

Wybrane zagadnienia nieniszczącej diagnostyki konstrukcji

Magdalena Rucka

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Katedra Wytrzymałości Materiałów

Posiedzenie Plenarne Komitetu Mechaniki PAN Warszawa, 13.10.2016



Wprowadzenie

Diagnostyka techniczna

- ✓ ocena stanu technicznego konstrukcji inżynierskich
- ✓ zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji inżynierskich











 $\psi(x)$ – funkcja falkowa

$$\psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{x-u}{s}\right)$$



Jednowymiarowa transformata falkowa

$$Wf(u,s) = \left\langle f, \psi_{u,s} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \,\psi\left(\frac{x-u}{s}\right) dx$$

f(x) = sygnalf(x) = sygnals = -skalau = pozycja





 $\pm \infty$

Metoda transformaty falkowej

Jednowymiarowa transformata falkowa

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^{k} \psi(x) dx = 0 \qquad k = 0, 1, 2, ..., n-1$$

n – zanikające momenty

$$Wf(u,s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) dx$$

transformata falkowa w postaci całkowej

$$\psi(x) = \frac{d^n \theta(x)}{dx^n}$$

$$Wf(u,s) = s^n \frac{d^n}{du^n} (f * \bar{\theta}_s)(u)$$

transformata falkowa w postaci różniczkowej

$$\bar{\theta}_s(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \theta\left(\frac{-x}{s}\right)$$

Transformata falkowa zawiera informację o pochodnej sygnału bez konieczności numerycznego różniczkowania

Dwuwymiarowa transformata falkowa

GDAŃSKA



Postać różniczkowa transformaty falkowej $\psi^{1}(x, y) = \frac{\partial^{n} \theta(x, y)}{\partial x^{n}}$ $\psi^{2}(x, y) = \frac{\partial^{n} \theta(x, y)}{\partial y^{n}}$

$$\begin{pmatrix} W^{1}f(u,v,s) \\ W^{2}f(u,v,s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f * \overline{\psi}_{s}^{1}(u,v) \\ f * \overline{\psi}_{s}^{2}(u,v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f * s^{n} \frac{\partial \overline{\theta}_{s}}{\partial u}(u,v) \\ f * s^{n} \frac{\partial \overline{\theta}_{s}}{\partial v}(u,v) \end{pmatrix} = s^{n} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial u}(f * \overline{\theta}_{s})(u,v) \\ \frac{\partial}{\partial v}(f * \overline{\theta}_{s})(u,v) \\ \frac{\partial}{\partial v}(f * \overline{\theta}_{s})(u,v) \end{pmatrix} = s^{n} \nabla (f * \overline{\theta}_{s})(u,v)$$









sygnał numeryczny pierwsza postać drgań



sygnał eksperymentalny pierwsza postać drgań



Rucka M., Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beam and plates, *Journal of Sound and Vibration* 297, 536–550, 2006





sygnał numeryczny druga postać drgań



sygnał eksperymentalny druga postać drgań



Rucka M., Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beam and plates, *Journal of Sound and Vibration* 297, 536–550, 2006





Rucka M., Damage detection in beams using wavelet transform on higher vibration modes, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 49(2), 399–417, 2011











- $\rho = 7430 \text{ g/cm}^3$ L = 560 mm*E* = 192 GPa v = 0.25H = 2 mm
 - B = 480 mm
- $L_1 = 100 \text{ mm}$ $B_1 = 100 \text{ mm}$





Б



100

0 'n

B [mm]

300

L [mm]

200

100

uszkodzenie

głębokość zniszczenia = 25% grubości płyty powierzchnia zniszczenia = **2.4%** powierzchni płyty





Rucka M., Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beam and plates, *Journal of Sound and Vibration* 297, 536–550, 2006



Metoda propagacji fal sprężystych

Zastosowanie propagacji fal sprężystych do wykrywania uszkodzeń

metoda ultradźwiękowa (lokalna)





metoda fal prowadzonych (globalna)





Metoda fal prowadzonych

- powstają w ośrodkach ograniczonych dwiema równoległymi powierzchniami, których grubość jest rzędu długości fali
- mogą propagować w płytach, prętach, elementach cienkościennych, itp.
- ✓ istnieją dwie grupy postaci fal Lamba: formy symetryczne (S₀, S₁, S₂, ...) oraz antysymetryczne (A₀, A₁, A₂, ...)
- ✓ dyspersja zależność prędkości rozchodzenia się fal od częstotliwości



Metoda fal prowadzonych – opis stosowanych teorii

pręt: teoria **Mindlina-Herrmanna** $\overline{u}_x(x, y, t) \approx u_x(x, t)$ $\overline{u}_y(x, y, t) \approx \psi(x, t) y$

POLITECHNIKA GDAŃSKA



Rucka M: Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation, *Journal of Sound and Vibration* 329, 1760–1779, 2010



Rucka M: Experimental and numerical studies of guided wave damage detection in bars with structural discontinuities, *Archive of Applied Mechanics* 80, 1371–1390, 2010



Metoda fal prowadzonych – opis stosowanych teorii



Rucka M: Modelling of in-plane wave propagation in a plate using spectral element method and Kane-Mindlin theory with application to damage detection, *Archive of Applied Mechanics* 81, 1877-1888, 2011



Metoda fal prowadzonych – modelowanie

Metoda elementów spektralnych

- elementy wielowęzłowe z węzłami
 Gauss-Lobatto-Legendre (GLL)
- ✓ funkcje interpolacyjne Lagrange'a
- ✓ całkowanie numeryczne: kwadratura Gauss-Lobatto-Legendre



współrzędne punktów całkowania

$$(1 - \xi^2) \frac{dP_N(\xi)}{d\xi} = 0$$

wagi

$$w_p = \frac{2}{N(N+1) \left[P_N(\xi_r) \right]^2}$$

$$P_N$$
 – wielomian Legendre'a

- ✓ eliminacja efektu Runge
- ✓ diagonalna macierz mas
- macierz mas całkowana kwadraturą GLL nie jest macierzą ścisłą
- mniejsza liczba węzłów na długość fali niż w klasycznej MES (5÷10)
- ✓ programy autorskie



Metoda fal prowadzonych – modelowanie

Metoda elementów skończonych

- ✓ możliwość użycia programów komercyjnych (np. Abaqus)
- ✓ potrzeba użycia 20 do 40 węzłów na długość fali









Rucka M: Experimental and numerical studies of guided wave damage detection in bars with structural discontinuities, Archive of Applied Mechanics 80, 1371–1390, 2010





Rucka M: Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation, Journal of Sound and Vibration 329, 1760–1779, 2010



POLITECHNIKA GDAŃSKA



161 punktów







65x65 = 4225 punktów



zobrazowanie typu B – wielkości amplitud w funkcji czasu i położenia

POL

DLITECHNIKA GDAŃSKA



Rucka M: Wave Propagation in Structures. Modelling, Experimental Studies and Application to Damage Detection, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011



Rucka M: Wave Propagation in Structures. Modelling, Experimental Studies and Application to Damage Detection, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011





S2

S1

A●

POLITECHNIKA GDAŃSKA



0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0





Zima B, Rucka M: Guided waves for monitoring of plate structures with linear cracks of variable length, Archives of Civil and Mechanical Engineering 16, 387–396, 2016

0.4

0.3

0.2

0.1

0



Diagnostyka kotew gruntowych













Diagnostyka kotew gruntowych









Zima B, Rucka M: Wave propagation in damage assessment of ground anchors, Journal of Physics: Conference Series 628, 012026, 2015



Diagnostyka połączeń śrubowych

Propagacja fal prowadzonych przez połączenia cierne

- zmienność nominalnej i rzeczywistej powierzchni kontaktu
- dyssypacja energii
- ✓ generacja wyższych harmonicznych
- 🗸 wyciek widma







Diagnostyka połączeń śrubowych









diagnostyka okresowa/doraźna



monitoring ultradźwiękowy





















Rucka M, Wilde K: Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method, Diagnostyka 3(55), 63–68, 2010



Rucka M, Wilde K: Non-destructive diagnostics of concrete cantilever beam and slab by impact echo method, Diagnostyka 3(55), 63–68, 2010





http://annapurnaconstruction.com/content/concrete-splitting

Monitorowanie procesu pękania betonu na skutek utraty przyczepności stali do betonu (ang. "bond splitting failure")















Rucka M. Wilde K: Experimental study on ultrasonic monitoring of splitting failure in reinforced concrete, *Journal of Nondestructive Evaluation* 32, 372–383, 2013 Rucka M, Wilde K: Ultrasound monitoring for evaluation of damage in reinforced concrete, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 63, 65–75, 2015





Metoda georadarowa (ang. GPR - ground penetrating radar)

 zjawisko propagacji fal elektromagnetycznych
 szerokie zastosowanie w diagnostyce technicznej (konstrukcje murowe, żelbetowe, gruntowe)



- ✓ wzmacnianie sygnału
- szacowanie prędkość propagacji na podstawie aproksymacji hiperboli
- ✓ wyznaczanie granicy ośrodków
- ✓ szacowanie średnicy prętów zbrojeniowych





Badania doświadczalne





Lachowicz J, Rucka M: Numerical modeling of GPR field in damage detection of a reinforced concrete footbridge, Diagnostyka 17(2), 3-8, 2016









$$\begin{split} t &= \sqrt{4 \frac{\left(x_0 - x_i\right)^2}{v_1^2} + t_0^2}, \quad \text{for } x \ge x_p, \\ t &= \sqrt{4 \frac{\left(x_0 - x_p\right)^2}{v_1^2} + \left(t_0 - t_p\right)^2}_{t_1} + \frac{1}{v_2} \left(\sqrt{v_1^2 t_0^2 + 4(x_0 - x_i)^2} - \sqrt{v_1^2 (t_0 - t_p)^2 + 4(x_0 - x_p)^2}\right), \text{for } x < x_p, \\ t_p &= t_0 \frac{\left(x_p - x_i\right)}{x_0 - x_i} \end{split}$$

Rucka M, Lachowicz J, Zielińska M: GPR investigation of the strengthening system of a historic masonry tower, Journal of Applied Geophysics 131, 94–102, 2016



Badania doświadczalne

Analizy numeryczne











Rucka M, Lachowicz J, Zielińska M: GPR investigation of the strengthening system of a historic masonry tower, Journal of Applied Geophysics 131, 94–102, 2016



HISTORIA MĄDROŚCIĄ PRZYSZŁOŚĆ WYZWANIEM