

# Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm xác định mô men uốn giới hạn của cầu kiện dầm BTCT theo mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông

Nguyễn Ngọc Linh\*, Nguyễn Ngọc Tân, Nguyễn Văn Quang, Phan Quang Minh

Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng

Ngày nhận bài 16/8/2019; ngày chuyển phản biện 19/8/2019; ngày nhận phản biện 16/9/2019; ngày chấp nhận đăng 24/9/2019

## Tóm tắt:

Nghiên cứu này giới thiệu phương pháp tính toán mô men uốn giới hạn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) ở trạng thái giới hạn thứ nhất về độ bền theo sơ đồ 2 đoạn thẳng và sơ đồ 3 đoạn thẳng của mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông tuân theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018. Đồng thời, nghiên cứu cũng đã tiến hành thí nghiệm uốn bốn điểm trên 6 dầm BTCT kích thước  $b \times h \times L = 120 \times 200 \times 2.200$  mm, được chế tạo bằng bê tông nặng có cấp độ bền B25, và chia làm ba nhóm mẫu có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo khác nhau, lần lượt là 2φ8, 2φ10 và 2φ12. Kết quả tính toán lý thuyết được so sánh với kết quả thực nghiệm để lựa chọn phương pháp tính toán phù hợp, phân tích các giai đoạn làm việc của cầu kiện dầm chịu uốn, cũng như ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến ứng xử của dầm BTCT.

**Từ khóa:** biến dạng bê tông vùng nén, dầm bê tông cốt thép, mô men uốn giới hạn, sơ đồ 2 đoạn thẳng, sơ đồ 3 đoạn thẳng.

**Chỉ số phân loại:** 2.1

## Mở đầu

BTCT là loại vật liệu được sử dụng phổ biến trong thiết kế và thi công các kết cấu công trình xây dựng, đặc biệt là công trình nhà cao tầng, công trình dân dụng và công nghiệp... Cầu kiện BTCT được tính toán ở 2 trạng thái giới hạn: (i) Trạng thái giới hạn thứ nhất về độ bền, để đảm bảo khả năng chịu lực giới hạn của kết cấu; (ii) Trạng thái giới hạn thứ hai về biến dạng, nhằm đảm bảo cho kết cấu thỏa mãn các yêu cầu giới hạn về khe nứt và độ võng [1].

Ở Việt Nam, trước năm 2018, tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông và BTCT là TCVN 5574:2012 [2], với những nội dung được lấy từ tiêu chuẩn TCXDVN 356:2005 [3]. Trong tiêu chuẩn này, việc tính toán cầu kiện BTCT về độ bền dựa trên ứng suất giới hạn của vật liệu bê tông và cốt thép. Đối với cầu kiện chịu uốn thường được tính toán để đảm bảo điều kiện phá hoại dẻo, nghĩa là cốt thép bị chảy dẻo trước khi bê tông vùng nén bị phá vỡ. Việc tính toán dựa trên một số giả thuyết, đó là: ứng suất trong cốt thép chịu kéo đạt tới cường độ chịu kéo tính toán, ứng suất trong bê tông chịu nén đạt đến cường độ chịu nén tính toán, biểu đồ ứng suất - biến dạng của bê tông có dạng chữ nhật, vùng bê tông chịu kéo bị nứt không được tính đến khả năng chịu lực.

Kể từ cuối năm 2018, tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574:2018 [4] đã được ban hành để thay thế cho TCVN 5574:2012 [2], được xây dựng trên cơ sở tiêu chuẩn Nga SP 63.13330.2012 [5], nên không gây ra nhiều khó khăn trong việc áp dụng tiêu chuẩn mới vào công tác tính toán thiết kế. Tiêu chuẩn mới cập nhật nhiều điểm mới trong tính toán cầu kiện bê tông và BTCT so với tiêu chuẩn cũ, trong đó có mở rộng phạm vi áp dụng cho bê tông nặng từ B1,5 đến B100, sử dụng các tiêu chuẩn hiện hành đối với cốt thép, cũng như sử dụng một giá trị hệ số

độ tin cậy cho cốt thép thay thế cho nhiều giá trị như trước đây [6]. Một trong những điểm mới quan trọng trong TCVN 5574:2018 [4] là sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu để đánh giá tính chất đàn dẻo của bê tông và cốt thép khi nén và kéo. Đối với bê tông khi nén, đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông có thể được đơn giản hóa bằng sơ đồ 2 đoạn thẳng hoặc sơ đồ 3 đoạn thẳng. Tương tự, biểu đồ biến dạng của cốt thép cũng được ưu tiên sử dụng sơ đồ 2 đoạn thẳng đối với cốt thép có giới hạn chảy thực tế và sơ đồ 3 đoạn thẳng đối với cốt thép có giới hạn chảy quy ước.

Trong thời gian gần đây, các nghiên cứu liên quan đến việc áp dụng tiêu chuẩn thiết kế mới đã được thực hiện [6, 7] và thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học, cũng như các kỹ sư thiết kế trong nước. Đối với các cầu kiện BTCT chịu uốn, phương pháp tính toán độ bền theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 [4], ngoài việc dựa trên nội lực giới hạn mà bê tông và cốt thép có thể chịu được, các giá trị biến dạng cực hạn của bê tông vùng chịu nén, cốt thép vùng chịu kéo cũng được đưa vào để không chế điều kiện phá hoại dẻo.

Nghiên cứu này trình bày phương pháp lý thuyết để dự báo mô men uốn giới hạn của cầu kiện dầm BTCT theo sơ đồ 2 đoạn thẳng và sơ đồ 3 đoạn thẳng của bê tông khi nén. Đồng thời, trong phòng thí nghiệm, 6 dầm BTCT có các kích thước hình học là  $b \times h \times L = 120 \times 200 \times 2.200$  mm đã được chế tạo bằng bê tông có cấp độ bền chịu nén B25, với lớp cốt thép dọc chịu kéo thay đổi lần lượt là 2φ8, 2φ10 và 2φ12. Thí nghiệm uốn 4 điểm với tải trọng tĩnh đã được thực hiện trên từng dầm mẫu. Kết quả thu được cho phép so sánh mô men uốn giới hạn thực tế và giá trị tính toán lý thuyết theo mô hình biến dạng bê tông. Hơn nữa, các biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng, tải trọng - biến dạng của bê tông vùng

\*Tác giả liên hệ: Email: linhnm@nuce.edu.vn

# Theoretical and experimental study for determining ultimate flexural moment of reinforced concrete beams using non-linear model of concrete deformation

Ngoc Linh Nguyen\*, Ngoc Tan Nguyen,  
Van Quang Nguyen, Quang Minh Phan

Faculty of Building and Industrial Construction,  
National University of Civil Engineering

Received 16 August 2019; accepted 24 September 2019

## Abstract:

This study presents the calculation method of ultimate flexural moment of reinforced concrete (RC) beams using the bi-linear diagram and tri-linear diagram of non-linear model of concrete deformation according to the Vietnamese standard TCVN 5574:2018. In parallel, the four-point bending test was carried out on six RC beams with the dimension  $b \times h \times L = 120 \times 200 \times 2,200$  mm, made of concrete having the compressive strength of B25 class, divided into three groups with different ratios of longitudinal reinforcement at the bottom layer,  $2\phi 8$ ,  $2\phi 10$ , and  $2\phi 12$  steel bars, respectively. The theoretical results were compared with the experimental results obtained in order to select the appropriate calculation method, analyse the flexural behaviour of RC beams under static load as well as the effect of longitudinal reinforcement on their behaviour.

**Keywords:** bi-linear diagram, deformation of concrete in compression, RC beam, tri-linear diagram, ultimate flexural moment.

**Classification number:** 2.1

nén được xây dựng từ số liệu thực nghiệm cho phép phân tích các giai đoạn làm việc của cấu kiện dầm chịu uốn, định lượng ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến sự làm việc chịu uốn của cấu kiện dầm.

## Lý thuyết tính toán mô men uốn giới hạn của dầm BTCT chịu uốn

Theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018, việc tính toán cấu kiện BTCT theo độ bền của tiết diện thẳng góc được tiến hành theo 2 cơ sở: (i) Nội lực giới hạn mà bê tông và cốt thép có thể chịu được; (ii) Mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông và cốt thép. Theo nội lực giới hạn của vật liệu, thì một số giả thuyết sau được áp dụng:

(1) Cường độ chịu kéo của bê tông lấy bằng không.

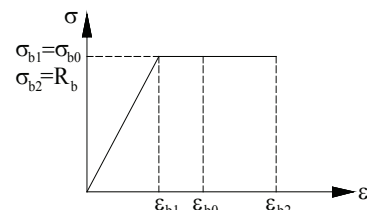
(2) Cường độ chịu nén của bê tông lấy bằng ứng suất có giá trị bằng cường độ chịu nén tính toán và được phân bố đều trên vùng chịu nén quy ước của bê tông.

(3) Ứng suất kéo và nén trong cốt thép lấy không lớn hơn cường độ chịu kéo tính toán và chịu nén tính toán.

Mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu dựa trên giả thuyết tiết diện phẳng, nghĩa là tiết diện vẫn được coi là phẳng sau khi bị biến dạng. Từ đó, biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông và cốt thép có thể được biểu diễn theo sơ đồ 2 đoạn thẳng hoặc sơ đồ 3 đoạn thẳng.

### Tính toán theo sơ đồ 2 đoạn thẳng

Hình 1 minh họa biểu đồ quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông khi nén theo sơ đồ 2 đoạn thẳng. Khi biến dạng của bê tông nhỏ hơn giới hạn biến dạng đàn hồi  $\epsilon_{b1}$ , thì ứng suất của bê tông  $\sigma_b$  xác định theo công thức (1), với  $E_{b,red}$  là mô đun biến dạng quy đổi của bê tông khi biến dạng tương đối ( $\epsilon_{b,red}$  lấy bằng 0,0015 đối với bê tông nặng, và 0,0022 đối với bê tông nhẹ). Khi biến dạng của bê tông lớn hơn biến dạng đàn hồi thì ứng suất của bê tông lấy bằng cường độ chịu nén  $R_b$  như trong công thức (2). Thông thường, biến dạng cực hạn của bê tông có giá trị  $\sigma_{b2} = 0,0035$ .



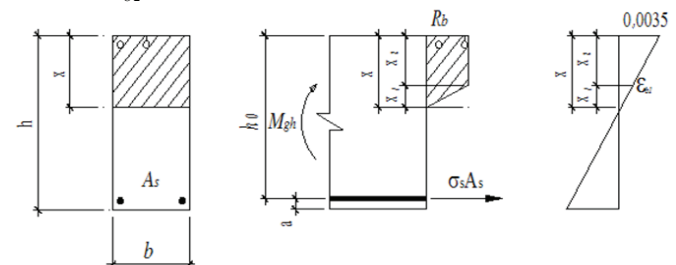
Hình 1. Biểu đồ ứng suất - biến dạng của bê tông khi nén theo sơ đồ 2 đoạn thẳng.

$$\text{Khi } 0 \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{b1} \text{ thì } \sigma_b = E_{b,red} \epsilon_b \quad (1)$$

$$\text{Khi } \epsilon_{b1} \leq \epsilon_b \leq \epsilon_{b2} \text{ thì } \sigma_b = R_b \quad (2)$$

Từ các giả thiết này, trên một mặt cắt ngang của dầm có tiết diện  $b \times h$ , sơ đồ tính toán mô men uốn giới hạn, ký hiệu  $M_{gh}$ , theo sơ đồ 2 đoạn thẳng được minh họa như trên hình 2, trong đó:  $a$  là chiều dày lớp bê tông bảo vệ,  $h_0$  là chiều cao làm việc của dầm,  $x$  là chiều cao bê tông vùng nén,  $x_1$  là chiều cao vùng nén ứng với biến dạng đàn hồi của bê tông,  $x_2$  là chiều cao vùng nén ứng với biến dạng cực hạn của bê tông. Từ phương trình hình học, mối quan hệ giữa  $x_1$ ,  $x_2$  và chiều cao vùng nén  $x$  của bê tông được biểu diễn theo công thức (3), xác định được  $x_1 = 3x/7$  và  $x_2 = 4x/7$ .

$$\frac{x_1}{x} = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_{b2}} \quad (3)$$



Hình 2. Tính toán mô men uốn giới hạn của dầm BTCT theo sơ đồ 2 đoạn thẳng.

Phương trình cân bằng giữa lực nén trong bê tông và lực kéo trong cốt thép được biểu diễn bởi công thức (4), trong đó  $R_b$  là cường độ chịu nén của bê tông,  $R_s$  là giới hạn chảy (cường độ chịu kéo) của cốt thép,  $A_s$  là diện tích tiết diện của cốt thép dọc chịu kéo. Thay các giá trị  $x_1$  và  $x_2$  vào công thức (4), xác định được chiều cao vùng bê tông chịu nén  $x$  như trong công thức (5).

$$R_b b x_2 + \frac{1}{2} R_b b x_1 = A_s R_s \quad (4)$$

$$x = \frac{R_s A_s}{0,7857 R_b b} \quad (5)$$

Khoảng cách theo phương đứng từ mép trên của tiết diện đến trọng tâm của vùng bê tông chịu nén được xác định có giá trị  $y = 0,3477x$ . Từ đó, cánh tay đòn từ trọng tâm cốt thép đến trọng tâm bê tông vùng nén có giá trị  $z = h_o - y$ . Như vậy, theo sơ đồ 2 đoạn thẳng đối với biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông khi nén, thì mô men uốn giới hạn của cầu kiện dầm được xác định theo công thức (6).

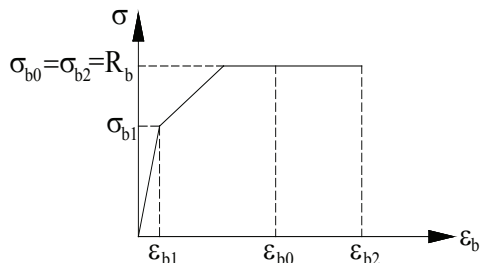
$$M_{gh} = A_s R_s (h_o - 0,3477x) \quad (6)$$

Để đảm bảo điều kiện cốt thép chảy dẻo, khi ứng suất đạt đến  $R_s$  thì biến dạng của cốt thép đạt tới giá trị  $\varepsilon_{s,el} = R_s / E_s$ . Khi tính toán tiết diện thẳng góc thì chiều cao vùng bê tông chịu nén  $x$  phải nhỏ hơn giá trị giới hạn  $x_R$  được xác định từ chiều cao tương đối  $\xi_R$  như trong công thức (7). Khi quy đổi từ biểu đồ thực tế ứng suất - biến dạng của bê tông khi nén về biểu đồ có dạng hình chữ nhật thì điều kiện hạn chế chiều cao vùng nén được nhân với hệ số 0,8 đối với bê tông có cấp độ bền từ B60 trở xuống, và hệ số 0,7 đối với bê tông có cấp độ bền từ B70 đến B100.

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_o} = \frac{I}{I + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} \quad (7)$$

### Tính toán theo sơ đồ 3 đoạn thẳng

Hình 3 minh họa biểu đồ quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông khi nén theo sơ đồ 3 đoạn thẳng, trong đó: ứng suất  $\sigma_{b1}$  lấy bằng  $0,6R_b$  và tương ứng với biến dạng  $\varepsilon_{b1} = \sigma_{b1} / E_b$ ,  $\sigma_{b0}$  là ứng suất lấy bằng cường độ chịu nén  $R_b$  và biến dạng tương đối giới hạn  $\varepsilon_{b0}$  lấy bằng 0,002. Biến dạng tương đối cực hạn của bê tông  $\varepsilon_{b2}$  lấy bằng 0,0035. Theo sơ đồ 3 đoạn thẳng, ứng suất của bê tông được xác định theo các công thức (8), (9) và (10).



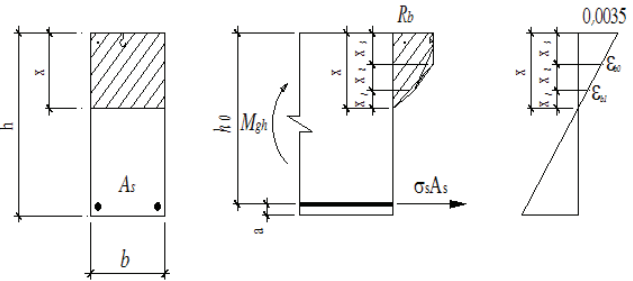
Hình 3. Biểu đồ ứng suất - biến dạng của bê tông khi nén theo sơ đồ 3 đoạn thẳng.

$$\text{Khi } 0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1} \text{ thì } \sigma_b = E_b \varepsilon_b \quad (8)$$

$$\text{Khi } \varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0} \text{ thì } \sigma_b = \left[ \left( 1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right] R_b \quad (9)$$

$$\text{Khi } \varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2} \text{ thì } \sigma_b = R_b \quad (10)$$

Từ các giả thiết trên, trên một mặt cắt tiết diện ngang của dầm, sơ đồ tính toán mô men uốn giới hạn của dầm theo sơ đồ 3 đoạn thẳng được minh họa như trên hình 4, trong đó  $x_1, x_2, x_3$  là các chiều cao thành phần của vùng bê tông chịu nén tương ứng với sơ đồ ba đoạn thẳng. Từ các phương trình hình học, mối quan hệ giữa  $x_1, x_2, x_3$  và chiều cao vùng bê tông chịu nén  $x$  được xác định như sau:  $x_1 = 171,43cx$ ;  $x_2 = 0,5741x - 171,43cx$ ;  $x_3 = 0,4286x$ , với  $c = R_b / E_b$ .



Hình 4. Tính toán mô men uốn giới hạn của dầm theo sơ đồ 3 đoạn thẳng.

Phương trình cân bằng giữa lực nén trong bê tông và lực kéo trong cốt thép được biểu diễn trong công thức (11). Thay thế các giá trị chiều cao thành phần của vùng bê tông chịu nén vào công thức (11), xác định được chiều cao vùng bê tông chịu nén  $x$  như công thức (12).

$$R_b b x_3 + \frac{1}{2} x_2 (0,6 R_b + R_b) + \frac{1}{2} R_b b x_1 = A_s R_s \quad (11)$$

$$x = \frac{R_s A_s}{0,8857 R_b b - 51,7 R_b c} \quad (12)$$

Khoảng cách theo phương đứng từ mép trên của tiết diện đến trọng tâm của vùng bê tông chịu nén được xác định theo công thức (13). Từ đó, cánh tay đòn từ trọng tâm cốt thép đến trọng tâm bê tông vùng nén là  $z = h_o - y$ . Và mô men uốn giới hạn của cầu kiện dầm chịu uốn được xác định như công thức (14).

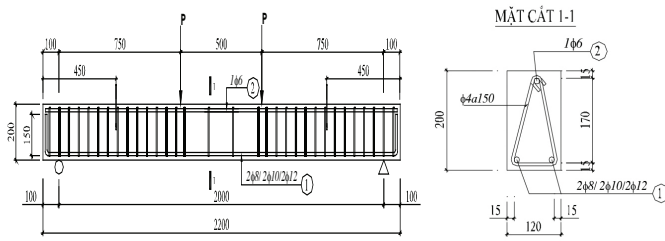
$$y = \frac{(0,3793 R_b - 86,3 R_b c)x + (51,43c - 2938,7c^2)}{0,886 R_b - 85 R_b c} \quad (13)$$

$$M_{gh} = A_s R_s (h_o - y) \quad (14)$$

### Nghiên cứu thực nghiệm xác định mô men uốn giới hạn của dầm BTCT

#### Mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, 6 dầm BTCT có các kích thước hình học  $b \times h \times L = 120 \times 200 \times 2.200$  mm đã được chế tạo trong phòng thí nghiệm. Cấu tạo cốt thép của các dầm thí nghiệm được thể hiện chi tiết như trong hình 5; 6 dầm được chia làm 3 nhóm mẫu, ký hiệu là D1, D2, D3, mỗi nhóm mẫu gồm 2 dầm, bằng cách thay đổi đường kính của cốt thép dọc ở lớp dưới lần lượt là 2φ8, 2φ10 và 2φ12 (tương ứng với hàm lượng cốt thép là 0,45%, 0,71% và 1,02%). Tại lớp trên của mỗi dầm sử dụng một thanh cốt thép đường kính danh nghĩa φ6. Các dầm thí nghiệm sử dụng cốt đai đường kính φ4, khoảng cách  $a_1 = 60$  mm ở hai đầu dầm, trên chiều dài  $l_1 = 750$  mm, khoảng cách  $a_2 = 150$  mm ở giữa dầm trên chiều dài  $l_2 = 500$  mm. Việc thay đổi khoảng cách bố trí cốt thép đai nhằm mục đích thiết kế các dầm thí nghiệm làm việc chịu uốn thuần túy.



Hình 5. Cấu tạo cốt thép của các mẫu dầm thí nghiệm.

Đồng thời, một tổ mẫu bê tông hình lập phương có kích thước 150x150x150 mm đã được chế tạo và bảo dưỡng trong cùng điều kiện với các dầm thí nghiệm để kiểm tra cường độ chịu nén thực tế ( $R_m$ , MPa) của bê tông ở 28 ngày tuổi theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 [8]. Một tổ mẫu hình trụ có các kích thước  $D \times H = 150 \times 300$  mm cũng được chế tạo và tiến hành thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi ( $E_b$ , MPa) của bê tông ở 28 ngày tuổi. Với mỗi một loại đường kính cốt thép, thí nghiệm kéo được tiến hành trên một tổ mẫu gồm 3 thanh theo tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 [9] để xác định giới hạn chảy của thép ( $f_s$ , MPa). Kết quả được tổng hợp trong bảng 1, đặc trưng bởi các chỉ tiêu giá trị trung bình ( $m$ ), độ lệch chuẩn ( $s$ ) và hệ số biến động ( $cv$ , %).

Bảng 1. Các tính chất cơ học của bê tông và cốt thép.

Chỉ tiêu	$m$ (MPa)	$s$ (MPa)	$cv$ (%)
$R_m$	29,6	1,6	5,5
$E_b$	30.600	3.000	9,8
$f_s$ (φ8)	398	20,7	5,2
$f_s$ (φ10)	337	7,3	2,2
$f_s$ (φ12)	410	3,1	0,7

Trong nghiên cứu này, cấp độ bền chịu nén của bê tông được xác định theo công thức (15) từ cường độ chịu nén trung bình trên mẫu tiêu chuẩn hình lập phương, và có giá trị  $B=26,9$  MPa. Do đó, bê tông chế tạo các dầm thí nghiệm đạt yêu cầu về cấp độ bền thiết kế (B25). Cường độ chịu nén tiêu chuẩn ( $R_{b,n}$ ) và cường độ chịu nén tính toán ( $R_b$ ) của bê tông được xác định lần lượt theo các công thức (16) và (17), áp dụng đối với bê tông có cấp độ bền từ B60 trở xuống và hệ số độ tin cậy của bê tông khi nén ( $\gamma_b$ ) lấy bằng 1,3 đối với bê tông nặng. Trong khi đó, cường độ chịu kéo tiêu chuẩn ( $R_{s,n}$ ) của cốt thép lấy bằng giới hạn chảy thực tế thu được bởi thí nghiệm kéo thép. Cường độ chịu kéo tính toán ( $R_s$ ) của cốt thép được xác định bằng công thức (18), với hệ số độ tin cậy của cốt thép ( $\gamma_s$ ) lấy bằng 1,15 đối với trạng thái giới hạn thứ nhất.

$$B = R_m (1 - 1,64cv) \tag{15}$$

$$R_{b,n} = B(0,77 - 0,001B) \tag{16}$$

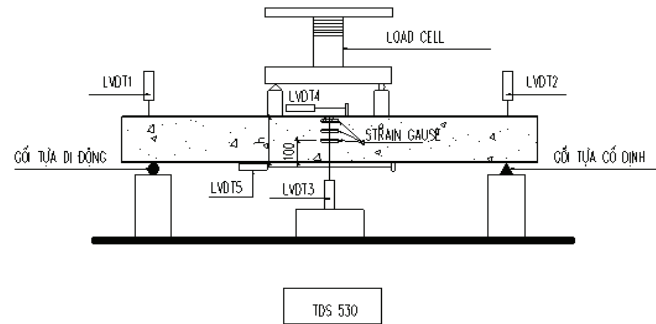
$$R_b = \frac{R_{b,n}}{\gamma_b} \tag{17}$$

$$R_s = \frac{R_{s,n}}{\gamma_s} \tag{18}$$

Sơ đồ thí nghiệm uốn dầm

Sơ đồ thí nghiệm uốn 4 điểm là dầm đơn giản chịu tác dụng của 2 lực tập trung ( $P$ ) như trên hình 6. Sử dụng kích thủy lực loại 20 tấn

kết hợp với dầm phân tải để gia tải thí nghiệm. Giá trị tải trọng tập trung đều kích được xác định thông qua một dụng cụ đo lực điện từ (load-cell). Độ võng của dầm thí nghiệm được xác định bằng 3 dụng cụ đo chuyển vị, ký hiệu LVDT1, LVDT2, LVDT3 bố trí tại vị trí 2 gối tựa và ở giữa dầm. Biến dạng của bê tông vùng nén được đo bằng một dụng cụ đo chuyển vị, ký hiệu LVDT4, bố trí ở mặt trên của dầm giữa 2 điểm đặt lực, với chiều dài chuẩn đo  $l=200$  mm. 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.



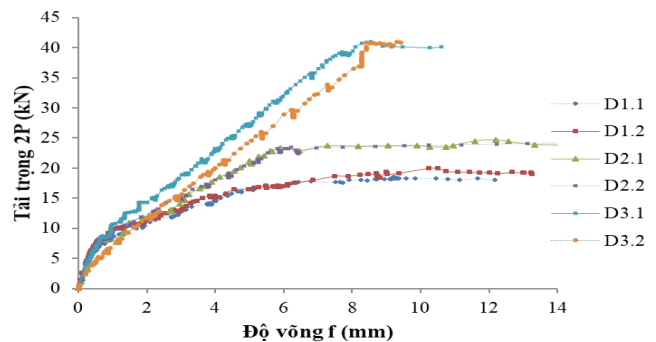
Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm uốn bốn điểm các mẫu dầm.

Tải trọng tác dụng được tăng với tốc độ đồng đều, không gây ra lực xung lên kết cấu thí nghiệm, cho đến khi dầm bị phá hoại thì dừng lại. Số liệu thu được trong quá trình thí nghiệm bao gồm: (i) Tải trọng tác dụng lên dầm, (ii) Biến dạng của bê tông vùng nén, (iii) Chuyển vị đứng của dầm. Những số liệu này cho phép xây dựng biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng, và biểu đồ quan hệ tải trọng - biến dạng bê tông vùng nén của các dầm thí nghiệm.

Phân tích kết quả thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm BTCT

Quan hệ tải trọng và độ võng

Hình 7 giới thiệu biểu đồ quan hệ tải trọng và độ võng cho tất cả dầm thí nghiệm, bao gồm: (1) Nhóm D1 gồm hai dầm D1.1 và D1.2; (2) Nhóm D2 gồm hai dầm D2.1 và D2.2; (3) Nhóm D3 gồm hai dầm D3.1 và D3.2. Trong mỗi nhóm dầm, biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng là tương đối trùng khớp giữa 2 dầm thí nghiệm. Điều này chứng tỏ rằng những kết quả thu được ít chịu ảnh hưởng của sự biến động các tính chất cơ lý của vật liệu bê tông và cốt thép.



Hình 7. Biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng của các dầm thí nghiệm.

Trong quá trình thực hiện thí nghiệm (hình 8), sự làm việc của dầm được quan sát để phát hiện các thời điểm mà tại đó ứng xử của dầm có sự thay đổi. Trong giai đoạn thứ nhất, bê tông và cốt thép làm việc đàn hồi, biểu đồ tải trọng - độ võng có dạng tuyến tính. Khi dầm xuất hiện vết nứt đầu tiên ở vùng bê tông chịu kéo giữa hai điểm đặt lực, làm giảm độ cứng của dầm và làm tăng nhanh độ võng. Thời điểm này tương ứng với điểm thay đổi độ dốc lần đầu tiên trên biểu đồ tải trọng - độ võng. Trong giai đoạn thứ hai, dầm thí nghiệm tiếp tục chịu được tải trọng lớn hơn, đồng thời độ võng tiếp tục tăng, số lượng vết nứt xuất hiện nhiều hơn ở vùng bê tông chịu kéo, và phát triển về phía vùng bê tông chịu nén. Giai đoạn này tương ứng với đoạn biểu đồ tải trọng - độ võng có dạng phi tuyến. Khi cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo thì thấy rằng tải trọng tác dụng lên dầm thí nghiệm không tăng, hoặc không có sự thay đổi đáng kể, trong khi đó độ võng có dầm tăng rất nhanh so với giai đoạn trước đó. Giai đoạn thứ ba này tương ứng đoạn biểu đồ tải trọng - độ võng có dạng nằm ngang. Thí nghiệm được kết thúc khi quan sát thấy bê tông vùng chịu nén bị vỡ (biến dạng tương đối của bê tông lớn hơn giá trị cực hạn  $\epsilon_{b2}=0,0035$ ).



Hình 8. Dầm thí nghiệm ở trạng thái bị phá hoại uốn.

Từ các biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng, các đặc trưng cơ bản của sự làm việc chịu uốn có thể được xác định đối với từng dầm thí nghiệm, bao gồm: (i) Tải trọng gây nứt ( $P_{cr}$ , kN); (ii) Độ võng tương ứng với tải trọng gây nứt ( $f_{cr}$ , mm); (iii) Tải trọng gây phá hoại ( $P_{ph}$ , kN), trong nghiên cứu này được xác định là tải trọng lớn nhất mà dầm chịu tải được đến trước khi bê tông vùng nén bị phá hoại; (iv) Độ võng tương ứng với tải trọng phá hoại ( $f_{ph}$ , mm). Các kết quả này được tổng hợp trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả của thí nghiệm uốn bốn điểm các mẫu dầm.

Dầm	$P_{cr}$ (kN)	$f_{cr}$ (mm)	$P_{ph}$ (kN)	$f_{ph}$ (mm)
D1.1	7,8	0,73	18,3	9,44
D1.2	7,9	0,81	18,6	8,90
D2.1	8,4	0,74	23,6	8,10
D2.2	8,4	0,79	24,1	8,04
D3.1	8,8	0,81	41,0	8,54
D3.2	8,9	0,72	40,9	8,42

### So sánh kết quả lý thuyết và kết quả thực nghiệm

Bảng 3 giới thiệu các kết quả tính toán mô men uốn giới hạn của 3 nhóm dầm thí nghiệm theo sơ đồ 2 đoạn thẳng, sơ đồ 3 đoạn thẳng của mô hình biến dạng bê tông và theo kết quả thí nghiệm thu được. Đối với mỗi nhóm dầm, mô men uốn giới hạn thực tế là giá trị trung bình của hai mẫu dầm. Các kết quả thực nghiệm đều có giá trị lớn hơn kết quả tính toán lý thuyết, để đảm bảo điều kiện an toàn trong công tác thiết kế cấu kiện chịu uốn ở trạng thái giới hạn về độ bền.

Bảng 3. Các kết quả lý thuyết và thực nghiệm xác định mô men uốn giới hạn.

Nhóm dầm	$M_{gh}$ (kNm)		
	Sơ đồ 2 đoạn thẳng	Sơ đồ 3 đoạn thẳng	Thực nghiệm
D1	6,14	6,13	6,92
D2	8,01	7,98	8,94
D3	13,37	13,29	15,36

Những kết quả tính toán lý thuyết chỉ ra rằng, không có sự chênh lệch đáng kể về giá trị mô men uốn giới hạn khi tính toán theo sơ đồ 2 đoạn thẳng và 3 đoạn thẳng. Hơn nữa, các giá trị này đều lớn hơn so với mô men uốn giới hạn tính toán theo sơ đồ hình chữ nhật của tiêu chuẩn TCVN 5574:2012. Điều này có thể được giải thích bởi chiều cao vùng bê tông chịu nén có giá trị dự báo lớn hơn khi áp dụng sơ đồ 2 đoạn thẳng. Vì vậy, trong thực tế tính toán thiết kế, mô hình biến dạng của bê tông theo sơ đồ 2 đoạn thẳng được khuyến dùng vì sự tính toán đơn giản hơn sơ đồ 3 đoạn thẳng và cho giá trị dự báo đối với mô men uốn giới hạn gần hơn với giá trị thực tế.

### Quan hệ tải trọng và biến dạng của bê tông vùng nén

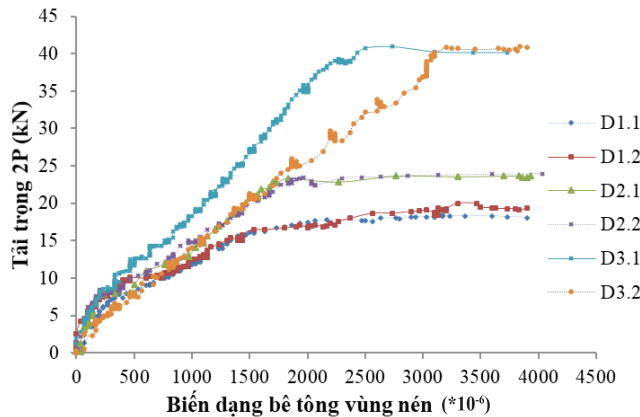
Trong mỗi thí nghiệm uốn dầm, biến dạng của bê tông vùng nén được đo đạc bởi một dụng cụ đo chuyển vị LVDT như minh họa trên hình 9. Biến dạng tương đối của bê tông ( $\epsilon_b$ ) được xác định bởi công thức (19), trong đó  $\Delta l$  (mm) là biến dạng tuyệt đối của bê tông,  $l=200$  mm là chiều dài chuẩn đo.

$$\epsilon_b = \frac{\Delta l}{l} \quad (19)$$



Hình 9. Đo biến dạng tương đối của bê tông vùng nén trên dầm thí nghiệm.

Hình 10 giới thiệu biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và biến dạng tương đối của bê tông vùng nén đối với từng dầm thí nghiệm. Từ những kết quả thu được nhận thấy rằng, khi hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo nhỏ (0,45% trên nhóm dầm D1; 0,71% trên nhóm dầm D2) thì thời điểm biến dạng tương đối của bê tông đạt đến giá trị giới hạn  $\epsilon_{b0}=0,002$  xảy ra gần như đồng thời với cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo. Khi tăng hàm lượng cốt thép (1,02% trên nhóm dầm D3) thì biến dạng tương đối của bê tông đạt đến giá trị giới hạn sớm hơn, trước khi tải trọng đến giá trị làm cho cốt thép bị chảy dẻo.



Hình 10. Quan hệ tải trọng - biến dạng tương đối của bê tông vùng nén.

Trên tất cả các dầm thí nghiệm, biến dạng tương đối của bê tông vùng nén đều vượt quá giá trị cực hạn  $\epsilon_{b2}=0,0035$ . Như vậy, giai đoạn từ khi cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo đến khi bê tông vùng nén bị phá hoại diễn ra dài hơn trên các nhóm dầm có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo nhỏ hơn, và diễn ra nhanh hơn trên nhóm dầm có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo lớn hơn.

**Kết luận**

Nghiên cứu đã trình bày phương pháp tính toán mô men uốn giới hạn của cấu kiện dầm BTCT chịu uốn ở trạng thái giới hạn thứ nhất về độ bền, sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu bê tông biểu diễn theo sơ đồ 2 đoạn thẳng và sơ đồ 3 đoạn thẳng nêu ra trong tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574:2018. Đồng thời, 6 dầm BTCT đã được chế tạo trong phòng thí nghiệm bằng bê tông cấp độ bền B25, và lớp cốt thép dọc chịu kéo thay đổi lần lượt là 2φ8, 2φ10 và 2φ12. Thí nghiệm uốn bốn điểm đã được tiến hành trên các dầm thí nghiệm để xác định mối quan hệ tải trọng - độ võng của dầm và quan hệ tải trọng

- biến dạng tương đối của bê tông vùng nén. Các kết quả tính toán lý thuyết đã được so sánh với các kết quả thực nghiệm xác định mô men uốn giới hạn của dầm, và cho phép đưa ra một số kết luận chính của nghiên cứu như sau:

(i) Mô men uốn giới hạn của cấu kiện dầm chịu uốn không có sự chênh lệch đáng kể khi tính toán với sơ đồ 2 đoạn thẳng và sơ đồ 3 đoạn thẳng của quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông. Do đó, sơ đồ 2 đoạn thẳng được ưu tiên sử dụng để đơn giản hóa việc tính toán và đưa ra giá trị dự báo mô men uốn giới hạn gần hơn với giá trị thực tế.

(ii) Đối với cấu kiện dầm chịu uốn thuần túy, hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo ảnh hưởng đến thời điểm bê tông vùng nén đạt đến giá trị biến dạng giới hạn. Khi hàm lượng cốt thép nhỏ thì bê tông vùng nén đạt đến biến dạng giới hạn và cốt thép bị chảy dẻo gần như xuất hiện đồng thời. Khi hàm lượng cốt thép lớn hơn thì bê tông vùng nén đạt đến biến dạng giới hạn sớm hơn thời điểm cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo.

(iii) Giai đoạn từ khi cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo đến khi bê tông vùng nén bị phá vỡ diễn ra dài hơn trên các dầm có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo nhỏ hơn, và diễn ra nhanh hơn trên các dầm có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo lớn hơn.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] Phan Quang Minh, Ngô Thế Phong, Nguyễn Đình Công (2011), *Kết cấu BTCT - Phần cấu kiện cơ bản*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

[2] Bộ Khoa học và Công nghệ (2012), *TCVN 5574:2012: Kết cấu bê tông và BTCT - Tiêu chuẩn thiết kế*.

[3] Bộ Xây dựng (2005), *TCXDVN 356:2005: Kết cấu bê tông và BTCT - Tiêu chuẩn thiết kế*.

[4] Bộ Khoa học và Công nghệ (2018), *TCVN 5574:2018: Thiết kế kết cấu bê tông và BTCT*.

[5] Russian Federation (2012), *SP 63.13330.2012: Kết cấu bê tông và BTCT - Các quy định chung*.

[6] Lê Minh Long (2017), “Một số điểm mới trong dự thảo TCVN 5574:2017”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 2, tr.55-61.

[7] Nguyễn Ngọc Bá (2019), “Giới hạn hàm lượng cốt thép trong kết cấu BTCT chịu uốn theo TCVN 5574:2018”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 1, tr.22-28.

[8] Bộ Khoa học và Công nghệ (1993), *TCVN 3118:1993: Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén*.

[9] Bộ Khoa học và Công nghệ (2014), *TCVN 197-1:2014: Vật liệu kim loại - Thử kéo - Phần 1: Phương pháp thử ở nhiệt độ phòng*.