

## Khả năng kháng uốn dầm bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn TCVN 5574-2018: So sánh giữa phương pháp tính toán theo nội lực giới hạn và phương pháp tính toán có xét đến ứng xử phi tuyến của cốt thép

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

Nguyễn Thế Dương\*, Nguyễn Tấn Phúc, Lê Tấn Đăng  
Nguyen The Duong\*, Nguyen Tan Phuc, Le Tan Dang

*Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng  
Department of Civil Engineering, University of Technology and Education, The University of Da Nang*

*(Ngày nhận bài: 19/3/2022, ngày phản biện xong: 9/5/2022, ngày chấp nhận đăng: 20/5/2022)*

### Tóm tắt

Bài báo trình bày sơ bộ lý thuyết tính toán khả năng kháng uốn của mặt cắt chữ nhật bê tông cốt thép (BTCT) theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574-2018 theo hai phương pháp: Tính toán theo nội lực giới hạn và tính toán xét đến ứng xử phi tuyến của cốt thép. Ứng xử phi tuyến của cốt thép được xét theo hai mô hình: mô hình hai đoạn thẳng và mô hình 3 đoạn thẳng. Từ đó nhóm tác giả đề xuất thuật toán tự động tìm vị trí trục trung hòa của mặt cắt dầm ở trạng thái phá hoại theo phương pháp dò và thu hẹp khoảng. Một chương trình tính toán được thiết lập trên nền tảng ngôn ngữ lập trình Python cho phép minh họa các bước tính toán cũng như so sánh kết quả tính toán cho một số trường hợp bao gồm thép tập trung ở các vùng kéo, vùng nén; thép được bố trí nhiều lớp theo chiều cao mặt cắt. Kết quả cho thấy mô men kháng uốn tính toán theo phương pháp truyền thống (phương pháp nội lực giới hạn) thiên về an toàn so với sơ đồ tính toán phi tuyến.

*Từ khóa:* mô men kháng uốn; tính toán nội lực giới hạn; tính toán phi tuyến; biểu đồ ứng suất - biến dạng hai đoạn thẳng; biểu đồ ứng suất biến dạng ba đoạn thẳng.

### Abstract

This paper briefly presents the theory of calculating the flexural resistance of a reinforced concrete rectangular section according to Vietnamese standards TCVN 5574-2018 by two approaches: by the limit of internal force and by the method considering the nonlinear behavior of reinforcement. Two nonlinear models of steel considered are: the bi-linear and tri-linear segments of stress-strain diagram. An algorithm is then proposed to automatically find the neutral axis position of the beam section at failure state called "interval narrowing". A calculation program is coded using Python programming language which allows to illustrate calculation steps as well as compare calculation results for a number of cases, including reinforcement concentrated in tensile and compressive regions; multilayer distribution of reinforcement along the cross-sectional height. The results show that the bending moment calculated by the traditional method (limite of internal force) is safer than that obtained by the nonlinear calculation approach.

*Keywords:* bending resistance of RC beams; limit of internal force, nonlinear behavior of reinforcement, bi-linear stress-strain diagram, tri-linear stress-strain diagram.

\* *Corresponding Author:* Nguyen-Thê Duong; Department of Civil Engineering, University of Technology and Education, The University of Da Nang

*Email:* ntheduong@ute.udn.vn; nguyentheduong@outlook.com

## 1. Đặt vấn đề

Kết cấu BTCT là loại kết cấu được sử dụng khá phổ biến cho các công trình xây dựng. Kết cấu chịu uốn (chủ yếu là dầm, sàn, các tường chắn,...) được tính toán, bao gồm việc xác định kích thước, lựa chọn vật liệu và bố trí vật liệu để đảm bảo nhiều trạng thái giới hạn. Trong các trạng thái giới hạn có trạng thái giới hạn phá hoại (ULS) liên quan đến độ bền và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) liên quan đến các vấn đề về độ võng, tần số dao động, nứt của kết cấu. Các tính toán này dựa vào các nguyên lý cơ học về vật liệu, trong đó cần thiết phải xét đến các mô hình làm việc của kết cấu và của vật liệu. Vật liệu bê tông chủ yếu vẫn là vật liệu làm việc chịu kéo kém và chịu nén tốt và do đó độ bền kéo thường được bỏ qua trong tính toán. Bê tông làm việc đàn hồi với ứng suất nén trong bê tông khi nhỏ hơn giá trị 0.4 đến 0.45 giá trị cường độ phá hoại lớn nhất. Ở ngoài giai đoạn này, bê tông làm việc phi tuyến và độ cứng giảm dần đến khi đạt cường độ cao nhất rồi chuyển sang giai đoạn giảm yếu [1–3]. Cốt thép sử dụng trong xây dựng thường là thép thanh cán nóng, làm việc đàn hồi tuyến tính khi ứng suất trong thép nhỏ hơn giới hạn chảy rồi chuyển qua giai đoạn chảy dẻo, sau đó là tái bền đến khi đạt cường độ lớn nhất và cuối cùng là chuyển sang giai đoạn giảm yếu [2]. Trong thực tế thiết kế và tính toán đối với vật liệu bê tông, các tính toán kỹ thuật thường không mô tả tỉ mỉ sự làm việc theo đường cong ứng suất biến dạng phi tuyến như thí nghiệm thực tế do tính phức tạp và cũng như tính đa dạng, tính thay đổi theo điều kiện sản xuất, thi công. Vì vậy các phương pháp tính toán kỹ thuật thường dựa trên một số mô hình đơn giản hơn và thiên về an toàn để phục vụ công tác tính toán được nhanh chóng mà vẫn đảm bảo độ an toàn, tính kinh tế như mong muốn. Có hai giả thiết thường gặp để tính toán cường độ chịu uốn và khả năng kháng nứt của mặt cắt BTCT chịu uốn là (i) giả thiết liên quan đến ứng xử của kết cấu,

trong đó có giả thiết quan trọng là giả thiết biến dạng phẳng và (ii) là giả thiết liên quan đến ứng suất phân bố trên vật liệu. Giả thiết thứ hai liên quan đến mô hình làm việc của vật liệu, tức là mô hình quan hệ giữa ứng suất và biến dạng.

Các tính toán kỹ thuật trong thiết kế kết cấu BTCT ở Việt Nam hiện tại sử dụng chủ yếu tiêu chuẩn quốc gia TCVN 5574-2018 [2] cũng như tham khảo một số tiêu chuẩn tiên tiến như Eurocode 2 [1], ACI 318 [4] hiện tại được thực hiện chủ yếu dựa vào giả thiết về mặt cắt phẳng (mặt cắt trước khi phá hoại phẳng thì sau khi phá hoại cũng phẳng). Liên quan đến giả thiết về mô hình ứng suất trong vật liệu, các tiêu chuẩn tính toán đều giả thiết và hướng dẫn áp dụng mô hình khối ứng suất chữ nhật Whitney [5] đối với vật liệu bê tông. Đồng thời các tiêu chuẩn cũng giả thiết điều kiện phá hoại của bê tông bao gồm giá trị ứng suất, giá trị biến dạng và chiều cao khối ứng suất nén. TCVN 5574-2018 giả thiết ở trạng thái phá hoại, ứng suất trong bê tông đạt cường độ chịu nén  $R_b$  và biến dạng đạt giá trị 0.0035. Eurocode 2 quy định tương ứng các giá trị ứng suất, biến dạng của bê tông đạt giá trị  $f_{ck}$  và 0.0035. Tiêu chuẩn ACI 318 quy định các giá trị này tương ứng là  $f'_c$  và 0.003. Chiều cao của khối ứng suất chữ nhật trong bê tông phụ thuộc vào cấp bền của bê tông và thường từ 0.8 đến 0.85 giá trị của vùng nén. Đồng thời, để tính toán cường độ chịu nén của bê tông, cốt thép dù là phân bố khác nhau cũng được quy đổi về một vị trí tương đương về mô men tĩnh của cốt thép đối với một trục nào đó kể cả ở vùng nén và vùng kéo. Ngoài ra, giá trị ứng suất trong cốt thép đều đạt giá trị giới hạn chảy  $R_s$  (đối với vùng kéo) và  $R_{sc}$  đối với vùng nén. Các giả thiết này giúp việc tính toán được thuận lợi và phù hợp với đa số các cấu kiện dầm, sàn chịu uốn thông dụng trong các kết cấu BTCT dân dụng, công nghiệp và giao thông. Trong tính toán thực hành, các phần mềm, bảng tính cũng được thiết lập dựa trên các giả thiết này.

Trong thực tế thiết kế kết cấu hiện nay, có nhiều loại kết cấu có chiều cao lớn nhưng có chiều dày nhỏ, ví dụ như các cấu kiện vách phía trên của cửa các ô thang máy trong công trình nhà cao tầng, các kết cấu dầm-vách kết hợp. Trong các kết cấu này, thép được bố trí nhiều lớp và cũng không hoàn toàn tập trung ở các biên dầm mà được bố trí phân bố theo chiều cao. Do đó việc sử dụng giả thiết tính toán như trình bày ở trên sẽ không còn phù hợp. Trong tính toán cần phải xem xét đến sự phân bố này khiến cho các cốt thép không đồng thời xảy ra biến dạng dẻo và cùng đạt cường độ tính toán  $R_s$  hoặc  $R_{sc}$ . Bài báo này trình bày so sánh tính toán giữa hai cách tiếp cận cũng như xây dựng một chương trình tính toán giúp các kỹ sư thực hành có thể xác định một cách nhanh chóng cường độ kháng uốn của dầm BTCT có cốt thép phân bố theo chiều cao của cấu kiện.

Các công thức tính toán và giả thiết diễn giải dưới đây được tóm tắt theo TCVN 5574-2018 [2]. Theo đó tính toán khả năng chịu uốn của cấu kiện bê tông cốt thép có thể thực hiện theo hai phương pháp. Phương pháp thứ nhất là tính toán theo nội lực giới hạn (phương pháp truyền thống). Phương pháp thứ hai là tính toán theo mô hình biến dạng phi tuyến.

Khi tính toán khả năng chịu uốn theo nội lực giới hạn, có một số giả thiết sau:

- Toàn bộ thép được đặt tại một điểm ở trọng tâm thép tương ứng của vùng kéo/ vùng nén.
- Ở trạng thái giới hạn phá hoại, toàn bộ thép nén và thép kéo đều chảy dẻo.
- Bê tông đạt cường độ tính toán  $R_b$  và phân bố trên 80% chiều cao vùng nén (mô hình Whitney);

Từ đó có công thức xác định chiều cao vùng chịu nén:

$$x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b} \quad (\text{Eq, 1})$$

và công thức xác định mô men kháng uốn:

$$M_n = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a') \quad (\text{Eq,2})$$

Trong các công thức trên,  $b$  là chiều rộng mặt cắt,  $h$  là chiều cao,  $h_0$  là chiều cao có hiệu đối với cốt thép chịu kéo,  $a$  và  $a'$  là lượt là khoảng cách từ trọng tâm cốt thép vùng kéo, vùng nén đến mép kéo, mép nén của mặt cắt.  $R_s, R_{sc}$  lần lượt là cường độ chịu kéo và chịu nén tính toán của cốt thép;  $A_s, A_{sc}$  lần lượt là diện tích thép kéo và thép nén.

Trong thực tế có một số trường hợp, ví dụ như các dầm có chiều cao lớn và chiều rộng nhỏ thì cốt thép được bố trí theo nhiều lớp trên chiều cao mặt cắt, khi đó không dễ dàng xác định ngay từ đầu thép nào chịu kéo và thép nào chịu nén cũng như việc cho rằng tất cả cốt thép đều bị chảy dẻo sẽ không còn chính xác. Vì vậy, sử dụng phương pháp phân tích phi tuyến sẽ phản ánh chính xác hơn kết quả tính toán. Phương pháp này sử dụng một số giả thiết sau đây [2, trang 64, mục 8.2.7]:

- Giả thiết tiết diện phẳng: Sự phân bố biến dạng tương đối của bê tông và cốt thép theo chiều cao tiết diện cấu kiện được lấy theo quy luật tuyến tính;
- Quan hệ giữa ứng suất dọc trục và biến dạng tương đối của bê tông và của cốt thép được lấy theo các biểu đồ biến dạng của bê tông và cốt thép;
- Bỏ qua khả năng làm việc chịu kéo của bê tông.

Đối với cốt thép, hai mô hình quan hệ ứng suất – biến dạng dưới đây gồm mô hình hai đoạn thẳng và mô hình 3 đoạn thẳng theo các phương trình dưới đây [2, trang 49]:

Mô hình hai đoạn thẳng:

$$\begin{aligned} \text{Khi } 0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s0} : \sigma_s &= \varepsilon_s E_s \\ \text{Khi } \varepsilon_{s0} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} : \sigma_s &= R_s \end{aligned} \quad (\text{Eq, 3})$$

Mô hình ba đoạn thẳng:

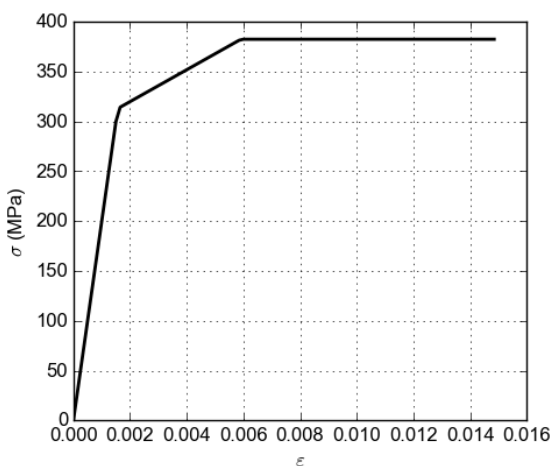
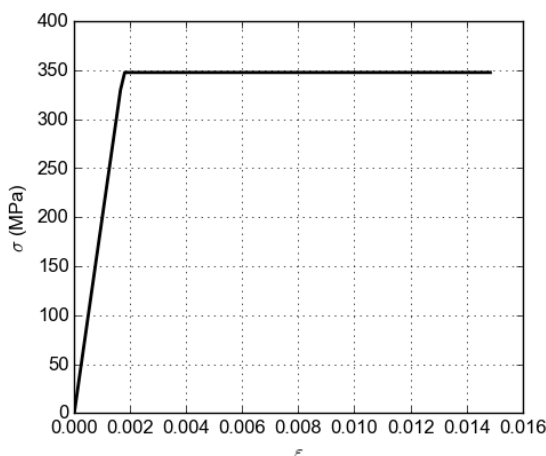
Khi  $0 \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s1} : \sigma_s = \varepsilon_s E_s$  (Eq, 4)

Khi  $\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2} : \sigma_s = \left[ \left( 1 - \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right) \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{s1}} + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \right] R_s \leq 1.1R_s$

Trong các công thức (Eq, 3) và (Eq, 4),  $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0.002$ ,  $E_s = 200000MPa$  là mô đun đàn hồi của thép,  $R_s$  là cường độ tính toán chịu kéo của thép ; giá trị ứng suất  $\sigma_{s1}$  lấy bằng  $0.9R_s$  còn giá trị ứng suất  $\sigma_{s2}$  lấy bằng  $1.1R_s$  ; giá trị biến dạng tương đối  $\varepsilon_{s1} = 0.9R_s/E_s$ , biến dạng  $\varepsilon_{s2} = 0.015$ .

Ví dụ đối với thép cấp bền CB-400V, cường độ tính toán

$R_s = 400MPa/1.15 = 347.8MPa \approx 350MPa$  ta có biểu đồ quan hệ ứng suất – biến dạng của thép theo hai mô hình trên được trình bày ở Hình 1.

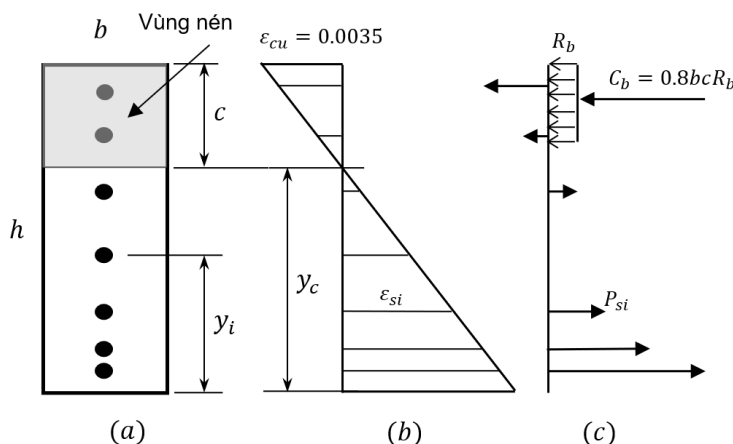


**Hình 1.** Quan hệ ứng suất – biến dạng của thép CB400-V sử dụng trong tính toán độ bền cầu kiện BTCT theo mô hình phi tuyến gồm mô hình hai đoạn thẳng (bên trái), mô hình 3 đoạn thẳng (bên phải).

## 2. Lập chương trình tính toán mô men kháng uốn của mặt cắt bê tông cốt thép theo mô hình biến dạng phi tuyến của cốt thép

Trong tính toán này, chúng ta vẫn áp dụng giả thiết như ở phương pháp tính theo nội lực giới hạn đối với vật liệu bê tông. Đó là ở trạng thái phá hoại do uốn, ứng suất trong bê tông đạt cường độ tính toán  $R_b$  và phân bố đều trên chiều cao quy đổi  $a = 0.8c$  trong đó  $c$  là chiều cao vùng bê tông chịu nén. Còn lại, ứng xử của cốt thép được nghiên cứu theo hai mô hình của TCVN 5574-2018 đề xuất như ở mục 2.

Để tính toán được mô men kháng uốn  $M_n$ , cần thiết phải tìm vị trí của trục trung hòa. Trong phương pháp tính toán theo nội lực giới hạn, trục trung hòa được tính toán một cách tường minh theo công thức (Eq, 1). Tuy nhiên trong trường hợp tính toán theo mô hình phi tuyến, vị trí trục trung hòa là ẩn số và cần phải tìm dựa trên điều kiện cân bằng sau: ở trạng thái phá hoại, tổng lực dọc trong thép và trong bê tông bằng 0. Do đó để tìm  $x$ , có thể dùng phép thử dần cho đến khi điều kiện cân bằng thỏa mãn.



**Hình 2.** Mô hình tính toán ứng suất, biến dạng và lực trong các thành phần vật liệu của mặt cắt BTCT ở trạng thái phá hoại. (a) Sơ họa mặt cắt và tọa độ bố trí thép; (b) Sơ đồ biến dạng phẳng; (c) Lực trong thép và bê tông trong đó bê tông khi phá hoại đạt cường độ  $R_b$  phân bố đều trên chiều cao  $0.8c$ .

Với giả thiết này, các tác giả đề xuất các bước tính toán sau đây để tìm vị trí trục trung hòa và mô men kháng uốn:

- 1) Chia dầm thành  $n$  đoạn đều nhau,  $\Delta y = h/n$ .
- 2) Lập các tọa độ giả định của trục trung hòa là  $y_c^{(j)} = \Delta y \times j$  trong đó  $j$  là biến số chạy từ 0 đến  $n$ , chiều cao vùng nén tương ứng là  $c^{(j)}$ .
- 3) Tính toán biến dạng của thanh thép  $i$  dựa vào tọa độ  $y_i$  của chúng theo hình 2(b) dựa theo quan hệ toán học:

$$\epsilon_{si}^{(j)} = \frac{y_c^{(j)} - y_i}{c^{(j)}} \times \epsilon_{cu} \quad (\text{Eq, 5})$$

- 4) Tính toán ứng suất của thép tương ứng với quan hệ giữa biến dạng và ứng suất ở hình 2 và nhân ứng suất với diện tích thanh thép để được lực tương ứng. Tính lực trong thép  $P_{si}$  như hình 2(c) và tổng  $\sum P_{si}$  của chúng.

- 5) Tính tổng của lực trong bê tông  $C^{(j)}$  theo hình 2(c).

- 6) Tính hiệu  $C^{(j)} - \sum P_{si}^{(j)}$ , nếu hiệu này = 0 thì  $y_c^{(j)}$  là nghiệm cần tìm, tức là tọa độ của trục trung hòa. Nếu hiệu này khác 0 thì quay lại bước 2.

Tính toán mô men kháng uốn theo công thức (Eq, 6):

$$M_n = \sum P_{si} \times \left( h - \frac{a}{2} - y_i \right) \quad (\text{Eq, 6})$$

Với các bước tính toán ở trên, trong thực tế ở bước 6, rất khó đạt được điều kiện  $C_i - \sum P_{si} = 0$ . Mặt khác trong quá trình tính toán, các tác giả nhận thấy quan hệ giữa giá trị  $(C^{(j)} - \sum P_{si}^{(j)})$  và giá trị tọa độ giả định  $y_{ci}$  là một đường cong đơn điệu, do đó cách thức tính toán được đề xuất như sau, được gọi là *phương pháp thu hẹp khoảng*: Kiểm tra tích số ở bước thứ  $(j - 1)$  và bước thứ  $j$  để dự đoán vùng nghiệm: nếu tích số  $(C^{(j-1)} - \sum P_{si}^{(j-1)}) \times (C^{(j)} - \sum P_{si}^{(j)}) < 0$  thì nghiệm  $y_c$  sẽ nằm trong khoảng  $y_c^{(j-1)}$  và  $y_c^{(j)}$ . Từ đây ta lại chia khoảng giữa  $y_c^{(j-1)}$  và  $y_c^{(j)}$  ra thành rất nhiều khoảng nhỏ một lần nữa để từ đó tìm được khoảng nghiệm nhỏ hơn và có thể lấy gần đúng giá trị ở đầu khoảng nghiệm ở vòng dò tìm lần 2 hoặc 3. Cách thức này có thể dễ dàng đạt được nhờ phép lập trình bởi bất kỳ ngôn ngữ lập trình nào.

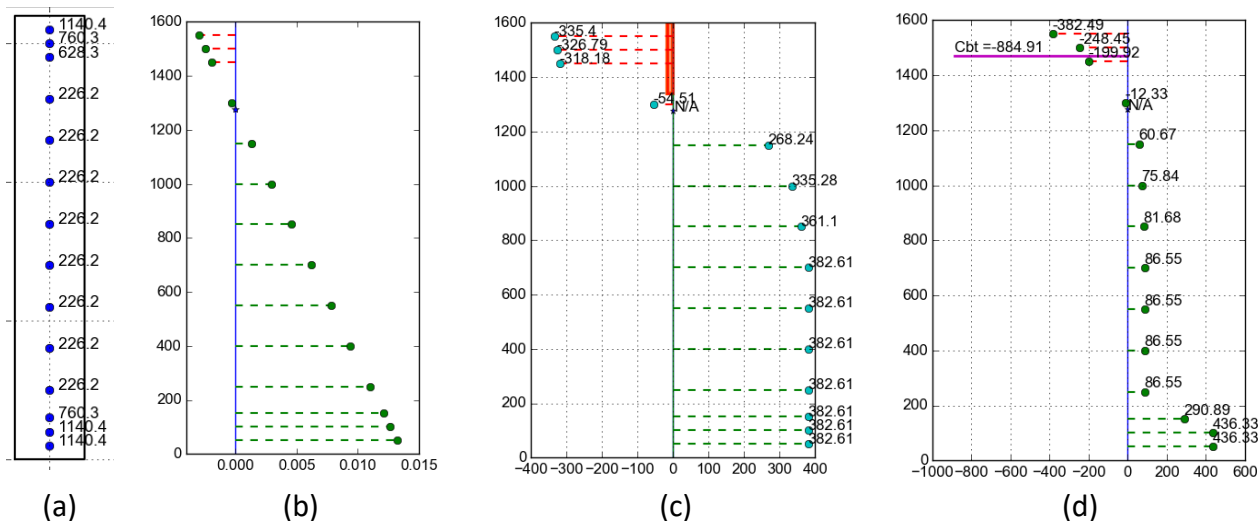
### 3. Kết quả tính toán và đánh giá

Trong nghiên cứu này, ngôn ngữ lập trình Python được sử dụng để giải bài toán dò tìm nghiệm. Chúng ta đánh giá theo một số kết quả dưới đây cho một trường hợp kết cấu điển hình.

Kết quả đánh giá và so sánh giữa hai phương pháp tính toán theo một số bài toán đặc trưng, trong đó mặt cắt tính toán có chiều cao 1600mm, chiều rộng 200mm, bê tông cấp bền

B30, thép CB-400V. Tọa độ thép theo chiều cao, đường kính thép và số lượng thanh thép tương ứng được xét cho 04 tình huống như Hình 3, Bảng , trong đó tình huống 1 là tình huống giả thiết tất cả thép chịu lực chính đặt tập trung được tại các vị trí gần biên dưới và gần biên trên của mặt cắt; tình huống 2 tính toán chỉ xét đến các thép chịu lực chính đường kính lớn; tình huống 3 xem xét thép phụ bố trí

đến gần 1/2 chiều cao mặt cắt và tình huống 4 xem xét tất cả cốt thép phụ bố trí cách nhau 150mm theo chiều cao mặt cắt. Ví dụ tính toán và các giá trị trung gian cho tình huống 4 được trình bày ở Hình 3. Phép tính toán phân tích phi tuyến cho thấy cốt thép ở cao độ 850mm trở xuống vẫn đạt chảy dẻo, trong khi đó cốt thép vùng nén vẫn còn làm việc trong giai đoạn đàn hồi, kể cả cốt thép gần vùng nén nhất.



**Hình 3.** Kết quả các bước tính toán trung gian: (a) Sơ họa mặt cắt, vị trí của thép chịu lực và tổng diện tích thép (mm<sup>2</sup>) của mỗi lớp; (b) Biến dạng của thép ở trạng thái phá hoại; (c) Ứng suất (MPa) trong thép và trong bê tông ở trạng thái phá hoại ; (d) Lực (kN) trong thép và trong bê tông ở trạng thái phá hoại.

**Bảng 1.** Tình huống bố trí thép tính toán khả năng kháng uốn cho dầm BTCT kích thước  $b \times h = 200\text{mm} \times 1600\text{mm}$ , bê tông B30, thép CB-400V.

Tình huống 1			Tình huống 2			Tình huống 3			Tình huống 4		
y (mm)	phi (mm)	n	y (mm)	phi (mm)	n	y (mm)	phi (mm)	n	y (mm)	phi (mm)	n
1550	22	7	1550	22	3	1550	22	3	1550	22	3
			1500	22	2	1500	22	2	1500	22	2
			1450	20	2	1450	20	2	1450	20	2
									1300	12	2
									1150	12	2
									1000	12	2
									850	12	2
									700	12	2
									550	12	2
									400	12	2
									250	12	2
			150	22	2	150	22	2	150	22	2
			100	22	3	100	22	3	100	22	3
50	22	8	50	22	3	50	22	3	50	22	3

**Bảng 2.** So sánh kết quả tính toán giữa một số mô hình.

Tình huống	Chiều cao vùng nén $c(mm)$			$M_n (kN.m)$		
	Tính toán theo phương pháp nội lực giới hạn	Mô hình phi tuyến 2 đoạn thẳng của thép	Mô hình phi tuyến 3 đoạn thẳng của thép	Tính toán theo phương pháp nội lực giới hạn	Mô hình phi tuyến 2 đoạn thẳng của thép	Mô hình phi tuyến 3 đoạn thẳng của thép
1	50	89	115	1582	1590	1746
2	135	159	178	1462	1521	1665
3	135	213	259	1767	1832	1999
4	100	241	276	1816	1950	2115

Qua quá trình phân tích cũng như từ kết quả tính toán trình bày ở Bảng 2, ta có một số nhận xét như sau:

- Kể cả trong trường hợp cốt thép được bố trí tập trung ở gần biên vùng kéo và biên vùng nén (tình huống 1) thì có thể cốt thép ở vùng nén vẫn không đạt giới hạn chảy nếu tính theo giả thiết mặt cắt phẳng và thép làm việc theo mô hình phi tuyến. Giá trị khả năng kháng uốn  $M_n$  trong trường hợp này khá tương đồng giữa phương pháp tính toán theo nội lực giới hạn và phương pháp tính toán phi tuyến trên sơ đồ hai đoạn thẳng của thép. Điều này cũng dễ hiểu vì xuất phát của phương pháp phân tích theo nội lực giới hạn cũng giả thiết vật liệu thép làm việc đàn dẻo.
- Các tính toán theo mô hình phi tuyến 3 đoạn thẳng của thép cho giá trị mô men kháng uốn cao hơn ở tất cả các tình huống còn lại. Điều này cũng dễ hiểu vì trong mô hình phi tuyến 3 đoạn thẳng, cốt thép được lấy cường độ tính toán cao hơn so với các trường hợp khác 10%.
- Khi cốt thép phân bố theo chu vi càng lớn thì sự sai lệch về kết quả giữa phương pháp tính toán phi tuyến và phương pháp phân tích theo nội lực giới hạn càng lớn. Kết quả thiên về an toàn hơn khi tính toán theo phương pháp truyền thống.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày tóm tắt phương pháp tính toán mô men kháng uốn được nêu trong tiêu chuẩn TCVN 5574-2018 bao gồm cả phương pháp tính toán theo nội lực giới hạn và phương pháp tính toán theo phân tích phi tuyến. Một thuật toán giải lập đã được đề xuất để áp dụng tính toán khả năng chịu mô men trong trường hợp phân tích phi tuyến theo mô hình ứng suất - biến dạng phi tuyến của thép là mô hình hai đoạn thẳng và mô hình ba đoạn thẳng. Một chương trình tính toán thiết lập trên nền tảng của ngôn ngữ lập trình Python đã được thực hiện, cho phép tính toán theo các mô hình khác nhau ở trên. Dựa vào kết quả tính toán cho 4 tình huống, tính toán theo phương pháp phân tích nội lực giới hạn và phương pháp phân tích theo mô hình phi tuyến vật liệu đàn dẻo lý tưởng của thép cho kết quả tương đối gần nhau. Tuy nhiên đối với các trường hợp cốt thép phân bố theo chiều cao của mặt cắt thì phương pháp phân tích theo nội lực giới hạn thiên về an toàn hơn so với phương pháp phân tích phi tuyến, đặc biệt là phi tuyến theo mô hình làm việc 3 đoạn thẳng của thép.

Trong nghiên cứu này, mô hình làm việc phi tuyến của bê tông vẫn chưa được xem xét mà trong đó vẫn sử dụng dạng biểu đồ làm việc Whitney ở vùng nén, là dạng biểu đồ được tham khảo theo nhiều tiêu chuẩn tính toán trong đó có tiêu chuẩn TCVN 5574-2018. Các mô hình làm việc phi tuyến khác nhau của bê tông sẽ được xem xét đánh giá trong các nghiên cứu tiếp theo.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên năm 2022, cấp Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, mã số SV2022-88 theo Quyết định số 150/QĐ-ĐHSPKT. Các tác giả xin bày tỏ sự cảm ơn chân thành.

### Tài liệu tham khảo

- [1] EN 1992-1-1 (2005), Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [2] TCVN 5574 : 2018. (2018), Thiết kế Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.
- [3] K. Rgen, J.A.N. Walcwk, A.W. E (1989), Non linear analysis of concrete structures, Comput. Struct. 32, 563–590.
- [4] American Concrete Institute (2014), ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural concrete and Commentary.
- [5] J.G.M. James K. Wight (2009), Reinforced concrete - Mechanics and Design, 6th ed., Pearson Education.