

# PHÂN TÍCH TRƯỜNG BIẾN DẠNG VÀ CHUYỂN VỊ, CÙNG SỰ PHÁT TRIỂN VẾT NỨT TRONG KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP LẮP GHEP BẰNG KỸ THUẬT TƯƠNG QUAN ẢNH SỐ

Nguyễn Quang Huy<sup>a</sup>, Vũ Tiến Chương<sup>a</sup>, Nguyễn Văn Hùng<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 28/10/2025, Sửa xong 07/12/2025, Chấp nhận đăng 24/12/2025*

## Tóm tắt

Các phương pháp đo truyền thống như quan sát trực quan hay sử dụng cảm biến dịch chuyển vị sai tuyến tính (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) còn nhiều hạn chế, như chỉ ghi nhận được biến dạng tại các điểm cục bộ, dễ mất số liệu đo khi biến dạng lớn và không phản ánh được toàn trường biến dạng/chuyển vị của kết cấu. Nghiên cứu này ứng dụng kỹ thuật Tương quan ảnh số (Digital Image Correlation – DIC) để theo dõi trường biến dạng và phân tích quá trình hình thành, lan truyền vết nứt trong nút dầm-cột bê tông cốt thép (BTCT) lắp ghép dưới kịch bản phá hủy lủy tiến. Hệ thống DIC hai chiều được triển khai song song với LVDT nhằm kiểm chứng độ chính xác và khả năng nhận dạng biến dạng cục bộ. Kết quả cho thấy chuyển vị đo bằng DIC có độ tương đồng cao với LVDT, đặc biệt duy trì ổn định ở giai đoạn biến dạng lớn khi cảm biến tiếp xúc mất tín hiệu. Dữ liệu toàn trường giúp xác định chính xác vị trí, hướng và bề rộng vết nứt qua từng giai đoạn tải trọng. Bề rộng vết nứt tại hai trạng thái đặc trưng, đó là TT1 (bắt đầu xuất hiện vết nứt) và TT2 (cốt thép lớp dưới dầm chảy dẻo), được đối chiếu với dự báo theo tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004) [1]. Kết quả so sánh cho thấy sự sai lệch đáng kể giữa thực nghiệm và lý thuyết tại giai đoạn sau chảy dẻo, qua đó làm rõ giới hạn áp dụng của các công thức thiết kế quy ước đối với trạng thái biến dạng lớn. Điều này khẳng định tiềm năng của DIC như một công cụ thực nghiệm hiệu quả để đánh giá ứng xử phá hoại phức tạp của kết cấu BTCT lắp ghép tại biến dạng lớn mà các mô hình tính toán hiện hành chưa phản ánh đầy đủ.

*Từ khóa:* tương quan ảnh số (DIC); bê tông cốt thép lắp ghép; nút dầm-cột; phá hủy lủy tiến, bề rộng vết nứt; EN 1992-1-1 (2004).

## ANALYSIS OF STRAIN AND DISPLACEMENT FIELDS, AND CRACK PROPAGATION IN PRECAST REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

### Abstract

Traditional measurement methods such as visual inspection or the use of Linear Variable Differential Transformers (LVDTs) have several limitations, as they only record deformation at discrete local points, are prone to data loss under large deformations, and cannot capture the full-field strain or displacement of structures. This study applies the Digital Image Correlation (DIC) technique to monitor strain fields and analyse the initiation and propagation of cracks in precast concrete (PC) beam-column joint under progressive collapse scenario. A two-dimensional DIC system was implemented in parallel with LVDT measurements to verify the accuracy and assess its capability in detecting local deformation. The results show that displacement field obtained from DIC exhibits a high correlation with those from LVDT, particularly maintaining stability in the large-deformation stage when contact sensors failed to record data. Full-field DIC data enable direct identification of the location, direction, and width of cracks throughout different loading stages. Crack widths at two characteristic states, i.e., TT1 (initial cracking) and TT2 (yielding of bottom reinforcement), were compared with predictions in accordance with EN 1992-1-1 (2004) [1]. The comparison reveals significant discrepancies between experimental results and theoretical predictions during the post-yield stage, thereby clarifying the limitations of conventional design formulas under large deformation conditions. This confirms the potential of DIC as an effective experimental tool for evaluating complex failure behaviors in PC structures under large deformation stage that are not fully captured by current computational models.

*Keywords:* Digital Image Correlation (DIC); precast reinforced concrete; beam-column joint; progressive collapse; crack width; EN 1992-1-1 (2004).

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(1V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(1V)-07) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, việc đánh giá chính xác ứng xử của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) dưới tác dụng của các trạng thái tải trọng phức tạp đã trở thành một yêu cầu cấp thiết đối với cả công

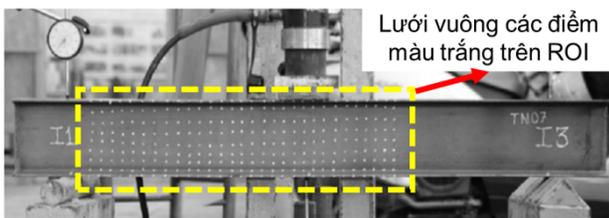
\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [hungnv4@huce.edu.vn](mailto:hungnv4@huce.edu.vn) (Hùng, N. V.)

tác nghiên cứu và thực tiễn kỹ thuật. Ở Việt Nam, trong các thí nghiệm cơ học vật liệu và cấu kiện BTCT, các thiết bị đo tiếp xúc truyền thống như đồng hồ so, cảm biến dịch chuyển vi sai tuyến tính (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) hay tem điện trở đo biến dạng tỷ đối (strain gauge) vẫn được sử dụng phổ biến để theo dõi biến dạng và chuyển vị. Tuy nhiên, ngoài hạn chế về số lượng do chi phí thiết bị tương đối cao, các phương pháp này chỉ ghi nhận được thông tin tại những điểm đo cục bộ, mà không phản ánh được trường biến dạng và chuyển vị trên toàn bộ cấu kiện [2–5].

Cùng với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ xử lý ảnh và cảm biến quang học, các phương pháp đo biến dạng không tiếp xúc đã trở thành xu hướng chủ đạo trong lĩnh vực cơ học thực nghiệm. Trong số đó, kỹ thuật Tương quan ảnh số (Digital Image Correlation - DIC) nổi lên như một công cụ mạnh mẽ và linh hoạt trong việc theo dõi chuyển vị và biến dạng của vật liệu. Được phát triển từ đầu những năm 1980 bởi Peter Rastogi và Mike Sutton [6], DIC cho phép ghi nhận trực tiếp sự dịch chuyển của bề mặt vật liệu thông qua việc so sánh các ảnh số thu được trong quá trình chịu tải. Phương pháp này có thể áp dụng cho cả phân tích hai chiều và ba chiều, cung cấp dữ liệu toàn trường với độ chính xác cao, từ đó cho phép mô tả trực quan và chi tiết quá trình hình thành, lan truyền vết nứt của các cấu kiện BTCT, điều mà các phương pháp đo tiếp xúc truyền thống khó đạt được.

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chứng minh tính hiệu quả của kỹ thuật DIC trong phân tích ứng xử của kết cấu BTCT dưới tác dụng của các loại tải trọng khác nhau. Küntz và cs. [7] đã sử dụng DIC để khảo sát sự phát triển của vết nứt trong dầm BTCT chịu uốn, trong khi Destrebecq và cs. [8] áp dụng phương pháp này nhằm đánh giá trường biến dạng trong dầm BTCT có cốt sợi. Mahal và cs. [9] nghiên cứu cơ chế phá hoại mỏi của dầm BTCT cũng như hiệu quả gia cường bằng vật liệu polymer cốt sợi thông qua DIC. Gần đây hơn, Forquin và Chen, cùng với Nguyễn và Tan [3, 10–13], đã khai thác kỹ thuật này để phân tích phá hoại lũy tiến và đánh giá khả năng chịu lực sau động đất của kết cấu BTCT. Bên cạnh đó, Phạm và Tan [14] cũng sử dụng camera tốc độ cao để ghi nhận ứng xử tĩnh và động của kết cấu trong kịch bản mất cột đột ngột. Ngoài ra, DIC cũng được chứng minh là một công cụ hữu hiệu trong việc theo dõi và nhận dạng cơ chế phá hoại cắt, như thể hiện trong các nghiên cứu của Campana và cs., Huber và cs., và Cavagnis và cs. [15–17]. Kết quả từ các nghiên cứu này khẳng định dữ liệu toàn trường thu được bằng DIC có thể làm sáng tỏ mối quan hệ giữa biến dạng cục bộ, sự phát triển của vết nứt và quá trình suy giảm khả năng chịu tải của cấu kiện.

Gần đây, các phương pháp máy học (machine learning - ML) và trí tuệ nhân tạo (artificial intelligence - AI) cũng bắt đầu được ứng dụng trong xử lý dữ liệu DIC [18–20]. Các mô hình học sâu cho phép cải thiện độ ổn định truy vết subset, giảm nhiễu và tự động hóa việc nhận dạng, theo dõi sự phát triển của vết nứt từ chuỗi ảnh thí nghiệm. Xu hướng này cho thấy tiềm năng đáng kể trong việc nâng cao độ chính xác và khả năng dự báo hư hại của DIC, đặc biệt đối với các thí nghiệm xuất hiện chuyển vị lớn hoặc hình học thay đổi phức tạp.



(a) Dầm thép TN07 [21]



(b) Thí nghiệm dầm BTCT TN08 [22]

Hình 1. Ứng dụng DIC trong đo chuyển vị của dầm chịu uốn

Tại Việt Nam, việc ứng dụng kỹ thuật DIC trong nghiên cứu kết cấu vẫn còn hạn chế. Bảng và

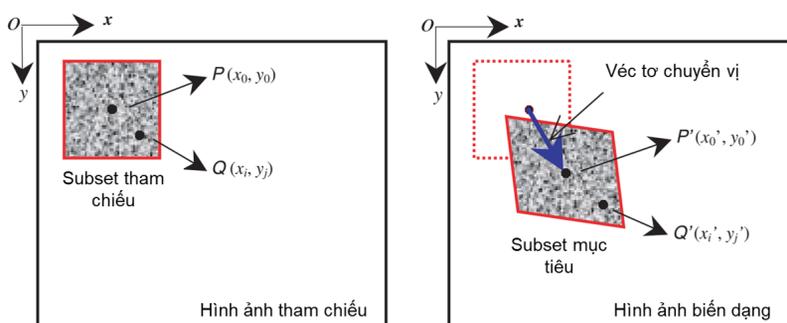
Thống [23] đã áp dụng DIC để xác định trường biến dạng tại các mối hàn. Phú và cs. cùng Quang và cs. [21, 22] sử dụng kỹ thuật này để đo chuyển vị của dầm thép và dầm BTCT chịu uốn (Hình 1). Tuy nhiên, nghiên cứu của Phú và cs. gặp phải sai số do rung động và thay đổi tiêu cự trong quá trình ghi hình, dẫn đến chênh lệch đáng kể giữa kết quả DIC và dữ liệu đo từ LVDT. Trong khi đó, ở nghiên cứu của Quang và cs., khoảng cách chụp ngắn (khoảng 1 m, xấp xỉ chiều dài vùng quan tâm – Region of Interest, ROI) được cho là có thể gây ra sự méo hình (distortion), ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của phép đo [24]. Ngoài ra, cả hai nghiên cứu trên đều chủ yếu tập trung vào đo chuyển vị, trong khi phân tích mô hình vết nứt mới chỉ dừng ở mức định tính. Tương tự như vậy, Sơn và Dương [25] gần đây đã sử dụng kỹ thuật DIC để thu nhận hình thái vết nứt trong khối xây gạch đất tự chèn, song cũng chủ yếu dừng ở mức mô tả sơ bộ.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của kỹ thuật tương quan ảnh số hai chiều (2D-DIC, gọi tắt là DIC) trong việc xác định trường biến dạng và phân tích hình thái vết nứt tại nút dầm-cột BTCT lắp ghép dưới kích bản phá hủy lũy tiến. Phương pháp DIC được triển khai song song với hệ đo LVDT để đối chiếu và kiểm chứng kết quả. Ngoài ra, dữ liệu về bề rộng và phân bố vết nứt được so sánh với các công thức dự báo theo tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004) [1] nhằm đánh giá mức độ phù hợp của DIC trong phân tích vết nứt của kết cấu BTCT lắp ghép. Kết quả thu được không chỉ góp phần khẳng định tính khả thi của kỹ thuật DIC trong điều kiện thí nghiệm trong nước, mà còn mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi hơn trong nghiên cứu và đánh giá kết cấu BTCT lắp ghép chịu tác động của các tải trọng đặc biệt.

## 2. Kỹ thuật tương quan ảnh số

### 2.1. Nguyên lý cơ bản

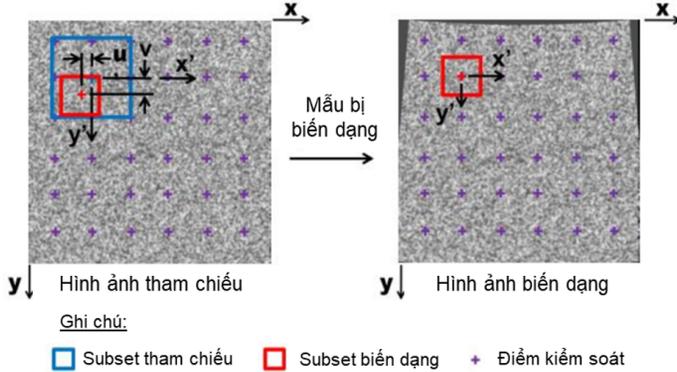
Kỹ thuật DIC được thực hiện giữa hai hình ảnh số được chụp trước và sau biến dạng mẫu. Các hình ảnh này lần lượt được gọi là hình ảnh tham chiếu (hoặc hình ảnh chưa biến dạng) và hình ảnh mục tiêu (hoặc hình ảnh đã biến dạng) [24]. Bằng cách sử dụng điểm ảnh ngẫu nhiên được áp dụng trên bề mặt của mẫu thử, có thể thu được dịch chuyển toàn trường bằng cách theo dõi và so khớp các vùng con (subset) của ảnh trước và sau biến dạng. Một subset, như minh họa trong Hình 2, là một hình vuông có kích thước  $(2M+1) \times (2M+1)$  pixel, được lấy từ hình ảnh tham chiếu, trong đó điểm trung tâm  $P(x_0, y_0)$  được theo dõi để xác định vị trí tương ứng của nó trên hình ảnh đã biến dạng.



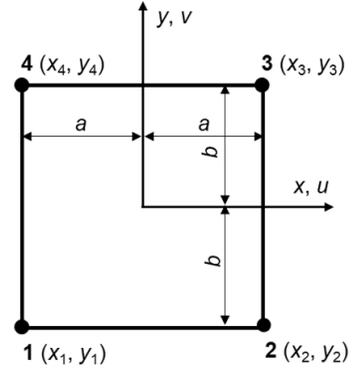
Hình 2. Sơ đồ minh họa của một subset vuông tham chiếu trước biến dạng và một subset mục tiêu sau biến dạng [24]

Để đánh giá mức độ tương đồng giữa subset tham chiếu và subset biến dạng, một tiêu chuẩn tương quan chéo (cross-correlation, CC) hoặc tiêu chuẩn tương quan tổng bình phương sai khác (sum-squared difference, SSD) phải được xác định trước [24]. Quá trình so khớp được thực hiện bằng cách tìm vị trí đỉnh của phân bố các hệ số tương quan. Khi hệ số tương quan cực đại hoặc cực tiểu được

phát hiện, vị trí của subset biến dạng có thể được xác định. Sự khác biệt về vị trí giữa các subset dẫn đến các dịch chuyển trong mặt phẳng  $u$  và  $v$  như thể hiện trên Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ minh họa của phân tích tương quan ảnh [26]



Hình 4. Sơ đồ phần tử hình chữ nhật bốn nút (four-node rectangular element)

Các biến dạng được tính toán bằng cách nội suy các dịch chuyển thô sử dụng các phần tử 4 nút với các hàm dạng tuyến tính để xác định các vết nứt rời rạc trong mẫu thí nghiệm. Hình 4 thể hiện sơ đồ của phần tử hình chữ nhật bốn nút. Các hàm dạng song tuyến tính  $N_1, N_2, N_3$ , và  $N_4$  của nó được mô tả trên các phương trình (1), (2), (3) và (4) tương ứng. Theo đó, mối quan hệ biến dạng-chuyển vị của phần tử được cho bởi phương trình (5).

$$N_1 = \frac{1}{4ab} (a - x) (b - y) \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4ab} (a + x) (b - y) \quad (2)$$

$$N_3 = \frac{1}{4ab} (a + x) (b + y) \quad (3)$$

$$N_4 = \frac{1}{4ab} (a - x) (b + y) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

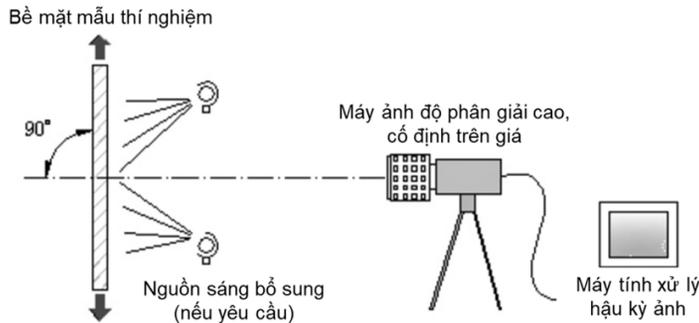
Phần sau đây trình bày tóm tắt cách triển khai kỹ thuật DIC trên một mẫu thí nghiệm trong không gian hai chiều.

## 2.2. Triển khai kỹ thuật tương quan ảnh số trong chương trình thí nghiệm

Kỹ thuật DIC có thể được triển khai trên mẫu thí nghiệm theo ba bước chính, như minh họa trong Hình 5:

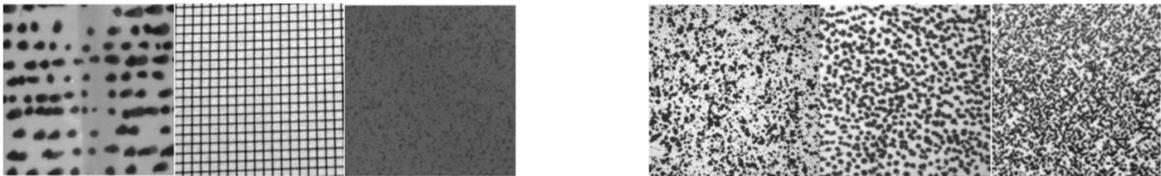
- Chuẩn bị mẫu thí nghiệm và bố trí hệ thống chụp ảnh.

- Ghi lại hình ảnh trước và sau khi gia tải tại mỗi cấp tải trọng.
- Xử lý các hình ảnh thu được bằng chương trình máy tính để thu được các trường chuyển vị và biến dạng.



Hình 5. Sơ đồ mô tả công tác triển khai kỹ thuật DIC [24]

Bề mặt mẫu cần được làm phẳng và phủ lớp điểm ảnh ngẫu nhiên để phục vụ quá trình tương quan. Các điểm ảnh này có thể là vân tự nhiên hoặc được tạo thủ công bằng sơn đen - trắng nhằm tăng độ tương phản. Độ chính xác của phép đo DIC phụ thuộc đáng kể vào chất lượng mẫu điểm ảnh. Cụ thể, mẫu điểm ảnh ngẫu nhiên lý tưởng phải là mẫu không chu kỳ, không có hướng ưu tiên và có độ tương phản cao. Hình 6 minh họa ví dụ về các mẫu có chất lượng khác nhau theo khuyến nghị của AN-1701 [27].



(a) Mẫu có đặc tính kém

(b) Mẫu có đặc tính tốt

Hình 6. Ví dụ về mẫu điểm ảnh ngẫu nhiên theo AN-1701 [27]

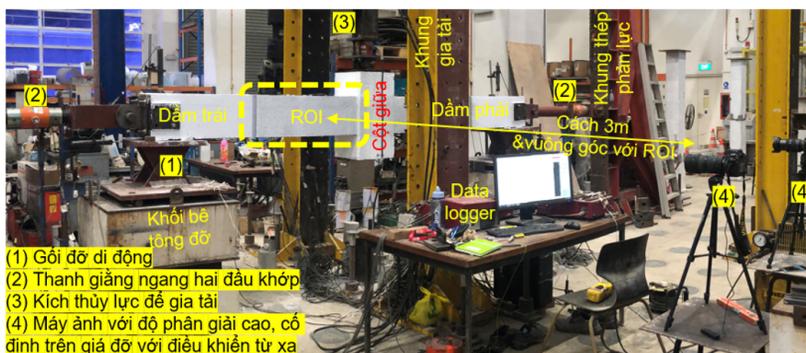
Để đảm bảo kết quả chính xác, máy ảnh phải được thiết lập với trục quang học vuông góc với bề mặt của mẫu thử (Hình 5). Do hình ảnh là phản chiếu 2D của bề mặt mẫu, để đảm bảo rằng các dịch chuyển ước tính và dịch chuyển thực tế là giống nhau, bề mặt của mẫu thử phải phẳng và duy trì song song với cảm biến CCD (Charge Coupled Device) của máy ảnh và các chuyển động ngoài phẳng của mẫu thử phải nhỏ đến mức có thể bỏ qua. Trong quá trình ghi hình, việc cố định chắc chắn máy ảnh trên giá đỡ vững chắc và loại bỏ mọi rung động là đặc biệt quan trọng, bởi rung động hoặc dịch chuyển nhỏ của máy có thể gây ra sai số đáng kể trong phép đo DIC, nhất là khi phân tích trường biến dạng ở mức vi mô.

Khoảng cách từ máy ảnh đến bề mặt mẫu được khuyến nghị cách bề mặt mẫu một khoảng vừa đủ (khoảng ba lần kích thước lớn nhất của vùng quan tâm), nhưng không quá gần, để giảm thiểu ảnh hưởng của sự méo hình đến kết quả phân tích. Bên cạnh đó, ánh sáng tới bề mặt mẫu thử tại vùng quan tâm phải được duy trì đủ, ổn định và đồng đều trong suốt quá trình thí nghiệm. Việc sử dụng camera độ phân giải cao, cảm biến CCD chất lượng tốt và ống kính telecentric giúp nâng cao độ chính xác của phép đo.

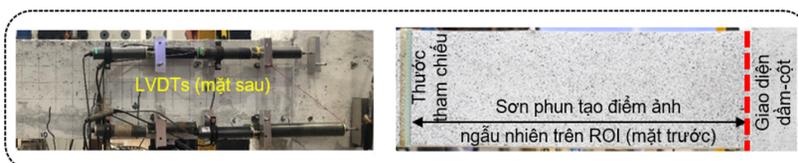
Trước khi gia tải, một ảnh tham chiếu được chụp làm cơ sở so sánh. Các ảnh tiếp theo được ghi lại tại mỗi cấp tải để phục vụ phân tích hậu kỳ, bao gồm xác định trường biến dạng, sự phát triển vết nứt và mô hình phá hoại.

### 3. Thiết lập kỹ thuật tương quan ảnh số trên mẫu dầm-cột BTCT lắp ghép

Trong nghiên cứu này, kỹ thuật DIC được triển khai để phân tích trường biến dạng và chuyển vị của nút dầm-cột trong (interior beam-column joint) BTCT lắp ghép. Mẫu thí nghiệm được lựa chọn là P-I-A, một trong bốn nút khung đã được thí nghiệm nhằm đánh giá ứng xử kết cấu dưới kích bản phá hủy lũy tiến trong nghiên cứu của Nguyễn và Tan [11]. Các thông tin chi tiết về cấu tạo, bố trí cốt thép, sơ đồ thí nghiệm và thiết bị đo, cũng như kết quả ứng xử tổng thể của mẫu này đã được trình bày đầy đủ trong công trình nói trên. Cần nhấn mạnh rằng, nghiên cứu của Nguyễn và Tan [11] mới chỉ giới thiệu sơ bộ hình thái vết nứt thu được từ phân tích DIC, trong khi nghiên cứu hiện tại tập trung khai thác sâu hơn dữ liệu toàn trường để mô tả chi tiết trường biến dạng trên bề mặt kết cấu, từ đó làm rõ cơ chế hình thành, phát triển và lan truyền vết nứt qua các giai đoạn chịu tải khác nhau cho đến khi mẫu bị phá hoại hoàn toàn.



(a) Tổng thể thí nghiệm



(b) Triển khai LVDT và DIC trên vùng quan tâm

Hình 7. Sơ đồ thí nghiệm (chế bản lại từ [11])

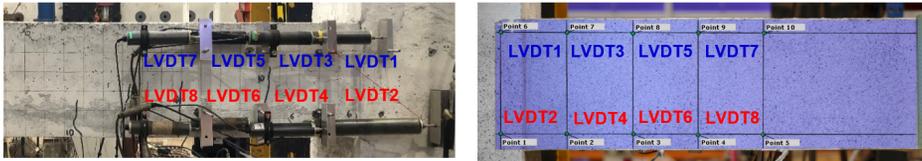
Hình 7 thể hiện thiết lập thí nghiệm cho nút khung dưới kích bản mắt cột giữa. Trên mặt của vùng quan tâm (region of interest, ROI), có chiều dài bằng ba lần chiều cao dầm tính từ giao diện dầm-cột, các điểm ảnh ngẫu nhiên được tạo ra bằng cách phun sơn đen lên bề mặt dầm đã được phủ một lớp sơn trắng để tăng độ tương phản hình ảnh như hướng dẫn của AN-1701 [27]. Lưu ý rằng, do tính giòn của lớp sơn bề mặt mỏng, giả định rằng ảnh hưởng của lớp này là không đáng kể đến các phép đo vết nứt. Hai vùng ROI được bố trí ở dầm bên trái và bên phải của cột giữa, được quan sát đồng thời bởi hai camera độ phân giải cao (ký hiệu (4) trong Hình 7), có trục quang học vuông góc với bề mặt ROI. Ánh sáng ổn định và đồng đều được áp dụng trong suốt quá trình thí nghiệm. Do khoảng cách từ camera đến ROI là khoảng 3 m, lớn hơn ba lần kích thước lớn nhất của vùng quan tâm, ảnh hưởng của sự méo hình khi xử lý hậu kỳ hình ảnh đã được giảm thiểu đến mức chấp nhận được [24].

Trước khi gia tải, ảnh hiệu chuẩn được chụp để xác định tham số ban đầu. Sau đó, ảnh được ghi lại tại mỗi bước tăng chuyển vị 2 mm (giai đoạn đàn hồi - elastic stage) và 5 mm (giai đoạn ngoài đàn hồi - inelastic stage) của cột giữa. Các ảnh này được xử lý bằng phần mềm GOM Correlate Professional (2024) [28] để thu được trường chuyển vị, độ mở vết nứt và cơ chế phá hoại của nút dầm-cột.

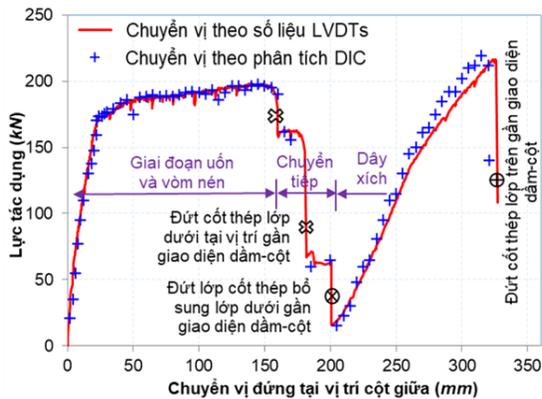
#### 4. Phân tích trường biến dạng và mô hình vết nứt sử dụng kỹ thuật DIC

##### 4.1. Xác minh tính chính xác của phép đo tương quan ảnh

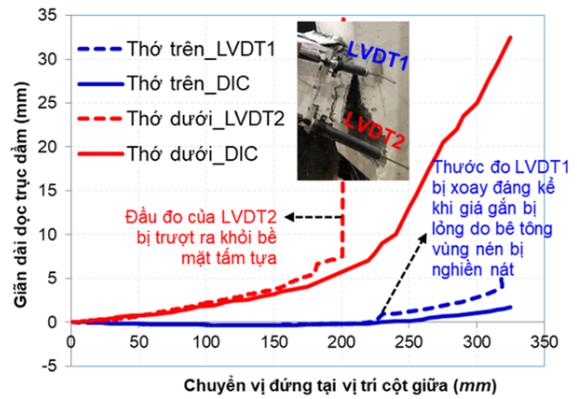
Độ chính xác của kỹ thuật DIC được kiểm chứng thông qua so sánh kết quả chuyển vị với dữ liệu đo từ hệ thống LVDTs bố trí trên cùng ROI (Hình 8). Các điểm đo DIC được lựa chọn trùng với vị trí đặt LVDTs nhằm thiết lập mối tương quan giữa hai phương pháp. Hai quan hệ chính được đối chiếu gồm: (i) quan hệ giữa lực tác dụng và chuyển vị thẳng đứng tại cột giữa, và (ii) quan hệ giữa biến dạng dọc thớ trên (tại LVDT1) và thớ dưới (tại LVDT2) ở giao diện dầm-cột với chuyển vị của cột giữa. Kết quả so sánh được trình bày trong Hình 9(a) và Hình 9(b) tương ứng.



Hình 8. Bố trí LVDTs (hình trái) và vị trí tương ứng trong phân tích DIC (hình phải)



(a) Quan hệ lực tác dụng và chuyển vị đứng tại cột giữa



(b) Giãn dài dọc trục dầm gần giao diện dầm-cột vs chuyển vị đứng tại cột giữa

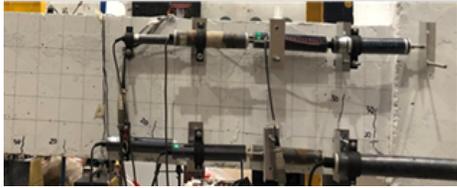
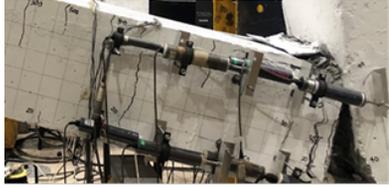
Hình 9. So sánh kết quả giữa phép đo từ LVDTs và DIC

Tổng cộng 71 bước phân tích DIC được thực hiện, tương ứng với 71 mức tăng chuyển vị đứng của cột giữa cho đến khi mẫu bị phá hoại hoàn toàn. Trong giai đoạn đàn hồi và phần lớn giai đoạn ngoài đàn hồi, ảnh được chụp định kỳ với bước chuyển vị 2 mm và 5 mm theo kế hoạch. Tuy nhiên, quá trình thí nghiệm đi qua vùng chuyển tiếp giữa hiệu ứng vòm nén (Compressive Arch Action - CAA, giai đoạn kết cấu kháng lại tải trọng nhờ lực nén dọc trục dầm) và hiệu ứng dây xích (Catenary Action - CA, giai đoạn kết cấu làm việc chịu kéo như hệ dây xích ở độ võng lớn). Đây là hai cơ chế đặc thù giúp gia tăng sức kháng của kết cấu dưới kịch bản phá hủy lũy tiến, vốn chỉ được huy động hiệu quả khi độ cứng ngang được cung cấp đầy đủ ở cả hai phía [29]. Tại vùng chuyển tiếp này, khi cốt thép lớp dưới của dầm gần giao diện dầm-cột bị đứt gãy, nút khung mất đột ngột khả năng kháng xoay. Điều này dẫn đến chuyển vị gia tăng nhanh chóng, khiến hệ thống không thể duy trì tần suất chụp ở bước 5 mm. Hiện tượng này thể hiện rõ qua mật độ điểm dữ liệu DIC bị thưa hơn trong vùng chuyển tiếp này, như thể hiện trong Hình 9(a).

Như thể hiện ở Hình 9(a), đường cong lực-chuyển vị thu được từ DIC cho thấy sự tương đồng cao với kết quả từ LVDTs. Trong khi đó, Hình 9(b) chỉ ra rằng độ giãn dài dọc trục của thớ trên (đường màu xanh) và thớ dưới (đường màu đỏ) từ hai phương pháp gần như trùng khớp, ngoại trừ ở giai đoạn

biến dạng lớn. Ở giai đoạn này, độ võng của dầm lớn và phát sinh chuyển vị ngoài mặt phẳng, làm thay đổi khoảng cách từ camera tới mẫu và giảm độ ổn định của thuật toán truy vết subset của DIC; do đó, sai số của DIC có xu hướng tăng dần ở các bước tải cuối. Đồng thời, sự sai khác giữa hai phương pháp còn đến từ việc mất ổn định của giá gắn (mounting bracket) khi vết nứt mở rộng và bê tông vùng nén bị ép vỡ, khiến LVDT1 thay đổi phạm vi đo và LVDT2 mất tín hiệu khi đầu đo trượt khỏi tấm tựa ở chuyển vị khoảng 200 mm (hình chèn trong Hình 9(b)). Ngược lại, kỹ thuật DIC vẫn ghi nhận đầy đủ xu hướng phát triển của trường chuyển vị trong giai đoạn này, mặc dù độ chính xác định lượng giảm đi do ảnh hưởng của chuyển vị ngoài mặt phẳng.

Bảng 1. Mô hình vết nứt thông qua quan sát trực quan và phân tích DIC

Trạng thái	Quan sát trực quan	Phân tích DIC
Biến dạng nhỏ <sup>(a)</sup>		
Biến dạng lớn <sup>(b)</sup>		

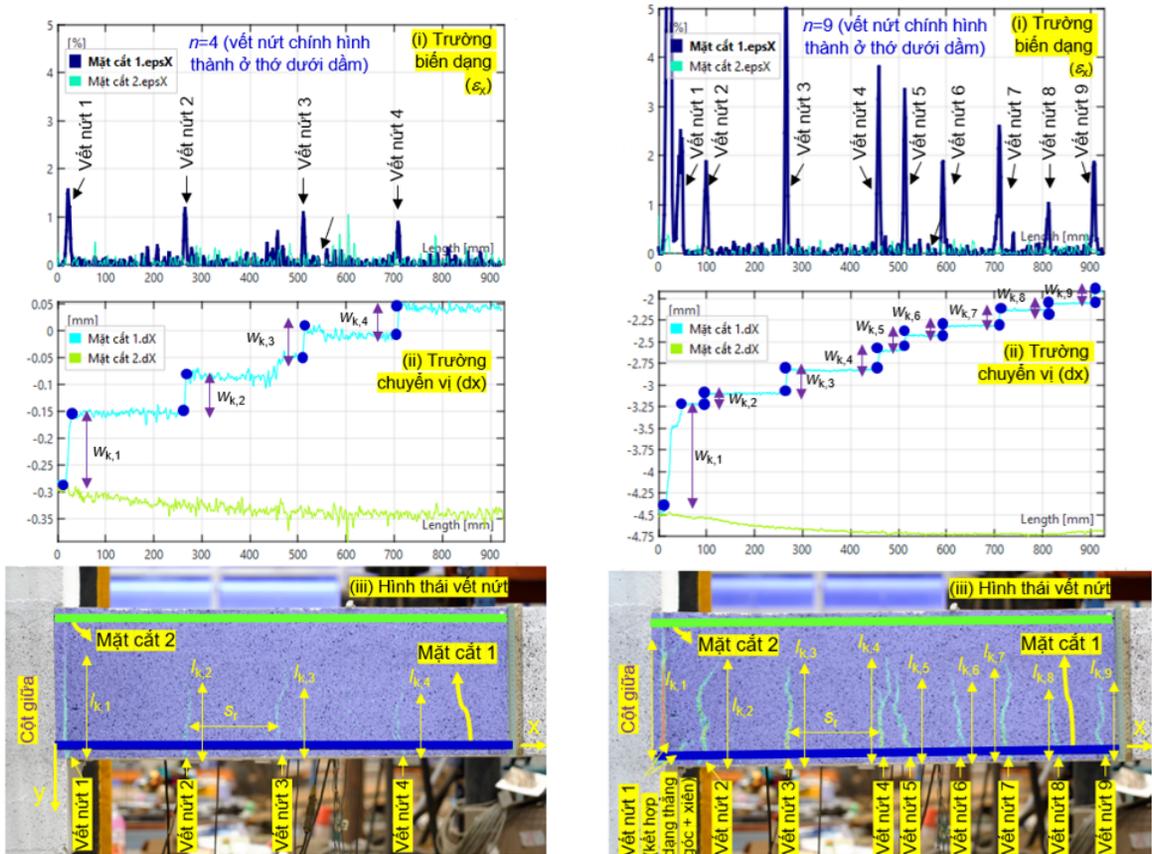
Ghi chú: <sup>(a)</sup> Giai đoạn ứng xử đàn hồi và nứt ban đầu trước khi cốt thép dầm chảy dẻo. <sup>(b)</sup> Giai đoạn làm việc sau chảy dẻo, chuyển vị tăng nhanh và kết cấu chuyển sang cơ chế vòm nén và cơ chế dẩy xích.

Bên cạnh độ chính xác cao, phương pháp này không chỉ xác định được các vết nứt chính mà còn phát hiện các vi nứt nhỏ, vốn khó nhận biết bằng quan sát trực quan như minh họa trong Bảng 1 [30]. Nhờ vậy, các cơ chế truyền lực thay thế (alternate load paths) trong các giai đoạn CAA và CA có thể được nhận dạng rõ ràng thông qua bản đồ trường biến dạng thu được từ DIC.

#### 4.2. Phép đo vết nứt

Sự hình thành và mở rộng của các vết nứt làm gián đoạn tính liên tục của trường biến dạng, dẫn đến sự thay đổi đột ngột trong chuyển vị cục bộ của các điểm đo nằm trong vùng chịu kéo của dầm BTCT. Nhờ khả năng ghi nhận trường dịch chuyển với độ phân giải cao, kỹ thuật DIC cho phép phát hiện và định lượng vết nứt ngay từ những giai đoạn đầu của quá trình gia tải. Để theo dõi quá trình này, hai mặt cắt được xem xét: (i) mặt cắt 1, trùng với vị trí cốt thép lớp dưới – nơi hình thành các vết nứt chủ đạo trong giai đoạn uốn và CAA; và (ii) mặt cắt 2, trùng với vị trí cốt thép lớp trên – vùng chịu kéo chính trong giai đoạn CA. Phân tích được thực hiện chi tiết tại hai trạng thái (TT) đặc trưng: TT1, khi xuất hiện các vết nứt thẳng góc đầu tiên (ứng suất lớn nhất trong cốt thép lớp dưới,  $\sigma_s$ , đạt khoảng 80% giới hạn chảy,  $f_y$ ); và TT2, khi cốt thép lớp dưới bắt đầu chảy dẻo ( $\sigma_s = f_y$ ). Các trạng thái khác được tổng hợp trong Bảng 2.

Hình 10 thể hiện rõ sự xuất hiện và phát triển của vết nứt thông qua bản đồ biến dạng màu. Mỗi gián đoạn trong trường biến dạng hoặc chuyển vị biểu thị sự tồn tại của một vết nứt, trong đó hoành độ của gián đoạn thể hiện vị trí vết nứt, còn biên độ dọc theo trục tung tương ứng với độ mở vết nứt. Từ đó, bề rộng vết nứt được tính toán dựa trên chênh lệch dịch chuyển giữa hai điểm nằm ở hai bên vết nứt.



(a) TT1: khi bắt đầu quan sát được vết nứt ở thớ dưới dầm ( $n_a = 4; \delta_y = 8; P = 77$ )

(b) TT2: tại điểm cốt thép lớp dưới dầm bắt đầu chảy dẻo ( $n_a = 11; \delta_y = 22; P = 170.5$ )

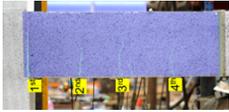
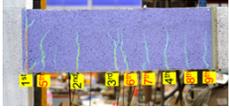
Ghi chú:  $n_a$  là số thứ tự bước chụp ảnh (Image acquisition step number, dao động từ 0 đến 71);  $\delta_y$  là chuyển vị thẳng đứng tại vị trí cột giữa (mm);  $P$  là lực tác dụng (kN);  $n$  là số lượng các vết nứt (đầm bên phải nứt);  $w_k$  là bề rộng của vết nứt (mm);  $s_r$  là khoảng cách giữa các vết nứt (mm);  $l_k$  là chiều dài vết nứt (mm).

Hình 10. Phát hiện và đo vết nứt từ trường biến dạng ( $\epsilon_x$ ) và trường chuyển vị ( $d_x$ ) cho TT1 và TT2 (minh họa cho đầm bên phải)

Ở TT1 (Hình 10(a)), bốn vết nứt thẳng góc (do uốn) được hình thành gần giao diện dầm-cột với bề rộng từ 0,05 mm (vết nứt số 4) đến 0,15 mm (vết nứt số 1 tại giao diện dầm-cột) cùng chiều dài tương ứng từ 100 mm đến 175 mm. Khi đạt TT2 (Hình 10(b)), số lượng vết nứt tăng lên chín, đồng thời có dấu hiệu hình thành một vết nứt nghiêng (do cắt) nối từ vết nứt thẳng góc số 1 sang vết nứt thẳng góc số 2, phản ánh tương tác giữa mômen uốn và lực cắt lớn. Ở các giai đoạn tải cao hơn, như tổng hợp trong Bảng 2, bê tông vùng nén bị ép vỡ, một số vết nứt thẳng góc mở rộng đến toàn chiều cao dầm, và xuất hiện thêm các vết nứt do kéo ở thớ trên khi cơ chế dây xích bắt đầu được huy động. Nhờ khả năng ghi nhận liên tục hình ảnh theo từng bước gia tải và phân tích biến dạng cục bộ với độ phân giải cao, kỹ thuật DIC đã cho phép xác định chính xác thời điểm khởi đầu, vị trí, hướng lan truyền và đặc trưng hình học của từng vết nứt, bao gồm số lượng, bề rộng và chiều dài.

Kết quả phân tích trường biến dạng và hình thành vết nứt tại các trạng thái đặc trưng là cơ sở để đối chiếu khả năng dự báo bề rộng vết nứt của tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004), được trình bày trong mục 5.

Bảng 2. Diễn biến và đặc trưng hình thái vết nứt trong nút dầm-cột từ phân tích DIC

Giai đoạn làm việc	Hình thái vết nứt	Tính chất đặc trưng				Ghi chú
		$n$	$s_r$	$w_k$	$l_k$	
Trước biến dạng ( $n_a = 0; \delta_y = 0; P = 0$ )		0	-	-	-	Ảnh hiệu chuẩn ban đầu
Thời điểm quan sát được vết nứt ( $n_a = 4; \delta_y = 8; P = 77$ )		4	200 ÷ 250	0,05 ÷ 0,16	100 ÷ 175	04 vết nứt thẳng góc (do uốn) ở thớ dưới dầm, bắt đầu từ giao diện dầm-cột và lan ra ngoài. Tải trọng tác dụng tăng nhanh.
Cốt thép lớp dưới dầm chảy dẻo ( $n_a = 11; \delta_y = 22; P = 170$ )		9	50 ÷ 200	0,1 ÷ 2,0	100 ÷ 200	Vết nứt thẳng góc phát triển nhanh về số lượng, bề rộng và chiều dài. Có dấu hiệu xuất hiện vết nứt nghiêng (do cắt) giữa vết nứt 1 và 2. Vết nứt tại giao diện dầm-cột nghiêm trọng nhất.
Bê tông vùng nén thớ trên bắt đầu bị ép vỡ ( $n_a = 23; \delta_y = 70; P = 189$ )		11	50 ÷ 200	0,05 ÷ 9,0	150 ÷ 275	02 vết nứt thẳng góc mới hình thành + vết nứt nghiêng trở nên rõ rệt. Cấu trúc vùng nén bị phá hoại cục bộ ở thớ trên gần giao diện dầm-cột. Biểu hiện giai đoạn chuyển từ đàn hồi sang dẻo. Tải trọng tác dụng tăng chậm.
Trước và sau khi kết thúc giai đoạn CAA ( $n_a = 45; \delta_y = 155; P = 195$ )		12	50 ÷ 100	0,05 ÷ 40,0	150 ÷ 300	Bê tông vùng nén bị ép vỡ nghiêm trọng. Vết nứt tại giao diện dầm-cột mở rộng xuyên suốt chiều cao dầm; các vết khác có xu hướng khép lại, đặc biệt sau khi cốt thép lớp dưới dầm bị đứt gãy.
Bắt đầu huy động CA ( $n_a = 54; \delta_y = 205; P = 15$ )		13	50 ÷ 100	0,05 ÷ 40,0	150 ÷ 300	Một số vết nứt ở thớ dưới dầm đóng lại; xuất hiện vết nứt do kéo đầu tiên ở thớ trên dầm. Biểu hiện giai đoạn tái phân bố nội lực; cốt thép lớp trên bắt đầu chịu kéo.
Ngay trước khi kết thúc CA ( $n_a = 71; \delta_y = 320; P = 212$ )		19	~100	0,5 ÷ 1,0	250 ÷ 300	Hình thành thêm nhiều vết nứt thẳng góc ở thớ trên; các vết có khoảng cách đều, tương ứng vị trí cốt đai. Một số vết nứt xuyên suốt chiều cao dầm; bề rộng và chiều dài đạt cực đại.

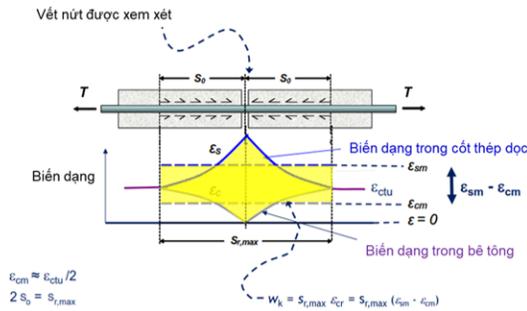
Ghi chú:  $n_a$  là số thứ tự bước chụp ảnh (Image acquisition step number, dao động từ 0 đến 71);  $\delta_y$  là chuyển vị thẳng đứng tại vị trí cột giữa (mm);  $P$  là lực tác dụng (kN);  $n$  là số lượng các vết nứt (dầm bên phải nút);  $w_k$  là bề rộng của vết nứt (mm);  $s_r$  là khoảng cách giữa các vết nứt (mm);  $l_k$  là chiều dài vết nứt (mm).

### 5. Đối chiếu bề rộng vết nứt thực nghiệm với tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004)

Bề rộng vết nứt là một trong những tiêu chí quan trọng phản ánh khả năng làm việc và độ bền lâu của kết cấu BTCT. Mặc dù tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004): Eurocode 2 - Thiết kế kết cấu bê tông, Phần 1-1 [1] được xây dựng chủ yếu cho trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) trong điều kiện làm việc ổn định, nghiên cứu này vẫn tiến hành đối chiếu kết quả thực nghiệm từ phân tích DIC với các công thức tính toán lý thuyết của tiêu chuẩn. Mục đích của việc so sánh này không nhằm đánh giá sự tuân thủ tiêu chuẩn trong kịch bản sụp đổ lũy tiến, mà nhằm định lượng mức độ sai lệch và làm rõ giới hạn

áp dụng của các mô hình dự báo nứt quy ước khi kết cấu chuyển từ giai đoạn đàn hồi sang giai đoạn biến dạng dẻo lớn. Do đó, bề rộng vết nứt được khảo sát tại hai trạng thái đặc trưng, đó là, TT1 (thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt thẳng góc trong vùng đàn hồi, tương ứng với miền áp dụng của tiêu chuẩn) và TT2 (khi cốt thép lớp dưới bắt đầu chảy dẻo, đánh dấu sự chuyển sang miền phi tuyến lớn), qua đó cung cấp cơ sở thực nghiệm để đánh giá sự khác biệt giữa lý thuyết thiết kế hiện hành và ứng xử thực tế của kết cấu chịu tải trọng đặc biệt.

5.1. Cách tiếp cận của tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004) về dự đoán bề rộng vết nứt



Ghi chú:  $w_k$  là bề rộng vết nứt (mm);  $s_{r,max}$  là khoảng cách lớn nhất giữa các vết nứt (mm);  $s_o$  là khoảng cách từ vị trí vết nứt tới điểm bê tông đạt giá trị biến dạng kéo cực hạn,  $s_o = s_{r,max}/2$  (mm);  $\epsilon_{cr}$  là biến dạng tương đối trung bình giữa cốt thép và bê tông (sau khi nứt);  $\epsilon_s$  và  $\epsilon_c$  lần lượt là biến dạng trong cốt thép và bê tông trong khi  $\epsilon_{sm}$  và  $\epsilon_{cm}$  lần lượt là biến dạng trung bình của chúng trong phạm vi  $s_{r,max}$ ;  $\epsilon_{ctu}$  là giới hạn biến dạng ở trạng thái kéo của bê tông;  $T$  là lực dọc trong cốt thép chịu kéo.

Hình 11. Sơ đồ mô tả nguyên lý xác định bề rộng vết nứt trong cấu kiện BTCT chịu uốn theo EN 1992-1-1 (2004)

Trong tính toán vết nứt, EN 1992-1-1 (2004) giả thiết rằng sự hình thành và phát triển vết nứt phụ thuộc chủ yếu vào mức độ biến dạng kéo giữa bê tông và cốt thép (Hình 11). Khi cấu kiện BTCT chịu uốn, vùng bê tông kéo bị nứt và ứng suất kéo được chuyển sang cốt thép thông qua lực dính bám. Do sự chênh lệch biến dạng giữa bê tông và cốt thép, vết nứt xuất hiện với một khoảng cách đặc trưng. Khi đó, bề rộng vết nứt  $w_k$  được xác định theo công thức sau:

$$w_k = s_{r,max} \times (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = s_{r,max} \times \epsilon_{cr} \tag{6}$$

trong đó khoảng cách lớn nhất giữa các vết nứt  $s_{r,max}$  được xác định như sau:

$$s_{r,max} = k_3 \times c + 0,425k_1 \times k_2 \times \phi / \rho_{p,eff} \tag{7}$$

với  $c$  là chiều dày lớp bảo vệ bê tông (mm),  $\phi$  là đường kính cốt thép (mm);  $k_1 = 0,8$ ;  $k_2 = 0,5$  và  $k_3 = 3,4$  (cấu kiện chịu uốn);  $\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$  là hàm lượng cốt thép hiệu dụng;  $A_s$  là diện tích cốt thép chịu kéo;  $A_{c,eff}$  là diện tích bê tông chịu kéo hiệu dụng (effective area of concrete in tension), tức là phần bê tông có hiệu quả trong việc kìm hãm sự mở rộng vết nứt và được xác định như sau:

$$A_{c,eff} = b \times h_{c,eff} \tag{8}$$

trong đó  $b$  là chiều rộng tiết diện (mm) và  $h_{c,eff}$  là chiều sâu hiệu dụng của vùng bê tông chịu kéo có hiệu quả (mm) được xác định như sau:

$$h_{c,eff} = \min \{0,5h; 2,5(c + 0,5\phi); (h - x) / 3\} \tag{9}$$

trong đó  $h$  là chiều cao tiết diện (mm);  $x$  là chiều cao vùng nén (mm) được ước lượng như dưới đây:

$$x = T / (f_{cd}b) \tag{10}$$

trong đó  $f_{cd}$  là cường độ chịu nén thiết kế của bê tông (MPa) và  $T$  là lực kéo trong cốt thép chịu kéo (N), được xác định qua biểu thức:

$$T = \sigma_s A_s \quad (11)$$

Đối với cấu kiện chịu uốn, biến dạng tương đối  $\varepsilon_{cr}$  có thể được xác định dựa theo biểu thức sau:

$$\varepsilon_{cr} = \left[ \sigma_s - k_t \times \left( f_{ct,eff} / \rho_{p,eff} \right) \times \left( 1 + \alpha_e / \rho_{p,eff} \right) \right] / E_s \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (12)$$

với  $\sigma_s$  là ứng suất trong cốt thép tại thời điểm tính toán;  $f_{ct,eff}$  là cường độ kéo của bê tông tại thời điểm nứt và tính bằng  $0,3 f_{ck}^{2/3}$  (Bảng 3.1, EN 1992-1-1 (2004));  $E_s$  là mô đun đàn hồi của thép;  $k_t$  là hệ số phụ thuộc thời gian tải trọng (0,6 với tải ngắn hạn; 0,4 với tải dài hạn);  $\alpha_e = E_s / E_{cm}$  là tỷ số mô đun đàn hồi của thép và bê tông.

### 5.2. So sánh bề rộng vết nứt với dự báo theo tiêu chuẩn EN 1992-1-1 (2004)

Bề rộng vết nứt được tính cho TT1 và TT2, sau đó so sánh với các giá trị thu được từ thực nghiệm thông qua phân tích DIC như tổng hợp trên Bảng 3.

Bảng 3. Bảng tổng hợp kết quả so sánh

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Dự báo		Thực nghiệm	
			TT1	TT2	TT1	TT2
Chiều cao bê tông hiệu dụng	$h_{c,eff}$	mm	37,17	21,47	-	-
Diện tích bê tông hiệu dụng	$A_{c,eff}$	mm <sup>2</sup>	11.150	6.441	-	-
Hàm lượng cốt thép hiệu dụng	$\rho_{p,eff}$		0,338	0,585	-	-
Khoảng cách lớn nhất giữa các vết nứt	$s_{r,max}$	mm	146,1	136,7	100 ÷ 175	100 ÷ 200
Biến dạng đặc trưng tại vết nứt	$\varepsilon_{cr}$		0,00126	0,00224	-	-
Bề rộng vết nứt lớn nhất	$w_{k,max}$	mm	0,184	0,306	0,16	1,8

Kết quả cho thấy EN 1992-1-1 (2004) dự báo khá chính xác bề rộng và khoảng cách vết nứt trong giai đoạn đàn hồi (TT1), với sai khác nhỏ hơn 15%. Tuy nhiên, tại TT2, khi cốt thép chảy dẻo, bề rộng vết nứt thực tế vượt xa giá trị dự báo (1,8 mm so với 0,306 mm). Nguyên nhân chính là do EN 1992-1-1 (2004) giả thiết vẫn duy trì bám dính hoàn toàn giữa bê tông và cốt thép, trong khi ở cấu kiện lắp ghép, hiện tượng mất bám dính cục bộ, tách lớp tại giao diện dầm cột đã làm gia tăng biến dạng kéo cục bộ trong thép, khiến vết nứt mở rộng nhanh hơn dự đoán.

So sánh với các giới hạn kiểm soát nứt trong EN 1992-1-1 (2004) ( $w_{k,limit} = 0,4$  mm và  $w_{k,limit} = 0,3$  mm lần lượt đối với cấu kiện BTCT trong môi trường khô ráo, không xâm thực và trong môi trường ẩm ướt, có khả năng ăn mòn nhẹ), kết quả cho thấy:

- Ở giai đoạn đàn hồi,  $w_{k,max} = 0,16$  mm nhỏ hơn giới hạn cho phép, cho thấy kết cấu đáp ứng yêu cầu sử dụng và bền lâu.

- Ở giai đoạn dẻo,  $w_{k,max} = 1,8$  mm vượt quá giới hạn kiểm soát theo tiêu chuẩn. Tuy nhiên, đây là trạng thái cực hạn tương ứng với tải trọng đặc biệt, trong đó kết cấu được phép xuất hiện hư hại cục bộ mà vẫn duy trì khả năng chịu lực tổng thể. Điều này phù hợp với triết lý thiết kế “damage-tolerant” của EN 1992-1-1 (2004), trong đó sự hình thành và phát triển của vết nứt ở mức kiểm soát được xem là một phần tự nhiên của quá trình làm việc của kết cấu BTCT. Triết lý này nhấn mạnh rằng hư hại cục bộ không đồng nghĩa với mất an toàn, mà trái lại, cho phép kết cấu tái phân bố nội lực và phát huy khả năng dẻo dự phòng, đảm bảo tính toàn vẹn và ổn định tổng thể của hệ chịu lực trước khi đạt đến trạng thái giới hạn cuối cùng.

## 6. Kết luận

Nghiên cứu này đã chứng minh hiệu quả và tính khả thi của kỹ thuật DIC trong phân tích biến dạng và mô hình hóa vết nứt của kết cấu BTCT lắp ghép. Bằng việc kết hợp đồng thời đo chuyển vị bằng LVDT và phân tích trường biến dạng toàn phần bằng DIC, kết quả cho thấy độ tương thích cao giữa hai phương pháp trong miền đàn hồi, đồng thời DIC thể hiện ưu thế rõ rệt khi kết cấu chuyển sang giai đoạn ngoài đàn hồi cũng như phá hoại hoàn toàn.

Phân tích DIC đã cho phép quan sát chi tiết quá trình hình thành, phát triển và tương tác giữa các hệ thống vết nứt uốn, cắt cũng như kéo trong vùng nút dầm-cột, giúp nhận diện rõ các cơ chế truyền lực thay thế như hiệu ứng vòm nén và dây xích. So sánh định lượng giữa bề rộng và khoảng cách vết nứt thực nghiệm và giá trị dự báo theo EN 1992-1-1 (2004) cho thấy:

- Trong giai đoạn đàn hồi, tiêu chuẩn dự đoán chính xác khoảng cách và bề rộng vết nứt với sai lệch dưới 15%, phù hợp cho thiết kế giới hạn nứt trong khai thác thường xuyên;

- Trong giai đoạn dẻo, EN 1992-1-1 (2004) không còn phản ánh đúng hoàn toàn cơ chế nứt thực tế, đặc biệt với cấu kiện BTCT lắp ghép, do ảnh hưởng của mất bám dính và sự gián đoạn của bê tông tại tiết diện dầm-cột.

Kết quả này khẳng định DIC là công cụ thực nghiệm phù hợp để hiệu chuẩn, mở rộng và cập nhật các mô hình dự báo vết nứt trong tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Ngoài giá trị khoa học, phương pháp này có tiềm năng ứng dụng cao trong đánh giá hư hại theo thời gian thực và nghiên cứu cơ chế phá hoại lũy tiến của kết cấu BTCT.

Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc tích hợp dữ liệu DIC với mô hình phần tử hữu hạn (FEM) nhằm xây dựng khung mô phỏng liên hợp “thực nghiệm-số” (hybrid DIC-FEM) cho phép dự đoán chính xác hơn quá trình nứt và biến dạng phi tuyến trong kết cấu bê tông hiện đại. Ngoài ra, việc kết hợp DIC với các phương pháp ML/AI cũng là một hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm nâng cao khả năng nhận dạng và dự báo hư hại trong các thí nghiệm chuyển vị lớn.

### Lời cảm ơn

Tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội thông qua đề tài nghiên cứu cấp trường mã số 24-2025/KHXD.

### Tài liệu tham khảo

- [1] European Committee for Standardization, EN 1992-1-1:2004 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- [2] Nguyen, V. H., Yu, J., Tan, K. H. (2022). [Component-based joint model for RC frames with conventional and special detailing against progressive collapse](#). *Structures*, 46:820–837.
- [3] Nguyen, V. H., Tran, M. H., Tan, K. H. (2024). Enhancing Crack Detection and Progressive Collapse Assessment of Earthquake-Damaged Precast Concrete Joints Using Digital Image Correlation. *International Conference on Engineering Structures*, Springer, 876–885.
- [4] Linh, N. N., Van Hung, N., Huy, N. X., Dat, P. X. (2019). [Double-curvature test of reinforced concrete columns using shaking table: a new test setup](#). *Civil Engineering Journal*, 5:1863–1876.
- [5] Hung, N. V., Huy, N. X., Thuy, P. T. T., Linh, N. N., Dat, P. X. (2020). [Shaking table tests on V-shaped RC columns at the weak ground storey of a building](#). *Magazine of Concrete Research*, 72:564–577.
- [6] Sutton, M. A., Wolters, W., Peters, W., Ranson, W., McNeill, S. (1983). [Determination of displacements using an improved digital correlation method](#). *Image and Vision Computing*, 1:133–139.
- [7] Küntz, M., Jolin, M., Bastien, J., Perez, F., Hild, F. (2006). [Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33: 1418–1425.
- [8] Destrebecq, J.-F., Toussaint, E., Ferrier, E. (2011). [Analysis of cracks and deformations in a full scale reinforced concrete beam using a digital image correlation technique](#). *Experimental Mechanics*, 51:879–890.

- [9] Mahal, M., Blanksvärd, T., Täljsten, B., Sas, G. (2015). [Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams](#). *Engineering Structures*, 105:277–288.
- [10] Forquin, P., Chen, W. (2017). [An experimental investigation of the progressive collapse resistance of beam-column RC sub-assemblages](#). *Construction and Building Materials*, 152:1068–1084.
- [11] Nguyen, V. H., Tan, K. H. (2023). [Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation](#). *Engineering Structures*, 293:116603.
- [12] Nguyen, V. H., Tan, K. H. (2024). [Progressive collapse behaviour of earthquake-damaged interior precast concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation](#). *Engineering Structures*, 306:117817.
- [13] Nguyen, V. H., Tan, K. H. (2025). [Experimental study on progressive collapse behaviour of intact and slightly earthquake-damaged exterior precast concrete joints, and finite element modelling of building performance](#). *Engineering Structures*, 333:120146.
- [14] Pham, A. T., Tan, K.-H. (2019). [Static and Dynamic Responses of Reinforced Concrete Structures under Sudden Column Removal Scenario Subjected to Distributed Loading](#). *Journal of Structural Engineering*, 145.
- [15] Campana, S., Fernández Ruiz, M., Anastasi, A., Muttoni, A. (2013). [Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics](#). *Magazine of Concrete Research*, 65:386–404.
- [16] Huber, P., Huber, T., Kollegger, J. (2016). [Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics](#). *Engineering Structures*, 113:41–58.
- [17] Cavagnis, F., Ruiz, M. F., Muttoni, A. (2018). [A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack](#). *Engineering Structures*, 157:300–315.
- [18] Liu, Y., Yu, L., Wang, Z., Pan, B. (2023). [Neutralizing the impact of heat haze on digital image correlation measurements via deep learning](#). *Optics and Lasers in Engineering*, 164:107522.
- [19] Chi, Y., Liu, Y., Pan, B. (2024). [Improving deep learning-based digital image correlation with domain decomposition method](#). *Experimental Mechanics*, 64:575–586.
- [20] Pan, B., Liu, Y. (2024). [User-independent, accurate and pixel-wise DIC measurements with a task-optimized neural network](#). *Experimental Mechanics*, 64:1199–1213.
- [21] Phu, N. T., Chuong, V. T., Hung, D. V., Duan, N. B. (2018). [Ứng dụng điểm ảnh xác định chuyển vị của kết cấu trong quá trình thí nghiệm](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 12(2):24–30.
- [22] Quang, N. V., Hiếu, N. T., Lành, L. P., Hiền, N. T. T. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm áp dụng phương pháp tương quan điểm ảnh \(DIC\) trong đo đạc chuyển vị của dầm bê tông cốt thép làm việc chịu uốn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVXD) - ĐHXDHN*, 15(5V):157–168.
- [23] Bằng, T. Q., Thống, B. H. (2018). [Xác định trường biến dạng trên toàn bộ chi tiết mối hàn bằng phương pháp tương quan ảnh số](#). *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 11:1–4.
- [24] Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A. (2009). [Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review](#). *Measurement Science and Technology*, 20:062001.
- [25] Sơn, H. T., Dương, T. T. (2025). [Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử nén đứng tâm của khối xây gạch đất xi măng dạng tự chèn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNVXD) - ĐHXDHN*, 19(2V):138–148.
- [26] Jones (2015). *Documentation for Matlab-based DIC code*. Urbana-Champaign, University of Illinois.
- [27] Correlated Solutions (2017). *Application Note AN-1701 Speckle Pattern Fundamentals*. Speckle Pattern Fundam., pages 1–13.
- [28] GOM GmbH (2021). *GOM Suite, GOM Correlate Pro*.
- [29] Yu, J., Tan, K.-H. (2013). [Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages](#). *Engineering Structures*, 55:90–106.
- [30] Nguyen, V. H., Pham, X. D., Tan, K. H. (2024). [Application of Headed Bars in Precast Concrete Wet Joints Under Accidental Loads: Experimental and Numerical Investigations](#). *International Colloquium on Performance, Protection & Strengthening of Structures Under Extreme Loading & Events*, Springer, 41–54.