

GIẢI PHÁP LAI GIA CƯỜNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI SỢI DỆT NHẪM NÂNG CAO KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP

TS. LÊ NGUYỄN KHƯƠNG, ThS. **CAO MINH QUYỀN**

Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

PGS. TS. NGUYỄN XUÂN HUY

Đại học Giao thông Vận tải

GS. SI LARBI AMIR

Viện nghiên cứu LTDS-ENISE Pháp

Tóm tắt: Trong khoảng 30 năm qua, vật liệu composite Fiber-Reinforced Polymer (FRP) với đặc tính cơ học tốt, dễ thi công, được phát triển và sử dụng nhiều trong việc sửa chữa và gia cường các kết cấu bê tông cốt thép. Tuy nhiên, một số hạn chế của FRP như giá thành cao, dễ bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, bong tách lớp kết dính và không phù hợp với sự phát triển bền vững, đó là các lý do chính khiến vật liệu FRP dần được thay thế bởi loại vật liệu thân thiện hơn là bê tông cốt lưới sợi dệt (Textile Reinforced Concrete - TRC). Mục tiêu của nghiên cứu này là phân tích ứng xử và đánh giá sự hiệu quả của vật liệu TRC ở hai mức độ là thí nghiệm vật liệu và kết cấu. Kết quả đạt được đã chứng minh được hiệu quả của giải pháp lai gia cường vật liệu cốt lưới sợi dệt trong việc gia cường dầm bê tông cốt thép.

Từ khóa: TRC, FRP, bê tông cốt thép, giải pháp lai gia cường.

Abstract: Over the last thirty years, Fiber-Reinforced Polymer (FRP) composite material with their good mechanical performance as well as the easy implementation, which is developed and used for repairing and strengthening reinforced concrete structures. However, FRP also have a number of limitations, for example their very high price, their incompatibility with sustainable development, this makes FRP material to be replaced by an environment friendly material, such as Textile Reinforced Concrete (TRC). The objectives of this study are to analyze the behavior and the effect of TRC-strengthened on material and structural design. The results demonstrate the effectiveness of the TRC and hybrid strengthening method for RC beams.

Keyword: TRC, FRP, reinforced concrete, hybrid strengthening solution.

1. Giới thiệu

Trong nhiều thập kỷ vừa qua, cùng với sự phát triển chung của khoa học, nhiều loại vật liệu mới đã được nghiên cứu và chế tạo nhằm thỏa mãn các yêu cầu về sử dụng, chịu lực, độ bền và hiệu quả kinh tế trong đó có bê tông cốt lưới sợi dệt (Textile-Reinforced Concrete - TRC). Những nghiên cứu chính liên quan đã tập trung vào đặc tính cơ học, chứng minh cơ chế làm việc chung và sự truyền ứng suất giữa lưới dệt và chất kết dính [1], [2]. Một vài nghiên cứu đã kiểm tra tính phù hợp của TRC trong các kết cấu thực tế [3], [4], [5] và nghiên cứu chi tiết hơn về khả năng gia cường cho cấu kiện chịu uốn của TRC [6], [7].

Bài báo này miêu tả và khai thác kết quả thí nghiệm dựa trên 5 dầm dài 2m với mục đích nghiên cứu và đánh giá tính khả thi về công nghệ thi công cùng một số đặc tính cơ học của giải pháp sử dụng TRC. Năm dầm thí nghiệm được chia thành 2 nhóm mẫu thí nghiệm, trong đó nhóm mẫu thí nghiệm đầu tiên được thực hiện trên 2 dầm nguyên vẹn (không bị nứt) tương ứng với việc thi công trực tiếp lớp TRC trên bề mặt chịu kéo của dầm với mục tiêu chính là kiểm soát sự làm việc của dầm ở trạng thái xuất hiện vết nứt. Nhóm mẫu thí nghiệm thứ hai tập trung vào 3 dầm đã bị hư hại (làm việc đến trạng thái giới hạn chảy của các thanh thép dọc), các dầm này được gia cường bằng các tấm CFRP hoặc TRC liên hợp với các thanh bằng sợi carbon hoặc thủy tinh và dán lên lớp chất nền được sử dụng làm chất kết dính với bề mặt kết cấu chịu kéo với mục tiêu nâng cao khả năng chịu lực giới hạn của kết cấu.

2. Miêu tả thí nghiệm

2.1 Tính chất của vật liệu gia cường

Vật liệu bê tông cốt lưới sợi dệt (TRC). Vừa gia cường nhãn hiệu Emaco R315 do công ty BASF

BÊ TÔNG - VẬT LIỆU XÂY DỰNG

sản xuất được sử dụng cho các thí nghiệm này. Vải dệt gia cường là một lưới sợi dệt (đơn dọc). Mật lưới hình chữ nhật và “mở”, kích thước ô lưới 3x5mm. Các sợi dọc (hướng tải) là thủy tinh AR (cho cường độ và độ bền) và sợi ngang là vải polyester (vải nhân tạo để may quần áo). Bảng 1

thể hiện đầy đủ các đặc tính của thủy tinh AR. Nhằm tối ưu hóa khả năng của TRC, một lớp phủ ngoài được thiết kế để tạo điều kiện thuận lợi cho việc xâm tán của các sợi vải trước khi vữa được thêm vào. Phương pháp gia cường sử dụng TRC là phương pháp đặt ướt (wet lay up method).

Bảng 1. Đặc tính kĩ thuật của thủy tinh AR

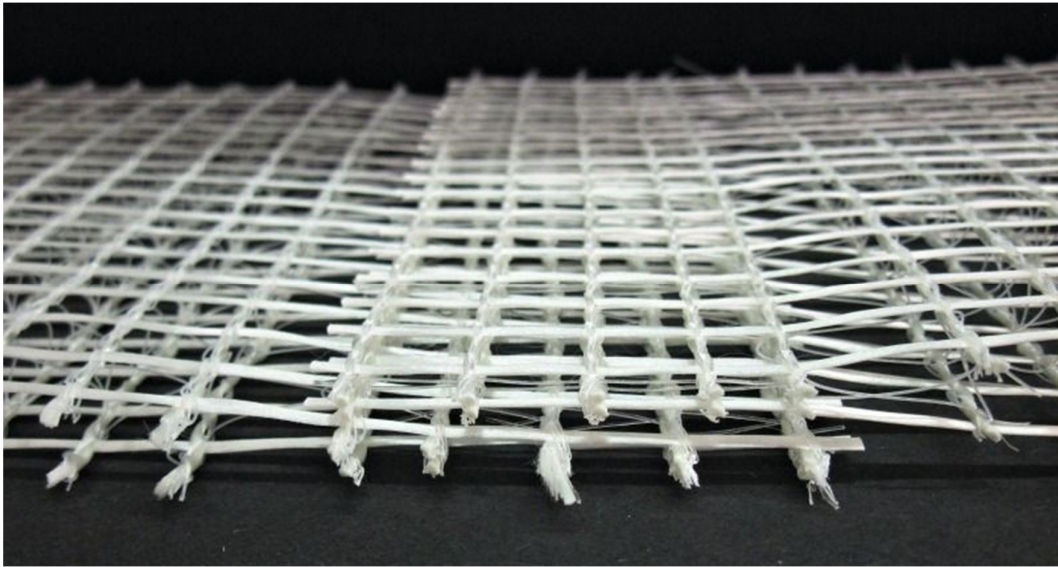
	Số lượng sợi cơ bản trong 1 bó sợi	Độ mịn bó sợi (tex)	Đường kính sợi cơ bản (µm)	Chiều dài bó sợi (mm)
Thủy tinh AR	1600	25000	700	1102

Với giải pháp gia cường thông thường, TRC bao gồm 3 lớp vải dệt kháng kiềm được nhúng trong vữa. Trong khi với giải pháp lai gia cường, 2 lớp vải dệt kháng kiềm được sử dụng cùng với các thanh các bon (TRC+JC) hoặc kết hợp giữa các

bon và thủy tinh (TRC+JVC) đặt vuông góc với phương chịu lực chính của lưới sợi. Các thanh được xử lý (quét bề mặt bằng silica) để tăng độ nhám bề mặt của chúng. Bảng 2 thể hiện đặc trưng cơ học và hình học của các thanh.

Bảng 2. Đặc tính kĩ thuật của các thanh

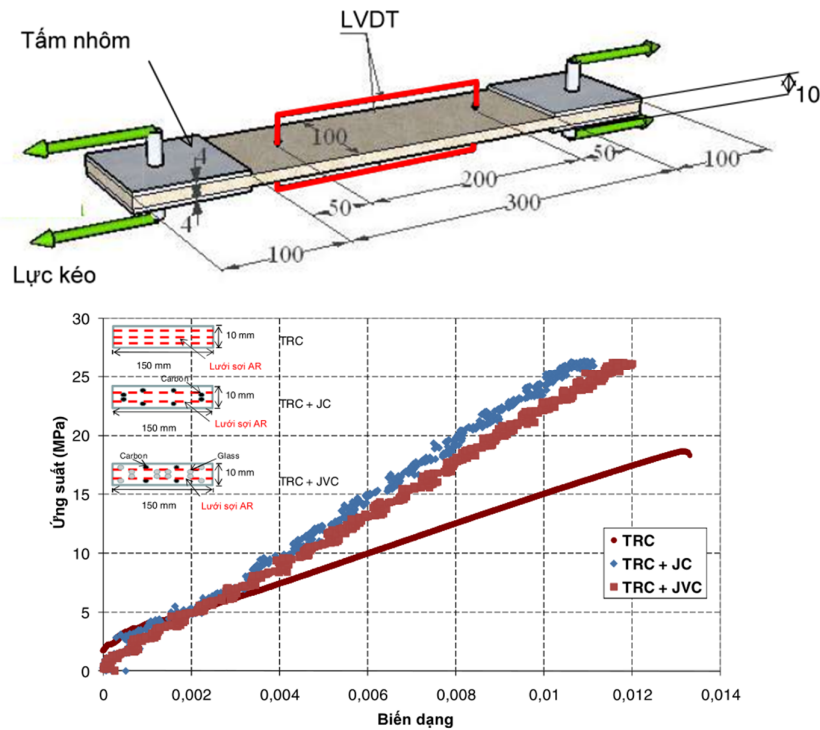
	Đường kính (mm)	E (MPa)	Cường độ chịu kéo (MPa)
Thanh thủy tinh	2	25000	700
Thanh các bon	2	140000	2240



Hình 1. Ví dụ lớp lưới sợi dệt đơn cùng các thanh thủy tinh

Lớp lưới sợi dệt đơn cùng các thanh thủy tinh hoặc thanh carbon có hình dạng như trong ví dụ thể hiện trên hình 1. Tính ổn định của TRC và các giải

pháp lai được xác định theo phương án thí nghiệm kéo trực tiếp của Contamine và các đồng nghiệp [8] (hình 2).

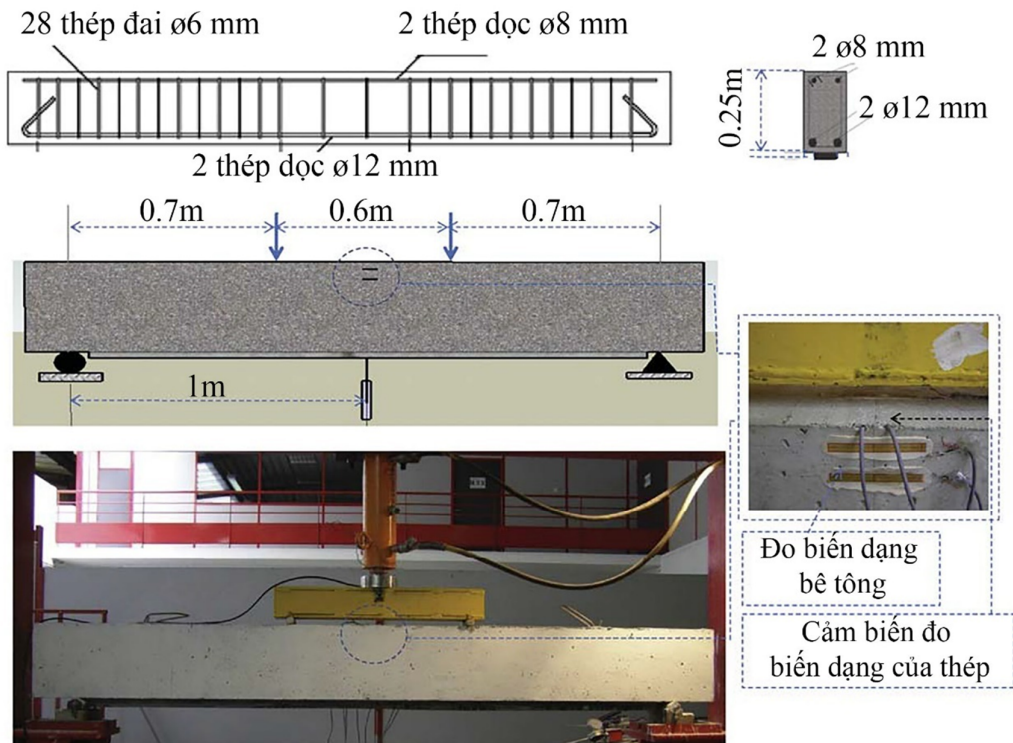


Hình 2. Mẫu thí nghiệm kéo (hình học, thiết bị đo, tải trọng) quy luật ứng xử

CFRP. Các đặc tính chính của tấm dán gia cường bằng carbon (CFRP) là chiều dày: 0.4 mm; cường độ chịu kéo: 700 MPa; Mô đun đàn hồi: 80000 MPa.

Thép và bê tông. Thép loại E500. Bê tông được sử dụng là loại bê tông trộn sẵn, điều này hạn chế sự chênh lệch giữa các lô khác nhau. Cường độ bê tông tại 28 ngày là 30 MPa.

2.2 Mô tả mẫu thí nghiệm



Hình 3. Đặc trưng hình học của các dầm

BÊ TÔNG - VẬT LIỆU XÂY DỰNG

Định nghĩa mẫu thí nghiệm. Dầm có tổng chiều dài 2.3 m với khoảng cách 2 gối tựa là 2 m. Để đánh giá khả năng của cốt thép, 3 dầm bê tông cốt thép được gia tải trước khi được gia cường bằng CFRP,

TRC + JC và TRC + JVC. Các tấm gia cường có chiều dài 1.95 m và được cắt đi để đi qua giữa các gối tựa trong quá trình thí nghiệm. Bảng 3 tóm tắt các giải pháp được sử dụng cho nghiên cứu này.

Bảng 3. Định nghĩa các mẫu thí nghiệm

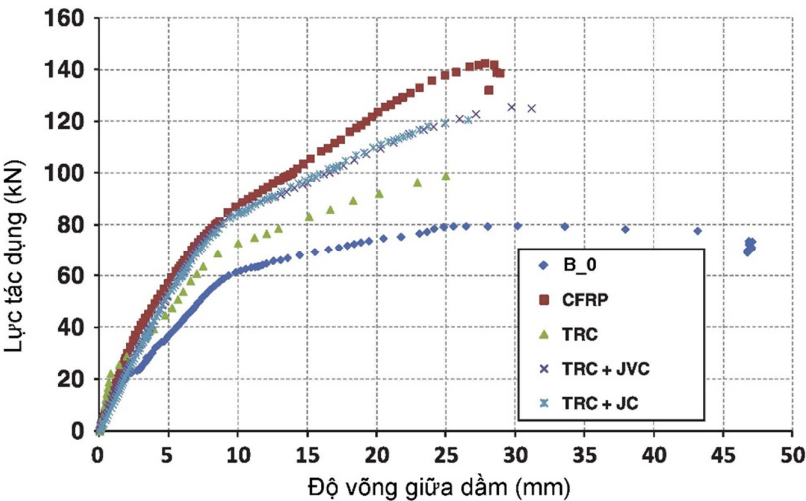
Tên dầm và ký hiệu	Vật liệu gia cường	Độ cứng dọc trục EA (MN)	Ghi chú	Kích thước vật liệu gia cường
Dầm 1 (B_0)	Không gia cường	-	Chưa bị hư hại	-
Dầm 2 (TRC)	TRC (3 lưới thủy tinh AR)	1.8		10 x 150 (mm)
Dầm 3 (CFRP)	CFRP	4.8	Đã bị hư hại	0.4 x 150 (mm)
Dầm 4 (TRC+JC)	TRC (2 lưới thủy tinh AR) + 2 thanh các bon JC	3.5		10 x 150 (mm) + 8 ϕ 2 (các bon)
Dầm 5 (TRC + JVC)	TRC (2 lưới thủy tinh AR) + (JVC) thanh thủy tinh kết hợp các bon	3.3		10 x 150 (mm) + 4ϕ2 (các bon) + 12ϕ2 (thủy tinh)

Thiết bị đo. Vật liệu gia cường lai (TRC + JC; TRC + JVC) và CFRP được đặt tại mặt dưới của dầm (đã hư hại). Các mẫu thử được kiểm tra tải uốn tại 4 điểm. Khoảng cách giữa các gối tựa là 2 m. Một tải trọng tĩnh được đặt cách nhau 60 cm cho đến khi mẫu thử phá hoại. Để đo chuyển vị thay đổi

liên tục, một LVDT với chu trình đo ± 100 được đặt ở chính giữa dầm.

2.3 Kết quả thí nghiệm

Đường cong tải trọng - độ võng (hình 4) cho thấy sự khác nhau về khả năng giữa các dầm ban đầu không bị hư hại và các dầm bị hư hại và được gia cường.



Hình 4. Đường cong tải trọng - chuyển vị

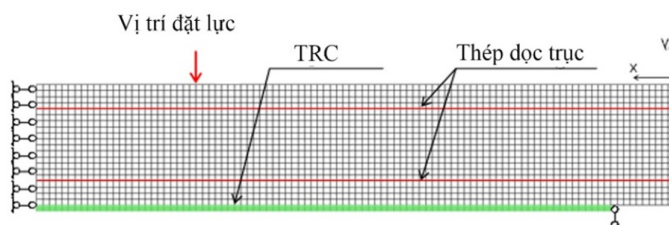
Trong trường hợp dầm không bị hư hại trước, đường cong tải trọng - chuyển vị có 3 pha: pha đầu tiên ở trạng thái đàn hồi, thể hiện sự nguyên vẹn của dầm, trong đó không có vật liệu của dầm nào bị hư hại; pha thứ 2 là sự lan truyền vết nứt và sự nhân rộng của chúng dọc theo chiều dài dầm; pha cuối cùng là sự chảy của thép. Khi dầm được gia cường bởi TRC hay CFRP, khả năng chịu tải của dầm được cải thiện rõ rệt khi lực tới hạn của dầm tham chiếu (không gia cường) và các dầm gia

cường bằng TRC, TRC+JC, TRC+JVC và CFRP lần lượt là 78kN, 98.58kN, 121.4kN, 125.88kN và 143.63kN. Chúng ta thấy giải pháp lai kết hợp TRC với các thanh carbon và/hoặc thủy tinh được đặt hợp lý giúp cho khả năng chịu lực của dầm được tăng lên đáng kể, 23% và 27% tương ứng với TRC+JC và TRC+JVC. Ứng xử của các dầm gia cường bằng phương pháp lai là tương quan với giải pháp gia cường bằng CFRP mặc dù khả năng chịu tải trọng giới hạn có thấp hơn.

3. Mô hình hóa

Các mô hình PTHH sử dụng phần tử hai chiều được thiết lập bằng phần mềm mã nguồn mở Cast3M [9] để mô phỏng ứng xử chịu uốn của năm dầm bê tông cốt thép đã đề cập tới ở trên. Do tính chất đối

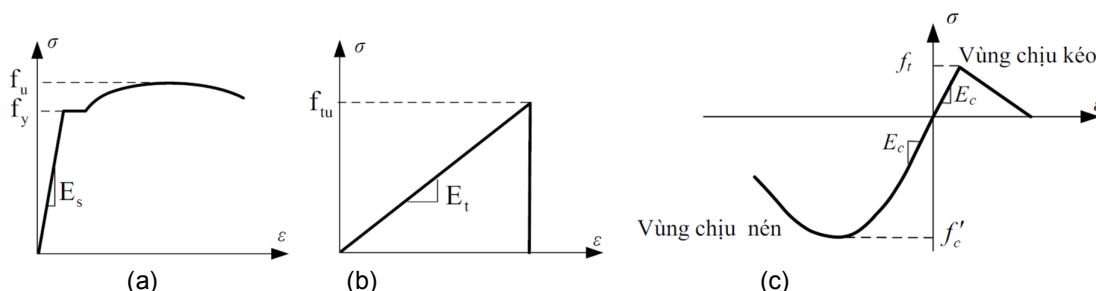
xứng về kết cấu và tải trọng nên chỉ một nửa dầm được mô phỏng, thể hiện ở hình 5. Các mô hình mô phỏng này không chỉ đánh giá được khả năng chịu lực của kết cấu mà còn cho phép phân tích ứng xử chịu uốn và cơ chế phá hoại của dầm được gia cường.



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn (1/2 dầm) dầm gia cường bằng TRC

Trong nghiên cứu này, phần tử QUA4, dạng phần tử hai chiều có 4 nút tuyến tính, được gán cho các phần tử bê tông thường và bê tông hạt mịn của TRC. Các thanh cốt thép và lưới sợi dệt có thể được mô hình hóa bằng mô hình phần tử thanh SEG2. Mô hình đàn hồi dẻo được sử dụng để mô phỏng tính chất vật liệu của cốt thép, các đặc trưng cơ bản của mô hình bao gồm mô đun đàn hồi, cường độ kéo chảy, cường độ cực hạn của cốt thép, các biến dạng tương ứng với mỗi trạng thái tới hạn của vật liệu. Lưới sợi dệt là loại vật liệu có tính chất đàn hồi - giòn. Ứng suất kéo tăng gần như tuyến tính, sau khi đạt ứng suất kéo cực đại, lưới sợi dệt bị phá hoại ngay lập tức. Mô hình cốt thép ACIER_UNI do Menegotto và Pinto [10] đề xuất được sử dụng để mô phỏng cốt thép và TRC. Mô hình bê tông INSA dạng dải đường nứt trung bình "smeared fixed crack" do Viện Khoa học ứng dụng

INSA de Lyon phát triển và ứng dụng [11], [12] được dùng để mô phỏng ứng xử phi tuyến của bê tông thường và bê tông hạt mịn. Các tham số đầu vào quan trọng của mô hình là độ cứng ban đầu E_0 , cường độ chịu nén f_c , cường độ chịu kéo f_t , biến dạng nứt khi chịu kéo ε_{tm} và biến dạng nứt khi chịu nén ε_{rupt} . Các biến dạng nứt khi chịu kéo và chịu nén được tính toán dựa trên năng lượng phá hủy G_f , đồng thời có xét tới sự ảnh hưởng của kích thước phần tử. Sự thay đổi các giá trị biến dạng này theo kích thước phần tử giúp cho năng lượng phá hủy tổng thể của đơn vị thể tích vật liệu là không đổi, đảm bảo tính sát thực của mô hình [13]. Các tham số đầu vào định nghĩa ứng xử của bê tông thường, bê tông hạt mịn, cốt thép, lưới sợi được tổng hợp bằng 4 và bảng 5. Dạng đường quan hệ ứng suất-biến dạng của thép, TRC và bê tông theo phương chịu lực chính được thể hiện trên hình 6



Hình 6. Dạng đường quan hệ ứng suất-biến dạng của (a) thép, (b) TRC và (c) bê tông

Bảng 4. Tham số đầu vào của mô hình bê tông

	Định nghĩa	Bê tông thường	TRC
E_0	Độ cứng (module Young)	28.E3 MPa	23.E3 MPa
f_c	Cường độ chịu nén	32 MPa	29 MPa
f_t	Cường độ chịu kéo	1.6 MPa	1.6 MPa
ε_{tm}	Biến dạng nứt theo phương kéo	5.E-03	4.E-03
ε_{rupt}	Biến dạng nứt theo phương nén	1.51E-2	1.3E-2

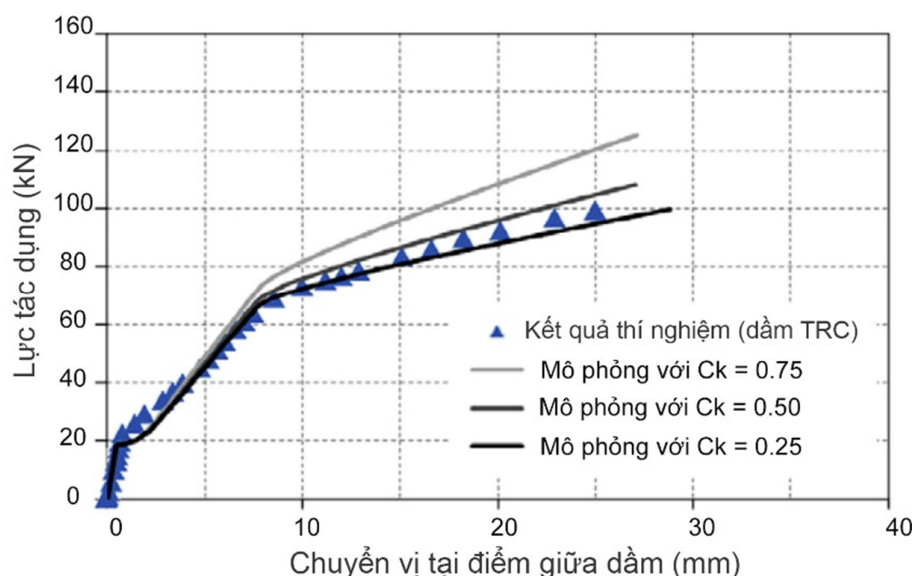
Bảng 5. Tham số đầu vào của mô hình thép

	E (GPa)	σ_{sy} (MPa)	ϵ_y	ϵ_{sh}	σ_{su} (MPa)	ϵ_{su}
Thép	210	500	2.38E-3	3.5E-3	550	0.05
TRC (AR)	70	1000	0.016	0.025	1102	0.05

Lưới sợi được mô hình bằng các phần tử thanh dọc theo chiều dài của dầm (hình 5). Diện tích phần tử thanh được tính bằng diện tích tương đương của lưới vải dệt theo phương chịu lực chính.

Khi xét tới ứng xử phi tuyến của kết cấu, cường độ chịu lực của dầm ở trạng thái trước khi phá hủy không chỉ phụ thuộc vào năng lượng nứt của bê tông mà còn phụ thuộc rất nhiều vào sự tham gia chịu lực của cốt thép và lưới sợi gia cường. Trong mô hình đang xét, các phần tử làm việc với nhau thông qua biến dạng nứt. Trong mô phỏng, liên kết giữa các phần tử bê tông và

cốt thép, lưới sợi là hoàn hảo, không xét tới ứng xử trượt, tuột của cốt thép trong bê tông. Trên thực tế, thép và cốt lưới sợi không làm việc hết 100% công suất do nhiều nguyên nhân trong đó tính kết dính thực tế đóng vai trò quan trọng. Hệ số làm việc hiệu quả của cốt lưới sợi vì thế cần được nghiên cứu và xét tới trong các kết quả thí nghiệm trước khi đưa vào mô hình hóa [8], [12], [14]. Trong nghiên cứu này, hệ số làm việc hiệu quả C_k của cốt lưới sợi được xét tới. Hệ số này trong mô phỏng được nhân với cường độ chịu lực kéo của lưới sợi.

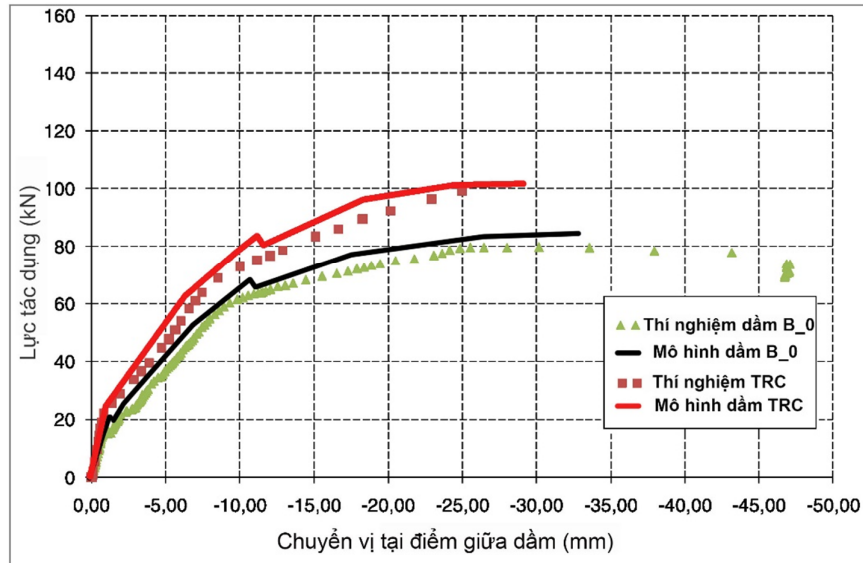


Hình 7. Ảnh hưởng của hệ số kết dính giữa lưới sợi và bê tông hạt mịn trong mô phỏng dầm TRC

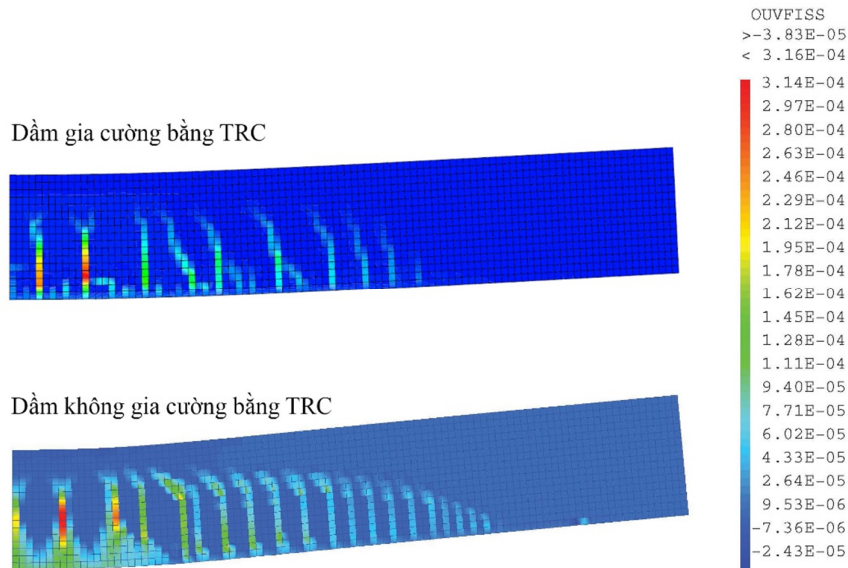
Hình 7 là kết quả thí nghiệm và mô hình dầm gia cường bằng TRC theo 3 giá trị của C_k . Chúng ta dễ dàng nhận thấy $C_k = 0.25$ cho kết quả gần sát với thí nghiệm nhất. Điều này phù hợp với các quan điểm và công bố của *Si Larbi và các đồng nghiệp* [14].

Đường cong lực - chuyển vị giữa dầm (hình 8) cho thấy sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm của cả dầm không gia cường B_0 và

dầm gia cường bằng TRC. Có thể thấy, ở các thời điểm bê tông bị nứt, cốt thép chảy và thời điểm phá hoại, giá trị tải trọng giữa mô phỏng và thực nghiệm xấp xỉ bằng nhau, chuyển vị của các đường cong thực nghiệm và mô phỏng cũng khá phù hợp với nhau. Sự khác biệt giữa kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm được giải thích do các giả thuyết về liên kết tuyệt đối giữa bê tông - cốt thép và sự đồng nhất của vật liệu TRC trong mô hình phần tử hữu hạn.



Hình 8. So sánh kết quả mô hình và kết quả thí nghiệm hai dầm không gia cường và gia cường bằng TRC



Hình 9. Vùng vết nứt xuất hiện trong mô hình tại chuyển vị 30mm

Vùng nứt thể hiện trên kết quả mô hình hóa tại thời điểm độ võng giữa dầm là 30mm (hình 9). Đây là dạng nứt phân bố điển hình khi dầm được gia cường bằng TRC. Tại cùng một độ võng, vùng nứt của dầm gia cường tập trung và nhỏ hơn so với dầm không gia cường.

Trong giới hạn của bài báo, nhóm tác giả chỉ tập trung làm rõ phương án và kết quả mô hình với hai dầm B_0 và TRC. Các dầm CFRP, TRC+JC và TRC+JVC (viết theo ký hiệu đã định nghĩa ở bảng 3) được mô phỏng theo nguyên lý tương tự, có xét tới cường độ chịu kéo khác nhau của vật liệu (CFRP so với TRC) và hệ số kết dính lớn hơn trong

trường hợp lai gia cường (TRC+JC và TRC+JVC so với TRC).

4. Kết luận

Sử dụng vật liệu bê tông cốt lưới sợi dệt TRC trong gia cường các dầm bê tông cốt thép đã được đề cập trong nghiên cứu. Giải pháp lai gia cường trong đó các thanh thủy tinh và thanh carbon được lai dệt với lưới sợi TRC (hai trường hợp TRC + JC và TRC+JVC) giúp nâng cao khả năng chịu kéo và hiệu quả trong gia cường của TRC.

Kết quả thí nghiệm cũng chứng minh được tính khả thi của việc sử dụng TRC nhằm nâng cao khả

năng chịu lực của dầm và giảm thiểu được các động tới môi trường so với phương án dán FRP truyền thống mặc dù về khả năng chịu lực, dầm gia cường bằng TRC không cho kết quả cao bằng FRP.

Mô hình phần tử hữu hạn trên mã nguồn mở Cast3M cho kết quả sát với các thí nghiệm khi so sánh các đường cong “lực - chuyển vị giữa dầm” và vùng nứt tại thời điểm chuyển vị giữa dầm bằng 30mm. Hệ số làm việc hiệu quả giữa lưới sợi và lớp bê tông hạt mịn được sử dụng, cho ra kết quả mô hình sát với thực tế.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) thông qua đề tài có mã số 107.01-2017.03. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn quỹ Nafosted đã có những ủng hộ cần thiết và kịp thời.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Cuypers H. and Wastiels J. (2006). Stochastic matrix-cracking model for textile reinforced cementitious composites under tensile loading. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 39, 777–786.
2. Hegger J. and Voss S. (2008). Investigation of the load-bearing behaviour and potential of Textile Reinforced Concrete. *Engineering Structures*, 30, 2050–2056.
3. Tetta Z.C., Koutas L.N., and Bournas D.A. (2018). Shear strengthening of concrete members with TRM jackets: Effect of shear span-to-depth ratio, material and amount of external reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 137, 184–201.
4. Ali Abdullah J., Sumei Z., and Jiepeng L. (2010). Shear strength and behavior of tubed reinforced and steel reinforced concrete (TRC and TSRC) short columns. *Thin-Walled Structures*, 48(3), 191–199.
5. Truong B.T., Bui T.T., Limam A., et al. (2017). Experimental investigations of reinforced concrete beams repaired/reinforced by TRC composites. *Composite Structures*, 168, 826–839.
6. Brückner A., Ortlepp R., and Curbach M. (2006). Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Mater Struct*, 39(8), 741–748.
7. Yin Shiping, Yang Yang, Ye Tao, et al. (2017). Experimental Research on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened with TRC under Corrosion Environment. *Journal of Structural Engineering*, 143(5), 04016231.
8. Contamine R., Si Larbi A., and Hamelin P. (2011). Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29), 8589–8598.
9. Le Fichoux E. (2011). Présentation Et Utilisation De Cast3m. <<http://www-cast3m.cea.fr/>>.
10. Menegotto M. and Pinto P. (1973). Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending.
11. Merabet O. and Reynouard J. (1999). Formulation d'un modèle élasto-plastique fissurable pour le béton sous chargements cycliques.
12. Le Nguyen K., Brun M., Limam A., et al. (2014). Pushover experiment and numerical analyses on CFRP-retrofit concrete shear walls with different aspect ratios. *Composite Structures, Volume 113*, 403–418.
13. Le Nguyen K. (2015), *Contribution à la compréhension du comportement des structures renforcées par FRP sous séismes*, Ph.D thesis, INSA de Lyon, Lyon.
14. Si Larbi A., Agbossou A., and Hamelin P. (2013). Experimental and numerical investigations about textile-reinforced concrete and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 99, 152–162.

Ngày nhận bài: 24/10/2018.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 27/11/2018.