

ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU TRÚC VÀ SỐ LỚP LƯỚI ĐẾN SỨC KHÁNG KÉO CỦA BÊ TÔNG CỐT LƯỚI SỢI DỆT THỦY TINH

Trương Văn Đoàn^{a,*}, Trần Trung Hiếu^b, Ngô Trí Thường^c, Vũ Quốc Anh^b, Đặng Văn Phi^d

^aPhân hiệu tại Bình Dương, Trường Đại học Thủy lợi, số 175 Tây Sơn, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội, Km 10 Nguyễn Trãi, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

^cKhoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, số 175 Tây Sơn, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

^dKhoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ địa chất, số 18 Phố Viên, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 26/02/2025, Sửa xong 31/3/2025, Chấp nhận đăng 06/5/2025

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày kết quả thực nghiệm xác định ứng xử ứng suất kéo - biến dạng của bê tông gia cường lưới sợi dệt thủy tinh (GTRCCs) có xét đến ảnh hưởng của cấu trúc lưới và số lớp lưới sợi. Kết quả thực nghiệm cho thấy, quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của GTRCCs là ứng xử ba giai đoạn bao gồm giai đoạn tuyến tính, giai đoạn hình thành vết nứt, và giai đoạn mở rộng vết nứt. Cường độ kéo của mẫu bê tông GTRCCs tăng khoảng 58-68% khi số lớp lưới sợi thủy tinh tăng từ 1 đến 2 lớp. Bê tông GTRCCs sử dụng lưới sợi thủy tinh với các bó sợi dọc tự do (cấu trúc 1) có sức kháng kéo lớn hơn khoảng 18-25% so với bê tông GTRCCs sử dụng lưới sợi thủy tinh với các bó sợi dọc bị thắt chặt bởi các sợi chỉ dò (cấu trúc 2) với cùng số lớp lưới gia cường.

Từ khóa: bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh; ứng suất kéo; biến dạng; số lớp lưới; cấu trúc lưới sợi.

EFFECT OF LAYER NUMBER AND TEXTILE STRUCTURES ON TENSILE BEHAVIOR OF GLASS TEXTILE REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

Abstract

This study experimentally investigated the stress versus strain response of glass textile reinforced cementitious composites (GTRCCs), regarding to the effects of layer number and textile structures. The results showed that tensile stress versus strain curves of GTRCCs was a trilinear behavior characterized by 3 stages including elastic, crack development, and crack opening stages. The tensile resistance of GTRCCs increased by 58-68%, as layer number increased from 1 to 2 layers. GTRCCs using glass textile having longitudinal yarns without stitches (structure 1) produced higher tensile resistance (approximately 18-25%) than GTRCCs using glass textile having longitudinal yarns tightened by stitches (structure 2), as using the same number of layers.

Keywords: glass textile reinforced cementitious composites; tensile stress; strain; number of layers; textile structures.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-08) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Vật liệu bê tông cốt lưới sợi dệt TRCCs (textile reinforced cementitious composites), một loại vật liệu tiên tiến thuộc nhóm composites có gốc xi măng, sử dụng lưới sợi dệt liên tục để làm chất gia cố trong bê tông hạt mịn (BTHM) [1–6]. TRCCs thể hiện các đặc trưng cơ học như cường độ, độ chống mài mòn, chống cháy cao, độ bền, độ dẻo lớn, chiều dày sử dụng nhỏ, nên có thể giảm trọng lượng công trình và giảm lượng khí carbonic và lượng nhiệt tỏa ra do quá trình thủy hóa xi măng trong bê tông [1–6]. TRCCs có khả năng tăng cường kết cấu bê tông rất hiệu quả, bao gồm tăng cường khả năng chịu uốn, chịu cắt, và chịu nén. TRCCs được sử dụng để xây dựng các công trình kiến trúc phức tạp như kết cấu vòm của các tòa nhà thương mại [7], cấu kiện dạng tấm hoặc để gia cường cấu trúc bê

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: doantv@tlu.edu.vn (Đoàn, T. V.)

tông như cột, vỏ hầm [8–10], hoặc tăng cường sửa chữa các kết cấu hạ tầng bị suy giảm độ bền theo thời gian do ăn mòn, hỏa hoạn, động đất [11].

Lưới sợi dệt được làm thành từ những sợi nhỏ, có nguồn gốc từ sợi tự nhiên như sợi gai, sợi đay, sợi lanh, sisal, sợi vải, basalt, hoặc có nguồn gốc từ sợi tổng hợp như sợi thủy tinh, carbon, aramid, Kevlar, polyethylene, polypropylene, polyvinyl alcohol [12]. So sánh với các loại lưới sợi dệt khác, lưới sợi dệt thủy tinh (glass textile) có đủ cường độ dính bám trong BTHM, do vậy lưới sợi dệt thủy tinh phát huy tối đa hiệu quả chất gia cường trong bê tông gia cố cốt lưới sợi dệt thủy tinh (GTRCCs) [2, 5, 12–16].

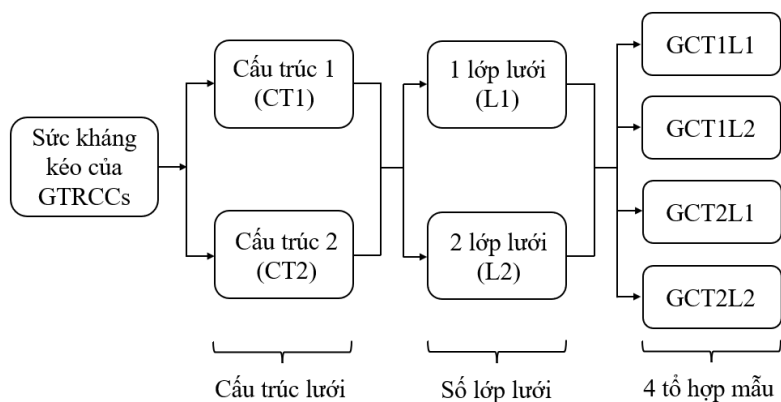
Để tăng cường khả năng chịu kéo của kết cấu, các loại vật liệu có cường độ, tính dẻo cao và khả năng hấp thụ năng lượng lớn nên được phát triển [5, 15]. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, càng nhiều lớp lưới gia cường được sử dụng, độ cứng và cường độ của bê tông gia cường TRCCs đạt được càng cao [2, 3, 17, 18]. Triantafyllou [11] kết luận rằng hiệu quả gia cường khả năng chịu nén và tính dẻo của kết cấu cột bê tông cốt thép tăng cường bằng lớp áo TRCCs phụ thuộc vào số lớp lưới sử dụng và thành phần của bê tông hạt mịn. Các nghiên cứu [19–22] cũng khẳng định khả năng tăng cường kết cấu của TRCCs tăng khi số lớp lưới gia cường tăng. Các đặc trưng về loại lưới sợi và cấu trúc lưới sợi cũng ảnh hưởng lớn đến khả năng tăng cường kết cấu của TRCCs [12, 23]. Peled và cs. [12, 23] cho thấy rằng, các sợi chỉ và dây liên kết dọc theo các bó sợi của lưới sợi bao quanh và bó chặt các bó sợi, do đó giảm diện tích tiếp xúc giữa bó sợi và BTHM, giảm khả năng xâm nhập của BTHM vào các khe hở giữa các bó sợi dọc và ngang, vào khe hở giữa các sợi nano bên ngoài bó sợi, dẫn đến giảm lực dính tổng thể của lưới sợi trong BTHM. Tuy nhiên, các nghiên cứu ở trên chỉ đánh giá hiệu quả tăng cường của TRCCs, trong khi các tính chất cơ lý của chúng cần được hiểu rõ hơn. Vì vậy các nghiên cứu thực nghiệm về sức kháng cơ học của TRCCs là cần thiết.

Bài báo này nghiên cứu ứng xử cơ học của GTRCCs. Lưới sợi thủy tinh G và BTHM được sử dụng để chuẩn bị mẫu GTRCCs. Các mẫu thí nghiệm được chế tạo với số lớp lưới khác nhau và cấu trúc lưới khác nhau. Thí nghiệm kéo trực tiếp được thực hiện để xác định quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của GTRCCs. Từ kết quả thí nghiệm, ảnh hưởng của số lớp lưới và cấu trúc của lưới sợi thủy tinh đến khả năng chịu kéo của GTRCCs cũng được đánh giá.

2. Chương trình thí nghiệm

2.1. Sơ đồ chương trình thí nghiệm

Một chương trình thí nghiệm được thiết kế để đánh giá khả năng kháng kéo của GTRCCs như thể hiện trong Hình 1. Tổng cộng có 4 tổ hợp mẫu đã được chế tạo và thí nghiệm để đánh giá ảnh hưởng



Hình 1. Sơ đồ chương trình thí nghiệm

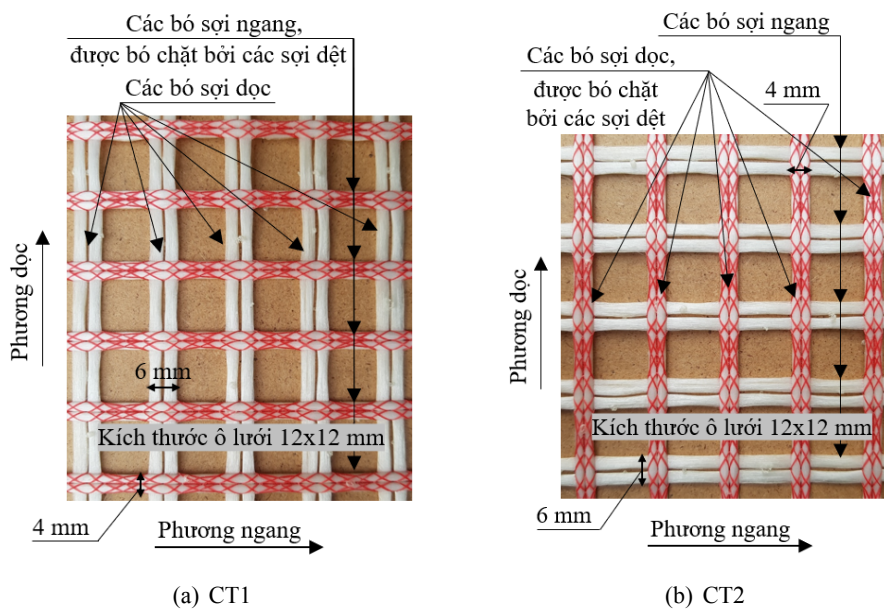
của số lớp lưới sợi (hoặc hàm lượng lưới sợi) và cấu trúc của lưới sợi thủy tinh đến khả năng kháng kéo của GTRCCs. Số lớp lưới được dùng để chế tạo mẫu bao gồm 1 lớp (L1) và 2 lớp (L2). Lưới sợi thủy tinh (G) với 2 loại cấu trúc lưới bao gồm cấu trúc 1 (CT1) và cấu trúc 2 (CT2) được sử dụng làm chất gia cường trong BTHM.

2.2. Vật liệu

Thành phần cấp phối của BTHM thể hiện trong Bảng 1, được thiết kế theo những nghiên cứu trước đây [2, 3, 5, 15, 16, 24, 25]. Thành phần chủ yếu trong BTHM là cát hạt mịn có đường kính trung bình của hạt 0,5 mm. Xi măng loại 1 có độ mịn $3630 \text{ cm}^2/\text{g}$ được sử dụng. Phụ gia hóa dẻo Polycarboxylate có chứa 25% thể rắn và 75% thể nước làm tăng tính công tác của BTHM. Cường độ chịu nén của BTHM là 71 MPa, được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C109 [26].

Bảng 1. Tỷ lệ khối lượng các thành phần cấp phối của BTHM

Xi măng	Cát	Nước	Phụ gia hóa dẻo
1	1,5	0,45	0,0009



Hình 2. Lưới sợi thủy tinh với các cấu trúc khác nhau

Lưới sợi dệt được sử dụng làm chất gia cường trong BTHM là lưới sợi được chế tạo từ sợi thủy tinh. Khi gia cường lưới sợi thủy tinh được trải dài theo chiều dài của mẫu. Để xác định hướng gia cường tốt nhất của lưới sợi, các tấm lưới được cắt thành từng lớp trải dài theo 2 hướng khác nhau và được đặt tên là CT1 và CT2, như thể hiện ở Hình 2. Các bó sợi đơn dọc và bó sợi đơn ngang được kết từ hàng ngàn sợi rất bé có kích thước nano (filaments). Trước khi kết nối thành lưới, các bó sợi đơn được nhà sản xuất xử lý bề mặt bằng một lớp styrene butadine để làm tăng độ kết dính giữa các sợi nano hạt nhân bên trong và các sợi nano ở lớp bên ngoài. Mỗi bó sợi của cả hai phương dọc và ngang đều được kết hợp bởi 2 bó sợi đơn. Lưới sợi dệt thủy tinh được chế tạo bằng cách dán các bó sợi dọc và bó sợi ngang với nhau, sau đó được thắt chặt lại bởi các sợi dệt thủy tinh màu đỏ. Các bó sợi dọc của CT2 được thắt chặt bởi các sợi dệt (Hình 2(a)), nhưng ngược lại các bó sợi dọc của CT1

thì không bị thắt chặt bởi các sợi dệt mà được để tự do (Hình 2(b)). Kích thước mỗi ô lưới hình vuông là 12×12 (mm).

Bảng 2 liệt kê các tính chất cơ học của lưới sợi dệt thủy tinh. Mô đun đàn hồi của bó sợi và tỷ trọng của lưới sợi được cung cấp bởi nhà sản xuất, trong khi lực kéo đứt của lưới sợi được xác định dựa trên thí nghiệm kéo theo tiêu chuẩn KS K 0521:2017 [27] cho dải lưới có bề rộng 60 mm chứa 3 bó sợi dọc giống như kích thước lưới sợi tại khu vực đo biến dạng (gauge length) của mẫu thí nghiệm. Kích thước ô lưới của lưới sợi 12×12 (mm) đảm bảo cho BTHM lọt qua một cách dễ dàng. Giao điểm giữa bó sợi dọc và sợi ngang đóng vai trò là điểm neo làm tăng lực dính bám và chống lại sự trượt của các bó sợi dọc của lưới sợi vào BTHM. Vì bề rộng các bó sợi theo phương dọc và ngang là khác nhau trong khi kích thước ô lưới giống nhau, do đó số lượng các bó sợi ngang của mỗi lớp lưới là khác nhau. Sau khi được cắt thành từng lớp, mỗi lớp lưới sợi cấu trúc CT1 có 31 bó sợi ngang hình thành nên 145 điểm neo với các bó sợi dọc trong khi mỗi lớp lưới sợi CT2 có 29 bó sợi ngang và 135 số điểm neo tương ứng.

Bảng 2. Tính chất cơ lý của cốt lưới sợi dệt

Cấu trúc lưới	Lực kéo đứt của lưới sợi		Mô đun đàn hồi của bó sợi (MPa)	Tỷ trọng (kg/m ³)	Bề rộng bó sợi dọc hữu hiệu (mm)	Số điểm neo của lớp lưới sợi (điểm)
	Phương dọc (N)	Phương ngang (N)				
CT1	4600	5100	1200	2680	4	145
CT2	5100	4600	1200	2680	6	135

Hàm lượng theo thể tích của lưới sợi được tính toán dựa trên số lớp lưới sử dụng trong mẫu GTRCCs, được thể hiện ở Bảng 3. Mặc dù kích thước ô lưới của 2 loại lưới CT1 và CT2 là giống nhau, tuy nhiên bề rộng và cấu trúc của các bó sợi dọc và ngang là khác nhau, dẫn đến hàm lượng theo thể tích của CT1 và CT2 là khác nhau. Nhìn vào Bảng 3 có thể thấy hàm lượng theo thể tích sợi của CT1 là lớn hơn CT2 khi sử dụng cùng số lớp lưới tương ứng.

Bảng 3. Số lớp lưới và hàm lượng theo thể tích của lưới sợi trong GTRCCs

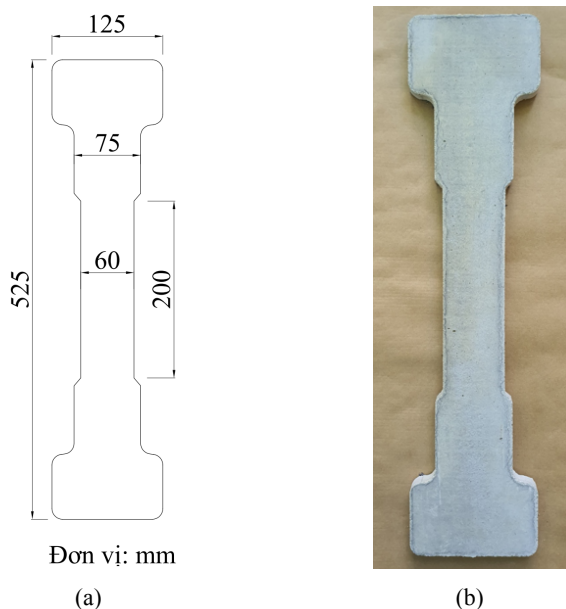
Tổ hợp mẫu	Loại cấu trúc lưới sợi	Số lớp lưới (lớp)	Hàm lượng theo thể tích lưới sợi (%)
GCT1L1	CT1	1	1,47
GCT1L2	CT1	2	2,94
GCT2L1	CT2	1	1,43
GCT2L2	CT2	2	2,86

2.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Máy trộn với dung tích 20 lít được dùng để trộn hỗn hợp vữa xi măng. Đầu tiên, vật liệu thành phần được cân đo đúng tỷ lệ khối lượng. Cát mịn và xi măng được trộn khô trong thùng trộn trong khoảng 10 phút. Nước trộn phụ gia hóa dẻo được đổ vào thùng trộn và tiến hành trộn hỗn hợp liên tục trong 5-10 phút nữa. Toàn bộ nước và phụ gia được chia làm 3 lần đổ, đảm bảo dung dịch được trộn đều trong hỗn hợp BTHM. Độ dẻo của hỗn hợp bê tông tươi được kiểm tra trước khi tiến hành đúc mẫu.

Hình 3 thể hiện kích thước, hình dạng của mẫu bê tông hình xương chó (dog-boned shape), được đề xuất cho vật liệu bê tông gia cường cốt lưới sợi dệt trong nghiên cứu trước đây [2], và được áp dụng trong nghiên cứu này. Theo các nghiên cứu trước đây [1, 2, 28, 29], phần mở rộng ở hai đầu mẫu làm

tăng diện tích tiếp xúc giữa lưới sợi, do đó góp phần tăng cường độ lực dính của lưới sợi và BTHM. Trước khi đổ bê tông, lưới sợi dệt thủy tinh được cắt thành từng lớp phù hợp khuôn đúc mẫu. Để thuận tiện trong quá trình đúc mẫu và rút ngắn thời gian chuẩn bị mẫu thí nghiệm, lưới sợi được đặt tự do trong BTHM. Việc đúc mẫu này là không ảnh hưởng đến kết quả thí nghiệm bởi vì độ cứng của lưới sợi thủy tinh là rất lớn và tất cả các bó sợi của lưới không bị uốn cong trước khi đúc. Lớp bê tông tươi đầu tiên được rót trực tiếp vào khuôn với thể tích bằng một nửa thể tích của khuôn và làm bằng phẳng bề mặt. Sau đó, lớp lưới sợi dệt thủy tinh được đặt trên bề mặt lớp bê tông thứ nhất và ấn nhẹ xuống để làm tăng khả năng dính bám của lưới sợi với BTHM. Sau khi đặt lưới sợi, lớp bê tông thứ hai được rót vào cho đến khi đầy khuôn thì làm phẳng bề mặt. Đối với các tổ hợp mẫu sử dụng 2 lớp lưới, quá trình đổ bê tông và đặt lớp lưới thứ hai vào cũng tương tự như lớp lưới thứ nhất, tuy nhiên phải đảm bảo chiều dày các lớp bê tông bên ngoài bằng chiều dày lớp bê tông giữa 2 lớp lưới. Trong quá trình đúc mẫu, khuôn chứa bê tông được đặt trên bàn rung với chế độ rung nhẹ để vữa BTHM lọt qua các ô lưới, xâm nhập vào khe hở giữa các bó sợi và khe hở giữa các sợi nano bên ngoài bó sợi. Vì lưới sợi ở dạng lớp lưới nên lưới sợi không bị chìm xuống sâu trong BTHM dưới tác dụng của chế độ rung nhẹ. Do vậy chiều dày của các lớp BTHM được đảm bảo một cách tương đối. Tuy nhiên, để chính xác vị trí của lưới sợi trong mẫu thí nghiệm, lưới sợi nên được kéo căng và cố định trước khi đổ BTHM vào khuôn, và ảnh hưởng của việc kéo căng sợi trước khi đúc đến tính chất cơ học GTRCCs sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo. Sau khi đúc, mẫu được bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ 20 °C trong 24 giờ. Sau đó, mẫu được tháo ra khỏi khuôn và bảo dưỡng trong nước ở nhiệt độ 20 °C trong 28 ngày. Sau thời gian bảo dưỡng trong nước, mẫu được vớt ra, để khô hoàn toàn trong phòng trước khi thí nghiệm.



Hình 3. Hình dạng, kích thước mẫu hình xương chó

2.4. Phương pháp thí nghiệm

Hình 4 thể hiện phương pháp thí nghiệm kéo trực tiếp được tiến hành trên máy thí nghiệm đa năng có cơ cấu truyền lực thông qua các chốt (hinges) để kéo mẫu TRCCs dưới tác dụng của tĩnh tải [2]. Tốc độ gia tải không đổi là 1,0 mm/phút [1, 2]. Lực kéo được đo bằng bộ phận đo tải trọng (load

cell), trong khi độ dãn dài của mẫu trong quá trình gia tải được đo bởi hai thiết bị đo biến dạng (linear variable displacement transducers - LVDTs) được gắn vào hai bên mẫu [2]. Trước khi thí nghiệm, mẫu được căn chỉnh cẩn thận để giảm thiểu ảnh hưởng của độ lệch tâm.

Các thông số nghiên cứu bao gồm: ứng suất kéo σ_u và khả năng biến dạng ε_u tương ứng tại đỉnh của đường cong quan hệ ứng suất kéo - biến dạng. Giá trị ứng suất kéo được xác định bằng công thức (1):

$$\sigma_u = \frac{P}{F} \quad (1)$$

trong đó P là tải trọng tác dụng, F là diện tích mặt cắt ngang khu vực đo chuyển vị của mẫu kéo.

và khả năng biến dạng của mẫu được xác định bằng công thức (2):

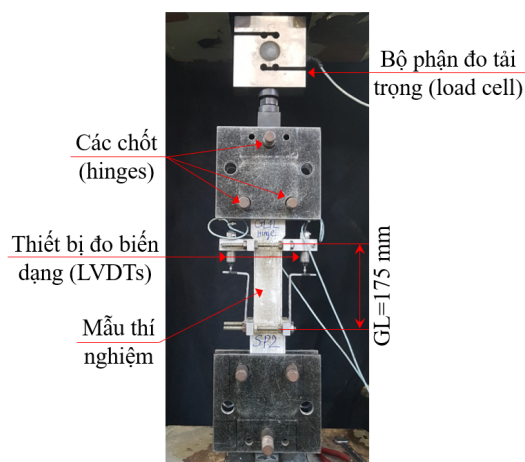
$$\varepsilon_u = \frac{\Delta H}{GL} \quad (2)$$

trong đó ΔH là độ dãn dài của mẫu trong quá trình kéo, GL (gauge length) là chiều dài khu vực đo biến dạng của mẫu. Trong nghiên cứu này $GL = 175$ mm.

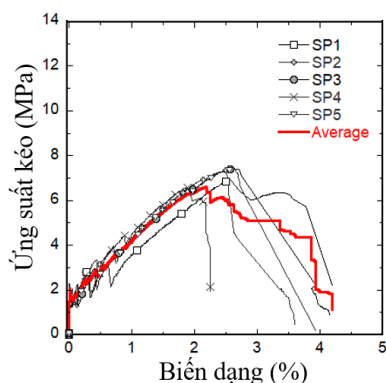
3. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

3.1. Quan hệ ứng suất biến dạng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh

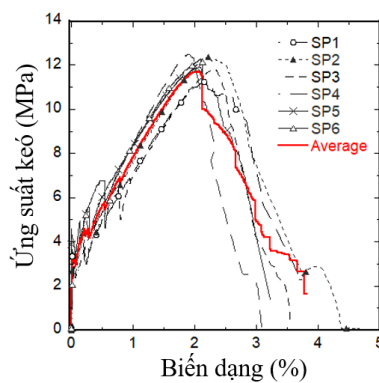
Quan hệ ứng suất và biến dạng kéo của bê tông cốt lưới sợi thủy tinh được thể hiện ở Hình 5. Đường cong trung bình của mỗi tổ hợp mẫu là trung bình kết quả thí nghiệm của ít nhất 4 mẫu trở lên. Nhìn vào Hình 5 có thể thấy quan hệ ứng suất, biến dạng kéo của GTRCCs là ứng xử tái bền (strain hardening behavior) [4, 30]. Tuy nhiên giai đoạn tái bền của đường cong ứng suất biến dạng thể hiện rõ rệt hai giai đoạn khác nhau đó là phát triển vết nứt và mở rộng vết nứt, do đó quan hệ ứng suất biến dạng của GTRCCs cũng có thể được gọi là ứng xử 3 giai đoạn (trilinear behavior). Kết quả này là tương đồng với các nghiên cứu trước đây về bê tông cốt lưới sợi dệt [2, 4, 12, 17, 30, 31]. Giai đoạn 1 là giai đoạn đàn hồi tuyến tính, được đặc trưng bởi đoạn tăng tuyến tính đến khi xảy ra vết nứt đầu tiên. Trong giai đoạn 1, BTHM chưa nứt là thành phần chịu lực chính, và độ dốc của giai đoạn 1 đặc trưng cho mô đun đàn hồi của GTRCCs [4, 30]. Giai đoạn 2 là giai đoạn phát triển vết nứt, từ khi mà



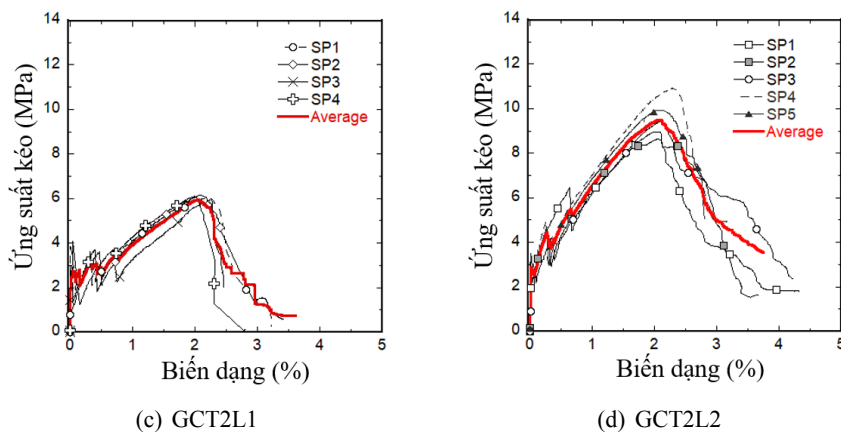
Hình 4. Thí nghiệm kéo trực tiếp



(a) GCT1L1



(b) GCT1L2



Hình 5. Ứng xử ứng suất kéo biến dạng của các tổ hợp mẫu

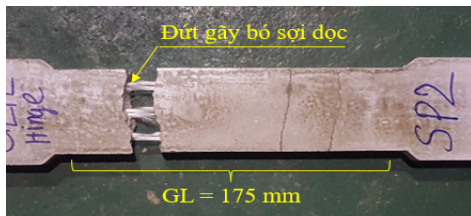
các vết nứt đầu tiên hình thành cho đến khi vết nứt cuối cùng xảy ra hoàn toàn. Trong giai đoạn này, tải trọng tác dụng truyền từ BTHM sang lưới sợi tại khu vực hình thành vết nứt [4, 30]. Ứng suất trong giai đoạn 2 tăng không đáng kể trong khi biến dạng mẫu tăng nhanh vì sự hình thành vết nứt, và mỗi vị trí ứng suất giảm đột ngột tương ứng với sự hình thành một vết nứt trên bề mặt BTHM. Giai đoạn 3 là giai đoạn mở rộng vết nứt, khi mà các vết nứt được mở rộng trong khi không có vết nứt nào khác được hình thành. Trong giai đoạn này, các bó sợi dọc chịu hoàn toàn lực kéo nên quan hệ ứng suất biến dạng gần như tuyến tính cho đến khi đạt giá trị ứng suất cao nhất. Sau khi đạt giá trị ứng suất cao nhất, các bó sợi dọc bị đứt gãy và mẫu bị đứt hoàn toàn thành 2 mảnh. Mặc dù các bó sợi dọc của các lớp lưới sợi đều bị đứt gãy, tuy nhiên sự đứt gãy của chúng không diễn ra đồng thời. Do đó, ứng suất giảm dần về giá trị 0 ở giai đoạn suy tàn của đường cong ứng suất biến dạng.

Thông số ứng xử kéo của GTRCCs bao gồm ứng suất kéo và khả năng biến dạng được thể hiện ở Bảng 4. Thông số của mỗi tổ hợp mẫu được lấy trung bình kết quả thí nghiệm của ít nhất 4 mẫu trở lên.

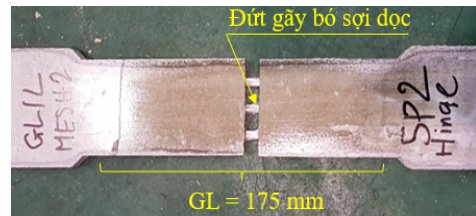
Bảng 4. Số lớp lưới và hàm lượng theo thể tích của lưới sợi trong GTRCCs

Tổ hợp mẫu	Loại cấu trúc	Tên mẫu	Ứng suất kéo σ_u (MPa)	Khả năng biến dạng ϵ_u (%)
GCT1L1	CT1	SP1	6,91	2,40
		SP2	7,36	2,49
		SP3	7,44	2,61
		SP4	5,56	1,86
		SP5	7,44	2,60
		Trung bình	7,14	2,39
		Độ lệch	0,39	0,31
GCT1L2	CT1	SP1	11,25	2,13
		SP2	12,36	2,20
		SP3	11,79	2,27
		SP4	12,48	1,88
		SP5	11,90	2,05
		SP6	12,28	2,10
		Trung bình	12,01	2,10
		Độ lệch	0,46	0,14

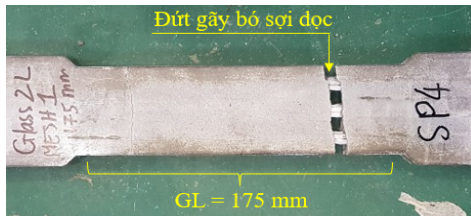
Tổ hợp mẫu	Loại cấu trúc	Tên mẫu	Ứng suất kéo σ_u (MPa)	Khả năng biến dạng ε_u (%)
GCT2L1	CT2	SP1	6,03	2,19
		SP2	6,14	2,05
		SP3	5,99	2,25
		SP4	6,10	1,98
		Trung bình	6,07	2,12
		Độ lệch	0,55	0,34
GCT2L2	CT2	SP1	8,97	2,02
		SP2	8,62	2,03
		SP3	9,46	2,13
		SP4	10,91	2,28
		SP5	9,92	2,01
		Trung bình	9,58	2,10
Độ lệch	0,89	0,11		



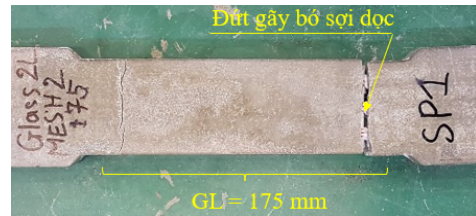
(a) GCT1L1



(b) GCT2L1



(c) GCT1L2



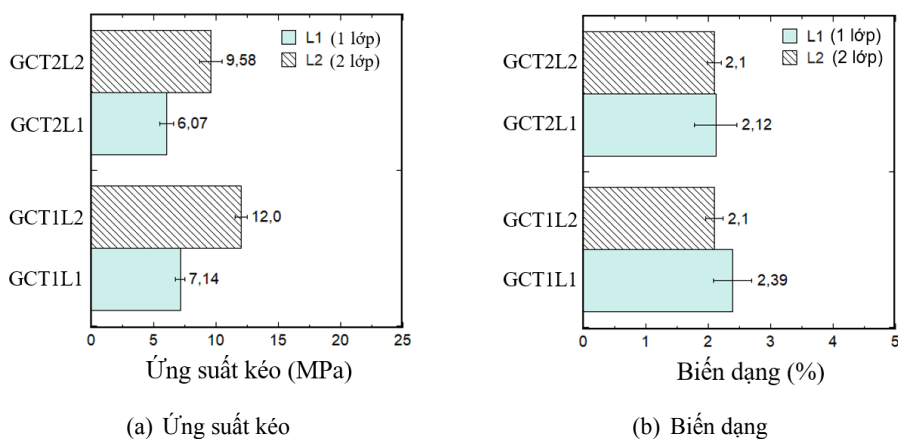
(d) GCT2L2

Hình 6. Kiểu phá hoại đa vết nứt của mẫu kéo

Bề mặt mẫu sau khi bị phá hoại được thể hiện ở Hình 6. Kiểu phá hoại đa vết nứt được quan sát trên bề mặt toàn bộ các mẫu bê tông của tất cả các tổ hợp mẫu, trong đó các vết nứt thường xuất hiện ở khu vực các bó sợi ngang và có xu hướng vuông góc với phương kéo, và nằm trong khu vực đo biến dạng. Điều này chứng tỏ khu vực tiếp xúc giữa các bó sợi ngang và BTHM là khu vực giòn yếu, dễ hình thành vết nứt trong quá trình kéo, mặc dù các bó sợi ngang đóng vai trò là các điểm neo hạn chế sự trượt của các bó sợi dọc và làm tăng cường độ dính bám tổng thể của lưới sợi trong BTHM [2, 12, 17, 18, 31]. Điều thú vị là các bó sợi dọc bị đứt rời và mẫu kéo bị phân tách ra làm hai phần tại vị trí đứt gãy của bó sợi dọc sau quá trình kéo. Ứng xử 3 giai đoạn như đã trình bày ở trên và kiểu phá hoại đứt gãy các bó sợi dọc chứng tỏ lưới sợi dệt thủy tinh có đủ cường độ dính bám để dính chặt bản thân nó trong BTHM, cho phép các bó sợi dọc đạt khả năng chịu lực cao nhất cho đến khi đứt gãy [2, 12, 17, 18, 31]. Vì vậy lưới sợi dệt thủy tinh có thể phát huy tối đa hiệu quả chất gia cố trong BTHM.

3.2. Ảnh hưởng của số lớp lưới đến khả năng kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh

Ảnh hưởng của số lớp lưới sợi dệt thủy tinh đến sức kháng kéo của GTRCCs được thể hiện ở Hình 7. Càng nhiều lớp lưới sợi dệt được sử dụng thì cường độ kháng kéo của GTRCCs càng cao. Khi số lớp lưới tăng từ 1 đến 2 lớp, cường độ kháng kéo của GTRCCs tăng khoảng 58-68% (tăng từ 6,07 đến 9,58 MPa và từ 7,14 đến 12 MPa), như thể hiện ở Hình 7(a). Khả năng kháng kéo của GTRCCs tăng theo số lớp lưới, có liên quan đến việc tăng hàm lượng của chất gia cường trong BTHM. Nhìn vào Bảng 3 có thể thấy, khi số lớp lưới tăng từ 1 đến 2 lớp, hàm lượng lưới sợi với cấu trúc CT1 trong BTHM tăng từ 1,47% đến 2,94% trong khi hàm lượng lưới sợi với cấu trúc CT2 tăng từ 1,43% đến 2,86%. Theo các nghiên cứu trước đây [2, 12, 17, 18], bê tông sử dụng chất gia cường với hàm lượng cao hơn có cường độ kéo cao hơn. Bên cạnh đó, hàm lượng lưới sợi trong BTHM tăng góp phần mở rộng diện tích tiếp xúc giữa lưới sợi và BTHM, làm cho cường độ lực dính của chất gia cố trong BTHM được cải thiện [2, 12, 17, 18]. Vì vậy, khả năng chịu kéo của GTRCCs tăng theo số lớp lưới sợi gia cố. Khả năng biến dạng của GTRCCs cũng tăng từ 2,1% đến 2,39%, như thể hiện trong Hình 7(b). Điều này chứng tỏ độ dẻo, khả năng chống biến dạng, và khả năng hấp thụ năng lượng của GTRCCs tốt hơn khi được gia cường bởi nhiều lớp lưới sợi.

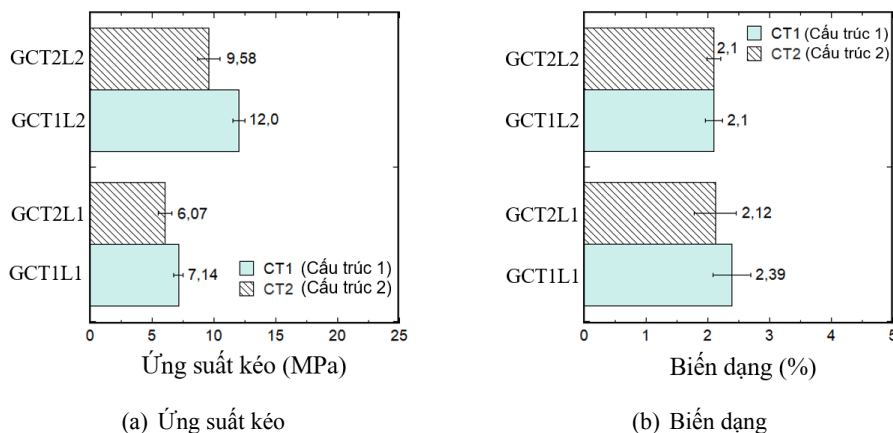


Hình 7. Ảnh hưởng của số lớp lưới đến khả năng kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh

3.3. Ảnh hưởng của cấu trúc lưới đến khả năng kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh

Hình 8 miêu tả các thông số khả năng kháng kéo của GTRCCs sử dụng lưới sợi với 2 loại cấu trúc CT1 và CT2. Lưới sợi dệt thủy tinh cấu trúc CT1 có hiệu quả gia cường cao hơn lưới sợi dệt thủy tinh cấu trúc CT2 khi được sử dụng cùng số lớp lưới sợi tương ứng. Ứng suất kéo của GCT1L1 và GCT1L2 (lần lượt là 7,14 và 12,0 MPa) lớn hơn nhiều so với ứng suất kéo của GCT2L1 và GCT2L2 (lần lượt là 6,07 và 9,58 MPa). Kết quả này có liên quan đến cấu trúc và hàm lượng lưới sợi có trong BTHM. Như đã liệt kê ở Bảng 2, mỗi lớp lưới CT1 có nhiều điểm neo (145 điểm) và các bó sợi ngang (31 bó) hơn mỗi lớp lưới CT2 (135 điểm neo và 29 bó sợi ngang). Theo như các nghiên cứu trước đây [6, 15, 16, 23], lưới sợi có càng nhiều điểm neo và bó sợi ngang thì cường độ dính bám của lưới sợi vào BTHM càng được tăng cường, và khả năng chống trượt của các bó sợi dọc (các bó sợi chịu lực theo phương tải trọng) càng cao, do vậy làm tăng cường độ của bê tông gia cố lưới sợi dệt. Bên cạnh đó, cấu trúc của các bó sợi dọc cũng đóng vai trò quan trọng tới cường độ của bê tông. Như đã trình bày ở mục 2.2, và được thể hiện ở Hình 2, các bó sợi dọc của CT2 bị thắt chặt bởi các sợi dệt màu đỏ, nhưng ngược lại các bó sợi dọc của CT1 là tự do. Các sợi dệt này không những thắt chặt các bó sợi, mà còn đóng vai trò cản trở sự xâm nhập của các hạt sản phẩm quá trình thủy hóa xi măng vào kẽ hở

giữa các sợi nano của bó sợi, vào kẽ hở giữa 2 bó sợi đơn của bó sợi hữu hiệu, và làm giảm diện tích tiếp xúc giữa bó sợi và BTHM [6, 15, 16]. Do vậy cường độ dính bám của các bó sợi dọc CT1 là cao hơn so với cường độ dính bám của các bó sợi dọc CT2, dẫn đến cường độ chịu kéo của GTRCCs sử dụng lưới sợi CT1 là cao hơn cường độ chịu kéo của GTRCCs sử dụng lưới sợi CT2 khoảng 18-25%.



Hình 8. Khả năng kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh sử dụng cấu trúc lưới khác nhau

4. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày kết quả thực nghiệm về khả năng kháng kéo của bê tông cốt lưới sợi dệt thủy tinh. Quan hệ ứng suất - biến dạng kéo được xác định. Ảnh hưởng của số lớp lưới và cấu trúc lưới sợi vào khả năng kháng kéo của GTRCCs cũng được làm rõ. Một số kết luận được rút ra như sau:

- Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng kéo của GTRCCs là quan hệ 3 giai đoạn bao gồm giai đoạn đàn hồi tuyến tính, phát triển vết nứt, và mở rộng vết nứt. Kết quả thí nghiệm cho thấy dạng phá hủy của tất cả tổ hợp mẫu là kiểu phá hoại đa vết nứt trong khu vực đo biến dạng.

- Tăng số lớp lưới sợi làm tăng khả năng kháng kéo của GTRCCs: cường độ chịu kéo của GTRCCs tăng khoảng 58-68%, khi số lớp lưới tăng từ 1 đến 2 lớp.

- Lưới sợi thủy tinh với cấu trúc CT1 là hiệu quả hơn lưới sợi thủy tinh với cấu trúc CT2 trong việc gia cường bê tông hạt mịn: cường độ kéo của GTRCCs sử dụng lưới CT1 cao hơn của GTRCCs sử dụng lưới CT2 khoảng 18-25%.

Mặc dù thí nghiệm này đã đưa ra quan hệ ứng suất biến dạng của GTRCCs dưới tác dụng lực kéo và đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đến tính chất cơ học của GTRCCs, tính dính bám của lưới sợi và BTHM và ảnh hưởng của các yếu tố đến tính dính bám cần được làm sáng tỏ trong các nghiên cứu tiếp theo. Bên cạnh đó, nghiên cứu về ảnh hưởng của việc căng sợi trước khi đổ BTHM đến sức kháng cơ học của GTRCCs cũng cần được thực hiện.

Lời cảm ơn

Trương Văn Đoàn được tài trợ bởi Chương trình học bổng sau tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2024.STS.09.

Tài liệu tham khảo

- [1] Truong, V. D., Kim, D. J. (2021). A review paper on direct tensile behavior and test methods of textile reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 263:113661.
- [2] Truong, V. D., Lee, D. H., Kim, D. J. (2021). Effects of different grips and surface treatments of textile on measured direct tensile response of textile reinforced cementitious composites. *Composite Structures*, 278:114689.

- [3] Truong, V. D., Kim, M. O., Kim, D. J. (2021). [Feasibility study on use of waste fishing nets as continuous reinforcements in cement-based matrix](#). *Construction and Building Materials*, 269:121314.
- [4] 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) - NUCE*, 15(1):67–78.
- [5] Truong, V. D., Noh, H. W., Kim, D. J. (2023). [Effects of adding short fibers on impact resistance of glass textile reinforced cementitious composites under direct tension](#). *Construction and Building Materials*, 379:131220.
- [6] Truong, V., Ngo, T., Nguyen, V., Pham, N., Do, V., Kim, D. (2025). [Direct tensile characteristics of textile reinforced cementitious composites: Effects of textile types and epoxy resin coating at the joints of textile grid](#). *Construction and Building Materials*, 481:141545.
- [7] Hankers, C., Matzdorff, D. D., Matzdorff, D. D. (2010). *Strengthening reinforced concrete elements using textile reinforced shotcrete concrete*. Plan Zwo.
- [8] Hegger, J., Horstmann, M., Zell, M. (2008). *Applications for TRC*. Prague.
- [9] Ajdukiewicz, A., Kotala, B., Węglorz, M. (2012). Concept and practical applications of textile reinforced concrete. Jasieńko, J., editor, *Structural Analysis of Historical Constructions*, Wroclaw, Poland, DWE, 760–766.
- [10] Liu, D., Huang, H., Yue, Q., Xue, Y., Wang, M. (2015). [Behaviour of tunnel lining strengthened by textile-reinforced concrete](#). *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(8):964–976.
- [11] Triantafyllou, T. (2016). [Strengthening of existing concrete structures](#). *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier Ltd., 303–322.
- [12] Peled, A., Mobasher, B., Bentur, A. (2017). *Textile reinforced concrete*. Modern Concrete Technology, Taylor & Francis Group, LLC.
- [13] De Munck, M., El Kadi, M., Tsangouri, E., Vervloet, J., Verbruggen, S., Wastiels, J., Tysmans, T., Remy, O. (2018). [Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites](#). *Construction and Building Materials*, 181:325–334.
- [14] Bompadre, F., Donnini, J. (2021). [Surface modification of glass textile for the reinforcement of a cement-based composite: A review](#). *Applied Sciences*, 11(5):2028.
- [15] Truong, V. D., Noh, H. W., Kim, D. J. (2022). [Rate-sensitive tensile resistance of glass textile reinforced cementitious composites](#). *Construction and Building Materials*, 360:129553.
- [16] Truong, V. D. (2022). *Tensile stress versus strain response of textile reinforced cementitious composites*. PhD Thesis, Sejong University, Civil and Environmental Engineering, South Korea.
- [17] 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.
- [18] Zhou, F., Liu, H., Du, Y., Liu, L., Zhu, D., Pan, W. (2019). [Uniaxial tensile behavior of carbon textile reinforced mortar](#). *Materials*, 12(3):1–19.
- [19] Quang, N. D., Cường, N. H., Tiển, N. D. (2020). [Nghiên cứu thực nghiệm và tính toán cột bê tông cốt thép chịu nén đúng tâm được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt các bon](#). *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, 71(8):486–499.
- [20] Ngọc, T. C. T., Huy, N. X., Bình, N. N., Hậu, P. M. (2021). [Ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt thép GFRP được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt](#). *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, 72:932–944.
- [21] Thủy, P. T. T., Huy, N. X., Sĩ, N. Q., Trung, N. M. C. (2022). [Phân tích ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt phi kim loại](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 1:3–8.
- [22] Cường, N. H., Tài, Đ. H., Cảnh, L. M. (2022). [Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt lưới dệt](#). *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, 73:111–126.
- [23] Peled, A., Cohen, Z., Pasder, Y., Roye, A., Gries, T. (2008). [Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(3): 174–183.
- [24] Truong, V. D., Park, J. K., Lee, S. Y., Han, T. H., Kim, D. J. (2023). [Feasibility of hybrid waste fishing net textile and fiber reinforced cementitious composites in strengthening concrete and retrofitting damaged concrete](#). *Journal of Building Engineering*, 74:106926.

- [25] Truong, V. D., Noh, H. W., Park, J. K., Han, T. H., Kim, D. J. (2024). [Pullout resistance of waste fishing net embedded in the interface between the concrete and fibrous mortar matrix: Test method and experimental investigation](#). *Construction and Building Materials*, 418:135397.
- [26] ASTM C109/ C109M-20 (2020). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. American Society for Testing and Materials.
- [27] KS K 0521:2017 (2017). *Textiles-Tensile properties of fabrics-Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method*. Korean Agency for Technology and Standards (KS).
- [28] RILEM Technical Committee (2016). [Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete](#). *Materials and Structures*, 49(12):4923–4927.
- [29] Kim, H.-S., Truong, G. T., Park, S.-H., Choi, K.-K. (2018). [Tensile properties of carbon fiber-textile reinforced mortar \(TRM\) characterized by different anchorage methods](#). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1):1–13.
- [30] Tien, T. M., Tu, D. N., Hong, V. X. (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.
- [31] Ferrara, G., Pepe, M., Martinelli, E., Tolêdo Filho, R. D. (2021). [Tensile behavior of flax textile reinforced lime-mortar: Influence of reinforcement amount and textile impregnation](#). *Cement and Concrete Composites*, 119:103984.