

Phân tích ứng xử của dầm bê tông cốt thép tiết diện chữ nhật chịu uốn phẳng theo mô hình biến dạng phi tuyến vật liệu

Analysis of the flexural behavior of reinforced concrete beam with rectangular cross-section according to nonlinear deformation model of material

> THS CAO VĂN TUẤN, THS TRƯƠNG MỸ PHẨM

Khoa Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây; Email: caovantuan@mtu.edu.vn, phamxdmt@mtu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày cách xác định mô men uốn trong dầm bê tông cốt thép (BTCT) tiết diện chữ nhật sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến. Trước hết là cơ sở thiết lập công thức xác định mô men uốn của dầm BTCT tiết diện chữ nhật đặt cốt đơn theo mô hình biến dạng phi tuyến được trình bày. Tiếp theo, nghiên cứu khảo sát sự ứng xử của dầm BTCT thông qua biểu đồ mô men uốn và biến dạng của vật liệu. Kết quả tính toán mô men uốn giới hạn của dầm BTCT theo mô hình biến dạng phi tuyến được so sánh với phương pháp tính theo nội lực giới hạn và có giá trị nhỏ hơn không đáng kể. Ngoài ra, nghiên cứu đã xác định được hàm lượng cốt thép tối đa được bố trí trong dầm nhằm tránh trường hợp phá hủy giòn xảy ra.

Từ khóa: Dầm bê tông cốt thép; mô hình biến dạng phi tuyến; mô men uốn; hàm lượng cốt thép tối đa.

ABSTRACT

This paper presents the calculation of the bending moment of the reinforced concrete beam with a rectangle section using the nonlinear deformation model. First, the fundamentals of building the formulas for determining the bending moment of reinforced concrete beams of rectangular cross-section with singly reinforced according to the nonlinear deformation model are presented. Second, the investigation of the behavior of reinforced concrete beams through the bending moment and deformation relationship. The results of the bending moment of reinforced concrete beams according to the nonlinear deformation model are compared with that calculated according to the ultimate internal force, and these different values are insignificantly small. In addition, this study determines the maximum reinforcement percentage arranged in the beam to avoid brittle failure.

Keywords: Reinforced concrete beam; nonlinear deformation model; bending moment; maximum reinforcement percentage.

1. MỞ ĐẦU

Dầm là một cấu kiện phổ biến trong công trình, với nhiều hình thức chịu lực (như uốn phẳng, xoắn, uốn xiên). Trong đó dầm chịu uốn phẳng (gọi đơn giản là dầm chịu uốn) được sử dụng thông dụng nhất khi tính toán thiết kế và thi công trong xây dựng.

Theo tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT hiện hành - TCVN 5574:2018 [1] khi tính toán thiết kế cấu kiện BTCT tiết diện chữ nhật theo độ bền chịu tác dụng của mô men uốn thì tính theo nội lực giới hạn hoặc theo mô hình biến dạng phi tuyến.

Phương pháp tính theo nội lực giới hạn được xem là phương pháp đơn giản, được ứng dụng trong thực hành thiết kế. Tuy nhiên phương pháp này lấy giá trị chiều cao vùng bê tông chịu nén quy đổi bằng 0.8 lần chiều cao vùng nén của bê tông [2],[3],[4]; giả thiết ứng suất của bê tông đạt đến cường độ chịu nén R_b và ứng suất kéo của cốt thép đạt đến cường độ chịu kéo R_s .

Phương pháp tính theo mô hình biến dạng phi tuyến là sử dụng biểu đồ quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông và cốt thép vào trong tính toán. Đây là một điểm mới trong TCVN 5574:2018 so với các tiêu chuẩn thiết kế trước.

Nội dung mới trên đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu, các công ty hoạt động trong lĩnh vực xây dựng. Đã có nhiều công trình khoa học đã thực hiện để làm rõ hơn hay đã xây dựng được các công thức áp dụng cho các bài toán cụ thể. Năm 2019 có nghiên cứu của Nguyễn Ngọc Bá [2] tìm hiểu về hàm lượng cốt thép trong kết cấu BTCT chịu uốn và áp dụng biểu đồ biến dạng của bê tông (biểu đồ dạng hai đoạn thẳng và ba đoạn thẳng). Năm 2020, Nguyễn Ngọc Linh cùng các cộng sự [5] đã xây dựng lý thuyết xác định mô men uốn giới hạn của cấu kiện dầm BTCT theo mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông (dạng hai đoạn thẳng và ba đoạn thẳng) và kết hợp nghiên cứu thực nghiệm 6 dầm BTCT. Nghiên cứu của Trần Ngọc Long và các đồng nghiệp [6] về dầm BTCT chịu uốn xiên sử dụng mô hình phi tuyến (biểu đồ biến dạng của bê tông và cốt thép dạng hai đoạn thẳng). Cùng năm 2020, có nghiên cứu của Nguyễn Hữu Anh Tuấn [7] với nội dung là khảo sát ứng xử uốn của dầm BTCT thông qua biểu đồ mô men với độ cong khi áp dụng mô hình phi tuyến của bê tông và cốt thép dạng hai đoạn thẳng. Trong năm 2020, có nghiên cứu về khả năng chịu lực của cột BTCT tiết diện chữ nhật áp dụng mô hình biến dạng phi tuyến dạng hai đoạn thẳng và ba đoạn thẳng của bê tông được thực hiện bởi Nguyễn Việt Phương và các đồng nghiệp [8]. Tương tự, nhóm nghiên cứu của Thạch Sôm Sô Hoách [9] cũng

xây dựng công thức xác định khả năng chịu lực của cột BTCT có tiết diện chữ nhật sử dụng mô hình phi tuyến (sơ đồ biến dạng của bê tông dạng ba đoạn thẳng, của cốt thép dạng hai đoạn thẳng) và ứng dụng lập trình VBA trong Excel để thực hiện tính toán. Đến năm 2022 có một nghiên cứu của Nguyễn Thế Dương và các cộng sự [10] về khả năng kháng uốn của dầm BTCT khi có xét đến tính phi tuyến của cốt thép.

Bên cạnh các nghiên cứu trên đã được công bố thì một vài nghiên cứu về sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến trong tính toán cấu kiện BTCT đã xuất bản thành sách và được dùng tài liệu giảng dạy, tham khảo ở một vài cơ sở đào tạo chuyên ngành Xây dựng. Như năm 2020 có sách của nhóm tác giả Đoàn Thị Quỳnh Mai [11] đã trình bày một vài ví dụ tính thép dọc của cấu kiện chịu uốn sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu, nhưng cách trình bày khá ngắn gọn dẫn đến khó hiểu. Năm 2021 Phan Quang Minh và các cộng sự [4] viết quyển sách về Kết cấu BTCT - phần cấu kiện cơ bản theo TCVN 5574:2018 cũng có giới thiệu sơ lược về phương pháp tính cấu kiện BTCT theo mô hình phi tuyến nhưng chỉ sơ lược.

Có nhiều nghiên cứu đã được thực hiện, tuy nhiên vẫn chưa có nghiên cứu về ứng xử của dầm BTCT chịu uốn thông qua biểu đồ quan hệ giữa mô men uốn và biến dạng, cũng như áp dụng mô hình phi tuyến dạng ba đoạn thẳng của bê tông và hai đoạn thẳng của cốt thép. Nội dung bài viết sẽ trình bày cách xác định mô men uốn trong dầm BTCT tiết diện chữ nhật đặt cốt đơn theo mô hình phi tuyến vật liệu gồm biểu đồ biến dạng của bê tông dạng hai đoạn thẳng, dạng ba đoạn thẳng và biểu đồ biến dạng của cốt thép dạng hai đoạn thẳng.

2. CƠ SỞ PHÂN TÍCH KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA DẦM BTCT TIẾT DIỆN CHỮ NHẬT

Theo [1] khi tính toán cấu kiện BTCT có tiết diện chữ nhật chịu mô men uốn được tiến hành theo hai phương pháp: phương pháp đơn giản là theo nội lực giới hạn và phương pháp sử dụng mô hình biến dạng phi tuyến.

Trong thiết kế kết cấu BTCT loại vật liệu thường được sử dụng là bê tông nặng (đối với bê tông có cấp độ bền chịu nén từ B60 trở xuống) và cốt thép có giới hạn chảy thực tế, do đó các công thức được thiết lập trong nội dung bài viết tương ứng với loại vật liệu này. Xét trường hợp chỉ đặt cốt thép trong vùng ứng suất kéo (bài toán cốt đơn) khi ấy ứng suất kéo trong bê tông không xét đến.

2.1 Xác định khả năng chịu uốn của dầm BTCT tiết diện chữ nhật theo nội lực giới hạn

Công thức (1) xác định mô men uốn của dầm được [1] xây dựng khi giả thiết rằng: (i) ứng suất nén trong bê tông đạt đến cường độ chịu nén R_b và phân bố đều trên chiều cao vùng nén quy ước của bê tông; (ii) ứng suất kéo trong cốt thép đạt đến cường độ chịu kéo R_s .

$$M_u = R_b b x (h_0 - 0,5x) \tag{1}$$

với chiều cao vùng nén quy ước của bê tông được tính theo (2)

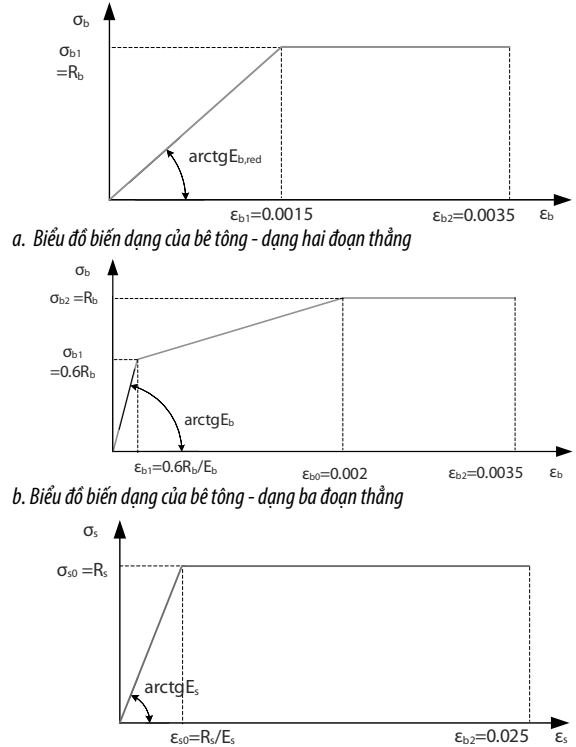
$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b}, \text{ khi } \frac{x}{h_0} \leq \xi_R \tag{2}$$

trong đó b - bề rộng tiết diện; h_0 - chiều cao làm việc của tiết diện; A_s diện tích cốt thép.

2.2 Xác định khả năng chịu uốn của dầm BTCT tiết diện chữ nhật theo mô hình biến dạng phi tuyến

Trong [1] đã đề cập đến khi cấu kiện BTCT tính toán theo mô hình biến dạng phi tuyến thì các biểu đồ biến dạng của bê tông được sử dụng là biểu đồ hai đoạn thẳng (BĐ2ĐT) hoặc ba đoạn

thẳng (BĐ3ĐT) và đối với cốt thép có giới hạn chảy quy ước nên sử dụng biểu đồ hai đoạn thẳng (ĐB2ĐT) xem Hình 1.



a. Biểu đồ biến dạng của bê tông - dạng hai đoạn thẳng

b. Biểu đồ biến dạng của bê tông - dạng ba đoạn thẳng

c. Biểu đồ biến dạng của cốt thép - dạng hai đoạn thẳng

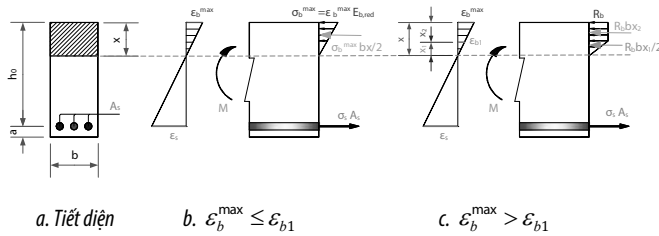
Hình 1. Biểu đồ biến dạng của bê tông nặng ($\leq B60$) khi nén và cốt thép có giới hạn chảy thực tế khi kéo

Khi áp dụng mô hình biến dạng phi tuyến trong thiết lập công thức tính toán mô men uốn của dầm được thực hiện dựa trên sự làm việc của tiết diện mặt cắt ngang của dầm cần đạt đến phá hoại. Sự phá hoại có thể xảy ra ở vùng chịu nén của bê tông (khi biến dạng vùng nén của bê tông vượt quá biến dạng giới hạn ϵ_{b2}) hoặc phá hoại xảy ra ở cốt thép (khi biến dạng của cốt thép vượt qua biến dạng giới hạn ϵ_{s2}). Với các giả thiết: tiết diện vẫn phẳng - nghĩa là sự phân bố biến dạng tương đối của bê tông và cốt thép theo chiều cao tiết diện cấu kiện được lấy theo quy luật tuyến tính.

Trong nội dung bài viết sẽ xây dựng công thức xác định mô men uốn theo mô hình phi tuyến, với hai trường hợp. Trường hợp thứ nhất là áp dụng biểu đồ biến dạng: biểu đồ hai đoạn thẳng (BĐ2ĐT) của bê tông và cốt thép - đặt tên PT1; trường hợp áp dụng thứ hai là áp dụng biểu đồ biến dạng: biểu đồ ba đoạn thẳng (BĐ3ĐT) của bê tông và biểu đồ hai đoạn thẳng (BĐ2ĐT) của cốt thép - đặt tên PT2.

a. Mô men uốn của dầm tính theo BĐ2ĐT của bê tông và cốt thép - PT 1

Xét trường hợp $\epsilon_b^{max} \leq \epsilon_{b1} = 0.0015$ (Hình 2b). Thực hiện cân bằng lực theo phương ngang nhận được phương trình (3). Và khả năng chịu mô men uốn của tiết diện dầm được tính theo (4). Trong công thức tính M phụ thuộc vào chiều cao vùng nén x , biết rằng x phụ thuộc vào giá trị biến dạng tương đối của cốt thép ϵ_s . Tương ứng với từng giá trị biến thiên ϵ_s thì có thể xảy ra hai trường hợp. Một là $\epsilon_s \leq \epsilon_{s0} = R_s/E_s$ thì chiều cao vùng bê tông chịu nén x được xác định theo (5). Hai là $\epsilon_s > \epsilon_{s0}$ (lấy $\sigma_s = R_s$) thì chiều cao vùng bê tông chịu nén x được xác định theo (6).



a. Tiết diện b. $\epsilon_b^{\max} \leq \epsilon_{b1}$ c. $\epsilon_b^{\max} > \epsilon_{b1}$

Hình 2. Sơ đồ ứng suất, biến dạng trong tiết diện dầm BTCT ứng với BĐ2ĐT của bê tông và cốt thép

$$\sigma_s A_s = \frac{1}{2} \sigma_b^{\max} b x \tag{3}$$

$$M = \frac{1}{2} \epsilon_b^{\max} \frac{R_b}{0.0015} b x \left(h_0 - \frac{1}{3} x \right) \tag{4}$$

$$\frac{(R_b/0.0015)b}{2E_s A_s} x^2 + x - h_0 = 0 \tag{5}$$

$$x = \frac{2R_s A_s}{\epsilon_b^{\max} (R_b/0.0015)b} \tag{6}$$

Xét trường hợp biến dạng tương đối lớn nhất của bê tông ở biên chịu nén ϵ_b^{\max} lớn hơn biến dạng tương đối đàn hồi ϵ_{b1} (như Hình 2c). Thông qua phương pháp cân bằng lực, thu được (7). Và giá trị mô men uốn M của dầm được xác định theo (8). Xét ảnh hưởng của giá trị biến dạng tương đối của cốt thép: khi $\epsilon_s \leq \epsilon_{s0} = R_s/E_s$ thì x được xác định theo (9); khi $\epsilon_s > \epsilon_{s0}$ ($\sigma_s = R_s$) thì x được xác định theo (10). Thông qua biểu đồ biến dạng thì mối quan hệ của x_1 và x_2 với x được thể hiện trong (11)

$$\sigma_s A_s = \frac{1}{2} R_b b x_1 + R_b b x_2 \tag{7}$$

$$M = R_b b x_2 \left(h_0 - \frac{x_2}{2} \right) + \frac{1}{2} R_b b x_1 \left(h_0 - x_2 - \frac{x_1}{3} \right) \tag{8}$$

$$\epsilon_b^{\max} (h_0 - x) E_s A_s = x^2 \left(1 - \frac{0.0015}{2\epsilon_b^{\max}} \right) R_b b \tag{9}$$

$$R_b b x \left(1 - \frac{0.0015}{2\epsilon_b^{\max}} \right) = R_s A_s \tag{10}$$

$$x_1 = \frac{0.0015}{\epsilon_b^{\max}} x; x_2 = \left(1 - \frac{0.0015}{\epsilon_b^{\max}} \right) x \tag{11}$$

b. mô men uốn của dầm tính theo BĐ3ĐT của bê tông và BĐ2ĐT cốt thép - PT2

Xét các trường hợp có thể xảy ra với biểu đồ biến dạng của bê tông dạng 3 đoạn thẳng và biểu đồ biến dạng của cốt thép dạng 2 đoạn thẳng thì có 3 trường hợp nhỏ như sau:

Trường hợp $\epsilon_b^{\max} \leq \epsilon_{b1} = 0.6 R_b/E_b$ (Hình 3b) thì mô men M được xác định theo (12) và giá trị chiều cao vùng nén x được tính theo (13) khi $\epsilon_s \leq \epsilon_{s0}$; tính theo (14) khi $\epsilon_s > \epsilon_{s0}$.

$$M = \frac{1}{2} \epsilon_b^{\max} E_b b x \left(h_0 - \frac{1}{3} x \right) \tag{12}$$

$$\frac{E_b b}{2E_s A_s} x^2 + x - h_0 = 0 \tag{13}$$

$$x = \frac{2R_s A_s}{\epsilon_b^{\max} E_b b} \tag{14}$$

Hình 3c thuộc trường hợp $\epsilon_{b1} < \epsilon_b^{\max} < \epsilon_{b0} = 0.002$, lúc này tính M theo (15) và giá trị x theo (16) khi $\epsilon_s \leq \epsilon_{s0}$, theo (17) khi $\epsilon_s > \epsilon_{s0}$. Với mối quan hệ giữa x_1, x_2 và x được thể hiện ở công thức (18).

$$M = \left[0.3R_b x_1 \left(h_0 - x_2 - \frac{1}{3} x_1 \right) + 0.6R_b x_2 \left(h_0 - \frac{1}{2} x_2 \right) + \frac{(\sigma_b^{\max} - 0.6R_b)x_2}{2} \left(h_0 - \frac{1}{3} x_2 \right) \right] b \tag{15}$$

$$\frac{0.3E_b \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} + \left(\frac{1}{2} \sigma_b^{\max} + 0.3R_b \right) \left(1 - \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} \right)}{E_s A_s \epsilon_b^{\max}} b x^2 + x - h_0 = 0 \tag{16}$$

$$x = \frac{R_s A_s}{E_b b} \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{\sigma_b^{\max}}{R_b} + 0.3 - \frac{1}{2} \frac{\sigma_b^{\max}}{R_b} \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}}} \tag{17}$$

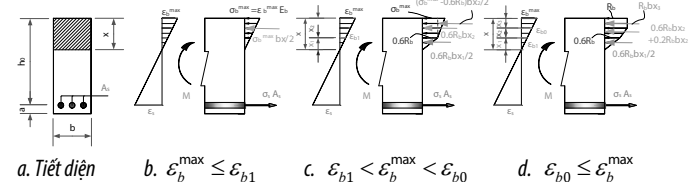
$$x_1 = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} x; x_2 = \left(1 - \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} \right) x \tag{18}$$

Khi $\epsilon_{b0} \leq \epsilon_b^{\max} \leq \epsilon_{b2} = 0.0035$, giá trị mô men uốn M được tính theo (19) với giá trị x_1, x_2 và x_3 xác định theo (20) phụ thuộc vào chiều cao vùng nén x. Giá trị x được tính theo (21) khi $\epsilon_s \leq \epsilon_{s0}$ và x tính theo (22) khi $\epsilon_s > \epsilon_{s0}$.

$$M = \left[0.3R_b x_1 \left(h_0 - x_3 - x_2 - \frac{1}{3} x_1 \right) + R_b x_3 \left(h_0 - \frac{1}{2} x_3 \right) + R_b x_2 \left(0.8h_0 - 0.8x_3 - \frac{1.1}{3} x_2 \right) \right] b \tag{19}$$

$$x_1 = \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} x; x_2 = \frac{\epsilon_{b0} - \epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} x; \tag{20}$$

$$x_3 = \left(1 - \frac{\epsilon_{b0}}{\epsilon_b^{\max}} \right) x$$



a. Tiết diện b. $\epsilon_b^{\max} \leq \epsilon_{b1}$ c. $\epsilon_{b1} < \epsilon_b^{\max} < \epsilon_{b0}$ d. $\epsilon_{b0} \leq \epsilon_b^{\max}$

Hình 3. Sơ đồ ứng suất, biến dạng trong tiết diện dầm BTCT ứng với BĐ3ĐT của bê tông và BĐ2ĐT của cốt thép

$$\frac{R_b b}{E_s A_s \epsilon_b^{\max}} \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} - 0.2 \frac{\epsilon_{b0}}{\epsilon_b^{\max}} \right) b x^2 + x - h_0 = 0 \tag{20}$$

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b} \frac{1}{1 - 0.5 \frac{\epsilon_{b1}}{\epsilon_b^{\max}} - 0.2 \frac{\epsilon_{b0}}{\epsilon_b^{\max}}} \tag{21}$$

Thực hiện khảo sát giá trị mô men uốn của dầm BTCT theo sự biến thiên của biến dạng tương đối của bê tông ứng với biểu đồ BĐ2ĐT, BĐ3ĐT của bê tông và biểu đồ BĐ2ĐT của cốt thép. Các trường hợp thực hiện được đề cập trong mục tiếp theo.

3. XÂY DỰNG CÁC TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

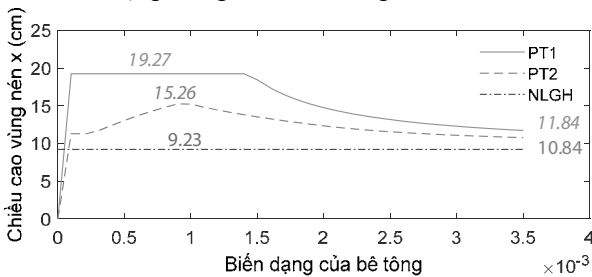
3.1. Xác định mô men uốn của dầm BTCT tiết diện 20x40cm và bê tông B15, cốt thép CB300-V

Xét dầm bố trí 3φ16 với $A_s = 6.03cm^2$ và $R_b = 0.85kN/cm^2$, $E_b = 24000kN/cm^2$, $R_s = 26kN/cm^2$, $E_s = 20000kN/cm^2$. Áp dụng các trường hợp có thể xảy ra ở mức 2 (xác định giá trị mô men uốn theo nội lực giới hạn - NLGH, theo mô hình phi tuyến: BÐ2ÐT của bê tông và cốt thép - PT1; BÐ3ÐT của bê tông và BÐ2ÐT của cốt thép - PT2) khi cho giá trị biến dạng tương đối ε_b^{max} biến thiên từ 0 đến ε_{b2} sẽ nhận được giá trị mô men uốn của dầm như trong Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị mô men uốn của tiết diện theo các trường hợp biểu đồ biến dạng của bê tông và cốt thép

TH	ε_b^{max}	x (cm)	σ_b^{max} (kN/cm ²)	M (kN.m)
NLGH		9.23	0.85	50.32
PT1	0	0	0	0
	0.0001	19.27	0.06	3.31
	0.0005	19.27	0.28	16.53
	0.001	19.27	0.57	33.06
	0.0015	18.45	0.85	47.91
	0.002	14.76	0.85	49.45
	0.0025	13.18	0.85	49.88
	0.003	12.3	0.85	50.05
0.0035	11.74	0.85	50.14	
PT2	0	0	0	0
	0.0001	11.3	0.24	8.93
	0.000213	11.3	0.51	18.98
	0.0005	13.07	0.55	34.4
	0.0009	15.26	0.64	46.09
	0.001	15.23	0.66	47.34
	0.0015	13.54	0.74	48.36
	0.002	12.35	0.83	49.19
	0.0025	11.57	0.85	49.69
	0.003	11.1	0.85	49.92
0.0035	10.79	0.85	50.04	

Trong bảng 1 đã hiện hiện rõ giá trị của chiều cao vùng nén x, ứng suất nén của bê tông và mô men uốn của dầm theo sự biến thiên của biến dạng tương đối của bê tông.

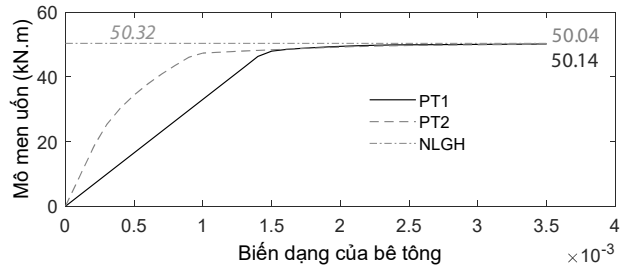


Hình 4. Giá trị chiều cao vùng nén x theo các trường hợp tính

Theo Hình 4, thể hiện rõ ràng hơn sự biến thiên của chiều cao vùng bê tông chịu nén x (giá trị trong biểu đồ được lấy từ Bảng 1). Đối với phương pháp tính theo nội lực giới hạn - NLGH thì lấy $x=9.23cm$ (tính theo công thức (2)). Phương pháp tính PT1 (BÐ2ÐT của bê tông và cốt thép) thì giá trị x cao nhất ($x=19.27cm$) và không đổi giá trị khi bê tông vẫn nằm trong giai đoạn đàn hồi ($\varepsilon_b^{max} < \varepsilon_{b1} = 0,0015$) và sau đó giảm dần đến khi biến dạng bê tông đạt cực hạn ($\varepsilon_b^{max} = \varepsilon_{b2} = 0,0035$) khi đó $x=11.84cm$. Đối với phương pháp tính PT2 (BÐ3ÐT của bê tông và BÐ2ÐT của cốt thép) thì chiều cao vùng nén x lớn nhất chỉ đạt 15.26cm và sau đó bắt đầu giảm dần đến khi biến dạng bê tông đạt cực hạn (ứng với $x=10.84cm$). Từ biểu đồ Hình 4

nhận thấy giá trị lớn nhất không ứng với vị trí gần biến dạng tương đối giới hạn của bê tông ($\varepsilon_{b0} = 0,002$) nhưng do biến dạng tương đối của cốt thép $\varepsilon_s = \frac{0.0009}{15.26} \times 21.44 = 0.00126$ đã gần đạt đến biến dạng chảy $\varepsilon_{s0} = 0,0013$.

Giá trị mô men uốn trong dầm được thể hiện rõ ràng trong Bảng 1 và được biểu diễn trực quan thông qua Hình 5. Kết quả tính theo NLGH cho giá trị mô men uốn giới hạn lớn nhất ($M_u = 50.32kNm$) và tính theo phương pháp PT1 cho giá trị mô men uốn lớn hơn so với phương pháp PT2, cụ thể giá trị mô men uốn giới hạn xác định theo phương pháp PT1 và PT2 lần lượt là 50.14kNm, 50.04kNm ứng với biến dạng tương đối của bê tông đạt giá trị cực hạn. Đây là trường hợp sự phá hủy của dầm (bố trí 3φ16 với hàm lượng cốt thép $\mu = 0.82\%$) xảy ra tại vùng bê tông chịu nén.



Hình 5. Biểu đồ quan hệ giữa biến dạng của bê tông và mô men uốn theo 3 phương pháp tính.

3.2. Xét các trường hợp phân tích

Xét ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến sự phá hủy của tiết diện dầm theo các phương pháp tính nên các trường hợp thay đổi hàm lượng thép được xét đến như trong Bảng 2.

Bảng 2. Các trường hợp tính

Tiết diện dầm	Thép	Hàm lượng cốt thép - μ
20x40 (cm)	2φ12	0.31%
	3φ12	0.46%
	3φ14	0.63%
	3φ16	0.82%
	3φ18	1.04%
	3φ20	1.29%
	3φ22	1.57%
	3φ25	2.03%

Mục 3.1 đã trình bày cách tính toán và kết quả cụ thể cho trường hợp 3φ16 ứng với $\mu = 0.82\%$. Thực hiện tương tự cho 7 trường hợp còn lại trong Bảng 2.

4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

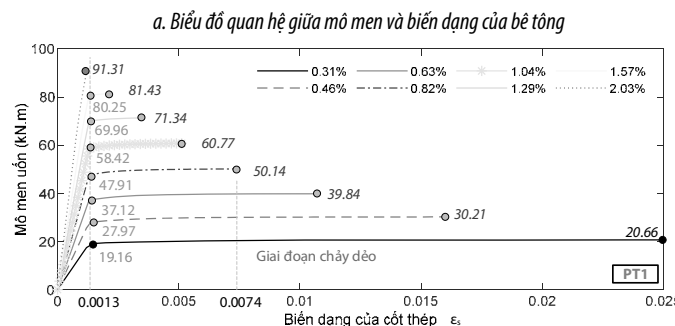
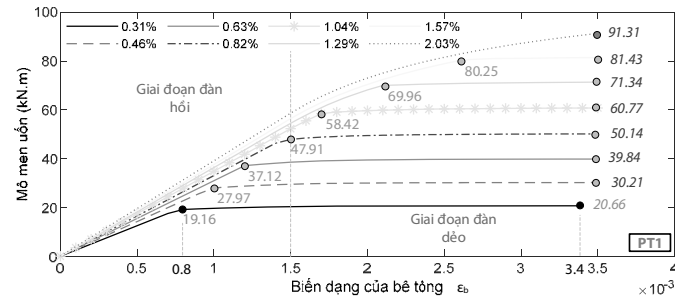
4.1 Momen uốn của dầm BTCT ứng với mô hình biến dạng BÐ2ÐT của bê tông và cốt thép - PT1

Tiến hành xác định giá trị mô men uốn của dầm theo phương pháp PT1 trong các trường hợp lượng thép thay đổi như trong Bảng 2. Kết quả tính cho 8 trường hợp được thể hiện trong Hình 6. Biểu diễn mối quan hệ giữa biến dạng tương đối của bê tông và giá trị mô men uốn trong dầm. Hàm lượng cốt thép trong dầm có mối quan hệ thuận với giá trị mô men uốn. Trong Hình 6 xuất hiện 3 trường hợp phá hủy của tiết diện. Với dầm có hàm lượng thép nhỏ nhất - $\mu = 0.31\%$ (Hình 6a): tại vị trí có biến dạng tương đối còn khá nhỏ $\varepsilon_b^{max} = 0.0008$ thì giá trị mô men uốn đã đạt đến

19.16kNm, sau đó biến dạng bê tông tiếp tục tăng nhưng giá trị mô men thay đổi không đáng kể và tiết diện dầm bị phá hủy với mô men uốn giới hạn $M_u = 20.66kNm$ khi biến dạng tương đối của bê tông $\epsilon_b^{max} = 0.0034$ chưa đạt đến biến dạng cực hạn của bê tông. Do đó, đây là trường hợp dầm phá hủy do cốt thép bị đứt (biến dạng của cốt thép đạt cực hạn $\epsilon_s = \epsilon_{s2} = 0.025$) (xem Hình 6b).

Đối với 6 dầm có hàm lượng cốt thép lần lượt 0.46%, 0.63%, 0.82%, 1.04%, 1.29% và 1.57% có đặc điểm phá hủy của tiết diện là giống nhau - do bê tông bị nén vỡ (biến dạng bê tông đạt đến giá trị cực hạn). Trong đó, hai dầm có $\mu = 0.46\%$ và $\mu = 0.63\%$ đều có biến dạng tương đối chưa đạt đến $\epsilon_{b1} = 0.0015$ mà mô men uốn có giá trị gần đạt đến mô men uốn giới hạn (tương tự như dầm có $\mu = 0.31\%$). Bốn dầm còn lại (với $\mu = 0.82\% - 1.57\%$) có mô men uốn gần đạt đến mô men uốn giới hạn khi biến dạng của bê tông $\epsilon_b^{max} \leq \epsilon_{b1}$.

Dầm có hàm lượng cốt thép lớn nhất là $\mu = 2.03\%$ thì tiết diện dầm bị phá hủy ở vùng bê tông chịu nén do biến dạng của bê tông đạt giá trị cực hạn, trong khi biến dạng của cốt thép vẫn chưa đạt đến giới hạn chảy - nghĩa là ứng suất kéo trong cốt thép vẫn chưa đạt đến cường độ R_s .



Hình 6. Biểu đồ quan hệ giữa mô men và biến dạng của vật liệu theo phương pháp PT1

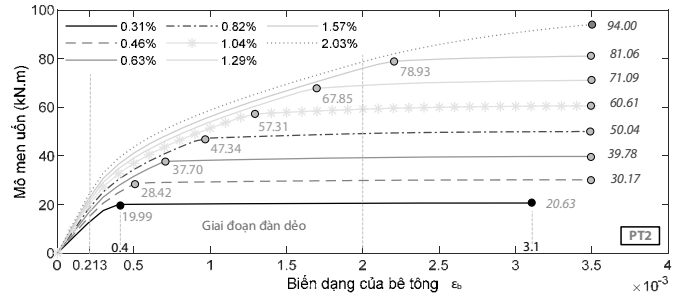
4.2 Momen uốn của dầm BTCT ứng với mô hình biến dạng BĐ3ĐT của bê tông và BĐ2ĐT của cốt thép - PT2

Xét dầm khi thay đổi hàm lượng cốt thép (08 trường hợp trong Bảng 2) được tính theo phương pháp phi tuyến với bê tông dạng BĐ3ĐT và cốt thép dạng BĐ2ĐT - PT2, kết quả giá trị mô men được thể hiện trong Hình 7.

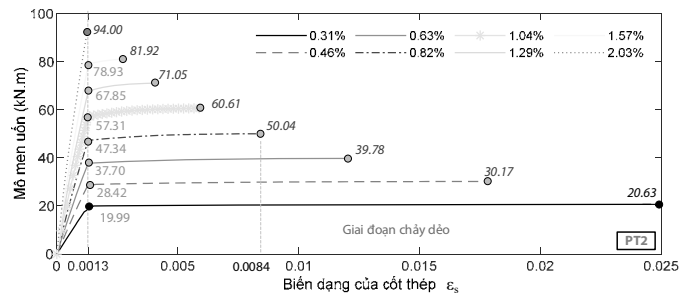
Trong các trường hợp xét tính được chia thành 3 nhóm dựa vào hình thức phá hủy của tiết diện dầm: nhóm 1 - phá hủy do cốt thép, gồm 01 dầm (hàm lượng $\mu = 0.31\%$) do biến dạng cốt

thép đạt đến giá trị cực hạn (Hình 7b) nhưng khi đó biến dạng của bê tông vẫn còn nhỏ hơn biến dạng cực hạn của bê tông

(trong Hình 7a, $\epsilon_b^{max} = 0.0031 < \epsilon_{b2} = 0.0035$); nhóm 2 đối với dầm có hàm lượng cốt thép từ 0.46% đến 1.57% - phá hủy do bê tông (biến dạng bê tông đạt đến cực hạn) và ứng suất cốt thép đạt đến cường độ R_s - biểu đồ biến dạng chuyển qua giai đoạn chảy dẻo; nhóm thứ 3 (dầm có $\mu = 2.03\%$) - phá hủy do bê tông nhưng ứng suất cốt thép chỉ vừa đạt đến cường độ R_s - biểu đồ biến dạng của cốt thép chưa có thêm chảy.



a. Biểu đồ quan hệ giữa mô men và biến dạng của bê tông



b. Biểu đồ quan hệ giữa mô men và biến dạng của cốt thép

Hình 7. Biểu đồ quan hệ giữa mô men và biến dạng của vật liệu theo phương pháp PT2

Giữa hai phương pháp tính PT1 và PT2 có dạng biểu đồ thể hiện mối quan hệ giữa mô men uốn và biến dạng của bê tông hay biến dạng của cốt thép gần giống nhau. Tuy nhiên, đối với phương pháp PT2 thì biểu đồ quan hệ giữa biến dạng cốt thép và mô men có thêm chảy dẻo lớn hơn. Dẫn chứng như dầm $\mu = 0.82\%$ với PT1 (Hình 6b) có thêm chảy bắt đầu từ biến dạng của cốt thép đạt 0.0013 đến 0.0074; còn với PT1 (Hình 7b) thêm chảy cũng bắt đầu từ biến dạng của cốt thép đạt 0.0013 đến 0.0084. Do đó, khi sử dụng tính mô men uốn cho dầm theo phương pháp PT2 - dùng BĐ3ĐT của bê tông và BĐ2ĐT của cốt thép sẽ làm tận dụng khả năng chịu kéo của cốt thép nhiều hơn so với phương pháp PT1 - dùng BĐ2ĐT của bê tông và cốt thép.

4.3 Momen uốn giới hạn của dầm BTCT ứng với các phương pháp tính

Dầm BTCT tiết diện 20x40cm đặt cốt đơn với vật liệu là bê tông B15 và thép CB300-V được xác định mô men uốn giới hạn theo cả 3 phương pháp, kết quả được thể hiện trong Bảng 3 và Hình 8.

Theo bảng 3, xét tổng thể thì giá trị mô men uốn giới hạn tính theo phương pháp NLGH có giá trị lớn nhất trong ba phương pháp tính; và giá trị mô men uốn giới hạn tính theo PT2 có giá trị mô men nhỏ nhất.

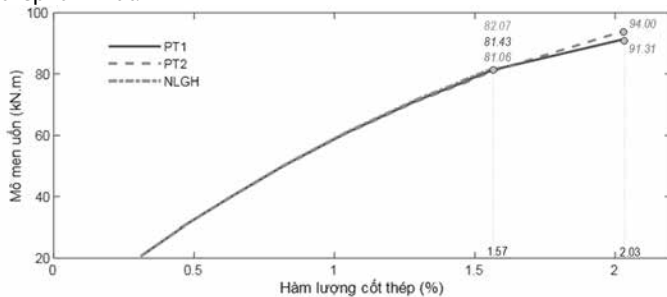
Trong Hình 8 giúp nhận thấy sự chênh lệch về giá trị mô men uốn giới hạn của các phương pháp tính. Như xét tại tiết diện có $\mu = 1.57\%$ thì sự chênh lệch giữa NLGH và PT1 so với PT2 lần lượt chỉ có 1.24% và 0.45%, kết quả nghiên cứu này phù hợp với [7], [4].

Độ chênh lệch này khá bé, do đó trong thiết kế thực hành nhằm đơn giản hóa và thuận tiện thì nhà thiết kế nên sử dụng phương pháp NLGH để xác định mô men uốn cho dầm.

Bảng 3. Giá trị mô men uốn của tiết diện dầm

Hàm lượng μ (%)	Mô men uốn giới hạn (kN.m)		
	NLGH	PT1	PT2
0.31	20.68	20.66	20.63
0.46	30.26	30.21	30.17
0.63	39.95	39.84	39.78
0.82	50.32	50.14	50.04
1.04	61.06	60.77	60.61
1.29	71.78	71.34	71.09
1.57	82.07	81.43	81.06
2.03		91.31	94.00

Riêng tại vị trí tiết diện dầm có hàm lượng thép $\mu = 2.03\%$ thì ứng với phương pháp NLGH lại rơi vào trường hợp chiều cao tương đối của vùng bê tông chịu nén $\xi = 0.621 > \xi_R$ (không thỏa bài toán đặt cốt thép đơn). Mô men uốn giới hạn tính theo PT2 lại cho giá trị lớn hơn khi tính theo PT1, với lý do là khi tính theo PT2 thì tại thời điểm biến dạng bê tông đạt cực hạn thì giá trị ứng suất trong cốt thép cũng vừa đạt đến cường độ chịu kéo của cốt thép R_s ; còn đối với phương pháp PT1 thì giá trị ứng suất trong cốt thép vẫn chưa đạt đến cường độ chịu kéo của cốt thép. Đây là trường hợp phá hủy giòn mà trong thiết kế kết cấu bê tông cốt thép cần tránh. Để không xảy ra phá hủy giòn cần hạn chế hàm lượng cốt thép không được vượt qua một giới hạn - được gọi là hàm lượng cốt thép lớn nhất.



Hình 8. Mối quan hệ giữa mô men uốn giới hạn và hàm lượng cốt thép

Xét mỗi phương pháp tính sẽ có lượng cốt thép lớn nhất khác nhau để tiết diện không xảy ra phá hủy giòn. Theo [4], phương pháp NLGH có $\mu_{\max} = \xi_R \frac{R_b}{R_s}$. Dựa vào các phương trình xây dựng ở mục 2 suy ra được giá trị hàm lượng cốt thép lớn nhất trong

phương pháp PT1 và PT2 lần lượt là $\mu_{\max} = \frac{R_b}{2R_s} \left(\frac{0.0055}{0.0035 + \frac{R_s}{E_s}} \right)$;

$$\mu_{\max} = \frac{R_b}{R_s} \left(\frac{0.0031 - 0.3 \frac{R_b}{E_b}}{0.0035 + \frac{R_s}{E_s}} \right).$$

Áp dụng vào bài toán đang khảo sát thì giá trị hàm lượng cốt thép theo từng phương pháp được thể hiện trong Bảng 4. Từ số liệu ở Bảng 4 cho thấy hàm lượng cốt thép lớn nhất theo phương

pháp PT2 có giá trị lớn nhất (2.04%), tiếp đến là phương pháp NLGH và phương pháp PT1 là nhỏ nhất (1.87%).

Trong các bài toán khảo sát (Bảng 2) thì chỉ ứng với dầm - hàm lượng thép $\mu = 2.03\%$ khi tính theo phương pháp NLGH và PT1 là rơi vào trường hợp phá hoại giòn; và đối với phương pháp PT2 thì thuộc trường hợp phá hoại dẻo.

Bảng 4. Hàm lượng cốt thép lớn nhất trong dầm theo các phương pháp tính

Vật liệu	Hàm lượng cốt thép (%)		
	NLGH	PT1	PT2
B15, CB 300-V	1.91	1.87	2.04

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được các phương trình xác định được mô men uốn của dầm BTCT tiết diện chữ nhật đặt cốt thép đơn theo mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông (dạng hai đoạn thẳng, dạng ba đoạn thẳng) và của cốt thép (dạng hai đoạn thẳng). Thông qua đó, đã phân tích được sự ứng xử của dầm chịu uốn từ biểu đồ mô men uốn và biến dạng của vật liệu để xác định được hình thức phá hủy của tiết diện dầm; và xác định được giá trị mô men giới hạn của dầm theo mô hình biến dạng phi tuyến (PT1 và PT2) có giá trị bé hơn không đáng kể so với phương pháp NLGH. Kết quả nhận thấy khi sử dụng biểu đồ biến dạng của bê tông dạng ba đoạn thẳng sẽ tận dụng được khả năng chịu kéo của cốt thép nhiều hơn so với biểu đồ dạng hai đoạn thẳng. Và khi dùng phương pháp PT1 thì hàm lượng cốt thép đối đa đặt trong tiết diện dầm nhằm tránh phá hoại giòn xảy ra là nhỏ nhất so với phương pháp PT2 và NLGH.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*. (2018)
- Nguyễn Ngọc Bà. *Giới hạn hàm lượng cốt thép trong kết cấu BTCT chịu uốn theo TCVN 5574:2018*. Tạp chí KHCN Xây dựng (2019)
- Lê Minh Long. *Một số điểm mới trong dự thảo TCVN 5574:2017*. Tạp chí KHCN Xây dựng (2017)
- Phạm Quang Minh, Ngô Thế Phong, Nguyễn Trường Thắng, Võ Mạnh Tùng. *Kết cấu bê tông cốt thép - Phần cấu kiện cơ bản (TCVN 5574:2018)*. Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật (2021)
- Nguyễn Ngọc Linh, Nguyễn Ngọc Tân, Nguyễn Văn Quang, and Phan Quang Minh. *Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm xác định mô men uốn giới hạn của cấu kiện dầm BTCT theo mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông*. Tạp chí Khoa học & công nghệ Việt Nam (2020)
- Trần Ngọc Long, Phan Văn Phúc, and Nguyễn Trọng Hà. *Tính toán dầm bê tông cốt thép chịu uốn xiên sử dụng mô hình phi tuyến*. Tạp chí KHCN Xây dựng (2020)
- Nguyễn Hữu Anh Tuấn. *Khảo sát ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép thông qua biểu đồ mô men - độ cong tính theo TCVN 5574 : 2018*. Tạp chí KHCN Xây dựng (2020)
- Nguyễn Việt Phương, Sykhampha Vongchith, and Nguyễn Trường Thắng. *Xác định khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép sử dụng các mô hình vật liệu phi tuyến của TCVN 5574:2018*. Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD (2020)
- Thạch Sớm Sô Hoách, Lê Quốc Tiến, Lê Thị Thu Hằng. *Tính toán khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép có tiết diện hình chữ nhật sử dụng mô hình phi tuyến vật liệu theo TCVN 5574:2018*. Tạp chí Vật liệu & Xây dựng (2022)
- Nguyễn Thế Dương, Nguyễn Tấn Phúc, Lê Tấn Đăng. *Khả năng kháng uốn dầm bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn TCVN 5574-2018: So sánh giữa phương pháp tính toán theo nội lực giới hạn và phương pháp tính toán có xét đến ứng xử phi tuyến của cốt thép*. Tạp chí KHCN Đại học Duy Tân (2022)
- Đoàn Thị Quỳnh Mai, Trần Việt Tâm, Phạm Thái Hoàn, Dương Văn Hai, and Đinh Văn Tùng. *Hướng dẫn tính toán cấu kiện bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018*. (2020)