

観測波形を用いた神納橋の振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Sin-No Bridge using Observed Vibration Wave

室蘭工業大学

北海道開発土木研究所

(株) KGE

室蘭工業大学

正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

正 員 池田 憲二 (Kenzi Ikeda)

正 員 巽 治 (Osamu Tatsumi)

○学生員 堀越 弘美 (Hiromi Horikoshi)

1. はじめに

橋梁の固有振動特性は通常起振機を用いた加振実験を実施して評価している¹⁾。しかしながら、この種の実験は長時間車輛の通行止が必要であり、供用後の実施は不可能に近い。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²⁾し、石狩河川橋を対象として常時微動観測を実施し起振実験による測定や解析結果との比較を行い、その妥当性を検証した。

その後、提案手法の応用と妥当性の再確認のために、石狩河川橋と同一橋梁型式である神納橋を取り上げ、半スパンに限定して類似の検討を試みた³⁾。しかしながら、半スパンに限定したことにより特定が困難なモードの存在が判明した。また、微風条件下での観測であったために減衰定数評価も信頼性の乏しいものとなった。このような観点から、本研究では全スパンを対象とした観測波形を基に神納橋に関する固有振動特性を検討することとした。本研究では風荷重作用時のみならず各種車輛走行後の減衰振動波形の測定を実施することとし、解析結果も含め固有振動特性を総合的に評価することとした。

2. 神納橋の概要

神納橋は一般道道旭川深川線の石狩川に架設されている橋長 250.8 m の橋梁で、その主径間部は、図-1 に示すように全長 160.8 m の二径間連続鋼床版二箱桁斜張橋である。当初は、国道 12 号線の一部をなしており北海道開発局札幌開発建設部が建設を担当した。その後、パ

イパスの完成にともない北海道に移管されたものである。

本斜張橋は二径間連続桁を連続する 2 本のケーブルで吊る構造で、横断方向には両端に箱桁を配し、床版部は鋼床版型式となっている。主塔は下端がヒンジ、上端は下段ケーブルに固定してロッキングタワーとし、上段ケーブルはロッカー杓により固定されている。

3. 常時微動測定の概要

本斜張橋の固有振動特性を評価するために、両箱桁にサーボ型加速度計（容量：9.8 m/s²あるいは 19.6 m/s²、周波数特性：DC ~ 100 Hz）を設置し、常時微動観測を実施した。前回の観測では、測定位置を構造系や振動モードの対称性、経費の節約を考慮して、片側半スパンのみ 14 点に限定したため、詳細な検討が困難であった。そこで、今回は全スパンに渡り 22 点の計測点を設けることとした。図-1 には加速度計設置位置を示している。なお、測定する振動波形成分は全て鉛直方向加速度成分とし、サンプリングタイムは 10 msec としている。

本研究では、各種条件下におけるスペクトル分布や減衰定数評価を試みることを目的に風荷重作用下のみならず、車輛走行後の減衰波形の測定も併せて行うこととした。車種は機材運搬用ワゴン車、トラック、乗用車の 3 種類であり、特にワゴン車に関しては走行速度を時速 20 km と 40 km に設定して観測を実施した。他 2 種に関しては、一般走行車であることより時速 50 km 程度の速度となっている。なお、すべての測定は走行車輛の少ない夜間実施している。

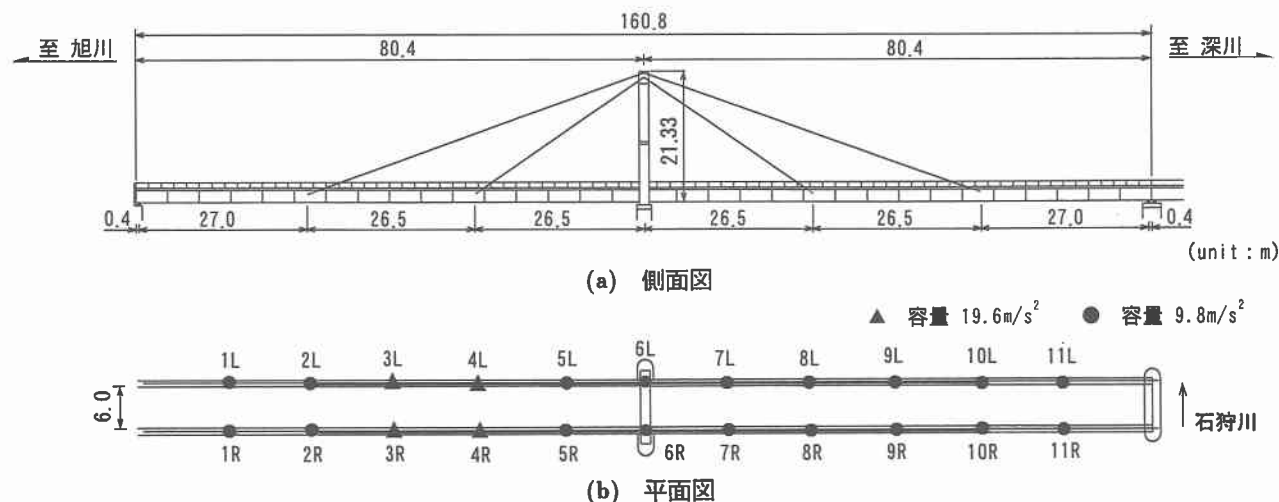


図-1 本斜張橋の概要図および加速度計設置位置

4. データ処理の概要

4.1. 固有振動数の決定

卓越振動数の抽出，固有振動モードの決定，固有振動数の決定は以下のデータ処理過程に基づいて行うこととした⁴⁾。なお，本研究では低次固有振動数に着目することとし，10 Hz 以下の卓越振動数に着目している。

- 1) 収録された全加速度波形から 10 sec（風による振動の場合は 60 sec）間に区切った波形データを用いて，FFT 処理を施しフーリエスペクトルおよび位相スペクトルを求める。データ数はいずれも 2^{13} 個である。
- 2) 主要な点に関するフーリエスペクトルから卓越振動数を抽出する。
- 3) 各卓越振動成分に対するモード分布を，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。
- 4) 振幅の大きい測点の波形を基準にし，1/2 振幅毎の振動モードを求め，高次振動モードやねじり振動モードとの連成，非連成を確認し，より信頼度の高い固有振動モード，固有振動数を決定する。

4.2. 減衰定数の決定

各固有振動成分に関する減衰定数は，以下の手順により算定した。すなわち，

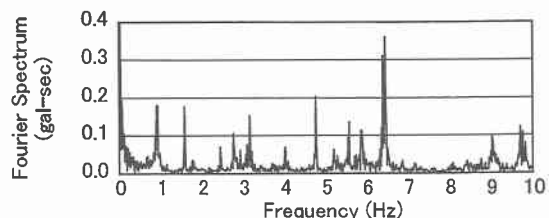
- 1) 各固有振動モードが卓越する測点に関するフーリエスペクトルに，着目している固有振動成分の周波数を中心として，バンドパスフィルター処理を施し，波形を生成する。
- 2) RD 法を適用し，高周波成分等のランダム波形の除去を行う。なお，車輦走行時には十分な振幅の減衰自由振動が励起されていることより，RD 法によるデータ処理は施していない。
- 3) 得られた波形に対して減衰自由振動を仮定し，半周期ごとの極大値，極小値に対して最小二乗法を適用し減衰定数を決定する。

5. 結果と考察

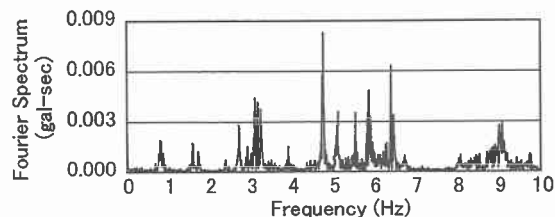
5.1. 風荷重作用下における振動波形の観測結果

図-2 には，測点 4L における 10 Hz までのフーリエスペクトル図を示している。前回は微風状態下の観測であったため，高次振動成分に対して低次振動成分のスペクトル値が小さく示されている。それに対して，今回は適度な風速（3.3 m/s）状態下での観測であるため，低次から高次に至るまでほぼ同程度のスペクトル値を示していることがわかる。

次に，フーリエスペクトル図を基に，各卓越振動数に関するモード図を作成し，固有振動数の特定を行った。図-3 には曲げ振動に関するモード分布を，表-1 には固有振動数を前回の測定結果と比較して示している。図より，対称振動に関しては若干他の振動成分との連成が見られるが，大略固有振動成分のみのモード分布を示していることがわかる。表より，曲げ振動成分に関しては，今回の測定結果に基づいた振動数が前回のそれよりも大きく評価されている。特に逆対称一次振動に関しては約 10 % の増加となっている。これは，前測定が比較的温暖な時期（平成 12 年 10 月中旬）に実施されたのに

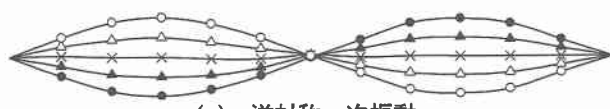


(a) 今回の測定（風速 3.3 m/s）



(b) 前回の測定（微風状態）

図-2 風荷重作用下の 4L 測点におけるフーリエスペクトル



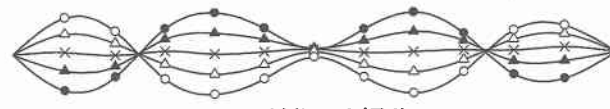
(a) 逆対称一次振動



(b) 逆対称二次振動



(c) 対称一次振動



(d) 対称二次振動

図-3 風荷重作用下におけるモード分布図

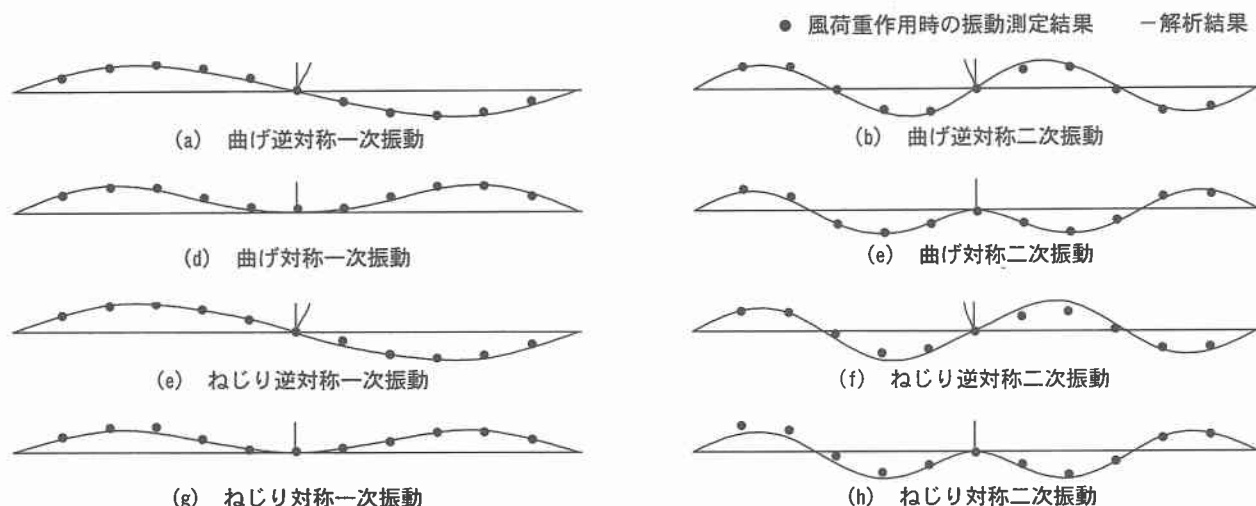
対し，今測定は積雪寒冷時（平成 13 年 11 月下旬）に実施しているため温度低下によってアスファルトの剛性増加あるいは支承部の凍結による摩擦力の増加等が影響しているものと推察される。また，前回の測定による結果は半スパンのみの測定であることにより，特に曲げ振動の対称一次やねじり振動の逆対称一次，対称一次振動モードの特定が困難であった。今測定時には全スパンに渡って測定を実施していることにより，全ての振動モードに対して明確に特定できることがわかる。

5.2. 解析結果

前節で得られた各固有振動数の妥当性検討のため，前測定時に併せて行った三次元有限要素法を用いた固有振動解析結果との比較を試みる。表-1 には解析結果の固有振動数を，図-4 には各固有振動成分に関するモード分布を風荷重作用下における観測より得られた結果と比

表－1 固有振動数（Hz）一覧

固有振動数		解析結果	風荷重作用時の振動		車輛走行後の減衰振動			
			今測定 (風速 3.3 m/s)	前測定 (微風)	ワゴン車		トラック	乗用車
					時速 20 km	時速 40 km		
曲げ	逆対称一次	0.82	0.90	0.82	0.92	0.89	0.88	0.92
	逆対称二次	2.90	2.80	2.72	2.82	2.81	2.80	2.82
	対称一次	1.68	1.77	1.59 または 1.72	1.78	1.78	1.77	1.78
	対称二次	3.72	4.03	-	4.04	4.03	4.02	4.03
ねじり	逆対称一次	2.37	2.45	3.10 または 3.25	-	-	-	-
	逆対称二次	5.27	5.21	4.75	-	-	-	-
	対称一次	2.88	3.08	3.10 または 3.25	-	-	-	-
	対称二次	5.69	6.46	-	-	-	-	-



図－4 固有振動モード分布に関する解析結果と風荷重作用化における測定結果の比較

較して示している．表より，固有振動数に関しては曲げ逆対称二次，ねじり逆対称二次振動を除いて，全て実測結果が解析結果よりも大きい値を示している．その程度は，曲げ逆対称一次，ねじり対称二次振動で 9.8，13.5 % であるが，その他は数 % に留まっている．

図－4 の各固有振動モードの比較より，観測波形から評価されるモード分布は解析結果と大略類似していることがわかる．これより，全スパンに渡って振動波形を測定することを条件に，風速数 m/s 程度の風荷重作用下においても低次固有振動数，振動モードを適切に抽出，評価可能であることがわかる．

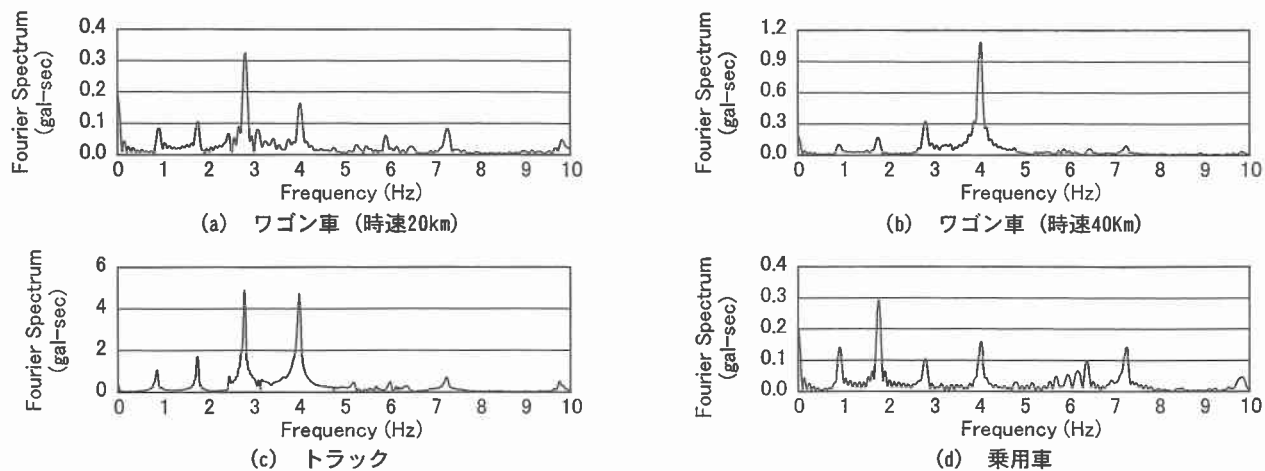
5.3. 車輛走行後の減衰振動波形の測定結果

本研究では風荷重のみが作用する場合の他，前述のように機材運搬用のワゴン車やトラック，乗用車走行後の減衰自由振動波形の測定も実施した．図－5 には各測定ケースにおけるフーリエスペクトル分布を，表－1 には特定された固有振動数を示している．

まず，フーリエスペクトル分布に関する比較を行う．図－2 より風荷重作用時の振動波形の場合スペクトルが増減の激しい分布を示し，固有振動成分とランダム波成分が合成された特性を呈している．一方，図－5 より車輛走行後の減衰波形の場合には平滑化された分布特性を示し，また，主に各固有振動成分のみによって合成された振動が発生していることがわかる．各車輛走行後のス

ベクトルを比較すると，(a)，(b) 図より，走行速度の大小によりスペクトル分布の異なることが分かる．すなわち，時速 20 km の場合は 40 km の場合に対して低次振動成分のスペクトル値がより均等化されていることがわかる．トラック走行時の場合には，ワゴン車走行時よりもスペクトルの平滑化の著しいことがわかる．これは，トラックの車輛重量がワゴン車より大きく振動振幅も大きくなることより，ワゴン車走行時よりも低次固有振動成分が卓越していることを示唆している．乗用車走行時には最も卓越する振動数が 2 Hz 前後に示されているが，大略ワゴン車の時速 20 km のスペクトル分布に類似している．また，乗用車走行時を除くと，曲げ逆対称二次，対称二次振動のスペクトルの卓越が顕著であることより，上段および下段ケーブル定着部の中間部を節部とする振動が励起されやすいことがわかる．

次に固有振動数に関する検討を行う．なお，本斜張橋は一車線道路で車輛が桁中央部を走行していることより，ねじり振動成分の励起は小さく，特定が困難であったため，その固有振動数は評価していない．表より，いずれの固有振動数に対しても，車輛重量の最も重いトラック走行時の値が若干小さいことがわかる．これは，図－5 にも示されているように，車輛重量が大きいことにより振動振幅も大きく，支持部の摩擦切れ等の現象が表されたことによるものと推察される．



図ー５ 各車輛走行後の減衰波形に関する測点 4L におけるフーリエスペクトル

表ー２ 減衰定数一覧

振動モード		風荷重 3.3m/s	ワゴン車		トラック	乗用車
			20km/h	40km/h		
曲げ	逆対称一次	0.0241	0.0144	0.0208	0.0214	0.0206
	逆対称二次	0.0124	0.0071	0.0071	0.0078	0.0061
	対称一次	0.0084	0.0060	0.0072	0.0078	0.0065
	対称二次	0.0061	0.0068	0.0068	0.0077	0.0067
ねじり	逆対称一次	0.0053	-	-	-	-
	逆対称二次	0.0095	-	-	-	-
	対称一次	0.0070	-	-	-	-
	対称二次	0.0020	-	-	-	-

5.4. 減衰定数評価

風荷重作用時の振動波形および車輛走行後の減衰自由振動波形を用いて減衰定数の評価を試みる。なお、風荷重作用時には振動の励起が小さいことより 60 sec 間の測定データに対して RD 法を適用し評価することとした。一方、車輛走行後の減衰自由振動波形に関してはいずれの場合も 10 sec 間のデータを用いて評価している。表ー２には、各測定データから得られた減衰定数を一覧にして示している。表より、いずれの測定ケースに関しても各固有振動成分の一次振動に対する減衰定数が二次のそれよりも大きいことがわかる。これは、ケーブル定着部が大きく影響しているものと考えられる。すなわち、一次振動の場合には定着部が振動の腹部に位置することより、ケーブル張力によって減衰が大きく評価されるものと推察される。一方、二次振動の場合には 2 本のケーブルの張力が均等化され、ケーブル張力の復元力が相殺されるようなモード分布となり、したがって減衰定数も小さな値として評価されるものと推察される。

各振動ケースで比較すると、風荷重作用時には、車輛走行時よりも減衰定数大きい。これは、風荷重作用時の振動振幅が小さいことによるものと推察される。また、車輛走行時の場合、曲げ逆対称一次振動に関してはワゴン車の時速 20 km の場合を除き、三者で類似の値を示している。その他の振動では、ほぼ同様な値を示している。以上の結果より、本斜張橋は曲げの逆対称一次振動モードに関しては 2 % 程度、他は 0.7 ~ 1.0 % 前後の分布を示していることがわかる。

6. まとめ

- 1) 風速数 m/s 程度の風荷重作用時の振動波形の観測によって、各振動モードの低次固有振動数を適切に抽出可能であることが明らかとなった。
- 2) フーリエスペクトル分布において風荷重作用時の振動波形の場合スペクトルが増減の激しい分布を示すのに対し、車輛走行後の減衰波形の場合には平滑化された分布特性を示すことが明らかとなった。
- 3) 曲げ逆対称二次、対称二次振動のスペクトルの卓越が顕著なことより、上段および下段ケーブル定着部の中間部に節部をもつ振動が励起されやすいことが明らかとなった。
- 4) 各振動成分において一次振動の減衰定数が二次振動のそれより大きい。これは、振動モードにおいて一次振動はケーブル定着部が腹部となり、二次振動においては 2 本のケーブル張力による復元力が相殺されるようなモード分布となるためであると推察される。

謝辞：実験データ処理を行うにあたり、(株) KGE の高橋朋代君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，丸善(株)，2000.10.
- 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発表論文報告集，Vol.57，pp.116-119，2001.2.
- 3) 新山 惇，岸 徳光，三田村 浩，佐藤昌志，堀越弘美：常時微動観測による神納橋の振動特性評価，土木学会北海道支部研究発表論文報告集，Vol.57，pp.120-123，2001.2.
- 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) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.7, Hibbitt Kalsson & Sorensen Inc., 1999.