

温度変形計測データを用いた構造物の変状評価に関する検討

清水建設(株) 正会員 ○稲田 裕

1. はじめに

近年、構造物の長寿命化の要請から予防保全による維持管理への動きが加速し、構造物の性能変化を監視する手段として構造モニタリングへの期待も高まっている。しかしその維持管理への展開には、ハード技術の開発とともに、計測結果から有用な情報を抽出する評価技術の整備が課題となっている。そこで本報では、温度の季節変化に伴う時間変化が緩やかな変形に着目して構造性能の変化を評価する手法を提案する。温度変化による構造物の変形は大きく、慣性力や減衰の影響を受けずに部材の特性変化を直接的に表すため、変状監視の指標として有効と考えられる¹⁾。さらにウェーブレット変換を用いて、劣化や損傷による性能の変化を検知する手法を構築し、その有効性を検討する。

2. 評価手法の構築

構造応答計測による劣化損傷の評価では、変状発生の的確な検知と劣化や損傷との関係の把握が重要となるが、実際の計測では変状を含むデータは容易には得られない。そこで本研究では、想定される劣化/損傷をモデル化し、それを考慮した構造応答評価を行うことにより、劣化や損傷が発生した時の応答特性を把握する。また、計測データの時系列解析には、局所的、微小な変化の検出に適するウェーブレット変換に基づく時間周波数解析を用いる。ウェーブレット変換の詳細な説明は省くが、正規直交の離散ウェーブレット変換による多重解像度解析によって波形の異常性の検知を図る²⁾。

3. ケーススタディによる検証

i) 評価モデル：対象構造物はPCラーメン橋を想定し、設計計算例³⁾を参考に、図1に示すような単純化した2次元の評価モデルを設定する。そして、図2に示す梁要素の解析モデルにより、季節変動に伴う日毎の温度変化による構造応

答を算定する。橋脚の温度応力による変形は無視し、上部構造の温度応力による力を両端の節点に水平力 F として与える。なお、気温変化は単純な正弦波を仮定し、道路橋示方書に従い基準温度を $+20^{\circ}\text{C}$ 、温度変化を $\pm 15^{\circ}\text{C}$ とした。基準温度から温度変化 Δt が生じたとき外力 F は、部材の線膨張係数を $\alpha=10 \times 10^{-6}$ とすると、 $F=\alpha E A \Delta t$ となる。

ii) 構造応答評価：損傷のモデル化の第一ステップとして、損傷の進展を梁要素の剛性変化で表し、各要素の曲率変動により応答特性の変化を評価する。損傷部位の梁の弾性係数を $E'=kE$ と表し、剛性変化率 k の経時変化として図3の5つのパターンを設定した。P-0は剛性変化なし、P-1は直線的な減少、P-2とP-3は各々変化の開始、終了時点で滑らかに連続するように誤差関数を用いて定義した。さらに、P-4は突発的な破断の連続する階段状の剛性低下とした。どのパターンも $t=1$ 年に変化が開始し、1年間で変化率が1から0.4まで減少するものとして進展状況を比較する。

この手法により損傷部位や評価対象項目を様々に変えた評価を行い、監視対象を設定することができる。その例として、損傷部位をa12としたときの反対側の梁要素b12における曲率変動(Case 1)と、損傷部位をa02として隣接する梁要素a03の曲率変動(Case 2)を図4に示す。曲率の変動振幅はCase 2の方が大きい。また、剛性低下に伴う変化

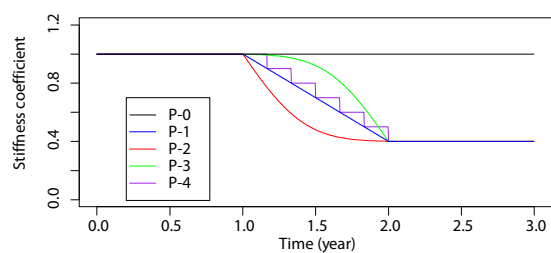


図3 剛性変化率の経時変化

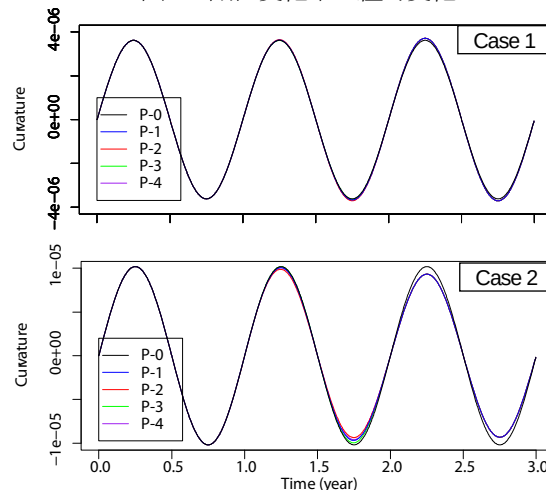


図4 曲率の変動波形

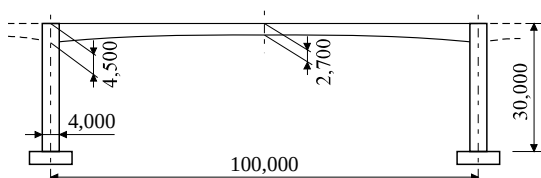


図1 評価対象モデル

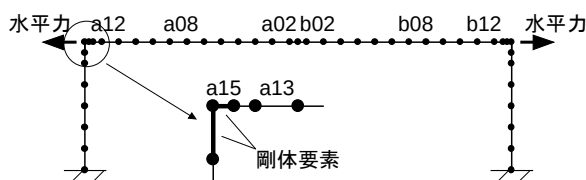


図2 解析モデル

キーワード 変状評価, ウェーブレット解析, 構造モニタリング, 損傷検知

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所 Tel 03-3820-8315

は, Case1 では振幅がわずかに増大し, Case 2 では減少している. 変状パターン P-1 の変化がやや大きく見えるが, 変状パターンによる差異は顕著には見られない.

iii) ウェーブレット変換による変状評価: 図4の二つの変動波形に対してウェーブレット変換を行い, 変状検知の可能性を検討する. 多重解像度分解アルゴリズムによりスケールを倍にしなが, $j=1,2,\dots,J$ のように順次フィルタリングして, 元波形の時系列ベクトル X を次式のように詳細部分であるDetail D_j と残りの近似部分のSmooth S_j に分解する.

$$X = \sum_{j=1}^J D_j + S_J \quad (1)$$

変状パターンを直線の変化の P-2 とし, マザーウェーブレットに Daubechies 10 を用いて, $D_j, j=1\sim 3$ を求めた結果を図5に示す. 両図とも求められた Detail を下から順に積み上げて表しており, $D_j, j=1\sim 3$ の縦軸のスケールは等しい. 剛性が変化する $t=1\sim 2$ 年の期間に信号が発生しており, 変状の影響が表現されている. 曲率変動の大きい Case 2 が全体に値は大きい, 信号の発生状況は良く一致している. これは損傷を単純な剛性変化として与えたことにもよるため, 今後詳細な検討も必要である. また Detail D_3 では, 剛性変化以外の影響もわずかに混入している.

次に信号の大きい Case 2 を例として, Detail D_1 の変化を変状パターン毎に求めた結果を図6に示す. なお, 剛性変化の期間の状況を見やすくするために, 横軸は $t=1\sim 2$ 年の期間のみを拡大して示している. 剛性変化のない P-0 の結果は省略したが, 信号は全く発生していない. 信号の発生状況は, 変状パターンにより大きく異なる. 剛性が低くなるほど曲率の変化は大きくなるため, 後半部分において得られる信号が大きくなっている. また, 階段状の変動パターンの P-4 では, 得られる信号が他のパターンより大きい.

最後に, 次式のように $D_j, j=1,2$ の元の波形 X に対するエ

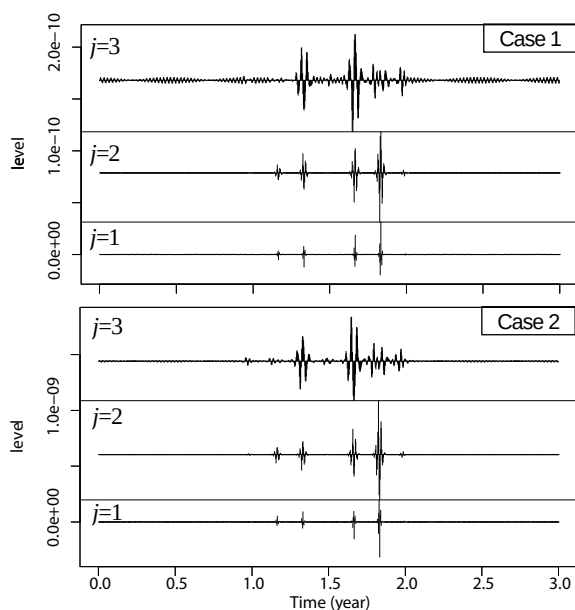


図5 二つの波形に対する $D_j, j=1\sim 3$ の比較

ネルギーの比を求め, 変状成分の占める割合を検討する.

$$\gamma = \sum_{j=1}^2 D_j^2 / X^2 \quad (2)$$

評価を行った各変状パターン, 評価点でのエネルギー比を表1に比較する. 剛性の変化量としては P-0 を除き全て等しいが, 変状パターンや損傷・計測位置により抽出される変動成分の割合は異なる. この値は変状検知の容易さの指標となるが, 階段状の変化である P-4 や後半部分の変化が大きい P-3 で得られた値は大きい. 実際の評価では, 変状の進展モデルを適切に設定する必要があることが分かる.

4. おわりに

本報では, 温度変化による構造物の変形に着目し, 劣化損傷を組み込んだ構造応答評価とウェーブレット変換による変状評価を用いた評価手法を提案した. 極めて単純なモデルによる評価結果の範囲ではあるが, 劣化, 損傷が構造性能に与える影響の把握, 応答の計測結果からの変状発生検知が可能であることを示した. 変状の進展状況が検知性能に与える影響は大きく, 実現象に適応した損傷モデルの検討が今後の課題である. また, 評価対象モデルの見直し, ウェーブレット解析の高度化, 実環境でのノイズ処理等の検討を継続して行っていく予定である.

参考文献

- 1) 小林他, 鋼床版箱桁梁の温度変形挙動を利用した健全性評価モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, 2006.10.
- 2) D. B. Percival, et.al.: Wavelet Methods for Time Series Analysis, Cambridge Univ. Press, 2000.
- 3) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1998.1.

表1 変動成分($j=1,2$)の元波形に対する割合

	P-0	P-1	P-2	P-3	P-4
Case 1	0.E+00	6.5E-12	6.9E-12	8.9E-12	1.5E-07
Case 2	0.E+00	8.8E-13	1.0E-12	1.2E-12	2.1E-08

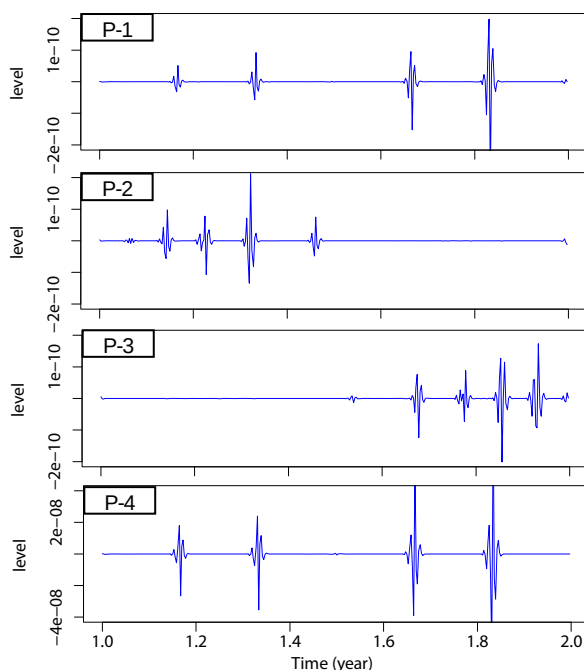


図6 変状パターンによる D_1 の経時変化の比較