

# 日高自動車道における新設橋梁での現地振動実験と振動特性の比較

室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所 第2工務課 ○田邊 彩都  
 室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所 道路施工保全官 丹羽 敏和  
 室蘭工業大学 もの創造系領域 土木工学ユニット 瓦井 智貴

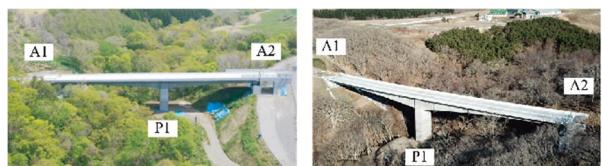
供用後の橋梁の維持管理に資する基礎データを取得することを目的として、日高自動車道において新設した支間長や平面形状が異なる2種類の2径間連続PCラーメン箱桁橋に関する現地振動実験および3次元固有振動解析を実施した。実験は、20 tonに重量調整したダンプトラックを用いて2橋での走行試験を行い、固有振動数及び対応する振動モードを同定した。また、支間長や平面形状等の違いが振動特性に与える影響について検討を行ったので報告する。

キーワード：橋梁、維持管理、固有振動特性

## 1. はじめに

我が国のインフラは高度経済成長期に集中的に整備された。その結果、今後供用後50年を迎える橋梁が急増することより、急速な老朽化が懸念されている。このような状況を背景として、近年インフラの戦略的かつ合理的な維持管理を目的に、IoTやAIを活用した新たなモニタリング技術が開発・検証・実用化されつつある<sup>1)</sup>。さらに、構造物に各種センサを設置し、その挙動に関する常時監視を通して構造性能を診断する構造ヘルスモニタリング（SHM）の研究も活発に進められている（例えば、<sup>2)</sup>）。しかしながら、常時モニタリングは初期導入および維持管理コストが高く、すべてのインフラに適用することは現実的ではない。そのため、限られた計測データから構造

性能を効率的に把握できるような評価手法の高度化が求められている。このような課題に対する取り組みとして、北海道内の既設あるいは新設の橋梁を対象に現地振動実験を実施し、固有振動数や振動モードの同定がなされてきた。また、供用開始前の固有振動特性評価を目的として、設計図書に基づいて有限要素モデルを構築し、



(a) 稲荷川橋 (b) 神山川橋

写真-1 対象橋梁の全景

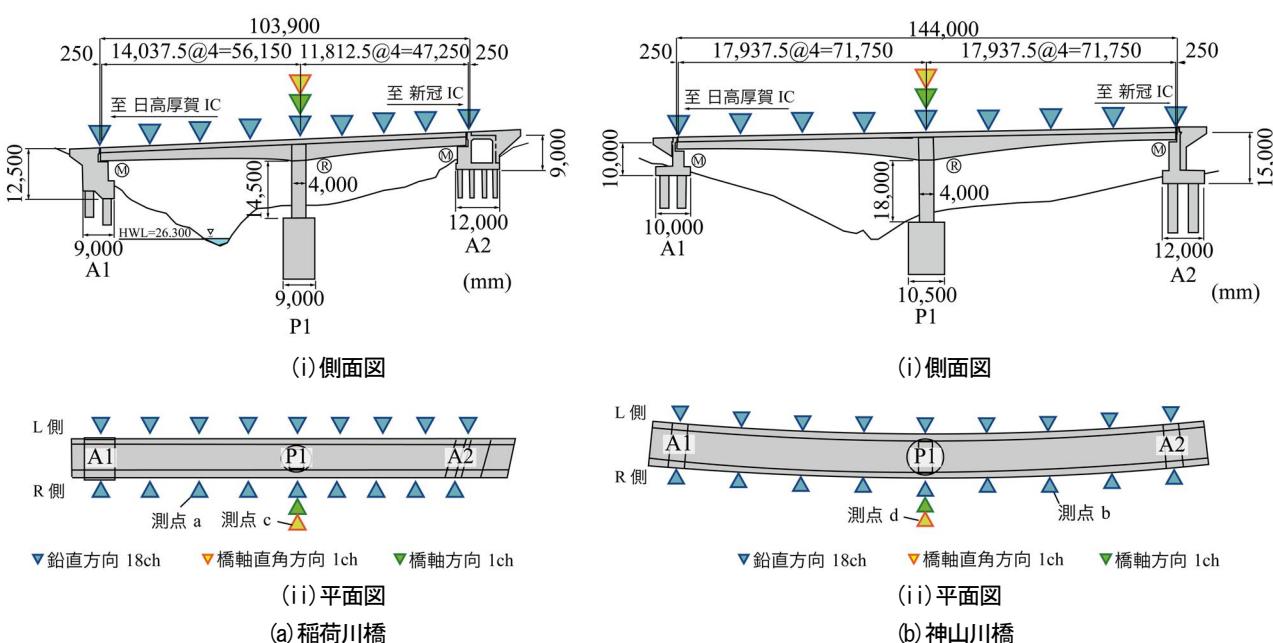
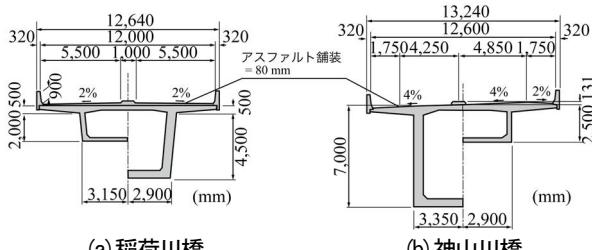


図-1 対象橋梁の形状寸法および振動計設置位置



(a) 稲荷川橋 (b) 神山川橋

図-2 対象橋梁の断面図

表-1 対象橋梁の諸元

路線	日高自動車道	
橋梁名	稲荷川橋	神山川橋
形式	2径間連続PCラーメン箱桁橋	
橋長	103.9 m	144.0 m
支間	56.2 m+47.3 m	2@71.8 m
幅員	12.0 m	12.6 m
平面形	直線	曲線
縦断勾配	4%	1.968%
斜角	A2のみ約75°	無し

数値解析結果と実測結果との比較から橋梁の健全度評価も実施してきた<sup>例えは、3)、4)</sup>。このような健全度評価を適切に行うためには、基準となる供用開始時点の固有振動特性を高精度に把握しておくことが極めて重要である。しかしながら、実務上技術的・経済的制約から全ての橋梁に対して供用開始前の現地振動実験を実施することは困難であり、さらに橋梁形式の違いによる固有振動特性の体系的な知見も十分に蓄積されていないのが現状である。このような背景から、供用開始前における新設橋梁の固有振動特性を把握し、数値解析による固有振動特性推定の妥当性検討に資するデータを蓄積することは、合理的な維持管理の実現に向けて極めて重要であると考えられる。

このような観点より、今回、これまでに検討されていない供用開始前の新設橋梁である橋長や曲率の異なる2橋の2径間連続PCラーメン箱桁橋を対象に現地振動実験を実施した。本稿では、令和7年度内に開通予定の日高自動車道（日高厚賀IC～新冠IC）に新設した2橋の橋梁に関して、車両走行後および人力加振後の自由振動計測、ならびに常時微動計測を実施し、両者の固有振動特性について比較・検討を実施した。また、固有振動特性を適切に評価可能な数値解析手法の構築を目的として、3次元固有振動解析<sup>5)</sup>も合わせて実施し、実験結果との比較によって数値解析モデルの妥当性についても検討を行った。

## 2. 対象橋梁の概要

写真-1には対象橋梁の全景を、図-1にはそれらの一般



モニタリング・計測 PC、データ受信



図-3 計測システムの概要図



(a)並列走行

(b)直列走行

写真-2 大型車両による加振状況(稲荷川橋)

図および振動計の設置位置を、図-2には対象橋梁の断面図を示している。また、表-1には橋梁の諸元を示している。

本検討で対象とした橋梁は、日高厚賀ICから新冠ICに至る日高自動車道に新設されている2径間連続PCラーメン箱桁橋である。1橋は直線桁で橋長が短く各支間長が異なる稲荷川橋であり、他橋は曲線桁で橋長が長く各支間長が等しい神山川橋である。断面形状に関しては、図-2に示す通り、いずれも箱桁であるもののその形状が異なり、全スパンに渡って神山川橋の桁高が稲荷川橋よりも高い。また、稲荷川橋のA2にのみ約75°の斜角を有している。

下部構造形式は、稲荷川橋の場合には、A1橋台：逆T式橋台、A2橋台：ラーメン式橋台、P1橋脚：柱式橋脚であり、神山川橋の場合には、A1、A2橋台：逆T式橋台、P1橋脚：柱式橋脚である。なお、いずれの橋梁も橋台上端支点部には密閉ゴム支承板支承(BP・B)が用いられている。本振動実験は、供用開始前の2025年9月20日に実施した。

## 3. 振動実験の概要

### (1) 振動計配置および計測方法

図-3には、本実験で使用した計測システムの概要を示している。本実験では、橋梁の固有振動モードを可能な

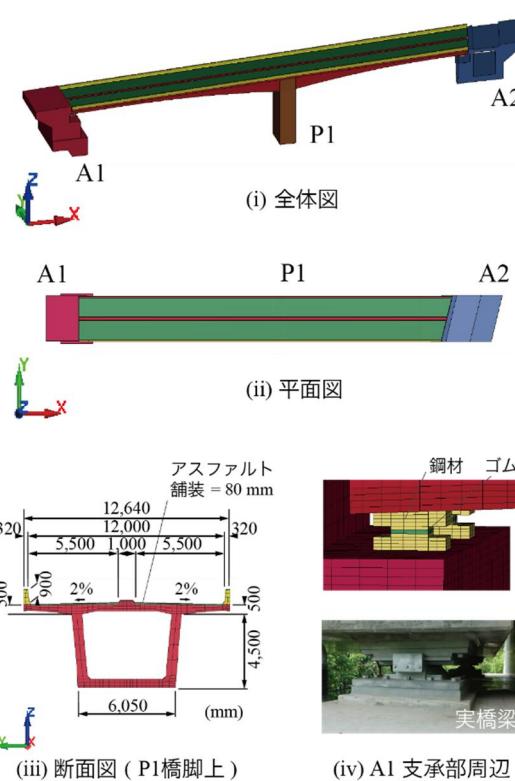


図4 有限要素モデルの一例(稻荷川橋)

限り精度よく把握するために、0.03 galまで測定可能な高精度デジタルサーボ型振動計を用い、図-1に示すように各橋梁上部工に20点ずつ設置した。ここでは、曲げおよびねじり振動モードを特定するためにL/R両側に計18点（感度方向：鉛直方向、片側9点）、橋軸方向および橋軸直角方向の振動特性を確認するために橋脚上のR側に1点（感度方向：橋軸方向および橋軸直角方向、各1点）を設置した。サーボ型振動計からの出力は、アンプユニット、無線LANを介して受信用アンテナに接続されたノートPCに送信される。なお、本実験では、全ての振動計からの加速度波形データを5ミリ秒のサンプリングタイムで収録することとした。

## (2) 実験方法

振動実験は、(1) 20 tonに重量調整された大型車両走行後、(2) 各径間中央部における人力加振後、および(3) 常時微動時の自由振動状態における加速度波形データを収録することとした。

写真-2には、大型車両走行による加振状況を示している。大型車両を用いて加振する場合には、(a) 各車線中央部を2台並走走行する場合（以後、並列走行）や、(b) 片側車線を2台の大型車が縦列して走行する場合（以後、直列走行）について、走行速度（30～70 km/h）や進行方向を変えて複数回実施した。

表2 物性値一覧

材料	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数 $E$ (MPa)	ポアソン比 $\nu$
上部工コンクリート	2.50	31,000	0.2
下部工コンクリート	2.50	25,000*	0.2
アスファルト	2.30	10,000	0.35
ゴム	1.50	655	0.49
鋼材	7.85	200,000	0.3

\*神山川橋のP1橋脚のみ  $E = 28,000$  MPa

## (3) 固有振動数の決定方法

実測加速度波形を用いた固有振動数および固有振動モードの決定方法は、以下の流れに沿って実施した。

- 1) 大型車両走行後あるいは人力加振後および常時微動の自由振動状態における全加速度波形を連続して180秒間収録する。
- 2) 全測点の収録波形に関する32,768 ( $2^{15}$ ) 個のデータ（163.84秒間）に対してFFT処理を施し、フーリエスペクトルを求める。
- 3) 主要な測点において、計測された応答波形のフーリエスペクトルから固有振動数と想定される卓越振動数を抽出し、その卓越振動数に対する全測点のフーリエスペクトル値、位相スペクトル値を求め、全測点における加速度波形を生成する。
- 4) 3) で求められた各測点の加速度波形について、振幅の大きい測点の波形を基準にして正規化し、1/8周期毎に橋軸方向全測点における振幅値をプロットして振動モードを求め、振動モードの節および腹の位置が各周期毎で移動せず、モードが連成していないことを確認して、固有振動モードを決定する。

## 4. 数値解析の概要

図-4には、本検討で作成した数値解析モデルの一例として稻荷川橋の有限要素モデルを示している。また、表-2には数値解析に用いた各材料の物性値の一覧を示している。

図に示す通り、対象橋梁の線形や曲率、縦断勾配、斜角等を実橋梁に対応して可能な限り詳細にモデル化している。また、各材料には全て8節点固体要素を用いている。支承部に関しては、実際には複雑な形状を有しているものの、本検討では図-4(iv)のように簡素化したモデルを用いている。また、各材料の密度や弾性係数は、表-2に示す通り公称値や設計図書に基づいた値を採用しつつ、必要に応じて予備解析を実施して決定した。

実構造では多くの鉄筋やPCケーブルが配置されている。しかしながら、振幅が小さく橋梁本体が弾性的に挙動するものと推察されることから、PCケーブルを含む

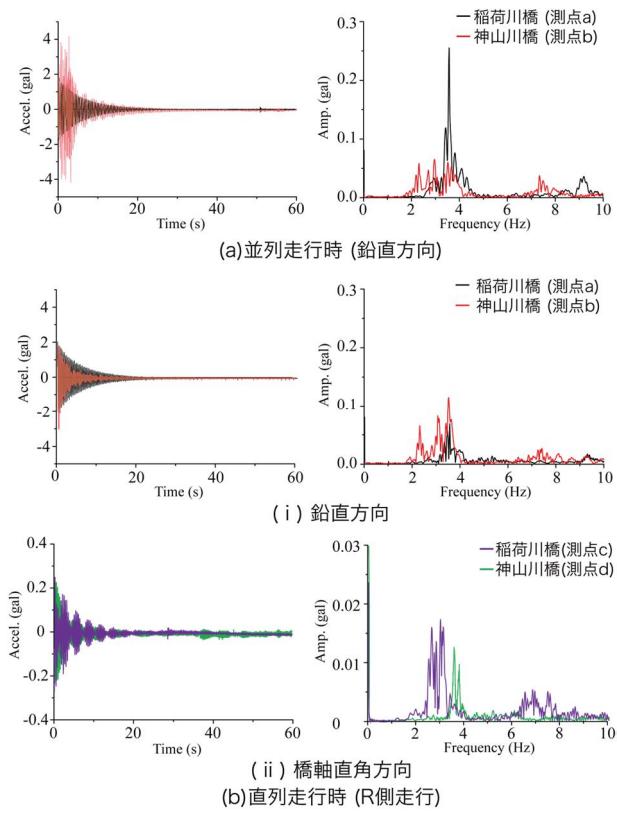


図-5 加速度波形およびFFT結果（50 km/h走行時）

鉄筋コンクリート構造として一体化してモデル化することとした。したがって、コンクリート部材の物性値は、PCケーブルが配置された鉄筋コンクリート構造であることを考慮しつつ設計図書を参考に決定した。また、実際の橋梁では橋脚下部は地盤で覆われている。しかしながら、本解析では簡略化してそれらを無視し、橋台底面あるは橋脚のフーチング上面を完全固定と設定した。

## 5. 実験結果および解析結果の考察

### (1) 計測加速度波形とフーリエスペクトル

図-5には、実験結果の一例として、大型車両を並列走行あるいは直列走行させた後の加速度波形とその加速度波形から求められたフーリエスペクトルを示している。着目点は図-1に示す測点a～dであり、車両の走行速度は、いずれも50 km/hである。図-5より、大型車両走行後の鉛直方向加速度に関する自由振動波形を見ると、並列走行後における最大加速度は、稲荷川橋の場合には1.7 gal程度、神山川橋の場合には4 gal程度となっている。また、直列走行後における最大加速度は、稲荷川橋の場合には2 gal程度、神山川橋では3 gal程度となっており、走行位置によらず神山川橋の場合が稲荷川橋の場合よりも若干大きい。これは、稲荷川橋および神山川橋の支間長がそれぞれ 56.2 m、71.8 mであり、神山川橋が稲荷

橋に比較して15 m程度長いことによるものと推察される。また、同図より鉛直振動に関しては、複数の卓越振動数の存在も確認できる。

次に、直列走行後における橋軸直角方向の加速度波形を見ると、各橋梁における最大加速度は0.02 gal程度と鉛直方向加速度と比較して小さいものの、いずれの橋梁においてもいくつかの卓越振動数が確認できる。

### (2) 振動モード分布

図-6には、図-5に示したフーリエスペクトルの下に特定した、大型車両が時速50 km/hで並列走行後における2橋の固有振動モード分布図の一例を示している。また、固有振動解析から得られた各固有振動モードの分布を実験結果と比較する形で示している。図中、いずれの結果に関しても、固有振動モードは全てR側の最大振幅を用いて正規化しており、青線はL側、赤線はR側における振動モードを示している。なお、実験結果において計測時の不具合により計測ができなかった箇所は、欠損状態となっている。

図-6より、実験・数値解析結果とともに、両橋においてそれぞれ曲げ1、2次、ねじり1次の3つの振動モードが確認できる。まず、(i)図より曲げ1次振動モードに着目すると、実験結果において、稲荷川橋の場合には連続橋であることから径間ごとに最大振幅の正負が異なるモードを示していることが分かる。一方で、神山川橋の場合には、L/R両側においてA1-P1間の最大振幅がP1-A2間よりも若干大きく、稲荷川橋と類似の傾向を示しているものの、各支間における最大振幅はほぼ同様である。これは、前述の通り、稲荷川橋はA1-P1間の支間がP1-A2間に比較して長いのに対して、神山川橋の場合には各支間が等しいためと推察される。数値解析結果は、A1-P1側の振動モードが卓越していることも含めて、実験結果と概ねよく対応していることが分かる。

次に、(ii)図より曲げ2次振動モードに着目すると、実験結果において両橋ともにP1橋脚を中心に各支間で正負が等しい曲げ挙動を呈していることが分かる。詳細にみると、稲荷川橋の場合にはL/R両側でP1橋脚の測点から1つA1寄りの測点における振幅が非常に小さく、かつ曲げ1次とは異なりP1-A2間の最大振幅がA1-P1間よりも大きい。これは、稲荷川橋の場合には若干斜角を有していることなどが要因であるものと推察される。一方で、神山川橋の場合には、概ね左右対称なモードを呈しているものの、L側の振幅がR側よりも若干大きい。これは、曲線桁であることなどが要因であるものと推察される。数値解析結果は、両橋共に概ね実験結果と対応しているものの、(b)-(ii)図において解析結果のみ橋軸直角方向に振動する挙動が確認された。これは、橋梁の拘束条件や支承部を簡略化していることなどが要因であるものと推察される。

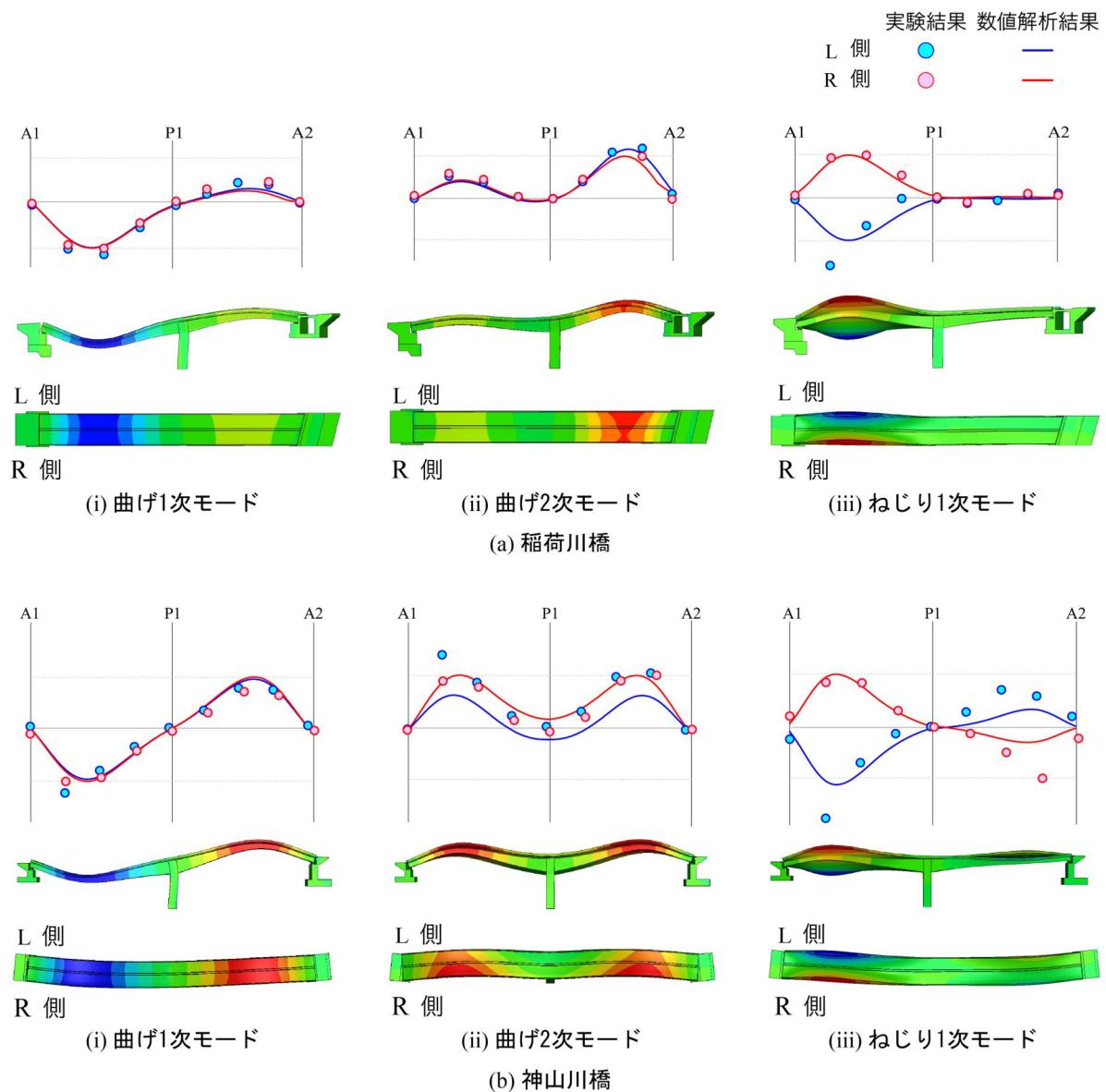


図-6 実験結果と数値解析結果に関する振動モード分布の比較

(iii) 図に示すねじり1次振動モードを見ると、実験結果は、前述の通り縦断勾配や支間の違い等で両橋において若干の差異があるものの、両橋ともにA1-P1間で最大振幅を示すねじり振動の様相を呈していることが分かる。数値解析結果は、両径間の振幅が類似していることも含め実験結果と概ね対応していることが確認できる。

### (3) 各固有振動数の比較

表-3には、本検討で実施した車両走行後、人力加振後、常時微動の3種類の振動実験結果および数値解析結果から特定された固有振動数を一覧にして示している。

表より、実験結果は加振方法によって得られる固有振動数や振動モードが若干異なるものの、その差は小さい。ここで、両橋の固有振動数を見ると、振動モードによらず稻荷川橋の固有振動数は神山川橋に比較して1~2 Hz程度大きい。これは、1) 稲荷川橋の橋長が神山川橋に

比較して 40 m 程度短いことや、2) 図-2に示す通り、断面寸法も必ずしも同様でないこと、等によるものと推察される。

次に、数値解析結果に着目すると、いずれの固有振動数に関しても、実験結果よりも若干差のあることが読み取れる。しかしながら、その差は7%以下となっており、提案の解析モデルを用いることによって、供用開始前である本橋梁のモード分布を含めた固有振動特性を概ね適切に再現可能であることが確認された。なお、固有振動数に関する実験結果との差異に関しては、1) 設計時の強度を基に各種材料パラメータを決定しているものの、実強度とは必ずしも対応しないことや、2) 橋台部におけるゴム支承を簡易にモデル化していること、等によるものと推察される。

表-3 本研究より得られた固有振動数の比較

対象橋梁	固有振動モード	実験結果								解析結果 (実験結果との最大誤差)	
		並列走行			直列走行			人力 加振	常時 微動		
		30km/h	50km/h	70km/h	30km/h	50km/h	70km/h				
稲荷川橋	曲げ1次	3.55	3.54	3.52	3.53	3.55	3.55	3.55	3.56	3.41 (-4.2%)	
	曲げ2次	-	5.13	-	-	-	-	5.12	-	4.98 (-2.9%)	
	ねじり1次	-	8.41	-	-	-	-	-	-	8.93 (6.2%)	
神山川橋	曲げ1次	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.23	2.31	-	2.31 (3.6%)	
	曲げ2次	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.06	3.13	2.97 (-5.1%)	
	ねじり1次	-	7.20	-	-	-	-	-	-	7.43 (3.2%)	

## 6.まとめ

本検討では、供用開始前の2橋の2径間連続PCラーメン箱桁橋を対象に、その固有振動特性の評価およびそれらを適切に評価可能な数値解析手法の構築を目的として、現地振動実験および三次元固有振動解析を実施した。ここでは、得られた解析結果を実験結果と比較することによって提案手法の妥当性を検討した。本検討の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 2橋の2径間連続PCラーメン箱桁橋に関して、2つの曲げ振動モード、1つのねじり振動モードを特定した。
- (2) 車両走行、人力加振、常時微動の加振方法によって得られる固有振動数に大きな差異はない。
- (3) 同様の構造形式の場合においても、橋長や支間長、勾配や断面形状の差異によって、固有振動特性に明確な差異が表れることを確認した。
- (4) 有限要素法を用いた3次元固有振動解析によって得られた振動モードは実験結果と大略一致することが確認された。
- (5) 各振動モードに対応する固有振動数に関しては、曲げ振動モードに関する数値解析結果は実験結果を若干過小に評価するものの、その差は最大でも7%以下の精度で評価可能であることが確認された。

今回は室蘭工業大学構造力学研究室の協力を得て

検討を行ったが、設計図書および各種定数に一般値を設定してモデル化することで、新設時の橋梁における固有振動特性（固有振動数・固有振動モード）を概ね把握可能であることを確認した。

橋梁の劣化が進行すると、一般に固有振動数の低下、振幅の増加等の特徴が現れる。今後は、この特徴に着目し、供用後の現地振動計測と固有振動解析を組み合わせることで、劣化程度の定量評価や健全度判定を行い、最適な補修・補強時期の特定に資する技術が確立され、維持管理の効率化が図られると考える。

## 参考文献

- 1) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）インフラ維持管理・更新・マネジメント技術プロジェクト紹介・開発技術の概要、2018.
- 2) 服部洋、松山卓真、別所謙、岡野雅、白土博通、八木知己：振動応答モデルを用いた損傷規模検知手法に関する研究、土木学会論文集A2（応用力学）、Vol.69、No.2、1741-I-1749、2013.
- 3) 西弘明、佐藤京、小室雅人、岸徳光：供用後73年経過した旭橋の固有振動特性評価に関する一考察、鋼構造年次論文報告集、Vol.15、pp.269-276、2007.
- 4) 川瀬良司、小室雅人、福原潤二、赤代恵司、岸徳光：5径間連続PCラーメン箱桁橋の固有振動特性に関する一検討、土木学会北海道支部論文報告集、Vol.77、A-12、2021.
- 5) Hallquist、J.O.: LS-DYNA User's Manual、Livermore Software Technology Corporation、2018.