



SHEAR BEHAVIOUR OF GFRP REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY TEXTILE REINFORCED CONCRETE

Tran Cao Thanh Ngoc^{1,2*}, Nguyen Xuan Huy³, Nguyen Nghia Binh⁴,
Pham Minh Hau⁵

¹Department of Civil Engineering, International University, Ho Chi Minh city, Vietnam

²Vietnam National University, Ho Chi Minh city, Vietnam

³University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

⁴LA Construction Joint Stock Company, Hochiminh, Vietnam

⁵Hoa Binh Construction Group, Hochiminh, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/07/2021

Revised: 20/09/2021

Accepted: 07/10/2021

Published online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.7>

* *Corresponding author*

Email: tctngoc@hcmiu.edu.vn; Tel: +84946464649

Abstract. GFRP reinforced concrete beams are more and more popular in the construction industry due to its non-corrosive behaviors. The needs for shear, flexural and axial strengthening of GFRP-reinforced concrete structures would come from the demands of the owner in altering the using functionality of the building. These demands could even happen during the construction stage. This paper presents the experimental study related to the use of textile reinforced concrete (TRC) in shear strengthening of GFRP reinforced concrete beams. Two identical GFRP reinforced concrete beams with an aspect ratio (a/d) of 1,7 and no stirrups are tested in this study. These are control and shear strengthened beams. The experimental results show that TRC is effective in enhancing the shear strengths of GFRP reinforced concrete beams. The experimental shear strengths of strengthened and control beams are compared with the existing equations from ACI 318-19 and debonding model. The analytical shear strengths show satisfactory results.

Keywords: GFRP reinforced concrete beam, shear strengthening, textile reinforced concrete, shear strength.



ỨNG XỬ CHỊU CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT GFRP ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT

Trần Cao Thanh Ngọc^{1,2*}, Nguyễn Xuân Huy³, Nguyễn Nghĩa Bình⁴,
Phạm Minh Hậu⁵

¹Bộ môn Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Quốc Tế, Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

⁴Công ty cổ phần tư vấn xây dựng vận tải L.A, Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁵Tập đoàn xây dựng Hòa Bình, Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 26/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 20/09/2021

Ngày chấp nhận đăng: 07/10/2021

Ngày xuất bản Online: 15/10/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.8.7>

* Tác giả liên hệ

Email: tctngoc@hcmiu.edu.vn; Tel: +84946464649

Tóm tắt. Dầm bê tông cốt GFRP được sử dụng ngày càng phổ biến trong thời gian gần đây do khả năng chống ăn mòn của cốt GFRP. Việc gia cường khả năng chịu tải của loại kết cấu này có thể phải được thực hiện ngay trong quá trình thi công của công trình do yêu cầu từ việc thay đổi công năng của kết cấu. Bài báo trình bày về kết quả thí nghiệm gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt GFRP được gia cường kháng cắt bằng bê tông cốt lưới dệt (TRC). Hai mẫu dầm bê tông cốt GFRP có tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu (a/d) là 1,7, không được bố trí cốt đai được thí nghiệm chịu cắt ba điểm. Trong hai mẫu này, một mẫu dầm không được gia cường phục vụ như mẫu đối chứng và mẫu còn lại được gia cường hai lớp bê tông cốt lưới dệt. Kết quả thí nghiệm cho thấy, bê tông cốt lưới dệt đem lại hiệu quả tốt trong việc gia cường khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt GFRP. Kết hợp từ tiêu chuẩn ACI 318-19 và mô hình bong tách từ nghiên cứu trước cho kết quả tương đối chính xác kết quả thực nghiệm cường độ kháng cắt cực đại của dầm bê tông cốt GFRP và dầm được gia cường bằng lưới dệt TRC.

Từ khóa: dầm bê tông cốt GFRP, gia cường cắt, bê tông cốt lưới dệt, khả năng kháng cắt.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dầm bê tông là một cấu kiện phổ biến trong công trình xây dựng. Việc nghiên cứu về dầm bê tông để có được một dầm ngày càng tối ưu như khả năng chống lại môi trường khắc nghiệt luôn đòi hỏi sự đầu tư, tìm tòi và nghiên cứu không ngừng. Một trong những loại cấu kiện dầm bê tông đang được khá nhiều nhà khoa học quan tâm hiện nay là dầm bê tông cốt GFRP, do có tuổi thọ cao trong những môi trường khắc nghiệt. Vai trò của thanh GFRP đã được cộng đồng nghiên cứu công nhận như là một trong những vật liệu thay thế cho thép trong kết cấu bê tông, đặc biệt là kết cấu dầm bê tông.

Cũng giống như các dầm bê tông cốt thép, các dầm bê tông cốt GFRP sau một thời gian đưa vào sử dụng và khai thác, dầm sẽ xuất hiện vết nứt với các vị trí và đặc thù khác nhau. Đặc biệt các vết nứt xiên do cắt xuất hiện khá nhiều tại vị trí gối làm giảm khả năng chịu tải của dầm. Ngoài ra do yêu cầu sử dụng, cần thay đổi công năng sử dụng của kết cấu, tải trọng vào dầm có thể thay đổi. Do đó việc sửa chữa, gia cường nhằm hồi phục và nâng cao khả năng chịu tải trọng của dầm bê tông cốt GFRP là điều cần thiết. Trong nhiều trường hợp, việc sửa chữa và gia cố kết cấu bê tông phải được thực hiện chỉ vài năm sau hoàn thành, đôi khi ngay sau đó.

Trên thế giới, để gia cố khả năng chịu tải cho các cấu kiện người ta đã sử dụng phương pháp gia cố bằng tấm Fiber-Reinforced Polymer (FRP). Liên kết giữa bê tông và tấm FRP thông qua chất kết dính. Chất kết dính được làm từ nhiều loại vật liệu khác nhau (epoxy, polyester, vinylester). Cường độ của tấm phụ thuộc rất nhiều vào quá trình thi công cũng như loại sợi. So với việc gia cố bê tông cốt thép truyền thống, FRP có những ưu điểm như: cường độ chịu kéo cao, chống ăn mòn, trọng lượng nhẹ, dễ thi công, tiết diện sau gia cường hầu như không thay đổi. Tuy nhiên bên cạnh ưu điểm thì FRP có một số nhược điểm: không chịu được nhiệt độ cao; chất lượng phụ thuộc nhiều vào quá trình thi công; không áp dụng cho trường hợp như: môi trường bị thấm thấu [1]. Trong thời gian gần đây khá nhiều nghiên cứu [2-18] tập trung sử dụng bê tông cốt lưới dệt (Textile Reinforced Concrete - TRC) để khắc phục các nhược điểm của gia cường kết cấu bằng tấm FRP.



Hình 1. Gia cường dầm bê tông cốt thép bằng bê tông cốt lưới dệt [12,13].

Kế thừa những ưu điểm và khắc phục nhược điểm của FRP, vật liệu bê tông cốt lưới dệt TRC ra đời. Vật liệu bê tông cốt lưới dệt thể hiện một sự phát triển tương đối mới trong lĩnh vực gia cố và sửa chữa kết cấu. Bê tông cốt lưới dệt là một loại vật liệu mới, cấu thành từ hai thành phần chính là lưới sợi dệt và bê tông hạt mịn. Lưới sợi dệt được làm từ những sợi nhỏ, có nguồn gốc từ cacbon hoặc thủy tinh, được dệt thành tấm lưới và đặt vào bê tông hạt mịn thay thế thép làm cốt. Thành phần chính thứ hai của TRC là hỗn hợp bê tông hạt mịn với kích thước cốt liệu thường nhỏ hơn 1 mm để đảm bảo dính bám tốt với lưới sợi dệt (Hình 1). TRC có thể được sử dụng rất hiệu quả để tăng cường, sửa chữa các kết cấu cũ, nhất là các kết cấu có yêu cầu cao về chống ăn mòn, hoặc sử dụng trong môi trường khắc nghiệt [2-12].

So với nghiên cứu về gia cường bằng tấm FRP, gia cường dầm bê tông cốt thép sử dụng TRC còn khá hạn chế. Một số nghiên cứu về việc sử dụng bê tông cốt sợi dệt để gia cường khả năng chịu tải trọng của dầm được thực hiện trên thế giới: Larbi *et al.* [2], Verbruggen *et al.* [3], Tetta *et al.* [4, 5, 6], Koutas *et al.* [7], Contanmine *et al.* [8], Brückner *et al.* [9] và Tetta *et al.* [10,11].

Trong những năm gần đây, bê tông cốt lưới dệt (TRC) đã bắt đầu được nghiên cứu và ứng dụng trong nước để sửa chữa và tăng cường khả năng chịu lực cho kết cấu bê tông cốt thép. Nguyễn *et al.* [13,14] đã thực hiện các nghiên cứu từ quy mô vật liệu đến kết cấu, trong đó, tập trung vào việc sử dụng TRC để tăng cường sức kháng uốn [13] và sức kháng cắt [14] cho dầm bê tông cốt thép. Ngô *et al.* [15] sử dụng TRC để gia cường sức kháng nén cho cột bê tông cốt thép. Nguyễn *et al.* [16] đã nghiên cứu phân tích sự phá hoại chọc thủng của bản bê tông cốt thép được gia cường bằng TRC. Năm 2018, TRC đã được sử dụng lần đầu tiên ở Việt Nam để sửa chữa và tăng cường cho kết cấu sàn bê tông cốt thép cho một công trình nhà xưởng công nghiệp tại Vĩnh Yên, Vĩnh Phúc [17]. Đối với mô phỏng ứng xử TRC bằng mô hình, Nguyễn *et al.* [18] đã nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt. Mô hình phần tử hữu hạn bằng phần mềm ABAQUS được sử dụng để mô phỏng sự làm việc chịu uốn của kết cấu, có xét đến đặc điểm làm việc phi tuyến của vật liệu cũng như hình học. Mô hình ứng xử dính bám giữa hai lớp vật liệu được sử dụng để mô tả chính xác sự làm việc cũng như cơ chế phá hoại của kết cấu dầm được tăng cường. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thí nghiệm với mục đích kiểm chứng sự chính xác của mô hình.

Các nghiên cứu như trình bày ở trên đều tập trung vào vấn đề gia cường khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt thép, hiện nay chưa một nghiên cứu nào được thực hiện đối với dầm bê tông cốt GFRP. Do đó cần nhiều hơn những nghiên cứu thực nghiệm cũng như lý thuyết tập trung vào vấn đề này để làm rõ ứng xử kháng cắt của loại kết cấu này. Bài báo trình bày về kết quả thí nghiệm gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt GFRP được gia cường kháng cắt bằng bê tông cốt lưới dệt (TRC). Hai mẫu dầm bê tông cốt GFRP có tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu (a/d) là 1,7, không được bố trí cốt đai được thí nghiệm chịu cắt ba điểm. Dầm được thí nghiệm là dầm ngắn với tỉ số (a/d) nhỏ hơn 2, theo tiêu chuẩn thiết kế ACI 318 [19], cốt đai không ảnh hưởng đến khả năng kháng cắt của loại dầm này. Do đó các mẫu dầm trong thí nghiệm này không được bố trí cốt đai. Trong hai mẫu này, một mẫu dầm không được gia cường phục vụ như mẫu đối chứng và mẫu còn lại được gia cường hai lớp bê tông cốt lưới dệt.

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Mẫu thí nghiệm và sơ đồ thí nghiệm



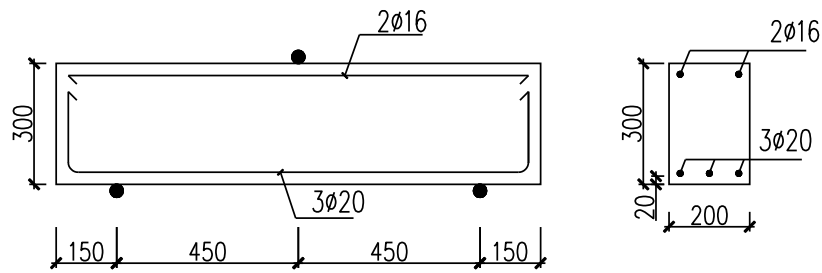
Hình 2. Mô hình thí nghiệm

Thí nghiệm theo kiểu uốn 3 điểm (hình 2) được thực hiện trên hai mẫu dầm. Thí nghiệm được thực hiện tại trường đại học Giao thông vận tải, Hà Nội. Dầm với 2 đầu là gối tựa đơn giản có tiết diện là $200\text{mm}\times 300\text{mm}$, 3 thanh GFRP đường kính danh nghĩa 20mm được sử dụng cho thanh dọc lớp dưới chịu uốn, cả hai mẫu đều không có cốt đai. Lực được tác dụng tại vị trí giữa dầm thông qua 1 kích thủy lực. Dụng cụ đo lực cũng được đặt tại vị trí này để thu thập khả năng chịu tải trọng của dầm trong suốt quá trình thí nghiệm. Nhịp chịu cắt của hai mẫu thí nghiệm là 450mm, tỉ số a/d của mẫu thí nghiệm là 1,7. Cảm biến đo chuyển vị (LVDT) được đặt tại vị trí giữa dầm để đo chuyển vị của dầm tương ứng với lực tác dụng vào dầm.

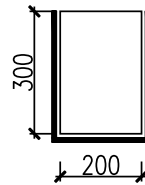
Dầm C-17.0 là dầm đối chứng, mẫu còn lại, TRC.2-1.7.0 sẽ được bố trí gia cường bằng hai lớp bê tông cốt lưới dệt TRC trên toàn bộ chiều dài dầm. Nghiên cứu này không nhằm khảo sát ảnh hưởng của số lớp TRC. Các nghiên cứu gia cường TRC cho dầm bê tông cốt thép cho thấy việc tăng số lớp TRC sẽ ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của dầm. Một số nghiên cứu cho dầm bê tông cốt thép cho thấy việc sử dụng hai lớp cho kết quả tối ưu nhất [11]. Do đó nghiên cứu này chọn hai lớp TRC để đánh giá hiệu quả của gia cường. Hình 3 và Bảng 1 tóm tắt kích thước cũng như phương pháp và số lớp gia cường của các mẫu thí nghiệm. Vị trí cảm biến điện trở đo biến dạng trong thanh GFRP được thể hiện ở hình 4.

Việc gia cường dầm được thực hiện khi bê tông đạt bảy ngày tuổi. Quá trình gia cường TRC cho dầm bê tông được thực hiện thông qua các bước như sau: chuẩn bị bề mặt (sử dụng máy mài để mài tạo nhám, khía rãnh, vo tròn góc tiết diện dầm với bán kính cong là 30mm); tưới ẩm bề mặt; trát lớp bê tông hạt mịn đầu tiên, dày 4 mm; đặt lưới sợi dệt vào, miết để lưới sợi chìm vào bê tông hạt mịn (tiếp tục thêm lớp bê tông hạt mịn và lưới sợi theo quy trình như trên); trát lớp bê tông hạt mịn cuối cùng, hoàn thiện bề mặt; bảo dưỡng chống bay hơi nước bằng lớp phủ.

Trong quá trình gia tải cho dầm thông qua kích thủy lực, các dữ liệu từ dụng cụ đo lực, cảm biến chuyển vị và cảm biến điện trở sẽ được thu thập. Vết nứt cũng được quan sát trong quá trình gia tải. Nếu vết nứt xuất hiện, quá trình gia tải sẽ tạm dừng để vẽ vết nứt được hình thành và tải trọng tại thời điểm vết nứt xuất hiện. Quá trình gia tải sẽ kết thúc khi tải trọng trong dầm giảm.

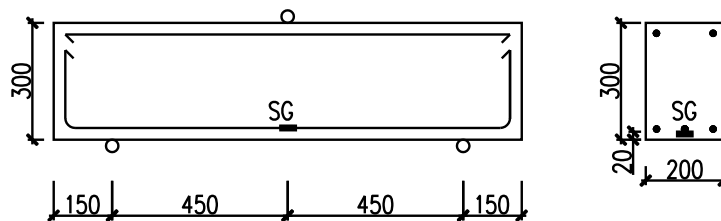


(a) Mẫu đối chứng C-1.7.0 (mm).



(b) Gia cường U-wrapping 2 lớp TRC, TRC.2-1.7.0 (mm).

Hình 3. Mẫu thí nghiệm.



Hình 4. Vị trí cảm biến điện trở đo biến dạng trong thanh GFRP (mm).

2.2. Vật liệu

Cường độ vật liệu bê tông của các mẫu tại ngày thí nghiệm được báo cáo trong Bảng 1. Bảng 2 trình bày các đặc trưng vật liệu của thanh GFRP thông qua thí nghiệm vật liệu dùng trong mẫu thí nghiệm.

Bảng 1 Tóm tắt kích thước các mẫu thí nghiệm

Mẫu	f'_c (MPa)	a (mm)	b (mm)	a/d	Thép đọc	Thép đai	Gia cường	V_u (kN)	V_n (kN)
C-1.7.0	35,6	450	300	1,70	3φ20	Không	Đối chứng	143,6	72,3
TRC.2- 1.7.0	35,3	450	330	1,70	3φ20	Không	2 lớp TRC	-	-

Trong đó f'_c là cường độ chịu nén của bê tông tại ngày thí nghiệm mẫu dầm, a là nhịp chịu cắt của dầm, b là chiều rộng của dầm, d là chiều cao hữu hiệu của dầm, V_u là lực cắt cực đại tính theo mô men kháng uốn của dầm và V_n là khả năng kháng cắt của dầm.

Bảng 2 Đặc trưng vật liệu của thanh GFRP

GFRP	Loại	E_F (GPa)	f_{tu} (MPa)	$A_{f,bar}$ (mm ²)
	φ 16	48,4	1041,3	165,0
φ 20	49,6	1025,8	240,4	

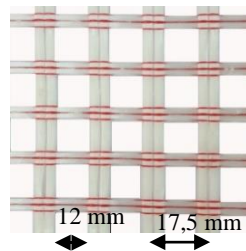
Trong đó E_F là mô đun đàn hồi của thanh GFRP, f_{fu} là khả năng chịu kéo cực đại của thanh GFRP và $A_{f,bar}$ là diện tích tiết diện của thanh GFRP.

Bảng 3 và hình 5 mô tả đặc trưng vật liệu thông qua thí nghiệm vật liệu của cốt lưới sợi trong bê tông cốt lưới sợi sử dụng để gia cường khả năng kháng cắt của dầm bê tông.

Bảng 3 Các đặc trưng của vật liệu của bê tông cốt lưới dệt

	Loại	E_F (GPa)	f_{fu} (MPa)	A_{roving} (mm ² /m)	Trọng lượng (g/cm ³)	Cường độ chịu nén (MPa)
Lưới dệt	SITgrid200KE	125,0	1890	105,67	2,68	-
Xi măng	PC40	-	-	-	-	52,2

Trong đó E_F là mô đun đàn hồi của lưới dệt, f_{fu} là khả năng chịu kéo cực đại của lưới dệt và A_{roving} là diện tích của lưới dệt tính theo mét dài.

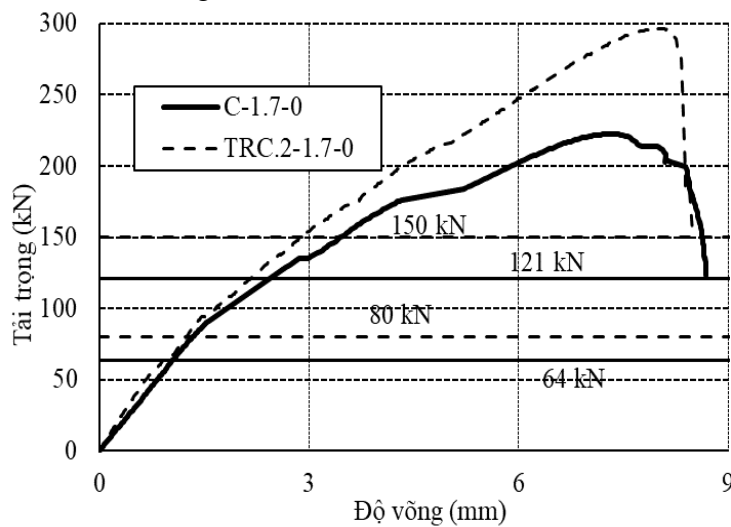


Hình 5. Hình ảnh cốt lưới dệt SITgrid200KE sử dụng trong gia cường.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Quan hệ tải trọng – độ võng

Hình 6 thể hiện quan hệ giữa tải trọng và độ võng tại giữa dầm của các mẫu thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu quả của lớp gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt. Khả năng kháng cắt của mẫu được gia cường cao hơn mẫu đối chứng. Mẫu đối chứng có khả năng kháng cắt là 222,5 kN, trong khi đó mẫu gia cường đạt được khả năng kháng cắt là 296,6kN tăng 33,3% so với mẫu đối chứng.



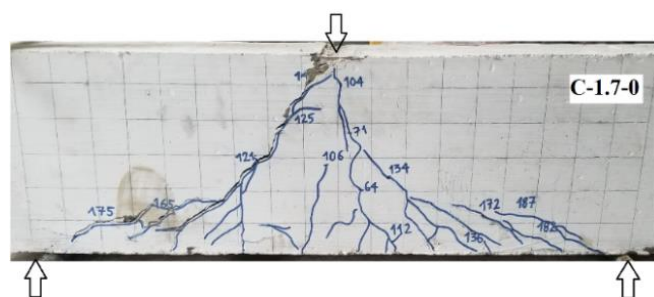
Hình 6. Quan hệ tải trọng - độ võng của các mẫu thí nghiệm.

Dựa vào mối quan hệ tải trọng và độ võng, có thể thấy độ cứng của mẫu được gia cường kháng cắt cũng được cải thiện so với mẫu đối chứng. Độ cứng của hai mẫu tại tải trọng 70% tải trọng phá hoại lần lượt là 43,3 kN/mm cho mẫu không gia cường và 45,1 kN/mm cho mẫu gia cường. Tuy nhiên độ võng tại tải trọng phá hoại của hai mẫu là tương đương nhau.

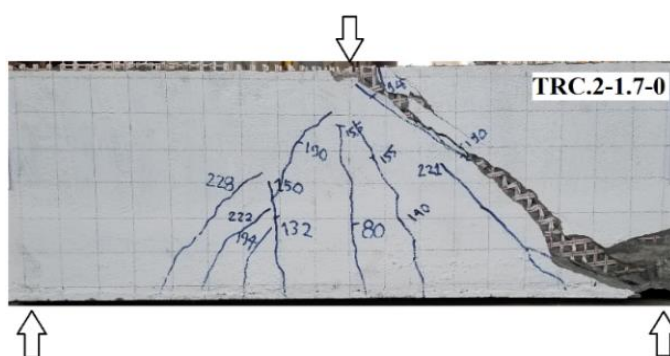
3.2. Hình thái phá hoại

Hình 7 thể hiện hình ảnh phá hoại của hai mẫu dầm thí nghiệm. Cả hai mẫu dầm đều bị phá hoại cắt đặc trưng của dầm có nhịp nhỏ với tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu nhỏ hơn 2. Thanh chống xiên bê tông từ điểm đặt lực đến gối bị phá hoại nén vỡ trong cả hai mẫu thí nghiệm. So với mẫu không gia cường, mẫu có gia cường có góc xiên của thanh chống nhỏ hơn, việc bố trí lớp gia cường đã giúp phân bố lại nội lực của dầm. Dầm được gia cường sẽ truyền lực thông qua cả hai cơ cấu: cơ cấu thanh chống và cơ cấu chống giằng thay vì một cơ cấu truyền lực thông qua thanh chống như mẫu không gia cường.

Vết nứt do mô men xuất hiện trong mẫu đối chứng khi tải trọng đạt 64 kN, trong khi mẫu gia cường vết nứt này xuất hiện khi tải trọng đạt 80 kN. Vết nứt xiên xuất hiện trong mẫu đối chứng khi tải trọng đạt 121 kN. Vết nứt tương tự xuất hiện ở mẫu gia cường khi tải trọng đạt 150 kN.



(a) Mẫu đối chứng



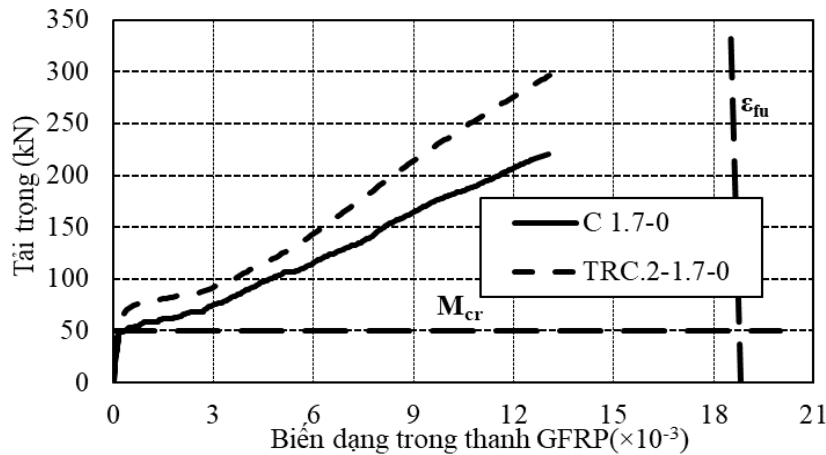
(b) Mẫu gia cường

Hình 7. Hình ảnh phá hoại mẫu dầm thí nghiệm.

3.3. Biến dạng của thanh GFRP

Hình 8 thể hiện mối quan hệ giữa tải trọng và biến dạng trong thanh dọc GFRP. Khi tải trọng nhỏ hơn mô men nứt, biến dạng trong thanh GFRP hầu như rất nhỏ. Biến dạng trong thanh GFRP trong cả hai mẫu thí nghiệm tăng nhanh khi vết nứt xuất hiện. Trong cả hai mẫu thí nghiệm, biến dạng trong thanh GFRP vẫn nhỏ hơn biến dạng phá hoại của thanh GFRP.

Điều này chứng tỏ phá hoại trong mẫu thí nghiệm không phải do phá hoại trong thanh GFRP. Kết quả này khá phù hợp với hình thái phá hoại quan sát được ở mục 3.2. So sánh giữa hai mẫu thí nghiệm, tại cùng mức tải trọng mẫu không gia cường có biến dạng trong thanh dọc GFRP cao hơn mẫu gia cường. Điều này có thể giải thích do một phần lực dọc được truyền qua lớp gia cường ở mặt dưới của dầm. Mặc dù dầm được gia cường kháng cắt, nhưng do phương pháp U-wrapping được sử dụng nên lớp gia cường ở mặt dưới của dầm vẫn đóng góp vào khả năng chống mô men của dầm.



Hình 8. Biến dạng trong thanh GFRP thu được từ cảm biến điện trở.

4. KHẢ NĂNG KHÁNG CẮT CỦA MẪU DẦM THÍ NGHIỆM

Hiện nay chưa một tiêu chuẩn thiết kế nào đề cập đến khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt GFRP gia cường bằng TRC. Khả năng kháng cắt này được đóng góp bởi bê tông, cốt đai và lớp gia cường TRC. Trong phần này các công thức trong các tiêu chuẩn hiện hành sẽ được kết hợp với các đề xuất trong các nghiên cứu trước để khảo sát khả năng kháng cắt của các mẫu dầm thí nghiệm. Đối với khả năng kháng cắt đóng góp bởi bê tông, tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] sẽ được sử dụng. Đóng góp của lớp gia cường TRC vào khả năng kháng cắt của dầm sẽ được tính toán thông qua mô hình bong tách của Chen và Teng [20].

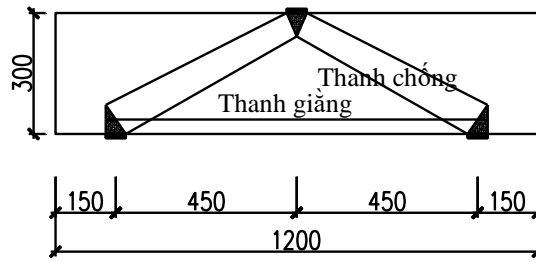
4.1. Khả năng kháng cắt của dầm bê tông cốt GFRP thông qua tiêu chuẩn ACI 318-19 [18]

Cho dầm nhịp ngắn với tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu (a/d) nhỏ hơn 2, thanh chống xiên sẽ hình thành từ điểm đặt lực đến gối như hình 9. Tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] kiến nghị sử dụng khả năng chịu nén hữu hiệu của bê tông được sử dụng để tính khả năng chịu lực của thanh chống như sau:

$$f_{cu} = \nu f'_c \quad (1)$$

Trong đó hệ số $\nu = 0,85\beta_s$.

Tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] sử dụng hệ số giảm khả năng chịu nén của bê tông β_s từ 0,4 đến 1,0, tùy thuộc vào loại thanh nén và chi tiết thép. Hệ số này sẽ được sử dụng trong phần này để tính khả năng chịu tải của dầm bê tông trong thí nghiệm với tỉ số a/d nhỏ hơn 2.



Hình 9. Thanh chống xiên cho dầm bê tông nhịp ngắn (mm)

4.2. Khả năng kháng cắt của lớp bê tông cốt lưới dệt TRC thông qua mô hình bong tách của Chen và Teng [20]

Cho trường hợp lớp gia cường theo phương 90° độ, khả năng kháng cắt của lớp bê tông cốt lưới dệt TRC:

$$V_F = \frac{2nt_f w_f f_{fe} d_{fv}}{s_f \tan \theta} \quad (2)$$

Trong đó n là số lớp, t_f là độ dày của lớp lưới dệt TRC, w_f là độ rộng của các tấm, s_f is khoảng cách giữa các tấm ; và d_{fv} , f_{fe} là chiều cao hữu hiệu, θ là góc nghiêng vết nứt (được giả sử bằng góc nghiêng của thanh chống trong hình 9) và ứng suất trong tấm lưới dệt. Trong đó, f_{fe} được tính như sau:

$$f_{fe} = \min(0.004E_F, f_{fed}) \quad (3)$$

Theo mô hình bong tách của Chen và Teng [19]

$$f_{fed} = D_f f_{fed,max} \quad (4)$$

Trong đó :

$$D_f = \begin{cases} 1 - \frac{\pi-2}{\pi\lambda} & , \lambda > 1 \\ \frac{2}{\pi\lambda} \left(\frac{1-\cos(\frac{\pi\lambda}{2})}{\sin(\frac{\pi\lambda}{2})} \right) & , \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_e} \quad (6)$$

Trong đó L_{max} được tính bằng d_{fv} , E_F là mô đun đàn hồi của lớp gia cường.

$$L_e = \sqrt{\frac{E_F t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (7)$$

$$f_{fed,max} = 0.427 \beta_f \beta_l \sqrt{\frac{E_F \sqrt{f'_c}}{t_f}} \quad (8)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2-w_f/(s_f \sin \beta)}{1+w_f/(s_f \sin \beta)}} \quad (9)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1 & , \lambda \geq 1 \\ \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) & , \lambda < 1 \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó β là phương của lớp gia cường.

Bảng 4 So sánh khả năng kháng cắt giữa thực nghiệm và tiêu chuẩn thiết kế

Mẫu	P_{exp} (kN)	P_{strut} (kN)	P_{TRC} (kN)	P_{Ana} (kN)	P_{Ana}/P_{Exp}
C-1.7.0	222,5	246,6	-	246,6	1,11
TRC.2-1.7.0	296,6	246,6	100,8	347,4	1,17

Trong đó P_{exp} là lực tác dụng lớn nhất thu thập từ thí nghiệm, P_{strut} là khả năng chịu tải của dầm thông qua cơ cấu thanh chống, P_{TRC} là khả năng chịu tải của dầm thông qua lớp gia cường TRC và P_{Ana} là tổng khả năng chịu tải của dầm thông qua mô hình tính toán.

Đối với mẫu dầm không gia cường C-1.7.0, kết quả dự đoán sử dụng mô hình thanh chống từ tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] cho kết quả cao hơn thí nghiệm. Như đã biết tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] là dành cho kết cấu bê tông cốt thép, trong khi mẫu thí nghiệm là dầm bê tông cốt GFRP. So với thanh GFRP mô đun đàn hồi của thép là lớn hơn nhiều. Điều này dẫn đến biến dạng trong thanh giằng GFRP là lớn hơn nhiều so với thanh giằng là thép. Chính biến dạng lớn hơn này làm giảm khả năng chịu tải của thanh chống trong mô hình. Điều này giải thích kết quả dự đoán cao hơn kết quả thực nghiệm.

Kết quả so sánh như bảng 4 cho thấy, việc kết hợp từ tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] và mô hình bong tách của Chen và Teng [20] cho kết quả tương đối chính xác kết quả thực nghiệm cường độ kháng cắt cực đại của dầm bê tông cốt GFRP và dầm được gia cường bằng lưới dệt TRC.

5. KẾT LUẬN

Như đã biết kết cấu bê tông cốt GFRP ngày càng được quan tâm sử dụng do tuổi thọ cao của vật liệu FRP và khả năng chịu tải trong những môi trường khắc nghiệt như môi trường ven biển. Việc ngày càng nhiều kết cấu bê tông cốt GFRP được sử dụng dẫn đến ngày càng nhiều nhu cầu gia cường loại kết cấu này do nhiều lý do khác nhau. Do đó, việc nghiên cứu ứng xử của dầm bê tông cốt GFRP có gia cường kháng cắt bằng bê tông cốt lưới dệt TRC là vô cùng cần thiết và cấp bách.

Kết quả thí nghiệm trong nghiên cứu này bước đầu cho thấy hiệu quả của việc sử dụng bê tông cốt lưới dệt TRC trong việc tăng cường khả năng kháng cắt cho dầm bê tông cốt GFRP. Mẫu đối chứng có khả năng kháng cắt là 222,5 kN, trong khi đó mẫu gia cường đạt được khả năng kháng cắt là 296,6kN tăng 33,3% so với mẫu đối chứng.

Cả hai mẫu dầm đều bị phá hoại cắt đặc trưng của dầm có nhịp nhỏ với tỉ số nhịp chia cho chiều cao hữu hiệu nhỏ hơn 2. Thanh chống xiên bê tông từ điểm đặt lực đến gối bị phá hoại nén vỡ trong cả 2 mẫu thí nghiệm.

Kết hợp từ tiêu chuẩn ACI 318-19 [19] và mô hình bong tách của Chen và Teng [20] cho kết quả tương đối chính xác kết quả thực nghiệm cường độ kháng cắt cực đại của dầm bê tông cốt GFRP và dầm được gia cường bằng lưới dệt TRC.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2019.304.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. ACI 549.4R, Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures, Farmington Hills, MI, 2020.
- [2]. A. S. Larbi, R. Contamine, E. Ferrier, P. Hamelin, Shear strengthening of RC beams with textile reinforced concrete (TRC) plate. *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 1928-1936. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.008>.
- [3]. S. Verbruggen, O. Remy, J. Wastiels, T. Tysmans, Stay-in-place formwork of TRC designed as shear reinforcement for concrete beams, *Advances in Materials Science and Engineering* (2013).
- [4]. Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, *Compos. Part B: Eng.*, 77 (2015) 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.055>.
- [5]. Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Shear strengthening of concrete members with textile-reinforced mortar (TRM): Effect of shear span-to-depth ratio, material and amount of external reinforcement, *Compos. Part B*, 137 (2018) 184–201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.041>
- [6]. Z. C. Tetta, T. C. Triantafillou, D. A. Bournas, On the design of shear-strengthened RC members through the use of textile reinforced mortar overlays, *Compos. Part B*, 147 (2018) 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.008>
- [7]. L. N. Koutas, Z. C. Tetta, D. A. Bournas, T. C. Triantafillou, Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-art review, *Journal of Composites for Construction*, 23 (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882)
- [8]. R. Contamine, A. Si Larbi, P. Hamelin, Identifying the contributing mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) in the case of shear repairing damaged and reinforced concrete beams, *Eng. Struct.*, 46 (2013) 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.024>
- [9]. A. Brückner, R. Ortlepp, M. Curbach., Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC), *Mater. Struct.*, 41 (2008) 407–418. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9254-9>
- [10]. Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, *Compos. Part B: Eng.*, 95 (2016) 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.076>
- [11]. Z. C. Tetta, L. N. Koutas, D. A. Bournas, Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, *Compos. Part B: Eng.*, 77 (2015) 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023>
- [12]. C. T. N. Tran, X. H. Nguyen, H. C. Nguyen, D. D. Le, Shear performance of short-span FRP-reinforced concrete beams strengthened with CFRP and TRC, *Engineering Structures*, 242 (2021) 112548. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112548>
- [13]. N. H. Cường et al., Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon, *Tap chí Kết cấu và công nghệ xây dựng*, 23 (2016).
- [14]. N. H. Cường et al., Phân tích thực nghiệm đánh giá ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon, *Tap chí Khoa học Giao thông vận tải*, 56 (2017) 20-25.

- [15].N. Đ. Quang, N. H. Cường, N. D. Tiến, Nghiên cứu thực nghiệm và tính toán cột bê tông cốt thép chịu nén đúng tâm được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt các bon, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71 (2020) 486-499. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.3>
- [16].X. H. Nguyễn, T.N. Nguyễn, Phân tích sự phá hoại chọc thủng của bản bê tông cốt thép được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, 69 (2019).
- [17].V. H. Vũ, Đ. Q. Ngô, H. C. Nguyễn, Giải pháp sửa chữa, tăng cường sàn panel lắp ghép bằng bê tông cốt lưới dệt, Tạp chí Xây dựng, 8 (2018) 101-104.
- [18].H. C. Nguyễn, V.H. Vũ, D.D. Lê, Nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt.” Tạp chí Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, 48 (2015) 70.
- [19].American Concrete Institute (ACI), Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-19, Farmington Hills, MI, 2019.
- [20].J.F. Chen, J.G. Teng, Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding, Construct Build Mater, 17 (2003) 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00091-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00091-0)