

デジタル画像相関法を用いた振動計測による亀裂検知手法の開発

Development of a Crack Detection Method Using Vibration Measurement with Digital Image Correlation

システム工学群

振動工学研究室 内山田 鷹介

1. 緒言

梁, 橋, エンジンなどの構造物は経年劣化や過負荷による亀裂進展が生じる場合がある. この異常検知について, 加速度センサによる振動計測を用いた手法が提案されてきた⁽¹⁾. しかし, 精度維持のために異常箇所の近傍にセンサ設置をすることが要求されるため, 広範囲にわたる異常検知が難しいという課題があった. そのため, 近年では, 構造物ヘルスマニタリングの分野で, デジタル画像相関法(DIC)が活用され始めており, ひずみの変化をとらえることで亀裂を検知する手法が提案されている⁽²⁾. しかし, ひずみは亀裂以外の要因でも変化することが多々あり, 安定した検知が難しいという課題がある.

Nigam らは, 亀裂を有する梁での初期たわみによる自由振動中での亀裂の検出に成功している⁽³⁾. しかし, 定常的な加振状態での評価には至っていない.

そこで本研究では, 定常振動中の振動モードの変化を評価することで, 亀裂位置を検知する手法を提案する. 実験では亀裂を有する配管に振動を与えることで, 振動モード変化と亀裂位置の関係を評価した.

2. 解析手法と装置

2.1 Digital image correlation

デジタル画像相関法(Digital image correlation, DIC)は画像解析を用いて物体の変形を非接触で計測する技術である.

変位算出では, 基準画像と変形後画像から「サブセット」と呼ばれる微小領域を切り出し, その一致度が最も高い位置を推定する. 極大値近傍を Bi-cubic 補間することで, 画素分解能以下のサブピクセル単位の変位を取得することができる. このサブピクセル精度は, 一般的に 1/50~1/10 程度になるといわれている. 本研究では, DIC ソフトウェアには Ncorr⁽⁴⁾を用いた.

2.2 Proper Orthogonal Decomposition

X 方向変位データ配列: $U(x, y)$ と Y 方向変位データ $V(x, y)$ を縦方向に連結したデータ配列: $A(x, y, t)$ を POD⁽⁵⁾を用いて下記式の通り分解した.

$$A(x, y, t) = \sum_j \sqrt{\epsilon_j} p_j(t) \xi_j(x, y) \quad (1)$$

ここで, $\xi_j(x, y)$ は固有モード, ϵ_j はエネルギーレベル, $p_j(t)$ は時間関数(振動信号)を示す.

2.3 変位勾配算出

亀裂による軸方向での伸び量の変化をより定量的に評価するため, 変化量の変位勾配 ϵ を下記式を用いて求めた.

$$\epsilon = \sum_i \frac{\partial \xi_1(x)}{\partial x} \approx \sum_i \frac{\xi_1(x_{i+1}) - \xi_1(x_i)}{\Delta x} \quad (2)$$

$\xi_1(x)$ は, 軸方向の固有モード, Δx は DIC のメッシュ間隔である 6 ピクセル分の長さ約 0.96 mm である.

次に, 変位勾配 ϵ に下記式に示す移動平均フィルタを適用した.

$$y_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=-k}^k \epsilon_{i+j} \quad (3)$$

この結果を用いて平均を算出した.

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_j^n y_i \quad (4)$$

2.4 実験装置

DIC を用いた加振試験における振動モードと亀裂検知手法の検証を行うために, 図 2 に示す実験装置を設計した. 変位計測用に高解像度カメラ(BAUMER 製, VCXU-123U, 2992×4096 pix)を設置した.

試験体は, 外径 18 mm, 内径 13 mm, 全長 1000 mm の硬質ポリ塩化ビニル管であり, 左端から 230 mm の位置に亀裂を入れている. 中央に穴があり, M5 のボルトで加振器に固定している. 固定位置や加速度計の設置位置などの条件も図 1 に示している. 尚, カメラでの撮影は先端から右固定部までとした.

カメラと同じ方向からハロゲンライト(株式会社 高儀製 WLT-260)の光を試験配管に照射した. 加振条件や実験条件は表 1 に示すとおりであり, 単一周波数試験を実施した. FEM で計算した試験対象配管の固有振動数が 10, 63, 175 Hz 近傍であったため, 周波数条件は表 1 に示すとおり固有振動数の近くに設定している.

Table.1 Vibration conditions with abnormal condition

Single frequency Vibration with abnormal condition[Hz]	Crack location from the left edge[mm]
10, 22, 27, 33, 66, 80, 100	230

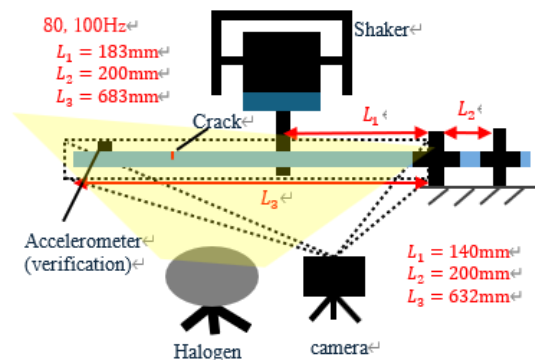


Fig.1 Overview of the experiment apparatus. Schematic diagram

3. 実験結果

単純な振動に対する亀裂変化を評価するため、単一周波数の加振試験を実施した。

図2(a)には10 Hzの加振を実施した際の、PODにより抽出した1次空間モード $\xi_1(x, y)$ の軸方向強度分布を示す。亀裂がある $x = 230 \text{ mm}$ の地点において軸方向の伸び量が增加していることが分かる。図2(b)には66 Hzの加振を実施した際の空間モードを示す。亀裂がある $x = 230 \text{ mm}$ の地点において10 Hzの加振を実施した際より軸方向の伸び量の変化が顕著に表れた。このメカニズムを評価するために、図3に示す通りFEMにより亀裂付近の $x = 220 \sim 240 \text{ mm}$ におけるせん断応力分布を計算した。図3(b)の結果に示す通り、2次の固有振動数近くの65 Hzでは亀裂位置でのせん断応力が図3(a)の1次モードより約4倍増加している。これにより亀裂部に軸方向への力がかかったため、軸方向モードが顕著に変化したと考えられる。また、10 Hzにおいて66 Hzと比べ伸び量の変化が小さかったのは波長が長く腹が亀裂点から離れていたことで亀裂周りの応力が小さかったためだと考えられる。

式(4)により算出した変位勾配の絶対値について亀裂付近におけるピーク値と加振周波数の関係を図4に示す。図4から、亀裂ありの場合、高周波になるにつれて変位勾配も増大する傾向になっていることが分かる。これは、高周波になるほど振動モードの波長が短くなり、亀裂部にかかるせん断応力が大きくなることが要因だと考えられる。しかし、10 Hzでは亀裂付近の変位勾配のピーク値が振動モードに埋もれて検知ができなかった。22 Hzでは、亀裂の有無による変位勾配の差は小さいが、高周波になるにつれてその差は顕著に拡大していることが分かる。

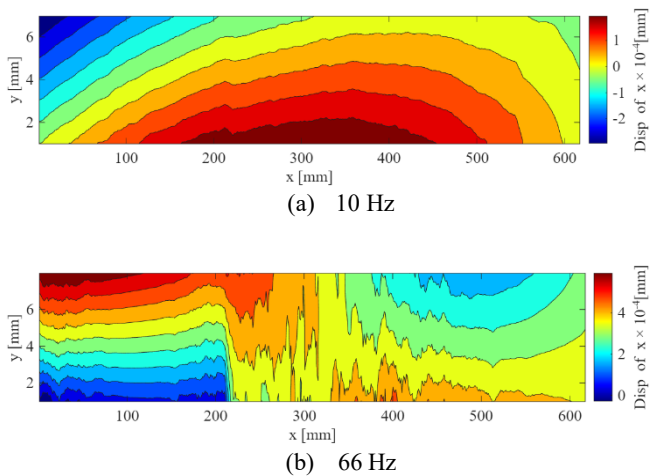
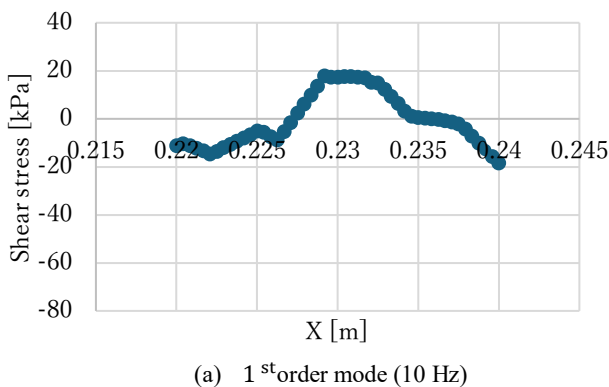
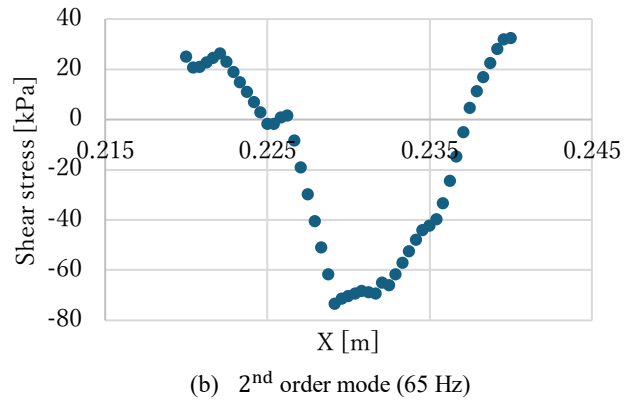


Fig.2 1st axial spatial mode calculated using POD



(a) 1st order mode (10 Hz)



(b) 2nd order mode (65 Hz)

Fig.3 Mode shape and shear stress distribution calculated using FEM

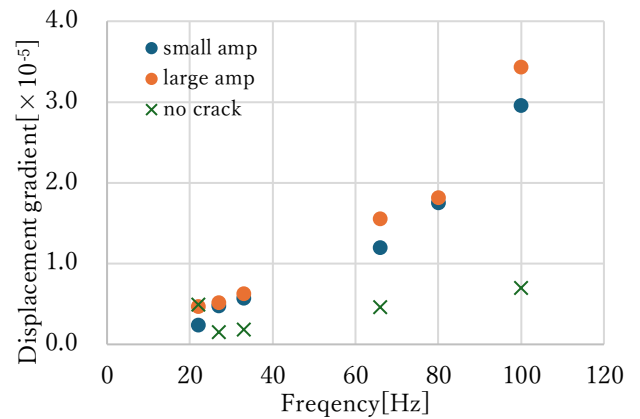


Fig.4 Displacement gradients near the crack location for vibration modes at each frequency

4. 結論

亀裂を有する配管に振動を与えて、そのモードをPODにより抽出した。その結果、亀裂位置付近で軸方向の伸び量が急増しており、異常箇所とその度合いが見積もれる可能性が示唆された。また、高周波になるにつれて伸び量の変化量が増加することが認められた。

5. 参考文献

- (1) Y, Bao., Z, Tang., H, Li., and Y, Zhang., "Computer Vision and Deep Learning-Based Data Anomaly Detection Method for Structural Health Monitoring", February 2018, 18(2), pp. 401-421.
- (2) Mousa, M. A. et al., "Application of Digital Image Correlation in Structural Health Monitoring of Bridge Infrastructures: A Review", Infrastructures (2021), 6(12), 176.
- (3) R, Nigam., "Crack detection in a beam using curvatures and digital image measurements" Meccanica, Volume 57(2022), pp2199 - 2211.
- (4) J, Blaber, B Adair, and A. Antoniou, "Ncorr: Open-source 2D Digital Image Correlation Matlab Software." Experimental Mechanics (2015), Volume 55, pp. 1105-1122
- (5) Kerschen, G., et al., "The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: an overview", Nonlinear Dyn.41(1) (2005) 147-169