



## EXPERIMENTAL STUDY TO ESTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE CONFINED BY CFRP SHEET

Dao Sy Dan\*, Pham Hoang Kien, Pham Van Phe

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/08/2021

Revised: 21/10/2021

Accepted: 26/10/2021

Published online: 15/12/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.1>

\* *Corresponding author*

Email: sydandao@utc.edu.vn

**Abstract.** The CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) sheet is a new material with many outstanding advantages and it is especially suitable for strengthening reinforced concrete structures. That material was firstly applied in developed countries in 1980s, but it is relatively new in Vietnam. In this study, an experimental study was performed to estimate compressive strength of the concrete cylinder confined by CFRP sheet of Toray firm, Japan, with various levels of CFRP sheets. Results show that the strengthening effect of CFRP sheet in this study is generally suitable to the models proposed by previous researchers. The strengthening effect of CFRP sheet much depends on the construction quality of CFRP sheet; it requires that the builder must have experience and strictly follows the instruction of CFRP distributor. From the test results, this study recommends to apply suitable models to estimate compressive strength of concrete confined by CFRP sheet of Toray firm (Japan) and other products as well.

**Keywords:** CFRP, compressive strength, confined concrete.



## NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG ĐƯỢC KIỂM CHẾ NỖ NGANG BẰNG TẤM CFRP

Đào Sỹ Đán\*, Phạm Hoàng Kiên, Phạm Văn Phê

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: 23/08/2021

Ngày nhận bài sửa: 21/10/2021

Ngày chấp nhận đăng: 26/10/2021

Ngày xuất bản Online: 15/12/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.1>

\* Tác giả liên hệ

Email: sydandao@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Tấm CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) là một loại vật liệu mới có nhiều ưu điểm nổi trội và nó đặc biệt thích hợp cho việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép. Loại vật liệu này bắt đầu được ứng dụng ở các nước phát triển vào khoảng năm 1980, nhưng nó còn tương đối mới ở Việt Nam. Trong nghiên cứu này, một nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn khi được kiểm chế nỡ ngang bằng tấm CFRP, của hãng Toray, Nhật Bản, ở các mức độ gia cường khác nhau. Kết quả cho thấy, hiệu quả gia cường của tấm CFRP trong nghiên cứu này là cơ bản phù hợp với các mô hình đã được đề xuất bởi những nghiên cứu trước đó trên thế giới. Hiệu quả gia cường của tấm CFRP phụ thuộc rất lớn vào chất lượng thi công tấm CFRP; nó đòi hỏi người thi công phải có kinh nghiệm và tuân thủ đúng hướng dẫn của nhà phân phối vật liệu CFRP. Từ những kết quả thí nghiệm, nghiên cứu này đề xuất sử dụng các mô hình phù hợp để đánh giá cường độ chịu nén của bê tông khi được kiểm chế nỡ ngang bằng tấm CFRP của hãng Toray, Nhật Bản, cũng như của các hãng khác.

**Từ khóa:** CFRP, cường độ chịu nén, bê tông được kiểm chế nỡ ngang.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tấm CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) là một loại vật liệu mới, chưa được sử dụng phổ biến trong xây dựng công trình ở Việt Nam. Vật liệu mới này bắt đầu được ứng dụng trong xây dựng vào khoảng năm 1980, ở các nước phát triển, như Mỹ, Anh, Pháp, Nhật, Đức và Canada. Ở Việt Nam, vật liệu mới này bắt đầu được ứng dụng trong xây dựng vào khoảng năm

2010. Một số nhà sản xuất vật liệu CFRP lớn và đang cung cấp cho thị trường Việt Nam có thể đến như các hãng Toray, Tyfo, Maedakosen, Mitsubishi, QuakeWrap, Horse.

Vật liệu CFRP có nhiều ưu điểm nổi trội và nó đặc biệt thích hợp cho việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép. Các ưu điểm chính của vật liệu CFRP có thể kể đến như cường độ rất cao (bằng từ 10 đến 20 lần so với cốt thép thường) nên hiệu quả gia cường rất lớn; dễ dàng thi công và thời gian thi công rất nhanh nên không tốn thời gian chờ đợi; kích thước rất nhỏ gọn nên không làm thay đổi hình dạng kiến trúc ban đầu của công trình được gia cường. Vật liệu CFRP có thể được dùng để gia cường cho các cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn (dầm, sàn,...), chịu cắt (dầm, vai kê, công xôn,...) và chịu nén (cột, trụ, tháp,...).

Theo lý thuyết thì khi bị kiểm chế sự nở ngang, khả năng chịu nén của bê tông sẽ tăng lên theo mức độ tăng sự kiểm chế nở ngang của vật liệu gia cường. Vật liệu CFRP có cường độ chịu kéo rất cao, lại dễ dàng thi công nên rất thích hợp để gia cường cho kết cấu bê tông cốt thép, trong đó có việc gia cường cho cấu kiện chịu nén nhằm hạn chế sự nở ngang của bê tông cấu kiện chịu nén. Đã có nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước về vật liệu CFRP, nhằm ứng dụng vật liệu mới này trong việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép [1-9]. Các nghiên cứu đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn khi được hạn chế nở ngang bằng tấm CFRP cũng đã được thực hiện nhiều trên thế giới, với nhiều chủng loại CFRP của các hãng khác nhau [10-16]. Tuy nhiên, các nghiên cứu tương tự, đặc biệt là các nghiên cứu sử dụng vật liệu CFRP của hãng Toray, Nhật Bản (một hãng sản xuất vật liệu CFRP lớn và được sử dụng nhiều ở Việt Nam) chưa được thực hiện ở Việt Nam. Hiện nay, vật liệu CFRP vẫn chưa được sản xuất trong nước mà phải nhập khẩu từ các nước phát triển. Để chủ động hơn nữa trong việc ứng dụng vật liệu mới này trong xây dựng, bài báo này sẽ trình bày một nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn khi được hạn chế nở ngang bằng tấm CFRP của hãng Toray, Nhật Bản. Nghiên cứu này cho thấy, hiệu quả gia cường của tấm CFRP trong nghiên cứu này là cơ bản phù hợp với các mô hình đã được đề xuất bởi những nghiên cứu trước đó trên thế giới. Từ những kết quả đó, nghiên cứu này đề xuất sử dụng các mô hình phù hợp để đánh giá cường độ chịu nén của bê tông khi được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP của hãng Toray, Nhật Bản, cũng như của các hãng khác.

Bài báo được hy vọng sẽ là tài liệu hữu ích cho các kỹ sư thiết kế, cũng như các nhà nghiên cứu trong việc ứng dụng vật liệu CFRP trong việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép.

## 2. VẬT LIỆU VÀ CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu sử dụng

Vật liệu sử dụng cho thí nghiệm này bao gồm những vật liệu để chế tạo những mẫu bê tông hình trụ tròn và các vật liệu để chế tạo những tấm CFRP. Vật liệu để chế tạo những mẫu bê tông hình trụ tròn, kích thước  $(dxh) = (150 \times 300)mm$ , có cường độ chịu nén trong khoảng từ 30MPa đến 50MPa là những vật liệu thông thường nên không được thể hiện chi tiết ở đây. Vật liệu để chế tạo những tấm CFRP bao gồm vải sợi carbon cường độ cao và keo epoxy đi kèm. Hiện nay, Việt Nam chưa sản xuất được vật liệu CFRP, mà phải nhập khẩu từ các nước phát triển. Có nhiều hãng phân phối sản phẩm CFRP, như Toray, Tyfo, Maedakosen, Mitsubishi, QuakeWrap, Horse. Theo tài liệu công bố của các hãng này thì vải sợi carbon cường độ cao thường có 04 loại có chiều dày khác nhau như sau: 0,111mm ( $200g/m^2$ ); 0,167mm ( $300g/m^2$ ); 0,222mm ( $400g/m^2$ ); 0,333mm ( $600g/m^2$ ). Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng vật liệu của hãng Toray (Nhật Bản), được tài trợ bởi Công ty Cổ phần công nghệ tiên tiến Nhật – Việt (JVTEK, là một đơn vị chuyên nhập khẩu và phân phối các sản phẩm công nghệ

mới của Nhật Bản). Đặc điểm kỹ thuật của vải sợi carbon cường độ cao và keo epoxy đi kèm, theo công bố của hãng Toray, được trình bày trong bảng 1&2 dưới đây.

Bảng 1. Đặc điểm kỹ thuật của vải sợi carbon cường độ cao, của hãng Toray (Nhật Bản).

Mã số sản phẩm	Cường độ chịu kéo tối thiểu (MPa)	Mô đun đàn hồi kéo (GPa)	Độ dày (mm)	Trọng lượng (g/m <sup>2</sup> )	Tỷ trọng (g/m <sup>3</sup> )	Độ dẫn dài kéo cực hạn (%)
UT70-20G	≥ 3400	230	0,111	200	1,8	≤ 2,0
UT70-30G	≥ 3400	230	0,167	300	1,8	≤ 2,0
UT70-40G	≥ 3400	230	0,222	400	1,8	≤ 2,0
UT70-60G	≥ 3400	230	0,333	600	1,8	≤ 2,0

Bảng 2. Đặc điểm kỹ thuật của keo epoxy đi kèm, của hãng Toray (Nhật Bản).

Đặc tính	Phương pháp thí nghiệm	Mã sản phẩm	
		Primer AUP40S	AUR80S
Mục đích sử dụng		Keo lót	Keo tẩm
Cường độ bám dính (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K5600 JIS A6909 JSCEE545	≥ 2,0	≥ 2,0
Cường độ chịu uốn (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K7171	-	≥ 40
Cường độ chịu kéo (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K7161 JIS K7113	-	≥ 30
Cường độ chịu cắt (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K6850	-	≥ 10
Tỷ trọng	JIS K7112	1,20 ± 0,1	1,17 ± 0,1
Độ nhớt hỗn hợp (MPa.s)	JIS K7117	1200 ± 600	≤ 10000
Màu hỗn hợp		Màu vàng	Màu xanh

## 2.2. Dụng cụ và thiết bị sử dụng

Dụng cụ và thiết bị sử dụng cho thí nghiệm này bao gồm: 1) Cân điện tử để cân lượng keo sử dụng; 2) Thau nhựa và que để pha trộn keo; 3) Kéo để cắt vải sợi carbon cường độ cao; 4) Máy mài bê tông cầm tay; 5) Con lăn dùng để tẩm keo cho đều; 6) Máy nén xác định cường độ chịu nén của mẫu bê tông.

Chúng ta thấy, các các dụng cụ và thiết bị nêu trên đều là thông thường, riêng có máy nén mẫu bê tông là thiết bị chuyên dụng. Trong nghiên cứu này, máy nén xác định cường độ chịu nén của mẫu bê tông là máy ADR-2000 (kN) và máy SANS-3000 (kN), của Phòng thí nghiệm công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải (Vilas 047). Nghiên cứu này phải sử dụng đến hai máy nén mẫu là bởi vì lực nén phá hoại mẫu bê tông được hạn chế nhờ ngang bằng tấm CFRP trong thí nghiệm này có những trường hợp vượt quá 2000 kN.

### 2.3. Số lượng mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, tổng cộng 18 mẫu bê tông hình trụ tròn, kích thước  $(dxh) = (150 \times 300)mm$ , đã được chế tạo từ cùng một hỗn hợp bê tông và cùng được bảo dưỡng đến cường độ thiết kế trong một điều kiện giống nhau. Sau đó, các mẫu bê tông này được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP và chia thành bốn nhóm như sau:

**Nhóm 01:** 03 mẫu không được gia cường để xác định cường độ chịu nén của bê tông khi không được kiểm chế nở ngang;

**Nhóm 02:** 05 mẫu được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 20G (dày 0,111mm) của hãng Toray, Nhật Bản. Trong đó có 02 mẫu được gia cường 1 lớp; 02 mẫu được gia cường 2 lớp và 01 mẫu được gia cường 3 lớp;

**Nhóm 03:** 05 mẫu được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 30G (dày 0,167mm) của hãng Toray, Nhật Bản. Trong đó có 02 mẫu được gia cường 1 lớp; 02 mẫu được gia cường 2 lớp và 01 mẫu được gia cường 3 lớp;

**Nhóm 04:** 05 mẫu được gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 60G (dày 0,333mm) của hãng Toray, Nhật Bản. Trong đó có 02 mẫu được gia cường 1 lớp; 02 mẫu được gia cường 2 lớp và 01 mẫu được gia cường 3 lớp;

### 2.4. Trình tự quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm

Tham khảo tài liệu “Giới thiệu về công nghệ CFRP của hãng Toray, Nhật Bản” của Công ty Cổ phần công nghệ tiên tiến Nhật-Việt [10] về cách thi công tấm CFRP, nghiên cứu này thực hiện chế tạo các mẫu thí nghiệm theo các bước như sau:

Bước 1: Chế tạo 18 mẫu bê tông hình trụ tròn, kích thước  $(dxh) = (150 \times 300)mm$  từ cùng một hỗn hợp bê tông và bảo dưỡng chúng đến cường độ thiết kế trong cùng một điều kiện như nhau;

Bước 2: Dùng máy mài cầm tay để mài bề mặt mẫu bê tông theo hướng dẫn [17];

Bước 3: Chuẩn bị sẵn sàng các vật liệu và dụng cụ để thi công các lớp CFRP gia cường cho các mẫu bê tông trên; cắt sợi theo thiết kế, cân đong và pha trộn keo epoxy theo hướng dẫn [10]. Chú ý, thời gian bắt đầu đông cứng của keo epoxy sau khi pha trộn là khoảng 180 phút (ở nhiệt độ  $25^{\circ}C$ ), vì vậy việc thi công phải được thực hiện trong vòng 180 phút từ lúc pha trộn keo epoxy. Ngoài ra, để đảm bảo cho các tấm CFRP phát huy hết khả năng chịu lực của chúng thì việc cắt vải sợi carbon cường độ cao phải đảm bảo sao cho mỗi nối chồng của các tấm CFRP khi gia cường mẫu phải lớn hơn chiều dài mỗi nối chồng yêu cầu của chúng. Đây là mỗi nối chồng theo chiều ngang (theo chu vi) của mẫu. Theo khuyến cáo của nhà sản xuất [17] thì chiều dài mỗi nối chồng yêu cầu của các tấm CFRP là 150mm. Để thiên về an toàn, chiều dài mỗi nối chồng của các tấm CFRP trong nghiên cứu này được lấy bằng 200mm;

Bước 4: Dùng con lăn tẩm keo lót đều lên bề mặt những mẫu bê tông được gia cường theo hướng dẫn [17]. Lớp keo lót này sẽ thấm thấu sâu vào bê tông và có tác dụng như một lớp neo chắc chắn giữa bê tông và tấm CFRP;

Bước 5: Đợi cho lớp keo lót bắt đầu dính bám (khoảng 30 đến 60 phút), dùng con lăn quét một lớp keo tẩm đều lên bề mặt mẫu theo hướng dẫn [17];

Bước 6: Dán lớp sợi carbon cường độ cao thứ nhất theo thiết kế;

Bước 7: Dùng con lăn quét tiếp một lớp keo tẩm đều lên bề mặt mẫu theo hướng dẫn [17].  
Lặp lại Bước 6 & 7 nếu có nhiều lớp sợi carbon cường độ cao được gia cường;

Bước 8: Đợi cho keo epoxy đông cứng hoàn toàn (khoảng 72 giờ) thì mang các mẫu đã được chuẩn bị đi capping mẫu và làm thí nghiệm nén dọc trục phá hoại mẫu để xác định cường độ chịu nén của các mẫu. Hình 1 dưới đây thể hiện 18 mẫu bê tông đã được chuẩn bị trước khi thực hiện thí nghiệm nén dọc trục phá hoại mẫu.



Hình 1. Hình ảnh các mẫu bê tông đã được chuẩn bị trước khi thực hiện thí nghiệm nén.

## 2.5. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông

Tham khảo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M-20 [18], các mẫu thí nghiệm sau khi đã được chuẩn bị theo thiết kế, được mang đi làm thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của bê tông theo các bước sau:

Bước 1: Đặt từng mẫu vào vị trí thí nghiệm. Chú ý, mẫu phải được đặt đúng tâm và vuông góc bàn nén mẫu;

Bước 2: Tiến hành tăng lực nén lên mẫu cho tới khi mẫu bị phá hoại do nén dọc trục. Theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M-20 [18], thì máy thí nghiệm phải được điều chỉnh sao cho lực nén tăng dần trong khoảng từ  $(3,5 \div 5,0)$  kN/s;

Bước 3: Ghi lại các giá trị lực nén lớn nhất mà mỗi mẫu chịu được,  $P_{max}$  (kN), và xác định cường độ chịu nén của mẫu bê tông,  $f_c$  (MPa), theo công thức (1) dưới đây. Trong đó,  $d$  (mm) là đường kính của mẫu bê tông hình trụ tròn. Cường độ chịu nén của mẫu bê tông tương ứng với mỗi mức gia cường là giá trị trung bình của các kết quả thí nghiệm thu được tương ứng với mức độ gia cường đó.

$$f_c = \frac{4000P_{max}}{\pi d^2} \quad (1)$$

Hình 2 dưới đây thể hiện một vài hình ảnh sau khi các mẫu thí nghiệm đã bị phá hoại do nén dọc trục. Hình 2a là hình ảnh tổng thể của 15 mẫu bê tông được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP sau khi bị nén phá hoại. Như có thể thấy trong hình 2b & 2c, chúng ta có hai kiểu phá hoại mẫu: kiểu 1 thể hiện trong hình 2b là khi việc thi công tấm CFRP đảm bảo chất lượng và kiểu 2 thể hiện trong hình 2c là khi việc thi công tấm CFRP không đảm bảo chất lượng. Như có thể thấy rõ trong hình 2c thì tấm vải sợi carbon cường độ cao chưa được tẩm keo epoxy đầy đủ theo hướng dẫn, dẫn đến các sợi carbon cường độ cao vô cùng nhỏ này không làm việc cùng

nhau và bị xù lên khi bị kéo đứt. Việc này sẽ làm giảm đáng kể tác dụng kiềm chế nở ngang của tấm CFRP, như được thảo luận trong Phần 3.



a) b) c)

Hình 2. Một số hình ảnh mẫu thí nghiệm sau khi bị phá hoại do nén.

### 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

Cường độ chịu nén của bê tông xác định được từ nghiên cứu này sẽ được so sánh với các mô hình đã được đề xuất bởi các nghiên cứu đã được xuất bản trước đó trên thế giới để so sánh và đánh giá.

Theo ACI 440.2R-2017 [10], thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được xác định theo các công thức (2, 3, 4 & 5) sau đây:

$$f_c = f_{co} + \psi_f \cdot 3,3 \cdot \kappa_a \cdot f_l \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$f_l = \frac{2E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{d} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (5)$$

Trong nghiên cứu của Wu & Wei, 2014 [11] thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được phỏng đoán theo công thức (6) như sau:

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 0,75 + 2,7 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0,9} \right] \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

Theo nghiên cứu của Pham & Hadi, 2014 [12], thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiềm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được đánh giá theo các công thức (7 & 8) dưới đây.

$$f_{cc} = 0,7 f_{co} + 1,8 f_l + 5,7 \frac{t}{d} + 13 \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

$$t = n t_f \quad (\text{mm}) \quad (8)$$

Trong nghiên cứu của Teng và các cộng sự, 2009 [13] thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được phỏng đoán theo các công thức (9, 10, 11 & 12) như sau:

Khi  $\rho_k \geq 0,01$  thì

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 3,5(\rho_k - 0,01)\rho_\varepsilon \right] \quad (\text{MPa}) \quad (9)$$

Khi  $\rho_k < 0,01$  thì

$$f_{cc} = f_{co} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

$$\rho_k = \frac{2E_f t}{d(f_{co} / \varepsilon_{co})} \quad (11)$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \quad (12)$$

Theo nghiên cứu của Youssef và các cộng sự, 2007 [14], thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được đánh giá theo công thức (13) dưới đây.

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2,25 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right)^{5/4} \right] \quad (\text{MPa}) \quad (13)$$

Trong nghiên cứu của Guralnick & Gunawan, 2006 [15] thì cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP có thể được phỏng đoán theo công thức (14) như sau:

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 0,616 + \frac{f_l}{f_{co}} + 1,57 \left( \frac{f_l}{f_{co}} + 0,06 \right)^{1/2} \right] \quad (\text{MPa}) \quad (14)$$

Trong các công thức trên:

$f_{co}$  là cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn không được kiểm chế nở ngang (MPa);

$f_l$  là áp lực kiểm chế ngang lớn nhất của tấm CFRP (MPa);

$\psi_f$  là hệ số giảm cường độ bổ sung cho tấm CFRP, ở đây lấy bằng 0,95;

$\kappa_a$  là hệ số hình dạng mẫu, với mẫu hình trụ tròn lấy bằng 1,0;

$E_f$  là mô đun đàn hồi chịu kéo của vải sợi carbon cường độ cao (MPa);

$n$  là số lớp sợi carbon cường độ cao;

$t_f$  là chiều dày của một lớp sợi carbon cường độ cao (mm);

$d$  là đường kính của mẫu bê tông thí nghiệm (mm);

$\varepsilon_{fe}$  là biến dạng có hiệu của tấm CFRP khi phá hoại;

$\varepsilon_{fu}$  là biến dạng kéo đứt thiết kế của tấm CFRP;

$\varepsilon_{fu}^*$  là biến dạng kéo đứt của tấm CFRP;

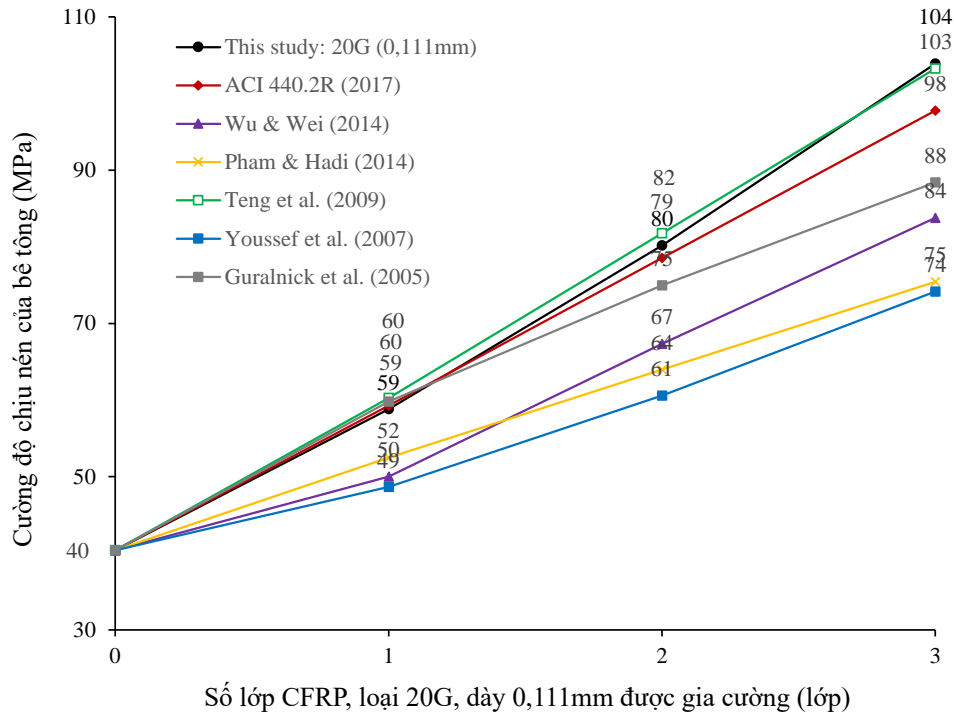
$\kappa_\varepsilon$  là hệ số biến dạng có hiệu của tấm CFRP, ở đây lấy bằng 0,55;

$C_E$  là hệ số giảm cường độ của tấm CFRP do môi trường, ở đây lấy bằng 0,95;

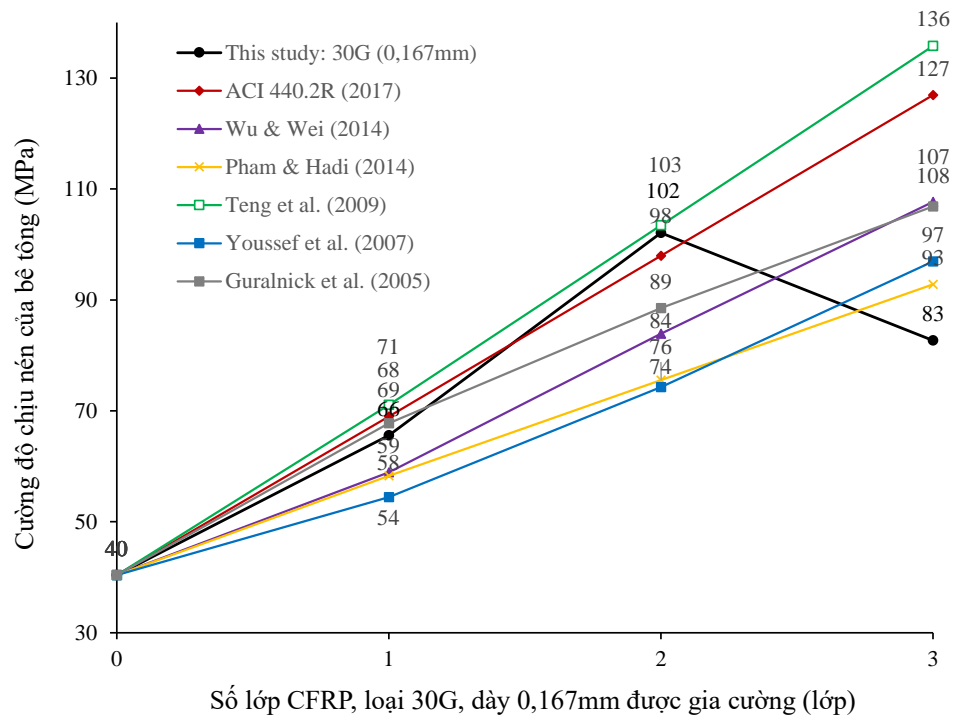


$t$  là tổng chiều dày của các lớp sợi carbon cường độ cao gia cường cho mẫu (mm);  
 $\epsilon_{co}$  là biến tương ứng với  $f_{co}$  của mẫu bê tông không được kiểm chế nở ngang, ở đây lấy bằng 0,002.

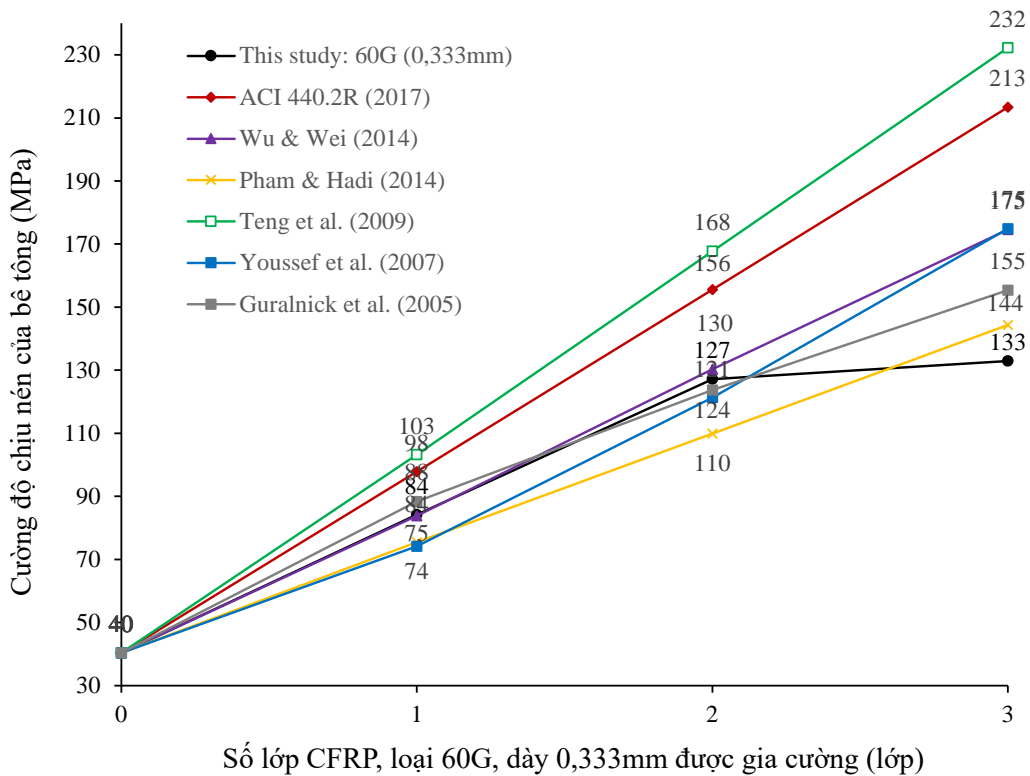
Các kết quả thí nghiệm từ nghiên cứu này và các mô hình đã được đề xuất trên thế giới ở trên được thể hiện trong các hình 3, 4 & 5 dưới đây.



Hình 3. Cường độ chịu nén của bê tông bị kiểm chế nở ngang bằng tám CFRP dày 0,111mm.



Hình 4. Cường độ chịu nén của bê tông khi bị kiểm chế nở ngang bằng tám CFRP dày 0,167mm.



Hình 5. Cường độ chịu nén của bê tông khi bị kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP dày 0,333mm.

Từ các hình 3, 4 & 5, ta thấy các kết quả thí nghiệm từ nghiên cứu này cơ bản là phù hợp với các mô hình đánh giá đã được đề xuất của các nghiên cứu trước đó trên thế giới. Tuy nhiên, những kết quả thí nghiệm của nghiên cứu này ứng với hai trường hợp mẫu bê tông được gia cường bằng 3 lớp CFRP loại 30G (dày 0,167mm) và loại 60G (dày 0,333mm) cho kết quả nhỏ hơn nhiều so với các mô hình đánh giá đã được đề xuất trước đó. Nguyên nhân có thể do việc thi công gia cường ứng với hai trường hợp này không đảm bảo chất lượng, dẫn đến hiệu quả gia cường thấp hơn kết quả mong muốn. Như được nhìn thấy rõ trong hình 2c ở trên, do vải sợi carbon cường độ cao chưa được tẩm keo epoxy đầy đủ theo hướng dẫn, dẫn đến các sợi carbon cường độ cao vô cùng nhỏ này không làm việc cùng nhau và bị xù lên khi bị kéo đứt. Do đó, có thể nói rằng hiệu quả gia cường của tấm CFRP phụ thuộc rất lớn vào chất lượng thi công tấm CFRP; nó đòi hỏi người thi công phải có kinh nghiệm và tuân thủ đúng hướng dẫn của nhà phân phối vật liệu CFRP.

Hiệu quả gia cường bằng tấm CFRP, loại 20G (dày 0,111mm) và loại 30G (dày 0,167mm), của hãng Toray, Nhật Bản, là tương đồng nhất với mô hình đã được đề xuất bởi Teng và các cộng sự (2009). Do đó, nghiên cứu này đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Teng và các cộng sự (2009), hay các công thức (9, 10, 11 & 12) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 20G (dày 0,111mm) và loại 30G (dày 0,167mm), của hãng Toray, Nhật Bản.

Hiệu quả gia cường bằng tấm CFRP, loại 60G (dày 0,333mm), của hãng Toray, Nhật Bản, là tương đồng nhất với mô hình đã được đề xuất bởi Wu & Wei (2014). Do đó, nghiên cứu này đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Wu & Wei (2014), hay công thức (6) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 60G (dày 0,333mm), của hãng Toray, Nhật Bản.

Cũng từ hình 3, 4 & 5, chúng ta thấy rằng các mô hình đã được đề xuất và kết quả của nghiên cứu này cho kết quả sai lệch nhau khá lớn. Nguyên nhân của điều này có thể do loại vật liệu CFRP của các nghiên cứu trước đó và nghiên cứu này là khác nhau. Do đó, có thể nói rằng mỗi mô hình đã được đề xuất trước đó chỉ phù hợp với một loại vật liệu CFRP nhất định. Trong các mô hình đã được đề xuất thì mô hình được đề xuất bởi Wu & Wei (2014) cho các kết quả trung bình và thiên về an toàn nhất. Do vậy, nếu không có các kết quả thí nghiệm kiểm chứng thì nghiên cứu này đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Wu & Wei (2014) hay công thức (6) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP bất kỳ.

#### 4. KẾT LUẬN

Dưới đây là những kết luận được rút ra từ nghiên cứu này:

- Hiệu quả gia cường của tấm CFRP phụ thuộc rất lớn vào chất lượng thi công tấm CFRP; nó đòi hỏi người thi công phải có kinh nghiệm và tuân thủ đúng hướng dẫn của nhà phân phối vật liệu CFRP.
- Hiệu quả gia cường của tấm CFRP của hãng Toray, Nhật Bản được tìm thấy trong nghiên cứu này cơ bản phù hợp với các mô hình đã được đề xuất bởi các nghiên cứu trước đó trên thế giới. Cường độ chịu nén của bê tông tăng dần khi mức độ gia cường kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP tăng dần. Vật liệu CFRP rất thích hợp cho việc gia cường các cấu kiện bê tông cốt thép chịu nén nhằm kiểm chế sự nở ngang hay tăng cường khả năng chịu nén của chúng.
- Đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Teng và các cộng sự (2009) hay các công thức (9, 10, 11 & 12) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 20G (dày 0,111mm) và loại 30G (dày 0,167mm), của hãng Toray, Nhật Bản.
- Đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Wu & Wei (2014) hay các công thức (6) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP, loại 60G (dày 0,333mm), của hãng Toray, Nhật Bản.
- Mỗi mô hình đã được đề xuất bởi các nghiên cứu trước đó trên thế giới chỉ phù hợp với một loại vật liệu CFRP nhất định. Đề xuất sử dụng mô hình đã được đề xuất bởi Wu & Wei (2014) hay công thức (6) để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu bê tông hình trụ tròn được kiểm chế nở ngang bằng tấm CFRP bất kỳ khi không có các kết quả thí nghiệm kiểm chứng.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐHGTVT) trong đề tài mã số T2021-CT-019 và Công ty Cổ phần công nghệ tiên tiến Nhật-Việt (JVTEK). Tác giả cũng

chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của nhóm sinh viên Trần Kim Long, Kim Đức Anh, Nguyễn Văn Bằng, Trần Văn Quang và Bùi Đức Dũng - Lớp Cầu Đường bộ 3-K58, Trường Đại học Giao thông Vận tải, trong quá trình làm nghiên cứu thực nghiệm này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Panjehpour, N. Farzadnia, R. Demirboga, A. A. A. Ali, Behavior of high-strength concrete cylinders repaired with CFRP sheets, *Journal of civil Engineering and Management*, 22 (2016) 56-64. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.897965>
- [2]. H. S. Al-Nimry, R. A. Al-Rabadi, Axial-flexural interaction in FRP-wrapped RC columns, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13 (2019) . <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0366-8>
- [3]. S. Barour, Z. Abdesselam, F. Bouziadi, W. A. Jasim, Finite element analysis of CFRP-externally strengthened reinforced concrete beams subjected to three-point bending, *World Journal of Engineering*, 17 (2019) 183-202. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2019-0121>
- [4]. Q. T. Ngô, Sửa chữa và gia cố công trình bê tông cốt thép bằng phương pháp dán nhờ sử dụng vật liệu FRP, *Tạp chí Phát triển KH&CN*, 10 (2007).
- [5]. V. Q. Huỳnh, Nghiên cứu gia cường cột trụ cầu cũ bằng vật liệu FRP, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông Vận tải, 2014.
- [6]. Q. C. Nguyễn, Nghiên cứu đánh giá khả năng làm việc của các loại keo ứng dụng để sửa chữa tăng cường dầm bê tông cốt thép bằng tấm polyme cốt sợi carbon (CFRP) dán ngoài trong điều kiện môi trường Việt Nam, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2016.
- [7]. V. P. Ta, V. S. Nguyễn, Một số phương pháp gia cường kết cấu cột bê tông cốt thép, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 57 (2017).
- [8]. T. H. Nguyễn, T. C. Lý, Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường dầm bê tông cốt thép bị nứt bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 61 (2019).
- [9]. G. Campoine, Influence of FRP wrapping techniques on the compressive behavior of concrete prisms, *Cement & Concrete Composites*, 28 (2006) 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.002>
- [10]. ACI 440.2R-17, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, ACI Committee 440, 2017.
- [11]. Y. F. Wu, Y. Wei, General stress strain model for steel and FRP confined concrete, *Journal of composite for construction*, ASCE, 19 (2014). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000511](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000511)
- [12]. T. M. Pham, M. N. S. Hadi, Confinement model for FRP confined normal and high strength concrete circular columns, *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.036>
- [13]. J. G. Teng, T. Jiang, L. Lam, Y. Z. Luo, Refinement of a design oriented stress strain model for FRP confined concrete, *Journal of composite for construction*, ASCE, 13 (2009) 269-278. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012)
- [14]. M. N. Youssef, M. Q. Feng, A. S. Mosallam, Stress strain model for concrete confined by FRP composites, *Composite Part B: Engineering*, 38 (2007) 614-628. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.020>
- [15]. S. A. Guralnick, L. Gunawan, Strengthening of reinforced concrete bridge columns with FRP Wrap, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11 (2006) 218-228. <https://doi.org/10.22075/jtie.2018.13650.1275>

- [16]. J. G. Teng, L. Lam, T. Jiang, Refinement of a design-oriented stress strain model for FRP confined concrete, *Journal of Composites for Construction*, 13 (2009). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012)
- [17]. Công ty Cổ phần Công nghệ Tiên tiến Nhật-Việt (JVTek), Giới thiệu về thiêu về công nghệ CFRP của hãng Toray, Nhật Bản, 2019.
- [18]. ASTM C39/C39M-20, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM Committee C09, 2020.