

## 橋梁ヘルスマモニタリングのための加速度応答に基づく減衰評価方法の検討

山梨大学大学院 ○正会員 竹谷 晃一, 山梨大学 非会員 小野 拓朗  
株式会社TTES 正会員 梅川 雄太郎, 東京工業大学 正会員 佐々木 栄一

### 1. はじめに

橋梁の戦略的な維持管理が求められている今日、その実現には橋梁の状態を定量的かつ効率的に把握する方法の確立が不可欠である。その方法のひとつとして加速度センサ等を用いて橋梁の構造応答を長期的に把握する橋梁ヘルスマモニタリング (BHM) がある。

BHMでは振動等の構造応答から構造パラメータの逆解析を行い、主に固有振動数や減衰比、振動モード形などを同定している。その中でも構造物の減衰を評価することは構造物を管理する上で重要である。しかし橋梁の場合、加速度から逆解析で求める減衰は摩擦等に起因する変位依存性があるほか、重量車両のダンパーによる減衰や空力減衰等が複雑に影響している。そのため、データ選択や分析方法によって減衰比がばらつくため定量的な評価が困難であった。

一方、いわゆるIoTのようなBHMでは、センサが取得した時系列データを無線で中継機に収集することが多いが、時系列データの解釈が難しいことや、データ量が多いため送信時間や電力消費などの課題も多い。そこで、時系列データを準リアルタイムに処理することで、データの解釈を容易にして定量的評価に役立つほか、データ容量の削減と省電力化が可能となる。

本研究では、外的要因によって変動する橋梁の減衰比を適切に評価し、実用的なヘルスマモニタリングを提案するため、分析方法の検討を行った。減衰比の分析には、計算処理が比較的軽いRD法<sup>1)</sup>を用いて減衰比の収束条件・評価方法について検討を行った。

### 2. RD法と対象橋梁の概要

#### (a) RD法の概要

RD法<sup>1)</sup>による減衰推定手順は以下の通りである。

- 1) 対象振動数の波形をフィルタリングで抽出
- 2) 対象データを時間窓で区切り平均化
- 3) 自由減衰波形の対数近似から減衰比を算出

RD法は計算が簡便で軽い一方、同定される減衰比がフィルターの設計値や対象データの選択、窓長に依存

すると考えられ、結果の収束条件の検討が必要である。

#### (b) 対象橋梁の概要

対象橋梁は2径間連続鋼床版箱桁中路式であり、片側1車線の対面交通、交通量は毎時300~600台である。図-1(a)(b)に対象橋梁の概略図、図-1(c)に3軸MEMS式加速度センサの設置位置を示す。使用したMEMS式加速度センサはEPSON製M-A351である。

図-2(a)は大型車が単独で走行した支間中央(N-3地点)の加速度波形、図-2(b)は3時間分のパワースペクトル密度(PSD)である。車両通行時の加速度レベルは数十~数百 $\text{mm/s}^2$ 程度であった。PSDの0.3Hz付近のピークは車両通行によるたわみ成分である。図-3はS-3、S-7、N-3、N-7の鉛直(Z)方向加速度から算出したPSDである。3.8Hz、5.0Hz、5.6Hz、6.8Hzにピークがあり対象橋梁の固有振動数と考えられる。不定外力下でのモード形状分析法<sup>2)</sup>で得られた結果より、ここでは1次鉛直振動モードである3.8Hzに着目し、S-7地点のデータを用いて減衰比評価方法の検討を行った。

### 3. 減衰比評価方法の検討

減衰比の同定に必要な窓長とデータ点数の検討を行った。検討した窓長は5、10、15、20波形分の4パターンである(以下、窓長5、10、15、20と呼ぶ)。窓長が短いと対数近似の点数は少なくなるが、重ね合わせ数を増やすことができる。図-4は窓長5、10の対数近似の一例

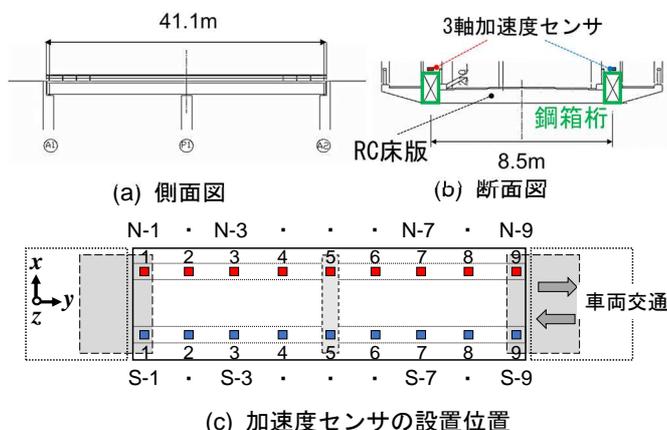


図-1 対象橋梁の概略図とセンサの設置位置

キーワード 橋梁振動, 加速度応答, 減衰比, RD法, 実橋梁  
連絡先 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11 山梨大学工学部

TEL : 055-220-8519 E-mail : ktakeya@yamanashi.ac.jp

であり、図-5はデータ長( $n=100$ 秒,  $300$ 秒, ...  $19800$ 秒)に  
対象振動数[Hz]を掛けて正規化したデータ長と対数近  
似の決定係数 $R^2$ の関係を表している。灰色の線( $m=1,$   
 $2, \dots, 11$ )は異なる時刻データでの結果を示しており、  
データ選択による分析結果の分散を考慮している。

窓長5では決定係数が0.8前後で収束するが、窓長10  
は決定係数が0.95前後になり近似精度が高い。図-6は  
データ数と減衰比の関係を示しており、灰色の線が異  
なる時刻データ $m$ での減衰比 $\zeta(n, m)$ 、黒点がデータ数 $n$   
毎の平均減衰比 $\bar{\zeta}(n)$ 、赤線が全体の平均減衰比 $\bar{\zeta}_{all}$ であ  
り、 $n$ が十分大きいとき $\bar{\zeta}_{all}$ を減衰比の収束値 $\bar{\zeta}^*$ として  
いる。ここで提案する平均減衰比は以下の式で与えら  
れる決定係数 $R^2$ を重みとした重み付き平均である。

$$\bar{\zeta}_{all} = \frac{\sum_n \sum_m R^2(n, m) \zeta(n, m)}{\sum_n \sum_m R^2(n, m)} \rightarrow \bar{\zeta}^* \quad (1)$$

窓長が15, 20と大きくなるほど決定係数は1に近づ  
くが、重ね合わせ数が減るため減衰比の収束が鈍くな  
る。以上の検討の結果、最適な窓長は10程度、必要な  
正規化データ長は40000以上(3.8Hzで約3時間分)であ  
る。RD法を用いた減衰比の推定結果を表-1に示す。

4. まとめ

本研究ではBHMのための減衰比評価に着目し、対象  
橋梁の加速度からRD法を用いて減衰比を算出して分  
析方法を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 窓長とデータ長を検討した結果、窓長約10、正規  
化データ長40k以上が最適であることを示した。
- 2) 決定係数で重み付け平均した減衰比の評価方法  
を提案し、実橋梁実験から、データ選択に依存せ  
ずに自動で減衰比を算出できることを示した。

本研究では特に減衰比に着目してその分析方法を  
検討したが、計算過程で固有振動数や振動モード形を  
算出しているため、今後これらのパラメータを含めて  
総合的に評価する方法についても検討を行っていく。

5. 謝辞

本研究は鋼橋技術研究会「センシング技術を用いた  
構造評価に関する研究部会」(部会長: 東京大学長山智

則准教授)における検討の成果を一部活用させて頂い  
ております。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

[1] 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD法による構造物のランダム  
振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.454,  
pp.29-38, 1993.  
[2] 竹谷晃一, 佐々木栄一, 岩吹啓史, 長船寿一, 洞宏一, 名児耶武:  
橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの開発と実橋梁  
への適用, 土木学会論文集A1, Vol.72, No.2, pp.290-301, 2016.

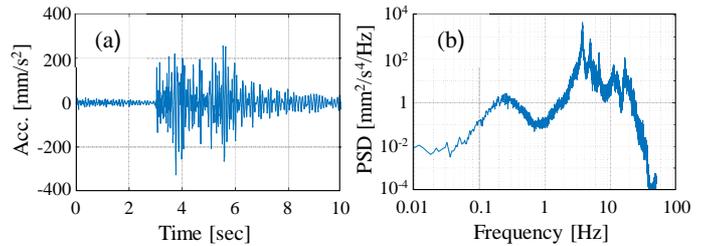


図-2 (a)加速度の時刻歴波形と(b)パワースペクトル密度

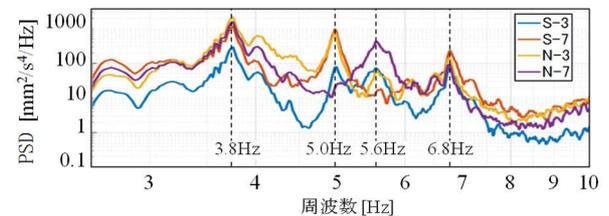


図-3 支間中央部の鉛直加速度のパワースペクトル密度

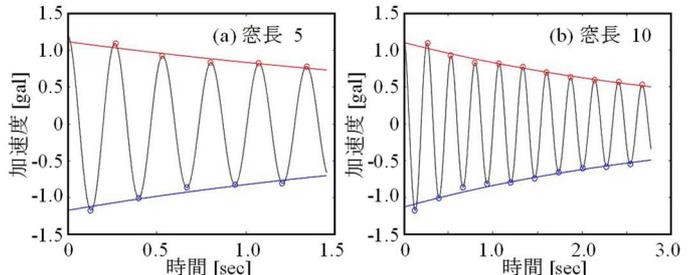


図-4 RD法による自由減衰波形と対数近似曲線の一例

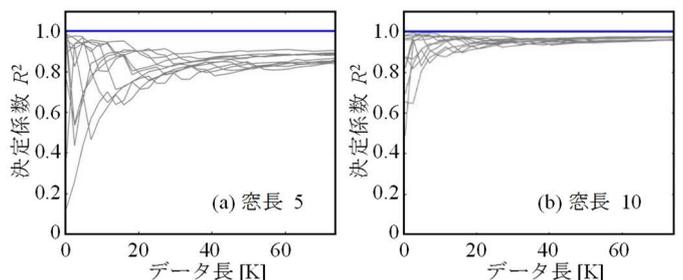


図-5 対数近似曲線の決定係数 $R^2$ とデータ長の関係

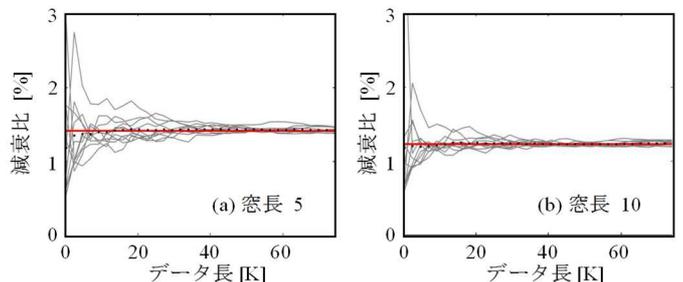


図-6 減衰比とデータ長の関係

表-1 RD法を用いた減衰比の推定結果

	N-3	N-7	S-3	S-7	平均
3.74 Hz	1.228%	1.269%	1.288%	1.230%	1.254%
6.74 Hz	1.306%	1.348%	1.332%	1.258%	1.311%