

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC NÉN DỌC TRỰC CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP CÓ CỐT ĐÃ BỊ ẼN MÒN ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT SỢI CÁC BON

THEORETICAL MODELING FOR PREDICTING THE AXIAL COMPRESSIVE CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH CORRODED REINFORCEMENT STRENGTHENED BY CARBON TEXTILE REINFORCED CONCRETE

➔ ThS. Đinh Hữu Tài*, TS. Vũ Văn Hiệp, ThS. Đặng Việt Tuấn - Trường Đại học Giao thông vận tải

*Điện thoại: 0334911803 *Email: taidh@utc.edu.vn

Tóm tắt: Ngày nay, bê tông cốt lưới dệt (Textile reinforced concrete-TRC) là một trong những phương án được sử dụng để gia cường cho các cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) đã bị giảm khả năng chịu lực do ăn mòn, đặc biệt với những cấu kiện chịu lực chính như cột, dầm, sàn, ... Tại Việt Nam, các nghiên cứu về cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng TRC vẫn còn hạn chế. Bài báo này trình bày nghiên cứu về mô hình lý thuyết tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT có cốt thép đã bị ăn mòn được gia cường bằng TRC sợi các bon có xét đến các ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép. Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết sẽ được kiểm chứng với kết quả nghiên cứu thực nghiệm nén dọc trục đúng tâm mẫu cột. Các nhóm mẫu bao gồm: cột BTCT đối chứng không bị ăn mòn, cột BTCT bị ăn mòn không được gia cường và cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng TRC sợi các bon. Mô hình lý thuyết cho kết quả tương đồng với kết quả thí nghiệm, mức độ sai lệch là tương đối nhỏ (dưới 5%) cho thấy độ tin cậy cao của mô hình lý thuyết đã được xây dựng trong nghiên cứu này.

Từ khóa: Gia cường, ăn mòn, cột chịu lực nén dọc trục được gia cường, bê tông cốt lưới dệt sợi các bon, bê tông hạt mịn, mô hình tính toán lý thuyết.

1. Mở đầu

Các công trình bê tông cốt thép (BTCT) được xây dựng tại các vùng ven biển hoặc trong môi trường có hàm lượng muối cao thường phải đối mặt với hiện tượng ăn mòn cốt thép. Đây là một trong những nguyên nhân chủ yếu làm suy giảm khả năng chịu tải trọng, độ bền lâu và tính toàn vẹn của kết cấu bê tông. Trong hệ kết cấu công trình, cột (trụ) BTCT giữ vai trò đặc biệt quan trọng; sự hư hỏng của một cấu kiện này có thể kéo theo nguy cơ mất ổn định hoặc thậm chí sụp đổ toàn bộ công trình. Dưới tác động của các yếu tố xâm thực từ môi trường, chẳng hạn như quá trình cacbonat hóa bê tông hoặc sự xâm nhập của ion clorua, cốt thép trong cột BTCT bị ăn mòn nhanh hơn, dẫn đến suy giảm chất lượng cấu kiện. Ảnh hưởng của hiện tượng này đến ứng xử cơ học của cột BTCT chịu nén đã được nhiều nghiên cứu thực nghiệm trước

Abstract: Nowadays, Textile Reinforced Concrete (TRC) is one of the effective solutions used to strengthen reinforced concrete (RC) structures whose load-carrying capacity has been reduced due to corrosion, especially for primary structural members such as columns, beams, and slabs. In Vietnam, studies on corroded RC columns strengthened with TRC are still limited. This paper presents a theoretical model for predicting the axial compressive load-carrying capacity of corroded RC columns strengthened with carbon fiber TRC, taking into account the effects of steel corrosion. The calculated results from the theoretical model are validated against experimental results obtained from concentric axial compression tests on column specimens. The specimen groups include: uncorroded control RC columns, corroded RC columns without strengthening, and corroded RC columns strengthened with carbon fiber TRC. The theoretical model shows good agreement with the experimental results, with a relatively small deviation (less than 5%), indicating the high reliability of the proposed model.

Keywords: Strengthening, corrosion, axially loaded strengthened columns, carbon textile reinforced concrete (TRC), fine-grained concrete, theoretical calculation model.

đây làm rõ [1-3]. Vì vậy, việc nghiên cứu và phát triển các giải pháp công nghệ cũng như vật liệu mới nhằm gia cường, phục hồi khả năng chịu lực cho các cột BTCT bị ăn mòn trong quá trình khai thác là hết sức cần thiết.

Trong những năm gần đây, bê tông cốt lưới dệt được xem là một loại vật liệu tiên tiến, nhận được sự quan tâm rộng rãi từ nhiều tổ chức nghiên cứu trên thế giới nhờ tiềm năng ứng dụng bền vững trong xây dựng. TRC sử dụng vật liệu bê tông hạt mịn (BTHM) kết hợp hệ cốt lưới dệt từ sợi các bon hoặc sợi thủy tinh kháng kiềm. Vật liệu này nổi bật với các đặc tính như trọng lượng nhẹ, cường độ cao, cùng khả năng chống cháy và chịu nhiệt hiệu quả. Trong thực tế, TRC hiện nay thường được sử dụng như một lớp bao gia cường cho các cấu kiện BTCT, đặc biệt là trong việc cải thiện khả năng chịu nén của cột BTCT.

Hiện nay, chưa có nhiều mô hình xác định sức kháng nén của cột BTCT được tăng cường bằng TRC. Một số mô hình đã được đề xuất tại các tiêu chuẩn như CNR- DT -215 của Italia [4], Zulassung Z-31.10-182 [5] của Đức và ACI 549.4R-20 [6] của Mỹ. Các mô hình này đều được xây dựng theo phương pháp trạng thái giới hạn, dựa trên nguyên tắc tương thích về biến dạng, với vật liệu TRC dính bám ngoài cột tạo hiệu ứng kiểm chế nở ngang lên phần lõi cột. Tuy nhiên, các mô hình này đều chỉ được sử dụng cho các cột BTCT mới và chưa xét đến ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép lên khả năng tăng cường sức kháng nén cho các cột BTCT có cốt đã bị gỉ của TRC. Bài báo này xây dựng mô hình lý thuyết nhằm tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT khi bị ăn mòn cốt thép được gia cường bằng TRC sợi các bon có xét đến ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép. Kết quả của nghiên cứu góp phần làm rõ tính ứng dụng vật liệu mới này để gia cường cho các kết cấu BTCT trong giai đoạn khai thác.

2. Nghiên cứu mô hình lý thuyết tính toán khả năng tăng cường chịu nén dọc trục cho cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng TRC sợi các bon

2.1. Ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép lên khả năng BTCT

Nghiên cứu về ảnh hưởng của quá trình ăn mòn lên cốt thép của Du và các cộng sự [7] đã xác định được sự suy giảm của cường độ, diện tích mặt cắt ngang của cốt thép đã bị ảnh hưởng bởi quá trình ăn mòn thông qua các công thức tính toán sau:

$$f_{yc} = (1 - \beta_s \times \Delta w) \times f_y \quad (1)$$

$$A_{sc} = \pi \times \frac{D_s^2}{4} \times (1 - 0,01 \times \Delta w) \quad (2)$$

Trong đó:

f_{yc} : Là cường độ chảy của thanh cốt thép bị ăn mòn;

β_s : Là hệ số suy giảm cường độ cốt thép do ăn mòn; $\beta_s = 0,0015$ cho cốt thép có vằn và $\beta_s = 0,0065$ cho cốt thép trơn;

Δ_w : Là phần trăm khối lượng cốt thép bị mất mát do ăn mòn (%);

f_y : Là cường độ chảy của thanh thép không bị ăn mòn;

A_{sc} : Là diện tích mặt cắt ngang của thanh cốt thép bị ăn mòn;

D_s : Là đường kính của thanh cốt thép ban đầu khi chưa bị ăn mòn.

Sự suy giảm ứng suất tới hạn khi mất ổn định của cốt thép dọc: Ứng suất tới hạn của thanh thép thẳng chịu nén đúng tâm được tính toán theo công thức Euler như sau:

$$\sigma_{th} = \frac{P_{th}}{A_s} = \frac{\pi^2 \times E_s \times I_s}{l_s^2 \times A_s} \quad (3)$$

Trong đó:

E_s : Là mô đun đàn hồi của cốt thép;

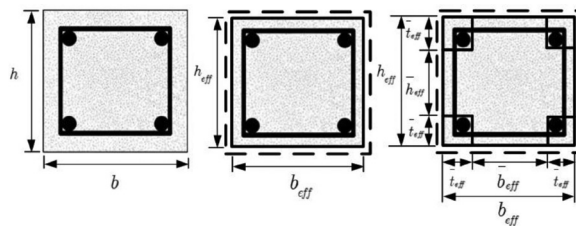
I_s : Là mô men quán tính của thanh thép;

A_s : Là diện tích mặt cắt của cốt thép;

l_s : Là chiều dài tự do của thanh cốt thép.

Sau khi bị mất ổn định, cốt thép dọc sẽ bị biến dạng nhanh chóng và cường độ chịu lực của thép bị suy giảm nghiêm trọng còn khoảng 20% so với cường độ chịu lực ban đầu theo Kashani [8].

Sơ đồ suy giảm diện tích bê tông do sự bong tróc của lớp bê tông bảo vệ dưới tác động của quá trình ăn mòn cốt thép dọc và cốt thép đai được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ bong tróc bê tông bảo vệ do ăn mòn cốt thép

Sự suy giảm phần bê tông cột bị bong tróc do ăn mòn cốt thép đai được xác định theo các công thức của Xia và các cộng sự [9] như sau:

$$h_{eff} = \begin{cases} h - 2 \times (c + d_v) + \frac{s \times \tan \Phi}{2} \\ \rightarrow s < 2 \times c \times \cot \Phi \\ h - \frac{2}{s \times \tan \Phi} \times (c + d_v)^2 \\ \rightarrow s \geq 2 \times c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{eff} = \begin{cases} b - 2 \times (c + d_v) + \frac{s \times \tan \Phi}{2} \\ \rightarrow s < 2 \times c \times \cot \Phi \\ b - \frac{2}{s \times \tan \Phi} \times (c + d_v)^2 \\ \rightarrow s \geq 2 \times c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (5)$$

$$c_{eff} = \begin{cases} (c + d_v) - \frac{s \times \tan \Phi}{4} \\ \rightarrow s < 2 \times c \times \cot \Phi \\ \frac{1}{s \times \tan \Phi} \times (c + d_v)^2 \\ \rightarrow s \geq 2 \times c \times \cot \Phi \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:

b, h và c lần lượt là chiều rộng, chiều cao mặt cắt cột và chiều dày lớp bê tông bảo vệ lúc chưa bị ăn mòn;

b_{eff} , h_{eff} và c_{eff} lần lượt là chiều rộng, chiều cao mặt cắt cột và chiều dày lớp bê tông bảo vệ sau khi bị suy giảm do ăn mòn cốt thép đai;

d_v và s là đường kính và khoảng cách bố trí cốt thép đai;

Φ là góc nghiêng của vết nứt tại cốt thép đai.

Giá trị suy giảm diện tích bê tông cột do ăn mòn cốt thép dọc được xác định theo công thức:

$$\bar{h}_{eff} = \left\{ h_{eff} - (2 + \cot \beta) \times (c_{eff} + D_s) \right\} \quad (7)$$

$$\bar{b}_{eff} = \left\{ b_{eff} - (2 + \cot \beta) \times (c_{eff} + D_s) \right\} \quad (8)$$

$$\bar{t}_{eff} = \left\{ \left(1 + \frac{\cot \beta}{2} \right) \times (c_{eff} + D_s) \right\} \quad (9)$$

Trong đó:

b_{eff} , h_{eff} lần lượt là chiều rộng, chiều cao của mặt cắt cột sau khi bị suy giảm do ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc;

t_{eff} là độ dài của phần bê tông bị bong tách do ăn mòn cốt thép đai và cốt thép dọc;

D_s là đường kính cốt thép dọc trước khi bị ăn mòn;

β là góc nghiêng của vết nứt tại cốt thép dọc.

2.2. Các giả thiết tính toán

Khả năng kháng nén dọc trục của cột sẽ chỉ được xem xét ở trạng thái giới hạn về cường độ. Các giả thiết được sử dụng để tính toán khả năng chịu nén trong trường hợp chịu lực nén đúng tâm của các cột là: Mặt cắt phẳng; biến dạng trong bê tông khi bị phá hoại là 3‰; bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông và không xét đến độ mảnh của cột; biến dạng kéo cục bộ của lưới sợi dệt các bon thường chỉ đạt khoảng 15 ÷ 18‰.

2.3. Mô hình tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục còn lại của cột bê tông cốt thép có cốt đai bị ăn mòn

Sức kháng nén còn lại của cột BTCT có cốt đai bị ăn mòn sẽ được tính toán theo hai trường hợp sau đây:

* Trường hợp 1: Cốt thép dọc chưa bị mất ổn định.

Khi ứng suất tới hạn của cốt thép dọc lớn hơn cường độ kéo chảy của cốt thép dọc thì cốt thép sẽ đạt giới hạn chảy mà không bị mất ổn định: $\sigma_{th} \geq f_{yc}$.

Với:

σ_{th} Ứng suất tới hạn khi mất ổn định của cốt thép dọc, tính theo công thức (3);

f_{yc} : Cường độ chảy của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn, tính theo công thức (1).

Cốt thép dọc sẽ làm việc trong giai đoạn đàn hồi đến giới hạn chảy của chúng. Sức kháng nén của cột lúc này được tính toán theo công thức:

$$P_{cc} = \left[f'_c \times (A_{cc}) + A_{sc} \times f_{yc} \right] \quad (10)$$

* Trường hợp 2: Cốt thép dọc đã bị mất ổn định.

Khi ứng suất tới hạn của cốt thép dọc bé hơn cường độ chảy của cốt thép dọc thì cốt thép sẽ bị mất

ổn định: $\sigma_{th} < f_{yc}$. Sức kháng nén của cột bê tông cốt thép có thể được tính toán theo công thức sau:

$$P_{cc} = \left[f'_c (A_{cc}) + A_{sc} \times (0,2 \times f_{yc}) \right] \quad (11)$$

Trong đó:

f'_c : Cường độ chịu nén của bê tông;

A_{sc} : Diện tích mặt cắt ngang của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn, tính theo công thức (2);

A_{cc} : Diện tích mặt cắt ngang của cột sau khi bị suy giảm do bong tách lớp bê tông bảo vệ, tính theo công thức từ (4) đến (9).

2.4 Mô hình lý thuyết tính toán sức kháng nén dọc trục của cột BTCT sau khi được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt

Mô hình tính toán sức kháng nén của cột BTCT có cốt thép đã bị ăn mòn chịu nén đúng tâm, được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt sợi các bon được xác định theo công thức sau:

$$P_{cs} = \left[P_{cef} + P_{eff} + P_{sc} + P_{cf} \right] \quad (12)$$

Với các cột có cốt đai bị ăn mòn, sức kháng nén của cốt thép dọc được tính toàn như sau:

Sức kháng nén của cốt thép dọc lúc này được tính toán theo công thức:

$$P_{sc} = \left[A_{sc} \times f_{yc} \right] \quad (13)$$

Trong đó:

f_{yc} : Cường độ chảy của cốt thép dọc bị ăn mòn, tính theo công thức (1);

A_{sc} : Diện tích mặt cắt ngang của cốt thép dọc sau khi bị ăn mòn, tính theo công thức (2).

Sức kháng nén dọc trục của lớp BTHM được sử dụng để sửa chữa lớp bê tông bảo vệ của cột bị bong tróc do ăn mòn:

$$P_{cf} = f'_{cf} \times A_{eff} \quad (14)$$

Trong đó:

f'_{cf} : Cường độ chịu nén của BTHM;

A_{eff} : Diện tích mặt cắt ngang của lớp BTHM sửa chữa lớp bê tông bảo vệ cột bị bong tróc do ăn mòn, tính theo công thức từ (4) đến (9).

Sức kháng nén của bê tông cột sau khi được tăng cường bằng TRC đã xét đến hiệu ứng kiểm chế nở ngang của lưới sợi dệt được tính theo công thức:

$$P_{cef} = f'_{cef} \times (A_{cc} - A_{sc}) \quad (15)$$

Với:

f'_{cef} : Cường độ chịu nén của bê tông khi được tăng cường bằng TRC, tính toán theo công thức từ tiêu chuẩn ACI 549.4R-20:

$$f'_{cef} = f'_c + 3,1 \times k_a \times f_l \quad (16)$$

Trong đó: k_a : là hệ số hình dạng, được xác định theo công thức (21); f_l là ứng suất kiểm chế nở

ngang, được xác định như sau:

Với cột có mặt cắt tiết diện hình tròn:

$$f_l = \frac{(2 \times n_f \times A_f \times E_f \times \varepsilon_{fe})}{D} \quad (17)$$

Với cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật:

$$f_l = \frac{(2 \times n_f \times A_f \times E_f \times \varepsilon_{fe})}{\sqrt{(b^2 + h^2)}} \quad (18)$$

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_f 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 ε_{fe} là biến dạng có hiệu của cốt lưới dẹt.

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

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0,012 \quad (19)$$

$$\varepsilon_{fe} = \frac{f_f}{E_f} \quad (20)$$

Các hệ số hình dạng được xác định như sau

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \times \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (21)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \times \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (22)$$

Với mặt cắt tiết diện hình chữ nhật, $k_a = k_b = 1$.

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

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h}\right) \times (h - 2 \times r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right) \times (b - 2 \times r_c)^2 \right] \times \rho_g}{3 \times A_g (1 - \rho_g)} \quad (23)$$

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

A_{cc} : Diện tích mặt cắt ngang của cột sau khi bị suy giảm do bong tách lớp bê tông bảo vệ, $A_{cc} = A_{eff}$ và được tính theo công thức từ (4) đến (9).

Sức kháng nén của lớp BTHM có xét đến sự suy giảm cường độ chịu nén của BTHM dưới tác dụng của lưới sợi dẹt:

$$P_{cf} = \kappa \times f'_{cf} \times A_{cf} \quad (24)$$

Trong đó:

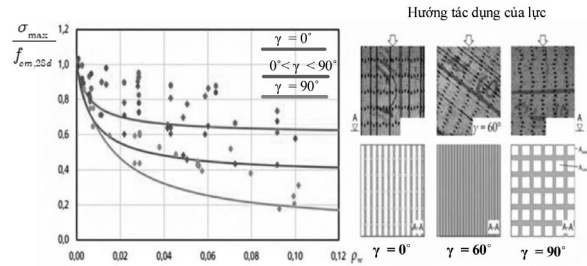
f'_{cf} : Cường độ chịu nén của BTHM;

A_{cf} : Diện tích mặt cắt ngang của lớp BTHM;

κ : Hệ số suy giảm cường độ chịu nén của BTHM dưới tác dụng của lưới sợi dẹt, được tính theo nghiên cứu của Bochmann [10] với các công thức sau:

Bảng 1. Công thức tính toán hệ số

$\gamma = 0^\circ$	$0^\circ < \gamma < 90^\circ$	$\gamma = 90^\circ$
$\kappa = \frac{0,0026}{0,0076 + 1,15 \times \rho_w} + 0,652$	$\kappa = \frac{0,0027}{0,0031 + 0,22 \times \rho_w} + 0,115$	$\kappa = \frac{0,0002}{0,0003 + 0,05 \times \rho_w} + 0,420$



Hình 2. Biểu đồ thực nghiệm tỷ lệ thể tích gia cường [10]

Hệ số tỷ lệ thể tích gia cường được xác định dựa

trên biểu đồ thực nghiệm Hình 2, tỷ lệ $\frac{\sigma_{max}}{f_{cm,28d}}$ của

bê tông thường được lấy bằng 0,85 hoặc 0,9.

2.5 Mô hình lý thuyết tính toán khả năng tăng cường chống mất ổn định cho cốt thép dọc trong cột BTCT của bê tông cốt lưới dẹt

Ứng suất tới hạn của cốt thép dọc của cột BTCT có xét đến hiệu ứng kiểm chế của lớp TRC bọc bên ngoài được xác định theo công thức Winkler sau:

$$\sigma_{th} = \frac{P_{th}}{n_s \times A_s} = 2 \times \frac{\sqrt{k_f \times E_s \times I_s \times n_s}}{n_s \times A_s} \quad (25)$$

Trong đó:

K_f : Hằng số đàn hồi của các lớp TRC;

E_s, I_s, n_s : Mô đun đàn hồi, mô men quán tính và số lượng cốt thép dọc của cột.

A_s : Diện tích mặt cắt của cốt thép.

Hằng số đàn hồi của lớp TRC được tính toán bằng các công thức theo Giamundo và cộng sự [11] như sau:

Cột có mặt cắt tiết diện hình chữ nhật:

$$k_f = \frac{2 \times E_t \times t_f}{b} \quad (26)$$

Cột có mặt cắt tiết diện hình tròn:

$$k_f = \frac{4 \times \pi \times E_t \times t_f}{D} \quad (27)$$

Trong đó:

E_t : Mô đun đàn hồi của TRC sau thời điểm bị nứt tính theo công thức (2.4);

t_f : Chiều dày của các lớp lưới sợi dẹt;

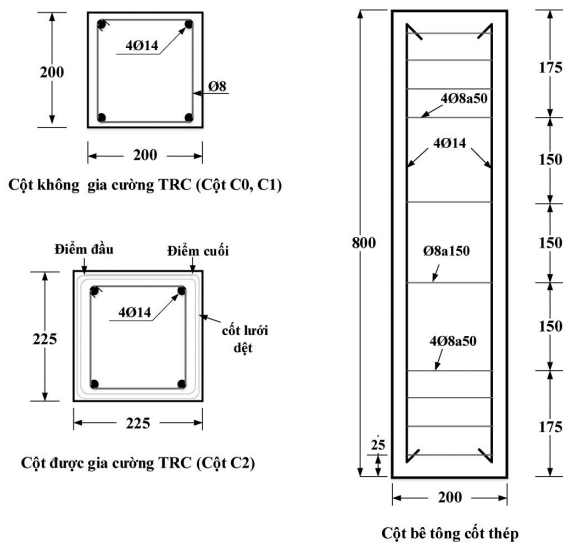
b, h : Chiều rộng và chiều cao của mặt cắt tiết diện hình chữ nhật của cột ($b \geq h$);

D : Đường kính của mặt cắt tiết diện hình tròn của cột.

3. Nghiên cứu thực nghiệm về cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng TRC sợi các bon

3.1. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm được chế tạo là các cột BTCT có tiết diện vuông với cạnh 200 mm (Hình 3), lớp bê tông bảo vệ dày 25 mm. Chiều cao cột được lựa chọn là 800 mm nhằm phù hợp với kích thước thiết bị thí nghiệm. Về cấu tạo cốt thép, mỗi cột được bố trí 4 thanh cốt dọc đường kính 14 mm, kết hợp với cốt đai đường kính 8 mm. Khoảng cách cốt đai được bố trí 150 mm tại vùng giữa cột và giảm xuống 50 mm tại hai đầu cột.



Hình 3. Kích thước chung và bố trí cốt thép trong cột đối chứng (đơn vị mm) [12]

Các mẫu cột BTCT trong nghiên cứu này được chế tạo từ bê tông có cường độ chịu nén trung bình (trên mẫu trụ tiêu chuẩn, tại tuổi 28 ngày) đạt 22,2 MPa. Cốt thép dọc và cốt đai sử dụng có giới hạn chảy lần lượt là 429,4 MPa và 363,1 MPa, mô đun đàn hồi của thép là 210 GPa.

Lớp TRC bao gồm BTHM kết hợp với lưới sợi dệt các bon. Thành phần của BTHM gồm các hạt cốt liệu có kích thước nhỏ hơn 0,6 mm, muối silic, tro bay, phụ gia siêu dẻo và nước. Các đặc trưng cơ học của BTHM được xác định thông qua thí nghiệm theo khuyến nghị của RILEM [13] và tiêu chuẩn TCVN 6016:2011 [14]. Kết quả cho thấy cường độ chịu uốn và chịu nén trung bình của vật liệu này lần lượt đạt 5,4MPa và 38,62MPa, mô đun đàn hồi khoảng 17.000MPa.

Trong nghiên cứu này, loại lưới sợi sử dụng là sợi các bon SITgrid017, có cường độ chịu kéo trung bình đạt 2750 MPa và mô đun đàn hồi 185 GPa. Lưới được dệt theo hai phương vuông góc, với khoảng cách mắt lưới xấp xỉ 12,7mm. Bên cạnh đó, cường độ dính bám trung bình giữa lớp bê tông cốt

lưới dệt và bê tông nền được xác định vào khoảng 4,8 MPa.

Trong quá trình thí nghiệm, hiện tượng ăn mòn cốt thép được tạo ra bằng phương pháp điện hóa nhằm tăng tốc quá trình ăn mòn, khi các thanh cốt thép được nối với cực dương của nguồn điện, với mật độ dòng điện áp dụng là $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Sau khi kết thúc quá trình gây ăn mòn, mức độ suy giảm được xác định thông qua việc đo lại khối lượng cốt thép. Đối với các mẫu cột bị ăn mòn, cốt thép được gia tốc ăn mòn đến hai mức độ lần lượt là 8% và 22%.

Các mẫu được chia thành ba nhóm: nhóm C0 gồm các cột không bị ăn mòn cốt thép (03 mẫu); nhóm C1 gồm các cột bị ăn mòn (thực hiện tăng tốc ăn mòn bằng điện hoá) nhưng không được gia cường (03 mẫu); và nhóm C2 gồm các cột bị ăn mòn với mức độ lần lượt là 8% (03 mẫu) và 22% (03 mẫu) và được tăng cường bằng một lớp TRC.

3.2. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm

Thực hiện thí nghiệm nén các nhóm mẫu bằng máy nén vạn năng SAN3000, trong quá trình thí nghiệm nén mẫu các kết quả được đo đạc và xử lý theo quy trình. Kết quả cho thấy, các mẫu cột không bị ăn mòn và không được tăng cường này bị phá hủy ở mức tải trọng trung bình xấp xỉ 1186 kN. Lực nén trung bình lớn nhất gây phá hủy các mẫu cột bị ăn mòn 8% và 22% chỉ đạt xấp xỉ 1112 kN và 862 kN, giảm 5,7% và 28,8% so với lực nén trung bình lớn nhất gây phá hủy cột đối chứng không bị ăn mòn. Khi được tăng cường 01 lớp TRC sợi các bon, các giá trị lực trung bình gây phá hủy các cột lần lượt tăng lên 36,2% và 82% so với cột đối chứng bị ăn mòn.

Bảng 2. Bảng giá trị tải trọng trung bình lớn nhất gây phá hủy các mẫu

Loại cột	Giá trị tải trọng lớn nhất (kN)
Cột không bị ăn mòn C0	1186,0
Cột bị ăn mòn 8% không gia cường C1 - L0	1112,0
Cột bị ăn mòn 22% không gia cường C2 - L0	862,5
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 1 lớp TRC C1- L1	1513,0
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 1 lớp TRC C2 - L1	1475,0

4. So sánh kết quả tính toán giữa mô hình lý thuyết và kết quả nghiên cứu thực nghiệm

4.1. Kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết

Các thông số vật liệu đầu vào của các mẫu cột thí nghiệm được thể hiện tại Bảng 3.

Ứng suất tới hạn (theo điều kiện ổn định) của các thanh cốt thép tính theo công thức (3) được thể hiện trong Bảng 4:

Ứng suất tới hạn của các thanh cốt thép tại cột bị ăn mòn 22% được tăng lên đáng kể nhờ hiệu ứng

Bảng 3. Kết quả tính toán ứng suất tối hạn của thép dọc

STT	Loại	Tên	ký hiệu	Số liệu	Đơn vị
1	Kích thước cột	Bề rộng tiết diện	b	0,2	m
2		Chiều cao tiết diện	h	0,2	m
3		Chiều cao cột	l	0,8	m
4		Bề dày bê tông bảo vệ	c	0,025	m
5		Bán kính bo góc	r_c	0,03	m
6	Bê tông lõi cột	Diện tích nguyên	A_c	0,04	m ²
7		Cường độ bê tông lõi	f'_c	22,20	MPa
8		Đường kính khi chưa bị ăn mòn	D_s	0,014	m
9	Cốt thép dọc	Diện tích khi chưa bị ăn mòn	A_s	0,00062	m ²
10		Cường độ chảy khi chưa bị ăn mòn	f_s	429,0	MPa
11	Cốt thép đai	Đường kính	d_v	0,008	m
12		Khoảng cách đai ở giữa	s	0,15	m
13		Chiều dày	D_f	0,05	m
14	BTHM	Diện tích chịu lực	A_f	0,04	m ²
15		Cường độ BTHM	f'_{cf}	38,62	MPa
16		Module đàn hồi	E_{cf}	21	GPa
17		Diện tích lưới sợi	A_f	0,00014	m ² /m
18	Lưới sợi các bon	Cường độ chịu kéo	f_f	2750	MPa
19		Module đàn hồi	E_f	185	GPa

Bảng 4. Kết quả tính toán ứng suất tối hạn của thép dọc

Mức độ ăn mòn	Lực tới hạn (kN)	Ứng suất tới hạn (MPa)	Mức độ suy giảm ứng suất	Tình trạng cốt thép dọc
0%	173,7	1128,4	0%	Không bị mất ổn định
8%	147,0	1038,2	8%	Không bị mất ổn định
22%	26,4	202,4	82%	Mất ổn định

kiểm chế của lớp TRC bọc bên ngoài cột. Kết quả tính toán cụ thể theo công thức (25) được thể hiện trong Bảng 5:

Bảng 5. Kết quả tính toán ứng suất tối hạn của cốt thép khi được tăng cường BT TRC sợi các bon

Mức độ ăn mòn	Số lớp lưới sợi	Chiều dày lưới sợi (mm)	Hàng số đàn hồi	Ứng suất tới hạn (MPa)	Tình trạng cốt thép dọc
22%	1	0,14	192	1790,3	Không bị mất ổn định
22%	2	0,28	384	2531,9	Không bị mất ổn định

Điều này cho thấy rằng, TRC sợi các bon với hiệu ứng kiểm chế của các lớp lưới sợi dẹt đã giúp cho cốt thép dọc của cột chống lại sự mất ổn định do ảnh hưởng của quá trình ăn mòn.

Kết quả tính toán khả năng chịu lực nén dọc trục đúng tâm cho các loại cột theo công thức (12) được thể hiện trong Bảng 6 dưới đây:

Bảng 6. Kết quả tính toán sức kháng nén dọc trục đúng tâm

STT	Tên cột	Cấp độ ăn mòn cốt thép	Số lớp TRC	P_c (kN)	P_{sc} (kN)	P_{cf} (kN)	P_{cff} (kN)	Lực nén tính toán (kN)
1	Cột C0	0%	0	887,8	264,2			1152,0
2	Cột C1-L0	8%	0	814,8	240,1			1054,9
3	Cột C2-L0	22%	0	814,8	39,8			854,7
4	Cột C1-L1	8%	1	883,1	240,1	217,3	127,0	1467,5
6	Cột C2-L1	22%	1	883,2	199,2	217,3	127,0	1426,7

4.2. So sánh kết quả

Bảng 7. So sánh kết quả từ mô hình tính toán lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm

Loại cột	Giá trị tải trọng lớn nhất		
	Thực nghiệm (kN)	Tính toán (kN)	Sai số tính toán (%)
Cột không bị ăn mòn C0	1186,0	1152,0	-3%
Cột bị ăn mòn 8% không gia cường C1 - L0	1112,0	1054,9	-5%
Cột bị ăn mòn 22% không gia cường C2 - L0	862,5	854,7	-2%
Cột bị ăn mòn 8% có gia cường 1 lớp TRC C1 - L1	1513,0	1467,5	-3%
Cột bị ăn mòn 22% có gia cường 1 lớp TRC C2 - L1	1475,0	1426,7	-3%

Có thể thấy rằng với cột không bị ăn mòn, kết quả tính toán được từ mô hình lý thuyết thấp hơn đôi chút so với nghiên cứu thực nghiệm với sai số khoảng 3%. Với các cột bị ăn mòn 8% kết quả tính toán từ mô hình thấp hơn khoảng 5% so với kết quả thực nghiệm. Các cột có cốt thép bị ăn mòn 8% và được tăng cường thêm 1 lớp TRC sợi các bon, kết quả tính toán từ mô hình lý thuyết nhỏ hơn so với kết quả thu được từ thực nghiệm với sai số là 3%. Cột bị ăn mòn 22% và không được tăng cường có lực nén dọc trục lớn nhất được tính toán từ mô hình lý thuyết thấp hơn với sai số khoảng 2% so với kết quả thu được từ thực nghiệm. Kết quả lực nén dọc trục lớn nhất tính toán được từ mô hình lý thuyết của các cột bị ăn mòn 22% và được tăng cường 1 lớp TRC sợi các bon là bé hơn so với kết quả thu được từ thực nghiệm, sai số là 3%.

Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng được một mô hình lý thuyết để tính toán khả năng gia cường chịu lực nén dọc trục cho cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng TRC sợi các bon có xét đến ảnh hưởng của quá trình ăn mòn cốt thép như sự suy giảm cường độ và diện tích chịu lực của cốt thép, sự mất ổn định của cốt thép dọc và sự bong tách lớp bê tông bảo vệ. Kết quả thu được từ mô hình lý thuyết này cho tất cả các mẫu cột đều tương đồng với kết quả thí nghiệm (sai số dưới 5%). Mô hình lý thuyết được xây dựng trong bài báo cho thấy độ tin cậy cao và có thể được áp dụng trong bài toán thiết kế cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng các lớp TRC sợi các bon. □

Tài liệu tham khảo:

- [1].J. Xia, W.-L. Jin, L.-Y. Li (2016), Performance of corroded reinforced concrete columns under the action of eccentric loads, *Journal of materials in civil Engineering*, 28(2016), 04015087.
- [2].V. N. Son (2016), Experimental and analytical investigations on seismic behavior of corroded reinforced concrete members.
- [3].A. S. Rajput, U. K. Sharma (2018), Corroded reinforced concrete columns under simulated seismic loading, *Engineering Structures*, 171(2018), 453-463.
- [4].CNR-DT-215 (2018), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures.
- [5].Zulassung Z-31.10-182 (2015), Gegenstand: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton), Prüfstelle: DIBt, Antragsteller: TUDAG TU Dresden Aktiengesellschaft.
- [6].ACI 549.4R-20 (2020), Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix and Steel-Reinforced Grout Systems for Repair and Strengthening of Concrete Structures.
- [7].Du Y. G., Clark L. A., Chan A. H. C. (2005), Residual capacity of corroded reinforcing bars (*Mag Concrete Res* 7(3):135), pp. 47.
- [8].Mohammad M. Kashani, Adam J. Crewe, Nicholas A. Alexander (2013), Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling, *Engineering Structures* 48, pp. 417-429.
- [9].Jin Xia, Wei Liang Jin and Long Yuan Li (2016), Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns under the Action of Eccentric Loads, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1): 04015087.
- [10].Jakob Bochmann, Manfred Curbach and Frank Jesse (2018), Textile reinforced concrete under compression – Part 2: Influence of textiles and their alignment, *Carbonbeton unter Druck* 113.
- [11].Giamundo V., Lignola G. P., Prota A. & Manfredi G. (2012), Restraining bars buckling by means of FRP wrapping: an analytical approach, 15th World conference on earthquake engineering.
- [12].Huu Tai Dinh, Dang Quang Ngo, Hoai Ho, Huy Cuong Nguyen (2023), Experimental and numerical evaluation of axial compression strengthening for corroded square reinforced concrete columns by carbon textile reinforced concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1289 012083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1289/1/012083>
- [13].W. Brameshuber (2006), Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC, RILEM publications.
- [14].I. o. C. M. Ministry of Construction (2011), TCVN 6016: 2011 Cement-Test method-Strength determination.