

ĐÀO TẠO

VIỆN KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

VIỆN CƠ HỌC

Đào Như Mai

ĐỘ NHẠY CẢM CỦA  
CÁC ĐẶC TRƯNG ĐỘNG LỰC HỌC KẾT CẤU  
VÀ ỨNG DỤNG TRONG CHẨN ĐOÁN  
KỸ THUẬT CÔNG TRÌNH

*Chuyên ngành: Cơ học vật rắn biến dạng*

Mã số: 01.02.21

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ CƠ HỌC

## Mở đầu

Việc xác định hư hỏng, khuyết tật hay bất kỳ sự thay đổi nào của kết cấu công trình đang sử dụng được gọi là chẩn đoán kỹ thuật công trình. Đây là vấn đề có tính thời sự trong cả những nghiên cứu lý thuyết cũng như thực tế sử dụng khai thác công trình. Một trong những phương pháp hữu hiệu để giải quyết bài toán này là dựa trên sự biến đổi của các đặc tính cơ học của kết cấu do các tham số vị trí cũng như mức độ hư hỏng gây nên. Sự biến đổi này mô tả bằng khái niệm độ nhạy cảm của các đặc trưng đó đối với các tham số hư hỏng. Tổ hợp độ nhạy cảm này tạo thành một cơ sở dữ liệu quan trọng để chẩn đoán hư hỏng. Mục đích của luận án này là xây dựng một cơ sở dữ liệu gồm độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học đối với một số hư hỏng điển hình của kết cấu phục vụ việc chẩn đoán công trình dạng khung và phát triển phương pháp độ nhạy cảm trong chẩn đoán hư hỏng công trình. Những vấn đề được đặt ra trong luận án như sau

1. Phát triển phương pháp phân tử hữu hạn để mô phỏng kết cấu có hư hỏng (không nguyên vẹn) dạng suy yếu liên kết với nền, liên kết mối nối hay phân tử bị nứt để xây dựng mô hình tham số của kết cấu ở dạng:  $\{M(p), K(p)\}$ .
2. Xây dựng thuật toán và chương trình tính độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học (tần số riêng, dạng riêng...) đối với các tham số hư hỏng, cho kết cấu dạng dầm và khung không gian
3. Phát triển phương pháp độ nhạy cảm, xây dựng thuật toán và áp dụng thử nghiệm vào bài toán chẩn đoán hư hỏng trên dầm và điều chỉnh mô hình khung không gian bằng các ví dụ cụ thể.

### ***Phương pháp nghiên cứu***

*Phương pháp phân tử hữu hạn* là công cụ chính được áp dụng trong nghiên cứu này. Ở đây các hàm dạng là lời giải của bài toán biên dạng, có tính đến những thay đổi của các đặc trưng hình học, các điều kiện liên kết... Bằng cách đó ta có thể đưa các tham số mô tả các hư hỏng vào các ma trận của hệ.

*Phân tích độ nhạy cảm* của các đặc trưng động lực học kết cấu thực chất là tính các đạo hàm của các đặc trưng đó đối với các tham số mô hình, đã được xây dựng trong chương 2

Phát triển *phương pháp bình phương tối thiểu* cho bài toán phi tuyến dùng thuật toán lặp và bài toán quy hoạch toàn phương để nhận dạng hư hỏng sử dụng độ nhạy cảm.

### ***Nội dung của luận án***

Luận án này được trình bày trong 4 chương và phụ lục, gồm

Chương 1. Tổng quan các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước

Chương 2 trình bày cơ sở của phương pháp PTHH. Thiết lập hàm dạng, ma trận độ cứng  $K$  và ma trận khối lượng  $M$  cho các phần tử dầm cải biên có kể đến các tham số mô tả hư hỏng. Xây dựng mô hình tham số của kết cấu không nguyên vẹn.

Phương pháp tính toán độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học kết cấu là nội dung chủ yếu của Chương 3. Một chương trình chuyên dụng dựa trên SAP4 được phát triển để phân tích độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học theo các tham số mô hình đã đưa ra trong Chương 2. Các kết quả phân tích độ nhạy cảm của tần số riêng và dạng riêng đối với các tham số như tiết diện ngang, điều kiện liên kết tại nút, liên kết nền, tham số vết nứt và độ cứng tương đương được trình bày dưới dạng đồ thị cho ba ví dụ cụ thể.

Chương 4 trình bày phương pháp chẩn đoán hư hỏng áp dụng độ

nhảy cảm. Đề xuất thuật toán lặp để nhận dạng hư hỏng dựa trên cơ sở phương pháp bình phương tối thiểu phi tuyến và thuật toán dựa trên bài toán quy hoạch toàn phương. Áp dụng thử nghiệm chẩn đoán hư hỏng trên một dầm đơn giản và nhận dạng tham số liên kết giữa cọc và nền của một giàn trên biển dạng khung.

Cuối cùng là các kết luận. Phần phụ lục gồm các dòng lệnh của chương trình đã viết và các kết quả số.

## Chương 1. Tổng quan

*Sự phát triển và ứng dụng lý thuyết độ nhảy cảm.* Năm 1963 tác giả Tomovic R. viết về độ nhảy cảm của các hệ động lực. Các nghiên cứu ứng dụng độ nhảy cảm trong quy hoạch toán học của Radomovic L. (1966), trong lý thuyết điều khiển tối ưu Brayton R. K. và Spence R. (1980), đặc biệt trong thiết kế tối ưu của Haug E.J. & Arora J.S. (1979) và một số tác giả. Vấn đề điều chỉnh mô hình trên số liệu đo đạc công trình thực được các tác giả Mottershead J. E., Friswell M.I. (1993), Shao W. (1993), Brandon J.A. (1996), Natke H.G., Schulze H. (1981) v.v. giải quyết sử dụng lý thuyết độ nhảy cảm.

*Lý thuyết độ nhảy cảm và bài toán chẩn đoán kỹ thuật công trình.* Bài toán chẩn đoán kỹ thuật thực chất là tìm tham số mô hình  $\{p_1, \dots, p_m\}$  từ số liệu đo của các đặc trưng  $\Omega^*$ , giải phương trình:

$$\Omega(p_1, \dots, p_m) = \Omega^*,$$

ta thấy ngay sự đồng dạng với bài toán điều chỉnh mô hình.

Việc mô hình hoá các hư hỏng, khuyết tật của kết cấu sử dụng phương pháp PTHH được các tác giả Haisty B.C. (1986), Engels R. C. (1992), Lin R. M., Lim M. K. (1997) v.v khởi xướng nghiên cứu. Một số kết quả ban đầu phát triển phương pháp PTHH đã được công bố bởi Mottershead J. E. (1998), Lam H. F., Ko J. M., Wong C.

W. (1998) v.v. Nhu cầu cải tiến phương pháp PTHH để mô tả các dạng hư hỏng là rất cần thiết. Các nghiên cứu chung về độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học có thể tìm thấy (Fox R. L. & Kapoor M. P. (1968), Nelson R. B. (1976), El-Kady M. A. & Al-Chaly A. A. (1997), Jensen H. A. & Sepulveda A. E. (1998) v.v.)

*Phương pháp rung động trong chẩn đoán kỹ thuật.* Năm 1978, 1979, Adams R. D., Cawlay P., Pye C. J., Stone B. J. đã công bố kết quả nghiên cứu về việc sử dụng dạng dao động để phát hiện hư hỏng của kết cấu. Những năm 1980-1990 nhóm tác giả Chondros J. G. & Dimarogonas A. D., Gounaris T. G., Yao J. công bố các nghiên cứu mới về chẩn đoán hư hỏng kết cấu. Những năm gần đây các nghiên cứu về lĩnh vực này đã được tổng quát hoá và tập trung vào phát triển các phương pháp nhận dạng hư hỏng (Hassiotis S. & Jeong G. D. (1995), William E. J., Contursi T. & Messina A. v.v.)

*Phương pháp độ nhạy cảm trong chẩn đoán hư hỏng kết cấu.* N. Stubbs (1987) cùng các cộng sự công bố việc ứng dụng độ nhạy cảm trong chẩn đoán cho một dầm. Năm 1995, các tác giả S. Hassiotis, G. D. Jeong, Messina A. và Williams E. I. đã ứng dụng bài toán quy hoạch toán học trong bài toán chẩn đoán.

Tại Việt Nam những năm gần đây các nhóm tác giả Nguyễn Xuân Hùng, Nguyễn Cao Mệnh, Nguyễn Tiến Khiêm đã công bố các nghiên cứu về chẩn đoán hư hỏng của công trình.

## **Chương 2. Mô hình phần tử hữu hạn của kết cấu không nguyên vẹn**

### **2.1. Phương pháp phần tử hữu hạn**

Đối với phần tử dầm không gian, chuyển vị tại các nút bao gồm:

$$U_r^e = \{U_1^e, \dots, U_{12}^e\} = \{u_1, v_1, w_1, \theta_1, w'_1, v'_1, u_2, v_2, w_2, \theta_2, w'_2, v'_2\}. \quad (2.3)$$

Trường chuyển vị  $U_i^T = \{u(x), \theta(x), v(x), w(x)\}$  biểu diễn qua các chuyển vị nút nhờ các hàm nội suy (hàm dạng)

$$U_i^T = H(x)U_e \quad (2.4)$$

trong đó  $H(x)$  là ma trận nội suy chuyển vị

$$H(x) = \begin{pmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{10} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & 0 & 0 & 0 & \rho_6 & 0 & \rho_8 & 0 & 0 & 0 & \rho_{12} \\ 0 & 0 & \rho_3 & 0 & \rho_5 & 0 & 0 & 0 & \rho_9 & 0 & \rho_{11} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

trong đó hàm  $\rho_j(x)$ ,  $j = 1, \dots, 12$  là hàm dạng  $\rho_j(x) = \sum_i C_{ij} x^i$ . (2.6)

Ma trận cứng và ma trận khối lượng nhận được từ tích phân sau

$$K_e = \int_0^L \bar{H}^T(x) [E] \bar{H}(x) dx, \quad M_e = \int_0^L \bar{H}^T(x) [m] \bar{H}(x) dx, \quad (2.7)$$

trong đó

$$\bar{H}(x) = \begin{pmatrix} \rho_1' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_7' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_4' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{10}' & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2'' & 0 & 0 & 0 & \rho_6'' & 0 & \rho_8'' & 0 & 0 & 0 & \rho_{12}'' \\ 0 & 0 & \rho_3'' & 0 & \rho_5'' & 0 & 0 & 0 & \rho_9'' & 0 & \rho_{11}'' & 0 \end{pmatrix}; \quad \rho_j' = \frac{\partial \rho_j}{\partial x};$$

$$\rho_j'' = \frac{\partial^2 \rho_j}{\partial x^2}$$

và  $[m] = \text{diag}[\rho F, \rho F, \rho F, \rho F]$ ;  $[E] = \text{diag}[EF, GJ_x, EJ_z, EJ_y]$ .

$\rho$  là khối lượng riêng,  $F$  - diện tích mặt cắt,  $E$  - modun đàn hồi,  $G$  - modun trượt và  $J_x$  - moment quán tính chống xoắn,  $J_y$ ,  $J_z$  - các moment quán tính chống uốn trong mặt phẳng  $xz$  và  $xy$  tương ứng.

## 2.2. Phần tử dầm cải biên

Mục này trình bày việc thiết lập các ma trận phần tử cho các phần tử dầm cải biên, được ứng dụng để mô tả các hư hỏng điển hình. Ta bắt đầu từ phần tử dầm cổ điển

### Phần tử dầm cổ điển

Trường hợp phần tử dầm cổ điển hàm dạng là các hàm Hermit. Khi đó ma trận  $K$  có dạng



$$\begin{aligned}
k_{22} = k_{88} = -k_{28} &= \frac{12EJ_z}{L^3} h_1^f(\alpha_z, \beta_z), \quad k_{66} = \frac{4EJ_z}{L} h_2^f(\alpha_z, \beta_z), \\
k_{33} = k_{99} = -k_{39} &= \frac{12EJ_y}{L^3} h_1^f(\alpha_y, \beta_y), \quad k_{55} = \frac{4EJ_y}{L} h_2^f(\alpha_y, \beta_y), \\
k_{11,11} &= \frac{4EJ_y}{L} h_3^f(\alpha_y, \beta_y), \quad k_{12,12} = \frac{4EJ_z}{L} h_3^f(\alpha_z, \beta_z), \\
k_{26} = -k_{68} &= \frac{6EJ_z}{L^2} h_4^f(\alpha_z, \beta_z), \quad k_{35} = -k_{59} = -\frac{6EJ_y}{L^2} h_4^f(\alpha_y, \beta_y), \\
k_{2,12} = -k_{8,12} &= \frac{6EJ_z}{L^2} h_5^f(\alpha_z, \beta_z), \quad k_{3,11} = -k_{9,11} = -\frac{6EJ_y}{L^2} h_5^f(\alpha_y, \beta_y), \\
k_{6,12} &= \frac{2EJ_z}{L} h_6^f(\alpha_z, \beta_z), \quad k_{5,11} = \frac{2EJ_y}{L} h_6^f(\alpha_y, \beta_y). \quad (2.34)
\end{aligned}$$

Các hàm  $h_j^f(\alpha, \beta)$ , có dạng

$$\begin{aligned}
h_0^f(\alpha, \beta) &= \frac{1}{(1 + \alpha + \beta)^2}, \quad h_1^f(\alpha, \beta) = \frac{1 + 2\alpha + 2\beta + 4\alpha^2 - 4\alpha\beta + 4\beta^2}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}, \\
h_2^f(\alpha, \beta) &= \frac{1 + 6\beta + 12\beta^2}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}, \quad h_3^f(\alpha, \beta) = \frac{1 + 6\alpha + 12\alpha^2}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}, \\
h_4^f(\alpha, \beta) &= \frac{1 + 4\beta - 4\alpha\beta + 8\beta^2}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}, \quad h_5^f(\alpha, \beta) = \frac{1 + 4\alpha - 4\alpha\beta + 8\alpha^2}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}, \\
h_6^f(\alpha, \beta) &= \frac{1 - 12\alpha\beta}{(1 + 4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta)^2}. \quad (2.35)
\end{aligned}$$

### Phần tử dầm có vết nút

Xét dầm với vết nút tại vị trí  $x^* \in (0, L)$ , ta coi như tại vị trí có vết nút  $x^*$  độ cứng của dầm bị suy giảm, sự suy giảm này biểu diễn qua độ cứng của các lò xo (dọc trục  $k$ , xoắn  $v_x$  và uốn  $v_y, v_z$ ), nối hai phần của phần tử dầm với nhau. Ta có thêm 5 tham số không thứ nguyên mới mô tả vết nút

$$\alpha = \frac{x^*}{L} \quad \beta_u = \frac{EF}{Lk} \quad \beta_0 = \frac{GJ_x}{Lv_x} \quad \beta_y = \frac{EJ_y}{Lv_y} \quad \beta_z = \frac{EJ_z}{Lv_z}, \quad (2.38)$$

Tìm chuyển vị dưới dạng



$$u(x) = \begin{cases} a^l x + b^l & 0 \leq x < x^* \\ a^r (x - L) + b^r & x^* < x \leq L \end{cases}, \theta(x) \text{ có dạng tương tự } u(x),$$

$$v(x) = \begin{cases} c_0^l + c_1^l x + c_2^l x^2 + c_3^l x^3, & 0 \leq x < x^* \\ c_0^r + c_1^r (x - L) + c_2^r (x - L)^2 + c_3^r (x - L)^3, & x^* < x \leq L \end{cases}$$

$w(x)$  có dạng tương tự  $v(x)$ ,

thỏa mãn các điều kiện tương thích về chuyển vị và nội lực tại vị trí vết nứt và tại hai đầu nứt, các phần tử  $k_{ij} \neq 0$  có dạng

$$k_{11} = k_{77} = -k_{17} = \frac{EF}{L} h_0^c(\alpha, \beta_u), k_{44} = k_{10,10} = -k_{4,10} = \frac{GJ_x}{L} h_0^c(\alpha, \beta_\theta),$$

$$k_{22} = k_{88} = -k_{28} = \frac{12EJ_x}{L^3} h_1^c(\alpha, \beta_x), k_{33} = k_{99} = -k_{39} = \frac{12EJ_y}{L^3} h_1^c(\alpha, \beta_y),$$

$$k_{55} = \frac{4EJ_y}{L} h_2^c(\alpha, \beta_y), k_{66} = \frac{4EJ_x}{L} h_2^c(\alpha, \beta_x),$$

$$k_{11,11} = \frac{4EJ_y}{L} h_3^c(\alpha, \beta_y), k_{12,12} = \frac{4EJ_x}{L} h_3^c(\alpha, \beta_x),$$

$$k_{26} = -k_{68} = \frac{6EJ_x}{L^2} h_4^c(\alpha, \beta_x), k_{35} = -k_{59} = -\frac{6EJ_y}{L^2} h_4^c(\alpha, \beta_y),$$

$$k_{2,12} = -k_{8,12} = \frac{6EJ_x}{L^2} h_5^c(\alpha, \beta_x), k_{3,11} = -k_{9,11} = -\frac{6EJ_y}{L^2} h_5^c(\alpha, \beta_y),$$

$$k_{6,12} = \frac{2EJ_x}{L} h_6^c(\alpha, \beta_x), k_{5,11} = \frac{2EJ_y}{L} h_6^c(\alpha, \beta_y). \quad (2.54)$$

Các hàm  $h_j^c(\alpha, \beta)$  có dạng

$$h_0^c(\alpha, \beta) = \frac{1}{L(1+\beta)^2}, \quad h_1^c(\alpha, \beta) = \frac{1+2\beta+4\beta^2-12\alpha\beta^2+12\alpha^2\beta^2}{(1+4\beta-12\alpha\beta+12\alpha^2\beta)^2},$$

$$h_2^c(\alpha, \beta) = \frac{1+6\alpha^2\beta+12\alpha^2\beta^2-36\alpha^3\beta^2+36\alpha^4\beta^2}{(1+4\beta-12\alpha\beta+12\alpha^2\beta)^2},$$

$$h_3^c(\alpha, \beta) = \frac{1+6\beta-12\alpha\beta+6\alpha^2\beta+12\beta^2-60\alpha\beta^2+120\alpha^2\beta^2-108\alpha^3\beta^2+36\alpha^4\beta^2}{(1+4\beta-12\alpha\beta+12\alpha^2\beta)^2},$$

$$h_4^c(\alpha, \beta) = \frac{1+4\alpha\beta+8\alpha\beta^2-24\alpha^2\beta^2+24\alpha^3\beta^2}{(1+4\beta-12\alpha\beta+12\alpha^2\beta)^2},$$

$$h_5^e(\alpha, \beta) = \frac{1 + 4\beta - 4\alpha\beta + 8\beta^2 - 32\alpha\beta^2 + 48\alpha^2\beta^2 - 24\alpha^3\beta^2}{(1 + 4\beta - 12\alpha\beta + 12\alpha^2\beta)^2},$$

$$h_6^e(\alpha, \beta) = \frac{1 + 12\alpha\beta - 12\alpha^2\beta + 24\alpha\beta^2 - 96\alpha^2\beta^2 + 144\alpha^3\beta^2 - 72\alpha^4\beta^2}{(1 + 4\beta - 12\alpha\beta + 12\alpha^2\beta)^2}. \quad (2.55)$$

### Phân tử cọc nền

Đưa lò xo phân bố dọc theo cọc theo các phương dọc (x) là  $K_u$ , hai phương ngang (y, z) -  $K_y, K_z$  và xoắn (quay quanh x) -  $K_\theta$ . Đặt các biến không thứ nguyên mô tả hệ số nền như sau

$$\lambda_u = L\sqrt{\frac{K_u}{EF}}, \quad \lambda_\theta = L\sqrt{\frac{K_\theta}{GJ_x}}, \quad \lambda_z = L\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{\frac{K_z}{EJ_z}}, \quad \lambda_y = L\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{\frac{K_y}{EJ_y}} \quad (2.59)$$

Khi đó các thành phần  $k_{ij}$  của ma trận độ cứng K có dạng

$$k_{11} = k_{77} = \frac{EF}{L} \varphi_1(\lambda_u); \quad k_{17} = k_{71} = \frac{EF}{L} \varphi_2(\lambda_u);$$

$$k_{44} = k_{10,10} = \frac{GJ_x}{L} \varphi_1(\lambda_\theta); \quad k_{4,10} = k_{10,4} = \frac{GJ_x}{L} \varphi_2(\lambda_\theta);$$

$$k_{ij} = \frac{EJ_z}{L^3} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 C_{k,i} C_{l,j} \varphi_{kl}(\lambda_z) \quad j = 2, 6, 8, 12$$

$$k_{ij} = \frac{EJ_y}{L^3} \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 C_{k,i} C_{l,j} \varphi_{kl}(\lambda_y) \quad j = 3, 5, 9, 11 \quad (2.75)$$

trong đó các hàm  $\varphi$  có dạng

$$\varphi_1(\lambda) = \frac{0,5\lambda(\lambda + 0,5\sinh 2\lambda)}{\sinh^2 \lambda}, \quad \varphi_2(\lambda) = -\frac{0,5\lambda(\sinh \lambda + \lambda \cosh \lambda)}{\sinh^2 \lambda},$$

$$\varphi_{11}(\lambda) = -\lambda^4 + \lambda^3 \frac{\sinh 2\lambda + \sin 2\lambda}{2} - \lambda^3 \frac{K_3(2\lambda) + K_2(2\lambda)}{4},$$

$$\varphi_{22}(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 \frac{\sinh 2\lambda - \sin 2\lambda}{2} - \lambda^3 \frac{K_3(2\lambda) + K_2(2\lambda)}{4},$$

$$\varphi_{33}(\lambda) = -\lambda^4 + \lambda^3 \frac{\sinh 2\lambda - \sin 2\lambda}{2} + \lambda^3 \frac{K_3(2\lambda) + K_2(2\lambda)}{4},$$

$$\varphi_{44}(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 \frac{\sin 2\lambda + \sinh 2\lambda}{2} + \lambda^3 \frac{K_3(2\lambda) + K_2(2\lambda)}{4},$$

$$\varphi_{12}(\lambda) = -\frac{1}{4}\lambda^3 + \lambda^3 \frac{\cosh 2\lambda}{2} - \lambda^3 \frac{K_1(2\lambda) + K_4(2\lambda)}{4},$$

$$\begin{aligned}
\varphi_{13}(\lambda) &= \frac{1}{4}\lambda^3 - \lambda^3 \frac{\cos 2\lambda}{2} - \lambda^3 \frac{K_4(2\lambda) - K_1(2\lambda)}{4}, \\
\varphi_{14}(\lambda) &= \lambda^3 \frac{K_2(2\lambda) - K_3(2\lambda)}{4} = \varphi_{23}(\lambda), \\
\varphi_{24}(\lambda) &= -\frac{3}{4}\lambda^3 + \lambda^3 \frac{\cos 2\lambda}{2} - \lambda^3 \frac{K_4(2\lambda) - K_1(2\lambda)}{4}, \\
\varphi_{34}(\lambda) &= -\frac{3}{4}\lambda^3 + \lambda^3 \frac{\cosh 2\lambda}{2} + \lambda^3 \frac{K_1(2\lambda) + K_4(2\lambda)}{4}, \quad (2.76)
\end{aligned}$$

trong đó  $K_1(z) = \cos z \cosh z$ ,  $K_2(z) = \cos z \sinh z$ ,  
 $K_3(z) = \sin z \cosh z$ ,  $K_4(z) = \sin z \sinh z$ .

### 2.3. Mô hình tham số của kết cấu không nguyên vẹn

Mô hình của một hệ cơ học, xét trong không gian các biến thiết kế  $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ , được gọi là mô hình tham số của hệ  $\Sigma(S)$ . Các biến  $S$  mô tả hình dáng, kích thước, vật liệu, liên kết, v.v được gọi là tham số mô hình. Mô hình của một đối tượng đang làm việc có thể bị thay đổi do tác dụng của nhiều yếu tố khác nhau. Để nghiên cứu và phát hiện sự thay đổi có thể đưa vào một số tham số, tạm gọi là tham số hư hỏng, ký hiệu là  $d = \{d_1, \dots, d_m\}$ . Ta có mô hình tham số của kết cấu không nguyên vẹn trong không gian các tham số hư hỏng  $\Sigma(d)$ . Mỗi một trạng thái kỹ thuật của kết cấu ứng với một tập giá trị xác định của các tham số  $d$ . Đánh giá  $d$  từ một số các đặc trưng của kết cấu gọi là bài toán đánh giá trạng thái kỹ thuật của kết cấu.

Các ma trận  $M$ ,  $K$ ,  $C$  của hệ được xây dựng bằng các thuật toán của phương pháp PTHH là hàm của các tham số  $S$  và  $d$ :

$$M = M(d); C = C(d); K = K(d) \quad (2.77)$$

Việc mô phỏng thực trạng kết cấu không nguyên vẹn bằng PTHH chính là xây dựng các quan hệ (2.77).

### Mô hình hoá một số hư hỏng điển hình

- Ăn mòn, gỉ, hà bám  $M = M(F)$ ,  $K = K(F)$ ,  $F$  - diện tích mặt cắt
- Gãy thanh:  $M(d)$ ,  $K(d)$  - ma trận của kết cấu không có phần tử thứ  $d$ .
- Suy giảm độ cứng liên kết giữa kết cấu và nền móng. Mô hình thứ nhất,  $M(L)$ ,  $K(L)$ ,  $L$  - độ dài làm việc của phần tử dưới cùng. Trường hợp 2,  $M(d)$ ,  $K(d)$ ,  $d = \{l/C_1, \dots, l/C_n\}$ ,  $0 \leq d < d_0$  - độ mềm lò xo
- Phần tử bị móp  $M = M(J)$ ,  $K = K(J)$ ,  $J$  - Mô men quán tính.
- Phần tử dầm bị nứt và sự suy giảm độ cứng liên kết ở môi nối. Các tham số hư hỏng là vị trí vết nứt và độ mềm của các lò xo theo cả 3 loại biến dạng: uốn, xoắn và dọc trục.  
 $M = M(x, \beta_u, \beta_x, \beta_y, \beta_z)$      $K = K(x, \beta_u, \beta_x, \beta_y, \beta_z)$ .

## Chương 3. Độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học

### 3.1. Các đặc trưng động lực học của kết cấu

Các đặc trưng động lực học của hệ bao gồm:

- tần số riêng  $\omega_j$  và dạng dao động riêng tương ứng  $\Phi(j) = \{\Phi_1(j), \dots, \Phi_N(j)\}$ ,  $j=1, \dots, N$  là nghiệm của bài toán dao động riêng

$$(K - \omega^2 M) \cdot \Phi = 0 \quad (3.1)$$

- $h_j$  - hệ số cản của dạng tương ứng,  $j = 1, \dots, N$ .

Tập hợp  $\{\omega_j, \Phi(j), h_j, j = 1, \dots, N\}$  gọi là mô hình dao động của hệ đang xét (modal model), và có những tính chất rất quan trọng sau:

- a) Thay đổi khi kết cấu có thay đổi, không phụ thuộc vào các yếu tố bên ngoài.

- b) Đặc trưng cho kết cấu một cách tổng thể và việc xác định chúng cho một kết cấu cụ thể không phụ thuộc vào vị trí đo đạc trên kết cấu.
- c) Hoàn toàn xác định hệ rời rạc, khi biết các đặc trưng động lực học của hệ.

Vì vậy các đặc trưng này được chọn là chỉ tiêu (indicator) chính trong lý thuyết nhận dạng kết cấu và phương pháp chẩn đoán.

### 3.2. Độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học

#### *Độ nhạy cảm của giá trị riêng*

Từ phương trình  $K\Phi(j) - \omega_j^2 M\Phi(j) = 0$  của nghiệm  $(\omega_j^2, \Phi(j))$ , lấy đạo hàm theo  $d_r$  sau một số biến đổi có kể đến tính trực giao của dạng dao động riêng ta có

$$\frac{\delta \omega_j^2}{\omega_j^2} = \frac{\Phi^T(j) \delta K \Phi(j)}{\Phi^T(j) K \Phi(j)} - \frac{\Phi^T(j) \delta M \Phi(j)}{\Phi^T(j) M \Phi(j)} = \sum_r a_{rj} \delta d_r, \quad (3.9)$$

$a_{rj}$  là độ nhạy cảm của giá trị riêng thứ  $j$  đối với tham số hư hỏng  $d_r$ ,

$$a_{rj} = \frac{1}{\omega_j^2} \frac{\partial \omega_j^2}{\partial d_r} = \frac{\Phi(j)^T L_r^T (K_r^* - \omega_j^2 M_r^*) L_r \Phi(j)}{\omega_j^2 \Phi(j)^T M \Phi(j)}. \quad (3.10)$$

#### *Độ nhạy cảm của dạng riêng*

Để tính đạo hàm của dạng riêng theo  $d_r$ , ta giải phương trình

$$(K - \omega_j^2 M) \frac{\partial \Phi(j)}{\partial d_r} = \left( \frac{\partial K}{\partial d_r} - \omega_j^2 \frac{\partial M}{\partial d_r} \right) \Phi(j) + \frac{\partial \omega_j^2}{\partial d_r} M \Phi(j) \quad (3.11)$$

Từ tính chất độc lập, trực giao của các dạng riêng ta có khai triển

$$\frac{\partial \Phi(j)}{\partial d_r} = \sum_k \gamma_{kj} \Phi(k),$$

trong đó

$$\gamma_{jr} = -\frac{1}{2} \Phi(j)^T \frac{\partial M}{\partial d_r} \Phi(j) \quad \gamma_{ir} = \frac{\Phi(i)^T \left( \frac{\partial K}{\partial d_r} - \omega_j^2 \frac{\partial M}{\partial d_r} \right) \Phi(j)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)}, \quad i \neq j$$

Nếu biểu diễn biến phân của dạng riêng ở dạng

$$\delta\Phi(j) = \sum_r A_{jr} \delta d_r .$$

Khi đó véc tơ nhạy cảm của dạng riêng thứ  $j$  được tính bằng

$$A_{jr} = \sum_{k \neq j} \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega_k^2)} \left\{ \Phi^T(k) \frac{\partial K}{\partial d_r} \Phi(j) - \omega_j^2 \Phi^T(k) \frac{\partial M}{\partial d_r} \Phi(j) \right\} \Phi(k) - \frac{1}{2} \left\{ \Phi^T(j) \frac{\partial M}{\partial d_r} \Phi(j) \right\} \Phi(j) \quad (3.14)$$

### **Quy trình tính độ nhạy cảm các đặc trưng động lực**

Bước 1: Lập mô hình kết cấu với các thông số hình học cụ thể

Bước 2. Tính các ma trận phần tử, ghép nối ma trận tổng thể

Bước 3. Giải bài toán trị riêng tìm các đặc trưng động lực học

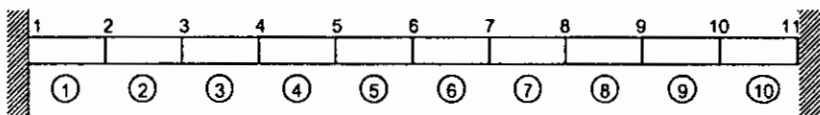
Bước 4: Tính toán độ nhạy cảm của các đặc trưng này theo các tham số thiết kế mà ta chọn

### **3.3. Chương trình chuyên dụng tính toán độ nhạy cảm**

Dựa trên quy trình thuật toán trên, một chương trình chuyên dụng đã được phát triển để tính toán độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học. Các mô hình phần tử dầm cải biên xây dựng trong chương 2 đã được đưa vào trong chương trình này. Đã áp dụng chương trình này để phân tích độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học trong ba ví dụ cụ thể được trình bày trong các mục sau.

### **3.4. Độ nhạy cảm của tần số riêng và dạng riêng của dầm**

Ví dụ là một dầm thép tiết diện hình chữ nhật với hai đầu ngàm (hình 3.2) với mô đun đàn hồi  $E = 2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ; mật độ khối  $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$ ; hệ số Poisson  $\nu = 0,3$ ; chiều dài  $L = 1 \text{ m}$ ; kích thước của tiết diện:  $0,27\text{m} \times 0,09\text{m}$ .



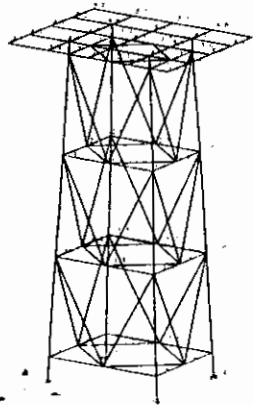
Hình 3.2. Mô hình tính toán dầm đàn hồi

### *Kết luận chung về độ nhạy cảm của các tần số và dạng riêng*

- Hư hỏng ở biên là nguyên nhân gây nên những thay đổi lớn.
- Những điểm nút của các dạng riêng đồng thời cũng là những điểm không nhạy cảm của các tần số riêng.
- Những điểm đỉnh của các dạng riêng là những điểm nhạy cảm nhất của các tần số riêng.
- Các dạng riêng nhạy cảm nhất với các vị trí hư hỏng.
- Độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học cũng có tính đối xứng giống như điều kiện biên.

Hư hỏng ở những vị trí riêng biệt gây ra sự thay đổi tần số và dạng riêng cũng rõ rệt hơn so với những hư hỏng mang tính tổng thể của cả phần tử.

### **3.5. Phân tích độ nhạy cảm cho mô hình khung không gian**



Xét mô hình của khung này được mô tả trong hình bên, gồm 61 nút, 132 phần tử và 3 loại tiết diện tròn. Để nghiên cứu độ nhạy cảm của các tần số riêng đối với các dạng hư hỏng khác nhau tiến hành phân tích độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học đối với các biến hư hỏng của từng phần tử.

Nghiên cứu các kết quả số có thể rút ra những nhận xét như sau:

*Sự gãy hoàn toàn phần tử.* 5 tần số đầu tiên rất nhạy cảm với sự vắng mặt của các phần tử nằm trên cột chính. Phần tử càng ở gần với nền thì ảnh hưởng càng lớn, đặc biệt tần số thứ nhất có thể thay đổi tới 30% nếu phần tử dưới cùng bị gãy. Các tần số cao thì nhạy cảm với các phần tử trên cao hơn

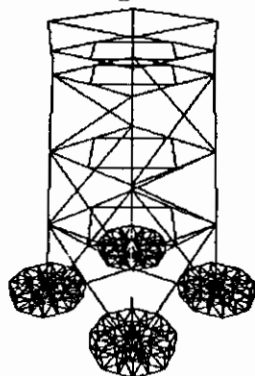
*Suy giảm độ cứng liên kết nút.* Chỉ độ cứng kéo nén của các thanh giằng ngang và chéo gây ảnh hưởng đến các tần số riêng. Ngược lại độ cứng uốn của các liên kết nút trên cột, đặc biệt là các phần tử nằm sát nền gây ảnh hưởng nhiều. Đây là sự minh chứng cho tính đúng đắn và phù hợp với thực tiễn của mô hình.

*Ảnh hưởng của vết nứt.* Vết nứt mô tả sự suy giảm độ cứng ở tại vị trí bị nứt nên sự suy giảm độ cứng uốn đóng vai trò nổi bật, vết nứt không làm thay đổi nhiều trạng thái kéo nén và xoắn của các phần tử. Những vết nứt ở các thanh cột chính, nơi tiếp xúc giữa công trình và nền móng, làm thay đổi đáng kể 6 tần số đầu của hệ.

*Độ nhạy cảm đối với tiết diện ngang.* Trong trường hợp này bức tranh độ nhạy cảm của các tần số riêng không khác nhiều so với trường hợp gầy hoàn toàn các phần tử. Độ nhạy cảm của các tần số riêng cao (từ tần số thứ 4) có giá trị lớn hơn. Đặc biệt, độ nhạy cảm đối với tiết diện ngang của các thanh giằng lớn gấp chục lần đối với các thanh cột chính. Do vậy các tần số riêng cao cho thông tin tin cậy để chẩn đoán hư hỏng các thanh giằng.

### 3.6. Độ nhạy cảm của giàn trên biển với các thông số nền

*Mô hình tính.* Mô hình giàn trên biển dạng khung được gia cố bằng 4 khối bê tông (Hình 3.20). Chân đế được mô phỏng với 60 nút và 104 phần tử dầm với 5 loại diện tích mặt cắt. Bốn khối bê tông gia cố được mô phỏng với 64 nút và 192 phần tử dầm. Tương tác giữa cọc và nền được mô phỏng bằng các lò xo theo mô hình của Venkataramana (1989) [97].



Hình 3.20

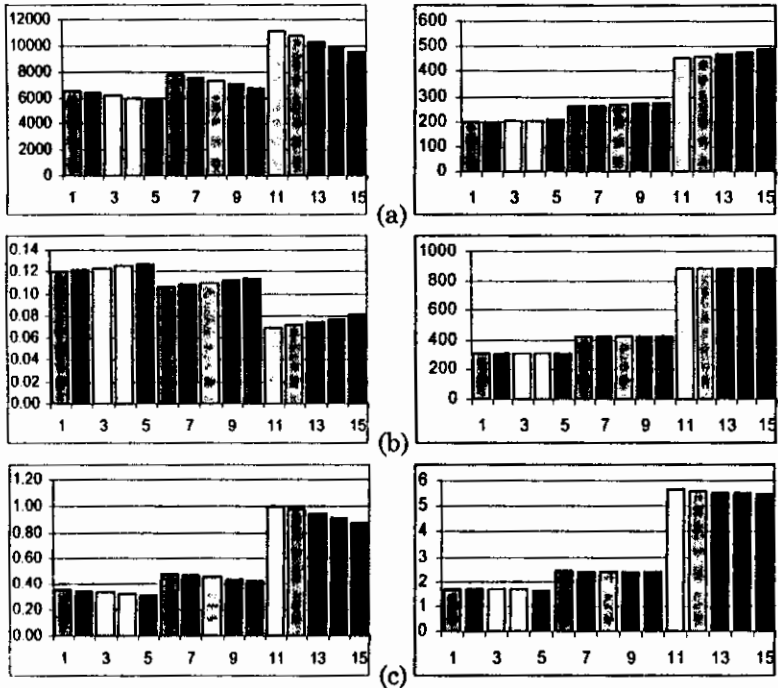


Các tham số lò xo tính qua thông số của nền bằng các công thức

$$K_h = \frac{2E_p I}{r^3} \left( \frac{E_s}{E_p} \right)^{0,75}, \quad K_v = \frac{2-\nu}{2(1-\nu)} K_h, \quad K_v = \frac{7-8\nu}{8(1-\nu)^2} K_h,$$

$$K_t = \frac{1,6E_p I}{r} \left( \frac{E_s}{E_p} \right)^{0,25}, \quad K_r = \frac{K_t}{2(1-\nu)}. \quad (3.28)$$

Tiến hành phân tích trị riêng và phân tích độ nhạy cảm cho 15 trường hợp với E và  $\nu$  khác nhau



Hình 3.23 Độ nhạy cảm của tần số riêng uốn bậc 1 (a), xoắn (b), dọc trục (c) đối với tham số  $K_v$  (bên trái) và  $K_h$  (bên phải)

## Chương 4. Phương pháp độ nhạy cảm trong bài toán chẩn đoán kỹ thuật

### 4.1. Phương pháp độ nhạy cảm trong chẩn đoán hư hỏng

Bài toán nhận dạng hư hỏng kết cấu bằng phương pháp rung động, thực chất là đánh giá các tham số hư hỏng  $d$  tham gia vào các ma trận  $M(d)$ ,  $K(d)$  dựa trên cơ sở số liệu đo được về tần số và dạng dao động riêng. Xét trường hợp khi biết tần số riêng  $\omega_1^0, \dots, \omega_m^0$ , ta tìm  $d$  biết nghiệm  $\omega_1^*, \dots, \omega_m^*$  của phương trình tần số

$$\det[K(d) - \omega^2 M(d)] = 0.$$

Các tác giả P. Cawley & R. D. Adams (1979) xuất phát từ giả thiết rằng sự thay đổi tần số bằng mối quan hệ  $\delta\omega = \omega^* - \omega^0 = f(\delta K, r)$ , trong đó  $r$  là vị trí vết nứt,  $\delta K$  - thay đổi độ cứng. Khai triển Taylor hàm  $f$  theo tham số  $\delta K$  ta có thể biểu diễn sự thay đổi tần số riêng qua độ nhạy cảm  $g(r) = \partial\omega/\partial\delta K$  của tần số riêng. Khi biết  $\delta\omega_i^*$ ,  $\delta\omega_j^*$  là sự thay đổi của 2 tần số riêng thì vị trí hư hỏng xác định từ

$$h^* = \frac{\delta\omega_i^*}{\delta\omega_j^*} = \frac{g_i(r)}{g_j(r)} \equiv h_{ij}(r)$$

còn tham số hư hỏng  $\delta K$  được tính một cách đơn giản bằng

$$\delta K = \frac{\delta\omega_i^*}{g_i(r^*)} = \frac{\delta\omega_j^*}{g_j(r^*)}.$$

Đây là kết quả lý thuyết đầu tiên của việc ứng dụng độ nhạy cảm trong chẩn đoán hư hỏng kết cấu.

Nhóm tác giả Stubbs dựa trên phương trình  $[K - \lambda M]\Phi = 0$ ;  $\lambda = \omega^2$ ;

$$\frac{\delta\lambda_j}{\lambda_j} = \frac{\Phi^T(j)\delta K\Phi(j)}{K_j} - \frac{\Phi^T(j)\delta M\Phi(j)}{M_j} = \sum_i f_{ji}\delta k_i - g_{ji}\delta m_i + O(\epsilon^2)$$

với  $K_j = \Phi^T(j)K\Phi(j)$ ;  $M_j = \Phi^T(j)M\Phi(j)$ ;

và  $f_{ji} = \frac{1}{K_j}\Phi^T(j)\frac{\partial K}{\partial k_i}\Phi(j)$ ;  $g_{ji} = \frac{1}{M_j}\Phi^T(j)\frac{\partial M}{\partial m_i}\Phi(j)$ .

$$\text{Ký hiệu } Z = \left\{ \frac{\delta\lambda_1}{\lambda_1}, \dots, \frac{\delta\lambda_m}{\lambda_m} \right\}^T; F = [f_{ji}]_{j=1, i=1}^{m, n}; G = [g_{ji}]_{j=1, i=1}^{m, n};$$

$$\delta k = \{\delta k_1, \dots, \delta k_n\}^T; \delta m = \{\delta m_1, \dots, \delta m_n\}^T$$

đưa về  $F\delta k - G\delta m = Z$ . Có thể giải dễ dàng đối với  $d = \{\delta k, \delta m\}^T$ . Tuy nhiên phương pháp này chỉ giới hạn bài toán trong trường hợp tuyến tính. Để cải thiện đã phát triển thuật toán lặp kết hợp với bài toán phi tuyến để chính xác hoá kết quả chẩn đoán hư hỏng bằng phương pháp độ nhạy cảm nêu trên.

#### 4.2. Thuật toán lặp trong bài toán nhận dạng hư hỏng bằng phương pháp độ nhạy cảm

**Phương pháp bình phương tối thiểu.** Giả sử  $d^* = \{d_1^*, \dots, d_m^*\}$  là số liệu đo đạc được về các đặc trưng của kết cấu. Số liệu tính toán là  $d = \{d_1, \dots, d_m\} = g(x)$ , trong đó  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$  là véc tơ các tham số chẩn đoán,  $g(x)$  là hàm biểu diễn sự phụ thuộc của các đặc trưng của kết cấu vào các tham số chẩn đoán.

Bài toán đánh giá tham số được phát biểu: tìm  $x$  để

$$\|d^* - d\| = \|d^* - g(x)\| \Rightarrow \min .$$

Trường hợp tuyến tính ta có  $d = g(x) = Hx$  (4.1)

trong đó  $H$  là ma trận cấp  $m \times n$ . Khi đó ta sẽ tìm  $x$  để

$$J(x) = e^T e = (d^* - Hx)^T (d^* - Hx) \Rightarrow \min \quad (4.2)$$

Từ điều kiện cực tiểu của hàm  $J(x)$ , đưa vào ma trận  $W$  xác định dương ta có lời giải

$$x = (H^T W H)^{-1} H^T W d^* \quad (4.4)$$

**Trường hợp phi tuyến:** Giả sử có một giá trị cho trước của  $x$  là  $x^{(0)}$ , khi đó đối với  $x$  gần  $x^{(0)}$  sao cho  $\|x^{(0)} - x\|^2$  có thể bỏ qua ta có

$$d = g(x^{(0)}) + G_0(x - x^{(0)}) \Rightarrow e(x) = d^* - g(x^{(0)}) - G_0(x - x^{(0)})$$

Lời giải Gauss cho trường hợp này:

$$x = x^{(0)} + [G_0^T G_0]^{-1} G_0^T [d^* - g(x^{(0)})]$$

Như vậy ta có được công thức lặp để tìm  $x$

$$x^{(n)} = x^{(n-1)} + k[G_{n-1}^T G_{n-1}]^{-1} G_{n-1}^T [d^* - g(x^{(n-1)})] \quad (4.5)$$

Newton và Rapson đưa ra công thức lặp

$$x^{(n)} = x^{(n-1)} + k \left[ G_{n-1}^T G_{n-1} - \sum_i [d_i^* - g_i(x^{(n-1)})] \frac{\partial^2 g_i}{\partial x^2}(x^{(n-1)}) \right]^{-1} G_{n-1}^T [d^* - g(x^{(n-1)})]$$

### Thuật toán lặp

Đối với mô hình kết cấu không nguyên vẹn với các ma trận  $K$ ,  $M$  là hàm của các tham số chẩn đoán  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ , tần số tính toán  $d = \{\omega_1^2, \dots, \omega_M^2\} = g(x)$  là hàm phi tuyến không hiển. Để áp dụng phương pháp bình phương tối thiểu, phải tính được ma trận nhạy cảm  $G$  với  $G_{ij} = \partial \omega_i^2 / \partial x_j$ . Khi đó ta có lời giải Gauss là

$$x^{(n)} = x^{(n-1)} + k[G_{n-1}^T G_{n-1}]^{-1} G_{n-1}^T \{\lambda^* - \lambda^{(n-1)}\} \quad (4.9)$$

Thường lấy  $x^{(0)} = 0$  ứng với trường hợp không có hư hỏng.

Trường hợp ma trận  $M$  không thay đổi và ma trận  $K$  có dạng

$$K(x) = K(x^{(0)} + \delta x) = K_0 + \Delta K; \Delta K = \sum_{j=1}^{N_e} K_j^* \delta x_j \quad (4.10)$$

Ta có 
$$D_0 = D_{ij}(x^{(0)}) = \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} = \Phi^{oT}(i) K_j^* \Phi^o(i), \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, m; \\ j = 1, \dots, N_e \end{matrix} \quad (4.11)$$

và 
$$x^{(n)} = x^{(n-1)} + k[D_{n-1}^T D_{n-1}]^{-1} D_{n-1}^T \{\lambda^* - \lambda^{(n-1)}\} \quad (4.12)$$

Chấp nhận giả thuyết hư hỏng không làm tăng độ cứng ta có

Bước 1: Chọn các số cho trước  $k$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  và  $x^{(0)} = 0$ ;

Bước 2: Giải bài toán trị riêng đối với  $M = M^0 = \text{const}$ ,  $K = K_{n-1}$  và tính ma trận nhạy cảm  $D_{n-1}$  theo công thức (4.11);

Bước 3: Tính lặp theo công thức (4.12);

Bước 4: Kiểm tra  $x_j^{(n)} > 0$  loại phần tử  $j$  ra khỏi vùng bị hư hỏng.

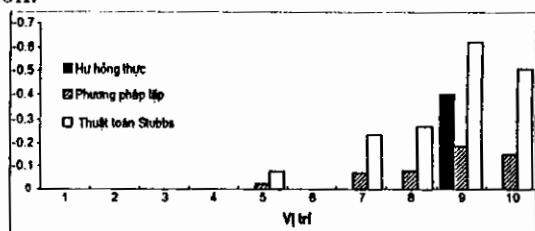
Bước 5: Kiểm tra  $\|x^{(n)} - x^{(n-1)}\| < \varepsilon_1 \Rightarrow$  dừng; nếu không về bước 2;

Bước 6: Kiểm tra  $|x_j^{(n)}| > \varepsilon_2$ . Nếu thỏa mãn thì phần tử  $j$  bị hư hỏng.

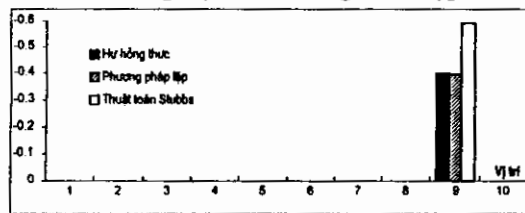
Thuật toán này đã được lập trình ở dạng một phần mềm chẩn đoán. Dưới đây sẽ trình bày kết quả thử nghiệm trên một dầm.

### 4.3. Ví dụ áp dụng

Áp dụng thuật toán lập nêu trên cho một dầm đàn hồi hai đầu khớp có các thông số  $L=1\text{m}$ ,  $E=2,058 \cdot 10^{11}\text{N/m}^2$ ,  $F=2,011\text{cm}^2$ ,  $J=1,272\text{cm}^4$  với hư hỏng thực  $\delta x=0,4$  tại vị trí thứ 9. Hình 4.1 và 4.2 trình bày kết quả chẩn đoán bằng phương pháp của tác giả Stubbs và phương pháp lập. Kết quả cho thấy phương pháp lập chính xác hơn.



Hình 4.1. Những dự đoán trong bước lập đầu tiên



Hình 4.2. Kết quả chẩn đoán cuối cùng của hai phương pháp

### 4.4. Nhận dạng tham số dùng phương pháp quy hoạch toàn phương

Như đã trình bày trong mục 4.2 bài toán nhận dạng tham số kết cấu được đưa về việc giải một hệ phương trình đại số tuyến tính. Các tác giả S. Hassiotis và G. D. Jeong (1995) đã dựa trên bài toán quy hoạch toàn phương để đưa ra thuật toán. Tổng quát bài toán quy hoạch toàn phương có dạng

$$\min \left( g^T x + \frac{1}{2} x^T H x \right) \text{ với ràng buộc } A_1 x = b_1; \quad A_2 x \geq b_2. \quad (4.13)$$

Sự thay đổi độ cứng của hệ được biểu diễn qua sự thay đổi của từng phần tử khi khối lượng không đổi

$$(K + \delta K) = \sum_{i=1}^{N_e} K_i^* (1 + \delta k_i) \Rightarrow \delta K = \sum_{i=1}^{N_e} K_i^* \delta k_i \quad (4.15)$$

$$\delta \lambda_j = \sum_{i=1}^{N_e} \Phi^T(j) K_i^* \Phi(j) \delta k_i \quad \text{hay } D \delta k = \delta \lambda \quad (4.16)$$

Khi đó ta thiết lập bài toán ở dạng quy hoạch toàn phương

$$\min \left( g^T \delta k + \frac{1}{2} \delta k^T H \delta k \right) \text{ với ràng buộc } D \delta k = \delta \lambda \text{ và } \delta k \leq 0 \quad (4.17)$$

Lấy tiêu chuẩn sự thay đổi của độ cứng nhỏ, bài toán (4.17) có dạng

$$\min \left( \frac{1}{2} \delta k^T \delta k \right) \text{ với ràng buộc } D \delta k = \delta \lambda \text{ và } \delta k \leq 0 \quad (4.18)$$

ở đây  $H = I$  và  $g = 0$ . Sử dụng chương trình con *qprog* trong bộ thư viện IMSL của FORTRAN để giải bài toán quy hoạch toàn phương.

#### *Quy trình thuật toán của bài toán nhận dạng tham số*

Bước 1. Tập các tần số riêng đo được  $\lambda$

Bước 2. Giải bài toán trị riêng được  $\lambda$  tính toán và ma trận  $D$

Bước 3. Tính  $\delta \lambda$

Bước 4. Tìm  $\delta k$  giải bài toán quy hoạch toàn phương (4.18)

Bước 5. Tính  $K$  mới

Bước 6. Dừng khi  $\delta k_i < 0,1\%$ , nếu không quay về bước 2

#### **4.5. Áp dụng phương pháp quy hoạch toàn phương nhận dạng tham số liên kết của hệ khung với nền**

**Nhận dạng tham số.** Để kiểm nghiệm thuật toán và chương trình đã tiến hành tính toán cho mô hình giàn trên biển với các lò xo mô tả liên kết cọc nền. Tham số cần nhận dạng chính là trị số của 8 lò xo mô tả liên kết của cọc với nền và khối bê tông với nền. Đã tiến hành tính toán thử nghiệm với 15 trường hợp hệ số  $E_{đất}$ ,  $\nu_{đất}$  khác

nhau. Trong bảng 4.1 đưa ra kết quả tính cho 1 trường hợp

Bảng 4.1. Kết quả tính toán thử nghiệm

Bài toán thuận		Bài toán ngược		
Tham số kết cấu	Tần số riêng	Tần số đo	Tham số tính được	Sai số %
$E_d = 4,1 \cdot 10^7, \nu = 0,2$		Số bước lặp 5		
3,817E+07	1,55803	1,558	3,766E+07	1,3%
4,295E+07	1,55804	1,558	4,228E+07	1,6%
2,202E+08	2,15676	2,157	2,163E+08	1,8%
3,523E+08	3,55784	3,557	3,395E+08	3,6%
1,600E+08	6,85555	6,855	1,538E+08	3,9%
1,800E+08	7,20680	7,207	1,726E+08	4,1%
3,161E+10	7,36435	7,364	3,018E+10	4,5%
5,058E+10	7,39861	7,399	4,811E+10	4,9%

### Kết luận

Bắt đầu bằng việc xây dựng mô hình của kết cấu có hư hỏng, làm cơ sở để tính toán độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học theo các tham số hư hỏng và cuối cùng là ứng dụng các mô hình đã xây dựng, độ nhạy cảm đã tính vào việc chẩn đoán hư hỏng của kết cấu, luận án đã đạt được các kết quả chính sau:

1. Phát triển phương pháp phân tử hữu hạn cho các kết cấu có hư hỏng: Xây dựng mô hình phân tử hữu hạn cho phân tử dầm có kể đến sự suy giảm liên kết tại nút, có vết nứt, suy giảm liên kết nên như các tham số của mô hình.
2. Xây dựng mô hình tham số của các kết cấu dạng khung với những hư hỏng điển hình như suy giảm liên kết biên, mối nối, bị ăn mòn, có vết nứt.
3. Xây dựng phương pháp, thuật toán tính toán độ nhạy cảm của

các tần số riêng và dạng riêng của kết cấu đối với các tham số hư hỏng thông qua các đạo hàm của ma trận độ cứng theo các tham số này.

4. Xây dựng phần mềm phân tích kết cấu khung không gian có kể đến một số hư hỏng và tính toán độ nhạy cảm của các đặc trưng động lực học đối với các tham số mô tả hư hỏng, bước đầu tạo lập cơ sở dữ liệu dùng cho chẩn đoán.
5. Xây dựng thuật toán lập cho phương pháp độ nhạy cảm trong chẩn đoán hư hỏng các kết cấu đơn giản dạng dầm và khung không gian dựa trên cơ sở dữ liệu về độ nhạy cảm được thiết lập bằng phần mềm nêu trên. Đã áp dụng có hiệu quả vào bài toán chẩn đoán hư hỏng của dầm, nhận dạng tham số liên kết nên của một giàn trên biển dạng khung.

Luận án này chỉ là bước đi đầu tiên trên con đường tìm kiếm lời giải cho bài toán chẩn đoán kỹ thuật công trình nói trên. Chắc chắn luận án không thể giải quyết mọi vấn đề cả về khoa học lẫn ứng dụng thực tiễn và do đó sẽ có không ít những bài toán cần phải nghiên cứu tiếp. Tác giả luận án sẽ cố gắng tiếp tục đi tiếp trên con đường này.



### Danh mục các công trình của tác giả

1. Khiem, Nguyen Tien & Mai, Dao Nhu (2004), "Finite Element Modeling and Identification of Damaged Structures", *Proceeding of International Conference of Scientific and Engineering Computation*, Singapore, June 30-July 2, 2004.
2. Đào Như Mai, Nguyễn Tiến Khiêm (2002). Nhận dạng tham số của hệ khung bằng phương pháp quy hoạch toàn phương sử dụng độ nhạy cảm của tần số riêng. Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 7, Hà Nội 18-20/12/2002, Tập 1, tr. 261-268.
3. Khiem N.T., Mai.D.N., Khoa N.V (2000), "An Iteration Procedure for Model Updating by Measurement of Natural Frequencies and Application to Structural Damage Detection", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Vietnam-Japan Symposium on Advances in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Hanoi Jan 19-21, 2000, pp. 162.-169.
4. Nguyen Tien Khiem, Dao Nhu Mai, Nguyen Viet Khoa, Le Van Anh (2000), "Pile-soil system Identification by a modal testing Approach". Proceedings of the IUTAM Symposium on recent Developments in Non-linear Oscillations of Mechanical Systems, Hanoi March 2-5, 1999, N.V.Dao and Kreuzer.E.J. (Eds), Kluwer Academic Publishire, pp. 197-206.
5. Nguyễn Tiến Khiêm, Đào Như Mai (1999), "Mô hình phần tử hữu hạn cục-nền và ứng dụng trong phân tích kết cấu". *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Cơ học Vật rắn biến dạng toàn quốc lần thứ VI*, Hà Nội, 26-27/11/1999, tr. 289-295.
6. Nguyễn Cao Mệnh, Nguyễn Tiến Khiêm, Đỗ Sơn, Đào Như Mai (1998), "Một công nghệ chẩn đoán kỹ thuật giàn khoan biển", *Tuyển tập Báo cáo khoa học, Hội nghị Khoa học Công nghệ biển toàn quốc lần thứ 4*, Hà Nội 12-13/11/1998, tr 345-353.
7. Nguyen Cao Menh, Nguyen Tien Khiem, Dao Nhu Mai (1998), "Optimum Midification of Dynamical System in Mechanics by the Sensitivity Analysis Technique". *Proceedings of the RESCCE'98, Japan-USA-Vietnam, Workshop*, Hanoi, May 13-15, pp. 49-56.

8. Nguyen Cao Menh, Nguyen Tien Khiem, *Dao Nhu Mai*, Nguyen Viet Khoa (1998) "Modal Analysis of Damaged Structures by the Modified Finite Element Method", *Vietnam Journal of Mechanics*, Vol. XX(1), pp. 29-46.
9. *Dao Nhu Mai*, Nguyen Cao Menh, Nguyen Tien Khiem (1997), "Structural Damage Detection Problems using the Parameter Modification and Modal Testing", Proceedings of IUTAM-IITD Inter. Winter School on Optimum Dynamic Design using Modal Testing and Structural Dynamic Modification, Dec. 15-19, 1997, T.K.Kundra & B.C.Narka (Eds), New Dehli, p.89-98.
10. Nguyen Tien Khiem, *Dao Nhu Mai* (1997), "Natural frequency Analysis of cracked beam", *Vietnam Journal of Mechanics*, Vol. XIX(2), pp. 28-38.
11. Nguyễn Tiến Khiêm, *Đào Như Mai* (1997), "Độ nhạy cảm của dạng riêng, tính toán và ứng dụng trong chẩn đoán kỹ thuật công trình", *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VI*, Hà Nội 3-5/12/1997, Tập 3, tr. 169-175.
12. Nguyễn Cao Mệnh, Nguyễn Tiến Khiêm, Đỗ Sơn, *Đào Như Mai*, Nguyễn Việt Khoa (1996), "Quy trình chẩn đoán kết cấu giàn khoan biển cố định bằng các đặc trưng động lực học", *Tuyển tập Công trình Khoa học Hội nghị Cơ học Vật rắn biến dạng toàn quốc lần thứ V*, Hà Nội, 29-30/11/1996, trang 367-376.
13. Nguyễn Tiến Khiêm, *Đào Như Mai*, Nguyễn Việt Khoa, Lê Văn Anh (1996), "Bài toán chẩn đoán hư hỏng cầu bằng cách đo tần số riêng", *Tuyển tập Công trình Khoa học Hội nghị Cơ học Vật rắn biến dạng toàn quốc lần thứ V*, Hà Nội, 29-30/11/1996, trang 303-310.
14. Nguyễn Tiến Khiêm, *Đào Như Mai*, Nguyễn Văn Đắc, Nguyễn Việt Khoa (1995), "Xác định đặc trưng động lực học của hệ vô số bậc tự do từ số liệu đo đặc dao động". *Tạp chí Cơ học*, tập XVII(1), tr. 35-44.
15. Nguyễn Tiến Khiêm, *Đào Như Mai*, Nguyễn Việt Khoa (1994), "Phân tích động lực học khung không gian phục vụ chẩn đoán kỹ thuật công trình", *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Cơ học Vật rắn biến dạng toàn quốc lần thứ IV*, Hà Nội 20-22/X/1994, tr. 186-195.