

TÍNH TOÁN VÀ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA CỘT LIÊN HỢP THÉP - BÊ TÔNG VỚI CÁC DẠNG TIẾT DIỆN KHÁC NHAU

CALCULATION AND EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE COLUMNS WITH DIFFERENT SECTIONS

HOÀNG HIẾU NGHĨA^a, VŨ QUỐC ANH^{b*}

^aKhoa Xây dựng, Trường ĐH Hải Phòng

^bKhoa Xây dựng, Trường ĐH Kiến trúc Hà Nội

*Tác giả đại diện: Email: anhvuq@hau.edu.vn

Ngày nhận 28/5/2024, Ngày sửa 27/6/2024, Chấp nhận 30/6/2024

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol2-1>

Tóm tắt: Cột liên hợp thép – bê tông là kết cấu chịu lực chính trong các công trình cao tầng. Việc tính toán, thiết kế, kiểm tra cột liên hợp cũng đã được trình bày trong một số tài liệu về kết cấu liên hợp. Tuy nhiên, để có một quy trình thiết kế đầy đủ với các loại tiết diện và để so sánh, dự đoán khả năng chịu lực của cột liên hợp với các dạng tiết diện khác nhau là chưa có hoặc chưa đầy đủ. Bài báo này đã trình bày quy trình tính toán, thiết kế, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông với các dạng tiết diện khác nhau. Thực hiện ví dụ tính toán, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông. Thực hiện việc vẽ biểu đồ tương tác của cột liên hợp với các dạng tiết diện khác nhau, từ đó đánh giá, so sánh khả năng chịu lực của cột với các dạng tiết diện khác nhau khi chịu nén uốn. Khảo sát khả năng chịu lực khi thay đổi các thông số của cột, từ đó có thể lựa chọn được tiết diện cột hợp lý khi thiết kế cột liên hợp chịu nén uốn.

Từ khóa: Kết cấu liên hợp, cột liên hợp, biểu đồ tương tác, khả năng chịu lực, bọc bê tông, nhồi bê tông.

Abstract: Steel-concrete composite columns are the main load-bearing structures in high-rise buildings. The calculation, design, and inspection of composite columns have also been presented in a number of documents on composite structures. However, to have a complete design process with different types of cross-sections and to compare and predict the load-bearing capacity of composite columns with different cross-sections is not available or not complete. This paper presents the calculation, design, and inspection process of steel-concrete composite columns with different cross-sections. Perform an example of calculating and inspecting steel-concrete composite columns. Draw interaction diagrams of composite columns with different cross-sections, thereby evaluating and comparing the load-bearing capacity of columns with different

cross-sections when subjected to bending and compression. Survey the load-bearing capacity when changing the parameters of the column, from which a reasonable column cross-section can be selected when designing composite columns subjected to bending and compression.

Keywords: Composite structure, composite column, interaction diagram, bearing capacity, concrete cover, concrete filling.

1. Đặt vấn đề

Nhu cầu xây dựng nhà cao tầng và nhà siêu cao tầng đang bùng nổ mạnh mẽ ở Việt Nam, đặc biệt ở các khu đô thị lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh nên việc lựa chọn giải pháp kiến trúc, kết cấu là một vấn đề lớn đặt ra cho ngành thiết kế xây dựng. Giải pháp sử dụng kết cấu bê tông cốt thép cổ điển không đáp ứng được yêu cầu do đòi hỏi kích thước các cấu kiện kết cấu có thể rất lớn, nặng nề, tốn kém, giảm không gian sử dụng và giảm tính thẩm mỹ của công trình.

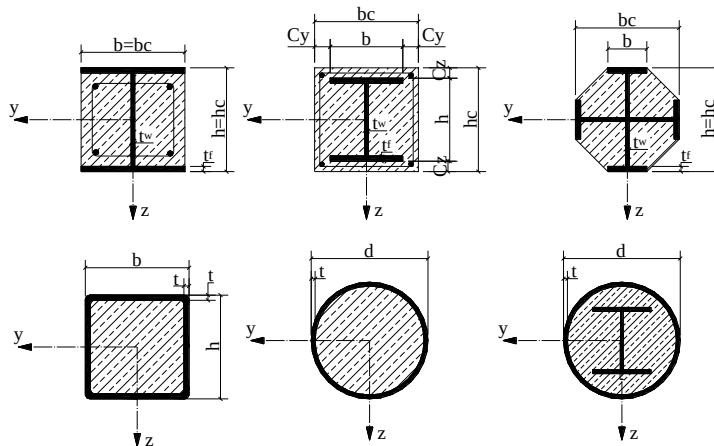
Do vậy giải pháp sử dụng kết cấu liên hợp thép – bê tông đã được sử dụng để giải quyết các nhược điểm của loại kết cấu cũ, việc sử dụng kết cấu thép – bê tông liên hợp đã đáp ứng được các yêu cầu đặt ra trong xây dựng: có khả năng chịu lực và độ tin cậy cao, đồng thời tăng cường khả năng chống cháy, đáp ứng được công năng sử dụng cao, hiệu quả về kinh tế và đảm bảo tính thẩm mỹ cho công trình.

Trong kết cấu nhà cao tầng, cột là cấu kiện chính chịu tải trọng đứng của công trình. Công trình càng cao tầng thì tiết diện cột cũng càng lớn. Vì vậy yêu cầu hạn chế tối đa kích thước tiết diện cột được đặt ra cho các kỹ sư xây dựng để tăng tính thẩm mỹ cũng như công năng cho công trình.

Cột có nhiều dạng tiết diện khác nhau như: cột liên hợp bọc bê tông hoàn toàn lõi chữ I và cột nhồi bê tông tiết diện dạng vuông, tròn [3], [5], [6] (Hình

1)... Mỗi loại tiết diện cột có khả năng chịu lực khác nhau, các tài liệu về kết cấu liên hợp chủ yếu tính toán cột tiết diện chữ I [1], [3], [4]. Do đó để cung cấp

cách chọn cột hợp lý nhất, tăng khả năng chịu lực và phù hợp với công năng sử dụng cho công trình thì cần tính toán với nhiều loại tiết diện khác nhau.



Hình 1. Các dạng tiết diện ngang của cột liên hợp

Theo EN 1994-1-1 [6],[9] có 2 phương pháp tính toán cột liên hợp:

Phương pháp thứ nhất (phương pháp tổng quát): yêu cầu tính đến ảnh hưởng của sự làm việc phi tuyến và chế tạo không chính xác. Phương pháp này có thể áp dụng cho tiết diện không đối xứng và cột có tiết diện thay đổi. Cách tính dùng phương pháp số và chỉ có thể áp dụng khi dùng chương trình tính toán được thành lập riêng. Trong tiêu chuẩn thiết kế không nêu nội dung của phương pháp này.

Phương pháp thứ hai (phương pháp đơn giản hóa): sử dụng đường cong uốn dọc của cột thép có kể đến sự chế tạo không chính xác được thống nhất giữa nhiều nước, được gọi là đường cong uốn dọc Châu Âu. Chúng được giới hạn cho cột liên hợp có tiết diện không đổi và có hai trục đối xứng.

Các giả thiết tính toán:

- Tương tác giữa thép và bê tông là hoàn toàn cho đến khi cột bị phá hoại;
- Kể đến sự chế tạo không chính xác về hình học và kết cấu;
- Tiết diện ngang luôn phẳng khi cột bị biến dạng.

Tính toán kết cấu liên hợp thép – bê tông là vấn đề được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu và tìm các phương pháp tính toán. Tại Việt Nam, chưa có tiêu chuẩn thiết kế kết cấu liên hợp thép - bê tông, vẫn đang sử dụng tiêu chuẩn Eurocode 1994-1-4 [6] để thiết kế, tuy nhiên cũng đã có một số tài liệu tính toán loại kết cấu này. Năm

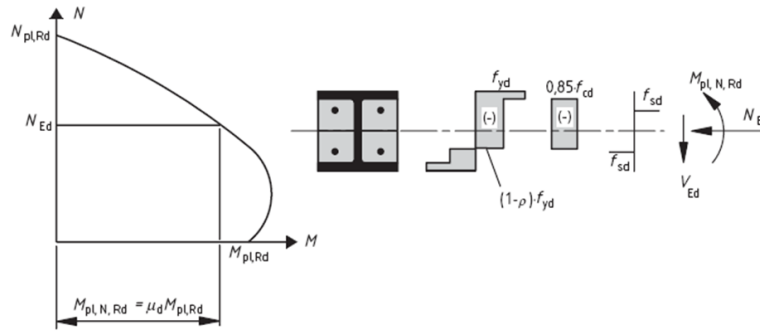
2007, tác giả Phạm Văn Hội đã trình bày quy trình tính toán các dạng cấu kiện liên hợp thép – bê tông tiết diện chữ nhật bọc bê tông cốt thép hoàn toàn [1]. Năm 2017, tác giả Nguyễn Xuân Huy và cộng sự đã nghiên cứu và trình bày chi tiết về sức kháng của cột liên hợp chịu nén đúng tâm và cột liên hợp chịu nén uốn đồng thời, vị trí trục trung hòa của một số dạng tiết diện cột liên hợp [2]. Năm 2022, tác giả Chu Tuấn Long và cộng sự cũng đã tính toán kết cấu liên hợp thép – bê tông theo tiêu chuẩn Châu Âu [5].

Với mục tiêu trên, nhóm tác giả cần thiết trình bày quy trình tính toán, thiết kế, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông với các dạng tiết diện khác nhau dựa theo tiêu chuẩn Eurocode 1994-1-4 [6]. Thực hiện ví dụ tính toán, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông. Thực hiện việc vẽ biểu đồ tương tác của cột liên hợp với các dạng tiết diện khác nhau, từ đó đánh giá, so sánh khả năng chịu lực của cột với các dạng tiết diện khác nhau khi chịu nén uốn. Khảo sát khả năng chịu lực khi thay đổi các thông số của cột, từ đó có thể lựa chọn được tiết diện cột hợp lý khi thiết kế cột liên hợp chịu nén uốn.

2. Quy trình tính toán, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông với các dạng tiết diện khác nhau chịu nén - uốn đồng thời

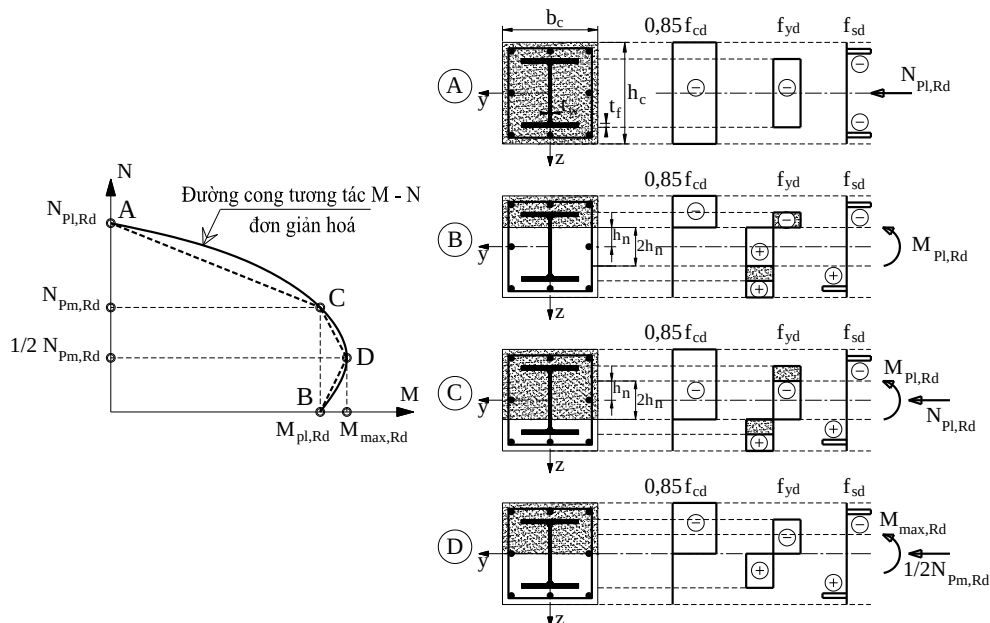
Cần tiến hành kiểm tra khả năng chịu lực của cột đối với từng trục đối xứng. Khả năng chịu lực của cột dưới tác dụng của mômen và lực dọc (theo hai trục nói chung) được xác định thông qua đường

cong tương tác giữa mô men và lực dọc $M - N$ (Hình 2) (EN 1994-1-1, 6.7.3.2(2))[6].

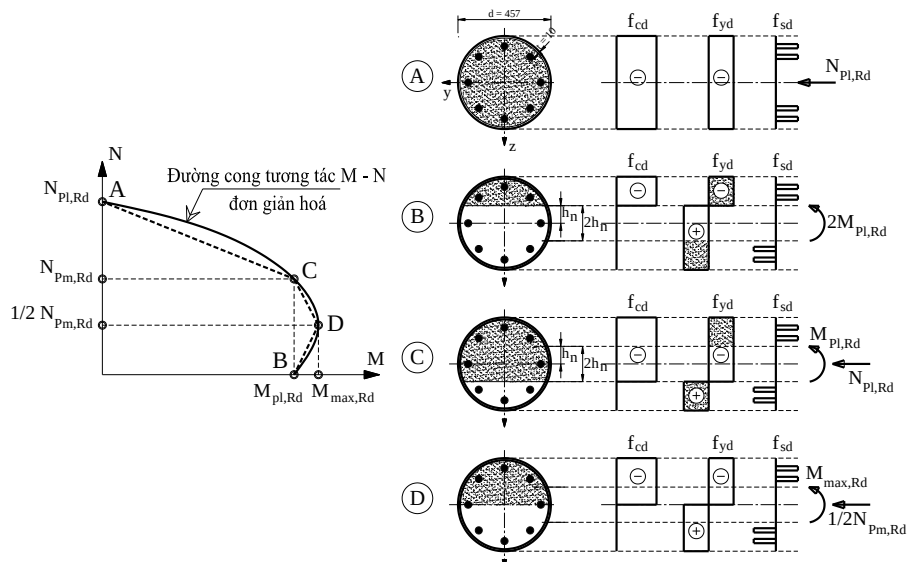


Hình 2. Đường cong tương tác lực nén và mômen uốn

Để đơn giản hóa, đường cong tương tác có thể được xấp xỉ bằng đường tương tác đơn giản hóa ABCD theo EN 1994-1-1, 6.7.3.2(5) [6] (Hình 3).



(a) Với tiết diện chữ nhật - cột chữ I được bọc bê tông hoàn toàn



(b) Với tiết diện cột ống nhồi bê tông

Hình 3. Đường cong tương tác đơn giản hóa và sự phân bố ứng suất tương ứng

2.1 Đường cong tương tác M – N đơn giản hóa của tiết diện cột liên hợp

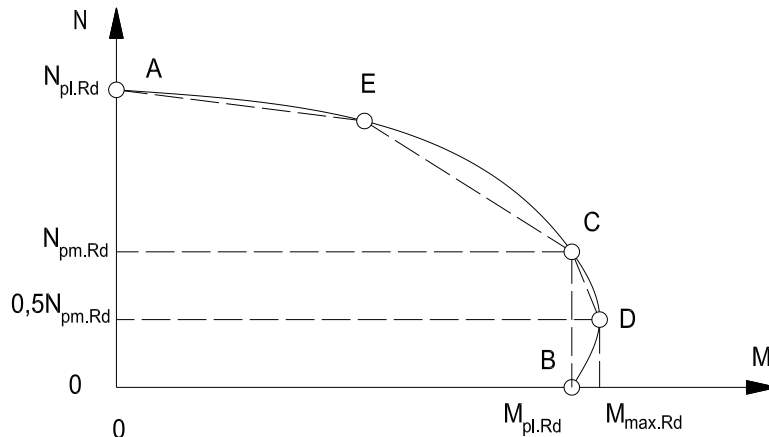
Đường cong tương tác M – N đơn giản hóa được xây dựng bằng cách xác định khả năng chịu lực của tiết diện tại các điểm A, B, C, D tương ứng với các vị trí khác nhau của trục trung hòa dẻo trên tiết diện ngang của cột liên hợp và sử dụng phương

trình cân bằng của các khối ứng suất hình chữ nhật kéo, nén trên tiết diện này.

2.1.1 Tính toán cột liên hợp chịu nén lệch tâm theo phương chính

a. Xây dựng đường cong tương tác M - N

Thực hiện xây dựng đường cong tương tác M – N đơn giản hóa ABCD như Hình 4.



Hình 4. Đường cong tương tác lực nén và mômen uốn

Trên đường cong thể hiện các điểm giới hạn A, B, C, D [6]:

• Điểm A: khả năng chịu nén lớn nhất

Điểm A là điểm ứng với trường hợp tiết diện cột liên hợp chịu nén đúng tâm, khả năng chịu nén là lớn nhất (Hình 3).

$$N_A = N_{pl,Rd} ; M_A = 0 \quad (1)$$

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} + A_c \cdot 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

$$M_D = M_{max,Rd} = W_{pa} \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} + W_{ps} \frac{f_{sk}}{\gamma_s} + \frac{1}{2} W_{pc} \cdot \alpha_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2)$$

Trong công thức trên: $\alpha_c = 0,85$ đối với cột bọc bê tông và $\alpha_c = 1,0$ đối với cột rỗng nhồi bê tông.

W_{pa} , W_{ps} , W_{pc} lần lượt là các môđun chống uốn dẻo của lõi thép hình, cốt thép thanh và bê tông tương ứng với điểm đang xét. Hệ số 1/2 được đưa vào chỉ để tính một nửa phần bê tông chịu nén, còn 1/2 phần bê tông chịu kéo được bỏ qua trong tính toán.

Khả năng chịu nén tại điểm D chỉ sinh ra bởi phần bê tông chịu nén:

$$N_D = \frac{1}{2} N_{pm,Rd} = \frac{1}{2} A_c \cdot \alpha_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3)$$

• Điểm D: mômen uốn giới hạn dẻo lớn nhất

Điểm D là điểm mômen giới hạn dẻo tại điểm D đạt giá trị lớn nhất bằng $M_{max,Rd}$ (Hình 3).

Điểm này ứng với trường hợp trục trung hòa dẻo trùng với trục trung tâm của tiết diện. Trong trường hợp này, tất cả các khối ứng suất sẽ sinh ra mô men giới hạn dẻo cho tiết diện.

A_c là diện tích của tiết diện bê tông.

• Điểm B: khả năng chịu uốn (khả năng chịu nén bằng không).

Điểm B là điểm ứng với trường hợp tiết diện chỉ chịu uốn mà không chịu nén.

Trong trường hợp này, hợp lực của các khối ứng suất kéo và nén trên tiết diện bằng không. Vị trí trục trung hòa dẻo nằm phía trên trục trung tâm của tiết diện một đoạn bằng h_n sao cho lực nén sinh ra trong vùng bê tông chịu nén cân bằng với lực kéo sinh ra của phần thép hình nằm trong phạm vi chiều cao $2h_n$.

$$N_B = 0 ; M_B = M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{pl,n,Rd} \quad (4)$$

$$M_{pl,n,Rd} = W_{pl,a,n} \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} + W_{pl,s,n} \frac{f_{sk}}{\gamma_s} + \frac{1}{2} W_{pl,c,n} \cdot \alpha_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5)$$

$M_{pn,Rd}$ là mômen uốn dẻo của tiết diện cột trong vùng $2h_n$.

- Điểm C: có cùng khả năng chịu uốn như B nhưng có lực nén.

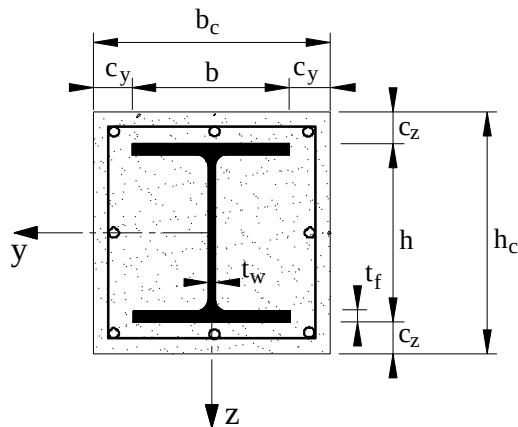
Điểm C là điểm ứng với trường hợp vị trí trục trung hòa nằm đối xứng qua trục trung tâm với trục trung hòa dẻo ứng với điểm B. Mômen giới hạn tại điểm B và điểm C bằng nhau và bằng $M_{pl,Rd}$ (Hình 3).

Khả năng chịu nén của tiết diện ứng với điểm C bằng sức kháng nén của phần bê tông trên tiết diện.

$$N_c = N_{pm,Rd} = A_c \cdot \alpha_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} ; M_c = M_{pl,Rd} \quad (6)$$

b. Xác định vị trí trục trung hòa của một số dạng tiết diện liên hợp

- Tiết diện cột chữ I được bọc bê tông hoàn toàn



Hình 5. Tiết diện cột chữ I - bọc bê tông hoàn toàn

Mômen chống uốn dẻo của phần cốt thép được xác định theo công thức:

$$W_{ps} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_i \quad (7)$$

Trong đó: A_{si} - diện tích cốt thép thứ i , e_i - khoảng cách từ cốt thép thứ i đến trục đang xét; $\alpha_c = 0,85$

- Uốn quanh trục khỏe yy:

$$W_{ypa} = \frac{(h - 2.t_f)^2 \cdot t_w}{4} + b.t_f.(h - t_f) \quad (8)$$

$$W_{ypc} = \frac{b_c \cdot h_c^2}{4} - W_{ypa} - W_{yps} \quad (9)$$

Các vị trí khác nhau của trục trung hòa, h_n và W_{ypan} được xác định như sau:

+ Trục trung hòa đi qua bản bụng của thép hình: $h_{ny} \leq h / 2 - t_f$.

$$h_{ny} = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2.b_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + 2.t_w \cdot \left(2 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (10)$$

Trong đó: h_{ny} - khoảng cách từ trục y tới trục trung hòa;

A_{sn} - diện tích cốt thép nằm trong vùng $2h_n$.

$$W_{ypan} = t_w \cdot h_{ny}^2 \quad (11)$$

+ Trục trung hòa đi qua bản cánh của thép hình: $h / 2 - t_f \leq h_{ny} \leq h / 2$.

$$h_{ny} = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right) + (b - t_w) \cdot (h - 2.t_f) \cdot \left(2 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2.b_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + 2.b \cdot \left(2 \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (12)$$

$$W_{ypan} = b \cdot h_{ny}^2 - \frac{(b - t_w) \cdot (h - 2.t_f)^2}{4} \quad (13)$$

+ Trục trung hòa nằm ngoài phần thép hình: $h / 2 \leq h_{ny} \leq h_c / 2$.

$$h_{ny} = \frac{N_{pm.Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right) - A_a \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2 \cdot b_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \quad (14)$$

$$W_{ypan} = W_{ypa} \quad (15)$$

Mô men chống uốn dẻo của phần bê tông trong vùng có chiều cao $2h_n$:

$$W_{ypcn} = b_c \cdot h_n^2 - W_{ypan} - W_{ypsn} \quad (16)$$

$$W_{ypsn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{zi} \quad (17)$$

Trong đó: A_{sni} - diện tích cốt thép thứ i trong vùng có chiều cao $2h_n$, e_{zi} - khoảng cách từ cốt thép thứ i đến trục y .

- Uốn quanh trục yếu zz :

$$W_{zpa} = \frac{(h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^2}{4} + \frac{2 \cdot t_f \cdot b^2}{4} \quad (18)$$

$$W_{zpc} = \frac{h_c \cdot b_c^2}{4} - W_{zpa} - W_{zps} \quad (19)$$

Các vị trí khác nhau của trục trung hòa, h_n và W_{zpan} được xác định như sau:

+ Trục trung hòa đi qua bản bụng của thép hình: $h_{nz} \leq t_w / 2$.

$$h_{nz} = \frac{N_{pm.Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2 \cdot h_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + 2 \cdot h \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (20)$$

Trong đó: h_{nz} - khoảng cách từ trục z tới trục trung hòa;

A_{sn} - diện tích cốt thép nằm trong vùng $2h_n$.

$$W_{zpan} = h \cdot h_{nz}^2 \quad (21)$$

+ Trục trung hòa đi qua bản cánh của thép hình: $t_w / 2 \leq h_{nz} \leq b / 2$.

$$h_{nz} = \frac{N_{pm.Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right) + t_w \cdot (2 \cdot t_f - h) \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2 \cdot h_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + 4 \cdot t_f \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (22)$$

$$W_{zpan} = 2 \cdot t_f \cdot h_{nz}^2 - \frac{(h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^2}{4} \quad (23)$$

+ Trục trung hòa nằm ngoài phần thép hình: $b / 2 \leq h_{nz} \leq b_c / 2$

$$h_{nz} = \frac{N_{pm.Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right) + A_a \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2 \cdot h_c \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}} \quad (24)$$

$$W_{zpan} = W_{zpa} \quad (25)$$

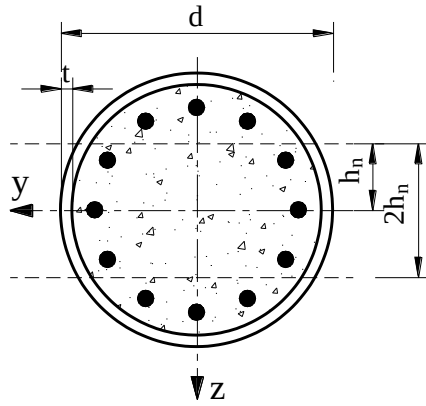
Mômen chống uốn dẻo của phần bê tông trong vùng có chiều cao $2h_n$:

$$W_{zpcn} = h_c \cdot h_{nz}^2 - W_{zpan} - W_{zpsn} \quad (26)$$

$$W_{zpsn} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{yi} \quad (27)$$

Trong đó: A_{sni} - diện tích cốt thép thứ i trong vùng có chiều cao $2h_n$, e_{yi} - khoảng cách từ cốt thép thứ i đến trục z .

• **Tiết diện cột ống tròn được nhồi bê tông**



Hình 6. Tiết diện ống được nhồi bê tông

Mômen chống uốn dẻo của phần cốt thép được xác định theo công thức:

$$W_{ps} = \sum_{i=1}^n A_{si} e_i \quad (28)$$

Trong đó: A_{si} - diện tích cốt thép thứ i ; e_i - khoảng cách từ cốt thép thứ i đến trục đang xét.

$$W_{pa} = \frac{d^3 - (d - 2t)^3}{6} \quad (29)$$

$$W_{pc} = \frac{d^3}{6} - W_{pa} - W_{ps} \quad (30)$$

Trục trung hòa h_n và W_{pan} được xác định như sau:

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn} \cdot \left(2 \frac{f_{sk}}{\gamma_s} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)}{2 \cdot d \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + 4 \cdot t \cdot \left(2 \frac{f_{yk}}{\gamma_{Ma}} - \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \right)} \quad (31)$$

$$W_{pan} = 2 \cdot t \cdot h_n^2 \quad (32)$$

Mômen chống uốn dẻo trong vùng có chiều cao $2h_n$:

+ Cốt thép dọc:

$$W_{pl,s,n} = \sum_{i=1}^n A_{sni} e_{yi} \quad (33)$$

Trong đó: A_{sni} - diện tích cốt thép thứ i trong vùng có chiều cao $2h_n$, e_{yi} - khoảng cách từ cốt thép thứ i đến trục z .

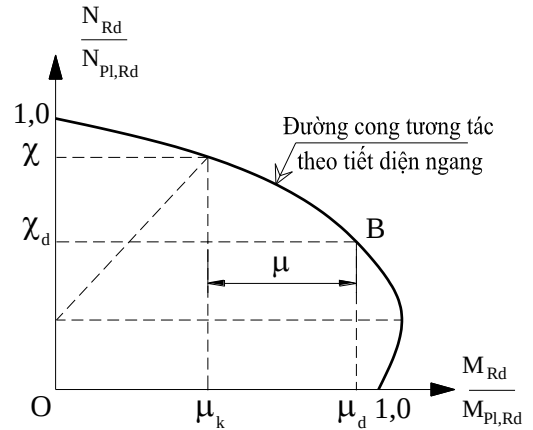
+ Bê tông:

$$W_{pl,c,n} = (d - 2 \cdot t) \cdot h_n^2 - W_{pl,s,n} \quad (34)$$

+ Thép ống kết cấu:

$$W_{pl,a,n} = d \cdot h_n^2 - W_{pl,s,n} - W_{pl,c,n} \quad (35)$$

c. Kiểm tra khả năng chịu lực



Hình 7. Phương pháp tính toán cột chịu nén uốn một phương

Việc kiểm tra khả năng chịu lực của cột chịu nén uốn một phương được thể hiện trên Hình 7 [6].

Trong đó: $N_{pl,Rd}$ - khả năng chỉ chịu nén đúng tâm tối đa của cột (theo điều kiện bền);

N_{Rd} - khả năng chịu nén dọc trục tính toán của cột (khả năng chịu lực nén dọc trục thực tế của cột khi kể đến độ mảnh và sai số hình học);

$$N_{Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd} \quad (36)$$

χ - hệ số uốn dọc theo trục đang xét, hệ số này tính đến sự không chính xác về mặt hình học và kết cấu của cột liên hợp;

$M_{pl,Rd}$ - khả năng chỉ chịu mômen tối đa của cột;

M_{Rd} - khả năng chịu mômen tính toán của cột;

χ_d - thông số thể hiện tác động dọc trục N_{sd} (khi có cả mô men M_{Rd}).

$$\chi_d = \frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}} \quad (37)$$

N_{sd} - lực dọc trục tính toán của cột;

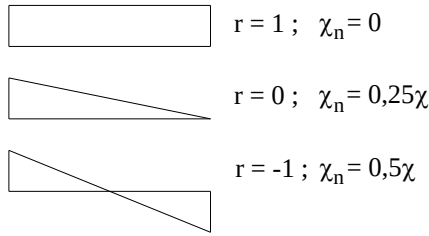
$$\chi_n = \chi \frac{1-r}{4} \quad (38)$$

χ_n - thông số thể hiện giá trị của N_{sd} ứng với khả năng chịu mômen lớn nhất của tiết diện; $\chi_n \leq \chi_d$
 r - tỷ số mô men với hai đầu của cột.

Giá trị r và χ_n phụ thuộc vào dạng phân bố mô men uốn trong cột như Hình 8.

Sự phân bố là tuyến tính của mômen thì giá trị r và χ_n lấy như Hình 8.

Sự phân bố mômen không phải là tuyến tính thì $\chi_n = 0$.



Hình 8. Cách xác định χ_n

Giải thích đồ thị trên Hình 7.

Sức kháng tính toán của cột sẽ bị giảm đi do kể đến sự chế tạo không chính xác về hình học và kết cấu. Mômen kháng tính toán của cột cũng bị giảm đi do tính đến các hiệu ứng bậc 2.

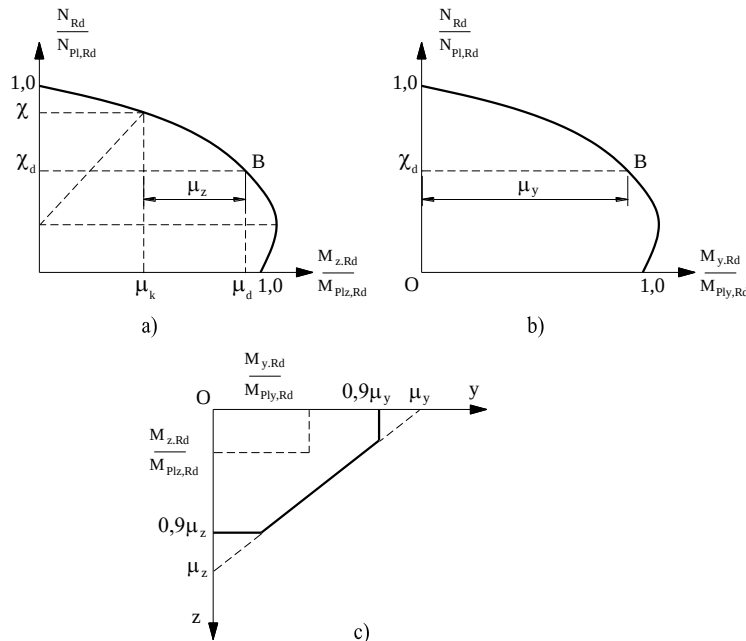
Để sử dụng đường cong trên Hình 7, ta thực hiện như sau:

- Xác định $N_{Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd}$;

- Ứng với giá trị $N_{Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd}$ trên đồ thị ta có sức kháng uốn $M_{Rd} = \mu_k \cdot M_{pl,Rd}$ (đây là sức kháng uốn tính toán có tính đến hiệu ứng bậc 2). Trong trường hợp này nếu ta tác dụng lên cột một mômen uốn lớn hơn M_{Rd} thì cột không có khả năng chịu tải.

- Ứng với giá trị $\chi_d \cdot N_{pl,Rd}$ trên đồ thị ta có sức kháng uốn dẻo $\mu_d \cdot M_{pl,Rd}$. Tuy nhiên do hiệu ứng bậc hai, mômen kháng uốn dẻo sẽ bị giảm đi và chỉ còn là $\mu \cdot M_{pl,Rd}$. Với μ được xác định như sau:

$$\mu = \mu_d - \frac{\mu_k(\chi_d - \chi_n)}{\chi - \chi_n} \quad (39)$$



Hình 9. Phương pháp tính toán cho cột chịu nén và uốn theo hai phương

a) Mặt phẳng giả thiết xảy ra phá hoại, có tính đến sự chế tạo không chính xác về mặt hình học và kết cấu

b) Mặt phẳng không kể đến sự chế tạo không chính xác

c) Biểu đồ tương tác cho sức kháng uốn theo hai phương

Cột có khả năng chịu mômen uốn khi thỏa mãn điều kiện sau:

$$M_{Sd} \leq 0,9 \cdot M_{Rd} = 0,9 \cdot \mu \cdot M_{pl,Rd} \quad (40)$$

Hệ số 0,9 kể đến các yếu tố sau:

- Đường cong tương tác M-N được xác định khi coi như tiết diện chảy dẻo hoàn toàn dưới tác dụng của N và M. Điều này không phù hợp hoàn toàn với thực tế.

- Mômen M_{Sd} được xác định khi coi như tiết diện không bị nứt, thực tế khi mômen đủ lớn thì cột sẽ xuất hiện vết nứt ảnh hưởng đến độ cứng của cột.

2.2 Cột liên hợp chịu nén – uốn theo hai phương

Do cột chịu uốn trong mặt phẳng xz, với mômen uốn ban đầu $M_{y,Ed}$ trong mặt phẳng xz và một mômen uốn do sai số chế tạo trong mặt phẳng xy bằng $N_{Ed} \cdot e_{0y}$. Do đó cần kiểm tra khả năng chịu lực của cột chịu nén và uốn theo hai phương.

Theo EN 1994-1-1, 6.7.3.7 [6], [9] kiểm tra cột chịu nén và uốn theo hai phương được kiểm tra theo những điều kiện sau (Hình 9):

$$M_{y,Sd} \leq 0,9 \cdot \mu_y \cdot M_{pl,y,Rd} \quad (41)$$

$$M_{z,Sd} \leq 0,9 \cdot \mu_z \cdot M_{pl,z,Rd} \quad (42)$$

$$\frac{M_{y,Sd}}{\mu_y \cdot M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{\mu_z \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq 1 \quad (43)$$

Với $M_{pl,y,Rd}$, μ_y , $M_{pl,z,Rd}$, μ_z lần lượt được tính toán theo các trục y, z.

2.3 Ảnh hưởng của hiệu ứng bậc 2

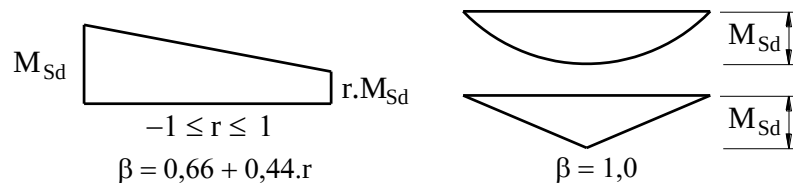
Khi tính toán, giả thiết của phương pháp đơn giản là kết cấu cứng, nhưng không thể bỏ qua ảnh hưởng của phi tuyến hình học làm tăng mômen trong cột khi tính theo tuyến tính. Khi đó ta tính mômen theo sơ đồ biến dạng, nghĩa là mômen được tính theo hiệu ứng bậc hai theo EN 1994-1-1, 6.7.3.4 (5) [6], [9].

Điều kiện kiểm tra cột chịu nén uốn có kể đến hiệu ứng bậc 2 (một trong hai điều kiện sau):

$$\frac{N_{Sd}}{N_{cr}} \geq 0,1 \quad (44)$$

$$\bar{\lambda} > 0,2 \cdot (2 - r) \quad (45)$$

Trong đó:



Hình 10. Sự phân bố mômen dọc theo trục cột

3. Ví dụ tính toán và đánh giá khả năng chịu lực của cột với các dạng tiết diện khác nhau

3.1 Tính toán, kiểm tra và đánh giá khả năng chịu lực của cột liên hợp với các dạng tiết diện khác nhau

r – tỷ số của mômen hai đầu cột ($-1 \leq r \leq 1$).
Nếu có tải trọng ngang tác dụng lên cột thì lấy $r = 1,0$.

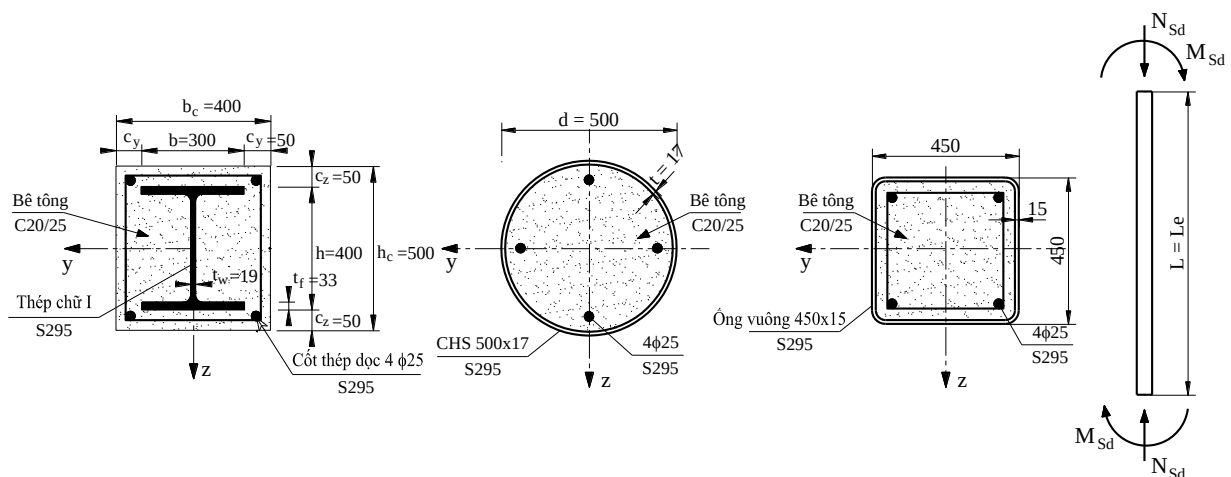
Ảnh hưởng của hiệu ứng bậc hai được đưa vào trong tính toán bằng cách nhân mômen tính toán ban đầu với hệ số k , giá trị hệ số k được xác định theo công thức sau:

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{cr}}} \geq 1 \quad (46)$$

Với $\beta = 0,66 + 0,44r$ trong trường hợp có mômen tác dụng ở hai đầu cột.

$\beta = 1$ trong trường hợp có tải trọng ngang tác dụng lên cột.

Thép chữ I được bọc bê tông hoàn toàn; ống thép có tiết diện hình tròn rỗng nhồi bê tông; ống thép có tiết diện vuông nhồi bê tông chịu lực nén uốn tại đầu cột như (Hình 11) dưới đây.



Hình 11. Sơ đồ tính và tiết diện ngang của các dạng tiết diện cột khác nhau

Sơ đồ tính: Cột chịu nén uốn tại 2 đầu cột. Giả thiết mô men tại 2 đầu cột bằng nhau và bằng M_{Sd} , do đó $r = 1$; $\beta = 1$.

Số liệu tải trọng: $N_{Sd} = 3.150 \text{ kN}$; $M_{Sd} = 84 \text{ kNm}$.

Các đặc trưng vật liệu sử dụng:

Bê tông cấp độ bền C20/25: $f_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$; $E_{cm} = 29.000 \text{ N/mm}^2$.

Thép kết cấu I300x400x19x33; thép tròn D500x17; thép ống vuông V500x15; S295 có: $f_{yk} = 295 \text{ N/mm}^2$; $E_a = 21.000 \text{ kN/cm}^2$.

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Cốt thép 4 ϕ 25; S295 có: $f_{sk} = 295 \text{ N/mm}^2$; $E_s = 210.000 \text{ N/mm}^2 = 21.000 \text{ kN/cm}^2$.

Hệ số an toàn: $\gamma_{Ma} = 1$; $\gamma_c = 1,5$; $\gamma_s = 1,15$.

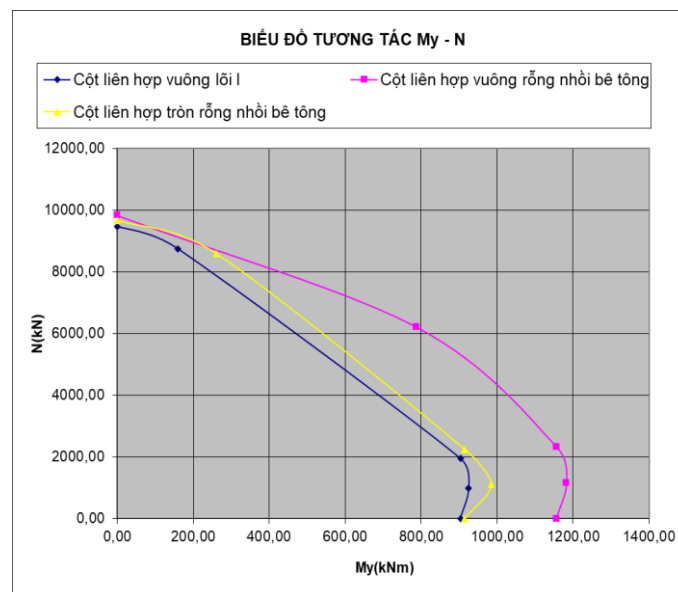
Điều kiện để thực hiện so sánh: Cùng diện tích tiết diện cột $A_a \approx 0,2\text{m}^2$; cùng diện tích thép hình $A_a = 0,026 \text{ m}^2$.

Thực hiện tính toán theo quy trình ở mục 2 có kết quả khả năng chịu lực như Bảng 1.

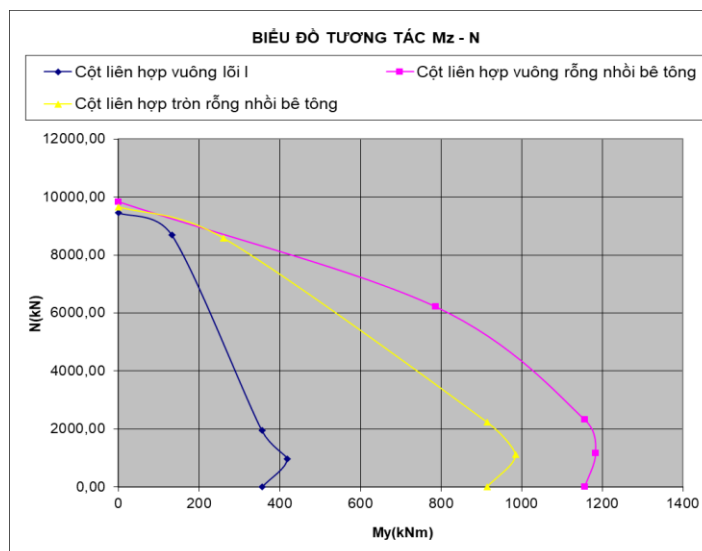
Bảng 1. Khả năng chịu lực tại các điểm A, B, C, D, E trên biểu đồ tương tác

Đơn vị: kN

Biểu đồ tương tác	Cột chữ I bọc bê tông 400x500				Cột ống vuông V450		Cột ống tròn D500	
	Diện tích tiết diện: $A_{cột} = 0,2\text{m}^2$				$A_{cột} = 0,2025\text{m}^2$		$A_{cột} = 0,19625\text{m}^2$	
	Diện tích thép hình: $A_a = 0,02615\text{m}^2$				$A_a = 0,0261\text{m}^2$		$A_a = 0,0258\text{m}^2$	
	My	N	Mz	N	M	N	M	N
A	0,00	9463,41	0	9463,41	0	9828,80	0	9664,57
E	159,25	8744	133,22	8688	787,45	6208,35	261,47	8582
C	903,40	1948	356,26	1948	1156,10	2325,83	913,82	2246,73
D	925,20	974	418,2587	974	1182,84	1162,9167	984,83	1123,366
B	903,40	0	356,2599	0	1156,10	0	913,82	0



Hình 12. Biểu đồ tương tác My – N của cột liên hợp với các dạng tiết diện cột khác nhau



Hình 13. Biểu đồ tương tác Mz – N của cột liên hợp với các dạng tiết diện cột khác nhau

Bảng 2. So sánh khả năng chịu lực tại điểm D trên biểu đồ tương tác

Biểu đồ tương tác	Đơn vị: kN							
	Cột chữ I bọc bê tông 400x500				Cột ống vuông V450		Cột ống tròn D500	
	Diện tích tiết diện: $A_{cột} = 0,2m^2$				$A_{cột} = 0,2025m^2$		$A_{cột} = 0,19625m^2$	
	Diện tích thép hình: $A_a = 0,02615m^2$				$A_a = 0,0261m^2$		$A_a = 0,0258m^2$	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	My	N	Mz	N	M	N	M	N
D	925,20	974,0518	418,2587	974,0518	1182,84	1162,9167	984,83	1123,366

Nhận xét:

Từ đồ thị Hình 12, 13 nhận thấy ba đường cong biểu đồ tương tác của 3 tiết diện rất khác nhau, từ đó có thể thấy khả năng chịu lực của cột liên hợp với ba dạng tiết diện khác nhau là rất khác nhau. Hình 12, nhận thấy khả năng chịu lực theo phương chính trục y của cột liên hợp thép chữ I bọc bê tông hoàn toàn là nhỏ nhất, khả năng chịu lực của cột liên hợp thép ống vuông nhồi bê tông là lớn nhất. Hình 13 nhận thấy khả năng chịu lực theo phương trục phụ z của cột liên hợp thép chữ I bọc bê tông hoàn toàn là nhỏ nhất và nhỏ hơn rất nhiều, khả năng chịu lực của cột liên hợp thép ống vuông nhồi bê tông là lớn nhất.

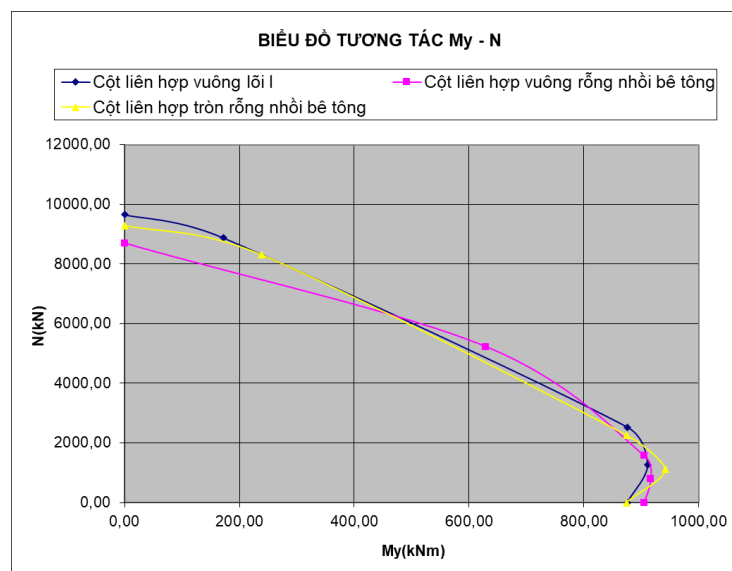
Từ Bảng 2, khi so sánh khả năng chịu lực tại điểm D trên biểu đồ tương tác nhận thấy:

- Với My theo phương trục chính (trục y): Cột ống vuông > cột chữ I = 28%; Cột ống vuông > cột ống tròn = 20,1%; Cột ống tròn > cột chữ I = 6,5%;

- Với Mz theo phương trục chính (trục z): Cột ống vuông > cột chữ I = 182%; Cột ống vuông > cột ống tròn = 20,1%; Cột ống tròn > cột chữ I = 135%.

3.2 Đánh giá, lựa chọn tối ưu về kích thước tiết diện khi khả năng chịu lực như nhau của cột liên hợp với các dạng tiết diện khác nhau

Thực hiện bài toán tính toán với cột liên hợp: Thép chữ I được bọc bê tông hoàn toàn; ống thép có tiết diện hình tròn rỗng nhồi bê tông; ống thép có tiết diện vuông nhồi bê tông chịu lực nén uốn tại đầu cột như ví dụ trên (Hình 11), với điều kiện cùng chịu lực như nhau và cho kết quả cùng xấp xỉ khả năng chịu lực thì tiết diện lựa chọn và diện tích thép hình sẽ khác nhau như thế nào, được thể hiện như sau:



Hình 14. Xấp xỉ khả năng chịu lực - Biểu đồ tương tác My – N của cột liên hợp với các dạng tiết diện cột khác nhau

Bảng 3. So sánh, lựa chọn kích thước tiết diện cột khi xấp xỉ khả năng chịu lực

Biểu đồ tương tác	Đơn vị: kN							
	Cột chữ I bọc bê tông 500x500				Cột ống vuông V380		Cột ống tròn D500	
	Diện tích tiết diện: $A_{cột} = 0,25m^2$				$A_{cột} = 0,144m^2$		$A_{cột} = 0,19625m^2$	
	Diện tích thép hình: $A_a = 0,02468m^2$				$A_a = 0,0247m^2$		$A_a = 0,0243m^2$	
	My	N	Mz	N	M	N	M	N

A	0,00	9654,56	0	9654,56	0	8693,27	0	9290,86
E	172,00	8879	221,86	8596	628,88	5228,36	238,82	8304
C	875,44	2531	393,96	2531	905,17	1570,05	874,24	2266,28
D	910,76	1266	469,139	1266	916,34	785,0233	942,01	1133,142
B	875,44	0	393,9562	0	905,17	0	874,24	0

Nhận xét:

Từ đồ thị Hình 14 nhận thấy ba đường cong biểu đồ tương tác của 3 tiết diện là xấp xỉ nhau theo điều kiện đề bài đặt ra. Từ Bảng 13 cho thấy với cùng xấp xỉ khả năng chịu lực, cùng diện tích thép hình Aa, thì tiết diện hình học của cột là tương đối khác nhau nhiều đối với 3 dạng tiết diện cột. Cột chữ I bọc bê tông hoàn toàn có kích thước 500x500, cột ống tròn cũng có tiết diện D500, nhưng diện tích đã giảm từ 0,25m² xuống còn 0,19625m²; đặc biệt dùng cột ống vuông có tiết diện nhỏ nhất V380 (giảm 31,6% kích thước tiết diện cột).

4. Kết luận

Bài báo này đã trình bày quy trình tính toán, thiết kế, kiểm tra cột liên hợp thép – bê tông với các dạng tiết diện khác nhau và thực hiện tính toán đối với cột liên hợp với 3 tiết diện: Thép chữ I được bọc bê tông hoàn toàn; ống thép có tiết diện hình tròn rỗng nhồi bê tông; ống thép có tiết diện vuông nhồi bê tông, qua đó đánh giá được khả năng chịu lực của cột.

Thực hiện vẽ biểu đồ tương tác cho cột liên hợp thép – bê tông, qua đó đánh giá khả năng chịu lực của tiết diện: Khả năng chịu lực theo phương chính trục y của cột liên hợp thép chữ I bọc bê tông hoàn toàn là nhỏ nhất, khả năng chịu lực của cột liên hợp thép ống vuông nhồi bê tông là lớn nhất; khả năng chịu lực theo phương trục phụ z của cột liên hợp thép chữ I bọc bê tông hoàn toàn là nhỏ nhất và nhỏ hơn rất nhiều, khả năng chịu lực của cột liên hợp thép ống vuông nhồi bê tông là lớn nhất. Do đó ta nên lựa chọn cột liên hợp với tiết diện ống vuông nhồi bê tông để chịu lực cho công trình.

Với cùng xấp xỉ khả năng chịu lực, cùng diện tích thép hình Aa, thì tiết diện hình học của cột là tương đối khác nhau nhiều đối với 3 dạng tiết diện cột. Cột chữ I bọc bê tông hoàn toàn, cột ống tròn xấp xỉ bằng nhau; đặc biệt là dùng cột ống vuông có tiết diện nhỏ nhất (giảm 31,6% kích thước tiết diện cột).

Mặt khác mặc dù trong bài báo không đề cập đến, tuy nhiên từ thực tế nghiên cứu tài liệu nhận thấy cột nhồi bê tông để thi công hơn cột bọc bê tông hoàn toàn, trong đó cột vuông nhồi bê tông là thi công dễ nhất. Ở Nhật đã áp dụng các tài liệu thiết kế cột vuông rỗng nhồi bê tông vào thực tế.

Từ các nhận xét trên, việc lựa chọn cột liên hợp với tiết diện ống vuông nhồi bê tông là hiệu quả nhất cả về mặt chịu lực được tốt nhất, quy trình tính toán đơn giản nhất và khả năng thi công ngoài thực tế cũng đơn giản hơn so với các tiết diện khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Văn Hội (2007), *Kết cấu liên hợp thép bê tông dùng trong nhà cao tầng*, Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [2] Nguyễn Xuân Huy và Nguyễn Hoàng Quân (2017), *Tính toán kết cấu liên hợp Thép – Bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn Eurocode 4*, NXB Xây dựng.
- [3] Phạm Văn Hội (2019). *Kết cấu liên hợp thép – bê tông*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [4] Phạm Thành Công (2020). *Thiết kế kết cấu liên hợp thép – bê tông cốt thép*. NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, Hà Nội.
- [5] Chu Tuấn Long và cộng sự (2022). *Tính toán kết cấu liên hợp thép – bê tông theo tiêu chuẩn Châu Âu*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [6] Eurocode 4: *Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (2010).
- [7] British Standards Institution, Eurocode 4: *Design of composite steel and concrete structures – London:BSI, 2004*.
- [8] AS/NZS 2327.1-2017. *Composite structures - Composite steel-concrete construction in buildings*, Australian/New Zealand Standard.
- [9] Designers' guide to EN 1994-1-1. Eurocode 4: *Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1 General rules and rules for buildings*.