

常時微動観測による鳥崎川河川公園歩道橋の固有振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Torisaki River Park Pedestrian Bridge

by Means of Microtremor Measuring Method

(株) K G E ○正員 高橋 朋代 (Tomoyo Takahashi)
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井建設(株) 正員 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 ドーピー建設(株) 正員 竹本 伸一 (Shinichi Takemoto)

1. まえがき

鳥崎川河川公園歩道橋は、平成 13 年 3 月に森町の鳥崎川に建設された外ケーブル式二径間連続 PC 中空床版橋であり、世界的にも例のない新しい型式の橋梁である。また、本橋は極めて軽量で死荷重が小さく、耐震上優れた構造形式である。森町では、歩行者の怨限度の観点と振動特性確認のための人力による加振実験¹⁾を実施している。

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剛性低下度を評価する方法がある。しかしながら、この種の実験は長時間車両の通行止めが必要であり、共用後にはほとんど不可能に近い。著者等は、簡易に橋梁の固有振動特性を評価するために常時微動観測による方法を提案し、石狩河口橋²⁾および神納橋³⁾を対象として常時微動観測を実施しその妥当性を検討してきた。その結果、提案の方法を用いることによりほぼ妥当な評価が可能であることが明らかとなっている。

ここでは、提案手法が石狩河口橋や神納橋とは異なる型式の鳥崎川河川公園歩道橋への適用の妥当性を確認することを目的に、常時微動観測や人力による加振実験を実施し類似の検討を試みた。すなわち、常時微動観測を実施し、低次固有振動数および対応する振動モード、減衰定数の特定を試み、加振実験結果との比較検討を行うものである。

2. 鳥崎川河川公園歩道橋の概要

図-1 に示すように、鳥崎川河川公園歩道橋は全長

57.3m であり、外ケーブルを桁外に大きく偏心させたケーブルトラス構造を用いた二径間連続 PC 中空床版橋である。以下に本橋の諸元を示す。

橋長：57.3m

支間：23.0m+33.2m

橋格：人道橋

型式：二径間連続ケーブルトラス PC 中空床版歩道橋

3. 測定および試験の概要

常時微動観測波形や人力加振によって、本橋の固有振動特性を評価するために、桁上にサーボ型加速度計（容量：9.8m/s² あるいは 19.6m/s²、周波数特性：DC～100Hz）を設置している。加速度計からの出力波形は 10msec のサンプリングタイムでメモリレコーダアナライザにて一括収録している。図-1 には、加速度計の配置位置を示している。鉛直振動成分観測時には、曲げ振動成分に着目して中央径間に 17ch を、またねじり振動成分の励起を想定して上流側および下流側に 18ch 設置することとした。水平方向成分観測時は中央径間に 17ch 設置している。

常時微動観測は、それぞれの計器配置時に 5 分間の測定を 10 回実施した。

一方、加振実験は桁上各点における人間のジャンプにより強制加振させることとした。通常、橋梁の固有振動特性を把握するためには、起振機を用いるのが一般的であるが、歩道橋のように規模が小さく、主桁の剛性が比較的小さい場合には人力により十分励起が可能である。

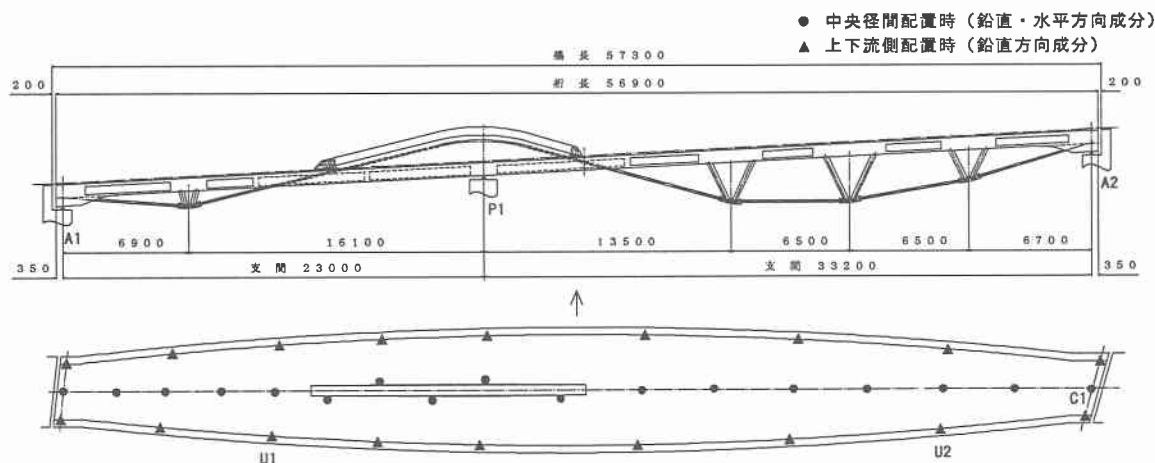


図-1 本橋の概要と計器配置位置

加振位置は様々な振動モードの励起を想定し、鉛直方向成分観測時には、数点の加振位置を設定した。また、水平振動成分観測時には水平振動が励起されるように、長径間中央部において、上流側から下流側に向かって走行することにより加振した。

4. データ整理の概要

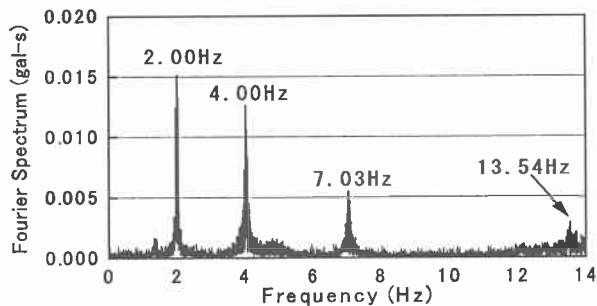
4.1 固有振動モードおよび固有振動数の決定

実測加速度波形を用いた本橋の低次固有振動モードおよび固有振動数の決定法は、以下の過程に基づいて実施した⁴⁾。

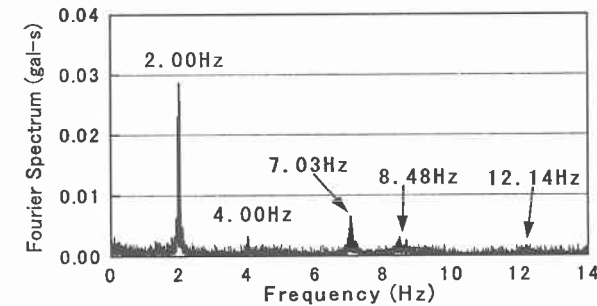
- 1) 常時微動および人力加振により励起された波形を収録する。
- 2) 全地点の収録波形に関して、一定時間（常時微動観測時：300sec 間、鉛直加振実験時：振動励起後 30sec 間、水平加振実験時：振動励起後 6sec 間）について FFT 処理を施し、フーリエスペクトルを求める。
- 3) 主要な点に関するフーリエスペクトルから低次固有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。
- 4) 3)で着目した卓越振動数における各測点のフーリエスペクトル値および位相スペクトル値を用いて、各測点の振幅を時間軸を統一し、かつ最大振幅で正規化した状態で 1/2 振幅ごとにプロットする。
- 5) 各時間におけるモード分布の節や腹が軸方向に移動せず、振動モードが連成していないことを確認し、固有振動モードを決定する。

4.2 減衰定数の決定

常時微動観測および加振実験より得られた加速度波形を用いた各固有振動成分に関する減衰定数は以下の手順



(a) 測点 U1



(b) 測点 U2

図-2 鉛直振動成分観測時における
加速度波形のフーリエスペクトル

により算定した。

- 1) 各固有振動モードが卓越する測点に関して、常時微動および人力加振によって得られた振動波形データに FFT 処理を施し、フーリエスペクトルを求める。
- 2) 着目している固有振動成分のみを卓越させるため、バンドパスフィルタ処理を施し、波形を生成する。
- 3) ランダム成分が卓越している場合には RD 法を適用し、ランダム成分を相殺して、減衰自由振動のみを抽出する。
- 4) 得られた波形包絡線を式(1)のように仮定し、半周期毎の極大値、極小値を用いた最小二乗法により減衰定数を決定する。

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

ここで、A：振幅；h：減衰定数； ω ：角速度；t：時間である。

また、上述の 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。

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決定

図-2(a)、(b)には、鉛直振動観測時の測点 U1 および U2 について、それぞれ 14Hz 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 1/2 振

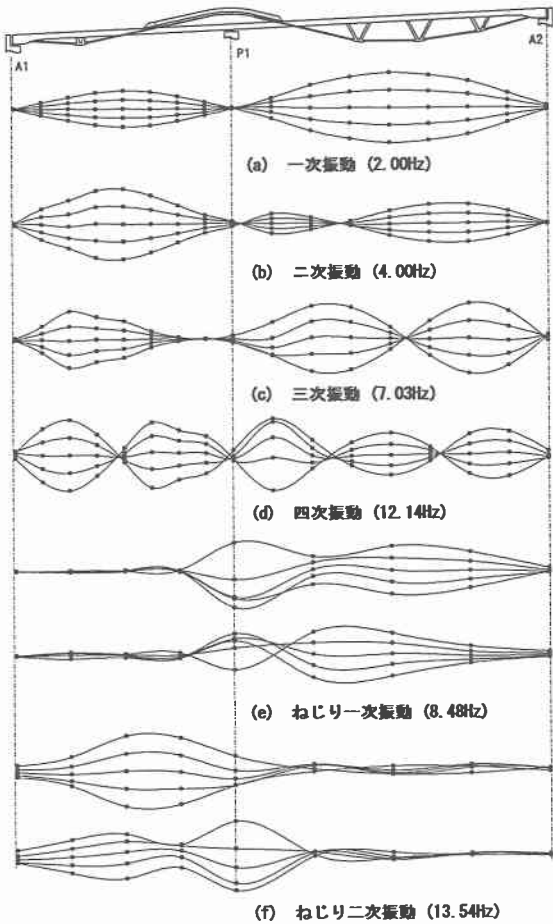


図-3 各固有振動数に対応する鉛直振動モード分布

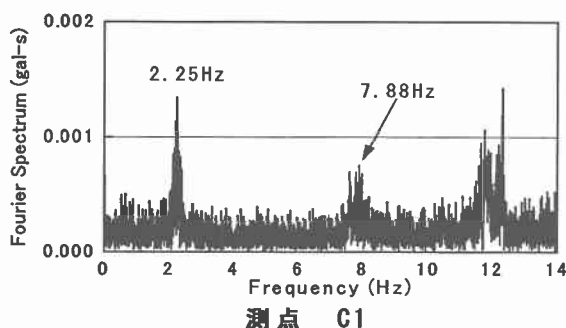


図-4 水平振動成分観測時における
加速度波形のフーリエスペクトル

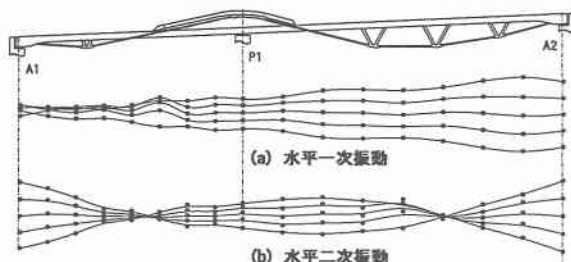


図-5 各固有振動数に対応する水平振動モード分布

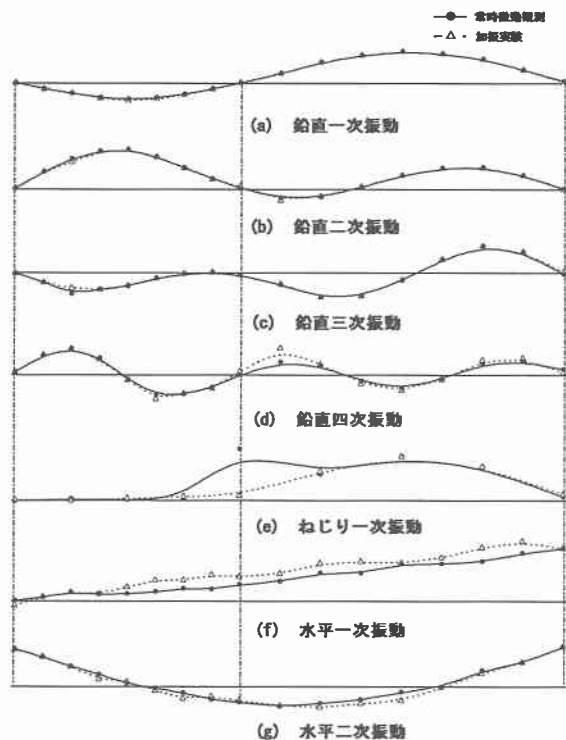


図-6 常時微動観測結果と加振実験結果による
モード分布の比較

幅毎のモード図を作成し、振動モードを特定した。図-3(a)～(f)には、各卓越振動数に対応するモード図を示している。(a)、(b)図より、鉛直一次および二次振動に関してはモードの節や腹が明瞭に現れており、固有振動数に対応するものであることがわかる。(c)、(d)図より、特に四次振動では支点 P1 近傍部において各時間毎にモード分布にズレが生じており、完全な固有振動状態を抽出できていない。(e)、(f)図より、ねじり振動に関して

表-1 固有振動数一覧

振動モード	常時微動観測	加振実験
鉛直	一次	2.00
	二次	4.00
	三次	7.03
	四次	12.14
ねじり	一次	8.48
	二次	13.54
水平	一次	2.25
	二次	7.88
	三次	—

も支点 P1 上の測点が節とならず、振動を呈していることがわかる。これらの時間的なモード分布のズレは、振動の励起が小さいことや、支点がゴム支承であるためゴムの剛性が起因していると思われる。また、常時微動観測により、加振実験時には抽出不可能だったねじり二次振動の抽出が可能となった。

図-4には、水平振動観測時の測点 C1 におけるフーリエスペクトルを示している。水平振動成分の励起は、鉛直振動成分と比較して極めて小さいが、固有振動モードを特定した。図-5(a)、(b)には、各卓越振動数に対応する水平振動成分のモード図を示している。図より、振動モードは端部で最大振幅を有し、P1 支点においても節が生じないモード分布となっている。なお、この結果は加振実験結果と同様の傾向を示していることを確認している。水平一次振動では A1 が回転支点、A2 が可動支点となり、水平二次振動では両端部が可動となっていることがわかる。これらの傾向は、全支点がゴム支承となっていることより、支点部が比較的容易に水平方向に振動可能であることを示している。

次に、常時微動観測結果と加振実験との比較を行う。

図-6(a)～(g)には、常時微動観測から得られた最大振幅時における各固有振動モードを加振実験結果と比較して示している。また、表-1には、それらの固有振動数を一覧にして示している。図および表より、鉛直一次および二次振動に関しては、固有振動数、振動モードともに両者が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、他の固有振動モードに関しては、定常的には一致しているもののゴム支承である支点 P1 付近のモードが乱れ、差異が生じていることがわかる。固有振動数に関しても、加振実験結果と若干異なる値を示しており、モード分布の乱れの影響が表れているものと推察される。

5.2 減衰定数の特定

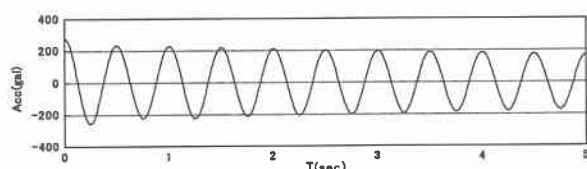
5.1 で特定されたそれぞれの固有振動モードに対応する減衰定数の算定を試みた。本研究では、各固有振動成分波形を励起させるために、バンドパスフィルタ処理を施すこととした。表-2には、各フーリエスペクトルに応じて決定したバンド幅を示している。なお、本研究では比較のために常時微動観測と加振実験から得られた波形を用いて減衰定数の特定を試みた。

図-7(a)～(c)には、常時微動観測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生成し、さらに RD 法を適用して得られる波形を示している。

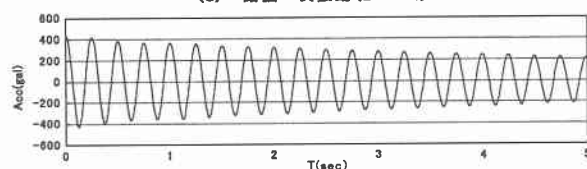
図-8(a)～(d)には、加振実験において、ジャンプ加振したときの加速度波形にバンドパスフィルタ処理を施し

表-2 各固有振動数に対応するバンドパスフィルタ域および減衰定数

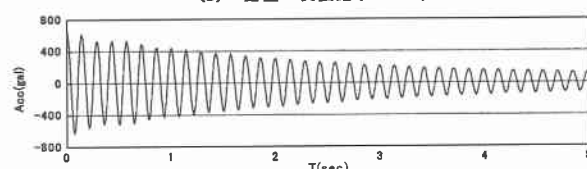
振 動 モード		常 時 微 動 観 測			加 振 実 験		
		固有振動数	バンドパス	減衰定数	固有振動数	バンドパス	減衰定数
鉛 直	一次	2.00	1.00～3.00Hz	0.0057	2.00	1.00～3.00Hz	0.0058
	二次	4.00	3.00～5.00Hz	0.0053	4.00	3.00～5.00Hz	0.0069
	三次	7.03	5.00～9.00Hz	0.0075	7.01	5.00～9.00Hz	0.0109
	四次	12.14	-	-	12.13	11.00～13.00Hz	0.0125



(a) 鉛直一次振動 (2.00Hz)



(b) 鉛直二次振動 (4.00Hz)



(c) 鉛直三次振動 (7.03Hz)

図-7 常時微動波形に RD 法を適用して得られる減衰波形

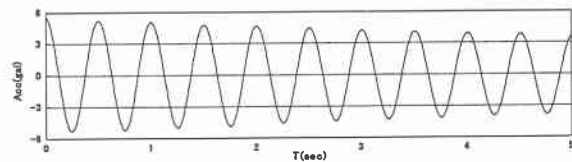
生成した波形を示している。

表-2 には図-7 および図-8 の各波形の減衰定数を一覧にして示している。表より、常時微動観測から得られた値は加振実験と比較して、鉛直一次振動に関してはほぼ同程度の値を示し、鉛直二次振動に関しては若干小さい値を示しているもののほぼ同程度の値を示していることがわかる。したがって、本橋においても提案の手法により各固有振動モードに対応する減衰定数を適切に評価できることがわかった。これより、本橋の場合には風などに起因する常時微動時と人力加振の振動時の減衰定数はほぼ類似していることが明らかとなった。また、本データ処理においては、単純な橋梁故にフーリエスペクトルが輝線スペクトル状となるため、加振実験においては RD 法の適用をすることなく、減衰定数が評価可能であることが明らかとなった。

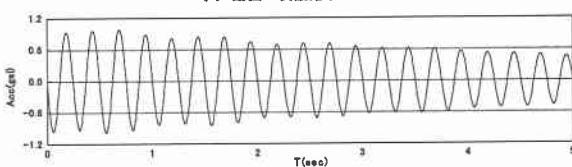
6. まとめ

本研究では、常時微動観測によって固有振動特性および対応する減衰定数の特定を試み、その妥当性を加振実験と比較・検討した。本研究で得られた結果を整理すると以下ようになる。

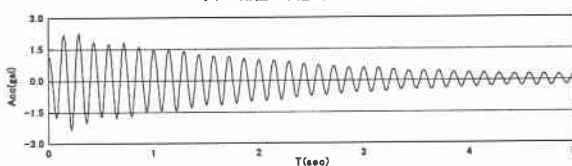
- 1) 本橋の低次固有振動特性は、常時微動観測法を用いて十分評価可能である。しかしながら、振動の励起が小さい固有振動成分に関しては、支点のゴム支承の影響から振幅の乱れや時間軸のズレが生じる結果となった。
- 2) 本橋の水平一次および二次振動に関して、常時微動観測法により得られた振動モードは、加振実験と同様に端部に最大振幅が現れる振動モードが得られた。



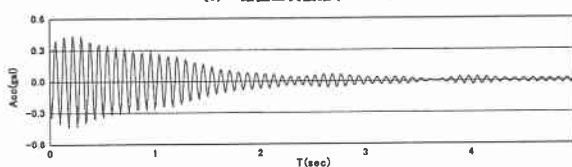
(a) 鉛直一次振動 (2.00Hz)



(b) 鉛直二次振動 (4.00Hz)



(c) 鉛直三次振動 (7.01Hz)



(d) 鉛直四次振動 (12.13Hz)

図-8 加振実験から得られた減衰自由振動波形

- 3) 本橋に関する加振実験および常時微動観測結果を用いて、フーリエスペクトルに基づいて生成した鉛直一次および二次、三次、四次振動は比較的良好な減衰自由振動波形を示している。
- 4) 本橋の低次固有振動数の減衰定数は 0.6%程度であることが明らかとなった。

謝辞：本研究を行うにあたり、森町、CE サービス、ドーピー建設、三井JVの関係者の方々にご協力を頂いた。記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 岸徳光，小室雅人，巽治，松本一希；人力加振による鳥崎川河川公園歩道橋の固有振動特性評価，土木学会北海道支部研究論文報告集，2002.1
- 2) 新山惇，岸徳光，佐藤昌志，池田憲二，高橋朋代；常時微動測定を用いた石狩河口橋の振動特性評価，土木学会北海道支部研究論文報告集，vol.57，pp116-129，2001.2
- 3) 岸徳光，池田憲二，巽治，堀越弘美；観測波形を用いた神納橋の振動特性評価，土木学会北海道支部研究論文報告集，2002.1
- 4) 大崎順彦；新・地震動のスペクトル入門，鹿島出版会，1994.5
- 5) 菅野裕晃，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