NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CẤP CƯỜNG ĐỘ CHỊU NÉN CỦA BÊ TÔNG VÀ ĂN MÒN CỐT THÉP ĐẾN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP SỬ DỤNG PHẦN MỀM ABAQUS

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONCRETE GRADE AND REINFORCEMENT CORROSION ON THE FLEXURAL STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY USING ABAQUS SOFTWARE

Nguyễn Văn Chính[1]*, Bùi Quang Hiếu[1], Lê Xuân Dũng[1], Nguyễn Văn Vũ[2], Lý Văn Thịnh[3]

[1]Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng
[2]Công ty TNHH Structerre
[3]Công ty MEICO

*Tác giả liên hệ: nvchinh@dut.udn.vn

(Nhận bài: 13/10/2022; Chấp nhận đăng: 22/12/2022)

Tóm tắt - Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén của bê tông và cấp ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực uốn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) thông qua mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm Abaqus. Các dầm được khảo sát có kích thước150x200x2100 (mm) với các cấp cường độ bê tông là B20, B30 và B45 và các cấp ăn mòn cốt thép là 0%, 2%, 4%, 8%, 10% và 15%. Kết quả chỉ ra rằng, mô hình Abaqus được sử dụng có độ tin cậy cao khi sự chênh lệch giữa khả năng chịu lực của mô hình mô phỏng và thí nghiệm của dầm đối chứng và dầm ăn mòn lần lượt là 1,2% và 0,6%. Kết quả từ mô hình phân tích cũng cho thấy, cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm cả giới hạn chảy và khả năng chịu lực uốn của dầm BTCT. Cấp cường độ chịu nén của bê tông ảnh hưởng nhỏ đến khả năng chịu lực uốn trong khi sự ăn mòn cốt thép dọc ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu lực uốn của dầm BTCT.

Từ khóa - Dầm BTCT; Abaqus; cấp cường độ chịu nén; ăn mòn cốt thép; khả năng chịu lực uốn

Abstract - The paper investigates the effect of concrete grade and reinforcement corrosion on the flexural loading capacity of reinforced concrete (RC) beams by using the finite element method software Abaqus. The surveyed beams have dimensions of 150x200x2100 (mm), with the concrete grade of B20, B30, B45 and degree of reinforcement corrosion of 0%, 2%, 4%, 8%, 10% and 15%. The results show that, the current model is highly reliable as the differences of bearing capacity between the simulated model and experiment of control beam and corroded one is 1.2% and 0.6% respectively. The corrosion of reinforcing steel bars reduces both yield and ultimate strengths of RC beams. The compressive strength grade of concrete has a small effect while reinforcement corrosion shows the great influence on the flexural strength of RC beams.

Key words - Reinforced concrete beams; Abaqus; concrete grade; corrosion of reinforcement; loading capacity

1. Đặt vấn đề

Ăn mòn cốt thép trong bê tông là một trong những nguyên nhân chính gây hư hại kết cấu bê tông cốt thép. Cốt thép trong bê tông thông thường ở trạng thái thụ động không bị ăn mòn do tính kiềm cao của vữa xi măng bao quanh cốt thép, nhưng dưới tác động của hiện tượng cac-bo-nát hóa và xâm nhập ion clorua cốt thép bi ăn mòn, các sản phẩm ăn mòn có thể tích vài lần so với thể tích thép ban đầu dẫn đến sinh ra các nội ứng lực gây nên vết nứt và bong trát lớp bê tông bảo vệ [1-3]. Ăn mòn của cốt thép làm suy giảm cả diện tích tiết diện ngang và đặc tính cơ học của thanh thép [4]. Kết hợp chung của việc ảnh hưởng của ăn mòn là sự ảnh hưởng đến lực dính giữa bê tông và cốt thép, từ đó giảm khả năng chịu lực của cấu kiện bê tông cốt thép [4-6].

Có nhiều nghiên cứu về khả năng chịu lực của dầm BTCT bị ăn mòn, với phần lớn được thực hiện dựa trên mô hình thí nghiệm sử dụng biện pháp gia tốc ăn mòn cốt thép trong bê tông. McLeish đã khám phá ra rằng, có vài yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của kết cấu ví dụ như sự giảm diện tích tiết diện ngang và tính dẻo của cốt thép, sự suy giảm lớp bê tông bảo vệ ở vùng nén, sự bong tróc lớp bê tông bảo vệ ở vùng kéo, sự giảm lực dính giữa cốt thép và bê tông [7]. Trong khi đó Okada [8] thực hiện thí nghiệm trên dầm bê tông bị nứt do ăn mòn cốt thép. Nghiên cứu chỉ ra rằng, các vết nứt do moment uốn xuất hiện ở những vùng moment không đổi trên dầm và số lượng các vết nứt do uốn cắt ở vùng chịu lực cắt nhỏ hơn ở dầm không bị ăn mòn. Từ đó nghiên cứu đưa ra kết luận, sự hư hại của lực dính là do các vết nứt dọc theo thanh cốt thép. Do đó, làm suy giảm khả năng chịu lực của dầm khi bị ăn mòn cốt thép.

Khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép phụ thuộc vào nhiều yếu tố trong đó diện tích tiết diện ngang, cường độ của cốt thép và cường độ của bê tông đóng vai trò quan trọng. Việc nghiên cứu thực nghiệm cho tất cả các trường hợp suy giảm khả năng chịu lực do ăn mòn cốt thép ở các mức ăn mòn khác nhau đòi hỏi tốn nhiều thời gian và chi phí, do đó mô hình mô phỏng cần được nghiên cứu và ứng dụng.

Việc áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng cấu kiện BTCT dựa vào phần mềm Abaqus đã được thực hiện trước đó và đã cho thấy hiệu quả của phần mềm này trong việc mô hình cấu kiện BTCT. Phầm mềm này cho phép sử dụng các mô hình bê tông và cốt thép, cũng như liên kết giữa bê tông và cốt thép khác nhau [9, 10]. Bài báo này trình bày việc ứng dụng mô hình mô phỏng sử

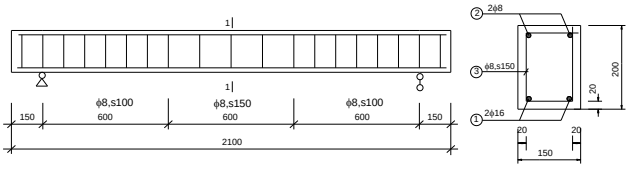
[1] The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Van Chinh, Bui Quang Hieu, Le Xuan Dung)
[2] Structerre Ltd. (Nguyen Van Vu)
[3] M.E.I Material, Equipment & Investment Construction Joint Stock Company (Ly Van Thinh)

dụng phần mềm Abaqus để mô phỏng khả năng chịu lực của dầm BTCT khi cốt thép không bị ăn mòn và bị ăn mòn. Bài báo cũng đánh giá ảnh hưởng của cấp cường độ của bê tông và các cấp ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực uốn của dầm bê tông cốt thép bằng phần mềm Abaqus.

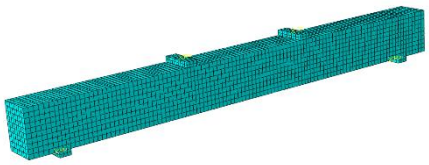
2. Chương trình mô phỏng

2.1. Mô phỏng dầm bê tông cốt thép trong Abaqus

Mô hình phần tử hữu hạn 3D sử dụng phần mềm Abaqus được ứng dụng để mô phỏng dầm bê tông cốt thép như Hình 1 và Hình 2. Phần tử C3D8R được sử dụng để mô hình bê tông sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo (CDPM), phần tử T3D2 được sử dụng để mô hình cốt thép. Cốt thép được liên kết với bê tông thông qua mô hình nhúng trong Abaqus [11]. Các gối tựa và gối gia lực được mô phỏng bằng phần tử khối cứng R3D4, và tương tác với dầm bê tông cốt thép thông qua mô hình tương tác ma sát trượt với hệ số ma sát là 0,1 [12]. Lưới chia của phần tử bê tông là 20mm, trong khi lưới chia cho cốt thép là 50mm. Mô hình này đã được sử dụng bởi nhiều nghiên cứu trước đó và cho kết quả có độ tin cậy cao [9, 10].



Hình 1. *Chi tiết dầm BTCT*



Hình 2. *Chi tiết mô hình dầm BTCT trong Abaqus*

2.2. Các thông số vật liệu

2.2.1. Bê tông

Bê tông được mô phỏng sử dụng mô hình CDPM. Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông chịu nén được mô hình sử dụng mô hình của Sargin [13] như được biểu diễn ở công thức (1) như sau:

$$\sigma_c = f_c'.\frac{\frac{E_o}{E_g}.\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{oc}}+(D-1)\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{oc}}\right)^2}{1+\left(\frac{E_o}{E_g}-2\right).\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{oc}}+D.\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{oc}}\right)^2} \quad (1)$$

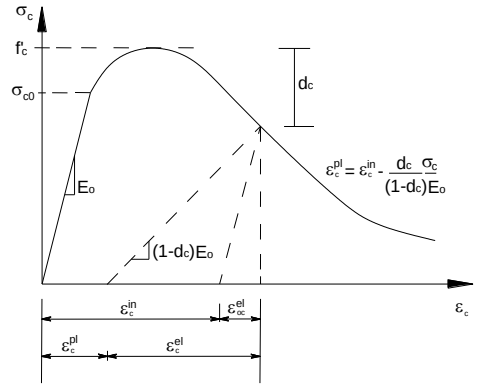
Trong đó, f_c' là cường độ chịu nén của bê tông, E_o là mô đun đàn hồi ban đầu của bê tông, ε_{oc} là biến dạng tương ứng tại cường độ chịu nén (ứng suất nén cực đại) của bê tông, E_g mô đun biến dạng của bê tông, D là hệ số điều chỉnh khả năng chống lại sự mềm hóa nén của bê tông (0<D<1).

Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của bê tông khi chịu kéo được mô phỏng sử dụng mô hình của Arab [14] được thể hiện ở công thức (2) và (3), trong đó f_t là cường độ chịu kéo của bê tông, ε_{ot} là biến dạng tương ứng tại cường độ chịu kéo (ứng suất kéo cực đại) của bê tông, β là hệ số điều chỉnh khả năng chống lại sự mềm hóa kéo của bê tông.

$$\sigma_t = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ot}} f_t \text{ khi } \varepsilon_t \le \varepsilon_{ot} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{\beta \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ot}} f_t}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ot}}\right)^{\beta}} \text{ khi } \varepsilon_t > \varepsilon_{ot} \quad (3)$$

Mô hình bê tông phá hoại dẻo khi nén và khi kéo được trình bày ở Hình 3 và 4.



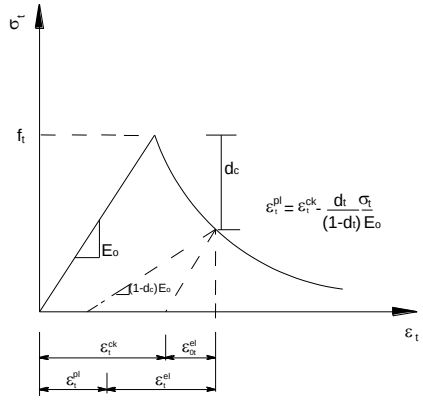
Hình 3. *Mô hình bê tông phá hoại dẻo khi nén [15]*

$$\sigma_{co} = 0{,}4f_c' \quad (4)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c).E_o(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (5)$$

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_o} \quad (7)$$



Hình 4. *Mô hình bê tông phá hoại dẻo khi kéo [15]*

$$\sigma_t = (1 - d_t).E_o(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_o} \quad (10)$$

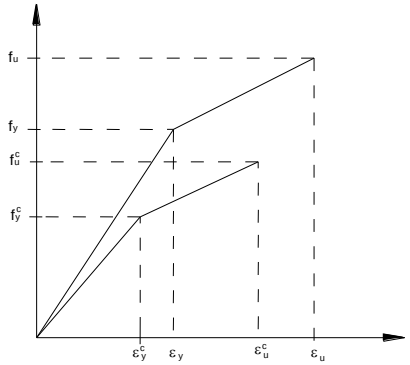
Các thông số phá hoại khi nén và khi kéo được xác định gần đúng theo các phương trình sau [15]:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_c'} \quad (11)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (12)$$

2.2.2. Cốt thép

Mối quan hê giữa ứng suất và biến dạng của cốt thép chịu kéo được mô hình theo quan hệ hai đoạn thẳng như Hình 5.



Hình 5. *Mô hình ứng suất biến dạng của cốt thép*

Khi cốt thép bị ăn mòn thì ngoài sự suy giảm đường kính thì còn kéo theo sự suy giảm khả năng chịu kéo. Diện tích tiết diện ngang của thanh cốt thép bị ăn mòn được xác định theo công thức sau:

$$A_s^c = \pi\frac{D_c^2}{4} = \pi\frac{(D-2\delta)^2}{4} = \pi\frac{D^2}{4}(1-L)^2\ A_s^c = A_s(1-L)^2 \quad (13)$$

Trong đó, L (%) là cấp ăn mòn được định nghĩa như sau:

$$L\% = \frac{200(m_1 - m_2)}{a.\gamma.D}(\%) \quad (14)$$

Trong đó: m_1, m_2 lần lượt là khối lượng thanh thép trước và sau khi ăn mòn; γ là khối lượng riêng của thép (7,86 g/cm^3); a là diện tích xung quanh của thanh thép trước khi ăn mòn (cm^2); D là đường kính của thanh thép trước khi bị ăn mòn (cm).

Giới hạn chảy và mô đun đàn hồi của cốt thép bị ăn mòn được xác định theo mô hình của Wang và Liu [16] như sau:

$$f_y^C = (1 - 0{,}00198L)f_y \quad (15)$$

$$E_s^C = (1 - 0{,}00113L)E_s \quad (16)$$

Trong đó, f_y, f_y^c lần lượt là giới hạn chảy của cốt thép trước và sau khi bị ăn mòn; E_s, E_s^C lần lượt là mô đun đàn hồi của cốt thép trước và sau khi bị ăn mòn.

Giới hạn bền và biến dạng tương ứng tại giới hạn bền của thanh thép bị ăn mòn được tính toán sử dụng mô hình của Wu và Yuan [17]:

$$f_u^C = (1 - 0{,}0019L)f_u \quad (17)$$

$$\varepsilon_u^C = (1 - 0{,}021L)\varepsilon_u \quad (18)$$

Trong đó, f_u, f_u^c lần lượt là giới hạn bền của thanh thép trước và sau khi bị ăn mòn; ε_u, ε_u^c lần lượt là biến dạng tương ứng tại giới hạn bền của thanh thép trước và sau khi bị ăn mòn.

2.3. Đánh giá độ tin cậy của mô hình

Mô hình mô phỏng được thực hiện và so sánh với kết quả thí nghiệm. Hai dầm BTCT có kích thước chi tiết như Hình 1 được chế tạo và dưỡng hộ tại phòng thí nghiệm. Dầm EXP_DC là dầm đối chứng khi cốt thép không bị ăn mòn trong khi đối với dầm EXP_AM, cốt thép được gia tốc ăn mòn đến cấp ăn mòn là 4,93 % theo sự mất mát đường kính. Chi tiết định nghĩa về cấp ăn mòn và phương pháp gia tốc ăn mòn có thể được tìm thấy trong tài liệu [18, 19]. Sau thời gian dưỡng hộ trong nước thì dầm BTCT được gia tốc ăn mòn sử dụng phương pháp dòng điện không đổi với mật độ cường độ dòng điện ăn mòn là 1mA/cm^2. Khi đạt được cấp ăn mòn cần thiết thì dầm được thí nghiệm uốn theo sơ đồ bốn điểm dưới tác dụng lực bằng kích thủy lực như Hình 6. Giá trị lực và chuyển vị giữa dầm được ghi lại thông qua hệ thống đầu đọc được kết nối với máy tính.

Hình 6. *Thí nghiệm uốn dầm BTCT theo sơ đồ 4 điểm*

Giá trị cường độ chịu nén của bê tông là fc'= 26,18MPa tương ứng với cấp cường độ chịu nén B45 theo TCVN 5574:2018 [20]. Giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép chịu kéo khi chưa bị ăn mòn lần lượt là 388,7MPa và 537MPa và biến dạng tương ứng tại giới hạn chảy và giới hạn bền lần lượt là 0,001851 và 0,18.

Hai dầm trên được tiến hành mô phỏng sử dụng mô hình được mô tả ở Mục 2.1 và 2.2. Các thông số của mô hình bê tông và cốt thép sử dụng cho các dầm mô phỏng ANA-DC (0%) và ANA-AM (4,93%) được lần lượt thể hiện ở Bảng 2 và Bảng 3.

2.4. Khảo sát ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén và ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu uốn của dầm

Bảng 1. *Chi tiết chương trình khảo sát ảnh hưởng của cường độ chịu nén, cấp ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực uốn của các dầm BTCT*

Nhóm	Tên dầm	Cấp cường độ chịu nén	Cốt thép chịu nén	Cốt thép chịu kéo	Cấp ăn mòn cốt thép (%)
1	20.0	B20	2ϕ8	2ϕ16	0
	20.2	B20	2ϕ8	2ϕ16	2
	20.4	B20	2ϕ8	2ϕ16	4
	20.8	B20	2ϕ8	2ϕ16	8
	20.10	B20	2ϕ8	2ϕ16	10
	20.15	B20	2ϕ8	2ϕ16	15
2	30.0	B30	2ϕ8	2ϕ16	0
	30.2	B30	2ϕ8	2ϕ16	2
	30.4	B30	2ϕ8	2ϕ16	4
	30.8	B30	2ϕ8	2ϕ16	8
	30.10	B30	2ϕ8	2ϕ16	10
	30.15	B30	2ϕ8	2ϕ16	15
3	45.0	B45	2ϕ8	2ϕ16	0
	45.2	B45	2ϕ8	2ϕ16	2
	45.4	B45	2ϕ8	2ϕ16	4
	45.8	B45	2ϕ8	2ϕ16	8
	45.10	B45	2ϕ8	2ϕ16	10
	45.15	B45	2ϕ8	2ϕ16	15

Mô hình Abaqus bên trên được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén và cấp ăn mòn đến khả năng chiu uốn của dầm. Chi tiết các mẫu khảo sát, cấp cường độ chịu nén của bê tông và cấp ăn mòn của cốt thép được trình bày ở Bảng 1. Số liệu Bảng 1 chỉ ra rằng, có 3 cấp cường độ chịu nén của bê tông được sử dụng trong

khảo sát là B20, B30, B45, trong đó các giá trị cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo tương ứng được tra bảng trong TCVN 5574:2018 [20]. Ở mỗi cấp cường độ chịu nén thì cốt thép được khảo sát ở các cấp ăn mòn là 0% (mẫu đối chứng), 2%, 4%, 8%, 10% và 15%. Các thông số của mô hình bê tông và cốt thép lần lượt được trình bày ở Bảng 2 và 3. Biểu đồ mối quan hệ giữa lực- chuyển vị của các dầm BTCT từ mô hình Abaqus được dùng để đánh giá ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén và cấp ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực uốn của dầm.

Bảng 2. *Các thông số của mô hình bê tông*

Cấp cường độ chịu nén	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E_0 (MPa)	$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	K	Góc lệch (°)
B20	11,5	0,9	27500	1,16	0,6667	35
B30	17	1,2	32500	1,16	0,6667	35
B45	25	1,45	37000	1,16	0,6667	35

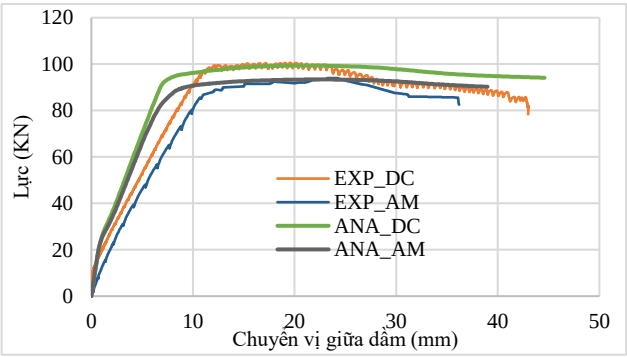
Bảng 3. *Các thông số của mô hình cốt thép*

Loại thép	Cấp ăn mòn (%)	E_s (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ε_y	ε_u
ϕ8	0	210000,0	205,40	383,50	0,000978	0,3043
ϕ16	0	210000,0	388,70	537,00	0,001851	0,1800
ϕ16	2	209525,4	387,16	534.96	0,001848	0,1724
ϕ16	4	209050,8	385,62	532,92	0,001845	0,1649
ϕ16	4,93	208830,1	384,91	531,97	0,001843	0,1614
ϕ16	8	208101,6	382,54	528,84	0,001838	0,1498
ϕ16	10	207627,0	381,00	526,80	0,001835	0,1422
ϕ16	15	206440,5	377,16	521.69	0,001827	0,1233

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Độ tin cậy của mô hình mô phỏng

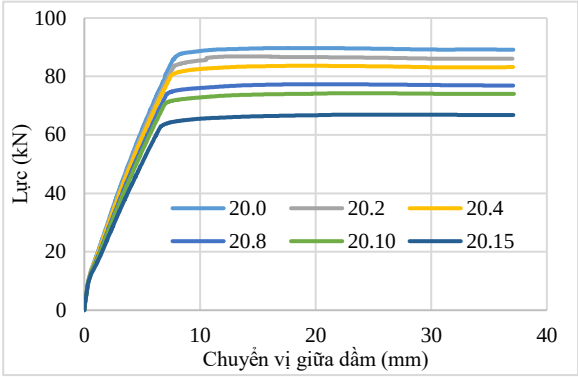
Kết quả giữa mô hình mô phỏng và thí nghiệm được thể hiện ở Hình 7. Hình 7 cho thấy, hình dạng biểu đồ lực chuyển vị của dầm đối chứng và dầm có ăn mòn cốt thép thực nghiệm (EXP_DC và EXP_AM) tương đồng so với kết quả mô phỏng (ANA_DC và ANA_AM). Giá trị lực phá hoại của dầm đối chứng từ kết quả thí nghiệm (EXP_DC) và theo mô hình mô phỏng Abaqus (ANA_DC) lần lượt là 100,58 kN và 99,33 kN thể hiện sự chênh lệch 1,2%. Giá trị lực phá hoại của dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn 4,93% từ kết quả thí nghiệm (EXP_AM) và theo mô hình mô phỏng Abaqus (ANA_AM) lần lượt là 93,98 kN và 93,38 kN thể hiện sự chênh lệch 0,6%. Từ đó có thể thấy kết quả mô phỏng có sự tương đồng với kết quả thí nghiệm khẳng định sự đúng đắn của mô hình và các thông số mô hình trong Abaqus.



Hình 7. *So sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm*

3.2. Ảnh hưởng của cấp ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực của dầm

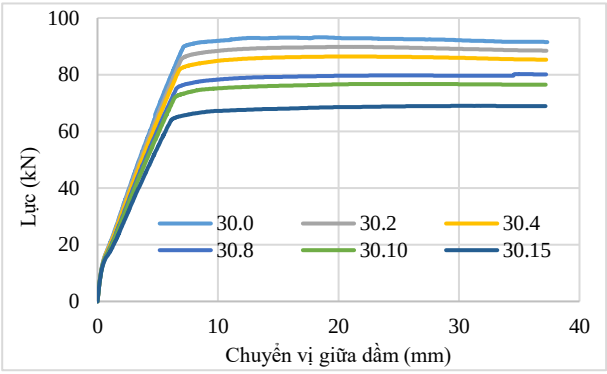
3.2.1. Nhóm 1 (B20)



Hình 8. *Quan hệ lực - chuyển vi của các dầm nhóm 1 (B20)*

Hình 8 thể hiện mối quan hệ giữa lực và chuyển vị giữa dầm bê tông cốt thép có cấp cường độ chịu nén của bê tông B20 khi cốt thép bị ăn mòn với các cấp độ ăn mòn khác nhau. Có thể nhận thấy, với mô hình đang sử dụng thì ăn mòn cốt thép dọc không ảnh hưởng nhiều đến hình dạng đường cong lực và chuyển vị giữa dầm. Điều này bởi vì sự ăn mòn cốt thép dọc không ảnh hưởng đến trạng thái phá hoại của dầm. Các dầm trong trường hợp này vẫn phá hoại theo cơ chế phá hoại cốt thép dọc chịu kéo trước khi phá hoại bê tông vùng nén. Hình 8 cũng cho thấy sự ăn mòn cốt thép nhóm 1 (B20) làm giảm cường độ giới hạn chảy và khả năng chịu lực của dầm BTCT. Khi cấp ăn mòn càng lớn thì khả năng chịu lực của dầm càng giảm. Giới hạn chảy của dầm đối chứng là 86,76 kN trong khi giới hạn chảy của dầm có cốt thép ăn mòn ở các cấp 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 83,73 kN, 81,53 kN, 74,47 kN, 71,3kN và 63,09 kN tương ứng với sự suy giảm giới hạn chảy lần lượt là 3,5%, 6,0%, 14,2%, 17,85 và 27,3%. Khả năng chịu lực của dầm đối chứng là 89,73kN trong khi khả năng chịu lực của dầm bị ăn mòn cốt thép dọc 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 86,83 kN, 83,66 kN, 77,32 kN, 74,23 kN, 66,93 kN tương ứng với sự suy giảm cường độ 3,2%, 6,8%, 13,8%, 17,3% và 25,4%. Nguyên nhân của sự suy giảm khả năng chịu lực trong trường hợp này là do sự suy giảm đường kính cốt thép và cường độ của cốt thép dọc chịu kéo [18, 19, 21, 22].

3.2.2. Nhóm 2 (B30)

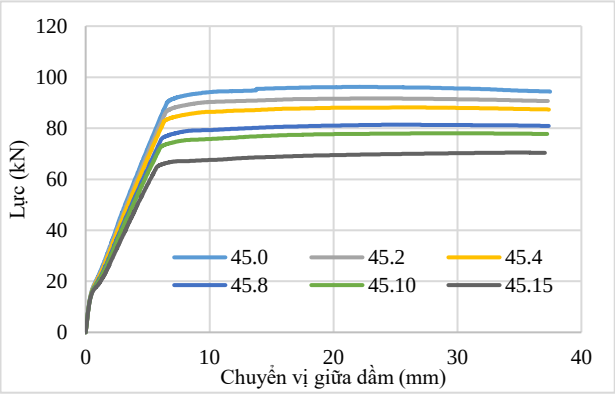


Hình 9. *Quan hệ lực chuyển vị của các dầm nhóm 2 (B30)*

Tương tự như nhóm 1 thì mối quan hệ lực chuyển vị của các dầm BTCT đối chứng và dầm ăn mòn nhóm 2

được thể hiện ở Hình 9. Có thể nhận thấy, với cấp độ cường độ chịu nén B30 thì sự ăn mòn cũng chỉ làm suy giảm khả năng chịu lực của dầm BTCT mà không thay đổi hình dạng biểu đồ quan hệ lực chuyển vị do trạng thái phá hoại của dầm không thay đổi, đó là sự phá hoại xảy ra do phá hoại cốt thép trước khi phá hoại bê tông vùng nén. Sự ăn mòn cốt thép dọc làm suy giảm giới hạn chảy và khả năng chịu lực của dầm BTCT. Khi cấp ăn mòn càng lớn thì khả năng chịu lực của dầm càng giảm. Giới hạn chảy của dầm đối chứng là 90,31 kN trong khi giới hạn chảy của các dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 86,13 kN, 82,19 kN, 76,07 kN, 72,55 kN và 64, 56 kN tương ứng với sự suy giảm giới hạn chảy là 4,6%, 9,0%, 15,8%, 19,7% và 28,5%. Khả năng chịu lực của dầm BTCT đối chứng là 93,19 kN trong khi khả năng chịu lực của dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn cấp 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 89,77 kN, 86, 39 kN, 80,17 kN, 76,74 kN và 68, 97 kN tương ứng với sự suy giảm khả năng chịu lực là 3,7%, 7,3%, 14%, 17,7% và 26,0%. Tương tự như nhóm 1 thì với mô hình xem lực dính là tuyệt đối và cốt thép bị ăn mòn đều thì sự suy giảm khả năng chịu lực của dầm có cốt thép bị ăn mòn là do sự suy giảm đường kính và cường độ của cốt thép dọc như được tính toán ở Mục 2.2.2 [18, 19, 21, 22].

3.2.3. Nhóm 3 (B45)



Hình 10. *Quan hệ lực chuyển vi của các dầm nhóm 3 (B45)*

Hình 10 thể hiện mối quan hệ giữa lực và chuyển vị của dầm BTCT đối chứng và các dầm BTCT bị ăn mòn khi cấp cường độ chịu nén của bê tông là B45. Tương tự như nhóm 1 và 2 thì kết quả Hình 10 cũng cho thấy, sự ăn mòn cốt thép không ảnh hưởng nhiều đến hình dạng đường cong quan hệ lực chuyển vị mà chỉ làm suy giảm giới hạn chảy và khả năng chịu lực của dầm BTCT nhóm 3 (B45). Khi cấp ăn mòn càng lớn thì khả năng chịu lực của dầm càng giảm. Điều này là do với cấp độ cường độ lớn thì cường độ chịu nén của bê tông vùng nén lớn nên sự phá hoại của tất cả các dầm nhóm 3 là sự phá hoại bắt đầu từ cốt thép chịu kéo trước khi sự phá hoại của bê tông vùng nén. Giới hạn chảy của dầm đối chứng là 91,61kN trong khi giới hạn chảy của các dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 86,78 kN, 83,77 kN, 77,4 kN, 73,66 kN và 65,33 kN tương ứng với sự suy giảm lần lượt là 5,3%, 8,6%, 15,5%, 19,6% và 28,7%. Khả năng chịu lực của dầm BTCT đối chứng là 96,23 kN trong khi khả năng chịu lực của dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn cấp 2%, 4%, 8%, 10% và 15% lần lượt là 91,66 kN, 88,14 kN, 81,37 kN, 78 kN và 70,44 kN tương ứng với sự suy giảm khả năng chịu lực là 4,7%, 8,4%, 15,4%, 18,9% và 26,8%. Tương tự như nhóm 1, 2 thì sự suy giảm khả năng chịu lực của dầm có cốt thép bị ăn mòn là do sự suy giảm đường kính và cường độ của cốt thép dọc như được tính toán ở mục 2.2.2 [18, 19, 21, 22].

3.3. Ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén đến khả năng chịu lực của dầm

Bảng 4 cho thấy, cấp cường độ chịu nén của bê tông ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng chịu lực của dầm BTCT ở các cấp ăn mòn khác nhau. Đối với các dầm đối chứng thì khả năng chịu lực của dầm tăng nhẹ khi cấp cường độ chịu nén của bê tông tăng từ B20 lên B45. Khả năng chịu lực của dầm đối chứng với B20 là 89,73 kN trong khi với dầm đối chứng B30 và B45 lần lượt là 93,19 kN và 96,23 kN, tăng tương ứng lần lượt 3,8% và 7,2%. Tương tự khả năng chịu lực của các dầm ăn mòn cốt thép dọc tăng khi cấp cường độ chịu nén của bê tông tăng. Ví dụ, với cấp ăn mòn cốt thép 2% thì khả năng chịu lực của dầm có B20 là 86,83 kN trong khi với dầm có B30 và B45 lần lượt là 89,77kN và 91,66kN, tăng tương ứng 3,4% và 5,6%. Với cấp ăn mòn cốt thép 15% thì khả năng chịu lực của dầm có B20 là 66,93 kN trong khi với dầm có B30 và B45 lần lượt là 68,97kN và 70,44kN, tăng tương ứng 3% và 5,2%. Điều này có thể được giải thích là do cấp cường độ chịu nén của bê tông tăng đồng nghĩa với việc tăng cường độ chịu nén của bê tông vùng nén và cường độ chịu kéo của bê tông vùng kéo cũng như lực dính giữa bê tông và cốt thép. Sự tăng cường độ bê tông vùng kéo làm tăng khả năng chịu kéo của vùng kéo, trong khi đó việc tăng cường độ chịu nén của bê tông vùng nén làm tăng khả năng chịu nén của vùng nén. Điều đó góp phần tăng khả năng chịu lực tổng thể của dầm BTCT [23, 24].

Bảng 4. *Tổng hợp khả năng chịu lực của các dầm BTCT*

Nhóm	Tên dầm	Cấp cường độ chịu nén	Cấp ăn mòn cốt thép (%)	Lực chảy dẻo (kN)	Lực phá hoại (kN)
1	20.1	B20	0	86,76	89,73
	20.2	B20	2	83,73	86,83
	20.3	B20	4	81,53	83,66
	20.4	B20	8	74,47	77,32
	20.5	B20	10	71,30	74,23
	20.6	B20	15	63,09	66,93
2	30.1	B30	0	90,31	93,19
	30.2	B30	2	86,13	89,77
	30.3	B30	4	82,19	86,39
	30.4	B30	8	76,07	80,17
	30.5	B30	10	72,55	76,74
	30.6	B30	15	64,56	68,97
3	45.1	B45	0	91,61	96,23
	45.2	B45	2	86,78	91,66
	45.3	B45	4	83,77	88,14
	45.4	B45	8	77,40	81,37
	45.5	B45	10	73,66	78,00
	45.6	B45	15	65,33	70,44

4. Kết luận

Từ các kết quả phân tích trên có thể đưa ra một số kết luận sau:

- Mô hình dầm BTCT khi cốt thép chưa và bị ăn mòn trong Abaqus có thể được sử dụng vì phản ánh tương đối chính xác sự làm việc thực tế của dầm BTCT.

- Mô hình phân tích cho thấy, việc cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm cả giới hạn chảy và khả năng chịu lực của dầm BTCT.

- Cấp cường độ chịu nén của bê tông ảnh hưởng nhỏ đến khả năng chịu lực của dầm BTCT trong khi sự ăn mòn cốt thép dọc ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu lực của dầm BTCT.

- Mô hình sử dụng lực dính giữa bê tông và cốt thép là tuyệt đối, tuy nhiên khi ăn mòn cốt thép xảy ra thì làm giảm lực dính của bê tông và cốt thép. Đây là hạn chế của mô hình hiện tại, do đó những nghiên cứu sâu hơn để tìm ra công cụ mô phỏng ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến lực dính giữa bê tông và cốt thép cần được tiến hành thực hiện.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2020-DN02-76.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lambert P, "*Reinforced concrete-history, properties and durability*", Technical note, Corrosion Prevention Association, 2022.

[2] Rodriguez J, Ortega LM, Casal J, "*Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforce concrete structures: corrosion and bond deterioration*". In: International conference on concrete across borders, Odense, Denmark, 1994, 315–326

[3] McLeish A, *Structural assessment, manual for life cycle aspects of concrete in buildings and structures*, Taywood Engineering Limited, UK, 1987, B4.1–B4.22.

[4] Ahmad S, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review", *Cement and Concrete Composite*, 25, 2003, 459–471.

[5] Mangat PS, Molloy BT, "Factors influencing chloride induced corrosion of reinforcement in concrete", *Materials and Structures 25*, 1992, 404–411.

[6] Al-Sulaimani GJ, Kaleemullah M, Basunbul IA (1990) "Influence of corrosion and cracking on the bond behaviour and strength of reinforced concrete members", *ACI Structure Journal* 87(2), 1990, 220–231.

[7] Rodriguez J, Ortega LM, Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 11(4), 1997, 239–248

[8] Okada K., Kobayashi K., and Miyagawa T, "Influence of Longitudinal Cracking Due to Reinforcement Corrosion on Characteristics of Reinforced Concrete Members", *ACI Structural Journal*, 1988, 134-140.

[9] Trần Văn Toản, "Phân tích mô hình số dầm bê tông cốt thép chịu uốn", *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy Lợi và Môi trường*, Số 57, 2017, 3-10.

[10] Zhao G, Xu J, Li Y, Zhang M, "Numerical analysis of the degradation characteristics of bearing capacity of a corroded reinforced concrete beam", *Advanced in Civil Engineering*, 2492350, 2018, 1-10.

[11] Dassault Systèmes. *Abaqus 6.14-Abaqus Analysis User's Guide*; Dassault Systèmes: Velizy-Villacoublay, France, 2014.

[12] Bui QH, Kabeyasawa T, Hosokawa Y. Static test on friction coefficient of concrete foundation. *Young*, 2013; 199(184.4).

[13] Sargin M, *Stress–strain relationship for concrete and the analysis of structural concrete section*, Solid Mechanics Division, University of Waterloo; 1971.

[14] Arab AA, *Finite element modelling of pretensioned concrete girder: A methodological approach with applications in large strands and end zone cracking*, Southern Illinois University, 2012.

[15] Huang T, Jianxin P, Linfa X, Xinhua L, "Numerical simulation of corroded reinforced concrete beam strengthened by a steel plate with different strengthening schemes", *Advanced in Civil Engineering*, 4236943, 2020, 19 pages

[16] Wang XH, Liu XL, "Modeling the flexural carrying capacity of corroded RC beam", *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 13(2), 2008, 129–135.

[17] Wu Q, Yuan YS, "Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars", *China Civil Engineering Journal*, 41(12), 2008, 42–47.

[18] O'Flaherty FJ, Mangat PS, Lambert P, Browne EH, "Effect of under reinforcement on the flexural strength of corroded beams". *Materials and Structures*, 41, 2008, 311–321.

[19] Nguyen CV, Lambert P, "Effect of current density on accelerated corrosion of reinforcing steel bars in concrete". *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(11), 2018, 1535-1546.

[20] TCVN 5574: 2018: "*Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*", 2018.

[21] Abdullah AA, "Effect of degree of corrosion in properties of reinforcing steel bars", *Construction and Building Materials*, 15, 2001, 361–368.

[22] Du YG, Clark LA, Chan AHC, "Residual capacity of corroded reinforcing bars", *Magazine of Concrete Research*, 57 (3), 2005, 135–147.

[23] Rajib KB, Mitsuyasu I, Nobuhiro C, Kunihiko U, "Effect of non-uniform rebar corrosion on structural performance of RC structures: A numerical and experimental investigation", *Construction and Building Materials*, 230 (116908), 2020.

[24] Zhu W, François R, "Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam". *Construction and Building Materials*, 51, 2014, 461–472.