

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

LÊ THANH CAO

PHÁT TRIỂN PHƯƠNG PHÁP NĂNG LƯỢNG BIẾN DẠNG ĐỂ  
CHẨN ĐOÁN HƯ HỎNG CHO KẾT CẤU TẮM

Ngành: Kỹ thuật Xây dựng  
Mã số ngành: 9580201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn: PGS. TS. Hồ Đức Duy

Phản biện độc lập: PGS. TS. Nguyễn Văn Hiếu

Phản biện độc lập: PGS. TS. Trần Cao Thanh Ngọc

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Văn Hiếu

Phản biện: PGS. TS. Bùi Quốc Bảo

Phản biện: PGS. TS. Vũ Công Hòa

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại  
Phòng chuyên đề Khoa Kỹ thuật Xây dựng - Trường Đại học Bách khoa - Đại  
học Quốc gia TP.HCM  
vào lúc 08 giờ 30 phút ngày 09 tháng 5 năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

### Tạp chí quốc tế

1. T.-C. Le, M.-N. Pham, C.-T. Nguyen, and D.-D. Ho, "Development of Modal Strain Energy Method for Structural Damage Detection in Plates," in *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development: Proceedings of the International Conference GTSD2022*, 2022, pp. 245-256: Springer.
2. T.-C. Le, V.-S. Bach, T.-S. Vo, N.-L. Pham, T.-C. Huynh, and D.-D. Ho, "Development of Modal Strain Energy Method Combined with Multi-phase Genetic Algorithm for Structural Damage Detection in Plates," in *Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures: Select Proceedings of SHM and ES 2022*: Springer, 2022, pp. 247-255.
3. T.-C. Le, D.-D. Ho, C.-T. Nguyen, and T.-C. Huynh, "Structural Damage Localization in Plates Using Global and Local Modal Strain Energy Method," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022.
4. V.-S. Bach, T.-C. Le, C.-T. Nguyen, M.-H. Tran, M.-N. Pham, and D.-D. Ho, "Damage Identification for Steel Frame Structures Using Two-Step Approach Combining Modal Strain Energy Method and Genetic Algorithm," in *ICSCEA 2021: Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*, 2022, pp. 767-775: Springer.
5. T.-C. Le, V.-S. Bach, C.-T. Nguyen, M.-H. Tran, and D.-D. Ho, "An Improved Approach for Damage Identification in Plate-Like Structures Based on Modal Assurance Criterion and Modal Strain Energy Method," in *ICSCEA 2021: Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*, 2022, pp. 737-745: Springer.
6. T.-C. Le, D.-D. Ho, T.-C. Huynh, and V.-S. Bach, "Crack detection in plate-like structures using modal strain energy method considering various boundary conditions," *Shock and Vibration*, vol. 2021, pp. 1-17, 2021.
7. T.-C. Le and D.-D. Ho, "Structural damage identification of plates using two-stage approach combining modal strain energy method and genetic

algorithm," in *Modern Mechanics and Applications: Select Proceedings of ICOMMA 2020*, 2022, pp. 1004-1017: Springer.

8. T.-C. Le, T.-T. Nguyen, T.-C. Huynh, and D.-D. Ho, "Damage Detection in Plates with Different Boundary Conditions Using Improved Modal Strain Energy Method," in *ICSCEA 2019: Proceedings of the International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*, 2020, pp. 1059-1068: Springer.

### **Tạp chí trong nước**

1. B. V. Sỹ, L. T. Cao và H. Đ. Duy, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu khung thép sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền," *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ – Kỹ thuật và Công nghệ*, Tập 4, Số 4, tr. 1254-1263, 2021.
2. L. T. Cao, B. V. Sỹ và H. Đ. Duy, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng kết hợp với thuật toán di truyền," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, Tập 14, Số 4V, tr. 16-28, 2020.
3. L. T. Cao, H. V. Phương, L. V. P. N. và H. Đ. Duy, "Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, Tập 62, Số 1, tr. 42-45, 2020.
4. H. Đ. Duy, H. P. H. Lộc, L. T. Cao và N. T. Thịnh, "Chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng có xét đến điều kiện biên khác nhau và ảnh hưởng của nhiệt độ," *Tạp chí Xây dựng*, Số 05, tr. 97-102, 2019.
5. H. Đ. Duy, L. T. Cao, L. Q. Huy, N. M. T. Anh và N. T. Chung, "Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng cho kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau," *Tạp chí Xây dựng*, Số 09, tr. 341-347, 2018.

### **Kỹ yếu hội nghị quốc tế**

1. T.-C. Le, D.-D. Ho, and J.-T. Kim, "Damage detection in plate-like structures using two-stage approach combining modal strain energy method and genetic algorithm," in *The International Conference on Disaster Mitigation Technology for Smart Infrastructure (DMTSI 2022)*, Busan - South Korea, 2022.

2. D.-D. Ho, T.-C. Le, V.-P. Huynh, and Q.-H. Le, "Advances in smart structural health monitoring technologies for sustainable development of infrastructure," in *The 12th AUN/SEED-Net Regional Conference on Environmental Engineering 2019 (RCEE 2019)*, Bali - Indonesia, 2019.
3. T.-C. Le and D.-D. Ho, "Damage detection in plate-like structures using improved modal strain energy method," in *The Third International Conference on Transport Infrastructure and Sustainable Development (TISDIC2019)*, Danang - Vietnam, 2019.

### **Kỹ yếu hội nghị trong nước**

1. H. V. Phuong, **L. T. Cao**, L. Q. Huy, H. Đ. Duy, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền," in *The 3rd Conference on Civil Technology (CIVILTECH3)*, Thành phố Hồ Chí Minh, 2019.

### **Đề tài nghiên cứu khoa học**

1. Hồ Đức Duy, "Theo dõi tổn hao lực căng cáp trong dầm bê tông cốt thép ứng suất trước sử dụng đặc trưng trở kháng cơ-điện kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo." B2020-20-06/ĐHQG. Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, 2020-2022.
2. Lê Thanh Cao, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng và thuật toán di truyền." TR2020-13-11. Trường Đại học Nha Trang, Khánh Hòa, 2020-2021.
3. Bạch Văn Sỹ, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu khung không gian sử dụng các đặc trưng của dao động." TR2020-13-22. Trường Đại học Nha Trang, Khánh Hòa, 2020-2021.
4. Hồ Đức Duy, "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng cải tiến." T-KTXD-2019-13. Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, 2019-2020.
5. Hồ Đức Duy, "Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm với các điều kiện biên khác nhau." C2018-20-26/ĐHQG. Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, 2018-2019.

# CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU

## 1.1 Tính cần thiết và ý nghĩa thực tiễn

Với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học và công nghệ trong lĩnh vực xây dựng, các công trình dân dụng có quy mô ngày càng lớn và phức tạp. Trong đó, kết cấu tấm là một trong những thành phần cơ bản của một công trình dân dụng. Trong quá trình xây dựng và vận hành, việc xảy ra các khuyết tật hay hư hỏng trong kết cấu là không thể tránh khỏi. Vì vậy, kết cấu cần được giám sát thường xuyên, liên tục để phát hiện hư hỏng sớm nhằm đưa ra các hành động sửa chữa, bảo trì để đảm bảo sự an toàn và sự vận hành bình thường của kết cấu.

Việc phát triển các phương pháp chẩn đoán hư hỏng kết cấu, đặc biệt là các phương pháp sử dụng các đáp ứng dao động từ kết cấu, nhận được quan tâm của rất nhiều nhà nghiên cứu. Trong đó, phương pháp năng lượng biến dạng đã chứng tỏ là một trong những phương pháp có tính hiệu quả cao để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu [1]. Các nghiên cứu về các chỉ số hư hỏng dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng trên nhiều dạng cấu kiện khác nhau đã chẩn đoán vị trí hư hỏng trong một số kịch bản hư hỏng đơn giản, chẳng hạn: tỉ lệ thay đổi năng lượng biến dạng dao động (*MSECR*) [2], phân tích năng lượng biến dạng dao động (modal strain energy decomposition) [3], năng lượng biến dạng chéo (*cross modal strain energy*) [4], chỉ số dựa trên năng lượng biến dạng (*MSEBI*) [5], chỉ số năng lượng biến dạng dao động tương đương (*MSEEI*) [6], chỉ số năng lượng dao động tổng cộng (*total modal energy index*) [7], chỉ số năng lượng biến dạng chuẩn hóa (*normalized modal strain energy-based damage index - nMSEBI*) [8]...

Tuy nhiên, các chỉ số hư hỏng này được tính toán dựa vào ma trận độ cứng phần tử và vectơ các thành phần chuyển vị nút của phần tử [2]. Cách tiếp cận này chỉ có ý nghĩa về mặt lý thuyết chứ không khả thi cho việc triển khai trong thực tiễn vì phải đo đạc nhiều dữ liệu về chuyển vị nút. Ngoài ra, các chỉ số hư hỏng này chưa hiệu quả trong việc chẩn đoán hư hỏng trong các trường hợp đa hư hỏng, mức độ hư hỏng nhỏ, các hư hỏng nằm ở biên... Do vậy, phương pháp

năng lượng biến dạng cần được tiếp tục cải tiến để chẩn đoán được chính xác hư hỏng trong các trường hợp nêu trên mà chỉ sử dụng thành phần chuyển vị theo phương vuông góc với mặt phẳng tấm.

Bên cạnh thông tin về vị trí hư hỏng, mức độ hư hỏng của các phần tử trong kết cấu cũng là một thông tin rất quan trọng mà các hệ thống SHM phải cung cấp được [9]. Để có được thông tin về vị trí và mức độ hư hỏng từ dữ liệu các dạng dao động, các quy trình hai bước được nghiên cứu áp dụng và đã chứng tỏ được hiệu quả tốt. Trong đó, bước 1 sử dụng một chỉ số hư hỏng dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng của kết cấu ở hai trạng thái chưa hư hỏng và có hư hỏng để khoanh vùng hư hỏng. Tiếp theo, một thuật toán tối ưu được sử dụng để ước lượng mức độ hư hỏng của kết cấu thông qua việc cực tiểu các hàm mục tiêu, chẳng hạn: thuật toán tối ưu bầy đàn [5, 10], thuật toán Jaya [8], thuật toán tiến hóa [11], mô hình mạng nơron nhân tạo [12], tối ưu dựa vào dạy và học [13], ... Trong các công cụ tối ưu thì thuật toán di truyền được ứng dụng phổ biến và đã được chứng minh là hiệu quả trong việc xác định mức độ hư hỏng của kết cấu khi bước 1 xác định chính xác các phần tử hư hỏng [14].

Tuy nhiên, trong trường hợp bước 1 chẩn đoán dư nhiều phần tử hư hỏng thì kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng của bước 2 không chính xác, thể hiện thông qua việc giá trị hàm mục tiêu không thể hội tụ về điều kiện dừng. Do đó, việc cải tiến thuật toán di truyền ở bước 2 để giải quyết bài toán trên có ý nghĩa rất lớn trong việc nâng cao hiệu quả chẩn đoán hư hỏng.

Ngoài ra, kết cấu sàn bê tông cốt thép được sử dụng rất phổ biến trong lĩnh vực xây dựng dân dụng. Kết cấu sàn thường chịu tải trọng phân bố đều và là một trong những cấu kiện cơ bản của công trình. Trong quá trình sử dụng, tấm sàn thường bị nứt ở các cấp tải nhỏ do cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông thấp hơn nhiều so với cường độ chịu nén. Các vết nứt phát triển theo sự gia tăng tải trọng làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Chính vì vậy, việc theo dõi và phát hiện hư hỏng để kịp thời sửa chữa, bảo trì, gia cường kết cấu sàn là rất cần thiết đối với sự an toàn và vận hành bình thường của công trình.

## **1.2 Mục tiêu và nội dung nghiên cứu**

### **1.2.1 Mục tiêu nghiên cứu**

Mục tiêu của nghiên cứu này là phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để cải tiến quy trình chẩn đoán hư hỏng trên kết cấu tấm đến mức độ 3, nhằm xác định sự xuất hiện, vị trí và mức độ của hư hỏng trong kết cấu tấm.

### **1.2.2 Nội dung nghiên cứu**

- (1) Phát triển phương pháp chẩn đoán hư hỏng dựa vào năng lượng biến dạng với bài toán tấm với các điều kiện biên khác nhau.
- (2) Cải tiến phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng để nâng cao độ chính xác của việc xấp xỉ năng lượng biến dạng phần tử và loại bỏ ảnh hưởng của điều kiện biên bằng cách sử dụng phần tử đẳng tham số chín nút.
- (3) Phát triển phương pháp chẩn đoán hư hỏng chỉ sử dụng dữ liệu dao động trên vùng hư hỏng cục bộ để giảm bớt dữ liệu đầu vào nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả chẩn đoán.
- (4) Cải tiến cách chọn ra các dạng dao động cho ra kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt nhất bằng cách sử dụng hệ số tương quan giữa các dạng dao động ở hai trạng thái tấm chưa hư hỏng và tấm có hư hỏng.
- (5) Cải tiến quy trình chẩn đoán hư hỏng hai bước để chẩn đoán cả vị trí và mức độ hư hỏng. Trong cải tiến này, năng lượng biến dạng của phần tử được tính toán dựa vào phần tử chín nút và chỉ sử dụng duy nhất thành phần chuyển vị đứng.
- (6) Cải tiến quy trình chẩn đoán mức độ hư hỏng ở bước 2 bằng cách sử dụng thuật toán di truyền lặp nhằm loại bỏ dần các phần tử không hư hỏng bị cảnh báo sai ở bước 1.
- (7) Kiểm chứng quy trình chẩn đoán vị trí hư hỏng được đề xuất trên tấm sàn bê tông cốt thép chịu tác dụng của tải trọng.



### **1.3 Phương pháp nghiên cứu**

Các phương pháp nghiên cứu chủ đạo dùng trong nghiên cứu này là mô phỏng số và lập trình tính toán.

### **1.4 Phạm vi nghiên cứu**

Đề tài giới hạn trong phạm vi nghiên cứu sau: Tấm hình chữ nhật tuân theo lý thuyết tấm dày Mindlin-Reissner. Các điều kiện biên được lý tưởng hóa là ngàm, tựa đơn hoặc tự do. Tấm dao động trong điều kiện tự do, không cản. Hư hỏng phần tử được mô phỏng bằng cách giảm độ cứng phần tử, giảm chiều dày hoặc là các vết nứt do tải trọng gây ra.

### **1.5 Những đóng góp mới của luận án**

- (1) Xây dựng được quy trình chẩn đoán vị trí hư hỏng dựa vào năng lượng biến dạng cho bài toán tấm với các điều kiện biên khác nhau.
- (2) Xây dựng được phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng phần tử dựa vào dữ liệu chuyển vị đứng của phần tử chín nút để nâng cao độ chính xác của kết quả chẩn đoán và loại bỏ ảnh hưởng của điều kiện biên.
- (3) Xây dựng được quy trình chẩn đoán hư hỏng sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ nhằm giảm bớt dữ liệu đầu vào nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả chẩn đoán.
- (4) Xây dựng được bộ các chỉ số đánh giá độ chính xác của kết quả chẩn đoán cho vùng hư hỏng, vùng không hư hỏng và độ chính xác tổng thể.
- (5) Xây dựng được tiêu chí lựa chọn dạng dao động để chọn ra các dạng dao động cho ra kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt nhất thay vì sử dụng ngẫu nhiên các dạng dao động đầu tiên.
- (6) Phát triển quy trình chẩn đoán hư hỏng hai bước để chẩn đoán cả vị trí và mức độ hư hỏng.

- (7) Cải tiến quy trình chẩn đoán mức độ hư hỏng ở bước 2 bằng cách sử dụng thuật toán di truyền lặp nhằm loại bỏ các phần tử hư hỏng chẩn đoán sai ở bước 1.
- (8) Áp dụng phương pháp năng lượng để xác định vị trí hư hỏng trên kết cấu tấm sàn bê tông cốt thép làm việc sau giai đoạn đàn hồi.

## **1.6 Cấu trúc của luận án**

Nội dung của luận án được trình bày trong sáu chương: Chương 1 (Giới thiệu); Chương 2 (Tổng quan nghiên cứu); Chương 3 (Cơ sở lý thuyết - Trình bày các cơ sở lý thuyết của phương pháp năng lượng biến dạng, phương pháp di truyền lặp và các cải tiến sử dụng); Chương 4 (Các bài toán phân tích - Trình bày các cải tiến áp dụng trên hai bài toán tấm kim loại và tấm bê tông); Chương 5 (Bài toán mở rộng - Trình bày các cải tiến áp dụng trên bài toán tấm sàn bê tông cốt thép); Chương 6 (Kết luận và kiến nghị); Tài liệu tham khảo; Phụ lục.

## **CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU**

### **2.1 Các cấp độ điều khiển sức khỏe kết cấu**

Mục tiêu của SHM là xác định được hư hỏng kết cấu và đánh giá được khả năng chịu lực của kết cấu sử dụng các dữ liệu thu thập được. Rytter [9] chia việc xác định hư hỏng theo bốn cấp độ. Trong đó, cấp độ thấp nhất cần xác định các chỉ tiêu định lượng để cung cấp được thông tin về sự xuất hiện của hư hỏng trong kết cấu. Cấp độ 2 cung cấp thêm thông tin về các vị trí có thể xảy ra hư hỏng. Cấp độ 3 phải ước lượng được mức độ, độ lớn của hư hỏng. Ở cấp này, cần phải có một mô hình tham số để mô tả được hư hỏng, chẳng hạn như: chiều dài vết nứt, kích thước tách lớp, độ giảm độ cứng hay mức giảm khối lượng, chiều dày... Đặc biệt, cấp độ cao nhất cung cấp được thông tin về độ an toàn của kết cấu, ước tính được tuổi thọ còn lại của kết cấu.

### **2.2 Các kỹ thuật khoanh vùng hư hỏng dựa vào đặc trưng dao động**

Khoanh vùng hư hỏng là hoạt động SHM ở cấp độ 2, được thực hiện sau khi đã xác định có sự xuất hiện của hư hỏng ở trong kết cấu, nhằm xác định chính xác vị trí, hoặc khu vực có khả năng bị hư hỏng. Các kỹ thuật được sử dụng phổ biến bao gồm các phương pháp dựa vào thay đổi tần số [15-17], thay đổi dạng dao động [18-20], thay đổi độ cong dạng dao động [21-23] và thay đổi năng lượng biến dạng [2, 3].

Nghiên cứu so sánh [1] chỉ ra rằng phương pháp xác định hư hỏng dựa trên năng lượng biến dạng cho kết quả ổn định nhất trong điều kiện có nhiễu tín hiệu so với các phương pháp còn lại. Năng lượng biến dạng của toàn bộ kết cấu cho dạng dao động có thể được tính dựa vào tích phân của tích độ cứng và bình phương độ cong của hàm dạng trên toàn bộ chiều dài dầm. Đối với kết cấu tấm, tấm được chia thành các dải nhỏ và tính năng lượng biến dạng giống như đối với kết cấu dầm [24]. Trong một cách tiếp cận khác thì năng lượng biến dạng của một phần tử được tính bằng tích giữa véc-tơ dạng dao động tại các nút của phần tử và ma trận độ cứng của phần tử [2].

### 2.3 Các kỹ thuật định lượng hư hỏng

Định lượng hư hỏng là hoạt động SHM cấp độ 3, được thực hiện sau khi đã khoan vùng được vị trí của hư hỏng trong kết cấu. Những năm gần đây, nhiều kỹ thuật tiên tiến đã được triển khai để định lượng mức độ hư hỏng. Đây cũng là một lĩnh vực nghiên cứu mới nổi, thu hút cộng đồng nghiên cứu và đóng vai trò rất quan trọng trong lĩnh vực điều khiển sức khỏe kết cấu. Thông thường, hoạt động khoan vùng và định lượng hư hỏng có thể thực hiện đồng thời hoặc tuần tự. Các kỹ thuật tiên tiến được phát triển trong lĩnh vực này thường thuộc bốn nhóm: phương pháp cập nhật mô hình phần tử hữu hạn [25-27], phương pháp sử dụng thuật toán tối ưu [6, 14, 28], phương pháp sử dụng học máy [29-31] và phương pháp kết hợp.

Nghiên cứu tổng quan về SHM chỉ ra rằng các phương pháp kết hợp có khả năng dự đoán cả vị trí và mức độ hư hỏng tốt hơn so với việc sử dụng từng phương pháp riêng lẻ. Trong số các phương pháp kết hợp, phương pháp tiếp cận hai giai đoạn (*two-stage method*) được đánh giá là hữu ích nhất cho mục tiêu xác định và ước lượng hư hỏng. Đặc điểm chung của các phương pháp này là các vị trí hư hỏng nghi ngờ được xác định sơ bộ bằng phương pháp khoan vùng hư hỏng trong giai đoạn đầu tiên và sau đó phương pháp định lượng hư hỏng được thực hiện trong giai đoạn thứ 2 để tìm ra chính xác vị trí và mức độ hư hỏng.

Gần đây, có rất nhiều nghiên cứu về các phương pháp hai giai đoạn được thực hiện, trong đó bước 1 sử dụng chỉ tiêu nhạy với hư hỏng như thay đổi năng lượng biến dạng để khoan vùng hư hỏng, bước 2 sử dụng một thuật toán tối ưu tìm kiếm để định lượng hư hỏng [5, 10, 32].

## CHƯƠNG 3 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 3.1 Phân tích dao động tự do tấm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn

Thông số dạng dao động tự do của kết cấu tấm ở trạng thái trước và sau khi xuất hiện hư hỏng là dữ liệu đầu vào của phương pháp năng lượng biến dạng. Trong nghiên cứu này, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích dao động tự do cho kết cấu tấm. Phần tử tứ giác đẳng tham số bốn nút, ký hiệu là Q4 (*four-node Quadrilateral Element*) hoặc phần tử tứ giác đẳng tham số chín nút, ký hiệu là Q9 (*nine-node Quadrilateral Element*) có thể được sử dụng mô phỏng và phân tích dao động tự do cho kết cấu tấm hình chữ nhật.

Phương trình phân tích dao động tự do không cản của kết cấu tấm:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = 0 \quad (3.1)$$

Trong đó  $\mathbf{d}(t)$  và  $\ddot{\mathbf{d}}(t)$  lần lượt là vectơ chuyển vị và vectơ gia tốc của tất cả các nút trong miền bài toán;  $\mathbf{K}$  và  $\mathbf{M}$  lần lượt là ma trận độ cứng tổng thể và ma trận khối lượng tổng thể ghép nối từ các ma trận phần tử.

### 3.2 Tiêu chuẩn so sánh các dạng dao động (Modal Assurance Criterion: MAC)

#### 3.2.1 Công thức xác định MAC

Giả sử có hai tập hợp véc-tơ dạng dao động  $\Phi^A$  với  $n$  dạng dao động và  $\Phi^B$  với  $m$  dạng dao động. Để xác định tính tương quan giữa véc-tơ dạng dao động thứ  $i$  của tập hợp véc-tơ A, ký hiệu là  $\{\Phi_i^A\}$  và thứ  $j$  của tập hợp véc-tơ B, ký hiệu là  $\{\Phi_j^B\}$ , chỉ tiêu MAC được tính toán như sau [33]:

$$MAC(i, j) = \frac{\left| \{\Phi_i^A\}^T \{\Phi_j^B\} \right|^2}{\left( \{\Phi_i^A\}^T \{\Phi_i^A\} \right) \left( \{\Phi_j^B\}^T \{\Phi_j^B\} \right)} \quad (3.2)$$

MAC là một đại lượng vô hướng có độ lớn thay đổi từ 0 đến 1. Khi giá trị MAC bằng 1 thì hai dạng dao động tương quan hoàn toàn. Ngược lại, khi MAC bằng 0 thì hai dạng dao động hoàn toàn không tương quan.

### 3.2.2 Ứng dụng của chỉ tiêu MAC trong lĩnh vực chẩn đoán hư hỏng

Trong lĩnh vực chẩn đoán hư hỏng, MAC được sử dụng để [34]:

(1) So sánh các dạng dao động của hai tập hợp véctor nhằm chọn ra các dạng dao động có hình dạng tương đồng để đưa vào thuật toán chẩn đoán.

(2) So sánh mức độ tương quan cùng một dạng dao động của kết cấu ở hai trạng thái để phát hiện sự xuất hiện hư hỏng và đánh giá sơ bộ mức độ hư hỏng.

Trong nghiên cứu này, MAC được sử dụng làm căn cứ cho việc lựa chọn các dạng dao động nhạy nhất với hư hỏng để đưa vào thuật toán chẩn đoán hư hỏng nhằm nâng cao hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng.

### 3.3 Phương pháp năng lượng biến dạng

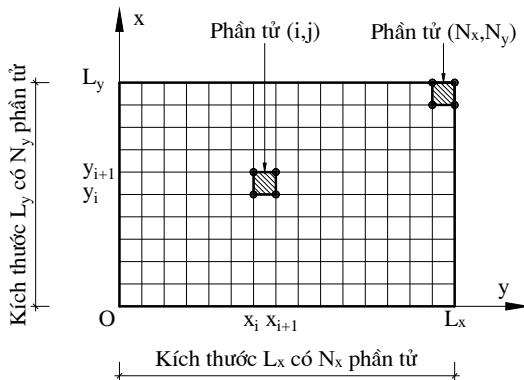
#### 3.3.1 Phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể

Xét một tấm mỏng dao động tự do không cản, được chia thành các vùng con như Hình 3.1.

Tương ứng với một dạng dao động thứ  $k$ ,  $\phi_k$ , năng lượng biến dạng dao động của vùng con  $(i, j)$  được xác định như sau [35]:

$$MSE_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[ \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.3)$$

trong đó:  $D_{ij}$  là độ cứng chống uốn của vùng con  $(i, j)$ ;  $\nu$  là hệ số Poisson.



Hình 3.1. Sơ đồ kết cấu tấm tổng thể

Năng lượng biến dạng tổng cộng của toàn bộ tấm:

$$MSE_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} MSE_{k,ij} \quad (3.4)$$

Năng lượng biến dạng tỷ đôi của vùng con thứ  $(i, j)$  được xác định như sau:

$$F_{k,ij} = \frac{MSE_{k,ij}}{MSE_k}, \quad \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1 \quad (3.5)$$

Xét  $m$  dạng dao động, trong tính toán, chỉ số hư hỏng trong vùng con  $(i, j)$  được định nghĩa là:

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (3.6)$$

trong đó: ký hiệu “\*” đại diện cho kết cấu ở trạng thái sau khi xuất hiện hư hỏng.

Chỉ số hư hỏng được chuẩn hóa theo công thức:

$$MSEDI_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (3.7)$$

trong đó,  $\bar{\beta}_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của các chỉ số hư hỏng.

Giá trị  $MSEDI_{ij}$  được sử dụng để chẩn đoán vị trí phân tử xuất hiện hư hỏng trong kết cấu tấm. Trong công thức tính năng lượng biến dạng (3.3) xuất hiện giá trị đạo hàm bậc hai của dạng dao động theo hai biến  $x$  và  $y$ . Phương pháp sai phân trung tâm được sử dụng để xác định các giá trị này.

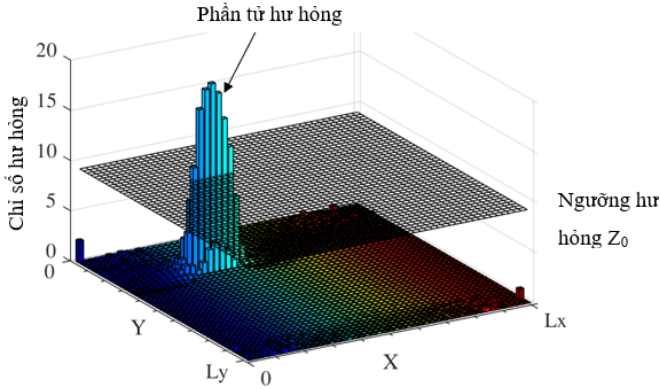
### 3.3.2 Ngưỡng hư hỏng (damage threshold)

Căn cứ để phát hiện các vùng hư hỏng trong tấm là chỉ số hư hỏng sau khi đã chuẩn hoá. Đồ thị chỉ số hư hỏng trên toàn tấm cho thấy nhiều phân tử có chỉ số hư hỏng khá lớn so với các phần lại và cũng có những phân tử chưa hư hỏng nhưng có chỉ số hư hỏng lớn hơn 0. Do đó, cần có tiêu chuẩn cụ thể để đánh giá một vùng con là đã hư hỏng hay chưa. Tác giả đề xuất sử dụng một khái niệm gọi là ngưỡng hư hỏng [36]. Chỉ số hư hỏng được tính toán cho tất cả các phần

từ trên toàn tấm. Ngưỡng hư hỏng  $Z_0$  được tính bằng tỷ lệ phần trăm chỉ số hư hỏng lớn nhất trên toàn tấm  $MSEDI_{ij}^{max}$ . Khi chỉ số hư hỏng lớn hơn hoặc bằng ngưỡng hư hỏng, phần tử được xem là cảnh báo hư hỏng. Ngược lại, phần tử chưa hư hỏng.

$$Z_0 = a \times MSEDI_{ij}^{max} \tag{3.8}$$

trong đó  $a$  là hệ số tỷ lệ phần trăm, nằm trong đoạn từ 0 đến 100%.



Hình 3.2. Minh họa ngưỡng hư hỏng

### 3.3.3 Phương pháp năng lượng cục bộ

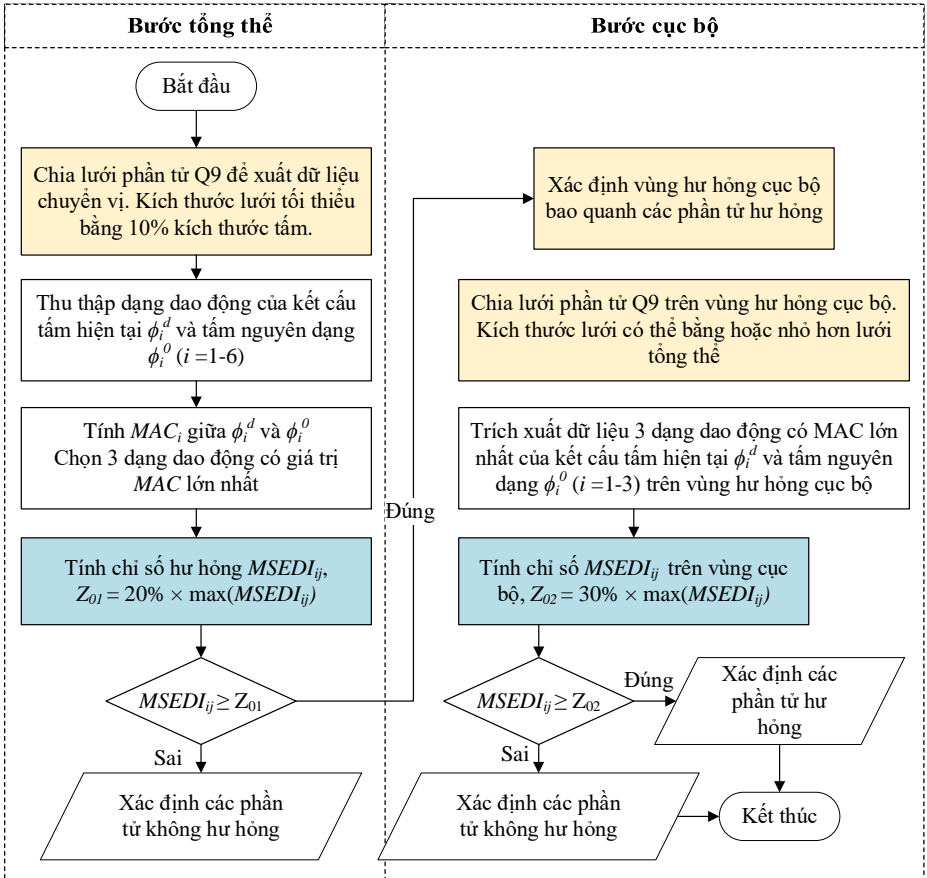
Phương pháp này là chỉ xét đến dữ liệu chuyển vị tại các điểm nằm trong vùng hư hỏng cục bộ. Như vậy, ảnh hưởng của các điểm nằm ngoài vùng cục bộ này đến kết quả chẩn đoán được loại bỏ.

Nội dung của phương pháp này được tóm tắt theo lưu đồ dưới. Trong đó, vùng hư hỏng cục bộ được khoanh vùng dựa vào các phần tử hư hỏng được chẩn đoán ở bước tổng thể. Vùng hư hỏng cục bộ là hình chữ nhật được lấy bao phủ quanh các phần tử hư hỏng sơ bộ đoạn bằng 20% kích thước của tấm về mỗi phía.

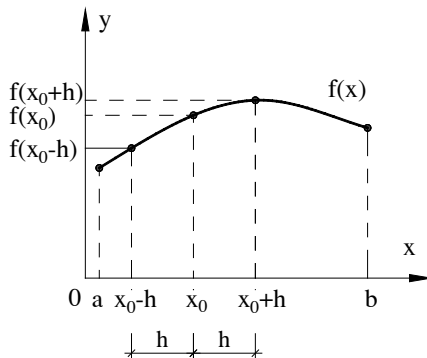
### 3.3.4 Phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng dựa vào phần tử Q4

Công thức phương pháp sai phân trung tâm (*central differential method*) dựa vào định lý Taylor [37]. Cho  $n$  là số nguyên dương và  $f(x)$  là hàm khả vi, liên tục đến cấp ba trên đoạn  $[a, b]$  và khả vi cấp bốn trên khoảng  $(a, b)$  như minh họa ở Hình 3.4.





Hình 3.3. Lưu đồ phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể, cục bộ

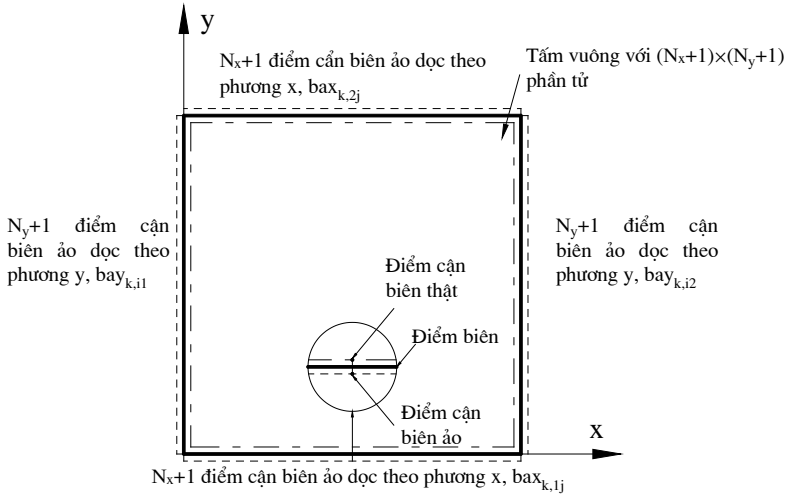


Hình 3.4. Minh họa phương pháp sai phân trung tâm

Thông qua khai triển Taylor bậc bốn và các phép biến đổi, khi khoảng cách  $h$  đủ nhỏ, thu được phép xấp xỉ sau:

$$f''(x_0) \approx \frac{f(x_0 + h) - 2f(x_0) + f(x_0 - h)}{h^2} \quad (3.9)$$

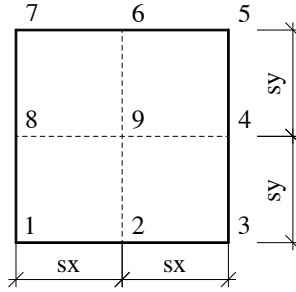
Phương trình (3.9) được sử dụng để xấp xỉ đạo hàm bậc hai của hàm dạng theo các phương  $x$  và  $y$ . Trong phương pháp xấp xỉ năng lượng dựa vào phần tử Q4, phương pháp sai phân trung tâm được sử dụng tính đạo hàm của hàm dạng tại các điểm biên thật, sử dụng dữ liệu chuyển vị tại điểm biên, điểm cận biên thật và điểm cận biên ảo. Điểm cận biên ảo là các điểm đối xứng với điểm cận biên thật qua điểm biên như minh họa ở Hình 3.5.



Hình 3.5. Minh họa các điểm cận biên

### 3.3.5 Phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng dựa vào phần tử Q9

Phần tử Q9 có hàm dạng để nội suy tọa độ và chuyển vị có dạng bậc 2 thay vì bậc nhất như phần tử Q4 nên cho kết quả phân tích dao động chính xác hơn. Quan trọng hơn, nhờ có chín điểm nút như minh họa ở Hình 3.6, phương pháp sai phân trung tâm có thể được áp dụng để xấp xỉ đạo hàm bậc hai tại tâm của phần tử Q9 mà chỉ cần xét đến dữ liệu chuyển vị tại các điểm nút của phần tử. Từ đó, các bước xấp xỉ được giảm bớt và ảnh hưởng của điều kiện biên đến công thức tính giá trị năng lượng biến dạng của phần tử cũng được loại bỏ.



Hình 3.6. Các điểm nút của phần tử Q9

Cụ thể, các đạo hàm bậc hai tại điểm số 9 được xấp xỉ dựa vào giá trị chuyển vị tại các điểm lân cận điểm số 9 như sau:

$$\frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 x} = \frac{\phi_4 - 2\phi_9 + \phi_8}{(sx)^2}; \quad \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 y} = \frac{\phi_2 - 2\phi_9 + \phi_6}{(sy)^2}$$

$$\frac{\partial \phi_6}{\partial x} = \frac{\phi_5 - \phi_7}{2 \times sx}; \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = \frac{\phi_3 - \phi_1}{2 \times sx}; \quad \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial x \partial y} = \frac{\frac{\partial \phi_6}{\partial x} - \frac{\partial \phi_2}{\partial x}}{2 \times sy}$$
(3.10)

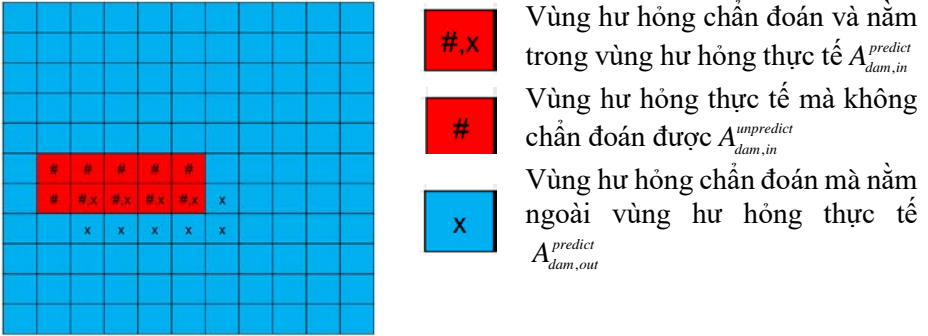
trong đó  $sx, sy$  lần lượt là kích thước của phần tử theo phương  $x, y$ ;  $\phi_{i=1-9}$  là giá trị chuyển vị tại chín nút của phần tử.

Năng lượng biến dạng phần tử e được tính thông qua giá trị các đạo hàm bậc hai tại điểm 9 như sau:

$$MSE_e = \frac{D_{ij}}{2} \left[ \left( \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 x} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 y} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 x} \right) \left( \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial^2 y} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \phi_9}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] 4sx sy \quad (3.11)$$

Công thức (3.11) chính là ưu điểm của phần tử Q9 so với phần tử Q4 khi áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng. Công thức này có thể được áp dụng để tính năng lượng biến dạng của phần tử trong kết cấu tấm với các điều kiện biên khác. Ưu điểm này rất có ý nghĩa trong thực tiễn bởi vì các điều kiện biên của kết cấu trong thực tế không phải là các liên kết lý tưởng như ngàm, khớp hoặc tự do. Ngoài ra, việc giảm bớt các phép xấp xỉ giúp làm tăng độ chính xác và hiệu quả chẩn đoán hư hỏng.

### 3.4 Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán phân tử hư hỏng



Hình 3.7. Minh họa các đại lượng trong tính toán chỉ số đánh giá hiệu quả

$A_{gross}$  : Diện tích toàn tấm

$A_{dam}^{real}$  : Vùng hư hỏng thực tế

#### 3.4.1 Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán vùng hư hỏng (chỉ số A)

Chỉ số này được định nghĩa bằng tỉ số giữa diện tích vùng hư hỏng chẩn đoán nằm trong vùng hư hỏng thực tế và diện tích vùng hư hỏng thực tế.

$$A = \frac{A_{dam,in}^{predict}}{A_{dam}^{real}} \quad (3.12)$$

#### 3.4.2 Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán vùng không hư hỏng (chỉ số B)

Chỉ số B được định nghĩa là tỉ số giữa diện tích vùng không hư hỏng chẩn đoán được và diện tích vùng không hư hỏng thực tế.

$$B = \frac{A_{undam}^{predict}}{A_{undam}^{real}} = \frac{A_{gross} - (A_{dam,in}^{predict} + A_{dam,out}^{predict})}{A_{gross} - A_{dam}^{real}} \quad (3.13)$$

#### 3.4.3 Chỉ số đánh giá kết quả chẩn đoán tổng thể (chỉ số C)

Chỉ số C là chỉ số đánh giá tổng quát cho cả hiệu quả chẩn đoán vùng hư hỏng và vùng không hư hỏng trên toàn bộ diện tích tấm. Chỉ số C được định nghĩa bằng tổng độ chính xác chẩn đoán vùng nứt và vùng không nứt có kể đến

trọng số của mỗi vùng  $w_{dam}$ ,  $w_{undam}$ . Trọng số của mỗi vùng là tỉ số diện tích vùng đó và tổng diện tích của toàn tằm.

$$C = Aw_{dam} + Bw_{undam} = A \frac{A_{dam}^{real}}{A_{gross}^{real}} + B \frac{A_{undam}^{real}}{A_{gross}^{real}} \quad (3.14)$$

### 3.4.4 Chỉ số đánh giá mức độ chẩn đoán sai vùng hư hỏng (chỉ số D)

Chỉ số D được định nghĩa bằng tỷ số diện tích của vùng hư hỏng bị chẩn đoán sai và diện tích vùng hư hỏng thực tế.

$$D = \frac{A_{dam,out}^{predict}}{A_{dam}^{real}} \quad (3.15)$$

## 3.5 Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm: GA)

### 3.5.1 Khái niệm và các quá trình của thuật toán di truyền

Thuật toán này được xây dựng dựa trên sự mô phỏng của sự chọn lọc và sinh tồn của các cá thể trong tự nhiên để tìm ra cá thể có đặc điểm tốt nhất, từ đó ứng dụng trong bài toán tối ưu để tìm biến số cho kết quả tốt nhất đối với hàm mục tiêu đề ra. Các quá trình của di truyền bao gồm: chọn lọc, lai tạo và đột biến.

### 3.5.2 Định nghĩa về hư hỏng

Trong việc mô phỏng kết cấu tằm, phần tử hư hỏng được định nghĩa bằng hai cách: giảm chiều dày phân tử và giảm độ cứng của kết cấu.

### 3.5.3 Thông số thuật toán di truyền

#### 3.5.3.1 Biến số (variables)

Biến số trong bài toán này là vectơ độ giảm độ cứng  $\alpha^s$  tương ứng với phần tử xảy ra hư hỏng được chẩn đoán trước đó. Cận của biến số được lấy dựa theo phạm vi của mức độ hư hỏng có thể xảy ra,  $\alpha^s \in [0,1]$ .

#### 3.5.3.2 Hàm mục tiêu (objection function)

Có nhiều hàm mục tiêu khác nhau có thể sử dụng để chẩn đoán mức độ hư hỏng, chẳng hạn: (1) hàm mục tiêu thay đổi tần số; (2) hàm mục tiêu thay đổi dạng dao động; (3) hàm mục tiêu thay đổi năng lượng biến dạng tổng thể và (4) hàm mục tiêu thay đổi năng lượng biến dạng cục bộ. Kết quả khảo sát cho thấy

hàm mục tiêu dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng của các phần tử thuộc vùng hư hỏng sơ bộ cho kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng tốt nhất, và được tính như sau:

$$OF(\alpha^s) = \min_{\alpha^s} \left\langle \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n^*} \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}^s(\alpha^s)|}{MSE_{ij}^d} \right\rangle \quad (3.16)$$

Trong đó  $MSE_{ij}^d, MSE_{ij}^s(\alpha^s)$  lần lượt là năng lượng biến dạng của phần tử thứ  $j$  của dạng dao động tự do thứ  $i$  của trạng thái có hư hỏng thực tế và dạng dao động thứ  $i$  tương ứng với biến  $\alpha^s$ ;  $m$  là số dạng dao động xét đến trong tính toán;  $n^*$  là số phần tử nằm trong vùng hư hỏng sơ bộ đã xác định từ bước 1.

### 3.5.3.3 Điều kiện dừng (stop condition)

Thuật toán di truyền dừng khi đạt một trong hai điều kiện sau:

- (1) Số vòng lặp đạt đến giá trị số vòng lặp tối đa.
- (2) Giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn của độ thích nghi.

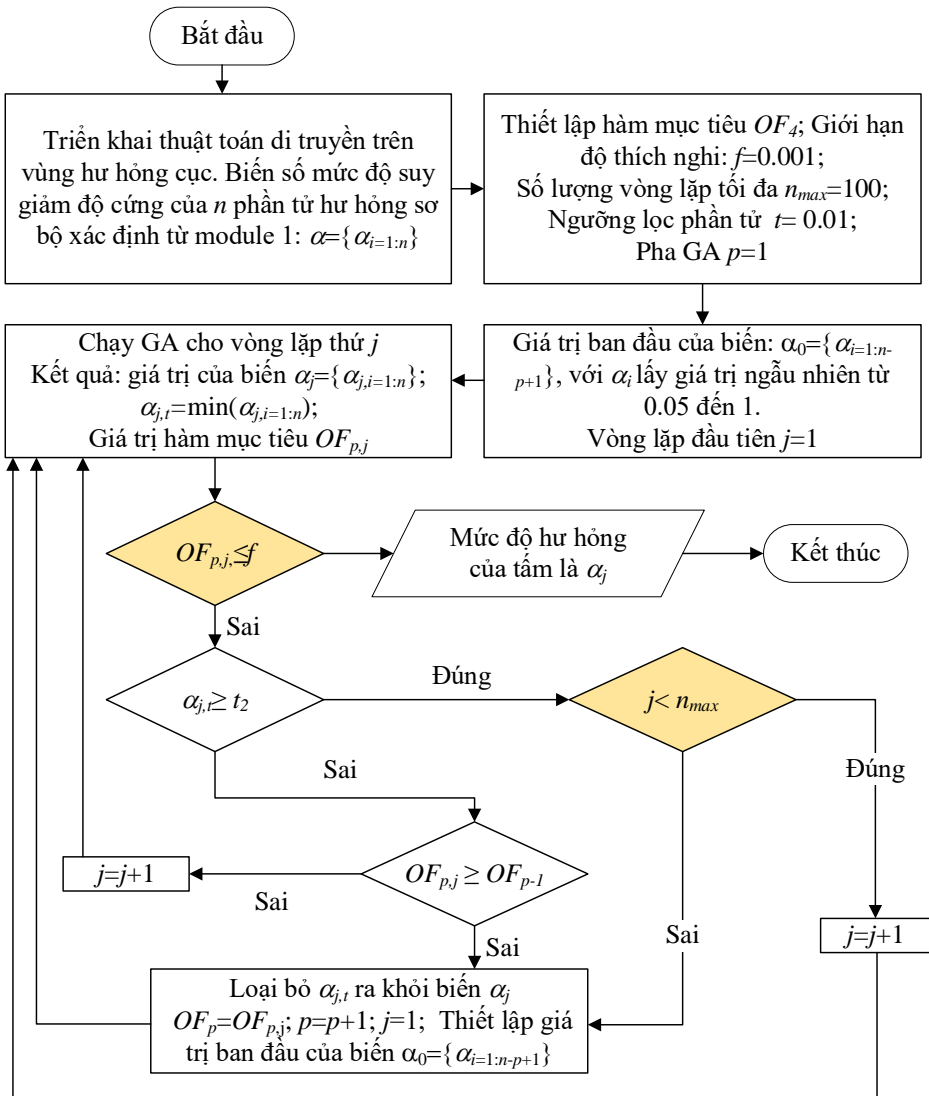
## 3.6 Thuật toán di truyền lặp (iterative genetic algorithm)

### 3.6.1 Đặt vấn đề

Trong các kịch bản hư hỏng phức tạp, bước 1 thường chẩn đoán dư phần tử hư hỏng. Khi bước 1 chẩn đoán dư nhiều hơn hai phần tử hư hỏng thì thuật toán di truyền không chẩn đoán được mức độ hư hỏng của phần tử hư hỏng thực tế. Do vậy, cần cải tiến thuật toán di truyền để giải quyết trường hợp này.

### 3.6.2 Đề xuất phương pháp

Phương pháp di truyền lặp được đề xuất để giải quyết vấn đề trên, trong đó thuật toán di truyền trải qua nhiều giai đoạn (pha), mỗi giai đoạn lọc ra một phần tử hư hỏng cảnh báo sai. Tiêu chuẩn để lọc ra phần tử hư hỏng ở từng pha là mức độ hư hỏng của phần tử được chẩn đoán nhỏ hơn 0.01, gọi là ngưỡng lọc phần tử. Hoặc sau 100 vòng lặp, nếu không có phần tử có mức độ hư hỏng chẩn đoán nhỏ hơn 0.01 thì phần tử có giá trị mức độ hư hỏng được chẩn đoán nhỏ nhất bị loại bỏ ra khỏi pha di truyền tiếp theo. Lưu đồ thuật toán di truyền lặp được thể hiện ở hình dưới.



Hình 3.8. Lưu đồ của thuật toán di truyền lặp

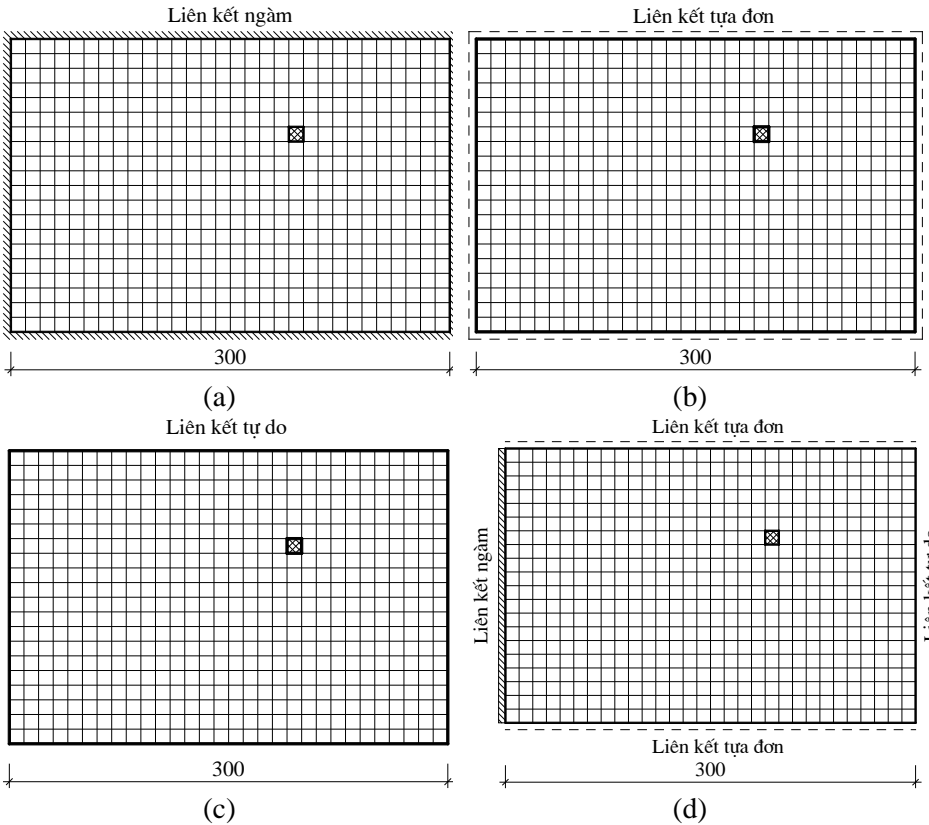
# CHƯƠNG 4 CÁC BÀI TOÁN PHÂN TÍCH

## 4.1 Bài toán 1: Chấn đoán vị trí hư hỏng trên tấm nhôm

### 4.1.1 Thông số bài toán

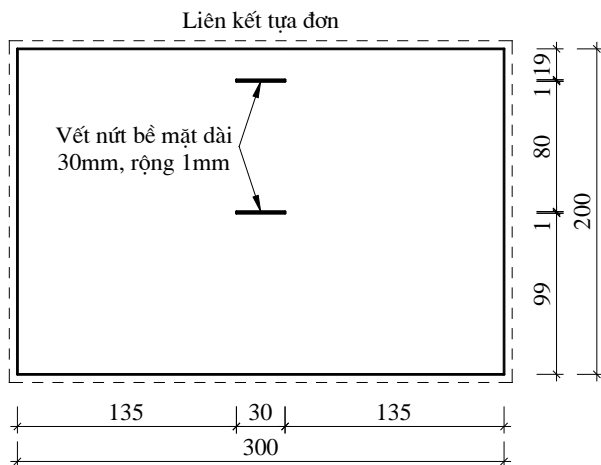
Các thông số của bài toán được lấy theo nghiên cứu của Kumar và Reddy (2016) [24]. Tấm nhôm hình chữ nhật có kích thước cạnh dài là 300 mm, cạnh ngắn là 200 mm, chiều dày là 4 mm, được chia thành 30 phần tử theo phương  $x$  và 20 phần tử theo phương  $y$  như Hình 4.1 (a). Vật liệu tấm có các thông số: khối lượng riêng  $\rho = 2710 \text{ kg/m}^3$ ; môđun đàn hồi  $E = 68.9 \text{ GPa}$ ; hệ số Poisson  $\nu = 0.33$ . Phần tử thứ 410 được giả định hư hỏng bằng cách giảm chiều dày.

### 4.1.2 Các kịch bản hư hỏng



Hình 4.1. Các kịch bản hư hỏng với điều kiện biên khác nhau. (a) Kịch bản 1. (b) Kịch bản 2. (c) Kịch bản 3. (d) Kịch bản 4





Hình 4.2. Kích bản hư hỏng số 5

Trong đó, kích bản 1 để khảo sát sự hội tụ của tần số dao động. Kích bản 3 dùng để so sánh tính hiệu quả của hai phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng. Kích bản 2 và 4 để minh họa tính hiệu quả hiệu quả của quy trình đề xuất trên tám với các điều kiện biên khác nhau. Kích bản 5 để so sánh hiệu quả phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ so với phương pháp tổng thể.

#### 4.1.3 Kết quả phân tích dao động tấm chừa hư hỏng, kích bản 1

Bảng 4.1 thể hiện thay đổi của tần số tự nhiên của tấm chừa hư hỏng với điều kiện biên bốn cạnh ngàm theo kích thước lưới phần tử. Kết quả cho thấy rằng, với kích thước lưới  $30 \times 20$ , tần số tự nhiên của bốn dạng dao động đầu tiên gần như bằng kết quả phân tích sử dụng lưới  $36 \times 24$ . Do đó, kích thước lưới  $30 \times 20$  được sử dụng để mô phỏng và phân tích dao động tự do của tấm.

Bảng 4.1. Tần số dao động (Hz) của tấm chừa hư hỏng, kích bản 1

Dạng dao động	Lưới phần tử					
	6×4	12×8	16×12	24×16	30×20	36×24
1	736.8	673.1	664.5	661.9	661.0	660.6
2	1145.9	1039.5	1026.4	1020.8	1019.4	1018.8
3	1962.9	1673.9	1633.8	1619.6	1614.6	1612.5
4	2147.3	1686.3	1643.0	1627.2	1623.7	1622.2

Bảng 4.2. So sánh tần số dao động theo các phương pháp khác nhau, kích bản 1

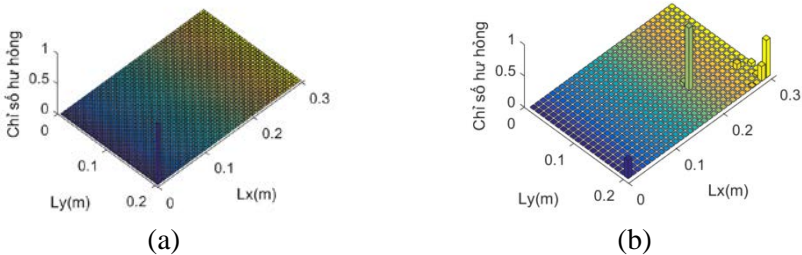
Dạng dao động	Tần số tự nhiên (Hz)				Độ chênh lệch (%)		
	Nghiên cứu này	[24]	[38]	SAP2000	[24]	[38]	SAP2000
1	661.0	660.3	662.8	661.4	0.11	0.28	0.06
2	1019.4	1018.8	1023.7	1019.2	0.06	0.43	0.02
3	1614.6	1615.9	1623.0	1619.3	0.08	0.52	0.29
4	1623.7	1624.4	1633.2	1624.6	0.05	0.59	0.06

Bảng 4.2 cho thấy kết quả phân tích dao động trong nghiên cứu này phù hợp với kết quả phân tích từ nghiên cứu của Kumar và Reddy [24], phân tích bằng phương pháp giải tích [38] và phân tích số bằng phần mềm SAP2000. Độ chênh lệch của các giá trị tần số dao động là rất nhỏ, thấp hơn 1%. Do đó, kết quả phân tích dao động tự do của tấm sử dụng trong nghiên cứu này là đáng tin cậy để làm dữ liệu đầu vào cho các bước chẩn đoán tiếp theo.

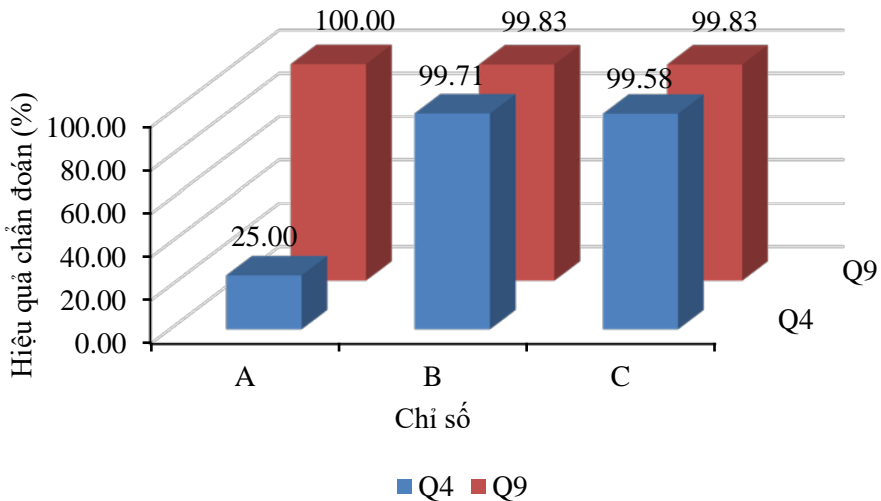
#### 4.1.4 Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng

##### 4.1.4.1 Ảnh hưởng của phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng đến kết quả chẩn đoán

Phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng dựa vào phần tử Q4 cho kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt đối với trường hợp biên tựa đơn và biên ngàm. Tuy nhiên trường hợp biên tự do, chỉ số hư hỏng tại vùng biên thường lớn, thậm chí lớn hơn nhiều so với vị trí có hư hỏng thực tế. Điều đó dẫn đến việc chẩn đoán sai các phần tử hư hỏng thực tế như minh họa ở Hình 4.3(a). Bằng cách cải tiến phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng dựa vào phần tử Q9, hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng trong trường hợp biên tự do được cải thiện đáng kể như ở Hình 4.3(b) và Hình 4.4.



Hình 4.3. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, sử dụng kết hợp 3 dạng đầu tiên, ngưỡng 20%. (a) Sử dụng Q4. (b) Sử dụng Q9



Hình 4.4. Chỉ số hiệu quả chẩn đoán khi sử dụng hai phương pháp xấp xỉ

#### 4.1.4.2 Ảnh hưởng của điều kiện biên đến kết quả chẩn đoán

Phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng dựa vào phần tử Q9 được áp dụng cho các trường hợp biên tựa, biên ngàm và biên tùy ý để kiểm chứng hiệu quả của quy trình chẩn đoán hư hỏng.

Bảng 4.3. Chỉ số hiệu quả, biên tựa đơn, Q9

Ngưỡng hư hỏng	Chỉ số hiệu quả	Dạng dao động sử dụng							
		1	2	3	4	1,2	1,2,3	1,2,3,4	
20%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	B (%)	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00
	C (%)	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00

Bảng 4.4. Chỉ số hiệu quả, biên ngàm, Q9

Ngưỡng hư hỏng	Chỉ số hiệu quả	Dạng dao động sử dụng							
		1	2	3	4	1,2	1,2,3	1,2,3,4	
20%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	B (%)	100.00	100.00	99.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	C (%)	100.00	100.00	99.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Kết quả chẩn đoán cho thấy, việc sử dụng phần tử Q9 cho hiệu quả chẩn đoán hư hỏng cao đối với các điều kiện biên khác nhau. Để nâng cao độ chính

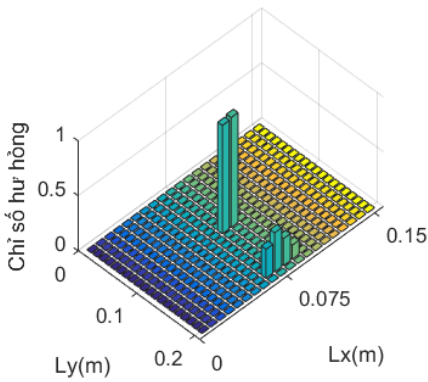
xác và ổn định của thuật toán, việc kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% được đề xuất sử dụng.

**Bảng 4.5. Chỉ số hiệu quả, biên tùy ý, Q9**

Ngưỡng hư hỏng	Chỉ số hiệu quả	Dạng dao động sử dụng						
		1	2	3	4	1,2	1,2,3	1,2,3,4
20%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	B (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	C (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

**4.1.4.3 Chẩn đoán vị trí hư hỏng sử dụng thuật toán cục bộ**

Hình 4.5 thể hiện biểu đồ chỉ số hư hỏng sau khi cắt xén bằng ngưỡng hư hỏng 30%, sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên. Kết quả cho thấy sau khi áp dụng phương pháp năng lượng biến tổng thể, hư hỏng được khoanh vùng thành các vùng hư hỏng cục bộ.



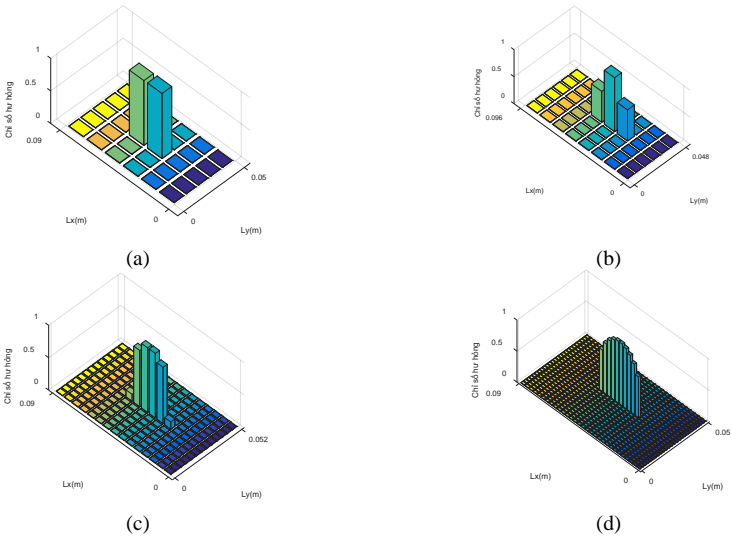
**Hình 4.5. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, ngưỡng hư hỏng 30%, kích thước lưới 5%**

**Bảng 4.6. Hiệu quả chẩn đoán phần tử hư hỏng, sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể**

Kích thước lưới	Chỉ số	Ngưỡng hư hỏng				
		10%	20%	30%	40%	50%
5%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	75.00
	D (%)	2400.00	1650.00	650.00	525.00	300.00
10%	A (%)	100.00	100.00	25.00	25.00	25.00
	D (%)	1275.00	1025.00	350.00	350.00	350.00

Với cùng một kích thước lưới thì chỉ tiêu D, đặc trưng cho mức độ chẩn đoán sai các phần tử hư hỏng, giảm khi ngưỡng hư hỏng tăng lên. Giả sử D bằng

2400%, điều đó có nghĩa là diện tích vùng hư hỏng bị chẩn đoán sai có diện tích lớn gấp 24 lần diện tích vùng hư hỏng thực tế. Giá trị  $D$  bằng 0 tương ứng với khả năng xác định chính xác các phần tử hư hỏng. Với ngưỡng 50%, giá trị  $D$  sử dụng kích thước lưới 5% nhỏ hơn của lưới 10%. Tuy nhiên, chỉ tiêu  $D$  vẫn lớn, bằng 300% khi sử dụng lưới kích thước 5%. Chính vì thế, phương pháp khoanh vùng hư hỏng dựa vào phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ được đề xuất để tăng hiệu quả khoanh vùng hư hỏng.



Hình 4.6. Biểu đồ chỉ số hư hỏng của vùng hư hỏng sơ bộ thứ nhất, ngưỡng hư hỏng 30%. (a) Lưới 5%, (b) Lưới 4%, (c) Lưới 2%, (d) Lưới 1%

Bảng 4.7 cho thấy rằng, với cùng một kích thước lưới 5%, kết quả chẩn đoán vùng hư hỏng của phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ tốt hơn so với phương pháp tổng thể. Kết quả cũng cho thấy với cùng một ngưỡng hư hỏng thì khi kích thước lưới phần tử giảm xuống thì hiệu quả chẩn đoán tăng lên. Để chẩn đoán hiệu quả cả vùng không hư hỏng và vùng hư hỏng, ngưỡng hư hỏng 30% được đề xuất sử dụng đối với thuật toán cục bộ.

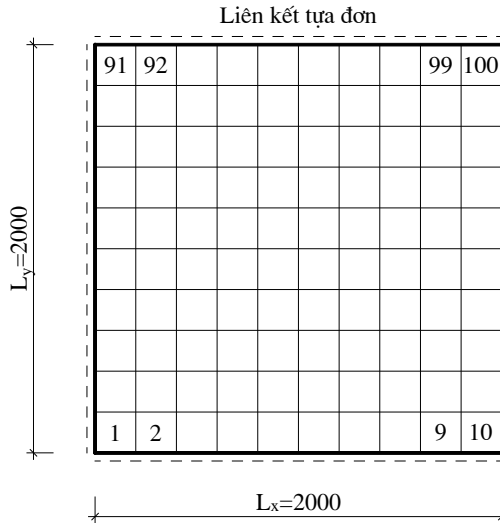
Bảng 4.7. Hiệu quả chẩn đoán phân tử hư hỏng trên vùng hư hỏng sơ bộ

Kích thước lưới	Chỉ tiêu hiệu quả	Ngưỡng hư hỏng				
		10%	20%	30%	40%	50%
5%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	D (%)	900.00	400.00	400.00	400.00	400.00
4%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	D (%)	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00
2%	A (%)	100.00	100.00	100.00	66.67	66.67
	D (%)	140.00	140.00	140.00	93.33	93.33
1%	A (%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	D (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 4.2 Bài toán 2: Chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng trên tấm bê tông

### 4.2.1 Thông số bài toán kiểm chứng

Các thông số của bài toán được lấy theo nghiên cứu của Dinh và cộng sự [8]. Tấm bê tông hình vuông có kích thước mỗi cạnh là 2000 mm, chiều dày là 150 mm, có bốn biên liên kết tựa đơn, được chia thành 10 phần tử theo mỗi phương như Hình 4.7. Vật liệu tấm có các thông số: khối lượng riêng  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ; mô đun đàn hồi  $E = 20 \text{ GPa}$ ; hệ số Poisson  $\nu = 0.2$ . Trong bài toán này, hư hỏng được giả định bằng cách giảm độ cứng phần tử.



Hình 4.7. Sơ đồ hình học của tấm bê tông với lưới phần tử  $10 \times 10$

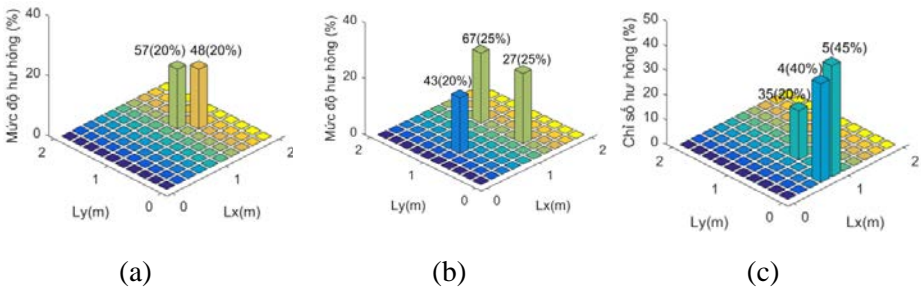
### 4.2.2 Các kịch bản hư hỏng phân tích

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng của phần tử, tác giả áp dụng quy trình đề xuất ở Chương 3 cho ba kịch bản hư hỏng có nhiều phần tử với các vị trí và mức độ hư hỏng khác nhau. Thông số cụ thể của các kịch bản hư hỏng được thể hiện ở Bảng 4.8 và Hình 4.8.

Trong đó, kịch bản hư hỏng 1 và 2 được sử dụng để chứng thực mô hình phần tử hữu hạn với nghiên cứu [8]. Kịch bản hư hỏng 3 để so sánh hiệu quả chẩn đoán của việc lựa chọn các dạng dao động làm đầu vào cho thuật toán và minh họa hiệu quả của phương pháp di truyền lặp trong việc loại bỏ dần các phần tử chẩn đoán dư ở bước 1.

Bảng 4.8. Thông số các kịch bản hư hỏng

Kịch bản hư hỏng	Phần tử hư hỏng	Mức độ hư hỏng (%)
KB1	48 57	20 20
KB2	27 43 67	25 20 25
KB3	4 5 35	40 45 20



Hình 4.8. Các kịch bản hư hỏng với vị trí và mức độ hư hỏng khác nhau. (a) Kịch bản 1. (b) Kịch bản 2. (c) Kịch bản 3

### 4.2.3 Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng

Để tăng hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng, việc kết hợp ba dạng dao động được sử dụng với ngưỡng hư hỏng 20%. Đồng thời, ba trong số sáu dạng dao động đầu tiên có chỉ số MAC cao nhất được chọn để làm đầu vào cho thuật toán chẩn đoán. Bảng 4.9 cho thấy trong cả ba kịch bản hư hỏng, dạng dao động 1, 4 và 6 có chỉ số MAC lớn nhất và được chọn để làm đầu vào cho thuật toán

chẩn đoán vị trí hư hỏng. Kết quả chẩn đoán được so sánh với trường hợp sử dụng ba dạng dao động đầu tiên (dạng 1, 2 và 3).

Kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của ba kịch bản được so sánh với nghiên cứu [8]. Trong cách tiếp cận của Dinh và các cộng sự, chỉ tiêu dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng trước và sau khi xuất hiện hư hỏng, nMSEBI được đề xuất để chẩn đoán phần tử hư hỏng. Trong đó, năng lượng biến dạng phần tử được tính bằng cách nhân véc-tơ chuyển vị nút với ma trận độ cứng phần tử.

Bảng 4.9. Chỉ tiêu MAC giữa dạng dao động trước và sau khi có hư hỏng

Dạng dao động	Kịch bản 1	Kịch bản 2	Kịch bản 3
1	1.000	1.000	1.000
2	0.989	0.973	0.950
3	0.989	0.973	0.950
4	1.000	1.000	0.998
5	0.999	1.000	0.984
6	0.999	1.000	0.988

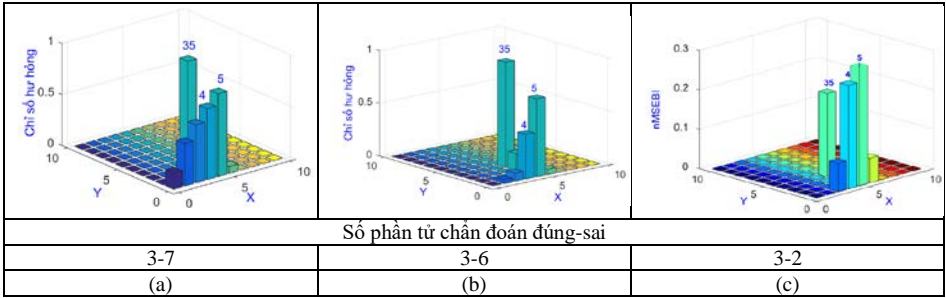
Số phần tử chẩn đoán đúng-sai		
2-0	2-0	2-2
(a)	(b)	(c)

Hình 4.9. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, kịch bản 1. (a) Không lọc dạng dao động. (b) Có lọc dạng dao động. (c) Theo Dinh và cộng sự [8]

Số phần tử chẩn đoán đúng-sai		
2-0	2-0	2-3
(a)	(b)	(c)

Hình 4.10. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, kịch bản 2. (a) Không lọc dạng dao động. (b) Có lọc dạng dao động. (c) Theo Dinh và cộng sự [8]





Hình 4.11. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, kích bản 3. (a) Không lọc dạng dao động. (b) Có lọc dạng dao động. (c) Theo Dinh và cộng sự [8]

So sánh với kết quả chẩn đoán sử dụng chỉ tiêu nMSEBI trong nghiên cứu [8], kết quả chẩn đoán phần tử hư hỏng trong hai kịch bản đầu tốt hơn. Cụ thể, thuật toán đề xuất trong nghiên cứu này chẩn đoán chính xác hoàn toàn các phần tử hư hỏng. Trong khi đó chỉ tiêu được đề xuất bởi Dinh và cộng sự chẩn đoán dư một số phần tử đối với hai kịch bản đầu. Đối với kịch bản 3, nếu sử dụng ngưỡng hư hỏng 30% thì kết quả chẩn đoán sử dụng ba dạng dao động có chỉ số MAC lớn nhất cho kết quả tốt hơn so với trong nghiên cứu [8].

#### 4.2.4 Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng sử dụng thuật toán di truyền thông thường

Để so sánh hiệu quả của hàm mục tiêu đối với việc chẩn đoán mức độ hư hỏng, hai trường hợp được khảo sát như sau: trường hợp 1 thì bước đầu tiên chẩn đoán chính xác ba phần tử hư hỏng, với trường hợp 2 thì bước đầu tiên chẩn đoán dư một phần tử mà thực tế không hư hỏng. Thuật toán chạy qua 50 vòng lặp với trường hợp 1 và 100 vòng lặp với trường hợp 2.

Bảng 4.10. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng, hàm mục tiêu năng lượng biến dạng cục bộ, kịch bản 1

Phần tử chẩn đoán	Trường hợp 1		Trường hợp 2			
	Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 100	
	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)
48 (0.200)	0.200	0.00	0.206	3.11	0.206	3.11
57 (0.200)	0.200	0.00	0.195	2.56	0.195	2.56
Giá trị hàm mục tiêu	2.61E-13		6.22E-02		6.22E-02	

Bảng 4.11. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng sử dụng hàm mục tiêu năng lượng biến dạng cục bộ, kích bản 2

Phần tử chẩn đoán	Trường hợp 1		Trường hợp 2			
	Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 100	
	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)
27 (0.250)	0.250	0.05	0.251	0.32	0.250	0.01
43 (0.20)	0.200	0.03	0.20	0.81	0.201	0.31
67 (0.250)	0.251	0.32	0.25	0.53	0.250	0.11
Giá trị hàm mục tiêu	6.36E-03		2.92E-02		1.54E-02	

Bảng 4.12. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng, hàm mục tiêu năng lượng biến dạng cục bộ, kích bản 3

Phần tử chẩn đoán	Trường hợp 1		Trường hợp 2			
	Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 50		Số vòng lặp: 100	
	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)	MĐHH chẩn đoán	Sai số (%)
4 (0.400)	0.400	0.01	0.401	0.27	0.401	0.27
5 (0.450)	0.450	0.02	0.437	2.83	0.437	2.83
35 (0.20)	0.200	0.00	0.198	0.82	0.198	0.82
Giá trị hàm mục tiêu	2.09E-04		4.13E-02		4.13E-02	

Hàm mục tiêu dựa vào thay đổi năng lượng biến dạng trên vùng hư hỏng cục bộ có khả năng chẩn đoán tốt nhất mức độ hư hỏng của phần tử kể cả trong trường hợp bước 1 chẩn đoán dư một phần tử hỏng. Tuy nhiên, trong trường hợp bước 1 chẩn đoán dư hai phần tử hư hỏng thì thuật toán không chẩn đoán được chính xác mức độ hư hỏng thực tế của phần tử 100 vòng lặp.

#### 4.2.5 Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng sử dụng thuật toán di truyền lặp

Giá sử, trường hợp bước thứ nhất chẩn đoán dư hai phần tử (phần tử 3 và 25) thì Bảng 4.13 cho thấy sai số chẩn đoán vẫn lên đến 16.6% đối với phần tử 4 sau 100 vòng lặp. Giá trị hàm mục tiêu bằng 0.12 sau 100 vòng lặp, lớn hơn nhiều so với điều kiện dừng của thuật toán là 0.001. Đồng thời, từ vòng lặp thứ 50, kết quả chẩn đoán không được cải thiện và giá trị hàm mục tiêu cũng không giảm khi số vòng lặp tăng lên. Như vậy, trong trường hợp này, thuật toán không chẩn đoán được chính xác mức độ hư hỏng thực tế của phần tử 100 vòng lặp. Đây là một hạn chế của thuật toán di truyền thông thường.

Bảng 4.13. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng sử dụng thuật toán di truyền thông thường, hàm mục tiêu năng lượng biến dạng cục bộ

Số vòng lặp	1	25	50	75	100
Phần tử chẩn đoán	Độ giảm độ cứng phần tử chẩn đoán				
3 (0.000)	0.156	0.072	0.070	0.070	0.070
4 (0.450)	0.061	0.336	0.333	0.333	0.333
5 (0.400)	0.661	0.432	0.455	0.455	0.455
25 (0.000)	0.019	0.005	0.004	0.004	0.004
35 (0.200)	0.291	0.197	0.197	0.197	0.197
Giá trị hàm mục tiêu	1.0E+00	1.4E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
Phần tử chẩn đoán	Sai số chẩn đoán (%)				
4 (0.450)	84.7%	16.1%	16.6%	16.6%	16.6%
5 (0.400)	46.9%	3.9%	1.2%	1.2%	1.2%
35 (0.200)	45.6%	1.5%	1.4%	1.4%	1.4%

Bằng cách áp dụng thuật toán di truyền lặp, thuật toán đề xuất có thể chẩn đoán chính xác mức độ hư hỏng của các phần tử. Thuật toán di truyền lặp trải qua ba pha, trong hai pha đầu, mỗi pha lọc được một phần tử hư hỏng chẩn đoán sai ở bước 1. Ở pha cuối cùng, thuật toán chẩn đoán chính xác mức độ hư hỏng của các phần tử 4,5 và 35 với sai số 0.03% chỉ sau 19 vòng lặp, như trình bày ở Bảng 4.15.

Bảng 4.14. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng, hai pha đầu

Pha	Số lượng vòng lặp	Giá trị nhỏ nhất của chỉ số hư hỏng	Phần tử hư hỏng được loại bỏ	Giá trị hàm mục tiêu
1	Các phần tử hư hỏng cần chẩn đoán: 3, 4, 5, <b>25</b> , 35			
	8	3.85E-04	25	7.68E-01
2	Các phần tử hư hỏng cần chẩn đoán: <b>3</b> , 4, 5, 35			
	8	6.19E-03	3	2.76E-01

Bảng 4.15. Kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng sử dụng, pha cuối

Số lượng vòng lặp	Phần tử hư hỏng	Chỉ số hư hỏng chẩn đoán được	Sai số chẩn đoán (%)	Giá trị hàm mục tiêu
Pha 3: các phần tử hư hỏng chẩn đoán: 4, 5, 35				
19	4 (0.450)	0.400	0.01	9.61E-04
	5 (0.400)	0.450	0.03	
	35 (0.200)	0.200	0.02	

# CHƯƠNG 5 CHẨN ĐOÁN HƯ HỎNG CHO SÀN BÊ TÔNG CỐT THÉP CHỊU TẢI TRỌNG

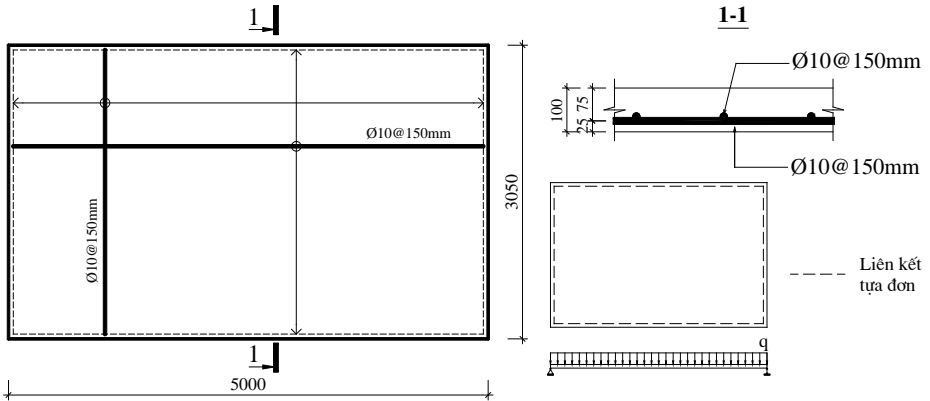
## 5.1 Phân tích tĩnh học tấm sàn bê tông cốt thép bốn cạnh tựa đơn

### 5.1.1 Thông tin đầu vào

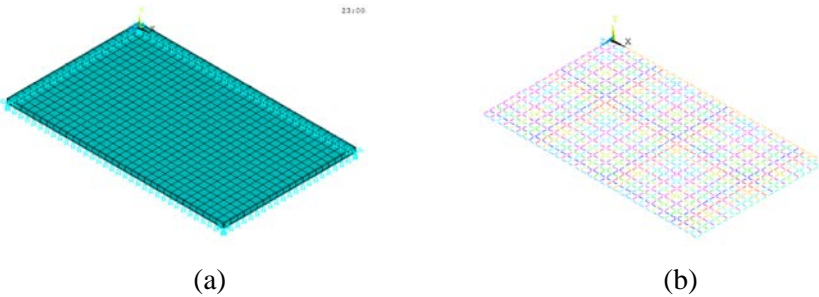
#### 5.1.1.1 Thông số mô hình

Tấm sàn bê tông cốt thép hình chữ nhật có bốn biên liên kết tựa đơn, kích thước các cạnh lần lượt là  $3.05 \times 5.00 \times 0.10$  m như minh họa ở Hình 5.1.

Thép được bố trí theo quy cách  $\text{Ø}10@150$  mm theo hai phương  $x$  và  $y$  ở lớp dưới để chịu mô men dương. Trong đó, thép theo phương cạnh ngắn được đặt ở phía dưới với khoảng cách từ trọng tâm cốt thép đến mép bê tông bằng 0.025 m.



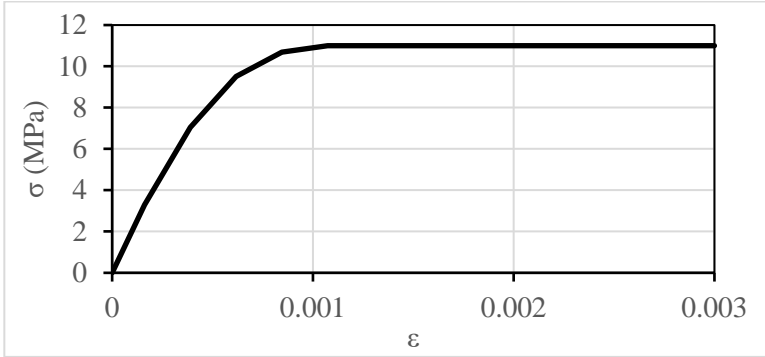
Hình 5.1. Kích thước và điều kiện biên của tấm sàn bê tông cốt thép



Hình 5.2. Mô hình tấm sàn bê tông cốt thép bốn cạnh tựa đơn trong ANSYS:  
(a) Liên kết; (b) Thép dọc chịu lực

### 5.1.1.2 Thông số vật liệu bê tông

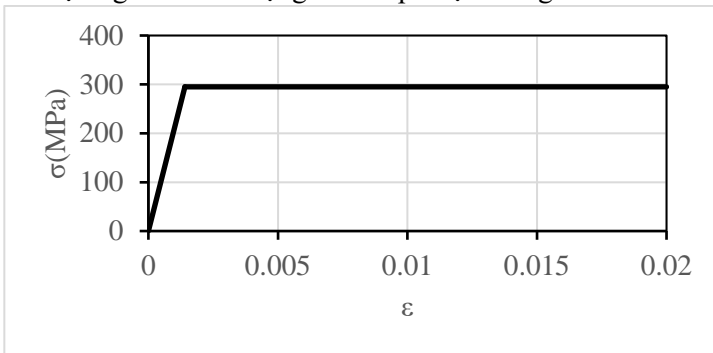
Thông số của vật liệu bê tông như sau: khối lượng riêng  $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ ; hệ số Poisson  $\nu_c = 0.2$ ; cường độ chịu nén một phương  $f'_c = 11.00 \text{ MPa}$ ; môđun đàn hồi  $E_c = 20500 \text{ MPa}$ .



Hình 5.3. Đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông

### 5.1.1.3 Thông số vật liệu cốt thép

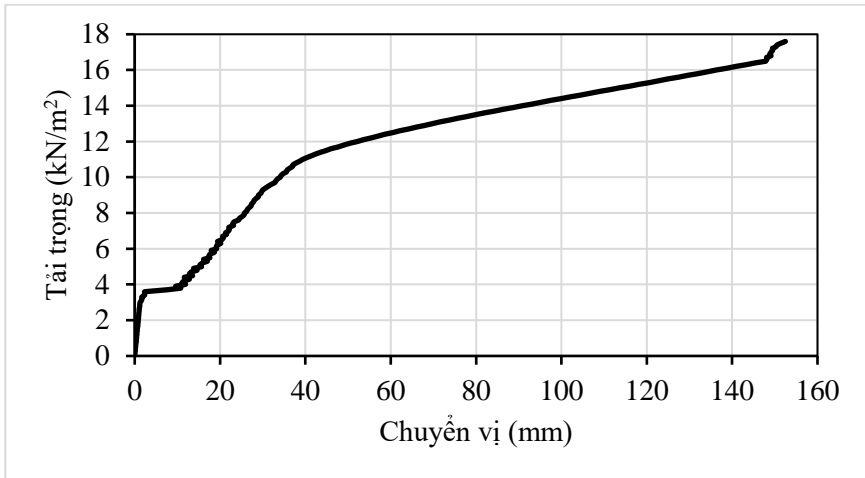
Thông số của vật liệu thép: khối lượng riêng  $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ ; hệ số Poisson  $\nu_s = 0.3$ ; môđun đàn hồi  $E_s = 210 \text{ GPa}$ ; cường độ chảy dẻo của thép  $f_y = 295 \text{ MPa}$ . Đường quan hệ ứng suất-biến dạng của thép được đơn giản hoá như Hình 5.4.



Hình 5.4. Đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của thép

## 5.1.2 Kết quả tính tải gây nứt, tải giới hạn

Tải gây nứt và tải phá hoại của tấm sàn bê tông cốt thép làm việc hai phương xác định bằng ANSYS gần sát với kết quả tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318-02.



Hình 5.5. Đường cong quan hệ tải trọng-chuyển vị tại giữa nhịp

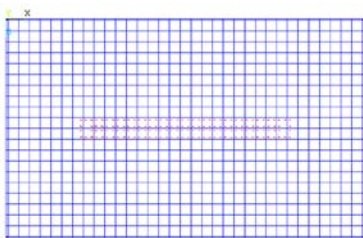
Bảng 5.1. Bảng so sánh tải gây nứt, tải phá hoại ô bản kê bốn cạnh

Phương pháp tính	ACI 318-02 [39]	ANSYS	Chênh lệch (%)
Tải gây nứt (kN/m <sup>2</sup> )	2.97	3.05	2.62
Tải phá hoại (kN/m <sup>2</sup> )	17.99	17.70	1.66

## 5.2 Chẩn đoán vị trí xuất hiện vết nứt trong tấm tại cấp tải gây nứt

### 5.2.1 Hình dạng vết nứt

Tại cấp tải gây nứt,  $q_{\text{crack}} = 3.05 \text{ kN/m}^2$  vết nứt xuất hiện tại vị trí ở mặt dưới tấm ở giữa nhịp và phân bố theo phương cạnh dài tấm. Hình dạng vết nứt được thể hiện chi tiết ở Hình 5.6.



(a)

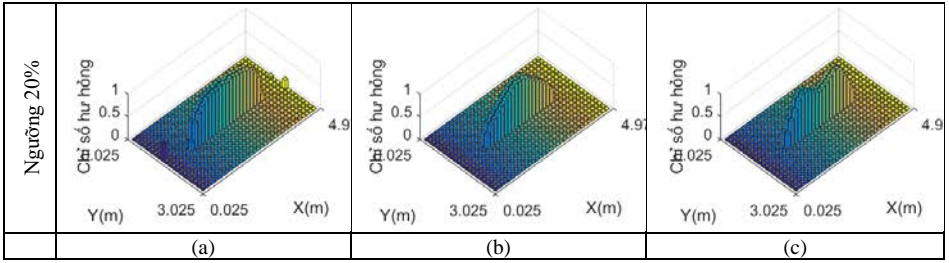


(b)



(c)

Hình 5.6. Hình dạng vết nứt. (a) Mặt dưới. (b) Mặt trước. (c) Mặt bên



Hình 5.7. Biểu đồ chỉ số hư hỏng. (a) Sử dụng dạng 1. (b) Sử dụng hai dạng đầu tiên. (c) Sử dụng ba dạng đầu tiên

### 5.2.2 Hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng

Hiệu quả chẩn đoán vị trí hư hỏng của từng trường hợp kết hợp dạng dao động và ngưỡng hư hỏng sử dụng được đánh giá dựa vào ba chỉ số A, B, C. Kết quả cho thấy rằng, trường hợp sử dụng kết hợp ba dạng dao động đầu tiên với ngưỡng hư hỏng 20% cũng cho kết quả chẩn đoán khá cao với chỉ số A bằng 90%, chỉ số B bằng 99% và chỉ số C bằng 99%. Như vậy, thuật toán đề xuất có khả năng chẩn đoán được hư hỏng khi tấm bắt đầu bị nứt.

Bảng 5.2. Hiệu quả chẩn đoán hư hỏng ở cấp tải  $q_{crack}$

Z <sub>0</sub>	Sử dụng một dạng dao động			Sử dụng kết hợp hai dạng dao động			Sử dụng kết hợp ba dạng dao động		
	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)	A (%)	B (%)	C (%)
10%	100	99	99	100	100	100	100	100	100
20%	100	100	100	95	100	99	90	99	99
30%	100	100	100	90	99	99	90	99	99
40%	90	100	99	90	99	99	90	99	99
50%	90	100	99	81	99	98	81	99	98

## CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 6.1 Kết luận

Luận án này đã kết hợp và cải tiến phương pháp năng lượng biến dạng với thuật toán di truyền trong một quy trình hai bước để xác định thành công vị trí và mức độ hư hỏng trong kết cấu tấm. Từ kết quả phân tích của các bài toán, một số kết luận quan trọng được rút ra như sau:

- (1) Phương pháp tính năng lượng biến dạng dựa vào phần tử chín nút cho kết quả chẩn đoán vị trí hư hỏng tốt hơn so với phương pháp dựa vào phần tử bốn nút. Đặc biệt, phương pháp xấp xỉ năng lượng biến dạng này có thể áp dụng cho tấm với điều kiện biên bất kỳ.
- (2) Việc sử dụng ba trong số sáu dạng dao động đầu tiên mà có chỉ tiêu MAC lớn nhất để làm đầu vào cho thuật toán chẩn đoán cho kết quả xác định vị trí hư hỏng tốt hơn so với việc sử dụng ngẫu nhiên ba dạng dao động đầu tiên.
- (3) Quy trình xác định vị trí hư hỏng sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể và cục bộ cho kết quả xác định vị trí hư hỏng tốt hơn trường hợp chỉ áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể. Bước tổng thể sử dụng ngưỡng hư hỏng bằng 20% giá trị chỉ số hư hỏng lớn nhất để xác định các vùng hư hỏng sơ bộ. Bước cục bộ sử dụng ngưỡng hư hỏng 30% để xác định chính xác hơn các phần tử hư hỏng đã xác định ở bước tổng thể.
- (4) Chỉ số A, B, C và D giúp đánh giá hiệu quả chẩn đoán phần tử hư hỏng, phần tử không hư hỏng toàn diện hơn so với số lượng các phần tử chẩn đoán đúng và số lượng các phần tử chẩn đoán sai.
- (5) Hàm mục tiêu dựa vào thay đổi giá trị năng lượng biến dạng phần tử trên vùng hư hỏng cục bộ cho kết quả chẩn đoán mức độ hư hỏng của kết cấu tốt nhất.



- (6) Với việc sử dụng thuật toán di truyền lặp, bước 1 có thể sử dụng ngưỡng hư hỏng thấp để không chẩn đoán thiếu các phần tử hư hỏng. Sau đó các phần tử bị chẩn đoán dư được loại bỏ dần thông qua các pha của thuật toán di truyền lặp.
- (7) Quy trình chẩn đoán vị trí hư hỏng có thể áp dụng được với tấm sàn bê tông cốt thép làm việc sau giai đoạn đàn hồi. Quy trình đề xuất xác định được chính xác vị trí xuất hiện các vết nứt trong sàn ở các cấp tải ngay sau khi vết nứt bắt đầu xuất hiện. Điều này giúp phát hiện sớm các hư hỏng khi ứng dụng quy trình chẩn đoán trong thực tiễn.

## **6.2 Kiến nghị**

Nghiên cứu hiện tại đã thực hiện nhiều cải tiến đáng kể trên quy trình chẩn đoán vị trí và mức độ hư hỏng trên kết cấu tấm. Tuy nhiên, vẫn còn một số vấn đề chưa được xét đến và cũng là giới hạn của đề tài này, cụ thể như sau:

- (1) Chưa xét đến phi tuyến hình học khi tấm dao động với biên độ lớn.
- (2) Chưa xem xét yếu tố nhiễu dữ liệu dao động do ảnh hưởng bởi điều kiện làm việc (nhiệt độ, độ ẩm), sai số của các phép đo và tính không toàn vẹn của dữ liệu.
- (3) Chưa xác định được mức độ hư hỏng trong bài toán tấm sàn bê tông cốt thép.
- (4) Chưa đánh giá khả năng chịu lực còn lại của kết cấu từ thông tin về vị trí và mức độ hư hỏng của các phần tử.
- (5) Chưa kiểm chứng hiệu quả chẩn đoán bằng nghiên cứu thực nghiệm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Alvandi and C. Cremona, "Assessment of vibration-based damage identification techniques," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 292, no. 1-2, pp. 179-202, 2006.
- [2] Z. Shi, S. Law, and L. Zhang, "Structural damage localization from modal strain energy change," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 218, no. 5, pp. 825-844, 1998.
- [3] H. Li, H. Yang, and S.-L. J. Hu, "Modal strain energy decomposition method for damage localization in 3D frame structures," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132, no. 9, pp. 941-951, 2006.
- [4] S.-L. James Hu, S. Wang, and H. Li, "Cross-modal strain energy method for estimating damage severity," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132, no. 4, pp. 429-437, 2006.
- [5] S. Seyedpoor, "A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 47, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [6] H. Y. Guo and Z. L. Li, "Structural damage identification based on evidence fusion and improved particle swarm optimization," *Journal of Vibration and Control*, vol. 20, no. 9, pp. 1279-1292, 2014.
- [7] Y. Li, M. Zhang, and W. Yang, "Numerical and experimental investigation of modal-energy-based damage localization for offshore wind turbine structures," *Advances in Structural Engineering*, vol. 21, no. 10, pp. 1510-1525, 2018.
- [8] D. Dinh-Cong, T. Vo-Duy, V. Ho-Huu, and T. Nguyen-Thoi, "Damage assessment in plate-like structures using a two-stage method based on modal strain energy change and Jaya algorithm," *Inverse Problems in Science Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 166-189, 2019.
- [9] A. Rytter, "*Vibrational based inspection of civil engineering structures*," Ph.D. dissertation, Aalborg University, Denmark, 1993.
- [10] P. Torkzadeh, Y. Goodarzi, and E. Salajegheh, "A two-stage damage detection method for large-scale structures by kinetic and modal strain energies using heuristic particle swarm optimization," *International Journal of Optimization in Civil Engineering* vol. 3, no. 3, pp. 465-482, 2013.
- [11] T. Vo-Duy, V. Ho-Huu, H. Dang-Trung, and T. Nguyen-Thoi, "A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm," *Composite Structures*, vol. 147, pp. 42-53, 2016.

- [12] H. Nick, A. Aziminejad, M. H. Hosseini, and K. Laknejadi, "Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network," *Engineering Failure Analysis*, vol. 119, p. 105010, 2021.
- [13] D. Dinh-Cong, T. Vo-Duy, and T. Nguyen-Thoi, "Damage assessment in truss structures with limited sensors using a two-stage method and model reduction," *Applied Soft Computing*, vol. 66, pp. 264-277, 2018.
- [14] V. Meruane and W. Heylen, "An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 25, no. 5, pp. 1559-1573, 2011.
- [15] A. Messina, I. Jones, and E. Williams, "Damage detection and localization using natural frequency changes," in *Proceedings of conference on Identification in Engineering Systems*, 1996, pp. 67-76.
- [16] A. Messina, E. Williams, and T. Contursi, "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 216, no. 5, pp. 791-808, 1998.
- [17] Q. Huang, Y. L. Xu, J. Li, Z. Su, and H. Liu, "Structural damage detection of controlled building structures using frequency response functions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 15, pp. 3476-3492, 2012.
- [18] J.-C. Chen and J. A. Garba, "On-orbit damage assessment for large space structures," *AIAA journal*, vol. 26, no. 9, pp. 1119-1126, 1988.
- [19] H. Li, Y. Huang, J. Ou, and Y. Bao, "Fractal dimension-based damage detection method for beams with a uniform cross-section," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 190-206, 2011.
- [20] J. Wang and P. Qiao, "Improved damage detection for beam-type structures using a uniform load surface," *Structural Health Monitoring*, vol. 6, no. 2, pp. 99-110, 2007.
- [21] Y. Ho and D. Ewins, "On the structural damage identification with mode shapes," in *Proceedings of the European COST F3 conference on system identification and structural health monitoring*, 2000, vol. 1.
- [22] J. F. Gauthier, T. M. Whalen, and J. Liu, "Experimental validation of the higher-order derivative discontinuity method for damage identification," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 15, no. 2, pp. 143-161, 2008.
- [23] M. A.-B. Abdo, "Damage detection in plate-like structures using high-order mode shape derivatives," *International Journal of Civil and Structural Engineering*, vol. 2, no. 3, p. 792, 2012.
- [24] K. A. Kumar and D. M. Reddy, "Application of frequency response curvature method for damage detection in beam and plate like

- structures," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 149, no. 1, p. 012160: IOP Publishing.
- [25] B. Moaveni, X. He, J. P. Conte, and J. I. Restrepo, "Damage identification study of a seven-story full-scale building slice tested on the UCSD-NEES shake table," *Structural Safety*, vol. 32, no. 5, pp. 347-356, 2010.
- [26] J. D. Sipple and M. Sanayei, "Finite element model updating using frequency response functions and numerical sensitivities," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 21, no. 5, pp. 784-802, 2014.
- [27] M. Sanayei, A. Khaloo, M. Gul, and F. N. Catbas, "Automated finite element model updating of a scale bridge model using measured static and modal test data," *Engineering Structures*, vol. 102, pp. 66-79, 2015.
- [28] Z. Ding, R. Yao, J. Li, and Z. Lu, "Structural damage identification based on modified artificial bee colony algorithm using modal data," *Inverse Problems in Science and Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 422-442, 2018.
- [29] O. Avci and O. Abdeljaber, "Self-organizing maps for structural damage detection: a novel unsupervised vibration-based algorithm," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 30, no. 3, p. 04015043, 2016.
- [30] S. Chen, F. Cerda, P. Rizzo, J. Bielak, J. H. Garrett, and J. Kovačević, "Semi-supervised multiresolution classification using adaptive graph filtering with application to indirect bridge structural health monitoring," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 11, pp. 2879-2893, 2014.
- [31] U. Dackermann, J. Li, and B. Samali, "Identification of member connectivity and mass changes on a two-storey framed structure using frequency response functions and artificial neural networks," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 16, pp. 3636-3653, 2013.
- [32] S.-L. Ma, S.-F. Jiang, and L.-Q. Weng, "Two-stage damage identification based on modal strain energy and revised particle swarm optimization," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 14, no. 05, p. 1440005, 2014.
- [33] W. M. West, "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen," in *Proceeding of the Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*, Georgia, United States of America, 1984, pp. 1-6.
- [34] J.-J. Sinou, "A review of damage detection and health monitoring of mechanical systems from changes in the measurement of linear and non-linear vibrations," in *Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control*, United Kingdom: Nova Science, 2009, pp. 643-702.

- [35] H.-W. Hu and C.-B. Wu, "Nondestructive damage detection of two dimensional plate structures using modal strain energy method," *Journal of Mechanics*, vol. 24, no. 4, pp. 319-332, 2008.
- [36] T.-C. Le, D.-D. Ho, T.-C. Huynh, and V.-S. Bach, "Crack detection in plate-like structures using modal strain energy method considering various boundary conditions," *Shock and Vibration*, vol. 2021, 2021.
- [37] M. Sezer, "A method for the approximate solution of the second-order linear differential equations in terms of Taylor polynomials," *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 821-834, 1996.
- [38] R. D. Blevins and R. Plunkett, "Formulas for natural frequency and mode shape," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 47, no. 2, p. 461, 1980.
- [39] *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-02) and Commentary (ACI 318RM-02): Metric Version*, 318/318R, 2002.