

鋼ニールセンアーチ人道橋における振動特性の同定とより簡易な測定手法の検討

東京理科大学大学院 学生員 ○八幡 太一
 東京理科大学理工学部 非会員 木村 公亮
 東京理科大学理工学部 フェロー 木村 吉郎

1. はじめに

橋梁の維持管理の重要性が増している¹⁾。橋梁に損傷等の異常が発生した場合、振動特性に変化が生じる場合がある。そのため、橋梁の振動特性を精度良く知ることができれば、維持管理に活用できる可能性がある。

本研究では、振動測定の際に従来の加速度センサーに加えて、米アップル社の携帯情報端末「iPod touch」を用いることも試みた。iPod touch は加速度計を有し、容易な振動計測が出来る可能性がある。

2. 対象橋梁

本研究の対象としたのは、図-1に示すような、利根運河に架かる千葉県野田市の「ふれあい橋」である。この橋梁はスパン90mの鋼ニールセンアーチ形式の人道橋である。



図-1 ふれあい橋



図-2 iPod touch

3. iPod touch について

本研究で用いたのは、米アップル社から2010年に発売された第4世代 iPod touch である。この

iPod touch は、図-2に示すように三軸の加速度を測定することが可能である。この携帯情報端末は、101gと比較的軽量であり、外部電源も必要とせず、データも内部メモリへ直接保存できるため、手軽に振動測定を行うことができる。

4. 小型加速度センサーと iPod touch の計測データの比較

iPod touch の振動測定の精度を確認するために、一般的な加速度センサーと計測結果を比較した。本研究では、共和電業製のひずみゲージ式加速度センサー「AS-2GB」を使用した。図-3に、測定結果の一例を示す。赤色の波形が加速度センサー、青色が iPod touch による測定結果である。測定は、地覆上に iPod touch を置き、その上に加速度センサーを固定して行った。この図から、低い振動数に関しては、比較的精度は高いと判断できる。両計測結果の相関係数を表-1に示す。

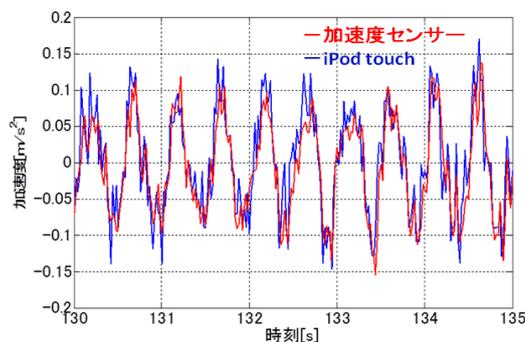


図-3 測定結果の比較

表-1 相関係数

		ローパスフィルタ		
生データ		15Hz	10Hz	5Hz
相関係数R	0.9127	0.9369	0.9687	0.9752

生データの相関係数でも0.9127と、相関は比較的高かった。これらの波形に、cut off 周波数を変えたいくつかのローパスフィルタをかけ、同様に相関係数を求めた結果も、表-1に合わせて示す。cut off 周

キーワード 橋梁振動モニタリング, iPod touch, スペクトル解析, RD法, 固有値解析

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科橋梁研究室 E-mail:kchiro@rs.tus.ac.jp

波数を小さくするほど相関係数は高くなり、図-3より目視できる判断を支持している。

5. 固有値振動数, 固有振動モード形の同定

固有振動数, 固有振動モード形の同定は, 実測値と固有値解析結果の比較によって行った。固有値解析には株式会社ソフトウェアセンターの三次元解析ソフト「SAP IV」を用いた。

図-4に常時微動の測定結果の一例と, そのフーリエスペクトルの絶対値を示す。固有振動数は, 一般に得られたスペクトルのピークに対応すると考えられる。しかし, 図-4から分かるように近接するピークが多く, 一意に判断することが困難であった。そのため, 固有値解析結果と比較し, 固有振動数を同定した。その結果を表-2に示す。解析値に対して, 比較的值に近いものをピックアップし, これを実測による固有振動数とした。

次に, 実測と解析の対応をより詳細に調べるために, 固有モード形を比較した。図-5に, 固有値解析で得たモード形を示す。今回は2次モードを例に, 固有振動数, 固有モード形の同定過程を示す。図-5から, 対象橋梁の2次モード形は桁部分の腹が2つとなった。この結果を基に, 3点同時測定を行った。測定地点は, 図-5に示す青, 赤, 緑の3点である。測定結果を図-6に示す。図-6(a)が, 測定結果の生データである。各波形の色が, 各測定地点と対応している。多数の振動成分を含んでおり, この結果だけではモード形を特定することができない。そこで, このデータにバンドパスフィルタを適用し, 特定の振動数成分のみに着目した。2次モードの実測における固有振動数は, 表-2から1.48Hzと分かる。1.47~1.52Hzでバンドパスフィルタを各波形に適用させると, 図-6(b)のようになった。青, 緑の波形が同振幅逆位相となり, 赤の波形は多少振動しているものの振幅0に近い結果となった。この結果は, 図-5における解析によるモード形の特徴と一致している。これより, 実測における2次モードの固有振動数は1.48Hz, 固有振動モード形は腹2つの逆対称モード形だと判断することができる。

6. 減衰定数の同定

減衰定数は, 条件によって値が変化しやすく, 同定が困難である場合が多い。これまで多くの減衰定数を同定する手法が提案されてきているが, 本研究

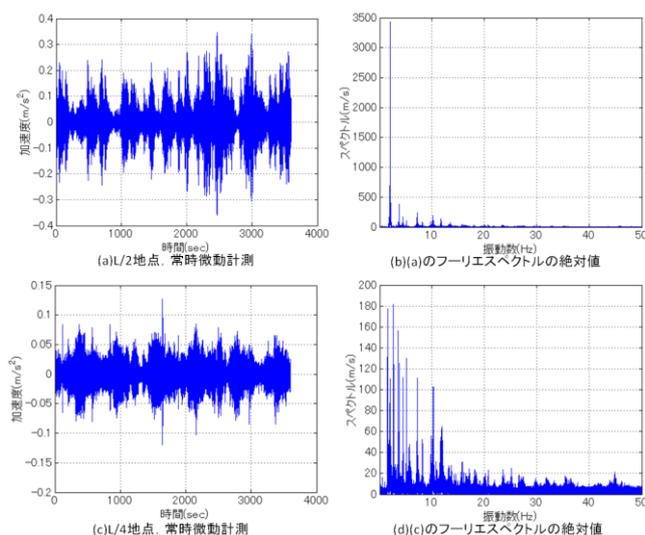


図-4 測定結果の一例

表-2 固有振動数の比較

振動次数	実測値[Hz]	解析値[Hz]
1次	0.947	1.085
2次	1.48	1.658
3次	2.00	1.968
4次	2.65	2.473
5次	3.19	2.985

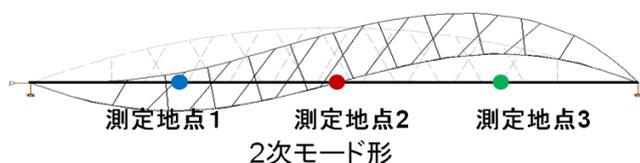


図-5 固有値解析によるモード形と測定地点

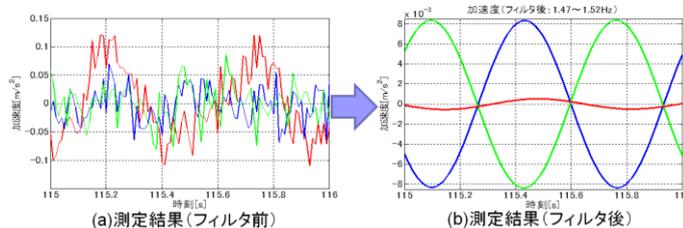


図-6 3点同時測定結果とフィルタ処理

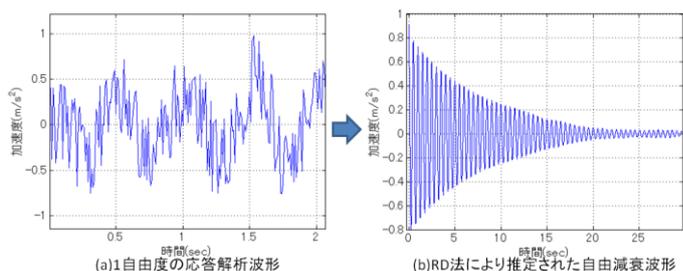


図-7 応答解析とRD法

ではRD法²⁾を採用した。採用理由は、本研究における振動測定は常時微動計測が主なためである。

ここでRD法について簡単に述べる。常時微動計測で得られたデータには自由振動成分と強制振動成分が含まれている。外力がランダムだとすると、強制振動成分の期待値は0となる。この仮定を基に、常時微動波形を数多く重ね合わせることで、強制振動成分が0に近づき、自由振動成分のみが残る。つまり、常時微動計測から自由減衰振動を推定することができる。

RD法の精度を検証するため、1自由度系を数値的に解析して得られる加速度波形にRD法を適用した。応答解析の条件は、固有振動数2Hz、減衰定数1%、外力はランダム外力とした。図-7(a)が応答解析波形で、(b)がRD法によって推定された減衰自由振動波形である。RD法の基準とする振幅 a_0 は 0.5 m/s^2 から 1.6 m/s^2 まで 0.1 m/s^2 刻みでとり、 t は30秒とした。ランダム外力を変えて解析を繰り返し、計5ケース行った。

各 a_0 に基づいて得られる減衰定数の平均値を、そのケースの減衰定数とした。減衰定数を求める際に使用するピークは、図-8における頂点を左から数えて2点目から20点、25点と、1点目から21点、26点とした。これは、最初の1点が極端に大きな値を示しているためである。結果を図-9に示す。各結果は真値に近い値を示しているものの、ケースごとにバラつきが大きい。また最初の1点を使用した場合、減衰定数は大きくなる傾向があった。そこで、有意水準5%の区間推定を行い、結果の評価を行った。区間推定の結果を、表-3に示す。全ての結果において、真値1%を区間内に含む結果となった。また、最初の1点を含むケースでは、値が大きくなっている。区間中央値が最も真値に近いのは25点のケース、区間幅最も狭いのは20点のケースであった。ただし、20点と25点の区間中央値に大きな差はない。よって、本研究では対数減衰率によって減衰定数を求める場合、20点平均を採用することとした。

図-10に、常時微動計測結果の一例とそれにRD法を適用した結果を示す。測定地点はL/2地点で、計測時間は1時間である。同様の測定を10回行った。RD法は a_0 を $0.01 \text{ m/s}^2 \sim 0.20 \text{ m/s}^2$ 、 t を30秒とした。結果を、図-11に示す。減衰定数の平均値は、0.469%

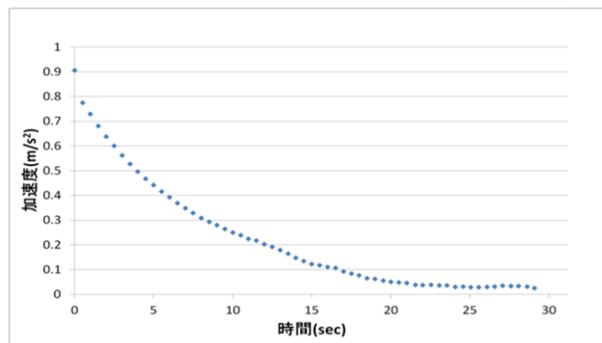


図-8 自由減衰波形から抽出した極大値(ピーク)

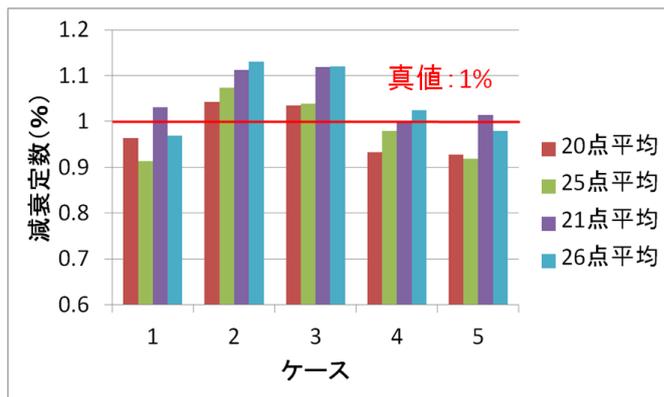


図-9 減衰定数の比較

表-3 減衰定数の区間推定

	区間下	区間上	区間幅
20点平均	0.918398	1.041143	0.122745
25点平均	0.905194	1.063386	0.158192
21点平均	0.99189	1.117688	0.125798
26点平均	0.959726	1.129021	0.169295

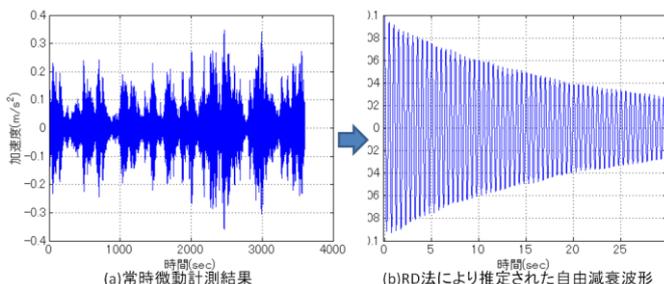


図-10 常時微動計測記録とRD法

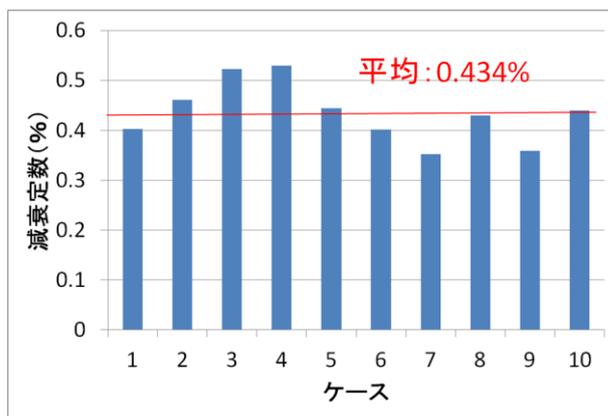


図-11 各ケースの減衰定数

であったものの、結果にケースごとのバラつきが大きくなった。応答解析と同様に区間推定を行ったところ、信頼区間は0.423~0.514%となった。

図-4 から、L/2 地点に比べて L/4 地点のスペクトルは近接ピークが多数存在することが分かる。そのため、L/4 地点の RD 法波形は複数のモードが重ね合わさった自由減衰波形となる。各モードの減衰定数を求めるために、常時微動波形に各固有振動数でバンドパスフィルタをかけ、RD 法を適用させた。しかし、バンドパスフィルタを使用すると、RD 法の結果にうなりが発生し、減衰定数算出が困難となった。そこで、バンドパスフィルタを用いずに、RD の結果に最も良く適合するような振動数の自由減衰波形を同定することを試みた。自由減衰波形に用いる振動数の初期値は、RD 法の結果のスペクトルのピーク値を用いた。自由減衰波形は式(1)で表される。

$$y(t) = C e^{-h(\omega t)} \cos(\omega \sqrt{1-h^2} t) \cdots (1)$$

ここで C が振幅、h が減衰定数、 ω が固有角振動数、t が時間である。振幅 C、減衰定数 h、固有各振動数 ω を、Excel のソルバー機能を用いて、残差の二乗和が最小となるように決定した。同定した自由減衰波形の一例を図-12 に示す。図-12(a)は、振動数 1.996Hz で同定を行い、減衰定数は 0.36% となった。

図-12(b)は振動数 2.64Hz、8.13Hz、13.07Hz で同定を行い、減衰定数はそれぞれ 0.78%、0.30%、64.6% となった。図-12(a)は(b)に比べて、近似がよくできていることが読み取れる。図-12(a)と同じケースで対数減衰率から算出した減衰定数は 0.38% であった。これより、自由減衰波形の近似による減衰定数の推定は可能であると考えられる。

7. まとめ

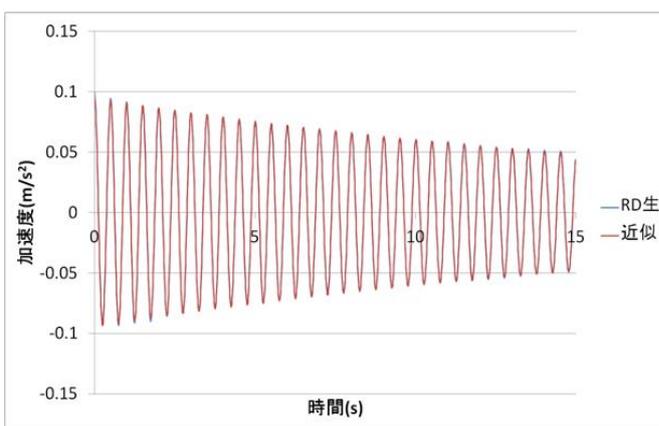
本研究では、加速度センサーと iPod touch を用いて橋梁の振動測定を行った。そして、得られたデータから、橋梁の動的特性の同定を試みた。

加速度センサーと iPod touch の計測結果の比較から、5Hz 程度の低振動数成分については、iPod touch でもある程度の精度で計測できると考えられた。

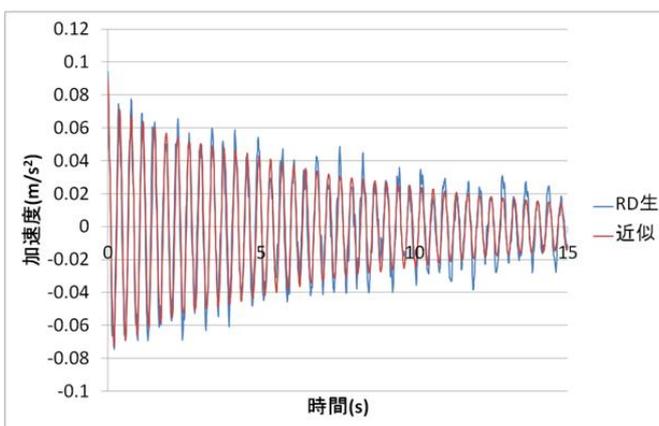
固有振動数、固有振動モード形は実測値と解析値を比較することで、同定することができた。減衰定数は、RD 法によって推定された減衰自由振動波形から同定を行った。基準振幅の異なる波形から得られる減衰定数と、減衰波形を同定して得られる減衰定数は L/2 地点のデータについてはほぼ一致した。しかし、L/4 地点のデータでは複数モードが混在するためか、同定もあまり良くなく、さらに検討が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，2001年2月
- 2) 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，第454号，1993年12月



(a)L/2地点



(b)L/4地点

図-12 自由減衰波形による近似の一例