

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

Nguyễn Việt Phương^a, Vongchith Sykhampha^b, Nguyễn Trường Thắng^{b,*}

^aCông ty Cổ phần Tư vấn Thiết kế Đầu tư và Xây dựng Hà Tây,
A36-TT2 Khu đô thị Văn Quán, quận Hà Đông, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 20/05/2020, Sửa xong 24/06/2020, Chấp nhận đăng 02/07/2020

Tóm tắt

Bài báo này đề xuất một phương pháp và bảng tính thực hành tính toán khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng các mô hình phi tuyến mô phỏng quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép dưới dạng hai đoạn thẳng (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT) của TCVN 5574:2018. Với kết quả kiểm chứng khá tin cậy bởi một chương trình thực nghiệm đã công bố, phương pháp đề xuất được sử dụng để khảo sát trên hai cột BTCT thực tế, từ đó ảnh hưởng của các mô hình vật liệu phi tuyến của TCVN 5574:2018 và tiêu chuẩn trước đây TCVN 5574:2012 được so sánh và đánh giá. Kết quả cho thấy khả năng chịu lực của cột BTCT theo TCVN 5574:2018 là thấp hơn so với TCVN 5574:2012. Bên cạnh đó, khả năng chịu lực của cột BTCT phân tích bằng TCVN 5574:2018 - MH2ĐT thấp hơn so với MH3ĐT cho vật liệu bê tông với định lượng nhỏ hơn 5%.

Từ khoá: cột; bê tông cốt thép; lệch tâm xiên; mô hình phi tuyến; mặt tương tác.

DETERMINATION OF LOAD BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING MATERIALS' NON-LINEAR MODELS OF TCVN 5574:2018

Abstract

This paper proposes a computation method and a practical Excel Spreadsheet to determine the load bearing capacity of reinforced concrete (RC) columns using non-linear materials' models in the forms of bilinear and trilinear stress-strain relationships specified in TCVN 5574:2018. With relatively good validation with a published experimental study, the proposed method is then used to calculate two RC columns in reality for the comparison and assessment of the effects of TCVN 5574:2018's non-linear material models as well as of the previous version TCVN 5574:2012 on the columns' strengths. It is shown that the load bearing capacity of RC columns obtained from TCVN 5574:2018 is lower than that of TCVN 5574:2012. Besides, when applying TCVN 5574:2018, the concrete bilinear model provides lower load bearing capacity of RC columns compared to that of the trilinear model with a rate of lower than 5%.

Keywords: column; reinforced concrete; bi-axial; non-linear model; interaction surface.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(3V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(3V)-09) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Trong kết cấu công trình, cột là cấu kiện chính nhận tải trọng đứng từ sàn, dầm và truyền lực xuống các cột phía dưới và xuống kết cấu móng. Như vậy, cột được coi là cấu kiện chủ yếu chịu lực

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: thangnt2@nuce.edu.vn (Thắng, N. T.)

nén [1–4]. Trong thực tế, do sự phân phối mô men tại các nút giao giữa dầm và cột, do sự đa dạng của phương án kiến trúc công trình tạo nên các nhịp và khẩu độ khác nhau trên mặt bằng, do sự thay đổi tiết diện ngang của cột theo chiều cao, do độ lệch tâm ngẫu nhiên hay do tải trọng ngang v.v..., phần lớn các cột tiết diện chữ nhật đều đồng thời chịu thêm hai mô men uốn M_x và M_y trong hai mặt phẳng chính của tiết diện cùng với lực nén N , được gọi là chịu nén lệch tâm xiên. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, một trong hai mô men uốn có giá trị không đáng kể và có thể được bỏ qua, tạo ra cột chịu nén lệch tâm phẳng với tác động của cặp nội lực (N, M_x) hoặc (N, M_y) . Nếu mô men còn lại cũng nhỏ tương đối so với lực dọc, cột có thể được coi một cách gần đúng là chịu nén thuần túy. Khả năng chịu lực của cột chịu nén lệch tâm phẳng thường được biểu diễn bởi biểu đồ tương tác (N_u, M_{xu}) hoặc (N_u, M_{yu}) . Đối với cột chịu nén lệch tâm xiên, tập hợp của họ biểu đồ tương tác tạo nên mặt tương tác (N_u, M_{xu}, M_{yu}) trong không gian, trong đó N_u, M_{xu}, M_{yu} lần lượt là khả năng chịu lực tới hạn đối với lực dọc, mô men uốn theo phương x và mô men uốn theo phương y của tiết diện cột BTCT.

Các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) của các nước tiên tiến trên thế giới đưa ra một số phương pháp xây dựng mặt tương tác cho cột BTCT. Các tiêu chuẩn của Viện Bê tông Hoa Kỳ ACI 318-19 [5] và của liên minh châu Âu EN 1992-2004 [6–8] đều chấp nhận giả thiết tiết diện phẳng cùng với quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép (quan điểm biến dạng). Tuy nhiên, tiêu chuẩn trước đây của CHLB Nga SNiP 2.03.01.84 [9] và tiêu chuẩn tương ứng của Việt Nam TCVN 5574:2012 [10] sử dụng quan điểm ứng suất và tính toán cột BTCT khá phức tạp. Trong thời gian qua, tiêu chuẩn thiết kế mới TCVN 5574:2018 [11] (dựa trên tiêu chuẩn CHLB Nga SP 63.13330.2012 [12]) được ban hành thay thế cho TCVN 5574:2012 đã cho phép sử dụng giả thiết tiết diện phẳng và cung cấp các mô hình biến dạng của vật liệu để tính toán kết cấu BTCT theo quan điểm biến dạng. Cùng với đó là một số nghiên cứu ở trong nước về việc áp dụng các tiêu chuẩn này vào điều kiện Việt Nam [13–15]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào đề cập tới việc so sánh các mô hình phi tuyến của vật liệu theo TCVN 5574:2018.

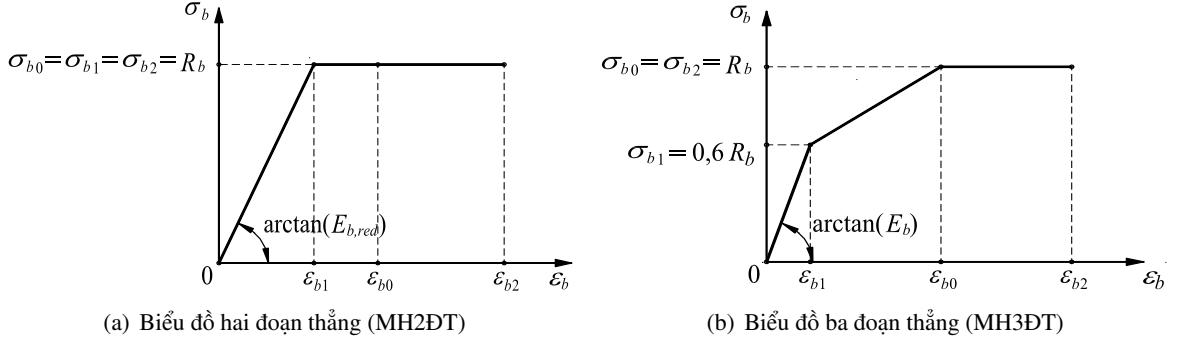
Bài báo này giới thiệu các nguyên tắc tính toán cột BTCT của TCVN 5574:2018, từ đó đề xuất một phương pháp và bảng tính thực hành tính toán khả năng chịu lực của cột BTCT chịu lệch tâm xiên dưới dạng mặt tương tác. Các mô hình phi tuyến mô phỏng quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép dưới dạng hai đoạn thẳng (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT) của TCVN 5574:2018 được tích hợp trong các bước tính toán. Phương pháp nội suy và phương pháp trung bình có trọng số được sử dụng để đánh giá hệ số an toàn khi tính toán cột BTCT chịu nén lệch tâm xiên bằng cách xác định vị trí trong không gian của điểm nội lực tới hạn so với mặt tương tác. Sau khi được kiểm chứng bởi một số kết quả thí nghiệm đã được công bố, phương pháp đề xuất được sử dụng để khảo sát trên hai cột BTCT thực tế, từ đó so sánh và đưa ra một số đánh giá về ảnh hưởng của các mô hình vật liệu phi tuyến của TCVN 5574:2018 cũng như với tiêu chuẩn trước đây TCVN 5574:2012, được giới thiệu ở phần cuối của bài báo này.

2. Các nguyên tắc tính toán cột BTCT theo TCVN 5574:2018

2.1. Mô hình vật liệu phi tuyến theo TCVN 5574:2018

So với tiêu chuẩn trước đây TCVN 5574:2012 [10], một trong những thay đổi quan trọng của TCVN 5574:2018 [11] là đã đưa ra một cách tường minh các đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép, được đơn giản hóa dưới dạng các mô hình vật liệu phi tuyến để dễ dàng áp dụng trong thực tế.

Với vật liệu bê tông, TCVN 5574:2018 đưa ra hai mô hình vật liệu phi tuyến là các biểu đồ biến dạng hai đoạn thẳng (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT) (Hình 1).



Hình 1. Mô hình vật liệu phi tuyến của bê tông [12]

Trong MH2ĐT, ứng suất nén σ_b trong bê tông được xác định theo các biến dạng co ngắn tương đối và mô đun đàn hồi của bê tông như sau:

$$\sigma_b = E_{b,red} \varepsilon_b \quad \text{khi} \quad 0 \leq \varepsilon_b < \varepsilon_{b1} \quad (1)$$

$$\sigma_b = R_b \quad \text{khi} \quad \varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b < \varepsilon_{b2} \quad (2)$$

trong đó $\varepsilon_{b1} = \varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ với bê tông nặng; $E_{b,red} = R_b / \varepsilon_{b1,red}$; $\varepsilon_{b2} = 0,0035$ với bê tông có cấp độ bền nhỏ hơn B60 và nội suy tuyến tính trong khoảng từ 0,0033 ứng với B70 tới 0,0028 ứng với B100; R_b là cường độ chịu nén tính toán của bê tông.

MH3ĐT của bê tông được biểu diễn qua các biểu thức:

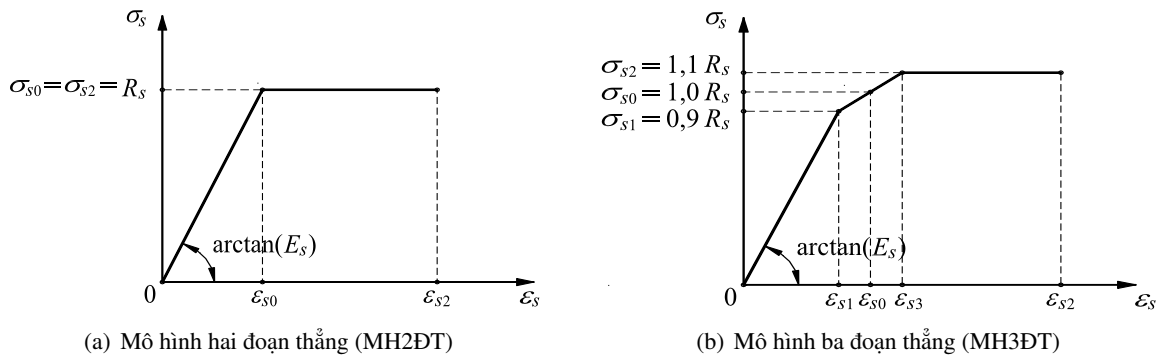
$$\sigma_b = \varepsilon_b E_b \quad \text{khi} \quad 0 \leq \varepsilon_b < \varepsilon_{b1} \quad (3)$$

$$\sigma_b = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \right] R_b \quad \text{khi} \quad \varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b < \varepsilon_{b0} \quad (4)$$

$$\sigma_b = R_b \quad \text{khi} \quad \varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2} \quad (5)$$

trong đó $\varepsilon_{b0} = 0,002$; $\sigma_{b1} = 0,6R_b$; $\varepsilon_{b1} = 0,6R_b / E_b$; ε_{b2} lấy tương tự như MH2ĐT; E_b là mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông.

TCVN 5574:2018 cũng quy định mô hình vật liệu phi tuyến hai đoạn thẳng (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT) cho cốt thép như trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình vật liệu phi tuyến của cốt thép [11]

Trong MH2ĐT, ứng suất σ_s trong cốt thép được tính toán theo các biến dạng tương đối và mô đun đàn hồi của cốt thép như sau:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad \text{khi} \quad 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s0} \quad (6)$$

$$\sigma_s = R_s \quad \text{khi} \quad \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} \quad (7)$$

trong đó $\varepsilon_{s0} = R_s/E_s$ và $\varepsilon_{s2} = 0,0025$; R_s và E_s lần lượt là cường độ chịu kéo tính toán và mô đun đàn hồi của cốt thép.

MH3ĐT của cốt thép được biểu diễn theo các biểu thức:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad \text{khi} \quad 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s1} \quad (8)$$

$$\sigma_s = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_s} \right) \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_s \leq 1,1 R_s \quad \text{khi} \quad \varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} \quad (9)$$

trong đó $\sigma_{s1} = 0,9 R_s$; $\varepsilon_{s1} = 0,9 R_s/E_s$; $\varepsilon_{s2} = 0,015$; $\varepsilon_{s0} = R_s/E_s$ với cốt thép có giới hạn chảy thực tế và $\varepsilon_{s0} = R_s/E_s + 0,002$ với cốt thép có giới hạn chảy quy ước.

Như vậy, với cốt thép có giới hạn chảy thực tế thì MH3ĐT trở thành MH2ĐT. Ngoài ra, để phù hợp với các kết quả thí nghiệm kéo, nén của cốt thép, TCVN 5574:2018 khuyến cáo nên sử dụng MH2ĐT cho các nhóm cốt thép CB240-T, CB300-T, CB300-V, CB400-V và CB500-V. Với các loại thép và cấp cường độ cao, MH3ĐT được khuyến cáo sử dụng. Trong bài báo này, các khái niệm MH2ĐT và MH3ĐT chủ yếu được đề cập và áp dụng cho vật liệu bê tông.

2.2. Nguyên tắc phân tích khả năng chịu lực của cốt BTCT theo TCVN 5574:2018

Trong trường hợp tổng quát, TCVN 5574:2018 dựa vào các giả thiết tính toán sau đây: (i) Sự phân bố biến dạng tương đối của cốt thép và bê tông theo chiều cao tiết diện được lấy theo quy luật phân bố tuyến tính (giả thiết tiết diện phẳng); (ii) Quan hệ giữa ứng suất dọc trục và biến dạng tương đối của bê tông và của cốt thép được lấy theo các mô hình vật liệu phi tuyến tương ứng của bê tông và cốt thép. Với cốt thép thì tùy loại nhóm thép tương ứng mà sử dụng MH2ĐT hoặc MH3ĐT; và (iii) Bỏ qua sự tham gia chịu lực của bê tông vùng kéo.

Cường độ trên tiết diện thẳng góc của cầu kiện BTCT được tính toán theo các điều kiện khống chế về biến dạng tương đối cực hạn: $|\varepsilon_{b,max}| \leq \varepsilon_{bu}$; $\varepsilon_{s,max} \leq \varepsilon_u$. Các giá trị biến dạng tối hạn của bê tông $\varepsilon_{b,u}$ và cốt thép $\varepsilon_{s,u}$ được lấy như sau:

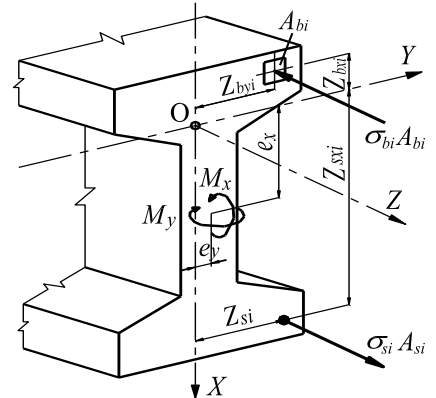
- Khi trục trung hòa nằm trong tiết diện: $\varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b2} = 0,0035$ với bê tông có $B \leq 60$.
- Khi trục trung hòa nằm ngoài tiết diện:

$$\varepsilon_{b,u} = \varepsilon_{b2} - (\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0}) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (10)$$

trong đó $\varepsilon_{b0} = 0,002$; ε_1 ; ε_2 là biến dạng tương đối ở biên hai phía đối diện và $|\varepsilon_2| \geq \varepsilon_1$.

- Giá trị biến dạng cực hạn của cốt thép $\varepsilon_{s,u}$ lấy tương ứng bằng 0,025 và 0,015 cho thép có giới hạn chảy thực tế và thép có giới hạn chảy quy ước.

Để tính nội lực tổng hợp từ biểu đồ ứng suất trong bê tông, TCVN 5574:2018 quy định sử dụng quy trình tích phân các ứng suất trên tiết diện thẳng góc với nguyên tắc chia tiết diện thành nhiều phần tử với ứng suất được coi là phân bố đều (Hình 3).



Hình 3. Sơ đồ tổng quát tính toán tiết diện thẳng góc của cầu kiện BTCT [11]

Nội lực được xác định từ các phương trình cân bằng sau:

$$M_x = \sum_{i=1}^{n \times m} \sigma_{bi} A_{bi} Z_{bxi} + \sum_{j=1}^p \sigma_{sj} A_{sj} Z_{sxj} \quad (11)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{n \times m} \sigma_{bi} A_{bi} Z_{byi} + \sum_{j=1}^p \sigma_{sj} A_{sj} Z_{syj} \quad (12)$$

$$N = \sum_{i=1}^{n \times m} \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_{j=1}^p \sigma_{sj} A_{sj} \quad (13)$$

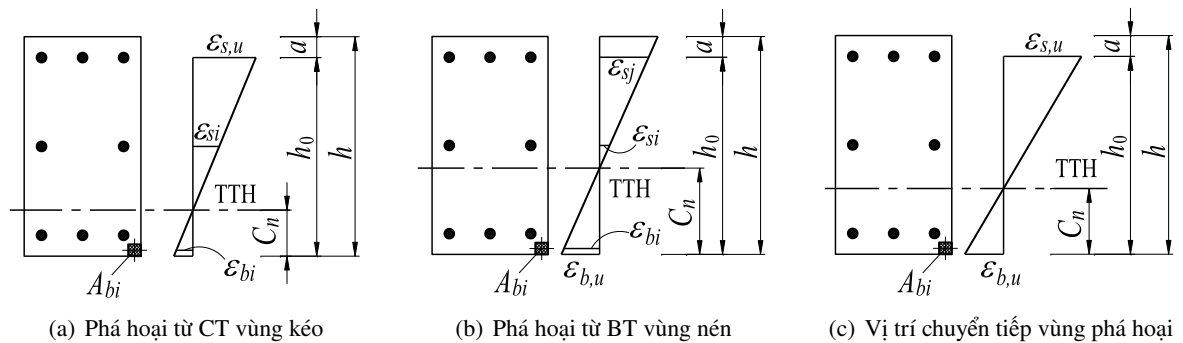
Giá trị ứng suất trong bê tông và cốt thép chịu nén lấy dấu (-), giá trị ứng suất trong cốt thép chịu kéo lấy dấu (+).

Ứng suất tại mỗi phân tố được xác định dựa vào MH2ĐT hoặc MH3ĐT trên cơ sở biến dạng tương đối của phân tố được tính theo biểu thức:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} Z_{bxi} + \frac{1}{r_y} Z_{byi} \quad \text{và} \quad \varepsilon_{si} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} Z_{sxi} + \frac{1}{r_y} Z_{syi} \quad (14)$$

trong đó ε_0 là biến dạng tương đối của thớ nằm tại giao điểm đã chọn (điểm O); $1/r_x$ và $1/r_y$ lần lượt là độ cong của trục dọc tại tiết diện ngang đang xét của cầu kiện trong các mặt phẳng tác dụng của M_x và M_y .

Với trường hợp $r_x = \infty$, $r_y = \infty$ và giả thiết tiết diện phẳng, biến dạng tương đối của phân tố có thể được xác định bằng các phương trình nội suy tuyến tính. Khả năng chịu lực của cột BTCT được xác định theo một trong các trường hợp như trên Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ xác định biến dạng tương đối phân tố

Để đơn giản trong tính toán cột, TCVN 5574:2018 chấp nhận giả thiết biến dạng nhỏ và kể tới ảnh hưởng của độ cong cầu kiện bằng các hệ số khuếch đại mô men, hay còn gọi là hệ số uốn dọc η .

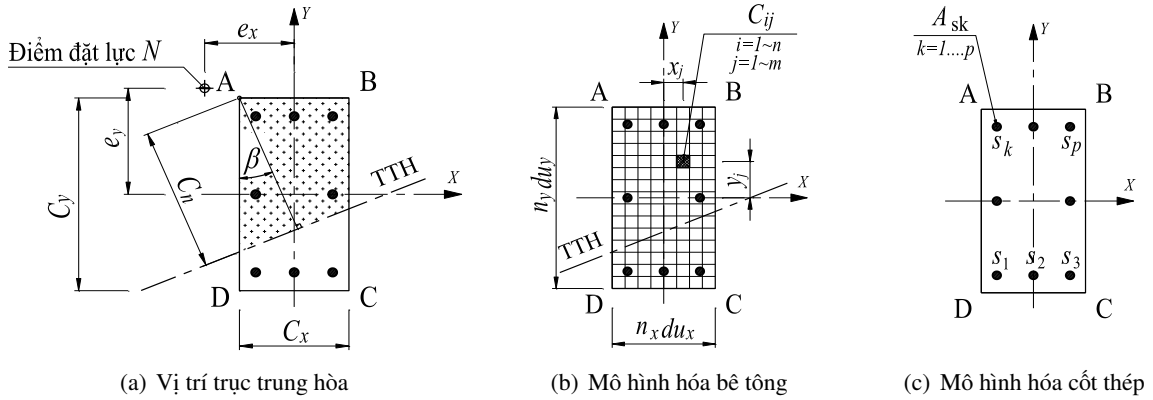
3. Xác định khả năng chịu lực của cột BTCT theo TCVN 5574:2018

3.1. Phương pháp xây dựng mặt tương tác của cột BTCT tiết diện chữ nhật

Xét một cầu kiện cột BTCT có tiết diện chữ nhật chịu lực nén N với độ lệch tâm e_y và e_x tương ứng với các giá trị mô men uốn $M_y = Ne_x$ và $M_x = Ne_y$ (Hình 5).

Hình 5 cho thấy mỗi trục trung hòa (TTH) có thể được đại diện bởi hai thông số là góc nghiêng β của nó với trục X (cũng chính là góc nghiêng của đường dóng từ điểm A tới TTH với trục Y) và

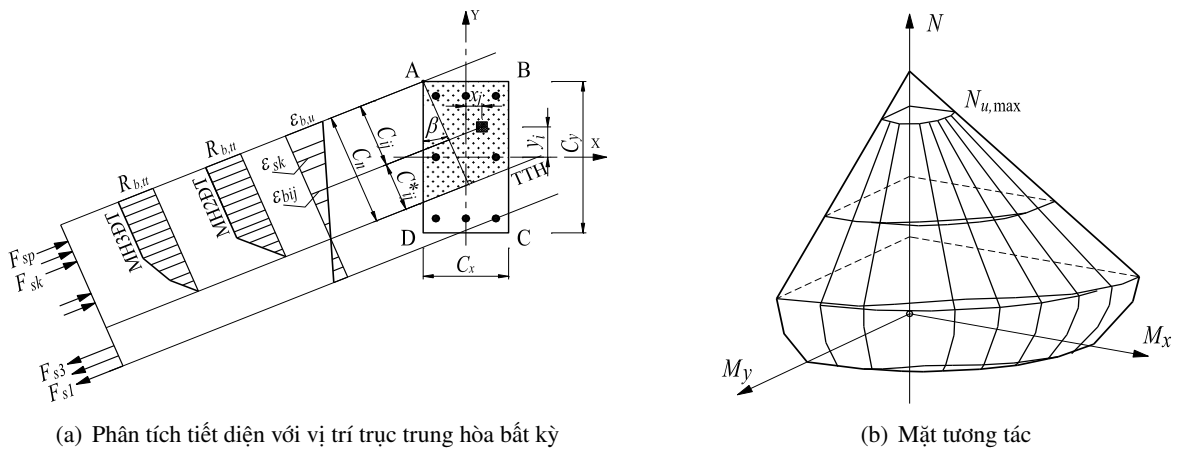
khoảng cách C_n từ điểm A tới trục trung hòa. Với mỗi TTH (β , C_n), để tìm được giá trị cực hạn của bộ nội lực (N_u , M_{xu} , M_{yu}), cho biến dạng bê tông vùng nén tại thử xa trục TTH (điểm A) đạt tới biến dạng cực hạn $\varepsilon_{b,u}$ hoặc thanh cốt thép chịu kéo nhiều nhất đạt biến dạng cực hạn $\varepsilon_{s,u}$. Lần lượt thay đổi β từ 0 tới 90° và tăng dần C_n sẽ xây dựng được tập hợp các điểm tạo nên mặt tương tác (Hình 6).



Hình 5. Mô hình tính toán biểu đồ tương tác

Trường hợp phá hoại cân bằng được xác định với vị trí TTH tại đó phía chịu nén có biến dạng lớn nhất $\varepsilon_{b,u}$ đồng thời biến dạng kéo cực hạn $\varepsilon_{s,u}$ tại thanh cốt thép xa TTH nhất (Hình 4(c)). Với $\varepsilon_{b,u} = 0,0035$, $\varepsilon_{s,u} = 0,025$ và h_0 là khoảng cách giữa hai đoạn thẳng song song với trục trung hòa đi qua điểm A và đi qua thanh cốt thép xa nhất, tính được:
$$\frac{h_0 - C_n}{C_n} = \frac{0,025}{0,0035} \rightarrow C_n = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,025} h_0 = 0,123h_0.$$
 Khi $C_n \leq 0,123h_0$, cần xét trường hợp phá hoại thanh cốt thép xa nhất đạt $\varepsilon_{s,u}$ và ngược lại. Cột BTCT chịu nén lệch tâm xiên thường xảy ra trường hợp phá hoại từ vùng nén, các cấu kiện dài như vách phẳng có thể xảy ra trường hợp phá hoại từ vùng kéo.

Để tính toán ứng suất bê tông chịu nén tại từng vị trí trên tiết diện, thực hiện chia nhỏ tiết diện thành nhiều phân tổ hình vuông có cạnh là du và diện tích $du \times du$ đủ nhỏ để ứng suất được coi là phân bố đều trong phân tổ với giá trị tương ứng với giá trị biến dạng tại trọng tâm của phân tổ. Cốt thép được mô hình hóa như một điểm tại tâm của thanh cốt thép với lực tác dụng là $F_s = A_s \sigma_s$. Khi



Hình 6. Áp dụng tính toán cột BTCT chịu lệch tâm xiên

cốt thép nằm trong vùng chịu nén, để giảm trừ đi khối lượng bê tông bị cốt thép chiếm chỗ, ứng suất cốt thép được giảm đi một lượng đúng bằng ứng suất của bê tông tại vị trí bị chiếm chỗ. Các giá trị biến dạng này được xác định bằng các tam giác đồng dạng theo sơ đồ trong Hình 6(a).

Ứng suất trong bê tông có thể được xác định bằng MH2ĐT hoặc MH3ĐT. Dựa vào giá trị biến dạng của mỗi phân tố, mỗi mô hình sẽ cho một giá trị cực hạn khác nhau. Nội lực cực hạn (N_u, M_{xu}, M_{yu}) được tính theo các biểu thức tổng quát (11)–(13).

Các tác giả đã sử dụng ngôn ngữ lập trình Visual Basic 6.0 tích hợp trong ứng dụng bảng tính Excel Spreadsheet để thực hiện việc chia lưới và tính toán theo nguyên tắc sau: Cho giá trị góc nghiêng β thay đổi từ 0 tới 90° với bước nhảy là $\Delta\beta = 1^\circ$. Với mỗi giá trị β , cho TTH chạy từ điểm A tới điểm C. Với mỗi vị trí của TTH, tính được giá trị hợp lực của bê tông và cốt thép. Tồn tại hai vị trí TTH tại đó giá trị hợp lực đổi dấu tương ứng với TTH có $N = 0$ nằm giữa hai đoạn thẳng này. Vị trí chính xác của TTH phụ thuộc độ mịn của lưới chia. Trục trung hòa có $N = 0$ được xác định theo phương pháp nội suy tuyến tính, từ đó tính được các giá trị M_{xu} và M_{yu} với trường hợp uốn thuần túy. Từ TTH có $N = 0$ tới TTH đi qua điểm C, chia làm 50 bước nhảy tương ứng với 50 giá trị của C_n . Ngoài ra còn có thêm 5 vị trí TTH nằm ngoài tiết diện. Như vậy với một góc β sẽ thu được 56 điểm giá trị cực hạn (N_u, M_{xu}, M_{yu}). Với cột tiết diện chữ nhật bố trí cốt thép đối xứng thì tại góc phần tư của biểu đồ tương tác, tổng cộng với 91 giá trị góc β , mỗi góc β có 56 giá trị C_n và thu được 5096 điểm của mặt tương tác, tương đương với 20384 điểm của toàn biểu đồ. Số điểm khá lớn này đủ để phục vụ cho việc kiểm tra khả năng chịu lực của cột một cách chính xác. Khi góc β bằng 0 và 90°, ta thu được biểu đồ tương tác (N/M_{xu}) và (N/M_{yu}) của hai trường hợp lệch tâm phẳng trên hai mặt phẳng chính của tiết diện cột BTCT tiết diện chữ nhật.

Ngoài ra, TCVN 5574:2018 quy định giá trị lực dọc cực hạn khi chịu nén đúng tâm ($M_x = M_y = 0$) như sau:

$$N_{u,max} = \varphi (R_b A_b + R_{sc} A_{s,tot}) \quad (15)$$

trong đó φ là hệ số do ảnh hưởng của uốn dọc và phụ thuộc vào độ mảnh cột; R_b và R_{sc} tương ứng là cường độ chịu nén tính toán của bê tông và cốt thép; A_b là diện tích tiết diện ngang của bê tông; $A_{s,tot}$ là tổng diện tích tiết diện ngang của cốt thép. Như vậy, mọi vị trí của mặt tương tác đều phải nhỏ hơn giá trị $N_{u,max}$ (Hình 6(b)).

3.2. Hệ số khuếch đại mô men (hệ số uốn dọc η)

TCVN 5574:2018 quy định tính toán hệ số uốn dọc η theo biểu thức sau:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (16)$$

trong đó N là giá trị lực dọc; N_{cr} là lực dọc tới hạn quy ước (lực Euler) $N_{cr} = \pi^2 D / L_0^2$; D là độ cứng của cấu kiện $D = k_b E_b I + k_s E_s I_s$; E_b và E_s lần lượt là mô đun đàn hồi của bê tông và cốt thép; I_b và I_s lần lượt là mô men quán tính của diện tích tiết diện bê tông và toàn bộ cốt thép dọc đối với trọng tâm của tiết diện - với trục x , $I_x = C_y C_x^3 / 12$ và $I_{sx} = \sum A_{si} y_{si}^2$, với trục y , $I_y = C_x C_y^3 / 12$; $I_{sy} = \sum A_{si} x_{si}^2$;

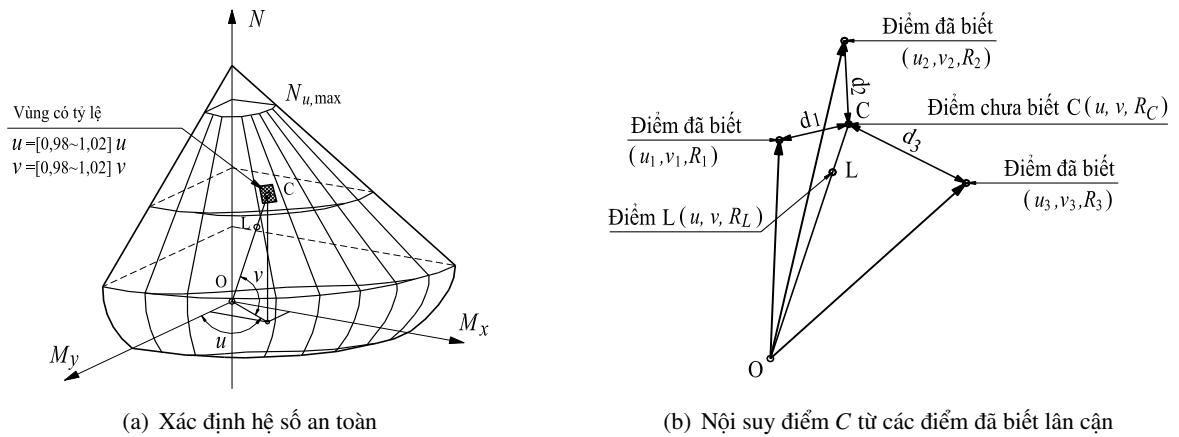
Hệ số k_s tính theo công thức $k_s = 0,7$; $k_b = \frac{0,15}{\varphi_L(0,3 + \delta_e)}$; $\varphi_L = 1 + M_L / M_{L1} \leq 2$; M_L là mô men với trọng tâm của thanh thép chịu kéo nhiều nhất hoặc chịu kéo ít nhất (khi toàn bộ tiết diện chịu nén) do tác dụng của toàn bộ tải trọng; M_{L1} là mô men với trọng tâm của thanh thép chịu kéo nhiều nhất hoặc chịu kéo ít nhất (khi toàn bộ tiết diện chịu nén) do tác dụng của tải trọng dài hạn và phần dài hạn của tải trọng tạm thời. Để đơn giản trong tính toán thực hành, do phần dài hạn của tải trọng

tạm thời thường chiếm tỷ lệ nhỏ trong toàn bộ giá trị tải trọng dài hạn, nên lấy giá trị $M_L/M_{L1} = 0,8$ để thiên về an toàn (giá trị φ_L càng lớn thì D càng nhỏ và η càng lớn); $\delta_e = e_0/h$ và luôn lấy trong khoảng $(0,15 \div 1,50)$; e_0 là độ lệch tâm ban đầu - với cấu kiện siêu tĩnh $e_0 = \max(M/N; e_a)$, với kết cấu tĩnh định $e_0 = M/N + e_a$; e_a là độ lệch tâm ngẫu nhiên, theo một mặt phẳng uốn của cột lấy $e_a = \max(l/600, h/30, 10 \text{ mm})$, với l là chiều dài cột hoặc khoảng cách giữa các tiết diện cột được liên kết chặn chuyển vị và h là kích thước tiết diện ngang của cột song song với mặt phẳng uốn.

Với mỗi trường hợp nội lực nguy hiểm (N, M_x, M_y) , xác định được một cặp giá trị (η_x, η_y) . Từ đó xác định được bộ nội lực tính toán $(N, \eta_x M_x, \eta_y M_y)$ và kiểm tra với khả năng chịu lực dưới dạng mặt tương tác (N_u, M_{xu}, M_{yu}) đã xác định được ở trên.

3.3. Phương pháp kiểm tra hệ số an toàn

Hệ số an toàn được xác định thông qua vị trí tương đối trong không gian của điểm nội lực L có tọa độ $(N, \eta_x M_x, \eta_y M_y)$ so với mặt tương tác. Về mặt định lượng, tồn tại một điểm C có tọa độ (N_u, M_{xu}, M_{yu}) nằm trên mặt tương tác sao cho ba điểm O, L, C tạo thành một đường thẳng, trong đó O là gốc có tọa độ $(0, 0, 0)$. Khi điểm L nằm phía bên trong của mặt tương tác, hệ số huy động trong không gian của mặt tương tác $CR = \overline{OL}/\overline{OC} < 1$, nội lực cực hạn nhỏ hơn khả năng chịu lực của cột, cột được coi là an toàn về chịu lực với một hệ số an toàn quy ước là $FS = \overline{OC}/\overline{OL} > 1$ (Hình 7).



Hình 7. Phương pháp nội suy xác định điểm C

Trên thực tế, mặt tương tác xác định thông qua quy trình nêu ở mục trên chỉ là một tập hợp của nhiều điểm rời rạc. Do đó cần sử dụng phương pháp nội suy để xác định được điểm C . Dựa vào phương pháp trung bình có trọng số (Inverse Distance Weighted Average - IDWA) [16, 17], các tác giả tiến hành nội suy có xét đến ảnh hưởng của điểm khảo sát tới các điểm (dữ liệu) lân cận đã biết, theo đó dữ liệu càng gần sẽ ảnh hưởng càng lớn tới giá trị của điểm khảo sát.

Để nội suy, hệ tọa độ (N_z, M_x, M_y) cần được chuyển sang hệ tọa độ cầu (u, v, R) thông qua các biểu thức sau:

$$R = \sqrt{\left(\frac{N_z}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_0}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_0}\right)^2}; \quad u = \arctan\left(\frac{M_x}{M_y}\right); \quad v = \arcsin\left(\frac{N_z/N_0}{R}\right) \quad (17)$$

trong đó N_0 và M_0 lần lượt là các giá trị đơn vị của lực dọc và mô men nhám khử thứ nguyên cho đại lượng R .

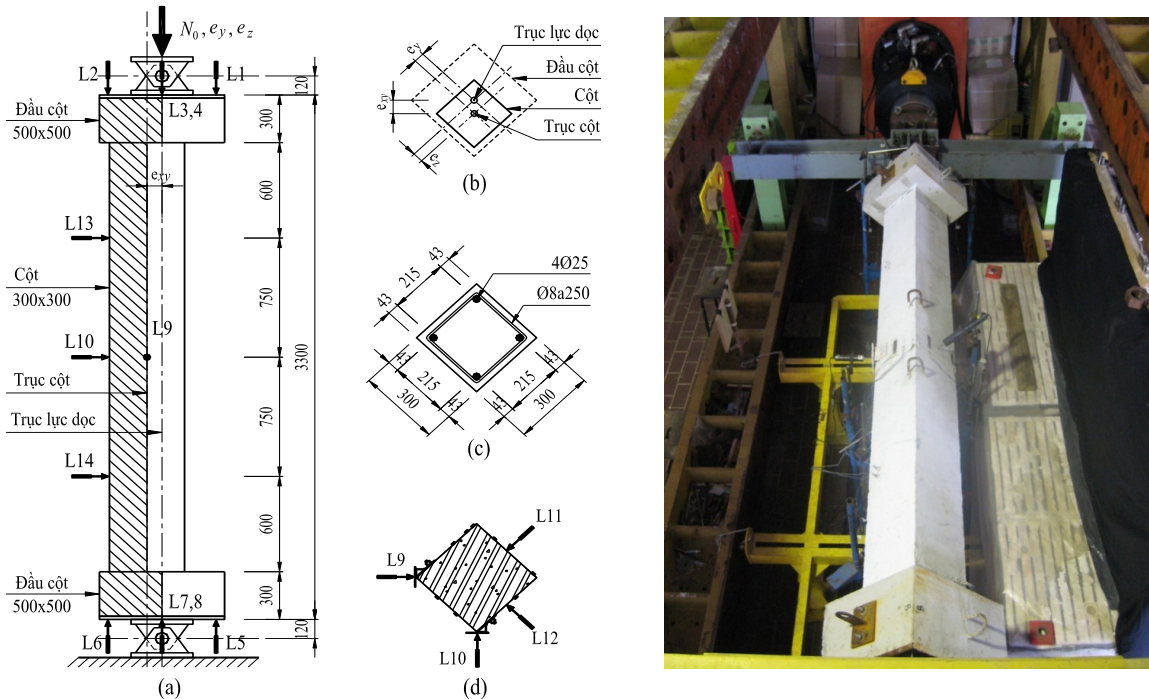
Trong hệ tọa độ cầu, do điểm C nằm trên tia OL nên tọa độ (u, v) của điểm C chính là (u, v) của điểm L . Khoảng cách R_C từ điểm C tới điểm O được tính theo công thức nội suy sau đây, với d_i là khoảng cách từ điểm nội suy tới điểm lân cận thứ i :

$$R_C = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \frac{1}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}; \quad d_i = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} \quad (18)$$

Phương pháp nội suy nêu trên được các tác giả áp dụng như sau: Với một bộ nội lực (N_i, M_{xi}, M_{yi}) bất kỳ sẽ có các thông số (u_i, v_i, R_i) được tính theo biểu thức (17), trong đó (N_i, M_{xi}, M_{yi}) đều được lấy giá trị (+). Với hai thông số u_i và v_i sẽ tìm tập hợp các điểm với ngưỡng sai số $\pm 2,0\%$ đối với cả u_i và v_i trên tập hợp 5096 điểm của mặt tương tác, sẽ tìm được những điểm sát với giá trị cần nội suy nhất. Áp dụng công thức nội suy (18) cho những điểm khảo sát và thu được giá trị R_{Ci} . Hệ số an toàn được xác định là $FS = \overline{OC}/\overline{OL} = RC/RL$.

4. Kiểm chứng phương pháp đề xuất với kết quả thực nghiệm

Phương pháp tính toán cột BTCT theo TCVN 5574:2018 và bảng tính Excel Spreadsheet do các tác giả đề xuất trong Mục 3 được kiểm chứng với một chương trình thực nghiệm thực hiện trên ba mẫu thí nghiệm cột BTCT ký hiệu là Ca-1-25, Ca-2-40 và Ca-3-60 [18]. Các cột đều có kích thước thực với tiết diện 300×300 (mm), cao 3,3 m (Hình 8). Bê tông có cường độ nén mẫu lăng trụ trung bình là $f_{cm} = 28,4$ MPa, cốt thép dọc $4\Phi 25$ có giới hạn chảy là $f_y = 554$ MPa.



Hình 8. Chương trình thực nghiệm trên cột BTCT chịu nén lệch tâm xiên [18]

Các mẫu cột chịu nén lệch tâm xiên với độ lệch tâm (e_x, e_y) lần lượt là (25, 25), (40, 40) và (60, 60) mm. Khả năng chịu lực dọc tối hạn của ba mẫu thu được từ thí nghiệm lần lượt là 1609, 1370 và 1042 kN. Như vậy, các bộ nội lực phá hoại ($N, \eta_x M_x, \eta_y M_y$) lần lượt là (1609, 40,225, 40,225), (1370, 54,8, 54,8) và (1042, 62,52, 62,52). Các mẫu cột được liên kết khớp hai đầu và chịu ảnh hưởng của uốn dọc, lấy hệ số chiều dài tính toán $k = 1,0$ khi tính hệ số η và bỏ qua độ lệch tâm ngẫu nhiên do đã được kiểm soát trong thí nghiệm. Tại cùng một giá trị lực dọc, nếu tính toán ra mô men phá hoại của biểu đồ tương tác nhỏ hơn mô men phá hoại thực tế thì TCVN 5574:2018 là an toàn và ngược lại.

Khi cho các hệ số an toàn thực nghiệm bằng đơn vị, xét bộ nội lực của cột C-2-40: $N = 1370$ kN; $M_{x-TT} = M_{y-TT} = 70,18$ kN. Xác định các thông số:

$$- R_L = (1370^2 + 70,18^2 + 70,18^2)^{0,5} = 1373,59;$$

$$- u = \arctan(M_y, M_x) = \arctan(1, 0) = 0,785398;$$

$$- v = \arcsin(N/R) = \arcsin(1370/1373,59) = 1,498476.$$

Với MH2ĐT, số liệu chi tiết của các điểm thuộc mặt tương tác có u và v lệch $\pm 2\%$ so với u và v của bộ nội lực cần kiểm tra nêu trên được biểu diễn trong Bảng 1.

Bảng 1. Xác định điểm nội suy C thông qua R_C

TT	N_u (N)	M_{xu} (kNm)	M_{yu} (kNm)	R	u	v	Δu	Δv	$1/d_i$	R_i/d_i
1	1124,0	68,8	68,8	1128,2	0,7854	1,4844	0,0000	-0,0140	71,2	80321,3
2	1242,7	65,3	65,3	1246,1	0,7854	1,4966	0,0000	-0,0019	538,4	670873,8
3	1280,4	64,1	64,1	1283,6	0,7854	1,5001	0,0000	0,0017	602,9	773847,8
4	1164,4	67,7	67,7	1168,3	0,7854	1,4888	0,0000	-0,0097	103,4	120759,2
5	1204,0	66,5	66,5	1207,6	0,7854	1,4928	0,0000	-0,0056	177,7	214553,0
6	1317,3	62,8	62,8	1320,3	0,7854	1,5034	0,0000	0,0050	201,6	266222,3
7	1353,3	61,6	61,6	1356,1	0,7854	1,5065	0,0000	0,0081	124,1	168324,7
8	1388,5	60,3	60,3	1391,1	0,7854	1,5095	0,0000	0,0110	91,1	126691,0
9	1422,8	59,0	59,0	1425,2	0,7854	1,5122	0,0000	0,0137	72,8	103747,6
Tổng									1983,1	2525340,6

Xác định điểm nội suy C của mặt tương tác có $R_C = 1273,43$. Với $R_L = 1373,59$, hệ số an toàn là $FS = R_C/R_L = 0,927$. Kết quả kiểm chứng tương tự cho các mẫu cột thí nghiệm khác được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Kiểm chứng phương pháp đề xuất theo thực nghiệm

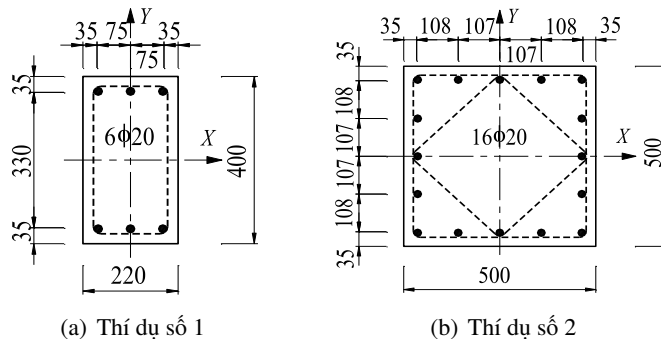
Mẫu cột	N	M_x	M_y	Hệ số η		M_{x-TT}	M_{y-TT}	FS	FS
	(kN)	(kNm)	(kNm)	η_x	η_y	(kNm)	(kNm)	MH2ĐT	MH3ĐT
Ca-1-25	1609,00	40,23	40,23	1,35	1,35	54,17	54,17	0,984	1,002
Ca-2-40	1370,00	54,80	54,80	1,28	1,28	70,18	70,18	0,927	0,954
Ca-3-60	1042,00	62,52	62,52	1,21	1,21	75,90	75,90	0,956	0,997
Trung bình								0,956	0,984
COV								0,020	0,019

Số liệu trong Bảng 2 cho thấy khi kiểm chứng MH2ĐT và MH3ĐT (cho bê tông) của TCVN 5574:2018 bằng kết quả thí nghiệm, nội lực phá hoại (đại diện bởi điểm L) đều nằm phía bên ngoài của mặt tương tác khi so với điểm nội suy C , với độ an toàn trung bình FS của ba cột thí nghiệm lần lượt là 0,956 và 0,984.

5. Đánh giá các mô hình phi tuyến của vật liệu trong tính toán cột BTCT

5.1. Các thí dụ thực tế

Với kết quả kiểm chứng khá tin cậy so với thực nghiệm trình bày trong Mục 4, phương pháp thực hành tính toán khả năng chịu lực của cột BTCT do các tác giả đề xuất trong Mục 3 được áp dụng cho bài toán thực tế trên hai cột BTCT có tiết diện ngang trong Hình 9, từ đó có thể đánh giá được độ an toàn của giải pháp thiết kế, cũng như ảnh hưởng của các mô hình phi tuyến của vật liệu theo TCVN 5574:2018.



Hình 9. Mặt cắt tiết diện cột thực tế được khảo sát

Trong thí dụ số 1, cột BTCT có kích thước tiết diện ngang là $C_x = 220$ mm và $C_y = 400$ mm, chiều cao là 3,9 m. Bê tông cấp độ bền B20, cốt thép dọc 6Φ20 thuộc nhóm CB300-V, lớp bê tông bảo vệ dày 25 mm (Hình 9(a)).

Trong thí dụ số 2, cột BTCT trong công trình thực tế có kích thước tiết diện ngang là $C_x = 500$ mm và $C_y = 500$ mm, chiều cao là 3,9 m. Bê tông cấp độ bền B30, cốt thép dọc 16Φ20 thuộc nhóm CB400-V, lớp bê tông bảo vệ 25 mm (Hình 9(b)).

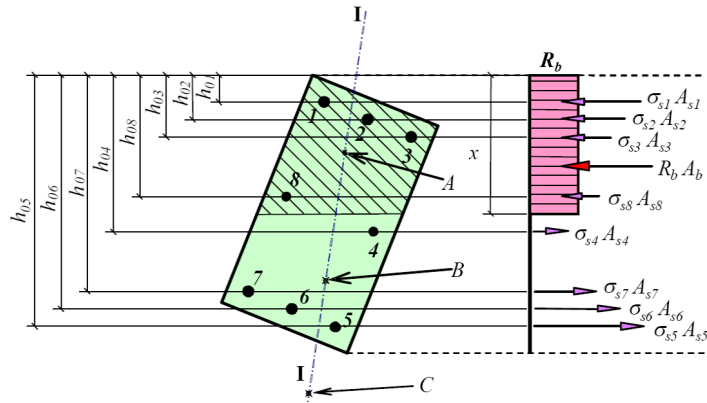
5.2. Đánh giá ảnh hưởng của các mô hình phi tuyến của vật liệu

Trong mục này, các tác giả sử dụng phương pháp và bảng tính theo TCVN 5574:2018 được đề xuất trong Mục 3, cũng như một công cụ bảng tính tương tự áp dụng cho TCVN 5574:2012 để thực hiện hai phép so sánh trên các cột khảo sát:

- So sánh khả năng chịu lực của cột BTCT và hệ số an toàn tính toán theo TCVN 5574:2018 - sử dụng hai mô hình vật liệu phi tuyến là MH2ĐT và MH3ĐT;
- So sánh khả năng chịu lực của cột BTCT và hệ số an toàn theo TCVN 5574:2018 và TCVN 5574:2012.

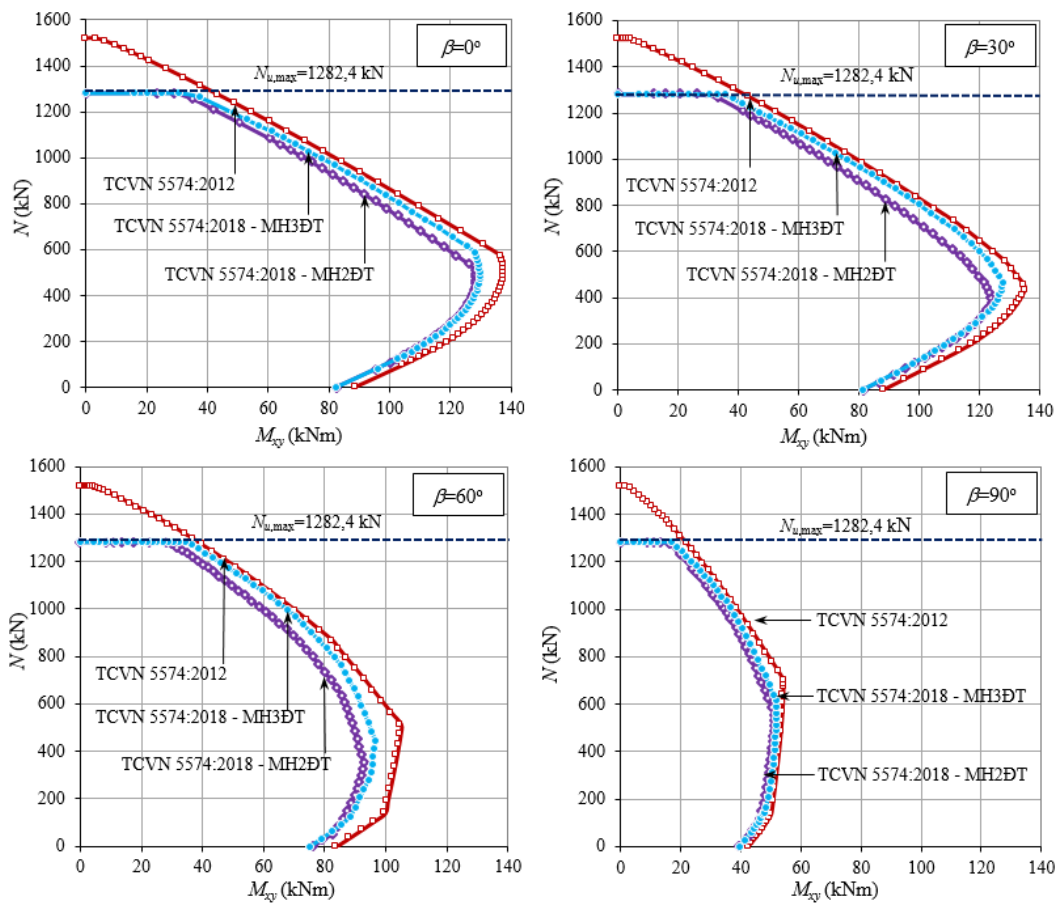
Phiên bản TCVN 5574:2012 cho phép tính toán cột BTCT theo phương pháp gần đúng là quy về trường hợp lệch tâm phẳng. Các giả thiết sau được sử dụng để xây dựng mặt tương tác: (i) Ứng suất trong bê tông trong vùng nén phân bố đều và có giá trị R_b ; và (ii) Ứng suất trong cốt thép phụ thuộc vào vị trí tương đối giữa thanh thép và đường giới hạn vùng nén và được xác định là:

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \left(\frac{\omega}{\xi_i} - 1 \right).$$
 Hình 10 giới thiệu nguyên tắc xây dựng mặt tương tác của cột BTCT theo TCVN 5574:2012 [10].

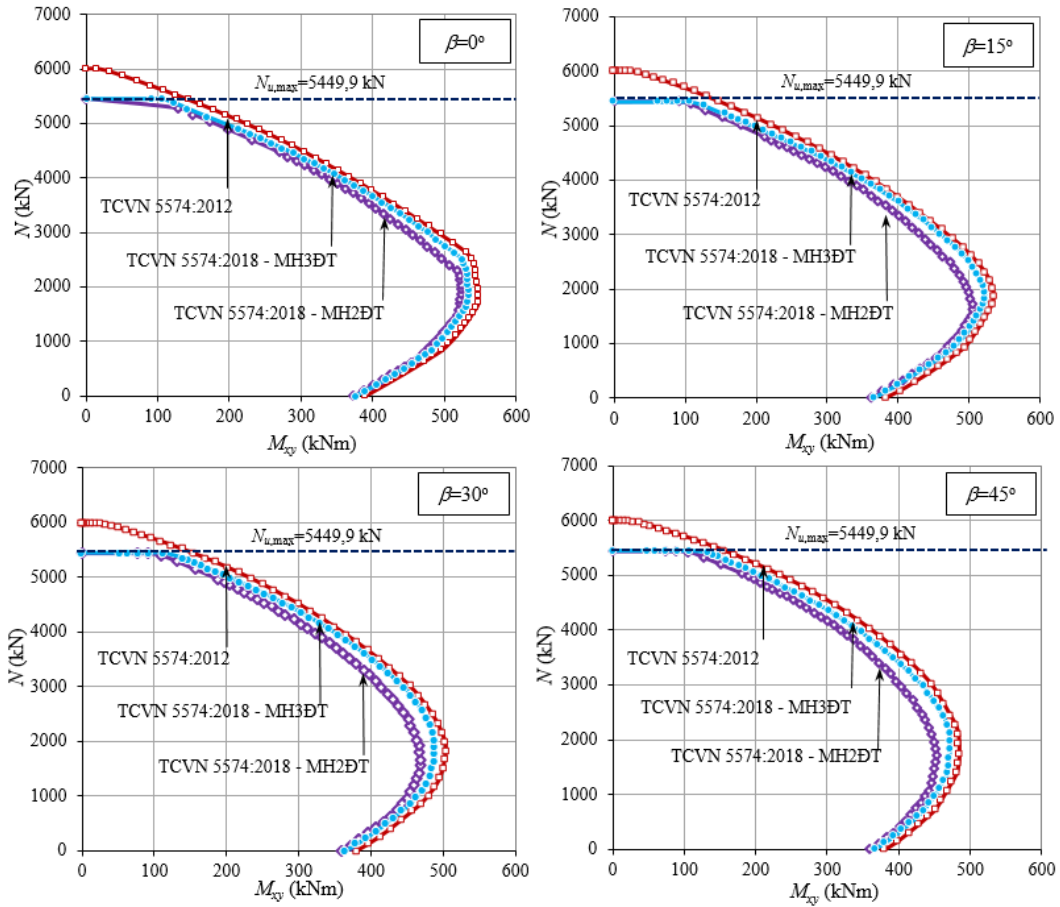


Hình 10. Sơ đồ xây dựng khả năng chịu lực cột BTCT theo TCVN 5574:2012 [10]

Biểu đồ tương tác quy ước (N, M_{xy}) (với $M_{xy} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$) tại một số góc nghiêng trục trung hòa điển hình β của các cột BTCT trong hai thí dụ nêu trên xác định bằng hai tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 và TCVN 5574:2012 được thể hiện tương ứng trong các Hình 11 và Hình 12.



Hình 11. Thí dụ số 1 - Biểu đồ tương tác (N, M_{xy}) với các góc $\beta = 0, 30, 60, 90^\circ$



Hình 12. Thí dụ số 2 - Biểu đồ tương tác (N, M_{xy}) với các góc $\beta = 0, 15, 30, 45^\circ$

Dựa vào các kết quả thu được trên Hình 11 và Hình 12, các phép so sánh được thực hiện trong các mục sau.

a. So sánh về khả năng chịu lực

Từ Hình 11 và Hình 12 cho thấy với cả hai cột BTCT được khảo sát trong Thí dụ số 1 và Thí dụ số 2, các biểu đồ tương tác (N, M_{xy}) với các góc β khác nhau được xây dựng bằng TCVN 5574:2012, TCVN 5574:2018 - MH3ĐT và TCVN 5574:2018 - MH2ĐT luôn nằm theo thứ tự lần lượt từ lớn đến nhỏ. Như vậy có nghĩa là khả năng chịu lực của cột BTCT giảm dần khi được phân tích theo các tiêu chuẩn với thứ tự là TCVN 5574:2012, TCVN 5574:2018 - MH3ĐT và TCVN 5574:2018 - MH2ĐT.

Về mặt định lượng, biểu đồ tương tác tại góc $\beta = 0$ (M_x) của Thí dụ số 1 theo TCVN 5574:2018 - MH2ĐT và TCVN 5574:2012 được so sánh trong Bảng 3, với hệ số R_C được tính theo biểu thức (18).

Số liệu trong Bảng 3 cho thấy với cùng một giá trị lực dọc, mô men M_x chênh lệch nhau 9,372%, nhưng mặt biểu đồ tương tác trong không gian chỉ chênh lệch nhau với giá trị hệ số huy động không gian của mặt tương tác R_C trung bình là 1,557%.

b. So sánh về hệ số an toàn

Với cùng một bộ nội lực, các hệ số an toàn khác nhau sẽ được xác định khi đặt trong các mặt tương tác khác nhau. Kết quả được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 3. So sánh một số điểm của biểu đồ tương tác theo các tiêu chuẩn

STT	β	N	TCVN 5574:2012 M_x (kNm)	TCVN 5574:2018 M_x (kNm)	Chênh lệch M_x (%)	TCVN 5574:2012 R_c	TCVN 5574:2018 R_c	Chênh lệch (%)
1	0	0	88,65	82,37	7,084	88,65	82,37	7,084
2	0	265,76	126,28	119,05	5,724	294,23	291,21	1,029
3	0	401,44	135,52	127,40	5,992	423,70	421,17	0,596
4	0	620,98	130,91	117,80	10,019	634,63	632,06	0,406
5	0	838,13	103,17	91,76	11,063	844,46	843,14	0,156
6	0	1071,10	72,28	60,46	16,352	1073,54	1072,81	0,068
Trung bình					9,372	Trung bình		1,557
COV					0,015	COV		0,010

Bảng 4. So sánh hệ số an toàn giữa các tiêu chuẩn

Hệ số η TCVN 5574:2012		Hệ số η TCVN 5574:2018		Hệ số an toàn TCVN 5574:2012	Hệ số an toàn TCVN 5574:2018 MH3ĐT	Hệ số an toàn TCVN 5574:2018 MH2ĐT	Chênh lệch MH3ĐT (%)	Chênh lệch MH2ĐT (%)
η_x	η_y	η_x	η_y					
1,07	1,29	1,04	1,25	1,569	1,558	1,503	0,694	4,239
1,06	1,23	1,04	1,19	1,700	1,631	1,610	4,087	5,293
1,06	1,23	1,04	1,19	1,642	1,558	1,585	3,305	3,505
1,06	1,23	1,04	1,19	1,799	1,760	1,710	2,141	4,917
1,06	1,22	1,04	1,19	1,361	1,342	1,27	1,355	6,081
1,07	1,28	1,04	1,24	1,519	1,484	1,440	2,313	5,195
1,07	1,28	1,04	1,24	1,522	1,543	1,438	-1,419	5,494
1,07	1,28	1,04	1,24	1,728	1,662	1,597	3,812	7,553
1,07	1,28	1,05	1,24	1,221	1,234	1,168	-1,081	4,286
Trung bình							1,690	5,174
COV							0,006	0,004

Số liệu trong Bảng 4 cho thấy với cùng một bộ giá trị nội lực, khi sử dụng TCVN 5574:2018 - MH2ĐT và TCVN 5574:2018 - MH3ĐT độ an toàn sẽ tăng tương ứng là 5,174% và 1,690% so với TCVN 5574:2012. Như vậy có thể thấy chênh lệch về khả năng chịu lực của cột BTCT khi sử dụng TCVN 5574:2018 - MH2ĐT và TCVN 5574:2018 - MH3ĐT (cho vật liệu bê tông) là nhỏ hơn 5%.

6. Kết luận

Với phương pháp tính toán thực hành được đề xuất, trong giới hạn của hai thí dụ thực tế tính toán khả năng chịu lực của cột bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng các mô hình phi tuyến của vật liệu trong TCVN 5574:2018, một số nhận xét được rút ra như sau:

- Với việc chấp nhận giả thiết tiết diện phẳng và quy định mô hình phi tuyến mô phỏng quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu bê tông và cốt thép một cách tường minh dưới dạng hai đoạn thẳng (MH2ĐT) và ba đoạn thẳng (MH3ĐT), TCVN 5574:2018 đã dần tiệm cận với các tiêu chuẩn tiên tiến trên thế giới, phù hợp với xu thế hội nhập quốc tế;

- Khi áp dụng TCVN 5574:2018 sử dụng mô hình phi tuyến hai đoạn thẳng hoặc ba đoạn thẳng cho vật liệu bê tông, đều thu được khả năng chịu lực của cột BTCT thấp hơn so với tiêu chuẩn trước đây TCVN 5574:2012;

- Khả năng chịu lực của cột BTCT phân tích bằng TCVN 5574:2018 - MH2ĐT thấp hơn so với TCVN 5574:2018 - MH3ĐT. Tuy nhiên, độ chênh lệch về khả năng chịu lực của cột BTCT thu được

khi áp dụng hai mô hình này là dưới 5%;

- Việc đánh giá vị trí tương đối trong không gian của điểm nội lực tối hạn so với mặt tương tác sử dụng phương pháp nội suy và phương pháp trung bình có trọng số là cách tiếp cận phù hợp để xác định hệ số an toàn trong việc tính toán cột BTCT chịu nén lệch tâm xiên.

Trong thời gian tới, cần có thêm nhiều nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng số, cũng như nghiên cứu thực nghiệm trong điều kiện Việt Nam trên cấu kiện cột BTCT nói riêng và kết cấu BTCT nói chung để TCVN 5574:2018 ngày càng đáp ứng một cách hiệu quả các yêu cầu về kinh tế - kỹ thuật từ thực tế xây dựng của đất nước. Bên cạnh đó, phương pháp do các tác giả đề xuất trong bài báo này có thể được tiếp tục nghiên cứu áp dụng cho tính toán cột BTCT sử dụng các loại vật liệu bê tông mới thân thiện môi trường được phát triển mạnh gần đây trong xu thế xây dựng bền vững.

Tài liệu tham khảo

- [1] Minh, P. Q., Phong, N. T., Công, N. Đ. (2013). *Kết cấu bê tông cốt thép - Phần cấu kiện cơ bản*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [2] Wight, J. K., MacGregor, J. G. (2012). *Reinforced concrete - Mechanics and design*. Sixth edition, Pearson Education Inc.
- [3] Mosley, B., Bungey, J., Hulse, R. (2007). *Reinforced concrete design to Eurocode 2*. Palgrave MacMillan, New York.
- [4] Minh, P. Q., Phong, N. T. (2010). *Kết cấu bê tông cốt thép - Thiết kế theo Tiêu chuẩn Châu Âu*. Nhà Xuất bản Xây dựng.
- [5] ACI 318-19. *Building code requirements for structural concrete*. American Concrete Institute.
- [6] EN 1992-1-1:2004. *Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*.
- [7] Thắng, N. T., Ninh, N. T. (2016). [Biểu đồ tương tác của cột bê tông cốt thép ở nhiệt độ cao theo tiêu chuẩn châu Âu EC2](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 10(2):55–61.
- [8] Thắng, N. T. (2017). Xác định khả năng chịu lửa của cột bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn EC2-1-2. *Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng*, (590):71–75.
- [9] SNiP 2.03.01-84 (1997). *Concrete and reinforced concrete structures - Design standards*. National Building Code of Russia.
- [10] TCVN 5574:2012. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [11] TCVN 5574:2018. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [12] SP 63.13330.2012. *Concrete and reinforced concrete structures - Principal rules*. Ministry of Regional Development of the Russian Federation.
- [13] Thang, N. T., Phường, N. V. (2017). [Experimental study on ultimate strength of normal sections in reinforced concrete beams](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 11(6):44–52.
- [14] Thắng, N. T. (2019). [Tính toán cốt đai cho dầm bê tông cốt thép chịu đồng thời lực phân bố đều và lực tập trung](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(1V):25–34.
- [15] Tâm, T. V., Tùng, P. T., Ninh, N. T., Vượng, P. N. (2019). [Xây dựng phần mềm tính toán khả năng chịu lực của cấu kiện bê tông cốt thép chịu nén lệch tâm xiên có tiết diện bất kỳ theo TCVN 5574: 2018](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(4V):47–57.
- [16] Hùng, H. V., Đạt, P. X., Huy, N. T. (2013). Xác định diện tích cốt thép yêu cầu của cấu kiện chịu nén lệch tâm xiên bằng phương pháp sử dụng biểu đồ tương tác. *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng lập Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng - số đặc biệt kỷ niệm 50 năm ngày thành lập Viện IBST*, 200–210.
- [17] Land University GIS Center (2004). *Interpolation*. Sweden.
- [18] Tan, K. H., Trung, N. T., Thang, N. T. (2012). Discussions on using EN 1992-1-1:2004 in design of precast prestressed planks and biaxially-loaded slender columns. *Proceedings of the Third International Workshop on Design of Concrete Structures Using Eurocodes*, Vienna, 203–210.