

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CHỊU XOẮN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THANH COMPOSIT POLYME SỢI THỦY TINH

TORSIONAL BEHAVIOR OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER CONCRETE BEAMS

LÊ ĐĂNG DŨNG¹, NGUYỄN QUANG SĨ², NGUYỄN HUY CƯỜNG¹, NGUYỄN THÀNH TÂM³

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Khoa Công trình, Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông Vận tải

³Trung tâm khoa học công nghệ - Giao thông vận tải, Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: sing_ph@utc.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo trình bày nghiên cứu ứng xử chịu xoắn của dầm bê tông cốt thanh composit polyme sợi thủy tinh (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP). Các mẫu thí nghiệm được thay đổi tham số cốt đai. Các kết quả về hình dạng vết nứt, đường cong mô men xoắn – góc xoắn tỉ đối được trình bày, phân tích. Công thức giải tích dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành cho kết cấu bê tông cốt thép sẽ được sử dụng để tính toán sức kháng và so sánh với kết quả thực nghiệm. Qua đó, một số khuyến cáo về hàm lượng sẽ được xem xét đến trong nội dung của bài báo.

Từ khóa: Dầm chịu xoắn, cốt thanh composit polyme sợi thủy tinh.

Abstract: This paper presents research on the torsional behavior of Glass fiber reinforced polymer (GFRP) concrete beam. Specimens in this research have the same dimensions, material properties, and longitudinal bars. The stirrup in specimens was changed. The experimental results in terms of failure modes, torsional moment – twist curves of tested beams are presented and analyzed. The analytical formulation based on the current reinforced concrete codes shall be used to calculate the torsional strengths of the beams and to compare with test result. Then, some recommendations of the reinforcement ratio will be considered in the content of this paper.

Keywords: Beam under torsion, Glass fiber reinforced polymer (GFRP).

1. Đặt vấn đề

Kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) là dạng kết cấu phổ biến đối với các công trình xây dựng ở Việt Nam cũng như trên thế giới. Kết cấu BTCT có nhiều ưu điểm nổi bật như có khả năng chịu lực lớn, dễ thi công, giá thành không cao. Tuy nhiên, theo thời gian

sử dụng, các công trình BTCT có thể sẽ bị hư hỏng và phá hủy. Một trong những lý do chính gây hư hỏng và phá hủy kết cấu BTCT là hiện tượng gỉ cốt thép. Cốt thép bị gỉ sẽ gây nứt lớp bê tông bảo vệ đã bị xuống cấp, gây ra mất mát diện tích tiết diện bê tông, cốt thép, làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu xuống tới mức gây nguy hiểm, mất an toàn khi chịu tải trọng. Bên cạnh giải pháp chống ăn mòn cho cốt thép, một giải pháp mới có tính bền vững là sử dụng vật liệu cốt phi kim loại để thay thế cốt thép truyền thống. Trong số các loại vật liệu phi kim loại có thể làm cốt chịu lực cho bê tông thì cốt thanh composit polyme (Fiber-reinforced polymer bar, cốt thanh FRP) đang rất được quan tâm. Cốt thanh FRP được tạo nên bằng cách gắn kết các sợi (thủy tinh, aramid, các bon, bazan) bởi các chất nền là nhựa polyme. Cốt thanh FRP có ưu điểm rất lớn là cường độ chịu kéo cao hơn cốt thép truyền thống, trọng lượng rất nhẹ, không nhiễm từ và đặc biệt là không bị ăn mòn. Năm 2015, hệ thống Tiêu chuẩn Việt Nam đã bổ sung Tiêu chuẩn về cốt thanh composit polyme [1], [2]. Hiện nay, cốt thanh FRP sợi thủy tinh (Glass fiber reinforced polymer, GFRP) đã được sản xuất trong nước và đang được thúc đẩy để đưa vào thay thế cốt thép [3]. Mặc dù có nhiều ưu điểm, tuy nhiên, một nhược điểm lớn của thanh GFRP là mô đun đàn hồi nhỏ, vì vậy loại vật liệu này chưa được sử dụng rộng rãi. Ở Việt Nam, đã có một số nghiên cứu về việc sử dụng cốt thanh GFRP cho các dạng kết cấu chịu uốn, chịu cắt [4], [5], nhưng nghiên cứu về kết cấu bê tông cốt GFRP chịu xoắn thì chưa có. Trên thế giới, kết cấu bê tông có sử dụng cốt GFRP được nghiên cứu và ứng dụng là rất đa dạng [10], [11].

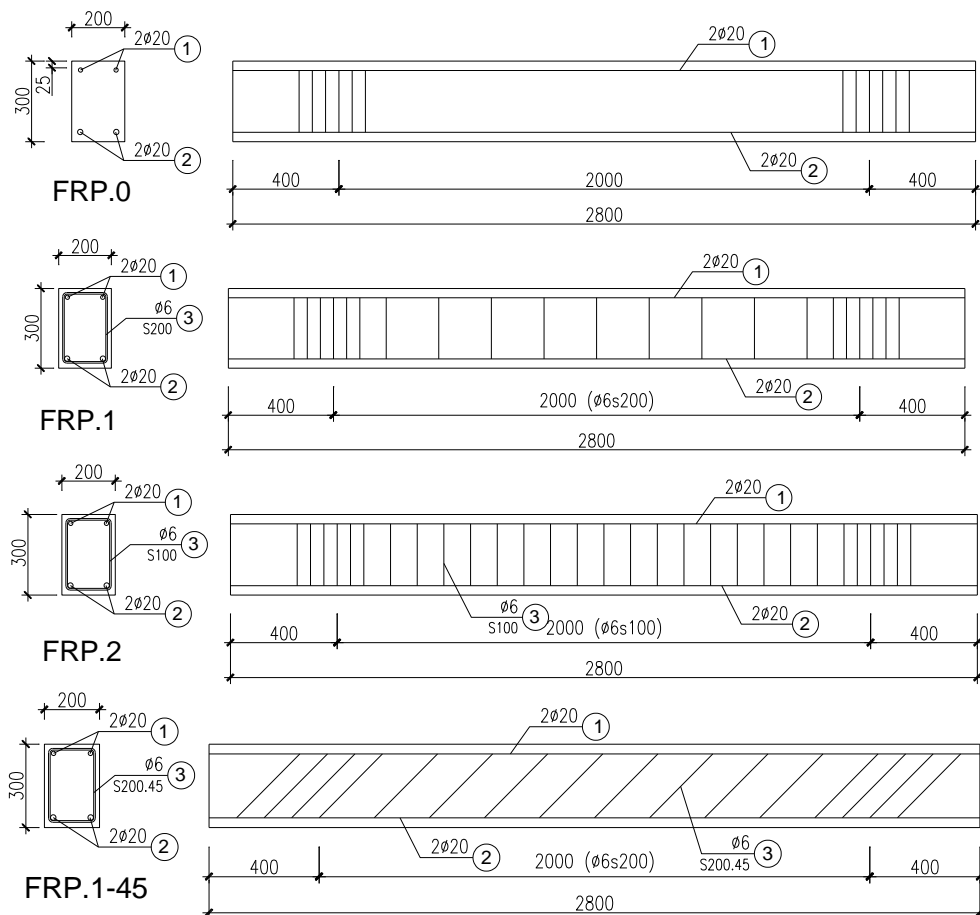
Kết cấu bê tông sử dụng cốt thanh FRP đã xuất hiện từ thập niên 80, cho đến nay, ở mức độ nghiên cứu và ứng dụng thì đây vẫn là một dạng kết cấu có ứng dụng vật liệu mới vì vậy vẫn đang được quan tâm nghiên cứu. Một số tiêu chuẩn thiết kế về loại kết cấu này như ACI 440.1R [8], CSA S806 [9]. Trong

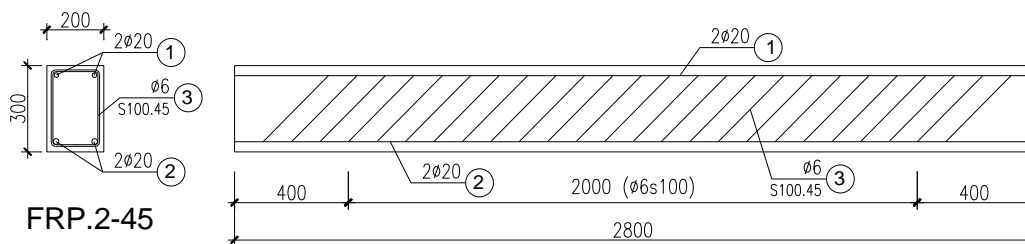
các tiêu chuẩn này, mô hình xác định sức kháng cắt, sức kháng uốn đã được đề xuất. Tuy nhiên, do việc áp dụng chưa rộng rãi, các dạng kết cấu hiện tại có sử dụng cốt GFRP không bị ảnh hưởng nhiều bởi mô men xoắn, do đó, sức kháng xoắn chưa được nhắc tới trong các tiêu chuẩn kể trên. Về yêu cầu cấu tạo và điều kiện giới hạn hàm lượng thì được dựa trên kết cấu bê tông cốt GFRP chịu cắt. Như vậy, việc có các nghiên cứu về kết cấu bê tông cốt GFRP chịu xoắn với hàm lượng cốt đai GFRP nhỏ sẽ góp phần cho sự hiểu biết thêm ứng xử của kết cấu bê tông cốt GFRP. Nội dung bài báo này sẽ thực hiện các thí nghiệm về kết cấu bê tông sử dụng cốt GFRP chịu xoắn thuần túy. Các kết quả thí nghiệm về mô men xoắn gây nứt, mô men xoắn tới hạn cũng như góc xoay sẽ được đo đạc, phân tích. Các kết quả này được so sánh với kết quả tính toán lý thuyết. Do chưa có tiêu chuẩn về tính toán sức kháng xoắn cho kết cấu bê tông cốt GFRP nên nội dung bài báo sẽ sử dụng công thức của tiêu chuẩn về cốt thép ACI 318 và các khuyến cáo về cốt GFRP để xác định sức kháng xoắn.

2. Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử chịu xoắn của dầm

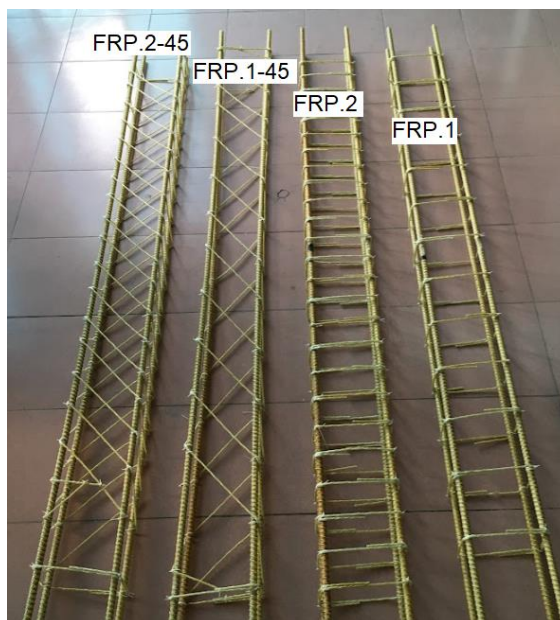
2.1 Mẫu thí nghiệm và sơ đồ thí nghiệm

Năm mẫu dầm có chiều dài 2,8m, mặt cắt ngang 200mm×300mm được chế tạo để khảo sát trong nghiên cứu. Vật liệu được sử dụng trong các mẫu thí nghiệm này gồm bê tông hạt mịn có cường độ chịu nén trung bình bằng 43,2 MPa, cốt thanh GFRP có mô đun đàn hồi 42,5 GPa và cường độ chịu kéo 800 MPa, xem Bảng 1. Các dầm có cùng kích thước thông số hình học và cốt dọc GFRP, thông số khác nhau giữa các dầm là cốt đai. Cốt đai được uốn định hình bằng gia công nhiệt từ trong nhà máy sản xuất. Bảng 2 thể hiện thông tin của các mẫu dầm trong nghiên cứu, cụ thể: mẫu FRP.0 không có cốt thép đai, mẫu FRP.1, FRP.2 có cốt đai là các thanh GFRP có đường kính 6 mm đặt cách nhau 200mm, 100mm. Các mẫu FRP.1-45 và LX.2-45 có cốt đai dạng xiên 45 độ so với trục dầm với khoảng cách giữa các nhánh cốt đai lần lượt là 200mm, 100mm. Hình 1 thể hiện cấu tạo của các mặt cắt mẫu thí nghiệm được sử dụng trong nghiên cứu dầm chịu xoắn. Hình 2 thể hiện cấu tạo cốt của các mẫu thí nghiệm.





Hình 1. Cấu tạo của các mặt cắt mẫu thí nghiệm



Hình 2. Cấu trúc cốt GFRP của các mẫu thí nghiệm

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu của thanh GFRP

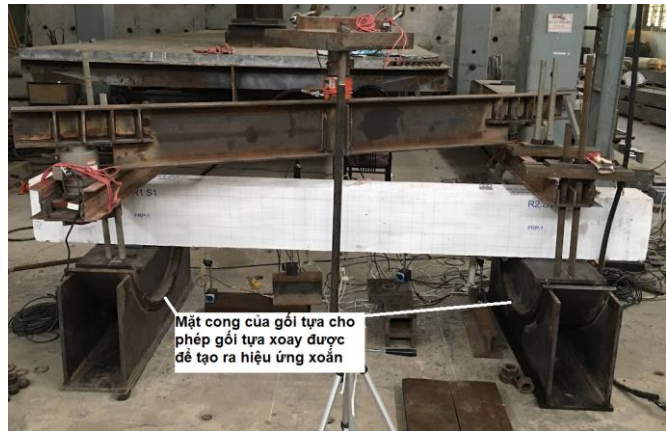
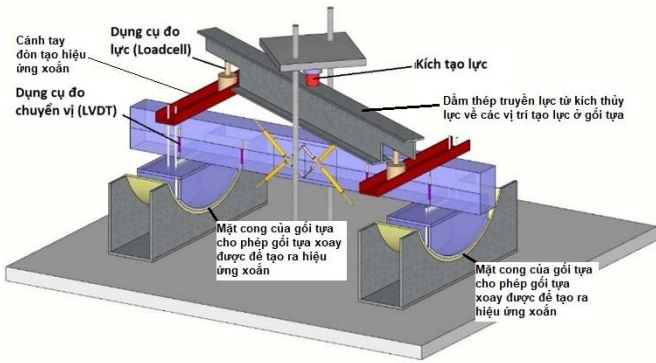
Vật liệu	Đường kính danh định của cốt GFRP	Mô đun đàn hồi E_F (GPa)	Cường độ tới hạn f_{tu} (MPa)	Diện tích mặt cắt ngang của cốt GFRP, mm^2
GFRP	$\phi 6$	42,5	810	19,62
	$\phi 20$		801,3	240,4

Bảng 2. Thông số của các mẫu dầm chịu xoắn

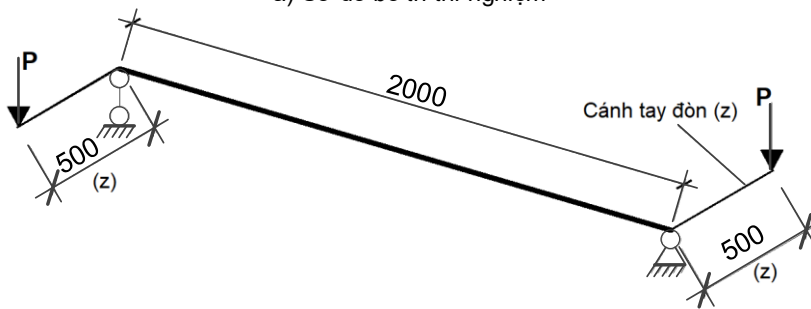
Tên mẫu	Kích thước mặt cắt, $b \times h$ (mm)	Cường độ chịu nén trung bình theo mẫu trụ của bê tông, f_{cm} (MPa)	Cốt GFRP dọc chịu kéo (mặt trên dầm/mặt dưới dầm)	Cốt FRP đai
FRP.0	200x300	44,9	$2\phi 20/2\phi 20$	Không có cốt đai
FRP.1	200x300	43,2	$2\phi 20/2\phi 20$	$\phi 6s200$
FRP.2	200x300	40,7	$2\phi 20/2\phi 20$	$\phi 6s100$
FRP.1-45	200x300	41,6	$2\phi 20/2\phi 20$	$\phi 6s200$ nghiêng 45°
FRP.2-45	200x300	45,4	$2\phi 20/2\phi 20$	$\phi 6s100$ nghiêng 45°

Hình 3 thể hiện sơ đồ bố trí thí nghiệm dầm chịu xoắn trong nghiên cứu này. Sơ đồ thí nghiệm được bố trí để chỉ tạo ra mô men xoắn trong dầm mà không gây ra mô men uốn và/hoặc lực cắt. Vì vậy các lực tác dụng (P) lên dầm thí nghiệm sẽ được đặt ở trong mặt phẳng có gối tựa và cánh tay đòn tạo mô men xoắn. Hiệu ứng xoắn dầm được tạo ra do các lực tác động đặt lệch tâm của mặt cắt và gây ra mô men xoắn ngược chiều ở các gối tựa. Để dầm có thể xoắn

được mà không bị kiểm chế bởi gối tựa thì gối tựa được cấu tạo có 2 bản thép cong, mặt cong của hai bản thép chỉ tiếp xúc và có khả năng chuyển vị tương đối so với nhau. Tại phần tiếp xúc của mặt cong, các bản thép được bôi mỡ để giảm tối đa lực ma sát khi hai bản thép chuyển vị trượt trên nhau. Tâm của mặt cong ở vị trí tiếp xúc trùng với tâm của mặt cắt ngang mẫu thí nghiệm. Lực tác dụng được kiểm soát bằng cách tạo chuyển vị thẳng đứng từ kích thủy lực.



a) Sơ đồ bố trí thí nghiệm



b) Sơ đồ tính

Hình 3. Sơ đồ bố trí thí nghiệm

2.2 Kết quả thí nghiệm

Hình 4 thể hiện hình ảnh của các mẫu thí nghiệm chịu xoắn khi bị hư hỏng. Xu hướng của vết nứt trên các mẫu có phần giống nhau. Các vết nứt nghiêng có ở trên cả 4 mặt của dầm. Về sự hình thành vết nứt, sau khi vết nứt đầu tiên hình thành ở một mặt của cấu kiện thì vết nứt đó nhanh chóng phát triển và nối dài sang các mặt khác của dầm. Ngoài vết nứt đầu tiên, trên các mẫu thí nghiệm còn có những vết nứt khác cũng tạo thành hình một vòng xoắn trên các mặt của dầm. Tuy nhiên, sự mở rộng vết nứt tập trung chủ yếu vào vết nứt đầu tiên. Ở cuối thí nghiệm, dầm FRP.0 và FRP.1, FRP.1-45 có ít vết nứt hơn so với dầm FRP.2 và FRP.2-45. Sự phá hoại của các mẫu thí nghiệm là do vết nứt đầu tiên mở rộng gây đứt cốt đai và một số vùng bê tông bị ép vỡ.

Hình 5 thể hiện hình ảnh cốt đai FRP bị đứt. Cốt đai bị đứt ở các vị trí có vết nứt nghiêng đi qua. Có hai phần trên cốt đai xảy ra hiện tượng đứt là điểm uốn ở góc cốt đai và điểm giữa cốt đai ở các vùng bụng dầm (thành dầm, mặt bên của dầm). Theo quan sát thí nghiệm thì vị trí ở các góc uốn cốt đai thường bị đứt trước, các vị trí cốt đai ở giữa thành dầm xảy ra đứt sau và khi độ mở rộng vết nứt đã rất lớn. Điều này là phù hợp với các nghiên cứu về cốt FRP bị uốn gia nhiệt, theo đó thì cường độ chịu kéo của vùng cốt

FRP bị uốn gia nhiệt chỉ nên lấy bằng khoảng 40% cường độ chịu kéo so với cốt FRP chưa bị uốn [12].

Hình 6 thể hiện biểu đồ quan hệ giữa góc xoắn tỉ đối với mô men xoắn của các mẫu trong thí nghiệm dầm chịu xoắn. Trong đó, giá trị mô men xoắn được tính bằng lực tác động (P) nhân với cánh tay đòn (z), xem Hình 3b. Góc xoắn tỉ đối được tính bằng tỷ lệ giữa góc xoay tương đối của hai mặt cắt đầu dầm (vị trí đặt LVDTs) với khoảng giữa các mặt cắt này. Bảng 3 thể hiện giá trị mô men xoắn gây nứt, mô men xoắn ngay sau nứt và mô men tới hạn (giá trị mô men xoắn lớn nhất đạt được sau khi nứt) của các mẫu trong thí nghiệm chịu xoắn. Theo biểu đồ ở Hình 5, các mẫu có độ cứng là như nhau trước khi vết nứt đầu tiên xuất hiện. Sau khi vết nứt đầu tiên xuất hiện thì các mẫu thí nghiệm đều bị suy giảm sức kháng xoắn đột ngột, giá trị suy giảm không giống nhau, phụ thuộc vào hàm lượng của cốt đai trong dầm. Dầm có hàm lượng cốt đai lớn sẽ bị suy giảm ít hơn dầm có hàm lượng cốt đai thấp. Dầm không có cốt đai FRP.0 bị suy giảm lớn nhất, xuống chỉ còn 4,8 kNm, tức là giảm 74,2% so với mô men gây nứt. Các dầm có cốt đai khoảng cách s200, FRP.1 và FRP.1-45, bị suy giảm 24 đến 33%. Các dầm có cốt đai khoảng cách s100, FRP.2 và FRP.2-45 bị suy giảm từ 9,5 đến 19%. Như vậy các dầm có hàm lượng cốt đai lớn hơn thì sự suy giảm nhỏ hơn, điều này cho thấy hàm lượng cốt đai ảnh hưởng lớn đến ứng xử chịu xoắn

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

của dầm cốt GFRP sau khi xuất hiện vết nứt. Theo quan sát thí nghiệm thì vết nứt đầu tiên của các dầm FRP.2 và FRP.2-45 là khá nhỏ, sau đó, việc tiếp tục tăng chuyển vị của kích tạo lực thì vết nứt nghiêng

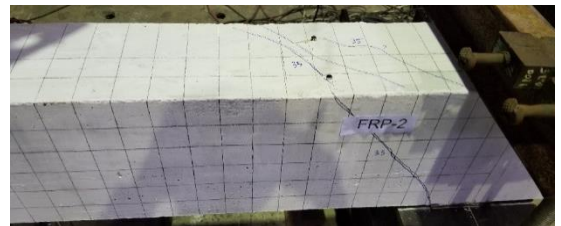
ban đầu mở rộng. Điều này là ngược lại với các mẫu có hàm lượng cốt đai nhỏ, như FRP.1 và FRP.1-45 khi vết nứt đầu tiên xuất hiện thì có độ mở rộng lớn và sự suy giảm sức kháng cũng có tính đột ngột hơn.



(a) FRP.0



(b) FRP.1



(c) FRP.2

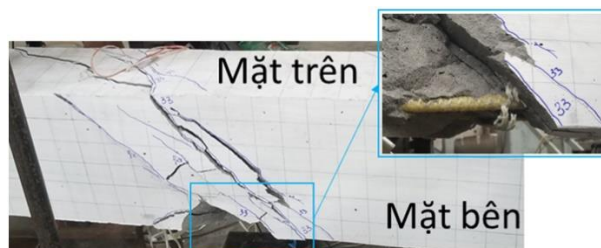


(d) FRP.1.45

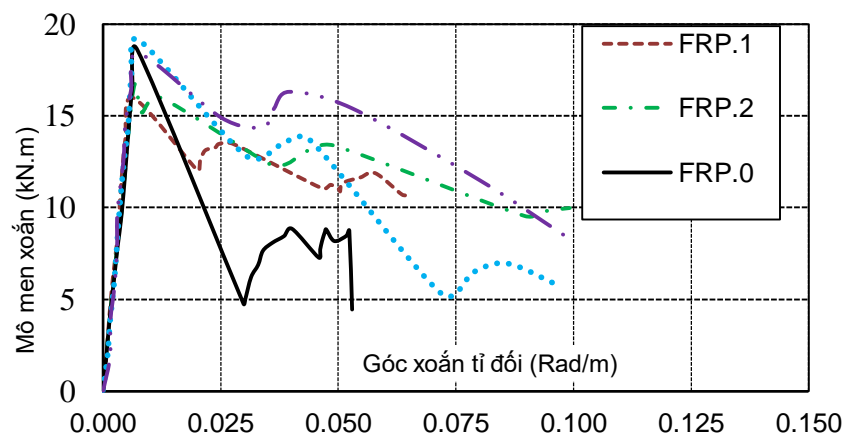


(d) FRP.2.45

Hình 4. Hình ảnh vết nứt trên các mẫu thí nghiệm



Hình 5. Hình ảnh cốt đai FRP bị đứt ở góc đai



Hình 6. Biểu đồ quan hệ giữa góc xoắn tỉ đối với mô men xoắn của các mẫu trong thí nghiệm

Bảng 3. Các giá trị mô men xoắn gây nứt, mô men xoắn sau nứt và mô men xoắn cực hạn theo kết quả thí nghiệm

Tên mẫu	Mô men xoắn gây nứt T_{cr} (kNm)	Mô men xoắn ngay sau nứt $T_{a,cr}$ (kNm)	Mô men xoắn cực hạn (sau nứt) $T_{u,exp}$ (kNm)	$\frac{T_{a,cr}}{T_{cr}}$ %	$\frac{T_{u,exp}}{T_{cr}}$ %
FRP.0	18,6	4,8	8,8	25,8	52,7
FRP.1	15,9	12,1	13,5	76,1	15,1
FRP.2	16,8	15,2	16	90,5	4,7
FRP.1-45	19,1	12,8	13,7	67	28,3
FRP.2-45	18,4	14,9	16,3	80,9	11,4

3. Phương pháp tính toán khả năng kháng xoắn của dầm cốt GFRP

3.1 Mô men gây nứt

Việc xác định khả năng chịu nứt được xác định bằng ứng suất kéo chính đạt đến cường độ chịu kéo của bê tông f_{cr} . Do sau khi nứt, lực kéo trong bê tông được truyền sang cốt dọc ở gần bề mặt, và do sự hạn chế của biến dạng trong bê tông nên mô men xoắn gây nứt trên cấu kiện có mặt cắt đặc cũng tương tự với cấu kiện có mặt cắt rỗng [6]. Với lập luận như vậy, góc xoắn và mô men xoắn gây nứt của mặt cắt được xác định theo các công thức sau:

Biến dạng xoắn (góc xoắn tỉ đối, góc xoắn trên một đơn vị chiều dài):

$$\theta = \frac{T\rho_0}{4A_b^2tG} \tag{1}$$

trong đó, θ, T là biến dạng xoắn và mô men gây xoắn. A_b, ρ_0 là diện tích và chu vi của hình bao bởi đường tâm của mặt cắt rỗng tương đương. t là chiều dày của mặt cắt rỗng tương đương, $t = 3A_{cp}/4\rho_{cp}$. G là mô đun kháng cắt của bê tông.

Mô men xoắn gây nứt cấu kiện bê tông:

$$T_{cr} = f_{cr} \frac{A_{cp}^2}{\rho_{cp}} \tag{2}$$

$$T_n = \min(T_{n,t,ACI}, T_{n,l,ACI}) = \min\left(\frac{2A_bA_t f_{ft}}{s} \cot \theta; \frac{2A_bA_l f_{fl}}{\rho_h} \tan \theta\right) \tag{5}$$

trong đó, A_l, A_t lần lượt là tổng diện tích cốt dọc và diện tích một nhánh cốt đai; $A_b = 0,85A_{0h}$, A_{0h} là diện tích bao bởi đường tâm cốt đai. f_{ft}, f_{fl} là cường độ của cốt đai và cốt dọc. s là khoảng cách giữa các nhánh cốt đai. ρ_h là chu vi mặt cắt nguyên của cấu kiện. θ là góc của vết nứt xiên do xoắn gây ra.

3.3 Hàm lượng cốt FRP tối thiểu

Theo Tiêu chuẩn ACI 440.1R thì hàm lượng cốt FRP tối thiểu được xác định theo:

$\rho_{fv,min} = \frac{0,35}{f_{fv}}$; trong đó f_{fv} là sức kháng kéo của cốt FRP cho kết cấu chịu cắt, xoắn. $f_{fv} = 0,004E_f$.

trong đó, T_{cr}, f_{cr} là mô men xoắn gây nứt và cường độ chịu kéo của bê tông. A_{cp}, ρ_{cp} là diện tích và chu vi của mặt cắt nguyên của cấu kiện.

3.2 Mô men xoắn cực hạn

Cho đến nay, sức kháng xoắn kết cấu bê tông có cốt GFRP chưa đề cập đến trong các Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu GFRP như ACI 440.1R, CSA S806. Nội dung của bài báo này sẽ sử dụng công thức tính toán sức kháng xoắn của dầm bê tông cốt thép theo Tiêu chuẩn ACI 318-19 [7] và các khuyến cáo về cốt GFRP để xác định sức kháng xoắn cực hạn của dầm cốt GFRP. Tiêu chuẩn ACI 318 đưa ra đề xuất cho sức kháng xoắn danh định của cấu kiện được giả thiết là chỉ do cốt thép đai và cốt thép dọc cung cấp. Phần đóng góp để chịu mô men xoắn của cả cốt thép đai và cốt thép dọc là như nhau [6].

Sức kháng xoắn tính theo cốt đai, $T_{n,t,ACI}$:

$$T_{n,t,ACI} = \frac{2A_bA_t f_{ft}}{s} \cot \theta \tag{3}$$

Sức kháng xoắn tính theo cốt dọc, $T_{n,l,ACI}$:

$$T_{n,l,ACI} = \frac{2A_bA_l f_{fl}}{\rho_h} \tan \theta \tag{4}$$

Sức kháng xoắn của mặt cắt:

Theo Tiêu chuẩn CSA S806 thì hàm lượng cốt FRP tối thiểu được xác định theo:

$$\rho_{fv,min} = \frac{0,7\sqrt{f'_c}}{0,4f_{fu}}; \text{ trong đó } f_{fu} \text{ là sức kháng kéo}$$

của cốt FRP.

4. So sánh kết quả thí nghiệm với kết quả lý thuyết

Bảng 4 thể hiện giá trị mô men xoắn gây nứt, T_{cr} , thu được từ thí nghiệm và mô men xoắn gây nứt theo tính toán. Mô men xoắn gây nứt thu được theo thí nghiệm lớn hơn từ 2,1 đến 2,5 lần giá trị theo lý thuyết. Tương tự, góc xoắn tỉ đối tại thời điểm nứt thu được từ thí nghiệm cũng lớn hơn góc xoắn tỉ đối tại thời điểm nứt theo lý thuyết, tỷ lệ nằm trong khoảng 1,7 đến 2,2 lần.

Bảng 4. Mô men xoắn gây nứt theo thí nghiệm và theo mô hình lý thuyết

Tên mẫu	Mô men xoắn gây nứt theo thí nghiệm $T_{cr,exp}$ (kNm)	Mô men xoắn gây nứt theo ACI 318-19 $T_{cr,ACI}$ (kNm)	Tỷ lệ $T_{cr,exp}/T_{cr,ACI}$	Góc xoắn tỉ đối tại thời điểm nứt theo thí nghiệm $\theta_{cr,exp}$ (Rad/m)	Góc xoắn tỉ đối tại thời điểm nứt theo lý thuyết $\theta_{cr,ACI}$ (Rad/m)	Tỷ lệ $\theta_{cr,exp}/\theta_{cr,ACI}$
FRP.0	18,6	8	2,3	0,0073	0,0034	2,1
FRP.1	15,9	7,6	2,1	0,0061	0,0031	2
FRP.2	16,8	7,6	2,2	0,007	0,0032	2,2
FRP.1-45	19,1	7,8	2,5	0,0061	0,0036	1,7
FRP.2-45	18,4	8	2,3	0,0059	0,0039	1,7

Bảng 5 thể hiện mô men xoắn cực hạn thu được từ thí nghiệm và theo tính toán lý thuyết. Trong đó, mô men xoắn cực hạn trong bài báo này được lấy là giá trị mô men xoắn lớn nhất đạt được sau khi kết cấu bị nứt. Có thể thấy, sức kháng xoắn của các mẫu thí nghiệm theo lý thuyết được quyết định bởi sức kháng của cốt đai. Giá trị của lý thuyết nhỏ hơn 4,3-10 lần so với giá trị thực nghiệm. Mức độ chênh lệch giữa kết quả tính toán theo lý thuyết với kết quả thực

thực nghiệm sẽ giảm đi khi hàm lượng cốt đai tăng lên. Nguyên nhân sự chênh lệch lớn giữa kết quả thí nghiệm và kết quả tính toán lý thuyết có thể là do việc Tiêu chuẩn thiết kế đã giới hạn cường độ tính toán của cốt GFRP chỉ bằng $f_{fv} = 0,004E_f$ tức bằng khoảng 170 Mpa. Trong khi đó, theo [12], khi cốt GFRP bị uốn gia nhiệt thì cường độ chịu kéo có thể lấy bằng khoảng 40% cường độ của cốt chưa bị uốn, $f_{fv} = 0,4f_{fu}$, tức bằng khoảng 320 MPa.

Bảng 5. Mô men xoắn cực hạn theo thí nghiệm và theo mô hình lý thuyết

Tên mẫu	Mô men xoắn cực hạn theo thí nghiệm $T_{u,exp}$ (kNm)	Mô men xoắn cực hạn theo lý thuyết do cốt đai $T_{n,t,ACI}$ (kNm)	Tỷ lệ $T_{u,exp}/T_{n,t,ACI}$	Mô men xoắn cực hạn theo lý thuyết do cốt dọc $T_{n,l,ACI}$ (kNm)	Tỷ lệ $T_{u,exp}/T_{n,l,ACI}$
FRP.0	8,8	-	-	10,2	0,8
FRP.1	13,5	1,35	10	10,2	1,4
FRP.2	16	2,69	5,6	10,2	2,7
FRP.1-45	13,7	1,9	7,2	10,2	1,9
FRP.2-45	16,3	3,8	4,3	10,2	3,8

Bảng 6 thể hiện hàm lượng cốt đai của các mẫu thí nghiệm và hàm lượng cốt đai tối thiểu theo tiêu chuẩn ACI 440.1R và Tiêu chuẩn CSA S806. Các mẫu FRP.1 và FRP.1-45 có hàm lượng nhỏ hơn so với yêu cầu của Tiêu chuẩn. Các mẫu FRP.2 có hàm lượng tương đương với Tiêu chuẩn ACI 440.1R. Mẫu FRP.2-45 có hàm lượng tương đương với quy định của tiêu chuẩn CSA S806. Mặc dù, các mẫu FRP.2 và FRP.2-45 có hàm lượng tương đương với Tiêu chuẩn quy định, tuy nhiên ứng xử của các mẫu này đều là dạng phá hoại giòn, tức là các mẫu đều mất sức kháng đột ngột và có sức kháng xoắn cực hạn,

$T_{u,exp}$, nhỏ hơn so với sức kháng xoắn gây nứt $T_{cr,exp}$. Như vậy, cần xem xét lại hàm lượng cốt đai GFRP tối thiểu cho kết cấu bê tông cốt GFRP chịu xoắn. Theo giới hạn trong nghiên cứu này, sự phá hủy của các mẫu xảy ra là do việc đứt cốt đai. Do đó, trong trường hợp để cấu kiện không mất sức kháng xoắn đột ngột sau khi xuất hiện vết nứt do xoắn, tức là sức kháng xoắn cực hạn theo lý thuyết do cốt đai bằng với sức kháng xoắn gây nứt, $T_{n,t,ACI} = T_{cr}$, thì hàm lượng cốt đai GFRP tối thiểu phải ở mức khoảng 0,65% theo tính toán với các mẫu thí nghiệm ở trong bài báo này.

Bảng 6. Hàm lượng cốt đai GFRP

Tên mẫu	Hàm lượng của mẫu $\rho_{v,exp}$ (%)	Hàm lượng tối thiểu theo ACI 440.1R, $\rho_{v,ACI}$ (%)	Hàm lượng tối thiểu theo CSA S806, $\rho_{v,CSA}$ (%)
FRP.0	-	-	-
FRP.1	0,1	0,21	0,28
FRP.2	0,2	0,21	0,27
FRP.1-45	0,14	0,21	0,26
FRP.2-45	0,28	0,21	0,27

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã thực hiện nghiên cứu trên 05 mẫu dầm chịu xoắn. Các dầm được khảo sát tham số về cốt đai, cụ thể dầm không có cốt đai, dầm có cốt đai bằng thanh GFRP với khoảng cách và góc nghiêng thay đổi, tức hàm lượng cốt đai thay đổi. Một số kết luận thu được dựa trên kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu này là:

Việc sử dụng cách xác định sức kháng xoắn theo Tiêu chuẩn ACI 318-19 của kết cấu bê tông cốt thép cho kết cấu bê tông cốt GFRP cho kết quả thiên về an toàn khá cao. Cụ thể, mô men gây nứt thu được từ thí nghiệm lớn hơn từ 2,1 đến 2,5 lần giá trị tính toán được theo Tiêu chuẩn. Sức kháng xoắn cực hạn thu được theo thí nghiệm lớn hơn từ 4,3 đến 10 lần giá trị theo tính toán sức kháng xoắn do cốt đai. Giá trị này nằm trong khoảng 1,4 đến 3,8 khi tính toán theo cốt dọc. Riêng đối với dầm không có cốt đai, FRP.0, sức kháng xoắn cực hạn tính theo lý thuyết cho cốt dọc lại lớn hơn 1,16 lần sức kháng xoắn cực hạn thu được theo thí nghiệm.

Mặc dù, các mẫu thí nghiệm có hàm lượng cốt đai GFRP tối thiểu tương đương với quy định của các tiêu chuẩn về kết cấu bê tông cốt FRP hiện hành như ACI 440.1R và CSA S806:12. Tuy nhiên, các mẫu thí nghiệm đều bị phá hoại giòn và sự phá hoại là do việc đứt cốt đai. Như vậy, hàm lượng cốt đai cho kết cấu bê tông cốt GFRP chịu xoắn thuần túy cần được xem xét lại để sức kháng xoắn của kết cấu bê tông cốt GFRP sau khi nứt không bị suy giảm đột ngột dẫn tới dạng phá hủy của kết cấu là dạng giòn.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu trân trọng cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo đã tài trợ cho nghiên cứu của đề tài mã số B2021-GHA-09.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 11109:2015 (2015), Cốt composite polyme, Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [2] TCVN 11110:2015 (2015), Cốt composite polyme dùng trong kết cấu bê tông và địa kỹ thuật, Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [3] Trần Hữu Hà (2014), "Công trình xây dựng tại Việt Nam: Ứng dụng cốt composite phi kim, Báo Xây dựng.
- [4] Nguyễn Hùng Phong (2014), Một số vấn đề về thiết kế cấu kiện chịu uốn bằng bê tông cốt thanh polyme cốt sợi thủy tinh, Tạp chí Xây dựng, số 8, Tr. 43-48.
- [5] Trần Cao Thanh Ngọc và cộng sự (2021), "Ứng xử cắt của dầm bê tông cốt GFRP", Tạp chí vật liệu và xây dựng, số 4, Tr. 33-36.
- [6] Ngô Đăng Quang (2015), Kết cấu bê tông, Nhà xuất bản Giao thông vận tải.
- [7] American Concrete Institute (ACI) (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [8] Canadian Standards Association (2012), Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers, Toronto, CSA.
- [9] American Concrete Institute (ACI) (2015). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-15). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- [10] Antonio Nanni (2014), Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, Taylor & Francis Group, New York.
- [11] Xiangke Guo and partners (2022), A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sand concrete environmental effects, Journal of Building Engineering, Volume 58, 105038.
- [12] Thanongsak Imjai, Maurizio Guadagnini and Kypros Pilakoutas (2017), Bend Strength of FRP Bars: Experimental investigation and bond modeling, Journal of Materials in Civil Engineering, 04017024-1-11.

Ngày nhận bài: 29/10/2022.

Ngày nhận bài sửa: 15/11/2022.

Ngày chấp nhận đăng: 18/11/2022.