

DÁNH GIÁ HIỆU QUẢ KINH TẾ - KỸ THUẬT CỦA CẤU KIỆN CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP TƯƠNG ỨNG VỚI CẤP BỀN BÊ TÔNG THEO TCVN 5574-2018

EVALUATION OF TECHNICAL - ECONOMIC EFFICIENCY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITHIN GRADE OF CONCRETE ACCORDING TO TCVN 5574-2018

Nguyễn Thế Dương*, Nguyễn Tấn Khoa

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ntheduong@ute.udn.vn

(Nhận bài / Received: 17/9/2023; Sửa bài / Revised: 20/10/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 30/10/2023)

Tóm tắt - Nghiên cứu này khảo sát cấu kiện cột bê tông cốt thép chịu nén-uốn đồng thời thông qua việc thiết lập biểu đồ tương tác nén-uốn và đánh giá sự làm việc của cột thông qua hệ số huy động. Nhiều tình huống mô men uốn – lực dọc với độ lệch tâm khác nhau đã được khảo sát nhằm đánh giá cụ thể tác động của yếu tố độ bền đến hiệu quả kỹ thuật – kinh tế. Nhiều cấp độ bền bê tông đã được khảo sát để đánh giá chi phí vật liệu. Kết quả cho thấy, sự hiệu quả về giá thành cho bê tông chỉ phát huy khi độ lệch tâm tương đối trong cột nhỏ hơn 80% và ở cấp bền nhỏ hơn B80. Ngoài ra, khi hàm lượng thép của cột lớn đến 4% thì hoàn toàn có thể sử dụng bê tông ở cấp bền khoảng B40 đến B60 để giảm hàm lượng thép và từ đó tối ưu chi phí vật liệu bê tông – thép. Với hàm lượng thép tối thiểu là 1% thì có thể không cần dùng đến bê tông ở cấp bền lớn hơn B60.

Từ khóa - Bê tông cường độ cao; cấu kiện BTCT chịu nén-uốn; hiệu quả kinh tế- kỹ thuật

1. Đặt vấn đề

Việc sử dụng bê tông cường độ ngày càng được quan tâm do có nhiều ưu điểm, đặc biệt là khả năng giảm kích thước. Hiện tại một số đơn vị trong nước đã nghiên cứu chế tạo thành công bê tông có cường độ chịu nén đến 130 MPa với nguồn vật liệu cung cấp trong nước và giá thành hợp lý. Tuy nhiên, hiện nay việc ứng dụng cho kết cấu chịu lực trong xây dựng dân dụng còn hạn chế. Sự hạn chế này có thể một phần chưa có thông tin về chi phí vật liệu. Cũng vì vậy, thực tế nhiều công trình đã và đang thiết kế hiện nay cho thấy các kỹ sư chưa sử dụng bê tông ở cấp độ bền cao mà chỉ sử dụng ở mức cấp bền khoảng B25 đến B35 là phổ biến. Trong nhiều thiết kế, hàm lượng thép cột vẫn còn cao, có thể đến 4%, do vậy chưa tận dụng tối ưu được nguồn vật liệu và tối ưu hóa về giá thành.

Trong lĩnh vực xây dựng dân dụng và công nghiệp, việc tính toán, thiết kế cấu kiện cột có ảnh hưởng lớn đến ý đồ kiến trúc của công trình, ảnh hưởng đến công năng sử dụng. Đối với kết cấu nhà sử dụng hệ khung bê tông cốt thép (BTCT) thì việc thiết kế tính toán, bao gồm việc bố trí hệ mặt bằng kết cấu, kích thước của các cấu kiện, vật liệu sử dụng,... là bài toán lặp, phải thực hiện nhiều lần mới có thể đạt được mục tiêu chung cho dự án. Quyết định lựa chọn vật liệu sử dụng và kích thước của cấu kiện ở giai đoạn sơ bộ ban đầu nếu chính xác sẽ góp phần thúc đẩy nhanh tiến độ của dự án. Tuy nhiên, việc quyết định này chịu nhiều ràng buộc và phải cân đối giữa nhiều yếu tố, trong đó có yếu tố về kinh tế, kỹ thuật, tính khả thi, việc lựa chọn nhà thầu,...

Abstract - This study investigates reinforced concrete column subjected to simultaneous compression and flexure through establishing an interaction diagram and evaluating the performance of the column through the demand/capacity coefficient. Different situations of bending moment - axial force with various eccentricities have been investigated to specifically evaluate the impact of durability factors on technical - economic efficiency. Many concrete grades were investigated to evaluate material costs. The results show that, the cost-effectiveness of concrete is only effective when the relative eccentricity in the column is less than 80% and at a grade less than B80. In addition, when the steel content of the column is up to 4%, it is possible to use concrete with grades between B40 and B60 to reduce the steel content and thereby optimize the cost of concrete and steel materials. With a condition of minimum steel content of 1%, it may not be necessary to use concrete with a durability level greater than B60.

Key words - High strength concrete; compression-flexion RC element; economic-technical efficiency

Trong công trình nhà dân dụng, các cấu kiện dầm, sàn có thể không cần thiết phải sử dụng bê tông với cấp độ bền quá lớn. Lý do là các loại cấu kiện này cần thiết phải đạt một chiều dày nhất định để đảm bảo trạng thái giới hạn sử dụng (trạng thái giới hạn 2 theo TCVN 5574-2018 [1]), trong đó quan trọng nhất là đảm bảo độ võng. Tuy nhiên đối với cấu kiện cột, là cấu kiện chủ yếu làm việc chịu nén, đồng thời chịu thêm mô men uốn thì việc sử dụng bê tông ở các cấp bền lớn có thể giảm được kích thước của cấu kiện, mà vẫn đảm bảo độ cứng ngang cũng như đảm bảo khả năng chịu lực, mà lại đạt được các yêu cầu về kiến trúc.

Thực tế các trạm trộn cung cấp bê tông thương phẩm hiện nay có thể cấp được bê tông đạt đến cấp độ bền B55 (mác 700 daN/cm²). Ở các cấp độ bền lớn hơn, do bê tông có tính nở rất lớn nên hiện nay các đơn vị sản xuất và cung cấp bê tông vẫn chưa thể bơm được bê tông lên cao cũng như đi quá xa, và nếu có sử dụng thì phải sử dụng biện pháp trộn và đổ tại chỗ. Do đó, chi phí có thể cao hơn so với các bê tông thương phẩm khác.

Mặt khác, trong thực tế sử dụng hiện nay, tại nhiều công trình xây dựng, bê tông có cấp độ bền cao, được sử dụng cho các hệ façade cho thấy chưa có sự hợp lý về mặt nguyên lý làm việc của vật liệu khiến cho chi phí đầu tư lớn nhưng không hiệu quả không nổi bật so với dùng các vật liệu khác. Một trong những nguyên nhân là ngay từ giai đoạn ban đầu (giai đoạn thiết kế ý tưởng), các nhà thiết kế có thể hiểu chưa đúng cũng như chưa định lượng được giá

¹ The University of Danang - University of Technology and Education, Danang, Vietnam (Duong NGUYEN-THE, Khoa NGUYEN-TAN)

thành do đó dẫn đến quyết định sử dụng chưa tối ưu.

Trong công trình xây dựng, cấu kiện cột, vách là các cấu kiện quan trọng và chịu chủ yếu các tác động đồng thời là lực dọc nén và mô men uốn. Cấu kiện dầm chủ yếu chịu uốn và cắt. Độ bền uốn và cắt của cấu kiện dầm có thể tính toán một cách dễ dàng theo các công thức giải tích một cách tường minh. Tuy nhiên đối với cấu kiện vách, cột thì khả năng chịu nén và khả năng chịu uốn lại phụ thuộc lẫn nhau. Do đó để nghiên cứu khả năng chịu lực của các kết cấu chịu nén-uốn, cần thiết phải thiết lập các biểu đồ tương tác [2]–[4] giúp đánh giá được khả năng chịu lực của cấu kiện một cách trực quan. Thông qua việc thiết lập này, có thể đánh giá được vùng chịu lực tốt nhất của cấu kiện chịu nén-uốn và từ đó thiết kế đáp ứng được yêu cầu của nội lực sinh ra trong cấu kiện. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng các thông số của vật liệu theo TCVN 5574-2018 [1], sử dụng phương pháp tính toán theo mô hình biến dạng phi tuyến của vật liệu cũng trong tiêu chuẩn này, kết hợp với sơ đồ 3 điểm xoay đối với các khả năng phá hoại của mặt cắt theo tiêu chuẩn Eurocode 2 [5] để thiết lập biểu đồ tương tác (BĐTT) của cấu kiện chịu nén-uốn đồng thời. Mặt khác, số liệu về chi phí vật liệu được nghiên cứu cho địa bàn Đà Nẵng để lấy làm ví dụ cho đầu vào nghiên cứu để từ đó đánh giá được mối quan hệ giữa khả năng chịu lực và giá thành của cấu kiện. Từ mối quan hệ này, người thiết kế có thể có căn cứ để thiết lập được phương án kết cấu kiến trúc một cách phù hợp nhất về kinh tế và kỹ thuật.

2. Khả năng chịu nén-uốn của cấu kiện BTCT và mô hình vật liệu

Việc thiết lập biểu đồ tương tác mô men uốn – lực dọc (biểu đồ M-N) được tính toán theo phương pháp biến dạng theo hướng dẫn trong TCVN 5574-2018, cũng như sử dụng mô hình của cốt thép là mô hình đàn-dẻo lý tưởng (mô hình biến dạng phi tuyến hai đoạn thẳng). Tương tự đối với bê tông, mô hình biến dạng phi tuyến hai đoạn thẳng được sử dụng. Việc lựa chọn các mô hình này nhằm có được thiết kế an toàn nhất theo kết luận trong nghiên cứu [6], [7]. Trong khuôn khổ của bài báo này, nhóm tác giả không trình bày lại việc thiết lập biểu đồ tương tác một cách chi tiết mà chỉ nêu một số bước chính ở phần sau.

2.1. Cốt thép

Mô hình phi tuyến hai đoạn thẳng của thép (Hình 1) được biểu thị theo phương trình (1):

$$\begin{aligned} \text{với } 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}: \sigma_s &= \varepsilon_s E_s \\ \text{với } \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}: \sigma_s &= R_s \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó, ε_s , σ_s và E_s lần lượt là biến dạng, ứng suất và mô đun Young; $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0,002$, R_s là cường độ tính toán chịu kéo của thép. Mô hình này được khuyến nghị sử dụng trong TCVN 5574-2018 cho các loại thép ở Việt Nam là loại CB-400 và CB-500. ε_{s2} được lấy bằng 0,025.

2.2. Bê tông

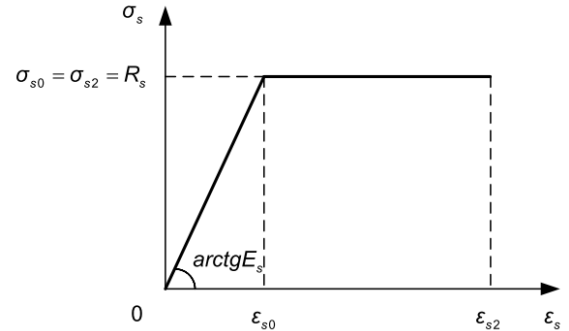
Mô hình đàn dẻo lý tưởng (mô hình biến dạng hai đoạn thẳng) được đề xuất trong tiêu chuẩn TCVN 5574-2018 như sau (Hình 2):

$$\text{- khi } 0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1} \text{ với } \varepsilon_{b1} = R_b/E_{b,red}: \quad (2)$$

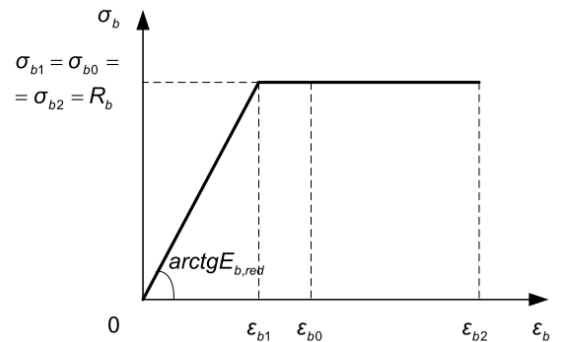
$$\sigma_b = E_{b,red} \varepsilon_b \text{ với } E_{b,red} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b1,red}}$$

$$\text{- khi } \varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}: \sigma_b = R_b$$

Trong đó, R_b là cường độ chịu nén tính toán, $E_{b,red}$ là mô đun đàn hồi của bê tông.



Hình 1. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của cốt thép theo mô hình biến dạng phi tuyến hai đoạn thẳng [1]



Hình 2. Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông theo mô hình biến dạng phi tuyến hai đoạn thẳng [1]

Trong phương trình (2), giá trị $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ được sử dụng cho bê tông nặng trong trường hợp tải ngắn hạn. Giá trị ε_{b2} là giá trị biến dạng nén giới hạn của bê tông được lấy như sau (đối với trường hợp tải trọng ngắn hạn):

- Đối với bê tông có cấp độ bền chịu nén từ B60 trở xuống: $\varepsilon_{b2} = 0,0035$;

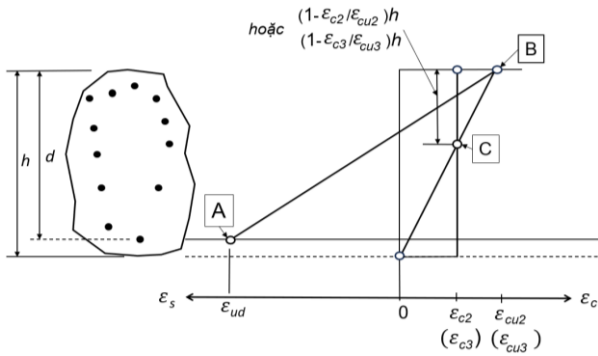
- Đối với bê tông cường độ cao có cấp độ bền chịu nén từ B70 đến B100: ε_{b2} lấy theo nội suy tuyến tính trong khoảng giá trị từ 0,0033 ứng với B70 đến 0,0028 ứng với B100.

Ngoài ra, khi chịu nén đúng tâm, giá trị biến dạng giới hạn của bê tông được lấy là $\varepsilon_{b0} = 0,002$ cũng đối với tác dụng của tải trọng ngắn hạn.

Trong thực tế thiết kế các cấu kiện cột, tổ hợp tải trọng nguy hiểm đối với các cấu kiện cột là do tổ hợp có xét đến tải trọng gió, tải trọng động đất và hoạt tải sử dụng, là các tải trọng ngắn hạn. Do đó, trong các tính toán, sẽ lấy các giá trị trên tương ứng với trường hợp tải trọng ngắn hạn để tính toán.

2.3. Tính toán nội lực giới hạn của mặt cắt bê tông cốt thép

Tính toán nội lực giới hạn của mặt cắt bê tông cốt thép theo sơ đồ biến dạng được tiêu chuẩn Eurocode 2 [5] đề xuất như trình bày ở Hình 3.



Hình 3. Các tình huống về biến dạng có thể xảy ra đối với một mặt cắt bê tông cốt thép ở trạng thái phá hoại [5]

Chú thích hình:

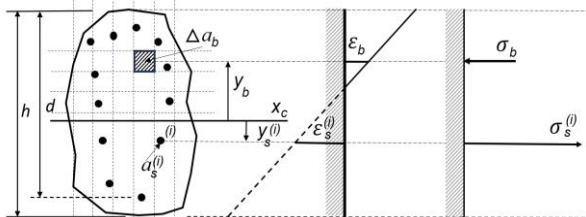
- Điểm A: Cốt thép ở thứ xa nhất đạt giới hạn biến dạng về kéo. Giá trị ϵ_{ud} trong hình tương ứng bằng $\epsilon_{s2} = 0,025$ theo TCVN 5574-2018.
- Điểm B: Giới hạn biến dạng nén của bê tông. Giá trị ϵ_{cu3} trong hình trên bằng giá trị ϵ_{b2} trên biểu đồ Hình 2.
- Điểm C: Giới hạn biến dạng nén đúng tâm. Giá trị ϵ_{c3} trong hình trên bằng giá trị ϵ_{b0} trong Hình 2, bằng 0,002.

2.4. Biểu đồ tương tác cột BTCT

2.4.1. Lý thuyết chung

Lý thuyết tổng quát để tính toán độ bền của tiết diện theo mô hình biến dạng phi tuyến được trình bày trong mục 9.2.4 của TCVN 5574-2018 [1] và tuân thủ một số điều kiện cũng của tiêu chuẩn này (mục 8.1.2.7.5), ở đây nhóm tác giả không trình bày lại các công thức mà chỉ nêu tổng quan phương pháp tính toán. Nguyên lý tính toán như sau: nội lực tổng hợp chính là tích phân của thành phần ứng suất phân bố trên mặt cắt. Việc tích phân được thay thế bằng phép cộng theo cách chia nhỏ mặt cắt ra thành nhiều phần tử nhỏ sao cho ở mỗi phần tử đó có thể giả thiết ứng suất giống nhau, biến dạng giống nhau. Việc chia này nhằm thuận lợi cho viết sử dụng các ngôn ngữ lập trình.

Đối với một mặt cắt BTCT, kể từ lúc đặt tải cho đến khi bị phá hoại, sơ đồ biến dạng của mặt cắt biến đổi như sơ đồ ở Hình 3 ở trên. Trong tính toán này, chúng tôi sử dụng các tình huống biến dạng như trên để lập trình (trên nền tảng ngôn ngữ lập trình Python) để vẽ biểu đồ tương tác của mặt cắt. Để có thể thực hiện lập trình, chia mặt cắt ra thành nhiều phần tử chữ nhật và trên mỗi phần tử nhỏ đó, các giá trị ứng suất, biến dạng được coi là hằng số. Hình 4 minh họa sơ đồ phân mảnh mặt cắt và vị trí của thép (hình trái), biểu đồ biến dạng của mặt cắt (hình giữa) và ứng suất tương ứng trong phần tử bê tông và thép (hình phải).



Hình 4. Sơ đồ phân rã mặt cắt và các đại lượng ứng suất, biến dạng trên mặt cắt ở trạng thái phá hoại

Các tính toán trong nghiên cứu này đều sử dụng giả thiết mặt cắt phẳng và bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông.

Để tính toán các giá trị mô men uốn giới hạn M_u và lực

đọc giới hạn N_u tương ứng với từng trường hợp biến dạng của mặt cắt, có thể dựa vào một số công thức dưới đây.

Khi mặt cắt quay quanh điểm A (Hình 3), biến dạng ở thứ chịu nén lớn nhất của bê tông ϵ_b^{top} thay đổi từ $\epsilon_{ud} = 0,025$ đến $\epsilon_{cu,3}$ là biến dạng nén cực hạn của bê tông. Khi mặt cắt quay quanh điểm B (Hình 3), biến dạng ở thứ chịu nén lớn nhất của bê tông ϵ_b^{top} được cố định ở giá trị ϵ_{b2} . Biến dạng của lớp thép xa đỉnh nén nhất thay đổi từ $\epsilon_{ud} = 0,025$ về 0.

Đối với điểm C, biến dạng ở thứ chịu nén lớn nhất thay đổi từ ϵ_{b2} đến $\epsilon_{b0} = -0,002$ (là giá trị biến dạng cực hạn của bê tông khi chịu nén thuần túy).

Tương ứng với mỗi vị trí của mặt cắt ngang, ta tính được biến dạng tại từng phân tử bê tông (ϵ_b) và tại từng thanh thép $\epsilon_s^{(i)}$ theo các quan hệ tuyến tính theo giả thiết mặt cắt phẳng, khi biết được giá trị biến dạng ở mép chịu nén lớn nhất của bê tông và biến dạng của thanh thép xa mép chịu nén nhất. Sau khi có các giá trị biến dạng, sử dụng các quan hệ ở phương trình (1) và phương trình (2) để tìm ra ứng suất trong từng thanh thép $\sigma_s^{(i)}$ và ứng suất trong phân tử bê tông σ_b . Giá trị lực dọc ΔC_b và mô men uốn đối với trục trung tâm mặt cắt $\Delta M_{n,b}$ do phân tử bê tông sinh ra như sau:

$$\Delta C_b = \Delta a_b \times \sigma_b; \Delta M_{n,b} = \Delta C_b \times y_b \quad (3)$$

Lực dọc $N_{n,s}^{(i)}$ và mô men $M_{n,s}^{(i)}$ đối với trục trung tâm của mặt cắt sinh ra do thanh thép được tính:

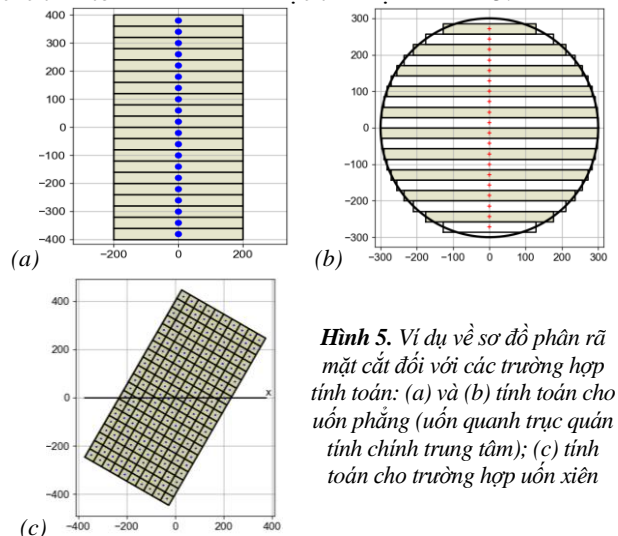
$$N_{n,s}^{(i)} = \sigma_s^{(i)} \times a_s^{(i)}, M_{n,s}^{(i)} = y_s^{(i)} \times N_s^{(i)} \quad (4)$$

Trong các công thức (3) và (4), Δa_b là diện tích phân tử bê tông, $a_s^{(i)}$ là diện tích của thanh thép thứ i , y_b là tọa độ của phân tử bê tông, $y_s^{(i)}$ là tọa độ của thanh thép thứ i (Hình 4).

Mô men uốn M_u và lực dọc N_u là tổng của các thành phần trên như sau:

$$N_n = \sum \Delta C_b + \sum N_{n,s}^i; M_n = \sum \Delta M_{n,b} + \sum M_s^i; \quad (5)$$

Lưu ý rằng, đối với các mặt cắt có trục đối xứng, khi tính toán đối với trục quán tính chính trung tâm vuông góc với trục đối xứng này thì phần tử chia có thể lấy chiều rộng bằng cả chiều rộng của mặt cắt tại vị trí chia để tiết kiệm thời gian tính toán cho máy tính. Ví dụ sơ đồ phân chia cho các tính toán khác nhau được thể hiện ở Hình 5.

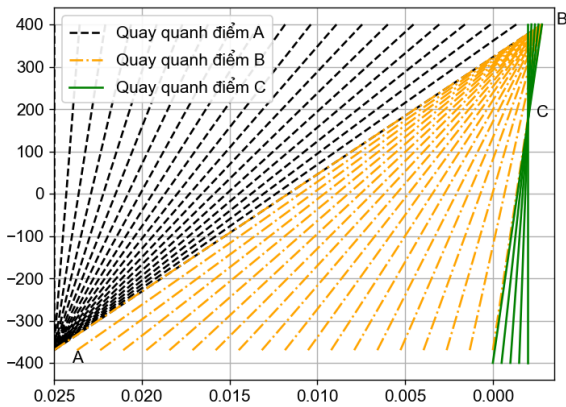


Hình 5. Ví dụ về sơ đồ phân rã mặt cắt đối với các trường hợp tính toán: (a) và (b) tính toán cho uốn phẳng (uốn quanh trục quán tính chính trung tâm); (c) tính toán cho trường hợp uốn xiên

2.4.2. Lập trình và tính toán biểu đồ tương tác

Lý thuyết chung và thuật toán để lập trình tính toán biểu đồ tương tác đã được trình bày ở nhiều tài liệu ([2]–[4]), ở đây nhóm tác giả không trình bày lại tổng thể thuật toán này. Tuy nhiên, điểm khác biệt trong cách tính toán các điểm (M_n, N_n) của một cấu hình mặt cắt là, thay vì giả thiết vị trí của trục trung hòa trên mặt cắt như các nghiên cứu trước đó, nhóm tác giả tính toán dựa vào sơ đồ 3 điểm quay như trình bày ở mục 2.4.1. Khi thiết lập việc tính toán này, cho mặt cắt quay quanh điểm A, B, C theo các giới hạn biến dạng. Số bước nhảy của biến dạng thường được chia theo một số lượng điểm hữu hạn. Hình 5 thể hiện một ví dụ về các vị trí khác nhau của mặt cắt có thể xảy ra ở trạng thái phá hoại biểu diễn theo sơ đồ 3 điểm quay.

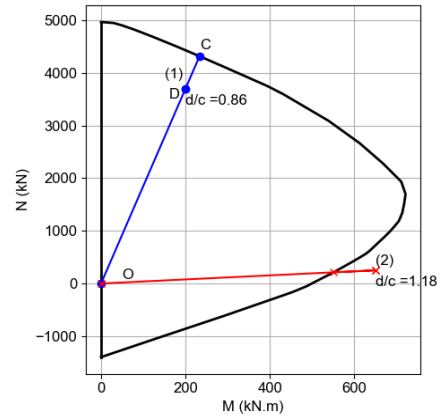
Theo thống kê qua các tính toán, có thể chỉ cần chọn 20 vị trí khi quay quanh A, 50 vị trí khi quay quanh B và 10 vị trí khi quay quanh C là có thể tạo ra biểu đồ có độ mịn đủ chính xác cho bài toán tính toán hệ số an toàn của cột.



Hình 5. Minh họa vị trí các mặt cắt khác nhau theo sơ đồ 3 điểm quay để tính toán các giá trị khả năng chịu lực của mặt cắt

2.4.3. Sử dụng biểu đồ tương tác trong tính toán thiết kế

Trong tính toán thực hành, bài toán thiết kế cột là bài toán thử dần. Đối với nhà nhiều tầng, kích thước cột được cân đối sao cho đảm bảo thỏa mãn yêu cầu kiến trúc và được xác nhận sau khi kiểm tra các điều kiện chuyên vị đỉnh và chuyên vị lệch tầng. Bước tiếp theo là tính toán thép để tất cả các cột đều thỏa mãn được độ bền, thuận lợi thi công và đảm bảo yếu tố kinh tế. Thông thường cần xét khoảng 15 tổ hợp tải trọng khác nhau, tức là 15 cặp nội lực (N_u, M_{ux}, M_{uy}) cho mỗi mặt cắt. Tại mỗi cột thường tính cho 02 mặt cắt là đầu cột và chân cột, do đó sẽ có khoảng 30 cặp nội lực cần tính toán cho mỗi cột. Hàm lượng thép phải tính toán sao cho tất cả các cặp nội lực phải đảm bảo an toàn, tức là các giá trị nội lực, nếu biểu thị trên biểu đồ tương tác thì có nghĩa là mỗi cặp nội lực phải được “nhốt” bên trong biểu đồ tương tác (M, N) tương ứng. Mức độ an toàn của cấu kiện được tính toán thông qua hệ số huy động $d/c = OD/OC$ chung của cả M và N , là tỉ số giữa chiều dài đường thẳng nối từ gốc tọa độ (điểm O) ra đến điểm nội lực (M_u, N_u) – điểm D, và chiều dài đoạn thẳng cũng nối từ gốc tọa độ ra đến điểm (M_u, N_u) kéo dài ra cắt đường bao biểu đồ nội lực - điểm C. Phương pháp lập trình để tính toán giá trị hệ số huy động này có thể sử dụng phương pháp dò nghiệm và sử dụng thuật toán thu hẹp khoảng [7].



Hình 6. Ví dụ tính toán biểu đồ tương tác đối với mặt cắt có kích thước ở Hình 4(a), bê tông cấp bền B20, thép CB500-V, bố trí 5 thép $\Phi 16\text{mm}$ mỗi cạnh (hàm lượng 1,0%), tính toán cho phương chịu lực chính

Kết quả một ví dụ tính toán được thể hiện ở Hình 6, trong đó xét điểm (1) có nội lực $(M_u, N_u) = (200\text{kN.m}, 3700\text{kN})$ và điểm (2) có nội lực $(M_u, N_u) = (650\text{kN.m}, 250\text{kN})$. Điểm (2) nằm bên ngoài biểu đồ, do đó không an toàn (tương ứng với hệ số huy động $d/c = 1,18$) và điểm (1) nằm trong biểu đồ, do đó an toàn (tương ứng với hệ số huy động $\frac{d}{c} = OD/OC = 0,86$). Biểu đồ thể hiện rất rõ tính “tương tác” giữa mô men uốn và lực nén: khả năng chịu nén của cột phụ thuộc vào giá trị của mô men uốn và ngược lại, đồng thời thể hiện rõ tính chất chịu nén tốt và chịu kéo kém của vật liệu bê tông. Việc sử dụng biểu đồ tương tác và tính toán hệ số huy động d/c được cho là phương pháp trực quan nhất để đánh giá sự làm việc của cấu kiện cột.

Đối với trường hợp cột tròn, có có tính chất đối xứng tâm nên sự làm việc của cột tròn thường là trạng thái lệch tâm phẳng, do đó các giá trị hệ số huy động của các cặp nội lực chỉ cần tính toán trên một biểu đồ tương tác duy nhất. Điều này cũng đúng cho các trường hợp cột chữ nhật chịu nén lệch tâm phẳng. Tuy nhiên, đối với cột chữ nhật, thông thường là làm việc lệch tâm xiên. Mỗi mặt cắt có các nội lực (M_{ux}, M_{uy}, N_u) , do đó cần phải xây dựng biểu đồ tương tác của mặt cắt đối với trục xiên góc với trục ngang ban đầu một góc α với $\tan(\alpha) = M_{uy}/M_{ux}$, ở biểu đồ tương tác của mặt cắt tương ứng với góc xiên α này, giá trị nội lực phá hoại sử dụng tính toán hệ số huy động d/c là $(\sqrt{M_{ux}^2 + M_{uy}^2}, N_u)$. Vì vậy quá trình tính toán thép xác định khả năng chịu lực chính là quá trình thử dần các tình huống thép sao cho tất cả các hệ số d/c tính được phải nhỏ hơn giới hạn mong muốn (thông thường là 1). Do có rất nhiều kích bản bố trí thép nên quá trình tính toán thường phải chạy hàng vạn trường hợp đối với một công trình có quy mô khoảng 5000m² trở lên.

3. Sơ bộ về tính toán chi phí vật liệu

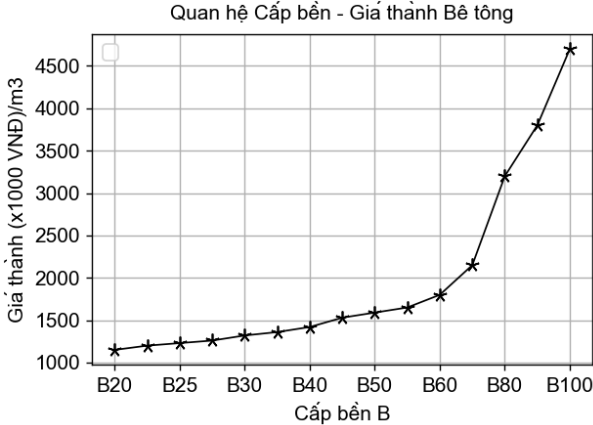
Trong khuôn khổ của nghiên cứu này, các tác giả tính toán giá thành vật tư để cấu thành cấu trúc cột theo đơn giá tham khảo tại thành phố Đà Nẵng trong thời gian tháng 8 năm 2023. Giá thành được tính toán trên cơ sở như sau:

- Giá thành tính toán theo cấp độ bền bê tông tại phòng thí nghiệm (chỉ bao gồm vật liệu cấu thành như xi măng,

phụ gia, cát, đá, nước).

- Giá thành theo báo giá của đơn vị sản xuất kinh doanh bê tông thương phẩm.

Do tại địa bàn nghiên cứu chưa có đơn vị sản xuất bê tông thương phẩm với cấp bền B60 trở lên, do đó đơn giá được tính toán trên cơ sở kết quả thí nghiệm do các tác giả thực hiện tại Phòng thí nghiệm và ước lượng về chi phí xử lý vật liệu thô (cát, đá) bao gồm chi phí rửa, sàng và phân loại để đảm bảo chế tạo được bê tông cường độ cao. Với cách tính toán đơn giản này, chúng tôi thiết lập ở mức độ khái toán biểu đồ quan hệ giữa chi phí và cấp bền bê tông như Hình 7.



Hình 7. Ước lượng chi phí sản xuất (VNĐ) cho 1m³ bê tông tại địa bàn thành phố Đà Nẵng

Đối với thép, giá thành tính toán được tính trung bình là 20 000 VNĐ/1kg thép đã được gia công.

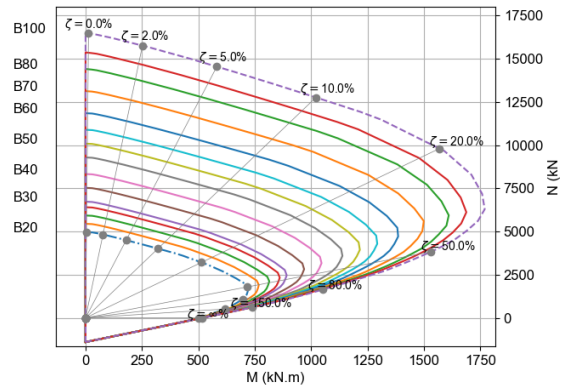
4. Hiệu quả của cấp bền bê tông đến khả năng chịu lực và tính toán tối ưu về chi phí

Việc lựa chọn bê tông và thép đi với cùng một mặt cắt, ta chọn được hệ số an toàn cao nhất, tức là hệ số huy động d/c nhỏ nhất với chi phí thấp nhất là bài toán cần đặt ra trong công tác thiết kế. Với việc lập trình được biểu đồ tương tác để tính được hệ số huy động, đồng thời chúng ta cũng có thể tính toán được chi phí về vật liệu, từ đó, có thể thiết lập cho chương trình thực hiện tính toán các trường hợp cấp bền bê tông khác nhau để từ đó chọn ra sự phối hợp bê tông – thép tốt nhất về hệ số huy động và giá thành.

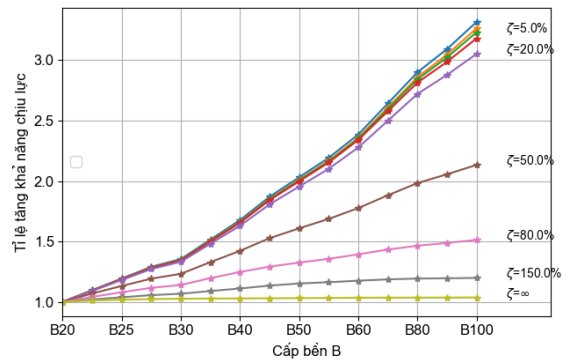
4.1. Hiệu quả kỹ thuật – kinh tế của cấp bền bê tông đối với khả năng chịu lực của cấu kiện cột

4.1.1. Hiệu quả kỹ thuật

Trong phần này, nhóm tác giả phân tích hiệu quả của cấp bền bê tông đối với các tình huống chịu lực thông qua các ví dụ tính toán và phân tích hệ số huy động trên các biểu đồ tương tác thông qua một số trường hợp tính toán. Lấy điểm xuất phát là bê tông cấp bền B20 (mức 250 daN/cm²), xét hàm lượng thép. Xét lại ví dụ cột như ở Hình 6. Giả thiết các thông số khác không đổi và chúng ta cho thay đổi cấp độ bền bê tông từ B20 đến B100. Để đánh giá tính hiệu quả, chúng ta đưa vào hệ số độ lệch tâm tương đối $\zeta = e/h \times (100\%)$, trong đó $e = M_u/N_u$ là độ lệch tâm tuyệt đối của nội lực gây phá hoại, h là chiều cao mặt cắt theo phương đang xét. Độ lệch tâm bằng 0 tức là cột chịu nén đúng tâm, độ lệch tâm bằng ∞ tức là cột chịu uốn thuần túy (làm việc như dầm).



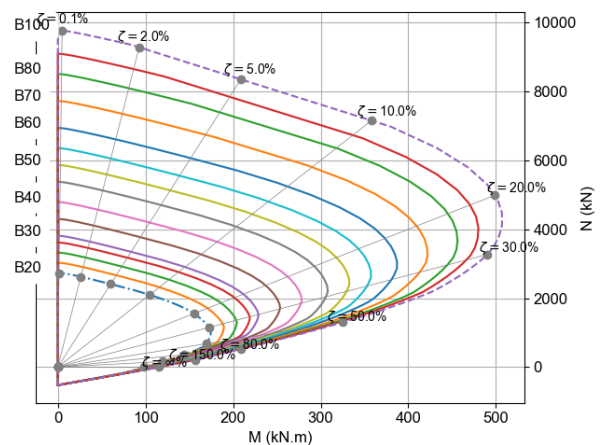
Hình 8a. Biểu đồ tương tác cột ở ví dụ Hình 6 khi thay đổi cấp độ bền bê tông và hiệu quả tăng khả năng chịu lực tính toán cho một số vị trí theo độ lệch tâm của nội lực



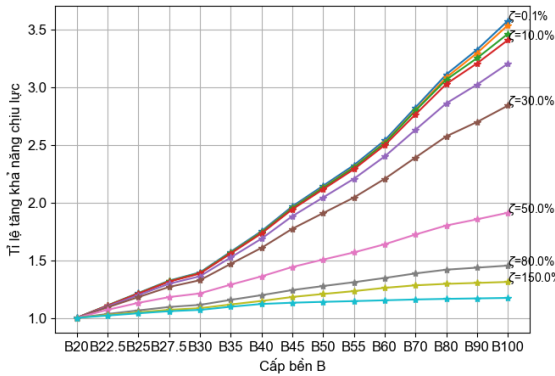
Hình 8b. Tỉ lệ tăng khả năng chịu lực (chịu nén-uốn) của cấu kiện tính toán ở Hình 6 khi tăng cấp độ bền bê tông, tương ứng với các độ lệch tâm tương đối thể hiện ở Hình 8a

Kết quả thể hiện ở Hình 8a là ĐĐT tính toán cho các cấp độ bền khác nhau và vị trí các điểm tính toán độ an toàn, kèm theo số liệu về độ lệch tâm tương đối.

Hình 8b thể hiện giá trị số các số liệu về hệ số an toàn (mức tăng khả năng chịu lực) khi tính toán cho các cấp bền cao hơn, tương ứng với các độ lệch tâm ζ biến đổi từ 0 đến ∞ . Hệ số an toàn trên biểu đồ này được tính toán bằng tỉ lệ giữa điểm nối gốc tọa độ 0 với điểm nội lực trên đường biểu đồ B20, kéo ra ngoài và giao cắt với các đường biểu đồ của cấp độ bền B lớn hơn.



Hình 9a. ĐĐT M-N của mặt cắt BTCT hình tròn $D=500\text{mm}$, bố trí 6 thép $\varnothing 16\text{mm}$ (hàm lượng 1%), mức thép CB500-V, bê tông cấp bền từ B20 đến B100. Các điểm đánh dấu tròn trên biểu đồ phía trong thể hiện các điểm xem xét tương ứng với độ lệch tâm ζ

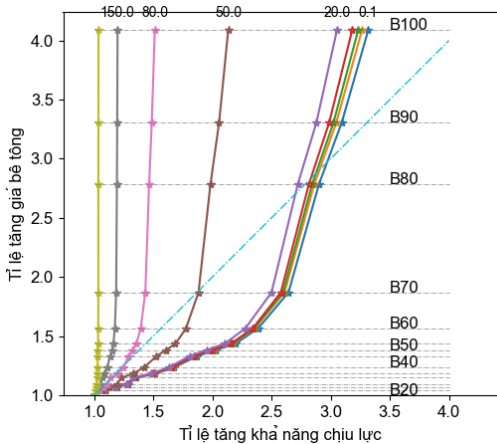


Hình 9b. Tỉ lệ tăng khả năng chịu lực (chịu nén-uốn) của cấu kiện cột BTCT mặt cắt tròn khi tăng cấp độ bền bê tông, tương ứng với các độ lệch tâm tương đối thể hiện ở Hình 9a

Cũng với cấu kiện ở Hình 6, tính toán cho các hàm lượng thép cao hơn, ta cũng được kết quả tương tự. Tuy nhiên, ở hàm lượng thép cao hơn thì tác động của độ bền bê tông sẽ bị giảm xuống, do đó hệ số an toàn lớn nhất sẽ không còn được cao như trường hợp hàm lượng thép thấp. Tương tự, cấu kiện mặt cắt tròn cũng được kiểm tra và một ví dụ kết quả được thể hiện ở Hình 9a và Hình 9b. Các kết quả tính toán cho thấy khi độ lệch tâm tương đối đạt mức 80% trở lên thì việc tăng cấp độ bền của bê tông không tạo ra sự đột phá về khả năng chịu lực của cấu kiện. Đặc biệt là trong trường hợp chịu uốn thuần túy thì việc tăng cấp độ bền bê tông rất ít hiệu quả.

4.1.2. Hiệu quả kinh tế

Từ mối quan hệ về khả năng tăng độ bền - cấp bền B ở các Hình 8b và Hình 9b, dựa vào biểu đồ quan hệ giá thành - cấp bền B ở Hình 7, có thể thiết lập được mối quan hệ giữa tỉ lệ tăng giá bê tông và tỉ lệ tăng khả năng chịu lực, ví dụ được thể hiện ở Hình 10 cho trường hợp mặt cắt chữ nhật tính toán ở trên.



Hình 10. Quan hệ giữa tỉ lệ tăng khả năng chịu lực và tỉ lệ tăng giá thành bê tông đối với mặt cắt chữ nhật nghiên cứu

Trên biểu đồ Hình 10, giá trị ở phía bên phải là cấp bền bê tông tương ứng với các giá trị tính toán trong biểu đồ. Đường thẳng nét đứt là đường chia hiệu quả (đường phân giác): điểm nằm phía dưới là điểm hiệu quả (tỉ lệ tăng khả năng chịu lực lớn hơn tỉ lệ tăng giá bê tông), điểm nằm phía trên đường phân giác là điểm không hiệu quả. Ở phía trên, các giá trị tương ứng với mỗi đường là giá trị độ lệch tâm

tương đối ζ . Ta thấy đối với các tình huống có độ lệch tâm lớn (các đường bên trái) thì hiệu suất tăng khả năng chịu lực của bê tông ở cấp bền cao gần như không có, đặc biệt là ở độ lệch tâm 80% trở lên. Ở các độ lệch tâm thấp hơn, bê tông chỉ hiệu quả ở các cấp bền nhỏ hơn B80.

Các tính toán này cũng tương tự như trường hợp cột tròn đã xét và nhóm tác giả không trình bày ở đây.

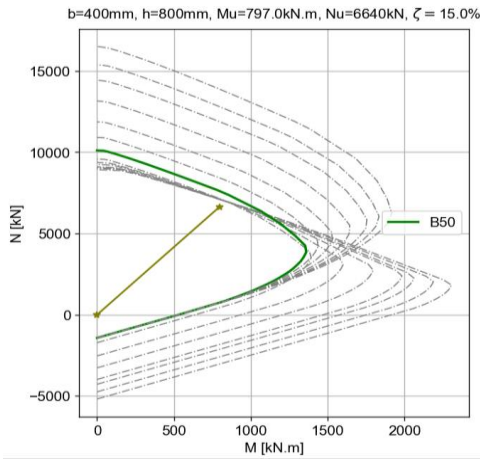
4.2. Bài toán tìm tổ hợp thép – bê tông tối ưu cho cấu kiện

Trong thực tế thiết kế, người thiết kế thường lựa chọn loại bê tông trước sau đó đi thiết kế thép. Do quá trình lựa chọn thép kích thước mặt cắt cột phụ thuộc rất nhiều yếu tố nên người thiết kế thường rất ít khi thử tìm các tổ hợp vật liệu khác nhau để thiết kế. Tuy nhiên với công cụ lập trình, và với phương pháp tiếp cận đã đề xuất ở các phần trên, hoàn toàn có thể thiết lập được bài toán tìm lời giải tối ưu cho các cấu hình vật liệu thép-bê tông khác nhau. Do vật liệu thép trên thị trường khá ít, thép chịu lực chủ yếu có hai mác hay được sử dụng là CB400-V và CB500-V, và người thiết kế thường có xu hướng sử dụng thép CB500-V cho các công trình lớn vì chênh lệch giá thành giữa hai mác thép là không đáng kể, trong khi đó có sự chênh lệch lớn về cường độ. Riêng bê tông, có nhiều cấp độ bền để lựa chọn. Còn lại, kích thước mặt cắt thường không có nhiều lựa chọn vì bị ràng buộc bởi yếu tố kiến trúc.

Do đó, với một kích thước mặt cắt cố định, để mặt cắt này chịu một nội lực (M_u, N_u) nào đó thì có thể có nhiều phương án phối hợp vật liệu khác nhau, sử dụng cấp độ bền bê tông thấp thì cần nhiều thép, hoặc sử dụng cấp độ bền bê tông cao thì có thể sử dụng ít thép hơn. Mỗi cấu hình như thế sẽ có 1 giá thành tương ứng. Do vậy, bài toán lựa chọn tìm vật liệu chính là bài toán tìm giá thành phù hợp nhất. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chưa xét tới các yếu tố khác.

Để đánh giá tính hiệu quả của bê tông ở các cấp bền cao cũng như chi phí vật liệu, chúng ta giả thiết các tình huống nội lực sao cho ở cấp độ bền thấp nhất B20, cần phải huy động hàm lượng thép lớn từ 3-4%. Tình huống này trong thực tế là tình huống mà các kích thước cấu kiện bị giảm đến mức tối đa để thỏa mãn các yếu tố kiến trúc và hệ thống khác. Các cặp nội lực cũng được xét với độ lệch tâm thay đổi từ mức độ rất nhỏ (nén thuần túy) đến rất lớn (uốn thuần túy). Trong tính toán này, lấy hàm lượng thép tối thiểu cho cột là 1%, tương ứng với tình huống của thiết kế với cấp dèo trung bình khi kết cấu chịu động đất, theo TCVN 9386-2012 [8]. Các tính toán được thực hiện cho các cấp độ bền từ B20 đến B100, từ đó tính toán được lượng thép tương ứng. Cấp độ bền tối ưu về kinh tế là cấp bền sao cho tổng giá trị thép và giá trị bê tông là nhỏ nhất. Giới hạn hệ số huy động tối đa của các tính toán là 0,95.

Hình 11 thể hiện một ví dụ tính toán cho cột chữ nhật khi chịu tải trọng, với độ lệch tâm tương đối $\zeta = 15\%$. Các thông tin về nội lực tác dụng và mặt cắt được thể hiện trên hình này. Kết quả tính toán cho tất cả các cấp độ bền từ B20 đến B100, trong đó đường nét liền-đậm B50 là BĐTT tương ứng khi chương trình tính toán với cấp bền B50, cho phương án chi phí giá thành vật liệu thấp nhất. Các đường khác cũng cho phương án đảm bảo hệ số huy động tối đa là 0,95 nhưng cho chi phí giá thành cao hơn.



Hình 11. Minh họa tính toán tìm cấp bền bê tông tối ưu về giá thành cho mặt cắt hình chữ nhật, chịu nén và uốn phẳng quanh trục trung tâm song song với cạnh ngắn, hệ số độ lệch tâm tương đối là $\zeta = 50\%$

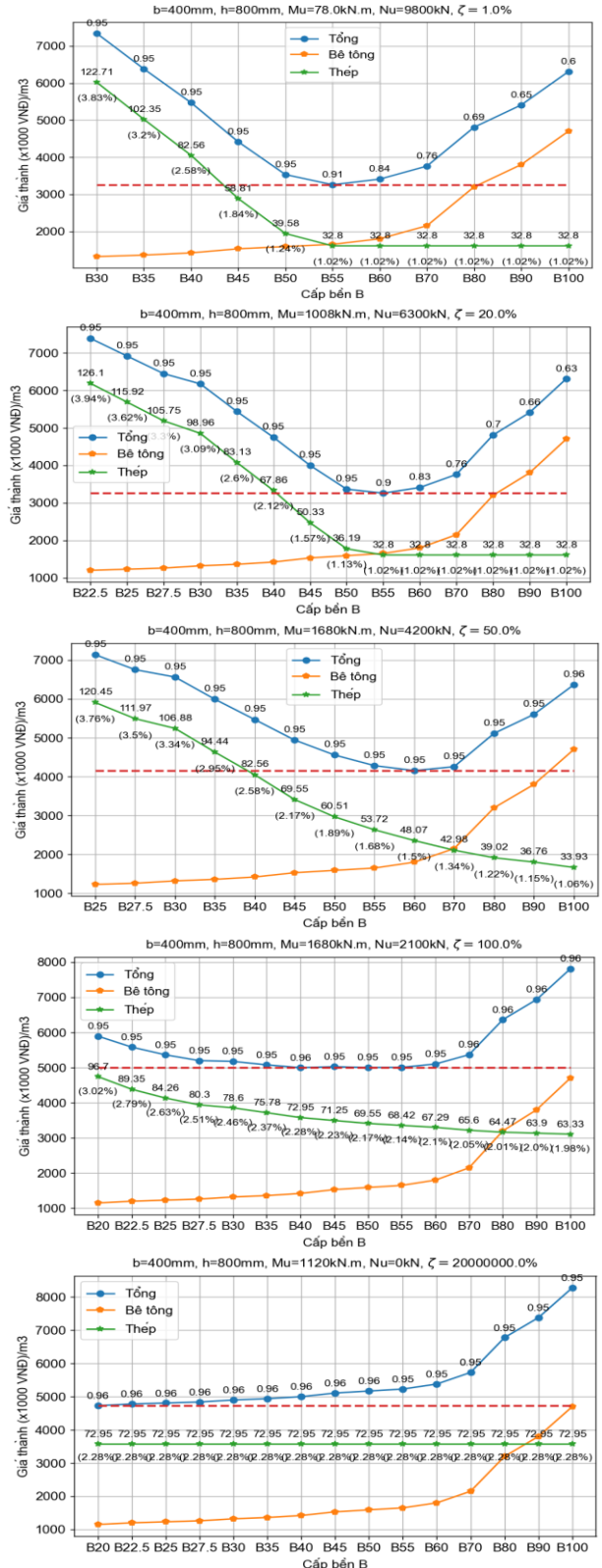
Dưới đây, khảo sát thêm các tình huống chịu lực với độ lệch tâm khác nhau, một trường hợp mặt cắt chữ nhật và một trường hợp mặt cắt hình tròn. Các kết quả được thể hiện ở Hình 10 và Hình 11 tương ứng cho mặt cắt chữ nhật và mặt cắt tròn. Mặt cắt chữ nhật có kích thước $400mm \times 800mm$, chịu uốn quanh trục trung tâm song song cạnh ngắn, đồng thời thép cạnh dài giá thiết là thép cấu tạo. Mặt cắt tròn có đường kính $D = 500mm$. Một số kết quả tính toán thể hiện ở Hình 12 và Hình 13 theo thứ tự từ trên xuống dưới tương ứng với với các độ lệch tâm tương đối ζ từ nhỏ đến rất lớn. Trong các hình này, trị số ghi bên cạnh giá trị “**Tổng**” thể hiện hệ số huy động tính toán thu được từ “cấu hình” **Cấp bền B** (trục hoành) và hàm lượng thép (%) – diện tích thép (cm^2) thể hiện bên cạnh giá trị của đường “**Thép**”. Trên biểu đồ, đường nét đứt nằm ngang là đường giá thành đi qua điểm có giá thành thấp nhất.

Kết quả tính toán cho thấy, đa số các tình huống cho thấy, với giá thép và giá bê tông như Hình 7, tình huống tốt nhất thường là tình huống có hàm lượng thép thấp nhất cho đến cấp độ bền B60. Do thép bị khống chế bởi một hàm lượng tối thiểu nên trong nhiều tình huống không cần sử dụng bê tông có cấp độ bền quá lớn. Các tính toán cho thấy với hàm lượng thép tối thiểu được khống chế là 1% thì nếu ở tình huống bê tông cấp thấp (B20) cần sử dụng thép đến khoảng 4% thì ở cấp độ bền B55, B60 đã có thể giảm xuống được gần 1% và đây cũng là tình huống sẽ cho giá thành thấp nhất. Như vậy cấp độ bền B55, B60 sẽ thể là các lựa chọn tốt khi mặt cắt bị “ép” khá nhỏ và các bê tông thông thường phải thiết kế thép với hàm lượng rất lớn. Đồng thời nếu bị giới hạn ở hàm lượng thép tối thiểu 1% thì không cần đến cấp độ bền cao hơn B60. Ở tình huống đạt được giá thành thấp nhất, ta thấy chỉ số giá của bê tông và chỉ số giá của thép xấp xỉ nhau, hay còn gọi là cân bằng giá. Hàm lượng thép này cũng được đánh giá là hàm lượng thép kinh tế trong thiết kế. Ở các cấp nội lực phá hoại có độ lệch tâm lớn, mặc dù cấp độ bền bê tông lớn vẫn có khả năng cho giá thành vật liệu thấp nhất, tuy nhiên độ chênh lệch về chi phí không được nhiều như trường hợp cột có độ lệch tâm bé. Do đó, việc sử dụng bê tông cấp độ cao ở tình huống uốn ngược trị (ví dụ cột phía trên của các tòa nhà cao tầng), thì có thể không cần dùng bê tông cường độ quá cao nếu điều kiện thi công bơm lên cao khó khăn.

Đối với tình huống chịu uốn, một lần nữa khẳng định

không cần thiết sử dụng bê tông cường độ cao cho chịu lực, trừ các yêu cầu khác nhưng chống thấm, chống mốc, chống ăn mòn ven biển,...

Đối với các tình huống cột chữ nhật chịu uốn xiên, các tính toán cũng cho kết quả tương tự như với tình huống cột mặt cắt chữ nhật và cột mặt cắt tròn.



Hình 12. Các biểu đồ tìm kiếm giá thành nhỏ nhất cho mặt cắt cột BTCT chịu các nội lực với độ lệch tâm khác nhau

5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu này phân tích tính toán khả năng chịu lực và xét mối quan hệ với chi phí giá thành vật liệu của cấu kiện cột BTCT với hình dạng chữ nhật và tròn. Khả năng chịu lực của cột được đánh giá thông qua xây dựng BĐTT nén-uốn, trong đó các tác giả sử dụng phương pháp biểu đồ 3 điểm quay của mặt cắt, đồng thời sử dụng phương pháp phân tích biến dạng phi tuyến của vật liệu theo hướng dẫn trong TCVN 5578-2018. Thép và bê tông được tính toán theo mô hình phi tuyến đàn-dẻo lý tưởng (mô hình hai đoạn thẳng). Các tính toán được thực hiện thông qua lập trình trên nền tảng ngôn ngữ lập trình Python để đánh giá an toàn của cấu kiện cột khi chịu nội lực phá hoại (M_u, N_u). Sự an toàn của cấu kiện cột được thể hiện qua thông số hệ số huy động d/c . Với một tình huống mặt cắt – nội lực phá hoại, tất cả các cấp độ bền của bê tông được sử dụng để tính toán hàm lượng thép và từ đó tìm được giá thành tốt nhất về vật liệu cho cấu kiện. Kết quả nghiên cứu về kỹ thuật, kết hợp với đánh giá hiệu quả kinh tế dựa trên ví dụ phổ giá bê tông và thép cho thị trường tại thành phố Đà Nẵng ở thời điểm tháng 10/2023, kết quả nghiên cứu cho thấy:

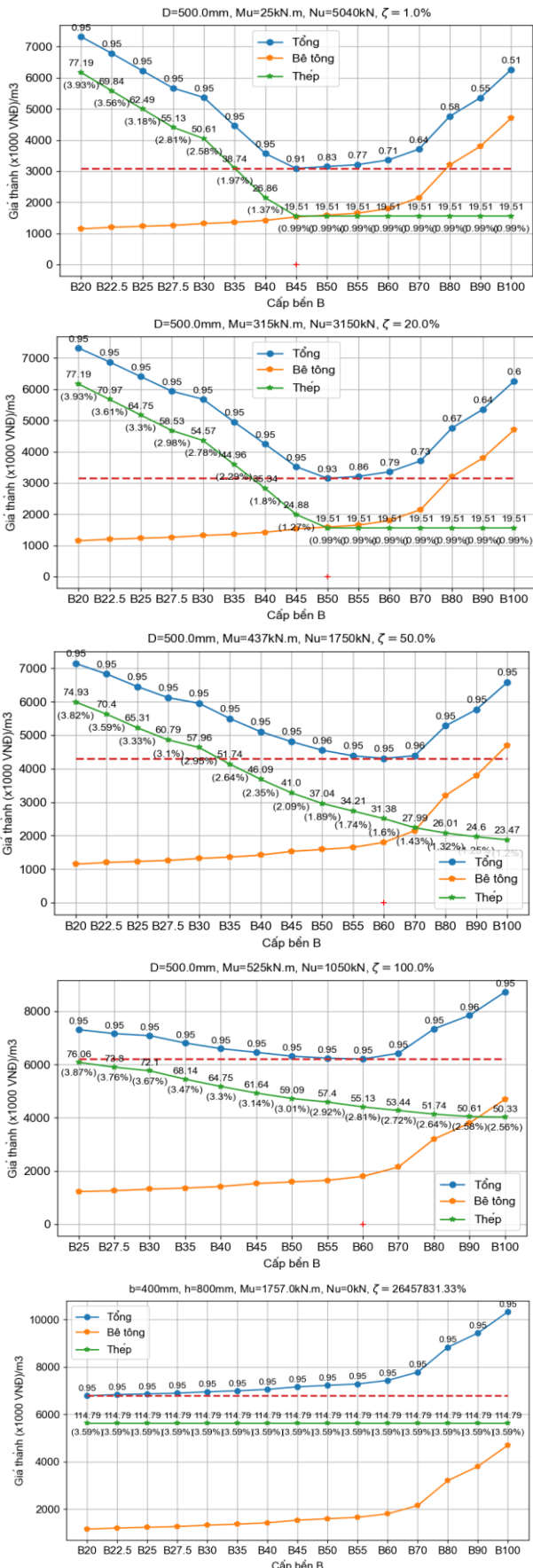
- Hiệu quả cao của cấp bền bê tông đối với khả năng chịu lực của cấu kiện cột chỉ thể hiện rõ rệt khi độ lệch tâm tương đối ở mức nhỏ hơn 80%. Đặc biệt thể hiện rõ rệt ở các tình huống có độ lệch tâm nhỏ.

- Đối với các bê tông thông thường đang sử dụng cho công trình nhà mà cần thiết phải sử dụng đến hàm lượng thép lớn, thì có thể sử dụng đến cấp bền từ B40-B60 để đạt được hàm lượng khoảng 1% và đạt được chi phí hiệu quả nhất.

Cách tiếp cận như trong nghiên cứu này hoàn toàn có thể áp dụng được đối với bất kỳ phổ giá nào của bê tông và thép. Đối với công trình xây dựng thực tế, cách thức thực hiện cũng tương tự như trên, tuy nhiên cần thực hiện nhiều tính toán khác nhau do có nhiều tình huống nội lực. Quá trình tính toán sẽ xuất hiện nhiều kết quả về cấp độ bền tối ưu. Khi đó cấp độ bền nào có tổng thể tích lớn nhất ở từng tầng hoặc từng khu vực sẽ được ưu tiên lựa chọn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] *Design of concrete and steel concrete structures*, TCVN 5574:2018, 2018.
- [2] N. D. Cong, *Calculating reinforced concrete column cross-sections*, Scientific and Technical Publishing House, 2006.
- [3] D. N. Thanh and D. N. The, “Calculation of Rectangular Reinforced Concrete Column under Bi-axial Eccentric Compression after Pproximate Approach and Interaction Diagram Method”, *DTU Journal of Science & Technology*, ISSN 1859.4905, vol. 20, no. 1, pp. 75–82, 2017.
- [4] N. V. P, V. Sykhampha, and N. T. Thang, “Determination of load bearing capacity of reinforced concrete columns using materials’ non-linear models of TCVN 5574:2018”, *Journal of Science and Technology in Civil Engineering, NUCE*, vol. 14, no. 3V, pp. 93–107, 2020.
- [5] *Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, EN 1992-1-1, 2005.
- [6] D. N. The, N. T. Phuc, and L. T. Dang, “Bending resistance of reinforced concrete beams according to norm TCVN 5574-2018: A comparison between the ultimate internal force method and the non-linear deformation of reinforcement approach”, *DTU Journal of Science & Technology*, vol. 52, no. 3, pp. 26-33, 2022.
- [7] D. N. The, A. P. Van, and K.-H. Tran-Thi, “Investigating the ultimate bending strength of reinforced concrete section under different non-linear constitutive models according to the design standard TCVN 5574-2018”, in *7th National Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings (ATiGB)*, 2022, pp. 150–155.
- [8] *Designing earthquake-resistant structures*, TCVN 9386:2012, 2012.



Hình 13. Các biểu đồ tìm kiếm giá thành nhỏ nhất cho cấu hình cột D500mm chịu các nội lực với độ lệch tâm khác nhau