

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG KỸ THUẬT PHÂN TÍCH HÌNH ẢNH ĐỂ ĐO BIẾN DẠNG CHUYỂN VỊ CỦA TẤM KẾT CẤU HÀNG HẢI KHI CHỊU TẢI VÀ ĐẬP

A STUDY ON THE APPLICATION OF IMAGE ANALYSIS TECHNIQUES TO MEASURE DEFORMATIONS OF MARINE STRUCTURES UNDER IMPACT LOADS

Trương Đắc Dũng*, Dương Vương Quốc, Võ Tấn Lợi, Trần Nguyễn Minh Tiến, Trương Thành Chung

Trường Đại học Nha Trang, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: truongdacdung@ntu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 02/3/2025; Sửa bài / Revised: 18/8/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 08/9/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.23(9A).116

Tóm tắt - Nhờ tiến bộ kỹ thuật số, phương pháp đo không tiếp xúc đã được phát triển nhằm thay thế cách đo tiếp xúc thông thường. Phương pháp này có lợi thế đáng kể như chi phí thấp, dễ vận hành và linh hoạt, nhờ đó dữ liệu biến dạng chuyển vị có thể thu được từ video ghi lại sự dịch chuyển kết cấu khi chịu tải tác động. Nghiên cứu này xây dựng một phương pháp đo không tiếp xúc để theo dõi biến dạng của tấm kết cấu hàng hải bị va đập. Để kiểm chứng, các thí nghiệm và mô phỏng số đã được thực hiện. Kết quả cho thấy, giá trị đo không tiếp xúc về biến dạng dư và biến dạng lớn nhất lệch so với giá trị thu được từ phương pháp mô phỏng số khá nhỏ, lần lượt 0,4% và 3,8%, và sự khác nhau là 0,1% với biến dạng dư thu được bằng đo thủ công. Phương pháp đề xuất có thể theo dõi quá trình biến dạng của tấm kết cấu khi bị va đập, từ đó có thể giúp đánh giá an toàn kết cấu trong quá trình khai thác.

Từ khóa - Tấm nhôm AA 5083; phân tích hình ảnh kỹ thuật số; mô phỏng số; biến dạng dư; tải va đập lặp lại

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình khai thác, kết cấu tàu thủy có thể bị biến dạng hư hỏng khi chịu tải va đập lặp lại gây ra bởi tác dụng của sóng biển, hay va chạm với vật rắn như các hàng hóa rơi trên boong/sàn tàu, khối băng trôi nổi trên biển, hay cầu/cảng, đá ngầm... dẫn đến gây nguy hiểm cho thủy thủ cũng như thiệt hại lớn về kinh tế. Quá trình chịu các tác động kể trên cũng có thể làm thân tàu thủy rung lắc đáng kể ảnh hưởng đến sự sắp xếp, ổn định hàng hóa trên tàu.

Đã có nhiều nghiên cứu về ứng xử biến dạng của tấm kết cấu hàng hải chịu tác động tải va đập được công bố [1-9]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu ảnh hưởng tải va đập lặp lại trên các loại chi tiết kết cấu đơn giản như thanh/tấm cũng được thực hiện và đề xuất phương pháp lý thuyết và phương pháp mô phỏng số đi kèm [10-16]. Ngoài ra, ứng xử va đập liên tục trên kết cấu tấm hợp kim nhôm dạng kết hợp (aluminum foam sandwich, aluminum honeycomb sandwich) cũng được nghiên cứu [17, 18]. Hầu hết các nghiên cứu thực nghiệm kể trên đều ứng dụng phương pháp đo đặc biến dạng và ứng xử động lực học kết cấu theo cách

Abstract - Thanks to rapid advances in digital vision, non-contact vision method has developed as an alternative to conventional methods for structural response measurements. This method has significant advantages such as low cost, easy operation and flexibility, whereby displacement deformation data can be obtained from video recording the structural displacement under impact force. This study developed a non-contact measurement method to monitor the deformation of marine plates subjected to impact loads. Experiments and numerical simulations were carried out for validation. The results show that the non-contact measurement values of residual deformation and maximum deformation are quite small compared with the values obtained by the numerical simulation method, respectively 0.4% and 3.8%, and the difference is 0.1% with the residual deformation obtained by manual measurements. The proposed method can monitor the deformation process of marine structural panels under impact loads, which can help to evaluate the safety of structures during operation.

Key words - AA 5083 plate; digital photogrammetry technique; numerical simulation; permanent deflection; repeated impacts

tiếp xúc truyền thống như Strain gauge, Accelerometer, Load cell... kết hợp với bộ xử lý thông tin phức tạp, nên những phương thức đo đặc này đều yêu cầu nhiều thời gian xử lý dữ liệu và chi phí khá cao.

Như trong thực tế, tàu thủy đặc thù thường phải di chuyển trên biển liên tục, nếu có va chạm xảy ra trong quá trình khai thác, kết cấu có thể bị biến dạng, nứt/gãy, nhưng những hư hỏng biến dạng này không thể tiến hành đo đạc ngay lúc đó. Điều này có dẫn đến việc khó dự tính trước mức độ nghiêm trọng của phần kết cấu hư hỏng/tải va chạm để tránh một số hệ quả không mong muốn như làm ảnh hưởng độ bền cũng như rò rỉ chất lỏng và khả năng làm việc của kết cấu. Ngoài ra, sự rung lắc trong quá trình vận chuyển cũng có thể gây ra xô lệch hàng hóa, rơi đổ các kiện hàng (container) xuống biển. Để giải quyết vấn đề này, phương pháp “non-contact” đã được phát triển và ứng dụng, ví dụ như GPS, Laser Doppler Velocimeter (LDV) [19] hoặc microwave radar [20]. Tuy nhiên, các phương pháp này khá đắt đỏ và chịu ảnh hưởng điều kiện môi trường đặc biệt với GPS. Để hạn chế nhược điểm kể trên, một phương pháp dựa trên thị giác xử lý

¹ Nha Trang University, Vietnam (Dac Dung Truong, Vuong Quoc Duong, Tan Loi Vo, Nguyen Minh Tien Tran, Thanh Chung Truong)

hình ảnh đã được nghiên cứu ứng dụng để đo các chuyển vị của kết cấu [21], hoặc biến dạng độ võng tại vị trí va chạm nhằm kịp thời dự tính mức độ nghiêm trọng của biến dạng hoặc dịch chuyển hàng hóa.

Sự phát triển của công nghệ quang học và máy tính cho phép ứng dụng kỹ thuật dựa trên thị giác sử dụng máy ảnh kỹ thuật số để đo chuyển vị của các kết cấu có kích thước lớn/thực [22, 23]. So với các phép đo tiếp xúc truyền thống, kỹ thuật dựa trên hình ảnh cho phép đo từ xa, không tiếp xúc bằng cách sử dụng hệ thống camera tốc độ cao có thể chụp hàng trăm khung hình mỗi giây và một máy tính xách tay để hoàn thành phép đo chuyển vị/biến dạng và ứng xử động lực học kết cấu. Phương pháp này sử dụng thuật toán và đưa ra kết quả khá chính xác và nhanh chóng.

Trong nghiên cứu này, một phương pháp đo đặc (theo dõi) biến dạng chuyển vị kết cấu trong quá trình chịu lực và va đập sẽ được nghiên cứu. Phương pháp này dựa kỹ thuật phân tích hình ảnh thu được từ camera tốc độ cao. Một số thực nghiệm và đập và mô phỏng số cũng được sử dụng để kiểm chứng phương pháp đo này. So sánh kết quả đo giữa các phương pháp cho thấy khả năng, hiệu quả của phương pháp đề xuất, gợi mở hướng nghiên cứu ứng dụng rộng rãi trong công tác kiểm tra đánh giá an toàn kết cấu hàng hải trong quá trình khai thác.

2. Xây dựng phương pháp đo biến dạng chuyển vị

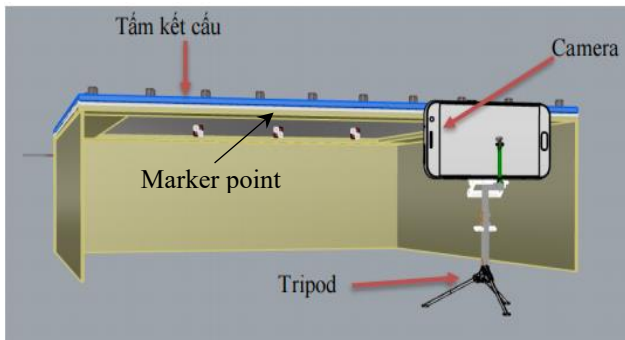
2.1. Kỹ thuật phân tích hình ảnh

2.1.1. Thuật toán phân tích hình ảnh

Để đo được sự dịch chuyển kết cấu, chúng ta cần phải thiết lập mối quan hệ giữa hệ tọa độ ảnh (image coordinates) và hệ tọa độ vật lý (physical coordinates). Ở đây, mối quan hệ này được mô tả thông qua hệ số SF (scaling factor), có đơn vị là mm/pixel. Trong trường hợp trực quang học của camera vuông góc với bề mặt kết cấu, hệ số tỷ lệ có thể được xác định như sau:

$$SF = \frac{d}{l}$$

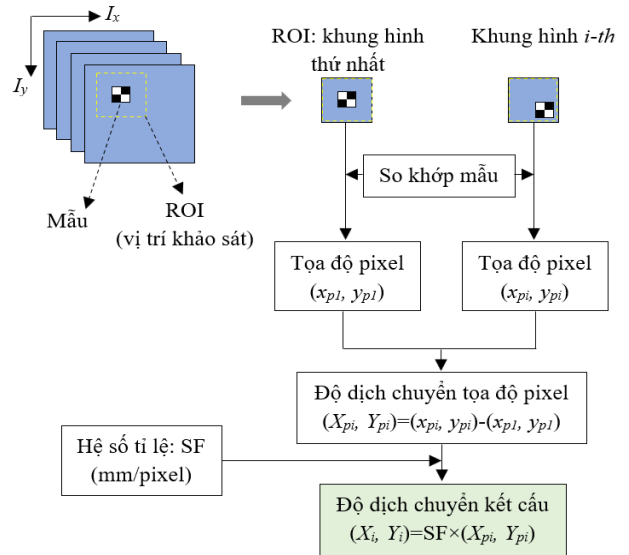
Trong đó, d là khoảng cách giữa hai điểm trong hệ tọa độ vật lý, đơn vị là mm, l là khoảng cách tương ứng trong hệ tọa độ ảnh đơn vị là pixel.



Hình 1. Mô hình dầm công xôn vi kết cấu

Sơ đồ các bước xác định biến dạng bằng kỹ thuật phân tích hình ảnh được mô tả trên Hình 2. Kỹ thuật tương tự cũng đã được áp dụng thành công trong việc đo đặc chuyển vị kết cấu cầu đường [20]. Dựa trên so sánh sự dịch chuyển của điểm quan sát theo thời gian, dịch chuyển biến dạng của kết cấu sẽ được xác định. Phương pháp đo này sẽ được

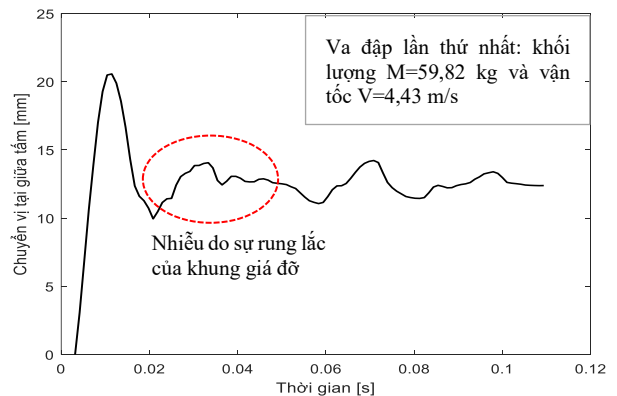
kiểm chứng thông qua so sánh với thực nghiệm và mô phỏng số trình bày ở phần dưới đây.



Hình 2. Sơ đồ thuật toán phân tích biến dạng bằng hình ảnh

2.1.2. Áp dụng phương pháp phân tích hình ảnh cho bài toán va đập

Trong nghiên cứu này, kỹ thuật phân tích hình ảnh nêu ở trên sẽ được áp dụng để xác định quá trình biến dạng kết cấu tàu thủy chịu tải va đập, và ứng xử động lực học va chạm cũng được phân tích dựa trên phương pháp này. Cần chú ý rằng, trong tính toán thiết kế cũng như đánh giá an toàn kết cấu, biến dạng lớn nhất thường được quan tâm khi chịu tải va đập. Do đó, điều kiện nghiên cứu ảnh hưởng tải va đập đến biến dạng kết cấu cũng sẽ được tập trung va đập tại vị trí giữa tầm kết cấu. Tuy nhiên, khác với các kết cấu thanh/dầm (đo biến dạng có thể sử dụng camera ghi tại sự dịch chuyển biến dạng tại vị trí ở giữa thanh một cách đơn giản), đối với tầm kết cấu, để ghi sự dịch chuyển/biến dạng tại vị trí giữa tầm, một “marker point” cần được gắn vào theo hướng vuông góc (xem Hình 1). Như vậy, bằng camera ghi lại sự dịch chuyển của marker point, quá trình biến dạng độ võng của tầm sẽ được ghi lại chi tiết.



Hình 3. Một ví dụ về kết quả lịch sử chuyển vị tại giữa tầm chịu lực và đập thu được bằng phương pháp phân tích hình ảnh

Quá trình phân tích hình ảnh từ camera ghi lại dựa trên thuật toán trình bày ở Hình 2 được thực hiện trên phần mềm Matlab. Một chương trình với các thuật toán cơ bản được

nhóm nghiên cứu xây dựng và áp dụng cho bài toán va đập. Hình 3 trình bày lịch sử biến dạng chuyển vị điển hình theo thời gian ghi tại giữa tấm kết cấu chịu lực va đập từ phương pháp đo bằng kỹ thuật phân tích hình ảnh. Lưu ý, trong quá trình va đập, khung giá đỡ sẽ có sự rung lắc nhẹ mặc dù đã có giá giảm rung chấn. Do đó, để hạn chế hay khử nhiễu (Hình 3), lịch sử chuyển vị của khung giá đỡ cũng được xác định và được trừ vào kết quả chuyển vị của tấm kết cấu. Mặc dù, kỹ thuật này khá đơn giản nhưng nó giúp khử nhiễu đáng kể trong quá trình phân tích biến dạng của tấm chịu va đập bằng phương pháp hình ảnh.

2.2. Thực nghiệm đo biến dạng chuyển vị tấm kết cấu chịu lực va đập

2.2.1. Chuẩn bị thí nghiệm bài toán va đập

Như đã nói ở trên, kết cấu hàng hải trong thực tế có thể chịu nhiều loại tải trọng va đập nguy hiểm trong quá trình khai thác, ví dụ tàu đâm vào đá ngầm, tàu va chạm vào vật trôi nổi trên biển, hay sự rơi rớt của các thùng hàng hóa trên boong/sàn tàu... Sau những lần va chạm như vậy, kết cấu sẽ bị biến dạng đáng kể, thậm chí chúng bị nứt gãy/phá hủy. Ở nghiên cứu này, bài toán va đập của kết cấu tàu thủy được thực hiện, nhằm đánh giá ứng xử va chạm của kết cấu va đập và kiểm chứng phương pháp đo biến dạng không tiếp xúc đã xây dựng.

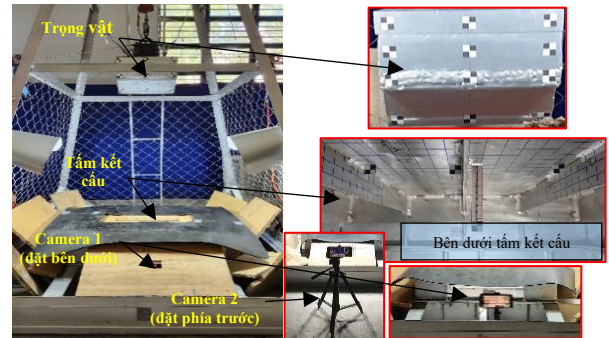
Mẫu thí nghiệm được chế tạo từ vật liệu hợp kim nhôm thường dùng trong tàu thủy, có kích thước tính toán $600 \times 600 \times 3,94$ mm, và được gia cường bởi ba nếp $600 \times 50 \times 3,94$ mm. Mẫu được thử và đập với trọng vật rắn có dạng hình nêm như Hình 4. Mẫu được thí nghiệm va đập liên tiếp sáu lần với cùng điều kiện va đập tại giữa tấm với khối lượng $M=59,82$ kg và vận tốc $V=4,43$ m/s.

2.2.2. Tiến hành thí nghiệm

Thí nghiệm va đập được tiến hành trên máy thử rơi như trên Hình 4, thực hiện tại phòng thí nghiệm khoa Kỹ thuật Giao thông, Trường Đại học Nha Trang. Máy gồm một khung kết cấu gắn với bộ đỡ chắc chắn - dùng để cố định mô hình thử, một nam châm điện, trọng vật va chạm, hệ thống đèn chiếu sáng - cung cấp đủ ánh sáng để ghi video va chạm, hộp điều khiển (nâng hạ trọng vật và ngắt điện nam châm) và hệ thống camera tốc độ cao. Bên cạnh đó, còn có hệ thống phụ trợ gồm các dây cáp (tăng đỡ) điều chỉnh hướng trọng vật và tấm cao su kết hợp tấm gỗ che chắn bảo vệ tấm mô hình và trọng vật trong quá trình thử va đập. Trọng vật được thả rơi ở độ cao 1,0 m (tương ứng $V=4,43$ m/s) và đập lên tấm mô hình, sau đó biến dạng chuyển vị sau va chạm của tấm sẽ được đo đạc thủ công bằng thước kẹp (dial gauge).

Để ghi lại thông tin về quá trình biến dạng của tấm khi chịu va đập cũng như quá trình chuyển động của trọng vật, có hai camera tốc độ cao đã được bố trí lắp đặt như Hình 4. Ở nghiên cứu này, một hệ thống camera tốc độ cao với 960 khung hình/giây (fps) được sử dụng để ghi lại được các chuyển động cơ bản trong quá trình va chạm. Lưu ý, chức năng quay video “siêu chậm” (ghi hình tốc độ cao) của camera có thời gian ghi hình liên tục trong 0,2 giây, do đó mỗi lần va đập, máy sẽ ghi được 192 khung hình. Ở đây, camera 1 sẽ đặt dưới tấm mô hình để ghi lại quá trình biến dạng của tấm kết cấu, và camera 2 đặt phía trước máy thử

va đập để ghi lại quá trình chuyển động của trọng vật. Bên cạnh đó, nhằm hỗ trợ tốt nhất cho sự nhận dạng chuyển động khi quay video tốc độ cao, phía dưới tấm mô hình và trên trọng vật được gắn các điểm nhận dạng “maker point” với kích thước xác định. Để xác định được vận tốc di chuyển của trọng vật và quá trình biến dạng của tấm mô hình khi chịu va đập dựa trên video quay được, một chương trình máy tính hỗ trợ dựa trên nền tảng phần mềm Matlab đã được phát triển như đã nói ở trên (Hình 2).

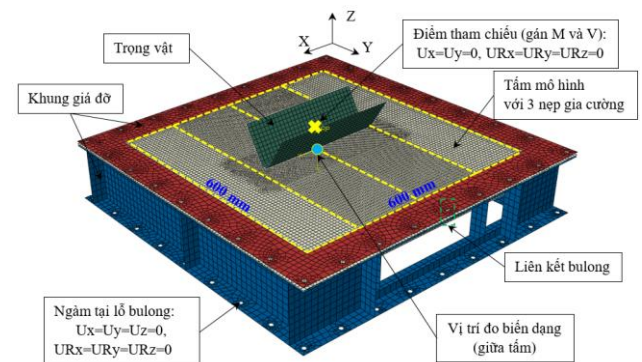


Hình 4. Bố trí thực nghiệm va đập

2.3. Mô phỏng số quá trình va đập trên tấm kết cấu

Trong nghiên cứu này, mô hình phân tích số cho bài toán va đập ở thực nghiệm cũng được thiết lập bằng phần mềm Abaqus. Mô hình phân tích số gồm 3 phần: tấm kết cấu, giá đỡ và trọng vật như được mô tả như Hình 5.

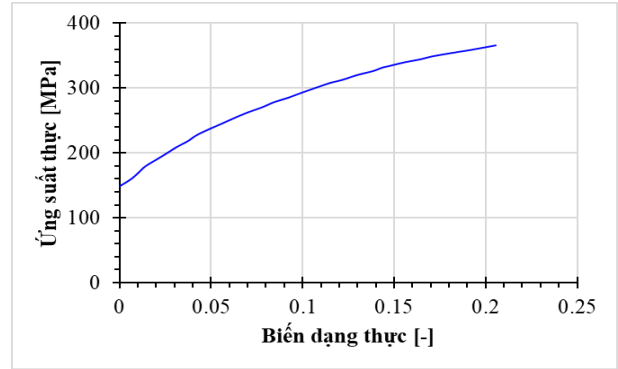
Lưu ý rằng, bài toán hội tụ lưới cũng đã được tiến hành để xác định lưới phân tích phù hợp. Tại vị trí va chạm, tấm kết cấu được chia lưới phân tử tấm (shell) có kích thước 4×4 mm, trong khi ngoài vùng va chạm và bộ phận khác của mô hình số được chia lưới với kích thước thô 20×20 mm nhằm tối ưu hóa thời gian tính toán trong khi vẫn đảm bảo được độ chính xác cần thiết khi phân tích mô phỏng số. Lưu ý, do không bị biến dạng khi va đập với kết cấu, trọng vật đã được mô hình hóa bằng cứng tuyệt đối.



Hình 5. Mô hình mô phỏng số

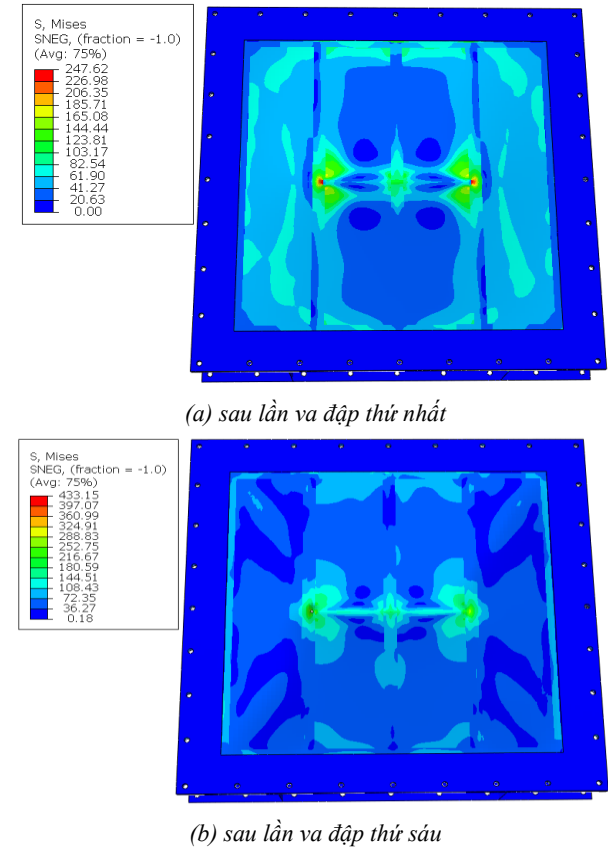
Tính chất vật liệu của hợp kim nhôm chế tạo tấm kết cấu được xác định thông qua thử kéo mẫu theo tiêu chuẩn ASTM [24]. Kết quả thử kéo gồm có mô đun đàn hồi $E=70$ GPa, ứng suất chảy dẻo $\sigma_Y=148,7$ MPa, và mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng kỹ thuật (engineering stress-strain curve); mối quan hệ này sẽ được chuyển đổi thành dạng thực (true stress-strain curve) như thể hiện trong Hình 6 để được áp dụng cho mô hình số. Phương pháp chuyển đổi từ giá trị kỹ thuật qua giá trị thực có thể tìm thấy trong một số tài liệu tham khảo liên quan, ví dụ [14-16, 26].

Các điều kiện biên - liên kết ngăn kẹp bulong được khai báo phù hợp. Tuy nhiên, để đơn giản hóa mô hình tính toán, liên kết bulong thực tế giữa tấm kết cấu và giá đỡ đã được tối giản bằng “Tie constraints” cho phép giữ liên kết cố định tâm với giá đỡ tương tự như trong thực nghiệm. Hệ số ma sát giữa tấm kết cấu và trọng vật khi tiếp xúc được khai báo bằng 0,3 - giá trị phổ biến cho tiếp xúc giữa các bề mặt cứng áp dụng trong thực tế.



Hình 6. Đường cong ứng suất-biến dạng thực áp dụng trong mô hình phân tích số

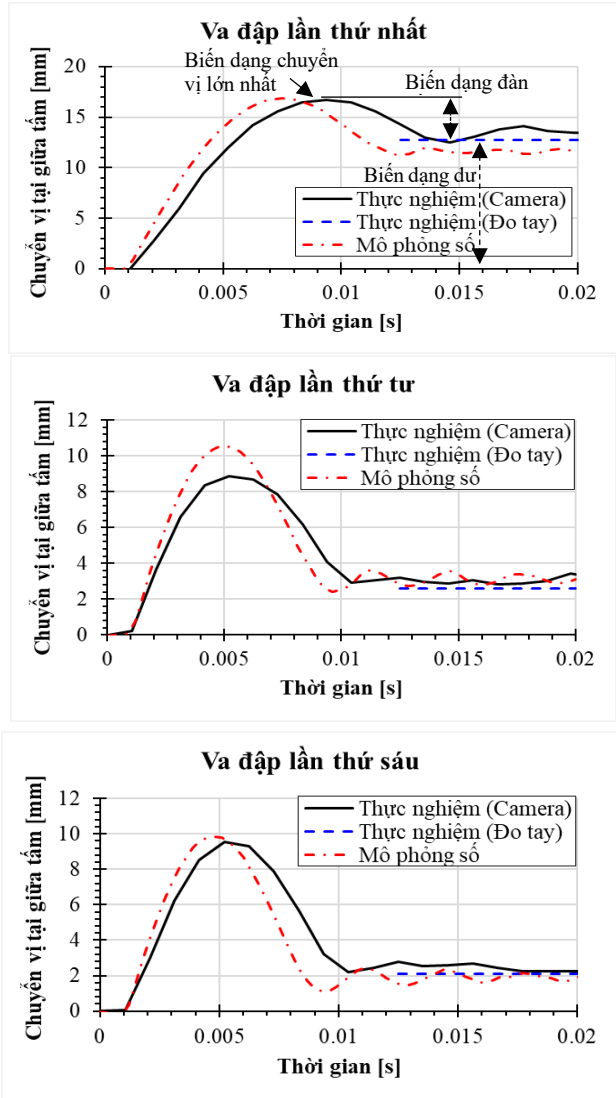
Trọng vật được khai báo với khối lượng và vận tốc va chạm tương tự như trong bài toán thí nghiệm trình bày ở Mục 2.2. Hình 7 trình bày sự phân bố ứng suất tương đương sinh ra trong kết cấu tấm sau khi chịu lực va đập. Kết quả mô phỏng số cho thấy, biến dạng lớn nhất tại vị trí va chạm, dẫn đến ứng suất phân bố tập trung lớn nhất, do đó trong tính toán thiết kế cần lưu ý khu vực chịu va chạm.



Hình 7. Kết quả mô phỏng sự phân bố ứng suất sau va chạm

3. Thảo luận

3.1. Quá trình biến dạng chuyển vị



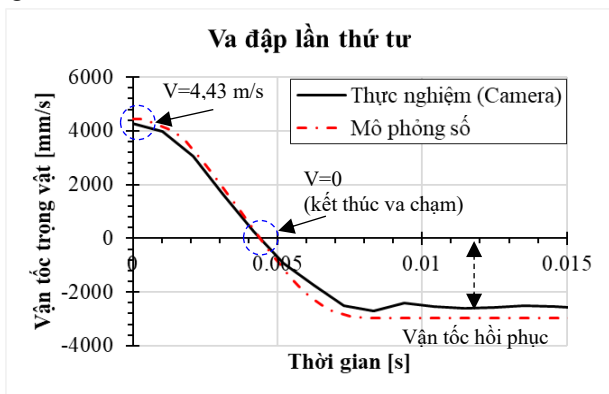
Hình 8. So sánh quá trình thay đổi độ võng biến dạng ghi tại vị trí va đập cho lần va đập đầu tiên, thứ tư và thứ sáu

Quá trình biến dạng chuyển vị của tấm kết cấu trong quá trình chịu lực va đập được trích xuất từ video quay tốc độ cao (camera 1), dữ liệu này sẽ cung cấp chi tiết thêm về ứng xử biến dạng kết cấu khi chịu tải va đập. Hình 8 so sánh kết quả giữa thực nghiệm ghi bằng phương pháp phân tích hình ảnh (camera) và đo thủ công với mô phỏng số trong lần va chạm thứ nhất, thứ tư và lần cuối cùng. Có thể thấy, quá trình biến dạng thu được bằng phương pháp phân tích hình ảnh là khá tương đồng với mô phỏng số về sự thay đổi biến dạng theo thời gian. Cụ thể cả hai phương pháp đều cho thấy quá trình biến dạng trải qua ba giai đoạn: (i) biến dạng tăng dần đến giá trị lớn nhất do sự gia tải, (ii) biến dạng đàn hồi (spring-back), sau cùng (iii) biến dạng dư (permanent deflection). Cả ba giai đoạn biến dạng chuyển vị đặc trưng này đều diễn ra trong tất cả các lần va chạm [26]. Kết quả đo tay thể hiện ở Hình 8 cũng cho thấy kết quả biến dạng dư nhìn chung khá thống nhất, đặc biệt đều cho thấy có sự giảm đáng kể về biến dạng dư theo số lần va đập. Cần lưu ý rằng, sự

rung lắc của bộ đỡ hệ thống camera gây ra bởi lực va đập cũng có thể ảnh hưởng đến chất lượng hình ảnh ghi được; đây cũng là yếu tố cần quan tâm khi sử dụng hệ thống đo đặc không tiếp xúc. Tuy nhiên, khác với hai phương pháp (mô phỏng số, camera), phương pháp đo tay chỉ có thể đo được biến dạng dư - biến dạng của kết cấu sau va chạm, như trên Hình 8. Lưu ý, trong một số trường hợp ví dụ như kết cấu khung giàn bảo vệ hàng hải [27], biến dạng chuyển vị lớn nhất thường được quan tâm nhằm tránh rủi ro va chạm trực tiếp với thân tàu làm phá hủy kết cấu chính - kết cấu bảo vệ từ các vụ va chạm giữa tàu thủy và kết cấu giàn khoan. Do đó, việc xác định được biến dạng chuyển vị lớn nhất tại thời điểm va chạm cho những kết cấu bảo vệ này là đặc biệt quan trọng.

3.2. Vận tốc va chạm

Nhằm kiểm chứng thêm độ tin cậy của phương pháp phân tích hình ảnh, ứng xử động lực học của quá trình va chạm trên kết cấu cũng được đánh giá, thảo luận. Dựa trên hình ảnh ghi được quá trình di chuyển của trọng vật theo thời gian bằng camera 2 đặt trước máy thử va đập, vận tốc di chuyển của trọng vật trong thực nghiệm cũng được theo dõi và so sánh với kết quả mô phỏng. Hình 9 so sánh kết quả vận tốc di chuyển của trọng vật ghi được từ camera 2 và mô phỏng số. Rõ ràng, cả mô phỏng số và thực nghiệm đều xác nhận một xu hướng chung - vận tốc của trọng vật giảm dần theo quá trình va đập, sau đó bằng không trước khi tăng lên và đạt giá trị vận tốc hồi phục (rebound velocity), và giá trị mô phỏng khá giống với kết quả thực nghiệm bao gồm cả vận tốc va chạm, thời điểm kết thúc va chạm và vận tốc hồi phục. Tuy nhiên, như đã thấy ở hình rằng góc nghiêng độ giảm vận tốc trong khi va đập ở thực nghiệm là nhỏ hơn (thoải hơn) một chút so với kết quả mô phỏng, điều này là do điều kiện biên trong mô phỏng là dạng lý tưởng cho liên kết bulong và không tính mức độ chuyển động trượt giữa các phần mô hình thử nghiệm.

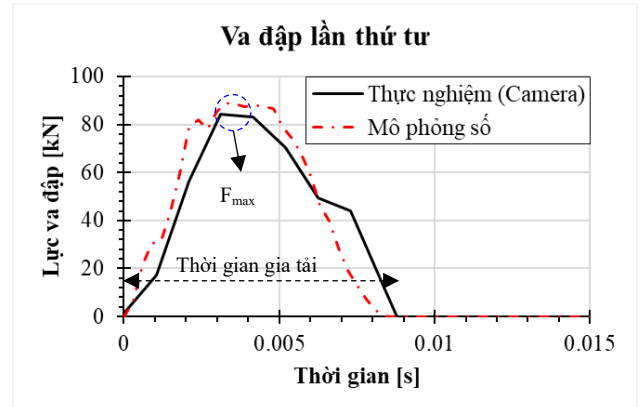


Hình 9. So sánh sự thay đổi lịch sử vận tốc của trọng vật khi va chạm giữa thực nghiệm và mô phỏng số cho lần va đập thứ tư

3.3. Lực va đập

Từ kết quả vận tốc thu được như Hình 9, gia tốc (a) cũng có thể dễ dàng thu được và lực va đập (F) từ đó sẽ được xác định theo định luật hai Newton ($F=M \times a$). Hình 10 so sánh kết quả lực va đập tiêu biểu được ghi lại bằng camera 2 và mô phỏng số. Nhìn chung, có sự tương đồng giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng số. Tuy nhiên, có phần nhỏ khác nhau ở giá trị lực va đập lớn nhất ($F_{\max}$) và

thời gian gia tải, điều này là do sự tối giản trong bài toán mô phỏng như đã nêu ở trên - điều kiện biên lý tưởng được áp dụng trong mô hình số, dẫn đến vận tốc hồi phục lớn hơn ở kết quả thực nghiệm, giải thích tại sao lực va đập từ mô phỏng số lớn hơn kết quả thực nghiệm, và thời gian gia tải nhỏ hơn ở phương pháp mô phỏng số (xem Hình 10).



Hình 10. So sánh sự thay đổi lực va đập giữa thực nghiệm (ghi bằng camera) và mô phỏng số cho lần va đập thứ tư

4. Kết luận

Ở nghiên cứu này, kỹ thuật phân tích hình ảnh để đo biến dạng chuyển vị của tấm kết cấu hàng hải trong quá trình chịu lực va đập đã được xây dựng thành công và ứng dụng một cách hiệu quả. Kết quả biến dạng thu được từ phương pháp phân tích hình ảnh được so sánh phù hợp với kết quả mô phỏng và kết quả đo thủ công. Kết quả so sánh nhìn chung khá tương đồng, tuy nhiên có sai số nhỏ bởi những yếu tố không mong muốn trong quá trình thí nghiệm như rung lắc khi quay video, hay bởi sự tối giản trong kỹ thuật mô phỏng số. Rõ ràng, kết quả thí nghiệm và mô phỏng đều cho thấy biến dạng chuyển vị của tấm tăng dần hay biến dạng dư giảm dần theo số lần va đập. Kỹ thuật phân tích hình ảnh cũng cho thấy sự hiệu quả trong việc xác định quá trình biến dạng chuyển vị của kết cấu khi chịu va chạm theo thời gian. Kết quả nghiên cứu này cũng có thể được áp dụng trong việc quan sát sự ổn định của hàng hóa trong quá trình chất xếp và vận chuyển thông qua camera quan sát theo thời gian thực, từ đó giúp theo dõi, quản lý hiệu quả quá trình vận chuyển hàng hóa và đảm bảo an toàn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi nguồn ngân sách khoa học và công nghệ của Trường Đại học Nha Trang trong đề tài mã số TR2025-13-21 và SV2023-13-49.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. S. Sutherland and C. Guedes Soares, "Impact behaviour of GRP, aluminium and steel plates", in *Proceedings of 2nd International Conference on Marine Structures-Analysis and Design of Marine Structures*, Taylor & Francis, Lisbon, Portugal, 2009, pp. 293–300. doi: 10.13140/RG.2.1.1020.2327
- [2] J. Liu and N. Jones, "Experimental investigation of clamped beams struck transversely by a mass", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 303–335, 1987. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(87\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0734-743X(87)90097-2)
- [3] M. Langseth and P. K. Larsen, "Dropped objects' plugging capacity of aluminium alloy plates", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 225–241, 1994.

- [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(05\)80015-6](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(05)80015-6)
- [4] L. Zhu, "Stress and strain analysis of plates subjected to transverse wedge impact", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 31, no. 1, pp. 1-7, 1994. <https://doi.org/10.1243/03093247V311001>.
 - [5] N. Jones and J. K. Paik, "Impact perforation of aluminium alloy plates", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 48, pp. 46-53, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.05.007>
 - [6] R. Villavicencio, L. Sutherland, and C. Guedes Soares, "Numerical simulation of transversely impacted, clamped circular aluminium plates", *Ships and Offshore Structures*, vol. 7, no. 1, pp. 31-45, 2012. <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.548122>
 - [7] R. Villavicencio, and C. Guedes Soares, "On the failure criterion of aluminum and steel plates subjected to low-velocity impact by a spherical indenter", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 80, pp. 1-15, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.12.015>
 - [8] L. Y. Qian, G. Fang, P. Zeng, and Q. Wang, "Experimental and numerical investigations into the ductile fracture during the forming of flat-rolled 5083-O aluminum alloy sheet", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 220, pp. 264-275, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.031>
 - [9] D. Morin, B. L. Kaarstad, B. Skajaa, O. S. Hopperstad, and M. Langseth, "Testing and modelling of stiffened aluminium panels subjected to quasi-static and low-velocity impact loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 110, pp. 97-111, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.03.002>
 - [10] F. Duan, J. Liu, G. Wang, and Z. L. Yu, "Dynamic behavior of aluminum alloy plates with surface cracks subjected to repeated impacts", *Ships and Offshore Structures*, vol. 14, no. 5, pp. 478-491, 2019. <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1507088>
 - [11] D. D. Truong, H. K. Shin, and S.-R. Cho, "Permanent set evolution of aluminium-alloy plates due to repeated impulsive pressure loadings induced by slamming", *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 23, pp. 580-595, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0494-2>
 - [12] D. D. Truong and N. A. V. Le, "Dynamic response of aluminum-alloy plates subjected to repeated impacts", in *Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications*, Springer, Thai Nguyen, Vietnam, 2022, pp. 365-374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92574-1_37
 - [13] D. D. Truong, T. K. Dang, T. L. Vo, and V. L. Dau, "Effects of impact location on the dynamic response of repeatedly impacted aluminum alloy plates", *Journal of Fisheries Science and Technology*, vol. 1, pp. 134-141, 2024. <https://doi.org/10.53818/jfst.01.2024.244>
 - [14] S.-R. Cho, D. D. Truong, and H. K. Shin, "Repeated lateral impacts on steel beams at room and sub-zero temperatures", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 72, pp. 75-84, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.05.010>
 - [15] S.-R. Cho, D. D. Truong, and H. K. Shin, "Response of low temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 670-682, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.10.002>
 - [16] S.-R. Cho, D. D. Truong, and H. K. Shin, "Repeated lateral impacts on steel grillage structures at room and sub-zero temperatures", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 113, pp. 40-53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.11.007>
 - [17] K. L. Guo, L. Zhu, Y. G. Li, T. X. Yu, A. Sheno, and Q. Zhou, "Experimental investigation on the dynamic behaviour of aluminum foam sandwich plate under repeated impacts", *Composite Structures*, vol. 200, pp. 298-305, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.148>
 - [18] Y. Zhang, Y. G. Li, K. L. Guo, and L. Zhu, "Dynamic mechanical behaviour and energy absorption of aluminium honeycomb sandwich panels under repeated impact loads", *Ocean Engineering*, vol. 219, pp. 108344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108344>
 - [19] H. H. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration", *NDT & E International*, vol. 38, no. 3, pp. 213-218, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.012>
 - [20] C. Gentile, "Deflection measurement on vibrating stay cables by non-contact microwave interferometer", *NDT & E International*, vol. 43, no. 3, pp. 231-240, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.11.007>
 - [21] Y. Tian, J. Zhang, and S. Yu, "Vision-based structural scaling factor and flexibility identification through mobile impact testing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 122, pp. 387-402, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.12.029>
 - [22] D. Feng and M. Q. Feng, "Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review", *Engineering Structures*, vol. 156, pp. 105-117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.018>
 - [23] D. Feng, M. Feng, E. Ozer, and Y. Fukuda, "A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement", *Sensors*, vol. 15, pp. 16557-16575, 2015. <https://doi.org/10.3390/s150716557>
 - [24] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M-16a. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
 - [25] B. C. Seo, D. D. Truong, S.-R. Cho, D. J. Kim, S. K. Park, and H. K. Shin, "A study on accumulated damage of steel wedges with dead-rise 10 degree due to slamming loads", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, pp. 520-528, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.03.001>
 - [26] V.-V. Huynh, S.-R. Cho, X.-P. Dang, and D. D. Truong, "Practical formula for predicting the residual deflection evolution of steel plates subjected to repeated impacts", *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 6, 956, 2024. <https://doi.org/10.3390/jmse12060956>
 - [27] S.-R. Cho, D. N. C. Le, J.-H. Jeong, P. A. Frieze, and H.-K. Shin, "Development of simple design-oriented procedure for predicting the collision damage of FPSO caisson protection structures", *Ocean Engineering*, vol. 142, pp. 458-469, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.036>