

Tính toán cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn và nén lệch tâm theo sự hình thành vết nứt với mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông

Calculation bending and biaxial bending of reinforced concrete element based on nonlinear deformations model of concrete

Ngày nhận bài: 15/7/2017

Ngày sửa bài: 9/8/2017

Ngày chấp nhận đăng: 5/9/2017

Đào Văn Cường, Nguyễn Hồng Sơn,
Nguyễn Tiến Nghĩa

TÓM TẮT:

Bài báo giới thiệu về Phương pháp tính toán cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn và nén lệch tâm theo sự hình thành vết nứt, mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông, dựa theo Chỉ dẫn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép của Nga, SP 63.13330.2012. Thực hiện ví dụ số, nhằm làm sáng tỏ cách tính toán vừa nêu đối với cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn hoặc nén lệch tâm. Từ khóa: cấu kiện bê tông, hình thành vết nứt, mô hình biến dạng phi tuyến.

ABSTRACT:

This article introduces the calculation method for bending and biaxial bending of reinforced concrete element, based on nonlinear deformations model of concrete to Russian standard SP 63.13330.2012. Examples to illustrate the calculation panel slab with prestress reinforcing bar.

Keyword: reinforced concrete element, crack formation, nonlinear deformations model.

Đào Văn Cường, Nguyễn Hồng Sơn

Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Nguyễn Tiến Nghĩa

Phân Viện Khoa học Công nghệ xây dựng Miền Nam

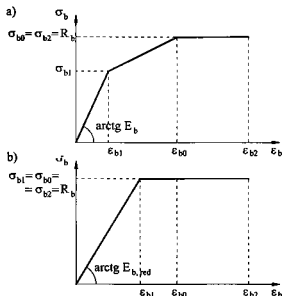
1. Đặt vấn đề

Dầm, sàn và cột là các bộ phận chịu lực cơ bản của công trình, chúng rất phổ biến trong thực tế xây dựng. Về mặt chịu lực, chúng thường là các cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn hoặc nén lệch tâm. Các cấu kiện bê tông cốt thép nói chung, khe nứt có thể xuất hiện do nhiều nguyên nhân, một trong số đó là bởi trong tiết diện xuất hiện ứng suất kéo vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông. Khe nứt khó có thể nhìn thấy được, ngoại trừ khe nứt có bề rộng 0,005 mm trở lên. Khe nứt làm cho công trình mất khả năng chống thấm, cốt thép không được bê tông bảo vệ gây ăn mòn bởi tác động xâm thực từ môi trường, nên việc tính toán khả năng chống nứt của tiết diện nào đó trên cấu kiện bê tông cốt thép, đặc biệt đối với cấu kiện chịu uốn và nén lệch tâm, là cần thiết. Thấy rằng, các quy định tính toán về sự hình thành vết nứt đã được đề cập trong các tài liệu tiêu chuẩn kết cấu bê tông cốt thép của Việt Nam [2], nhưng đối với bê tông cốt thép không ứng suất trước (như ở tài liệu [1]), hoặc việc quy định chưa được đầy đủ (như ở tài liệu [2]) v.v.. Công thấy rằng, tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép TCVN 5574:2012 của Việt Nam được chuyển dịch từ tiêu chuẩn CHN 2.03 01 84 của Liên xô cũ (Nga), nhưng hiện nay phiên bản cập nhật CII 63.13330.2012 [4] của Nga đã được ban hành, nội dung có đề cập nhiều vấn đề mới, một trong số đó là việc tính toán cấu kiện của các kết cấu bê tông cốt thép theo trạng thái giới hạn thứ hai, về sự hình thành và mở rộng vết nứt cũng như tính toán về biến dạng, theo mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông. Các nội dung đề cập dưới đây sẽ giới thiệu một phần nội dung về việc tính toán hình thành vết nứt cho cấu kiện chịu uốn và nén lệch tâm, mô hình biến dạng phi tuyến hai đoạn thẳng.

2. Cơ sở tính toán

2.1. Biểu đồ trạng thái của bê tông

Có thể sử dụng bất kỳ biểu đồ trạng thái (quan hệ ứng suất và biến dạng tương đối) của bê tông, biểu đồ này có dạng đường cong hoặc được tuyến tính hóa từng đoạn, dạng ba đường thẳng hoặc hai đường thẳng (Hình 1). Trong tính toán thực hành sử dụng biểu đồ dạng hai đường hoặc ba đoạn thẳng, giá trị các tọa độ ứng với các điểm chính được quy định trong tài liệu tiêu chuẩn [4]. Theo đó, đối với biểu đồ ba đoạn thẳng, ứng suất $\sigma_{b1} = 0,6R_b$, biến dạng tương đối $\epsilon_{b1} = \sigma_{b1}/E_b$, giá trị biến dạng tương đối ϵ_{b2} phụ thuộc vào loại bê tông và tác dụng ngắn hạn/dài hạn của tải trọng (ví dụ bê tông nặng, khi có tác dụng ngắn hạn của tải trọng, $\epsilon_{b2} = 0,0035$), các giá trị R_b , E_b và ϵ_{b0} được lấy theo tài liệu, tiêu chuẩn [2, 4]; đối với biểu đồ hai đoạn thẳng, biến dạng tương đối quy đổi của bê tông được lấy phụ thuộc vào loại bê tông và tác dụng ngắn hạn/dài hạn của tải trọng (ví dụ bê tông nặng, khi có tác dụng ngắn hạn của tải trọng, $\epsilon_{b,đổi} = 0,0015$).



Hình 1 Biểu đồ trạng thái bê tông

(a – dạng ba đường thẳng, b – dạng hai đường thẳng)

2.2. Các giả thiết tính toán

- Tiết diện sau khi biến dạng vẫn phẳng;

- Biểu đồ ứng suất trong vùng nén của bê tông dạng tam giác, như đối với vật liệu đàn hồi;

- Biểu đồ ứng suất trong vùng kéo của bê tông lấy dạng hình thang, với ứng suất không vượt quá cường độ chịu kéo tính toán của bê tông $R_{bt,calc}$;

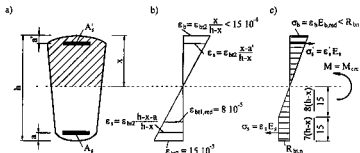
- Biến dạng tương đối của thép chịu kéo ngoài cùng của bê tông lấy bằng giá trị giới hạn $\epsilon_{b0,ul}$ khi có tác dụng ngắn hạn của tải trọng; khi biểu đồ biến dạng trong tiết diện cấu kiện với biến dạng có hai đầu (âm, dương), lấy $\epsilon_{b0,ul} = 0,00015$;

- Ứng suất trong cốt thép lấy phụ thuộc vào biến dạng tương đối, như vật liệu đàn hồi.

2.3. Một số quy định chung

Tính toán hình thành vết nứt cho cấu kiện bê tông cốt thép, tính đến tác động của tải trọng tính toán – như khi tính toán độ bền (hệ số độ tin cậy về tải trọng $\gamma_t > 1,0$), không cho phép hình thành vết nứt do khả năng phá hoại dẫn gây gỉ cốt thép, các cấu kiện gồm:

a) cấu kiện được sử dụng trong môi trường xâm thực cao, cốt thép chịu lực theo TCVN 6284-2:1997, TCVN 6284-4:1997 hoặc tương đương



Hình 2 Để xác định mô men tạo thành vết nứt cho cấu kiện chịu uốn tiết diện bất kỳ

(a – sơ đồ tiết diện; b – biểu đồ biến dạng; c – biểu đồ ứng suất)

nhóm Bp1200, Bp1400, K1400, K1500 (K-19) và K1500 (K-7) với đường kính 12 mm theo CII 63.13330.2012.

b) các cấu kiện được sử dụng trong môi trường xâm thực cao và trung bình, cốt thép chịu lực theo TCVN 6284-5:1997, TCVN 6284-4:1997 hoặc tương đương nhóm A800, A1000, Bp1500 và K1500(K-7) với đường kính 6+9mm theo CII 63.13330.2012.

Đối với các cấu kiện đã chỉ ra, tất nhiên, không cần tiến hành tính toán theo sự mở rộng vết nứt.

Đối với các cấu kiện khác, tính toán theo sự hình thành vết nứt có ý nghĩa phụ trợ và được tiến hành nhằm xác định lực, tương ứng với việc hình thành vết nứt. Lực này được sử dụng trong tính toán theo sự mở rộng vết nứt và biến dạng, khi kể đến sự phân bố không đều của biến dạng cốt thép giữa các vết nứt (hệ số Ψ_s), và để xác định đoạn cấu kiện không có vết nứt khi tính toán độ võng. Tính toán hình thành vết nứt cũng cần thiết khi tính toán theo sự mở rộng vết nứt.

Khả năng chống nứt của cấu kiện bê tông cốt thép, phụ thuộc vào điều kiện làm việc và loại cốt thép được dùng, chia thành ba cấp: cấp 1 – không cho phép xuất hiện vết nứt; cấp 2 – cho phép xuất hiện khe nứt nhưng khép lại khi dỡ tải trọng tạm thời; cấp 3 – cho phép xuất hiện khe nứt ngắn hạn với bề rộng hạn chế $a_{cr,t}$, và cho phép xuất hiện khe nứt dài hạn nhưng với bề rộng hạn chế $a_{cr,l}$ [1].

3. Lý thuyết tính toán

3.2.1. Tính toán cấu kiện chịu uốn

Đối với cấu kiện chịu uốn, tính toán theo điều kiện tạo thành vết nứt đầu tiên

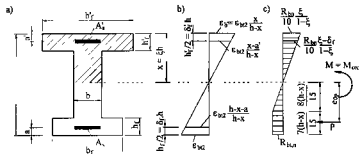
$$M \leq M_{cr,t} \quad (4.1)$$

trong đó

M – mô men uốn, do tải trọng ngoài đối với trục vuông góc với mặt phẳng tác dụng của mô men uốn và đi qua trọng tâm tiết diện ngang quy định của cấu kiện;

$M_{cr,t}$ – mô men uốn, do ngoại lực tại tiết diện thẳng góc của cấu kiện chịu khi hình thành vết nứt, chính là khả năng chống nứt của cấu kiện, được xác định dựa vào đặc trưng vật liệu, kích thước tiết diện hoặc điều kiện làm việc khi chịu tải trọng v.v...

Trong trường hợp chung, chỉ dẫn [3, 4] khuyến nghị xác định giá trị $M_{cr,t}$ trên cơ sở mô hình biến dạng phi tuyến, sử dụng biểu đồ trạng thái bê tông $\sigma_b - \epsilon_b$ hai đoạn thẳng, đối với bê tông chịu kéo và chịu nén kể đến tác động dài hạn của tải trọng. Khi đó, tác động của $M_{cr,t}$ sẽ tương ứng với đạt được trong thứ tự chịu kéo ngoài cùng của bê tông biến dạng tương đối $\epsilon_{b0,t} = 15 \cdot 10^{-5}$, còn biểu đồ biến dạng của bê tông trong tiết diện sẽ có dạng Hình 2b.



Hình 3 Để xác định mô men tạo thành vết nứt cho cấu kiện bê tông tiết diện chữ I

(a – sơ đồ tiết diện; b – biểu đồ biến dạng; c – biểu đồ ứng suất)

Khi đó, sử dụng giá trị cường độ tiêu chuẩn của bê tông chịu kéo và chịu nén R_{bt} và R_{bt} . Khi biến dạng của thép bê tông chịu nén ngoài cùng $\epsilon_b < \epsilon_{b0,t} = 15 \cdot 10^{-5}$, ứng suất tại thứ tự chịu nén bằng $\sigma_b = \epsilon_b E_{b0,t}$, còn biểu đồ ứng suất nén có đặc trưng tuyến tính. Biểu đồ ứng suất chung trong trường hợp này biểu diễn ở Hình 2c.

Trong vùng có $\epsilon_b > \epsilon_{b0,t,reg}$, ứng suất nén bằng R_{bt} .

Chiều cao vùng nén x được xác định từ phương trình cân bằng nội lực và ngoại lực.

a) Đối với cấu kiện chịu uốn không ứng suất trước

Do trong cấu kiện chịu uốn không ứng suất trước, lực dọc bên ngoài bằng không, phương trình cân bằng lực có dạng $N_k = N_k$ trong đó N_k - lực trong bê tông chịu nén và cốt thép chịu kéo; N_k - lực trong bê tông chịu kéo và cốt thép chịu kéo.

Đối với tiết diện có hình dạng bất kỳ, phương trình này được giải bằng cách xấp xỉ liên tiếp, ở xấp xỉ đầu tiên lấy giá trị $x = 0,5h$, còn giá trị N_k và N_k được xác định theo tích phân số, khi tiết diện trong phương trình phẳng uốn (vuông góc với trục trung hòa), được chia thành những đoạn có bề rộng nhỏ, ứng suất trong đó được lấy phân bố đều và tương ứng với biến dạng tại mốc của các đoạn theo biểu đồ $\sigma - \epsilon$, đối với bê tông chịu kéo và nén. Tính toán như thế sẽ phù hợp khi tiến hành bằng các chương trình máy tính.

Đối với tiết diện hình chữ nhật, chữ T và chữ I, giá trị x có thể xác định bằng phương pháp giải tích và nghiệm của phương trình bậc hai.

(1) Tính toán cho tiết diện chữ nhật

Sẽ thiết lập phương trình này cho tiết diện chữ nhật, đây là phương trình đơn giản nhất.

Khi $\delta_k < \delta_{b1,rel}$, công thức của ứng suất thử chịu nén nhiều nhất có dạng

$$\sigma_b = \epsilon_{b12} \frac{x}{h-x} \cdot \frac{R_{bt}}{\epsilon_{b1,rel}} = \frac{R_{bt}}{10} \frac{x}{h-x}$$

$$\text{Ứng suất trong cốt thép chịu nén bằng } \sigma'_s = \frac{x-a'}{h-x} E_s,$$

$$\text{còn khi } E_s = 200000 \text{ MPa, } \sigma'_s = 30 \frac{x-a'}{h-x} (\text{MPa}).$$

$$\text{Khi đó } N_k = \sigma_b \frac{bx}{2} + \sigma'_s A'_s = \frac{R_{bt}}{20} \frac{bx^2}{h-x} + \frac{30(x-a')}{h-x} A'_s$$

Nội lực trong bê tông chịu kéo bằng

$$N_k = \left[\frac{7}{15}(h-x) + \frac{8}{215}(h-x) \right] R_{bt,b} = \frac{11}{15} b(h-x) R_{bt,b}$$

còn trong cốt thép chịu kéo

$$N_{s1} = \epsilon_{b12} \frac{h-x-a}{h-x} E_s A_s = \frac{30(h-x-a) A_s}{h-x}$$

Phương trình cân bằng có dạng

$$\frac{R_{bt,b}}{20} bx^2 + 30A'_s x - 30A_s a' = \frac{11}{15} R_{bt,b} (h^2 - 2hx + x^2) + 30A_s (h-a) - 30A_s x \quad (2)$$

Lấy các đạo hàm tương đối:

$$\alpha_s = \frac{30}{R_{bt,b}} \frac{A_s}{bh}; \quad a'_s = \frac{30}{R_{bt,b}} \frac{A'_s}{bh}; \quad r = \frac{R_{bt,b}}{10R_{bt,b}}; \quad \delta_s = \frac{a}{h}; \quad \delta'_s = \frac{a'}{h}$$

Sau khi biến đổi đại số, sẽ nhận được nghiệm phương trình bậc hai có dạng

$$\xi = \frac{x}{h} = Z = \sqrt{Z^2 - \frac{0,733 + \alpha_s(1-\delta_s) + \alpha'_s \delta'_s}{0,733 - 0,5r}} \quad (3)$$

$$\text{trong đó } Z = \frac{0,733 + (\alpha_s + \alpha'_s) / 2}{0,733 - 0,5r}$$

Khi bê tông cấp bền B50 và lớn hơn, khi đó $0,5r > 0,733$, trong công thức (3) trước dấu căn sẽ lấy dấu "cộng".

Giá trị M_{rel} là mô men của nội lực đối với trục bất kỳ, nhưng thuận lợi nhất, mô men này xác định đối với trục trung hòa. Khi đó, cũng sử dụng các đặc trưng tương đối sẽ nhận được:

$$M_{rel} = R_{bt,b} b h^2 \left[0,4526(1-\xi)^2 + \frac{r\xi^3 / 3 + (\xi - \delta'_s)^2 \alpha'_s}{1-\xi} \right] \quad (4)$$

(2) Tính toán cho tiết diện chữ T và chữ I

Khi đó, có các cánh nằm trong vùng nén và vùng kéo (Hình 3), lấy các giá trị tương đối của diện tích cánh

$$\alpha_{ov} = \frac{b_1 - b}{bh}; \quad \alpha_{ov} = \frac{b_1 - b}{bh} h_1; \quad \delta_1 = \frac{h_1}{2h}; \quad \delta'_1 = \frac{h'_1}{2h}$$

Có thể xác định chiều cao vùng nén từ phương trình bậc hai, tương tự theo các công thức sau, phụ thuộc vào chiều cao cánh chịu kéo.

$$\text{(a) Khi } h_1 \leq \frac{7}{15}(h-x) \text{ hoặc khi } \left[\delta_1 \leq \frac{7}{30}(1-\xi) \right]$$

$$\xi = \frac{x}{h} = Z \pm \sqrt{Z^2 - \frac{0,733 + \alpha_s(1-\delta_s) + \alpha'_s \delta'_s + r\delta_1 \alpha'_{ov}}{0,733 - 0,5r}} \quad (5)$$

trong đó

$$Z = \frac{0,733 + (\alpha_s + \alpha'_s + r\alpha'_{ov}) / 2 + \alpha_{ov} / 2}{0,733 - 0,5r}$$

$$\text{(b) Khi } h_1 > \frac{7}{15}(h-x) \text{ hoặc khi } \left[\delta_1 > \frac{7}{30}(1-\xi) \right]$$

$$\xi = \frac{x}{h} = Z \pm \sqrt{Z^2 - \frac{\left[0,733 + \alpha_s(1-\delta_s) + \alpha'_s \delta'_s + r\delta_1 \alpha'_{ov} \right] + \left[3,75\delta_1(1-\delta_1) - 0,204 \right] (b_1 / b - 1)}{0,733 - 0,5r - 0,204(b_1 / b - 1)}} \quad (6)$$

trong đó

$$Z = \frac{0,733 + (\alpha_s + \alpha'_s + r\alpha'_{ov}) / 2 + (1,875\delta_1 - 0,204)(b_1 / b - 1)}{0,733 - 0,5r - 0,204(b_1 / b - 1)}$$

Khi $Z > 0$, trong các công thức (5) và (6) lấy dấu "trừ", khi $Z < 0$, tương ứng lấy dấu "cộng".

Bắt đầu tính toán có thể từ công thức (5), và khi không thỏa mãn điều kiện thứ nhất thì sử dụng công thức (6).

Giá trị M_{rel} xác định theo công thức

$$M_{rel} = R_{bt,b} b h^2 \left\{ 0,4526(1-\xi)^2 + \frac{r\xi^3 / 3 + (\xi - \delta'_s)^2 \alpha'_s}{(1-\xi)} + m_{ov} \right\} \quad (7)$$

trong đó m_{ov} - mô men tương đối của lực trong cánh chịu kéo đối với trục trung hòa, bằng:

$$\text{khi } 2\delta_1 \leq \frac{7}{15}(1-\xi); \quad m_{ov} = \alpha_{ov}(1-\xi-\delta_1);$$

$$\text{khi } 2\delta_1 > \frac{7}{15}(1-\xi);$$

$$m_{ov} = \alpha_{ov}(1-\xi-\delta_1) - \left[2\delta_1 - \frac{7}{15}(1-\xi)^2 \right] \left(\frac{b_1}{b} - 1 \right) / 2.$$

b) Đối với cấu kiện chịu uốn có ứng suất trước

Khi tính toán theo trạng thái giới hạn hai, lực nén trước P được kể đến như ngoại lực, do trong các tính toán như vậy, ứng suất trong cốt thép không cần đạt đến giới hạn chảy (quy ước hoặc vật lý). Phương trình cân bằng có dạng

$$N_n = N_s + P.$$

(1) Tính toán cho tiết diện chữ nhật

Phương trình sẽ chuyển thành phương trình tương tự như (2) với việc bổ sung vào vế phải đại lượng $(p/h-x)$, và khi đó, công thức cho $\xi = x/h$ sẽ chuyển thành dạng

$$\xi = \frac{x}{h} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{0,733 + \alpha_s (1 - \delta_s) + \alpha_s \delta_s + P}}{0,733 - 0,5r} \quad (8)$$

trong đó

$$\alpha = \frac{0,733 + (\alpha_s + \alpha_s' + p)/2}{0,733 - 0,5r};$$

$$p = \frac{P}{R_{n,bh}} - \text{giả trị tương đối của lực nén trước.}$$

(2) Tính toán cho tiết diện chữ T và chữ I

Đối với tiết diện có các cánh nằm trong vùng chịu kéo và nén, các công thức (5) và (6) được viết chính bằng cách tương tự. Trong từ số của Z bổ sung 0,5p, còn trong từ số của số hạng thứ hai dưới dấu căn thì bổ sung -p.

Giá trị M_{acc} xác định theo công thức (4) và (7) với việc bổ sung mô men của lực nén trước đối với trục trung hòa $P e_{0b}$ (Hình 3). Phương của mô men này cần trùng với phương của mô men nội lực. Trong trường hợp ngược lại, mô men $P e_{0b}$ sẽ làm giảm giá trị M_{acc} .

Đối với các cấu kiện ứng suất trước, khi tác dụng mô men M_{acc} chiếu cao của vùng kéo bị giảm đáng kể, còn chiều cao của vùng nén được tăng lên so với các cấu kiện không ứng suất trước. Vì thế, biến dạng lớn nhất của bề tổng vận hành ε_{tk} có thể vượt quá giá trị $\varepsilon_{tk,red} = 15 \cdot 10^{-4}$, và suy ra, đối với phần nén của bề tổng cần lấy thông qua ứng suất bằng R_{bn} và nhỏ hơn, so với tính toán đàn hồi tương ứng.

Giá trị giới hạn của chiều cao vùng nén, trong trường hợp này, được xác định từ phương trình

$$\varepsilon_{tk,red} = \varepsilon_{tk} \frac{x}{h-x}$$

$$\text{từ đó } x_p = x = \frac{\varepsilon_{tk,red}}{\varepsilon_{tk,red} - \varepsilon_{tk2}} h = 0,909h$$

Đạt được chiều cao giới hạn vùng nén tương ứng với lực nén trước, bằng

$$P_p = 0,55 R_{bn} [b(h' - b) + (b' - b)h' + E_s / E_{s,red} A_s'].$$

Theo đó, nếu giá trị ξ xác định theo (2), (4) và (5) (có kể đến P) lớn hơn 0,909, tương ứng giá trị M_{acc} được nâng cao một cách không hợp lý. Tuy nhiên, lý này có giá trị không lớn do giá trị của M_{acc} là đáng kể, trong trường hợp này xác định bởi giá trị của P , chiều rộng mở rộng vết nứt thường không lớn, còn độ cứng của cấu kiện gần với độ cứng tương ứng với khi không có vết nứt. Ngoài ra, khi thiết kế không khuyến nghị lấy giá trị P lớn hơn P_p .

Trong chỉ dẫn [3] để xuất phương pháp đơn giản hóa để xác định M_{acc} dựa trên cơ sở xác định ứng suất trước kéo ở biên của bề tổng như đối với vật liệu đàn hồi. Theo công thức đã biết của sức bền vật liệu, ứng suất này bằng

$$\sigma_{st} = \frac{M - P e_0}{W_{red}} - \frac{P}{A_{red}} \quad (9)$$

trong đó

W_{red} và A_{red} – mô men chống uốn và diện tích của tiết diện cấu kiện quy đổi với hệ số quy đổi thép và bê tông $\alpha = E_s / E_b$. Khi đó, mô men chống uốn xác định cho thứ chịu kéo bên dưới;

e_0 – độ lệch tâm của lực nén trước P đối với trục tâm tiết diện quy đổi.

Lấy $M = M_{acc}$ và $\sigma_{st} = R_{st,n}$ nhận được

$$M_{acc} = R_{st,n} W_{red} + P (e_0 + r_s^2) \quad (10)$$

trong đó $r_s^2 = I_{red}/A_{red}$ – khoảng cách từ trọng tâm tiết diện quy đổi đến cánh chịu kéo xa nhất của điểm lõi phía trên.

Cách xác định M_{acc} khi $P < P_p$ cho dự trữ đáng kể đối với việc tính toán theo trạng thái giới hạn thứ hai, vì thế nó được dùng cho tính toán sơ bộ.

Trong trường hợp không thỏa mãn các yêu cầu của các tính toán tương ứng trong chỉ dẫn [3], khuyến nghị hiệu chỉnh W_{red} bằng cách nhân nó với hệ số γ , phụ thuộc vào các tỷ lệ b'/b ; h'/h , b/b , h/h và được đưa ra trong Bảng 4.1 của tài liệu [3]. Cách như vậy cũng đã được đề cập trong các giáo trình, tài liệu được xuất bản trước đây của Nga.

Tuy nhiên, so sánh một cách chi tiết các tính toán theo mô hình biến dạng không đàn hồi và các phương pháp đã đề xuất, chỉ ra rằng, hệ số γ này rất không chính xác, bởi vì không phản ánh ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác như hàm lượng cốt thép, cấp độ bền bê tông, mức độ nén trước, mặc dù trong đa số trường hợp nó cho dự trữ nào đó.

Nếu các đặc trưng hình học của tiết diện xác định với hệ số quy đổi cốt thép về bê tông bằng $\alpha = E_s/E_{st,red}$ thì hệ số $\gamma = \frac{M_{acc} - P(e_0 + r_s^2)}{R_{st,n} W_{red}}$

(trong đó M_{acc} – mô men được tính toán theo mô hình biến dạng) sẽ phụ thuộc ở mức độ nhỏ hơn, bởi các yếu tố đã chỉ ra và trong tất cả các trường hợp có thể lấy bằng 1,15 khi $b'/b < 2$, bằng 1,2 cho các trường hợp khác.

Trong giai đoạn chế tạo, vận chuyển và lắp đặt kết cấu ứng suất trước, do kết quả tác động đồng thời của lực nén trước đặt lệch tâm và lực do trọng lượng bản thân, tại vùng phía trên của cấu kiện xuất hiện ứng suất kéo và có thể hình thành vết nứt.

Để phân tích sự cần thiết của việc tính toán mở rộng vết nứt trong vùng này, và để tính toán chính xác diện tích mở rộng vết nứt lớn nhất theo cạnh phía trên, cần kiểm tra theo sự hình thành vết nứt. Các tiết diện như thế thường nằm tại các vị trí kê cấu kiện (móc cấu, các lỗ để móc...). Trong trường hợp này, kể đến mô men gây kéo vùng phía trên, bằng $M = qa/2$, trong đó a – khoảng cách từ điểm kê đến điểm đầu cấu kiện, q – tải trọng tính chuẩn do trọng lượng bản thân của cấu kiện, có kể đến hệ số 1,4. Trong quá trình vận chuyển cấu kiện, cần kể đến hệ số động lực lớn hơn 1,6, nhưng khi đó, giá trị a cần lấy là khoảng cách từ đầu cấu kiện đến vị trí điểm kê. Ngoài ra, khi cốt thép ứng suất trước không có neo, cần kể đến lực nén trước trong giới hạn chiều dài truyền ứng suất L_p , có nghĩa là giảm vận chuyển tính từ đầu cho đến 0, tức là khi lực nén trước cần lấy bằng P/L_p . Nhưng trường hợp như vậy thường không phải là trường hợp tính toán, và khi đó tiết diện tính toán được lấy ở khoảng cách L_p từ đầu cấu kiện khi cần thiết toàn bộ lực nén trước P và mô men do trọng lượng bản thân tương ứng biểu đồ mô men M .

Tính toán hình thành vết nứt trong giai đoạn này, nói chung, được tiến hành trên cơ sở mô hình biến dạng phi tuyến. Khi đó, cường độ bề tổng chịu kéo $R_{st,n}$ được lấy theo cấp độ bền của bê tông, sẽ bằng với cường độ giới hạn của bề tổng R_{bp} , còn lực nén trước P chỉ kể đến các tổn thất nhỏ nhất về ứng suất.

Sự khác nhau về tính toán như thế so với các tính toán trước đây ở chỗ, các cánh chịu kéo và chịu nén đã thay đổi vị trí, còn phương của mô men bên ngoài M trùng với phương của mô men do lực nén trước $P e_{0b}$. Vì thế, tất cả các công thức (3), (5) và (6) để xác định γ vẫn không thay đổi khi quy nguyên ý nghĩa của các đại lượng h' và b' như kích thước của cánh chịu nén (tức là vùng phía dưới), và các đại lượng h và b như kích thước của cánh chịu kéo (tức là vùng phía trên). Giá trị xác định theo công thức (4) và (7), được giảm đi với giá trị $P e_{0b}$. Nếu trong kết

quả, giá trị M_{acc} là âm, điều đó có nghĩa là vết nứt ở vùng trên được hình thành do tác động chỉ do lực nén trước.

Xác định đơn giản mô men M_{acc} theo công thức

$$M_{acc} = \gamma R_{bt,n} W_{acc} - P(e_0 + r_s), \quad (11)$$

trong đó

W_{acc} – mô men chống uốn của tiết diện quy đổi phần cánh chịu kéo phía trên;

r_s – khoảng cách từ trọng tâm của tiết diện quy đổi đối với vùng lõi phía dưới.

Hệ số γ cũng có thể lấy như trong giai đoạn sử dụng, kể đến vì trị mới của các cánh với kích thước h'_1, b'_1, h'_2, b'_2 .

Các đặc trưng của tiết diện quy đổi, để đơn giản hóa tính toán, có thể xác định như hệ số quy đổi α , giống như khi tính toán ở giai đoạn sử dụng.

Xác định mô men hình thành vết nứt M_{acc} , cần thiết đối với các cấu kiện có hàm lượng cốt thép nhỏ, bởi vì sự mất khả năng chịu lực của cấu kiện mái và sàn có thể xảy ra đối với việc hình thành vết nứt và sự phá hoại có đặc tính dòn đột ngột, điều đó là đặc biệt nguy hiểm. Trong các trường hợp thông thường, giới hạn mô men theo độ bền M_{bh} thường lớn hơn đáng kể so với mô men hình thành vết nứt, liên quan tới việc phá hủy đồng hành của vết nứt và biến dạng đáng kể. Điều đó cho phép khi sử dụng kết cấu áp dụng một số biện pháp: để bắt tải trọng, thiết lập các gia cố cần thiết v.v. các vết nứt và độ võng lớn thường báo hiệu khả năng phá hoại. Nếu $M_{acc} > M_{bh}$ thì các dấu hiệu như vậy là không có. Khi hình thành vết nứt (tức là khi mô men bên ngoài lớn hơn đáng kể mô men bên, do kết quả của sự quá tải ngẫu nhiên), thì nơi lúc được chịu bởi cốt thép trong vết nứt vượt quá khả năng chịu lực của cốt thép, và sẽ xảy ra sự phá hoại dòn đột ngột.

Liên quan điều đó, thường các kết cấu được chỉ dẫn thiết kế sao cho $M_{bh} > M_{acc}$. Nếu thỏa mãn điều kiện này, tức là không cần thiết, theo tài liệu [3] thì diện tích tiết diện cốt thép dọc chịu kéo cần phải tăng lên so với yêu cầu khi tính toán về chịu lực, không nhỏ hơn 15% hoặc cần thỏa mãn tính toán theo chịu lực dưới tác động của mô men lấy với mô men M_{acc} , tức là giả thiết rằng, sự vượt quá mô men bên ngoài quá 15% mô men tối hạn vẫn xác suất rất nhỏ.

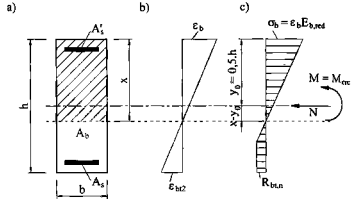
Giá trị M_{acc} trong trường hợp này xác định như chỉ ra trên đây, tức là, với cường độ tiêu chuẩn của bê tông, còn mô men chịu lực M_{bh} xác định với cường độ tính toán của bê tông và cốt thép.

3.2.2. Tính toán cấu kiện chịu nén lệch tâm

Trong các cấu kiện chịu nén lệch tâm, trường hợp khi độ bền của tiết diện được xác định bởi độ bền của cốt thép chịu kéo sẽ xuất hiện vết nứt, bề rộng của chúng có thể vượt quá giá trị cho phép. Vì thế trong trường hợp này, cần tính toán cốt và trụ theo sự hình thành vết nứt. Điều đó đặc biệt cần thiết khi sử dụng kết cấu trong môi trường xâm thực.

Tính toán cốt (trụ) theo hình thành vết nứt cũng được tiến hành theo điều kiện (1). Trong đó M – mô men do ngoại lực, nhân được bởi tính toán tĩnh học; M_{acc} – mô men của nội lực, trước khi xuất hiện vết nứt đối với trục đi qua trọng tâm của tiết diện bê tông.

Khi tính toán cốt đến mô hình hình dạng phi tuyến, giá trị của mô men M_{acc} xác định đối với trục trung hòa, bao gồm trong đó, mô men của nội lực dọc (bằng với ngoại lực N) đặt tại trọng tâm đối với trục trung hòa. Ví thể, mô men M_{acc} được tính từ trọng điều kiện (1) cũng được xác định đối với trục trung hòa với việc giảm đi $(N \cdot y_0)$, trong đó x – chiều cao vùng nén của tiết diện bê tông; y_0 – khoảng cách từ trọng tâm đến cạnh chịu nén của cấu kiện (Hình 4).



Hình 4. Để xác định mô men hình thành vết nứt của cấu kiện chịu nén lệch tâm (a – sơ đồ tiết diện; b – biểu đồ biến dạng; c – biểu đồ ứng suất)

Chiều cao vùng nén của cấu kiện, được xác định như đối với cấu kiện chịu uốn ứng suất trước, với việc thay lực nén trước P bằng lực N .

Do cấu kiện chịu nén lệch tâm thường là các cốt tiết diện chữ nhật với cốt thép đối xứng, biến đổi công thức (8) cho các tiết diện như vậy

$$\xi = \frac{x}{h} = Z - \sqrt{Z^2 - \frac{0,733 + \alpha_s + n}{0,733 - 0,5r}},$$

trong đó

$$Z = \frac{0,733 + \alpha_s + 0,5n}{0,733 - 0,5r}, \quad (12)$$

còn mô men M_{acc} bằng

$$M_{acc} = R_{bt,n} b h^2 \left\{ \frac{[r\xi^2/3 + (\xi - \delta_2)^2]^2}{1 - \xi} + \frac{+(1 - \xi - \delta_1)^2}{1 - \xi} \right\} - n(\xi - 0,5) \quad (13)$$

trong đó $n = \frac{N}{R_{bt,n} b h}$, $r, \alpha_s, \delta_1, \delta_2$ – cm, xem công thức (2).

Các công thức này, như lưu ý trên đây, chỉ được sử dụng khi $\epsilon_s \leq \epsilon_{s1,red} = 15.10^{-4}$. Xác định giá trị giới hạn của lực N , khi cho phép sử dụng các công thức này.

Từ điều kiện cân bằng của lực dọc, ta có

$$N = \frac{R_{bt,n} b x}{2} + E_s \epsilon_{s,red} \frac{x - \alpha}{x} A_s - R_{s,b} b (h - x) \frac{11}{15} - E_s \epsilon_{s,red} \frac{h - x - \alpha}{h - x} A_s$$

Lấy $x = x_{np} = h/1,1$, và thay tất cả các số hạng cho $R_{bt,n} b h$, nhận được

$$n_{np} = \frac{R_{bt,n} b h}{R_{s,b} b h} = \frac{5r}{1,1} + \left(\frac{1}{1,1} - \delta_1 \right) 11 \alpha_s - \frac{1}{15} - \left(\frac{1}{15} - \delta_2 \right) 11 \alpha_s = 4,545r - 0,0667 + 9 \alpha_s$$

Khi $N > n_{np} R_{s,b} b h$, biểu đồ ứng suất trong bê tông chịu nén sẽ có đặc tính hình thang.

Tuy nhiên, trong trường hợp này có tính quyết định là do bên của bê tông chịu nén, M_{acc} sẽ gần bằng hoặc lớn hơn mô men bên ngoài, còn chiều rộng mở rộng vết nứt trong trường hợp hình thành sẽ không lớn.

Vì thế, nếu $N > n_{np} R_{s,b} b h$ thì tính toán hình thành vết nứt có thể không cần tiến hành.

Trong chỉ dẫn [3] đã đề xuất phương pháp đơn giản hóa để xác định M_{acc} , tương tự như xác định M_{acc} cho cấu kiện ứng suất trước, với việc thay giá trị P bằng N và với $e_0 = 0$, tức là

$$M_{acc} = \gamma R_{bt,n} W_{acc} + N r_s. \quad (14)$$

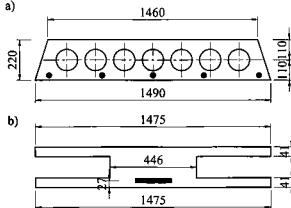
Trong trường hợp, nếu giá trị W_{red} và $r_a = W_{red} / A_{red}$ xác định với hệ số quy đổi $\alpha = E_s E_{sh} / R_{sh}$, hệ số γ cho tiết diện chữ nhật có thể lấy bằng 1,1.

Đối với tiết diện chữ nhật có cốt thép đặt đối xứng, W_{red} và A_{red} bằng

$$W_{red} = bh^2 / 6 + \alpha A_s (h - 2a)^2 / h; \quad A_{red} = bh + 2\alpha A_s$$

4. Ví dụ tính toán

Minh họa cho phương pháp tính toán xác định mô men hình thành vết nứt M_{cr} , có kể đến mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông, bằng ví dụ tính toán đối với tấm sàn nhiều lỗ rỗng theo Hình 5; bê tông cấp bền B20 ($R_{btm} = 1,35 \text{ MPa}$, $R_{btv} = 15 \text{ MPa}$); cốt thép dọc lấy A-800, diện tích tiết diện $A_s = 565 \text{ mm}^2$ (5φ12); lực nén trước (tính đến tất cả các hao hụt) $P = 200 \text{ kN}$ [5].



Hình 5. Cho ví dụ tính toán

(a - tiết diện tấm thực tế; b - tiết diện tấm quy đổi tương đương)

Tính toán theo Hình 5, có $h = 200 \text{ mm}$, $b = 466 \text{ mm}$, $b_t' = b_t = 1475 \text{ mm}$, $h_t' = h_t = 41 \text{ mm}$, $a = 27 \text{ mm}$

Xác định giá trị M_{cr} trên cơ sở mô hình biến dạng phi tuyến.

Tính các đặc trưng tương đương:

$$r = \frac{R_{btv}}{10R_{btm}} = \frac{15}{10 \cdot 1,35} = 1,1; \quad \delta_s = \frac{a}{h} = \frac{27}{220} = 0,123;$$

$$\alpha_s = \frac{30 A_s}{R_{btm} b h} = \frac{30 \cdot 565}{1,35 \cdot 466 \cdot 220} = 0,122$$

$$\alpha_{ov} = \alpha_{ov} = \frac{b_t - b}{b h} h_t = \frac{1475 - 466}{466 \cdot 220} \cdot 41 = 0,404;$$

$$\delta_t = \delta_t' = \frac{h_t}{2h} = \frac{41}{2 \cdot 220} = 0,093$$

$$p = \frac{P}{R_{btm} b h} = \frac{200000}{1,35 \cdot 466 \cdot 220} = 1,445; \quad \alpha_p' = 0$$

Xác định chiều cao tương đối của vùng nén ξ , theo công thức (5), tính đến giá trị P :

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{0,733 + (\alpha_s + r\alpha_{ov} + p) / 2\alpha_{ov} / 2}{0,733 - 0,5r} = \\ &= \frac{0,733 + (0,122 + 1,1 \cdot 0,404 + 1,445) / 2 + 0,404 / 2}{0,733 - 0,5 \cdot 1,1} = \\ &= \frac{1,741 + 0,202}{0,178} = 10,914 \end{aligned}$$

$$\xi = Z - \sqrt{Z^2 - \frac{[0,733 + \alpha_s(1 - \delta_s) + r\delta_s\alpha_{ov} + p] + \alpha_{ov}}{0,733 - 0,5r}} =$$

$$\begin{aligned} &= 10,914 - \sqrt{10,914^2 - \frac{[0,733 + 0,122(1 - 0,123) + 1,1 \cdot 0,093 \cdot 0,404 + 1,445] + 0,404}{0,178}} = \\ &= 10,914 - \sqrt{10,914^2 - \frac{2,327 + 0,404}{0,178}} = 0,727 \end{aligned}$$

Bởi vì:

$$\frac{7}{15}(1 - \xi) = \frac{7}{15}(1 - 0,727) = 0,127 < 2\delta_t = 0,186.$$

Xác định lại giá trị ξ theo công thức (6), sử dụng các tính toán trước đó, không tính đến α_{ov} từ số và mẫu số của giá trị Z , cũng như từ số của biểu thức dưới dấu căn ξ , được lấy:

$$b_t / b - 1 = 1475 / 466 - 1 = 2,165$$

$$2\delta_t - \frac{7}{15}(1 - \xi) = 0,186 - 0,127 = 0,059.$$

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1,741 + (1,875\delta_t - 0,204)(b_t / b - 1)}{0,178 - 0,204(b_t / b - 1)} = \\ &= \frac{1,741 + (1,875 + 0,093 - 0,204) \cdot 2,165}{0,178 - 0,204(b_t / b - 1)} = -6,36 < 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi &= Z + \sqrt{Z^2 - \frac{2,327 + [3,75\delta_t(1 - \delta_t) - 0,204](b_t / b - 1)}{0,178 - 0,204(b_t / b - 1)}} = \\ &= -6,36 + \sqrt{6,36^2 - \frac{2,327 + (3,75 \cdot 0,093 \cdot 0,907 - 0,204) \cdot 2,165}{0,178 - 0,204 \cdot 2,165}} = \\ &= 0,725 \end{aligned}$$

Xác định M_{cr} theo công thức (7) với việc bỏ sung

$$Pe_{ov} = Ph(1 - \xi - \delta_s)$$

$$= 200000 \cdot 220(1 - 0,725 - 0,123) = 6,69 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Sử dụng công thức (6), giá trị m_{ov} xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} m_{ov} &= \alpha_{ov}(1 - \xi - \delta_s) - [2\delta_t - 7 / 15(1 - \xi)]^2 (b_t / b - 1) / 2 = \\ &= 0,404(1 - 0,725 - 0,123) - 0,059^2 \cdot 2,165 / 2 = 0,070; \end{aligned}$$

$$-0,059^2 \cdot 2,165 / 2 = 0,070;$$

$$M_{cr} = R_{btm} b h^2 \left\{ 0,4526(1 - \xi)^2 + \frac{r\xi^3 / 3 + (\xi - \delta_s)^2 r\alpha_{ov}}{(1 - \xi)} + m_{ov} \right\} +$$

$$+ Pe_{ov} = 1,35 \cdot 466 \cdot 220^2$$

$$\left\{ 0,4526(1 - 0,725)^2 + \frac{[111 \cdot 0,725^3 / 3 + (0,725 - 0,093)^2 \cdot 1,11 \cdot 0,404 + (1 - 0,725 - 0,123)^2 \cdot 0,122]}{(1 - 0,725)} + 0,07 \right\} =$$

$$+ 6,69 \cdot 10^6 = 45,6 \cdot 10^6 \text{ Nm} = 45,6 \text{ kNm}$$

Xác định giá trị M_{cr} theo công thức đơn giản hóa (10), tính các đặc trưng tiết diện quy đổi với hệ số quy đổi, $\alpha = E_s E_{sh} / R_{sh}$. Khi đó, có thể

sử dụng diện tích cốt thép tương đối quy đổi, được tính giá trị $\alpha_s = 0,122$ và các đặc trưng tương đối khác.

Các đặc trưng tương đối khác của tiết diện được quy đổi bằng:

Diện tích. $\alpha_{s\text{red}} = 1 + \alpha_{ov} + \alpha'_{ov} + \alpha_s = 1 + 0,404 \cdot 2 + 0,122 = 1,93$.

Khoảng cách từ trọng tâm đến mép dưới:

$$y = \left[0,5 + \alpha_{ov} \delta_i + \alpha'_{ov} (1 - \delta_i) + \alpha_s \delta_s \right] / A_{\text{red}} = \\ = \left[0,5 + 0,404 \cdot 0,093 + 0,404(1 - 0,093) + 0,122 \cdot 0,123 \right] / 1,93 \\ = 0,476,$$

Mô men quán tính:

$$I_{\text{red}} = 1/12 + (0,5 - y)^2 + \alpha_{ov} (y - \delta_i)^2 + \alpha'_{ov} (1 - \delta_i - y)^2 \\ + \alpha_s (y - \delta_s)^2 = 0,0833 + (0,5 - y)^2 + 0,404(y - 0,093)^2 \\ + 0,404(1 - 0,093 - y)^2 + 0,122(y - 0,123)^2 = 0,2334$$

Mô men kháng uốn đối với mép chịu kéo phía dưới:

$$w_{\text{red}} = I_{\text{red}} / y = 0,2334 / 0,476 = 0,4903;$$

Khoảng cách lõi: $r_s^b = w_{\text{red}} / \alpha_{\text{red}} = 0,4903 / 1,93 = 0,2541$.

Do tỷ lệ $b_i / b = 1475 / 466 = 3,17 > 2,0$, lấy $\gamma = 1,2$ khi đó:

$$M_{\text{cs}} = R_{\text{bsh}} b^2 \left[\gamma w_{\text{red}} + \rho (y - \delta_s + r_s^b) \right] = \\ = 1,35 \cdot 466 \cdot 220^2 \left[1,2 \cdot 0,4903 + 1,445(0,476 - 0,123 + 0,2541) \right] \\ = 44,6 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m} = 44,6 \text{ kNm}.$$

Sai lệch so với phương pháp tính toán chính xác về giá trị M_{cs} là 2,1%.

5. Kết luận và kiến nghị

- Bài báo đã trình bày phương pháp tính toán cấu kiện bê tông cốt thép chịu uốn và nén uốn, cho trường hợp cấu kiện chịu uốn có ứng suất trước và không ứng suất trước, tiết diện cấu kiện chữ nhật hoặc chữ I và chữ T, theo trạng thái giới hạn thứ hai với mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông, được đề cập trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép của Nga SP 63.13330.2012. Thực hiện ví dụ minh họa, làm sáng tỏ phương pháp tính toán, và làm tài liệu tham khảo cho các kỹ sư của Việt Nam.

- Phương pháp cũng đã làm rõ hơn các nội dung quy định về tính toán cấu kiện bê tông cốt thép theo trạng thái giới hạn thứ hai về tính toán theo sự hình thành vết nứt, với mô hình biến dạng phi tuyến của bê tông, như trong bản dự tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép của Việt Nam.

- Cần có các nghiên cứu tiếp theo, khi tính toán cấu kiện bê tông cốt thép theo trạng thái giới hạn thứ hai, trường hợp tính toán theo sự mở rộng vết nứt và tính toán biến dạng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Phan Quang Minh, Ngô Thế Phong, Nguyễn Đình Cống (2013), "Kết cấu bê tông cốt thép – Cấu kiện cơ bản", Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
2. TCVN 5574 - 2012 (2012), "Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Tiêu chuẩn thiết kế".
3. СНиП 52-101-2003 (2003), "Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры - Основные положения", Система нормативных документов в строительстве, Москва.
4. СП 63.13330 2012 (2012) "Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения". Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
5. Кодыш Э.Н. Никитин И.К. Трекин Н.Н. (2010), "Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям", Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ).