

**NÂNG CAO HIỆU QUẢ CỦA BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT (TRC)
ĐỐI VỚI DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐƯỢC GIA CƯỜNG:
NGHIÊN CỨU VỀ SỰ PHÁT TRIỂN VẾT NỨT VÀ LIÊN KẾT VẬT LIỆU
ENHANCING THE EFFICIENCY OF TEXTILE REINFORCED CONCRETE
(TRC) FOR STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAMS:
A STUDY ON CRACK DEVELOPMENT AND MATERIAL BONDING**

Trần Nam Hưng¹, Nguyễn Thị Thu Nga², Võ Thanh Hùng³

^{1,2}Trường Đại học kỹ thuật Lê Quý Đôn

³Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: ¹ tranhung@lqdtu.edu.vn, ² nguyennga@lqdtu.edu.vn, ³ thanhhungibst@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses1-13>

TÓM TẮT: Bê tông cốt lưới dệt (Textile Reinforced Concrete -TRC) là một loại bê tông hạt mịn được gia cố bằng lưới sợi cacbon, sợi thủy tinh và các vật liệu khác. TRC có thể tăng khả năng chịu tải của dầm bê tông cốt thép đáng kể, đặc biệt là khi chịu tải động. Ngoài ra, TRC còn có thể hạn chế vết nứt trên dầm và sự xâm thực của môi trường. Nghiên cứu này nhằm nâng cao hiệu quả gia cường của TRC trên dầm bê tông cốt thép cho hai trường hợp: kết cấu mới và kết cấu được gia cường. Nghiên cứu xem xét sự thay đổi cường độ của lớp gia cường và liên kết giữa hai lớp vật liệu, đó là bê tông cốt thép của dầm và TRC. Kết quả cho thấy rằng để gia cường dầm bê tông cốt thép một cách hiệu quả bằng TRC, cần đảm bảo đồng thời hai yếu tố sau: tăng cường liên kết giữa TRC và bê tông trong dầm bê tông cốt thép và TRC phải có cường độ cao. Khi đó, TRC giúp phân phối đều ứng suất trong dầm bê tông cốt thép, giảm ứng suất trong cốt thép, tăng cường ứng suất trong TRC và giảm khả năng xuất hiện vết nứt trong bê tông. Do vậy, khả năng chịu tải của dầm được cải thiện.

TỪ KHÓA: Bê tông cốt lưới dệt, nứt trong dầm, mô hình đàn nhớt Burgers, năng lượng gây nứt, dầm chịu uốn, phần tử tiếp xúc, thí nghiệm uốn 4 điểm.

ABSTRACTS: Textile Reinforced Concrete (TRC) is a type of fine-grained concrete that is reinforced with carbon fibers, glass fibers, and other materials in the form of lattice nets. TRC can significantly increase the load-bearing capacity of reinforced concrete beams, especially under dynamic loading conditions. In addition, TRC possibly limits cracks on the beams and the environmental penetrations effects. This study aims to improve the reinforcement efficiency of TRC on reinforced concrete beams for two cases: new structures and retrofitted structures. It has been considered the changes in the strength of the reinforcement layer and the bond between the two layers of materials, namely the reinforced concrete of the beam and the TRC. The results obtained have shown that to strengthen effectively reinforced concrete beams by using TRC, two following factors need to be simultaneously ensured: enhancing the connection between TRC and the concrete in the reinforced concrete beam and TRC must have high strength. Then, TRC helps distribute stress evenly in the reinforced concrete beam, reduces stress in the steel reinforcement, strengthens stress in TRC, and reduces the likelihood of cracks in concrete, thereby improving the load-bearing capacity of the beam.

KEYWORDS: Textile Reinforced Concrete, cracks in beams, Burgers' viscoelastic model, fracture energy, flexural beams, interface; four point bending test.

1. GIỚI THIỆU

Bê tông cốt lưới dệt (TRC) bao gồm bê tông hạt mịn và lưới vải dệt cường độ cao, đã trở thành một giải pháp hiệu quả để nâng cao khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép. Bằng cách sử dụng lưới

sợi cacbon, sợi thủy tinh hoặc các vật liệu khác như sợi basalt, polymer, TRC có các tính chất cơ học vượt trội và khả năng chịu mài mòn tốt hơn so với bê tông truyền thống. Bên cạnh đó, TRC được coi là một giải pháp thay thế khả thi cho bê tông cốt thép và FRP (fiber reinforced polymer) khi kết

cần đảm bảo khả năng chống cháy và chống ăn mòn môi trường biển. TRC làm tăng đáng kể khả năng chịu tải trọng của dầm bê tông cốt thép, đặc biệt là khi chịu tải động, đồng thời giảm thiểu hiện tượng nứt và tác động của môi trường. Nhờ có các đặc tính cơ học và độ bền tuyệt vời nên TRC có thể áp dụng trong xây dựng kết cấu mới làm giảm trọng lượng kết cấu hoặc để sửa chữa, phục hồi kết cấu cũ [1].

Mục tiêu của nghiên cứu này là điều tra và nâng cao hiệu quả của TRC như một phương pháp tăng cường chịu lực cho dầm bê tông cốt thép, bao gồm cả kết cấu mới và kết cấu được gia cường. Nghiên cứu tập trung vào phân tích sự phát triển của vết nứt trong dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng TRC để đánh giá hiệu quả của phương pháp gia cường này thông qua việc đánh giá ảnh hưởng của cường độ của lớp gia cường và liên kết giữa dầm bê tông cốt thép và lớp TRC.

Để đánh giá chính xác hiệu quả của TRC, các thanh cốt thép trong dầm bê tông cốt thép được giả định có đặc tính đàn hồi lý tưởng, trong khi bê tông được mô hình hóa bằng mô hình đàn nhớt Burgers. Trong khi đó, TRC được coi là một vật liệu đàn hồi đồng nhất cho phép bị kéo đứt tức thời.

Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp những thông tin về yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả của TRC trong việc gia cường dầm bê tông cốt thép. Tính hiệu quả của TRC trong việc cải thiện khả năng chịu tải của dầm được đánh giá thông qua các chỉ tiêu là: phân bố lực trong dầm hợp lý, giảm ứng suất trong thanh cốt thép, tăng cường ứng suất trong TRC và giảm khả năng xuất hiện vết nứt trong bê tông. Điều này được thực hiện thông qua phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm mã nguồn mở Cast3m.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp tiếp cận đã có

Các loại sợi gia cường được sử dụng trong TRC bao gồm sợi cacbon, sợi thủy tinh và các vật liệu khác. Nhiều giải pháp sử dụng TRC được đề xuất nhằm ngăn cản sự xuống cấp của kết cấu hiện có. Các giải pháp thường nhằm mục đích tăng khả năng chịu tải của kết cấu theo trạng thái giới hạn thứ nhất [2], hoặc đảm bảo công năng khi sử dụng và độ bền của kết cấu theo trạng thái giới hạn thứ hai [3], hoặc nâng cao đặc tính cơ học của vật liệu TRC [4]. Ngoài ra, các nghiên cứu cũng tập trung vào việc tối ưu hóa liên kết giữa hai lớp vật liệu, bê tông cốt thép và TRC, để đảm bảo khả năng truyền lực tốt và đồng đều từ TRC vào bê tông. Vì thế, hiểu rõ về cách mà hai lớp vật liệu tương tác và chịu tải cùng nhau sẽ cung cấp thông tin quan trọng để thiết kế dầm bê tông cốt thép

gia cường bằng TRC một cách hiệu quả.

Các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tiến hành thử nghiệm độ bền và đánh giá tính chất cơ học của TRC. Một số thí nghiệm thực tế dựa trên thông số đầu vào cụ thể của một loại TRC cho trước và dạng tải trọng cho trước, từ đó đánh giá khả năng chịu lực, độ bền với môi trường ăn mòn và khả năng chịu nứt của dầm bê tông cốt thép gia cường bằng TRC [5-7]. Kết quả nhận được đều cho thấy TRC có thể cải thiện sự chịu tải của dầm và giảm thiểu vết nứt. Nhận thấy, các nghiên cứu mô phỏng số thường coi liên kết giữa lớp tăng cường và bê tông cũ là hoàn hảo, vật liệu tăng cường TRC hoạt động tuyến tính cho đến khi bị phá hủy. Trong khi đó, một số nghiên cứu thực nghiệm đã nhấn mạnh rằng cần chú trọng đến liên kết giữa TRC và bê tông trong dầm bê tông cốt thép nếu không hiệu quả gia cường sẽ không cao [8].

Có thể thấy rằng, những nghiên cứu này thường tập trung vào một số loại TRC cụ thể và chưa đưa ra được toàn diện về tương quan cường độ giữa hai loại vật liệu là TRC và bê tông cũ như thế nào thì hiệu quả cũng như tương tác giữa hai thành phần vật liệu này.

2.2. Các trường hợp phá hủy của dầm

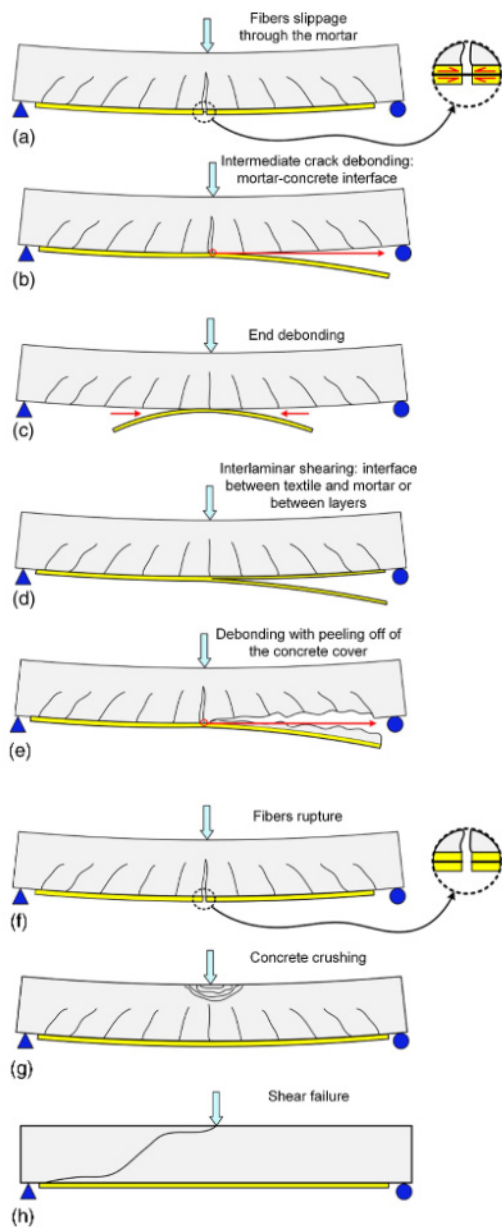
Thực tế thí nghiệm cho thấy, có 5 trường hợp có thể xảy ra khi dầm bị phá hủy như sau:

TH1: Trượt của các sợi trong bê tông hạt mịn (hình 1.a): Sự phá hủy này có liên quan đến sự bám dính của các sợi với bê tông hạt mịn và liên kết hóa học kém ở bề mặt phân cách giữa sợi và bê tông hạt mịn. Có thể xảy ra đứt một phần các sợi bên ngoài của tấm lót do khả năng bám dính của chúng tốt hơn so với các sợi lõi. Hiện tượng trượt xảy ra ở vùng có mô men cực đại, trong khi sự giảm tải do mất tác dụng tăng cường trong trường hợp này diễn ra từ từ và trơn tru. Việc sử dụng giải pháp bọc chữ U ở các đầu dầm như một neo cho các lớp tăng cường uốn có thể gây ra sự trượt của các sợi khỏi bê tông tại vùng có mô men lớn nhất.

TH2: Phân tách tại vùng tiếp xúc bê tông-bê tông hạt mịn (hình 1.b, c): Sự mất liên kết giữa bê tông và bê tông hạt mịn là nguyên nhân dẫn đến phương thức hư hỏng này. Sự tách rời của lớp TRC có thể bắt đầu từ vùng có mô men uốn lớn nhất do sự phát triển của các vết nứt uốn hoặc có thể bắt đầu từ các đầu mút. Trường hợp bắt đầu từ vùng có mô men uốn lớn nhất thường được mô tả là sự phát triển từ nứt giữa vệt gối. Trường hợp bắt đầu từ các đầu mút thường được mô tả là phân tách rời của TRC từ gối truyền về phía giữa. Khi độ dài neo ngắn cho TRC có thể dẫn đến việc phân tách theo trường hợp bắt đầu từ các đầu mút. Sự sụt giảm tải trọng trong cả hai trường hợp là đột ngột, cho thấy bản chất giòn của quá trình bong tách.

TH3: Bong tách ở vùng tiếp xúc bê tông hạt mịn - lưới dệt (hình 1.d). Bong tách dạng này là mặt cắt đi qua chiều dày lớp TRC tại chỗ tiếp xúc bê tông hạt mịn - lưới dệt. Trong trường hợp này, liên kết tại mặt phân cách bê tông-bê tông hạt mịn mạnh hơn liên kết cốt tại mặt phân cách bê tông hạt mịn - lưới dệt. Do đó, một phần của vật liệu tăng cường vẫn còn dính vào khe hở của phần tử bê tông. Việc sử dụng các loại vữa có độ bền cắt tương đối thấp và / hoặc sử dụng các loại sợi dệt có độ bền kéo cao có kích thước ô lưới nhỏ có thể gây ra hiện tượng cắt giữa các lớp vữa và lớp sợi dệt. Kiểu bong tách này có thể được quan sát thấy khi sử dụng loại sợi tráng phủ.

TH4: Bong tách từ bề mặt bê tông kèm theo bong tróc lớp vỏ bê tông (hình 1.e): Trong trường hợp này, quá trình bong tách bắt đầu từ một vết nứt



Hình 1. Các hình thức phá hủy trong dầm BTCT được tăng cường TRC, [9].

do uốn hoặc uốn cắt trung gian và lan truyền về phía đầu của cốt chịu lực trong TRC. Một phần của lớp bảo vệ bê tông lại dính vào vật liệu TRC, cho thấy sự liên kết chặt chẽ giữa bê tông hạt mịn và bê tông. Sự hỏng hóc này về mặt phương thức dẫn đến khả năng uốn cao hơn so với các trường hợp bong tách 1, 2 và 3 đã nói ở trên, và thường xảy ra khi bê tông hạt mịn cường độ cao được kết hợp với nhiều lớp sợi dệt có độ bền cao.

TH5: Sợi bị cắt đứt (hình 1.f): Khi các sợi dệt ở vùng có mômen lớn nhất chịu ứng suất kéo cao, chúng bị đứt ra thành hai đoạn. Cơ chế phá hoại giòn này dẫn đến giảm tải đột ngột.

Cả năm chế độ phá hủy nói trên đều liên quan đến việc mất tác dụng tăng cường của TRC. Tuy nhiên, có một trường hợp phá hoại lại trong vùng bê tông tại chỗ đặt tải (hình 1.g), khi đó dầm BTCT có hàm lượng cốt thép lớn, trong khi TRC có cường độ nhỏ. Hiện tượng bê tông vỡ này đã ngăn cản sự lan truyền của sự bong tách. Trong trường hợp tăng cường độ bền uốn của bê tông quá mức, sự phá hủy do cắt của kết cấu có thể xảy ra trước sự phá hủy do uốn (hình 1.h) khiến tác dụng của TRC không còn.

Như vậy, hiệu quả của sự tăng cường bằng TRC phụ thuộc nhiều vào hình thức phá hoại. Nếu mục tiêu là tăng cường khả năng chịu uốn, thì các trường hợp phá hoại sớm như là trượt sợi hoặc bong tách sớm đem lại hiệu quả kém hơn so với trường hợp khai thác các đặc tính của vật liệu tăng cường (tức là trường hợp đứt sợi - TH5 hoặc bong tách ở ứng suất lớn - TH4).

2.3. Các giả thiết trong mô phỏng số

Trong nghiên cứu này, thông qua mô phỏng số, sự phát triển của vết nứt được đánh giá trong dầm gia cường chịu uốn, tương ứng với các trường hợp khác nhau của cường độ TRC và trạng thái liên kết giữa TRC và bê tông dầm cũ, từ đó có những khuyến nghị khi lựa chọn vật liệu gia cường và chú ý đến quá trình thi công đảm bảo liên kết giữa hai lớp vật liệu. Một số giả thiết được chấp nhận sau đây:

- Liên kết giữa lưới sợi và bê tông hạt mịn là hoàn hảo, có nghĩa là bê tông hạt mịn và lưới sợi làm việc cùng nhau, trường hợp phá hoại TH1 không xảy ra.

- Lưới sợi dệt và bê tông hạt mịn được xem là một vật liệu đồng nhất, không có sự trượt, tách giữa hai thành phần vật liệu này, làm việc đàn hồi tuyến tính cho đến khi bị phá hủy.

- Bê tông của dầm BTCT cũ làm việc theo mô hình đàn nhót Burgers.

- Cốt thép trong dầm bê tông cốt thép được xem là vật liệu đàn hồi lý tưởng,

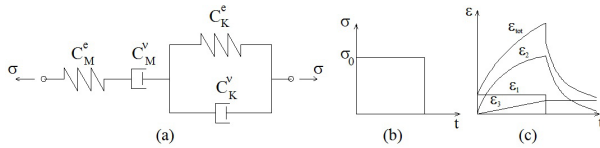
- Cốt thép liên kết hoàn hảo với bê tông trong

dầm BTCT, không có sự trượt, tách giữa hai thành phần vật liệu này.

- Bỏ qua ảnh hưởng của cốt đai trong dầm.
- Mô hình mô phỏng 2D bằng phần mềm mã nguồn mở Cast3m.

2.4. Mô hình đàn nhớt Burgers của Bê tông trong dầm BTCT

Sơ đồ Burgers gồm 1 lò xo mắc nối tiếp 1 piton và mắc nối tiếp hệ mắc song song lò xo-piton, (Hình 2).



Hình 2. Mô hình đàn nhớt Burger, [10].

Mô hình Burger có các thành phần đàn hồi và nhớt, [10]: $C_M^e = 3k_M^e \mathbb{J} + 2\mu_M^e \mathbb{K}$, $C_M^v = \eta_M^s \mathbb{J} + \eta_M^d \mathbb{K}$,

$$C_K^e = 3k_K^e \mathbb{J} + 2\mu_K^e \mathbb{K}, C_K^v = \eta_K^s \mathbb{J} + \eta_K^d \mathbb{K}.$$

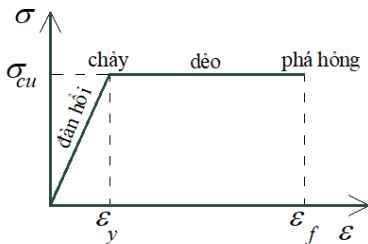
Với liên hệ:

$$\frac{1}{E_M^e} = \frac{1}{9k_M^e} + \frac{1}{3\mu_M^e}; \frac{1}{E_K^e} = \frac{1}{9k_K^e} + \frac{1}{3\mu_K^e},$$

nhận thấy đặc trưng vật liệu bê tông dầm gồm 8 tham số là: $E_M^e, E_K^e, \nu_M, \nu_K, \eta_M^s, \eta_M^d, \eta_K^s, \eta_K^d$.

2.5. Mô hình đàn hồi- dẻo lý tưởng của thép

Vật liệu thép được xem là đàn hồi- dẻo lý tưởng (Hình 3). Thép bị kéo đứt khi ứng suất đạt ứng suất tới hạn σ_{cu} và biến dạng tới hạn ϵ_f .

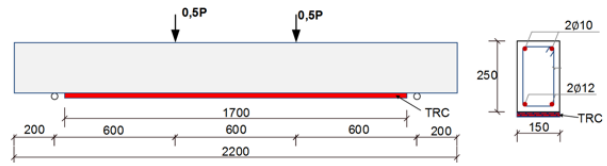


Hình 3. Đường ứng suất- biến dạng trường hợp đàn hồi- dẻo lý tưởng.

3. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM

Dầm BTCT có kích thước $150 \times 250 \times 2200$ mm được bố trí 2 thanh cốt thép $\varnothing 10$ ở lớp trên, 2 thanh $\varnothing 12$ ở lớp dưới. Lớp tăng cường TRC đặt tại mặt dưới dầm, trong phạm vi hai gối đỡ. Thí nghiệm theo mô hình uốn 4 điểm với vị trí đặt tải trọng như trên Hình 4. Tải trọng được chắt dưới dạng chuyển vị, tăng dần đến giá trị 10mm trong 100 bước gia tải.

Dầm không tăng cường TRC được sử dụng làm mẫu đối chứng để so sánh hiệu quả của việc tăng cường bằng TRC.



Hình 4. Cấu tạo dầm bê tông cốt thép tăng cường TRC

Đặc trưng vật liệu bê tông dầm gồm 8 tham số như sau, [10]:

$$E_M^e = 33.7 \times 10^3 \text{ MPa}, E_K^e = 37.7 \times 10^3 \text{ MPa},$$

$$\nu_M = 0.27, \nu_K = 0.27.$$

$$\eta_M^s = 22.0 \times 10^{11} \text{ MPa.s}, \eta_M^d = 7.75 \times 10^{11} \text{ MPa.s},$$

$$\eta_K^s = 15.2 \times 10^{10} \text{ MPa.s}, \eta_K^d = 2.54 \times 10^{10} \text{ MPa.s}$$

Do đó mô đun đàn hồi của bê tông là $E = 29 \text{ GPa}$, hệ số poisson là $\nu = 0,29$. Năng lượng gây nứt trong bê tông giả thiết là $G_f = 100 \text{ N/m}$.

Bê tông hạt mịn có cường độ chịu nén 70 Mpa, mô đun đàn hồi $E = 29 \text{ GPa}$, $\nu = 0,20$. Lưới sợi dệt được giả thiết có cường độ chịu kéo trung bình của lưới sợi từ 140- 6000 MPa. Mô đun đàn hồi chịu kéo là từ 3 GPa đến 600 GPa. Các lớp TRC được trát vào mặt dưới của dầm có bề rộng 250 mm, chiều dài 1700 mm và chiều dày 8 mm, tuân theo chỉ dẫn kỹ thuật ACI 549.4R-13.

TRC được coi là vật liệu đồng nhất dựa trên các phương pháp đồng nhất vật liệu. TRC được xem là vật liệu đàn hồi tuyến tính, có mô đun đàn hồi $E = 5.8 \text{ GPa} \div 580 \text{ GPa}$, $\nu = 0.2$ tức là so với vật liệu dầm BTCT, TRC có mô đun đàn hồi từ $0,2 \div 20$ lần BTCT.

Cốt thép được đặc trưng bởi mô đun đàn hồi $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.20$, $\sigma_{cu} = 500 \text{ MPa}$, $\epsilon_f = 0.2$.

Hai trường hợp được xem xét:

Trường hợp thứ nhất: dầm bê tông cốt thép cũ và trường hợp thứ hai: dầm bê tông cốt thép mới. Các dầm đều được tăng cường bằng TRC có đặc trưng độ cứng thay đổi từ yếu, trung bình đến cường độ cao. Trong trường hợp thứ nhất, tiếp xúc giữa bê tông cũ và bê tông hạt mịn trong dầm BTCT cũ được xem là không hoàn toàn. Giữa hai lớp vật liệu này là phần tử tiếp xúc, có độ cứng được xác định dựa trên sự kết hợp giữa kỹ thuật đồng nhất và phân tích tiệm cận áp dụng trên vật liệu yếu hơn/mỏng hơn, [11]:

$$C_N = \lim_{e \rightarrow 0} \frac{\bar{C}_{3333}}{e}, C_T = \lim_{e \rightarrow 0} \frac{\bar{C}_{1313}}{e} \quad (2.1)$$

Với $\bar{C}_{3333}, \bar{C}_{1313}$ là các thành phần trong ma trận

độ cứng hiệu dụng của vật liệu mỏng hơn (hay TRC trong trường hợp bài toán này).

Trường hợp thứ hai thì TRC được đổ cùng lúc với dầm BTCT nên tiếp xúc giữa hai lớp vật liệu được coi là hoàn toàn.

Trong trường hợp thứ nhất, các bài toán sau được nghiên cứu:

- Bài toán 0: Dầm BTCT không có lớp gia cường - được sử dụng làm đối chứng. Ký hiệu: BTCT0.

- Bài toán 1: Trường hợp lớp gia cường yếu, tiếp xúc không hoàn toàn giữa BTCT và TRC. TRC là một lớp đồng nhất, có đặc tính mô đun E chỉ bằng 1/5 lần BTCT thông thường ($E = 5,8 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Áp dụng cách xác định độ cứng phần tử tiếp xúc theo (2.1), trên vật liệu yếu hơn là TRC ta nhận được $C_N = 2,89 \text{ GPa}$, $C_T = 1,44 \text{ GPa}$. Ký hiệu: BTCT1y.

- Bài toán 2: Trường hợp lớp gia cường trung bình, TRC là một lớp đồng nhất, có đặc tính mô đun E bằng 2 lần BTCT thông thường ($E = 58 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Độ cứng phần tử tiếp xúc có hai phương án phụ thuộc vật liệu như sau:

+ Theo BTCT: $C_N = 14.956 \text{ GPa}$;
 $C_T = 7.478 \text{ GPa}$, ký hiệu: BTCT2tba.

+ Theo TRC: $C_N = 29.912 \text{ GPa}$;
 $C_T = 14.956 \text{ GPa}$, ký hiệu: BTCT2tbb.

- Bài toán 3: Trường hợp lớp gia cường có cường độ cao, TRC là một lớp đồng nhất, có đặc

tính mô đun E bằng 20 lần BTCT thông thường ($E = 580 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Độ cứng phần tử tiếp xúc có hai phương án phụ thuộc vật liệu như sau:

+ Theo BTCT: $C_N = 14.956 \text{ GPa}$, $C_T = 7.478 \text{ GPa}$
- liên kết trung bình, ký hiệu: BTCT3ca.

+ Theo TRC: $C_N = 299.120 \text{ GPa}$, $C_T = 149.560 \text{ GPa}$
- liên kết tốt, ký hiệu: BTCT3cb.

Trong trường hợp thứ hai, các bài toán sau được nghiên cứu:

- Bài toán 1: Trường hợp lớp gia cường yếu, tiếp xúc hoàn toàn giữa BTCT và TRC. TRC là một lớp đồng nhất, có đặc tính mô đun E bằng 1/5 lần BTCT thông thường ($E = 5.8 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Ký hiệu: BTTRC1y.

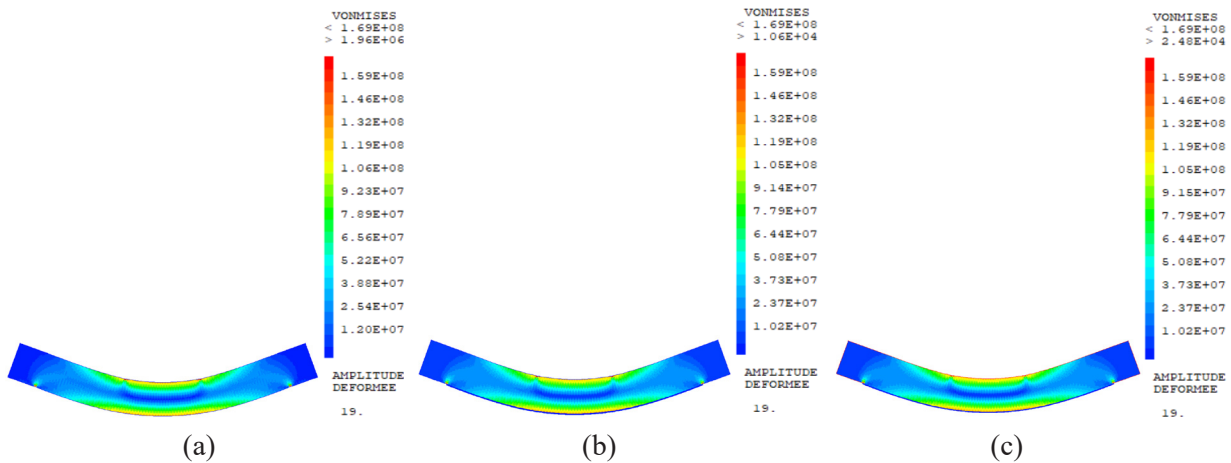
- Bài toán 2: Trường hợp lớp gia cường trung bình, tiếp xúc hoàn toàn giữa BTCT và TRC. TRC là một lớp đồng nhất, có đặc tính mô đun E bằng 2 lần BTCT thông thường ($E = 58 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Ký hiệu: BTTRC2tb.

- Bài toán 3: Trường hợp lớp gia cường có cường độ cao, tiếp xúc hoàn toàn giữa BTCT và TRC. TRC là một lớp đồng nhất, có đặc tính mô đun E bằng 20 lần BTCT thông thường ($E = 580 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$). Ký hiệu: BTTRC3c.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Khi dùng lớp gia cường yếu

Dùng kết quả phân tích phân bố ứng suất và



Hình 5. Trạng thái ứng suất trong dầm bê tông cốt thép không tăng cường TRC (a), tăng cường TRC yếu liên kết không hoàn toàn và tăng cường TRC yếu liên kết hoàn toàn trong kết cấu mới (c)

Bảng 1. Bảng tổng hợp kết quả cho trường hợp tăng cường dầm BTCT bằng lớp gia cường yếu

Bài toán	Biến dạng lớn nhất trong bê tông (mm)	Giới hạn nứt xuất hiện trong bê tông D (mm)	σ_s max trong thép (Mpa)	s_s max trong BT (MPa)	s_s max trong TRC (Mpa)
BTCT0	3.96501	0.269419	0.157187	144.804	-
BTCT1y	3.96479	0.269434	0.157177	144.796	0.2364
BTTRC1y	3.96474	0.269437	0.157176	144.795	0.2551

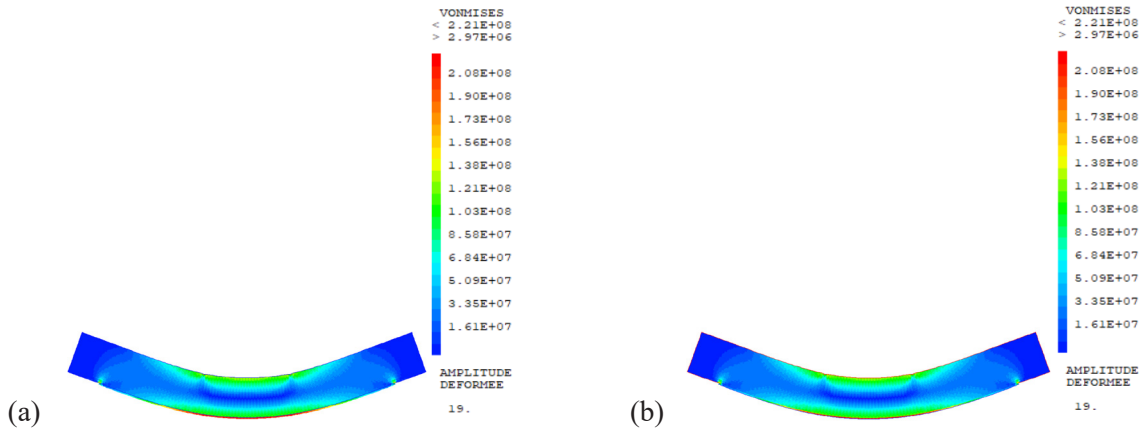
phân bố nứt trong dầm BTCT không gia cường (BTCT0) với trường hợp dầm BTCT gia cường yếu kết cấu cũ (BTCT1y) và kết cấu mới (BTTRC1y).

Kết quả trong Hình 5 và Bảng 1 cho thấy, khi có gia cường TRC có cường độ yếu, cả phương án liên kết không hoàn toàn và hoàn toàn đều cho ứng suất,

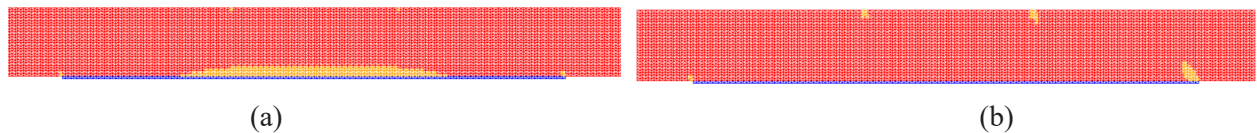
biến dạng và giới hạn nứt hầu như không thay đổi. Lớp gia cường TRC vì thế không có tác dụng.

4.2. Khi dùng lớp gia cường trung bình

Các kết quả trên Hình 6, Hình 7 và Bảng 2 cho thấy TRC cường độ gấp 2 lần bê tông đã có tác dụng làm giảm biến dạng và ứng suất trong bê tông



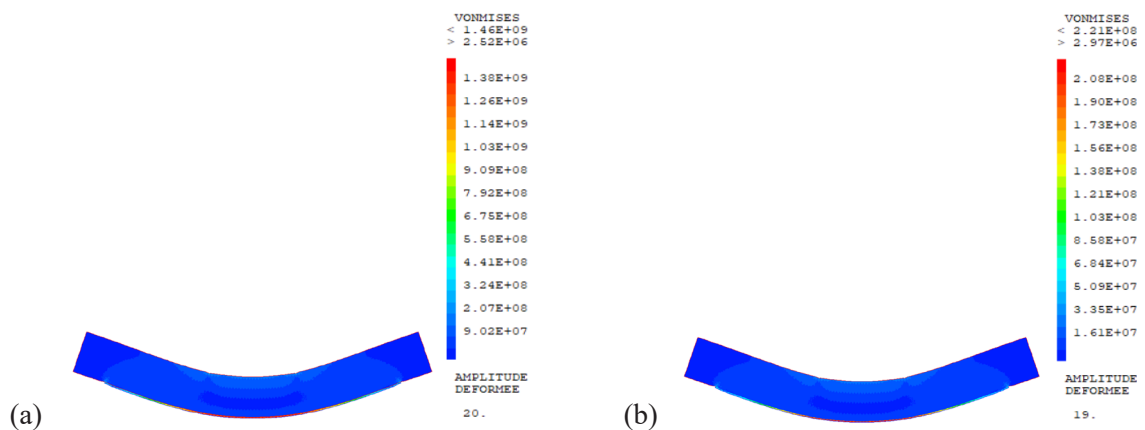
Hình 6. Trạng thái ứng suất trong dầm bê tông cốt thép tăng cường TRC trung bình liên kết không hoàn toàn (a) và tăng cường TRC trung bình liên kết hoàn toàn trong kết cấu mới (b)



Hình 7. Vùng phát triển nứt trong dầm BTCT gia cường TRC cường độ trung bình liên kết không hoàn toàn yếu và trung bình (a) và trong dầm BTCT gia cường liên kết hoàn toàn (b)

Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả cho trường hợp tăng cường dầm BTCT bằng lớp gia cường trung bình

Bài toán	Biến dạng lớn nhất trong bê tông (mm)	Giới hạn nứt xuất hiện trong bê tông D (mm)	σ_x max trong thép (Mpa)	s_x max trong BT (MPa)	s_x max trong TRC (Mpa)
BTCT0	3.96501	0.269419	0.157187	144.804	-
BTCT2tba	3.71705	0.287391	0.146046	135.855	240.263
BTCT2tbb	3.71712	0.287383	0.146049	135.861	240.268
BTTRC2tb	3.71744	0.287362	0.146065	135.990	240.301



Hình 8. Trạng thái ứng suất trong dầm bê tông cốt thép tăng cường TRC cao liên kết yếu, không hoàn toàn (a) và tăng cường TRC cao liên kết hoàn toàn hoặc liên kết tốt (b)

(a) (b)

Hình 9. Vùng phát triển nứt trong dầm BTCT gia cường TRC cường độ cao liên kết yếu không hoàn toàn (a) và trong dầm BTCT gia cường liên kết hoàn toàn (b)

Bảng 3. Bảng tổng hợp kết quả cho trường hợp tăng cường dầm BTCT bằng lớp gia cường cao

Bài toán	Biến dạng lớn nhất trong bê tông (mm)	Giới hạn nứt xuất hiện trong bê tông D (mm)	σ_s max trong thép (Mpa)	s_x max trong BT (MPa)	s_x max trong TRC (Mpa)
BTCT0	3.96501	0.269419	0.157187	144.804	-
BTCT3ca	3.21726	0.327891	0.120126	127.615	1138.16
BTCT3cb	2.37892	0.449048	0.085370	87.2259	1591.39
BTTRC3c	2.37894	0.449045	0.085369	87.2315	1591.44

nhưng không đáng kể (tương ứng 6.25% và 7.09%). Phương án của liên kết hầu như không ảnh hưởng đến giá trị khảo sát. Thêm vào đó, ứng suất lớn nhất (ứng suất gây kéo) trong TRC cũng rất nhỏ khiến TRC không phát huy được tác dụng.

4.3. Khi dùng lớp gia cường cao

Khi sử dụng TRC cường độ cao, biến dạng lớn nhất trong bê tông giảm (~40%), giới hạn cho nứt xuất hiện trong bê tông cũng tăng lên (~67%) – hay giới hạn đàn hồi của bê tông tăng lên làm hạn chế nứt xuất hiện trong bê tông, làm giảm ứng suất trong cốt thép chịu kéo (~46%), giảm ứng suất kéo trong bê tông (~40%) nhưng tăng ứng suất kéo trong TRC, tận dụng vật liệu TRC khi tham gia chịu lực (xem Hình 9 và Bảng 3).

Thêm vào đó, Hình 8 so với Hình 6 và Hình 5 cho thấy ứng suất phân bố trong bê tông đồng đều, không có sự tập trung ứng suất trong bê tông như trường hợp TRC có cường độ yếu và trung bình, khiến khả năng nứt trong bê tông giảm hẳn. Như vậy, dầm BTCT mới khi sử dụng TRC cường độ cao giúp tăng hiệu quả khi chịu lực của dầm lên rõ rệt.

5. KẾT LUẬN

- Khi tăng cường cho dầm BTCT cũ bằng TRC có cường độ yếu hoặc trung bình, cần thiết phải tính đến sự không hoàn toàn trong liên kết giữa BT cũ và bê tông hạt mịn. Cần chú ý là mức tăng cường khả năng chịu lực không cao, chỉ làm giảm độ mở rộng vết nứt, hạn chế xâm thực trong khi ứng suất trong bê tông dầm vẫn lớn, không tập trung ứng suất trong TRC nên không hiệu quả.

- Khi tăng cường cho dầm BTCT cũ bằng TRC có cường độ cao, nếu liên kết giữa BT cũ và bê tông hạt mịn không hoàn toàn thì hiệu quả tăng cường khả năng chịu lực không cao, chỉ làm giảm độ mở rộng vết nứt, hạn chế xâm thực, gây lãng phí vật

liệu. Khi xử lý tốt liên kết này bằng các biện pháp thi công, bảo dưỡng tiêu chuẩn, có thể coi liên kết này là hoàn toàn, TRC phát huy tác dụng ngăn cản sự hình thành thêm vết nứt chính giữa dầm, làm tăng đáng kể khả năng chịu lực của dầm, tăng độ mở rộng vết nứt đáng kể tại lớp gia cường, kết cấu không bị phá hoại đột ngột. Do đó, khi sửa chữa kết cấu dầm BTCT cũ, nên sử dụng TRC có cường độ cao kết hợp xử lý tốt bề mặt tiếp xúc giữa hai lớp vật liệu mới đem lại hiệu quả.

- Khi tăng cường cho dầm BTCT mới, liên kết giữa TRC với BT trong dầm BTCT có thể coi là hoàn toàn. Việc tăng cường dầm bằng TRC có cường độ yếu và trung bình không đem lại hiệu quả. TRC có cường độ cao giúp phân bố đều ứng suất trong dầm BTCT, giảm ứng suất trong cốt thép, tăng cường ứng suất tại TRC, giảm khả năng xuất hiện nứt trong BTCT, do vậy nâng cao khả năng chịu lực cho dầm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Alexander, A. E., & Shashikala, A. P. (2020, September). *Sustainability of construction with textile reinforced concrete-a state of the art*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 936, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- [2] Mansur de Castro Silva, R., & de Andrade Silva, F. (2020). *Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis*. Materials and Structures, 53(1), 17.
- [3] Rossi, E., Randl, N., Mészöly, T., & Harsányi, P. (2021). *Effect of TRC and F/TRC Strengthening on the Cracking Behaviour of RC Beams in Bending*. Materials, 14(17), 4863.

- [4] Rawat, P., Liu, S., Guo, S., Rahman, M. Z., Yang, T., Bai, X. & Zhu, D. (2022). *A state-of-the-art review on mechanical performance characterization and modelling of high-performance textile reinforced concretes*. Construction and Building Materials, 347, 128521.
- [5] Rossi, E., Randl, N., Mészöly, T., & Harsányi, P. (2021). *Effect of TRC and F/TRC Strengthening on the Cracking Behaviour of RC Beams in Bending*. Materials, 14(17), 4863.
- [6] Yu, Y. L., Yin, S. P., & Na, M. W. (2019). *Bending performance of TRC-strengthened RC beams with secondary load under chloride erosion*. Journal of Central South University, 26(1), 196-206.
- [7] Sheng, J., Yu, Z., Dou, G., & Liu, H. (2022). *Fatigue Damage Behaviors of TRC-Strengthened RC Beams*. Materials, 15(15), 5113.
- [8] Li, S., Yin, S., Wang, C., & Yang, Y. (2021). *Research on the bonding performance of TRC permanent formwork and cast-in-place concrete*. Engineering Structures, 235, 112021.
- [9] Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). *Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review*. Doctoral dissertation, American Society of Civil Engineers.
- [10] Nguyen, S.T. and Dormieux, L. *A Burger model for the effective behavior of a microcracked viscoelastic solid*. International Journal of Damage Mechanics (2011) 20:1116{1129.
- [11] Thu, N. N. T., & Nam, H. T. (2020). *Modeling of contact interface between two material layers in hybrid structures*. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71(4), 419-430.