

Identificación de daños en estructuras a partir de su respuesta dinámica

Ramón Rojas Díaz^(1a), Pedro Galvín Barrera^(1b)

⁽¹⁾*Departamento de Mecánica de los Medios Continuos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los descubrimientos S/N, 41092-Sevilla*
E-mail: rroiasdiaz@us.es, pedrogalvin@us.es

Resumen

La presencia de daños en estructuras puede deberse a multitud de causas. Por ejemplo, debido a causas accidentales que excedieron aquellas para las cuales fueron diseñadas las estructuras o simplemente porque éstas han superado su vida útil.

La presencia de un daño en un sistema mecánico implica un cambio en las propiedades dinámicas del mismo. Por tanto, la detección del daño mediante la variación de las propiedades dinámicas tiene un gran interés, sobre todo en los casos en que los defectos están en partes de la estructura que no son accesibles.

Este trabajo pretende dar una visión general de los métodos de detección y localización del daño en estructuras más usados en la actualidad, profundizando en alguno de ellos y probándolos en un banco de ensayos creado al efecto en el Laboratorio de Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Palabras Clave: Identificación de daño, parámetros modales, ensayos experimentales.

Abstract

Appearance of damages in structures is due to several reasons. For instance, accidental causes that exceed design considerations.

Damages in mechanical systems provoke changes in their dynamic properties. Therefore, damage detection by the variation of dynamic properties has a huge interest, especially in cases where damages are in non-accessible areas.

This work expects to show briefly the existing methods to identify and locate damages in structures, dealing with some of them and testing them in a test device created in the Structures laboratory of Escuela Técnica Superior de Ingenieros (University of Seville).

Keywords: Damage identification, modal parameters, experimental tests.

1. Introducción

Actualmente es muy intenso el interés que existe en la comunidad de ingenieros por la posible detección del daño en estructuras. La detección del daño mediante el cambio de las propiedades o la respuesta dinámica está recibiendo una atención considerable, puesto que, a diferencia de otros métodos (acústicos o ultrasónicos, radiografías, etc), las técnicas que en este trabajo se presentan se basan en el conocimiento del comportamiento global de la estructura, por lo que no es necesario conocer a priori la posición más probable del daño.

La idea es sencilla: los parámetros modales de la estructura (frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento modal), están relacionados con las propiedades físicas de ésta, por lo que cambios en dichas propiedades provocarían cambios en la

respuesta dinámica del sistema. Para el conocimiento de las propiedades dinámicas de la estructura, se ha hecho uso de una técnica conocida como Análisis Modal Operacional (en adelante OMA, *Operational Modal Analysis*) [1], que permite la determinación de las mismas a partir de la respuesta del sistema sometido a sus cargas de servicio, sin ser necesario el conocimiento de éstas.

En este trabajo se presentan algunas de las técnicas más empleadas actualmente en la detección y localización del daño en estructuras. Tras probar dichas técnicas en el banco de ensayos construido en el Laboratorio de Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, lo que permitió un conocimiento profundo de las mismas, se aplicaron posteriormente al estudio de otras estructuras reales, tales como el Puente de la Barqueta, el puente I-40 sobre Río Grande en Albuquerque (EE.UU.), La Giralda, la estructura soporte de El Giraldillo y el puente Z-24 en Suiza.

2 Métodos para la detección del daño

En la actualidad existen multitud de técnicas para la detección y localización del daño. En este trabajo, como ya se ha indicado, nos hemos centrado en la identificación del daño a partir de la respuesta dinámica del sistema.

Se comparan los parámetros modales entre dos estados, uno de referencia en el que no hay daño (o un modelo de elementos finitos) y el estado del que se desea conocer si existe un daño.

En este trabajo se he desarrollado un software que a partir de las frecuencias naturales y los modos de vibración de las estructuras, implementa varios métodos de detección y localización de daño, ofreciendo la posibilidad de interpolar los desplazamientos modales con el fin de poder localizar con mayor precisión la presencia de daños. En particular, se han desarrollado los siguientes métodos:

- Variación de las frecuencias naturales y de los modos de vibración.
- Variación de la curvatura de los modos. Método de Stubbs. [2-5]
- Variación de las matrices de rigidez y flexibilidad. [6,7]

3. Experimentación

Con el fin de conocer profundamente los métodos y las implicaciones que tiene la aplicación de los mismos, se diseñó y construyó un pequeño pórtico metálico sobre el que se simularían distintos estados de daños conocidos. El pórtico se muestra en la Figura 1, donde también se muestran los dispositivos empleados para la identificación dinámica de la estructura. Para ello se realizó un OMA sobre la estructura, empleándose el programa comercial PULSE y varios acelerómetros Edevco 256 HX-100.

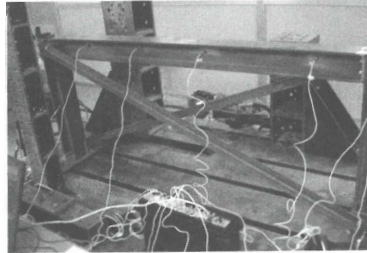


Figura 1. Banco de ensayos y montaje experimental

Sobre la estructura se simularon varios estados de daño: eliminando una o dos barras de la cruz de San Andrés del pórtico liberando uno de los apoyos y provocando una grieta en el dintel del pórtico de 60mm y a 58cm de uno de los extremos.

4. Resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los métodos implementados.

4.1. Variación de los modos de vibración.

Para la ilustración de este método se muestra el caso en el que se libera uno de los apoyos. Se observa claramente (Figura 2) la diferencia en la forma de los modos de vibración, asimismo es interesante reseñar que para ese modo de vibración la frecuencia natural asociada al mismo se ve reducida desde los 39 Hz. del estado de referencia a los 8.36 Hz de la situación que se está estudiando.

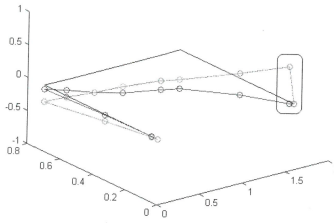


Figura 2 Método de la variación de los modos de vibración

4.2. Método de Stubbs.

El estado dañado objeto de estudio es aquél en el que se produjo una grieta, realizándose ésta a 58 cm. de uno de los extremos. El método de Stubbs se basa en que la localización de un hipotético defecto se produce en el punto en el que el parámetro β_p alcanza el máximo.

$$\beta_p = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^{\text{dañado}}}{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^{\text{sin dañado}}} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^d}{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^u} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\int_0^L [\{\phi^d(x)\}_i]''^2 dx + \int_0^L [\{\phi^d(x)\}_i]''^2 dx}{\int_0^L [\{\phi^d(x)\}_i]''^2 dx}}{\sum_{i=1}^m \frac{\int_0^L [\{\phi^u(x)\}_i]''^2 dx + \int_0^L [\{\phi^u(x)\}_i]''^2 dx}{\int_0^L [\{\phi^u(x)\}_i]''^2 dx}} \quad (1)$$

Donde ϕ'' denota la curvatura de los modos, que se determina como la derivada segunda de éstos. Los resultados obtenidos situaban el defecto en un punto que difería de la posición real en menos de un 1 %

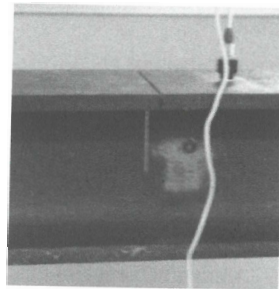
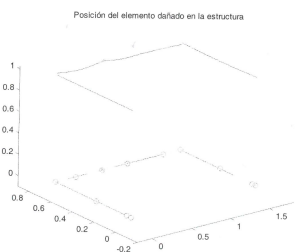


Figura 3. Posición del daño (izqda) y detalle del daño (dcha)

3. Variación de las matrices de rigidez y de flexibilidad.

Las matrices de flexibilidad y rigidez (la una es la inversa de la otra) pueden aproximarse, respectivamente, por:

$$F \cong \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \cdot \phi_i \cdot \phi_i^T \quad ; \quad K \cong \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \cdot \phi_i \cdot \phi_i^T \quad (2)$$

La localización del daño se obtiene a partir de la columna de la matriz $F^d - F$ con el valor más alto en valor absoluto o la columna donde el valor absoluto de $K^d - K$ sea mínimo, donde el superíndice "d" denota estado "con daño".

Nuevamente el caso objeto de estudio es en el que se ha realizado una grieta en el dintel, obteniéndose casos se obtiene un error menor al 1.5%.

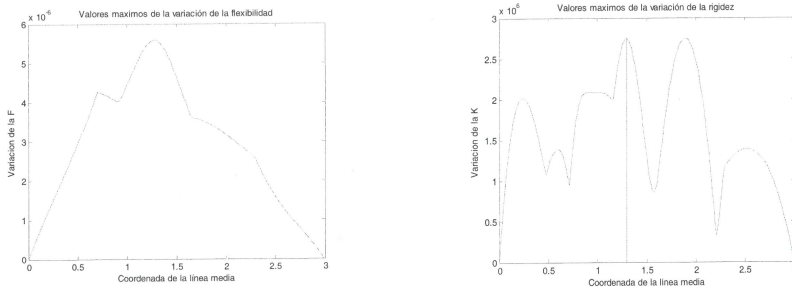


Figura 4. Valores máximos de la variación de las matrices de rigidez y flexibilidad.

5. Aplicación.

En lo que sigue, mostraremos algunos resultados en los que se han aplicado los métodos presentados anteriormente a una estructura civil, el puente I-40 (Interstate 40) que estuvo situado sobre Rio Grande (Albuquerque, Nuevo México). Dicho puente fue demolido en el verano de 1993. Como paso previo a la demolición, un equipo de Los Alamos National Laboratory creó diversos niveles controlados de daño, con el fin de probar en una estructura real los métodos de detección del daño.

Como estado de referencia se utilizaron las medidas dinámicas realizadas sobre la estructura antes de la demolición, y como estado dañado las medidas realizadas sobre la estructura una vez realizada la ranura.

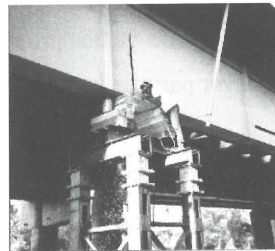
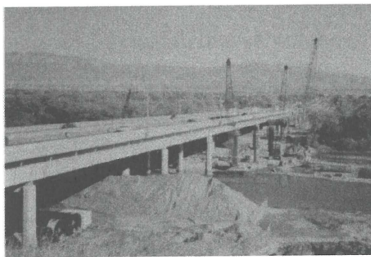


Figura 5. Puente I-40 (izqda) y obtención del daño sobre él (dcha).

En la Figura 6 puede observarse que la localización del daño se hace de manera casi exacta mediante el estudio de la variación de los modos de vibración y el método de Stubbs.

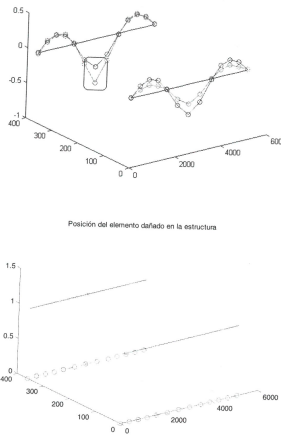


Figura 6 Variación de los modos de vibración (izqda) y método de Stubbs (dcha).

6. Conclusiones.

- La variación en los valores de las frecuencias naturales sólo da idea de la presencia de un daño. Sólo será posible localizarlo a muy altas frecuencias, pues en esos casos los modos están asociados a respuestas locales.
- La variación de la forma de los modos, puede ayudar a localizar el daño, tanto más cuanto más local sea el daño. Sin embargo, esto no siempre es posible.
- El método de Stubbs proporciona los resultados más satisfactorios, localizando la mayor parte de las veces la posición exacta del defecto sobre la estructura.

7. Referencias.

1. J. S. Bendat, A. G. Piersol, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. John Wiley & Sons, New York, 1980.
2. C. R. Parrar, S. W. Doebling, Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, EE.UU., 1996.
3. A. K. Pandey, M. Biswas and M. M. Samman, Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes. Journal of Sound and Vibration, **145**, 321-332, 1991.
4. N. Stubbs, J. T. Kim, K. Tople, An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms, in Proceedings of the ASCE Tenth Structures Congress, 543-546, 1992.
5. K. Wang, D. J. Inman, C. R. Parrar, Modeling and analysis of a cracked composite cantilever beam vibrating in coupled bending and torsion. Journal of Sound and Vibration, **284**, 23-49, 2005.
6. A. K. Pandey, M. Biswas, Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. Journal of Sound and Vibration, **169**, 3-17, 1991.
7. S. Choi, S. Park, N. Stubbs, Nondestructive damage detection in structures using changes in compliance. International Journal of Solids and Structures, **42**, 4494-4513, 2005.