



ỨNG DỤNG ĐIỂM ẢNH XÁC ĐỊNH CHUYỂN VỊ CỦA KẾT CẤU TRONG QUÁ TRÌNH THÍ NGHIỆM

Nguyễn Trọng Phú^{1*}, Vũ Tiến Chương², Đặng Việt Hưng¹, Nguyễn Bá Duẩn²

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả ứng dụng phương pháp điểm ảnh xác định chuyển vị của các dầm bê tông cốt thép và dầm thép trong phòng thí nghiệm. Trong các thí nghiệm xác định ứng xử của cấu kiện chịu lực trong phòng thí nghiệm từ trước đến nay sử dụng phổ biến các thiết bị đo truyền thống như LVDT và Strain Gauge. Tuy nhiên, việc sử dụng các thiết bị này đòi hỏi chi phí cao, khả năng sử dụng lại không cao, khó khăn khi các cấu kiện có hình dạng hình học phức tạp. Nhận thấy khả năng ứng dụng cao của phương pháp tương quan ảnh số trong các phép đo trong cơ học, nhóm nghiên cứu đã xây dựng một phần mềm dựa trên nguyên lý tương quan ảnh số để đo các chuyển vị của cấu kiện chịu lực trong phòng thí nghiệm. Các kết quả đo bằng phương pháp điểm ảnh được so sánh với các kết quả có được từ thiết bị LVDT.

Từ khóa: DIC; ảnh số; tương quan ảnh số; đo chuyển vị; dầm bê tông; dầm thép; phòng thí nghiệm.

Digital image-based measurement of deflection of specimens in laboratory

Abstract: The paper presents the application of digital image-based measurement of the deflection of reinforced concrete and steel beams in laboratory. So far, in laboratory most measurement of the behavior of specimens were based on conventional equipment such as LVDT and Strain Gauges. However, using such equipment in laboratory is high cost, low repeatable capacity, especially it is difficult to measure the behavior of specimens with irregular geometric shapes. It was realized that Digital Image Correlation methods were applied in mechanic measurements, the authors had built a software based on principles of digital image correlation method to measure the deflection of beams in laboratory. The results of digital image based measurement were compared to those of LVDT equipment.

Keywords: DIC; digital image; digital image correlation; measurement of deflection; reinforced concrete beams; steel beams; laboratory.

Nhận ngày 5/12/2017; sửa xong 21/12/2017; chấp nhận đăng 28/02/2018

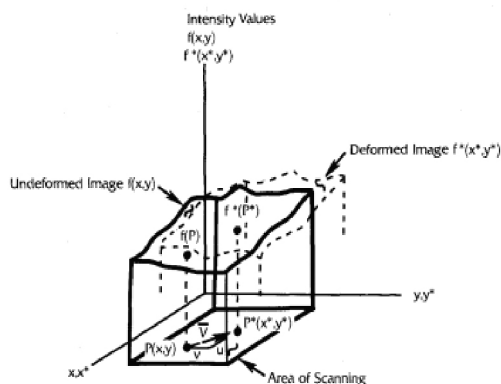
Received: December 5th, 2017; revised: December 21st, 2017; accepted: February 28th, 2018



1. Giới thiệu

Phương pháp tương quan ảnh, digital image correlation (DIC), được xem như một phương pháp thuộc lớp các phương pháp không tiếp xúc, thu thập, lưu giữ hình ảnh đối tượng và phân tích để có được các kết quả đo biến dạng/chuyển động của đối tượng được khảo sát. Quá trình đối chiếu ảnh được thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau trên cơ sở vật quan sát như các đường, các lưới, điểm hay mảng ngẫu nhiên. Một trong các phương pháp được sử dụng phổ biến nhất là sử dụng các mẫu ngẫu nhiên và so sánh các miền nhỏ của toàn bộ ảnh để có được các kết quả đo toàn trường.

Phương pháp tương quan ảnh số dựa trên việc so sánh các ảnh số được chụp trong các thời điểm khác



Hình 1. Tương ứng một-một về cường độ xám của bề mặt vật liệu [1]

¹ TS, Khoa Xây dựng DD&CN, Trường Đại học Xây dựng.

² ThS, Khoa Xây dựng DD&CN, Trường Đại học Xây dựng.

* Tác giả chính. E-mail: nguyentrongphu111@yahoo.com.

nhau. Quá trình so sánh này được thực hiện dựa trên các giả thiết tính duy nhất và tương ứng một-một về cường độ xám của các mảng bề mặt của vật liệu. Không có yêu cầu đặc biệt về chiếu sáng bề mặt vật liệu và trong nhiều trường hợp ánh sáng tự nhiên của bề mặt vật liệu đã đủ đảm bảo có được dữ liệu đủ chính xác. Hình 1 miêu tả tương ứng một-một về cường độ xám của bề mặt vật liệu trước và sau khi biến dạng [1].

Công trình nghiên cứu ứng dụng phương pháp tương quan ảnh đầu tiên được tác giả [2] thực hiện đầu những năm 1950 để đối chiếu các đặc trưng của các góc chiếu khác nhau. Sau khi các thiết bị chụp ảnh số ra đời, các nhà nghiên cứu trí tuệ nhân tạo và robot đã phát triển các thuật toán quan sát và các phương pháp luận âm thanh-quan sát cùng với các ứng dụng đo ảnh cho chụp ảnh viễn thám. Tuy nhiên, khi đó ứng dụng của các phương pháp tương quan ảnh số trong các phòng thí nghiệm cơ học và kết cấu chưa nhiều.

Năm 1982, nhóm nghiên cứu [3] là một trong những người đầu tiên ứng dụng phương pháp thu thập và xử lý thông tin ảnh để phục vụ việc đo biến dạng trong thí nghiệm vật liệu. Tương tự, năm 1983 nhóm tác giả [4] đã phát triển các thuật toán số và thực hiện các thí nghiệm sơ khai sử dụng các ảnh được chụp để chứng minh khả năng của phương pháp tương quan ảnh số 2D. Sau đó các tác giả [5] đã thực hiện đo chuyển động của vật thể rắn bằng cách sử dụng các thuật toán này và đã chứng minh được khả năng đo chuyển vị thẳng và chuyển vị xoay trong mặt phẳng bằng phương pháp tương quan ảnh. Năm 1985, nhóm nghiên cứu [6] đã thực hiện một chuỗi các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm để chứng minh rằng phương pháp tương quan ảnh có thể được sử dụng để đo biến dạng của các vật thể. Năm 1986, các tác giả [7] đã sử dụng các phương pháp tìm kiếm gradient để đạt được mức độ chính xác dưới đơn vị điểm ảnh, sub-pixel accuracy, qua toàn bộ ảnh để có được một tập hợp mật độ cao của các phép đo chuyển vị toàn trường. Nhóm nghiên cứu [8] đã thảo luận việc sử dụng một số phương pháp tìm kiếm với độ chính xác dưới đơn vị điểm ảnh, đã chỉ ra rằng cả hai phương pháp tìm kiếm gradient và phương pháp tìm kiếm coarse-fine đều khả dĩ. Cuối những năm 1980, nhóm tác giả [9] đã thực hiện các mô phỏng số một chiều để cung cấp các đánh giá ban đầu về tính chính xác của các phép đo biến dạng bằng phương pháp tương quan ảnh.

Đầu những năm 1980, nghiên cứu sử dụng 2D-DIC trong cơ học phá hủy được bắt đầu và tiếp tục cho đến nay. Các tác giả [10] đã sử dụng các phương pháp đo 2D-DIC để tính toán hệ số tập trung ứng suất. Sutton và những người khác đã thực hiện thí nghiệm đo vùng dẻo cục bộ đỉnh vết nứt để đánh giá ảnh hưởng của biến dạng 3 chiều. Hai tác giả [11] đã sử dụng 2D-DIC để đo chuyển vị mở rộng vết nứt. Cùng với các nghiên cứu được thực hiện trong cơ học phá hủy, các nhà nghiên cứu cũng sử dụng 2D-DIC để khảo sát ứng xử biến dạng của các loại vật liệu khác nhau như thép, nhựa, gỗ, sứ và giấy [12-14]. Cuối những năm 1990 và năm 2000, các nhà nghiên cứu đã ứng dụng 2D-DIC để nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu composite [15] và vật liệu bê tông [16].

Từ đầu những năm 2000, phương pháp tương quan ảnh 2 chiều, 2D-DIC, đã nhận được sự quan tâm từ nhiều nhà nghiên cứu và đã có những tiến bộ rất lớn trong cả nghiên cứu và ứng dụng. Theo tìm hiểu của nhóm đã có hơn 400 bài báo trình bày các kết quả liên quan đến phương pháp tương quan ảnh 2 chiều.

Bên cạnh đó trong điều kiện kinh phí cho nghiên cứu khoa học thực nghiệm trong ngành cơ học nói chung và xây dựng nói riêng hạn hẹp thì việc tìm kiếm một phương pháp đơn giản về thiết bị, chi phí thấp, có tần suất sử dụng lại cao nhưng đảm bảo mức độ chính xác là một mong muốn rất rõ của những người làm nghiên cứu. Trong các thí nghiệm sử dụng thiết bị đo biến dạng LVDT truyền thống kết hợp với Strain Gauges chỉ cung cấp được số liệu đo tại một số vị trí gắn thiết bị. Với ứng dụng phương pháp tương quan ảnh số, số điểm đo không còn bị hạn chế. Tùy theo nhu cầu cần khảo sát, số điểm đo được xác định tương ứng và số liệu kết quả đo có thể cung cấp thông tin trên toàn trường khảo sát. Ví dụ với các thí nghiệm khảo sát ứng xử của dầm bê tông cốt thép trong phòng thí nghiệm sử dụng phương pháp tương quan ảnh số để đo không chỉ chuyển vị của một số điểm mà có thể cung cấp được thông tin liên quan đến trường chuyển vị và biến dạng trên mặt bên của dầm. Với những thông tin này giúp làm sáng tỏ về ứng xử của dầm bê tông cốt thép trong quá trình chịu tải. Với sự tiến bộ về công nghệ của ngành kỹ thuật ảnh số và máy ảnh số, việc ứng dụng phương pháp tương quan ảnh số trong đo các đặc trưng ứng xử cơ học của mẫu trong phòng thí nghiệm và đo ứng xử của kết cấu ngoài hiện trường là một lĩnh vực hứa hẹn có nhiều ứng dụng ở Việt Nam.

Mặc dù phương pháp tương quan ảnh số đã được nghiên cứu và phát triển nhiều trên thế giới từ những năm 1980 như đã được trình bày ở trên, ở Việt Nam phương pháp tương quan ảnh số chưa nhận được nhiều sự quan tâm tương xứng với tiềm năng của phương pháp. Nhận thấy thực tế như trên, nhóm nghiên cứu mạnh dạn thực hiện những nghiên cứu đầu tiên của nhóm ứng dụng phương pháp tương quan ảnh số để thực hiện đo chuyển vị của các cấu kiện dầm bê tông cốt thép và dầm thép trong điều kiện phòng thí nghiệm. Mục tiêu

của các nghiên cứu này gồm: Tìm hiểu về phương pháp tương quan ảnh số; Ứng dụng phương pháp tương quan ảnh số trong đánh giá và đo chuyển vị của các dầm bê tông cốt thép và dầm thép; Đánh giá mức độ chính xác của phương pháp tương quan ảnh số khi sử dụng các thiết bị máy ảnh số thương mại có trên thị trường Việt Nam; Thiết lập quy trình ứng dụng phương pháp tương quan ảnh số đo các ứng xử cơ học của mẫu trong phòng thí nghiệm bằng các máy ảnh số thương mại có trên thị trường Việt Nam. Bài báo này trình bày những kết quả đo chuyển vị bằng phương pháp tương quan ảnh số trong một số thí nghiệm dầm bê tông cốt thép và dầm thép. Các thí nghiệm này được thực hiện tại phòng thí nghiệm kết cấu công trình của Trường Đại học Xây dựng. Giới hạn của các thí nghiệm đo dừng ở mức độ đo chuyển vị của các mẫu trong mặt phẳng, tức không gian hai chiều.

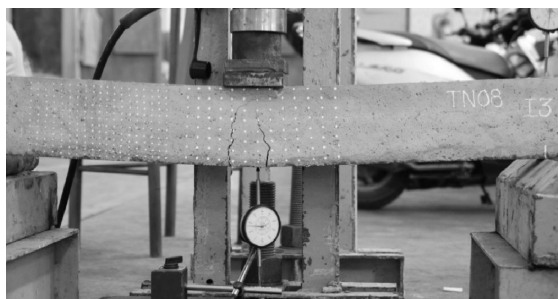


2. Chương trình thí nghiệm

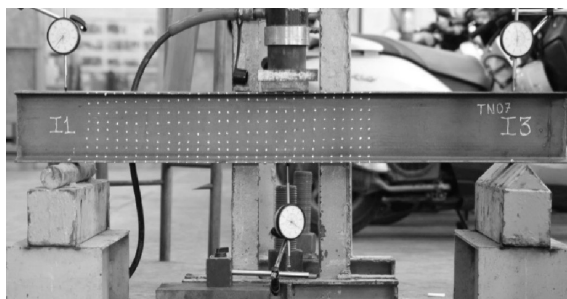
Chương trình thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm và kiểm định xây dựng, LAS XD 125, Trường Đại học Xây dựng. Trong chương trình thí nghiệm có 08 dầm gồm 03 dầm bê tông cốt thép ký hiệu TN01, TN02 và TN08 và 05 dầm thép tiết diện chữ I ký hiệu TN03, TN04, TN05, TN06 và TN07 được gia tải và đo chuyển vị đồng thời bằng các thiết bị Indicator và phương pháp điểm ảnh.

a. Thiết bị thí nghiệm: Hệ giá đỡ dầm và hệ gia tải gồm kích thủy lực và đầu gia tải. Thiết bị đo gồm 03 thiết bị Indicator có độ chính xác 0.01mm. Bên cạnh đó 02 máy ảnh kỹ thuật số Nikon 7500 và Canon 7D được sử dụng để ghi các ảnh số phục vụ việc phân tích điểm ảnh. Các máy ảnh được gắn trên các chân máy có thể điều chỉnh chiều cao để đảm bảo trục ống kính vuông góc với mặt phẳng uốn của dầm.

b. Trình tự thí nghiệm: Các dầm trước khi thí nghiệm được làm sạch bề mặt bằng bàn chải kim loại sau đó được chấm thêm các điểm màu trắng bằng bút đánh dấu. Như đã nói ở trên, việc tạo thêm các điểm tương phản trên bề mặt của dầm không phải là yêu cầu bắt buộc. Tuy nhiên, để thuận tiện cho việc phân tích chuyển dịch trên bề mặt dầm cũng như phân tích trường ứng suất và biến dạng có thể tạo thêm các điểm tương phản theo dạng lưới. Sau khi các dầm đã được chuẩn bị xong sẽ được đặt lên hệ giá đỡ. Tiếp đó các kỹ thuật viên sẽ lắp đặt và điều chỉnh các thiết bị gia tải và thiết bị Indicator cho phù hợp. Xác định khoảng cách đặt máy ảnh đến dầm thí nghiệm. Trong điều kiện phòng thí nghiệm và khả năng của các máy ảnh kỹ thuật số hiện nay, khoảng cách từ máy ảnh đến dầm thí nghiệm được xác định chủ yếu dựa trên yêu cầu đảm bảo an toàn trong quá trình thí nghiệm. Máy ảnh được gắn trên chân máy và điều chỉnh độ cao cũng như trục ống kính để đảm bảo trục ống kính vuông góc với mặt phẳng uốn của dầm. Sau khi đã ổn định độ cao và trục máy, tiêu cự của máy sẽ được điều chỉnh tập trung vào vùng bề mặt dầm cần phân tích. Quá trình thí nghiệm được thực hiện vào ban ngày với điều kiện ánh sáng trong phòng thí nghiệm,



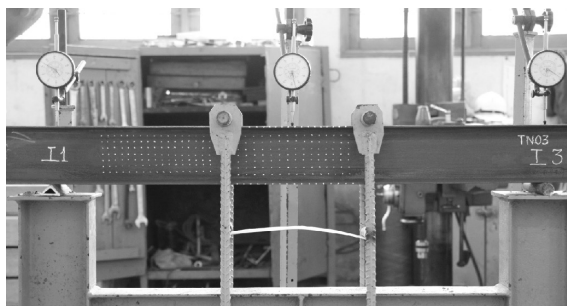
Hình 2. Thí nghiệm dầm bê tông cốt thép TN08



Hình 3. Thí nghiệm dầm thép tiết diện I150x75x5x7 TN07



Hình 4. Thí nghiệm dầm bê tông cốt thép TN01



Hình 5. Thí nghiệm dầm thép tiết diện I120x64 TN03

không cần bổ sung thêm nguồn sáng. Tải trọng tác dụng lên các dầm thí nghiệm có được từ kích thủy lực vận hành bằng tay. Sau mỗi bước tải, các giá trị trên thiết bị Indicator được ghi lại và ảnh chụp tương ứng của dầm sẽ được thực hiện. Do đó sẽ có tương ứng một-một giữa ảnh số và giá trị đo từ thiết bị Indicator để phục vụ việc đánh giá kết quả.

Hình 2 đến hình 5 mô tả một số các dầm thí nghiệm trong chương trình thí nghiệm. Bề mặt các dầm bê tông cốt thép và dầm thép được đánh dấu thêm các điểm chấm trắng tạo tương phản ánh sáng trên bề mặt và cũng là các điểm tham chiếu để phân tích chuyển vị và biến dạng. Các điểm chấm trắng được tạo một cách ngẫu nhiên bằng bút đánh dấu. Tuy nhiên, trong chương trình thí nghiệm của nhóm nghiên cứu, các điểm chấm trắng được tạo ra theo lưới vuông để thuận tiện cho việc phân tích dữ liệu chuyển vị sau này.

Chương trình thí nghiệm lựa chọn việc thí nghiệm trên cả dầm bê tông cốt thép và dầm thép để có cơ sở dữ liệu đánh giá ảnh hưởng của bề mặt vật liệu lên mức độ chính xác của kết quả đo theo phương pháp điểm ảnh.

Quá trình chụp ảnh để có dữ liệu số phục vụ việc phân tích điểm ảnh được thực hiện tương ứng với từng bước tải. Máy ảnh sử dụng trong quá thí nghiệm gồm hai máy ảnh Nikon 7100 và Canon 7D được sử dụng lần lượt. Trong quá trình chụp ảnh, máy ảnh được gắn trên chân máy để đảm bảo ảnh không bị rung và đảm bảo khoảng cách từ máy ảnh đến mẫu thí nghiệm không bị thay đổi trong quá trình thí nghiệm. Máy ảnh được bố trí để sao cho mặt phẳng uốn của dầm thí nghiệm vuông góc với trục tiêu cự máy ảnh. Khoảng cách từ máy ảnh đến các dầm thí nghiệm được xác định dựa trên điều kiện đảm bảo an toàn trong quá trình thí nghiệm và đảm bảo lấy được toàn ảnh khu vực cần quan tâm của dầm thí nghiệm. Trong chương trình thí nghiệm này khoảng cách từ máy ảnh đến các dầm thí nghiệm được lựa chọn từ khoảng 2m đến 3m.

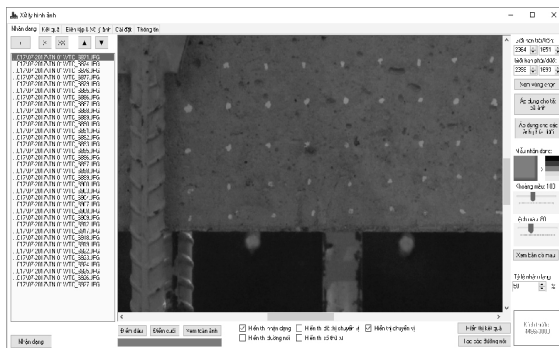


3. Kết quả thí nghiệm

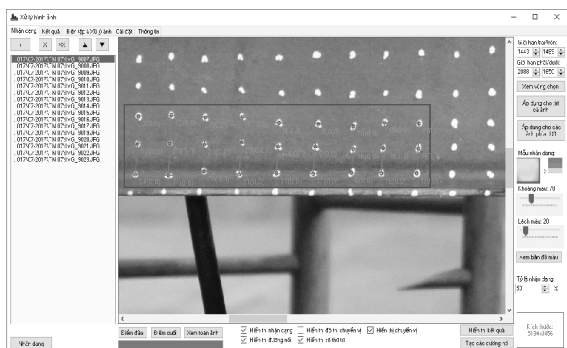
Hình 8 đến Hình 13 so sánh kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm từ thiết bị Indicator và từ phương pháp phân tích điểm ảnh. Do điều kiện thời gian cũng như cơ sở vật chất chưa cho phép, nên nhóm nghiên cứu dừng ở so sánh kết quả chuyển vị của điểm giữa dầm. Kết quả đo chuyển vị của dầm bằng phương pháp phân tích điểm ảnh có được dựa trên phần mềm do nhóm nghiên cứu tự viết. Nhóm dự định sẽ dành riêng một bài báo trình bày chi tiết về thuật toán cũng như cách sử dụng phần mềm để có được kết quả đo. Các Hình 6 và 7 trình bày cửa sổ làm việc của chương trình phần mềm, để phân tích ảnh số và đưa ra kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm. Hiện tại, chương trình phân tích chưa thể tự động tính toán ra giá trị đo mà vẫn cần một số thao tác thủ công tính toán trên định dạng file excel.

Có thể nhận thấy kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm bằng phương pháp phân tích điểm ảnh, dựa trên phần mềm do nhóm tự viết, ở thời điểm hiện tại chưa đạt được độ ổn định cần thiết. Một số kết quả thí nghiệm thể hiện sự tương quan tương đối tốt so với kết quả đo bằng thiết bị Indicator, như các dầm TN02, TN04, TN05, và TN06 trên các Hình 9, 10, 11 và 12. Tuy nhiên, trên các thí nghiệm dầm TN01 và TN07, kết quả so sánh tương đối kém như biểu diễn trên Hình 8, 13 và 14.

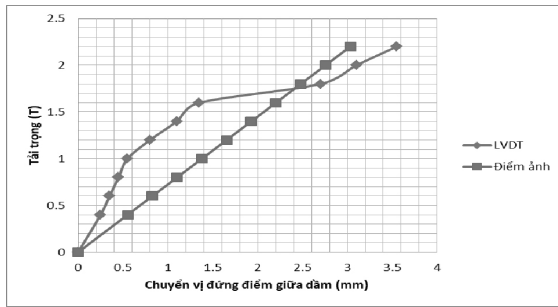
Hình 14 biểu diễn so sánh kết quả đo chuyển vị tại điểm giữa dầm bê tông cốt thép TN08. Trong thí nghiệm này, dầm bê tông cốt thép chịu tải tại ba điểm. Ứng xử của dầm thể hiện tính dẻo cao. Tuy nhiên, do biến dạng lớn của dầm và để tránh hỏng thiết bị Indicator nên sau khi biến dạng dầm chuyển sang miền dẻo, thiết bị Indicator đã được tháo ra. Do đó trên Hình 14, đồ thị biểu diễn tương quan giữa lực và chuyển



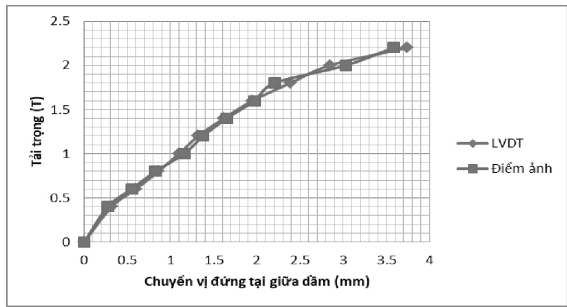
Hình 6. Giao diện chương trình phân tích điểm ảnh đo chuyển vị dầm bê tông cốt thép



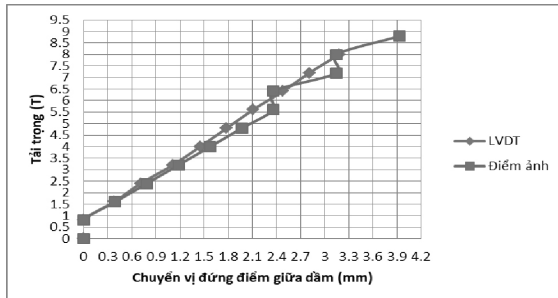
Hình 7. Giao diện chương trình phân tích điểm ảnh đo chuyển vị dầm thép



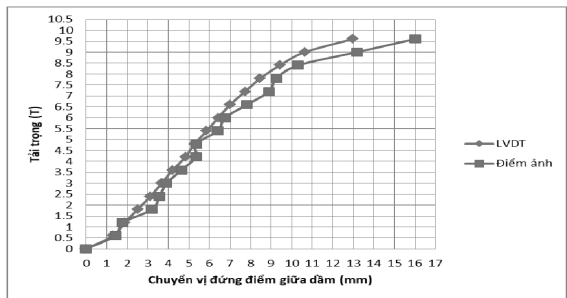
Hình 8. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN01



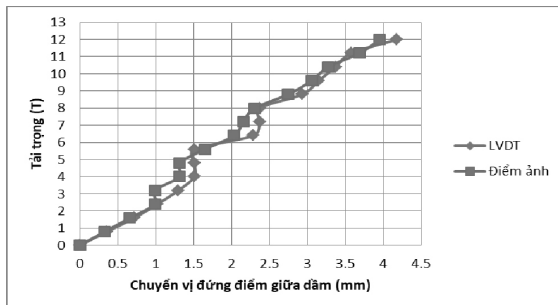
Hình 9. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN02



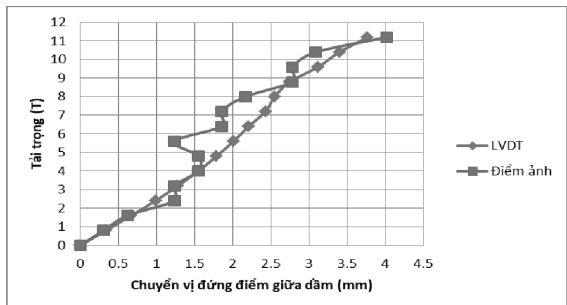
Hình 10. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN04



Hình 11. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN05



Hình 12. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN06



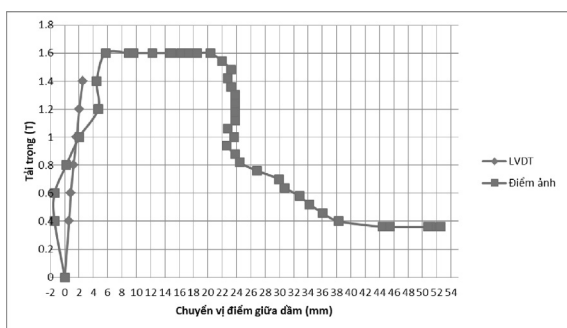
Hình 13. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN07

vị tại điểm giữa dầm theo hai phương pháp đo có sự khác biệt lớn. Tuy nhiên, Hình 14 cũng cho thấy khả năng ứng dụng của phương pháp phân tích điểm ảnh trong quá trình đo và đánh giá ứng xử của các cấu kiện bê tông cốt thép chịu biến dạng lớn. Đối với các cấu kiện bê tông cốt thép, quá trình phân bố lại nội lực giữa bê tông và cốt thép sau khi bê tông nứt là rất phức tạp. Sẽ không thể có đánh giá định lượng nào đối với quá trình này nếu chỉ dùng các thiết bị đo truyền thống. Đây cũng chính là một trong những mục tiêu ứng dụng phương pháp phân tích điểm ảnh của nhóm nghiên cứu trong tương lai.



4. Phân tích kết quả và đánh giá

Kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm cho kết quả tốt khi so sánh với kết quả đo từ thiết bị Indicator. Sai số giữa kết quả đo bằng thiết bị Indicator và bằng phương pháp tương quan ảnh số được trình bày trong Bảng 1.



Hình 14. So sánh kết quả giữa thiết bị đo Indicator và Điểm ảnh của TN08

Bảng 1. So sánh sai số kết quả đo chuyển vị giữa Indicator và phương pháp tương quan ảnh số

TN	01	02	04	05	06	07	08
Sai số	8%-150%	1.15%-13.87%	1.02%-12%	1.29%-28.11%	2.62%-23.92%	0.23%-38%	22%-333%

Trong các thí nghiệm có kết quả tương quan tốt, từ Hình 7 đến 10, có thể quan sát thấy rằng, khi biến dạng dầm còn nhỏ, những bước tải ban đầu, kết quả đo từ thiết bị Indicator và từ phương pháp phân tích điểm ảnh gần như đồng nhất. Tuy nhiên, khi biến dạng dầm lớn hơn, bắt đầu có sự phân tán giữa kết quả đo từ thiết bị Indicator và từ phương pháp phân tích điểm ảnh. Bên cạnh đó quan sát thấy trên một số thí nghiệm kết quả đo bằng phương pháp tương quan ảnh số cho kết quả mâu thuẫn với kết quả đo thực tế khi tăng tải chuyển vị của dầm lại giảm. Điều này có thể xuất phát từ một số lý do sau: Khi chụp ảnh, do thiếu thiết bị bấm máy từ xa nên việc bấm máy được thực hiện trực tiếp trên máy nên máy ảnh bị rung. Chuyển động rung của máy ảnh có thể gồm các chuyển vị xoay và chuyển vị thẳng, chính các chuyển vị này của máy ảnh tạo ra các chuyển vị tương đối của ảnh so với mẫu thí nghiệm. Và nếu chuyển vị tương đối của máy so với mẫu gồm cả chuyển vị xoay và chuyển vị thẳng ngược chiều với chiều chuyển dịch của dầm dẫn đến kết quả mâu thuẫn giữa hai phương pháp đo. Điều này có thể nhận thấy rõ trong kết quả đo của TN01. Đây là dầm thí nghiệm đầu tiên, nên nhóm chưa nhận thấy điều này. Thêm nữa trong quá trình thí nghiệm, do điều kiện khách quan phải thay đổi khoảng cách giữa máy ảnh và dầm thí nghiệm dẫn đến tiêu cự ống kính đã bị thay đổi dẫn đến hệ số chuyển kích thước của điểm ảnh bị thay đổi. Ảnh hưởng do thay đổi vị trí máy ảnh có thể thấy trên kết quả TN07. Trong quá trình thí nghiệm dầm TN07, đây là dầm thép lớn nhất nhịp 2.4m, để đảm bảo an toàn trong giai đoạn cuối của thí nghiệm nhóm đã dịch chuyển máy ra xa dầm. Đối với kết quả đo chuyển vị của dầm TN08, đây là dầm thực hiện thí nghiệm cuối cùng, tuy nhiên trong quá trình thí nghiệm thiết bị Indicator bị kẹt và thí nghiệm đã phải thực hiện lại nhiều lần. Điều này có thể dẫn đến lỗi xử lý dữ liệu số của phần mềm. Đối với các dầm thép, trạng thái phá hủy là do mất ổn định ngang, để đảm bảo an toàn nhóm nghiên cứu không được tiếp cận gần thiết bị Indicator để đọc kết quả. Do đó có thể tồn tại sai số do đọc kết quả. Do điều kiện không cho phép, nhóm đã phải thực hiện thí nghiệm với kích thủy lực gia tải bằng tay và đọc kết quả bằng mắt thường cả hai điều này đều có thể gây ra sai số cho kết quả đo. Nhóm hy vọng trong thời gian tới sẽ thực hiện lại thí nghiệm với các thiết bị đo truyền thống được tự động hóa cao, yếu tố con người can thiệp vào kết quả đo ít hơn sẽ có kết quả đánh giá chính xác hơn.

Đối với những thí nghiệm mà kết quả đo chuyển vị giữa hai phương pháp có độ lệch lớn, Hình 8, 13 và 14, có một số lý do có thể như sau: Trong quá trình thí nghiệm, do điều kiện khách quan phải thay đổi vị trí của máy ảnh. Điều này dẫn đến sự thay đổi của hệ số chuyển kích thước của điểm ảnh. Để xử lý vấn đề này, nhóm nghiên cứu thấy rằng trong các thí nghiệm tương lai có thể sử dụng một thước đo chuẩn gắn trên mẫu thí nghiệm. Với thước chuẩn gắn sẵn trên mẫu, hệ số thay đổi kích thước điểm ảnh sẽ được cập nhật tự động trong phần mềm khi tính toán chuyển vị tuyệt đối của điểm cần đo. Do bấm máy trực tiếp trên máy nên máy bị rung và chuyển động lên xuống cũng như chuyển động xoay dẫn đến ảnh chụp bị chuyển động tương đối so với mẫu chụp. Các thành phần chuyển động tương đối có thể gồm đầy đủ cả 3 thành phần. Do đó, trên các đồ thị so sánh kết quả đo giữa hai phương pháp trong một số thí nghiệm cho thấy kết quả phân tích điểm ảnh cho kết quả chuyển vị ngược chiều so với kết quả đo từ thiết bị Indicator, như trên Hình 14 - TN08. Để giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực này có thể sử dụng thiết bị bấm máy từ xa hoặc thực hiện việc quay video. Hình 11 trình bày so sánh thí nghiệm dầm TN05, kết quả cho thấy sai số lớn xảy ra tại giai đoạn cuối của thí nghiệm. Dầm TN05 là dầm thép, dạng phá hoại là mất ổn định ngang. Khi đến gần giai đoạn phá hoại, dầm biến dạng ngang lớn, để đảm bảo an toàn nên việc đọc kết quả đo Indicator có thể không được chính xác. Đây có thể là nguyên nhân dẫn đến sai số lớn giữa hai phương pháp đo.



5. Kết luận và hướng nghiên cứu tương lai

Kết quả đo chuyển vị của các dầm thí nghiệm bằng phương pháp phân tích điểm ảnh cho tương quan tốt với kết quả đo từ thiết bị Indicator. Phương pháp phân tích điểm ảnh kết hợp với các thiết bị đo truyền thống giúp cung cấp thêm nhiều thông tin ứng xử quan trọng của các mẫu thí nghiệm, đặc biệt là với những mẫu thí nghiệm có hình dạng hình học phức tạp, hoặc điều kiện lắp đặt thiết bị đo truyền thống khó khăn. Từ kết quả bước đầu khả quan, nhóm nghiên cứu tiếp tục hoàn thiện chương trình phần mềm để đạt được một số khả năng như sau:

- Tự động tính toán chuyển vị, biến dạng và ứng suất tại một điểm hoặc một mảng các điểm bất kỳ trên bề mặt mẫu thí nghiệm.
- Xử lý số liệu ảnh số trên video và tự động hóa quá trình phân tích biến dạng, chuyển vị và ứng suất của thí nghiệm tĩnh và động.

Bên cạnh việc tiếp tục hoàn thiện chương trình phần mềm, nhóm nghiên cứu nhận thấy một số hướng ứng dụng của phương pháp phân tích điểm ảnh trong nghiên cứu ứng xử kết cấu trong phòng thí nghiệm như sau: Phân tích ứng xử kết cấu bê tông cốt thép sau nứt và sau giai đoạn biến dạng đàn hồi; Phân tích ứng xử của dầm bê tông cốt thép dự ứng lực; Phân tích ứng xử của hệ khung bê tông cốt thép có tường chèn; Phân tích ứng xử của tường chịu cắt bê tông cốt thép; Ứng dụng phương pháp điểm ảnh trong phân tích ứng xử của nút khung bê tông cốt thép./.

Lời cảm ơn: Chương trình nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng theo đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường trọng điểm, mã số: 123-2016/KHCN-TĐ.

Tài liệu tham khảo:

1. Sutton M.A., Chu T.C., Peters W.H., Ranson W.F. (1985), "Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics", *Exp. Mech*, 3(25):232-244.
2. Hobrough G.L. (2003), *The Photogrammetric Record*, Wiley Blackwell.
3. Peters W.H., Ranson W. F. (1982), "Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis", *Optical Engineering*, 21(3):427-431.
4. Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson W.F., McNeill S.R. (1983), "Determination of Displacement Using an Improved Digital Correlation Method", *Im. Vis. Comp*, 1(3):133-139.
5. Andersson J., Sutton M. A., Chu T. C., Peters W. H., Ranson W. F. (1984), "Application of Digital Correlation Methods to Rigid Body Mechanics", *Optical Engineering*, 22(6):238-243.
6. Sutton M.A., Cheng M.Q., Peters W.H., Chao Y.J., McNeill S.R. (1986), "Applications of an Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis", *Image and Vision Computing*, 4(3):143-150.
7. Tian Q., Huhns M.N. (1986), "Algorithms for Subpixel Registration", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 35(2):220-233.
8. Sutton M. A., Jang J., Babai M., McNeill S.R. (1988), "Effects of Sub-Pixel Image Restoration on Digital Correlation Error", *Optical Engineering*, 27(10):870-877.
9. McGowan D.M., Ambur D.R., Hanna T.G., McNeill S.R. (2001), "Evaluating the Compressive Response of Notched Composite Panels Using Full-Field Displacements", *Journal of Aircraft*, 38(1):122-129.
10. Dawiche D.S., Sutton M.A. (1994), "CTOA and Crack-Tunneling Measurements in Thin Sheet 2024-T3 Aluminum Alloy", *Experimental Mechanics*, 34(4):357-368.
11. Dai Y.Z., Tay C.J., Chiang F.P. (1991), "Determination of the Plastic Zone by Laser-Speckle Correlation", *Experimental Mechanics*, 31(4):348-352.
12. Zhang H.X., Knauss W.G. (1997), "Uniaxial, Shear, and Poisson Relaxation and Their Conversion to Bulk Relaxation: Studies on Polymethyl Methacrylate", *Polymer Composites*, 18(2):211-222.
13. Zink A.G., Davison R.W., Hanna R.B. (1995), "Strain Measurement in Wood Using a Digital Image Correlation Technique", *Wood and Fiber Science*, 27(4):346-359.
14. Gonzalez J., Knauss W.G. (1998), "Strain Inhomogeneity and Discontinuous Crack Growth in a Particulate Composite", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(10):1981-1995.
15. Choi S., Shah S.P. (1997), "Measurement of Deformation on Concrete Subjected to Compression Using Image Correlation", *Experimental Mechanics*, 37(3):307-313.
16. Lichti D.D., Jamtsho S., El-Halawany S.I., Lahamy H., Chow J., Chan T.O., El-Bardy M. (2012), "Structural Deflection Measurement with a Range Camera", *ASCE*, 66-76.
17. Kuntz 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", *Can. J. Civ. Eng.*, 33:1418-1425.
18. Sutton M., Orteu J.-J., Schreier H.W. (2009), *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer.
19. Kuntz 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", *Can. J. Civ. Eng.*, 33:1418-1425.
20. Sutton M., Take W.A., Hoult N.A. (2014), "Curvature Monitoring of Beams Using Digital Image Correlation", *ASCE*, 1-13.
21. Yoneyama S., Kitagawa A., Iwata S., Tani K., Kikuta H. (2006), "Bridge Deflection Measurement Using Digital Image Correlation", *Can. J. Civ. Eng.*, 33:1418-1425.
22. Sladek J., Ostrowska K., Kohut P., Holak K., Uhl T., Gaska A. (2013), "Development of a Vision Based Deflection Measurement System and Its Accuracy Assessment", *Elsevier/Mechanical Systems and Signal Processing*, 1237-1249.