

Phát triển phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm

Lê Thanh Cao^{1,2}, Huỳnh Văn Phương¹, Lê Văn Phước Nhân¹, Hồ Đức Duy^{1*}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

²Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang

Ngày nhận bài 19/3/2019; ngày chuyển phản biện 22/3/2019; ngày nhận phản biện 26/4/2019; ngày chấp nhận đăng 14/5/2019

Tóm tắt:

Trong bài báo này, phương pháp năng lượng biến dạng được phát triển cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu dạng tấm. Trước tiên, cơ sở lý thuyết của phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dạng tấm được xây dựng. Trong đó, một quy trình chẩn đoán bao gồm hai bước (tổng thể và cục bộ) được kiến nghị nhằm nâng cao độ chính xác cho kết quả chẩn đoán vị trí và độ lớn của hư hỏng. Bài toán kết cấu tấm nhô, chữ nhật, với điều kiện biên ngẫu nhiên được khảo sát để kiểm chứng tính khả thi của phương pháp kiến nghị. Mô hình phần tử hữu hạn của tấm được phân tích bằng phần mềm ANSYS để thu được tần số và dạng dao động tương ứng với trạng thái trước và sau khi xuất hiện vết nứt. Đại lượng chỉ số hư hỏng được kiến nghị để xác định vị trí của vết nứt trong tấm. Kết quả phân tích cho thấy, phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể xác định được sơ bộ vị trí vùng xuất hiện hư hỏng và phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ xác định chính xác chiều dài và hình dạng của vết nứt.

Từ khóa: chẩn đoán hư hỏng, dao động, kết cấu tấm, năng lượng biến dạng, theo dõi và chẩn đoán kết cấu.

Chỉ số phân loại: 2.1

Giới thiệu

Trong hai thập kỷ gần đây, lĩnh vực theo dõi và chẩn đoán kết cấu (Structural health monitoring: SHM) đóng một vai trò rất quan trọng đối với sự an toàn, tuổi thọ và sự hoạt động bền vững của kết cấu công trình xây dựng. Trong đó, 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. Phương pháp năng lượng biến dạng (Modal strain energy: MSE) là một trong những phương pháp có tính hiệu quả cao cho việc chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu [1].

Stubbs và cộng sự (1995) lần đầu tiên đã áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán hư hỏng dựa trên sự thay đổi năng lượng biến dạng dao động của kết cấu [2]. Tiếp theo sau đó, Cornwell và cộng sự (1999) đã nghiên cứu mở rộng phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dạng tấm. Trong cách tiếp cận của Cornwell, giá trị năng lượng biến dạng phân đoạn của kết cấu tấm trước và sau khi xuất hiện hư hỏng được sử dụng để xác định chỉ số hư hỏng. Từ chỉ số này, vị trí hư hỏng được xác định thành công khi độ cứng giảm 10%, đồng thời sử dụng tương đối ít các dạng dao động [3]. Kim và cộng sự (2003) đã áp dụng phương pháp năng lượng biến dạng cho kết cấu dầm đơn giản và đã chẩn đoán chính xác vị trí hư hỏng ở giữa nhịp và ở một phần tư nhịp chỉ với hai dạng dao động. Mức độ hư hỏng của vết nứt trong dầm cũng được xác định chính xác [4]. Hu và Wu (2008) đã kiểm chứng phương pháp năng lượng biến dạng sử dụng kết quả thực nghiệm để chẩn đoán vết nứt bề mặt trong tấm nhô mỏng, đẳng hướng, với điều kiện biên tự do. Trong đó, nhóm

nghiên cứu đã áp dụng phương pháp vi phân cầu phương (Differential quadrature method: DQM) để xác định giá trị năng lượng biến dạng. Kết quả nghiên cứu đã chẩn đoán chính xác vị trí hư hỏng trong tấm nhô [5]. Lê và Hồ (2015) đã phát triển phương pháp năng lượng biến dạng cho bài toán tấm mỏng với các điều kiện biên khác nhau. Trong nghiên cứu này, phương pháp sai phân trung tâm (Central differential method: CDM) đã được sử dụng để tính đạo hàm bậc hai của dạng dao động [6]. Fu và cộng sự (2016) đã thiết lập một quy trình hai bước sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng để chẩn đoán cho kết cấu tấm sử dụng vật liệu đồng nhất đẳng hướng: bước một xác định vị trí vùng hư hỏng; bước 2 xác định hình dạng và độ lớn của hư hỏng [7].

Đối với các nghiên cứu đã thực hiện, phương pháp năng lượng biến dạng được áp dụng tổng thể trên toàn kết cấu. Vì vậy, để đảm bảo độ chính xác của kết quả chẩn đoán hư hỏng, việc sử dụng lưới phân tích với độ phân giải cao trên toàn kết cấu tấm là điều tất yếu; tuy nhiên, điều này sẽ không kinh tế và phức tạp khi triển khai ứng dụng thực tiễn. Trong nghiên cứu này, phương pháp năng lượng biến dạng được cải tiến và áp dụng cho vùng hư hỏng cục bộ sau khi vùng hư hỏng sơ bộ đã được xác định. Việc này sẽ làm giảm bớt dữ liệu phân tích nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác của kết quả chẩn đoán.

Phương pháp năng lượng biến dạng

Phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể

Đối với kết cấu tấm, dạng dao động được đặc trưng bởi mặt cong hai chiều. Xét một tấm mỏng dao động tự do không cản, được chia thành các vùng con như hình 1.

*Tác giả liên hệ: Email: hoducduy@hcmut.edu.vn

An improvement of modal strain energy method for damage detection in plates

Thanh Cao Le^{1,2}, Van Phuong Huynh¹,
Van Phuoc Nhan Le¹, Duc Duy Ho^{1*}

¹Faculty of Civil Engineering,

University of Technology, Vietnam National University, Ho Chi Minh City

²Faculty of Civil Engineering, Nha Trang University

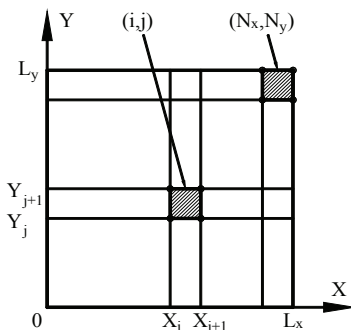
Received 19 March 2019; accepted 14 May 2019

Abstract:

This paper presents an improved modal strain energy (MSE) method for damage detection in plate-like structures. Firstly, the theory of MSE method established for plate-like structures is briefly outlined, in which a two-step MSE-based procedure (global step and local step) is proposed to enhance the accuracy of detecting the damage's location and severity. A rectangular aluminum plate constrained by fixed boundary conditions is investigated in order to verify the feasibility of the proposed method. The plate's finite element models are analysed to obtain natural frequencies and forms of vibration before and after the occurrence of crack. A damage index is presented to identify the location of crack in the plate-like structures. The analytical results show that the global MSE step identifies the damage zone in the plates; the local MSE step accurately detects the crack length and form in the damage zone.

Keywords: damage detection, modal strain energy, plate, structural health monitoring, vibration.

Classification number: 2.1



Hình 1. Sơ đồ kết cấu tấm tổng thể.

Xét một dạng dao động thứ k , $\phi_k(x, y)$, năng lượng biến dạng dao động của vùng con (i, j) được xác định như sau [3, 6]:

$$U_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{Y_j}^{Y_{j+1}} \int_{X_i}^{X_{i+1}} \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (1)$$

trong đó: D_{ij} là độ cứng chống uốn của vùng con (i, j) ; ν là hệ số Poát xng.

Năng lượng biến dạng tổng cộng của toàn bộ tấm:

$$U_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} U_{k,ij} \quad (2)$$

Năng lượng biến dạng phân đoạn của vùng con thứ (i, j) được xác định như sau:

$$F_{k,ij} = \frac{U_{k,ij}}{U_k} \quad (3)$$

với $\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1$.

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

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (4)$$

trong đó: ký hiệu $*$ đại diện cho trạng thái kết cấu có hư hỏng.

Chỉ số hư hỏng sau khi chuẩn hóa được xác định như sau:

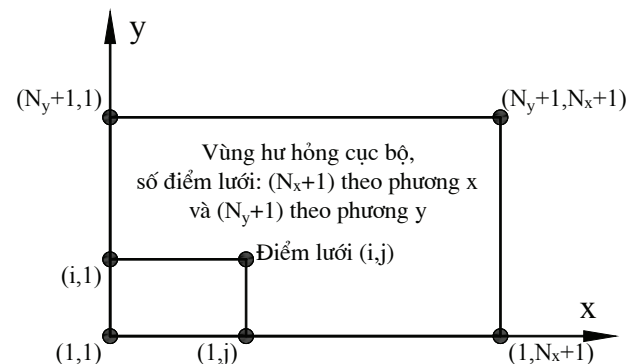
$$Z_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (5)$$

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

Giá trị Z_{ij} được sử dụng để chẩn đoán vị trí xuất hiện hư hỏng trong kết cấu tấm. Trong công thức tính năng lượng biến dạng, xuất hiện giá trị đạo hàm bậc hai của dạng dao động theo hai biến. Phương pháp sai phân trung tâm (CDM) được sử dụng để xác định các giá trị này [6].

Phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ

Sau khi triển khai phương pháp năng lượng tổng thể trên toàn bộ kết cấu tấm với lưới có độ phân giải thấp, vùng hư hỏng sơ bộ được xác định. Tiếp theo, phương pháp năng lượng biến dạng được áp dụng riêng cho vùng hư hỏng cục bộ này (hình 2) với lưới có độ phân giải cao để xác định chi tiết hơn vị trí và độ lớn của hư hỏng.



Hình 2. Sơ đồ vùng hư hỏng cục bộ.

Đạo hàm bậc hai của dạng dao động cũng được xác định theo phương pháp sai phân trung tâm (CDM), cụ thể như sau:

$$\frac{\partial^2 \phi_{k,ij}}{\partial^2 x} = \frac{\phi_{k,i(j-1)} - 2\phi_{k,ij} + \phi_{k,i(j+1)}}{(sx)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_{k,ij}}{\partial^2 y} = \frac{\phi_{k,(i-1)j} - 2\phi_{k,ij} + \phi_{k,(i+1)j}}{(sy)^2} \quad (7)$$

Tại các nút biên của vùng hư hỏng cục bộ, đạo hàm bậc hai của dạng dao động được xác định từ dữ liệu chuyển vị tại các điểm cận biên thật của vùng hư hỏng cục bộ. Điều này khác với phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể, phải sử dụng dữ liệu chuyển vị tại các điểm cận biên ảo [6].

Để đánh giá mức độ chính xác của phương pháp, một chỉ số về khả năng chẩn đoán (KNCD) được kiến nghị như sau:

$$KNCD = \frac{L_{pred}}{L_{real}} \times 100\% \quad (8)$$

trong đó: L_{pred} là chiều dài hư hỏng chẩn đoán từ biểu đồ chỉ số hư hỏng; L_{real} là chiều dài hư hỏng thực tế. Dựa vào chỉ số KNCD, kết quả được đánh giá như sau:

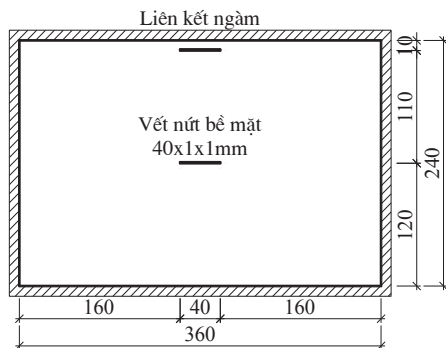
- Nếu $0 \leq KNCD < 50\%$: KNCD ở mức kém (K).
- Nếu $50\% \leq KNCD \leq 80\%$: KNCD ở mức trung bình (TB).
- Nếu $80\% < KNCD \leq 100\%$: KNCD hư hỏng ở mức tốt (T).

Cần lưu ý rằng đây là bài toán chẩn đoán ngược, không biết trước các thông tin về hư hỏng, dữ liệu đầu vào của phương pháp năng lượng biến dạng là dạng dao động của tấm ở trạng thái trước và trạng thái sau khi xuất hiện hư hỏng. Từ đó, thông qua các bước tính toán của phương pháp năng lượng biến dạng (tổng thể và cục bộ), kết quả chẩn đoán đầu ra là vị trí và chiều dài của hư hỏng.

Bài toán phân tích

Thiết lập bài toán

Tấm nhôm có kích thước 360×240×2 mm, bốn biên có liên kết ngàm; có hai vết nứt bề mặt dài 40 mm, rộng 1 mm, sâu 1 mm; một vết nứt ở giữa và một vết nứt ở biên của tấm (hình 3). Vật liệu có các thông số: khối lượng riêng $\rho = 2735 \text{ kg/m}^3$, mô đun đàn hồi $E = 70 \text{ GPa}$, hệ số Poát xôn $\nu = 0,33$.

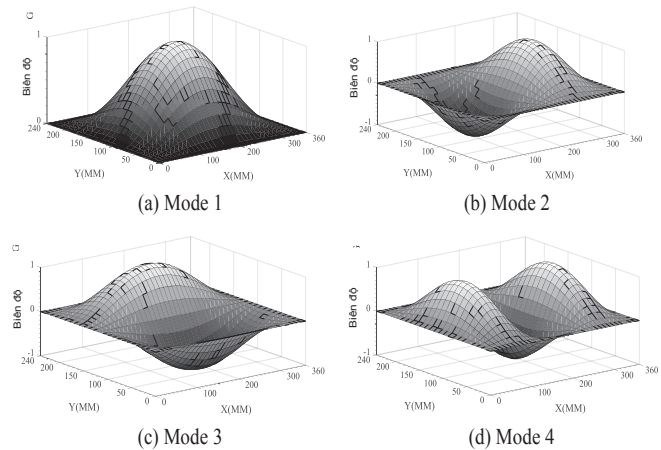


Hình 3. Tấm hình chữ nhật với hai vết nứt.

Phương pháp năng lượng biến dạng được triển khai thành hai bước. Bước 1, triển khai phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể trên toàn tấm với lưới phần tử kích thước 10 mm để xác định sơ bộ vùng hư hỏng. Bước 2, triển khai phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ trên vùng hư hỏng sơ bộ đã xác định ở bước 1 với lưới phần tử 1 mm để xác định chi tiết vị trí và hình dạng của vết nứt.

Kết quả phân tích dao động

Phần mềm ANSYS được sử dụng để mô phỏng và phân tích dao động cho kết cấu tấm khảo sát. Hình 4 thể hiện bốn dạng dao động uốn đầu tiên cho trạng thái trước hư hỏng. Kết quả tần số dao động được tổng hợp trong bảng 1. Khi có hư hỏng, tần số dao động giảm; tuy nhiên, độ giảm này tương đối nhỏ.



Hình 4. Bốn dạng dao động đầu tiên.

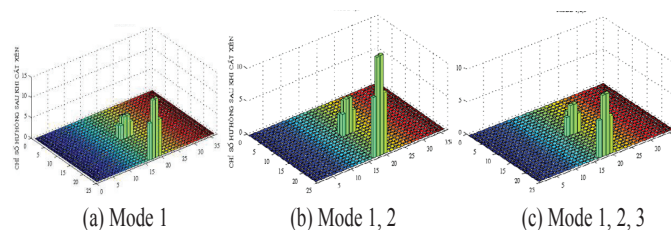
Bảng 1. Tần số dao động.

Mode	Tần số trước hư hỏng (Hz)	Tần số sau hư hỏng (Hz)	Độ chênh lệch (%)
1	222,82	220,12	1,21
2	342,43	342,34	0,03
3	547,01	542,90	0,75
4	547,13	546,61	0,10

Kết quả chẩn đoán hư hỏng

Bước 1 - Tổng thể:

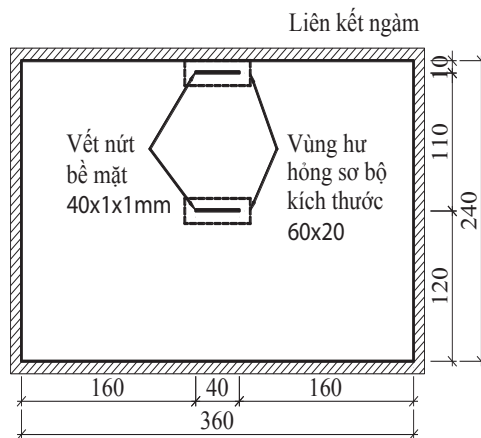
Hình 5 thể hiện biểu đồ chỉ số hư hỏng Z_{ij} , tương ứng với ngưỡng hư hỏng 30% Z_{ij}^{max} . Trong nghiên cứu này, các dạng dao động được khảo sát như sau: chỉ sử dụng một dạng dao động, và sử dụng kết hợp các dạng dao động. Kết quả chẩn đoán tổng thể cho thấy vùng của hai vị trí vết nứt được chẩn đoán chính xác khi sử dụng ngưỡng hư hỏng và dạng dao động thích hợp.



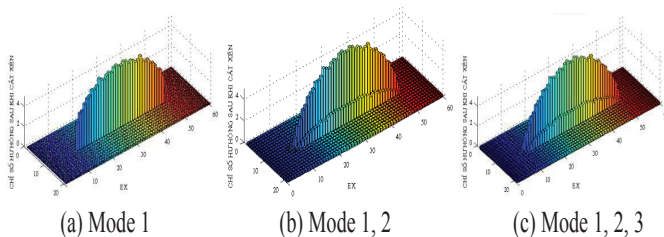
Hình 5. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, ngưỡng 30% Z_{ij}^{max} , lưới 10 mm.

Bước 2 - Cục bộ:

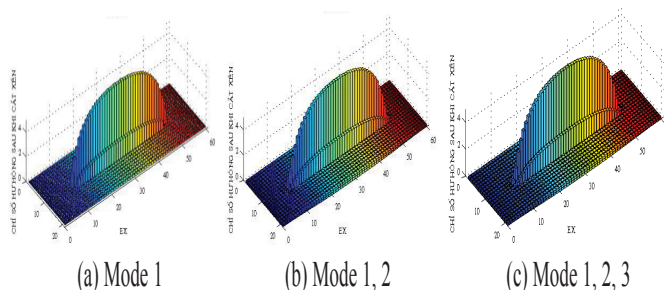
Sau khi triển khai phương pháp năng lượng biến dạng tổng thể, vùng hư hỏng sơ bộ của vết nứt biên và vết nứt giữa được xác định là hình chữ nhật với kích thước 60×20 mm (hình 6). Trên hai vùng hư hỏng sơ bộ này, phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ được triển khai với lưới 1 mm để khảo sát tính hiệu quả của phương pháp trong việc xác định vị trí và chiều dài của hư hỏng. Kết quả phân tích được thể hiện trên hình 7, hình 8 và tổng hợp trong bảng 2, bảng 3. Kết quả cho thấy rằng, chỉ số về KNCĐ phụ thuộc vào ngưỡng hư hỏng Z_{ij}^{max} và dạng dao động khảo sát. Kết quả chẩn đoán về chiều dài vết nứt, cho đồng thời cả vết nứt ở biên và vết nứt ở giữa tấm, đạt độ chính xác cao nhất khi sử dụng ngưỡng hư hỏng bằng 10% Z_{ij}^{max} và dạng dao động thứ nhất (mode 1). Tóm lại, phương pháp năng lượng biến dạng cục bộ có khả năng xác định chính xác chiều dài của vết nứt khi sử dụng ngưỡng hư hỏng và dạng dao động thích hợp.



Hình 6. Vùng hư hỏng sơ bộ được xác định từ bước tổng thể với lưới 10 mm.



Hình 7. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, ngưỡng 30% Z_{ij}^{max} , lưới 1 mm, vết nứt biên.



Hình 8. Biểu đồ chỉ số hư hỏng, ngưỡng 30% Z_{ij}^{max} , lưới 1 mm, vết nứt giữa.

Bảng 2. KNCĐ (%) hư hỏng cục bộ cho vết nứt biên.

Ngưỡng Z_{ij}^{max}	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 1, 2	Mode 1, 2, 3
10%	98 (T)	98 (T)	98 (T)	Nhiều	98 (T)	98 (T)
20%	93 (T)	97 (T)	93 (T)	Nhiều	93 (T)	93 (T)
30%	85 (T)	95 (T)	85 (T)	Nhiều	85 (T)	83 (T)
40%	70 (TB)	93 (T)	78 (TB)	Nhiều	70 (TB)	70 (TB)
50%	90 (T)	95 (T)	85 (T)	Nhiều	95 (T)	95 (T)

Bảng 3. KNCĐ (%) hư hỏng cục bộ cho vết nứt giữa.

Ngưỡng Z_{ij}^{max}	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 1, 4	Mode 1, 2, 4	Mode 1, 2, 3
10%	93 (T)	87 (T)	58 (TB)	95 (T)	95 (T)	94 (T)	90 (T)
20%	73 (TB)	62 (TB)	43 (K)	77 (TB)	73 (TB)	73 (TB)	73 (TB)
30%	95 (T)	95 (T)	48 (K)	95 (T)	95 (T)	98 (T)	95 (T)
40%	90 (T)	80 (T)	43 (K)	95 (T)	90 (T)	90 (T)	88 (T)
50%	85 (T)	75 (TB)	38 (K)	90 (T)	90 (T)	85 (T)	85 (T)

Kết luận

Trong bài báo này, phương pháp năng lượng biến dạng đã được cải tiến thành công trong việc chẩn đoán hư hỏng tổng thể và cục bộ cho kết cấu dạng tấm. Từ các kết quả phân tích, các kết luận được rút ra như sau:

(1) Phương pháp kiến nghị có khả năng chẩn đoán chính xác vết nứt trong kết cấu tấm. Bước chẩn đoán tổng thể cho biết được vị trí của vùng hư hỏng. Bước chẩn đoán cục bộ cho biết chính xác chiều dài của vết nứt trong kết cấu tấm.

(2) Đối với bước chẩn đoán cục bộ, điều kiện biên của tấm và các dữ liệu dao động tại các điểm nứt không nằm trong vùng hư hỏng sơ bộ đã xác định ở bước chẩn đoán tổng thể thì không cần xem xét. Như vậy, khối lượng dữ liệu sẽ giảm đáng kể và thời gian phân tích được rút ngắn.

(3) Việc sử dụng dạng dao động thứ nhất (mode 1) với ngưỡng hư hỏng bằng 10% chỉ số hư hỏng lớn nhất là đủ tốt để chẩn đoán chính xác vị trí và chiều dài vết nứt trong kết cấu tấm, cho cả vết nứt ở biên và vết nứt ở giữa tấm.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số C2018-20-26. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Fan, and P. Qiao (2011), "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study", *Structural Health Monitoring*, **10**, pp.83-111.
- [2] N. Stubbs, J.T. Kim, and C.R. Farrar (1995), *Field verification of a nondestructive damage localization and sensitivity estimator algorithm*, Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, pp.210-218.
- [3] P.J. Cornwell, S.W. Dodeling, and C.R. Farrar (1999), "Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures", *Journal of Sound and Vibration*, **224**, pp.359-374.
- [4] J.T. Kim, Y.S. Ryu, H.M. Cho, and N. Stubbs (2003), "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode shape-based method", *Engineering Structures*, **25**(1), pp.57-67.
- [5] H.W. Hu, and C.B. Wu (2008), "Nondestructive damage detection of two dimensional plate structures using modal strain energy method", *Journal of Mechanics*, **24**, pp.319-332.
- [6] T.C. Lê và Đ.D. Hồ (2015), "Chẩn đoán hư hỏng trong kết cấu tấm sử dụng phương pháp năng lượng biến dạng", *Tạp chí Xây dựng*, **6**, tr.100-105.
- [7] Y.Z. Fu, J.K. Liu, Z.T. Wei, and Z.R. Lu (2016), "A two-step approach for damage identification in plates", *Journal of Vibration and Control*, **22**(13), pp.3018-3031.