



## EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL EVALUATION OF CONCENTRICALLY LOADED REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENING BY CARBON TEXTILE REINFORCED CONCRETE JACKETING

Ngo Dang Quang, Nguyen Huy Cuong\*, Nguyen Duy Tien

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 13/3/2020

Revised: 9/6/2020

Accepted: 10/6/2020

Published online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.3>

\* *Corresponding author*

Email: [nguyenhuycuong@utc.edu.vn](mailto:nguyenhuycuong@utc.edu.vn); Tel: 098 983 2425

**Abstract.** Nowadays, TRC (textile reinforced concrete) has become a very popular strengthening technique for concrete structures. This paper presents an investigation into the efficacy of TRC for strengthening reinforced concrete column. Experimental and analytical studies were conducted to evaluate the performance and the confinement effectiveness of the proposed strengthening method. The experimental study was performed on a series of six reinforced concrete square columns tested to failure. Two of them were un-strengthened as references, the other four columns were strengthened with two different layers of carbon TRC. The results indicated that the application of carbon TRC enhanced the ductility and ultimate strength of the specimens. The results from these tests were also used to evaluate the design provisions of the ACI 549.4-13 and Zulassung Z-31.10-182.

**Keywords:** textile reinforced concrete, strengthen, column, confinement, carbon textile reinforcement.



# 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

Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường\*, Nguyễn Duy Tiến

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: 13/3/2020

Ngày nhận bài sửa: 9/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 10/6/2020

Ngày xuất bản Online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.3>

\* Tác giả liên hệ

Email: [nguyenhuycuong@utc.edu.vn](mailto:nguyenhuycuong@utc.edu.vn); Tel: 0989832425

**Tóm tắt.** Trong thời gian gần đây, bê tông cốt lưới dệt đang dần trở thành một loại vật liệu phổ biến để tăng cường cho kết cấu bê tông. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả của việc sử dụng bê tông cốt lưới dệt các bon để bọc tăng cường cho kết cấu cột bê tông cốt thép. Nghiên cứu thực nghiệm và tính toán đồng thời được triển khai để xác định ứng xử chịu lực tổng thể cũng như hiệu quả kiểm chế nở ngang của kết cấu được tăng cường. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện trên sáu mẫu cột vuông bê tông cốt thép, trong đó có bốn cột được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt với hai hàm lượng lưới sợi các bon khác nhau và hai cột còn lại không được tăng cường làm mẫu đối chứng. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc sử dụng các lớp bê tông cốt lưới dệt các bon đã làm tăng tính dẻo và khả năng chịu lực của các cấu kiện. Các kết quả thí nghiệm cũng đồng thời được sử dụng để đánh giá sự phù hợp của các chỉ dẫn thiết kế nêu trong tiêu chuẩn ACI 549.4-13 và Zulassung Z-31.10-182.

**Từ khóa:** bê tông cốt lưới dệt, tăng cường, cột, kiểm chế nở ngang, cốt lưới dệt các bon.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Bê tông cốt lưới dệt (TRC, Textile Reinforced Concrete) là một loại vật liệu thuộc nhóm composite có gốc xi măng, bao gồm bê tông hạt mịn và cốt lưới dệt. Lưới dệt được sử dụng làm cốt trong TRC có nguồn gốc từ sợi các bon, thủy tinh, bazan, v.v. [1]. TRC được nghiên cứu và phát triển từ mạnh từ những năm 1990 ở CHLB Đức [1-5]. Vật liệu này có thể được sử

dụng rất hiệu quả để tăng cường kết cấu bê tông, bao gồm cả tăng cường khả năng chịu uốn, chịu cắt cũng như chịu nén. Khi 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. Do đó, TRC có thể được coi là vật liệu có độ bền chịu ăn mòn và chịu cháy cao. Vì vậy, phương pháp tăng cường bằng TRC có ưu điểm đặc biệt là nó có thể áp dụng được ở những nơi có điều kiện môi trường khắc nghiệt, khu vực chịu tác động mạnh của ánh sáng mặt trời, khu vực ven biển, hải đảo. Ngoài ra, khi sử dụng với cốt sợi không bị ăn mòn như thủy tinh kháng kiềm, các bon, v.v. bê tông hạt mịn có thể được chế tạo từ cát biển, góp phần hạn chế việc sử dụng cát sông đang khan hiếm hiện nay.

Mục đích của việc sửa chữa, tăng cường khả năng chịu nén cho kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) bằng TRC là khôi phục hoặc bổ sung khả năng chịu lực cũng như tính dẻo khi chịu nén cho các cấu kiện này. Sức kháng nén của cấu kiện được khôi phục hoặc bổ sung nhờ việc tăng diện tích bê tông hạt mịn chịu nén, và quan trọng nhất là việc tăng khả năng chịu nén của bê tông cốt (gọi là bê tông vùng lõi) nhờ hiệu ứng kiềm chế nở ngang được tạo ra bởi cốt lưới dệt. Nghiên cứu của Lorenz [3] cho thấy, khả năng chịu nén trực tiếp của TRC nhỏ hơn đáng kể so với bản thân bê tông hạt mịn. Lý do là, khi có cốt lưới dệt, bê tông hạt mịn có thêm các điểm yếu là các vị trí tiếp giáp giữa bê tông và cốt lưới dệt. Ngoài ra, khi chịu nén, các bó sợi đặt theo phương vuông góc với phương chịu lực có xu hướng biến dạng nhỏ lại, qua đó, làm giảm khả năng chịu nén của bê tông. Tuy nhiên, khi chịu nén gián tiếp, nghĩa là khi sử dụng để tăng khả năng kiềm chế nở ngang cho bê tông, TRC làm tăng đáng kể khả năng chịu lực.

Ortlepp và các cộng sự [4] đã nghiên cứu bằng thực nghiệm để đánh giá hiệu quả tăng cường cấu kiện chịu nén bằng TRC. Theo đó, tác dụng của hiệu ứng kiềm chế nở ngang làm tăng khả năng chịu nén cho cốt đến 300 đến 400 % so với tác dụng của bê tông hạt mịn. Khi tăng cường chịu nén, phương chịu lực của cốt lưới dệt cần được bố trí vuông góc hoặc nghiêng góc với phương của lực nén. Để đảm bảo khả năng chịu lực, cốt lưới dệt cần phải có đủ chiều dài neo và phải được giữ để tránh hiện tượng “tách vỏ”. Có thể phải sử dụng các hệ thống neo cơ học giữa bê tông nền và bê tông cốt lưới dệt. Đồng thời, để phát huy hiệu quả tăng cường và tránh cho cốt lưới dệt có thể bị phá hoại sớm, trước khi thi công, các cạnh của cấu kiện được tăng cường nên được làm tròn [4]. Triantafillou và cộng sự [6] đã nghiên cứu thực nghiệm tăng cường cột BTCT bằng “lớp áo” TRC và cho rằng, hiệu quả tăng cường khả năng chịu nén và tính dẻo của kết cấu phụ thuộc vào hàm lượng cốt lưới dệt (số lớp lưới sợi), cường độ chịu kéo của bê tông hạt mịn (từ đó quyết định đến việc phá hoại xảy ra do lưới sợi bị kéo tuột hay bị kéo đứt).

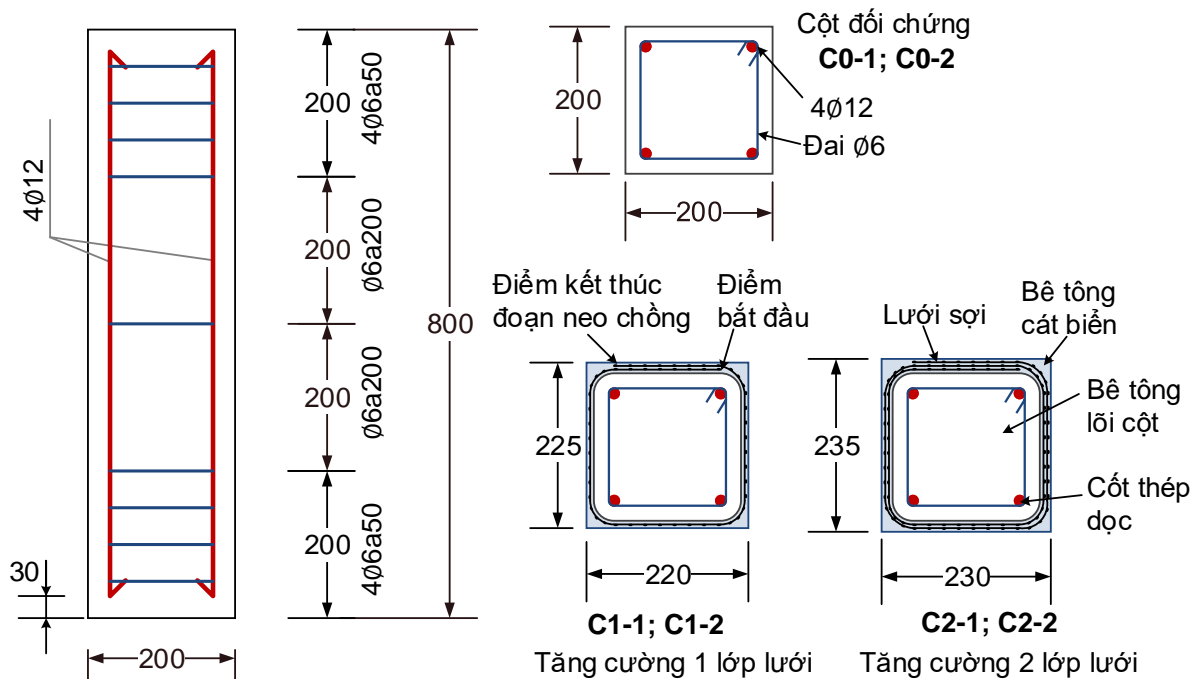
Nhằm từng bước đưa TRC vào sử dụng trong các công trình xây dựng một cách an toàn và tin cậy, trong thời gian qua, một loạt nghiên cứu đã được thực hiện tại trường Đại học Giao thông vận tải. TRC đã được nghiên cứu trong việc tăng cường khả năng chịu uốn và chịu cắt cho dầm [9], chịu chọc thủng cho sàn [10]. Sau các nghiên cứu cơ bản, TRC cũng đã lần đầu tiên được ứng dụng thành công trong việc tăng cường khả năng chịu lực cho một sàn nhà công nghiệp ở Vĩnh Phúc [11]. Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm trong việc tăng cường khả năng chịu nén cho cột BTCT bằng phương pháp bọc TRC, trong đó sử dụng bê tông cát biển kết hợp với lưới sợi các bon; từ đó đánh giá sự phù hợp của các chỉ

dẫn thiết kế về tính toán sức kháng nén của cột được tăng cường nêu trong tiêu chuẩn ACI 549.4-13 (Mỹ) và Zulassung Z-31.10-182 (Đức). Tuy nhiên, do được thực hiện trong thời gian tương đối ngắn nên mục tiêu của bài báo là xác định các ứng xử ngắn hạn. Ảnh hưởng của cát biển đến ứng xử lâu dài của kết cấu chưa được xem xét ở đây.

## 2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

### 2.1. Thiết lập thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, sáu cột BTCT có kích thước  $200 \times 200 \times 800$  mm được thí nghiệm để xác định hiệu quả tăng cường khả năng chịu nén bằng TRC. Trong đó, có 2 cột (được ký hiệu là C0-1 và C0-2) được sử dụng làm mẫu đối chứng; hai cột (C1-1 và C1-2) được tăng cường bằng 1 lớp lưới sợi dệt các bon quấn xung quanh tiết diện cột; hai cột còn lại (C2-1 và C2-2) được tăng cường bằng 2 lớp lưới sợi các bon. Cốt thép cho cột BTCT gồm 4 thanh cốt dọc  $\varnothing 12$  và các thanh cốt đai  $\varnothing 6$  được đặt dày ở 2 đầu cột (Hình 1).



Hình 1. Cấu tạo các cột BTCT thí nghiệm.

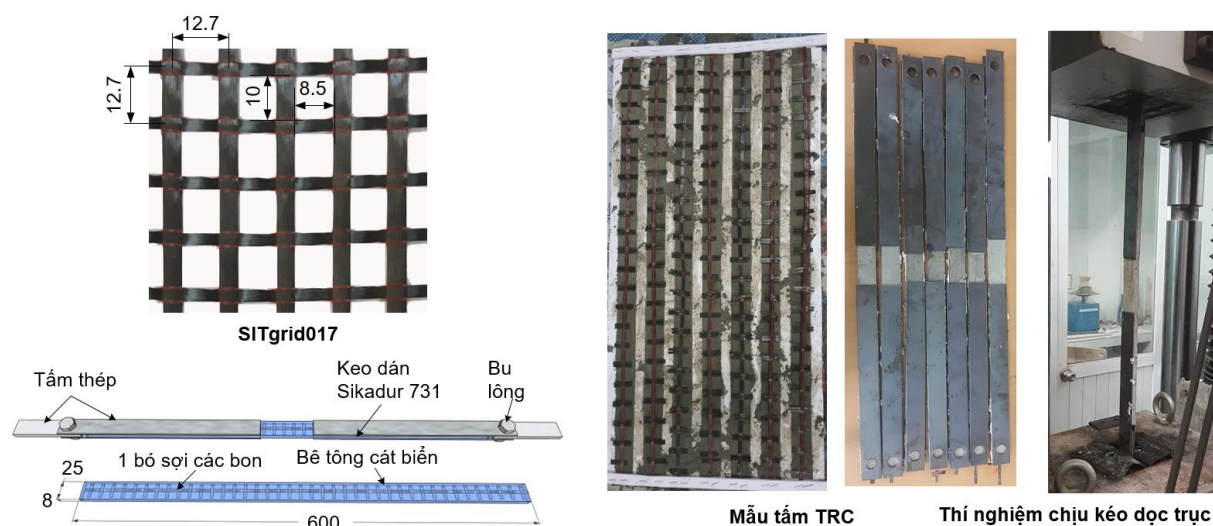
Sau khi chế tạo, các cột BTCT được bảo dưỡng trong 28 ngày. Sau đó, 4 cột BTCT được tăng cường bằng bê tông hạt mịn cát biển cốt lưới dệt (Hình 2). Để tạo hiệu ứng kiềm chế nở ngang tốt cho bê tông cốt, các góc của cột được vát tròn với bán kính 3 cm. Đầu tiên, một lớp bê tông cát biển có chiều dày 5 mm được trát lên bề mặt cột đã tạo nhám. Sau đó, 1 lớp lưới sợi được quấn xung quanh 4 mặt của tiết diện cột. Tiếp theo, lớp bê tông hạt mịn thứ 2 được trát bổ sung, và đoạn lưới sợi "neo chồng" còn lại tiếp tục được quấn lên cạnh tiếp theo (đối với cột C1-1 và C1-2). Với cột C2-1 và C2-2, việc tăng cường được thực hiện tương tự với 2 lớp lưới sợi quấn xung quanh tiết diện cột.

Về tính chất của vật liệu, cốt thép dọc và cốt thép đai có cường độ chịu kéo trung bình lần lượt là 422 MPa và 363 MPa. Bê tông cốt có cường độ chịu nén trung bình ở tuổi 28 ngày là 39,5 MPa. Bê tông hạt mịn cát biển được chế tạo từ xi măng póc lăng bền sun phát PCSR40

X18, tro bay của Nhà máy nhiệt điện Phả Lại, phụ gia sikament NN và cát biển được lấy từ bãi biển Cửa Lò (Nghệ An) [8]. Bê tông này có cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn trung bình ở tuổi 28 ngày lần lượt là 44,14 MPa và 7,47 MPa.



Hình 2. Quy trình chế tạo và tăng cường cột BTCT bằng TRC.

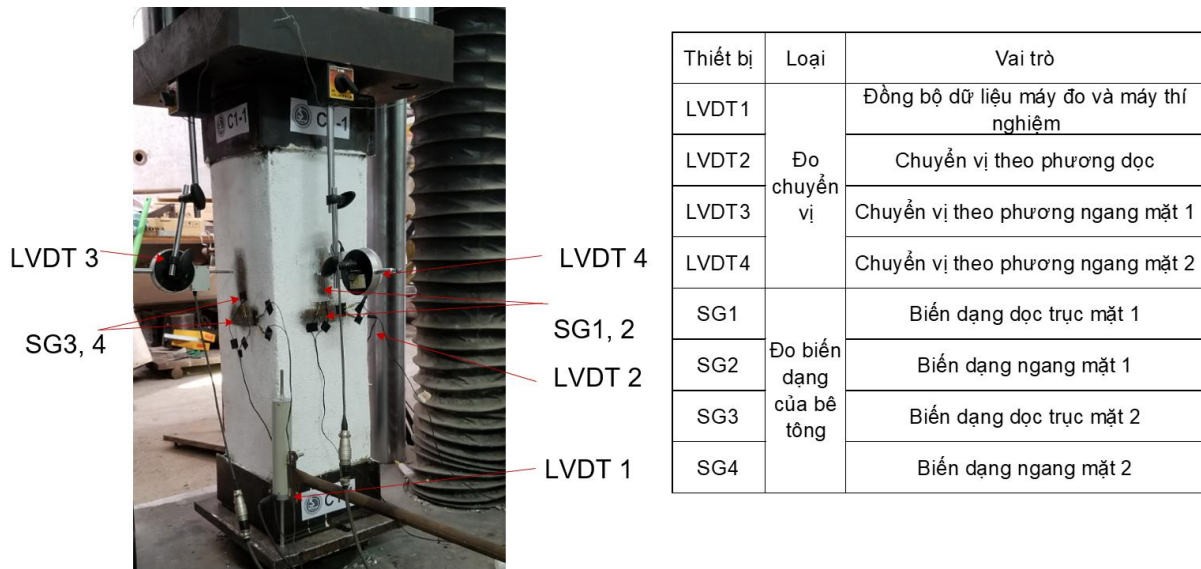


Hình 3. Lưới sợi các bon và thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo của sợi trong bê tông.

Cốt lưới sợi dệt được sử dụng ở nghiên cứu này là sợi các bon SITgrid017, được sản xuất bởi hãng V.FRAAS (Đức). Các bó sợi các bon có độ mịn 3200 tex, được dệt đều theo cả 2 phương (0/90°), với khoảng cách giữa các bó sợi là 12,7 mm. Mỗi bó sợi được tổ hợp từ 48.000 sợi cơ bản, có diện tích tiết diện mỗi bó sợi là 1,808 mm<sup>2</sup>. Diện tích lưới sợi dệt trên mỗi mét rộng là 140 mm<sup>2</sup>. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bó sợi trần, được xác định từ thí nghiệm kéo dọc trực tiếp, lần lượt là 2890 MPa và 185 GPa. Bên cạnh đó, nghiên cứu này còn thực hiện thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo của bó sợi đặt trong bê tông cát

biển, theo khuyến cáo của chỉ dẫn kỹ thuật RILEM Technical Committee 232-TDT. Mẫu thí nghiệm tấm TRC có kích thước  $25 \times 600 \times 8$  mm và có 1 bó sợi nằm ở chính giữa (Hình 3). Mẫu thí nghiệm được gia tải dọc trục cho đến khi phá hoại (bó sợi nằm trong bê tông bị kéo đứt). Kết quả thí nghiệm cho thấy, cường độ chịu kéo trung bình của bó sợi SITgrid017 nằm trong bê tông cát biển bằng 2750 MPa, nhỏ hơn so với cường độ chịu kéo của bó sợi trần.

Trong thí nghiệm, tất cả các cột đều được gia tải nén dọc trục, theo phương pháp không chế bằng lực với tốc độ gia tải 1 kN/s, thực hiện trên máy kéo - nén SANS 3000kN, tại phòng thí nghiệm Vật liệu và Kết cấu xây dựng, thuộc trường Đại học Giao thông vận tải. Việc bố trí các thiết bị đo được thể hiện trên Hình 4. Để xác định ứng xử của kết cấu, các giá trị phản lực chân cột và chuyển vị đầu cột sẽ được xác định từ máy kéo nén; các giá trị biến dạng dọc và biến dạng ngang ở các mặt cột tại giữa chiều cao được xác định từ các lá điện trở dán tại các vị trí đó; các giá trị chuyển vị dọc và chuyển vị ngang của thân cột được lấy từ các thiết bị đo chuyển vị (LVDT) được bố trí tại các vị trí tương ứng.

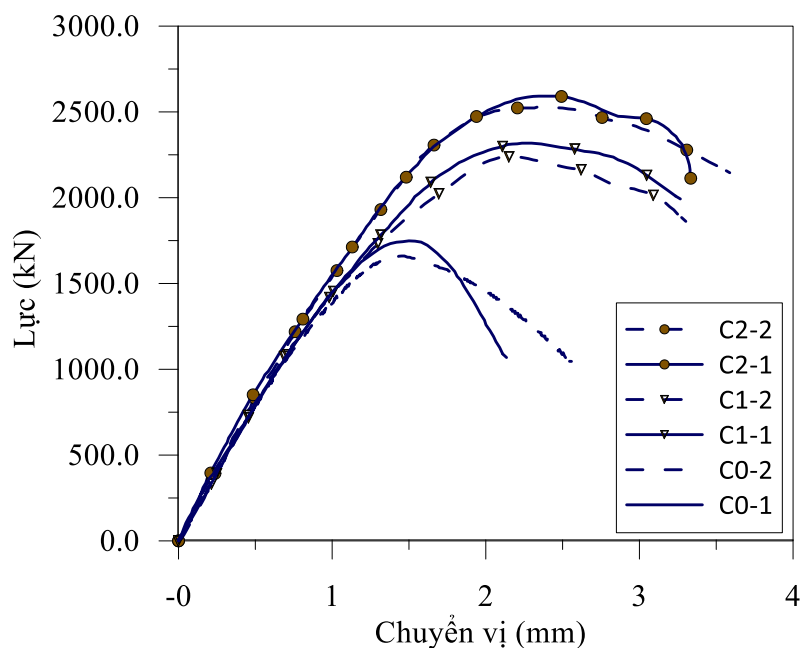


Hình 4. Thiết lập hệ thống đo và thí nghiệm cột chịu nén đứng tâm

## 2.2. Kết quả thí nghiệm

Mối quan hệ giữa lực tác dụng và chuyển vị dọc trục của 6 cột thí nghiệm được biểu diễn trên Hình 5, cấu trúc vết nứt của các mẫu thí nghiệm được biểu diễn trên Hình 6, Hình 8 và Hình 9. Giá trị tải trọng lớn nhất và hiệu quả tăng cường được tính toán và tóm tắt ở Bảng 2. Hình 5 cho thấy, ứng xử chịu lực của tất cả các cột là tương tự nhau. Trên phần lớn quá trình chịu lực, chuyển vị dọc trục của cả cột được tăng cường và cột không tăng cường đều tăng gần như tuyến tính cùng với giá trị lực. Độ cứng của kết cấu cột được tăng cường có phần lớn hơn so với cột không được tăng cường. Điều này có thể được giải thích là do tiết diện của cấu kiện được tăng cường đã gia tăng đáng kể, đặc biệt là với các cột được tăng cường bằng 2 lớp lưới sợi dệt. Các cột không được tăng cường (C0-1 và C0-2) bắt đầu bị nứt dọc theo chiều cao cột ở mức tải trọng xấp xỉ 1200 kN, và bị phá hoại ở mức tải trọng xấp xỉ 1720 kN. Tại thời điểm này, các vết nứt dọc đã mở rộng, kèm theo sự uốn cong của các thanh cốt thép dọc (Hình 6), đặc biệt là tại khu vực ở giữa cột, nơi có khoảng cách cốt thép đai thưa ( $=200$  mm). Bê tông lõi cột ở khu vực này có dấu hiệu bị ép vỡ, phần lớp bê tông bảo vệ ở ngoài cột đai bị bong bật hẳn ra ngoài. Quan hệ giữa lực tác dụng và biến dạng dọc trục, biến dạng ngang ở mặt ngoài bê tông cột C0-1 được biểu diễn ở Hình 7. Có thể thấy, biến dạng dọc trục của bê

tông cột tại thời điểm sập phá hoại xấp xỉ 3,5%, trong khi biến dạng ngang của bê tông chỉ xấp xỉ 0,3%. Tuy nhiên, biến dạng dọc trục và biến dạng ngang ở 2 mặt của cột lần lượt chênh nhau 9,2% và 61,4%. Điều này chứng tỏ kết cấu cột chịu nén không hoàn toàn đúng tâm.



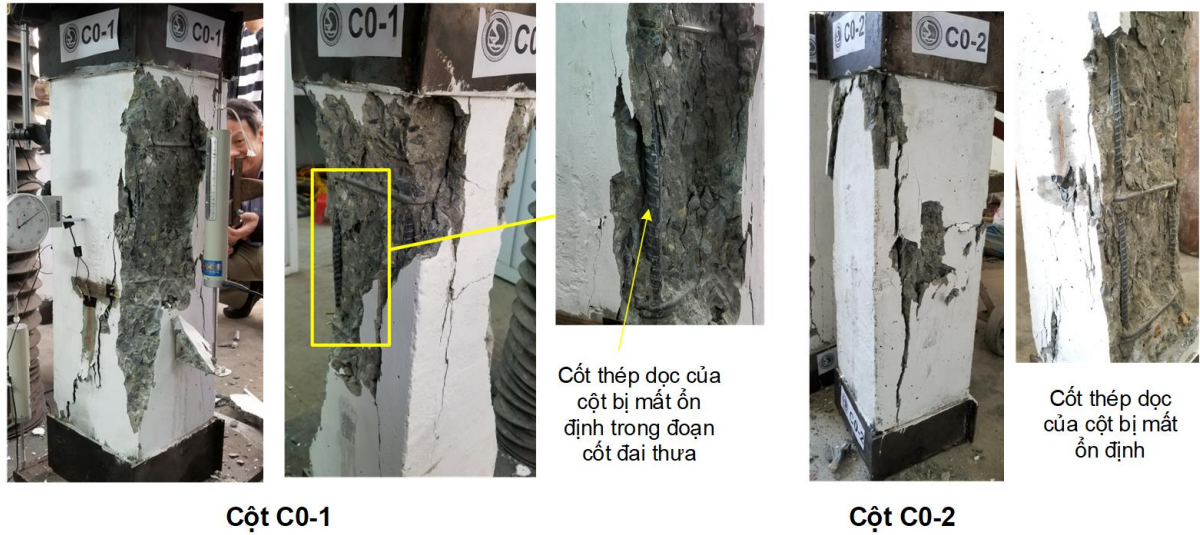
Hình 5. Quan hệ lực - chuyển vị dọc trục của các cột thí nghiệm.

Bảng 2. Giá trị tải trọng lớn nhất và hiệu quả tăng cường được tính toán.

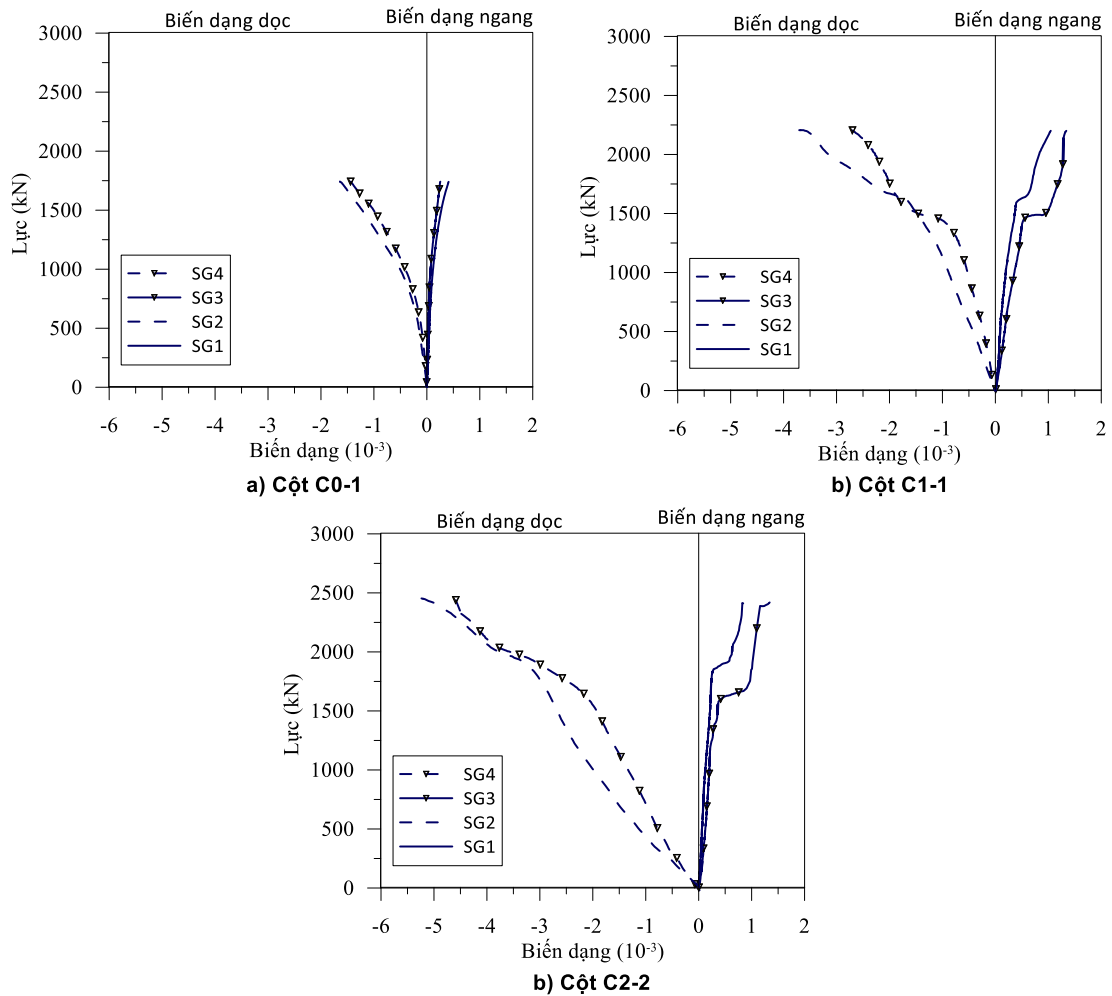
Cột	Tiết diện cột		Lực phá hoại		Hiệu quả tăng cường	
	$b$ (mm)	$h$ (mm)	$P_i$ (kN)	$P_{tb}$ (kN)	Tổng thể %	Hiệu ứng kiềm chế nở ngang (%)
C0-1	200	200	1755,49	1720,36	-	-
C0-2			1685,25			
C1-1	220	225	2215,67	2267,75	31,82	15,25
C1-2			2319,84			
C1-1	230	235	2530,58	2493,76	44,96	20,46
C2-2			2456,96			

Các cột được tăng cường với 1 và 2 lớp lưới sợi đều bị phá hoại theo một trạng thái tương tự nhau (Hình 8 và Hình 9), với các vết nứt dọc theo chiều dài cột xuất hiện nhiều ở gần các góc của tiết diện cột. Đối với các cột này, các vết nứt đầu tiên xuất hiện dọc theo chiều cao cột ở mức tải trọng xấp xỉ 1395 kN và 1455 kN, tương ứng với cột được bổ sung 1 và 2 lớp lưới sợi. Tại thời điểm này, biến dạng ngang ở 2 mặt ngoài của bê tông cột tăng đột ngột ở mức biến dạng xấp xỉ 0,3%. Mức biến dạng gây nứt lớn này (lớn hơn so với bê tông thông thường), có thể được giải thích là do bê tông cát biển có cường độ chịu kéo uốn cao, trong khi mô đun đàn hồi thấp hơn so với bê tông thông thường [8]. Sau đó, các vết nứt khác lần lượt xuất hiện. Cấu trúc vết nứt của các cột được tăng cường có số lượng vết nứt nhiều hơn, và bề rộng vết nứt nhỏ hơn (Hình 6, Hình 8 và Hình 9). Nhờ lớp vỏ TRC, mặt ngoài của tiết diện cột không bị vỡ vụn, bong bật ra như đối với các cột không được tăng cường. Tại thời điểm phá hoại, biến dạng dọc của bê tông cát biển ở cột C2-2 xấp xỉ 5%. Trong khi đó, đối với cột C1-1, biến dạng dọc của lớp vỏ bê tông cát biển chỉ dao động từ 3,0 – 3,7 %. Sự chênh lệch

giữa biến dạng dọc của lớp vỏ bê tông cốt biển ở 2 mặt của cùng 1 cột cho thấy, kết cấu cột chịu nén không hoàn toàn đúng tâm.



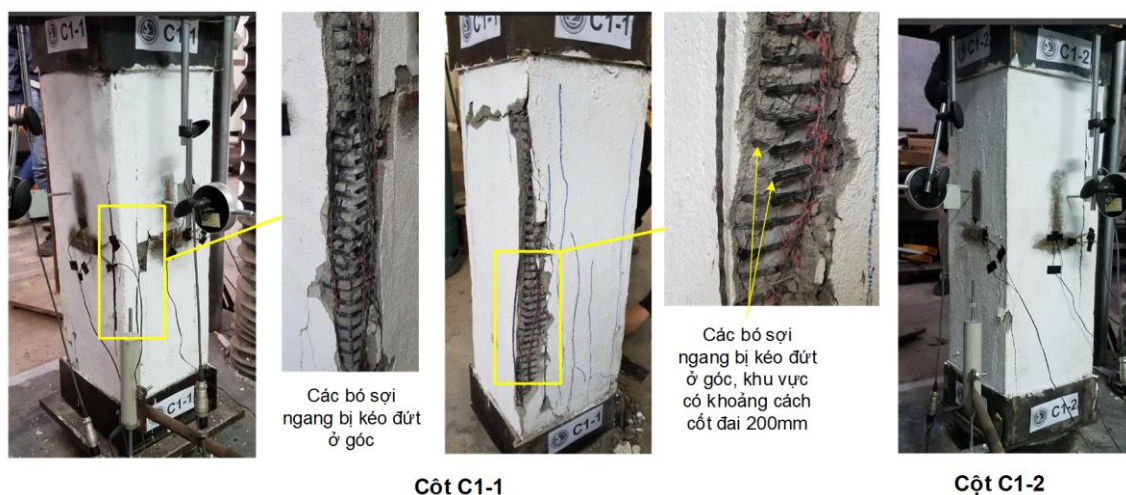
Hình 6. Dạng phá hoại của cột đối chứng C0-1 và C0-2.



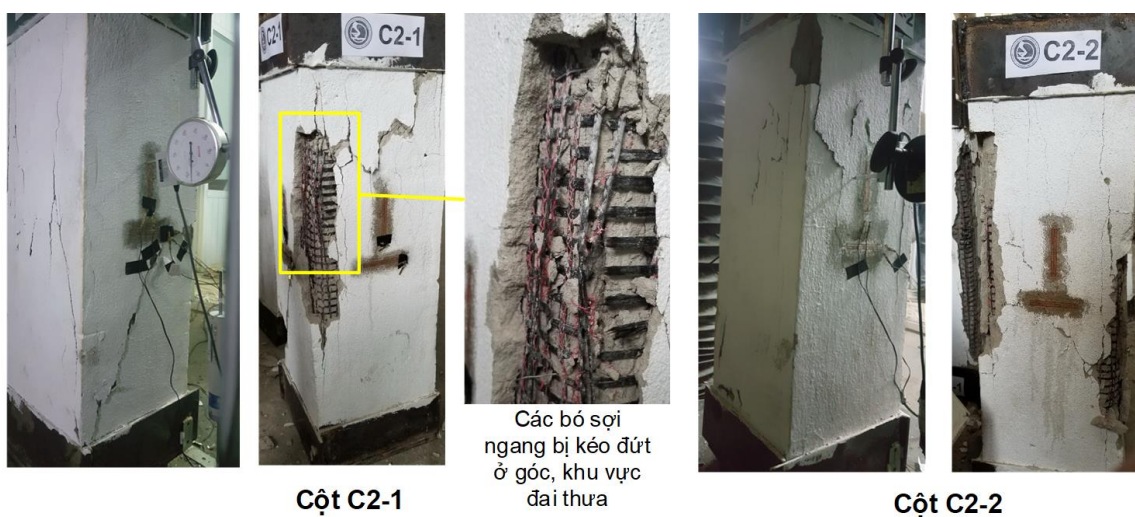
Hình 7. Quan hệ giữa lực và biến dạng của các cột thí nghiệm.



Với vật liệu và cấu tạo trong thí nghiệm, khả năng chịu nén dọc trục của các cột được tăng cường bằng TRC với 1 và 2 lớp lưới sợi tăng lên lần lượt là 31,82% và 44,96 % so với cột không được tăng cường. Sự tăng khả năng chịu lực có thể được giải thích bởi hai lý do: tiết diện cột được mở rộng (từ phần bê tông cát biển) và hiệu quả kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt đối với bê tông lõi cột. Hiệu ứng kiểm chế nở ngang sinh ra bởi cốt lưới dệt có thể tính một cách gần đúng như là sự chênh lệch giữa khả năng chịu lực của cột được tăng cường sau khi bỏ đi phần tham gia của bê tông cát biển và khả năng chịu lực của cột không được tăng cường. Kết quả tính toán cho thấy, việc sử dụng 1 và 2 lớp lưới sợi tạo hiệu ứng kiểm chế nở ngang, làm tăng hiệu quả chịu nén lần lượt là 15,25% và 20,46%. Các mẫu cột C1-1 và C1-2 sau đó được đục bỏ lớp nứt vỡ bên ngoài và thấy rằng, các bó sợi ngang ở góc tiết diện cột bị kéo đứt (Hình 8), đặc biệt là trong đoạn có khoảng cách cốt đai thưa ( $=200$  mm). Đồng thời, bê tông vùng lõi cột ban đầu đã bị ép vỡ vụn, trong khi lớp “áo” TRC chưa có nhiều vết nứt mở rộng lớn. Điều này chứng tỏ hiệu quả đáng kể của lưới sợi dệt trong việc kiểm chế nở ngang cho kết cấu cột đã được thí nghiệm. Ở các cột được tăng cường bằng 2 lớp lưới sợi, các bó sợi ngang ở lớp lưới sợi ngoài cùng cũng đã bị kéo đứt ở vị trí góc tiết diện cột. Tuy nhiên, số lượng bó sợi ngang của lớp lưới sợi phía trong bị kéo đứt ít hơn (Hình 9).



Hình 8. Dạng phá hoại của các cột được tăng cường bằng 1 lớp lưới sợi.



Hình 9. Dạng phá hoại của các cột được tăng cường 2 lớp lưới sợi.

### 3. TÍNH TOÁN XÁC ĐỊNH SỨC KHÁNG NÉN CỦA CỘT ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG THEO MỘT SỐ TIÊU CHUẨN THIẾT KẾ

#### 3.1. Sức kháng nén của cấu kiện được tăng cường – xác định theo tiêu chuẩn Đức Zulassung Z-31.10-182

Sức kháng nén của mặt cắt sau khi tăng cường có thể được tính toán như đề xuất được nêu trong tiêu chuẩn cơ sở của Đức, Zulassung Z-31.10-182 [2], như sau:

$$N_u = \max(N_{u1}, N_{u2}) \quad (1)$$

Với:  $N_{u1}$  là tổng sức kháng nén của lớp vỏ bê tông hạt mịn và phần lõi, không xét đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang.  $N_{u2}$  là sức kháng nén của phần lõi với bê tông được kiểm chế nở ngang.

$N_{u1}$  được xác định theo công thức sau:

$$N_{u1} = N_c + N_{fc} = 0,85f'_c \times A_c + A_s f_y + 0,27f'_{fcm} A_{fc,eff} \quad (2)$$

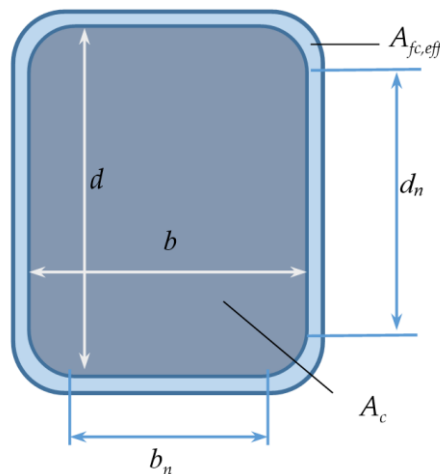
Với:  $A_c$  là diện tích phần lõi;  $A_{fc,eff}$  là diện tích của lớp vỏ bê tông hạt mịn;  $A_s$  và  $f_y$  là diện tích và cường độ của cốt thép dọc;  $f'_c$  và  $f'_{fcm}$  lần lượt là cường độ chịu nén danh định của bê tông lõi và của bê tông hạt mịn.

$N_{u2}$  được tính toán như sau:

$$N_{u2} = A_c \times f'_{cc} \quad (3)$$

Trong đó,  $f'_{cc}$  là cường độ của bê tông được kiểm chế nở ngang và có thể được xác định như sau:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 0,27 \times \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} + 5,55 \times \left( \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} \right)^2 - 3,51 \times \left( \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} \right)^3 \quad (4)$$



Hình 10. Cấu tạo mặt cắt.

Trong đó,  $f'_{cc}$  và  $f'_{c0}$  lần lượt là cường độ bê tông được kiểm chế nở ngang và cường độ bê tông không được kiểm chế nở ngang;  $\sigma_{lu}$  là ứng suất kiểm chế nở ngang do cốt lưới dẹt tạo

ra. Giá trị này có thể được xác định theo công thức:

$$\sigma_{lu} = k_e \times \frac{(b+d)}{b \times d} \times a_f \times n_{eff} \times f_{fu} \quad (5)$$

Ở đây,  $k_e$  là hệ số có hiệu, được xác định như sau:

$$k_e = 1 - \frac{b_n^2 + d_n^2}{3A_c} \quad (6)$$

$a_f$  là diện tích 1 lớp cốt lưới dẹt tính với 1 m chiều cao cột được tăng cường;  $n_{eff}$  là số lớp lưới có hiệu (không tính các lớp chồng lên nhau ở đầu lớp tăng cường);  $f_{fu}$  là cường độ chịu kéo tính toán của cốt lưới dẹt;  $b$  và  $d$  là chiều dài các cạnh của mặt cắt;  $b_n$  và  $d_n$  là chiều dài các cạnh sau khi được làm tròn góc, được mô tả trong Hình 10.

Điều kiện để áp dụng công thức (5) là  $\sigma_{lu}/f'_{cc} < 0,8$ .

### 3.2. Sức kháng nén của cầu kiện sau tăng cường – xác định theo tiêu chuẩn ACI 549.4-13

Theo tiêu chuẩn Mỹ ACI 549.4-13 [7], cường độ chịu nén của bê tông khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dẹt:

$$f'_{cc} = f'_c + 3,1\kappa_a f_l \quad (7)$$

Trong đó,  $\kappa_a$  là hệ số hình dạng, được xác định theo công thức (12);  $f_l$  là ứng suất kiềm chế nở ngang, được xác định như sau:

Với mặt cắt hình tròn:

$$f_l = (2nA_f E_f \varepsilon_{fe}) / D \quad (8)$$

Với mặt cắt hình chữ nhật:

$$f_l = (2nA_f E_f \varepsilon_{fe}) / (b^2 + h^2)^{0,5} \quad (9)$$

Với  $D$  là đường kính mặt cắt hình tròn;  $b$ ,  $h$  là chiều dài cạnh ngắn và cạnh dài của mặt cắt chữ nhật,  $n$  là số lớp lưới dẹt,  $A_f$  là diện tích 1 lớp lưới tính với một đơn vị chiều dài,  $E_f$  là mô đun đàn hồi và  $\varepsilon_{fe}$  là biến dạng có hiệu của cốt lưới dẹt.

Biến dạng có hiệu của cốt lưới dẹt được xác định như sau:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0,012 \quad (10)$$

Biến dạng nén cực hạn của bê tông khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dẹt

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left( 1,5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left( \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \leq 0,01 \quad (11)$$

Ở đây,  $\kappa_b$  là hệ số hình dạng, được xác định theo công thức (13).

Các hệ số hình dạng được xác định như sau

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^2 \quad (12)$$

$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{h}{b} \right)^2 \quad (13)$$

Với mặt cắt hình chữ nhật,  $\kappa_a = \kappa_b = 1$ .

Tỷ số giữa diện tích mặt cắt có hiệu  $A_e$  và diện tích mặt cắt bê tông  $A_c$  được xác định:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[ \left( \frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left( \frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right] - \rho_g}{3A_g - \rho_g} \quad (14)$$

Trong đó,  $A_g$  là diện tích mặt cắt nguyên,  $\rho_g$  là hàm lượng cốt thép dọc tính đối với diện tích mặt cắt nguyên,  $r_c$  là bán kính cung tròn vê góc.

Sức kháng nén đúng tâm của cầu kiện sau khi được tăng cường:

$$P_n = A_c f'_{cc} + A_s f_y \quad (15)$$

Sức kháng nén tính toán của cầu kiện được tăng cường không được vượt quá 20% sức kháng của cầu kiện trước khi được tăng cường.

### 3.3. Tính toán so sánh

Phần này trình bày kết quả tính toán theo hai phương pháp trên và so sánh với kết quả thí nghiệm đã nêu ở Mục 2.2. Đối tượng tính toán là các cầu kiện cột đã được sử dụng trong thí nghiệm: Kích thước mặt cắt  $b = d = 200$  mm; Bán kính cung tròn góc là 30 mm; Cường độ bê tông lõi  $f'_c = 40$  MPa; Cường độ chịu kéo tính toán của cốt lưới dệt  $f_{fu} = 2500$  MPa; Mô đun đàn hồi của cốt lưới dệt  $E_f = 200000$  MPa; Diện tích quy đổi của cốt lưới dệt:  $a_f = 0,14$  mm<sup>2</sup>/mm.

Bảng 3. Tính toán theo phương pháp của Zulassung Z-31.10-182.

Hệ số $k_e$	$k_e = 1 - \frac{b_n^2 + d_n^2}{3A_g} = 1 - \frac{160^2 + 160^2}{3 \times (200 \times 200)} = 0,65$
Ứng suất kiểm chế nở ngang do cốt lưới dệt tạo ra khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$\begin{aligned} \sigma_{lu} &= k_e \times \frac{(b+d)}{b \times d} \times a_f \times n_{eff} \times f_{fu} \\ &= 0,65 \times \frac{200+200}{200 \times 200} \times 0,14 \times 1 \times 2500 = 2,27 \text{ MPa} \end{aligned}$
Cường độ bê tông được kiểm chế nở ngang khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$\begin{aligned} f'_{cc} &= f'_{c0} \left( 1 + 0,27 \times \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} + 5,55 \times \left( \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} \right)^2 - 3,51 \times \left( \frac{\sigma_{lu}}{f'_{c0}} \right)^3 \right) \\ &= 41,3 \text{ MPa} \end{aligned}$

Khả năng chịu nén do bê tông lõi được kiểm chế nở ngang khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt  $N_{cc} = f'_{cc} A_c = 41,3 \times 37174 = 1535360 \text{ N} = 1535,3 \text{ kN}$

Khả năng chịu nén của cốt thép dọc  $N_s = A_s f_y = 452 \times 422 = 190744 \text{ N} = 190,7 \text{ kN}$

Khả năng chịu nén của mặt cắt khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt  $N = N_{cc} + N_s = 1726,1 \text{ kN}$

Tương tự, khả năng chịu nén của mặt cắt khi sử dụng 2 lớp cốt lưới dệt:  $f'_{cc} = 43,8 \text{ MPa}$ ,  $N = 1822 \text{ kN}$

Bảng 4. Tính toán theo phương pháp của ACI 549.

Tỷ số giữa diện tích mặt cắt có hiệu và diện tích mặt cắt bê tông	$A_e/A_c = 0,67$
Hệ số hình dạng	$\kappa_a = 0,67$
Ứng suất kiểm chế nở ngang khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$f_l = 2,4 \text{ MPa}$
Cường độ bê tông lõi đã được kiểm chế khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$f'_{cc} = 45 \text{ MPa}$
Sức kháng nén do bê tông lõi được kiểm chế nở ngang khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$N_{cc} = 0,85 f'_{cc} A_c = 1600 \text{ kN}$
Sức kháng nén của mặt cắt khi sử dụng 1 lớp cốt lưới dệt	$N = N_{cc} + N_s = 1791 \text{ kN}$
Sức kháng nén của mặt cắt khi sử dụng 2 lớp cốt lưới dệt	$N = N_{cc} + N_s = 1947 \text{ kN}$

Có thể thấy rằng, kết quả tính toán theo hai chỉ dẫn của Đức và của Mỹ đều cho kết quả khá giống nhau, chênh nhau không quá 7% với trường hợp tăng cường 2 lớp cốt lưới dệt, và đều thiên về an toàn (Bảng 5).

Bảng 5. Tổng hợp kết quả tính toán.

Dạng cấu kiện	Thí nghiệm (kN)	Sức kháng danh định tính theo Zulassung Z-31.10-182		Sức kháng danh định tính theo ACI 549	
		(kN)	So với thí nghiệm (%)	(kN)	So với thí nghiệm (%)
Cấu kiện không được tăng cường	1720				
Cấu kiện tăng cường bằng 1 lớp cốt lưới dệt	2267,75	1726	76	1791	79
Cấu kiện tăng cường bằng 2 lớp cốt lưới dệt	2493,76	1822	73	1947	78

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày một số kết quả thí nghiệm đánh giá việc tăng cường khả năng chịu nén cho cột BTCT bằng lớp vỏ bọc TRC, trong đó sử dụng bê tông cát biển kết hợp với lưới sợi các bon. Với kết cấu và vật liệu đã được thí nghiệm, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

Khả năng chịu nén đúng tâm của các cột được tăng cường bằng 1 và 2 lớp lưới sợi các bon tăng lên lần lượt là 31,82% và 44,96 % so với cột đối chứng. Hiệu quả tăng cường đạt

được nhờ sự mở rộng mặt cắt cột (của phần bê tông cát biển) và hiệu quả kiềm chế nở ngang của lưới sợi dệt đối với bê tông lõi cột.

Nhờ việc cấu tạo đầy đủ chiều dài neo và nối chồng, cũng như dính bám giữa lưới sợi với bê tông hạt mịn đủ tốt, hiện tượng “tách vỏ” đã không xảy ra. Mặc dù các góc của mặt cắt bê tông lõi đã được làm tròn trước khi tăng cường nhưng cốt sợi dệt vẫn bị đứt đầu tiên ở các vị trí đó. Điều này cho thấy, ở các góc, cốt sợi bị giảm cường độ nhiều do trạng thái chịu lực phức tạp. Do đó, cần phải có các nghiên cứu sâu hơn để xác định cường độ của cốt lưới dệt tại các khu vực này nhằm phục vụ cho công tác thiết kế.

Kết quả tính toán theo hai chỉ dẫn của Đức và của Mỹ đều cho kết quả khá giống nhau, chênh lệch không quá 7% với trường hợp tăng cường 2 lớp cốt lưới dệt, và đều thiên về an toàn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W. Brameshuber, Textile Reinforced Concrete, State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, 1st ed. Bagnex, vol. 36: RILEM Publications S.A.R.L., 2006. <https://www.rilem.net/publication/publication/100>
- [2]. Zulassung Z-31.10-182, Gegenstand: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton), Prüfstelle: DIBt, Antragsteller: TUDAG TU Dresden Aktiengesellschaft, 2015.
- [3]. E. Lorenz, End anchorage and overlapping of textile reinforcements in concrete, Proceedings of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, pp 685-690, 2012.
- [4]. 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, 29 (2009) 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2009/493097>
- [5]. R. Ortlepp, M. Curbach, Verstärken von Stahlbetonstützen mit textilbewehrtem Beton, Beton- und Stahlbetonbau, 104 (2009) 681–689 (in German). <https://doi.org/10.1002/best.200900034>
- [6]. T.C. Triantafillou, C.G. Papanicolaou, P. Zissimopoulos, T. Laourdekis, Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets, ACI Structural Journal, 103 (2006) 28–37.
- [7]. ACI Committee, ACI 549.4R-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.
- [8]. Ngô Đăng Quang, Nghiên cứu ứng dụng bê tông cốt lưới dệt trong tăng cường kết cấu bê tông cốt thép ở vùng biển và hải đảo, Báo cáo tổng kết Đề tài NCKH cấp Bộ Giáo dục và đào tạo, Mã số B2018-GHA-16, 2019.
- [9]. Nguyễn Huy Cường, Ngô Đăng Quang, Lê Minh Cường, Vũ Văn Hiệp, Phân tích thực nghiệm đánh giá ứng xử chịu cắt của dầm bê tông cốt thép được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi carbon, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 56 (2017) 20-25.
- [10]. Nguyễn Xuân Huy, Lê Minh Cường, Nguyễn Thị Nhung, Phân tích sự phá hoại chọc thủng của bản bê tông cốt thép được gia cường bằng bê tông cốt lưới dệt, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 69 (2019) 41-47.
- [11]. Vũ Văn Hiệp, Ngô Đăng Quang, Nguyễn Huy Cường, Giải pháp sửa chữa, tăng cường sàn panel lắp ghép bằng bê tông cốt lưới dệt, Tạp chí Xây dựng, 8 (2018), 101-104.