

既設長大橋の常時微動測定における全体構造診断評価

Diagnostic Method for Soundness of Entire Structure of Conventional
Long-Span Bridge by Ambient Vibration Measurement

北海道開発局 開発土木研究所	正員 三田村 浩 (Hiroshi Mitamura)
北海道開発局 開発土木研究所	正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)
北海道開発コンサルタント (株)	○正員 菅原 登志也 (Toshiya Sugawara)
計測技販 (株)	正員 後藤 雪夫 (Yukio Goto)

1. はじめに

橋梁構造物を長期にわたって有効に活用するためには、点検により早期に異常を発見して適切に補修・補強を行うとともに、継続的に橋梁の健全度を把握していくことが重要である。長支間を有する橋梁については、点検項目が多岐にわたることや点検箇所が膨大となることから合理的な点検が行われていないのが実状であり、点検結果からは健全度を評価することも困難と考えられる。

このような観点から、本研究では長大橋の合理的な維持管理手法を確立することを目的として、橋梁の常時微動を定期的に測定し、その結果得られた振動数やモード特性等からのRD解析において、現状橋梁の健全度を評価するシステムについて検討を行った。本論文は、石狩河口橋、白鳥大橋、神納橋について常時微動測定を実施し、RD法を適用した減衰率の評価についてその根拠を報告するものである。

2. RD法の概要

RD法は、航空宇宙工学の分野において提案されている手法であり、ランダムな時系列波形から、そのピークを始点とした一定時間の波形を重ね合わせることでランダム成分を相殺し、減衰自由振動のみを抽出する手法である。つまり、常時微動や風応答波形があれば、容易にかつ精度良く地上構造物の減衰定数を評価することが可能となる。また、時系列波形が必ずしも連続したものである必要がないという利点も兼ね添えている¹⁾。図-1にRD法の概念図を示す。

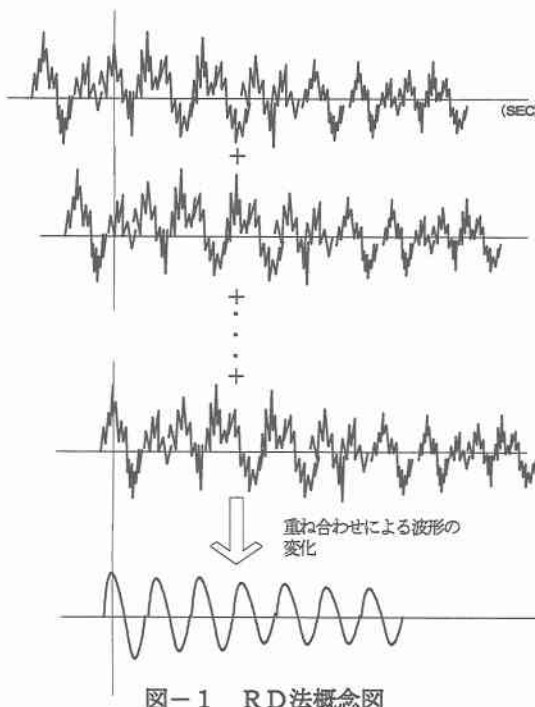


図-1 RD法概念図

3. データ整理の概要

3-1 固有振動数、固有振動モードの特定

- 1) 収録された全加速度波形のうち、ある秒数に関してFFT処理を施してフーリエスペクトルを求める。
- 2) 主要な点に関するフーリエスペクトルから低次固有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。
- 3) 前述のフーリエスペクトル図、及び位相スペクトルより、着目している固有振動数における各測点のフーリエスペクトル値、位相スペクトル値を求める。
- 4) 時間軸を統一し、かつ最大振幅で正規化した状態で、1/4振幅ごとの時間における各点の振幅を各測点にプロットする。
- 5) 各時間におけるモード分布の節や腹が橋軸方向に変化していないことを確認し、固有振動モードを決定する。

3-2 RD法による減衰定数の算出

減衰定数を簡易的な手法によって決定するために、常時微動測定によって得られた加速度波形にRD法を適用し、S/N比を向上させ減衰自由振動曲線を求めて評価することを試みた。RD法は固有振動数の極大値と見られる点を始点とした一定秒数の波形を、1ピークずつ移動させながら重複させて重ね合わせることにより行った。減衰定数は、RD法により得られた減衰自由振動波形の極大値と極小値のそれぞれについて最小二乗法を用いて、次式の指数関数に近似し算出した。(極小値については絶対値を用いて近似することとした)

$$y = A \cdot \exp(-h\omega t)$$

ここで、A: 振幅, h: 減衰定数, ω : 角速度, t: 時間であり、減衰定数 h は対数減衰率 $\delta = 2\pi h$ で表される定数である。

4. 石狩河口橋における検討

4-1 橋梁緒元

路線: 一般国道231号
橋長: 1412,700m (中央径間: 288m)
幅員: 10.5m
形式: 3径間連続鋼床版斜張橋

4-2 常時微動観測の概要

石狩河口橋は一般国道231号の一端をなし、留萌から札幌に至る幹線であることより、交通量が多く通行止めが不可能であったことから、片側交互通行状態で常時微動観測を行った。そのため、車両通行の途切れた30秒間のみの測定を数回実施することとした。測定回数は計7回である。なお、データのサンプリング間隔は5msecである。図-2に計測器取付位置図、図-3に中央径間における加速度波形の一例を示す。

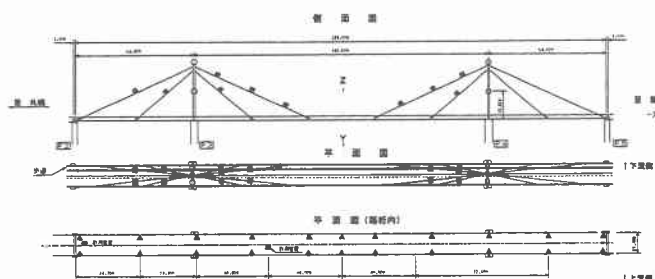


図-2 計器取付位置

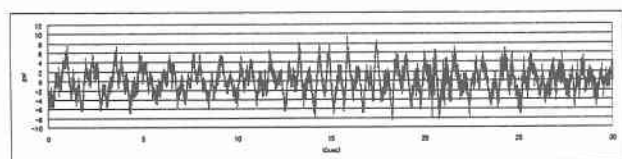


図-3 常時微動加速度波形

4-3 低次固有振動数の抽出

低次固有振動数を抽出するために、対称振動が最も卓越すると考えられる中央径間中央部の鉛直成分に関してフーリエスペクトルを求めることとした。図-4に結果の一例を示す。対称成分の低次固有振動数は、最低次より 0.73Hz, 1.93Hz, 3.2Hz であると推察される。これらの固有振動数のうち 1.93Hz のモード形状図を示す。図より、節と腹の位置が明確であり、これは鉛直対称 2 次モードであると特定した。

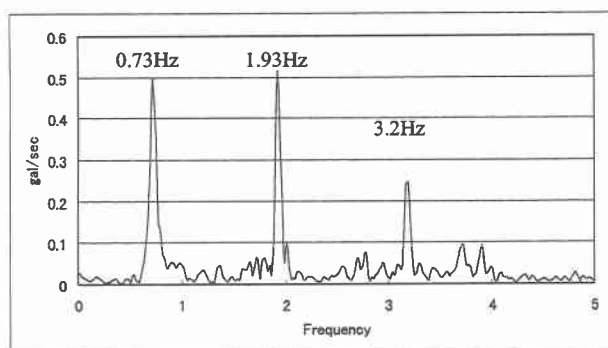


図-4 加速度波形のフーリエスペクトル

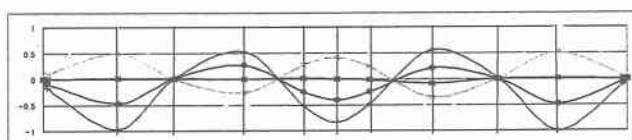


図-5 鉛直対称 2 次モード分布図

4-4 振動波形の前処理

着目している振動数成分を効率よく抽出するためと R D 法の処理回数を少なくするためには、高次振動数成分を前もってできるだけ除去しておくことが望ましい。

処理方法として、矩形移動平均法と Hanning ウィンドを比較検討した結果、ノイズ除去効果の高かった移動平均法 ($T_w=40\text{msec}$) を採用し波形の平滑化処理を施すことにした。図-6に処理後の波形を示した。

4-5 R D法による減衰定数の決定

図-7は、1.93Hz の解析波形から得られる固有振動

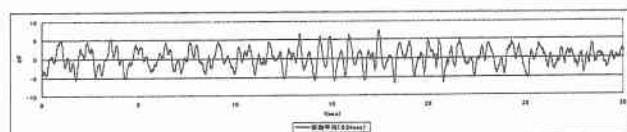


図-6 加速度波形の平滑化処理

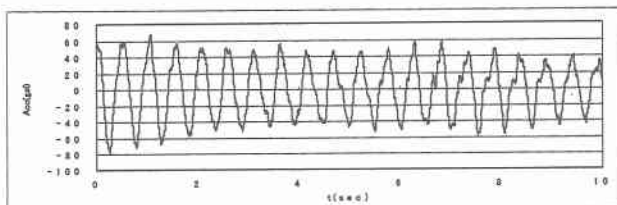


図-7 1 回の測定データを用いた R D 法による波形

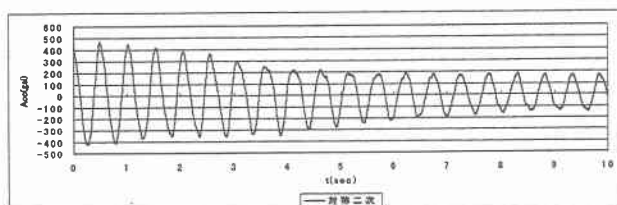


図-8 7 回の波形を重ね合わせた R D 法による波形

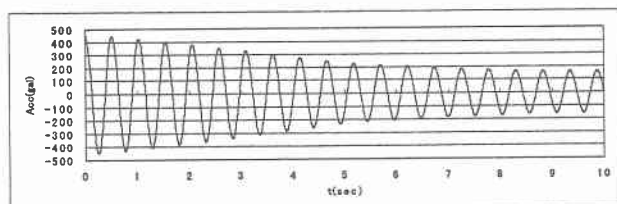


図-9 R D 法による波形 (バンドパスフィルタ後)

成分に着目し、1 回の測定データより R D 法を適用した場合の波形分布を示している。また、低次固有振動数成分の影響を断ち切るために、ハイパスフィルタ処理 (1.5Hz) を行った再構成波形を用いた。

図より、一回の測定時間が 30sec と短いことより、必ずしも全て平滑化された波形となっていないことがわかる。これはデータ量の不足によるものと推察し、本解析では、この不足を補うために R D 法処理後の 7 回の波形を全て重ね合わせて評価することとした。その結果を図-8 に示す。ここで、求められた波形の極大値と極小値から、減衰定数の算出すると、1.93Hz の減衰率としては 0.063 が得られた。

4-6 バンドパスフィルタを用いた場合の R D 法による減衰定数の算定

R D 法を行う前処理として、バンドパスフィルタを用いた各固有振動数成分ごとの波形を取り出すことにより、減衰定数の算定にどのような結果がもたらされるか検討を行った。バンド幅は、図-4 のフーリエスペクトルより 1.5Hz から 2.5Hz と設定した。ここで、以上のようにしてバンドパスフィルタ処理が行われた波形について、前節と同様な方法を用いて R D 法を適用し減衰定数を算出した。図-9には、前節の図-8に対応したバンドパス処理後の R D 法による重ね合わせ波形を示す。図より、対象とする固有振動数域に波形を絞ったことにより、図-8に表される重ね合わせ波形よりも滑らかな減衰自由振動波形が得られている。この自由減衰振動波形から減衰率を算出した結果 0.064 を得た。この減衰率は、前節で得られた 0.063 とほぼ同等の値であり、バンドパスフ

フィルタ処理を行うことによって、RD法における重ね合わせ回数の低減が期待できると推察される。

5. 白鳥大橋における検討

5-1 橋梁緒元

路線：一般国道37号

橋長：1,380m

幅員：14.25m

形式：3径間2ヒンジ補剛吊橋

5-2 常時微動観測の概要

本橋の風による振動特性を評価するため、補剛桁にセンサーを密に配置して常時微動測定を実施した。センサーは鉛直成分観測時のため中央径間に、構造系や振動モードの対称性を考慮して祝津側の半スパンにのみ配置している。図-10に加速度計配置位置を示している。なお、測定時におけるサンプリング間隔は10msecであり、風速は鉛直方向成分測定時が13~15m/sec程度のある30分間のデータを用意した。

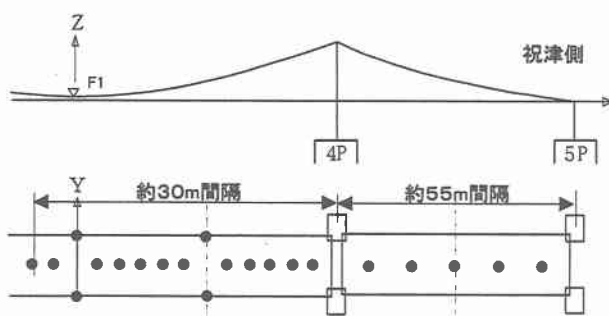


図-10 計器取付位置

5-3 固有振動モード図の作成

図-11は、鉛直成分測定時における中央径間1/4点のフーリエスペクトル図である。本研究では低次固有振動数のみ着目していることより1.5Hz以下の卓越振動数のみを抽出し、その振動数を求めることとした。

図-12は、図-11のフーリエスペクトル図を基にして算定した0.153Hzの鉛直逆対称モード分布図である。

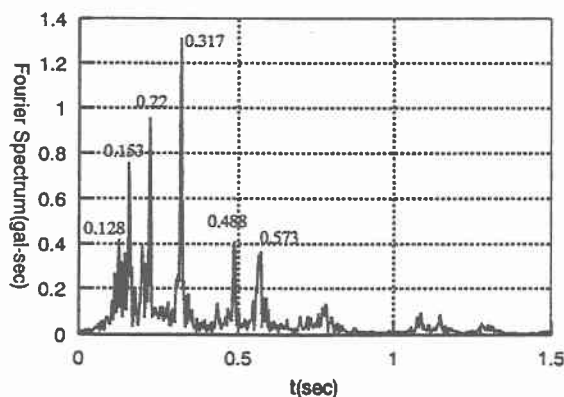


図-11 加速度波形のフーリエスペクトル

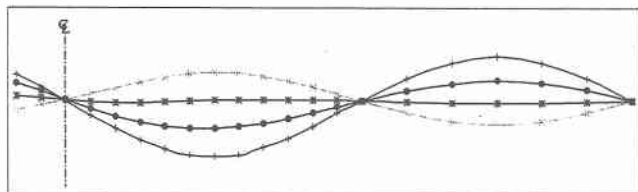


図-12 逆対称1次モード分布図

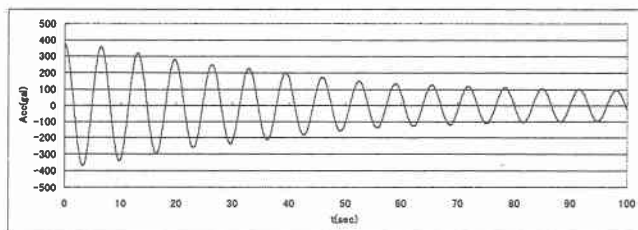


図-13 RD法による波形（バンドパスフィルタ後）

5-4 RD法による減衰定数の決定

4-3で求められた鉛直逆対称モードについてRD法により減衰定数を求めた。ここで、加速度波形にRD法を適用する前にバンドパスフィルタ処理を施して波形を再構成することにより、ある固有振動数域に限定した減衰振動を得られるようにした。ここでは、鉛直逆対称モードに着目し、バンドパスフィルタ域は0.14Hzから0.18Hzとした。データは30minを6分割した300secごとにバンドパスフィルタ処理を行うこととし、それぞれにRD法を適用した後、最終的にそれらを重ね合わせた波形から減衰定数を求めることとした。なお、データ間隔は100secとした。図-13は、0.153HzのRD法による重ね合わせ波形である。図より、ここで求められた波形では初期の減衰が大きく、その後は緩やかな減衰へと推移している。そこで、0~100sec、0~50sec、50~100secのような時間ごとに減衰率を算出した結果、それぞれ、0.099、0.119、0.058となった。しかしながら、区間を分割することによって得られる減衰率は変化しており、どの区間の減衰定数を評価するべきかの判断は難易であるため、さらなる検討が必要であるものと判断される。

6. 神納橋における検討

6-1 橋梁緒元

路線：一般道道旭川深川線

橋長：160.8m

幅員：有効幅員6.0m

形式：2径間連続鋼斜張橋

6-2 常時微動観測の概要

センサーの配置は、補剛桁の減衰率計測に主眼を置いたことから、補剛桁のみに計測センサーを設置することとし、本橋の構造が主塔を挟み対象であるため、旭川側の半断面に集中してセンサーを配置した。総チャンネル数は14chであり、これらのデータは10msecのサンプリング間隔でメモリ/アナライザに一括収録した。なお、常時微動測定は、一般車両の少ないことが必要であるため夜間に実施することとした。

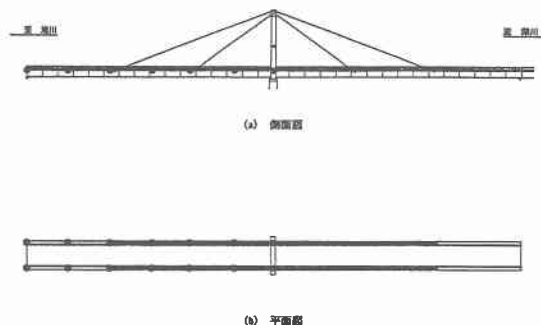


図-14 計器取付位置図

6-3 固有振動モード図の作成

図-15は、鉛直成分測定時における上段ケーブル取付部のフーリエスペクトル図である。これより低次固有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。図-16は、図-15のフーリエスペクトル図を基にして算定した0.82Hzの鉛直モード分布図である。

6-4 RD法による減衰定数の決定

ここでは、6-3で求めた0.82Hzの固有振動数についてRD法を適用した。低次振動数の場合は、連続したデータで十分な重ね合わせ回数を得ることは困難であるため、130秒間に5回の計測を行って5つのデータを用意し、それぞれをRD法に適用してさらにそれらを重ねることによって十分な重ね合わせ回数を得られるようにした。なお、重ね合わせたデータの間隔は30secとしている。図-17にRD法により重ね合わせた波形を示す。なお、バンドパスフィルタ処理によりあらかじめ2次以降の振動数の影響を断ち切った後にRD法を適用することとした。また、バンド幅は0.4~1.3Hzとしている。図より、白鳥大橋の場合と同様に初期の減衰が大きく、その後緩やかな減衰へと移り変わっているようである。そこで、0~30sec, 0~10sec, 10~30secのような時間ごとに減衰率を算出した結果それぞれ、0.0616, 0.17, 0.0239となった。これらも区間を分けることによって得られる減衰率は変化しており、どの区間の減衰定数を評価するべきかの判断は難しく、白鳥大橋と同様にさらなる検討が必要と判断される。

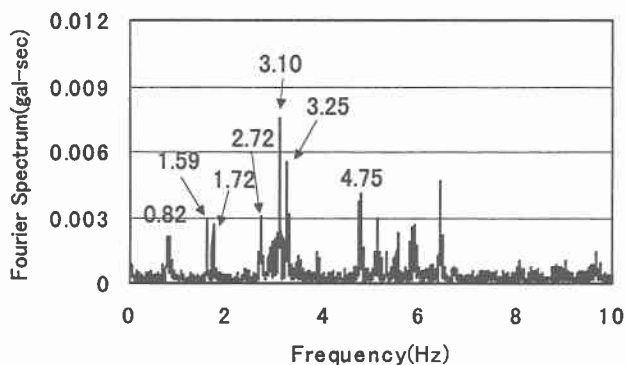


図-15 加速度波形のフーリエスペクトル

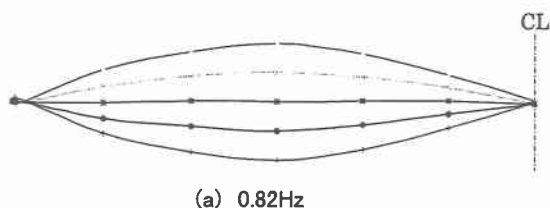


図-16 鉛直一次モード分布図

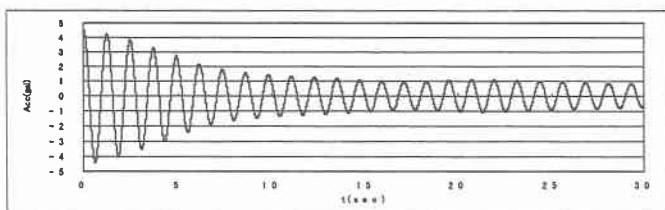


図-17 RD法による重ね合わせ波形
(バンドパスフィルタ後)

7. おわりに

本研究では、橋梁の総合診断を目的として構造全体の動的挙動を示す1つの指標である構造減衰に着目し、常時微動計測を利用した減衰率の算出方法の検討を行った。対象とした手法は、航空宇宙工学分野で提案されたRD法(ランダムデクリメント法)である。

本研究で得られた結果を要約すると、

- 1) 常時微動観測より抽出された固有振動数に対して、RD法により減衰自由波形を得ることが可能である。
- 2) 対象とする固有振動数より高次の振動数成分については、重ね合わせの段階で消えやすいが、低次固有振動数よりも高次の振動数のスペクトルが非常に卓越している場合は着目周波数に対し適切なバンドパスフィルタ処理を施すことで、着目周波数の自由減衰波形を得ることができる。
- 3) 石狩河口橋・神納橋・白鳥大橋の計3橋について、減衰率を評価したところ、神納橋・白鳥大橋では着目する波形データによっては減衰が異なる場合がみられるため、その判断が最終評価ではなく数回の減衰自由波形を観測することによって検討する必要がある。

最後に、本研究では点検項目が多岐にわたる長大橋の維持管理手法を確立するため、比較的簡易な方法として、常時微動波形を用いて解析するRD法により健全度の評価を行い、評価の指標となる構造減衰の算出が可能なのかを試みた。その結果、常時微動波形から構造減衰を算出できることが明らかとなり、RD法を用いた橋梁の健全度評価システムの有用性を確認することができた。減衰率は健全度を評価する一つのファクターであり、建設初期にその値を把握しておくことが望ましい。また、既設橋においても現状の減衰率を測定し、経年変化を把握しておくことは橋梁の健全度を評価する上で重要なことであるものと考えられる。

<参考文献>

田村幸雄, 佐々木淳, 堀越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価: 1993,12 日本建築学会構造系論文広告集 第454号