

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ KÉO NHỎ LƯỚI SỢI DỆT CÁC BON TỪ TẤM BÊ TÔNG CỐT SỢI

Trần Mạnh Tiến<sup>a,b,\*</sup>, Vũ Xuân Hồng<sup>c</sup>, Emmanuel Ferrier<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ – Địa chất, 18 Phố Viên, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

<sup>b</sup>Thành viên nhóm nghiên cứu mạnh địa kỹ thuật, vật liệu, và phát triển bền vững, Trường Đại học Mỏ – Địa chất, 18 Phố Viên, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

<sup>c</sup>Phòng thí nghiệm vật liệu Composite cho xây dựng, Đại học Lyon1, Pháp

Nhận ngày 07/10/2021, Sửa xong 14/10/2021, Chấp nhận đăng 15/10/2021

---

## Tóm tắt

Một yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến ứng xử cơ học và cường độ của bê tông cốt lưới sợi dệt (vật liệu Composite TRC) là cường độ liên kết giữa bê tông hạt mịn và lưới cốt sợi dệt. Bài báo này giới thiệu những kết quả thực nghiệm liên quan đến ứng xử kéo nhỏ lưới cốt sợi dệt các bon từ tấm bê tông cốt lưới sợi. Trong nghiên cứu này, lưới cốt sợi dệt các bon được thấm nhập bằng nhựa epoxy để tăng độ bền, độ cứng cũng như độ dính bám với bê tông. Kết quả cho thấy, liên kết bề mặt giữa hai lớp vật liệu lưới cốt sợi dệt các bon/ bê tông hạt mịn cho ra một ứng xử phi tuyến bao gồm các giai đoạn làm việc khác nhau: giai đoạn làm việc hoàn hảo (đường tuyến tính), giai đoạn bắt đầu phá vỡ liên kết, và giai đoạn phá hủy. Giá trị cường độ liên kết trung bình cũng được xác định dựa vào đồ thị lực kéo nhỏ - biến dạng trượt giữa lưới cốt sợi dệt các bon và khối bê tông hạt mịn. Ảnh hưởng của việc xử lý bề mặt lưới cốt sợi các bon bằng keo epoxy đến ứng xử kéo nhỏ và dạng phá hủy mẫu cũng được làm sáng tỏ. Ngoài ra, ảnh hưởng của chiều dài neo lưới các bon trong tấm bê tông đến các đặc tính của liên kết cũng được phân tích.

*Từ khóa:* bê tông cốt lưới sợi dệt; ứng xử kéo nhỏ; đường cong lực kéo nhỏ - chuyển vị; chiều dài neo.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PULL-OUT BEHAVIOUR OF CARBON TEXTILE FROM TEXTILE -REINFORCED CONCRETE COMPOSITE PLATE

## Abstract

An important factor that influences the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) composite is the bond strength of the textile/cementitious matrix interface. This paper presents the results of pull-out tests performed on carbon textile/ cementitious matrix interface specimens. In this experimental study, the carbon textile was pre-impregnated with epoxy resin to improve the mechanical properties of textile yarns as well as the bonding strength to concrete. As result, all interface specimens gave a typical behaviour as shown in the literature with the phases: perfect bonding phase and debonding phase. The average bonding strength is also identified from the pull-out force–slip curves between carbon textile and cementitious matrix block. The effect of carbon textile treatment with epoxy resin on pull-out behaviour and failure mode of interface specimens was also highlighted. In addition, the effect of the embedded length of the carbon textile in the concrete plat on the bonding capacity was also analyzed.

*Keywords:* textile – reinforced concrete (TRC); textile/matrix interface; pull-out behaviour; embedded length.

© 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

---

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tranmanhtien@humg.edu.vn (Tiến, T. M.)

## 1. Đặt vấn đề

Trong một thập kỷ trở lại đây, vật liệu bê tông cốt sợi sợi dệt (Composite TRC) đã được nghiên cứu ứng dụng và chuyển giao công nghệ trong lĩnh vực xây dựng công trình. Vật liệu Composite này vừa đảm bảo cường độ cao vừa đảm bảo tính phát triển bền vững, thân thiện với môi trường [1–4]. Các đặc trưng cơ học của nó như cường độ kéo và độ cứng được xác định thông qua các thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc uốn 3 điểm. Kết quả cho ra một ứng xử phi tuyến qua nhiều giai đoạn làm việc khác nhau, có xuất hiện nứt rồi tái bền và phụ thuộc rất nhiều yếu tố đến từ lưới cốt sợi dệt, bê tông hạt mịn, và môi trường [5–8]. Một yếu tố khác có ảnh hưởng rất lớn đến các giá trị đặc trưng cơ học của bê tông cốt sợi dệt là cường độ dính bám giữa cốt lưới sợi dệt và bê tông hạt mịn. Nhờ vào liên kết này mà việc phân bố nội lực giữa các lưới cốt sợi cũng như giữa chúng với lớp nền bê tông hạt mịn được diễn ra có hiệu quả. Điều này làm tăng sự đóng góp về mặt cơ học của lớp nền bê tông hạt mịn trong ứng xử tổng thể của bê tông cốt lưới sợi dệt. Ngược lại, sự yếu kém của độ bền liên kết giữa hai thành phần trên dẫn đến ứng xử cơ học của bê tông cốt lưới sợi giống như của lưới sợi gia cường [9, 10]. Do đó, trong quá trình sản xuất lưới cốt sợi dệt, chúng thường được xử lý bằng các sản phẩm khác nhau (bột cát, bụi silic, các loại keo như epoxy, styrene, ...) theo các phương pháp khác nhau (gia nhiệt, xử lý khô, xử lý ướt, ...) nhằm nâng cao tính dính bám với bê tông [11].

Về lý thuyết, cường độ dính bám giữa hai lớp vật liệu được hình thành từ ba thành phần chính: sự dính bám cơ học (neo cơ học), sự dính bám vật lý (lực hấp phụ, liên kết thứ cấp, lực Van de Waal, liên kết tĩnh điện, v.v.), và sự dính bám hóa học (liên kết hóa học, liên kết hóa trị) [12]. Để xác định cường độ dính bám giữa lưới cốt sợi dệt và bê tông hạt mịn, thí nghiệm kéo nhỏ (pull-out test) được sử dụng và cho hiệu quả cao nhất [13]. Dưới tác dụng của lực kéo lên cốt sợi, liên kết dính bám giữa hai lớp vật liệu bị phá hủy thông qua ứng suất tiếp trên bề mặt, nhờ đó mà cường độ dính bám này được xác định.

Trên thế giới, tương đối nhiều tác giả đã nghiên cứu nhằm xác định cường độ dính bám giữa cốt sợi và bê tông hạt mịn từ thí nghiệm kéo nhỏ cốt sợi. Ferreira và cs. [14, 15] đã nghiên cứu ảnh hưởng của loại cốt sợi tự nhiên cũng như phương pháp xử lý sợi đến cường độ liên kết với lớp nền gốc xi măng. Trong những nghiên cứu này, sợi sisal đã được xử lý theo nhiều phương pháp khác nhau như ngâm nước và gia nhiệt, xử lý kiềm, và ngâm tẩm với keo epoxy. Kết quả của các thử nghiệm kéo nhỏ cho thấy, khi so sánh với các mẫu sợi sisal tự nhiên, sự cải thiện đáng kể trong cường độ liên kết giữa hai loại vật liệu. Với việc xử lý bằng kiềm, các thành phần vô định hình được loại bỏ khỏi bề mặt của sợi, làm tăng độ thô của bề mặt sợi từ đó tăng liên kết với bê tông hạt mịn. Với việc xử lý bằng ngâm tẩm trong polymer, cường độ của từng sợi sisal được cải thiện đáng kể đồng thời làm tăng diện tích tiếp xúc của liên kết, gián tiếp làm tăng cường độ liên kết với bê tông hạt mịn. Trong những nghiên cứu mới đây của Lu và cs. [16], Tran và cs. [11], phương pháp xử lý sợi các bon bằng bột silica vô định hình cũng cải thiện đáng kể cường độ lực dính giữa cốt sợi các bon với bê tông hạt mịn. Với phương pháp này, trong quá trình thủy hóa xi măng sẽ xảy ra phản ứng hóa học giữa  $\text{SiO}_2$  và sản phẩm hydrat hóa xi măng ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) để tạo ra các keo sản phẩm C-S-H trên bề mặt của sợi các bon, từ đó làm tăng cường độ liên kết. Trong nghiên cứu của Lu và cs. [16], liên kết hóa học này làm tăng cường độ lực dính và năng lượng phá hủy của mẫu lên lần lượt là 3 và 10 lần so với mẫu không được xử lý.

Qua khảo sát, phần lớn các kết quả thực nghiệm đều cho ra một ứng xử phi tuyến tương đối phức tạp theo các giai đoạn làm việc: giai đoạn liên kết hoàn hảo, giai đoạn phá hủy liên kết, giai đoạn trượt giữa hai loại vật liệu [17, 18]. Ngoài ra, kết quả thực nghiệm cho thấy việc xử lý bề mặt giữa sợi (hoặc lưới sợi) và lớp nền gốc xi măng là yếu tố chính giúp tạo ra một độ bền cao cũng như giá trị ứng suất khi xuất hiện vết nứt của bê tông cốt lưới sợi [15, 17]. Một số sản phẩm được sử dụng có hiệu quả như phủ polymer, bột silica, ... Các sản phẩm xử lý này đã cải thiện đáng kể độ bền liên kết giữa sợi (hoặc

lưới sợi) và lớp nền bê tông hạt mịn thông qua sự thay đổi tích cực của ba thành phần dính bám chính. Hạn chế của những nghiên cứu trước đây về cường độ dính bám giữa lưới cốt sợi và bê tông hạt mịn là chỉ sử dụng một bó sợi để xác định cường độ lực dính bám, chưa đánh giá được cho cả một lưới như trong trường hợp vật liệu Composite TRC. Ngoài ra, chúng cũng chưa đánh giá được ảnh hưởng của các bó sợi ngang trong lưới đến việc neo giữ lưới sợi dệt trong khối bê tông hạt mịn.

Ở Việt Nam, một số tác giả đã thực hiện thí nghiệm kéo nhỏ lưới cốt sợi dệt từ khối bê tông hạt mịn nhằm xác định cường độ dính bám giữa hai loại vật liệu. Quyền và cs. [19] đã tiến hành các thí nghiệm cần thiết để so sánh cường độ dính bám giữa bê tông hạt mịn có thành phần cấp phối cát tự nhiên với lưới cốt sợi các bon Sigratex Grid 350 và lưới cốt sợi thủy tinh SIT Grid200. Kết quả cho thấy, cường độ dính bám trung bình là 2,4 MPa và 2,93 MPa, lần lượt cho 2 loại lưới cốt sợi. Từ đó, tác giả đã đề xuất giá trị chiều dài neo có hiệu của lưới cốt sợi thủy tinh trong bê tông hạt mịn là 140 mm. Một số tác giả đã đề xuất sử dụng cát biển để làm thành phần cấp phối trong bê tông hạt mịn và xem xét ảnh hưởng của hàm lượng muối trong cát đến cường độ dính bám giữa lưới sợi dệt các bon và các loại bê tông hạt mịn [20, 21]. Tuy nhiên, do điều kiện thực nghiệm có hạn nên những thí nghiệm này mới cho ra cường độ lực dính bám, mà chưa đưa ra được đường cong lực – chuyển vị phù hợp của liên kết bề mặt giữa hai loại vật liệu.

Theo hiểu biết của tác giả, rất hạn chế các nghiên cứu thực nghiệm xác định được ứng xử cơ học và cường độ lực liên kết giữa cả lưới cốt sợi dệt và bê tông hạt mịn trong vật liệu Composite TRC. Do đó, bài báo này giới thiệu những kết quả thực nghiệm liên quan đến ứng xử kéo nhỏ cả lưới cốt sợi dệt các bon từ tấm bê tông cốt lưới sợi. Lưới cốt sợi dệt các bon được sử dụng trong nghiên cứu này là một sản phẩm thương mại, được xử lý bề mặt bằng cách ngâm tẩm trong keo epoxy nhằm cải thiện cường độ kéo của sợi và tăng cường độ dính bám với bê tông. Để đánh giá được ảnh hưởng của chiều dài neo của lưới cốt sợi dệt trong khối bê tông hạt mịn đến cường độ dính bám, tác giả đã sử dụng ba kích thước là 3 cm, 4 cm, và 5 cm. Thí nghiệm kéo nhỏ được tiến hành trên các mẫu thí nghiệm, trong đó, chuyển vị trượt tương đối giữa lưới cốt sợi dệt các bon và khối bê tông hạt mịn được đo bằng cảm biến chuyển vị LVDT (Linear Variable Differential Transducer), nhờ đó mà có thể xác định được các đường cong lực kéo nhỏ - chuyển vị trượt.

## 2. Nghiên cứu thực nghiệm

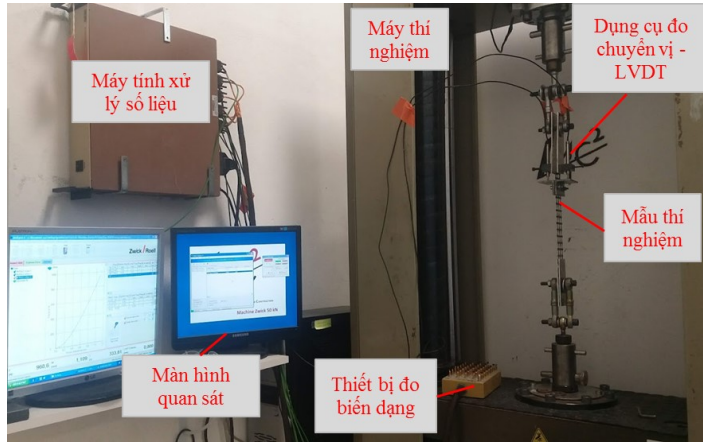
### 2.1. Thiết bị thí nghiệm

#### a. Máy thí nghiệm

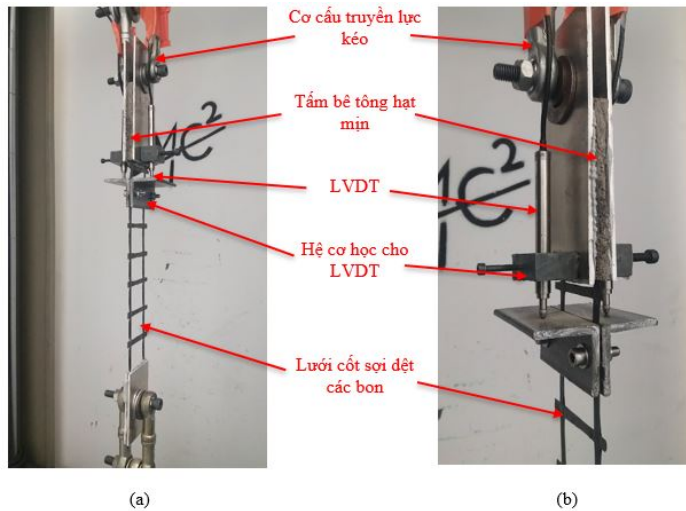
Máy thử nghiệm được sử dụng là máy kéo nén vạn năng, có khả năng cho ra lực kéo nén lên đến 65 kN. Máy thí nghiệm này được trang bị thêm một thiết bị đo có thể kết nối được với các dụng cụ đo khác nhau (cảm biến điện trở hoặc LVDT) để đo biến dạng hoặc dịch chuyển tương đối giữa hai điểm của mẫu (Hình 1). Lực kéo nhỏ được điều khiển bởi dịch chuyển thẳng đứng (100  $\mu\text{m}$ /phút) của đầu kéo nhờ vào chương trình điều khiển trong hệ thống máy tính. Trong quá trình thí nghiệm, dữ liệu, bao gồm lực kéo nhỏ và dịch chuyển của đầu kéo, được ghi lại ít nhất hai lần trên 1 giây và sau đó có thể được xuất dưới dạng tệp dữ liệu để phân tích kết quả.

#### b. Dụng cụ đo chuyển vị - LVDT

Dụng cụ đo chuyển vị, LVDT - Linear Variable Differential Transducer, được sử dụng trong nghiên cứu này để đo chuyển vị trượt tương đối giữa lưới cốt sợi dệt các bon và tấm bê tông. Hai LVDT được cố định trên hai bề mặt của tấm bê tông hạt mịn bằng một hệ thống cơ học. Một hệ thống khác cũng được cố định trên lưới cốt sợi dệt các bon ở vị trí sát với tấm bê tông (Hình 2(b)). Điều này đảm



bảo sự biến dạng không đáng kể của lưới sợi dệt các bon giữa hai hệ thống cơ học. Do đó, sự dịch chuyển thu được từ các thiết bị LVDT là sự trượt tương đối của lưới cốt sợi dệt các bon và khối bê tông. Hình 2 dưới đây thể hiện sự bố trí các đầu đo LVDT trên mẫu cho các thí nghiệm kéo nhỏ.



## 2.2. Mẫu thí nghiệm

### a. Vật liệu sử dụng

Bê tông xi măng hạt mịn sử dụng trong nghiên cứu này được thiết kế với điều kiện phòng thí nghiệm để tạo ra các mẫu bê tông cốt lưới sợi dệt các bon như trong nghiên cứu trước đây của các tác giả [22]. Nó bao gồm cốt liệu tổng hợp silico-aluminous-calcic, chứa khoảng 40% alumin, thu được bằng cách nấu chảy, kết hợp với xi măng mà về cơ bản bao gồm các aluminat canxi tạo thành chất kết dính cho các ứng dụng đặc biệt. Hàm lượng canxi aluminat cao của loại xi măng này (khoảng 50%) mang lại cho bê tông tính năng cơ học tốt. Đường kính tối đa của cốt liệu là 1,25 mm. Để tăng tính

công tác của bê tông, một lượng nhỏ phụ gia siêu dẻo và chất điều chỉnh độ nhót đã được thêm vào trong thành phần của nó. Tỷ lệ nước/xi măng được sử dụng là 0,35. Các tính chất cơ học của bê tông hạt mịn được xác định bởi các thí nghiệm nén trực tiếp và kéo uốn tại 3 điểm theo tiêu chuẩn Châu Âu BS EN 196-1. Bảng 1 dưới đây giới thiệu các đặc tính cơ học của bê tông hạt mịn ở 28 ngày.

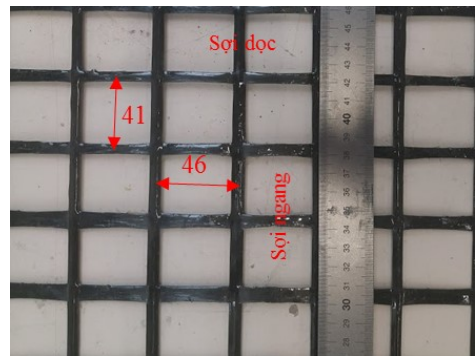
Bảng 1. Các đặc trưng cơ học của bê tông hạt mịn [22]

Đặc trưng cơ học của bê tông hạt mịn	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Nén trực tiếp (BS EN 196-1, 2005)	58,1 MPa	2,5 MPa
Kéo uốn (BS EN 196-1, 2005)	12,5 MPa	1,04 MPa
Mô đun đàn hồi	8,41 GPa	1,14 GPa

Lưới sợi dệt các bon được sản xuất công nghiệp theo dạng lưới và bán trên thị trường theo từng cuộn như Hình 3. Kích thước của lưới theo hướng dọc và ngang là 46 mm × 41 mm. Tiết diện của các sợi (sợi dọc cũng như sợi ngang) là 1,85 mm<sup>2</sup>. Nhờ có một lớp phủ nhựa epoxy, loại lưới sợi dệt các bon này có các đặc tính tốt: không bị ăn mòn, dễ xử lý và sử dụng, cường độ và mô đun đàn hồi cao khi kéo, và có liên kết cơ học đáng kể với bê tông. Các đặc trưng cơ lý của lưới cốt sợi dệt các bon được tổng hợp trong Bảng 2.



(a) Cuộn lưới cốt sợi dệt các bon



(b) Kích thước lưới sợi dệt các bon

Hình 3. Lưới cốt sợi các bon được sử dụng trong nghiên cứu

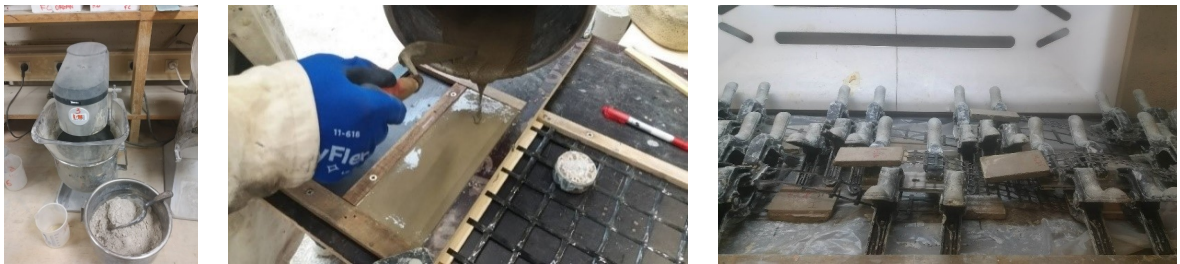
Bảng 2. Các đặc trưng cơ lý của lưới cốt sợi dệt [22]

Đặc trưng cơ lý	Giá trị
Cường độ kéo (MPa)	2617
Mô đun đàn hồi (GPa)	256
Khối lượng riêng (g/cm <sup>3</sup> )	3,43
Kích thước lưới (mm × mm)	46 × 41
Loại xử lý bề mặt	Nhựa epoxy
Tiết diện sợi dệt (mm <sup>2</sup> )	1,85



**b. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm**

Các mẫu cho thí nghiệm kéo nhỏ được chế tạo trong điều kiện phòng thí nghiệm và được gọi là IN-F.GC1 trong nghiên cứu này. Việc chuẩn bị các mẫu thí nghiệm được thực hiện bằng kỹ thuật theo quy trình sau: Đầu tiên, trộn vữa bê tông bằng thiết bị trộn theo quy trình. Sau đó, các tấm bê tông hình chữ nhật có kích thước 100 mm × 300 mm × 10 mm (dài × rộng × dày) được đúc với các chiều dài khác nhau được neo vào của lưới sợi dệt các bon trong đó. Chiều dài neo được thay đổi từ 3 cm đến 5 cm đối với các mẫu IN-F.GC1. Khoảng chiều dài neo khảo sát này được lựa chọn phụ thuộc vào hai yếu tố: khoảng cách giữa hai sợi ngang trong lưới và khoảng cách giữa hai vết nứt liên tiếp xuất hiện trên mẫu bê tông cốt lưới sợi dệt tương ứng khi bị phá hủy. Sau 14 ngày, mỗi tấm mẫu được cắt (bao gồm cả bê tông và lưới sợi dệt các bon), để thu được các mẫu có kích thước khối bê tông hạt mịn là 100 mm × 65 mm × 10 mm (chiều dài × rộng × dày). Cả hai đầu của mẫu được dán với các tấm nhôm (bằng keo eponal 380) để truyền tải trọng kéo lên các mẫu kéo nhỏ. Cuối cùng, tất cả các mẫu đều được dán nhãn cho các thử nghiệm ở 28 ngày tuổi.



(a) Chuẩn bị bê tông

(b) Đổ bê tông

(c) Cắt, bảo dưỡng và dán nhãn

Hình 4. Các bước chuẩn bị mẫu thí nghiệm

**c. Tổng hợp mẫu thí nghiệm**

Các mẫu thí nghiệm trong nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp các mẫu thí nghiệm

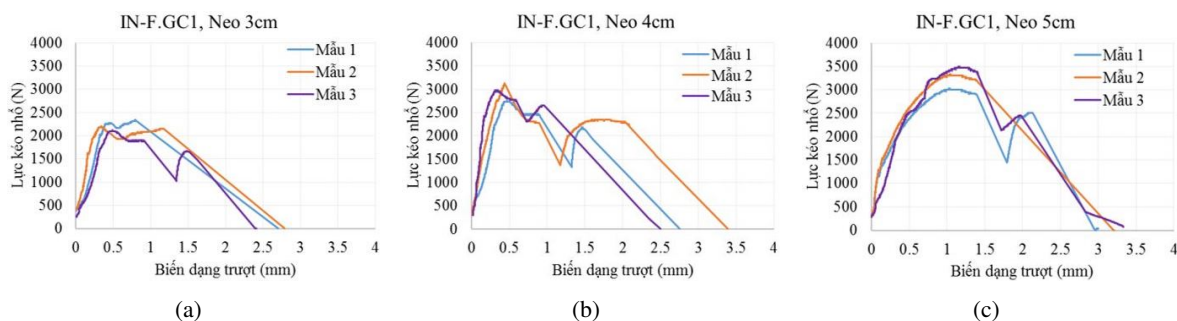
Mẫu	Kích thước [dài×rộng×dày (mm <sup>3</sup> )]	Chiều dài neo (mm)	Số lượng mẫu
IN-F.GC1 – 3 cm (1,2,3)	100 × 65 × 10	30	3
IN-F.GC1 – 4 cm (1,2,3)		40	3
IN-F.GC1 – 5 cm (1,2,3)		50	3
<b>Tổng cộng</b>			<b>9</b>

**3. Kết quả thí nghiệm**

*3.1. Quan hệ lực kéo nhỏ – biến dạng trượt*

Hình 5 dưới đây thể hiện quan hệ giữa lực kéo nhỏ và biến dạng trượt tương đối giữa lưới cốt sợi dệt các bon và tấm bê tông hạt mịn. Kết quả cho thấy các mẫu thí nghiệm, mặc dù có chiều dài neo của lưới cốt sợi dệt các bon khác nhau, nhưng vẫn cho ra cùng một dạng ứng xử phi tuyến gồm các

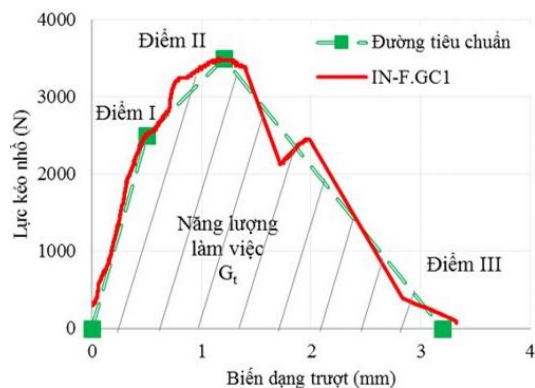
nhiều giai đoạn làm việc khác nhau. Ở giai đoạn đầu, đường quan hệ giữa lực kéo nhỏ và biến dạng trượt tương đối thẳng và dốc, có nghĩa là độ cứng của liên kết giữa hai lớp vật liệu làm hạn chế biến dạng trượt giữa chúng. Giai đoạn tiếp theo, đường cong phi tuyến xuất hiện tương ứng với sự phá hủy ở cấp độ vi mô của liên kết, thậm chí bắt đầu có sự phá hủy liên kết giữa lưới cốt sợi và bê tông hoặc là có sự xuất hiện những vết nứt vi mô trong bê tông lân cận vùng liên kết. Giai đoạn cuối, là một sự suy giảm về giá trị bằng không của lực kéo nhỏ tương ứng với tăng lên nhanh chóng biến dạng trượt. Điều này tương ứng với sự phá hủy một cách đột ngột của mẫu IN-F.GC1 được quan sát sau thí nghiệm. Ngoài ra, trong các giai đoạn làm việc cũng có xuất hiện những sự phá hủy cục bộ của liên kết giữa lưới cốt sợi các bon và bê tông thể hiện qua những đường lên xuống của lực kéo nhỏ trên đường cong quan hệ lực – biến dạng trượt.



Hình 5. Quan hệ lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của các mẫu thí nghiệm

### 3.2. Các đặc trưng cơ học của liên kết

Để xác định được các đặc trưng cơ học của liên kết giữa lưới cốt sợi các bon với bê tông, cần xây dựng đường cong tiêu chuẩn cho tất cả các trường hợp chiều dài neo khác nhau. Dựa vào những phân tích ở 3.1, có thể đưa ra đường cong tiêu chuẩn với 3 giai đoạn làm việc: giai đoạn liên kết cứng hoàn toàn, giai đoạn bắt đầu phá hủy liên kết, và giai đoạn phá hủy hoàn toàn. Hình 6 dưới đây giới thiệu đường cong tiêu chuẩn lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của các mẫu thí nghiệm IN-F.GC1. Các điểm I, II, III trên đường cong tiêu chuẩn được xác định tương ứng là điểm bắt đầu phá hủy, phá hủy vi mô và phá vỡ toàn liên kết. Lực kéo nhỏ lớn nhất được xác định bằng giá trị lực tương ứng với điểm II. Giá trị lực kéo nhỏ trung bình trên một đơn vị chiều dài ( $T_{tb}$ ) được xác định bằng tỷ số giữa lực kéo nhỏ lớn nhất với chiều dài neo của lưới cốt sợi dệt các bon trong bê tông. Năng lượng phá hủy của liên kết được xác định bằng công của lực tác dụng, được xác định qua diện tích miền giới hạn bởi đường cong “lực kéo nhỏ - biến dạng trượt” và trục biến dạng (Hình 6). Dựa vào cách xác định như trên, các đặc trưng cơ học của liên kết được xác định cho các trường hợp chiều dài neo và được giới thiệu trong Bảng 4.



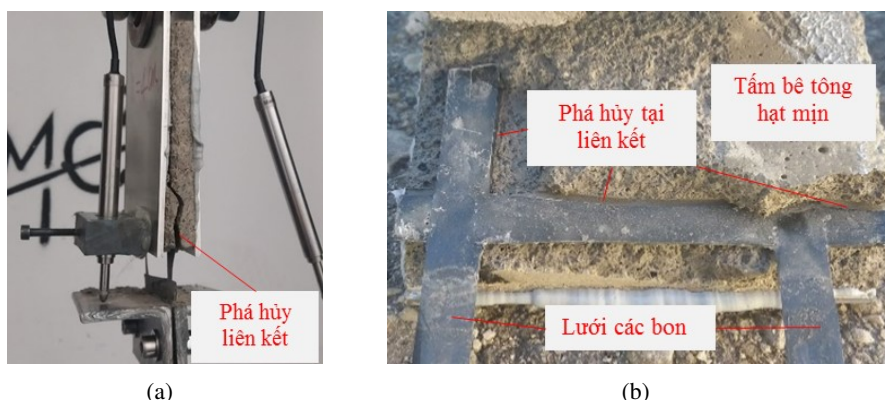
Hình 6. Đường cong tiêu chuẩn lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của các mẫu IN-F.GC1

Bảng 4. Các đặc trưng cơ học của liên kết giữa lưới cốt sợi các bon và bê tông

Mẫu thí nghiệm	Điểm I		Điểm II		Điểm III		$G_t$ (N.mm)	$T_{ib}$ (N/mm)
	Lực (N)	Biến dạng (mm)	Lực (N)	Biến dạng (mm)	Lực (N)	Biến dạng (mm)		
IN-F.GC1, $h = 3$ cm-1	2200	0,361	2340	0,796	0,00	2,721	3636,80	78,00
IN-F.GC1, $h = 3$ cm-2	1995	0,235	2200	1,172	0,00	2,751	3936,67	73,33
IN-F.GC1, $h = 3$ cm-3	1900	0,389	2125	0,929	0,00	2,431	3052,18	70,83
Giá trị trung bình	2032	0,328	2222	0,966	0,00	2,634	3541,88	74,06
Độ lệch chuẩn	153	0,082	109	0,191	0,00	0,177	449,82	3,64
%	7,55	24,98	4,91	19,74	-	6,71	12,70	4,91
IN-F.GC1, $h = 4$ cm-1	2015	0,255	2763	0,822	0,00	2,785	4322,73	69,06
IN-F.GC1, $h = 4$ cm-2	2250	0,215	3125	0,785	0,00	3,445	5930,00	78,13
IN-F.GC1, $h = 4$ cm-3	2400	0,205	2975	0,675	0,00	2,565	4320,50	74,38
Giá trị trung bình	2222	0,225	2954	0,761	0,00	3,190	4857,74	73,85
Độ lệch chuẩn	194	0,026	182	0,076	0,00	0,465	928,60	4,55
%	8,73	11,76	6,17	10,05	-	14,58	19,12	6,17
IN-F.GC1, $h = 5$ cm-1	2075	0,225	3025	1,040	0,00	3,498	6029,41	60,50
IN-F.GC1, $h = 5$ cm-2	2250	0,325	3501	1,150	0,00	3,258	6427,63	70,02
IN-F.GC1, $h = 5$ cm-3	2250	0,235	3328	1,037	0,00	3,455	6523,90	66,55
Giá trị trung bình	2192	0,262	3285	1,075	0,00	3,404	6326,98	65,69
Độ lệch chuẩn	101	0,055	241	0,064	0,00	0,128	262,16	4,82
%	4,61	21,05	7,34	5,96	-	3,76	4,14	7,34

### 3.3. Hình thái phá hoại mẫu

Hình 7 thể hiện hình ảnh phá hoại của mẫu IN-F.GC1 sau khi bị phá hủy (Hình 7(a)) và khi bỏ đi lớp bê tông bên ngoài (Hình 7(b)). Có thể thấy rằng, các mẫu thí nghiệm bị phá hủy chủ yếu do lớp bê tông bao quanh liên kết với lưới cốt sợi dệt các bon bị nứt ra, đồng thời do năng lượng làm việc lớn



Hình 7. Dạng phá hủy của các mẫu IN-F.GC1



dẫn đến sự giải phóng liên kết một cách đột ngột. Điều này có thể thấy trong giai đoạn thứ 3, lực kéo nhỏ giảm về giá trị bằng không một cách đột ngột đồng thời mẫu được tách ra thành hai phần. Có thể thấy rằng, nhờ vào lớp nhựa xử lý bề mặt lưới cốt sợi, cường độ liên kết giữa nó với bê tông là tương đối tốt, liên kết chỉ bị phá hủy khi lớp bê tông xung quanh bị phá hủy.

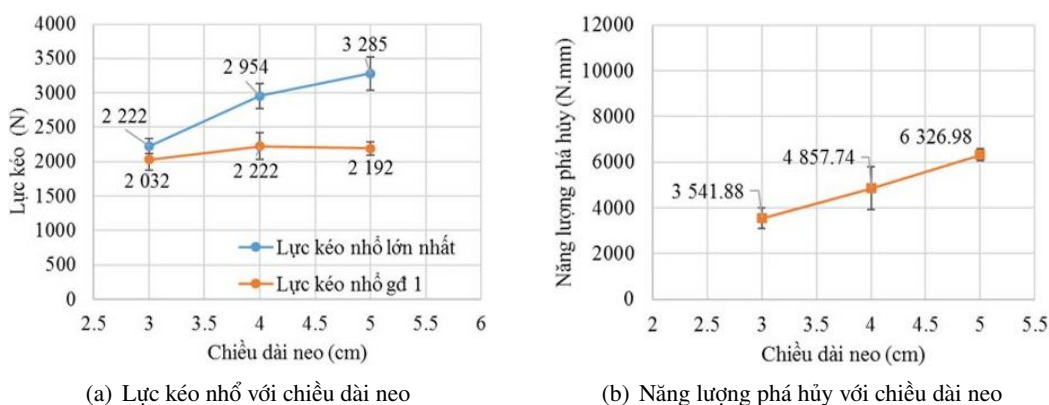
#### 4. Thảo luận

##### 4.1. Ảnh hưởng của xử lý sợi bằng keo epoxy

Khi xem xét các đường cong lực kéo nhỏ - biến dạng trượt của các mẫu IN-F.GC1 so với đường cong theo lý thuyết được đưa ra trong phần đặt vấn đề, có thể thấy sự khác biệt là không có giai đoạn ma sát giữa hai lớp vật liệu trước khi mẫu bị phá hủy (Hình 5). Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi lý do từ việc xử lý lưới cốt sợi dệt các bon bằng cách ngâm tẩm chúng trong keo epoxy. Việc xử lý này cải thiện rất lớn độ cứng và độ bền của lưới dệt các bon, do đó có thể coi biến dạng do lực kéo trong lưới cốt sợi dệt các bon là không đáng kể. Vì vậy, khi lực kéo nhỏ tăng đến một giá trị nào đó, liên kết giữa lưới các bon với tấm bê tông hạt mịn gần như bị phá vỡ cùng một lúc dọc theo chiều dài neo. Hơn nữa, khi quan sát dạng phá hủy của mẫu IN-F.GC1, nhận thấy toàn bộ phần bê tông phía ngoài liên kết bị bong bật ra (Hình 7(a)). Đây là kết quả của quá trình giải phóng năng lượng  $G_f$  kết hợp với sự xuất hiện vết nứt vi mô của các vùng bê tông hạt mịn lân cận liên kết. Điều này chứng tỏ cường độ liên kết giữa lưới sợi các bon và bê tông được cải thiện đáng kể do lớp phủ epoxy này và dẫn tới bê tông lân cận liên kết chịu các ứng suất cắt từ lực kéo nhỏ. Các lý do trên đây dẫn đến một sự phá hủy giòn trong giai đoạn cuối so với một sự phá hủy chậm rãi do ma sát trượt giữa hai lớp vật liệu.

##### 4.2. Ảnh hưởng của chiều dài neo đến các đặc trưng cơ học của liên kết

Đối với ảnh hưởng của chiều dài neo đến các đặc tính của liên kết, có thể thấy rằng lực kéo nhỏ lớn nhất tăng dần khi chiều dài neo tăng lên. Tuy nhiên, xu hướng này không phải là tuyến tính mà phi tuyến có xu hướng tiệm cận với một đường thẳng song song với trục biến dạng. Qua khảo sát ở những nghiên cứu trước đây [13], khi chiều dài neo dài hơn một giá trị giới hạn nào đó, giá trị của lực kéo nhỏ không còn phụ thuộc vào chiều dài neo nữa mà phụ thuộc vào những yếu tố khác như cường độ của sợi hoặc bê tông hạt mịn. Kết quả này cho thấy, chiều dài neo có hiệu của lưới cốt sợi các bon GC1 trong bê tông hạt mịn là lớn hơn 5cm.



Hình 8. Ảnh hưởng của chiều dài neo đến các đặc tính của liên kết

Quan sát Hình 8(a), có thể thấy việc tăng chiều dài neo dẫn tới việc kéo dài giai đoạn phá hủy của liên kết, thể hiện qua khoảng cách giữa hai giá trị lực kéo nhỏ được tăng lên. Ảnh hưởng của chiều dài neo đến giá trị năng lượng phá hủy của liên kết được thể hiện trong Hình 8(b). Theo đó, sự gia tăng một cách tuyến tính giá trị này được thấy đối với các mẫu IN-F.GC1, từ 3541,88 N.mm với chiều dài neo bằng 3 cm đến 6326,98 N.mm đối với chiều dài neo 5 cm.

## 5. Kết luận

Bài báo giới thiệu những kết quả thực nghiệm liên quan đến ứng xử kéo nhỏ của lưới sợi dệt các bon trong tấm bê tông hạt mịn với các chiều dài neo khác nhau. Theo kết quả thực nghiệm thu được, một số kết luận có thể được rút ra cho nghiên cứu này như sau:

Liên kết dính bám giữa lưới cốt sợi các bon và tấm bê tông hạt mịn cho ra ứng xử phi tuyến gồm các giai đoạn làm việc khác nhau với tất cả các mẫu có chiều dài neo khác nhau, từ liên kết cứng hoàn toàn rồi bắt đầu mềm dần và cuối cùng phá hủy một cách đột ngột.

Các đặc tính của liên kết giữa lưới dệt các bon neo trong bê tông hạt mịn có thể được xác định từ các đường cong quan hệ lực kéo nhỏ - biến dạng trượt, bao gồm lực và biến dạng trượt tương ứng với các điểm đặc trưng trên đường cong, năng lượng phá hủy liên kết, và cường độ trung bình của liên kết trên một đơn vị chiều dài neo.

Ảnh hưởng của việc xử lý lưới các bon bằng keo epoxy cũng được làm rõ qua sự cải thiện độ bền và độ cứng của lưới sợi các bon và sự phá hủy mẫu một cách đột ngột của mẫu, dẫn tới không có giai đoạn trượt giữa hai lớp vật liệu như trong các đường cong thông thường.

Liên quan đến ảnh hưởng của chiều dài neo đến các đặc tính cơ học của liên kết, có thể thấy rằng giá trị này tăng lên làm kéo dài giai đoạn phá hủy liên kết thể hiện qua khoảng cách giữa các lực kéo nhỏ tăng lên. Ngoài ra, năng lượng phá hủy cũng tăng lên một cách gần như tuyến tính với chiều dài neo.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ tài chính và trang thiết bị vật tư của phòng thí nghiệm Vật liệu Composite cho ngành Xây dựng (LMC2) – ĐH Lyon 1 cho các thử nghiệm và sự hỗ trợ tài chính của Bộ Giáo dục & Đào tạo Việt Nam cho tác giả chính của bài báo.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Contamine, R., Larbi, A. S., Hamelin, P. (2011). [Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete \(TRC\) composites](#). *Materials Science and Engineering: A*, 528(29-30):8589–8598.
- [2] Mobasher, B., Dey, V., Cohen, Z., Peled, A. (2014). [Correlation of constitutive response of hybrid textile reinforced concrete from tensile and flexural tests](#). *Cement and Concrete Composites*, 53:148–161.
- [3] Soranakom, C., Mobasher, B. (2008). [Correlation of tensile and flexural responses of strain softening and strain hardening cement composites](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(6):465–477.
- [4] Du, Y., Zhang, M., Zhou, F., Zhu, D. (2017). [Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading](#). *Construction and Building Materials*, 138:88–100.
- [5] Contamine, R. (2011). *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*. PhD thesis, Université Claude Bernard-Lyon I.
- [6] Peled, A. (2016). Bonds in textile-reinforced concrete composites. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier, 63–99.

- [7] Peled, A., Bentur, A., Yankelevsky, D. (1998). [Effects of Woven Fabric Geometry on the Bonding Performance of Cementitious Composites: Mechanical Performance](#). *Advanced Cement Based Materials*, 7(1): 20–27.
- [8] Barhum, R., Mechtcherine, V. (2012). [Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour of textile-reinforced concrete under tensile loading](#). *Engineering Fracture Mechanics*, 92:56–71.
- [9] Manh, T. T., Ngoc, T. D., Xuan, H. V. (2021). [A state-of-the art review of tensile behavior of the textile-reinforced concrete composite](#). *Transport and Communications Science Journal*, 72(1):127–142.
- [10] Tien, T. M., Vu, X. H., Lam, D. P., Tho, P. D. (2021). [A 3-D finite element modeling for the textile-reinforced concrete plates under tensile load using a non-linear behaviour for cementitious matrix](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(1):67–78.
- [11] Tran, M. T., Vu, X. H., Ferrier, E. (2021). [Experimental and numerical investigation of carbon textile/cementitious matrix interface behaviour from pull-out tests](#). *Construction and Building Materials*, 282: 122634.
- [12] Hallonet, A. (2016). *Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin: application au renforcement de structures en béton par collage externe*. PhD thesis, Université de Lyon.
- [13] Teklal, F., Djebbar, A., Allaoui, S., Hivet, G., Joliff, Y., Kacimi, B. (2018). [A review of analytical models to describe pull-out behavior – Fiber/matrix adhesion](#). *Composite Structures*, 201:791–815.
- [14] Ferreira, S. R., Pepe, M., Martinelli, E., de Andrade Silva, F., Filho, R. D. T. (2018). [Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices](#). *Composites Part B: Engineering*, 140:183–196.
- [15] Ferreira, S. R., de Andrade Silva, F., Lima, P. R. L., Filho, R. D. T. (2015). [Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems](#). *Construction and Building Materials*, 101:730–740.
- [16] Lu, M., Xiao, H., Liu, M., Li, X., Li, H., Sun, L. (2018). [Improved interfacial strength of SiO<sub>2</sub> coated carbon fiber in cement matrix](#). *Cement and Concrete Composites*, 91:21–28.
- [17] de Andrade Silva, F., Butler, M., Hempel, S., Filho, R. D. T., Mechtcherine, V. (2014). [Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 48:26–34.
- [18] Zhandarov, S., Mäder, E. (2005). [Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters](#). *Composites Science and Technology*, 65(1):149–160.
- [19] Quyền, C. M., Huy, N. X., Khương, L. N., Giang, N. H. (2021). Ảnh hưởng của hình dạng tiết diện đến hiệu quả gia cường cột ngắn bê tông bằng bê tông cốt lưới dệt. *Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học vật rắn lần thứ XV*.
- [20] Cường, N. H., Quang, N. Đ., Hiệp, V. V. (2017). Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử dính bám giữa lưới sợi cac-bon với các loại bê tông hạt mịn sử dụng cát quartz và cát biển. *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 59.
- [21] Hải, N. T. (2018). *Nghiên cứu thực nghiệm xác định cường độ dính bám của bê tông cát biển với cốt lưới dệt sợi cac bon*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp cơ sở, Đại học Giao thông vận tải Hà Nội.
- [22] Tran, M. T., Vu, X. H., Ferrier, E. (2019). [Mesoscale experimental investigation of thermomechanical behaviour of the carbon textile reinforced refractory concrete under simultaneous mechanical loading and elevated temperature](#). *Construction and Building Materials*, 217:156–171.