



Nghiên cứu cơ chế hư hỏng và sự suy giảm sức chịu tải do ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông bằng thực nghiệm và mô phỏng  
Investigation of damage mechanism and resistance reduction due to rebar corrosion in concrete structures using experiment and simulation

Vũ Bá Thành\*

Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải

*Từ khóa:*

Mô hình trường pha  
Kết cấu bê tông cốt thép  
Bê tông vỏ ngao  
Ăn mòn  
Sức chịu tải  
Phá hủy

**TÓM TẮT**

Bài báo sử dụng phương pháp trường pha xét tới hư hỏng mặt phân giới và định luật ma sát để nghiên cứu sự phá hoại của dầm bê tông cốt thép (BTCT) bị ăn mòn. Bài báo có một số điểm mới sau: (i) Phương pháp trường pha phát triển trong bài toán ba chiều (3D); (ii) dầm BTCT chứa bê tông không vỏ ngao (CS0) hoặc 60% vỏ ngao thay cho cát (CS60) và cốt thép D10 hoặc D14; (iii) dầm BTCT được thí nghiệm ăn mòn trong 0, 10, 25 ngày; (iv) các dầm (iii) được uốn để xác định hư hỏng, sức chịu tải phụ thuộc và thời gian ngâm, đường kính cốt thép và tỷ lệ vỏ ngao; (v) phương pháp (i) sử dụng các tham số vật liệu và cường độ dính bám từ thực nghiệm để tiến hành mô phỏng. Sự so sánh giữa thực nghiệm (iv) và mô phỏng (v) đã chứng minh phương pháp mô phỏng có thể giải quyết tốt vấn đề đặt ra. Các kết quả chỉ ra rằng bê tông CS60 có thể đáp ứng cho việc chế tạo dầm BTCT trong điều kiện ăn mòn.

*Keywords:*

Phase-field modeling  
RC structures  
Clam-shell concrete  
Corrosion  
Resistance  
Fracture

**ABSTRACT**

This paper uses the phase-field method, taking into account the interfacial damage combined with the law of friction, to study the fracture of reinforced concrete (RC) beams subjected to corrosion. This paper contributes several new aspects as follows: (i) The phase-field method is developed for a three-dimensional (3D) problem; (ii) The RC beams contain either concrete without clam-shell (CS0) or 60% clam-shell replacing sand (CS60), and smooth rebars with diameters D10 or D14; (iii) These RC beams undergo accelerated corrosion testing for 0, 10, and 25 days; (iv) The beams (iii) are subjected to four-point bending tests to determine the damage, depending on the immersion time, the rebar diameter, and the replacement ratio of clam-shell; (v) The method (i) uses material parameters and the bond strength from the experiment to conduct the simulation. The comparison between experiment (iv) and simulation (v) has demonstrated the superiority of this proposed simulation method in addressing the presented problems. These results show that CS60 concrete can adapt well to the production of RC beams under corrosion conditions.

\* Vũ Bá Thành. Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải  
Email: [thanhvb@utc.edu.vn](mailto:thanhvb@utc.edu.vn)

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(1\).49-60](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(1).49-60)

Ngày nhận bài: 26/11/2024; Ngày nhận bài sửa: 10/01/2025; Ngày chấp nhận đăng: 14/01/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/01/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Giới thiệu

Những năm gần đây có nhiều nghiên cứu tìm nguồn vật liệu thay thế đá dăm hoặc cát tự nhiên trong sản xuất bê tông để giảm thiểu khai thác nguồn tài nguyên thiên nhiên giúp bảo vệ môi trường. Một nguồn nguyên liệu sẵn có và phổ biến ở Việt Nam có thể đáp ứng được nhu cầu này là các vỏ động vật nhuyễn thể như vỏ hào, ngao, ốc, sò điệp bởi hàm lượng canxi oxit (CaO) cao [1], [2]. Về ứng dụng vỏ nhuyễn thể, các nghiên cứu [1], [2], [3] và [4] đã chỉ ra khả năng thay thế cốt liệu truyền thống trong bê tông bằng các loại vỏ nhuyễn thể trên với những tỷ lệ thay thế khác nhau, có thể phù hợp cho một số kết cấu, đặc biệt trong ứng dụng cho mặt đường thấm nước. Nghiên cứu [3] đã chứng minh tính khả thi của việc sử dụng vỏ sò điệp nghiền, qua đó, nghiên cứu [4] cho thấy thay thế vỏ sò cho cát không làm thay đổi nhiều đặc tính bê tông khi ở một tỷ lệ phù hợp.

Việt Nam với đường bờ biển dài và nhiều hải đảo, do đó, các kết cấu BTCT ở những khu vực này thường dễ bị hư hỏng do điều kiện ăn mòn bởi sự xâm nhập của ion clorua hoặc hiện tượng carbonat hóa dẫn tới cốt thép dễ bị gỉ làm bong lớp bê tông bảo vệ và giảm sức chịu tải của kết cấu. Liên quan tới vấn đề ăn mòn đã có nhiều nghiên cứu từ thực nghiệm [5], [6], mô phỏng [7], phương pháp phần tử hữu hạn [8] để nghiên cứu cơ chế hư hỏng kết cấu bê tông do ăn mòn cốt thép. Gần đây, trong các nghiên cứu [1], [9] và [10] đã sử dụng thí nghiệm ăn mòn tăng tốc để tạo cơ chế ăn mòn đáp ứng tốt điều kiện ăn mòn thực tế dựa trên cơ chế điện hóa. Trong đó, nghiên cứu [9] đã tiến hành thí nghiệm ăn mòn đầm chịu tải trước để xác định tốc độ ăn mòn phụ thuộc vào mức độ gia tải. Nghiên cứu [1] đã thí nghiệm ăn mòn các kết cấu BTCT chứa bê tông vỏ ngao và xác định sự lan truyền vết nứt do ăn mòn

cốt thép trên mặt cắt ngang của các kết cấu này. Nghiên cứu [10] đã chế tạo các mẫu thí nghiệm kéo tuột chứa bê tông vỏ ngao với những đường kính cốt thép khác nhau, sau đó, thí nghiệm ăn mòn các mẫu và xác định ứng xử cường độ dính bám - độ trượt của các mẫu phụ thuộc đường kính cốt thép, loại bê tông và thời gian ngâm mẫu. So với các phương pháp mô phỏng theo phần tử hữu hạn (FEM, XFEM) [11], [12], mô hình vùng dính kết (CZM) [13] để dự đoán hư hỏng kết cấu, thì phương pháp trường pha chứng tỏ là một phương pháp mô phỏng mạnh được sử dụng rộng rãi trong thập kỷ qua. Phương pháp trường pha có thể mô phỏng hư hỏng rất chính xác cho các loại vật liệu đồng nhất, dị hướng, đa pha vật liệu, bê tông rỗng [14], [15], [16]. Trong thời gian vừa qua, phương pháp trường pha có xét tới ảnh hưởng mặt phân giới kết hợp định luật ma sát để mô phỏng cơ chế dính bám trong thí nghiệm kéo tuột được ứng dụng và cho kết quả rất tốt khi so sánh với thực nghiệm [17]. Kế thừa các nghiên cứu trước đây về phương pháp thí nghiệm ăn mòn tăng tốc và phương pháp trường pha [1], [9], [10], nghiên cứu này mở rộng phương pháp trường pha có xét tới hư hỏng mặt phân giới và định luật ma sát [17] trong bài toán không gian ba chiều (3D) [18] để nghiên cứu cơ chế hư hỏng và sự suy giảm sức chịu tải do ăn mòn cốt thép trong đầm bê tông vỏ ngao. Bài báo trình bày các bước thực hiện sau:

(i) Chế tạo các đầm BTCT chứa bê tông thông thường không có vỏ ngao (CS0) và bê tông chứa 60% vỏ ngao (nghiền cỡ hạt từ 1 mm đến 4.75 mm) thay thế cát (CS60) với hai loại thép tròn trơn đường kính 10 mm (D10) và 14 mm (D14), cấp phối hai loại bê tông này được sử dụng trong [1];

(ii) Tiến hành thí nghiệm ăn mòn tăng tốc các mẫu đầm này bằng việc ngâm trong dung dịch NaCl 3% với dòng điện 300

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$  trong thời gian 0, 10 và 25 ngày (quy trình thí nghiệm xem trong [1], [9]);

(iii) Thực nghiệm uốn dầm bốn điểm để xác định hư hỏng và sức chịu tải các dầm BTCT theo thời gian ngâm mẫu trong (ii);

(iv) Dùng phương pháp trường pha [17] được phát triển trong bài toán 3D [18] với các tham số vật liệu được lấy từ thí nghiệm trong [1] và tham số cường độ dính bám - độ trượt từ thí nghiệm kéo tuột [10] để xác định sức chịu tải và hư hỏng của dầm BTCT vỏ ngao bị ăn mòn;

(v) Các kết quả đạt được từ mô phỏng trường pha tại bước (iv) được so sánh với

$$\Pi(\varepsilon, p) = \int_{V_{bt}} g(p)\Psi_{bt}dV_{bt} + \int_{V_{ct}} \Psi_{ct}dV_{ct} + G_c^{bt} \int_{\Omega_{bt}} \gamma(p, \nabla p)dV_{bt} + G_c^{ct} \int_{V_{ct}} \gamma(p, \nabla p)dV_{ct} + G_c^l \int_{V_l} \gamma(p, \nabla p)dV_l \quad (1)$$

Trong đó:

Tổng thể tích kết cấu BTCT bao gồm  $V = V_{ct} + V_{bt} + V_l$ , với  $V_{ct}, V_{bt}, V_l$  là thể tích của phần cốt thép, bê tông và mặt phân giới, tương ứng (xem tại [17]);

$g(p)$  là hàm suy biến bậc hai khả vi của biến trường pha  $p$  [15], [16];

$\varepsilon$  là tensor biến dạng;  $\Psi_{bt}$  và  $\Psi_{ct}$  là hai hàm năng lượng biến dạng trong khu vực bê tông và cốt thép;

$\gamma(p, \nabla p) = \frac{p^2}{2l} + \frac{l}{2}(\nabla p \times \nabla p)$  là hàm mật độ năng lượng biến dạng;

$l$  là tham số chiều dài;

$G_c^{bt}, G_c^{ct}$  và  $G_c^l$  là năng lượng kháng nứt của bê tông, cốt thép và mặt phân giới, tương ứng.

Trong nghiên cứu hiện tại, phương pháp trường pha được phát triển trong bài toán ba chiều (3D) như [18]. Trong khung FEM của bài toán 3D với phần tử lập phương tám nút, biến trường pha:

thực nghiệm ở bước (iii) để chứng minh tính hữu dụng của phương pháp mô phỏng đề xuất trong việc xác định hư hỏng và sức chịu tải của dầm BTCT bị ăn mòn.

## 2. Phương pháp trường pha cho hư hỏng kết cấu bê tông cốt thép bị ăn mòn cốt thép

Trong nghiên cứu [17], đã sử dụng phương pháp trường pha để mô phỏng hư hỏng cho kết cấu BTCT trong thí nghiệm kéo tuột. Khi đó, tổng năng lượng tồn tại trong kết cấu được biểu thị bởi các thành phần như sau:

$$p(\mathbf{x}) = [\mathbf{N}_p] \{\mathbf{p}_i\} = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6 \ N_7 \ N_8] \{p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8\}^{-1}$$

Gradient của biến  $p(\mathbf{x})$ :

$$\nabla p(\mathbf{x}) = [\mathbf{B}_p] \{\mathbf{p}_i\} = \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x}; \frac{\partial N_i}{\partial y}; \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \{p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8\}^{-1}$$

Với  $[\mathbf{N}_p]$  và  $[\mathbf{B}_p]$  là ma trận hàm dạng và ma trận vi phân hàm dạng của  $p(\mathbf{x})$ ;  $b_1 \dots b_8$  là giá trị biến trường pha tại tám nút phần tử. Tương tự, vector chuyển vị  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  được xác định:

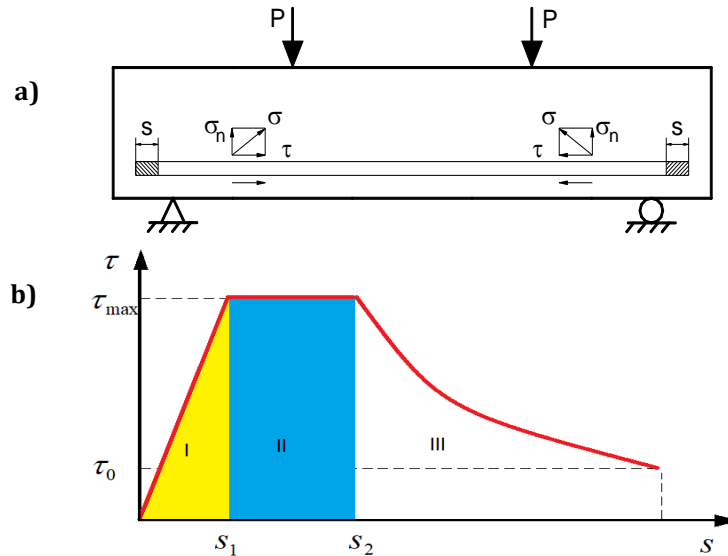
$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\mathbf{N}] \{\mathbf{u}_i\} = [N_1 \ 0 \ 0 \ N_2 \ 0 \ 0 \ \dots \ N_8 \ 0 \ 0] \{u_1^x \ u_1^y \ u_1^z \ \dots \ u_8^x \ u_8^y \ u_8^z\}^{-1}$$

Với  $[\mathbf{N}]$  là ma trận hàm dạng của vector  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  và  $u_i^x \ u_i^y \ u_i^z$  là giá trị vector chuyển vị tại nút thứ  $i$  theo các phương  $x, y, z$  của phần tử [18]. Hình 1a [17] mô tả dầm BTCT ăn mòn chịu uốn. Khi đó, cường độ dính bám  $\tau$  giữa bê tông và cốt thép ảnh hưởng nhiều đến sức chịu tải của dầm. Theo [17] và [19], các giai đoạn của ứng xử dính bám giữa bê tông và cốt

thép được mô tả như Hình 1b và hệ phương trình (2):

$$\tau = \begin{cases} \tau_{max} \left( \frac{s}{s_1} \right) & \text{khi } s \leq s_1 \\ \tau_{max} & \text{khi } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_0 + (\tau_{max} - \tau_0) \left( \frac{s_2}{s} \right) & \text{khi } s \geq s_2 \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó,  $\tau = \sigma \cdot P_t$  là cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép, với  $P_t = \mathbf{n} \otimes \mathbf{m}$ ;  $\mathbf{n}$  và  $\mathbf{m}$  là vector pháp tuyến và vector tiếp tuyến tại mặt phân giới  $\Gamma^I$ ; ứng suất trong kết cấu  $\sigma = \mathbb{C} : \epsilon$  với  $\mathbb{C}$  là tensor độ cứng đàn hồi;  $\tau_{max}$  là cường độ dính bám lớn nhất;  $\tau_0$  là ma sát dư [17], [19].

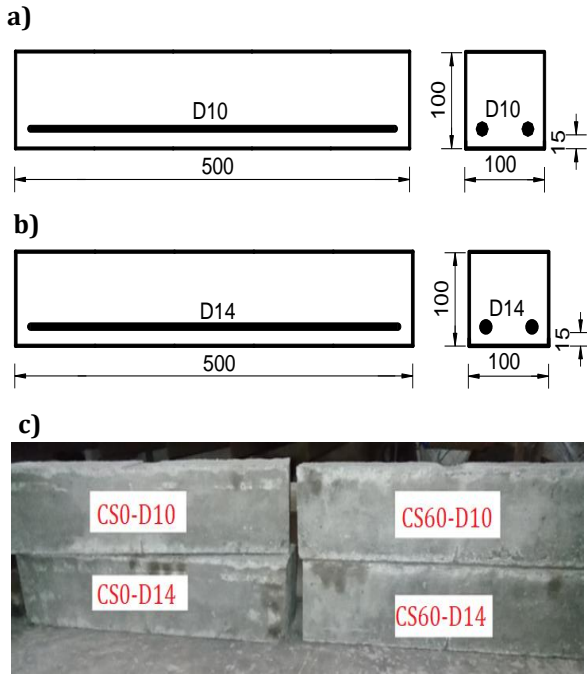


Hình 1. (a) Lực dính bám trong dầm bê tông cốt thép ăn mòn chịu uốn; (b) Các giai đoạn của ứng xử dính bám giữa bê tông và cốt thép].

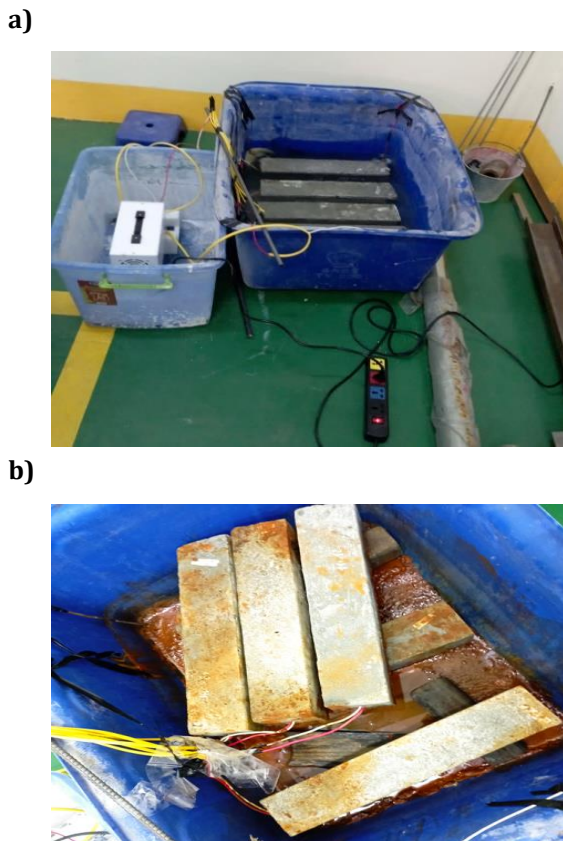
### 3. Thực nghiệm và phân tích kết quả thực nghiệm

Mục đích của bài báo này là phân tích và so sánh kết quả thực nghiệm, mô phỏng bằng phương pháp trường pha (Phần 2) cho hư hỏng và sức chịu tải của dầm BTCT bị ăn mòn. Dầm BTCT chế tạo với kích thước như Hình 2 với (i) sử dụng hai loại cấp phối bê tông với bê tông không có vỏ ngao (CS0) và loại bê tông có tỷ lệ vỏ ngao nghiền từ cỡ hạt 1 mm đến 4.75 mm thay cho cát tự nhiên 60% (CS60); (ii) dầm BTCT được chế tạo từ CS0 hoặc CS60 và chứa hai thanh cốt thép D10 hoặc D14. Cấp phối và đặc trưng vật liệu bê tông CS0 và CS60 được mô tả chi tiết trong nghiên cứu [1]. Để xác định ảnh hưởng của mức ăn mòn cốt thép, đường kính cốt thép và tỷ lệ vỏ ngao thay thế tới ứng xử cường độ dính bám - độ trượt,

nghiên cứu [10] đã tiến hành thí nghiệm ăn mòn tăng tốc bằng việc ngâm các mẫu BTCT kéo tuột chứa cốt thép D10, D14 và bê tông CS0, CS60. Các mẫu BTCT này có kích thước 150 x 150 x 150 mm được ngâm vào dung dịch NaCl 3% với mật độ dòng điện là 300  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  trong thời gian 0, 10 và 25 ngày. Kết quả thực nghiệm của đường cong cường độ dính bám - độ trượt trên có thể thiết lập các giai đoạn của ứng xử dính bám giữa bê tông và cốt thép như Hình 1b. Tác giả tiến hành thí nghiệm ăn mòn tăng tốc các mẫu dầm như Hình 2 trong thời gian 0, 10 và 25 ngày để đạt được mức độ ăn mòn tương tự như mẫu kéo tuột của [10] (Hình 3). Từ đó, sử dụng tham số vật liệu trong [1] và các đường cong ứng xử cường độ dính bám - độ trượt tương ứng của [10] để làm tham số đầu vào cho phương pháp mô phỏng trong Phần 2.



**Hình 2.** Dầm bê tông cốt thép CS0 và CS60 chứa  
(a) Hai thanh D10; (b) Hai thanh D14;  
(c) Hình ảnh các mẫu dầm.



**Hình 3.** Thí nghiệm ăn mòn tăng tốc các mẫu dầm:  
(a) Thiết lập thí nghiệm; (b) Các dầm bê tông  
cốt thép sau ăn mòn.

Các mẫu dầm BTCT được thí nghiệm uốn bốn điểm ở ba trạng thái chưa bị ăn mòn và

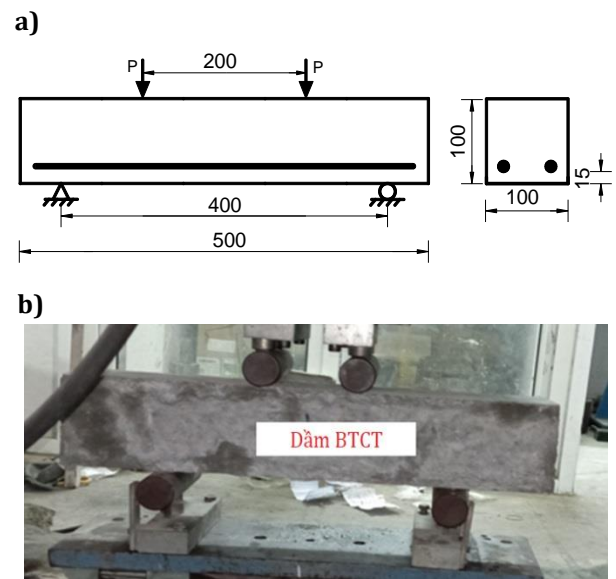
ăn mòn ở ngày thứ 10 và ngày thứ 25 (xem **Hình 4**). Kết quả thí nghiệm xác định ảnh hưởng của sức chịu tải dầm BTCT theo tỷ lệ vữa ngao thay thế và tỷ lệ ăn mòn cốt thép. Các dầm được đánh số hiệu theo loại bê tông, đường kính cốt thép, và số ngày ngâm như sau:

(i) Loại dầm với bê tông CS0, cốt thép D10, ngâm 0, 10, 25 ngày, ký hiệu CS0-D10-0N, CS0-D10-10N, CS0-D10-25N;

(ii) Loại dầm với bê tông CS0, cốt thép D14, ngâm 0, 10, 25 ngày, ký hiệu CS0-D14-0N, CS0-D14-10N, CS0-D14-25N;

(iii) Loại dầm với bê tông CS60, cốt thép D10, ngâm 0, 10, 25 ngày, ký hiệu CS60-D10-0N, CS60-D10-10N, CS60-D10-25N;

(iv) Loại dầm với bê tông CS60, cốt thép D14, ngâm 0, 10, 25 ngày, ký hiệu CS60-D14-0N, CS60-D14-10N, CS60-D14-25N.



**Hình 4.** Thí nghiệm uốn bốn điểm các dầm bê tông cốt thép: (a) Thiết lập thí nghiệm;  
(b) Tiến hành thí nghiệm.

#### 4. Ví dụ mô phỏng

Các ví dụ mô phỏng nhằm thực hiện việc so sánh kết quả giữa thực nghiệm và mô phỏng trường pha cho dầm BTCT được chế tạo từ bê tông vữa ngao, đường kính cốt thép và tỷ lệ ăn mòn khác nhau. Các tham số vật

liệu phục vụ mô phỏng bao gồm module đàn hồi của thép và bê tông,  $E_{ct}, E_{bt}$ ; hệ số Poisson của thép và bê tông,  $\nu_{ct}, \nu_{bt}$ ; cường độ chịu kéo của thép và bê tông,  $f_{yt}, f_{bt}^t$ ; cường độ chịu nén của bê tông,  $f_c'$ ; năng

lượng kháng của thép, bê tông và mặt phân giới,  $G_c^{ct}, G_c^{bt}, G_l$ . Trong mô phỏng đặt  $G_c^l = 0.5 \times G_c^{bt}$  và  $G_c^{ct} = 5 \times G_c^{ct}$  [17], các tham số vật liệu thể hiện trong **Bảng 1** và **Bảng 2**. Các tham số này được sử dụng từ các kết quả trong các nghiên cứu [1] và [10].

**Bảng 1.** Các tham số vật liệu đầu vào của bê tông, cốt thép và mặt phân giới của bê tông CS0.

Ký hiệu	Bê tông CS0	CS0-D10			CS0-D14			Mặt phân giới
		0N	10N	25N	0N	10N	25N	
		0%	6.85%	18.91%	0%	7.08%	22.87%	
$E$ (MPa)	31625.83	210000	210000	210000	210000	210000	210000	31625.83
$\nu$	0.192	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.192
$G_c$ (N/mm)	0.052	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.026
$f_t$ (MPa)	6.744	240	240	240	240	240	240	6.744
Độ trượt $s_1 = s_2$ (mm)	—	0.0313	0.0189	0.02	0.027	0.046	0.041	—
$\tau_{max}$ (MPa)	—	3.57	2.24	1.14	3.97	2.38	1.31	—
$\tau_0$ (MPa)	—	3.00	1.099	0.804	2.979	1.413	0.646	—
$l$ (mm)	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82	3.82

**Bảng 2.** Các tham số vật liệu đầu vào của bê tông, cốt thép và mặt phân giới của bê tông CS60.

Ký hiệu	Bê tông CS60	CS60-D10			CS60-D14			Mặt phân giới
		0N	10N	25N	0N	10N	25N	
		0%	6.85%	18.91%	0%	7.08%	22.87%	
$E$ (MPa)	27784.12	210000	210000	210000	210000	210000	210000	27784.12
$\nu$	0.201	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.201
$G_c$ (N/mm)	0.042	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.021
$f_t$ (MPa)	5.877	240	240	240	240	240	240	5.877
Độ trượt $s_1 = s_2$ (mm)	—	0.059	0.0147	0.011	0.028	0.057	0.042	—
$\tau_{max}$ (MPa)	—	3.49	2.08	1.05	3.73	2.18	1.28	—
$\tau_0$ (MPa)	—	2.849	1.215	0.642	2.988	1.256	0.782	—
$l$ (mm)	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55

Trong phương pháp trường pha, dầm BTCT có kích thước 500 x 100 x 100 mm được chia thành 300 x 60 x 60 phần tử lập phương đều như Hình 5. Trong đó, màu xanh lá và màu đỏ biểu thị phần bê tông và cốt thép tương ứng.

Kích thước lưới phần tử  $h = 1.67$  mm để đảm bảo  $l \geq 2h$  [20]. Điều kiện biên của phương pháp mô phỏng được quy định để mô phỏng dầm chịu uốn được mô tả trong Hình 4a:

(i) Các nút mặt đáy dầm cách đầu dầm bên trái 50 mm có phương x và phương z cố định, phương y chuyển dịch tự do;

(ii) Các nút mặt đáy dầm cách đầu dầm bên phải 50 mm có phương z cố định, phương x và phương y chuyển dịch tự do;

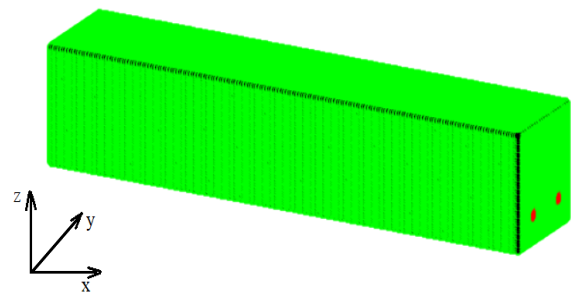
(iii) Các nút mặt trên dầm cách hai đầu dầm 150 mm được áp chuyển vị không đổi  $\Delta u = -0.005$  mm.

Các tham số mô phỏng tương ứng được lấy từ Bảng 1 và Bảng 2 cho bê tông đối chứng CS0 và bê tông vỏ ngao CS60. Trong phương pháp thực nghiệm để uốn dầm bốn điểm như mô tả trong Hình 4a, áp chuyển vị tải điểm đặt lực với tốc độ gia tải  $0.04 \mu\text{m/s}$  tới khi kết cấu dầm bị hư hỏng hoàn toàn.

Hình 6 so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng về đường nứt đối với dầm chưa ăn mòn tương ứng với mẫu dầm CS0-D10-0N và CS0-D14-0N. Có thể nhận thấy rằng, hai phương pháp vết nứt đều phát triển thẳng đứng ở vị trí giữa dầm, từ đáy dầm lên mặt trên dầm. Hình 7 so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng về đường nứt đối với dầm bị ăn mòn ngâm trong 10 ngày và 25 ngày, tương ứng với mẫu dầm CS0-D10-10N, CS0-D10-25N, và CS0-D14-10N, CS0-D14-25N. Hai phương pháp vết nứt cũng phát triển chéo xuất phát từ gối cầu tới điểm đặt lực cho hai loại dầm đã bị ăn mòn, mặc dù, thời

gian ngâm và mức độ ăn mòn khác nhau. Từ Hình 6 và Hình 7, hình thái vết nứt khác nhau rõ rệt cho thấy ảnh hưởng rất lớn từ ứng xử dính bám của cốt thép và bê tông trong dầm bị ăn mòn cốt thép và chưa bị ăn mòn. Sự khác nhau của đường nứt này sẽ gây ảnh hưởng lớn tới sức chịu tải của dầm bê tông cốt thép.

Hình 8a và Hình 8b so sánh đường cong ứng xử tải trọng - chuyển vị giữa hai phương pháp thực nghiệm và mô phỏng theo mức độ ăn mòn của các loại dầm CS0-D10 và CS0-D14 tương ứng. Các đường cong ứng xử giữa hai phương pháp tương tự nhau. Đối với hai loại dầm chứa cốt thép D10 và D14, sức chịu tải giảm dần theo mức độ ăn mòn hay thời gian ngâm mẫu như Bảng 3, qua đó, đối với bê tông CS0, mức độ suy giảm sức chịu tải  $P_{\text{max}}$  của dầm chứa cốt thép D14 nhanh hơn so với dầm chứa cốt thép D10 trong cùng thời gian ngâm. Điều này xảy ra có thể do mức độ ăn mòn cốt thép của loại D14 nhanh hơn D10, bởi diện tích tiếp xúc của D14 với môi trường ăn mòn lớn hơn so với D10 [10]. Hình 9a và Hình 9b so sánh ứng xử tải trọng - chuyển vị giữa hai phương pháp theo thời gian ngâm mẫu của các dầm CS60-D10 và CS60-D14 tương ứng. Đối với các dầm BTCT loại này, đường cong ứng xử giữa hai phương pháp là tương tự. Hai dầm chứa cốt thép D10 và D14, sức chịu tải giảm dần theo thời gian ngâm mẫu như Bảng 4.

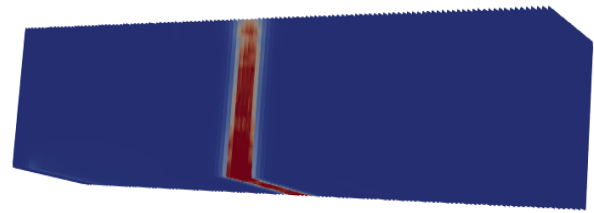


Hình 5. Phân chia lưới dầm bê tông cốt thép với màu xanh và màu đỏ biểu thị cho bê tông và cốt thép.

a)



b)

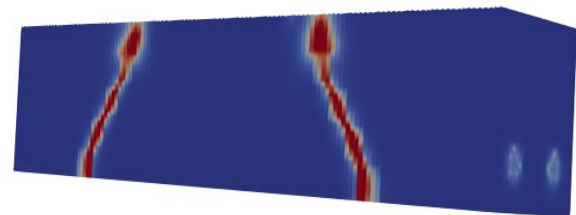


Hình 6. Hướng phát triển vết nứt của dầm chịu uốn chưa ăn mòn: (a) Thực nghiệm; (b) Mô phỏng.

a)

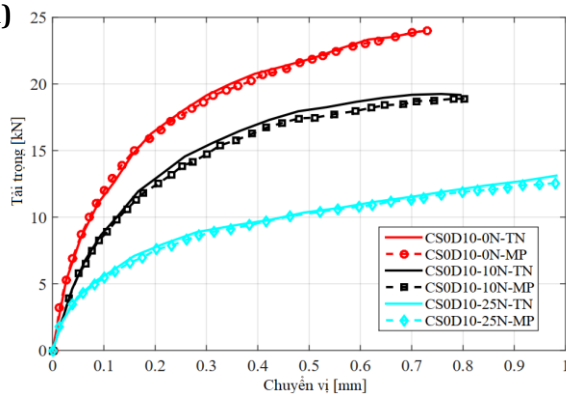


b)

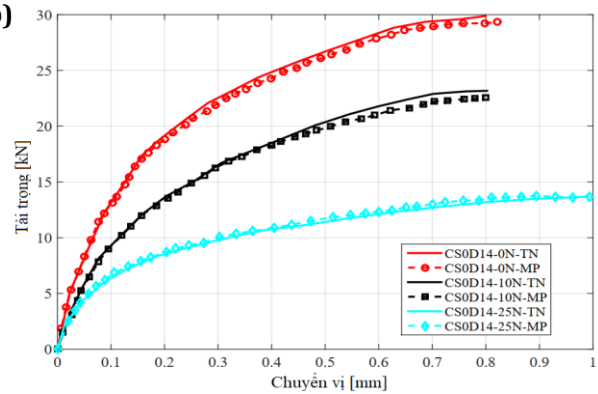


Hình 7. Hướng phát triển vết nứt của dầm chịu uốn bị ăn mòn: (a) Thực nghiệm; (b) Mô phỏng.

a)

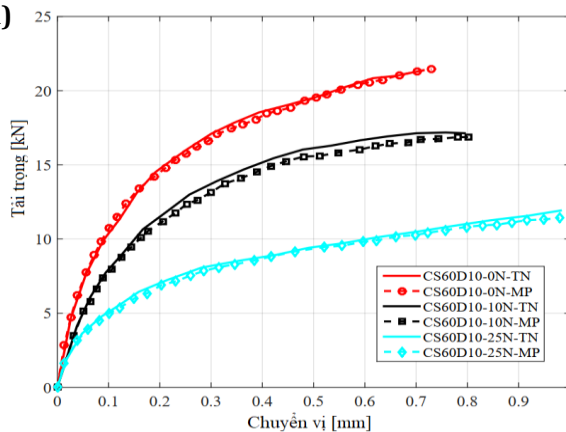


b)

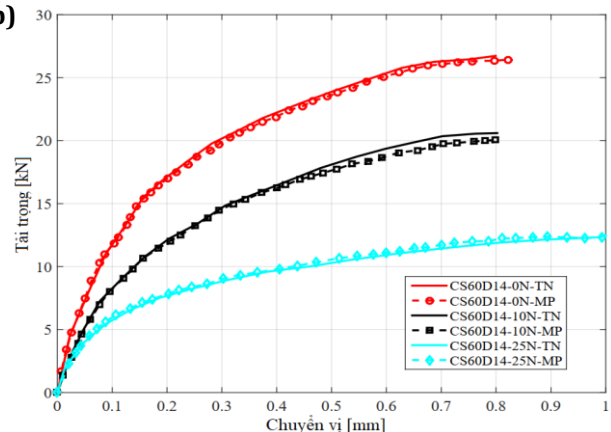


Hình 8. So sánh đường cong ứng xử tải trọng - chuyển vị giữa thực nghiệm và mô phỏng theo mức độ ăn mòn: (a) Dầm CS0-D10; (b) Dầm CS0-D14.

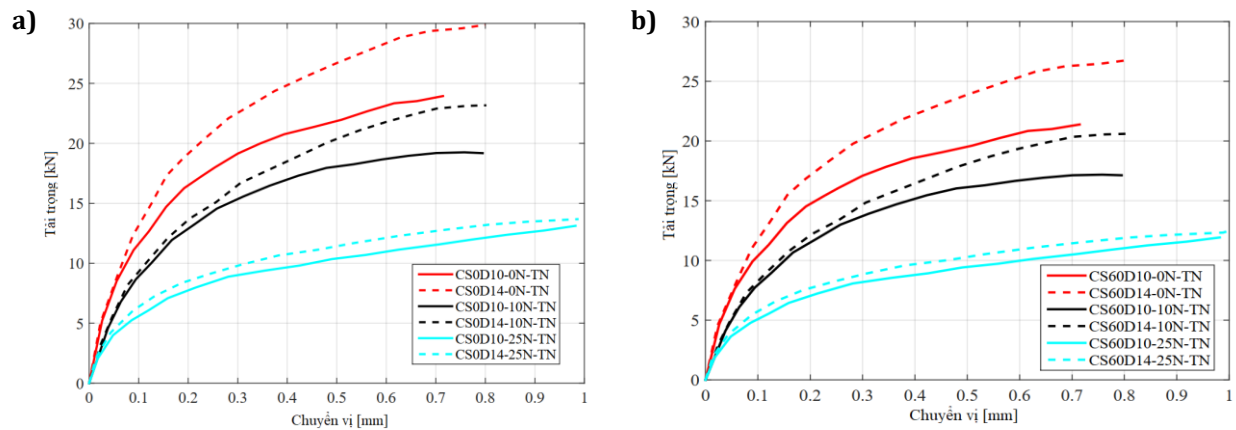
a)



b)



Hình 9. So sánh đường cong ứng xử tải trọng - chuyển vị giữa thực nghiệm và mô phỏng theo mức độ ăn mòn: (a) Dầm CS60-D10; (b) Dầm CS60-D14.



**Hình 10.** So sánh đường cong tải trọng - chuyển vị theo mức độ ăn mòn giữa dầm chứa cốt thép D10 và D14 theo thực nghiệm: (a) Bê tông CS0; (b) Bê tông CS60.

**Bảng 3.** Sự suy giảm sức chịu tải  $P_{max}$  theo thời gian ngâm của mẫu CS0-D10 và CS0-D14.

Mẫu	CS0-D10			CS0-D14		
Thời gian ngâm (ngày)	0	10	25	0	10	25
Tải trọng $P_{max}$ (kN)	23.94	19.19	13.12	29.88	23.17	13.68
Giảm $P_{max}$ (%)		19.84	45.19		22.45	54.21

**Bảng 4.** Sự suy giảm sức chịu tải  $P_{max}$  theo thời gian ngâm của mẫu CS60-D10 và CS60-D14.

Mẫu	CS60-D10			CS60-D14		
Thời gian ngâm (ngày)	0	10	25	0	10	25
Tải trọng $P_{max}$ (kN)	21.38	17.18	11.92	26.73	20.60	12.48
Giảm $P_{max}$ (%)		19.64	44.25		22.93	53.31

**Bảng 5.** Sự suy giảm sức chịu tải  $P_{max}$  theo thời gian ngâm của mẫu dầm bê tông CS0, CS60 chứa cốt thép D10, D14.

Mẫu	CS60			CS0		
Thời gian ngâm (ngày)	0	10	25	0	10	25
$P_{max}$ (D14)	26.73	20.60	12.48	29.88	23.17	13.68
$P_{max}$ (D10)	21.38	17.18	11.92	23.94	19.19	13.12
Giảm $P_{max}$ (%)	20.01	16.60	4.49	19.88	17.17	4.09

Đối với bê tông CS60, mức độ suy giảm tải trọng  $P_{max}$  của dầm chứa D14 nhanh hơn với dầm chứa D10, như nhận xét của bê tông CS0 (Bảng 3 và Bảng 4). Mức độ suy giảm tương ứng  $P_{max}$  với bê tông CS60 gần giống với bê tông CS0 tương ứng với số ngày ngâm như nhau. Điều này cho thấy, bê tông CS60 đáp ứng cho kết cấu BTCT được sử dụng trong môi trường ăn mòn với thời gian ngâm mẫu trong phòng thí nghiệm như

mô tả của nghiên cứu này. Để xem xét có thể áp dụng được thực tế loại bê tông CS60 trong môi trường ăn mòn, cần phải chế tạo mẫu và thí nghiệm thực tế trong thời gian lâu hơn. Hình 10 so sánh đường cong tải trọng - chuyển vị theo mức độ ăn mòn giữa dầm chứa cốt thép D10 và D14 theo thực nghiệm của loại bê tông CS0 và CS60. Kết quả so sánh được thể hiện trong Bảng 5. Từ Hình 5 thấy rằng, sức chịu tải của dầm chứa

các loại bê tông CS0, CS60 với cốt thép D14 đều có sức chịu tải lớn hơn so với dầm chứa cốt thép D10 theo mức độ ăn mòn tương ứng. Nhưng sự chênh lệch của sức chịu tải giữa các dầm chứa hai loại cốt thép này theo thời gian giảm dần. Nghĩa là với dầm không ngâm, chênh lệch sức chịu tải của dầm D14 và D10 lớn nhất, sau khi ngâm ở ngày thứ 25 thì chênh lệch sức chịu tải của dầm D14 và D10 khá nhỏ. Điều này cho thấy cốt thép D14 ăn mòn nhiều hơn so với D10 ở cùng thời gian ngâm, và làm cho cường độ dính bám giữa cốt thép và bê tông của dầm D14 suy giảm nhanh hơn so với dầm D10, đáp ứng như kết quả xác định  $\tau_{\max}$  tại [Bảng 1](#) và [Bảng 2](#).

## 5. Kết luận

Nghiên cứu thiết lập phương pháp trường pha trong bài toán 3D xét đến ảnh hưởng của sức dính bám giữa bê tông và cốt thép theo mức độ ăn mòn của dầm BTCT chứa bê tông CS0, CS60 và cốt thép D10, D14. Các kết quả đạt được từ thực nghiệm và mô phỏng trường pha, tác giả rút ra một số kết luận sau:

Các tham số đầu vào của phương pháp trường pha trong xác định hư hỏng và mức độ suy giảm sức chịu tải của dầm BTCT bị ăn mòn có thể được dùng từ kết quả thực nghiệm kéo tuột với cùng thời gian ngâm và điều kiện thí nghiệm ăn mòn tăng tốc. Kết quả thực nghiệm và mô phỏng trường pha là tương tự, tương ứng với các loại dầm BTCT được mô tả khi so sánh về sự phát triển vết nứt và đường cong ứng xử tải trọng - chuyển vị. Điều này cho thấy, phương pháp mô phỏng đáp ứng tốt với thí nghiệm uốn dầm BTCT bị ăn mòn.

Đối với dầm chứa bê tông CS0 và CS60 thì mức độ ăn mòn cốt thép D14 nhanh hơn D10 dẫn đến sự suy giảm sức chịu tải  $P_{\max}$  của dầm D14 nhanh hơn so với dầm chứa

D10. Điều này giải thích do lớp gỉ bị ăn mòn của dầm D14 lớn hơn D10 nên cường độ dính bám giữa cốt thép và bê tông của dầm D14 giảm nhanh hơn so với D10 khi cùng thời gian và điều kiện ăn mòn.

Khi xét cùng loại cốt thép D10 hoặc D14 thì mức độ suy giảm sức chịu tải tương ứng với thời gian ngâm gần giống nhau giữa bê tông CS0 và CS60. Điều này chứng tỏ loại bê tông vỏ ngao CS60 đáp ứng tốt để chế tạo dầm BTCT trong điều kiện ăn mòn với điều kiện thí nghiệm ngâm là 25 ngày. Để xem xét loại bê tông này có thể áp dụng thực tế trong điều kiện ăn mòn, cần chế tạo kết cấu BTCT của CS60 đặt ở môi trường ven biển lâu hơn để theo dõi điều kiện thực tế. Đối với bê tông CS0 và CS60, sự chênh lệch sức chịu tải  $P_{\max}$  đều giảm dần theo thời gian ngâm tương ứng giữa dầm chứa D14 và D10. Khi ngâm 25 ngày thì sự chênh lệch giữa hai loại dầm D14 và D10 khá nhỏ.

Từ các kết quả so sánh giữa thực nghiệm và phương pháp trường pha trong bài toán 3D cho thấy phương pháp mô phỏng đề xuất là phương pháp phù hợp để mô phỏng hư hỏng trong dầm BTCT bị ăn mòn. Phương pháp mô phỏng này có thể dự đoán khá chính xác về sự phát triển vết nứt và đường cong ứng xử vật liệu khi biết các thông số đầu vào đạt được từ các thí nghiệm tương ứng. Nghiên cứu này chỉ tập trung vào dầm BTCT chứa hai thanh cốt thép dọc chủ, do đó, trong nghiên cứu tiếp theo sẽ mô phỏng dầm BTCT bị ăn mòn có xét tới nhiều thanh cốt thép dọc và các cốt đai cũng như chịu tác dụng của tổ hợp nhiều loại tải trọng.

## Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

## Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2024-GHA-03.

---

Ba Thanh Vu. Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications

\*Corresponding author: thanhvb@utc.edu.vn

---

## Tài liệu tham khảo

- [1] B. -T. Vu, T. -T. Tran, and H. -C. Nguyen, "Phase-field method of fracture for experimental validation to simulate damage caused by reinforcement corrosion in clam-shell concrete beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 454, 2024, Art. no. 139065. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139065](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139065).
- [2] C. Varhen, S. Carrillo, and G. Ruiz, "Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 136, pp. 533–540, 2017, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067).
- [3] H. Cuadrado-Rica, N. Sebaibi, M. Boutouil, and B. Boudart, "Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells," *Mater. Struct.*, vol. 49, pp. 1805–1816, 2016, doi: [10.1617/s11527-015-0613-7](https://doi.org/10.1617/s11527-015-0613-7).
- [4] D. H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, F. Baraud, and L. Leleyter, "Durability of pervious concrete using crushed seashells," *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 137–150, 2017, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219).
- [5] R. Zhang, A. Castel, and R. François "Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no.3, pp. 415–425, doi: [10.1016/j.cemconres.2009.09.026](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.026).
- [6] S. Lim, M. Akiyama, D. M. Frangopol, "Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling," *Eng. Struct.*, vol. 127, pp. 189–205, 2016, doi: [10.1016/j.engstruct.2016.08.040](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.040).
- [7] X. Xi, S. Yang, and C. Q. Li, "A non-uniform corrosion model and meso-scale fracture modelling of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 108, pp. 87–102, Jun. 2018, doi: [10.1016/j.cemconres.2018.03.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.009).
- [8] A. Bossio, T. Monetta, F. Bellucci, G. P. Lignola, A. Prota; "Modeling of concrete cracking due to corrosion process of reinforcement bars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 71, pp. 78–92, May 2015, doi: [10.1016/j.cemconres.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.01.010).
- [9] T. T. Tran, T. M. Tran, X. T. Nguyen, D. H. Nguyen, B. T. Vu, and V. N. Vo; "Influences of pre-bending load and corrosion degree of reinforcement on the loading capacity of concrete beams," *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 31, no.1, pp. 554–563, 2022, doi: [10.1515/jmbm-2022-0061](https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0061).
- [10] N. Đ. Dũng, V. B. Thành "Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép tới ứng xử dính bám giữa cốt thép và bê tông vỏ ngao," Tạp chí Cầu đường Việt Nam,
- [11] F. Cirak, M. Ortiz, and A. Pandolfi, "A cohesive approach to thin-shell fracture and fragmentation," *Com. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 194, no. 21–24, pp. 2604–2618, 2005, doi: [10.1016/j.cma.2004.07.048](https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.07.048).
- [12] A. Ahmed, F. P. Van der Meer, and L. J. Sluys, "A geometrically nonlinear discontinuous solid-like shell element (DSL) for thin shell structures," *Com. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 201–204, pp. 191–207, 2012, doi: [10.1016/j.cma.2011.10.008](https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.10.008).
- [13] T. Rabczuk and T. Belytschko, "A three-dimensional large deformation meshfree method for arbitrary evolving cracks," *Com. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 196, no. 29–30, pp. 2777–2799, 2007, doi: [10.1016/j.cma.2006.06.020](https://doi.org/10.1016/j.cma.2006.06.020).
- [14] B. -T. Vu, H. Le-Quang, Q. -C. He, "A phase field method of crack nucleation investigation for experimental validation by using the improved degradation functions and strain orthogonal decompositions," *Appl. Eng. Sci.*, vol. 17, Mar. 2024, Art. no. 100173, doi: [10.1016/j.apples.2023.100173](https://doi.org/10.1016/j.apples.2023.100173).
- [15] B. -T. Vu, H. L. Quang, and Q.-C. He "Modelling and simulation of fracture in anisotropic brittle materials by the phase-field method with novel strain decompositions," *Mech. Res. Commun.*, vol. 124, Sep. 2022, Art. no. 103936, doi: [10.1016/j.mechrescom.2022.103936](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.103936).

- [16] N. H. Quan, T. B. Viet, and N. T. Tung, "A mesoscale numerical approach to predict damage behavior in concrete basing on phase field method," *Vietnam Journal of Mechanics*, vol. 43, no. 1, pp. 43-53, 2021, doi: [10.15625/0866-7136/15334](https://doi.org/10.15625/0866-7136/15334).
- [17] V. B. Thành, T. M. Hưng, P. M. Tuấn, và N. Đ. Đức, "Nghiên cứu cơ chế dính bám trong thí nghiệm kéo tuột kết cấu bê tông cốt thép bị ăn mòn bằng mô hình trường pha," *Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải*, tập 13, số 5, tr. 20-29, 2024, doi: [10.55228/JTST.13\(5\).20-29](https://doi.org/10.55228/JTST.13(5).20-29).
- [18] V. B. Thành và T. M. Hưng, "Mô phỏng phá hoại kết cấu dưới các loại tải trọng khác nhau bằng phương pháp trường pha phát triển trên bài toán ba chiều," *Tạp chí Giao thông vận tải*, tập 64, số 10/2024 (746), tr. 35-38, 2024.
- [19] C. A. N. Da Silva, J. Ciambella, J. A. O. Barros, and I. G. Costa, "Analytical bond model for general type of reinforcements of finite embedment length in cracked cement based materials," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 167, pp. 36-47, 2019, doi: [10.1016/j.ijsolstr.2019.02.018](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.02.018).
- [20] C. Miehe, M. Hofacker, and F. Welschinger, "A phase-field model for rate independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 199, no. 45-48, pp. 2776-2778, 2010, doi: [10.1016/j.cma.2010.04.011](https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.04.011).