

車輛走行実験による星の降る里大橋の振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Hoshinofurusato Bridge by Means of Vehicle Traveling Method

北海道開発局	正 員	三田村 浩	(Hiroshi Mitamura)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
(株) KGE	正 員	細川 真利	(Masatoshi Hosokawa)
室蘭工業大学	○ 学生員	松本 一希	(Kazuki Matsumoto)

1. はじめに

星の降る里大橋は、平成13年に芦別市（国道452号線）に建設された道内最長（全長：265 m）の2径間連続PC箱桁斜張橋である。北海道開発局では耐震上および維持管理の観点から建設当初における本橋の固有振動特性評価のための強制加振実験を実施した。維持管理の観点から考えると、近年、橋梁の劣化度診断の一つとして固有振動特性の経時変化に着目した方法が検討されている。本手法は、この種の長大斜張橋の固有振動数評価が簡易な方法で実施可能になれば、工学的にも優れた維持管理法の一つになるものと考えられる。通常、橋梁の固有振動特性評価のための実験計測には、起振機が用いられている。しかしながら、起振機を用いる場合には装置が大がかりになることより、容易に実験を行うことが不可能である。これより、長大橋梁の維持管理を定期的に可能とするための簡易な固有振動特性評価法の確立が望まれている。

このような観点から、北海道開発局では星の降る里大橋に関するトラック走行による簡易強制加振実験を実施し、固有振動特性評価を試みた。本論文では、この概要を報告すると共に、有限要素法による固有振動解析も実施し、加振実験結果との比較により、解析手法の妥当性を検討している。なお、本加振実験は、供用開始前の平成14年2月に実施されたものである。

2. 星の降る里大橋の概要

星の降る里大橋は、平成13年に一般国道452号線芦別

市に建設された2径間連続PC箱桁斜張橋である。本斜張橋は、道内最長となる橋長265 m、支間132.5 m + 132.5 m、幅員18.3 mの2径間連続箱桁を二面吊りした構造となっている。図-1には、本橋の概要および加速度計の配置位置を示している。また、写真-1には、全景を示している。

3. 実験概要

振動特性を評価した加振実験には、積荷により重量をコントロールしたトラック（総重量210 kN）を使用している。加振実験は、大きく2つの方法により実施した。すなわち、1) 車輛をある一定の速度で走行させる方法（以後、走行実験）、2) 所定の位置にチャンネル材を設置し、その上を車輛が乗り越えた後停止させることにより橋梁に衝撃を与える方法（以後、加振実験）である。表-1には、実験ケース一覧を示している。なお、走行実験は、全ケースでA1からA2方向に走行している。また、加振実験におけるチャンネル材は図-1に示すように支間1/4点に設置している。

3.1 車輛走行実験の概要

走行実験では、車輛を所定の速度で走行させることに

表-1 実験ケース一覧

実験方法	実験ケース	車輛の速度 (km/h)
走行実験	ケース 1	5
	ケース 2	10
	ケース 3	20
	ケース 4	45
衝撃加振実験	ケース 5	—

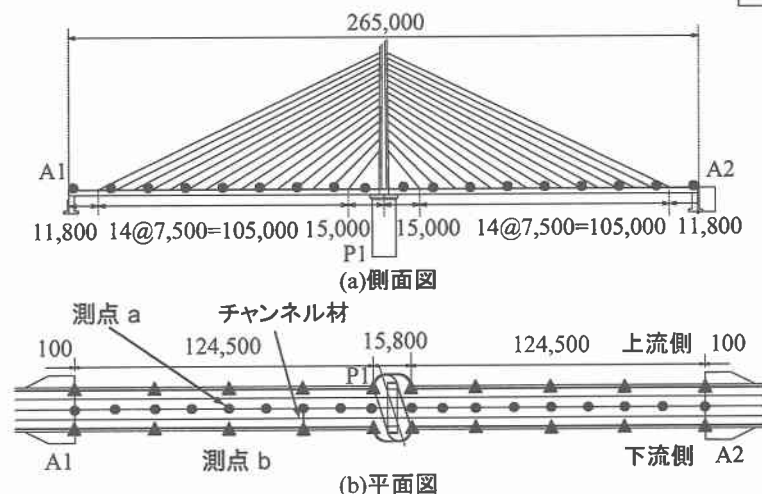


写真-1 星の降る里大橋の全景

● 曲げ振動成分計測時
▲ ねじり振動成分計測時

図-1 星の降る里大橋の概要および加速度計配置位置

総節点数 : 64,608
総要素数 : 75,490

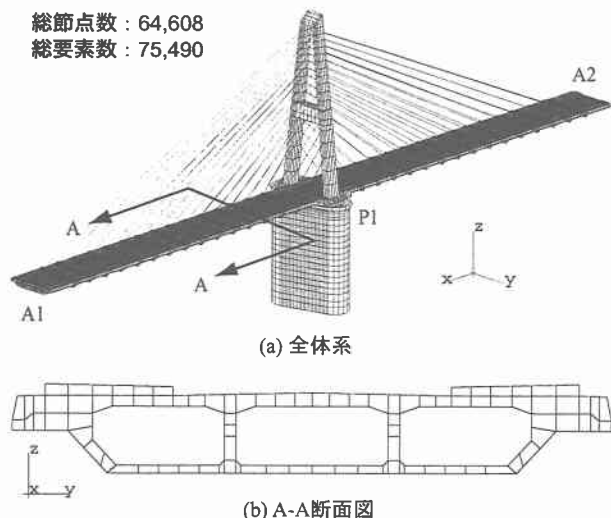


図-2 要素分割状況

より、橋梁に振動を励起させ、その後、車輛が橋梁部を通り抜けた後に減衰自由振動波形を測定している。また、走行速度が振動の励起や固有振動数に与える影響を調べるために、速度を5、10、20、45 km/hの4ケースについて行っている。

測定は、桁上にデジタルサーボ型加速度計を、曲げ振動成分計測時には桁中央部に18ch、ねじり振動成分計測時には上下流側端部にそれぞれ10chずつ合計20ch設置した(図-1参照)。加速度計からの出力波形は、10 msecのサンプリングタイムでメモリーレコーダ・アナライザーにて一括収録している。

3.2 車輛衝撃加振実験の概要

加振実験は、チャンネル材を路面上に置き、その上を車輛が乗り越えることにより橋梁に衝撃的な荷重を与える実験である。本実験では、車輛が支間の1/4点に置かれたチャンネル材を乗り越えた後急停止させる方法を採用している。なお、走行速度は20 km/hであり、計測器配置位置等は、走行実験時と同一条件である。

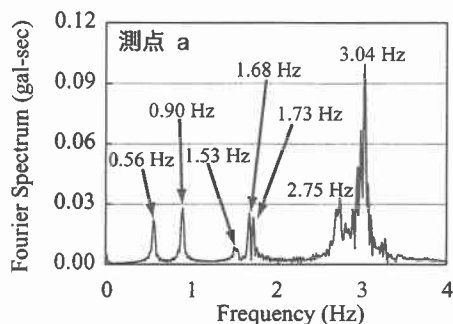
4. データ整理の概要

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および各固有振動モードの決定は、以下の過程に基づいて実施した¹⁾。すなわち、

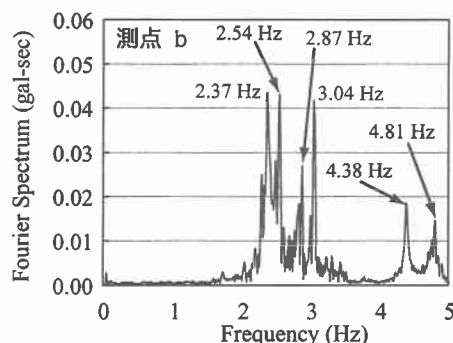
- 1) 収録された加速度波形に対して、ある一定時間について、FFT処理を施してフーリエスペクトルを求める。データは曲げ振動成分測定時およびねじり方向成分測定時には車輛走行後もしくは加振後20 sec間の減衰波形を用いている。
- 2) 主要な点に関するフーリエスペクトルから低次固有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。
- 3) 固有振動モードを求めるために、2)で着目した卓越振動数における全測点のフーリエスペクトル値および位相スペクトル値を求める。
- 4) 時間軸を統一し、かつ橋軸方向の最大振幅で正規化した状態で、1/2振幅ごとの時間における各測点の振幅を各測点にプロットする。
- 5) 各時間におけるモード分布の節や腹が軸方向に変動していないことを確認して、固有振動モードおよび固有振動数を決定する。

表-2 物性値一覧

	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	単位体積質量 γ (kg/m ³)
鉄筋コンクリート	29.4	0.2	2,500
鋼材	206	0.3	7,850



(a) 曲げ振動成分 (ケース4)



(b) ねじり振動成分 (ケース1)

図-3 加速度波形から得られたフーリエスペクトル

5. 有限要素法を用いた固有振動解析仮定

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、走行実験結果と比較することにより、解析手法の妥当性を検討している。

5.1 有限要素モデル

図-2に、本斜張橋の要素分割状況を示している。使用要素は、主桁、主塔および橋脚を8節点あるいは6節点固体要素で、ケーブルを3次元トラス要素でモデル化している。また、解析モデルは、ねじり振動モードの特定を行うため、全支間を対象としている。一方、計算の簡略化を考慮して主桁と比較して剛性および質量の小さいアスファルト舗装および高欄は無視することとした。表-2には、本解析で使用した物性値を一覧にして示している。

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、ケーブルの質量は、主桁および主塔のケーブル定着部に付加することとした。また、ケーブルには、設計条件と等しい張力(2.42～4.63 MN)を導入している。

各支点の境界条件は、設計条件と同様に可動支点に相当する節点を橋軸直角方向および鉛直方向に、また、橋

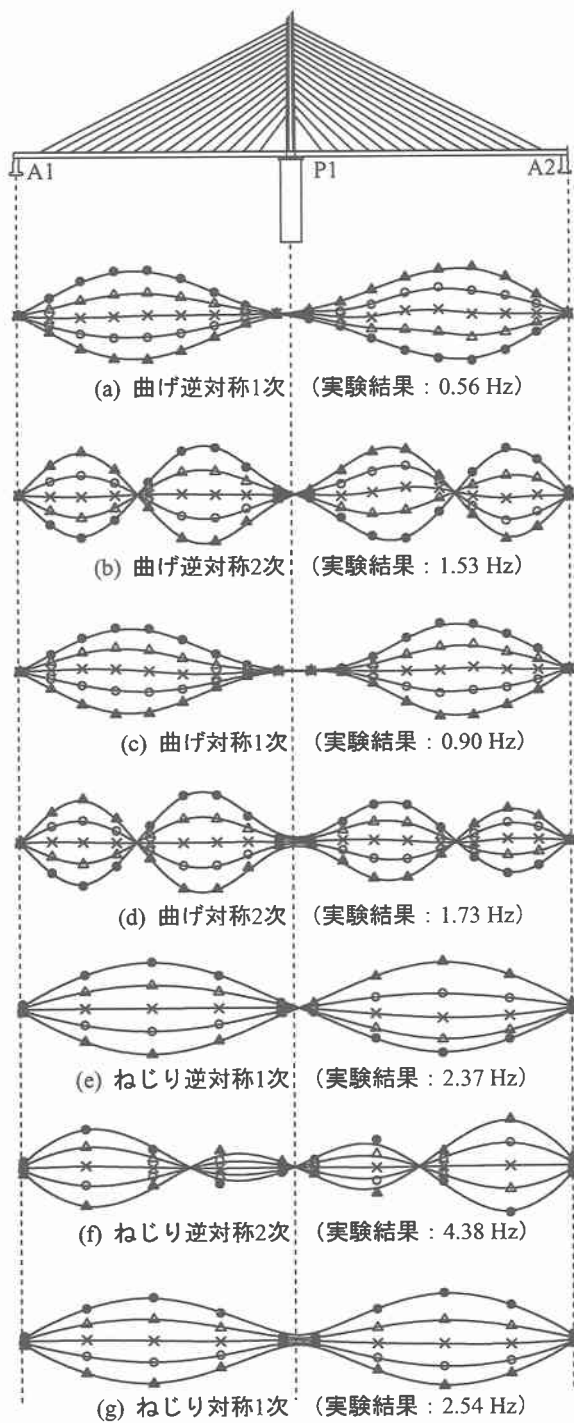


図-4 モード分布図（走行実験結果）

脚基部を完全固定としている。

6. 実験結果

6.1 車輛走行実験結果

走行実験では、前述したように車輛の走行速度を5、10、20、45 km/hの4ケースに変化させて実験を行った。図-3には、実験結果の一例として測点aおよび測点bで計測された加速度波形から求められた曲げ振動成分およびねじり振動成分のフーリエスペクトルを示している。図中の卓越振動数に対してモード図を作成し、固有振動数の特定を行った。

図-4には、フーリエスペクトルより求められた振動モード分布図を示している。なお、曲げ振動モードに関

表-3 固有振動数一覧

振動モード		固有振動数 (Hz)			
		ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
曲げ振動	逆対称1次	—	—	—	0.56
	逆対称2次	—	—	1.53	1.53
	逆対称3次	—	—	2.73	—
	対称1次	—	0.90	—	0.90
	対称2次	—	1.73	1.75	1.73
	対称3次	—	3.31	—	—
ねじり振動	逆対称1次	2.37	—	—	2.37
	逆対称2次	4.38	4.38	4.38	4.38
	対称1次	2.54	2.54	2.54	—

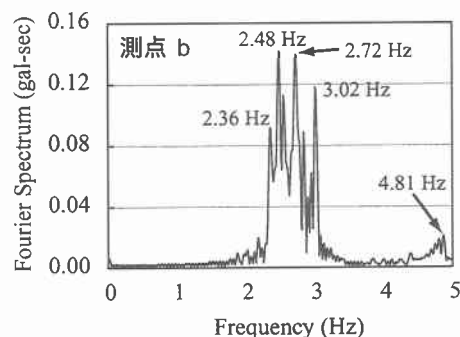
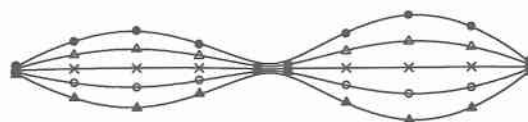


図-5 加速度波形から得られたフーリエスペクトル（加振実験；ねじり振動成分）



ねじり対称1次振動（実験結果：2.72 Hz）

図-6 モード分布（車輛加振実験結果）

しては、最低次固有振動数が求められたケース4の、ねじり振動モードに関してはケース1の結果である。図より、各振動モード分布図は、節と腹が明確に現れており、各固有振動数に対応するものであることがわかる。また、他の卓越振動数に関しては、連成振動モードであることを確認している。

表-3には、走行速度別に特定された固有振動数を示している。表より、速度の遅いケース1の場合には、曲げ振動モードに関する固有振動数の特定が困難であった。しかしながら、速度の増大とともに固有振動数が特定され、ケース4において、最低次固有振動数を含む4個の固有振動数の特定が可能であった。一方、ねじり振動モードに関しては、曲げ振動モードの場合とは異なり、速度の遅いケース1の場合に3個の低次固有振動モードの特定が可能であった。

これより、本実験の範囲内では、1) 曲げ振動成分に関しては、速度の増大とともに低次固有振動モードがより励起されること、一方、2) ねじり振動成分は、反対に速度の減少とともに低次固有振動モードが励起されることが明らかになった。また、車輛の速度が固有振動数に与える影響は少ないものの、速度によって、固有振動モードの特定が困難な場合もあることが明らかになった。

表－４ 解析結果と走行実験の比較

振動モード		解析結果 $f_a(\text{Hz})$	実験結果 $f_e(\text{Hz})$	誤差 f_a/f_e
曲げ振動	逆対称１次	0.60	0.56	1.07
	逆対称２次	1.45	1.53	0.95
	対称１次	0.91	0.90	1.01
	対称２次	1.65	1.73	0.95
ねじり振動	逆対称１次	2.20	2.37	0.93
	対称１次	2.35	2.54	0.93

6.2 車輛衝撃加振実験結果

図－５には、測点bで計測された加振実験結果より得られたねじり振動成分のフーリエスペクトルを示している。これらを前述の走行実験結果と同じように各固有振動数および固有振動モードの特定を行った。しかしながら、チャンネル材を支間1/4地点（図－１参照）に設置したため、ねじり対称1次振動モード以外の特定は困難だった。図－６には、ねじり対称1次振動モードを示している。なお、固有振動数および振動モードとも走行実験結果と比較的一致している。

7. 解析結果および車輛走行実験結果との比較

表－４には、解析結果における固有振動数 f_a を走行実験結果 f_e と比較して示している。また、表中には、各振動モードに対する誤差(f_a/f_e)を示している。表より、最大誤差が7%程度であり、いずれの振動モードにおいても概ね実験結果と一致していることがわかる。

図－７には、解析結果から得られる各固有振動モード分布を走行実験結果と比較して示している。図より、曲げ逆対称2次、曲げ対称2次振動およびねじり対称1次振動に関しては、若干の差異がみられるものの、他の振動モードは、実験結果とほぼ一致していることがわかる。

以上より、有限要素法による固有振動特性の評価方法は、工学的に妥当であると判断される。

8. まとめ

本論文で得られた結果を整理すると以下のようになる。

車輛走行実験結果より、

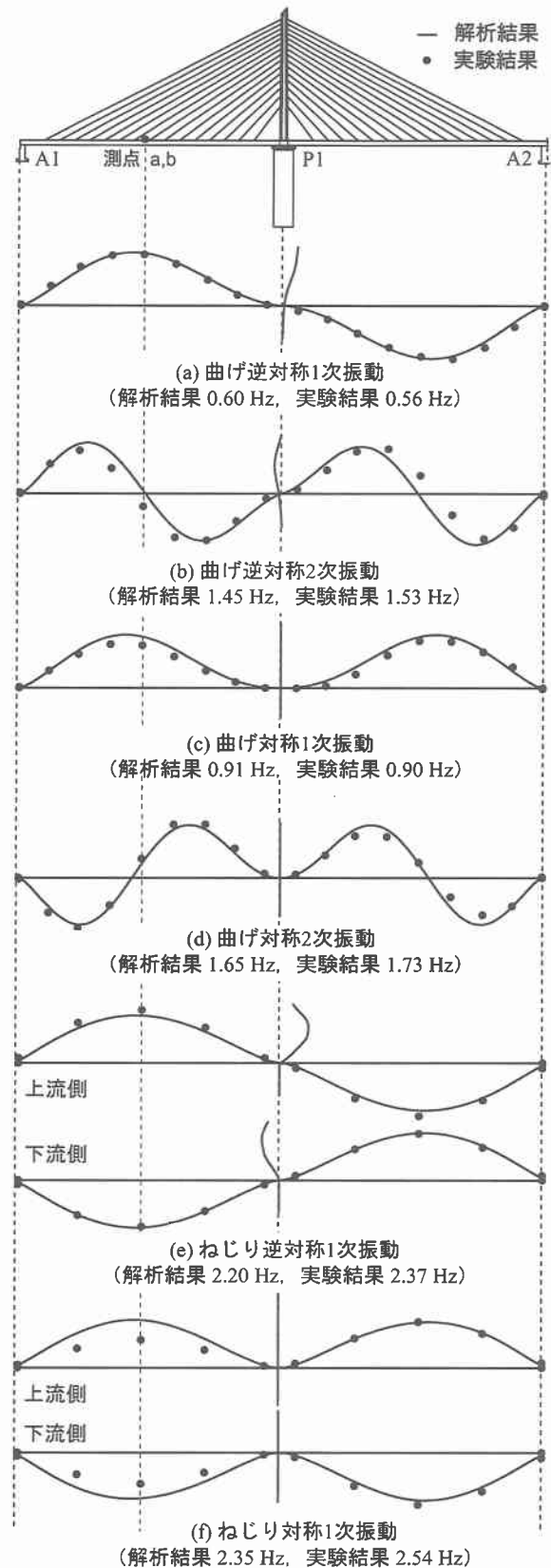
- 1) 曲げ振動成分に関しては、速度の増大とともに低次固有振動数が励起されること、ねじり振動成分に関しては、それとは反対に速度の減少とともに低次固有振動数が励起されることが明らかになった。
- 2) また、車輛走行速度が本斜張橋の固有振動数そのものに与える影響は少ないものの、速度によって固有振動モードの特定が困難な場合もあることが明らかになった。

加振実験結果より、

- 3) チャンネル材を支間1/4点に設置した実験ケースのみのため、ねじり対称1次振動のみの特定しかなかった。

三次元有限要素法による解析結果より、

- 4) 解析による固有振動数およびその振動モードは、走行実験結果とほぼ一致することが明らかになった。
- 5) これより、本解析手法は工学的に妥当なものと判断される。



図－７ 解析結果と走行実験結果の比較

参考文献

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