

Tính toán mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng

Nguyễn Việt Hưng^{1*}, Trần Công Nghiệp¹, Lê Hùng Quang¹, Nguyễn Kim Ngọc¹

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công Nghệ TP. Hồ Chí Minh (HUTECH)

TỪ KHÓA

Bê tông cốt thép
Mô men kháng nứt
Ứng xử phi tuyến
Mô hình hai đoạn thẳng

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày chi tiết phương pháp xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép hình chữ nhật có xét đến ứng xử phi tuyến của bê tông được đơn giản hóa theo mô hình hai đoạn thẳng quy định trong TCVN 5574 – 2018. Bài báo cũng thực hiện so sánh các giá trị mô men kháng nứt tính toán theo phương pháp gần đúng nêu trong TCVN 5574 – 2018 và tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng của bê tông ứng với các hàm lượng cốt thép khác nhau. Kết quả tính toán chỉ ra rằng: (1) mô men kháng nứt của tiết diện tăng tỉ lệ tuyến tính với hàm lượng cốt thép chịu kéo và hàm lượng cốt thép chịu nén; (2) hàm lượng cốt thép chịu kéo có ảnh hưởng lớn tới mô men kháng nứt của tiết diện trong khi ảnh hưởng của cốt thép chịu nén là không đáng kể; (3) phương pháp xác định một cách gần đúng mô men kháng nứt của tiết diện được trình bày trong TCVN 5574 – 2018 đánh giá thấp khả năng chống nứt của tiết diện, đặc biệt trong trường hợp hàm lượng cốt thép chịu kéo lớn.

KEYWORDS

Reinforced concrete
Cracking moment
Nonlinear behavior
Bi-linear model

ABSTRACT

This paper presents in detail the method for determining the cracking moment of rectangular reinforced concrete sections, taking into account the nonlinear behavior of concrete simplified as the bi-linear stress-strain diagram according to TCVN 5574 – 2018. The article also compares the cracking moment calculated according to the approximate method presented in TCVN 5574 – 2018 and calculated according to the method established based on the bi-linear model with different reinforcement ratios. The calculation results have showed that: (1) the cracking moment increases linearly as function of tensile reinforcement ratio and of compression reinforcement ratio; (2) the tensile reinforcement ratio has a great influence on the cracking moment while the influence of compression reinforcement ratio is insignificant; (3) the approximate method presented in TCVN 5574 – 2018 underestimates the cracking moment of the section, especially in the case of high tensile reinforcement ratio.

1. Giới thiệu

Tính toán và kiểm tra sự hình thành hoặc mở rộng vết nứt là một trong những nội dung cần phải được thực hiện trong quá trình thiết kế kết cấu bê tông cốt thép. Đối với những kết cấu bê tông cốt thép thông thường, tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574 – 2018 (§8.2.2.1.3) [1] cho phép sự xuất hiện của các vết nứt trong bê tông với chiều rộng giới hạn tùy theo loại cốt thép sử dụng và yêu cầu hạn chế thấm của kết cấu. Đối với những kết cấu bê tông cốt thép làm việc trong môi trường xâm thực hoặc có những yêu cầu nâng cao về khả năng chống thấm và độ bền lâu, tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574 – 2018 (§4.3, §8.2.1.2) [1] không cho phép sự xuất hiện của các vết nứt trong bê tông. Trong trường hợp này, kết cấu cần phải được thiết kế sao cho mô men uốn gây ra bởi tải trọng tính toán (có xét đến hệ số độ tin cậy về tải trọng) không được vượt quá mô men kháng nứt của tiết diện.

Việc xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn ACI 318 [2] của Hoa Kỳ và tiêu chuẩn EC2 [3] của châu Âu tương đối đơn giản, dựa trên các giả thiết: (1) tiết diện ngang phẳng

vẫn phẳng sau khi biến dạng, (2) bê tông và cốt thép ứng xử đàn hồi tuyến tính cho đến khi ứng suất kéo trong bê tông đạt tới cường độ chịu kéo. Tiêu chuẩn thiết kế TCVN 5574 – 2018 [1] cho phép xác định mô men kháng nứt theo công thức tương tự như ACI 318 [2] và EC2 [3] nhưng có nhân thêm hệ số hiệu chỉnh nhằm xét đến ứng xử dẻo của vùng bê tông chịu kéo trước khi bị nứt. Ngoài phương pháp đơn giản này, TCVN 5574 – 2018 [1] cũng cho phép xác định mô men kháng nứt của tiết diện một cách chính xác hơn dựa vào biểu đồ ứng suất – biến dạng của bê tông. Một số nghiên cứu về mô men giới hạn và mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép có xét tới ứng xử phi tuyến của bê tông theo TCVN 5574 – 2018 [1] đã được thực hiện [4, 5, 6]. Tuy nhiên, nghiên cứu về mô men kháng nứt [6] chưa xét tới ảnh hưởng của cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén khi thiết lập các công thức. Ngoài ra, biến dạng mà từ đó trở đi bê tông đạt tới cường độ chịu kéo trong mô hình phi tuyến hai đoạn thẳng được tiêu chuẩn quy định là 0,008 % [1] mà không được tính dựa trên mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo của bê tông. Điều này có nghĩa rằng độ dốc của biểu đồ ứng suất hình tam giác của vùng bê tông chịu nén và vùng bê tông chịu kéo

*Liên hệ tác giả: nv.hung@hutech.edu.vn

Nhận ngày 29/05/2024, sửa xong ngày 20/06/2024, chấp nhận đăng ngày 16/07/2024

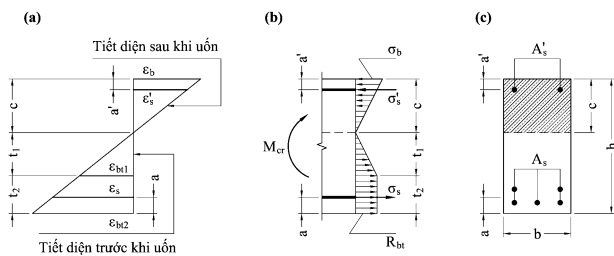
Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2024.722>

là không bằng nhau, không như bài báo [6]. Nghiên cứu này nhằm mục đích thiết lập công thức xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép hình chữ nhật có xét tới ứng xử phi tuyến của bê tông được đơn giản hóa dưới dạng biểu đồ hai đoạn thẳng quy định trong TCVN 5574 – 2018 [1]. Bài báo cũng trình bày ví dụ tính toán cụ thể mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép ứng với các hàm lượng cốt thép khác nhau, so sánh mô men kháng nứt tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng và theo công thức gần đúng. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén đối với mô men kháng nứt của tiết diện cũng được trình bày trong bài báo.

2. Tính toán mô men kháng nứt theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng của bê tông

Việc xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép hình chữ nhật có xét đến ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng của bê tông được thực hiện dựa trên các giả thiết thể hiện trên Hình 1, bao gồm:

- Tiết diện ngang phẳng vẫn phẳng sau khi biến dạng (Hình 1.a);
- Cốt thép chịu kéo và chịu nén ứng xử đàn hồi tuyến tính (ứng suất tỉ lệ với biến dạng);
- Bê tông vùng chịu nén ứng xử đàn hồi tuyến tính (ứng suất tỉ lệ với biến dạng), biểu đồ ứng suất trong vùng bê tông chịu nén có dạng hình tam giác (Hình 1.b);
- Bê tông vùng chịu kéo ứng xử phi tuyến, biểu đồ ứng suất trong vùng bê tông chịu kéo được đơn giản hóa dưới dạng hai đoạn thẳng (Hình 1.b).
- Các giá trị biến dạng kéo tương đối ϵ_{bt1} , ϵ_{bt2} của bê tông (Hình 1.a) ứng với mô hình hai đoạn thẳng được lấy theo quy định của TCVN 5574 – 2018 (§6.1.4.4) [0], lần lượt có giá trị $\epsilon_{bt1} = 0,008\%$ và $\epsilon_{bt2} = 0,015\%$;
- Ứng suất kéo của bê tông ngay trước khi bị nứt đạt tới R_{bt} (cường độ chịu kéo tính toán của bê tông khi tính toán theo trạng thái giới hạn thứ hai);
- Phân bố cấu kiện ở trạng thái cân bằng, thỏa mãn các điều kiện cân bằng lực và cân bằng mô men.



Hình 1. Sơ đồ tính toán mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép: (a) biểu đồ biến dạng; (b) biểu đồ ứng suất; (c) tiết diện ngang của cấu kiện.

Từ giả thiết tiết diện ngang phẳng vẫn phẳng sau khi biến dạng (Hình 1.a), dựa trên nguyên lý tam giác đồng dạng, ta có thể xác định

được các biến dạng tương đối và chiều cao của vùng bê tông chịu kéo như sau:

- Biến dạng tương đối của thớ bê tông chịu nén ngoài cùng
$$\epsilon_b = \left(\frac{c}{h-c}\right) \epsilon_{bt2} = \left(\frac{\xi}{1-\xi}\right) \epsilon_{bt2} \quad (2)$$

- Biến dạng tương đối tại trọng tâm cốt thép chịu kéo
$$\epsilon_s = \left(\frac{h-c-a}{h-c}\right) \epsilon_{bt2} = \left(1 - \frac{a/h}{1-\xi}\right) \epsilon_{bt2} \quad (3)$$

- Biến dạng tương đối tại trọng tâm cốt thép chịu nén
$$\epsilon'_s = \left(\frac{c-a'}{h-c}\right) \epsilon_{bt2} = \left(\frac{\xi-a'/h}{1-\xi}\right) \epsilon_{bt2} \quad (4)$$

- Chiều cao của vùng bê tông chịu kéo có ứng suất phân bố hình tam giác

$$t_1 = (h - c) \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}} = h(1 - \xi) \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}} \quad (5)$$

- Chiều cao của vùng bê tông chịu kéo có ứng suất phân bố đều

$$t_2 = (h - c) \left(1 - \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) = h(1 - \xi) \left(1 - \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \quad (6)$$

trong đó:

h là chiều cao tiết diện;

c là chiều cao của vùng bê tông chịu nén;

a là khoảng cách từ trọng tâm cốt thép chịu kéo tới thớ biên chịu kéo của tiết diện;

a' là khoảng cách từ trọng tâm cốt thép chịu nén tới thớ biên chịu nén của tiết diện;

ξ là chiều cao tỉ đối của vùng bê tông chịu nén so với chiều cao tiết diện;

$$\xi = \frac{c}{h} \quad (7)$$

Từ giả thiết bê tông vùng chịu nén và cốt thép (chịu kéo và chịu nén) ứng xử đàn hồi tuyến tính, ta có thể xác định được ứng suất trong bê tông và cốt thép như sau:

Ứng suất trong bê tông tại thớ biên chịu nén

$$\sigma_b = E_b \epsilon_b = \left(\frac{\xi}{1-\xi}\right) E_b \epsilon_{bt2} \quad (8)$$

- Ứng suất trong cốt thép chịu kéo

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s = \left(1 - \frac{a/h}{1-\xi}\right) n_s E_b \epsilon_{bt2} \quad (9)$$

- Ứng suất trong cốt thép chịu nén

$$\sigma'_s = E'_s \epsilon'_s = \left(\frac{\xi-a'/h}{1-\xi}\right) n'_s E_b \epsilon_{bt2} \quad (10)$$

trong đó:

E_b là mô đun đàn hồi của bê tông;

E_s, E'_s lần lượt là mô đun đàn hồi của cốt thép chịu kéo và của cốt thép chịu nén;

n_s, n'_s là tỉ số giữa mô đun đàn hồi của cốt thép (chịu kéo và chịu nén) và mô đun đàn hồi của bê tông;

$$n_s = \frac{E_s}{E_b} \quad (11)$$

$$n'_s = \frac{E'_s}{E_b} \quad (12)$$

Chiều cao c hay chiều cao tỉ đối $\xi = c / h$ của vùng bê tông chịu nén cần phải thỏa mãn điều kiện cân bằng lực dọc theo trục cấu kiện. Từ biểu đồ ứng suất trong bê tông và cốt thép thể hiện như trên Hình 1.b, ta có thể biểu diễn điều kiện cân bằng lực dưới dạng sau:

$$0.5\sigma_b cb + \sigma'_s A'_s = 0.5R_{bt} t_1 b + R_{bt} t_2 b + \sigma_s A_s \quad (13)$$

trong đó:

A_s là diện tích tiết diện của cốt thép chịu kéo;

A'_s là diện tích tiết diện của cốt thép chịu nén;

B là bề rộng tiết diện.

Thay các công thức (5), (6), (8), (9) và (10) vào phương trình (13), ta có thể viết lại điều kiện cân bằng lực dọc theo trục cấu kiện dưới dạng phương trình bậc hai của ξ như sau:

$$k_2 \xi^2 + k_1 \xi + k_0 = 0 \quad (14)$$

trong đó:

$$k_2 = 0.5 - \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} \quad (15)$$

$$k_1 = n_s \mu_s + n'_s \mu'_s + 2 \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} \quad (16)$$

$$k_0 = -\left(1 - \frac{a}{h}\right) n_s \mu_s - \frac{a'}{h} n'_s \mu'_s - \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} \quad (17)$$

$$\mu_s = \frac{A_s}{bh} \quad (18)$$

$$\mu'_s = \frac{A'_s}{bh} \quad (19)$$

Chiều cao tỉ đối ξ của vùng bê tông chịu nén là nghiệm dương của phương trình bậc hai (14) và có dạng:

$$\xi = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2 k_0}}{2k_2} \quad (20)$$

Từ điều kiện cân bằng mô men đối với trục trung hòa (biến dạng bằng không, cách thớ bê tông chịu nén ngoài cùng một khoảng c), ta có thể xác định mô men kháng nứt của tiết diện theo công thức sau:

$$M_{cr} = \left[2\sigma_b \xi^2 + R_{bt} (1 - \xi)^2 \left(3 - 2 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}} \right) + \right] \frac{bh^2}{6} \quad (21)$$

trong đó σ_b , σ_s và σ'_s là các ứng suất trong bê tông và cốt thép được xác định lần lượt theo các công thức (8), (9) và (10).

3. Tính toán mô men kháng nứt theo công thức gần đúng

Để đơn giản hóa quá trình tính toán, TCVN 5574 - 2018 (§8.2.2.2.4) [0] cho phép xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép theo công thức gần đúng. Công thức này có dạng tương tự như công thức trong tiêu chuẩn ACI 318 [[1].] của Hoa Kỳ và tiêu chuẩn EC2 [[2].] của châu Âu, được xây dựng dựa trên giả thiết vật liệu ứng xử đàn hồi tuyến tính cho đến khi bê tông đạt tới cường độ chịu kéo. Tuy nhiên, TCVN 5574 - 2018 [0] đưa thêm vào hệ số hiệu chỉnh nhằm xét tới ứng xử phi tuyến của vùng bê tông chịu kéo, khi đó mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép được xác định theo công thức:

$$M_{cr} = \gamma \frac{I_{red}}{y_t} R_{bt} \quad (22)$$

trong đó

y_t là khoảng cách từ trọng tâm tiết diện qui đổi tới thớ biên chịu kéo ngoài cùng

$$y_t = \frac{0.5h + \mu_s(n_s - 1)a + \mu'_s(n'_s - 1)(h - a')}{1 + \mu_s(n_s - 1) + \mu'_s(n'_s - 1)} \quad (23)$$

I_{red} là mô men quán tính của tiết diện quy đổi

$$I_{red} = \left[\frac{bh^3}{12} + bh(y_t - 0.5h)^2 + A_s(n_s - 1)(y_t - a)^2 + A'_s(n'_s - 1)(h - y_t - a')^2 \right] \quad (24)$$

Γ là hệ số hiệu chỉnh nhằm xét tới ứng xử phi tuyến của vùng bê tông chịu kéo trước khi bị nứt, $\gamma = 1,30$ đối với tiết diện chữ nhật hoặc chữ T có cánh nằm trong vùng bê tông chịu nén (Phụ Lục G, TCVN 5574 - 2018 [0]);

Trong trường hợp bỏ qua diện tích bê tông bị cốt thép chiếm chỗ, có thể thay thế các đại lượng $n_s - 1$ và $n'_s - 1$ trong các công thức (23) và (24) lần lượt bằng n_s và n'_s . Ngoài ra, để đơn giản hóa hơn nữa quá

trình tính toán, TCVN 5574 - 2018 [0] cũng cho phép xác định mô men quán tính của tiết diện quy đổi mà không kể đến cốt thép (xem $A_s = 0$, $A'_s = 0$), khi đó có thể lấy $y_t = 0,5h$ và $I_{red} = bh^3 / 12$.

4. Ví dụ tính toán

Để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu kéo và cốt thép chịu nén tới mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép, nhóm tác giả đã thực hiện tính toán mô men kháng nứt M_{cr} theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng (21) và theo phương pháp gần đúng (22) ứng với các thông số được tổng hợp như trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số dùng trong tính toán mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép.

| Ý nghĩa các đại lượng | Ký hiệu | Đơn vị | Giá trị |
|---|----------|--------|-----------|
| Cấp cường độ chịu nén của bê tông | GR_b | - | B25 |
| Mác cốt thép chịu kéo | GR_s | - | CB400V |
| Mác cốt thép chịu nén | GR'_s | - | CB400V |
| Chiều rộng tiết diện | b | (mm) | 250 |
| Chiều cao tiết diện | h | (mm) | 500 |
| Khoảng cách từ trọng tâm cốt thép chịu kéo và chịu nén lần lượt tới thớ biên chịu kéo và chịu nén của tiết diện | a | (mm) | 60 |
| | a' | (mm) | 40 |
| Mô đun đàn hồi của bê tông | E_b | (GPa) | 30 |
| Mô đun đàn hồi của cốt thép chịu kéo | E_s | (GPa) | 200 |
| Mô đun đàn hồi của cốt thép chịu nén | E'_s | (GPa) | 200 |
| Cường độ chịu kéo tính toán của bê tông (theo TTGH-2) | R_{bt} | (MPa) | 1,55 |
| Hàm lượng cốt thép chịu kéo | μ_s | (%) | 0,0 ÷ 3,0 |
| Hàm lượng cốt thép chịu nén | μ'_s | (%) | 0,0 ÷ 1,5 |

4.1. Tính toán mô men kháng nứt theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng

- Trường hợp $\mu_s = 0$, $\mu'_s = 0$

▪ Xác định các hệ số k_2 , k_1 , k_0 xác định lần lượt theo các công thức (15), (16) và (17) ứng với các thông số $\mu_s = 0$, $\mu'_s = 0$, $\epsilon_{bt1} = 0,008\%$, $\epsilon_{bt2} = 0,015\%$, $R_{bt} = 1,55$ MPa, $E_b = 30$ GPa:

$$k_2 = 0.5 - \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} = 0.5 - \left(1 - 0.5 \times \frac{0.008}{0.015}\right) \frac{1.55}{30 \times 10^3 \times 0.015} = 0.247;$$

$$k_1 = n_s \mu_s + n'_s \mu'_s + 2 \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} = 0 + 0 + 2 \left(1 - 0.5 \times \frac{0.008}{0.015}\right) \frac{1.55}{30 \times 10^3 \times 0.015} = 0.505;$$

$$k_0 = -\left(1 - \frac{a}{h}\right) n_s \mu_s - \frac{a'}{h} n'_s \mu'_s - \left(1 - 0.5 \frac{\epsilon_{bt1}}{\epsilon_{bt2}}\right) \frac{R_{bt}}{E_b \epsilon_{bt2}} = -0 - 0 - \left(1 - 0.5 \times \frac{0.008}{0.015}\right) \frac{1.55}{30 \times 10^3 \times 0.015} = -0.253;$$

▪ Xác định chiều cao tỉ đối của vùng bê tông chịu nén theo công thức (20):

$$\xi = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2 k_0}}{2k_2} = \frac{-0.505 + \sqrt{0.505^2 + 4 \times 0.247 \times 0.253}}{2 \times 0.247} = 0.415;$$

▪ Xác định ứng suất trong bê tông tại thớ biên chịu nén theo công thức (8):

$$\sigma_b = E_b \epsilon_b = \left(\frac{\xi}{1 - \xi}\right) E_b \epsilon_{bt2} = 0.415 / (1 - 0.415) \times 30 \times 10^3 \times 0.015\% = 3.20 \text{ MPa};$$

▪ Xác định mô men kháng nứt của tiết diện theo công thức (21) ứng với

$$\sigma_s = 0 \text{ và } \sigma'_s = 0 \text{ (không có cốt thép):}$$

$$M_{cr} = \left[2\sigma_b \xi^2 + R_{bt}(1-\xi)^2 \left(3 - 2 \frac{\xi_{bt}}{\xi_{bt2}} \right) + 6\sigma'_s \mu'_s \left(\xi - \frac{a'}{h} \right) + 6\sigma_s \mu_s \left(1 - \xi - \frac{a}{h} \right) \right] \frac{bh^2}{6}$$

$$= \left[2 \times 3,20 \times 0,415^2 + 1,55 \times (1 - 0,415)^2 \times \left(3 - 2 \times \frac{0,008^2}{0,015^2} \right) \right] \times \frac{250 \times 500^2}{6} \times 10^{-6}$$

$$= 24,91 \text{ kNm;}$$

- Các trường hợp khác

Việc tính toán mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng ứng với các giá trị hàm lượng cốt thép khác được thực hiện tương tự như ở trên, kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 2. Mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép xác định theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng ứng với các giá trị hàm lượng cốt thép chịu kéo khác nhau.

| TT | μ_s | μ'_s | k_2 | k_1 | k_0 | ξ | σ_b | σ_s | σ'_s | M_{cr} |
|-----|---------|----------|-------|-------|--------|-------|------------|------------|-------------|----------|
| | (%) | (%) | | | | | (MPa) | (MPa) | (MPa) | (kNm) |
| #1 | 0,00 | 0,00 | 0,247 | 0,505 | -0,253 | 0,415 | 3,20 | - | - | 24,91 |
| #2 | 0,20 | 0,00 | 0,247 | 0,519 | -0,264 | 0,424 | 3,31 | 23,75 | - | 26,78 |
| #3 | 0,40 | 0,00 | 0,247 | 0,532 | -0,276 | 0,432 | 3,42 | 23,66 | - | 28,63 |
| #4 | 0,60 | 0,00 | 0,247 | 0,545 | -0,288 | 0,440 | 3,54 | 23,57 | - | 30,46 |
| #5 | 0,80 | 0,00 | 0,247 | 0,559 | -0,300 | 0,448 | 3,65 | 23,48 | - | 32,27 |
| #6 | 1,00 | 0,00 | 0,247 | 0,572 | -0,311 | 0,455 | 3,75 | 23,40 | - | 34,06 |
| #7 | 1,20 | 0,00 | 0,247 | 0,585 | -0,323 | 0,462 | 3,86 | 23,31 | - | 35,84 |
| #8 | 1,40 | 0,00 | 0,247 | 0,599 | -0,335 | 0,469 | 3,97 | 23,23 | - | 37,59 |
| #9 | 1,60 | 0,00 | 0,247 | 0,612 | -0,346 | 0,475 | 4,07 | 23,14 | - | 39,33 |
| #10 | 1,80 | 0,00 | 0,247 | 0,625 | -0,358 | 0,481 | 4,18 | 23,06 | - | 41,05 |
| #11 | 2,00 | 0,00 | 0,247 | 0,639 | -0,370 | 0,487 | 4,28 | 22,98 | - | 42,76 |
| #12 | 2,20 | 0,00 | 0,247 | 0,652 | -0,382 | 0,493 | 4,38 | 22,90 | - | 44,45 |
| #13 | 2,40 | 0,00 | 0,247 | 0,665 | -0,393 | 0,499 | 4,48 | 22,82 | - | 46,13 |
| #14 | 2,60 | 0,00 | 0,247 | 0,679 | -0,405 | 0,504 | 4,58 | 22,74 | - | 47,79 |
| #15 | 2,80 | 0,00 | 0,247 | 0,692 | -0,417 | 0,510 | 4,68 | 22,66 | - | 49,43 |
| #16 | 3,00 | 0,00 | 0,247 | 0,705 | -0,429 | 0,515 | 4,77 | 22,58 | - | 51,06 |

4.2. Tính toán mô men kháng nứt theo phương pháp gần đúng

- Trường hợp $\mu_s = 0, \mu'_s = 0$

▪ Xác định khoảng cách từ trọng tâm tiết diện qui đổi tới thớ biên chịu kéo ngoài cùng theo công thức (23)

$$y_t = \frac{0,5h + \mu_s(n_s - 1)a + \mu'_s(n'_s - 1)(h - a')}{1 + \mu_s(n_s - 1) + \mu'_s(n'_s - 1)} = 0,5h = 0,5 \times 500 = 250 \text{ mm;}$$

▪ Xác định mô men quán tính của tiết diện quy đổi theo công thức (24)

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh(y_t - 0,5h)^2 + A_s(n_s - 1)(y_t - a)^2 + A'_s(n'_s - 1)(h - y_t - a')^2$$

$$= 250 \times 500^3 / 12 = 26,04 \times 10^8 \text{ mm}^4;$$

▪ Xác định mô men kháng nứt của tiết diện theo công thức (22)

$$M_{cr} = \gamma \frac{I_{red}}{y_t} R_{bt} = 1,30 \times 26,04 \times 10^8 / 250 \times 1,55 \times 10^6 = 20,99 \text{ kNm;}$$

❖ Các trường hợp khác

Việc tính toán mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép theo công thức gần đúng (22) ứng với các giá trị hàm lượng cốt thép khác được thực hiện tương tự như ở trên, kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 3.

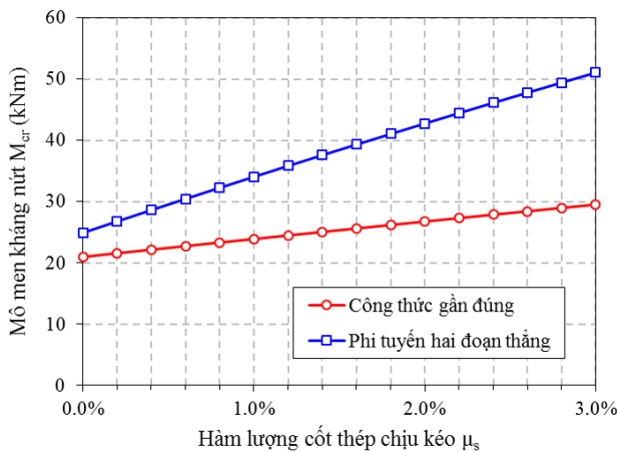
Bảng 3. Mô men kháng nứt của tiết diện dầm bê tông cốt thép xác định theo công thức gần đúng (22) ứng với các giá trị hàm lượng cốt thép chịu kéo khác nhau.

| TT | μ_s | μ'_s | y_t | I_{red} | M_{cr} |
|-----|---------|----------|--------|--------------------|----------|
| | (%) | (%) | (mm) | (dm ⁴) | (kNm) |
| #1 | 0,00 | 0,00 | 250,00 | 26,04 | 20,99 |
| #2 | 0,20 | 0,00 | 247,87 | 26,55 | 21,58 |
| #3 | 0,40 | 0,00 | 245,79 | 27,04 | 22,17 |
| #4 | 0,60 | 0,00 | 243,75 | 27,53 | 22,75 |
| #5 | 0,80 | 0,00 | 241,76 | 28,00 | 23,34 |
| #6 | 1,00 | 0,00 | 239,81 | 28,46 | 23,91 |
| #7 | 1,20 | 0,00 | 237,90 | 28,91 | 24,49 |
| #8 | 1,40 | 0,00 | 236,03 | 29,36 | 25,06 |
| #9 | 1,60 | 0,00 | 234,21 | 29,79 | 25,63 |
| #10 | 1,80 | 0,00 | 232,41 | 30,22 | 26,20 |
| #11 | 2,00 | 0,00 | 230,66 | 30,64 | 26,76 |

| TT | μ_s | $\dot{\mu}_s$ | y_t | I_{red} | M_{cr} |
|-----|---------|---------------|--------|-----------|----------|
| #12 | 2,20 | 0,00 | 228,94 | 31,04 | 27,32 |
| #13 | 2,40 | 0,00 | 227,25 | 31,44 | 27,88 |
| #14 | 2,60 | 0,00 | 225,60 | 31,84 | 28,44 |
| #15 | 2,80 | 0,00 | 223,98 | 32,22 | 28,99 |
| #16 | 3,00 | 0,00 | 222,39 | 32,60 | 29,54 |

5. So sánh và bình luận

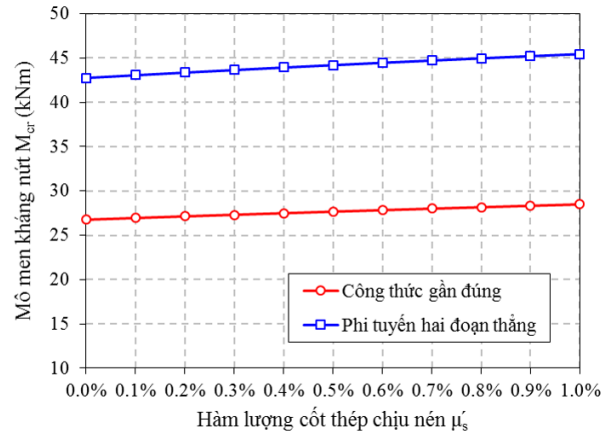
Hình 2 thể hiện mối quan hệ giữa mô men kháng nứt M_{cr} của tiết diện dầm bê tông cốt thép và hàm lượng cốt thép chịu kéo μ_s tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng (21) và theo phương pháp gần đúng (22) trong trường hợp bỏ qua sự tham gia chịu lực của cốt thép chịu nén ($\dot{\mu}_s = 0$). Ta có thể nhận thấy rằng mô men kháng nứt M_{cr} tính toán theo cả hai phương pháp đều tăng tỉ lệ tuyến tính với hàm lượng cốt thép chịu kéo μ_s , mức độ tăng là đáng kể, đặc biệt khi tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng (tăng hơn hai lần khi μ_s tăng từ 0% tới 3%). Phương pháp gần đúng đánh giá thấp đáng kể mô men kháng nứt của tiết diện so với phương pháp tính toán theo mô hình phi tuyến hai đoạn thẳng, chênh lệch mô men kháng nứt giữa hai phương pháp chấp nhận được khi hàm lượng cốt thép chịu kéo nhỏ (16% khi $\mu_s = 0$), mức độ chênh lệch ngày càng lớn khi hàm lượng cốt thép chịu kéo càng cao (42% khi $\mu_s = 3\%$).



Hình 2. Mối quan hệ giữa mô men kháng nứt và hàm lượng cốt thép chịu kéo, tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng và theo phương pháp gần đúng, trong trường hợp bỏ qua sự tham gia chịu lực của cốt thép chịu nén ($\dot{\mu}_s = 0$).

Hình 3 thể hiện mối quan hệ giữa mô men kháng nứt M_{cr} của tiết diện dầm bê tông cốt thép và hàm lượng cốt thép chịu nén μ_s tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng (21) và theo phương pháp gần đúng (22) trong trường hợp hàm lượng cốt thép chịu kéo $\mu_s = 2\%$. Ta có thể nhận thấy rằng mô men kháng nứt M_{cr} tính toán theo cả hai phương pháp cũng tăng tỉ lệ tuyến tính với hàm lượng cốt thép

chịu nén μ_s , tuy nhiên mức độ ảnh hưởng của cốt thép chịu nén nhỏ không đáng kể so với ảnh hưởng của cốt thép chịu kéo (Hình 2). Ngoài ra, ta cũng có thể nhận thấy rằng hai đường đồ thị trên Hình 3 gần như song song, điều này chứng tỏ ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu nén μ_s tới mô men kháng nứt M_{cr} tính toán theo hai phương pháp là giống nhau.



Hình 3. Mối quan hệ giữa mô men kháng nứt và hàm lượng cốt thép chịu nén, tính toán theo mô hình ứng xử phi tuyến hai đoạn thẳng và theo phương pháp gần đúng, trong trường hợp hàm lượng cốt thép chịu kéo $\mu_s = 2\%$.

6. Kết luận

Bài báo đã thiết lập các công thức cho phép xác định mô men kháng nứt của tiết diện bê tông cốt thép hình chữ nhật có xét đến ứng xử phi tuyến của vùng bê tông chịu kéo được đơn giản hóa dưới dạng mô hình hai đoạn thẳng quy định trong TCVN 5574 – 2018 [0]. Bài báo cũng đã thực hiện tính toán chi tiết mô men kháng nứt của tiết diện ứng với các hàm lượng cốt thép chịu kéo và hàm lượng cốt thép chịu nén khác nhau, so sánh với mô men kháng nứt được tính toán theo phương pháp gần đúng trình bày trong TCVN 5574 – 2018 [0]. Kết quả tính toán đã chỉ ra rằng:

- Mô men kháng nứt của tiết diện tăng tỉ lệ tuyến tính với hàm lượng cốt thép chịu kéo và hàm lượng cốt thép chịu nén;
- Phương pháp đơn giản hóa và gần đúng được trình bày trong TCVN 5574 – 2018 [0] đánh giá thấp mô men kháng nứt của tiết diện so với phương pháp tính toán theo mô hình hai đoạn thẳng. Chênh lệch giữa hai phương pháp có thể chấp nhận được trong trường hợp hàm lượng cốt thép chịu kéo nhỏ (16% khi $\mu_s = 0$), tuy nhiên mức độ chênh lệch này ngày càng lớn khi hàm lượng cốt thép chịu kéo càng cao (42% khi $\mu_s = 3\%$);
- Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép chịu nén tới mô men kháng nứt của tiết diện nhỏ không đáng kể so với ảnh hưởng của cốt thép chịu kéo. Mức độ gia tăng của mô men kháng nứt tính toán theo hai phương pháp khi tăng hàm lượng cốt thép chịu nén có giá trị tương đương nhau.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 5574 – 2018: Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, NXB Xây dựng, Hà Nội, Việt Nam, 2018.
- [2]. American Concrete Institute, ACI 318 – 19: Building code requirements for structural concrete and commentary, Farmington Hills, Michigan, USA, 2019.
- [3]. European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1), Brussels, Belgium, 2004.
- [4]. 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 Khoa học Công nghệ Xây dựng, 14 (2020) 62 – 69.
- [5]. Nguyễn Ngọc Linh, Nguyễn Ngọc Tân, Nguyễn Văn Quang, 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 và Công nghệ Việt Nam, 62 (2020) 36 – 41.
- [6]. Phạm Quang Đạo, Phạm Thanh Tùng, Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về mô men kháng nứt của dầm geopolymere cốt thép, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, 14 (2020) 14 – 25.