



NUMERICAL MODELING OF FULL-OUT BEHAVIOUR OF REINFORCEMENT TEXTILE EMBEDDED IN THE CEMENTITIOUS MATRIX

Tran Manh Tien^{1*}, Hoang Dinh Phuc², Vu Xuan Hong³, Emmanuel Ferrier³

¹Department of Mechanisms of Materials, Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), no18, Pho Vien street, Duc Thang ward, Bac Tu Liem district, Ha Noi city, Vietnam.

²Faculty of Construction, Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), no18, Pho Vien street, Duc Thang ward, Bac Tu Liem district, Ha Noi city, Vietnam.

³Université de LYON, Université Claude Bernard LYON 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction LMC2, France

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/07/2023

Revised: 24/08/2023

Accepted: 10/10/2023

Published online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.11>

* *Corresponding author*

Email: tranmanhtien@humg.edu.vn; Tel: +84973094737

Abstract. The bonding strength of the interface between the reinforcement textile and the cementitious matrix dramatically affects the performance of textile-reinforced concrete (TRC) composite. In order to identify this bond, the pull-out test of reinforcement textile embedded in cementitious matrix block was widely used and the most effective. This paper presents the numerical approach for the pull-out test to consider the influence of material parameters on the model results. The numerical model was initially developed and validated with the authors' previous experimental results. Thanks to the cracking model for the cementitious matrix, the pull-out model provided a failure mode in agreement with the experiments. The pull-out force - slip curve was also compared between experimental and numerical simulation results. Then, parametric study in different embedded lengths was performed, and the results were analyzed to identify the influence of this parameter on the pull-out performance of reinforcement textile embedded in the cementitious matrix block.

Keywords: Pull-out behaviour, Textile reinforced concrete (TRC), numerical modeling, Bond – slip curve.



NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ỨNG XỬ KÉO NHỎ CỦA CỐT LƯỚI DỆT TRONG BÊ TÔNG HẠT MỊN

Trần Mạnh Tiến^{1*}, Hoàng Đình Phúc², Vũ Xuân Hồng³, Emmanuel Ferrier³

¹BM Sức bền vật liệu, Khoa Mỏ, Đại học Mỏ - Địa chất (HUMG), 18 Phố Viên, p. Đức Thắng, q. Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

²Khoa Xây dựng - Trường Đại học Mỏ - Địa chất (HUMG), 18 Phố Viên, p. Đức Thắng, q. Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

³Université de LYON, Université Claude Bernard LYON 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction LMC2, France

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 23/07/2023

Ngày nhận bài sửa: 24/08/2023

Ngày chấp nhận đăng: 10/10/2023

Ngày xuất bản Online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.11>

* Tác giả liên hệ

Email: tranmanhtien@humg.edu.vn; Tel: +84973094737

Tóm tắt. Cường độ dính bám giữa cốt lưới dệt và bê tông hạt mịn ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả làm việc của bê tông cốt lưới dệt (BTCLD). Để xác định được giá trị này, phương pháp thí nghiệm kéo nhỏ cốt lưới dệt trong khối bê tông hạt mịn được sử dụng rộng rãi và cho hiệu quả nhất. Bài báo này giới thiệu phương pháp tiếp cận thí nghiệm kéo nhỏ bằng mô phỏng số để xem xét ảnh hưởng của các tham số vật liệu đến kết quả mô hình. Mô hình số ban đầu được phát triển và đối chứng với kết quả thực nghiệm trước đó của nhóm tác giả. Nhờ vào việc sử dụng mô hình vật liệu phá hủy do nút cho bê tông hạt mịn, mô hình kéo nhỏ đã cho ra dạng phá hủy tương đối phù hợp với thực nghiệm. Đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt cũng được so sánh giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng số. Tiếp đó, nghiên cứu mô hình với biến thiên của chiều dài neo được thực hiện và phân tích kết quả để xem xét ảnh hưởng của tham số này đến ứng xử kéo nhỏ của lưới sợi dệt và bê tông hạt mịn.

Từ khóa: Ứng xử kéo nhỏ, bê tông cốt lưới dệt (BTCLD), mô hình số, lực kéo nhỏ - biến dạng trượt.

@ 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong vài thập kỷ trở lại đây, bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) đã được sử dụng ngày càng rộng rãi trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng, có thể sử dụng để gia cường kết cấu cũ, xuống cấp, hoặc xuất hiện vết nứt trong quá trình khai thác, cũng có thể làm kết cấu mới dạng tấm, sàn trong các kết cấu nhà xưởng công nghiệp [1-3]. Ứng xử và các đặc trưng cơ học của BTCLD đã được xác định từ thực nghiệm bằng thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc uốn tại ba hoặc bốn điểm. Kết quả cho thấy, BTCLD cho ra một ứng xử phi tuyến phức tạp có xuất hiện vết nứt rồi tái bền với các giai đoạn làm việc khác nhau và phụ thuộc vào nhiều yếu tố vật liệu [4-7]. Một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử cơ học của BTCLD đó là độ bền liên kết giữa cốt lưới dệt (CLD) và bê tông hạt mịn (BTHM). Cường độ dính bám bề mặt tốt giữa hai loại vật liệu này có thể cải thiện khả năng làm việc của BTCLD trong những giai đoạn đầu (pha tuyến tính và pha nứt) [8]. Do đó, CLD thường được xử lý bề mặt bằng các sản phẩm khác nhau trong quá trình sản xuất để nâng cao khả năng dính bám với BTHM.

Để xác định cường độ liên kết giữa CLD và BTHM, có nhiều mô hình thí nghiệm đã được tiến hành. Trong số đó, phương pháp thí nghiệm kéo nhỏ CLD từ khối BTHM là mô hình đơn giản nhưng cho hiệu quả tốt trong điều kiện phòng thí nghiệm [9,10]. Có nhiều cách bố trí mẫu thí nghiệm kéo nhỏ khác nhau, chủ yếu liên quan đến hình dạng của khối BTHM: dạng khối hình trụ, dạng tấm, dạng đĩa, dạng giọt nước, ... Với mô hình thí nghiệm này, lực kéo nhỏ được chuyển thành ứng suất cắt trên bề mặt của hai loại vật liệu theo chiều dài neo và phá hủy liên kết tại đó khi lực kéo nhỏ đạt đến một giá trị nhất định. Cường độ liên kết giữa CLD và BTHM có thể được đánh giá qua lực kéo nhỏ, biến dạng trượt và chiều dài CLD neo trong khối BTHM.

Trên thế giới, có tương đối đầy đủ các nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định ứng xử kéo nhỏ CLD trong khối BTHM, chẳng hạn như Mu và cộng sự [11], Jiang và cộng sự [12], Silva và cộng sự [13], Tran và cộng sự [14], Zhu và cộng sự [15,16], ... Các kết quả thực nghiệm cho thấy rằng liên kết giữa CLD và BTHM cho một ứng xử điển hình phi tuyến có thể được chia thành ba giai đoạn như sau: giai đoạn liên kết hoàn hảo (perfect bonding), giai đoạn phá hủy liên kết (debonding) và giai đoạn ma sát (pure friction). Các mẫu thí nghiệm kéo nhỏ CLD từ khối BTHM cho thấy dạng phá hủy tương đối phù hợp, đó là sự tách rời của CLD trong khối BTHM kèm theo đó là phá hủy BTHM xung quanh vị trí CLD. Các mẫu thí nghiệm cũng có thể được quan sát kỹ hơn bằng phương pháp SEM (Scanning Electron Microscopes) để phân tích cơ chế phá hủy tại liên kết [13].

Theo kết quả khảo sát, ứng xử kéo nhỏ CLD từ khối BTHM là tương đối phức tạp, phụ thuộc vào nhiều yếu tố như phương pháp xử lý CLD [17,18], vật liệu tráng phủ CLD [19], thành phần hạt của BTCLD, ... Do đó, để có thể nghiên cứu bằng thực nghiệm ảnh hưởng của các yếu tố trên đến cường độ dính bám giữa CLD và BTHM thì tốn rất nhiều chi phí. Trong điều kiện nghiên cứu còn hạn chế, phương pháp tiếp cận bài toán ảnh hưởng của các tham số vật liệu đến cường độ dính bám giữa CLD và BTHM bằng mô phỏng số là phù hợp, đã được kiểm nghiệm bằng những nghiên cứu có chất lượng và được xuất bản trên các tạp chí uy tín trên thế giới [20-23]. Những mô hình số này đã xem xét và sử dụng ứng xử phi tuyến có phá hủy cho BTHM và mô hình phi tuyến cho liên kết giữa hai loại vật liệu. Do đó, kết quả mô hình số tương đối phù hợp khi đối chứng với thực nghiệm.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về vật liệu BTCLD nói chung và cường độ liên kết giữa CLD và BTHM nói riêng còn tương đối hạn chế. Đã có một số nghiên cứu về BTCLD ở cấp độ vật liệu và kết cấu đến từ các phòng thí nghiệm của một số trường đại học có ngành kỹ

thuật xây dựng. Ở cấp độ vật liệu, một số nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện nhằm xác định các đặc trưng cơ học của BTCLD theo thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc uốn tại 3 điểm [24-26]. Ở cấp độ kết cấu, các thử nghiệm đã được thực hiện nhằm xác định hiệu quả gia cường của BTCLD khi gia cường kết cấu chịu uốn, chịu cắt, chịu nén, chịu chọc thủng [27-31]. Ở cấp độ liên kết giữa CLD và BTHM, Cao Minh Quyền [24] đã so sánh cường độ dính bám giữa BTHM có thành phần cấp phối cát tự nhiên với CLD sợi các bon Sigratex Grid 350 và CLD sợi thủy tinh SIT Grid200. Trần và cộng sự [32] đã xác định được đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của liên kết giữa CLD các bon và BTHM. Một số tác giả khác đã đánh giá được ảnh hưởng của hàm lượng muối trong cát đến cường độ dính bám giữa CLD các bon và các loại BTHM [26][33]. Đây là những kết quả bước đầu nhưng có độ tin cậy cao, khẳng định xu hướng phát triển của vật liệu BTCLD trong ngành kỹ thuật xây dựng công trình ở Việt Nam.

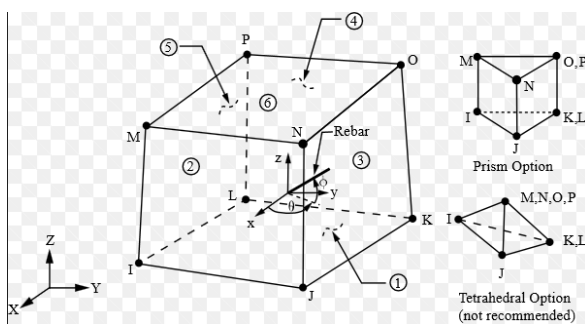
Nhằm góp phần vào sự hiểu biết về ứng xử cơ học tại liên kết giữa CLD và BTHM, bài báo này giới thiệu các kết quả mô phỏng số thí nghiệm kéo nhỏ CLD các bon trong tấm BTHM. Các dữ liệu thực nghiệm để làm thông số đầu vào mô hình và đối chứng kết quả được lựa chọn từ những nghiên cứu trước đây của nhóm nghiên cứu. Sau khi mô hình được đối chứng với thực nghiệm, ảnh hưởng của tham số chiều dài neo đến ứng xử kéo nhỏ CLD từ khối BTHM cũng được nghiên cứu. Bài báo được bắt đầu bằng công việc xây dựng mô hình số (phần 2), bao gồm các công việc lựa chọn phần tử, mô hình vật liệu, kích thước phần tử, lưới và điều kiện biên, dữ liệu thực nghiệm. Phần 3 và 4 giới thiệu kết quả mô hình số và thảo luận. Bài báo được kết thúc bằng phần kết luận khoa học cho toàn bộ nghiên cứu.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH SỐ

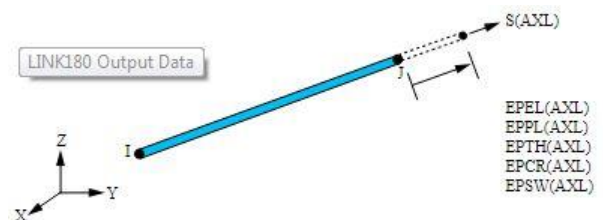
Mô hình số được xây dựng trên Ansys Mechanical 15. Các bước sau đây giới thiệu các bước xây dựng mô hình số trong nghiên cứu này.

2.1. Lựa chọn phần tử

Trong mô hình số này, hai loại phần tử được sử dụng cho các vật liệu thành phần là CLD và BTHM. Đầu tiên là phần tử LINK180 (3-D Spar or Truss) cho CLD, có tính chất chỉ chịu kéo hoặc nén với ba bậc tự do tại mỗi điểm nút (chuyển vị theo 3 phương x, y, và z) (xem Hình 1b). Thứ hai là phần tử SOLID65 (3D Reinforced Concrete Solid) cho lớp BTHM, phần tử này tương thích với mô hình phá hủy vật liệu bởi nứt hoặc nghiền cho khối BTHM (Xem Hình 1a).



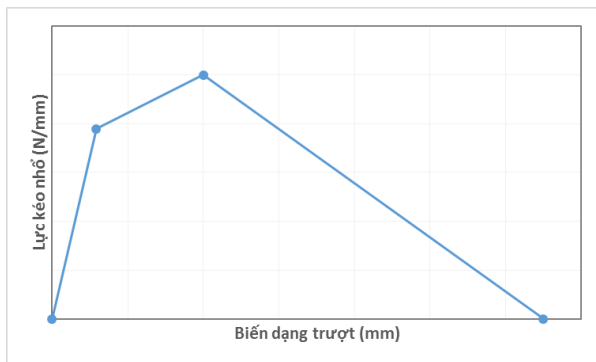
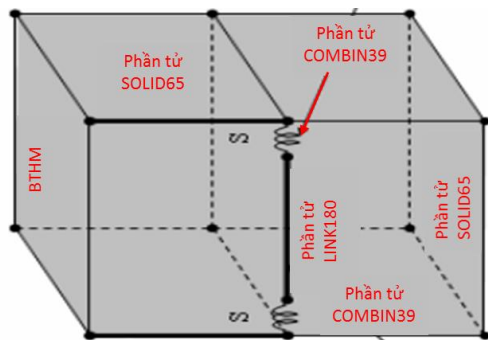
(a) Phần tử SOLID65 cho khối BTHM



(b) Phần tử LINK 180 cho CLD

Hình 1. Các phần tử được sử dụng trong mô hình số cho CLD và BTHM [34].

Đối với liên kết giữa CLD và BTHM, phần tử COMBIN39 được lựa chọn, phần tử này làm việc giống như một lò xo phi tuyến liên kết hai nút: một nút của phần tử SOLID65 (BTHM) và một nút của phần tử LINK180 (CLD). Cường độ liên kết giữa hai phần tử (SOLID65 và LINK180) được đặc trưng bởi mô hình vật liệu cho lò xo, được đưa vào dựa trên những kết quả thực nghiệm [32] [17]. Khi có sự dịch chuyển tương đối (biến dạng trượt) giữa hai nút tại mặt phân cách, sẽ tạo ra phản lực lò xo để giữ CLD trong khối BTHM. Lực này đóng vai trò giống như lực cắt tại liên kết giữa CLD và BTHM. Khi biến dạng trượt giữa hai nút vượt quá giá trị giới hạn, phần tử COMBIN39 sẽ bị phá hủy và không còn kết nối giữa hai nút trên. Hình 2 dưới đây giới thiệu phần tử COMBIN39 trong mô hình số cho thí nghiệm kéo nhổ CLD từ khối BTHM.



(a) Vị trí của phần tử COMBIN39 trong mô hình số

(b) Quan hệ lực kéo nhổ - biến dạng trượt

Hình 2. Phần tử COMBIN39 cho mô hình số thí nghiệm kéo nhổ.

2.2. Mô hình vật liệu

Đối với CLD, mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính có giới hạn bởi biến dạng của vật liệu được sử dụng. Với mô hình vật liệu này, các tham số vật liệu là ứng suất, biến dạng ở trạng thái giới hạn và mô đun đàn hồi của vật liệu. Phương trình định luật Hooke biểu diễn quan hệ ứng suất – biến dạng cho lưới cốt sợi dệt được mô tả dưới đây:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

Trong đó: σ là ứng suất trong CLD;

ε là biến dạng trong CLD;

E là mô đun đàn hồi của vật liệu;

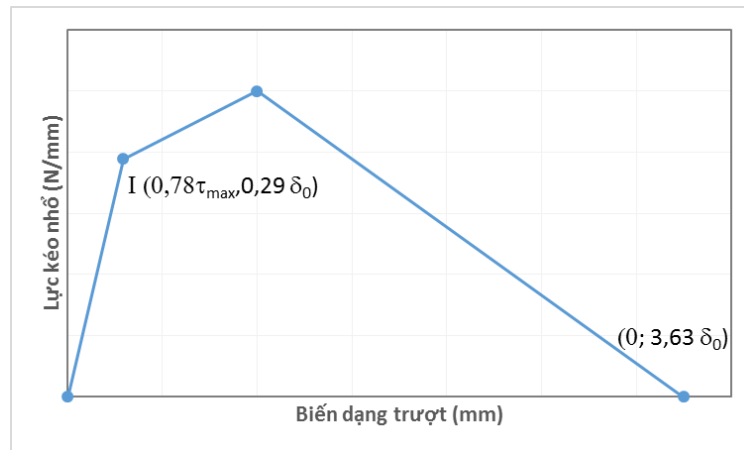
Đối với khối BTHM, mô hình vật liệu ứng xử phi tuyến có xuất hiện vết nứt (CONCR - Nonlinear Behaviour - Concrete) được lựa chọn. Mô hình này cho phép mô phỏng sự phá hủy vật liệu (nứt hoặc bị nghiền nát) đối với các vật liệu giòn như bê tông, đá khối, gạch đá, gốm sứ, ... Tiêu chí về sự phá hủy của bê tông do trạng thái ứng suất đa trục có thể được biểu thị trong phương trình sau (do Willam và Warnke đề xuất [35]):

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (2)$$

Trong đó F là một hàm của trạng thái ứng suất chính ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$), tùy thuộc vào bề mặt hư hỏng; S là bề mặt hư hỏng được biểu thị theo ứng suất chính và năm thông số đầu vào f_t (cường độ kéo đơn trục), f_c (cường độ nén đơn trục), f_{cb} (cường độ nén hai trục), f_l (cường

độ nén tương đương cho trạng thái nén hai trục cùng với ứng suất thủy tĩnh) và f_2 (cường độ nén tương đương cho trạng thái nén đơn trục đồng thời ứng suất thủy tĩnh). Nếu thỏa mãn phương trình nêu trên, vật liệu sẽ bị nứt hoặc bị nghiền nát.

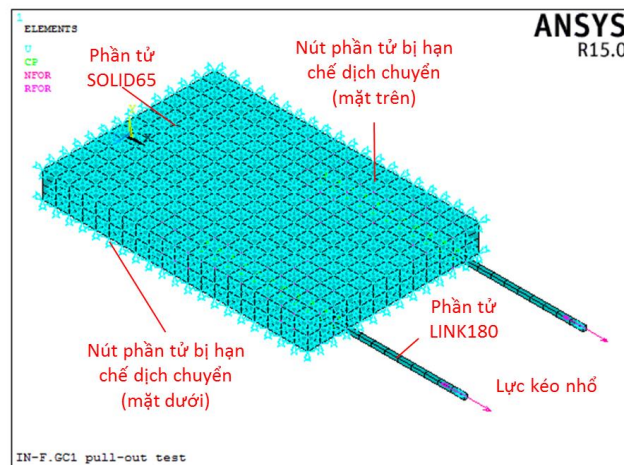
Đối với phần tử COMBIN39 cho liên kết giữa CLD và BTHM, mô hình kết hợp phi tuyến tính (Nonlinear Spring – COMBIN39) được chọn. Với mô hình vật liệu này, có thể xác định được lực kéo cho phần tử COMBIN39 bằng cách xác định các điểm lực rời rạc theo lực và biến dạng trượt (xem Hình 3).



Hình 3. Mô hình vật liệu cho phần tử COMBIN39.

2.3. Kích thước, chia lưới và điều kiện chuyển vị, tải trọng

Dựa trên mô hình mẫu trong thực nghiệm mà mô hình số được xây dựng lên theo bố trí và kích thước tương tự. Mẫu đối chứng được lấy từ thực nghiệm là mẫu thí nghiệm kéo nhỏ CLD các bon với BTHM (gọi là IN-F.GC1) [32]. Với mẫu thí nghiệm này, hai sợi dẹt các bon GC1 được ngàm vào khối BTHM với chiều dài neo là 3 cm (Xem Hình 4). Kích thước khối BTHM là 100 mm x 65 mm x 10 mm (dài x rộng x dày). Kích thước phần tử SOLID65 là 2.5 mm x 2.5 mm x 5 mm, có nghĩa là chiều dày được chia thành 4 phần tử, chiều rộng được chia thành 13 phần tử và chiều dài được chia 20 phần tử. Các phần tử CLD được chia lưới với chiều dài 5mm. Do đó, khi khai báo phần tử COMBIN39, khoảng cách giữa các phần tử này là 5 mm.



Hình 4. Lưới phần tử cho mô hình số thí nghiệm kéo nhỏ sợi dẹt các bon trong khối BTHM.

Điều kiện biên và tải trọng đặt lên mô hình thí nghiệm kéo nhỏ được bố trí như trên thực nghiệm. Tất cả các nút trên 2 bề mặt của tấm BTHM đều được cố định mọi chuyển vị như trong thực tế (các bề mặt này đã được dán gia cường bằng 2 tấm nhôm và do đó không thể biến dạng trong quá trình thí nghiệm). Lực kéo nhỏ được tạo ra nhờ vào các chuyển vị cưỡng bức tác dụng lên các đầu tự do của sợi dệt các bon. Tốc độ gia tăng chuyển vị cưỡng bức được kiểm soát bởi thời gian tính toán, được chia thành các giai đoạn để dễ dàng quan sát ứng xử kéo nhỏ của mô hình. Số lượng bước tải áp dụng vào mô hình là 100, độ lớn từng bước gia tải là 0,05 mm.

2.4. Dữ liệu thực nghiệm

Số liệu đầu vào của mô hình là kết quả nghiên cứu thực nghiệm có sẵn của nhóm tác giả về ứng xử kéo nhỏ CLD các bon (GC1) trong tấm BTHM (gọi là mẫu IN-F.GC1) [17] [32]. Trong các nghiên cứu này, các đặc trưng cơ học của các vật liệu thành phần (CLD và BTHM), cũng như ứng xử kéo nhỏ của CLD trong khối BTHM đã được xác định. Hình 5 dưới đây giới thiệu các công tác thực nghiệm để thu được kết quả: đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt, dạng phá hủy mẫu. Bảng 1 dưới đây giới thiệu các tham số mô hình cho CLD các bon GC1 và BTHM. Trong bảng 1, các đặc trưng cơ học của lưới sợi dệt các bon được lấy từ nghiên cứu [32], còn các đặc trưng cơ học khi kéo của BTHM được lấy từ nghiên cứu [17]. Tham số T_c là hệ số giảm của ứng suất kéo từ đỉnh trong mô hình vật liệu phi tuyến của phần tử BTHM, đã được giới thiệu trong những nghiên cứu trước đây [14] [17].

Bảng 1. Dữ liệu thực nghiệm được sử dụng cho mô hình số 3-D.

Mẫu - Tác giả	Lưới sợi dệt các bon			BTHM				
	Mô tả vật liệu	Tham số vật liệu		Mô tả vật liệu	Tham số vật liệu			
		E_f (GPa)	σ_f (MPa)		E_m (GPa)	f_t (MPa)	ϵ_{ck}	T_c
IN-F.GC1 – Trần và cộng sự [32] [17]	GC1	256	2617	BTHM	8,41	5,29	$6,29 \times 10^{-4}$	0,8

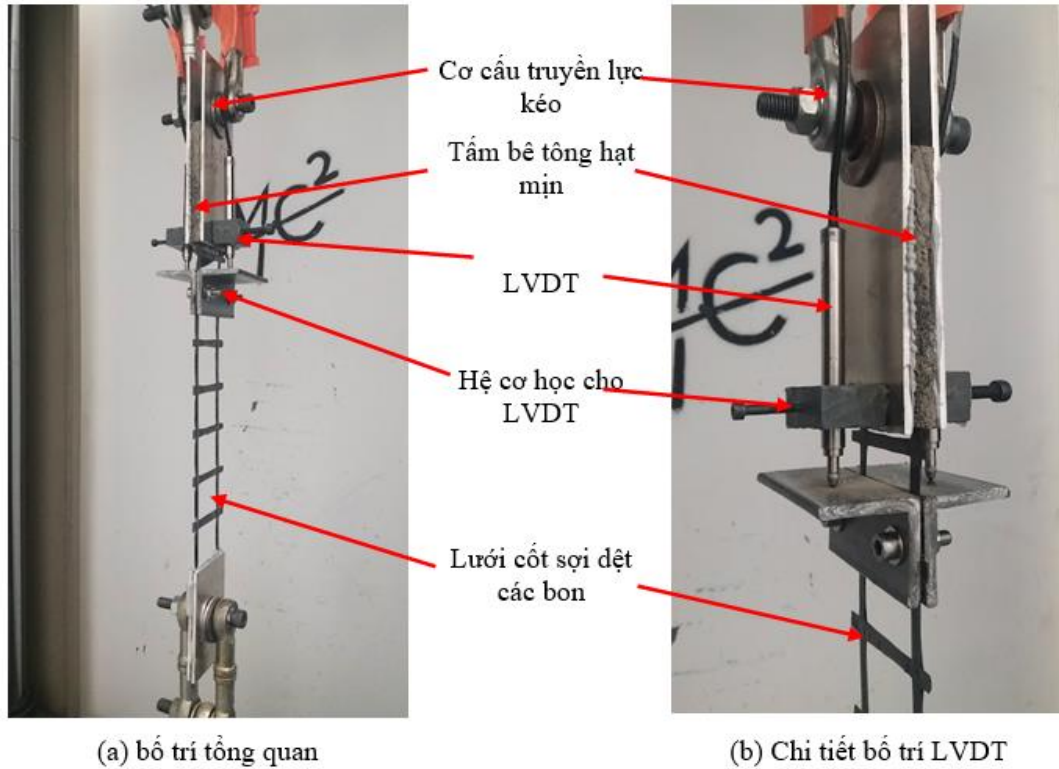
Với các tham số cho mô hình vật liệu phần tử COMBIN39, các giá trị τ_{max} và δ được xác định dựa theo kết quả thực nghiệm thí nghiệm kéo nhỏ. Tuy nhiên, trên thực tế, chuyển vị trượt tại các điểm nút theo chiều dài neo là khác nhau, do đó cường độ lực dính bám tại các điểm khác nhau sẽ là khác nhau. Biểu đồ phân bố ứng suất theo chiều dài neo có xu hướng giảm dần ứng suất khi đi sâu vào khối BTHM. Do đó, giá trị τ_{max} sẽ cao hơn giá trị trung bình thu được từ thí nghiệm. Qua thực nghiệm có thể xác định được giá trị $\tau_{tb} = 37,03$ N/mm (bằng cách lấy tỉ số giữa lực kéo nhỏ lớn nhất thu được cho chiều dài neo) cho liên kết giữa 1 sợi CLD và BTHM với chiều dài neo là 3 cm. Do đó, để xác định đúng được giá trị τ_{max} cho mô hình, cần khảo sát ảnh hưởng của tham số này đến kết quả thu được, từ đó đưa ra được giá trị phù hợp cho mẫu kéo nhỏ. Phần 3.1 sẽ giới thiệu những kết quả nghiên cứu này để xác định được giá trị τ_{max} phù hợp.

3. KẾT QUẢ MÔ HÌNH SỐ

3.1. Ảnh hưởng của τ_{max} đến kết quả mô hình số

Trong nghiên cứu tham số này, giá trị τ_{max} được bắt đầu bằng τ_{tb} là giá trị trung bình được tính bằng tỷ số giữa lực kéo nhỏ lớn nhất với chiều dài neo (3cm). Tỷ lệ τ_{max}/τ_{tb} tăng dần từ 1

đến 6 (với các bước giá trị là 0.5). Tất cả các tham số mô hình được giới thiệu trong Bảng 2 bên dưới.

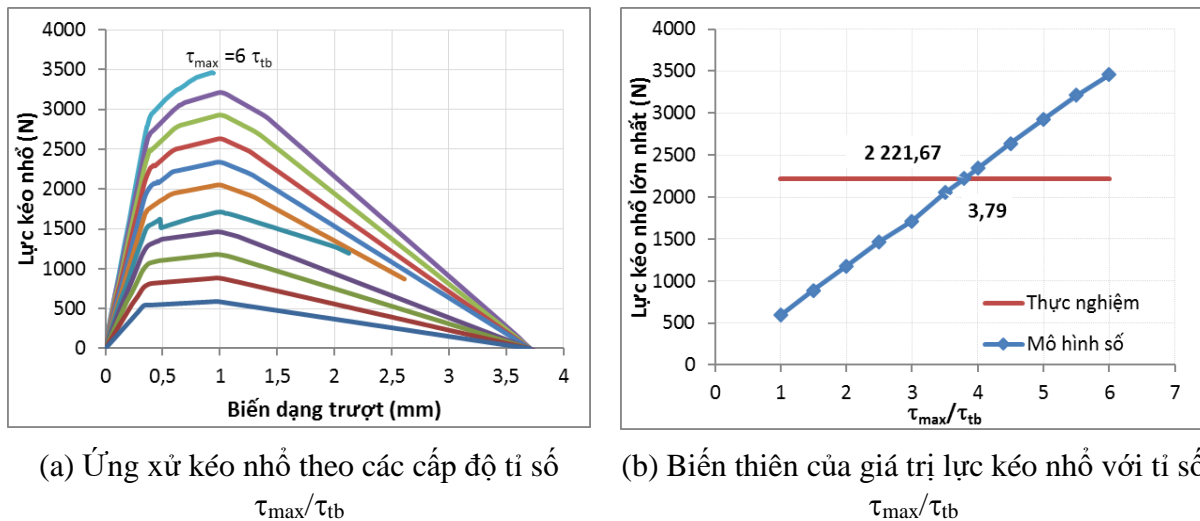


Hình 5. Bố trí thí nghiệm kéo nhỏ [32].

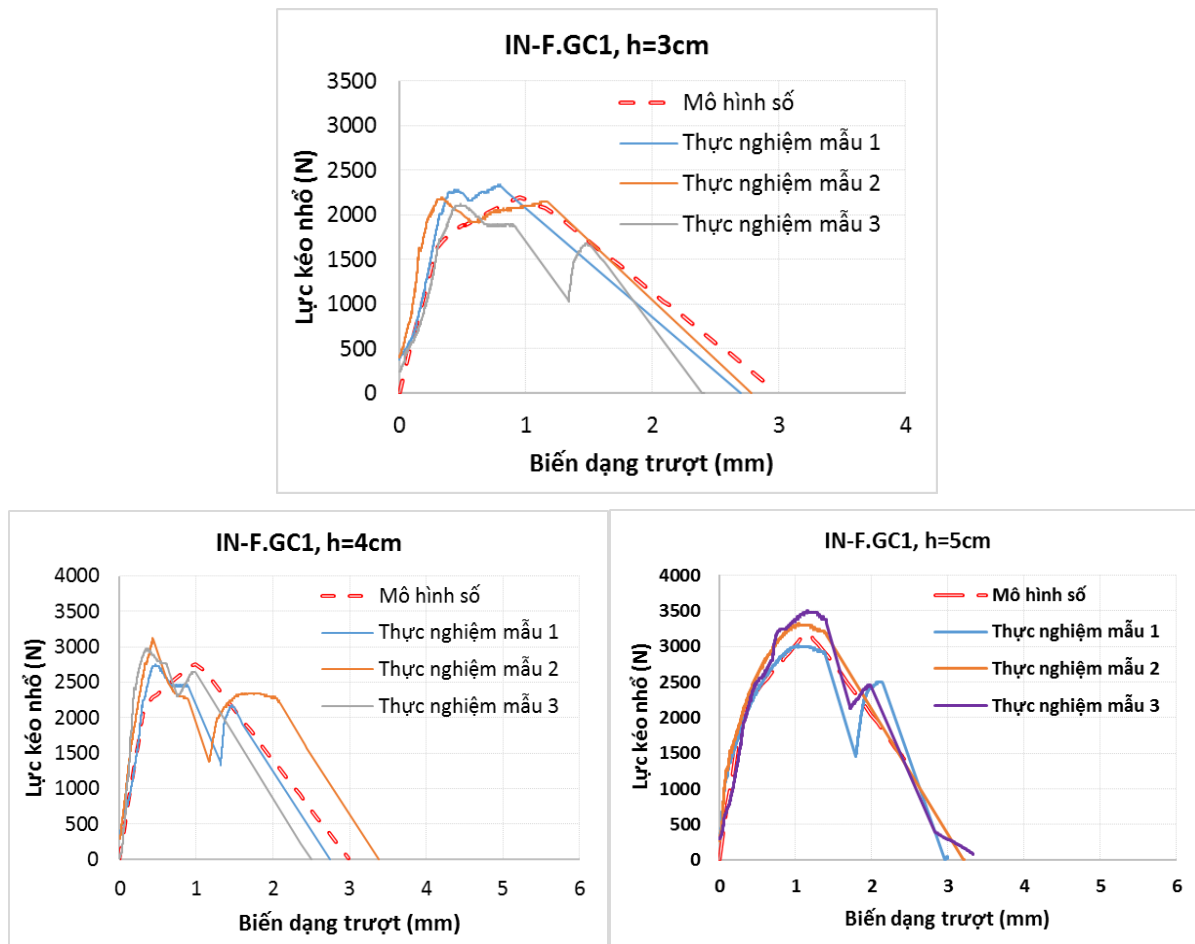
Bảng 2. Các tham số mô hình cho thí nghiệm kéo nhỏ mẫu IN-F.GC1.

τ_{\max}/τ_{tb}	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
τ_{\max} (N)	37,03	55,54	74,06	92,57	111,08	129,60	148,11	166,63	185,14	203,65	222,17
δ_0 (mm)	0,966										

Kết quả mô phỏng cho thấy, mô hình cho mẫu IN-F.GC1-3cm cho ra các đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt tùy thuộc vào giá trị τ_{\max} trong mô hình đã khai báo. Hình 6a giới thiệu các đường cong lực kéo nhỏ – biến dạng trượt tương ứng với 11 mức giá trị τ_{\max} , được trình bày trong Bảng 2. Giá trị τ_{\max} không làm thay đổi quá nhiều hình dạng của đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt. Nhưng khi cường độ lực dính quá lớn, thì các phần tử BTHM xung quanh sợi dệt sẽ bị phá hủy hoàn toàn trước và điều này làm cho phép tính lặp không hội tụ. Ứng xử kéo nhỏ của mẫu thu được sẽ bị mất đi phần cuối của đường cong như Hình 6a đối với trường hợp $\tau_{\max} = 6 \tau_{tb}$.



Hình 6. Ảnh hưởng của tham số τ_{max} đến kết quả mô phỏng số của mẫu IN-F.GC1-3cm.



Hình 7. So sánh kết quả thu được giữa thực nghiệm và mô phỏng số [32].

Biến thiên của lực kéo nhỏ cực đại phụ thuộc vào giá trị τ_{max} khai báo được giới thiệu trong Hình 6b. Theo kết quả này, lực kéo nhỏ tăng dần từ 590,5 N đến 3458,6 N khi tỷ số τ_{max}/τ_{tb} tăng từ 1 đến 6. Bằng phương pháp nội suy tuyến tính, tỷ số τ_{max}/τ_{tb} tương ứng với lực kéo nhỏ lớn nhất từ thực nghiệm (2221,67 N) là 3,79 lần. Giá trị τ_{max} đối với liên kết giữa các

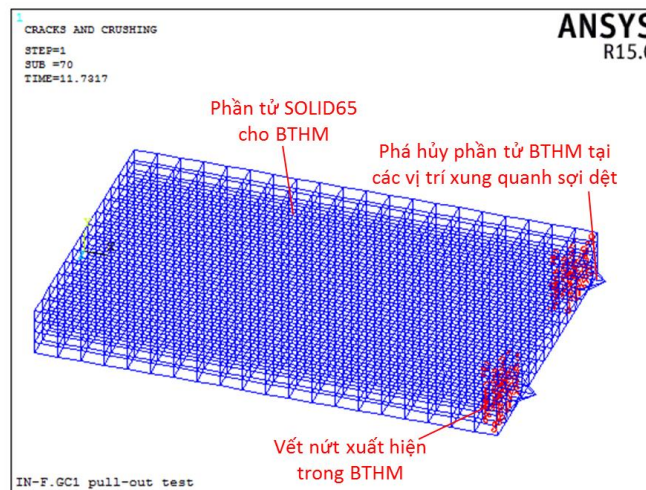
sợi dệt GC1 và BTHM là 140,38 N. Giá trị này được sử dụng làm lực liên kết tối đa trên một đơn vị chiều dài neo trong mô hình kéo nhỏ cho tất cả các mẫu IN-F.GC1.

3.2. Đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt

Mô hình số cho mẫu IN-F.GC1 – 3cm cho ra một đường cong quan hệ lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của liên kết CLD/BTHM theo dạng phi tuyến 3 đoạn, có sự suy giảm lực kéo nhỏ sau khi đạt đến giá trị tối đa. Hình 7 dưới đây giới thiệu sự so sánh giữa các kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu của Trần và cộng sự [32] và mô phỏng số về ứng xử kéo nhỏ của mẫu IN-F.GC1 với chiều dài neo 3 cm. Tương tự với các mẫu kéo nhỏ có chiều dài neo 4 cm và 5 cm, có thể nhận thấy sự tương đối phù hợp giữa hai kết quả thu được.

3.3. Dạng phá hủy mẫu

Mô hình số có thể cho ra dạng phá hủy đồng nhất trên các mẫu kéo nhỏ với các chiều dài neo khác nhau. Trên khối BTHM, có thể quan sát thấy sự phá hủy của các phần tử BTHM xung quanh CLD. Các phần tử BTHM (SOLID65) liên kết trực tiếp với phần tử CLD (LINK180) bị biến dạng mạnh trong khi các phần tử khác xung quanh (không được liên kết trực tiếp) cũng bị lực cắt phá hủy sinh ra vết nứt tại các vị trí này. Mô hình số có thể hiển thị các vết nứt trong khối BTHM tại các vị trí xung quanh CLD. Hình 8 dưới đây giới thiệu dạng phá hủy của mẫu thí nghiệm kéo nhỏ IN-F.GC1 và Hình 9 là dạng phá hủy quan sát được từ thực nghiệm.



Hình 8. Dạng phá hủy của mẫu thí nghiệm kéo nhỏ theo mô hình số.



Hình 9. Dạng phá hủy của mẫu thí nghiệm kéo nhỏ theo thực nghiệm.

4. THẢO LUẬN

4.1. Các đặc trưng cơ học của liên kết CLD/BTHM

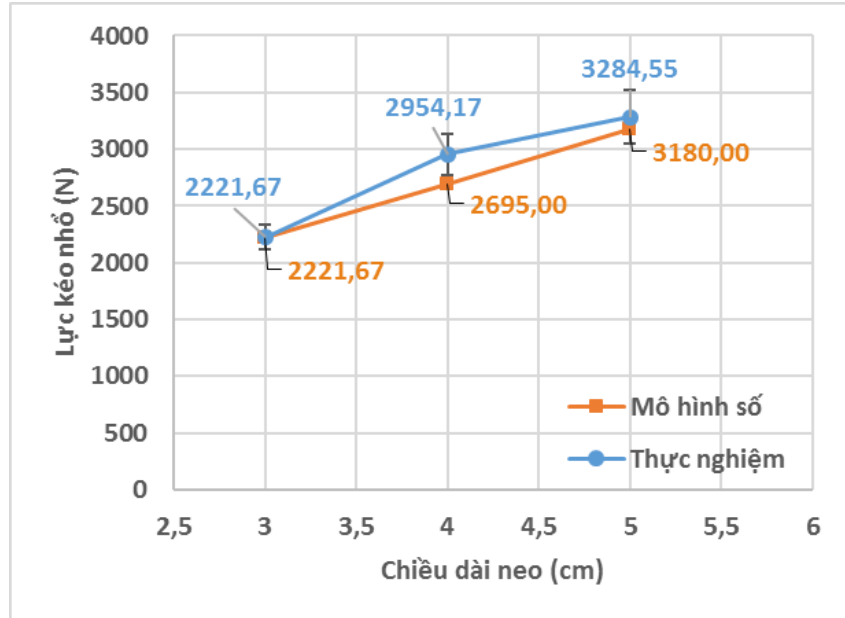
Các đặc trưng cơ học của liên kết giữa CLD và BTHM được xác định qua biểu đồ quan hệ giữa lực kéo nhỏ - biến dạng trượt. Hai thông số quan trọng nhất là lực kéo nhỏ lớn nhất (F_{max}) và biến dạng trượt tại đỉnh (δ). Các kết quả này được giới thiệu và so sánh với kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả [32] ở Bảng 3 dưới đây. Có thể thấy rằng, chiều dài neo tăng lên thì lực kéo nhỏ cực đại cũng tăng lên, khi chiều dài neo là 4 cm, lực kéo nhỏ cực đại là 2695 N (so với 2954 N ở thực nghiệm) và khi chiều dài neo là 5 cm, lực kéo nhỏ cực đại là 3180 N (so với 3285 N ở thực nghiệm). Các giá trị biến dạng trượt tại đỉnh thu được từ mô hình số cũng tương đối sát với kết quả thu được từ thực nghiệm.

Bảng 3. So sánh giữa lực kéo nhỏ thu được từ mô phỏng và thực nghiệm.

Mẫu – chiều dài neo	Kết quả	F_{max} (N)	δ (mm)
IN-F.GC1 - 3cm	Kết quả thực nghiệm	2222 N	0,966
	Kết quả mô phỏng	2221,67 N	0,996
IN-F.GC1 - 4cm	Kết quả thực nghiệm	2954 N	0,761
	Kết quả mô phỏng	2695 N	0,511
IN-F.GC1 - 5cm	Kết quả thực nghiệm	3285 N	1,075
	Kết quả mô phỏng	3180 N	1,149

4.2. Ảnh hưởng của chiều dài neo

Ảnh hưởng của chiều dài neo đã được phân tích từ nghiên cứu thực nghiệm trước đây của nhóm tác giả, đó là một xu hướng không tuyến tính mà có xu hướng tiệm cận với một đường thẳng song song với trục biến dạng [32]. Tuy nhiên, theo kết quả mô hình số, ảnh hưởng của chiều dài neo đến lực kéo nhỏ cực đại là gần như tuyến tính. Kết quả này có thể được giải thích bởi cường độ và mô đun đàn hồi quá lớn của CLD các bon. Khi liên kết với CLD các bon, sẽ có một số liên kết lò xo (COMBIN39) có hiệu theo chiều dài neo. Những liên kết lò xo này chịu chuyển tiếp lực kéo nhỏ từ CLD các bon sang các phần tử BTHM. Khi đạt đến trạng thái giới hạn, các lò xo này bị phá hủy gần như đồng thời do biến dạng của chúng là tương đồng nhau, làm cho lực kéo nhỏ giảm một cách nhanh chóng (trong giai đoạn cuối). Nguyên lý làm việc và phá hủy liên kết lò xo giữa CLD và BTHM là giống nhau cho mọi chiều dài neo khác nhau. Tuy nhiên, khi chiều dài neo tăng lên thì số lượng các liên kết lò xo có hiệu cũng tăng lên tương ứng, và do đó, lực kéo nhỏ cực đại trong các mẫu cũng tăng lên gần như tuyến tính. Hình 10 dưới đây so sánh ảnh hưởng của chiều dài neo đến lực kéo nhỏ cực đại theo kết quả thực nghiệm và mô phỏng số.



Hình 10. So sánh ảnh hưởng của chiều dài neo đến lực kéo nhỏ theo kết quả thực nghiệm và mô phỏng số.

5. KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu những kết quả mô phỏng số liên quan đến ứng xử kéo nhỏ của CLD các bon từ tấm BTHM với các chiều dài neo khác nhau. Theo kết quả mô phỏng thu được, một số kết luận có thể được rút ra cho nghiên cứu này như sau:

Sử dụng mô hình số với các đặc tính cơ học của các vật liệu thành phần có thể dự báo được ứng xử kéo nhỏ của CLD từ tấm BTHM. Các mô hình vật liệu sử dụng trong mô hình số đã phản ánh tương đối sát sự làm việc của vật liệu trên thực tế. Nhờ đó mà kết quả mô hình tương đối phù hợp với thực nghiệm từ đường cong quan hệ lực kéo nhỏ - biến dạng trượt đến dạng phá hủy của mẫu.

Cường độ dính bám lớn nhất (trong mô hình liên kết lò xo) không ảnh hưởng đến dạng đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt, nhưng lại làm thay đổi lực kéo nhỏ cực đại. Nghiên cứu tham số mô hình này cho phép chúng ta xác định được cường độ liên kết lò xo theo giá trị trung bình xác định từ thực nghiệm.

Ảnh hưởng của chiều dài neo đến lực kéo nhỏ cực đại là gần như tuyến tính theo kết quả mô hình số. Kết quả này là khác với những quan sát được từ kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, theo phân tích cơ cấu phá hủy của mô hình liên kết lò xo giữa CLD và BTHM thì kết quả mô phỏng số là chấp nhận được.

LỜI CẢM ƠN:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2022-MDA-08.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. Koncar, 1 - Introduction to smart textiles and their applications, in Smart Textiles and their Applications, V. Koncar, Ed., in Woodhead Publishing Series in Textiles, Oxford: Woodhead Publishing (2016) 1–8. <https://doi: 10.1016/B978-0-08-100574-3.00001-1>
- [2]. T. Gries, M. Raina, T. Quadflieg, O. Stolyarov, 1 - Manufacturing of textiles for civil engineering applications, in Textile Fibre Composites in Civil Engineering, T. Triantafillou, Ed., Woodhead Publishing (2016) 3–24. <https://doi: 10.1016/B978-1-78242-446-8.00002-1>
- [3]. Q. T. Shubhra, A. Alam, M. Quaiyum, Mechanical properties of polypropylene composites: A review, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 26 (3) (2013) 362–391. <https://doi: 10.1177/0892705711428659>
- [4]. R. Contamine, Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier : application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant, phdthesis, Université Claude Bernard - Lyon I, 2011.
- [5]. A. Peled, Bonds in textile-reinforced concrete composites, Textile Fibre Composites in Civil Engineering, (2016) 63–99. <https://doi: 10.1016/B978-1-78242-446-8.00005-7>
- [6]. A. Peled, A. Bentur, D. Yankelevsky, Effects of woven fabric geometry on the bonding performance of cementitious composites: Mechanical performance, Advanced cement based materials, 7 (1) (1998) 20–27. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00012-6)
- [7]. R. Barhum, V. Mechtcherine, Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading, Engineering Fracture Mechanics, 92 (2012) 56–71. <https://doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.06.001>
- [8]. M.-T. Tran, N.-T. Do, X.-H. Vu, A state of the art review of tensile behaviour of the textile reinforced concrete composite, Transport and Communications Science Journal, 72 (1) (2021) 135–150. <https://doi: 10.47869/tcsj.72.1.15>
- [9]. F. Teklal, A. Djebbar, S. Allaoui, G. Hivet, Y. Joliff, B. Kacimi, A review of analytical models to describe pull-out behavior – Fiber/matrix adhesion, Composite Structures, 201 (2018) 791–815. <https://doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.091>
- [10]. M. R. Piggott, P. S. Chua, D. Andison, The interface between glass and carbon fibers and thermosetting polymers, Polymer Composites, 6 (4) (1985) 242–248. <https://doi: 10.1002/pc.750060409>
- [11]. B. Mu, C. Meyer, S. Shimanovich, Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix, Cement and Concrete Research, 32 (5) (2002) 783–787. [https://doi: 10.1016/S0008-8846\(02\)00715-9](https://doi: 10.1016/S0008-8846(02)00715-9)
- [12]. J. Jiang, C. Jiang, B. Li, P. Feng, Bond behavior of basalt textile meshes in ultra-high ductility cementitious composites, Composites Part B: Engineering, 174 (2019) 107-022. <https://doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107022>
- [13]. F. de A. Silva, M. Butler, S. Hempel, R. D. Toledo Filho, V. Mechtcherine, Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete, Cement and Concrete Composites, 48 (2014) 26–34. <https://doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.007>
- [14]. M.-T. Tran, X.-H. Vu, E. Ferrier, Experimental and numerical investigation of carbon textile/cementitious matrix interface behaviour from pull-out tests, Construction and Building Materials, 282 (2021) 1226-34. <https://doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122634>
- [15]. M. Zhu, J. H. Zhu, T. Ueda, M. Su, F. Xing, A method for evaluating the bond behavior and anchorage length of embedded carbon yarn in the cementitious matrix, Construction and Building Materials, 255 (2020) 1190-67. <https://doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119067>

- [16]. M. Zhu, J. H. Zhu, T. Ueda, K. Matsumoto, M. Su, Bond behavior of carbon fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites considering matrix impregnation, *Composite Structures*, 262 (2021) 1133-50. <https://doi:10.1016/j.compstruct.2020.113350>
- [17]. M.-T. Tran, *Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du comportement thermomécanique à haute température des matériaux composites renforcés par des fibres*, phdthesis, Université de Lyon, 2019.
- [18]. M. Lu, H. Xiao, M. Liu, X. Li, H. Li, L. Sun, Improved interfacial strength of SiO₂ coated carbon fiber in cement matrix, *Cement and Concrete Composites*, 91 (2018) 21–28. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.04.007>
- [19]. S. R. Ferreira, F. de A. Silva, P. R. L. Lima, R. D. Toledo Filho, Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 730–740. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>
- [20]. E. Grande, G. Milani, Interface modeling approach for the study of the bond behavior of FRCM strengthening systems, *Composites Part B: Engineering*, 141 (2018) 221–233. <https://doi:10.1016/j.compositesb.2017.12.052>
- [21]. Z. I. Djamai, M. Bahrar, F. Salvatore, A. Si Larbi, M. El Mankibi, Textile reinforced concrete multiscale mechanical modelling: Application to TRC sandwich panels, *Finite Elements in Analysis and Design*, 135 (2017) 22–35. <https://doi:10.1016/j.finel.2017.07.003>
- [22]. A. Dalalbashi, B. Ghiassi, D. V. Oliveira, A. Freitas, Effect of test setup on the fiber-to-mortar pull-out response in TRM composites: Experimental and analytical modeling, *Composites Part B: Engineering*, 143 (2018) 250–268. <https://doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.010>
- [23]. G. Mazzucco, T. D’Antino, C. Pellegrino, V. Salomoni, Three-dimensional finite element modeling of inorganic-matrix composite materials using a mesoscale approach, *Composites Part B: Engineering*, 143 (2018) 75–85. <https://doi:10.1016/j.compositesb.2017.12.057>
- [24]. Cao Minh Quyền, Chuyên đề 1: Nghiên cứu thực nghiệm xác định một số tính chất cơ học của bê tông cốt lưới sợi, Báo cáo chuyên đề NCS, Trường ĐH Giao thông vận tải, 2021.
- [25]. Lê Minh Cường và cộng sự, Nghiên cứu chế tạo và xác định các đặc tính cơ học và độ bền của bê tông hạt mịn tính năng cao cốt lưới dệt ứng dụng trong công trình cầu, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ GD và ĐT mã số CTB2014-04-03, 2018.
- [26]. Nguyễn Huy Cường, Ngô Đăng Quang, Vũ Văn Hiệp, Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử dính bám giữa lưới sợi các-bon với các loại bê tông hạt mịn sử dụng cát quartz và cát biển, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 59 (2017).
- [27]. Huỳnh Xuân Ba, Phạm Duy Hữu, 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, 2017.
- [28]. Nguyễn Huy Cường, Vũ Văn Hiệp, Lê Đức Dũng, Nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt, 2018.
- [29]. Nguyễn Thị Nhung, Phân tích sự phá hoại chọc thủng của bản bê tông cốt thép được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt, Báo cáo tổng kết đề tài Thạc sỹ, 2019.
- [30]. Bùi Thị Loan, Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của kết cấu sandwich tường gạch-bê tông cốt lưới dệt dưới tác dụng của tải trọng trong mặt phẳng, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Trường GTVT mã số T2018-XD-005, 2018.
- [31]. Ngô Đăng Quang và cộng sự, Nghiên cứu ứng dụng bê tông cốt lưới dệt trong tăng cường kết cấu bê tông cốt thép ở vùng biển và hải đảo, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ GD và ĐT mã số B2018-GHA-16, 2019.

- [32]. Trần Mạnh Tiến, Vũ Xuân Hồng, E. Ferrier, Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử kéo nhỏ lưới sợi dệt các bon từ tấm bê tông cốt sợi, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 15 (2021) 173-183. [https://doi: 10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(6V\)-15](https://doi: 10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(6V)-15).
- [33]. Nguyễn Thanh Hải, Nghiên cứu thực nghiệm xác định cường độ dính bám của bê tông cát biển với cốt lưới dệt sợi các bon, Báo cáo tổng kết đề tài, 2018.
- [34]. ANSYS, Mechanical APDL Element Reference, ANSYS Inc, 14 (2011).
- [35]. K. J. William, E. P. Warnke, Constitutive model for the triaxial behavior of concrete, Int,” in Association of Bridge and Structural Engineers, Seminar on Concrete Structure Subjected to Triaxial Stresses, Paper III-1, Bergamo, Italy, 1975.