■Ngày nhận bài: 15/11/2025 ■Ngày sửa bài: 26/11/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 05/12/2025

Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm xác định mô men hình thành khe nứt khi uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng mô hình biến dạng khi kéo dạng hình thang

Theoretical and Experimental investigation of The flexural cracking moment of reinforced concrete beams using a Trapezoidal tensile stress model

> PGS.TS PHẠM THANH TÙNG, THS NGUYỄN VĂN QUANG*, GS.TS NGUYỄN TRUNG HIẾU
Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: quangnv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), các mô hình tính toán mô men hình thành khe nứt đối với cấu kiện chịu uốn đã được nghiên cứu và hệ thống hoá trong các tiêu chuẩn hiện hành. Đối với tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018, mô men kháng nứt được tính toán từ giá trị mô men kháng uốn đàn dẻo, giá trị này được tính thông qua mô men kháng uốn đàn hồi và hệ số thực nghiệm 1,3. Trong khi tiêu chuẩn Hoa Kỳ ACI 318-11 sử dụng tiết diện quy đổi tương đương và tính toán mô men kháng nứt thông qua giá trị cường độ chịu kéo khi uốn. Trong nghiên cứu này, ngoài việc trình bày tính toán mô men hình thành khe nứt theo hai tiêu chuẩn trên, nhóm tác giả tiến hành tính toán mô men kháng nứt từ việc cân bằng nội lực tại tiết diện chuẩn bị nứt, với mô hình này phần làm việc ngoài đàn hồi của bê tông vùng kéo được thể hiện qua việc lấy sơ đồ biến dạng khi kéo dạng hình thang. Các kết quả tính toán này được so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm 02 dầm BTCT kích thước 150x200x2200 mm chịu uốn bốn điểm. Kết quả cho thấy, tính toán TCVN 5574:2018 và ACI 318- 2011 khá sát so với kết quả thực nghiệm, mô hình tính toán mô men hình thành khe nứt dựa trên sơ đồ biến dạng khi kéo của bê tông dạng hình thang cho kết quả sai khác khoảng 13% so với thực nghiệm. Mặc dù tính toán mô men hình thành khe nứt theo phương pháp này phức tạp hơn so với phương pháp quy đổi tiết diện, nhưng có thể phát triển được cho những mô hình vật liệu bê tông có ứng xử khi kéo khác với bê tông thông thường.

Từ khóa: Dầm bê tông cốt thép, Mô men kháng nứt, TCVN 5574:2018, ACI 318-11.

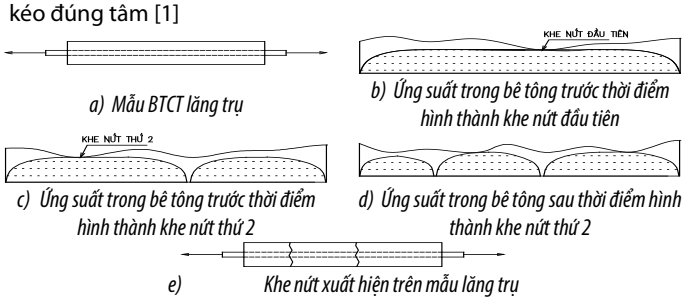
ABSTRACT

In reinforced concrete (RC) flexural members, several analytical approaches for predicting the cracking moment have been established in current design standards. TCVN 5574:2018 evaluates the cracking moment using the plastic flexural resistance, obtained by multiplying the elastic flexural capacity by an empirical coefficient of 1.3, whereas ACI 318-2011 directly employs the equivalent transformed section and the flexural tensile strength of concrete. In addition to these two code-based approaches, this study also evaluates the cracking moment using a stress-equilibrium model in which the nonlinear tensile response is idealized by a trapezoidal tensile stress block. The analytical predictions were compared with the experimental results of two RC beams tested under four-point bending, showing that the TCVN and ACI calculations agreed closely with the measured values, while the stress-distribution model, adopting a bilinear tensile response, exhibited a deviation of approximately 13%. Although more complex, the stress-equilibrium approach can be readily extended to other concrete material models for predicting the cracking moment.

Keywords: Reinforced concrete beams; Cracking moment; TCVN 5574:2018; ACI 318-2011.

1. GIỚI THIỆU

Nứt là hiện tượng khá phổ biến trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt đối với kết cấu chịu uốn, nguyên nhân chủ yếu là do bê tông thông thường có cường độ chịu kéo thấp [1]. Khe nứt hình thành khi trong bê tông xuất hiện ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của nó, trong khi . Khe nứt có thể làm cho công trình mất khả năng chống thấm, làm cho bê tông không bảo vệ được cốt thép vì tác dụng xâm thực của môi trường [2]. Hơn nữa khe nứt trong kết cấu ảnh hưởng đến độ cứng, năng lượng hấp thụ, và độ bền lâu của kết cấu. Nguyên nhân hình thành khe nứt có thể do biến dạng ván khuôn, co ngót của bê tông, sự thay đổi của nhiệt độ, độ ẩm, do sự tác dụng của tải trọng và các tác động khác [2]. Khi tính toán kết cấu BTCT theo trạng thái giới hạn (TTGH) thì TTGH 2 là trạng thái về điều kiện làm việc bình thường nhằm đảm bảo cho kết cấu không có những khe nứt hoặc biến dạng quá mức cho phép . Trong các tiêu chuẩn hiện hành, tính toán TTGH 2 bao gồm các phần việc như tính toán sự hình thành khe nứt, tính toán sự mở rộng khe nứt và tính toán biến dạng của cấu kiện. Trong đó tính toán sự hình thành khe nứt là một trong những yêu cầu đặc biệt quan trọng đối với công trình có yêu cầu tính chống nứt cao. Do bê tông có cường độ chịu kéo thấp nên tải trọng hình thành khe nứt thường diễn ra khi tải trọng tác động còn khá nhỏ, việc đánh giá tải trọng hình thành khe nứt kết hợp với cốt thép trong bê tông có thể được thực hiện qua các nghiên cứu trên mẫu lăng trụ kéo đúng tâm. Hình 1 trình bày nghiên cứu về tải trọng hình thành khe nứt và khoảng cách giữa các khe nứt theo các nghiên cứu của tác giả Macgreor [3]. Khe nứt hình thành khi ứng suất trong bê tông đạt tới cường độ chịu kéo $R_{bt,ser}$, lúc này khe nứt đầu tiên sẽ xuất hiện một cách ngẫu nhiên tại tiết diện nào đó mà bê tông chịu kéo yếu nhất. Tại tiết diện có khe nứt ứng suất kéo trong bê tông trở về không, ứng suất trong cốt thép lớn nhất là $_{s,crc}$. Càng xa tiết diện bị nứt, ứng suất kéo trong bê tông tăng dần do có sự truyền lực từ cốt thép sang bê tông qua lực dính, ứng suất trong bê tông đạt đến $R_{bt,ser}$ thì lại hình thành khe nứt [4]. Quá trình này tiếp tục diễn ra cho đến khi khoảng cách giữa hai khe nứt không đủ lớn để ứng suất trong bê tông đạt đến ứng suất giới hạn để hình thành khe nứt. Hình 1 thể hiện ứng suất trong bê tông và cốt thép sau khi hình thành khe nứt đối với cấu kiện chịu kéo đúng tâm [1]



a) Mẫu BTCT lăng trụ

b) Ứng suất trong bê tông trước thời điểm hình thành khe nứt đầu tiên

c) Ứng suất trong bê tông trước thời điểm hình thành khe nứt thứ 2

d) Ứng suất trong bê tông sau thời điểm hình thành khe nứt thứ 2

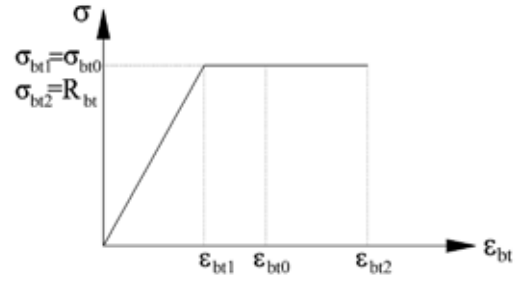
e) Khe nứt xuất hiện trên mẫu lăng trụ

Hình 1. Sự hình thành khe nứt trong mẫu BTCT lăng trụ chịu kéo đúng tâm [3]

Khi tính toán mô men hình thành khe nứt, mặc dù tiêu chuẩn Việt Nam TCVN đưa ra khá nhiều các giả thiết về sự làm việc của bê tông và cốt thép tại tiết diện chuẩn bị nứt. Tuy nhiên khi tính toán mô men hình thành khe nứt ở cấu kiện chịu uốn lại tính toán thông qua giá trị mô men đàn dẻo *Wpl,* giá trị này được tính từ mô men quán tính đàn hồi và hệ số thực nghiệm 1,3. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành nghiên cứu tính toán lý thuyết nhằm xác định mô men hình thành khe nứt của dầm BTCT chịu uốn theo TCVN 5574:2018 [5], ACI 318-2018 [6] và tính toán theo sơ đồ biến dạng hình thang của bê tông vùng kéo. Đồng thời tiến hành nghiên cứu thực nghiệm 02 dầm BTCT chịu uốn bốn điểm, nhằm so sánh kết quả nghiên cứu lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm.

2. TÍNH TOÁN MÔ MEN HÌNH THÀNH KHE NỨT CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP CHỊU UỐN

2.1. Mô hình sơ đồ biến dạng dạng 2 đoạn thẳng khi kéo của bê tông thường



Hình 2. Biểu đồ ứng suất biến dạng, dạng hai đoạn thẳng khi kéo của bê tông thường

Theo TCVN 5574:2018, các giá trị biến dạng cực hạn khi chịu kéo được lấy như trong Hình 2, các đặc trưng biến dạng khi kéo của bê tông thường lần lượt là $\varepsilon_{bt1,red} = 0,00008$; $\varepsilon_{bt0} = 0,0001$; ε_{bt2}=0,0015 và theo công thức (1) và (2)

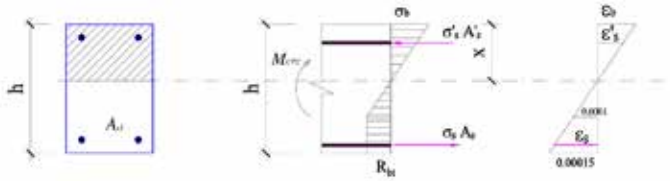
+ Khi $0 \le \varepsilon_{bt} \le \varepsilon_{bt1}$: $\sigma_{bt} = E_{bt,red}\varepsilon_{bt}$ (1)

+ Khi $\varepsilon_{bt1} < \varepsilon_b \le \varepsilon_{bt2}$: $\sigma_{bt} = R_{bt}$ (2)

Trong đó: $E_{bt,red} = \dfrac{R_{bt}}{\varepsilon_{b1,red}}$

2.2. Tính toán mô men hình thành khe nứt của dầm BTCT theo TCVN 5574:2018

Khi tính toán khả năng chống nứt. tiêu chuẩn Theo TCVN 5574:2018 [5] sử dụng một số giả thiết sau: (i) Dùng giả thiết tiết diện phẳng, nghĩa là sau khi biến dạng, tiết diện vẫn coi là phẳng; (ii) Biểu đồ ứng suất trong vùng chịu nén của bê tông lấy dạng tam giác, như đối với vật thể đàn hồi; (iii) Biểu đồ ứng suất trong vùng chịu kéo của bê tông lấy dạng hình thang với ứng suất không vượt quá cường độ chịu kéo tính toán của bê tông Rbt,ser; (iv) Biến dạng tương đối của thớ chịu kéo ngoài cùng của bê tông lấy bằng giá trị giới hạn của nó khi có tác dụng ngắn hạn của tải trọng, khi biểu đồ biến dạng trong tiết diện cấu kiện với biến dạng có hai dấu (âm, dương) thì $_{bt,u}$= 0.00015, (v) Ứng suất trong cốt thép lấy phụ thuộc và biến dạng tương đối như đối với vật thể đàn hồi. Từ các giả thiết trên, sơ đồ biến dạng và ứng suất của tiết diện bê tông tại tiết diện chuẩn bị hình thành khe nứt được trình bày trên Hình 3



Hình 3. Sơ đồ ứng suất biến dạng tại tiết diện chưa nứt theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 [5]

Công thức tính toán mô men nứt đối với cấu kiện chịu uốn được trình bày trong công thức (3)

$$M_{crc} = W_{pl} R_{bt,ser} \quad (3)$$

Trong đó:

$R_{bt,ser}$ là cường độ chịu kéo dọc trục của bê tông; W_{pl} là Mô men kháng uốn đàn dẻo của tiết diện đối với thớ ngoài cùng; Đối với tiết diện chữ nhật giá trị W_{pl} được tính theo công thức (4)

$$W_{pl} = 1,3W_{red} \quad (4)$$

Trong đó W_{red} là mô men kháng uốn đàn hồi của tiết diện quy đổi được tính theo công thức (5)

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t} \quad (5)$$

Ired là mô men quán tính của tiết diện quy đổi của cấu kiện đối với trọng tâm của nó. Giá trị I_{red} được tính bởi công thức (6)

$$I_{red} = I + \alpha I_s + \alpha I'_s \quad (6)$$

Với I, I_s, I'_s lần lượt là mô men quán tính của tiết diện bê tông, tiết diện cốt thép chịu kéo và tiết diện cốt thép chịu nén

y_t là khoảng cách từ thớ bê tông chịu kéo nhiều nhất đến trọng tâm tiết diện quy đổi của cấu kiện. y_t được tính theo công thức (7)

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}} \quad (7)$$

Ở đây $S_{t,red}$ là mô men tĩnh đối với diện tích tiết diện quy đổi của cấu kiện đối với thớ bê tông chịu kéo nhiều hơn. Ở đây A_{red} và $S_{t,red}$ lần lượt là diện tích ngang quy đổi của cấu kiện và mô men tĩnh của tiết diện quy đổi của cấu kiện

2.3. Tính toán mô men hình thành khe nứt của dầm BTCT sử dụng sơ đồ biến dạng khi kéo dạng hình thang

Từ các giả thiết của TCVN 5574:2018 tại tiết diện chuẩn bị nứt. Các giá trị chiều cao vùng nén và mô men hình thành khe nứt được tiến hành tính toán thông qua việc cân bằng nội lực tại tiết diện chuẩn bị nứt. Từ tính chất của 2 tam giác đồng dạng các giá trị ứng suất bê tông vùng nén s_b, s_s', s_b, cốt thép vùng nén và cốt thép vùng kéo được tính từ các công thức (8), (9), (10)

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bt,u}} = \frac{x}{h-x} \rightarrow \frac{\sigma_b}{E_b} = \varepsilon_{bt,u}\frac{x}{h-x} \rightarrow \sigma_b = R_{bt}.\frac{x}{h-x} \quad (8)$$

$$\frac{\varepsilon_{s'}}{\varepsilon_{bt,u}} = \frac{x-a'}{h-x} \rightarrow \frac{\sigma_{s'}}{E_s} = \varepsilon_{bt,u}\frac{x-a'}{h-x} \rightarrow \sigma_{s'} = R_{bt}\alpha\frac{x-a'}{h-x} \quad (9)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{bt,u}} = \frac{h-x-a}{h-x} \rightarrow \frac{\sigma_s}{E_s} = \varepsilon_{bt,u}\frac{h-x-a}{h-x} \rightarrow \sigma_s = R_{bt}\alpha\frac{h-} \quad (10)$$

Đặt $E_s/E_b=\alpha$ và cân bằng tổng lực dọc trên mặt cắt tiết diện dầm $\sum N = 0$ ta có phương trình (11), thay các giá trị $_b$, $_s$, $_{s'}$ vào phương trình trên ta được phương trình (12)

$$\frac{1}{2}\sigma_b.x.b + \sigma_{s'}A_{s'} = \frac{2}{3}R_{bt,ser}.(h-x).b + \sigma_s A_s \quad (12)$$

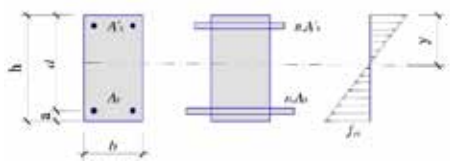
Nhân cả 2 vế với (h-x) và đưa về phương trình bậc 2 ẩn x: Ax2+Bx+C=0, với các giá trị A, B, C được tính từ công thức (13)

$$\begin{aligned} A &= b \\ B &= -\left(6\alpha A_{s'} + 6\alpha A_s + 8bh\right) \\ C &= \left(6\alpha A_s a + 4bh^2 + 6\alpha(h-a)A_s\right) \end{aligned} \quad (13)$$

Chiều cao bê tông vùng nén x là nghiệm dương của phương trình bậc 2, mô men hình thành khe nứt được tính từ công thức (14)

$$M_{crc} = \frac{1}{2}\sigma_b.xb.\frac{2}{3}x. + \sigma_{s'}A_{s'}.(x-a') + 0.48R_{bt}.(h-x)^2.b + \quad (14)$$

2.4. Tính toán mô men hình thành khe nứt của dầm BTCT theo ACI 318-11



Hình 4. Tính toán Theo tiết diện quy đổi tương đương

Khi tính toán mô men hình thành khe nứt theo ACI 318-11, lớp cốt thép chịu nén và cốt thép chịu kéo được quy đổi về tiết diện tương đương thông qua tỷ lệ mô đun đàn hồi của thép và của bê tông, quan hệ ứng suất được lấy dạng đàn hồi (Hình 4) Chiều cao vùng nén (tính từ mép bê tông vùng nén) được tính theo công thức (15)

$$y = \frac{\frac{bh^2}{2} + nA_s'a' + nA_s d}{bh + nA' + nA_s} \quad (15)$$

Mô men quán tính quy đổi của tiết diện tương đương được tính theo công thức (16)

$$I_{gt} = \frac{bh^3}{12} + bh(\frac{h}{2} - y)^2 + nA_s'(y-a')^2 + nA_s(d-y)^2 \quad (16)$$

Dầm hình thành khe nứt khi thớ chịu kéo ngoài cùng đạt tới cường độ chịu kéo khi uốn f_r. Mô men hình thành khe nứt được tính theo công thức (17)

$$M_{cr} = f_r\frac{I_{gt}}{h-y} \quad (17)$$

3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

3.1. Vật liệu chế tạo và mẫu thí nghiệm xác định chỉ tiêu cơ học

Trong nghiên cứu thực nghiệm này, sử dụng bê tông cấp độ bền B22.5 độ sụt 10 ± 2 cm. Cấp phối vật liệu chế tạo bê tông được trình bày trong Bảng 1. Trong đó sử dụng Xi măng PCB 30 Hoàng Thạch; Đá dăm 1x2 (mỏ đá Kiện Khê, Hà Nam), cát vàng Sông Lô

Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông (đơn vị kg/m^3)

Xi măng PCB 30 (kg)	*Cát vàng (kg)*	*Đá dăm 1 x 2 (kg)*	*Nước (kg)*
390	680	1210	185

Các chỉ tiêu cơ học của bê tông như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu kéo khi ép chẻ và mô đun đàn hồi được tiến hành chế tạo và thí nghiệm. Chi tiết mẫu thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2 và Hình 6

Bảng 2. Mẫu thí nghiệm xác định một số chỉ tiêu cơ lý của bê tông

Thí nghiệm	Loại mẫu	Kích thước mẫu (mm)	Số lượng (Mẫu)	Tiêu chuẩn
Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén	Mẫu trụ (DxH)	150x300	03	ASTM C39/C39M
Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi	Mẫu trụ (DxH)	150x300	03	ASTM C469/C469M
Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn	Mẫu lăng trụ (bxhxL)	100x100x400	03	ASTM C78/C78M
Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ	Mẫu trụ (DxH	150x300	03	ASTM C496/C496M

Cốt thép sử dụng thép gai D10, D14, cốt thép được cắt và uốn theo đúng quy cách, đảm bảo chiều dày lớp bảo vệ. Ngoài cốt thép để chế tạo dầm, để lại cốt thép để xác định chỉ tiêu cơ lý của thép. Kết quả giới hạn chảy và giới hạn bền lần lượt là 320Mpa và 424Mpa.

a. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén

b. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi

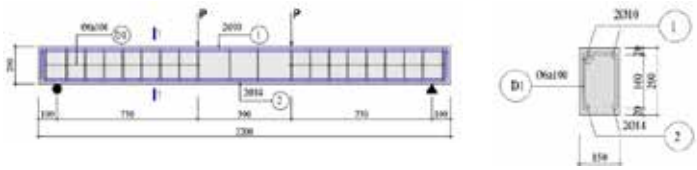
c. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi ép chẻ

d. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn

Hình 6. Thí nghiệm xác định chỉ tiêu cơ học của bê tông

3.2. Mẫu thí nghiệm dầm bê tông cốt thép

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chế tạo 02 dầm BTCT có kích thước bxhxL=120x200x2200 mm ký hiệu là dầm CB. Để khi thí nghiệm dầm không bị trượt khỏi 2 gối tựa, hai đầu dầm được kê sâu vào gối tựa mỗi bên 100mm, nhịp tính toán của dầm L_0=2000mm. Qua tính toán để tránh cho các mẫu dầm BTCT thí nghiệm không bị phá hoại do lực cắt, lựa chọn cốt thép dọc chịu lực vùng kéo (phía dưới dầm) là 2∅14, cốt thép dọc vùng nén (phía trên dầm) bố trí 2∅10, cốt thép đai ∅6 khoảng cách 150 mm ở vùng giữa gối tựa dầm và vị trí tác dụng tải trọng. Chi tiết cấu tạo được trình bày trên Hình 7.

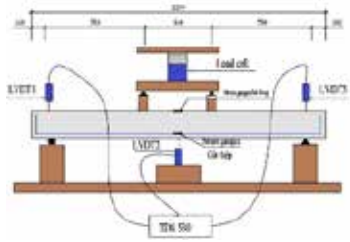


Hình 7. Chi tiết cấu tạo cốt thép các mẫu dầm thí nghiệm

Hình 8. Dầm BTCT thí nghiệm trong nghiên cứu

3.3. Sơ đồ thí nghiệm và sơ đồ bố trí dụng cụ đo

Tiến hành thí nghiệm uốn theo sơ đồ uốn bốn điểm trên sơ đồ dầm đơn giản. Dầm thí nghiệm chịu tác dụng của hai lực tập trung là P, khoảng cách từ gối tựa đến điểm đặt lực là L1 = 750 mm, khoảng cách giữa hai điểm đặt lực là L2 = 500 mm. Tải trọng được tạo ra bởi kích thủy lực và được đo đạc bằng thiết bị đo lực điện tử (load-cell). Độ võng của dầm thí nghiệm được xác định thông qua ba dụng cụ đo chuyển vị, ký hiệu là LVDT1, LVDT2 và LVDT3, bố trí tại vị trí hai gối tựa và ở giữa dầm. Đồng thời các giá trị biến dạng bê tông vùng nén, cốt thép vùng kéo và UHPC được đo đạc thông qua tem điện trở. Tất cả các thiết bị và dụng cụ đo được kết nối với bộ xử lý số liệu Data - Logger TDS 530 và máy tính để đo đạc số liệu một cách tự động và liên tục trong quá trình thí nghiệm. Mô hình bố trí các dụng cụ đo được trình bày trong Hình 9.



Hình 9. Sơ đồ thí nghiệm trong nghiên cứu

4. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Kết quả thí nghiệm

4.1.1. Kết quả thí nghiệm các đặc trưng cơ học của vật liệu

Kết quả thí nghiệm các đặc trưng cơ học của bê tông được trình bày trong Bảng 3

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm xác định chỉ tiêu cơ học của bê tông chế tạo dầm

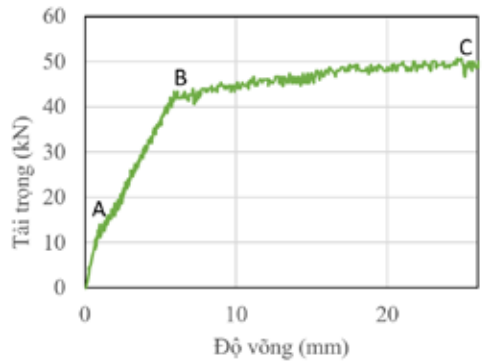
Thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm (MPa)				
		M1	M2	M3	Cường độ trung bình	Hệ số biến thiên CV (%)
Cường độ chịu nén	MPa	28,16	29,14	28,54	28,61	1,73
Mô đun đàn hồi	MPa	28700	29100	28210	28760	1,56
Cường độ chịu kéo khi uốn	MPa	3,41	3,29	3,45	3,38	2,46
Cường độ chịu kéo khi ép chẻ	MPa	2,88	2,91	2,72	2,84	3,59

Giá trị cường độ kéo trực tiếp trong nghiên cứu này được tính từ cường độ kéo trực tiếp theo công thức của EN 1992-1-1

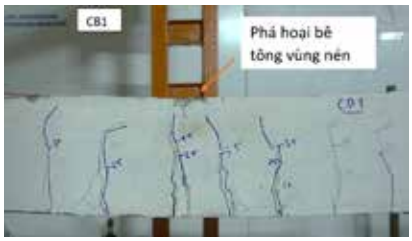
$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (18)$$

4.1.2. Kết quả thí nghiệm dầm BTCT

Hình 10 và Hình 11 trình bày mối quan hệ tải trọng độ võng của dầm thí nghiệm và dạng phá hoại của dầm thí nghiệm.

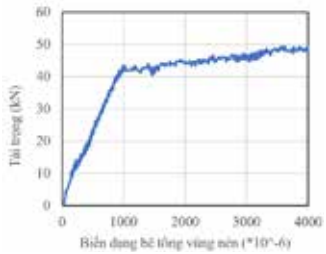


Hình 10. Quan hệ tải trọng độ võng của dầm thí nghiệm

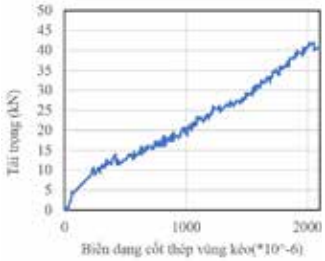


Hình 11. Dạng phá hoại của dầm thí nghiệm

Từ kết quả quan hệ tải trọng độ võng từ Hình 10 ta thấy các dầm BTCT khi chịu uốn có 3 giai đoạn làm việc chính. Giai đoạn trước nứt - OA, ở giai đoạn này quan hệ tải trọng độ võng gần như đường thẳng, dầm làm việc trong giai đoạn đàn hồi, chưa xuất hiện khe nứt. Giai đoạn AB, là giai đoạn dầm hình thành và phát triển khe nứt, thời điểm xuất hiện khe nứt đầu tiên (A) là thời điểm độ dốc của đường cong quan hệ tải trọng - độ võng bị giảm đột ngột, nguyên nhân do độ cứng của dầm giảm so với giai đoạn trước nứt, giá trị tải trọng xuất hiện khe nứt đầu tiên trong nghiên cứu này có giá trị 2P là 11,4 kN, tương ứng với 4,28 kN.m ứng với độ võng tại thời điểm này là 1,44 mm. Khi tăng tải trọng, khe nứt tiếp tục phát triển theo cả bề rộng, số lượng và chiều cao. Giai đoạn BC là giai đoạn cốt thép bắt đầu chảy dẻo, sau đó cốt thép tiếp tục chảy dẻo, chiều cao vùng nén giảm dần đến khi cường độ vùng nén đạt tới cường độ chịu nén lớn nhất của bê tông, bê tông vùng nén bị phá hoại. Dạng phá hoại của dầm là dạng phá hoại dẻo. Hình 11 trình bày dạng phá hoại của dầm trong nghiên cứu



Hình 12. Quan hệ tải trọng và biến dạng bê tông vùng nén



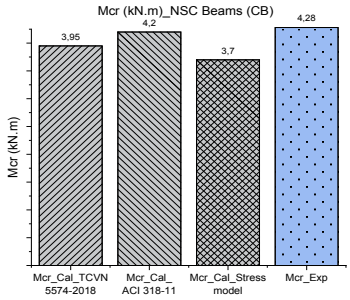
Hình 13. Quan hệ tải trọng và biến dạng cốt thép vùng kéo

Từ biểu đồ quan hệ tải trọng và biến dạng bê tông vùng nén có thể nhận thấy, biến dạng bê tông vùng nén của dầm BTCT tại thời điểm dầm bị phá hoại (bê tông vùng nén bị vỡ) của dầm thí nghiệm khoảng 0.0035 tới 0.0040. Giá trị này có xu hướng lớn hơn các giá trị biến dạng cực hạn theo TCVN 557-2018 do ảnh hưởng của cốt chịu nén, cốt đai và trạng thái làm việc ở trạng thái khi dầm chịu uốn. Trong khi giá trị biến dạng cốt thép tại thời điểm chảy dẻo khoảng 0.002

4.2. Kết quả tính toán lý thuyết và so sánh với kết quả thí nghiệm

Từ các thông số đầu vào của dầm thí nghiệm và các giá trị cường độ nén, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu kéo trực tiếp (tính từ cường độ chịu kéo khi ép chẻ) tiến hành tính toán mô men hình thành khe nứt theo 3 phương pháp: TCVN 5574:2018, ACI 318-11 và tính theo mô hình biến dạng hai đoạn thẳng. Kết quả tính toán và kết quả thí nghiệm được trình bày trong Hình14

Từ Hình 14 cho thấy mô men nứt của dầm thí nghiệm là 4,28 kN.m, giá trị tính toán theo TCVN 5574:2018 là 3,95 kN.m, thấp hơn thực nghiệm khoảng 7,7% so với dầm thí nghiệm. Phương pháp quy đổi tiết diện tương đương ACI 318-11 cho kết quả 4,2 kN.m, sai khác khoảng 1,9%, và là giá trị gần nhất với kết quả thí nghiệm. Mặc dù phương pháp này sơ đồ ứng suất chỉ lấy dạng đàn hồi, tuy nhiên cường độ chịu kéo để tính toán mô men nứt là cường độ chịu kéo khi uốn. Trong khi đó, khi tính toán theo mô hình biến dạng, giá trị mô men nứt là 3,7 kN.m, thấp hơn thực nghiệm khoảng 13,6%. Nhìn chung, cả ba phương pháp đều dự đoán tương đối gần với giá trị thực nghiệm, trong đó ACI 318-11 thể hiện độ chính xác cao nhất, tiếp theo là TCVN 5574:2018. Mô hình ứng suất cho kết quả thấp hơn so với các tiêu chuẩn trên, tuy nhiên mức sai lệch vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được. Điều này cho thấy các phương pháp lý thuyết đều có thể sử dụng hiệu quả để dự đoán mô men nứt của dầm BTCT thường trong thiết kế và phân tích ban đầu.



Hình 14. Kết quả tính toán Mcr và kết quả nghiên cứu thực nghiệm

5. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu tính toán mô men hình thành khe nứt bằng một số phương pháp và so sánh với kết quả thực nghiệm. Từ các kết quả thu được có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 đưa ra các giả thiết về biến dạng của bê tông vùng kéo dựa trên mô hình đơn giản hai đoạn thẳng. Tuy nhiên khi tính toán mô men hình thành khe nứt, giá trị này được tính toán thông qua sự quy đổi về mô men quán tính, đồng thời sử dụng hệ số 1,3 để quy đổi giá trị mô men kháng uốn đàn hồi sang mô men kháng uốn dẻo và sử dụng cường độ kéo trực tiếp trong tính toán. Trong khi ACI 318-11 sử dụng phương pháp quy đổi tương đương về mặt tiết diện, ứng suất lấy dạng đàn hồi và sử dụng cường độ chịu kéo khi uốn để tính toán mô men hình thành khe nứt. Cả hai tiêu chuẩn này có kết quả tính toán khá sát với nghiên cứu thực nghiệm trong nghiên cứu này.

- Khi sử dụng các giả thiết theo TCVN 5574:2018, mô hình biến dạng khi kéo dạng hình thang và tính toán mô men hình thành khe nứt thông qua việc cân bằng nội lực tại tiết diện chuẩn bị nứt, kết quả thu được khá tương đương so với 2 tiêu chuẩn trên và khá sát so với nghiên cứu thực nghiệm. Mặc dù phương pháp tính toán này khá phức tạp, tuy nhiên có thể phát triển được cho bê tông bê tông có mô hình ứng suất biến dạng khác so với bê tông thường trong việc tính toán mô men hình thành khe nứt.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài " Nghiên cứu ảnh hưởng của sợi thép trong việc gia cường kháng uốn dầm bê tông cốt thép bằng bê tông chất lượng siêu cao", mã số 10-2025/KHXD-TĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. N. T. P. N. T. T. V. M. T. Phan Quang Minh, Kết cấu bê tông cốt thép (Phần cấu kiện cơ bản). Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2021.

[2] PGS.TS Nguyễn Trung Hiếu, Hư hỏng sửa chữa gia cường kết cấu công trình phần kết cấu bê tông cốt thép và kết cấu gạch đá. NXB Xây dựng, 2023.

[3] "James K. Wight, James G. MacGregor-Reinforced Concrete_ Mechanics and Design, 6th Edition-Prentice Hall (2011)".

[4] P. T. Tùng, P. Quang Đạo, Đ. Văn Tùng, and N. V. Quang, "Kết quả nghiên cứu và ứng dụng nghiên cứu sự hình thành và mở rộng khe nứt thẳng góc trong dầm bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng ngắn hạn".

[5] TCVN 5574-2018 - Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. 2018.

[6] ACI committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11). 2011.