

常時微動測定を用いた石狩河口橋の振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Ishikari Bridge by Means of Microtremor Measuring Method

北海道開発技術センター	フェロー	新山 惇 (Makoto Niiyama)
室蘭工業大学	正員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
北海道開発局札幌道路事務所	正員	佐藤 昌志 (Masashi Sato)
北海道開発局開発土木研究所	正員	池田 憲二 (Kenji Ikeda)
計測技販株式会社	○正員	高橋 朋代 (Tomoyo Takahashi)

1. まえがき

一般に構造物の長寿命化を計るためには、定期的な劣化診断のもとに補修補強を実施することが必要不可欠である。しかしながら、河川橋梁や山岳橋梁あるいは橋長の長い橋梁の場合には劣化診断のみに関しても多大な労力と時間、費用を要する。

一方、橋梁全体の劣化度を診断する一つとして固有振動特性を用いて評価する方法がある。通常、橋梁の振動特性は起振機を用いた加振実験に基づいて評価している。しかしながら、この種の実験は長時間車両の通行止が必要であり、幹線道路橋梁の場合にはほとんど不可能に近い。著者らは、常時微動観測から固有振動特性や各モードに対応する減衰定数を簡易に評価する手法の確立に向け、石狩河口橋を対象として起振実験結果との比較により、その妥当性について検討を行った。

2. 石狩河口橋の概要

石狩河口橋は一般国道 231 号の一端をなし、石狩川河

口から 5.5km 上流に架設されている橋長 1,412.7m の橋梁で、その主径間部は図-1 に示されるような全長 288m の三径間連続鋼床版斜張橋である。以下に本斜張橋の諸元を示す。

路線：一般国道 231 号
 橋長：288m (主径間部)
 型式：三径間連続鋼床版斜張橋
 支間：64.0m+160.0m+64.0m
 幅員：車道 8.0m, 歩道 2.0m (方歩道)
 日交通量：約 1,5000 台 (平成 11 年度)

3. 測定および試験の概要

本斜張橋の固有振動特性を評価するために、補剛桁内部にはサーボ型加速度計 (容量：19.6m/s², 周波数特性：DC~40Hz) を 22ch, 主塔およびケーブルにはひずみゲージ型加速度計 (容量：19.6m/s², 周波数特性：DC~40Hz) を 60ch 設置している。加速度計からの出力波形は 5msec のサンプリングタイムで 3 台のメモリレコーダ

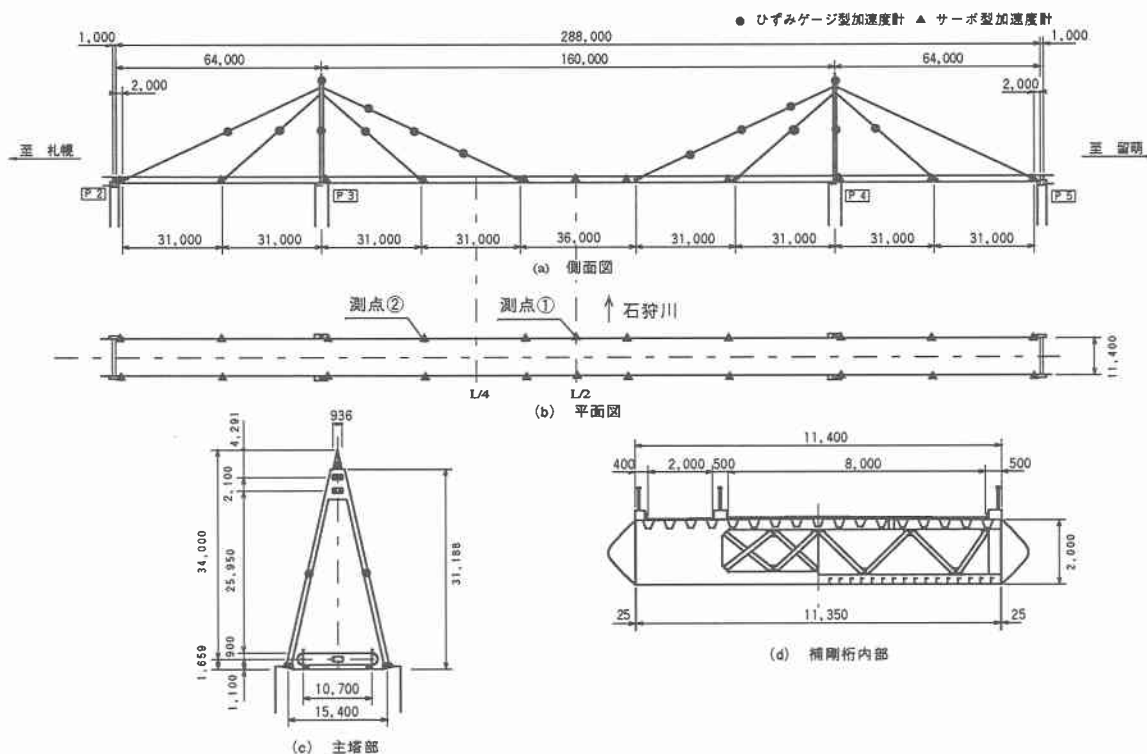


図-1 石狩河口橋の概要と計器配置位置

アナライザにて一括収録している。図-1には加速度計配置位置を示している。なお、本研究では補剛桁の振動特性にのみ着目し、検討を行うこととした。

本斜張橋の場合は、供用中でかつ本路線が幹線道路で交通量も多く十分な交通止めをすることが困難であることから、片側交互通行状態で測定を行った。また、安全性を重視して、最も交通量の少ない午後10時から午前4時の間に実施している。したがって、常時微動測定は車両通行の途切れた30sec間の測定を数回行うこととした。測定回数は合計7回である。

一方、強制加振試験には、片側交互通行状態で実験が可能でかつ加振装置の移動が容易なトラッククレーン（質量：26,500kg）を用いた重錘上下法²⁾を採用している（重錘質量：2,000kg）。加振位置は、中央径間のスパン長をLとして上流側あるいは下流側のL/2点とL/4点とした。L/2点加振時は対称振動、L/4点加振時は逆対称振動の励起を想定している。また、ねじり振動モードが励起されやすいように、トラッククレーンの近傍にカウンターウエイト（質量：2,000kg）を設置している。

4. データ処理の概要

4.1 固有振動数の抽出および固有振動数の決定

実測加速度波形を用いた本斜張橋の低次固有振動数の抽出、各固有振動モードの特定は、以下の過程に基づいて実施した³⁾。

- 1) 収録された加速度波形から、一定時間（常時微動測定時には30sec間、起振実験時には振動を励起させた後の10sec間）についてFFT処理を施し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) 2)で着目した卓越振動数における各測点のフーリエスペクトル値および位相スペクトル値を用いて、各測点の振幅を時間軸を統一し、かつ最大振幅で正規化した状態で1/4振幅ごとにプロットする。
- 4) 各時間におけるモード分布の節や腹が軸方向に変動していないことを確認する。

4.2 減衰定数の決定

常時微動観測から減衰定数を決定する方法として、加速度波形にRD法⁴⁾（Random Decrement Technique）を適用して得られる減衰自由振動波形から減衰定数を評価することを試みた。RD法とは、ランダムな時系列波形から $t=0$ においてピークをとるように並べ、これを時間軸を揃えて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方法である。本研究では、一回の測定に対し、最も大きい振幅発生時を始点とした10sec間の波形を1ピークずつ時間軸を移動させて重ねあわせており、最終的には全測定7回分を重ね合わせることであった。

起振実験では、クレーンで振動を励起した後、急停止した時の自由振動波形から直接減衰定数を算出した。

なお、減衰定数の算出を行う前処理として、着目して

いる固有振動成分のみが卓越するように、あらかじめバンドパスフィルタ処理を施すこととした。

減衰定数は、減衰自由振動波形を式(1)のように仮定し、半周期ごとの極大値と極小値を用いた最小二乗法により算定している⁵⁾（極小値は絶対値を用いている）。

$$y=A \cdot \exp(-h \omega t) \quad (1)$$

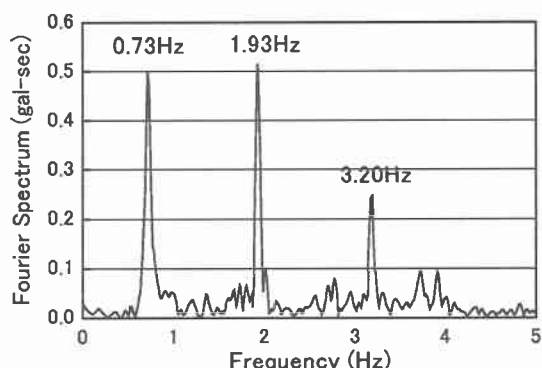
ここで、A：振幅；h：減衰定数； ω ：角速度；t：時間である。

5. 測定結果および考察

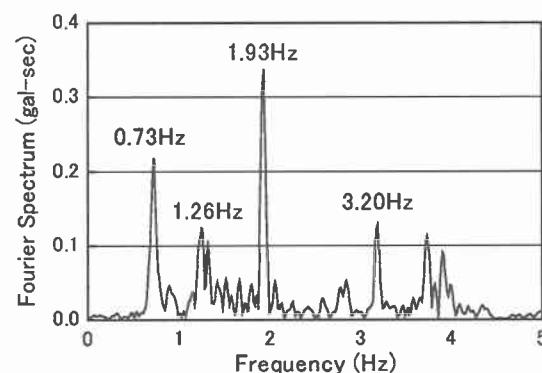
5.1 固有振動数および固有振動モードの特定

図-2(a)、(b)には、対称振動が卓越すると考えられる測点①と逆対称振動が卓越すると考えられる測点②について、それぞれ5Hzまでのフーリエスペクトルを示している。図より、各卓越振動数に関する1/4振幅ごとのモード図を作成し、振動モードを特定した。図-3(a)～(d)には、各固有振動数に対応するモード図を示す。全ての振動モードについて節や腹が明瞭に表れており、求められた各モードは固有振動数に対応するものであることがわかる。

次に、常時微動測定結果の妥当性を検討するために起振実験結果との比較を行った。起振実験時の加振位置は上流側および下流側のL/2点とL/4点であり、実験終了後、全実験ケースについてフーリエスペクトルを求めた。L/4点加振時にもL/2点加振時と同じ卓越振動数が見られたことから、図-4(a)、(b)には一例として上流側L/4点加振時のフーリエスペクトルを示している。このようにして、卓越振動数が顕著に表れている実験ケースを選



(a) 測点①



(b) 測点②

図-2 常時微動観測による
加速度波形のフーリエスペクトル

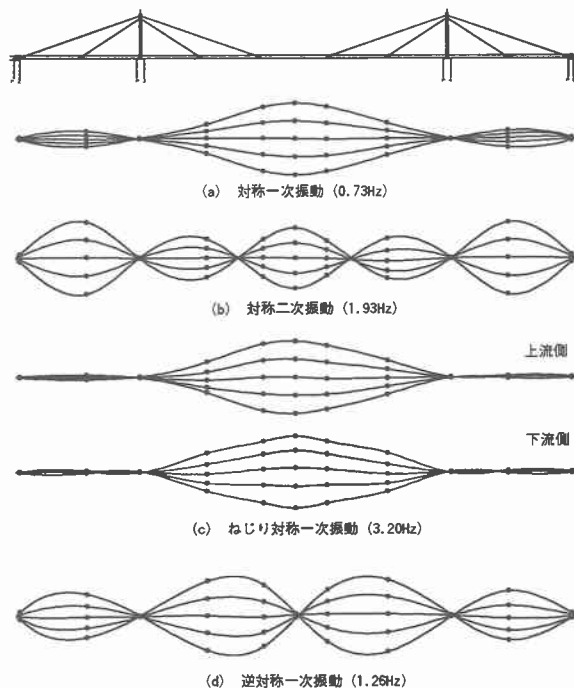
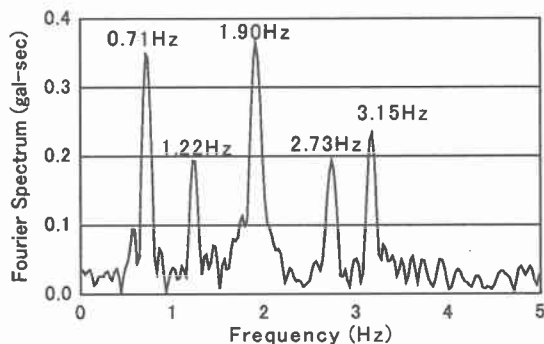
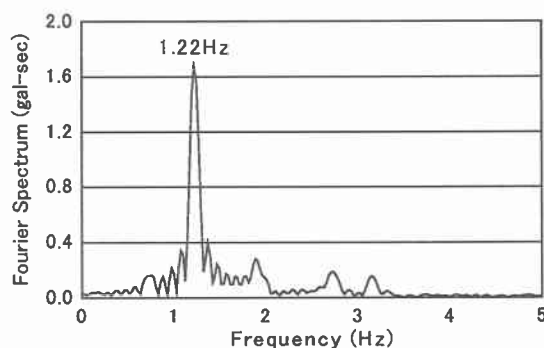


図-3 各固有振動数に対するモード分布図



(a) 測点①



(b) 測点②

図-4 上流側 L/4 点起振時の各測点のフーリエスペクトル

択して固有振動数および振動モードを特定している。図-5(a)～(d)には、常時微動測定時の各固有振動数および各モード分布を起振実験結果と比較して示している。図より、常時微動測定結果の各振動モードは起振実験結果と非常に良い一致を示していることがわかる。しかしながら、各固有振動数は起振実験結果が全体的に若干小さい値を示す結果となった。これは加振装置の質量増加に

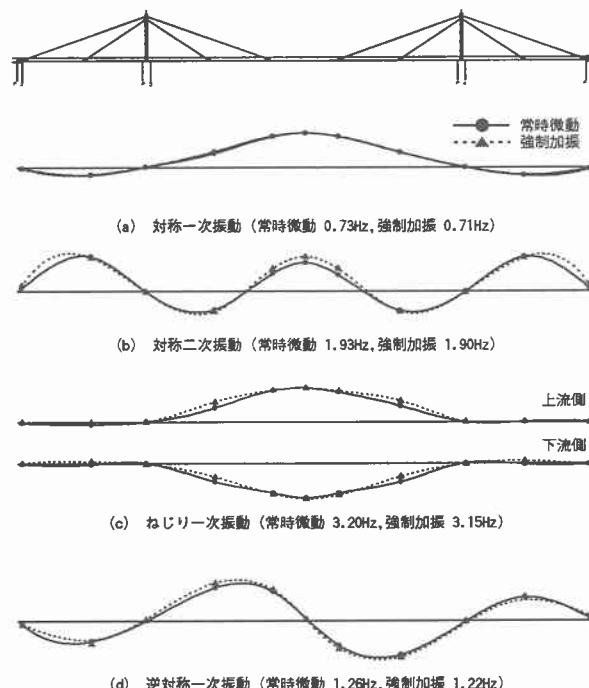


図-5 固有振動数、振動モード分布に関する常時微動測定結果と起振実験結果の比較

表-1 固有振動数とバンドパスフィルタ域

振動モード	常時微動測定時		起振実験時	
	固有振動数	バンドパスフィルタ域	固有振動数	バンドパスフィルタ域
対称1次振動	0.73 $\pm$	0.3 $\pm$ ～1.2 $\pm$	0.71 $\pm$	0.64 $\pm$ ～0.90 $\pm$
対称2次振動	1.93 $\pm$	1.5 $\pm$ ～2.5 $\pm$	1.90 $\pm$	1.78 $\pm$ ～2.12 $\pm$
ねじれ対称1次振動	3.20 $\pm$	3.0 $\pm$ ～3.5 $\pm$	3.15 $\pm$	—
逆対称1次振動	1.26 $\pm$	1.0 $\pm$ ～1.5 $\pm$	1.22 $\pm$	1.17 $\pm$ ～1.54 $\pm$

よるものと推察される。これより、常時微動観測によって、固有振動数および対応する振動モードを特定することが十分可能であることが明白になった。

5. 2 減衰定数の特定

5.1 で特定されたそれぞれの固有振動モードに関する減衰定数の算定を試みた。本研究では、各固有振動数成分波形を励起させるために、バンドパスフィルタ処理を施すこととした。図-2 および図-4 のフーリエスペクトル図に依じて、表-1 に示されるようにバンド幅を決定した。

図-6(a)～(d)には、常時微動測定結果の加速度スペクトルにバンドパスフィルタ処理を施して波形を復元させ、さらに RD 法を適用して得られる波形を示している。

図-7(a)～(c)には、起振実験において、加振後急停止した時の加速度波形にバンドパスフィルタ処理を施し再構成した波形を示している。なお、起振実験時のねじれ対称1次振動の波形にはうなり現象が現れ、減衰定数の算定が困難であった。

表-2 には、図-6 および図-7 の各波形の減衰定数を一覧にして示している。表より、対称1次および二次振動に関しては、常時微動測定と起振実験から得られた減衰定数がほぼ一致しており、RD法による減衰定数の特定

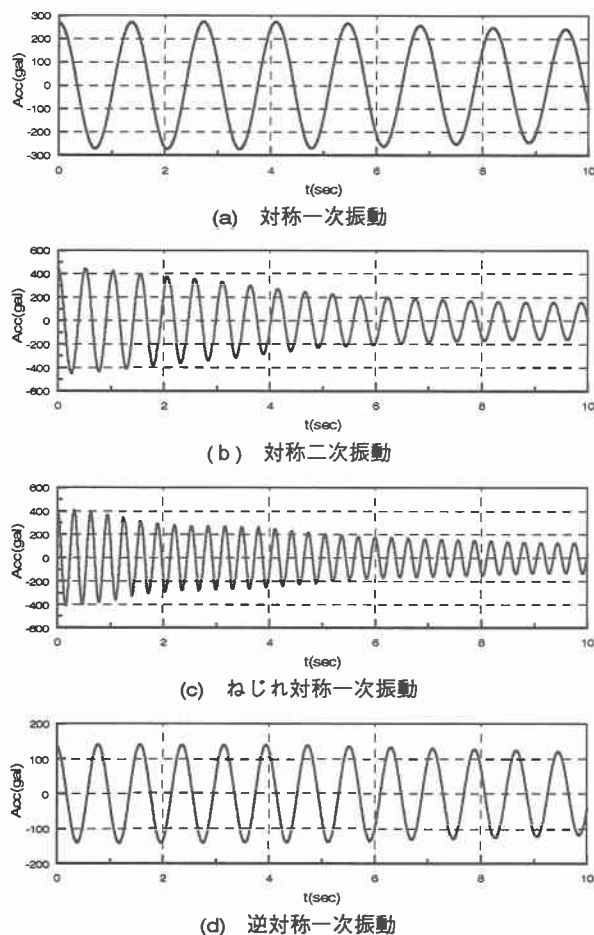


図-6 RD 法による重ね合わせ波形

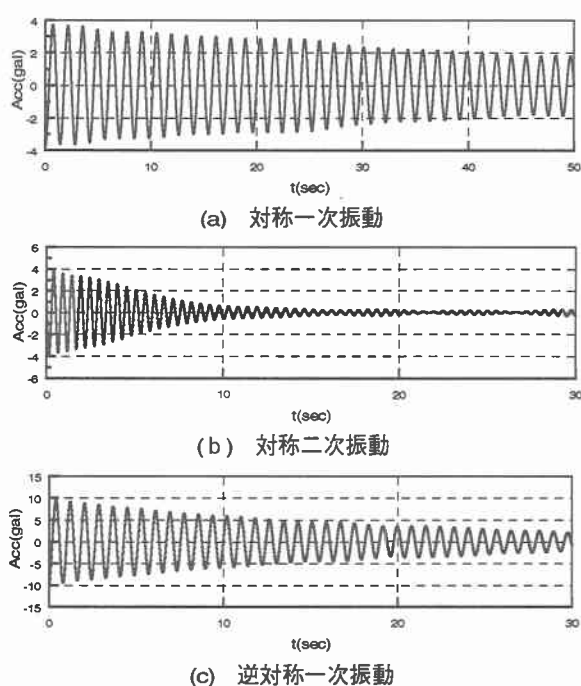


図-7 加振停止後の減衰自由振動波形

表-2 減衰定数

振動モード	減衰定数	
	常時微動測定時	起振実験時
対称1次振動	0.0032	0.0037
対称2次振動	0.0102	0.0126
ねじれ対称1次振動	0.0062	—
逆対称1次振動	0.0023	0.0066

がほぼ妥当なものであることがわかる。しかしながら、逆対称一次振動の減衰定数は両者の差が大きい。これは、常時微動観測結果のフーリエスペクトル図（図-2(b)）から明らかなように、逆対称一次振動成分の励起が他の固有振動成分より小さいことや、隣合う固有振動数成分と周波数的に近接していることにより、適切に減衰現象が表現されていない可能性のあることを示している。しかしながら、他の固有振動成分に関しては妥当な値を示しており、常時微動観測においても、振幅が大きく他の固有振動成分と周波数的に十分に分離している場合には適切に減衰定数を算定することが可能であることが証明された。

6. まとめ

本研究では、常時微動測定によって固有振動数および対応する減衰定数の特定を試み、その妥当性を起振実験と比較・検討した。常時微動観測は起振実験に比べ安価な上、車両通行止めを必要としないことより、供用中の橋梁の振動特性を把握する上で非常に有効である。本研究で得られた結果を整理すると、以下ようになる。

- 1) 本研究によって、常時微動観測のみで固有振動数および対応する振動モードを抽出することが可能である。
- 2) 常時微動観測により抽出された固有振動数に対応

する減衰定数は、波形に RD 法を用いることによって評価できるものと考えられる。しかしながら、固有振動モードの振幅が小さく、また他の固有振動成分と周波数が近接している場合には、さらなる検討が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院大学院構造力学研究室の堀越弘美君に多大なるご支援を戴いた。記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新山淳, 佐藤昌志, 小室雅人, 岸徳光：供用後 27 年経過した三径間連続鋼床版斜張橋の自由振動特性, 構造工学論文集, vol.47A, 2001. 3.
- 2) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版(株), 1993. 10.
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル入門, 鹿島出版会, 1994. 5.
- 4) 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, pp.29-38, 1993. 12.
- 5) 菅野裕見, 荒川利治：振幅依存性を考慮した RC 造高層煙突の振動特性評価に関する研究, コンクリート工学, vol.22, No3, pp7-12, 2000.