

# NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CHỊU UỐN CỦA DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT

Nguyễn Huy Cường<sup>1</sup>, Vũ Văn Hiệp<sup>1</sup>, Lê Đăng Dũng<sup>1</sup>

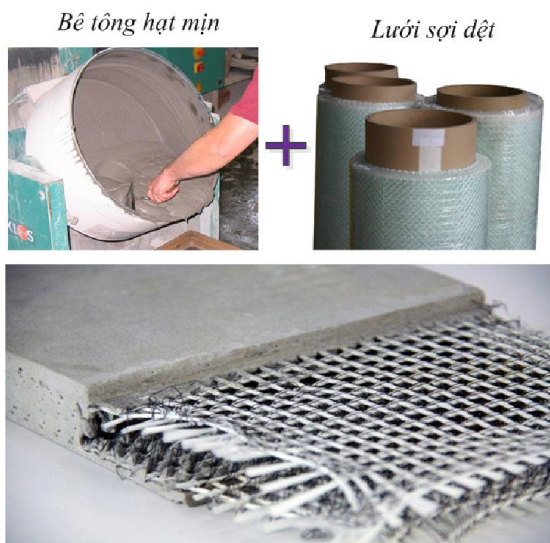
**Tóm tắt:** Công nghệ sử dụng bê tông cốt sợi dệt để tăng cường, sửa chữa các kết cấu bê tông bị xuống cấp đã và đang được nghiên cứu phát triển. Bài báo này trình bày nghiên cứu về ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt bọc bên ngoài. Mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) 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.

**Từ khóa:** ứng xử chịu uốn, tăng cường, bê tông cốt lưới dệt (TRC), ABAQUS, dính bám, phi tuyến

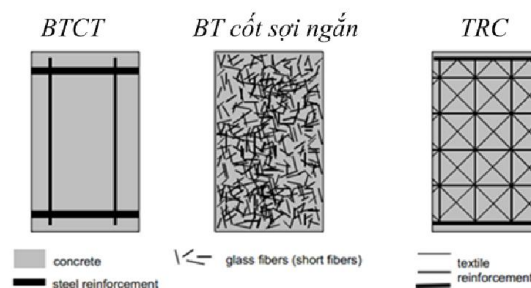
## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Giữa thế kỷ 19, bê tông cốt thép (BTCT) đã được phát minh và ảnh hưởng lớn đến việc phát triển các dạng kết cấu mới. Từ đó, BTCT trở thành một dạng vật liệu phổ biến, phần lớn các kết cấu công trình được tạo nên từ vật liệu phức hợp này. Hiện nay, nhiều công trình xây dựng đã được sử dụng một thời gian dài, và đã bắt đầu xuống cấp. Các kết cấu cũ không đáp ứng được nhu cầu tải trọng ngày càng lớn. Đồng thời, các kết cấu này cần phải được cải tạo để đáp ứng những tiêu chuẩn mới ngày càng chặt chẽ, đòi hỏi tính an toàn cao hơn.

Trong nhiều thế kỷ vừa qua, con người luôn tìm kiếm một vật liệu xây dựng thỏa mãn các yêu cầu về sử dụng, chịu lực, độ bền và hiệu quả kinh tế. Cùng với sự phát triển chung của khoa học, nhiều loại vật liệu mới đã được nghiên cứu và chế tạo thành công trong đó có bê tông cốt lưới dệt (Textile-Reinforced Concrete, TRC). Bê tông cốt lưới dệt là một thành tựu mới trong lĩnh vực kết cấu bê tông, được phát triển đầu tiên tại Đức bởi hai trung tâm nghiên cứu tại trường Đại học Kỹ thuật Tổng hợp Dresden và trường Đại học Kỹ thuật RWTH Aachen từ những năm 1990 ([1], [2]).



Hình 1: Các thành phần chính của TRC

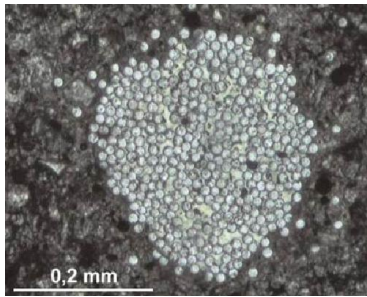


Hình 2: Hệ thống các loại cốt dung cho bê tông

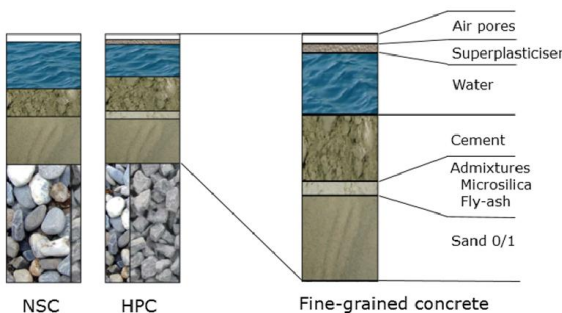
TRC bao gồm hai thành phần chính là lưới sợi dệt và bê tông hạt mịn (Hình 1). Sự phát triển của TRC dựa trên nguyên tắc cơ bản của bê tông cốt sợi ngắn phân tán (Hình 2). Khác với bê tông sợi ngắn, lưới sợi dệt trong bê tông cốt lưới dệt được làm từ những sợi nhỏ (sợi cơ

<sup>1</sup> Viện Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Giao thông vận tải

bản), có nguồn gốc từ carbon hoặc thủy tinh, với chiều dài không giới hạn được bó lại thành các bó nhỏ. Mỗi bó này chứa hàng trăm hoặc hàng nghìn sợi cơ bản nằm song song với nhau và có vị trí không thay đổi trên mặt cắt ngang của bó sợi (Hình 3). Sau đó, các bó sợi được dệt thành tấm lưới và đặt vào bê tông hạt mịn thay thế thép làm cốt. Lưới sợi dệt được phủ lớp bọc polymer kích thước nano giúp làm tăng khả năng dính bám các sợi cơ bản với nhau và giữa các bó sợi với bê tông hạt mịn trên bề mặt tiếp xúc [2].



Hình 3: Mặt cắt cốt sợi thủy tinh gồm 400 sợi cơ bản đặt trong bê tông hạt mịn [2]



Hình 4: Thành phần của bê tông hạt mịn

Bê tông hạt mịn để kết hợp với lưới sợi được viện kết cấu bê tông đại học TU Dresden nghiên cứu và phát triển trong khuôn khổ dự án SFB 528 về sửa chữa, tăng cường [2]. Kích thước hạt lớn nhất trong hỗn hợp có đường kính chỉ 1 mm, nên loại bê tông này được phân loại là như một loại vữa (Hình 4). Điều này đảm bảo khả năng dính bám tốt với lưới sợi dệt và nhằm tạo ra cấu kiện có kích thước nhỏ và chiều dày mỏng. Bê tông hạt mịn này sử dụng xi măng, tro

bay, microsilica làm chất kết dính, nước và phụ gia trong trường hợp cần thiết. Tỷ lệ khối lượng từng thành phần thay đổi phụ thuộc tùy theo chủng loại sử dụng [3].

Cốt lưới dệt được sản xuất từ carbon, thủy tinh không bị ăn mòn bởi môi trường, do đó chiều dày yêu cầu của lớp bê tông bảo vệ của cấu kiện giảm xuống chỉ ở mức mm và kết cấu trở nên thanh mảnh hơn. Lớp lưới dệt có diện tích bề mặt lớn hơn nhiều so với thanh cốt thép truyền thống, do đó bê tông cốt lưới dệt có được lực dính bám lớn hơn nhiều, có khả năng giảm chiều dài neo, khoảng cách và bề rộng vết nứt nhỏ [3].

Xét trên cả góc độ kỹ thuật và kinh tế, bê tông cốt lưới dệt đặc biệt phù hợp cho việc tăng cường, sửa chữa các công trình cũ, nhất là các công trình yêu cầu cao về chống ăn mòn, giữ nguyên độ mảnh và trọng lượng nhẹ. Với những ưu điểm của mình, TRC đang dần thay thế cho FRP - một dạng vật liệu gia cường phổ biến cho kết cấu BTCT trước đây.

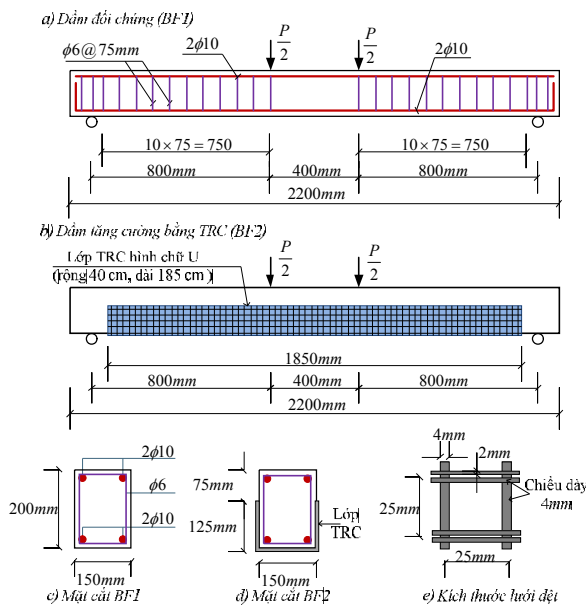
Đã có nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về việc ứng dụng TRC để tăng cường kết cấu BTCT như: nghiên cứu đầm BTCT được gia cường với các lớp TRC khác nhau; nghiên cứu hiệu quả hạn chế nở ngang của bê tông chịu nén với lớp áo TRC bọc ngoài v.v. Các nghiên cứu ban đầu đã cho thấy tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực tăng cường là rất lớn ([6], [7]). Trong nghiên cứu này, ứng xử chịu uốn của đầm BTCT được tăng cường bằng TRC được phân tích bằng phương pháp PTHH.

## 2. TÓM TẮT NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

Hussein (et al. [4]) đã nghiên cứu thực nghiệm đầm BTCT được tăng cường bằng TRC với 3 mẫu đầm BTCT thu nhỏ (150x200x2200mm). Các đầm được tiến hành thí nghiệm uốn 4 điểm, dưới tác dụng của chuyển vị với tốc độ 1 mm / phút cho đến khi phá hoại. Các LVDTs được gắn vào bề mặt dưới của đầm để đo chuyển vị trong quá trình thí nghiệm.

Cốt thép dọc của đầm là 2Φ10 được đặt ở cả phía trên và dưới, với lớp bảo vệ dày 25mm. Cốt đai đầm Φ6 được đặt với khoảng cách 75mm, để đảm bảo đầm bị phá hoại do uốn. Hai đầm (BF1) không tăng cường được sử dụng làm mẫu đối chứng để so sánh

hiệu quả của việc tăng cường TRC. Một dầm (BF2) đã được tăng cường bằng TRC bọc phía ngoài. Lớp TRC này sử dụng vữa xi măng và 10 lớp sợi lưới dệt. Lớp TRC này có tiết diện hình chữ U với bề rộng là 40cm và chiều dài là 185cm. Đối với dầm BF2, một lớp bê tông mịn có chiều dày khoảng 2 mm được bọc lên dầm bê tông. Lưới sợi dệt sẽ được ấn nhẹ vào cho đến khi bê tông hạt mịn trôi ra khỏi các ô lưới. Lớp bê tông mịn thứ 2 tiếp tục được trát vào để bao bọc hoàn toàn lưới sợi. Quy trình này được lặp lại đối với các lớp lưới sợi, đảm bảo lớp bê tông hạt mịn trước chưa đông cứng. Chi tiết dầm thí nghiệm được thể hiện như Hình 5.

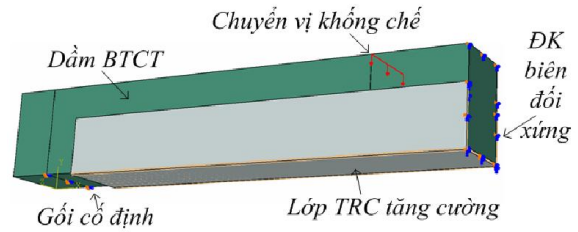


Hình 5: Cấu tạo chi tiết các mẫu dầm thí nghiệm [4]

### 3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

#### 3.1 Khái quát chung

Một mô hình ba chiều được thiết lập để mô phỏng ứng xử chịu uốn của dầm BTCT được tăng cường bằng TRC thông qua phần mềm PTHH ABAQUS phiên bản 6.10-1. Do tính chất đối xứng về kết cấu và tải trọng nên chỉ một nửa dầm được mô phỏng, thể hiện ở Hình 6. Mô hình mô phỏng này không chỉ đánh giá 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 tăng cường.



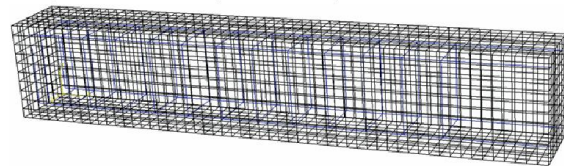
Hình 6: Mô hình PTHH dầm BTCT tăng cường bằng TRC

#### 3.2 Loại phần tử và chia lưới mô hình

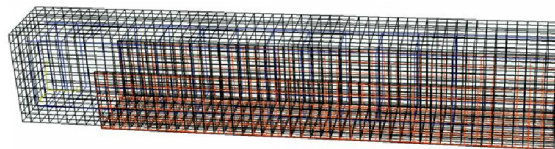
Trong nghiên cứu này, phần tử C3D8R trong thư viện vật liệu của phần mềm ABAQUS được sử dụng để rời rạc mô hình. Phần tử C3D8R là dạng phần tử khối 3 chiều, 8 nút tuyến tính được gán cho các phần tử bê tông thường và bê tông hạt mịn của TRC.

Các thanh cốt thép và lưới sợi dệt có thể được mô hình hóa bằng mô hình phần tử dạng khối (solid), dạng dầm (beam) hoặc dạng thanh (truss). Việc sử dụng mô hình phần tử dạng khối không được chọn do gây ra khối lượng tính toán lớn. Hơn nữa, thanh cốt thép và lưới sợi dệt có độ cứng chống uốn ngoài trục thanh khá nhỏ, vì vậy, phần tử dạng thanh T3D2 được sử dụng để mô phỏng cốt thép và lưới sợi dệt. Cụ thể hơn, lựa chọn phần tử dạng dây (wire) trong ABAQUS để mô phỏng các thanh cốt chịu lực (gồm cả cốt thép và lưới sợi dệt). Các thanh cốt dọc này được nhúng vào phần bê tông, tăng độ cứng cho kết cấu với giả thiết dính bám với bê tông là tuyệt đối. Số liệu đầu vào của dạng phần tử này là diện tích mặt cắt ngang và không cần định nghĩa cụ thể tiết diện hình học của mặt cắt.

a) Mô hình BF1 (Dầm BTCT)



b) Mô hình BF2 (Dầm tăng cường)



Hình 7: Lưới phần tử của các mô hình

Hình 7 thể hiện mô hình đã được rời rạc (chia lưới). Để có được kết quả đạt độ chính xác cao, việc chia mịn lưới đã được thực hiện. Kích thước mắt lưới tổng thể là 20mm trong đó có một số phần tử được chia nhỏ nhất là 10mm. Việc chia lưới sẽ ảnh hưởng đến sự hội tụ cũng như kết quả phân tích. Do đó, việc lựa chọn độ mịn đủ nhỏ khi chia lưới là cần thiết để đảm bảo sự thay đổi kích thước phần tử không ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng.

### 3.3 Mô hình vật liệu

#### 3.3.1 Cốt thép

Mô hình đàn hồi dẻo được sử dụng để mô phỏng tính chất vật liệu của cốt thép, thể hiện như Hình 6a. Đường ứng suất – biến dạng của thép được xác định thông qua mô đun đàn hồi  $E_s$  và cường độ chịu kéo  $f_y$ . Mô đun đàn hồi của cốt thép thông thường được lấy là 200GPa. Mô hình này có thể sử dụng được cho cả ứng xử kéo và nén của cốt thép.

**Bảng 1: Các thông số vật liệu thép [4]**

$E_s$	$\nu_s$	$E_c$
200 GPa	0,3	578 Mpa

#### 3.3.2 Lưới sợi dệt

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. Hình 4b thể hiện mối quan hệ ứng suất – biến dạng của lưới sợi dệt, không có giai đoạn biến dạng dẻo trước khi bị phá hoại. Sau khi đạt đến cường độ chịu kéo, ứng suất giảm đột ngột về không, thể hiện sự phá hoại giòn của vật liệu này.

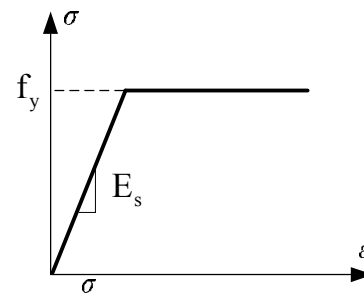
**Bảng 2: Các thông số vật liệu lưới sợi dệt [4]**

$E_t$	$\nu_t$	$f_{tu}$
31940 MPa	0,22	623 Mpa

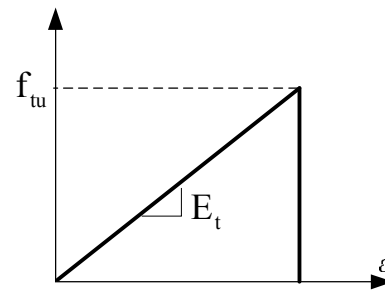
#### 3.3.3 Bê tông

Mô hình bê tông phá hoại dẻo (Concrete Damaged Plasticity - CDP) được sử dụng để mô tả tính chất vật liệu ở cả vùng kéo và nén của bê tông thường và bê tông hạt mịn. Các thông số cụ

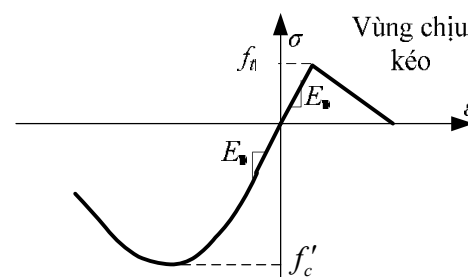
thể để xác định mô hình vật liệu này là cường độ chịu nén ( $f'_c$ ), cường độ chịu kéo ( $f_t$ ), mô đun đàn hồi ( $E_c$ ), và hệ số poisson ( $\nu$ ). Các thông số này được lấy từ kết quả thí nghiệm [4]. Trên thực tế, chỉ có thông số cường độ chịu nén  $f'_c$  là sẵn có từ kết quả thí nghiệm. Các thông số khác được xác định thông qua cường độ chịu nén. Ví dụ, mô đun đàn hồi được xác định bằng công thức  $E_c = 4730\sqrt{f'_c}$  theo chỉ dẫn của tiêu chuẩn ACI 318-11. Hệ số poisson  $\nu$  được lấy từ các tính chất đàn hồi phổ biến của bê tông.



a) Thép



b) Cốt lưới dệt

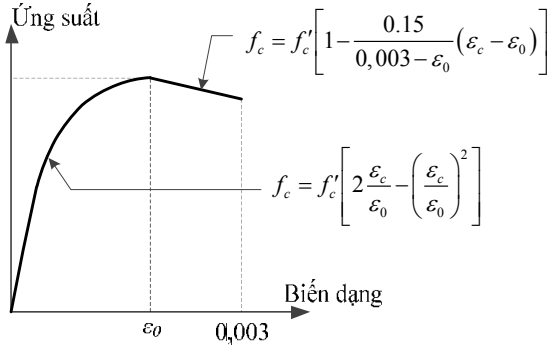


c) Bê tông

Hình 8: Quan hệ ứng suất – biến dạng của các vật liệu thép, lưới sợi dệt và bê tông.

Đường cong ứng suất – biến dạng của Hognestad được sử dụng để mô tả ứng xử của bê tông khi chịu nén một trục (Hình 9). Mô hình

của Hognestad có khả năng mô tả khá chính xác ứng xử chịu nén của nhiều cấp độ bền bê tông. Giá trị cường độ chịu nén  $f'_c$  được lấy từ thí nghiệm. Mô hình ứng xử này được sử dụng để khai báo cho vật liệu bê tông phá hoại dẻo.



Hình 9: Đường cong Hognestad về ứng suất- biến dạng của bê tông khi chịu nén

Bên cạnh đó, mô hình CDP sử dụng 5 thông số để mô tả quá trình hình thành và dạng phá hoại dẻo. Giá trị của những thông số này được lấy theo khuyến cáo trong hướng dẫn sử dụng phần mềm Abaqus [5]. Các thông số này đã được tập hợp trong Bảng 3.

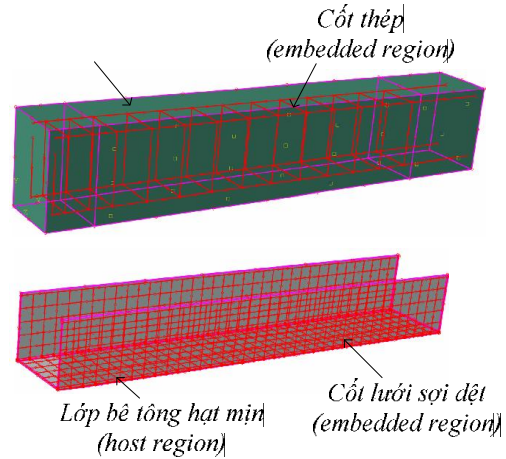
**Bảng 3: Các thông số vật liệu khai báo cho mô hình bê tông**

Loại bê tông	$f'_c$ (Mpa)	$f_t$ (Mpa)	$E_c$ (Mpa)	$\nu$
Bê tông thường	20	1,34	21150	0,2
Bê tông hạt mịn	23,9	2,77	23120	0,2
Thông số mô hình phá hoại dẻo				
$K_c$	$e$	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	$\psi$	$\mu$
2/3	0,1	1,16	30°	1E-5

### 3.4 Điều kiện ràng buộc và dính bám

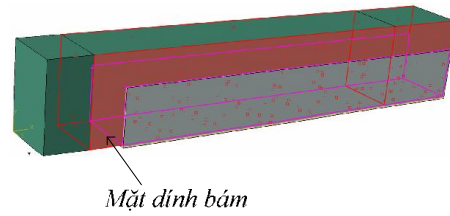
Mô hình dầm gia cường được tổ hợp hoàn chỉnh từ các phần (parts) riêng lẻ thông qua khai báo ràng buộc (constraint) thích hợp giữa các phần. Cốt thép và lưới sợi dệt được khai báo nhúng (embedded) vào bê tông với giả thiết

dính bám giữa cốt chịu lực và bê tông là tuyệt đối (Hình 10).

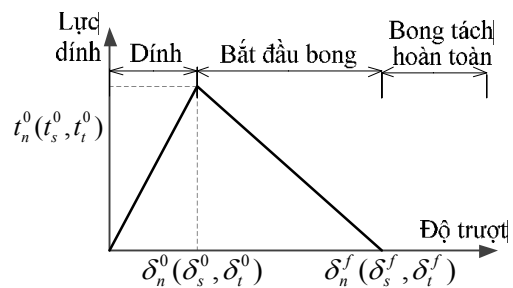


Ràng buộc "nhúng" (embedded)

Hình 10: Ràng buộc nhúng (embedded constraint)



a) Mặt tiếp xúc



b) Ứng xử dính bám

Hình 11: Ứng xử dính bám giữa 2 lớp vật liệu

Mô hình ứng xử dính bám bề mặt (Surface-based cohesive behavior) trong phần mềm ABAQUS được sử dụng để mô tả ứng xử dính bám giữa 2 lớp vật liệu bê tông và TRC (Hình 11-a). Mô hình này có khả năng mô phỏng quá trình dính bám và bong tách giữa 2 lớp vật liệu

này thông qua mối quan hệ giữa lực dính và độ trượt (Hình 11-b), với giả thiết ứng xử dính bám là tuyến tính trong giai đoạn đầu. Sau khi đạt đến lực dính lớn nhất, quá trình bong tách bắt đầu xuất hiện và kết cấu bị phá hoại khi quá trình bong tách diễn ra hoàn toàn. Ứng xử đàn hồi tuyến tính của mô hình này được thiết lập dựa trên ma trận độ cứng, ứng suất danh định và biến dạng danh định, thể hiện ở công thức (1).

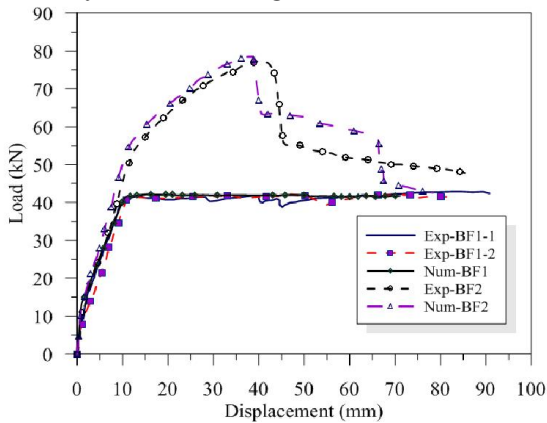
$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:  $t$  – vector ứng suất danh định;  $K$  – ma trận độ cứng đàn hồi;  $\varepsilon$  – vector biến dạng danh định [2].

Độ cứng  $K_{nn}$  được lấy bằng  $0,1E_{cm}$ ,  $K_{ss}$  và  $K_{tt}$  được gán bằng  $0,1G_{cm}$ , với  $E_{cm}$  và  $G_{cm}$  là mô đun đàn hồi chịu nén và mô đun chịu cắt của bê tông. Trong nghiên cứu này, các giá trị khác nhau của biến dạng khi phá hoại được thử dần cho đến khi đạt được kết quả tương đồng giữa kết quả thí nghiệm và kết quả mô phỏng.

#### 4. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH PTHH

Để kiểm chứng các mô hình phân tử hữu hạn, kết quả phân tích mô phỏng được so sánh với kết quả thí nghiệm của Hussein và cộng sự [4]. Cả kết quả thí nghiệm và kết quả phân tích mô phỏng đều được vẽ cùng trên một đồ thị quan hệ giữa chuyển vị - tải trọng để so sánh.



Hình 12: Quan hệ lực – chuyển vị của dầm BF1 và BF2

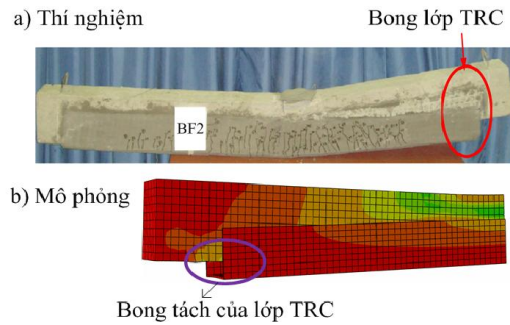
Hình 12 cho thấy sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm của cả dầm BTCT và dầm gia cường. Ở thời điểm phá hoại, giá trị tải trọng giữa mô phỏng và thực nghiệm gần như

bằng nhau, chuyển vị của đường cong thực nghiệm và mô phỏng cũng khá phù hợp với nhau. Sai số của giá trị khả năng chịu lực giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng chỉ khoảng từ 1,3% đến 1,6%. Kết quả thí nghiệm ở Bảng 4 cho thấy khả năng chịu tải tăng tới 86% so với trước khi được tăng cường.

**Bảng 4: Khả năng chịu lực của các dầm thí nghiệm và mô phỏng**

Dầm	Thí nghiệm	Mô phỏng	Sai số
Đối chứng BF1	42,82 kN	42,14 kN	1,6%
Tăng cường BF2	77,5 kN	78,46 kN	1,3%

Dạng phá hoại của dầm gia cường bằng TRC là phá hoại giòn do việc bong tách lớp TRC với dầm BTCT ở vị trí gần gối đỡ dầm. Hình 13 thể hiện sự tương đồng về cơ chế phá hoại giữa kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm. Việc bong tách lớp TRC dẫn đến việc giảm đột ngột khả năng chịu lực của mẫu thí nghiệm BF2.



Hình 13: Cơ chế phá hoại của dầm được tăng cường BF2

#### 5. KẾT LUẬN

Việc sử dụng phương pháp mô phỏng thông qua phần mềm ABAQUS để phân tích, đánh giá ứng xử chịu uốn của kết cấu dầm BTCT được tăng cường bằng TRC cho kết quả khá phù hợp với kết quả thực nghiệm. Mô hình PTHH đạt được sự chính xác nhờ có xét đến tính phi tuyến vật liệu cũng như lựa chọn mô hình dính bám phù hợp giữa lớp bê tông thường và TRC. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy lợi ích của việc

sử dụng TRC cho việc tăng cường kết cấu. Theo đó, cả độ cứng và khả năng chịu lực của dầm đều được tăng lên đáng kể.

Nhược điểm của mô hình này là chưa mô tả được sự hình thành của vết nứt ở kết cấu. Nguyên nhân là do mô hình vật liệu bê tông sử dụng dạng rời rạc (smeared), do đó mô hình không chỉ ra được các vị trí và hình dạng của vết nứt. Vì vậy, cần có sự cải tiến cho mô hình để xét đến sự hình

thành và phát triển của các vết nứt.

Sự phá hoại của dạng kết cấu liên hợp này chủ yếu đến từ việc bong tách giữa các lớp vật liệu. Trong mô hình mô phỏng trên, các thông số của mô hình ứng xử dính bám chủ yếu được thu thập từ nhiều nghiên cứu khác và sử dụng phương pháp thử dần. Do đó, cần nghiên cứu cụ thể ứng xử dính bám giữa các loại vật liệu này để có được các thông số chính xác hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hegger, J., N. Will (2007), *Textile Reinforced Concrete — A new Composite Material*. Advances in Construction Materials 2007, Springer Berlin Heidelberg: 147-156.
- [2] Manfred Curbach (2002), *SFB 528: Textile Bewehrungen zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung*, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999 - I/2002
- [3] Proceedings of the International RILEM (2006), *Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*, ISBN: 2-912143-99-3, Pages: 292, 2006
- [4] Hussein M. Elsanadedy, Tarek H. Almusallam, Saleh H. Alsayed, Yousef A. Al-Salloum. (2013), *Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study*, Composite Structures, Volume 97, March 2013, Pages 40–55.
- [5] Simulia (2009), *ABAQUS Analysis User's Manual 6.10*.
- [6] Curbach M., Ortlepp R., Scheerer S., Frenzel M. “*Verstärken mit Textilbeton – Weg von der Vision zur Anwendung*”. Der Prüferingenieur . 2011, n° 39, p. 32-44.
- [7] Ortlepp R., Weiland S., Curbach M. “*Rehabilitation and strengthening of a hypar concrete shell by textile reinforced concrete*”. In: LIMBACHIYA M.C., KEW H.Y. (eds.) Proceedings of the International Conference Excellence in Concrete Construction through Innovation, London, 09.-10.09.2008. London: Taylor & Francis Group, 2008, ISBN ISBN 978-0-415-47592-1, p. 357–364

### Abstract

#### FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM STRENGTHENED WITH TEXTILE REINFORCED CONCRETE

*Strengthening of reinforced concrete structures using textile reinforced concrete (TRC) has emerged as a viable technique to retrofit/repair deteriorated structures. In this study, the flexural performance of concrete beams strengthened with TRC has been investigated by means of a finite element analysis on ABAQUS software. The work reported in this paper deals with the analytical models, proposed to predict the behavior of reinforced concrete beam strengthened with externally bonded TRC layers. The surface – based cohesive behavior is also captured to represent the interfacial bonding between TRC and concrete substrate. The results of the numerical simulations are used to validate the experimental results.*

**Keywords:** flexural behavior, strengthening, textile reinforced concrete (TRC), ABAQUS, bonding, nonlinear

---

*BBT nhận bài: 18/3/2015*

*Phản biện xong: 07/4/2015*