Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2024, 18 (3V): 128–137

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHÂN TÍCH DỰ ĐOÁN ỨNG XỬ CHỊU UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP

Nguyễn Công Luyến[a,*], Mai Anh Đức[b], Thân Trọng Huy[a], Ngô Văn Huy[a], Phạm Phú Trung[a]

[a]*Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, số 54 Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, TP. Đà Nẵng, Việt Nam*
[b]*Khoa Quản lý dự án, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, số 54 Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, TP. Đà Nẵng, Việt Nam*

Nhận ngày 22/12/2023, Sửa xong 02/5/2024, Chấp nhận đăng 07/5/2024

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày sự phát triển mô hình phân tích dự đoán ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép dựa trên lý thuyết tương thích biến dạng và cân bằng lực, có xét đến sự thay đổi độ cứng của dầm khi bê tông vùng kéo ở mặt dưới dầm bị nứt. Mô hình được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm của dầm chịu uốn bốn điểm thu thập từ các bài báo của các tác giả khác nhau. Khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép có được từ mô hình phân tích trong bài báo này cũng được so sánh với kết quả từ mô hình lý thuyết dẻo cứng vốn thiên về an toàn và được sử dụng trong các tiêu chuẩn thiết kế. Kết quả kiểm chứng cho thấy rằng mô hình phân tích có thể dự đoán chính xác khả năng chịu uốn và độ võng của dầm bê tông cốt thép, và cao hơn 4% so với kết quả từ mô hình dẻo cứng.

Từ khoá: dầm bê tông cốt thép; ứng xử chịu uốn; biểu đồ lực – độ võng; mô hình phân tích; mô hình lý thuyết dẻo cứng.

DEVELOPMENT OF ANALYTICAL MODEL FOR PREDICTING THE FLEXURAL BEHAVIOUR OF RC BEAMS

Abstract

This study proposes an analytical model to predict the flexural behaviour of reinforced concrete (RC) beams based on the strain compatibility theory and force equilibrium, in which the degradation of beam's stiffness was taken into account as the tensile strain of concrete at below beam's interface exceeded its capacity. The developed analytical model was then validated with the experimental results conducted by various researchers. The flexural capacity of RC beam retrieved from the developed analytical model was also compared with that obtained by rigid plastic analysis which is a conservative method and currently being adopted in the domestic and international design standards. Validation results showed that the developed analytical model is capable of accurately predicting the flexural strength and displacement of RC beams, and is higher 4% than that obtained by rigid plastic analysis.

Keywords: RC beam; flexural behaviour; load – displacement relationship; analytical model; rigid plastic analysis.

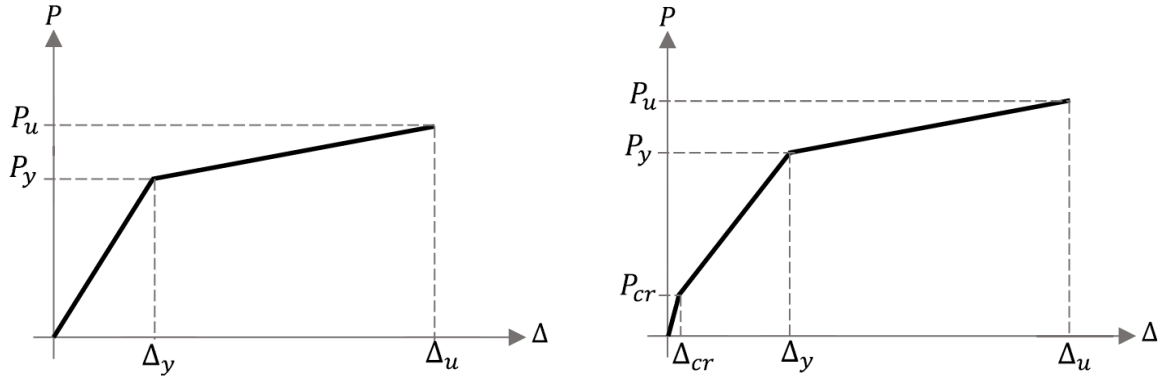
https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(3V)-10 © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Dầm là kết cấu chịu lực chính trong kết cấu nhà dân dụng, kết cấu cầu; là trung gian truyền tải trọng từ kết cấu sàn vào cột và truyền xuống móng. Có nhiều loại dầm được phát triển hiện nay để đáp ứng nhu cầu thực tế xây dựng, ví dụ như dầm liên hợp bê tông – thép hình chữ I, dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh. Vì vậy các nhà khoa học cũng đã tập trung nghiên cứu ứng xử những loại dầm này. Đơn cử như Tuấn và Tâm [1] nghiên cứu tính toán độ võng ngắn hạn dầm bê

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* ncluyen@dut.udn.vn (Luyến, N. C.)

tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh theo TCVN 5574:2018 [2]. Khả năng chịu mô men uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và GFRP theo TCVN 5574:2018 [2] cũng đã được nghiên cứu bởi tác giả [3]. Tuy nhiên, dầm bê tông cốt thép (BTCT) vẫn là loại dầm phổ biến dùng trong các kết cấu xây dựng ở Việt Nam hiện nay. Trong tính toán thiết kế dầm BTCT, ngoài yêu cầu tính toán khả năng chịu lực của dầm, tính toán độ võng cũng là một yêu cầu quan trọng khi tính toán dầm theo trạng thái giới hạn thứ hai về điều kiện làm việc bình thường. Các tiêu chuẩn thiết kế trên thế giới, trong đó có tiêu chuẩn Việt Nam [2] hiện nay dùng mô hình lý thuyết dẻo cứng để xác định khả năng chịu lực của kết cấu dầm. Trong khi đó, độ võng của dầm lại được tính toán riêng rẽ với các bước phức tạp. Để giải quyết vấn đề đó, phân tích ứng xử dầm chịu uốn bao gồm khả năng chịu lực và độ võng dùng các phần mềm chuyên dụng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn như SAP2000, ABAQUS trở nên phổ biến với độ chính xác và chi tiết hóa cao. Tuy nhiên quá trình mô phỏng tốn nhiều thời gian và yêu cầu bộ nhớ máy tính có cấu hình vượt trội vì nhiều phần tử và nút cần được tính toán. Các phương pháp có thể xác định chính xác ứng xử uốn của dầm BTCT và tốn ít tài nguyên với các bước tính toán nhanh chóng, vì vậy, trở nên thiết yếu để giúp các kỹ sư trong các công việc thiết kế hằng ngày. Các mô hình phân tích với những đặc điểm trên có thể giải quyết những vấn đề đó. Hiện nay, mô hình phân tích tính toán đường cong lực – độ võng của dầm chịu uốn được đề xuất bởi Hsu và Mo [4], bao gồm: mô hình hai đường thẳng (bi-linear load-displacement curve) và mô hình ba đường thẳng (tri-linear load-displacement curve), được miêu tả trong Hình 1 [5]. Sự khác nhau của hai mô hình phân tích này là mô hình ba đường thẳng có xét đến sự giảm độ cứng của dầm khi bê tông vùng kéo mặt dưới dầm bị nứt, trong khi mô hình hai đường thẳng thì không xét. Trong các mô hình phân tích này, giá trị tại các điểm chính của đường lực – độ võng được xác định trước, ví dụ tại điểm cốt thép bị kéo chảy hay tại điểm bê tông bị nén vỡ dẫn đến phá hoại dầm. Nối các điểm này sẽ được biểu đồ lực – độ võng của dầm. Mô hình ba đường thẳng thường mô phỏng chính xác hơn mô hình hai đường thẳng do có xét đến sự giảm độ cứng dầm khi bê tông vùng kéo dưới dầm bị nứt [5]. Tuy nhiên, có một thực tế là các mô hình này đã lý tưởng hóa đường cong lực – độ võng của dầm chịu uốn thành các đường thẳng, vốn dĩ chưa phản ánh chính xác hoàn toàn ứng xử uốn của dầm BTCT. Việc xác định chính xác các điểm trên biểu đồ lực – độ võng sẽ rất cần thiết cho các kỹ sư và nhà thiết kế trong việc tính toán kết cấu dầm chịu uốn.

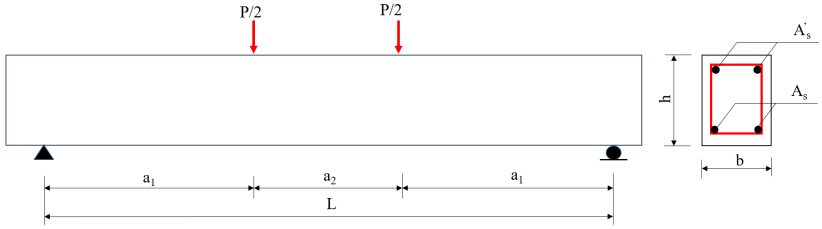


(a) Mô hình hai đường thẳng (b) Mô hình ba đường thẳng

Hình 1. Mô hình lực – độ võng của dầm [5]

Trong bài báo này, tác giả đề xuất sử dụng lý thuyết tương thích về biến dạng và cân bằng lực để xây dựng đường cong quan hệ lực – độ võng của dầm chịu uốn, trong đó có xét đến sự giảm độ cứng dầm khi bê tông vùng kéo ở mặt dưới dầm bị nứt. Ưu điểm của mô hình này là mô phỏng chính xác

sự làm việc của các vật liệu cấu tạo nên dầm vì các mô hình ứng suất – biến dạng của vật liệu sẽ được đưa vào trong mô hình. Hơn nữa, khả năng chịu lực và độ võng của dầm tại mọi điểm trong quá trình chịu tải được xác định chính xác so với mô hình phân tích đề xuất bởi Hsu và Mo [4]. Các yếu tố ảnh hưởng lên mô hình như sự giảm độ cứng khi bê tông vùng kéo bị nứt sẽ được phân tích trong bài báo. Sau đó mô hình được kiểm chứng bằng cách so sánh với kết quả thí nghiệm thu thập từ các bài báo được thực hiện bởi các tác giả khác nhau [6–13]. Sự so sánh giữa kết quả của mô hình phân tích với kết quả từ mô hình lý thuyết dẻo cứng cũng được trình bày trong bài báo này.



Hình 2. Đặc trưng kích thước và tiết diện dầm

2. Xây dựng mô hình phân tích

2.1. Đặc trưng kích thước dầm và các giả thiết

Dầm BTCT được nghiên cứu trong bài báo này là dầm chịu uốn bốn điểm có các kích thước hình học và cấu tạo chi tiết như Hình 2. Một số giả thiết được đưa ra khi xây dựng mô hình phân tích cho dầm:

- Sự phân bố ứng suất và biến dạng trên toàn bộ mặt cắt dầm là tuyến tính, và có cùng độ cong là ϕ.

- Giả thiết lực dính giữa bê tông và cốt thép là tốt, do vậy bê tông và cốt thép tại cùng vị trí có giá trị biến dạng như nhau.

- Bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông trong các công thức tính vì bê tông có khả năng chịu kéo kém.

2.2. Mô hình vật liệu bê tông và cốt thép

a. Bê tông

Đường biểu đồ ứng suất – biến dạng nén của bê tông được mô phỏng bằng đường cong biểu thị trên Hình 3, và được diễn giải theo Tiêu chuẩn Eurocode 2 [14]:

+ Khi $\varepsilon_{cc} \le \dfrac{0{,}4 f_{cm}}{E_{cm}}$:

$$\sigma_{cc} = E_{cm}\varepsilon_{cc} \tag{1}$$

trong đó E_{cm} là mô đun đàn hồi của bê tông, được xác định bằng công thức $E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$ nếu chưa được xác định từ thực nghiệm.

+ Khi $\dfrac{0{,}4 f_{cm}}{E_{cm}} < \varepsilon_{cc} < \varepsilon_{cu}$:

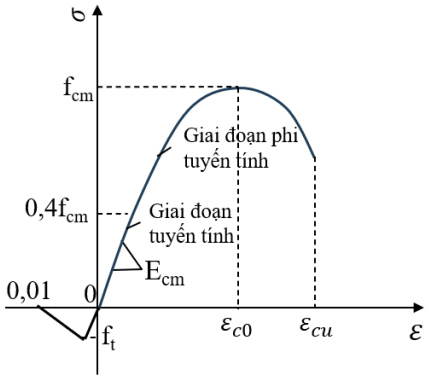
$$\sigma_{cc} = \frac{k(\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}) - (\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0})^2}{1 + (k-2)(\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0})} f_{cm} \tag{2}$$

trong đó σ_{cc} là ứng suất nén của bê tông; f_{cm} là cường độ chịu nén trung bình của bê tông; ε_{cc} là biến dạng nén của bê tông; ε_{c0} là biến dạng nén tại giá trị ứng suất nén cực đại, lấy bằng $\varepsilon_{c0} = \min(0{,}7 f_{cm}{}^{0,31}; 2{,}8)$ [14]; k là hệ số xác định bằng công thức $k = 1{,}05 E_{cm}|\varepsilon_{c0}|/f_{cm}$; ε_{cu} là biến dạng nén cuối cùng của bê tông, lấy bằng $\varepsilon_{cu} = \min\{2{,}8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4; 3{,}5\}$‰ [14].

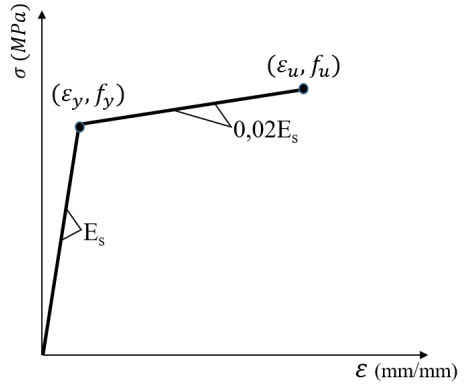
b. Cốt thép

Đường biểu đồ ứng suất – biến dạng của cốt thép được biểu thị bởi biểu đồ hai đường thẳng (Hình 4), giá trị ứng suất được xác định như sau [15]:

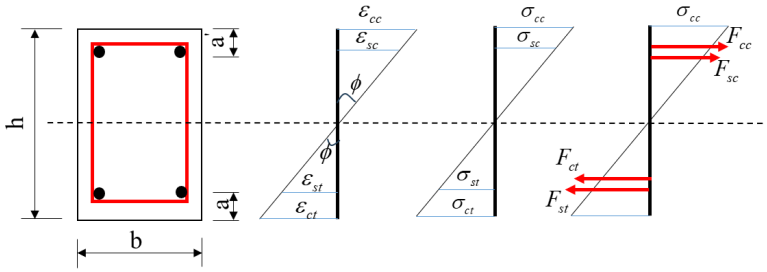
$$\sigma_s = \begin{cases} \varepsilon_s E_s & (0 < \varepsilon_s \le \varepsilon_y) \\ f_y + 0{,}02E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & (\varepsilon_y < \varepsilon_s \le \varepsilon_u) \end{cases} \quad (3)$$



Hình 3. Mô hình ứng suất – biến dạng của bê tông



Hình 4. Mô hình ứng suất – biến dạng của cốt thép



Hình 5. Biểu đồ ứng suất và biến dạng trong tiết diện dầm

2.3. Thiết lập mô hình phân tích

a. Phân bố biến dạng trên mặt cắt dầm

Phân bố biến dạng, ứng suất và lực trên mặt cắt dầm được biểu thị ở Hình 5. Dựa vào giá trị biến dạng của bê tông tại bề mặt vùng nén của dầm ε_{cc}và giá trị độ cong ϕ, các giá trị biến dạng của cốt thép vùng nén ε_{sc}, cốt thép vùng kéo ε_{st}, bê tông tại bề mặt vùng kéo ε_{ct} được xác định dựa vào các công thức sau:

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{cc} - \tan\phi a' \quad (4)$$

$$\varepsilon_{st} = \tan\phi(h - a) - \varepsilon_{cc} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ct} = \tan\phi h - \varepsilon_{cc} \quad (6)$$

Vì ϕ rất nhỏ nên $\tan\phi \approx \phi$, các công thức (4)–(6) trở thành:

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{cc} - \phi a' \quad (7)$$

$$\varepsilon_{st} = \phi(h - a) - \varepsilon_{cc} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{ct} = \phi h - \varepsilon_{cc} \quad (9)$$

Lưu ý trong các công thức (7)–(9), biến dạng $\varepsilon_{sc}, \varepsilon_{st}, \varepsilon_{ct}$ được trình bày dưới dạng giá trị tuyệt đối.

b. Tính toán ứng suất và ứng lực của các thành phần vật liệu

Vì bê tông chịu kéo kém nên bỏ qua khả năng chịu lực của bê tông trong vùng chịu kéo ($F_{ct} \approx 0$), các thành phần lực còn lại được xác định như sau: Với cốt thép chịu kéo:

$$F_{st} = \frac{n\pi d_t^2}{4}\sigma_{st} \tag{10}$$

trong đó n là số thanh thép dọc chịu kéo; dt là đường kính thép dọc chịu kéo; σ_{st} là ứng suất trong cốt thép chịu kéo, tính toán như công thức (11):

$$\sigma_{st} = \begin{cases} \varepsilon_{st}E_s & (0 < \varepsilon_{st} \le \varepsilon_y) \\ f_y + 0{,}02E_s(\varepsilon_{st} - \varepsilon_y) & (\varepsilon_y < \varepsilon_{st} \le \varepsilon_u) \end{cases} \tag{11}$$

Với cốt thép chịu nén:

$$F_{sc} = \frac{n\pi d_c^2}{4}\sigma_{sc} \tag{12}$$

trong đó n là số thanh thép dọc chịu nén; d_c là đường kính thép dọc chịu nén; σ_{sc} là ứng suất trong cốt thép chịu nén, tính toán như công thức (13):

$$\sigma_{sc} = \begin{cases} \varepsilon_{sc}E_s & (0 < \varepsilon_{sc} \le \varepsilon_y) \\ f_y + 0{,}02E_s(\varepsilon_{sc} - \varepsilon_y) & (\varepsilon_y < \varepsilon_{sc} \le \varepsilon_u) \end{cases} \tag{13}$$

Với bê tông chịu nén:

$$F_{cc} = \frac{1}{2}\sigma_{cc}\frac{\varepsilon_{cc}}{\phi}b \tag{14}$$

trong đó b là bề rộng tiết diện dầm; σ_{cc} là ứng suất trong bê tông chịu nén, được tính toán như công thức (1) và (2).

c. Tính toán độ cong và mô men dựa vào phương trình cân bằng lực

Với dầm chịu uốn thuần túy, phương trình cân bằng lực theo phương ngang trên toàn bộ tiết diện dầm như sau:

$$\sum F = F_{cc} + F_{sc} - F_{st} = 0 \tag{15}$$

Với một giá trị ε_{cc}cho trước, các giá trị biến dạng khác được xác định dựa vào ε_{cc}và ẩn số cần tìm là độ cong ϕ. Để tìm ϕ thì cần thiết phải giải phương trình phi tuyến (15). Bằng cách lập trình với phương pháp lặp dò tìm ϕ trong khoảng xác định để thỏa mãn phương trình (15) (phương trình (15) được xem là thỏa mãn khi sai khác giữa tổng lực kéo (Fst) và tổng lực nén ($F_{cc} + F_{sc}$) không lớn hơn 0,1% tổng lực thành phần), giá trị nhận được là độ cong ϕ tương ứng với mỗi giá trị của ε_{cc}. Với giá trị độ cong ϕ vừa tìm được, khả năng chịu mô men của các thành phần vật liệu trong tiết diện được xác định như sau:

$$M_{cc} = F_{cc}(h - \frac{\varepsilon_{cc}}{3\phi}) \tag{16}$$

$$M_{st} = F_{st}(a + \frac{d_t}{2}) \tag{17}$$

$$M_{sc} = F_{sc}[h - (a' + \frac{d_c}{2})] \tag{18}$$

trong đó a là khoảng cách bề mặt dưới dầm đến cốt thép chịu kéo; a' là khoảng cách bề mặt trên dầm đến cốt thép chịu nén.

d. Tính toán độ cứng hiệu quả và độ võng của dầm

Khả năng chịu mô men của toàn bộ tiết diện được xác định như sau:

$$M_f = M_{cc} + M_{sc} - M_{st} \tag{19}$$

Độ cứng hiệu quả của tiết diện dầm được tính theo:

$$EI_{eff} = \frac{M_f}{\phi} \tag{20}$$

Lưu ý rằng khi bê tông ở vùng kéo bị nứt (biến dạng kéo trong bê tông ε_{ct} vượt quá giới hạn biến dạng kéo của bê tông $[\varepsilon_{ct}]$, thường lấy $[\varepsilon_{ct}] = 0{,}02\%$ [16]), kết cấu dầm chịu uốn bị giảm độ cứng. Sự giảm độ cứng này được biểu thị bằng công thức sau:

$$EI_{eff\ \mathrm{mod}} = n_d EI_{eff} \tag{21}$$

trong đó $EI_{eff\ \mathrm{mod}}$ là độ cứng dầm sau khi bị giảm; n_d là hệ số giảm độ cứng, giá trị hệ số này sẽ được trình bày trong Mục 3.

Khả năng chịu lực và độ võng của dầm được tính như sau:

$$P = \frac{2M_f}{a_1} \tag{22}$$

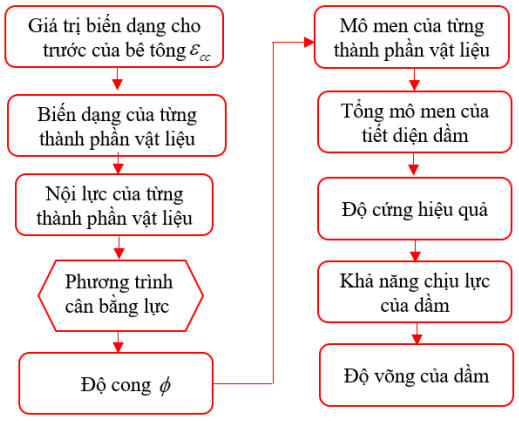
$$\delta_{\max} = \frac{Pa_1(3L^2 - 4a_1{}^2)}{24EI_{eff}} \quad \text{(khi bê tông vùng kéo chưa nứt)} \tag{23}$$

$$\delta_{\max} = \frac{Pa_1(3L^2 - 4a_1{}^2)}{24EI_{eff\ \mathrm{mod}}} \quad \text{(khi bê tông vùng kéo bị nứt)} \tag{24}$$

trong đó P là khả năng chịu lực của dầm; $\delta_{\max}$ là độ võng lớn nhất tại giữa nhịp dầm;a_1 là nhịp cắt của dầm (Hình 2); L là chiều dài dầm (Hình 2).

Lưu ý rằng công thức (23) và (24) dùng để tính độ võng cho dầm đơn giản bốn điểm uốn (Hình 2), tuy nhiên mô hình có thể áp dụng tính độ võng cho các dầm có dạng tải trọng khác nhau và điều kiện biên khác nhau khi thay công thức (23) và (24) với từng dạng dầm tương ứng.

Sơ đồ tính toán khả năng chịu lực và độ võng của dầm bê tông cốt thép được miêu tả như Hình 6.



Hình 6. Tóm tắt các bước tính toán bằng mô hình phân tích

3. Hiệu chỉnh mô hình phân tích

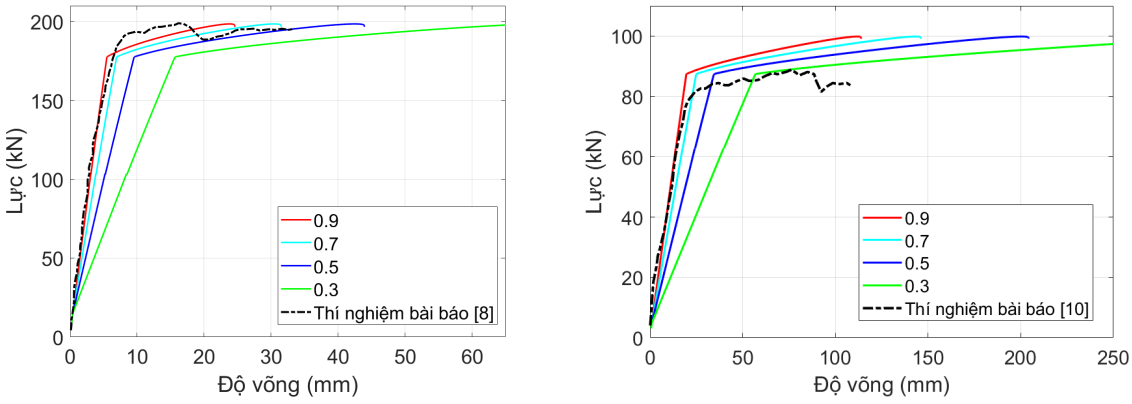
Các dầm được thí nghiệm trong các bài báo [6–13] được dùng để khảo sát sự ảnh hưởng của hệ số giảm độ cứng n_d lên đường cong quan hệ lực – độ võng của dầm. Các thông số của các dầm được cho trong Bảng 1. Các giá trị của hệ số giảm độ cứng là 0,9; 0,7; 0,5; và 0,3 được chọn để phân tích mức độ ảnh hưởng của hệ số này lên ứng xử uốn của dầm. Kết quả được biểu thị trong Hình 7 với dầm F-0 trong bài báo [8] và dầm 2ϕ16-B-PC trong bài báo [10]. Dựa vào kết quả, có thể thấy rằng với n_d càng nhỏ, độ cứng của dầm càng nhỏ sau khi

hình thành vết nứt ở bê tông trong vùng kéo, độ dốc của đường cong lực – độ võng càng giảm, và giảm dần theo thứ tự lần lượt từ hệ số n_d cao nhất (0,9) đến hệ số n_d thấp nhất (0,3). Từ biểu đồ Hình 7 có thể thấy rằng đường cong lực – độ võng của dầm có hệ số giảm độ cứng n_d bằng 0,9 là gần sát với kết quả thí nghiệm nhất. Vì vậy, hệ số giảm độ cứng bằng 0,9 sẽ được dùng trong mô hình sau khi bê tông vùng kéo bị nứt.

Bảng 1. Các thông số của dầm khảo sát

Nguồn	Tên dầm	b (mm)	h (mm)	A_s^*	$A_s'^*$	a (mm)	a' (mm)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_y (MPa)	E_s (GPa)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	L (mm)
Ref [6]	RC	150	250	20 (2)	12 (0)	25	25	45,2	34,5	410	200	750	600	2100
Ref [7]	NCB	200	350	14 (3)	12 (2)	25	25	37,1	32,6	486	206	1200	400	2800
Ref [8]	F-0	200	300	20 (2)	10 (2)	25	25	45,03	34,5	450	222	750	600	2100
Ref [9]	RC-0	130	250	12 (2)	10 (2)	20	20	38,75	33	452	200	500	500	1500
Ref [10]	2ϕ16-B-PC	200	300	16 (2)	10 (2)	25	25	54,8	36,6	534	200	1200	1200	3600
Ref [11]	C0	150	300	14 (2)	10 (2)	20	20	37	32,5	472	200	700	600	2000
Ref [12]	B2	200	400	20 (4)	14 (2)	24	32	23,8	28,5	459	207	950	950	2850
Ref [13]	CB	150	250	12 (2)	10 (2)	25	25	53	39	529	200	900	1000	2800

*Ghi chú: Giá trị bên ngoài dấu ngoặc đơn là đường kính thanh thép (mm), giá trị trong ngoặc đơn là số lượng thanh thép.



(a) Dầm F-0 (b) Dầm 2ϕ16-B-PC

Hình 7. Ảnh hưởng của hệ số giảm độ cứng lên biểu đồ lực – độ võng của dầm

4. Kiểm chứng mô hình phân tích

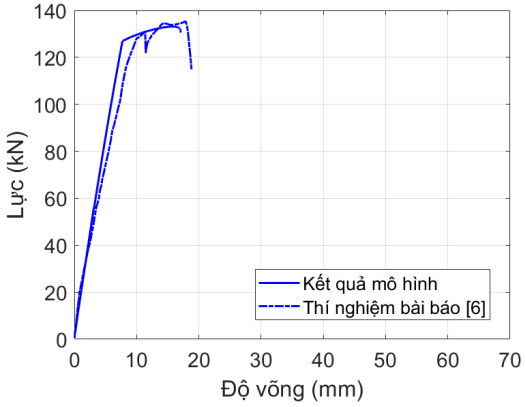
4.1. So sánh với kết quả thí nghiệm

Các thông số lấy được từ các dầm thí nghiệm cho trong Bảng 1 được nhập vào mô hình phân tích. Kết quả lấy được từ mô hình phân tích của từng dầm được so sánh với kết quả thí nghiệm. Kết quả từ tám dầm khảo sát cho thấy rằng kết quả từ mô hình phân tích cho kết quả sát với thí nghiệm, không những về khả năng chịu lực và độ võng (Bảng 2) mà còn về điểm chảy, độ cứng uốn (Hình 8).

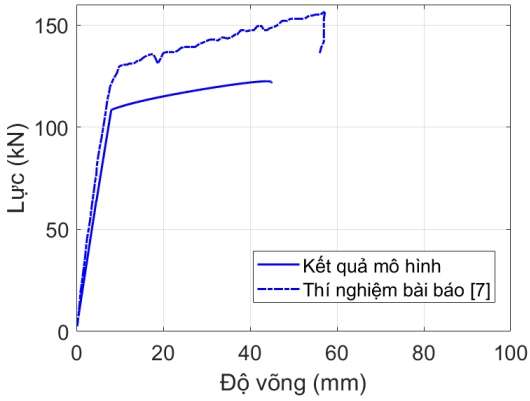
4.2. So sánh với mô hình dẻo cứng

Mô hình dẻo cứng (rigid plastic analysis (RPA)) tính toán khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép dựa trên giả thiết vùng biến dạng nén quy đổi, với hệ số chiết giảm cho chiều cao vùng nén khoảng 0,8. Mô hình này thiên về an toàn và được sử dụng trong các tiêu chuẩn thiết kế [3]. Kết quả khả năng chịu lực của các dầm khảo sát tính theo mô hình này (P_{rpa}) được so sánh với kết quả của mô hình phát triển trong bài báo này (P_{ana}) và được trình bày trong Bảng 2. Bảng 2 cho thấy rằng khả

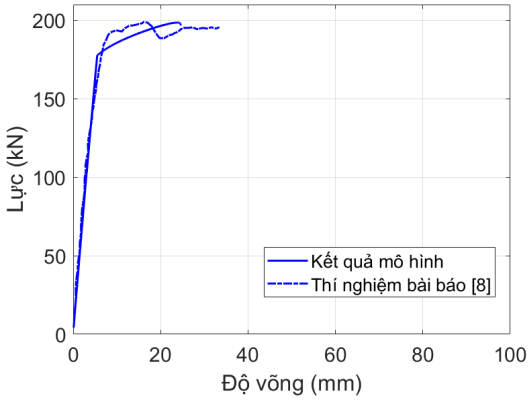
năng chịu lực từ mô hình phân tích P_{ana} cao hơn trung bình 4% so với kết quả của mô hình dẻo cứng P_{rpa}, với độ lệch chuẩn 0,08.



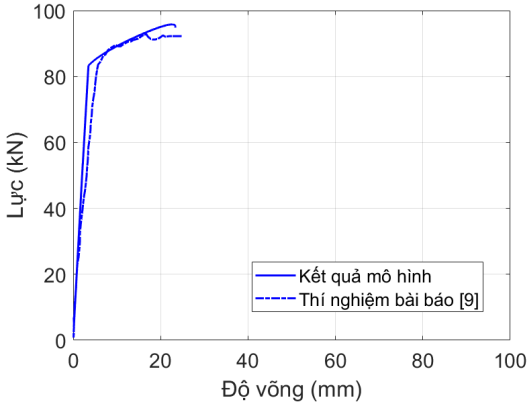
(a) Dầm RC



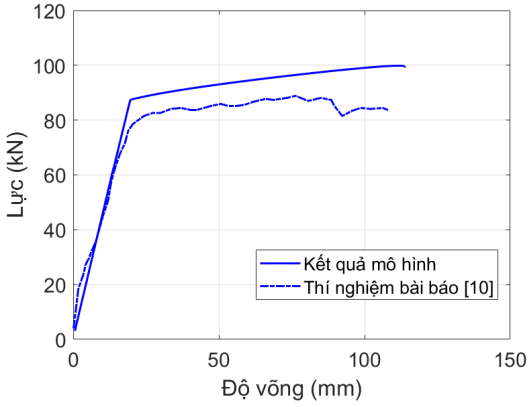
(b) Dầm NCB



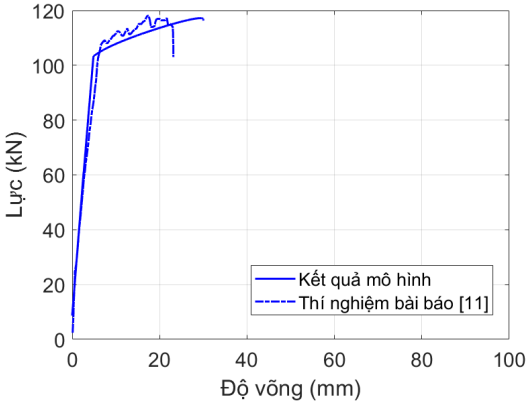
(c) Dầm F-0



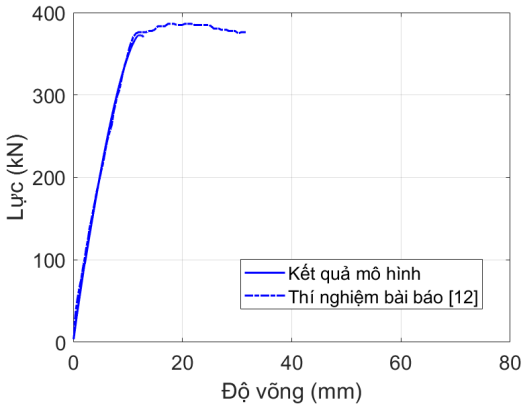
(d) Dầm RC-0



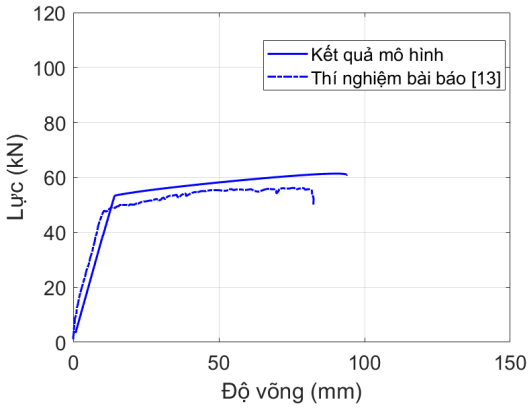
(e) Dầm 2ϕ16-B-PC



(f) Dầm C0



(g) Dầm B2



(h) Dầm CB

Hình 8. Biểu đồ lực – độ võng từ mô hình so sánh với kết quả thí nghiệm của các dầm khảo sát trong các bài báo [6–13]

Bảng 2. Kết quả mô hình phân tích so sánh với thí nghiệm và mô hình dẻo cứng

Nguồn	Tên dầm	P_{ana} (kN)	P_{test} (kN)	P_{rpa} (kN)	P_{ana}/P_{test}	P_{ana}/P_{rpa}	Độ võng (mô hình) (mm)	Độ võng (thí nghiệm) (mm)
Ref [6]	RC	133,1	132,7	144,3	1,00	0,92	15,69	18,14
Ref [7]	NCB	122,5	156,8	115,0	0,78	1,07	43,82	56,98
Ref [8]	F-0	198,5	199,1	196,5	1,00	1,01	23,81	17,13
Ref [9]	RC-0	95,8	92,8	86,8	1,03	1,10	22,66	16,60
Ref [10]	2ϕ16-B-PC	99,9	90,0	93,2	1,11	1,07	111,88	76,34
Ref [11]	C0	117,2	117,7	109,9	1,00	1,07	28,68	17,10
Ref [12]	B2	372,4	386,0	408,8	0,96	0,91	12,08	16,10
Ref [13]	CB	61,4	56,0	54,2	1,10	1,13	90,26	76,10
Trung bình					1,00	1,04		
Độ lệch chuẩn					0,10	0,08		

5. Kết luận

Mô hình phân tích dự đoán ứng xử chịu uốn của dầm bê tông cốt thép dựa trên lý thuyết tương thích biến dạng và cân bằng lực, có xét đến sự thay đổi độ cứng của dầm khi bê tông vùng kéo bị nứt đã được trình bày trong bài báo này. Số liệu của các dầm từ các bài báo của các tác giả trên thế giới được dùng để kiểm chứng mô hình. Kết quả từ mô hình dẻo cứng cũng được so sánh với kết quả từ mô hình phân tích trong bài báo này. Một số kết luận được rút ra từ kết quả của bài báo:

- Mô hình phân tích phát triển trong bài báo này cho kết quả sát với kết quả thí nghiệm, không chỉ về khả năng chịu lực và độ võng của dầm mà còn ở độ cứng, điểm chảy của dầm.

- Kết quả từ mô hình phân tích cao hơn trung bình 4% so với kết quả từ mô hình dẻo cứng vốn được xem là mô hình thiên về an toàn và được đùng trong các tiêu chuẩn thiết kế.

- Mô hình phân tích phát triển trong bài báo này áp dụng cho dầm đơn giản bốn điểm uốn, tuy nhiên trong các nghiên cứu sau có thể mở rộng ra cho các dạng dầm BTCT có các điều kiện biên khác nhau và chịu các dạng tải trọng khác nhau.

Tài liệu tham khảo

[1] Tuấn, P. M., Tâm, T. V. (2022). Nghiên cứu tính toán độ võng ngắn hạn dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh theo TCVN 5574:2018. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 16(3V):74–85.

[2] TCVN 5574:2018. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, tiêu chuẩn thiết kế*. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

[3] Tuấn, P. M. (2019). Khả năng chịu mô men uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và GFRP theo TCVN 5574:2018. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 13(4V):73–81.

[4] Hsu, T. T. C., Mo, Y. L. (2010). *Unified Theory of Concrete Structures*. Wiley.

[5] Al-Smadi, Y. M., Al-Huthaifi, N., Alkhawaldeh, A. A. (2022). The effect of longitudinal hole shape and size on the flexural behavior of RC beams. *Results in Engineering*, 16:100607.

[6] Liu, D., Qin, F., Di, J., Zhang, Z. (2023). Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and ECC. *Case Studies in Construction Materials*, 19: e02270.

[7] Gao, X.-L., Wu, K., Guo, Y.-Q., Zhao, Y.-C., Guo, J.-Y. (2023). Experimental and numerical study on flexural behaviors of damaged RC beams strengthened with UHPC layer using the bonding technology of post-installed reinforcing bar. *Construction and Building Materials*, 391:131835.

[8] Peng, G., Niu, D., Hu, X., Zhong, S., Huang, D. (2022). Experimental and theoretical study on the flexural behavior of RC beams strengthened with cementitious grout. *Engineering Structures*, 267:114713.

[9] Cheng, S., He, H., Cheng, Y., Sun, H. (2023). Flexural behavior of RC beams enhanced with carbon textile and fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 70:106454.

[10] Meda, A., Minelli, F., Plizzari, G. A. (2012). Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43(8):2930–2937.

[11] He, W., Wang, X., Wu, Z. (2020). Flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed and non-prestressed BFRP grids. *Composite Structures*, 246:112381.

[12] Lin, F., Zhong, Q., Zhang, Z. (2016). Flexural behaviour of RC beams reinforced with compressive steel bars and two-piece enclosed stirrups. *Construction and Building Materials*, 126:55–65.

[13] Qeshta, I. M. I., Shafigh, P., Jumaat, M. Z. (2015). Flexural behaviour of RC beams strengthened with wire mesh-epoxy composite. *Construction and Building Materials*, 79:104–114.

[14] Eurocode 2 (2004). *Design of concrete structures, Part 1*. British Standard.

[15] Nguyen, C.-L., Lee, C.-K. (2021). Flexural behaviours of Engineered Cementitious Composites – High strength steel composite beams. *Engineering Structures*, 249:113324.

[16] Shen, Q., Chen, W., Liu, C., Zou, W., Pan, L. (2019). The Tensile Strength and Damage Characteristic of Two Types of Concrete and Their Interface. *Materials*, 13(1):16.