

Tính toán khả năng chịu lực của dầm bê tông sử dụng cốt FRP theo tiêu chuẩn ACI 440.1R-15

Calculation of bearing capacity of concrete beams using FRP reinforcement according to standard ACI 440.1R-15

> **KS LÊ THÁI HOÀNG, TS PHẠM THANH BÌNH**

Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật quân sự Hà Nội
Email: hoangle210791@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc tính toán sức kháng uốn danh nghĩa tiết diện dầm bê tông sử dụng cốt FRP theo Tiêu chuẩn ACI 440.1R-15. Trên cơ sở quy trình tính toán, thực hiện khảo sát ảnh hưởng cường độ chịu nén của bê tông đến sự thay đổi khả năng chịu lực của dầm trong các trường hợp phá hoại. Các kết quả phân tích cho thấy, khi tiết diện dầm bê tông cốt FRP bị phá hoại do bê tông bị ép vỡ, việc thay đổi cường độ chịu nén của bê tông khiến thay đổi khả năng chịu lực nhiều hơn so với trường hợp tiết diện dầm bị phá hoại do cốt FRP bị kéo đứt.

Từ khóa: Dầm bê tông; cốt FRP; sức kháng uốn danh nghĩa.

ABSTRACT:

This paper presents the calculation of the nominal bending resistance of concrete beams using FRP bars reinforcement according to standard ACI 440.1R-15. On the basis of the calculation procedure, the influence of compressive strength of concrete on the change of bearing capacity of beams in the cases of failure is investigated. The analysis results show that, when the FRP reinforced concrete beam cross section is damaged by the concrete being crushed, the change in compressive strength of the concrete makes more changes in the bearing capacity than in the case damage due to cutting off FRP bars.

Keywords: Concrete beams; FRP bars; nominal flexural strength.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thanh polyme cốt sợi - Fiber reinforced polymer (FRP) là sản phẩm dạng thanh tạo nên bởi một chất nhựa tổng hợp polyme bao bọc các sợi thủy tinh hay sợi cacbon tạo nên cốt chịu lực cơ học. Thanh FRP ra đời từ hơn 40 năm, đã được sử dụng để làm cốt cho kết cấu bê tông như một giải pháp thay thế cho cốt thép. Kết cấu bê tông cốt thép truyền thống trong một số trường hợp có thể

gặp các vấn đề sau: kết cấu chịu môi trường xâm thực mạnh như cầu, cầu cảng, công trình bờ biển; kết cấu chịu tác dụng kết hợp của độ ẩm, nhiệt độ, hóa chất làm thép bị ăn mòn. FRP là vật liệu không có từ tính nên tránh được vấn đề tương tác điện từ của thép. Ngoài ra, vật liệu FRP còn có nhiều đặc trưng khác như cường độ chịu kéo lớn nên thích hợp để làm cốt gia cường [1].

Thanh FRP thông dụng gồm các loại thanh như: GFRP (*thanh polyme cốt sợi thủy tinh*); CFRP (*thanh polyme cốt sợi cacbon*); AFRP (*thanh polyme cốt sợi aramid*).

Các công trình điển hình đã sử dụng cốt FRP thay cho cốt thép thông thường hoặc dùng vật liệu FRP để gia cố như: Cầu Floodway bắc qua sông ở Winnipeg, MB, Canada, được hoàn thành năm 2006. Thanh GFRP đã được sử dụng ở Canada trong các kết cấu bê tông khác như nhà để xe, mặt đường bê tông cao tốc (Benmokrane et al. 2007), bể chứa nước và lò đốt (Beau-lieu-Michaud et al. 2013). Tại Hoa Kỳ việc sử dụng các thanh GFRP trong xây dựng phòng MRI ở bệnh viện đang trở nên phổ biến. Một số dự án lớn sử dụng cốt FRP như Tòa nhà Gonda tại Phòng khám Mayo ở Rochester, Minnesota; Viện Y tế Quốc gia ở Bethesda, Maryland...[1].

Dầm bê tông cốt FRP được sử dụng thay cho dầm bê tông cốt thép thông thường tại các công trình chịu ảnh hưởng của môi trường khắc nghiệt (tiếp xúc với muối, hóa chất, độ từ tính cao...) bởi vật liệu FRP làm cốt là không từ tính, không ăn mòn, độ bền kéo cao hơn so với thép [1].

Tại Việt Nam, các công trình nghiên cứu, sử dụng cốt FRP trong kết cấu bê tông có thể kể đến như: Sử dụng cốt thanh FRP thay cho cốt thép ở các tuyến đê biển ở Quảng Ninh; sử dụng Vật liệu FRP gia cường dầm cầu ở Yên Bái; sử dụng cốt FRP thay cho cốt thép cầu kiện dầm, sàn các công trình nhà dân dụng tại Hà Nội, Đà Nẵng.

Nhiều tiêu chuẩn thiết kế hiện nay trên thế giới đã đề cập đến việc thiết kế loại kết cấu này, như Tiêu chuẩn ACI 440.1R-15 của Mỹ, CSA S806-02 (2007) của Canada, JSCE-1997 của Nhật Bản..., hiện nay Việt Nam vẫn chưa có tiêu chuẩn riêng. Bài báo được thực hiện với mục đích tìm hiểu phương pháp tính toán sức kháng uốn của dầm bê tông cốt FRP theo Tiêu chuẩn ACI 440.1R-15 qua đó khảo sát ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông trong các trường hợp phá hoại của tiết diện dầm.

2. TÍNH TOÁN SỨC KHÁNG UỐN DANH NGHĨA THEO TIÊU CHUẨN ACI 440.1R - 15

2.1. Đặc trưng của vật liệu:

a) Khối lượng riêng:

Các đặc trưng vật liệu của cốt thép và cốt FRP được trình bày trong Bảng 1. Theo đó, khối lượng riêng của thép thường lớn hơn 4-6 lần so với cốt FRP.

Bảng 1. Khối lượng riêng của thép và FRP (g/cm³)

Thép	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25 ÷ 2,10	1,50 ÷ 1,60	1,25 ÷ 1,40

b) Hệ số giãn nở vì nhiệt:

Hệ số giãn nở nhiệt của thanh FRP khác nhau theo phương dọc và phương ngang, tùy thuộc loại sợi, nhựa và tỷ phần thể tích sợi [1]. Hệ số giãn nở nhiệt theo phương dọc phụ thuộc chủ yếu vào tính chất của các sợi, còn hệ số giãn nở nhiệt theo phương ngang phụ thuộc vào tính chất của nhựa.

Bảng 2. Hệ số giãn nở nhiệt điển hình của thép và FRP

Phương	Hệ số giãn nở nhiệt (x 10 ⁻⁶ /°C)			
	Thép	GFRP	CFRP	AFRP
Dọc, α _L	11,7	6,0 ÷ 10,0	-9,0 ÷ 0,0	-6,0 ÷ -2,0
Ngang, α _T	11,7	21,0 ÷ 23,0	74,0 ÷ 104,0	60,0 ÷ 80,0

c) Tính chất cơ học:

Bảng 3. Đặc trưng cơ lý của thép và FRP

Loại thanh	Thép	GFRP	CFRP	AFRP
Ứng suất chảy danh nghĩa, MPa	276 ÷ 517	Không có	Không có	Không có
Cường độ kéo, MPa	483 ÷ 690	483 ÷ 1600	600 ÷ 3690	1720 ÷ 2540
Mô đun đàn hồi, x 10 ³ MPa	200	35 ÷ 51	120 ÷ 580	41 ÷ 125
Biến dạng tỷ đối chảy, %	0,14 ÷ 0,25	Không có	Không có	Không có
Biến dạng tỷ đối kéo đứt, %	6 ÷ 12	1,2 ÷ 3,1	0,5 ÷ 1,7	1,9 ÷ 4,4

- Các thanh GFRP, CFRP và AFRP có cường độ nén giảm so với cường độ kéo lần lượt là 55%, 78% và 20%. Cường độ nén càng lớn khi thanh có cường độ kéo càng lớn, ngoại trừ trường hợp thanh AFRP thì các sợi ứng xử phi tuyến khi nén tại mức ứng suất tương đối thấp [1].

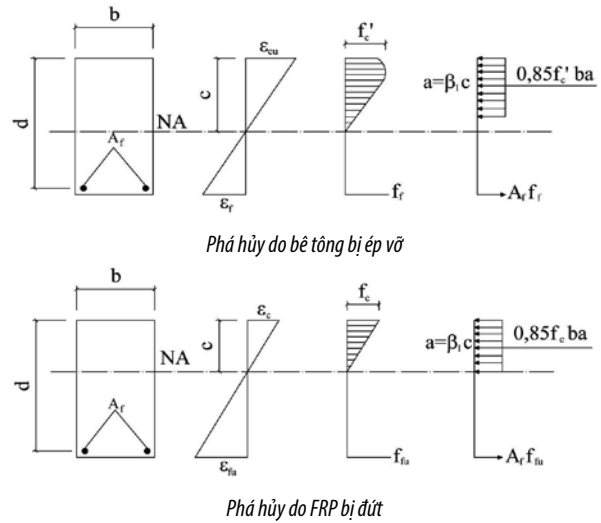
- Mô đun đàn hồi nén so với mô đun đàn hồi kéo của cùng loại cốt là vào khoảng 80% đối với GFRP, 85% đối với CFRP và 100% đối với AFRP [1].

2.2. Giả thiết, phương pháp tính toán:

a) Việc tính toán sức kháng uốn của tiết diện dầm bê tông cốt FRP được dựa trên các giả thiết sau:

- Biến dạng tỉ đối nén lớn nhất trong bê tông là ε_{cu} = 0,003;
- Biến dạng tỉ đối của bê tông và của cốt FRP tỉ lệ với khoảng cách đến trục trung hòa (nghĩa là tiết diện luôn phẳng trước và sau khi chịu tải);
- Bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông;
- Sự làm việc của thanh FRP là đàn hồi tuyến tính cho đến khi phá hủy;
- Giữa bê tông và cốt FRP có sự dính kết hoàn toàn.

b) Phương pháp tính toán sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt FRP theo hai trường hợp phá hủy:



Hình 1 - Trạng thái ứng suất và biến dạng tại các trạng thái phá hủy

Trong đó:

- A_r là diện tích tiết diện cốt FRP;
- b là chiều rộng tiết diện dầm;
- d là khoảng cách từ thớ nén ngoài cùng đến trục trung hòa cốt chịu kéo;
- c là khoảng cách từ thớ nén ngoài cùng đến trục trung hòa;
- ε_c là biến dạng tỉ đối của bê tông;
- ε_{fu} là biến dạng tỉ đối thiết kế khi đứt của thanh cốt FRP;
- f_{fu} là cường độ kéo thiết kế của FRP có xét đến sự giảm ảnh hưởng do môi trường sử dụng;
- f'_c là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông;
- f_r là ứng suất trong cốt FRP chịu kéo;
- a là chiều cao vùng làm việc;
- β₁ là hệ số khối ứng suất.

Sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt FRP phụ thuộc vào cách thức phá hủy là do bê tông bị ép vỡ hay do FRP đứt. Cách thức phá hủy có thể được xác định bằng cách so sánh hàm lượng cốt FRP với hàm lượng cốt cân bằng. Bởi vì FRP không chảy dẻo, hàm lượng cân bằng của cốt FRP được tính toán theo cường độ kéo thiết kế của cốt FRP.

Trên cơ sở [1], trình tự tính toán sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt FRP như sau:

Bước 1: Xác định cường độ thiết kế của FRP có xét đến sự giảm ảnh hưởng do môi trường sử dụng:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \tag{1}$$

Trong đó:

- C_E là hệ số giảm ảnh hưởng của môi trường;
- f_{fu}^{*} là cường độ chịu kéo đảm bảo của thanh FRP.

Bước 2: Xác định hàm lượng cốt FRP cân bằng:

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c \beta_1 E_f \cdot \epsilon_{cu}}{f_{fu} E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}} \tag{2}$$

Trong đó:

- E_f là mô đun đàn hồi đảm bảo của thanh FRP;
- ε_{cu} là biến dạng tỉ đối cực hạn của bê tông;
- Hệ số khối ứng suất được tính theo công thức sau:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{f'_c}{6,9} \tag{3}$$

Bước 3: Xác định hàm lượng cốt FRP:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (4)$$

Bước 4: Xác định sức kháng uốn danh nghĩa:

Dầm bê tông cốt FRP có thể bị phá hủy sự ép vỡ bê tông hoặc kéo đứt thép, ta có điều kiện và công thức tính toán sức kháng uốn theo hai trường hợp như sau:

* Khi $\rho_f > \rho_{fb}$, sự phá hủy của cấu kiện bắt đầu do bê tông bị ép vỡ, ta có công thức xác định sức kháng uốn danh nghĩa như sau:

$$M_n = A_f \cdot f_f \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5)$$

Trong đó:

- Chiều cao vùng làm việc được tính theo công thức sau:

$$a = \frac{A_f \cdot f_f}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (6)$$

- Ứng suất trong cốt FRP chịu kéo, được tính theo công thức sau:

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \cdot \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \cdot \epsilon_{cu}} - 0,5 E_f \cdot \epsilon_{cu} \quad (7)$$

* Khi $\rho_f < \rho_{fb}$, sự phá hủy của cấu kiện bắt đầu do cốt FRP bị kéo đứt, ta có công thức xác định sức kháng uốn danh nghĩa như sau:

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (8)$$

Trong đó:

- c_b là khoảng cách từ thớ nén ngoài cùng đến trục trung hòa trong điều kiện cân bằng biến dạng, được tính theo công thức sau:

$$c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) \cdot d \quad (9)$$

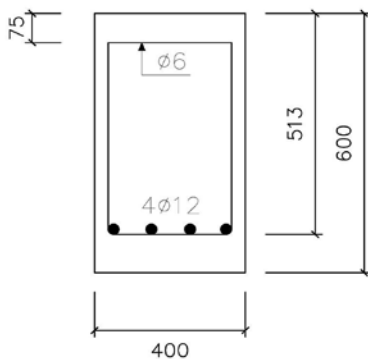
Với ϵ_{fu} được tính theo công thức:

$$\epsilon_{fu} = C_E \cdot \epsilon_{fu}^* \quad (10)$$

3. Ví dụ tính toán

Trên cơ sở lý thuyết tính toán đã được tổng hợp tại mục 2, tác giả đã đặt ra bài toán xác định và khảo sát sự thay đổi sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt FRP sau đây:

3.1. Xác định sức kháng uốn danh nghĩa với dầm bê tông sử dụng cốt CFRP - Trường hợp 1



Hình 2 - Tiết diện dầm bê tông sử dụng cốt CFRP

Dầm bê tông cốt CFRP có kích thước $b \times h = 400 \times 600 \text{ mm}$, cốt FRP 4Ø12. Vật liệu bê tông: Cường độ chịu nén $f'_c = 28 \text{ MPa}$. Cốt CFRP có $f_{fu}^* = 2068 \text{ MPa}$, mô đun đàn hồi $E_f = 131 \text{ GPa} = 131000 \text{ MPa}$,

$\epsilon_{cu} = 0,003$, $\epsilon_{fu}^* = 0,005$ điều kiện tiếp xúc trực tiếp với thời tiết bên ngoài [6].

- Xác định cường độ kéo thiết kế của FRP có xét đến sự giảm ảnh hưởng do môi trường:

Giả thiết dầm tiếp xúc trực tiếp với thời tiết bên ngoài và sử dụng CFRP làm cốt, tra bảng 6.2 theo ACI 440.1R - 15 ta có hệ số giảm ảnh hưởng của môi trường là: $C_E = 0,9$.

Áp dụng công thức (1) ta có:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = 0,9 \cdot 2068 = 1861,2 \text{ MPa}$$

- Xác định hàm lượng cốt CFRP cân bằng:

Áp dụng công thức (2) ta có:

$$\begin{aligned} \rho_{fb} &= 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}} \\ &= 0,85 \cdot \frac{28}{1861,2} \cdot 0,847 \cdot \frac{131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 1861,2} \\ &= 0,00189 \end{aligned}$$

Với β_1 - Hệ số khối ứng suất, áp dụng công thức (3) ta có:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{f'_c}{6,9} = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{28}{6,9} = 0,847$$

- Xác định hàm lượng cốt FRP:

Có 4Ø12 tra bảng 7.1 theo ACI 440.6 - 08 có $A_f = 4.129 = 516 \text{ mm}^2$ với $b = 400 \text{ mm}$, $d = 600 - 75 - 6 \cdot 12/2 = 513 \text{ mm}$, thay số ta có hàm lượng cốt FRP, áp dụng công thức (4) ta có:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{516}{400 \cdot 513} = 0,00251$$

- Xác định sức kháng uốn danh nghĩa:

Nhận thấy $\rho_f = 0,00251 > \rho_{fb} = 0,00189 \rightarrow$ Bê tông bị ép vỡ trước khi cốt FRP bị kéo đứt, do đó áp dụng công thức (5) ta có:

$$M_n = A_f \cdot f_f \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Ta có ứng suất trong cốt FRP, áp dụng công thức (7) ta có biểu thức (*) sau đây: $f_f = \sqrt{A+B} - C$, với:

$$A = \frac{(E_f \cdot \epsilon_{cu})^2}{4} = \frac{(131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 38612,25$$

$$\begin{aligned} B &= 0,85 \frac{\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \cdot \epsilon_{cu} = 0,85 \cdot \frac{0,847 \cdot 28}{0,00251} \cdot 131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \\ &= 3150885 \end{aligned}$$

$$C = 0,5 \cdot E_f \cdot \epsilon_{cu} = 0,5 \cdot 131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 196,5$$

Thay số vào (*) ta có:

s

\rightarrow Chiều cao vùng làm việc, áp dụng công thức (6) ta có:

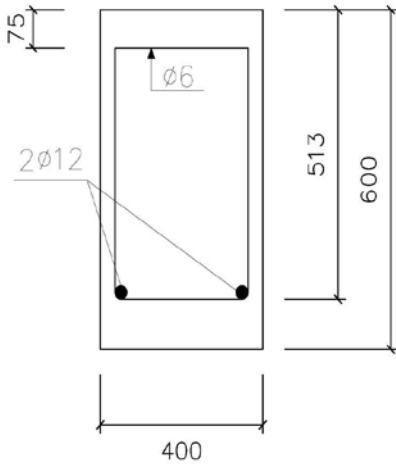
$$a = \frac{A_f \cdot f_f}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{516 \cdot 1589,42}{0,85 \cdot 28 \cdot 400} = 86,15 \text{ mm}$$

Vậy:

$$M_n = 516 \cdot 1589,42 \cdot \left(513 - \frac{86,15}{2} \right) \cdot 10^{-6} = 385,41 \text{ kNm}$$

Trên cơ sở tiết diện dầm đã tính toán ở trên, tiến hành thay đổi cường độ chịu nén của bê tông lần lượt là $f'_c = 35 \text{ MPa}$; $f'_c = 39 \text{ MPa}$. Sức kháng uốn danh nghĩa thu được lần lượt là $M_n = 426,22 \text{ kNm}$; $M_n = 445,57 \text{ kNm}$.

3.2. Xác định sức kháng uốn danh nghĩa với dầm bê tông sử dụng cốt CFRP - Trường hợp 2



Hình 3 - Tiết diện dầm bê tông sử dụng cốt CFRP

Tiến hành tính toán sức kháng uốn danh nghĩa với các thông số tiết diện như mục 3.1, với cốt CFRP thay đổi là 2Ø12.

- Xác định cường độ kéo thiết kế của FRP có xét đến sự giảm ảnh hưởng do môi trường:

Giả thiết dầm tiếp xúc trực tiếp với thời tiết bên ngoài và sử dụng CFRP làm cốt, tra bảng 6.2 theo ACI 440.1R - 15 ta có hệ số giảm ảnh hưởng của môi trường là: $C_E = 0,9$.

Áp dụng công thức (1) ta có:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0,9 \cdot 2068 = 1861,2 \text{ MPa.}$$

- Xác định hàm lượng cốt CFRP cân bằng:

Áp dụng công thức (2) ta có:

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f_c'}{f_{fu}'} \beta_1 \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}'} \\ = 0,85 \cdot \frac{28}{1861,2} \cdot 0,847 \cdot \frac{131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{131000 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 1861,2} \\ = 0,00189$$

Với β_1 - Hệ số khối ứng suất, áp dụng công thức (3) ta có:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{f_c'}{6,9} = 1,05 - 0,05 \cdot \frac{28}{6,9} = 0,847$$

- Xác định hàm lượng cốt FRP:

Có 2Ø12 tra bảng 7.1 theo ACI 440.6 - 08 có $A_f = 2.129 = 258 \text{ mm}^2$ với $b = 400 \text{ mm}$, $d = 600 - 75 - 6 \cdot 12/2 = 513 \text{ mm}$, thay số ta có hàm lượng cốt FRP, áp dụng công thức (4) ta có:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} = \frac{258}{400 \cdot 513} = 0,0013$$

- Xác định sức kháng uốn danh nghĩa:

Nhận thấy $\rho_f = 0,0013 < \rho_{fb} = 0,00189 \rightarrow$ Cốt CFRP bị kéo đứt trước khi bê tông bị ép vỡ, do đó áp dụng công thức (8) ta có:

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)$$

Áp dụng công thức (9) ta có:

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d = \left(\frac{0,003}{0,003 + 0,0045} \right) \cdot 513 = 205,2. \text{ Với:}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* = 0,9 \cdot 0,005 = 0,0045, \text{ áp dụng công thức (10).}$$

Thay vào ta có sức kháng uốn danh nghĩa:

$$M_n = 258 \cdot 1861,2 \cdot \left(513 - \frac{0,847 \cdot 205,2}{2} \right) \cdot 10^{-6} \\ = 204,61 \text{ kNm}$$

Trên cơ sở tiết diện dầm đã tính toán ở trên, tiến hành thay đổi cường độ chịu nén của bê tông lần lượt là $f_c' = 35 \text{ MPa}$; $f_c' = 39 \text{ MPa}$. Sức kháng uốn danh nghĩa thu được lần lượt là $M_n = 207,11 \text{ kNm}$; $M_n = 208,53 \text{ kNm}$.

3.3. Kết quả đạt được

Kết quả khảo sát tính toán sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt CFRP được tổng hợp trong Bảng 4. Trong đó độ chênh lệch Δ trong các trường hợp thay đổi cường độ chịu nén của bê tông so với ban đầu cũng được chỉ ra.

Bảng 4. Sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt CFRP.

STT	Trường hợp	Bê tông bị ép vỡ		Cốt CFRP bị kéo đứt	
		f_c' (MPa)	M_n (kNm)	Δ (%)	M_n (kNm)
1	28	385,41	-	204,61	-
2	35	426,22	10,6	207,11	1,2
3	39	445,57	15,6	208,53	1,9

Từ kết quả, nhận thấy trong hai trường hợp tiết diện bê tông cốt CFRP bị phá hoại, ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông đến khả năng chịu uốn là khác nhau. Cụ thể, trong trường hợp tiết diện bị phá hoại do bê tông bị ép vỡ, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông (lần lượt là 35 và 39 MPa), sức kháng uốn tăng lên rõ rệt hơn (10,6 và 15,6%) so với khi tiết diện bị phá hoại do cốt CFRP bị kéo đứt (1,2 và 1,9%).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng hợp quy trình tính toán sức kháng uốn danh nghĩa của dầm bê tông cốt CFRP theo hai trường hợp phá hoại tiết diện: Do bê tông bị ép vỡ trước; do cốt CFRP bị kéo đứt trước.

Trên cơ sở khảo sát, nhận thấy rằng sức kháng uốn danh nghĩa của dầm trong hai trường hợp bị phá hoại do kéo đứt cốt ít bị ảnh hưởng khi tăng cường độ bê tông so với trường hợp bị phá hủy do bê tông bị ép vỡ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Committee 440.
- [2] ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Committee 440.
- [3] ACI 318-11. Building code requirements for Structural Concrete. ACI Committee 318.
- [4] Chỉ dẫn thiết kế và thi công kết cấu bê tông thanh polyme cốt sợi. Đại học Xây dựng năm 2015.
- [5] Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanics and Design. Antonio Nanni, Antonio De Luca, Hany Jawaheri Zadeh, CRC Press, 2014.
- [6] Catalog các thông số kỹ thuật cốt CFRP của công ty AFZIR [<https://afzir.com/en/products/carbon-rebar>].