



## EXPERIMENTAL INVESTIGATION FOR DETERMINING THE TENSILE STRENGTH OF CARBON TEXTILE IN TEXTILE REINFORCED CONCRETE UNDER BOTH TENSILE AND COMPRESSIVE LOADING

Ho Thi Hoai, Dinh Huu Tai\*, Nguyen Huy Cuong, Pham Thi Thanh Thuy

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 09/11/2022

Revised: 05/01/2023

Accepted: 02/02/2023

Published online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.8>

\* *Corresponding author*

Email: taidth@utc.edu.vn; Tel: +84913294286

**Abstract.** Nowadays, textile reinforced concrete (TRC) is one of the effective methods for strengthening existing reinforced concrete (RC) structures. However, many studies pointed out that it is difficult to determine the tensile strength of the textile reinforcement in TRC when it subjects to the complex loading at the corners of the beams and columns. In this paper, the authors present an experimental study to determine the tensile strength of curved carbon textile reinforcement in TRC under both tensile and compressive loading. The results showed that all test specimens failed at the curvature region. The average tensile strength of the curved reinforcement in TRC under both tensile and compressive loading only reached 33 % to 48 % of the theoretical strength of the carbon textile. The direction change of the textile mesh and the effect of compression loading are the reasons for the strength degradation. The proposed experiment in this paper contributes to developing the experimental program for determining the mechanical properties of TRC when it is used as a strengthened material for RC structures.

**Keywords:** textile reinforced concrete, tensile strength, carbon textile reinforcement, tensile and compressive loading.



## NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CƯỜNG ĐỘ CHỊU KÉO CỦA LƯỚI SỢI CÁC BON TRONG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT KHI CHỊU TẢI TRỌNG KÉO VÀ NÉN ĐỒNG THỜI

Hồ Thị Hoài, Đinh Hữu Tài\*, Nguyễn Huy Cường, Phạm Thị Thanh Thủy

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 09/11/2022

Ngày nhận bài sửa: 05/01/2023

Ngày chấp nhận đăng: 02/02/2023

Ngày xuất bản Online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.8>

\* Tác giả liên hệ

Email: taidh@utc.edu.vn; Tel: +84913294286

**Tóm tắt.** Hiện nay, bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) là một trong những phương pháp hữu hiệu được ứng dụng để gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, rất khó để xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt khi BTCLD tham gia chịu lực tại vị trí có ứng suất phức tạp, nhiều chiều như góc dầm, góc cột. Trong bài báo này, tác giả trình bày nghiên cứu thực nghiệm để xác định cường độ chịu kéo của cốt lưới dệt các bon bị uốn cong trong các mẫu BTCLD hình ô van có đường kính cong khác nhau khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời. Kết quả cho thấy tất cả các mẫu thí nghiệm đều bị phá hoại trong vùng cong. Cường độ chịu kéo trung bình của lưới sợi dệt bị uốn cong trong BTCLD khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời chỉ đạt từ 33% đến 48% giá trị cường độ chịu kéo lý thuyết của lưới sợi trần. Nguyên nhân của sự suy giảm cường độ của cốt lưới dệt là do lưới sợi bị uốn cong và ảnh hưởng của tải trọng nén tác dụng lên mẫu. Thí nghiệm được đề xuất trong bài báo góp phần phát triển các mô hình thực nghiệm để xác định các đặc tính cơ học của bê tông cốt lưới dệt khi gia cường cho kết cấu BTCT.

**Từ khóa:** bê tông cốt lưới dệt, cường độ chịu kéo, cốt lưới dệt các bon, tải trọng kéo và nén.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, ở Việt Nam cũng như hầu hết các nước khác trên thế giới, các công trình chủ yếu được xây dựng bằng bê tông cốt thép (BTCT). Sau một thời gian dài sử dụng, nhiều công

trình gặp một số vấn đề về độ bền, suy giảm cả về khả năng chịu lực lẫn tuổi thọ. Đặc biệt là với những công trình ở nơi có điều kiện nhiệt độ cao hay môi trường biển, kết cấu bằng BTCT bị hư hỏng do sự ăn mòn cốt thép và suy thoái bê tông. Nhu cầu thực tế đặt ra là cần phải phát triển thêm những công nghệ xây dựng mới, phù hợp để cải tạo, sửa chữa và tăng cường khả năng chịu lực cho các kết cấu đã bị xuống cấp do ảnh hưởng của môi trường trong giai đoạn khai thác. Thời gian gần đây, giải pháp tăng cường kết cấu BTCT bằng bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) đang được ưu tiên nghiên cứu và áp dụng. Bê tông cốt lưới dệt là một loại bê tông xi măng hạt mịn, tính năng cao có cốt là các lưới sợi dệt. Lưới sợi dệt là loại lưới được dệt từ các loại sợi có độ bền cao với môi trường có nhiều chất gây ăn mòn. Khi được sử dụng làm vật liệu tăng cường, bê tông hạt mịn đóng vai trò là chất nền, truyền lực từ cốt lưới dệt lên kết cấu được tăng cường mà không bị ảnh hưởng bởi điều kiện môi trường. Do đó, BTCLD có thể sử dụng hiệu quả để tăng cường cho các công trình xây dựng bằng BTCT ở môi trường khí hậu khắc nghiệt.

Trong lĩnh vực xây dựng công trình BTCT, BTCLD có thể được sử dụng để tăng cường kết cấu như dầm, cột ở các khu vực chịu lực phức tạp. Điển hình của các khu vực này là các góc cột khi tăng cường chịu nén, góc dầm khi tăng cường chịu cắt và chịu xoắn, v.v. Nhiều nghiên cứu đã đề cập đến việc khó xác định được cường độ chịu kéo của lưới sợi nằm trong bê tông hạt mịn, đặc biệt khi lớp BTCLD được “trát” lên kết cấu và tham gia chịu lực tại vị trí có ứng suất phức tạp, nhiều chiều [1-3]. Nghiên cứu của Curbach và Ortlepp [1] về kết cấu tấm BTCLD chịu kéo dọc trục cho thấy, cường độ chịu kéo lớn nhất của bó sợi thấp hơn nhiều so với tổng cường độ chịu kéo của từng sợi cơ bản thành phần. Nguyên nhân dẫn đến cường độ của lưới sợi bị suy giảm là do các sợi cơ bản trong bó sợi và các bó sợi trong lưới cốt sợi chịu tải trọng không đều nhau. Đồng thời, khi bê tông bị nứt, các sợi cơ bản trên bề mặt bó sợi bị phá hoại trước khi ứng suất kéo trong sợi đạt tới cường độ chịu kéo. Ortlepp và các cộng sự [2] đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá hiệu quả tăng cường cấu kiện chịu nén bằng BTCLD. Theo đó, tác dụng của hiệu ứng kiềm chế nở ngang từ lớp “áo” BTCLD đã làm tăng đáng kể khả năng chịu nén và tính dẻo cho cột BTCT. Dạng phá hoại chính xảy ra là các bó sợi ngang bị kéo đứt tại vị trí góc cột. Đây là vị trí có ứng suất phức tạp được tạo thành từ ứng suất pháp dọc trục cột do tải trọng nén, kết hợp với ứng suất do hiệu ứng kiềm chế nở ngang gây ra. Tuy nhiên, tác giả chưa đề cập đến phương pháp xác định cường độ chịu kéo của cốt lưới dệt trong bê tông tại các vị trí này. Ngô Đăng Quang và các cộng sự [3] đã nghiên cứu về ứng xử chịu nén của kết cấu cột BTCT được tăng cường bằng BTCLD. Trong đó, lớp vỏ BTCLD được trát xung quanh cột để tạo ra hiệu ứng kiềm chế nở ngang cho bê tông lõi cột. Ở các khu vực góc cột, cốt lưới dệt chịu đồng thời tải trọng kéo và nén do hiệu ứng nở ngang. Kết quả thực nghiệm và mô phỏng số đã cho thấy, cường độ chịu kéo của bó sợi ở khu vực bị kiềm chế nở ngang lớn này bị suy giảm đáng kể, có thể giảm đến xấp xỉ 50% so với cường độ của bó sợi khi chịu kéo dọc trục. Mặc dù nghiên cứu trên đã chỉ ra sự suy giảm cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt ở khu vực có ứng suất phức tạp, nhiều chiều, vẫn chưa có phương pháp thực nghiệm để xác định được chính xác giá trị quan trọng này. Trong nghiên cứu thực nghiệm gần đây, tác giả và các cộng sự [4] đã tiến hành thí nghiệm kéo dọc trục với các mẫu BTCLD hình ô van có đường kính khác nhau. Kết quả thu được cho thấy cường độ chịu kéo của cốt lưới dệt bị suy giảm khi bị uốn cong. Cường độ chịu kéo của cả hai loại cốt lưới dệt giảm đi khi đường kính cong của mẫu thí nghiệm thay đổi từ 120 mm đến 22 mm. Tuy nhiên bài báo này mới chỉ khảo sát ảnh hưởng của đường kính cong đối với cường độ chịu kéo của lưới sợi khi chịu kéo dọc trục. Nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định cường độ của lưới sợi trong BTCLD gia cường xung quanh góc cột BTCT và chịu

tải trọng kéo và nén đồng thời hay ở trạng thái ứng suất phức tạp vẫn chưa được thực hiện.

Cho đến thời điểm này, BTCLD vẫn là loại vật liệu mới đối với các trung tâm nghiên cứu lớn trên thế giới. Hiện nay, chưa có các tiêu chuẩn cụ thể về việc tính toán, thiết kế đối với kết cấu sử dụng vật liệu BTCLD. Một số hiệp hội xây dựng có ban hành các chỉ dẫn kỹ thuật [5-8], nhưng mới chỉ dừng lại ở mức sơ khai, chưa đầy đủ. Để có thể xây dựng được các tiêu chuẩn tính toán, thiết kế cho vật liệu BTCLD với mục tiêu tăng cường khả năng chịu lực cho kết cấu BTCT, cần thiết phải có những mô hình thí nghiệm đáng tin cậy. Do đó, nghiên cứu này đề xuất mô hình và quy trình thí nghiệm nhằm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt các bon bị uốn cong trong BTCLD với các đường kính cong khác nhau khi chịu đồng thời tải trọng kéo và nén hay ở trạng thái chịu lực phức tạp. Mô hình thí nghiệm này được phát triển từ thí nghiệm kéo dọc trục với mẫu BTCLD hình ô van trong nghiên cứu trước đây của tác giả và các cộng sự [4]. Cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt khi chịu đồng thời tải trọng kéo và nén được xác định từ giá trị tải trọng kéo khi mẫu bị phá hoại. Các dạng phá hoại và sự suy giảm cường độ chịu kéo cũng được xác định trong thí nghiệm. Thí nghiệm đề xuất trong bài báo góp phần xây dựng các mô hình thực nghiệm để xác định các đặc tính cơ học của BTCLD, phục vụ mục tiêu tăng cường cho kết cấu BTCT trong thực tế.

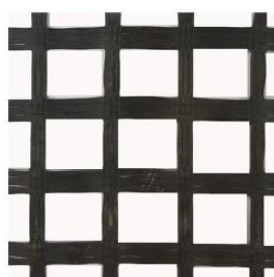
## 2. MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH CƯỜNG ĐỘ CHỊU KÉO CỦA CỐT LƯỚI DỆT CÁC BON KHI CHỊU TẢI TRỌNG KÉO VÀ NÉN ĐỒNG THỜI

### 2.1. Vật liệu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, các mẫu BTCLD được chế tạo từ bê tông hạt mịn và cốt lưới dệt các bon (Hình 1). Bê tông hạt mịn được chế tạo từ hỗn hợp cốt liệu có đường kính hạt tối đa 0,6 mm, kết hợp với xi măng poóc-lăng PC 40, tro bay, muối silic, nước và phụ gia siêu dẻo. Cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông hạt mịn được xác định trên mẫu lăng trụ có kích thước  $40 \times 40 \times 160$  mm áp dụng cho vữa theo tiêu chuẩn TCVN 6016-2011 [9]. Tất cả các mẫu thí nghiệm sau khi đổ khuôn sẽ được bảo dưỡng ở điều kiện tiêu chuẩn đến ngày tuổi thí nghiệm tương ứng. Cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn trung bình của bê tông hạt mịn sau 28 ngày là 47,5 MPa và 6,95 MPa.



a) Hỗn hợp bê tông hạt mịn



b) Lưới sợi dệt các bon SITgrid017

Hình 1. Vật liệu thí nghiệm.

Lưới sợi dệt được lựa chọn để chế tạo mẫu thí nghiệm là lưới sợi các bon có mã SITgrid017 được sản xuất bởi hãng V.FRAAS (Đức). Các bó sợi được cuộn tròn và vận chuyển từ Đức về Việt Nam. Các bó sợi các bon có độ mịn 3200 tex và được tổ hợp từ 48000 sợi cơ bản. Các sợi cơ bản được dệt đều theo cả 2 phương vuông góc với khoảng cách giữa các bó sợi là 12,7 mm. Lưới sợi dệt các bon có khối lượng trên đơn vị diện tích là  $578 \text{ g/m}^2$ .

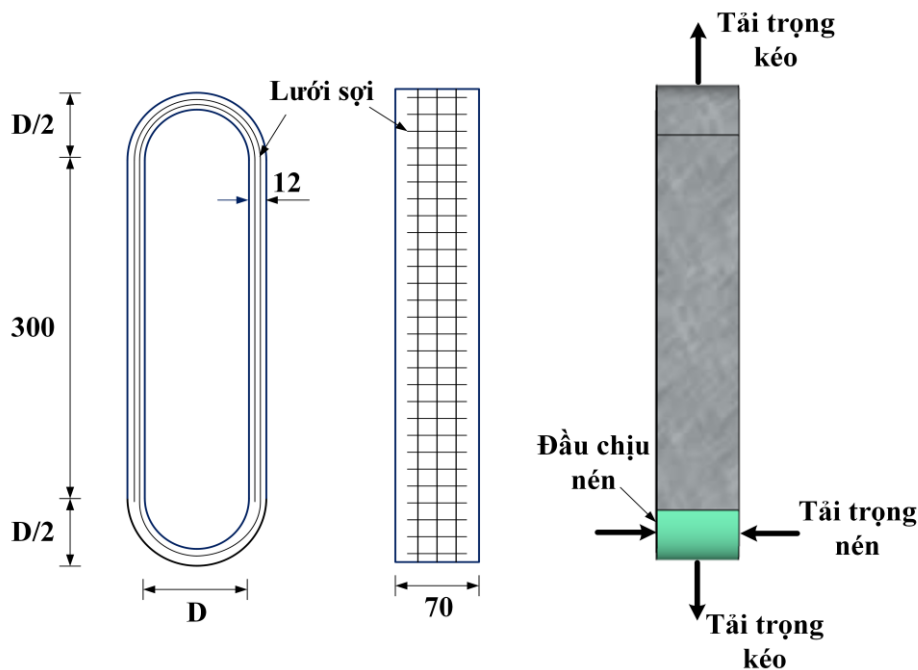
Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của lưới sợi được xác định từ thí nghiệm kéo dọc trục với tấm BTCLD. Các đặc trưng hình học và tính chất cơ học của lưới sợi dệt các bon sử dụng trong thí nghiệm được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Đặc trưng hình học và cơ học của lưới sợi các bon SITgrid017.

Kích thước mắt lưới (mm)	Diện tích bó sợi (mm <sup>2</sup> )	Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)
10 x 8,5	1,8	2890	185

## 2.2 Chế tạo mẫu thí nghiệm

Khi gia cường cho kết cấu bê tông, lớp bê tông cốt lưới dệt cần được “gắn” với mặt chịu lực của kết cấu được tăng cường, thậm chí cả thành của cấu kiện chịu lực nhằm tăng hiệu quả dính bám giữa hai loại vật liệu [5]. Do đó, để tránh phá hoại cho cốt lưới dệt trong quá trình thi công, các góc của cấu kiện phải được làm tròn hay vát góc. Khi đó, lưới sợi dệt gia cường cho kết cấu bị uốn cong tại các vị trí góc cột, góc dầm. Trên cơ sở đó, trong nghiên cứu này, các mẫu thí nghiệm có hình ô van được uốn cong hai đầu, đại diện cho mặt cắt cấu kiện cột hoặc trụ BTCT bị vát tròn khi được gia cường bằng BTCLD.



Hình 2. Kích thước mẫu thí nghiệm và vị trí tác dụng của tải trọng kéo và nén.

Nghiên cứu này trình bày thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời, đại diện cho lưới sợi dệt uốn cong gia cường cho kết cấu cột, trụ BTCT. Tải trọng kéo và nén sẽ được tác dụng lên các mẫu hình ô van nhằm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi nằm trong bê tông hạt mịn ở trạng thái chịu lực phức tạp. Các mẫu thí nghiệm bao gồm phần thẳng có chiều dài 300 mm và có hai đầu là hình ô van (Hình 2). Phần cong của mẫu thí nghiệm tượng trưng cho các góc của cấu kiện bê tông cốt thép khi được gia cường bằng các lớp BTCLD bọc xung quanh. Mô hình mẫu thí nghiệm này đã được đề xuất trong nghiên cứu xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt khi chịu kéo dọc trục

của nhóm tác giả [4]. Khi BTCLD được sử dụng để gia cường cho kết cấu cột BTCT, đường kính cong của phần vát ở góc cột, trụ được khuyến nghị có giá trị lớn hơn hoặc bằng 60 mm để đảm bảo điều kiện thi công [10]. Do đó, trong nghiên cứu này, đường kính của phân ô van của mẫu thí nghiệm được lựa chọn bằng 60, 90, và 120 mm. Tất cả các mẫu thí nghiệm được chế tạo rỗng để lắp đặt các thiết bị phụ trợ khi tác dụng tải trọng kéo và nén. Mẫu thí nghiệm có tổng chiều rộng là 70 mm và được gia cường bởi 3 bó sợi dệt các bon. Các mẫu hình ô van được chế tạo với một lớp lưới sợi các bon và hai lớp bê tông hạt mịn ở đầu chịu nén. Chiều dày mỗi lớp bê tông hạt mịn là 4 mm. Trong khi đó, để đảm bảo mẫu BTCLD phá hoại ở đầu chịu nén, đầu còn lại của mẫu thí nghiệm được chế tạo với hai lớp lưới sợi các bon. Do đó chiều dày tổng cộng của các mẫu hình ô van là 12 mm.

Hình 3 trình bày một số hình ảnh về khuôn mẫu và quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm BTCLD hình ô van. Đầu tiên, tiến hành chế tạo sẵn các khuôn cho mẫu ô van với đường kính cong khác nhau bằng gỗ và ống nhựa. Tiếp đó, sử dụng các thanh nhựa cắt sẵn dày 4 mm, gắn lên bề mặt khuôn để không chế chiều dày các lớp bê tông hạt mịn. Trát một lớp bê tông hạt mịn lên bề mặt khuôn theo chiều dày thanh nhựa sau đó quấn một lớp lưới sợi quanh khuôn, chú ý phải đảm bảo lưới sợi nằm trong bê tông hạt mịn. Tiếp tục gắn một lớp thanh nhựa thứ hai để trát lớp bê tông hạt mịn lên lớp lưới sợi. Trong quá trình chế tạo, sử dụng giấy xốp để làm phẳng bề mặt của bê tông hạt mịn. Tất cả các mẫu thí nghiệm được bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ phòng.



Hình 3. Chế tạo mẫu thí nghiệm.

### 2.3 Mô hình thí nghiệm

Thiết bị phục vụ thí nghiệm kéo nén với mẫu BTCLD hình ô van bao gồm hệ kéo bằng thép và kích tay thông tâm truyền tải trọng nén. Hệ kéo bao gồm các tấm thép đục lỗ kèm bu lông được nối với mẫu thí nghiệm ở hai đầu bằng thanh tyren đường kính 25 mm nhằm truyền tải trọng kéo dọc trục (Hình 4 (a)). Bên ngoài thanh tyren được thiết kế ống thép có chiều dày 10 mm với các đường kính là 60, 90, và 120 mm nhằm truyền tải trọng kéo đều lên đoạn cong

của mẫu ô van. Hệ kéo bằng thép được kẹp vào máy kéo nén 3000 kN tại phòng thí nghiệm kết cấu của Trường Đại học Giao thông vận tải. Trong quá trình thí nghiệm, giá trị tải trọng kéo được ghi lại bằng đầu đo lực của máy và lưu trữ trong máy tính.



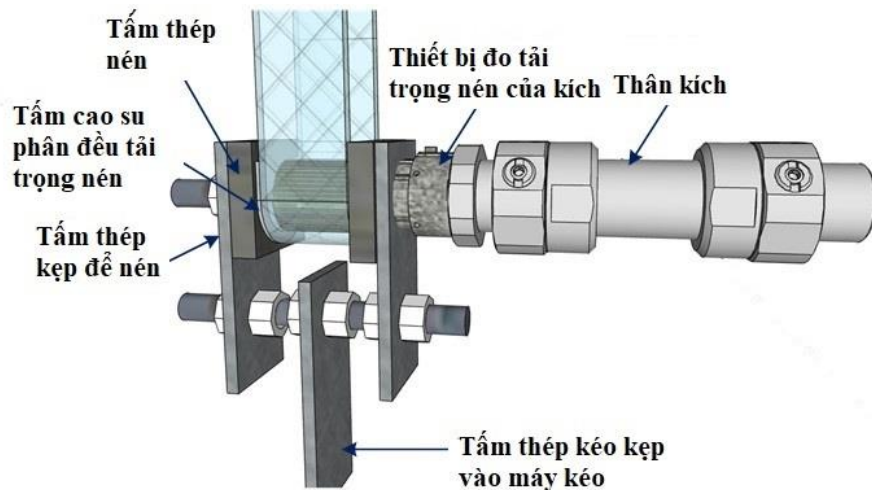
a) Hệ kéo và mẫu thí nghiệm



b) Kịch tay thông tâm



c) Máy đọc lực



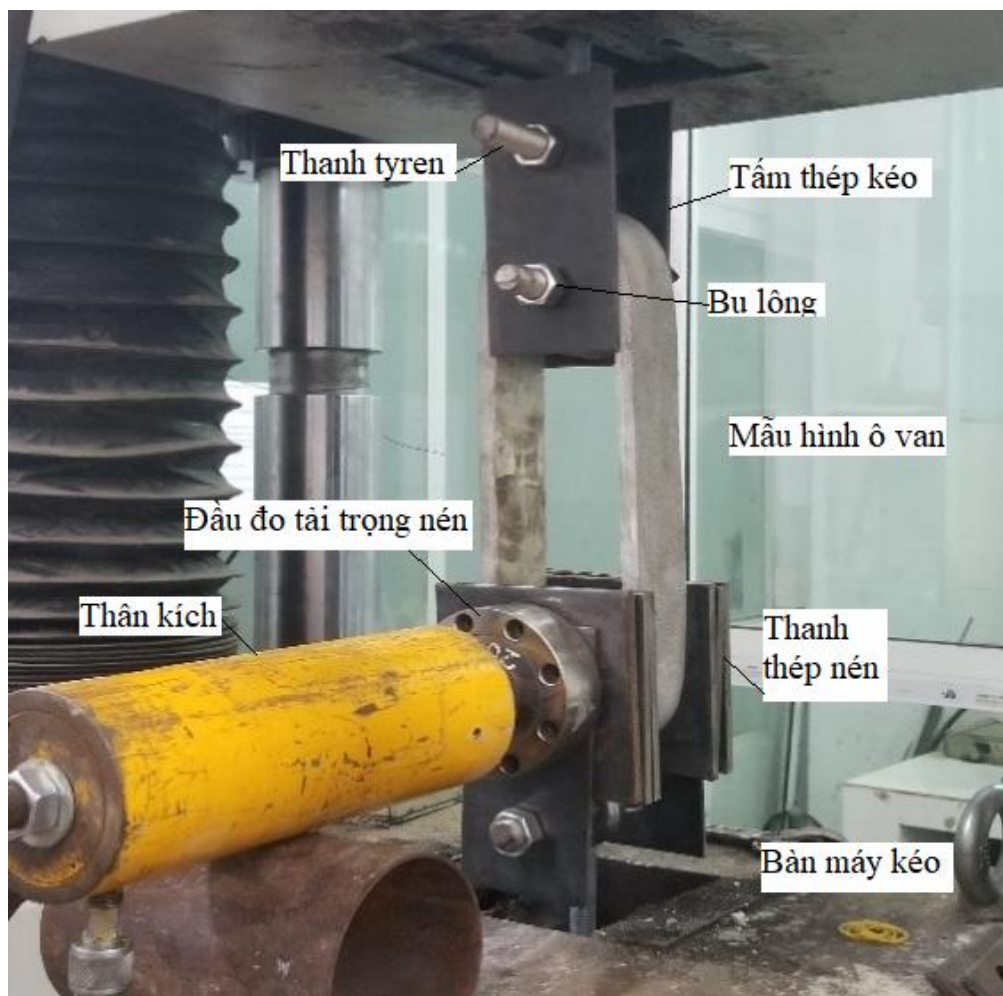
d) Mô hình lắp đặt hệ thống kéo nén và mẫu thí nghiệm

Hình 4. Các thiết bị thí nghiệm kéo và nén đồng thời.

Trong khi đó, một kịch tay thông tâm được gắn vào đầu cong phía dưới của mẫu BTCLD hình ô van thông qua thanh tyren để truyền tải trọng nén vào mẫu thí nghiệm (Hình 4 (b), (c)). Kịch tay bao gồm thân kịch, hệ thống gia tải bằng tay và thiết bị đo tải trọng nén gắn với máy đọc lực. Các tấm thép nén dày 10 cm và tấm cao su cũng được lắp đặt tại bề mặt bị nén của mẫu để đảm bảo tải trọng nén phân bố đều lên mẫu thí nghiệm. Giá trị tải trọng được ghi lại trên máy đo trong quá trình gia tải. Các tấm thép kéo, tấm thép nén, thanh tyren, tấm cao su,

bu lông, ống thép rỗng và kích tay thông tâm liên kết với nhau để tạo thành một hệ thống truyền tải trọng kéo và nén lên mẫu thí nghiệm. Mô hình lắp đặt hệ thống kéo nén và mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 4 (d).

#### 2.4. Quy trình thí nghiệm



Hình 5. Lắp đặt mẫu thí nghiệm trên bàn kéo.

Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt các bon bị uốn cong trong mẫu BTCLD hình ô van được tiến hành với ba tổ hợp mẫu thí nghiệm có đường kính cong lần lượt là 60, 90 và 120 mm. Mỗi tổ hợp bao gồm ba mẫu thí nghiệm có kích thước giống nhau. Các mẫu thí nghiệm được tiến hành kéo và nén tại phòng thí nghiệm kết cấu của trường Đại học Giao thông vận tải. Quy trình thí nghiệm kéo và nén đồng thời với mẫu BTCLD hình ô van bao gồm các bước sau:

- Bước 1: Lắp đặt mẫu thí nghiệm với hệ thống kéo nén. Tiến hành lắp đặt ống thép rỗng, tấm thép kéo, các tấm cao su, máy đo tải trọng nén, kích tay thông tâm bằng bu lông và thanh tyren. Vặn chặt các bu lông tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh gồm mẫu thí nghiệm và hệ kéo nén đồng thời.



- Bước 2: Lắp hệ thống thí nghiệm gồm hệ kéo, kích tay và mẫu thí nghiệm vào thớt kéo của máy kéo (Hình 5).
- Bước 3: Tải trọng nén được gia tải lên mẫu thí nghiệm bằng kích tay đến khi đạt được cấp tải trọng nén mong muốn. Nhằm đảm bảo bê tông vẫn làm việc trong vùng đàn hồi, ứng suất nén trong mẫu thí nghiệm không nên vượt quá 60% giá trị cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn. Do đó, trong thí nghiệm này, kích tay được gia tải với tải trọng nén tương đương 20% giá trị lực nén lớn nhất của mẫu BTCLD. Giá trị này được tính từ cường độ chịu nén của bê tông hạt mịn và diện tích gia tải nén lên mẫu. Tải trọng nén được tác dụng trực tiếp lên tấm thép chịu nén dày 10 mm và tấm cao su nối với hệ kéo thông qua thanh tyren nhằm phân bố tải trọng đều trên bề mặt mẫu thí nghiệm. Bắt đầu tiến hành gia tải kéo lên mẫu thí nghiệm với vận tốc 5 mm/ phút cho tới khi mẫu bị phá hoại. Giữ nguyên cấp tải trọng nén tác dụng lên mẫu trong suốt quá trình gia tải kéo.
- Bước 4: Ghi lại giá trị tải trọng kéo phá hoại trong các mẫu thí nghiệm. Từ giá trị tải trọng kéo và diện tích bố sợi, xác định được cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt bi uốn cong nằm trong bê tông hạt mịn khi mẫu BTCLD hình ô van chịu tải trọng kéo và nén đồng thời hay ở trạng thái chịu lực phức tạp. Cường độ chịu kéo của lưới sợi là giá trị trung bình cường độ chịu kéo của các mẫu thí nghiệm trong tổ hợp mẫu.

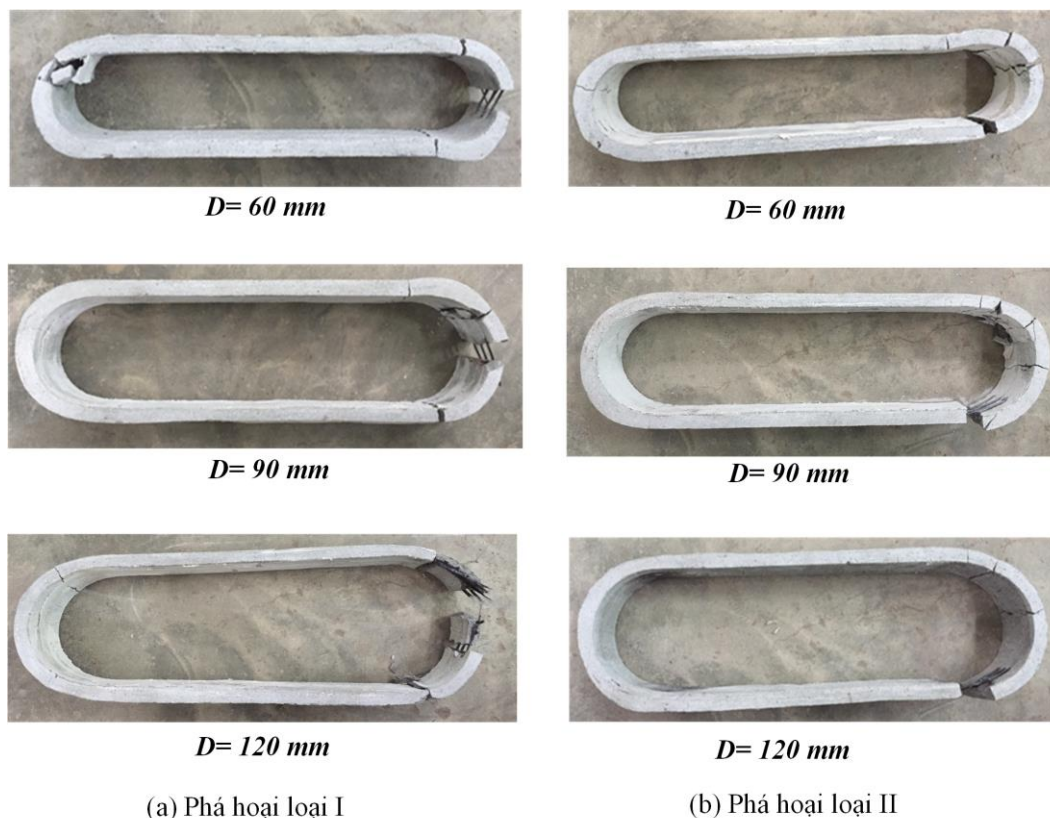
Quy trình trên đây được thực hiện như nhau với tất cả các mẫu thí nghiệm. Trong quá trình thí nghiệm, hệ thống kéo nén và mẫu phải luôn được cố định thẳng để đảm bảo các mẫu BTCLD chịu kéo dọc trục.

### 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

#### 3.1. Dạng phá hoại

Các dạng phá hoại của mẫu BTCLD hình ô van khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời được thể hiện trong Hình 6. Khi quan sát thí nghiệm, các vết nứt đầu tiên xuất hiện ở gần vùng giao giữa phần cong và phần thẳng của tất cả các mẫu BTCLD với đường kính cong khác nhau. Khi tải trọng kéo tăng lên, các vết nứt mới cũng xảy ra ở khu vực này cho đến khi mẫu ô van bị phá hoại do đứt sợi. Quá trình hình thành và phát triển vết nứt trong các mẫu thí nghiệm khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời cho kết quả tương tự như trong trường hợp chịu kéo dọc trục [4]. Các trạng thái phá hoại trong mẫu hình ô van có thể được chia thành hai trường hợp. Ở trường hợp phá hoại thứ nhất, cốt lưới sợi bị kéo đứt ở chính giữa phần cong (Loại I). Vị trí này là điểm đặt của tổng tải trọng kéo tác dụng lên mẫu ô van và chịu kéo với giá trị lớn nhất trong quá trình gia tải. Ở trường hợp phá hoại thứ hai, cốt lưới sợi bị kéo đứt ở gần khu vực giao giữa đường kính cong và phần thẳng (Loại II). Nghiên cứu của Hegger và các cộng sự [11] đã chỉ ra rằng, tại vùng chuyển tiếp này, lưới sợi dệt bắt đầu bị uốn cong và tạo ra góc nghiêng so với phương của lực kéo, gây ra sự suy giảm về cường độ. Trong cả hai trường hợp trên, các vết nứt đều xuất hiện rải rác ở vùng cốt lưới sợi bị uốn cong của mẫu BTCLD hình ô van. Phá hoại của mẫu thí nghiệm xảy ra theo trường hợp thứ nhất hoặc thứ hai tùy thuộc vào việc các vết nứt ở các vị trí chuyển tiếp của phần cong và phần thẳng hay các vết nứt ở chính giữa đường kính cong phát triển nhanh hơn và gây đứt sợi. Các vết nứt cũng xuất hiện tại vùng cong của đầu ô van có hai lớp lưới sợi trong quá trình thí nghiệm, tuy nhiên phá hoại luôn xảy ra ở đầu một lớp lưới. Cần lưu ý rằng, kích thước mẫu thí nghiệm, trong đó có chiều dày bê tông có ảnh hưởng đến ứng xử chịu nén của bê tông hạt mịn [12, 13]. Do đó, việc thay đổi chiều dày mẫu có thể gây ảnh hưởng đến ứng xử và dạng phá hoại

trong mẫu BTCLD khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời.



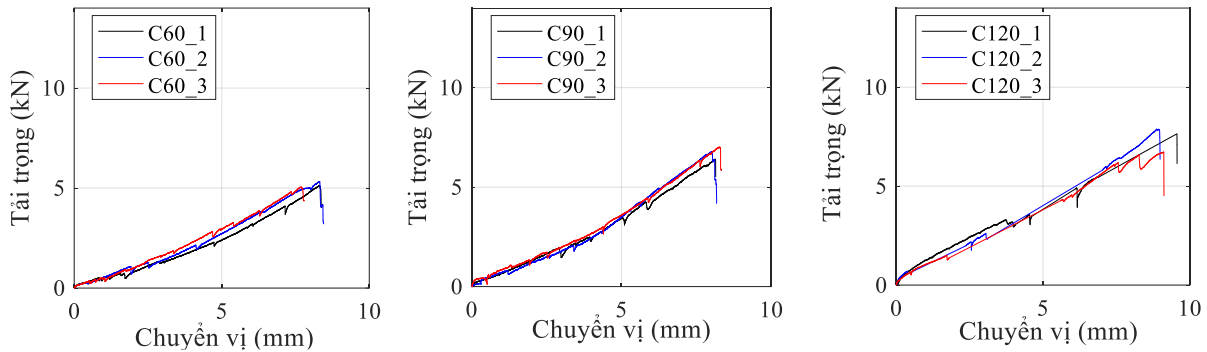
Hình 6. Các dạng phá hoại của mẫu thí nghiệm.

### 3.2 Đường cong tải trọng-chuyển vị

Hình 7 biểu diễn đường cong quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị của hệ thí nghiệm và mẫu BTCLD hình ô van có đường kính lần lượt là 60, 90 và 120 mm khi chịu kéo và nén đồng thời. Có thể thấy, ứng xử chịu kéo cũng như giá trị tải trọng kéo lớn nhất thu được trong các tổ hợp mẫu thí nghiệm có cùng kích thước đều có kết quả tương đồng mặc dù dạng phá hoại của mẫu có thể thay đổi giữa loại I và loại II. Chú ý rằng ứng xử thu được của mẫu thí nghiệm bị ảnh hưởng bởi hệ thiết bị thí nghiệm bao gồm các tấm thép kéo, tấm thép nén, tấm cao su, ống thép rỗng và hệ kích thông tâm. Đường cong tải trọng - chuyển vị trong thí nghiệm này thể hiện ứng xử của toàn bộ hệ thống thí nghiệm thay vì ứng xử của riêng mẫu bê tông cốt lưới dệt hình ô van. Do đó tải trọng kéo tăng gần như tuyến tính cùng với sự tăng nhanh của chuyển vị trong suốt quá trình thí nghiệm. Khác với ứng xử của mẫu BTCLD thẳng khi chịu kéo dọc trục, giai đoạn hình thành vết nứt trong mẫu hình ô van khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời là không rõ rệt. Tuy nhiên, các đoạn gãy khúc trên đường cong vẫn thể hiện các vết nứt của mẫu trong quá trình gia tải.

Bảng 2 trình bày giá trị tải trọng kéo lớn nhất và dạng phá hoại tương ứng của ba mẫu hình ô van đường kính 60, 90 và 120 mm trong thí nghiệm kéo nén đồng thời. Giá trị tải trọng kéo được ghi lại bằng máy tính phân tích kết nối trực tiếp với máy kéo trong quá trình thí nghiệm. Tương tự như thí nghiệm kéo dọc trục, sự phá hoại của cốt sợi dệt xảy ra sớm hơn

với các mẫu BTCLD các bon hình ô van có đường kính bé. Giá trị tải trọng kéo thu được khi phá hoại trong các mẫu BTCLD chỉ đạt xấp xỉ 5 và 7,5 kN với đường kính 60 và 120 mm. Trong khi đó, giá trị tải trọng kéo đo được với mẫu BTCLD hình ô van có đường kính tương ứng khi chỉ chịu kéo dọc trục lần lượt xấp xỉ 8 và 10 kN [4]. Sau khi tải trọng kéo đạt giá trị cực hạn, tải trọng tác dụng giảm đột ngột do lưới sợi bị kéo đứt trong vùng cong của mẫu thí nghiệm. Có thể thấy rằng, quá trình hình thành và phát triển vết nứt của mẫu thí nghiệm khi chịu tải trọng kéo nén đồng thời xảy ra tương tự như trong trường hợp chỉ chịu kéo dọc trục, tuy nhiên tải trọng nén khiến cho các mẫu BTCLD hình ô van phá hoại sớm hơn.



Hình 7. Đường cong tải trọng-chuyển vị của mẫu thí nghiệm.

Bảng 2. Giá trị tải trọng kéo lớn nhất của mẫu thí nghiệm.

Mẫu	Dạng phá hoại	Tải trọng phá hoại (kN)	Tải trọng phá hoại trung bình khi chịu kéo nén đồng thời (kN)	Tải trọng phá hoại trung bình khi chịu kéo dọc trục (kN) [4]
C60-1	I	5,11		
C60-2	I	5,32	5,16	7,81
C60-3	II	5,05		
C90-1	I	6,39		
C90-2	II	6,78	6,72	8,05
C90-3	I	7,00		
C120-1	I	7,64		
C120-2	I	7,88	7,41	10,3
C120-3	II	6,72		

### 3.3. Cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt bị uốn cong trong mẫu thí nghiệm BTCLD khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời

Giá trị cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt các bon bị uốn cong trong các mẫu thí nghiệm BTCLD hình ô van khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời được tính từ giá trị tải trọng kéo lớn nhất khi mẫu bị phá hoại và diện tích bố sợi dệt. Nghiên cứu mô phỏng của tác giả Ngô Đăng Quang và các cộng sự đã chỉ ra rằng khi bê tông cốt lưới dệt chịu ứng suất phức tạp, nhiều chiều, cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt bị suy giảm [3]. Bảng 3 thể hiện giá trị cường độ chịu kéo và hệ số suy giảm của lưới sợi các bon bị uốn cong của các mẫu thí nghiệm hình ô van. Kết quả thí nghiệm cho thấy giá trị cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt trong mẫu ô van

đường kính 60 và 120 mm khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời chỉ đạt 33 % tới 48 % giá trị cường độ chịu kéo dọc trục của lưới sợi trần. Trong khi đó, giá trị này lần lượt là 50 % và 66 % với mẫu thí nghiệm có đường kính cong tương ứng khi chịu kéo dọc trục [4]. Mặc dù ứng xử của mẫu thí nghiệm hình ô van trong thí nghiệm kéo nén đồng thời không thay đổi so với thí nghiệm chịu kéo dọc trục, cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt bị suy giảm hơn. Có thể thấy, sự suy giảm cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt các bon chịu ảnh hưởng của cả đường kính cong và tải trọng nén tác dụng lên mẫu. Kết quả của thí nghiệm tương đồng với kết luận của Ngô Đăng Quang và các cộng sự [3]. Khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời, sự mở rộng các vết nứt của bê tông làm giảm lực dính bám giữa bê tông và các bó sợi, và do đó làm giảm cường độ chịu kéo của bó sợi. Ngoài ra, một số nghiên cứu chỉ ra rằng, cường độ chịu kéo của cốt lưới dệt bị uốn cong giảm đi so với bó sợi thẳng khi xuất hiện góc nghiêng giữa phương của tải trọng kéo và phương của bó sợi [11]. Điều này cũng giải thích lý do của hiện tượng phá hoại đứt lưới sợi trong vùng cong của các mẫu BTCLD hình ô van trong thí nghiệm.

Bảng 3. Cường độ chịu kéo và độ suy giảm cường độ chịu kéo của lưới sợi các bon.

Đường kính	D= 60 mm	D= 90 mm	D= 120 mm
Cường độ chịu kéo (MPa)	955,56	1245,06	1372,84
Hệ số suy giảm cường độ trung bình của lưới sợi khi chịu tải trọng kéo nén đồng thời	0,33	0,43	0,48
Hệ số suy giảm cường độ trung bình của lưới sợi khi chịu kéo dọc trục [4]	0,50	0,52	0,66

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày mô hình thí nghiệm nhằm xác định cường độ chịu kéo của lưới sợi dệt các bon trong mẫu BTCLD hình ô van có đường kính cong khác nhau khi chịu tải trọng kéo và nén đồng thời. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng so với thí nghiệm kéo dọc trục, các mẫu hình ô van có cùng đường kính cong bị phá hoại sớm hơn khi chịu đồng thời tải trọng kéo và nén. Tuy nhiên tải trọng nén không gây ảnh hưởng đến quá trình hình thành và phát triển vết nứt trong mẫu thí nghiệm. Tất cả các mẫu bê tông cốt lưới dệt đều bị phá hoại do đứt sợi ở vùng cong. Tương tự như trong thí nghiệm kéo dọc trục, phá hoại trong mẫu thí nghiệm hình ô van xảy ra khi cốt lưới sợi bị kéo đứt ở chính giữa phần cong (Loại I) hoặc ở gần vùng giao giữa đường kính cong và phần thẳng (Loại II). Đồng thời, trong nghiên cứu này, cường độ chịu kéo của lưới sợi các bon trong các mẫu thí nghiệm có đường kính cong từ 60 đến 120 mm chỉ đạt từ 33 % đến 48 % giá trị cường độ chịu kéo dọc trục của lưới sợi trần.

Trên cơ sở mô hình thí nghiệm được đề xuất trong bài báo, có thể thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định cường độ chịu kéo của các loại lưới sợi dệt với cấu trúc và số lớp lưới sợi khác nhau khi chịu các trạng thái chịu lực phức tạp. Các kết quả thực nghiệm thu được sẽ góp phần xây dựng các mô hình thực nghiệm nhằm xác định các đặc tính cơ học của vật liệu BTCLD khi gia cường cho kết cấu BTCT trong thực tế.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài có mã số T2021-XD-010TD.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Curbach, R. Ortlepp, Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrung zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung: Abschlussbericht (gekürzte Fassung), Technische Universität Dresden, 2012.
- [2]. R. Ortlepp, A. Lorenz, M. Curbach, Column strengthening with TRC: influences of the column geometry onto the confinement effect, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009 (2009). <https://doi.org/10.1155/2009/493097>
- [3]. D. Q. Ngo, H. C. Nguyen, D. L. Mai, V. H. Vu, Experimental and numerical evaluation of concentrically loaded RC columns strengthening by textile reinforced concrete jacketing, *Civil Engineering Journal*, 6 (2020) 1428-1442. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091558>
- [4]. H. Ho, H. C. Nguyen, H. T. Dinh, T. T. Nguyen, Experimental investigation on the tensile strength degradation in curved reinforcement of textile reinforced concrete, *Transport and Communications Science Journal*, 73 (2022) 703-712. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.7.4>
- [5]. A. T. T. D. A. Zulassung Z-31.10-182, Gegenstand: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton), 2015.
- [6]. A. Committee, ACI 549.4 R-13: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, American Concrete Institute, 2013.
- [7]. M. Ekenel, F. D. C. y Basalo, A. Nanni, Acceptance criteria for concrete and masonry strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) and steel reinforced grout (SRG) composites, *ACI Special Publication*, 324 (2018) 4.1-4.6. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001418>
- [8]. W. Brameshuber, M. Hinzen, A. Dubey, A. Peled, B. Mobasher, A. Bentur, C. Aldea, F. Silva, J. Hegger, T. Gries, Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete: Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49 (2016) 4923-4927.
- [9]. Bộ Xây Dựng, TCVN 6016: 2011: Xi măng- Cường độ-Phương pháp thử, 2011.
- [10]. L. N. Koutas, Z. Tetta, D. A. Bournas, T. C. Triantafillou, Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: State-of-the-art review, *Journal of Composites for Construction*, 23 (2019) 03118001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882)
- [11]. J. Hegger, W. Brameshuber, N. Will, First International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete, Proceedings of RILEM conference, 2006.
- [12]. T. Brockmann, Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for TRC structures, in *Advances in Construction Materials 2007*. 2007, Springer. p. 119-129.
- [13]. T. Brockmann, W. Brameshuber, Size effect in tensile and compression fracture of fine grained concrete used as matrix for TRC, *ACI Special Publication (ACI Falls, New Orleans)*, 2007.