ビジョンシステムを用いた振動特性の変化による劣化検出方法の検討

広島大学大学院　正会員　○佐竹 亮一
広島大学大学院　フェロー会員　中村 秀治
広島大学大学院　石井 抱
広島大学大学院　辻 徳生

1. はじめに

近年，コンピュータやセンサなどに関する技術の発展は著しい．新たな技術として高速高解像度ビジョン技術が開発されている．

本研究では高速ビジョン技術を活用して，構造全体の局所変位を同時多点計測ができることを前提に構造物の振動特性の同定について検討を行ない，構造物の劣化や損傷を振動特性の変化から劣化や損傷部材を同定する方法を提案する．具体的には，高速ビジョンにより同時に 100 点以上の標点の変位を 1/1000 秒間隔で取得し, 応答変位波形から, 固有直交関数展開により，固有振動数，固有モードを求め，構造物の振動特性を同定する方法を提案する．また，部材ごとの計測点データを用いて固有直交関数展開で算出する固有ベクトルの変化から損傷部材を同定する方法を提案する．

2. 固有直交関数展開

固有直交関数展開はランダムに変動している変量の集合の全要素と最も良く相関する確定的関数$\phi(x,y)$を見つけることである．つまりランダムに変動する構造物の動的変位 $p(x,y,t)$ が与えられたとき，確定的関数$\phi(x,y)$への $p(x,y,t)$ の投影が最大となるものを捜す．正規化して式で表わせば,

$$\frac{\iint p(x,y,t)\phi(x,y)dxdy}{\sqrt{\iint \phi^2(x,y)dxdy}} \Rightarrow \max \tag{1}$$

である．式(1)の最大化は 2 乗平均の意味でもとめることが出来る．

$$\frac{\overline{\iint p(x,y,t)\phi(x,y)dxdy \cdot \iint p(x',y',t')\phi(x',y')dx'dy'}}{\iint \phi^2(x,y)dxdy} = \lambda > 0 \tag{2}$$

これは固有値問題で

$$\iint R_p(x,y,x',y')\phi(x',y')dx'dy' = \lambda\phi(x,y) \tag{3}$$

$R_p(x,y,x',y')$ は動的変位 $p(x,y,t)$ の空間相関である．$dx \times dy$ が長方形で一様に分布し，M 個の点での動的変位が得られている場合は，マトリクス表現で置き換えることができ,

$$\{R_p\}\{\phi\} = \lambda\{\phi\} \tag{4}$$

ここで$\{R_p\}$：動的変位の空間相関マトリクス,
$\{\phi\}$：空間相関マトリクスの固有ベクトル
λ：空間相関マトリクスの固有値

式(4)から得られる固有ベクトル $\phi_m(x,y)$ の直交性を利用して，元の動的変位は

$$p(x,y,t) = \sum_{m=1}^{M} a_m(t)\phi_m(x,y) \tag{5}$$

と表される．ただし,

$$a_m(t) = \frac{\iint p(x,y,t)\phi_m(x,y)dxdy}{\iint \phi^2(x,y)dxdy} \tag{6}$$

ここで $a_m(t)$ ：m 次規準座標(m 次主成分),
$\phi_m(x,y)$:m 次固有ベクトル(m 次固有モード)
である．

3. 実験条件

図 1 に示す 2 層ラーメン構造を実験供試体とした．図 1 に変位計測点番号および部材番号を示す．高速ビジョンによる多点変位計測の計測点を 40 点設定した．計測箇所は柱部材とし，計測方向は水平方向，鉛直方向とした．実験供試体はシリコーンとアクリル棒で作成した．

計測は図 1 に示す打振点に水平方向外力を作用させ, そのときの応答変位を, 高速ビジョンを用いて 1,000fps

キーワード：高速ビジョン，劣化検出，固有直交関数展開
連絡先　〒739-8527　広島県東広島市鏡山 1-4-1　広島大学大学院 工学研究科　TEL 082-424-7531

で約 1 秒間計測した.

損傷を入れる前の状態を健全モデルとする．損傷は 1 層目の柱部材 ④に与えた.

(a) 損傷モデル A：部材④に 10%の断面欠損を与えたモデル．断面欠損は部材長さ方向にシリコーンを除去した.

(b) 損傷モデル B：損傷モデル A に加えて断面欠損を与え，健全な状態から 20%の断面欠損を，外側に位置するアクリル棒を 1 本除去する.

(c) 損傷モデル C：損傷モデル B に加えて部材④の外に位置するアクリル棒をさらに 1 本除去する.

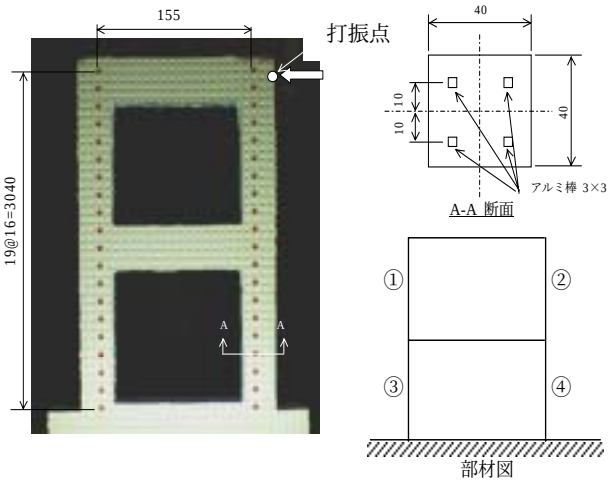


図 1 実験供試体

4. 実験結果

固有直交関数展開を用いて，計測データから各次の規準座標を算出し固有振動数，固有モードを求めた．損傷による固有振動数の変化を図 2 に示す．1 次固有振動数は健全な場合から損傷が増すごとに減少している.

損傷による 1 次固有モードの変化を図 3 に示す．損傷が大きい損傷モデル C では部材④のモード形状が健全時に比べ変化していることがわかる．しかし，固有モードの変化は小さく，劣化や損傷に関する感度は低いといえる.

本検討では部材ごとの固有ベクトルに着目し，健全な場合と劣化や損傷を有する場合の固有ベクトルの変化によって劣化や損傷箇所を同定する．その方法として，健全時と劣化時の固有ベクトルの内積を考察する方法を提案する.

固有ベクトルを健全時と劣化時について求め，それぞれの内積を求める．図 4 に部材ごとの健全時と損傷モデル A,B,C との内積を示す．図 4 より部材④の固有ベクトルの内積は損傷の増加に伴って減少していることがわかる.

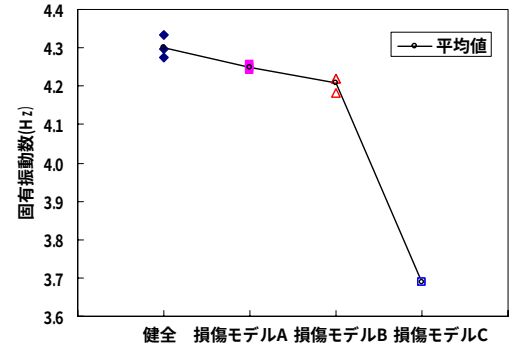
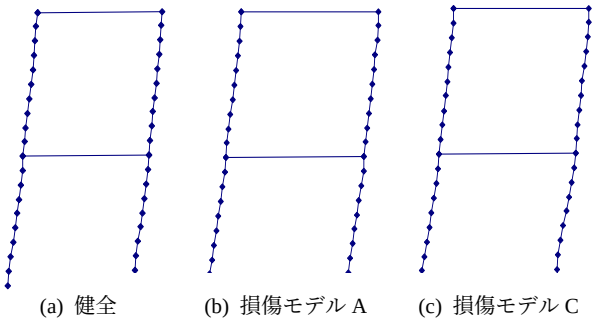


図 2 損傷による固有振動数の変化



(a) 健全 (b) 損傷モデル A (c) 損傷モデル C

図 3 損傷による 1 次固有モードの変化

5. 結論

高速ビジョン技術を活用して，構造物全体の変位の同時多点計測を行ない，応答変位波形を固有直交関数展開すると，固有ベクトルが固有振動モードを表していることを明らかにし，規準座標の周期から固有振動数を求めた．劣化や損傷箇所の特定方法として，部材ごとの応答波形の固有ベクトルの変化から劣化や損傷箇所を特定する方法が有効であることを示した.

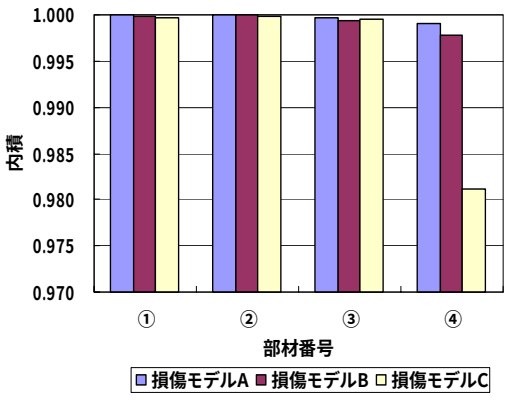


図 4 固有ベクトルの内積

参考文献

1) 田村幸雄：固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ，日本風工学会誌第 65 号，pp.33-40, 1995