



A XII-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională  
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",  
SEBEȘ, 2012

## **EFFECTUL DEFECTULUI ASUPRA COMPORTĂRII DINAMICE A GRINZILOR**

Carla PROTOCSIL, Gilbert-Rainer GILLICH

### **THE DAMAGE EFFECT ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF BEAMS**

Structural Health Monitoring (SHM) for civil engineering applications involves the use of sensing networks in order to diagnose damage in large scale civil structures such as buildings, bridges, aircraft. SHM will result in large savings in maintenance costs as well as improving life safety by providing a real-time updating of a structure's integrity.

Cuvinte cheie: defect, vibrații, senzori, bară încastrată  
Keywords: failure, vibration sensors, embedded bar

#### **1. Introducere**

Monitorizarea Integrității Structurii [Structural Health Monitoring (SHM)] furnizează în orice moment informații despre starea de integritate a structurii.

Datorită monitorizării se pot obține rezultate privind evoluția defectelor. Monitorizarea Integrității Structurii reprezintă o îmbunătățire, de a face o evaluare nedistructivă. Aceasta implică integrarea senzorilor, transmisii de date, de putere, abilități de procesare/prelucrare în interiorul structurii.

Aplicațiile în domeniul ingineriei civile a Monitorizării Integrității Structurii implică folosirea rețelelor senzorilor pentru diagnosticarea defectelor pe o scară largă a structurilor civile.

Conceptele de defect și defectare sunt generale și au o arie de cuprindere practică foarte largă. Pentru o analiză completă a comportării sistemelor din perspectiva siguranței lor în funcționare este necesar să se realizeze o cât mai corectă identificare a defectelor și a cauzelor acestora, să se identifice dependențele cauzale și să se delimiteze cauzele particulare de cele comune. Localizarea este importantă, pentru eforturile simplificate la reparare și întreținere.

Condițiile care determină apariția defectelor pot fi legate de umiditate, temperatură, vibrații, salturi de tensiuni. Cauzele externe sunt determinate de mediu, erori de întreținere sau erori de operare ale sistemului.

O primă clasificare a defectelor se poate realiza din punctul de vedere al operabilității: defecte fizice și defecte funcționale.

– în momentul în care apare un defect fizic, ansamblul se defectează și nu mai este apt de funcționare;

– un defect funcțional apare în momentul în care sistemul este operațional, dar nu își realizează funcția specificată. Majoritatea defectelor funcționale apar datorită erorilor din faza de proiectare și pot fi la rândul lor permanente sau tranzitorii. O modalitate de obținere a datelor despre defectele funcționale ar fi consultarea fișierelor de diagnosticare automată care conțin momentul apariției defectului și tipul defectului.

Pentru validarea imediată a rezultatelor teoretice obținute se fac comparații între rezultatele teoretice și cele experimentale obținute de alți cercetători în același domeniu, cât mai apropiată pe aceeași temă.

În evaluarea stării normale de funcționare a unei structuri se remarcă faptul că nu este disponibilă o singură variabilă direct măsurabilă. Cu cât vor fi mai evidente semnele avariilor care sunt măsurate, cu atât va fi mai exactă evaluarea stării de funcționare a structurii. Evaluarea condiției de funcționare a unei structuri, utilizând valorile generale ale nivelului de vibrații și zgomot, este metoda cea mai simplă și mai rapidă de a realiza o diagnosticare. Necesitând costuri relativ scăzute, prin această metodă se pot obține rezultate de încredere și se pot genera informații pentru o recunoaștere timpurie a avariilor și dezechilibrelor, o planificare optimă a acțiunii de menținere și de prevenire a unor avarii sau întreruperi ale proceselor productive.

Sistemele SHM se împart în două grupuri: sisteme SHM pasive și sisteme SHM active. Sistemul SHM pasiv se bazează pe detectarea schimbărilor proprietăților structurii. Diferența dintre sistemul SHM pasiv și sistemul SHM activ este reprezentat de senzorii care sunt direct

excitați și excitația care se transmite structurii; răspunsul structurii la această excitație fiind informația care va fi măsurată și evaluată pentru obținerea informațiilor integrității structurii. Propunerea unei noi metode de interpretare a măsurătorilor de vibrație este făcută, astfel încât să se poată pună în evidență existența și locul unde se află aceste defecte. Metodologia SHM prevede echipamente interesante pentru monitorizarea continuă a structurilor tehnice. Aplicațiile metodei SHM prevăd multe oportunități pentru prelungirea vieții structurii, cu o rapidă detectare a defectului. În tabelul 1 se propun mai multe nivele structurale pentru identificarea defectelor (Rytter și SHM).

Tabelul 1

| RYTTER - EXPLICAȚII       |   | SHM - EXPLICAȚII            |   |
|---------------------------|---|-----------------------------|---|
| NIVELUL I<br>Detectarea   | metoda ne dă indicații calitative că defectul poate fi prezent în structură | NIVELUL I<br>Detectarea     | metoda ne dă indicații calitative că defectul poate fi prezent în structură |
| NIVELUL II<br>Localizarea | metoda ne dă informații despre poziția probabilă a defectului               | NIVELUL II<br>Localizarea   | metoda ne dă informații despre poziția probabilă a defectului               |
| NIVELUL III<br>Evaluarea  | metoda ne dă extinderi estimative și/sau a tipului defectului               | NIVELUL III<br>Clasificarea | metoda ne dă informații despre tipul defectului                             |
| NIVELUL IV<br>Prognoză    | metoda oferă informații despre siguranță                                    | NIVELUL IV<br>Evaluarea     | metoda ne dă extinderi estimative a defectului                              |
|                           |   | NIVELUL V<br>Prognoză       | metoda oferă informații despre siguranță                                    |

## 2. Comportarea dinamică a grinzilor Euler – Bernoulli

Se disting două metode: metoda locală și metoda globală.

Metoda locală - inspectează structura pe o suprafață mică, cu unde ultrasonice, câmpuri magnetice sau radiografice. Din calcule sau experiențe cu alte structuri, este posibil de aflat „punctul fierbinte” al structurii.

Metodele globale - folosesc defectele locale, care cauzează reduceri ale rigidității locale, au o influență a comportamentului global a întregii structuri, în timp și spațiu. Modelul global se bazează pe identificarea defectelor, și poate fi considerat o aplicație specială a

metodologiei de identificare a sistemului. Defectele cauzează schimbări locale caracteristice de rigiditate, amortizare, și ca o importanță a acestor schimbări, cea a caracteristicilor dinamice ca și frecvența proprie, amortizarea modală. Deviațiile dintre proprietățile dinamice actuale și situația fără defecte pot fi folosite la detectarea defectelor și a diagnosticului.

Pentru bara prismatică solicitată la încovoiere [1]

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = p$$

$p$  – sarcina distribuită

S-a folosit simbolul de derivată parțială, întrucât săgețile  $v$  în timpul vibrației sunt funcție atât de abscisa  $x$  cât și de timpul  $t$ .

Se consideră bara prismatică din figura 1, simplu rezemată la capete.

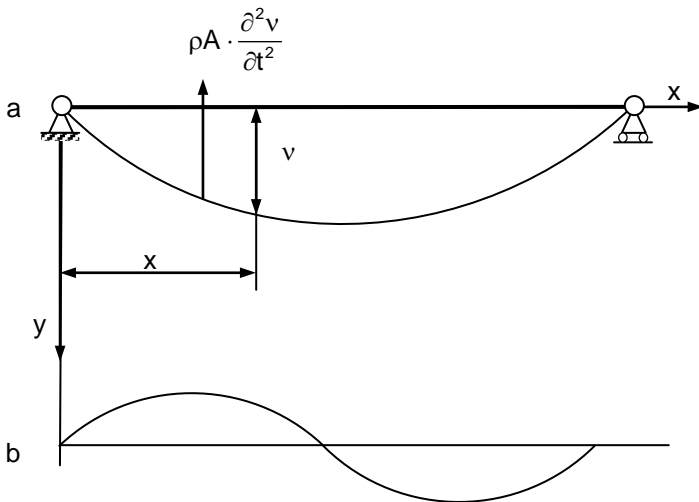


Fig. 1 Bară prismatică simplu rezemată la capete

Se ia forța de inerție pe unitatea de lungime  $\rho A \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$ , care fiind opusă axei  $y$  va fi introdusă în relație cu semnul minus.

$$EI \cdot \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = -\rho A \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

Se obține astfel ecuația cu derivate parțiale

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

Luând soluția ecuației ca produs de două funcții, una numai cu  $x$ , alta numai de  $t$

$$v = X(x) \cdot T(t) = X \cdot \sin pt$$

exprimând cele două derivate parțiale:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = X^{IV} \cdot \sin pt \qquad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = -p^2 X \cdot \sin pt$$

și înlocuind după simplificare cu *sin pt* rezultă:

$$X^{IV} - \frac{\rho A p^2}{EI} X = 0$$

Făcând notația simplificatoare

$$\frac{\rho A p^2}{EI} = \alpha^4$$

ecuația are integrala

$$X = A \cdot \sin \alpha x + B \cdot \cos \alpha x + C \cdot \operatorname{sh} \alpha x + D \cdot \operatorname{ch} \alpha x$$

Constantele A, B, C, D se determină cu ajutorul condițiilor pe reazeme:

– la un reazem simplu, săgeata  $v$  și momentul încovoiator (proporțional cu  $\partial^2 v / \partial x^2 \cdot x$ ) sunt nule, deci  $X = 0$ ,  $X'' = 0$ ;

– la un reazem încastrat, săgeata și unghiul sunt nule, deci  $X = 0$ ,  $X' = 0$

– într-un capăt liber al barei, momentul încovoiator și forța tăietoare sunt nule, deci  $X' = 0$ ,  $X''' = 0$

Astfel se pot scrie cele trei derivate ale funcției  $X$

$$X' = \alpha(A \cdot \cos \alpha x - B \cdot \sin \alpha x + C \cdot \operatorname{ch} \alpha x + D \cdot \operatorname{sh} \alpha x)$$

$$X'' = \alpha^2(-A \cdot \sin \alpha x - B \cdot \cos \alpha x + C \cdot \operatorname{sh} \alpha x + D \cdot \operatorname{ch} \alpha x)$$

$$X''' = \alpha^3(-A \cdot \cos \alpha x + B \cdot \sin \alpha x + C \cdot \operatorname{ch} \alpha x + D \cdot \operatorname{sh} \alpha x)$$

### 3. Efectul defectului asupra comportării structurii

Ideea de bază este că schimbarea curburii modurilor de vibrație este un bun indicator pentru defectul local.

Pentru grinda Euler-Bernoulli tensiunea  $\varepsilon$  este [2]:

$$\varepsilon = Kz$$

K – curbura axei grinzii

$z$  – coordonata perpendiculară a axei grinzi, pornind de la axa neutră.

Pentru deformații mici, de obicei este acceptat ca și curbură să fie aproximativ egală cu derivata secundară a îndoirii grinzii  $w$ :

$$K \approx w''$$

Energia totală a tensiunii a întregii grinzi poate fi obținută prin integrarea întregii lungimi  $L$  a grinzii:

$$U_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \int_0^L EI [w''(x)]^2 dx$$

Rigiditatea la îndoire  $EI$  poate varia de-a lungul axei grinzii.

Considerând doar o mică secțiune din grindă, porțiunea cu tensiunea energiei pentru această secțiune de grindă de lungime  $\Delta l$  este:

$$U_{\text{el},i} = \frac{1}{2} \int_{\Delta l} EI [w''(x)]^2 dx$$

Energia modală a tensiunii poate fi obținută înlocuind deplasarea generală  $w$  cu forma modului continuu  $\varphi(x)$ .

Energia tensiunii modale a întregii grinzi sau a unei părți din aceasta poate fi scrisă ca:

$$U_{\text{tot},i} = \frac{1}{2} \int_L EI [\varphi''(x_i)]^2 dx$$

$$U_{\text{el},i} = \frac{1}{2} \int_{\Delta l} EI [\varphi''(x_i)]^2 dx$$

Introducând proporția energiei elementelor cu energia totală pentru structuri fără defecte [nedeteriorate] (0) și cu defecte [deteriorate] [1]:

$$F_{i,\text{el}}^d = U_{\text{el},i}^d / U_{\text{tot},i}^0$$

$$F_{i,\text{el}}^0 = U_{\text{el},i}^0 / U_{\text{tot},i}^0$$

Suma tuturor celorlalte elemente este:

$$\sum_{\text{el}} F_{i,\text{el}}^d = \sum_{\text{el}} F_{i,\text{el}}^0 = 1 \Rightarrow F_{i,\text{el}}^d \ll 1 \text{ și } F_{i,\text{el}}^0 \ll 1$$

Aceasta implică:

$$1 + F_{i,\text{el}}^d \cong 1 + F_{i,\text{el}}^0$$

Va rezulta o formulă:

$$1 = \frac{1 + (U_{el,i}^d / U_{tot,i}^d)}{1 + (U_{el,i}^0 / U_{tot,i}^0)} = \frac{(U_{el,i}^d + U_{tot,i}^d)}{(U_{el,i}^0 + U_{tot,i}^0)} \cdot \frac{U_{tot,i}^0}{U_{tot,i}^d}$$

Stubbs, Kim și Farrar au amplificat, rezultând formula:

$$\beta_{el,i} = \frac{EI_{el}^0}{EI_{el}^d} = \frac{\int_{\Delta l} [\varphi_i^{*d}(x)]^2 dx + \int_L [\varphi_i^d(x)]^2 dx \int_L [\varphi_i^{*0}(x)]^2 dx}{\int_{\Delta l} [\varphi_i^{*0}(x)]^2 dx + \int_L [\varphi_i^{*0}(x)]^2 dx \int_L [\varphi_i^d(x)]^2 dx} = \frac{Num_{el,i}}{Den_{el,i}}$$

Un singur indicator este derivat în:

$$\beta_{el} = \frac{\sum_i Num_{el,i}}{\sum_i Den_{el,i}}$$

Indicatorul este normalizat de:

$$Z_{el} = (\beta_{el} - \mu_\beta) / \sigma_\beta$$

Farrar (și alții) au utilizat diferite derivații în raportul lor. În loc de ecuații, ei au scris:

$$F_{i,el}^d \cong F_{i,el}^0$$

că argumentul de bază al defectelor este localizat ca o singură sub-regiune și energia fracțională va rămâne aproximativ constant în sub-regiuni nedeteriorate.

Punând energia fracțională în ecuație, se obține:

$$\beta_{el,i}^* = \frac{EI_{el}^0}{EI_{el}^d} = \frac{\int_{\Delta l} [\varphi_i^{*d}(x)]^2 dx}{\int_{\Delta l} [\varphi_i^{*0}(x)]^2 dx} \cdot \frac{U_{tot,i}^0}{U_{tot,i}^d} = \frac{Num_{el,i}^*}{Den_{el,i}^*}$$

Însumarea tuturor modurilor este:

$$\beta_{el}^* = \frac{\sum_i Num_{el,i}^*}{\sum_i Den_{el,i}^*}$$

Indicatorul defectelor dă o mai puțină acuratețe rezultatelor dacă energia tensiunii elementului considerat este mică. În acest caz

două valori mici trebuie divizate. Această metodă poate fi extinsă pentru structuri plate.

#### 4. Concluzii

■ Importanța **Monitorizării Integrității Structurii** este într-o continuă creștere în ultimii ani, odată cu nevoia de creștere a dezvoltării sistemelor capabile de a monitoriza continuu integritatea structurilor complexe.

■ Pentru a fi în competiție cu tehnicile convenționale de evaluare nedistructive, SHM au capacitatea efectivă de a detecta defectul în structură, dând informații despre localizarea acestuia. Unde ultrasonice oferă posibilitatea de a inspecta o arie mare a structurii.

■ Pentru o structură complexă cum sunt podurile și clădirile, de obicei se folosesc un număr mare de parametri necunoscuți ai defectelor. Strategia este de a găsi un număr mic de parametri ai defectelor care sunt necesari pentru a descrie schimbările proprietăților dinamice.

#### Mulțumiri

Autorii mulțumesc pentru sprijinul acordat de Fondul Social European Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane (FSE POSDRU), prin Ministerul Muncii, Familiei și Protecției Sociale prin cofinanțarea proiectului (DocInvest) POSDRU/107/1.5/S/76813.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] Buzdugan, Gh., *Rezistența materialelor*, Editura tehnică București, 1974.  
[2] Balageas, D., Fritzen, Cl.P., Guemes, A., *Structural Health Monitoring*, Printed and bound in Great Britain by Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006.

Drd.Ing. Carla PROTOCSIL  
Universitatea „Eftimie Murgu” Reșița, membru AGIR  
e-mail: c.protocsil@uem.ro

Prof.Univ.Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH  
Prorector Învățământ  
Universitatea Universitatea „Eftimie Murgu” Reșița,  
Președinte Sucursala AGIR Caraș-Severin  
e-mail: gr.gillich@uem.ro