

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

An Evaluation of Vibration Characteristics of Torisaki River Park Pedestrian Bridge
by Means of Man-Power Excitation Test

室蘭工業大学	正員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	正員	小室 雅人 (Masato Komuro)
(株)KGE	正員	巽 治 (Osamu Tatsumi)
室蘭工業大学	○ 学生員	松本 一希 (Kazuki Matsumoto)

1. はじめに

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2径間連続PC中空床版橋であり、世界的に例のない新しい型式の橋梁である。本橋は従来形式の橋梁と比較して軽量化が図られ、死荷重が小さく、耐震上優れた構造型式である。森町では、本橋が上述のように過去に例のない橋梁形式であることから、供用開始後の歩行者の怒限度の観点と振動特性の確認を目的として、人力による強制加振実験を実施した。

本論文では、上述の強制加振実験の概要、その実験結果（低次固有振動数、振動モード）を述べると共に今後の維持管理の観点から有限要素法による固有振動解析を行い、その妥当性について検討を行ったので報告する。実験は、人力による跳躍や走行により強制加振を励起し、主桁上各点に設置した加速度計からの出力を同時計測することによって実施した。実験結果から得られた加速度波形をもとに低次の固有振動数およびそれに対応する固有振動モードを抽出している。

2. 鳥崎川河川公園歩道橋の概要

鳥崎川河川公園歩道橋は、全長 57.3 m、支間は 33.2 m と 23.0 m の異径間の歩道橋である。その型式は、外ケーブルを桁外に大きく偏心させた外ケーブル式2径間連続PC中空床版橋である。図-1(a)、(b)には、本橋の側面図および平面図を示している。

3. 加振実験の概要

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。しかしながら、本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る強制加振でも、十分な振動の励起が可能である。従って、本橋の固有振動特性評価は、人力による強制加振実験を採用した。加振方法は、1) 桁上各点で数秒間の跳躍を行うことにより鉛直振動成分を、また、2) 上流側から下流側に向かって走行することにより水平方向振動成分を励起させることとした。なお、鉛直振動成分の測定には、種々の振動モード成分の励起を容易にするために、加振位置を複数設定している。

測定は、桁上にサーボ型加速度計（容量：9.8 m/s² および 19.6 m/s²、周波数特性：DC～100 Hz）を、曲げおよび水平振動成分観測時には桁中央に 17 ch、ねじり振動成分観測時には上下流側端部に 18 ch 設置し行っている。図-1(b)には加速度計の配置位置を示している。計測は、各加速度計出力をメモリーレコーダアナライザーを用いて一括収録（サンプリング周波数：100 Hz）している。表-1 および図-2 には、本実験で行った実験ケースおよび加振位置を示している。表および図中の a、b は、それぞれの短径間 (23.0 m)、長径間 (33.2 m) を意味する。

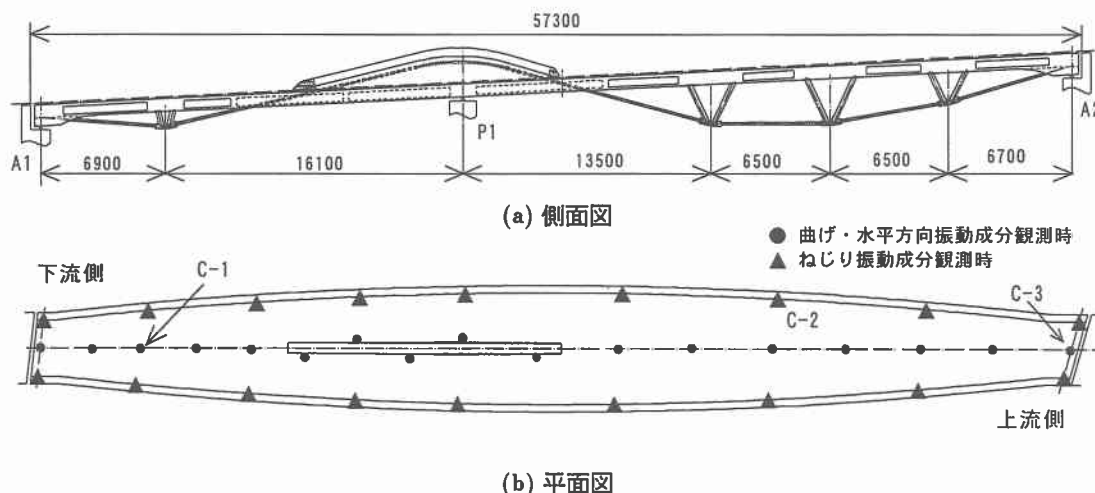
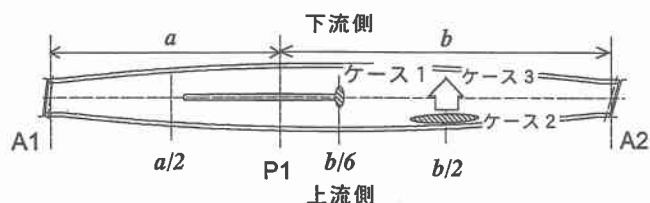


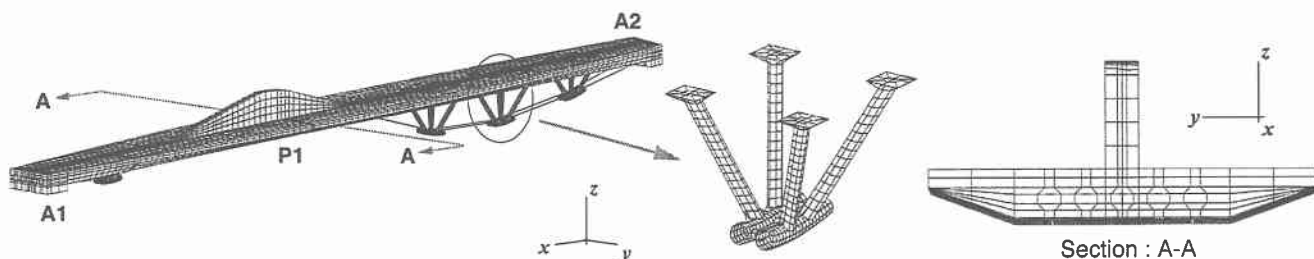
図-1 鳥崎川河川公園歩道橋の概要図および加速度計配置位置



図－２ 各実験ケースの加振位置

表－１ 実験ケース

実験ケース	載荷位置	方向成分	載荷人数
ケース 1	$b/6$	曲げ	4
ケース 2	$b/2$ (上流側)	ねじり	11
ケース 3	$b/2$ (上流側 → 下流側)	水平	11



図－３ 本歩道橋の要素分割状況

表－２ 物性値一覧

(a) ケーブル、鉄筋コンクリートおよび舗装部

	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	単位体積質量 ρ (kg/m^3)
ケーブル	206	0.3	7,850
鉄筋コンクリート	35.0	0.167	2,480
舗装部	1.00	0.350	2,300

(b) 積層ゴム支承の物性値（設計値）

支点位置	鉛直剛性 K_{ei} (kN/cm)	水平剛性 K_{mi} (kN/cm)
A1	6,390	29.6
P1	33,930	171.8
A2	9,280	37.1

4. データ処理の概要

実測加速度波形を用いた本橋の固有振動モードおよび固有振動数は、以下の過程に基づいて算定した¹⁾。

- 1) 人力による跳躍、走行加振により振動を励起させて全加速度波形を収録する。
- 2) 全地点の収録波形に関して、一定時間（鉛直振動時：振動励起後の約 30 sec，水平振動時：振動励起後の約 6 sec）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) 各卓越振動成分に対応するモード分布を、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生成する。
- 5) 振幅の大きい測点の波形を基準にして 1/2 振幅時点の各測点の振幅から振動モードを求め、モードの節および腹の位置が各振動で移動せず、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。

5. 有限要素法を用いた固有振動解析

本論文では、今後の維持管理の観点から、有限要素法による固有振動解析を実施し、解析の妥当性を検討している。

5.1 有限要素モデル

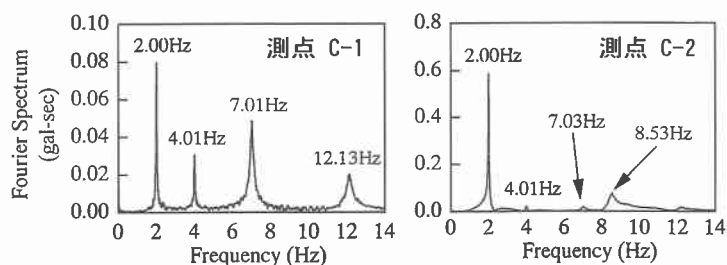
本解析では、対象としている構造形式が複雑であることから、可能な限り忠実にモデル化を行った。すなわち、橋桁部、舗装部は 8 節点あるいは 6 節点ソリッド要素、ケーブル取付部材は 4 節点あるいは 3 節点シェル要素、ケーブルは 3 次元梁要素を用いてモデル化している。また、高欄部は 4 節点シェル要素を用いて計算の簡略化を図っている。なお、本橋の 3 つの支点部には、耐震安全

性を考慮して反力分散型の積層ゴム支承（以後、単にゴム支承）が設置されている。ゴム支承は鉛直方向と水平方向の剛性が大きく異なる。ここでは、ゴム支承の異方性を簡易にモデル化するため、鉛直剛性および水平剛性が等価になるように梁要素でモデル化することとした。

図－３には、本橋の要素分割状況を示している。総節点数および総要素数は、それぞれ 19,659、17,038 である。また、表－２(a)、(b)には本解析で使用した物性値を示している。なお、表－２(b)に示す積層ゴム支承の物性値は設計値である。

5.2 解析条件

固有振動解析は、三次元構造解析用汎用プログラムである ABAQUS²⁾を用い、弾性解析に基づいて実施している。なお、本解析では、橋桁部の振動性状に主眼を置いているため、ゴム支承部の質量を無視し、かつケーブルの質量を桁端定着部、P1 橋脚上のフィン部（図－３の A-A 断面頂部）およびケーブル取付部材のケーブル定



(a) 曲げ振動

(b) ねじり振動

図-4 鉛直振動フーリエスペクトル

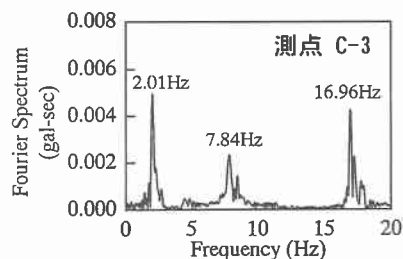


図-6 水平振動フーリエスペクトル

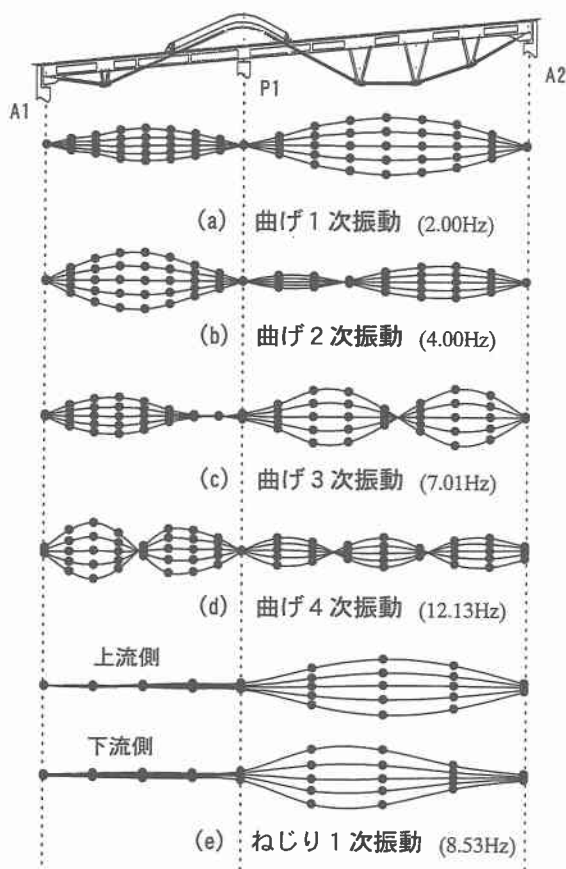


図-5 鉛直振動成分のモード分布図

着部に振り分けることとした。また、計算の簡略化のため、橋桁部のPC鋼線およびケーブル張力は無視し、ホロー部は橋桁内部を空洞とすることで処理した。なお、加振している人間の質量は考慮していない。

本解析では、前述のようにゴム支承部を梁要素でモデル化することにより、水平剛性および鉛直剛性を評価している。しかしながら、実際のゴム支承部は、ゴムと鋼版の積層構造であり、その剛性特性は外力条件に大きく依存するものと考えられる。このような観点から、本解析では後述の加振実験における固有振動数および振動モード結果を踏まえ、特に水平剛性 K_{mi} を設計値の1倍、2倍、3倍、3.5倍、4倍と5種類に変化させて解析を実施している。

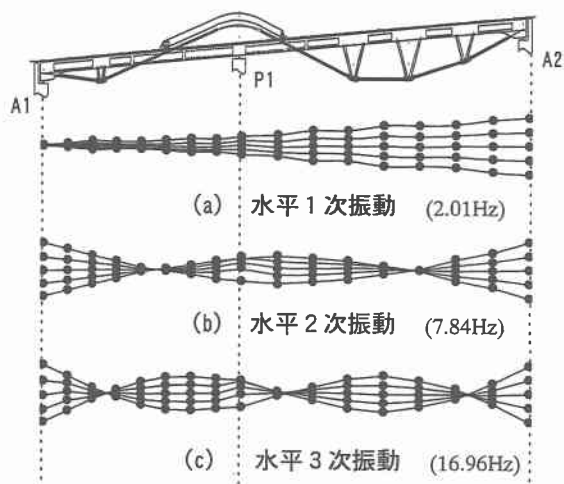


図-7 水平振動成分のモード分布図

6. 強制加振実験結果

6.1 鉛直振動成分測定結果

図-4には、ケース1の測点C-1およびケース2の測点C-2におけるフーリエスペクトルを示している。これらのフーリエスペクトルを基に各卓越振動数に関するモード分布図を求め、固有振動モードの特定を行った。

図-5には、ケース1およびケース2から得られるモード図を示している。図より、全ての振動モードについて節や腹が明瞭に現れており、求められた各モードは固有振動数に対応していることがわかる。しかしながら、曲げ3次および4次、ねじり振動では各支点において節とはならず支点が振動していることがわかる。この現象は、支点部に設置されているゴム支承の振動の影響によるものと考えられる。また、(e)図のねじり振動モードにおける上下流側を比較すると、腹の位置は下流側床版において支間中央部からP1支点よりに推移している。これは、起振力である人間の質量による影響であるものと推察される。

6.2 水平振動成分測定結果

図-6には、ケース3の水平振動成分観測時における測点C-3のフーリエスペクトルを示している。また、図-7には、各卓越振動数に対応する水平振動モード図を示している。(a)図より、水平1次振動は、支点A1が回転支点、A2が可動支点に類似した動きを示している。また、(b)、(c)図より、水平2次および3次振動は、3

表－3 固有振動解析結果と実験結果の比較

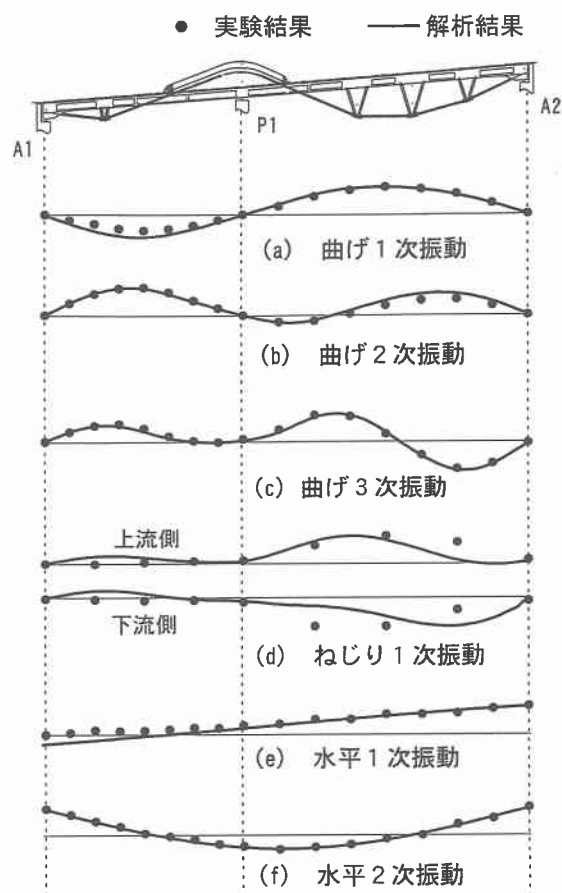
振動モード	次数	解析値 (Hz)					実験値 (Hz)
		$1K_{mi}$	$2K_{mi}$	$3K_{mi}$	$3.5K_{mi}$	$4K_{mi}$	
曲げ振動	1次	2.01	2.01	1.99	2.01	2.01	2.00
	2次	3.83	3.83	3.83	3.83	3.83	4.00
	3次	7.36	7.36	7.37	7.37	7.37	7.01
ねじり振動	1次	6.89	6.90	6.89	6.89	6.89	8.53
水平振動	1次	0.31	1.29	1.77	1.96	2.12	2.01
	2次	6.34	6.62	6.92	7.01	7.13	7.84

支点の全てが可動支点として挙動している。これは、本橋の全支承部がゴム支承であることから、人力による小さな起振力に対しても容易に水平方向振動が生じることを示している。

7. 有限要素法による固有振動解析結果

表－3には、ゴム支承部の水平剛性を変化させた場合の固有振動数を実験結果と比較して示している。表より、鉛直曲げ振動に関する解析結果において、1次振動数は実験値とほぼ一致しているものの、高次振動に関しては若干の差異が生じている。また、解析結果への水平剛性の影響は非常に小さいことがわかる。ねじり振動に関しては、解析結果がいずれの場合も実験結果より若干小さな値を示している。一方、水平振動に関しては、ゴム支承部の水平剛性を増加させることにより、固有振動数は増大する傾向を示している。特に、設計値を採用する場合（ $1K_{mi}$ ）の結果は、水平1次振動モードで0.31 Hzと実験結果（2.0 Hz）と比較して小さい。これは、本実験のように人力加振の場合には加振エネルギーが小さいことより、このゴム支承部の変形量も小さく弾性係数が設計値よりも大きく評価されるためと推察される。表より、ゴム支承の水平剛性を設計値の3.5倍（ $3.5K_{mi}$ ）と仮定する場合に、解析結果は実験結果とほぼ一致している。これより、以後の考察は全て水平剛性を3.5倍とした場合の解析結果に基づいて行うこととする。

図－8には、解析結果から得られた各振動モードを実験結果と比較して示している。(a)～(c)図より、曲げ振動モードに関しては、実験結果と解析結果はほぼ一致したモード分布を示している。(d)図のねじり1次振動モードに関しては、上下流側ともに実験結果の振動モードと若干のずれが生じている。これは、本解析において人間による加振質量を無視したことによるものと推察される。(e)、(f)図の水平振動モードに着目すると、1次振動モードはA1支点で若干ずれが生じるものの、P1およびA2支点における分布は実験結果とよく対応している。2次振動モードは、全支点が可動状態となる分布性状を精度良く再現できている。以上より、本解析結果は、実験結果を大略再現することが可能であることがわかる。



図－8 振動モード分布に関する解析結果と実験結果の比較

8. まとめ

人力による強制加振実験結果より、

- 1) 曲げ振動モードは4次、ねじり振動モードは最低次固有振動数およびそれに対応する振動モードをほぼ正確に把握できる。
- 2) 高次曲げ振動モードおよび水平振動モードでは、支点部の振動が確認された。これは支点部のゴム支承の影響と考えられる。

有限要素法による固有振動解析結果より、

- 3) ゴム支承の水平剛性を設計値の3.5倍と仮定することにより、実験結果の曲げ振動および水平振動モードをほぼ再現可能である。
- 4) また、各振動モードに対応する振動数は、高次振動モードに関して実験結果を過小評価しているものの、低次振動モードに対しては大略一致している。

謝辞：本実験を遂行するにあたり、森町役場、(株)シーイーサービス、三井建設(株)およびドービー建設(株)の関係各位には、多大なご協力を戴きました。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル入門，鹿島出版会，1994。
- 2) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.7, Hibbitt Kalsson & Sorensen Inc., 1999。