

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

Nguyễn Văn Quang^{a,*}, Nguyễn Trung Hiếu^a, Lê Phước Lành^a, Nguyễn Thị Thu Hiền^a

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 30/07/2021, Sửa xong 14/09/2021, Chấp nhận đăng 15/09/2021

Tóm tắt

Phương pháp tương quan điểm ảnh (DIC) là phương pháp quang học, sử dụng máy ảnh kỹ thuật số ghi lại những thay đổi trên bề mặt mẫu thí nghiệm trước và sau khi biến dạng. Từ việc theo dõi và so sánh vị trí của các pixel có thể tính toán ra các thông số biến dạng và chuyển vị của mẫu thí nghiệm. Nội dung của bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm ứng dụng phương pháp DIC để khảo sát chuyển vị của kết cấu dầm bê tông (BT) và dầm bê tông cốt thép (BTCT) chịu uốn. Các giá trị chuyển vị xác định bằng phương pháp DIC được so sánh với kết quả đo trực tiếp bằng dụng cụ đo chuyển vị điện tử (LVDTs). Kết quả thu được cho thấy khi đo trên mẫu dầm BT và dầm BTCT thì chênh lệch của hai phép đo lần lượt bằng 14% và 8%. Những kết quả này cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng phương pháp DIC cho việc đo đạc chuyển vị của kết cấu BTCT đặc biệt trong các trường hợp đo đạc tại hiện trường khi mà phương pháp đo chuyển vị truyền thống không đáp ứng được.

Từ khoá: dầm BTCT; chuyển vị; DIC; LVDT; độ võng.

EXPERIMENTAL RESEARCH APPLICATION DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) METHOD TO MEASURE DISPLACEMENT OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract

Digital image correlation (DIC) is an optical method that uses a digital camera to record changes in the surface of a test specimen before and after deformation. From tracking and comparing the positions of the pixels, it is possible to calculate the deformation and displacement parameters of the test sample. The content of the article presents the results of experimental research applying the DIC method to survey the displacement of concrete beams and reinforced concrete beams under bending. Displacement values determined by the DIC method are compared with those measured directly by electronic displacement measuring instruments (LVDTs). The obtained results show that when measuring on concrete beams and reinforced concrete beams, the errors of the two measurements are 14% and 8%, respectively. These results show that it is possible to use the DIC method for measuring displacement. position of the reinforced concrete structure, especially in the case of field measurements when traditional displacement measurement methods are not suitable.

Keywords: reinforced concrete beams; digital image correlation (DIC); displacement; LVDT; deflection

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(5V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(5V)-13) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

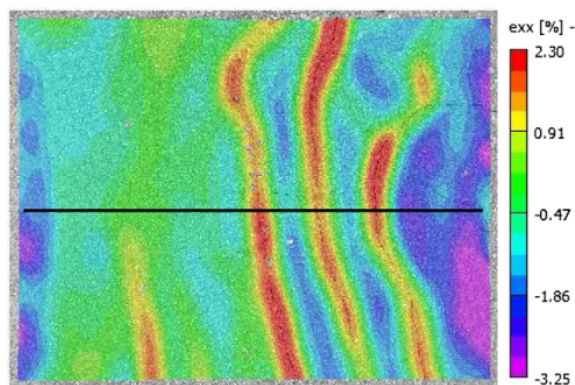
Trong kết cấu công trình, việc đo đạc các giá trị chuyển vị, biến dạng trên kết cấu là một trong những công cụ để định tính, định lượng các thông số đặc trưng cho độ cứng, độ bền, trạng thái ứng

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: quangnv@nuce.edu.vn (Quang, N. V.)

suất của kết cấu và vật liệu sử dụng. Từ các giá trị đó có thể đánh giá các ứng xử làm việc thực tế của kết cấu công trình. Để đo đặc biến dạng, chuyển vị của kết cấu công trình, thường sử dụng các dụng cụ như phiên điện trở, đồng hồ đo chuyển vị cơ (Indicator), dụng cụ đo chuyển vị cảm biến vi sai LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Các dụng cụ đo này được sử dụng phổ biến do nhiều ưu điểm như độ tin cậy cao, trực quan, dễ dàng thu thập và xử lý số liệu. Tuy nhiên nhược điểm chính của các thiết bị này chỉ đo được các giá trị điểm cục bộ tại những vị trí gắn dụng cụ đo, do đó cần số lượng thiết bị đo lớn, chi phí khá đắt đỏ, đồng thời dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như độ ẩm, nhiệt độ.

Gần đây, với sự phát triển bùng nổ về công nghệ trên thiết bị ghi hình, đặc biệt sự cải thiện đáng kể về chất lượng hình ảnh và tốc độ ghi hình trên giấy, dẫn đến có thể áp dụng phương pháp ghi hình trong việc khảo sát biến dạng và chuyển vị của kết cấu công trình. Một trong những phương pháp nổi bật, được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu và áp dụng rộng rãi hiện nay là phương pháp tương quan điểm ảnh DIC. Phương pháp này sử dụng máy ảnh kỹ thuật số, ghi lại các hình ảnh của mẫu trước và sau khi biến dạng, sau đó so sánh sự dịch chuyển giữa các pixel có thể tính toán ra các giá trị biến dạng và chuyển vị. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là không cần lắp đặt trực tiếp thiết bị đo trên mẫu thí nghiệm, đồng thời có thể ghi lại biến dạng, chuyển vị trên cả một vùng khảo sát, lắp đặt đo đặc dễ dàng và ít bị ảnh hưởng bởi các tác động thời tiết bên ngoài.

Phương pháp sử dụng thiết bị ghi hình để xác định giá trị chuyển vị và biến dạng được nghiên cứu từ khá lâu, được công bố chính thức lần đầu tiên vào năm 1985 bởi Chu và cs. [1], tuy nhiên do công nghệ ghi hình chưa phát triển nên các nghiên cứu này chỉ đưa ra các thuật toán trên lý thuyết. Thời gian sau đó, phương pháp này được nghiên cứu, phát triển bởi nhóm nghiên cứu của Goldrein và cs. [2], Zhang và cs. [3] với các tên gọi khác nhau như CASI, DSCM [4]. Hiện nay các nhà khoa học đều đồng ý sử dụng tên gọi DIC (Digital Image Correlation) cho phương pháp sử dụng thiết bị quang học để xác định chuyển vị và biến dạng trên mặt phẳng với các điểm ảnh ngẫu nhiên [5]. Phương pháp này được áp dụng khá nhiều trong việc đo đặc các giá trị biến dạng và chuyển vị trong kết cấu xây dựng. Các nghiên cứu của Fayyad và Lees về việc áp dụng phương pháp DIC trong kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) chịu uốn 3 điểm [6], các nghiên cứu của Rimkus và cs. [7], Hamrat và cs. [8] sử dụng phương pháp DIC trong việc xác định vị trí vết nứt trong kết cấu BTCT, và kết cấu BTCT sử dụng bê tông cốt sợi. Nghiên cứu của Fayyad và Lees [9] sử dụng DIC để nghiên cứu ứng xử của dầm BTCT sử dụng bê tông nhẹ và bê tông geopolimer. Các nghiên cứu của Zhao và cs. [10] sử dụng DIC để xác định vết nứt do co ngót của bê tông. Miura và cs. [11] sử dụng phương pháp DIC để xác định các



Hình 1. Áp dụng DIC để xác định thời điểm nứt do biến dạng co ngót của bê tông [9]

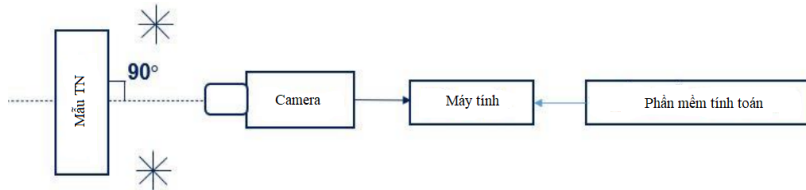
microcracking trên cầu kiện BTCT chịu nén. Ngoài ra, phương pháp DIC được sử dụng trên các công trình thực tế để đo chuyển vị của các công trình dân dụng và sử dụng phổ biến cho các công trình cầu [12–15].

Ở nước ta hiện nay, đã có một số nghiên cứu áp dụng phương pháp DIC để đo chuyển vị của kết cấu, như các nghiên cứu của nhóm tác giả Phu tại đại học Xây dựng với việc đo chuyển vị của các kết cấu dầm bê tông và dầm thép bằng phương pháp chụp hình với các điểm ảnh dạng lưới [16]. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong lĩnh vực này còn khá hạn chế, việc áp dụng phương pháp đo này trong các phòng thí nghiệm chuyên ngành kết cấu còn rất ít.

Nội dung bài báo trình bày về nghiên cứu thực nghiệm áp dụng phương pháp điểm ảnh DIC, trong đó các điểm ảnh phân bố một cách ngẫu nhiên, để đo đặc các giá trị chuyển vị của dầm bê tông và dầm BTCT làm việc chịu uốn. Đồng thời, dựa trên cơ sở xác định các vùng biến dạng cục bộ thông qua phân tích kết quả DIC bằng phần mềm GOM correlate 2020 phiên bản giới hạn [17], để dự đoán được sự hình thành, phát triển vết nứt trong từng cấp tải thí nghiệm. Các nghiên cứu thực nghiệm trong khuôn khổ bài báo được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

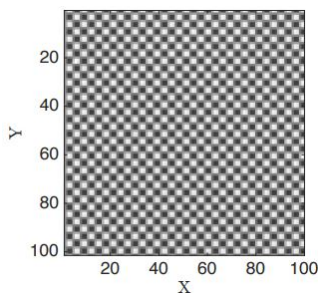
2. Một số nguyên lý cơ bản của phương pháp tương quan điểm ảnh (DIC)

Phương pháp tương quan điểm ảnh DIC là một phương pháp sử dụng kỹ thuật quang học, phương pháp này so sánh sự thay đổi của các bức ảnh kỹ thuật số thu thập được trong các giai đoạn làm việc trước và sau khi biến dạng của mẫu thí nghiệm. Mô hình thí nghiệm của phương pháp này được trình bày ở Hình 2.

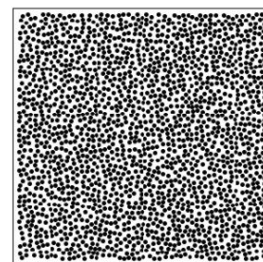


Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm của phương pháp DIC

Để tính toán ra chuyển vị của kết cấu dựa trên việc so sánh thay đổi vị trí các pixel, do đó các pixel cần có độ tương phản cao và được phân bố một lượng đủ lớn để quá trình sử dụng thuật toán được dễ dàng và có độ chính xác cao. Để tạo ra các pixel có độ tương phản cao trên bề mặt mẫu bằng cách phun lên các chấm ngẫu nhiên dạng kẻ lưới (Hình 3) hoặc các chấm ngẫu nhiên (Hình 4).

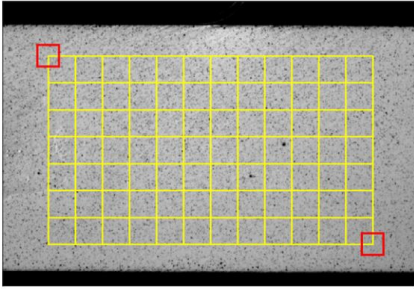


Hình 3. Bề mặt mẫu có điểm ảnh phân bố dạng kẻ lưới

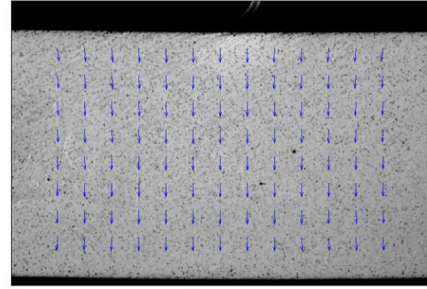


Hình 4. Bề mặt mẫu có điểm ảnh phân bố dạng ngẫu nhiên

Để các tính toán sự dịch chuyển các pixel trên điểm ảnh, hình ảnh ban đầu (chưa có tải trọng và biến dạng) được chia thành các hệ lưới ảo (Hình 5) hoặc chia thành các trường véc tơ (Hình 6) sau đó “nhặt” từng điểm trong từng ô để đi so sánh và tính toán sự dịch chuyển của các bức hình tiếp theo.

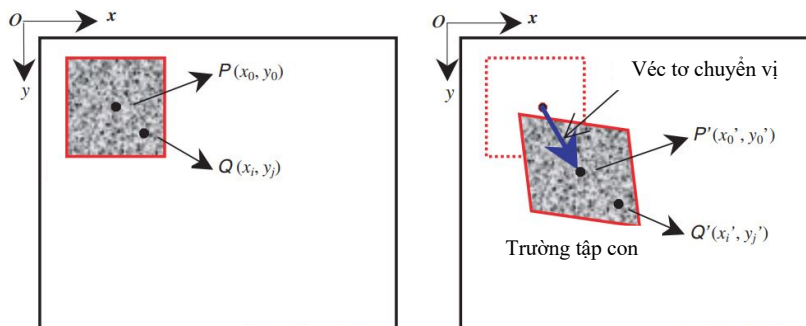


Hình 5. Phương pháp chia lưới ảo trên hệ điểm ảnh có sẵn



Hình 6. Phương pháp trường véc tơ trên hệ điểm ảnh có sẵn

Sau khi xác định vị trí điểm ảnh cần theo dõi, (điểm P trong Hình 7) để tính toán các chuyển vị của điểm P, tiến thành lập một trường tập con có kích thước $(2M+1) \times (2M+1)$ pixel sao cho trường tập con này có điểm $P(x_0, y_0)$ nằm chính giữa. Việc chọn cả trường tập con ngoài việc sử dụng cho tính toán của các thuật toán đồng thời có thể xem xét và đánh giá thông qua mức cường độ xám quanh vùng điểm P từ đó làm tăng độ chính xác khi tính toán chuyển vị và biến dạng.



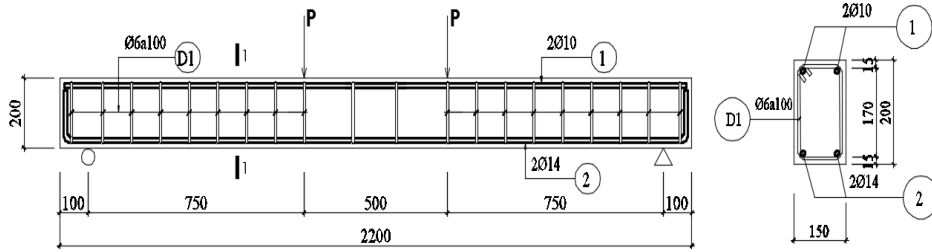
Hình 7. Hình thành trường tập con để xác định sự dịch chuyển của 1 điểm bất kì

Ngoài ra, một số yếu tố chính ảnh hưởng đến phương pháp DIC cần chú ý khi sử dụng phương pháp DIC là: (i) lựa chọn tiêu cự của ống kính (lens) khi ghi hình; (ii) khoảng cách giữa mẫu vật và máy ảnh và máy ảnh không song song với mẫu thí nghiệm; (iii) lựa chọn máy ảnh và chế độ lấy nét.

3. Nghiên cứu thực nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

Trong nghiên cứu này, 03 mẫu dầm bê tông kích thước $100 \times 400 \times 400$ mm và 03 mẫu dầm BTCT kích thước $150 \times 200 \times 2200$ mm được chế tạo. Các mẫu dầm bê tông và dầm BTCT sử dụng bê tông có cấp độ bền B25. Qua tính toán, để tránh cho các mẫu dầm BTCT thí nghiệm không bị phá hoại do lực cắt, lựa chọn cốt thép dọc chịu lực vùng kéo (phía dưới dầm) là $2\phi 14$, cốt thép dọc vùng nén (phía trên dầm) $2\phi 10$. Cốt thép đai $\phi 6$ khoảng cách 100 mm ở vùng giữa gối tựa dầm và vị trí tác dụng tải trọng. Chi tiết cấu tạo được trình bày trên Hình 8.



Hình 8. Chi tiết cấu tạo cốt thép các mẫu đầm thí nghiệm

Đối với các vật liệu chế tạo đầm, cường độ chịu nén của bê tông và cường độ chịu kéo của cốt thép được xác định thông qua thí nghiệm phá hoại. Tổng hợp các kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1 dưới đây. Trong đó, mỗi giá trị cường độ trình bày trong Bảng 1 được xác định bằng trung bình cộng kết quả thí nghiệm thu được từ 03 mẫu thí nghiệm.

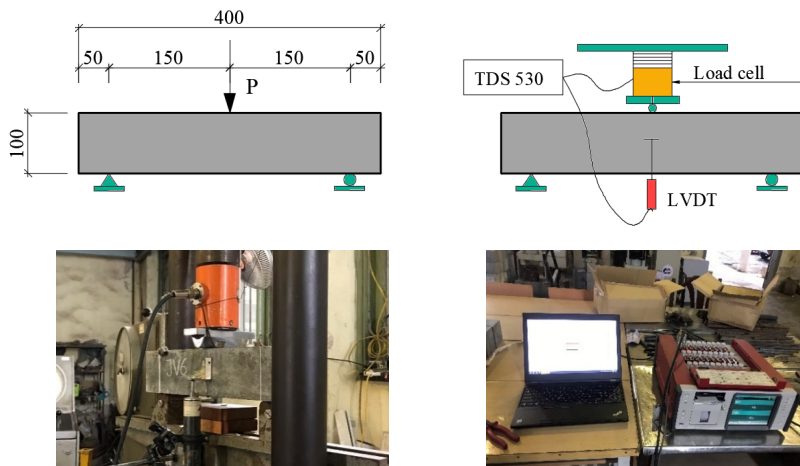
Bảng 1. Giá trị cường độ của bê tông và cốt thép sử dụng chế tạo các mẫu đầm

Cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày tuổi (mẫu thí nghiệm hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm)	27,7 MPa
Giới hạn chảy của thép Ø14	430 MPa
Giới hạn chảy của thép Ø8	380 MPa

3.2. Sơ đồ thí nghiệm và bố trí dụng cụ đo

a. Sơ đồ thí nghiệm mẫu đầm bê tông $100 \times 100 \times 400$

Mẫu đầm bê tông $100 \times 100 \times 400$ được thí nghiệm theo sơ đồ đầm đơn giản chịu uốn ba điểm (Hình 9). Dụng cụ đo chuyển vị LVDT được gắn ở mặt bên trước, tại vị trí giữa mẫu, mặt bên sau của mẫu thí nghiệm được phun điểm ảnh để sử dụng cho phép đo chuyển vị bằng phương pháp DIC. Dụng

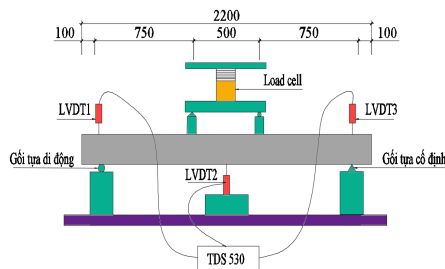


Hình 9. Sơ đồ thí nghiệm mẫu bê tông $100 \times 100 \times 400$

cụ đo LVDT sử dụng trong nghiên cứu do hãng Tokyo Sokky của Nhật Bản chế tạo với độ chính xác đến 10-6. Giá trị tải trọng tác dụng lên dầm được xác định thông qua dụng cụ đo lực điện tử (Load cell). Các dụng cụ đo lực, đo chuyển vị được kết nối với bộ thu thập và xử lý số liệu TDS 530 (Tokyo Sokki) cho phép ghi nhận tự động và đồng thời các số liệu thí nghiệm (01 giây/lần ghi).

b. Sơ đồ thí nghiệm mẫu dầm BTCT

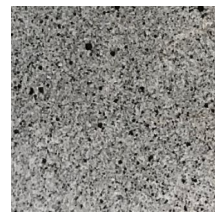
Các mẫu dầm BTCT được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản chịu uốn bốn như minh họa trên Hình 10. Dầm thí nghiệm chịu tác dụng của hai lực tập trung P, cách đều gối tựa mỗi bên 750 mm. Tải trọng được tạo ra bởi kích thủy lực và được đo đặc bằng thiết bị đo lực điện tử (Load-cell). Chuyển vị của các mẫu dầm BTCT thí nghiệm được xác định đồng thời bằng hai phương pháp: sử dụng các dụng cụ đo LVDT và bằng phương pháp DIC. Trong phương pháp đo bằng LVDT, sử dụng 03 LVDT, ký hiệu là LVDT1, LVDT2 và LVDT3, bố trí tại hai gối tựa và ở giữa dầm. Tải trọng tác dụng lên các mẫu thí nghiệm được tăng với tốc độ đồng đều, không gây ra lực xung lên kết cấu thí nghiệm, cho đến khi dầm bị phá hoại thì dừng lại.



Hình 10. Sơ đồ thí nghiệm dầm BTCT

3.3. Quy trình chuẩn bị và đo đặc chuyển vị bằng phương pháp DIC

Để đo chuyển vị bằng phương pháp DIC, một mặt bên của mẫu dầm bê tông và BTCT thí nghiệm sẽ được phun sơn nhằm tạo ra các điểm nhỏ phân bố ngẫu nhiên, với số lượng điểm ảnh được khuyến cáo lớn hơn 50 điểm ảnh trên 1 cm² [14]. Để tăng tính tương phản của các điểm ảnh và bề mặt mẫu, trước khi tiến hành phun sơn, tiến hành quét một lớp vôi trắng lên vùng bề mặt mẫu. Bề mặt mẫu thí nghiệm sau khi đã được quét vôi và phun sơn ảnh được minh họa trong Hình 11.



Hình 11. Bề mặt mẫu thí nghiệm sau khi xử lý phun sơn

Trong nghiên cứu này sử dụng máy ảnh Sony A6000 làm thiết bị ghi hình trong quá trình gia tải. Máy ảnh được gắn vào chân máy, đặt ở vị trí cố định bên ngoài mẫu thí nghiệm và bắt đầu ghi hình cùng thời điểm bắt đầu ghi số liệu của thiết bị TDS 530. Trong quá trình ghi hình, máy ảnh để chế độ lấy nét bằng tay (manual). Hình ảnh minh họa quá trình đo chuyển vị bằng phương pháp DIC được trình bày trên Hình 12.



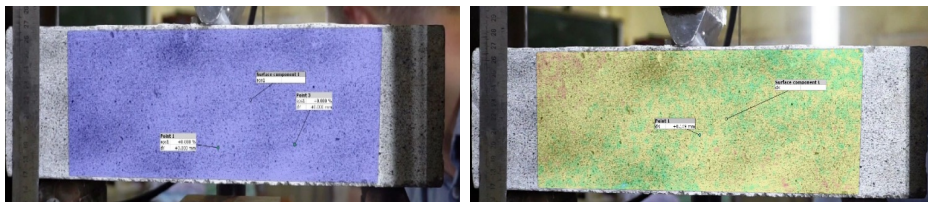
Hình 12. Đo đặc chuyển vị của dầm BTCT bằng phương pháp DIC

4. Phân tích và đánh giá kết quả

4.1. Kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm bằng phương pháp DIC và sử dụng dụng cụ đo LVDT

a. Kết quả thí nghiệm mẫu dầm bê tông

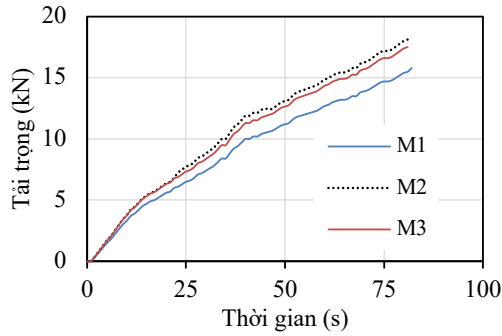
Sự gia tăng chuyển vị của mẫu thí nghiệm theo tải trọng tác dụng được xác định từ số liệu đo của dụng cụ đo LVDT và bằng phương pháp DIC. Đối với phương pháp DIC, tiến hành xuất các dữ liệu từ dạng video sang dạng hình ảnh với thông số 1 hình/giây từ lúc bắt đầu thí nghiệm đến lúc kết thúc thí nghiệm, giá trị này bằng với tốc độ ghi của máy TDS 530. Sau đó, sử dụng phần mềm GOM để xác định chuyển vị tại vị trí cần theo dõi trong suốt quá trình thí nghiệm, từ lúc bắt đầu gia tải đến khi dầm bị phá hủy (Hình 13).



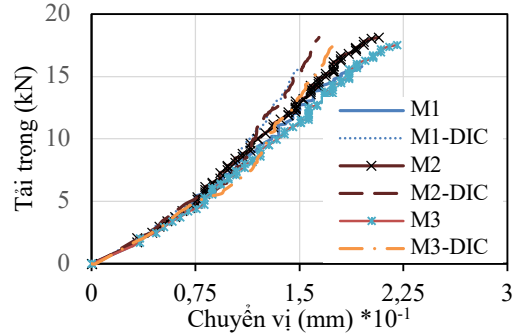
Hình 13. Minh họa ảnh chụp bề mặt mẫu thí nghiệm trong quá trình gia tải

Giá trị chuyển vị của phương pháp DIC và giá trị tải trọng thí nghiệm được đồng bộ thông qua giá trị thời gian. Sự gia tăng của tải trọng thí nghiệm theo thời gian được trình bày trên Hình 14, dựa trên kết quả thu được từ thiết bị TDS 530. Sau đó, bằng cách ghép nối đồ thị quan hệ tải trọng - thời gian với đồ thị quan hệ chuyển vị - thời gian (theo phương pháp DIC) cho phép thiết lập được biểu đồ quan hệ tải trọng - chuyển vị theo phương pháp DIC. Hình 15 trình bày biểu đồ quan hệ giữa tải trọng - chuyển vị của 03 mẫu dầm bê tông thí nghiệm xác định theo hai phương pháp đo trình bày ở trên.

Kết quả trình bày trong Hình 15 cho thấy, trong giai đoạn mẫu chưa bị nứt, tương ứng với tải trọng tác dụng lên mẫu nhỏ hơn 6 kN (giá trị tải trọng gây nứt được xác định rõ trên biểu đồ Hình 14 ứng với thời điểm thay đổi độ dốc đầu tiên của biểu đồ quan hệ tải trọng), chuyển vị của các mẫu thí nghiệm xác định bằng hai phương pháp có sự chênh lệch không đáng kể, không vượt quá 4%. Sau giai đoạn này, chênh lệch kết quả đo chuyển vị xác định theo hai phương pháp đo tăng dần cùng với sự gia tăng của tải trọng thí nghiệm. Ở thời điểm ngay trước khi các mẫu thí nghiệm bị phá hoại, chênh lệch kết



Hình 14. Quan hệ tải trọng và thời gian



Hình 15. Quan hệ tải trọng và chuyển vị theo hai phương pháp đo

quả trung bình của hai phương pháp đo trên 3 mẫu thí nghiệm lên đến 14%. Mức độ chênh lệch này có thể được giải thích qua việc các mẫu đầm bê tông bị phá hủy nhanh, đột ngột (do thí nghiệm kiểm soát theo lực) dẫn đến số liệu đo của hai phương pháp không được ghi nhận đồng thời.

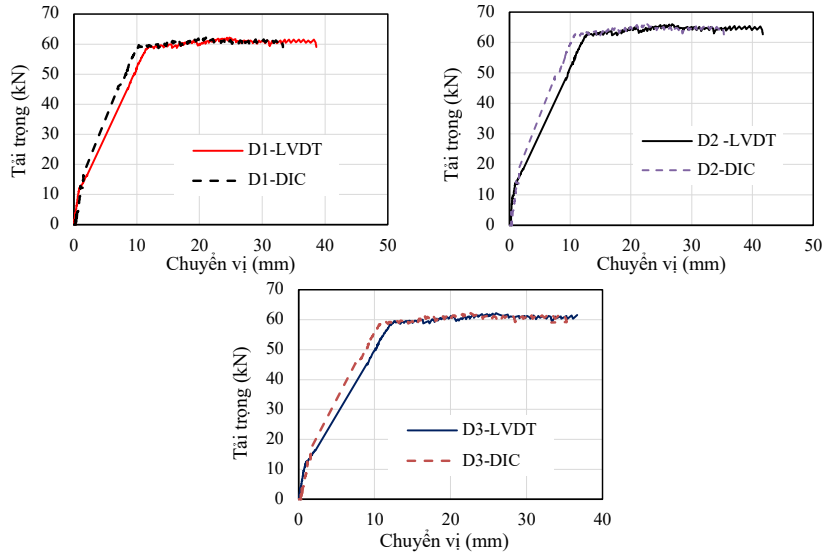
Bảng 2. So sánh chuyển vị đo theo được hai phương pháp ở thời điểm ngay trước khi mẫu bị phá hoại

Mẫu	Tải trọng phá hoại P_{ph} (kN)	Chuyển vị lớn nhất của mẫu (mm)		Chênh lệch giữa hai phương pháp đo (%)
		LVDT	DIC	
M1	14,9	0,18	0,15	14,2%
M2	17,3	0,19	0,16	14,4%
M3	16,6	0,19	0,17	14,1%

b. Kết quả thí nghiệm mẫu đầm BTCT

Tương tự với các mẫu đầm bê tông ở trên, các giá trị chuyển vị ở giữa nhịp của các mẫu đầm BTCT cũng được so sánh bởi hai phương pháp đo: phương pháp sử dụng LVDT và phương pháp DIC. Biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị của các mẫu đầm BTCT thí nghiệm xác định theo hai phương pháp đo được trình bày ở Hình 16. Kết quả đo chuyển vị tại các thời điểm đặc trưng cho sự làm việc của đầm BTCT: thời điểm hình thành khe nứt và thời điểm cốt thép vùng chịu kéo bị chảy dẻo, được trình bày trong Bảng 3.

Từ kết quả trình bày ở Hình 16 cho thấy các biểu đồ quan hệ tải trọng - chuyển vị được xây dựng từ các số liệu đo chuyển vị bằng phương pháp DIC và bằng dụng cụ đo LVDT có sự tương đồng và đều phản ánh được cái giai đoạn làm việc chính của kết cấu BTCT chịu uốn. Bên cạnh đó, từ kết quả so sánh giá trị chuyển vị đo được theo hai phương pháp trình bày ở Bảng 3, có thể thấy phương pháp DIC cho kết quả khá tương đồng với kết quả của LVDT, đặc biệt trong giai đoạn trước khi đầm hình thành khe nứt. Tại thời điểm hình thành khe nứt và thời điểm cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo, chênh lệch giá trị chuyển vị đo được theo hai phương pháp lần lượt bằng 7,5% và 10%.



Hình 16. Quan hệ tải trọng chuyển vị của dầm BTCT theo 2 phương pháp đo

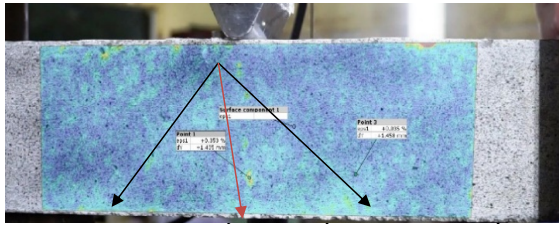
Bảng 3. Kết quả đo chuyển vị theo hai phương pháp ở các thời điểm đặc trưng

Dầm	Tải trọng gây nứt (kN)	Tải trọng gây chảy dẻo cốt thép (kN)	Chuyển vị tại thời điểm hình thành khe nứt (mm)		Chuyển vị tại thời điểm cốt thép chảy dẻo (mm)	
			Chênh lệch Δ (%)		Chênh lệch Δ (%)	
			LVDT	DIC	LVDT	DIC
D1	11,3	60,1	0,93	0,86	12,05	10,9
			$\Delta = 7,5\%$		$\Delta = 9,5\%$	
D2	12,6	62,3	0,96	0,89	11,6	10,3
			$\Delta = 7,2\%$		$\Delta = 11,2\%$	
D3	11,6	63,3	0,89	0,82	12,4	11,3
			$\Delta = 7,8\%$		$\Delta = 8,8\%$	

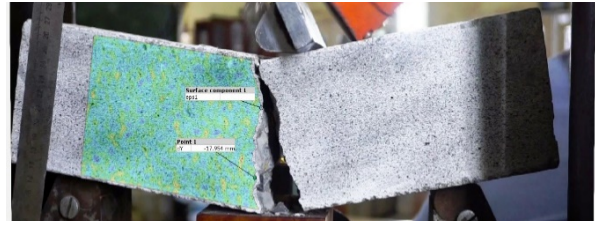
4.2. Ứng dụng phương pháp DIC trong việc dự báo sự hình thành và phát triển vết nứt trên dầm bê tông và BTCT

a. Dự báo vị trí hình thành khe nứt

Trong nghiên cứu thực nghiệm kết cấu BTCT, việc dự báo được vị trí xuất hiện vết nứt có ý nghĩa trong việc bố trí các dụng cụ đo để theo dõi sự phát triển của vết nứt. Tuy nhiên việc dự báo thường rất khó khăn, xuất phát từ đặc điểm không đồng nhất của vật liệu bê tông. Phương pháp DIC cho phép xác định biến dạng tương đối tại tất cả vị trí trên vùng khảo sát thông qua theo dõi sự thay đổi vị trí tương đối của các điểm ảnh. Từ lúc bắt đầu gia tải, đến lúc hình thành khe nứt, trên mẫu dầm thí nghiệm, sẽ xuất hiện một số vị trí mà ở đó biến dạng tương đối có sự gia tăng đáng kể so với các vị trí khác (thể hiện rõ qua sự thay đổi màu sắc trên bề mặt bê tông). Đây sẽ là các vị trí được dự báo sẽ xuất hiện các vết nứt.



(a) Các vị trí xuất hiện biến dạng tương đối lớn

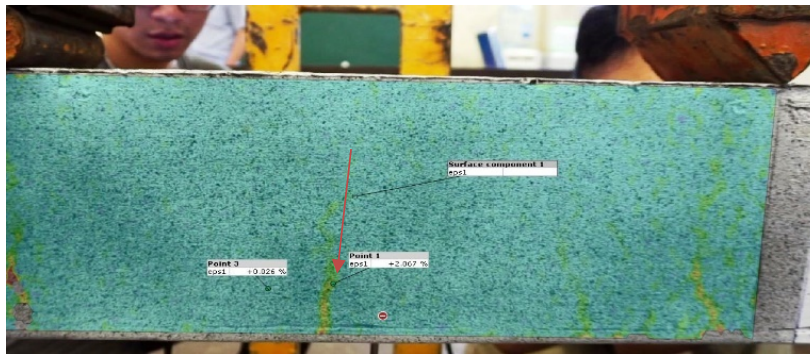


(b) Vị trí hình thành vết nứt ở giữa dầm (trùng với vị trí có biến dạng tương đối lớn)

Hình 17. Vị trí đo có biến dạng tương đối lớn và vị trí xuất hiện vết nứt trên bề mặt mẫu M1

Hình 17(a) cho thấy các vị trí có biến dạng tương đối gia tăng đáng kể so với các vị trí khác trên bề mặt bê tông trong giai đoạn dầm chưa bị nứt. Hình 17(b) trình bày hình ảnh của mẫu dầm bê tông bị nứt. Có thể nhận thấy, vết nứt xuất hiện ở vị trí giữa dầm trùng với vị trí đo có biến dạng tương đối lớn.

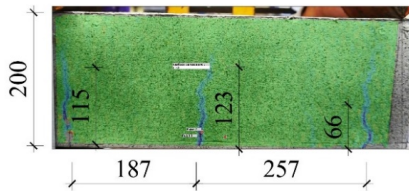
Đối với mẫu dầm BTCT, hình ảnh ở Hình 18 cho thấy sự gia tăng biến dạng tương đối theo phương ngang ở một số vị trí (thể hiện rõ qua sự thay đổi màu sắc trên vùng khảo sát) ở thời điểm tải trọng tác dụng nhỏ hơn tải trọng gây nứt. Các vị trí, cũng chính là các vị trí xuất hiện vết nứt trên dầm khi tải trọng thí nghiệm lớn hơn tải trọng gây nứt.



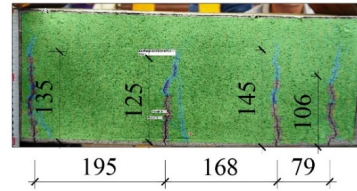
Hình 18. Biến dạng tương đối ở một số vị trí tại vùng bê tông chịu kéo tại thời điểm $P = 8 \text{ kN}$

b. Dự báo khoảng cách vết nứt, chiều cao vết nứt trên dầm BTCT

Khoảng cách và chiều cao của vết nứt là các thông số quan trọng được sử dụng trong việc phân tích sự làm việc của kết cấu BTCT làm việc chịu uốn. Trong công tác thí nghiệm kết cấu BTCT chịu uốn ở các phòng thí nghiệm ở nước ta hiện nay, hai thông số trên được ghi nhận một cách thủ công, rời rạc, không cho phép khảo sát liên tục sự thay đổi các thông số này. Do có thể thu thập được tất cả hình ảnh từ khi gia tải đến khi dầm phá hoại nên phương pháp DIC có thể cho phép xác định được chiều cao, khoảng cách trung bình và sự phát triển thêm vết nứt trong cả quá trình thí nghiệm. Hình 19 và Hình 20 minh họa việc xác định chiều cao và khoảng cách giữa các khe nứt tại các cấp tải bất kỳ bằng phương pháp DIC, trong đó khoảng cách vết nứt được xác định bằng khoảng cách giữa các vị trí xuất hiện biến dạng tương đối gia tăng còn chiều cao vết nứt được xác định thông qua chiều cao của vùng bê tông có sự gia tăng biến dạng tương đối (được thể hiện rõ bằng vị trí và chiều dài của vùng bê tông có sự thay đổi màu sắc trên bề mặt khảo sát).



Hình 19. Chiều cao và khoảng cách giữa các khe nứt tại $P = 16$ kN



Hình 20. Khoảng cách giữa các khe nứt tại $P = 29$ kN

5. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm sử dụng phương pháp tương quan điểm ảnh DIC để xác định chuyển vị của dầm bê tông và dầm BTCT chịu uốn. Các giá trị chuyển vị của phương pháp này được so sánh, đối chiếu với giá trị đo bằng dụng cụ đo LVDT. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra một số những kết luận chính sau:

- Phương pháp tương quan điểm ảnh DIC có thể sử dụng trong việc xác định chuyển vị trong thí nghiệm mẫu dầm bê tông và BTCT làm việc chịu uốn. Đối với mẫu dầm bê tông (không có cốt thép), phương pháp DIC phù hợp cho việc đo chuyển vị trong giai đoạn dầm chưa xuất hiện vết nứt, chênh lệch kết quả đo chuyển vị bằng LVDT và bằng phương pháp DIC nhỏ hơn 4%. Đối với mẫu dầm BTCT, chênh lệch giá trị chuyển vị đo theo hai phương pháp nêu trên trong giai đoạn trước khi cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo không vượt quá 10%.

- Quan hệ tải trọng - chuyển vị của dầm BTCT chịu uốn với chuyển vị xác định theo phương pháp DIC phù hợp với quan hệ này xác định theo phương pháp đo được sử dụng phổ biến hiện nay bằng LVDT. Kết quả này cho thấy, tính ổn định và khả năng áp dụng phương pháp DIC trong các phép đo đặc chuyển vị liên tục theo thời gian, phù hợp với yêu cầu đối với các dụng cụ đo chuyển vị.

- Phương pháp DIC có thể áp dụng trong việc dự báo vị trí xuất hiện, khoảng cách và chiều cao của vết nứt trên mẫu dầm BTCT thí nghiệm, thông qua việc xác định các vị trí có sự gia tăng của biến dạng tương đối trên bề mặt khảo sát. Các vị trí này được xác định dễ dàng qua các vị trí có sự thay đổi màu sắc trên bề mặt khảo sát. Việc ứng dụng phương pháp DIC trong trường hợp này mở ra triển vọng trong việc khảo sát sự phát triển của vết nứt trên kết cấu BTCT trong quá trình thí nghiệm vốn còn rất hạn chế với các dụng cụ đo hiện nay.

Tài liệu tham khảo

- [1] Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A. (1985). [Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics](#). *Experimental Mechanics*, 25(3):232–244.
- [2] Goldrein, H. T., Palmer, S. J. P., Huntley, J. M. (1995). [Automated fine grid technique for measurement of large-strain deformation maps](#). *Optics and Lasers in Engineering*, 23(5):305–318.
- [3] Zhang, D., Zhang, X., Cheng, G. (1999). [Compression strain measurement by digital speckle correlation](#). *Experimental Mechanics*, 39(1):62–65.
- [4] Bay, B. K. (1995). [Texture correlation: A method for the measurement of detailed strain distributions within trabecular bone](#). *Journal of Orthopaedic Research*, 13(2):258–267.
- [5] 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(6):062001.
- [6] Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). [Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture](#). *Procedia Materials Science*, 3:1585–1590.
- [7] Rimkus, A., Podvieszko, A., Gribniak, V. (2015). [Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members](#). *Procedia Engineering*, 122:239–243.

- [8] Hamrat, M., Boulekbache, B., Chemrouk, M., Amziane, S. (2016). [Flexural cracking behavior of normal strength, high strength and high strength fiber concrete beams, using Digital Image Correlation technique.](#) *Construction and Building Materials*, 106:678–692.
- [9] Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2017). [Experimental investigation of crack propagation and crack branching in lightly reinforced concrete beams using digital image correlation.](#) *Engineering Fracture Mechanics*, 182:487–505.
- [10] Zhao, P., Zsaki, A. M., Nokken, M. R. (2018). [Using digital image correlation to evaluate plastic shrinkage cracking in cement-based materials.](#) *Construction and Building Materials*, 182:108–117.
- [11] Miura, T., Sato, K., Nakamura, H. (2020). [The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC.](#) *Cement and Concrete Composites*, 114:103768.
- [12] McCormick, N., Lord, J. (2012). [Digital image correlation for structural measurements.](#) *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 165(4):185–190.
- [13] Saliba, J., Mezhoud, D. (2019). [Monitoring of steel-concrete bond with the acoustic emission technique.](#) *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100:416–425.
- [14] Huang, Z., Tu, Y., Meng, S., Sabau, C., Popescu, C., Sas, G. (2019). [Experimental study on shear deformation of reinforced concrete beams using digital image correlation.](#) *Engineering Structures*, 181: 670–698.
- [15] Golewski, G. L. (2019). [Measurement of fracture mechanics parameters of concrete containing fly ash thanks to use of Digital Image Correlation \(DIC\) method.](#) *Measurement*, 135:96–105.
- [16] Phú, N. T., Chương, V. T., Hưng, Đ. V., Duẩn, N. B. (2018). [Ứng dụng điểm ảnh xác định chuyển vị của kết cấu trong quá trình thí nghiệm.](#) *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 12 (2):24–30.
- [17] GOM. [GOM Correlate Pro.](#)