局所的な損傷による温度変形分布の変化に着目した構造物の変状評価

清水建設(株) 正会員 ○稲田 裕

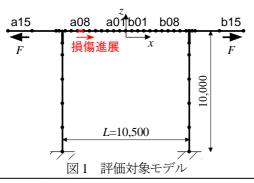
1. はじめに

社会インフラの長寿命化を図る動きの中で、構造物の性 能監視の手段として構造モニタリングの活用が期待される. その実現には計測データから性能変化や寿命を表す情報を 導き出すことが重要となるが, 損傷データの蓄積が不足し ていることや、環境/使用条件による変動性と損傷の識別 が難しいことなどの課題が残る. そこで本研究では、様々 な劣化/損傷を想定したデータを解析的に創出する仮想モ ニタリングの実現を図り、その変状を検知する手法の整備 を進めている. これまでの検討では、温度の季節変化に伴 う緩やかな変形に着目し、局所的な損傷として要素の剛性 低下を与えたときの曲率の時間波形についてウェーブレッ ト変換により変状を検知する手法を提案した1). その結果, 変状の検出は可能であるが得られる応答は小さく、損傷要 素以外での変状検知は容易でないこと、損傷範囲の応答に 与える影響が大きいこと等が分かった. 本検討では、曲率 の空間分布にウェーブレット変換を適用し、局所損傷の進 展が変形分布や検知性能に与える影響について考察する.

2. 対象モデルと評価手法

検討の対象として、RCラーメン橋脚の設計例 2 を参考に、図 1 に示す単純な 2 次元フレームモデルを作成した.そして上部構造の温度応力による水平力 $\pm F$ を両端の節点に加え、温度変形を求める.なお、橋脚の温度応力による変形は無視する.線膨張係数を $\alpha=10\times10^6$ とすると、温度変化 Δt による外力は $F=\alpha EA\Delta t$ となる.損傷は剛性低下率をk として、損傷要素の弾性係数をE'=(1-k)E として減少させる.

変状評価には離散ウェーブレット変換を用いる。図中の赤の要素の剛性がk=0.4と低下し、気温が15°C上昇した時の橋脚間の曲率分布は図2(a)の赤線のようになる。このモデルでは曲率変化は損傷を与えた要素に集中し、損傷位置以外での変状は小さい。次に、スケールをj=1,2,...,Jと順次倍にする多重解像度分解によって、曲率分布C(x)は次式のように詳細成分D(x)と残りの近似成分S(x)に分解できる3.



$$C(x) = \sum_{i=1}^{J} D_i(x) + S_I(x)$$

$$\tag{1}$$

曲率の局所的な変化を表す 1 次の詳細成分 $D_1(x)$ を図 2(b) に示す. 曲率変化が大きい位置で大きな値となるが、損傷範囲以外でも詳細成分の変化が見られる.

3. 損傷進展状況の影響評価

剛性変化を与える要素数を 2 個として剛性低下率を増加した場合と、剛性低下率を 0.4 として要素数を増加させた場合について、得られる詳細成分 $D_1'(x)$ の初期状態 $D_1(x)$ からの変化 $\Delta D_1(x)=D_1'(x)-D_1(x)$ を図 3 に示す。剛性変化率の増加に伴い変化量は全体的に増大する。一方、損傷範囲を拡大させると損傷の進展方向に詳細成分が大きくなる位置がシフトし、両ケースともに損傷の進展が検出される。

橋脚間全体(L)の詳細成分の強度変化 E_L と、健全部(BL)の変化 E_R が全体に占める割合 γ を次式のように定義する.

$$E_L = \sum_L \Delta D_1^2, \quad \gamma = E_{RL}/E_L \tag{2}$$

上の2ケースについて,図4に全体の強度変化を赤線で, 健全部の割合を青線で示す.なお,損傷範囲とそれに隣接

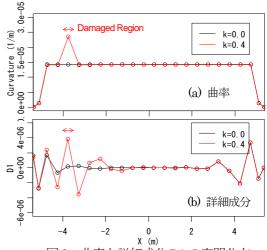
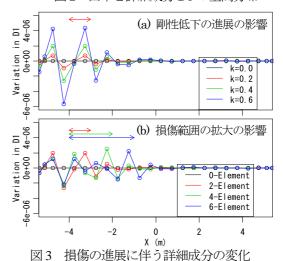


図2 曲率と詳細成分 D1 の空間分布



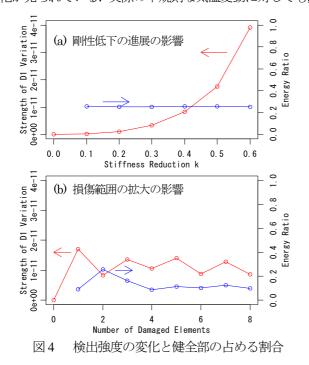
キーワード 変状評価, ウェーブレット解析, 構造モニタリング, 損傷検知 連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設 (株) 技術研究所 Tel 03-3820-8315

する要素を除いた範囲を健全部とした. 剛性低下率の増大 に伴う強度変化は大きく、健全部でも全体の 2 割程度の大 きさの変化が見られている. 一方、損傷要素数の増加が強 度に与える影響は小さく、剛性低下率が一定で損傷範囲が 拡大するときの変状の検出性能は高くはない.

4. 実際の運用に関する検討

実構造物への適用では、交通振動等の外乱や目射による温度の分布の影響等を排除する必要があり、各日の夜間に計測することが考えられる.そこで図4(a)に示す各日4時に計測された3年間の気温データを用い、実際の運用時の適用性の検討を行う。そして鉄筋の腐食のような劣化進展を想定し、図6に示すように時間に伴い剛性の低下が進展し、同時にその範囲が拡がる損傷モデルを与えた.1年後から剛性低下を生じる要素 a08 について損傷の有無による曲率変動波形を図5(b)に比較する。図中の赤線の損傷がある結果では、評価期間の後半になってようやく健全状態からの曲率の変動振幅の増大が確認できるが、気温の変動の影響が大きく、波形から直接的に変状を見いだすことは難しい。

日々の曲率計測から得られる詳細成分の空間分布 $D_I(x)$ と 曲率分布C(x)の比 $D_I(x)/C(x)$ を検出率と定義し、初期状態からの検出率の変化をコンターで表した結果を図 7 に示す. 検出率は剛性分布に変化が無い場合は温度に拘わらず等しくなるため、気温の影響を排除して剛性変化による変状の大きさを表すことができる. 図中赤線に囲まれる領域が損傷範囲を示すが、時間の経過とともに検出率の変化量が増加し、変動範囲も拡大しており、損傷の発生とその範囲を的確に表している. また、曲率の変化が損傷部に集中したため周辺での変化は小さいが、健全部における検出率にも変化が見られている. 実際の不規則な気温変動に対しても、



変形の分布変化の監視により局所的な損傷の影響を検出できることが分かった.

5. おわりに

本報では、温度変化による構造物の変形の空間分布に着目し、損傷を付与した仮想モニタリングとウェーブレット変換による変状検知を組み合わせた評価手法を提案した。単純なモデルによる評価ではあるが、局所損傷が応答特性に与える影響が把握できること、曲率分布の計測により変状発生と進展の検出が可能であることを示した。今後は、実際の損傷を表現しうる構造解析手法の改良、ウェーブレット解析の高度化等を継続して行っていく予定である。

参考文献

- 1) 稲田: 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, 土木学会年次講演会, I-583, pp.1075-1076, 2010.9.
- 2) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1998.1.
- D. B. Percival, et.al.: Wavelet Methods for Time Series Analysis, Cambridge Univ. Press, 2000.

