

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

Phase-field modeling for studying bond mechanisms in pull-out tests of corroded reinforced concrete structures

Vũ Bá Thành*, Trần Mạnh Hưng, Phạm Mạnh Tuấn, Nguyễn Đắc Đức

Trường Đại học Giao thông vận tải

Tác giả liên hệ: thanhvb@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 9/8/2024, Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2024

Tóm tắt:

Thí nghiệm kéo tuột được sử dụng phổ biến để xác định cơ chế dính bám giữa bê tông và cốt thép trong các kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Trong đó, ảnh hưởng của sự ăn mòn đến cơ chế dính bám đã được nghiên cứu trong nhiều thí nghiệm. Bài báo này với mục đích sử dụng mô hình trường pha có xét tới hiệu ứng mặt phân giới kết hợp định luật ma sát để mô phỏng hư hỏng mẫu BTCT trong sự làm việc đồng thời giữa ứng suất cắt và ứng suất kéo của thí nghiệm kéo tuột. Phương pháp mô phỏng hiện tại có thể mô tả được quá trình phát triển và suy giảm cường độ dính bám một cách chính xác khi so sánh với kết quả thực nghiệm. Các kết quả đạt được của phương pháp mô phỏng về đường nứt và đường cong ứng xử của các mẫu BTCT với những mức độ ăn mòn cốt thép và đường kính cốt thép khác nhau cho thấy đây là một công cụ hiệu quả và đáng tin cậy trong việc dự đoán cơ chế hư hỏng của thí nghiệm kéo tuột. Các kết quả chỉ ra rằng sau khi đạt tới giá trị lớn nhất, cường độ dính bám bị suy giảm đột ngột trong các mẫu BTCT bị ăn mòn.

Từ khóa: Mô hình trường pha; Cơ chế dính bám; Hư hỏng; Thí nghiệm kéo tuột; Ăn mòn.

Abstract:

The pull-out test is commonly employed to determine the bond mechanism between concrete and reinforcement in reinforced concrete (RC) structures. The influence of corrosion on the bond mechanism has also been investigated in many experiments. This paper aims to use phase-field modeling considering the interfacial effects combined with friction law to simulate the damage of RC specimens under simultaneous action of shear and tensile stresses from the pull-out test. The present simulation method can accurately describe the process of bond strength development and decline when compared to experimental results. The obtained results of the simulation method regarding crack paths and behavior curves of RC specimens with different corrosion levels and different diameters of reinforcement demonstrate that this is an effective and reliable tool for predicting the damage mechanism of the pull-out test. The results indicate that after reaching maximum value, bond strength suddenly decreased in corroded RC specimens.

Keywords: Phase-field modelling; Bond mechanism; Damage; Pull-out test; Corrosion.

1. Giới thiệu

Kết cấu bê tông cốt thép được sử dụng phổ biến trong xây dựng bởi sự làm việc đồng thời giữa hai vật liệu cốt thép và bê tông, do đó, đặc tính dính bám giữa cốt thép và bê tông rất quan trọng. Việt Nam là một quốc gia ven biển với đường bờ biển dài nên kết cấu BTCT ở những khu vực này thường dễ bị ăn mòn do môi trường xâm thực của hơi nước biển [1]. Đây là một trong những nguyên nhân quan trọng nhất gây hư hỏng tới kết cấu BTCT. Hiện tượng ăn mòn làm giảm tiết diện cốt thép và cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép gây suy giảm sức chịu tải của kết cấu [2], [3].

Những năm gần đây, nhiều nghiên cứu về ứng xử dính bám trong kết cấu BTCT được thực hiện. Trong đó, các đánh giá về ứng xử cường độ dính bám - độ trượt và ảnh hưởng của mức độ ăn mòn khác nhau được nghiên cứu [4], [5]. Nghiên cứu [6] đã thực hiện thí nghiệm kéo tuột cốt thép trong đầm để nghiên cứu ứng xử dính bám giữa bê tông thông thường và bê tông cốt liệu tái chế trong điều kiện ăn mòn. Các nghiên cứu trên đều tiến hành bằng phương pháp ăn mòn tăng tốc [4], [5], [6]. Nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của điều kiện thực tế và điều kiện ăn mòn trong phòng thí nghiệm, nghiên cứu [7] đã xác định đặc tính dính bám của những cấu kiện BTCT trong các điều kiện ăn mòn trên.

Hiện nay, để giảm chi phí chế tạo mẫu và thực nghiệm, đồng thời, hạn chế vật liệu sau thực nghiệm thải ra môi trường, nhiều nghiên cứu đã áp dụng các hệ thống máy tính nâng cấp tích hợp các phương pháp mô phỏng như FEM, XFEM [8], [9] hoặc các phần mềm phân tích kết cấu như Abaqus, Atena, Diana FEA [10], [11] để thay thế. Nhưng hạn chế của phương pháp mô phỏng FEM và XFEM là khó mô phỏng phân nhánh hoặc kết nối các nhánh vết nứt phức tạp trong kết cấu bị hư hỏng. Trong khi, các phần mềm khó có thể kiểm soát các công thức phân tích bên trong lõi.

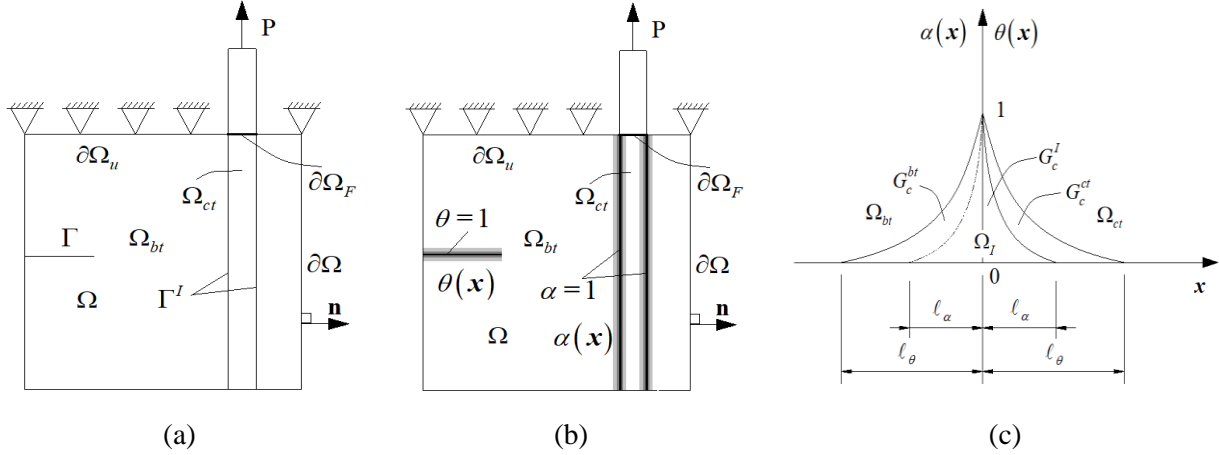
Để khắc phục các nhược điểm này, phương pháp trường pha được sử dụng rộng rãi để giải quyết những bài toán mô phỏng sự phát triển vết nứt phức tạp trong kết cấu. Xuất phát từ nghiên cứu ban đầu về cơ học phá hủy của Griffith [12], đã có nhiều nghiên cứu bằng phương pháp trường pha để mô tả hư hỏng trong những vật liệu giòn, đẳng hướng [13], vật liệu dị hướng [14]. Gần đây, nghiên cứu [15] đã sử dụng phương pháp trường pha kết hợp với mô hình vùng dính kết (CZM) bằng việc sử dụng hai biến trường pha đại diện cho hư hỏng mặt phân giới và hư hỏng nội tại các pha để mô phỏng kết cấu nhiều pha vật liệu thành phần như bê tông. Nhưng nghiên cứu này đang gặp hạn chế bởi việc hư hỏng kết cấu chỉ gây ra do ứng suất kéo tương ứng với thành phần tensor biến dạng dương. Điều này khó có thể áp dụng cho việc mô phỏng kết cấu thuần túy bị nứt do việc kết hợp giữa ứng suất cắt và ứng suất kéo như trong thí nghiệm kéo tuột. Để khắc phục vấn đề này, bài báo này cải tiến phương pháp trường pha đề cập trong [15] để mô tả quá trình phát triển và suy giảm cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép dựa trên định luật ma sát và hư hỏng mặt phân giới. Phương pháp này được kiểm chứng bằng việc so sánh về đường cong ứng xử cường độ dính bám - độ trượt và đường nứt với phương pháp thực nghiệm [5] trong thí nghiệm kéo tuột mẫu BTCT bị ăn mòn với các mức độ ăn mòn và đường kính cốt thép khác nhau.

Để đạt được các yêu cầu đặt ra, bài báo gồm các phần sau: Phần 1 tóm lược các nghiên cứu trong nước và thế giới liên quan tới nội dung bài báo hiện tại, từ đó nêu lên các vấn đề cần được giải quyết. Phần 2 mô tả phương pháp trường pha xét tới mặt phân giới có kết hợp với định luật ma sát để mô tả quá trình phát triển cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép. Phần 3 đưa ra các ví dụ mô phỏng để so sánh với kết quả thực nghiệm khi xét tới mức độ ăn mòn cốt thép và đường kính cốt thép. Phần 4 đưa ra các kết luận và kiến nghị.

2. Phương pháp trường pha mô tả hư hỏng trong thí nghiệm kéo tuột

Một kết cấu BTCT có diện tích Ω với biên ngoài $\partial\Omega = \partial\Omega_u \cup \partial\Omega_F$, chứa hai vật liệu là bê tông và cốt thép với diện tích lần lượt là Ω_{bt} và Ω_{ct} , trong đó, $\partial\Omega_u$ và $\partial\Omega_F$ là biên chuyển vị và biên lực tương ứng (Hình 1a). Đặt Γ^I là

mặt phân giới giữa bê tông và cốt thép. Bài báo này sử dụng hai biến trường pha α và θ đại diện cho hư hỏng mặt phân giới Γ^I và nội tại các pha như Hình 1b [15]. Đặt ℓ_α và ℓ_θ là tham số chiều dài đại diện cho bề rộng chuẩn tắc của hư hỏng mặt phân giới và trong nội tại các pha tương ứng (Hình 1c).



Hình 1. Phương pháp trường pha cho thí nghiệm kéo tuột: (a) Kết cấu chứa bê tông và cốt thép với mặt phân giới Γ^I , (b) Mô tả hai biến trường pha α và θ , (c) Mô tả chuẩn tắc của α và θ .

Tổng năng lượng tồn tại trong kết cấu bê tông gồm các thành phần sau:

$$\Pi(\boldsymbol{\varepsilon}, \theta) = \int_{\Omega} \Pi_u(\boldsymbol{\varepsilon}, \theta) d\Omega + G_c \int_{\Gamma} d\Gamma + \int_{\Gamma^I} \Pi_3 d\Gamma^I \quad (1)$$

Trong kết cấu BTCT, cốt thép có đặc trưng vật liệu lớn hơn rất nhiều so với bê tông, do đó, giả sử hư hỏng không thể phát triển trong cốt thép, chỉ phát triển ở bê tông và mặt phân giới. Để mô tả điều này, có thể thêm hàm suy biến $g(\theta)$ vào thành phần năng lượng liên quan tới pha bê tông. Vì thế, hàm năng lượng biến dạng, trong đó, đại diện bằng số hạng thứ nhất của biểu thức (1) trở thành:

$$\int_{\Omega} \Pi_u(\boldsymbol{\varepsilon}, \theta) d\Omega = \int_{\Omega_{bt}} g(\theta) \Pi_{bt} d\Omega_{bt} + \int_{\Omega_{ct}} \Pi_{ct} d\Omega_{ct} \quad (2)$$

Với, $g(\theta) = (1 - \theta)^2 + \kappa$ là hàm suy biến khả vi của biến trường pha θ và κ là số thực vô

cùng nhỏ [13], [14], [15], $\boldsymbol{\varepsilon}$ là tensor biến dạng, Π_{bt} và Π_{ct} là hai hàm năng lượng biến dạng trong bê tông và cốt thép tương ứng. Phần năng lượng trong số hạng thứ hai của biểu thức (1) được xác định:

$$G_c \int_{\Gamma} d\Gamma = G_c^{bt} \int_{\Omega_{bt}} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{bt} + G_c^{ct} \int_{\Omega_{ct}} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{ct} \quad (3)$$

Ở đó, $\gamma(\theta, \nabla\theta) = \frac{\theta^2}{2\ell_\theta} + \frac{\ell_\theta}{2} (\nabla\theta \cdot \nabla\theta)$ là hàm mật độ vết nứt, G_c^{bt} và G_c^{ct} là năng lượng kháng nứt của bê tông và cốt thép, tương ứng.

Từ Hình 1c, phần năng lượng trong số hạng thứ ba liên quan đến khu vực mặt phân giới giữa hai pha trong biểu thức (1) được phân tích như sau:

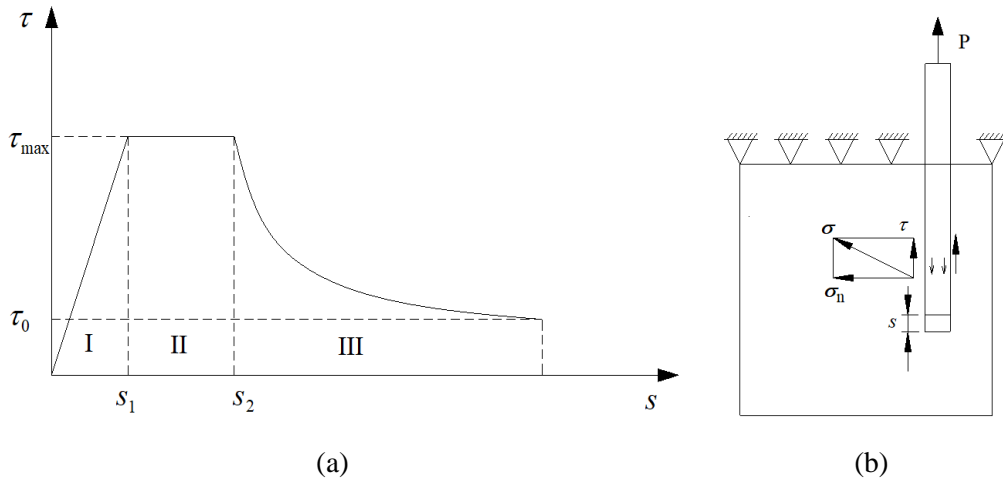
$$\int_{\Gamma^I} \Pi_3 d\Gamma^I = G_c^{bt} \int_{\ell_\alpha}^{\ell_\theta} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{bt} + G_c^I \int_{-\ell_\alpha}^{\ell_\alpha} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_I + G_c^{ct} \int_{\ell_\alpha}^{\ell_\theta} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{ct} \quad (4)$$

Trong đó, Ω_I và G_c^I là diện tích và năng lượng kháng nứt tại mặt phân giới Γ^I . Để đơn giản trong quá trình tính toán, đặt $\ell = \ell_\alpha = \ell_\beta$. Khi đó, biểu thức (4) trở thành:

$$\int_{\Gamma^I} \Pi_3 d\Gamma^I = G_c^I \int_{-\ell_\alpha}^{\ell_\alpha} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_I = G_c^I \int_{\Omega_I} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_I \quad (5)$$

Từ (2), (3) và (5), tổng năng lượng trong vật thể của biểu thức (1) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \Pi(\boldsymbol{\varepsilon}, \theta) = & \int_{\Omega_{bt}} g(\theta) \Pi_{bt} d\Omega_{bt} + \int_{\Omega_{ct}} \Pi_{ct} d\Omega_{ct} + G_c^{bt} \int_{\Omega_{bt}} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{bt} + \\ & + G_c^{ct} \int_{\Omega_{ct}} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_{ct} + G_c^I \int_{\Omega_I} \gamma(\theta, \nabla\theta) d\Omega_I \end{aligned} \quad (6)$$



Hình 2. (a) Các giai đoạn của ứng xử dính bám giữa bê tông và cốt thép, (b) Xác định lực dính bám.

Theo nghiên cứu [16], ứng xử dính bám giữa bê tông và cốt thép được thông qua ba giai đoạn như được mô tả trên Hình 2a:

(i) Giai đoạn đàn hồi thể hiện bằng việc bê tông và cốt thép được liên kết chắc chắn, khi đó, ứng suất tại mặt phân giới có ứng xử đàn hồi, ứng suất này được truyền từ cốt thép sang bê tông và không xuất hiện hư hỏng;

(ii) Giai đoạn hai tương ứng độ trượt s đạt tới giá trị s_1 thì cường độ dính bám τ đạt tới giá trị lớn nhất τ_{max} . Trạng thái chảy dẻo (còn được gọi là giai đoạn chảy dẻo). Giai đoạn này xuất hiện biến dạng dẻo và vết nứt vi mô trong bê tông (nhưng do cốt thép được sử dụng có đặc tính vật liệu cao nên giai đoạn chảy dẻo thường rất ngắn);

(iii) Giai đoạn ba đạt được khi hư hỏng tiến đến mức độ, khi đó, cường độ dính bám

chuyển thành ma sát. Cường độ dính bám τ giảm xuống khi độ trượt s tăng lên (giai đoạn suy giảm dính bám). Lúc này, cường độ dính bám tiệm cận với ma sát dư τ_0 , vết nứt vi mô của giai đoạn hai trở thành vết nứt lớn có thể gây vỡ bê tông và cốt thép bị kéo tuột hoàn toàn. Vì vậy, cường độ dính bám τ được xác định như sau [16]:

$$\tau = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right) & \text{khi } s \leq s_1 \\ \tau_{max} & \text{khi } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_0 + (\tau_{max} - \tau_0) \left(\frac{s_2}{s} \right) & \text{khi } s \geq s_2 \end{cases} \quad (7)$$

Xuất phát từ Định luật Hooke, có thể tính ứng suất trong kết cấu:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (8)$$

Từ Hình 2b, cường độ dính bám τ chính là ứng suất tiếp tại mặt phân giới của ứng suất (8) thuộc khu vực mặt phân giới Γ^I :

$$\tau = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{P}_t \text{ với } \mathbf{P}_t = \mathbf{n} \otimes \mathbf{m} \quad (9)$$

Ở đó, \mathbb{C} là tensor độ cứng đàn hồi bậc bốn, \mathbf{n} và \mathbf{m} là vector pháp tuyến và vector tiếp tuyến

$$\begin{cases} \int_{\Omega_{bt}} g'(\theta) \Pi_{bt} d\Omega_{bt} + G_c^{bt} \int_{\Omega_{bt}} \delta_\theta \gamma(\theta, \nabla \theta) d\Omega_{ct} + G_c^I \int_{\Omega_I} \delta_\theta \gamma(\theta, \nabla \theta) d\Omega_I \text{ trong } \Omega \\ \theta(\mathbf{x}) = 1 \text{ tại } \Gamma \\ \nabla \theta(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}_1 = 1 \text{ tại } \partial\Omega \end{cases} \quad (10)$$

Và hệ phương trình của bài toán chuyển vị:

$$\begin{cases} g(\theta) \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \text{ trong } \Omega_{bt} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \text{ trong } \Omega_{ct} \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{u}} \text{ tại } \partial\Omega_u \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}_1 = \bar{\mathbf{F}} \text{ tại } \partial\Omega_F \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó, $g'(\theta)$ là đạo hàm bậc một của hàm suy biến $g(\theta)$ với biến trường pha θ ; $\bar{\mathbf{u}}$ là giá trị chuyển vị áp tại biên chuyển vị $\partial\Omega_u$, $\bar{\mathbf{F}}$ là giá trị lực áp tại biên lực $\partial\Omega_F$, \mathbf{n}_1 là vector pháp tuyến tại biên $\partial\Omega$, với ứng suất $\boldsymbol{\sigma}$ được tính theo công thức (8).

3. Ví dụ mô phỏng

Các ví dụ được đưa ra nhằm so sánh kết quả về đường cong ứng xử cường độ dính bám - độ trượt giữa phương pháp thực nghiệm [5] và phương pháp trường pha hiện tại. Nghiên cứu [5] đã thực hiện thí nghiệm kéo tuột của mẫu BTCT bị ăn mòn với cốt thép tròn trơn có các đường kính D18, D20 và D22.

Trong [5], mẫu bê tông có hình lập phương với kích thước 150 x 150 x 150 mm được sử dụng. Các thanh cốt thép được bố trí lệch sao cho chiều dày bê tông bảo vệ là 30 mm. Chiều dài dính bám giữa bê tông và cốt thép cố định là 100 mm, phần không dính bám được bảo vệ bằng một ống nhựa PVC dài 50 mm (Hình 3). Bê tông sử dụng có cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày là $f'_c = 24.81$ MPa,

tại mặt phân giới Γ^I . Sử dụng nguyên lý biến phân của [17], dạng yếu của bài toán trường pha và bài toán chuyển vị tương ứng với các điều kiện biên. Từ biểu thức (6), có được hệ phương trình (10) để xác định biến trường pha θ và hệ phương trình (11) để xác định vector chuyển vị \mathbf{u} :

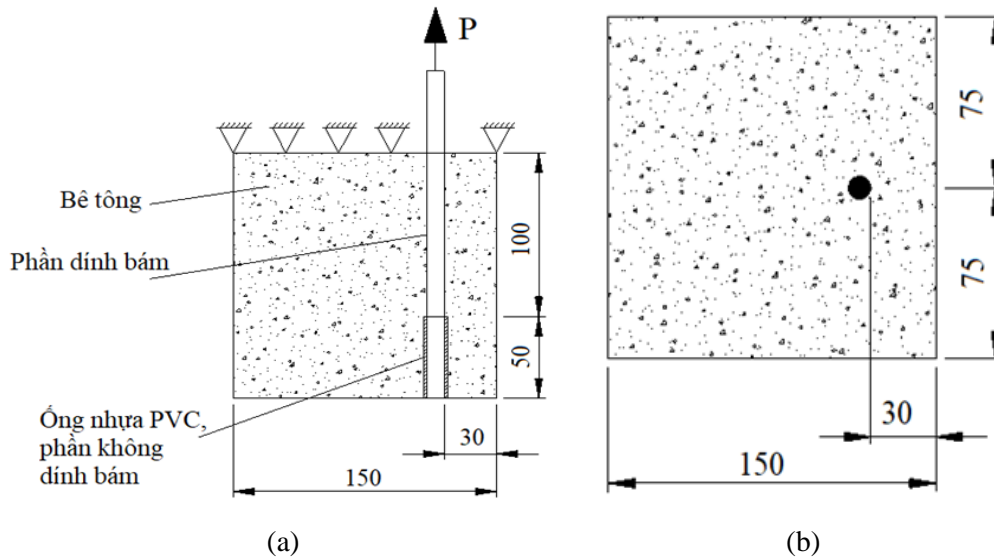
tương ứng với mô đun đàn hồi theo tiêu chuẩn TCVN 11823:2017 [18] là $E_{bt} = 0.043(\gamma_{bt})^{1.5}$ $\sqrt{f'_c} = 25974$ MPa với trọng lượng thể tích của bê tông được lấy $\gamma_{bt} = 24.50$ kN/m³; hệ số Poisson của bê tông $\nu_{bt} = 0.2$; cường độ chịu kéo của bê tông $f_t = 0.5\sqrt{f'_c} = 2.4$ MPa (xem trong [18]).

Theo [19], năng lượng kháng nứt của bê tông được tính theo công thức $G_c^{bt} = 0.073(f'_c)^{0.18} = 0.13$ N/mm. Cốt thép loại tròn trơn với mô đun đàn hồi $E_{ct} = 210000$ MPa, hệ số Poisson $\nu_{ct} = 0.3$, cường độ kéo chảy của thép $f_{yt} = 258.68$ MPa. Trong mô phỏng, giả sử năng lượng kháng nứt tại mặt phân giới $G_c^I = 0.5 \times G_c^{bt} = 0.065$ N/mm, và năng lượng kháng nứt của cốt thép $G_c^{ct} = 5 \times G_c^{ct} = 0.65$ N/mm.

Nghiên cứu [5] đã ngâm mẫu BTCT trong dung dịch NaCl 5%, thực hiện thí nghiệm diễn tiến nhanh để xảy ra quá trình ăn mòn cốt thép. Sau khi kết thúc thí nghiệm ăn mòn, tiến hành thí nghiệm kéo tuột để xác định đường cong ứng xử cường độ dính bám - độ trượt của các mẫu BTCT với cốt thép D18, D20, và D22 phụ thuộc vào mức độ ăn mòn cốt thép tương ứng. Để thực hiện sự so sánh kết quả giữa thực nghiệm và mô phỏng, nghiên cứu này đề xuất

mô phỏng mỗi loại cốt thép tương ứng với hai mức độ ăn mòn được lấy trong nghiên cứu [5]. Các tham số vật liệu thể hiện ở Bảng 1 được sử dụng làm dữ liệu đầu vào của phương pháp trường pha với việc giả thiết độ trượt $s_1 = s_2$, do đặc tính cốt thép cao hơn rất nhiều so với bê tông nên giai đoạn chảy dẻo trong Hình 2a xảy ra rất nhanh. Các giá trị s_1, s_2, τ_{\max} và τ_0 thu được từ thực nghiệm [16]. Điều kiện biên và điều kiện tải trọng được mô tả như Hình 3a. Mặt trên của mẫu trong phạm vi bê

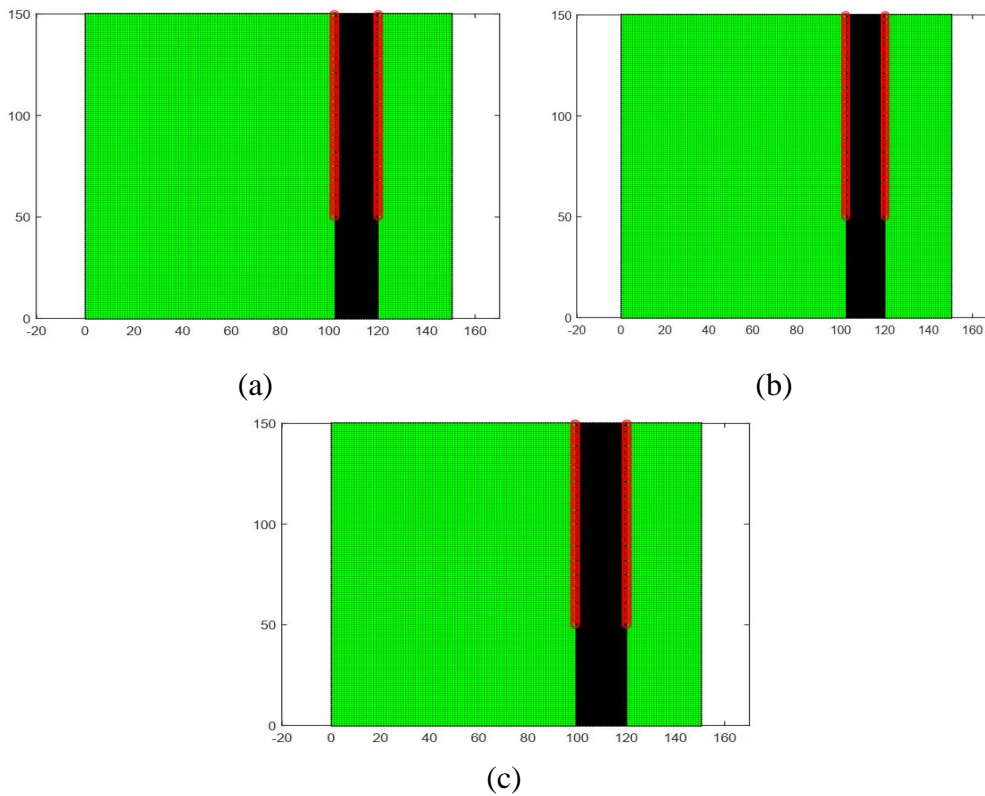
tông được khống chế cả hai phương, cốt thép được gia tải với chuyển vị đều $\Delta u = 0.0001 \text{ mm}$ trong suốt quá trình mô phỏng. Thiết lập ban đầu của mô phỏng, bê tông tiếp xúc với cốt thép có chiều dài không đổi, 100 mm, phần không tiếp xúc dài 50 mm. Chiều dày bê tông bảo vệ không đổi với ba loại cốt thép là 30 mm. Mẫu được chia thành các phần tử vuông đều với kích thước lưới phần tử $h = 0.1 \text{ mm}$; tham số chiều dài $\ell = 2h = 0.2 \text{ mm}$. Giả sử điều kiện biến dạng phẳng được sử dụng.



Hình 3. Kích thước mẫu thí nghiệm kéo tuột: (a) Mặt chính diện mẫu, (b) Mặt bằng mẫu.

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

Ký hiệu	Bê tông	Cốt thép						Mặt phân giới
		D18 (ăn mòn %)		D20 (ăn mòn %)		D22 (ăn mòn %)		
		1.78	3.38	4.13	7.51	3.34	4.2	
E (MPa)	25974	210000	210000	210000	210000	210000	210000	25974
ν	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
G_c (N/mm)	0.13	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.65
f_t (MPa)	2.4	258.68	258.68	258.68	258.68	258.68	258.68	2.4
Độ trượt $s_1 = s_2$ (mm)	–	0.0383	0.039	0.0537	0.102	0.0625	0.0246	–
τ_{\max} (MPa)	–	4.44	3.63	3.81	2.74	3.63	2.79	–
τ_0 (MPa)	–	2.5	1.99	2.19	1.52	2.16	1.44	–



Hình 4. Nhận dạng khu vực các pha bằng mô phỏng với bê tông (màu xanh), cốt thép (màu đen), mặt phân giới khu vực tiếp xúc giữa bê tông và cốt thép (màu đỏ): (a) D18, (b) D20, (c) D22.

Hình 4 thể hiện việc nhận dạng các pha và mặt phân giới bằng mô phỏng tương ứng với D18, D20 và D22, trong đó, màu xanh là khu vực bê tông, màu đen là khu vực cốt thép và màu đỏ là mặt phân giới giữa hai pha. Hình 5 thể hiện đường nứt được phát triển trong mẫu (đường màu đỏ thể hiện đường nứt) tương ứng với đường kính D18, D20 và D22. Nhận thấy rằng với trạng thái cốt thép bị ăn mòn một phần, cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép có thể bị suy giảm dẫn tới sự hư hỏng chỉ xuất hiện ở mặt tiếp xúc và không phân nhánh gây phá hoại pha bê tông, cốt thép có thể kéo tuột ra khỏi bê tông mà ít bị cản trở.

Hình 6 thể hiện sự so sánh kết quả của quan hệ cường độ dính bám - độ trượt giữa phương pháp trường pha hiện tại và phương pháp thực nghiệm [5] theo mức độ ăn mòn cốt thép tương ứng với đường kính D18, D20 và D22. Hình 6a thể hiện đường cong ứng xử của cốt thép D18 với hai mức độ ăn mòn cốt thép 1.78% và 3.38%. Hình 6b tương ứng với cốt thép D20 với tỷ lệ ăn mòn 4.13% và 7.51%, và

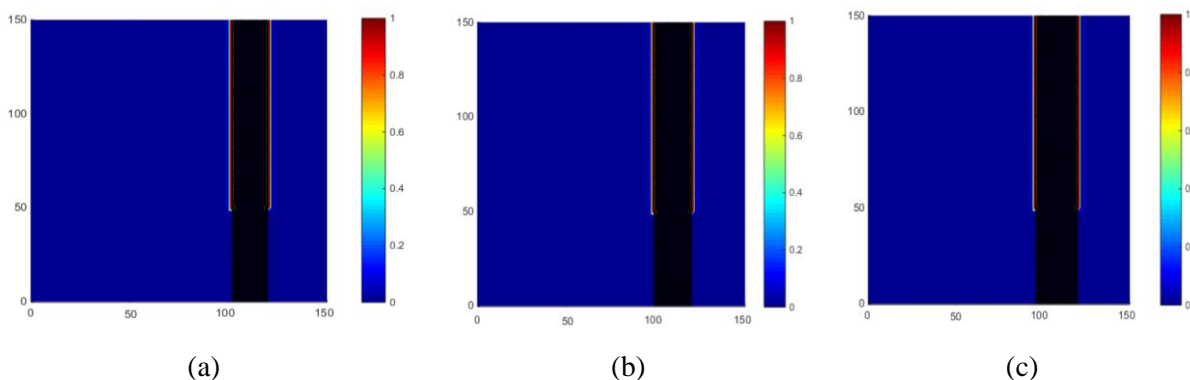
Hình 6c với cốt thép D22 với mức độ ăn mòn 3.34% và 4.20%.

Từ các đường cong ứng xử trong cả thực nghiệm và mô phỏng, có thể thấy giai đoạn chảy dẻo là không đáng kể, hầu như chỉ có giai đoạn đàn hồi và giai đoạn suy giảm dính bám xuất hiện, điều này được mô tả trong Hình 2a. Cường độ dính bám phát triển tới giá trị tương ứng với độ trượt và suy giảm đột ngột về giá trị ma sát dư. Hiện tượng này có thể được giải thích: Sau khi lực dính bám đạt tới giá trị toàn bộ mặt tiếp xúc giữa bê tông và cốt thép có các vết nứt nhỏ, bắt đầu suy giảm cường độ dính bám (cường độ dính bám chuyển sang cơ chế ma sát). Độ dốc của đường cong ứng xử do lực ma sát giữa cốt thép và bê tông liên quan tới chiều dài tạo ma sát, nghĩa là trong quá trình kéo tuột chiều dài tạo ma sát này dần dần giảm đi dẫn tới lực ma sát sẽ giảm theo đạt đến giá trị ma sát dư.

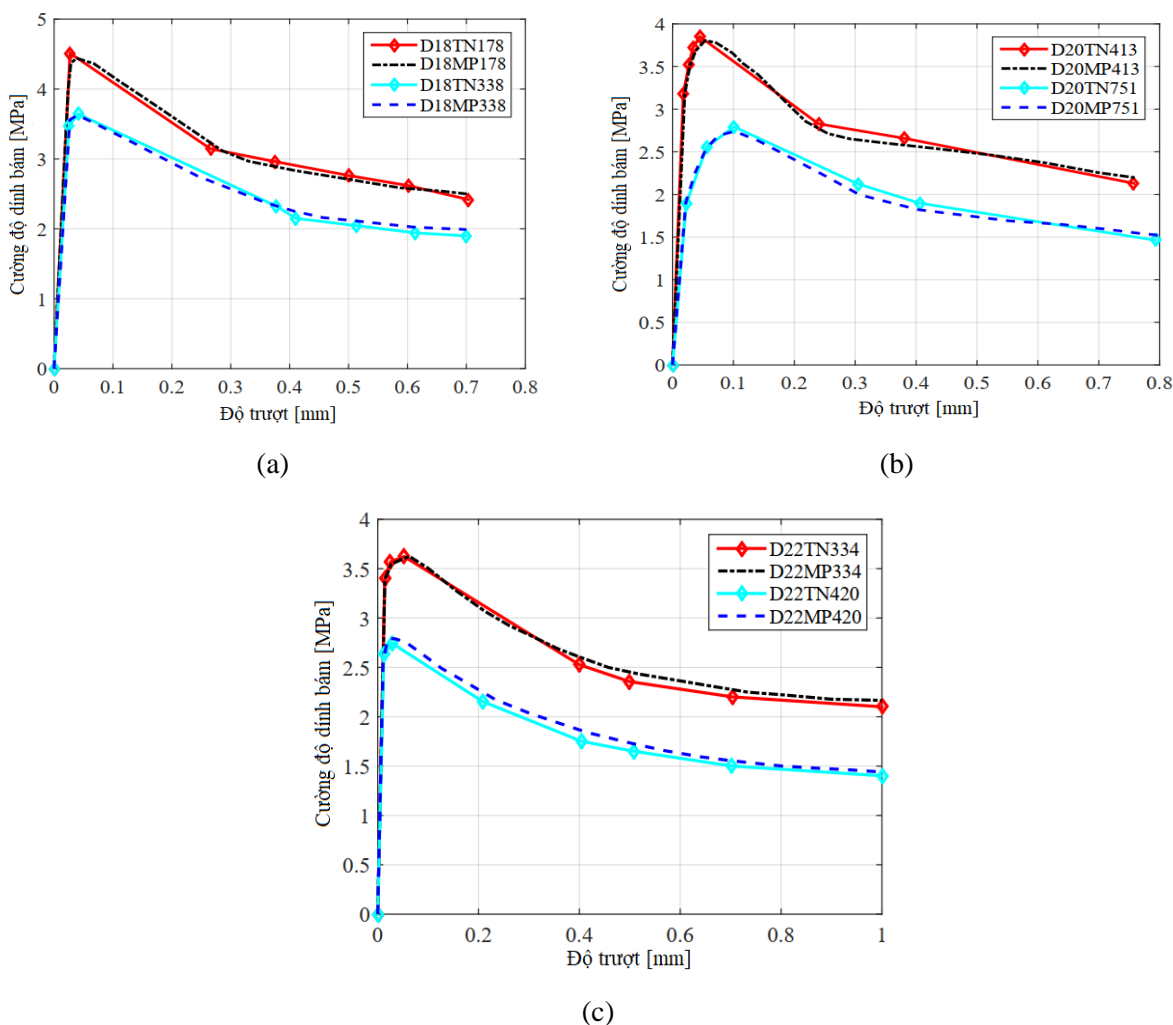
Hình 6 cho thấy rằng, với mỗi loại cốt thép, mức độ ăn mòn càng tăng thì cường độ dính bám càng giảm. Trong nghiên cứu này, việc

mô phỏng cường độ dính bám do ăn mòn của các đường kính cốt thép khác nhau, khi chưa so sánh cùng mức độ ăn mòn thì có thể xem xét cường độ dính bám của các loại cốt thép sẽ chịu ảnh hưởng nhiều hơn. Do đó, điều này cần được thí nghiệm và mô phỏng chứng thực trong các nghiên cứu tiếp theo.

Qua Hình 5 và Hình 6, kết quả mô phỏng bằng phương pháp trường pha đáp ứng tốt tới kết quả thực nghiệm tham chiếu [5]. Điều này cho thấy phương pháp mô phỏng hiện tại có thể dự đoán được đường nứt, cơ chế dính bám của bê tông và cốt thép trong kết cấu BTCT bị ăn mòn.



Hình 5. Đường nứt dọc theo mặt phân giới giữa bê tông và cốt thép: (a) D18, (b) D20, (c) D22.



Hình 6. So sánh đường cong cường độ dính bám - độ trượt giữa mô phỏng hiện tại và thực nghiệm [5] theo các mức độ ăn mòn cốt thép: (a) D18, (b) D20, (c) D22.

4. Kết luận

Bài báo đã sử dụng phương pháp trường pha xét tới mặt phân giới có kết hợp với định luật ma sát để mô tả quá trình phát triển cường độ dính bám giữa bê tông và cốt thép. Các số liệu đầu vào được lấy từ nghiên cứu tham chiếu và nội suy các nghiên cứu khác liên quan. Từ kết quả đạt được, có thể rút ra một vài kết luận như sau:

Các kết cấu BTCT với những đường kính khác nhau và các mức độ ăn mòn cốt thép khác nhau đều được dự đoán bằng phương pháp trường pha về đường nứt và đường cong ứng xử. Các kết quả mô phỏng đáp ứng tốt với kết quả thực nghiệm. Giai đoạn đàn hồi và giai đoạn suy giảm cường độ dính bám được thể hiện rõ ràng trong cả phương pháp mô phỏng và thực nghiệm với các loại cốt thép đường kính khác nhau và các tỷ lệ ăn mòn khác nhau.

Trong nghiên cứu này sử dụng các mức độ ăn mòn cốt thép nhỏ (nhỏ hơn 7.51%), tức là khi đó phần bê tông bảo vệ chưa bị sự trương nở cốt thép gây nứt ra pha bê tông. Điều này dẫn tới sự dính bám giữa bê tông và cốt thép được coi là đồng đều. Giả sử này rất quan trọng trong mô phỏng, bởi nó ảnh hưởng trực tiếp tới kết quả. Vì vậy, kết quả mô phỏng có thể nứt đều ở mặt tiếp xúc giữa bê tông và cốt thép do kết hợp ứng suất cắt và ứng suất kéo ở khu vực này. Vết nứt không phân nhánh gây phá hoại trong pha bê tông, do đó, cốt thép có thể tuột ra từ từ khỏi bê tông và ít bị cản trở trong suốt quá trình mô phỏng.

Từ các kết quả đạt được cho thấy, phương pháp mô phỏng đề xuất là đáng tin cậy trong việc nghiên cứu sự tương tác giữa hư hỏng mặt phân giới và hư hỏng nội tại các pha trong điều kiện kết hợp giữa ứng suất cắt và ứng suất kéo của thí nghiệm kéo tuột. Trong nghiên cứu tương lai, phương pháp này có thể được áp dụng cho nhiều loại thí nghiệm kéo thuộc kết cấu BTCT thông thường hoặc kết cấu bê tông với cốt sợi phân tán, trong đó, các góc của sợi là ngẫu nhiên, hoặc nghiên cứu cơ chế dính

bám giữa cốt thép và bê tông trong đầm BTCT chịu uốn.

Lời cảm ơn

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

Tài liệu tham khảo

- [1] P. H. Hanh, L. T. Thành, và N. V. Tuấn, *Bê tông cho công trình biển*. Hà Nội: NXB Xây dựng, 2013.
- [2]. Y. Ma et al., “Hybrid uncertainty quantification for probabilistic corrosion damage prediction for aging RC bridges,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27 no. 4, Art. no. 04014152, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001096.
- [3]. M. G. Stewart, “Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams,” *Struct. Saf.*, vol. 31, no. 1, pp. 19-30, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.strusafe.2007.12.001.
- [4]. A. A. Almusallam, A. S. Al-Gahtani, A. R. Aziz, and Rasheeduzzafar, “Effect of reinforcement corrosion on bond strength”. *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 2, pp. 123-129, 1996, doi: 10.1016/0950-0618(95)00077-1.
- [5] Y. Ma, Z. Guo, L. Wang, and J. Zhang, “Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 240-249, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.169.
- [6] Y. Zhao, H. Lin, K. Wu, and W. Jin, “Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars”. *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 348–359, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.091.
- [7] Y. S. Choi, S. T. Yi, M. Y. Kim, W. Y. Jung, and E. I. Yang, “Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 180-189, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.065.

- [8] N. Moes, J. Dolbow, and T. Belytschko, "A finite element method for crack growth without remeshing," *Int. J. Num. Methods Eng.*, vol. 46, no. 1, pp. 131-150, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J.
- [9] N. Sukumar, N. Moës, B. Moran, and T. Belytschko, "Extended finite element method for three-dimensional crack modeling," *Int. J. Num. Methods Eng.*, vol. 48, no. 11, pp. 1549-570, 2000, doi: 10.1002/1097-0207(20000820)48:11<1549::AID-NME955>3.0.CO;2-A.
- [10] N. N. Tan and N. T. Kien, "Modeling the flexural behavior of corroded reinforced concrete beams with considering stirrups corrosion," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 26-39, 2020, doi: 10.31814/stce.nuce2020-14(3)-03.
- [11] N. N. Tan and N. D. Nguyen, "An experimental study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams using electrochemical accelerated corrosion method," *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1-11, 2019, doi: 10.31814/stce.nuce2019-13(1)-01.
- [12] G. A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solid," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 221, no. 582-593, pp. 163-198, 1921, doi: 10.1098/rsta.1921.0006.
- [13] 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.
- [14] T. T. Nguyen, J. Réthoré, and M. -C. Bainetto, "Phase field modelling of anisotropic crack propagation," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 65, pp. 279-288, 2017, doi: 10.1016/j.euromech sol.2017.05.002.
- [15] T. T. Nguyen, J. Yvonnet, Q. -Z. Zhu, M. Bornert, and C. Chateau, "A phase-field method for computational modeling of interfacial damage interacting with crack propagation in realistic microstructures obtained by microtomography," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 312, pp. 567-595, 2016, doi: 10.1016/j.cma.2015.10.007.
- [16] 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.
- [17] G. A. Francfort, and J. -J. Marigo, "Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem," *J. Mech. Phys. Solids.*, vol. 46, no. 8, pp. 1319-1342, 1998, doi: 10.1016/S0022-5096(98)00034-9.
- [18] *Tiêu chuẩn quốc gia về Thiết kế cầu đường bộ*, TCVN 1182:2017, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2017.
- [19] A. Bossio, T. Monetta, F. Bellucci, G. P. Lignola, and A. Prota, "Modeling of concrete cracking due to corrosion process of reinforcement bars," *Cem. Conc. Res.*, vol. 71, pp. 78-92, May 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.01.010.