

## 4 径間連続 PC 箱桁橋の固有振動特性評価に関する数値解析的検討

Numerical study on natural vibration characteristics of a four-span continuous PC box girder bridge

(株)構研エンジニアリング	○正会員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
室蘭工業大学	正会員	小室 雅人 (Masato Komuro)
室蘭工業大学	正会員	瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai)
室蘭工業大学	名誉会員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
北海道開発局	非会員	須田 典一 (Yoshikatsu Suda)
北海道道路エンジニアリング(株)	正会員	伊藤 浩 (Hiroshi Ito)
北海道道路エンジニアリング(株)	正会員	五十嵐元次 (Motoji Igarashi)

## 1. はじめに

近年、既設インフラ施設の合理的な維持管理に向けて、IoT 技術、AI や UAV などを活用した様々な技術が開発、検証、実用化されている<sup>1)</sup>。また、構造物や構造部材に各種センサなどを設置し定期的にモニタリングすることで構造性能(健全度)を診断する手法(構造ヘルスマニタリング, SHM)も盛んに研究されている<sup>2),3)</sup>。

著者らの研究グループにおいても、これまで北海道内の数多くの橋梁を対象に現地振動実験を実施し、その振動特性を明らかにしてきた。また、その健全性を評価するために、設計図書をもとに有限要素モデルを構築し、固有振動解析結果と実験結果の比較検討を行ってきた<sup>4)-6)</sup>。一方、すでに供用が開始されている場合には、経年劣化による部材の損傷や支承機能の低下、あるいは補強・補修などによって、供用開始時と異なる状態にあることが予想され、設計図書に基づく有限要素解析結果との比較によって、その健全度を適切に評価することは容易なことではない。したがって、供用開始前(初期状態)の構造性能や振動特性を把握・評価しておくことは、今後の戦略的かつ合理的な維持管理を実施するために極めて重要であるものと考えられる。また、現地振動実験の他、数値解析モデルを構築した固有振動解析などを併用し、実験結果から得られた振動特性について解析的側面からの検証も重要となる。

このような背景より、本研究では供用開始前の4径間連続PC箱桁橋を対象に、三次元有限要素モデルを用いた固有振動解析を実施した。また、得られた結果(固有振動モードおよび固有振動数)を別途実施した現地振動実験結果と比較した。

## 2. 橋梁概要

図-1には本研究で対象とした橋梁の一般図および振動計の配置位置を示している。対象橋梁は、夕張市から旭川市に至る国道452号に架設されている。上部構造形式は、橋長274m、幅員8mの4径間連続PC箱桁橋である。また、図-1に示すように平面的には曲線を呈し、最大3.6%の縦断勾配がある特徴的な形状を有している。下部構造

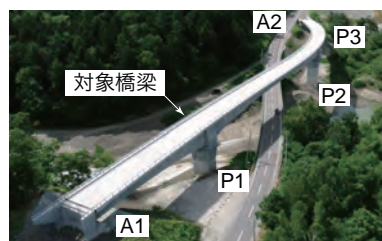


写真-1 対象橋梁の全景

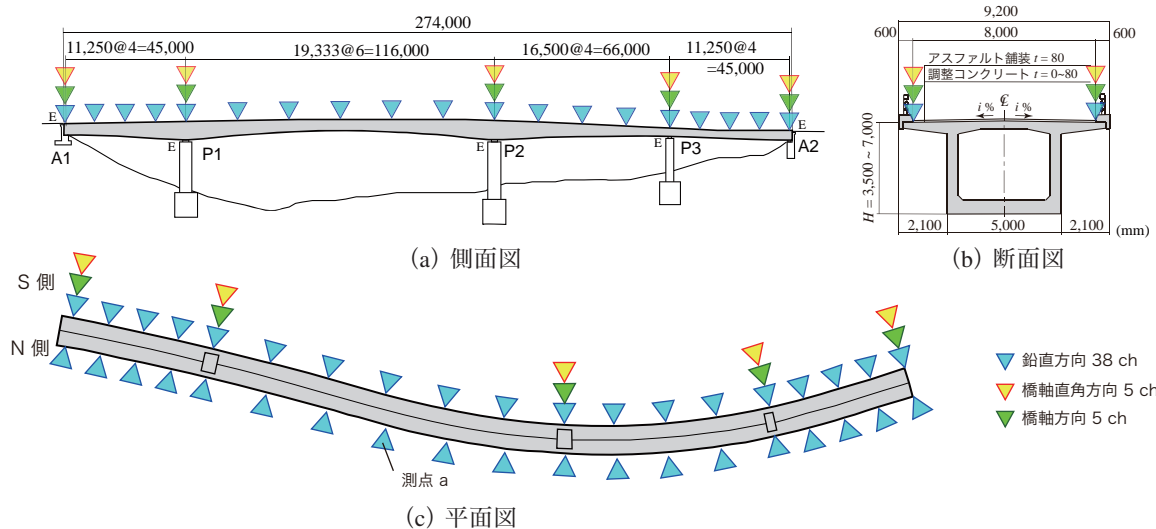
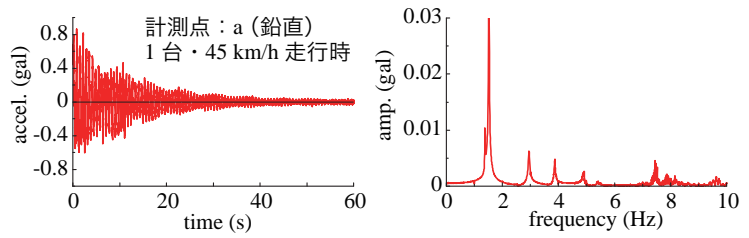


図-1 一般図および振動計配置図



写真-2 大型車両による加振状況



(a) 加速度波形

(b) フーリエスペクトル

図-2 加速度波形およびフーリエスペクトルの一例

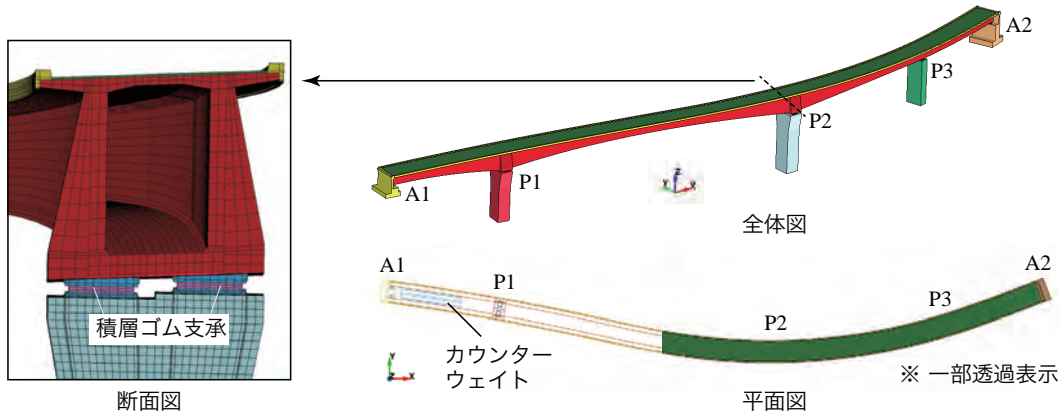


図-3 有限要素モデル

形式はA1, A2が逆T式橋台, P1~P3が張出式橋脚となっており, いずれの橋台, 橋脚においても支承部には鉛プラグ入り積層ゴム支承が用いられている。写真-1には橋梁の全景写真を示している。

### 3. 振動実験の概要

本研究では, 橋梁の振動モードを可能な限り精度よく把握するために, 図-1に示すようにデジタルサーボ型振動計を橋梁上部工に48点設置した。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, 両側の地覆部に計38点(感度方向:鉛直方向, 片側19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, 橋台や橋脚上の地覆部に計10点(感度方向:橋軸方向および橋軸直角方向, 各5点)の振動計を設置した。これらの振動計はアンブレユニットと接続され, 無線LANを介して, 5msのサンプリングタイムで収録用PCに送信・収録される。なお, 本振動実験は, 供用開始前の2022年9月27日に実施した。

写真-2には, 大型車両による加振状況を示している。実験は, 重量20tの大型車両通過後や人力加振後, あるいは常時微動の自由振動状態において加速度データを取録した。なお, 大型車両を走行させる場合には走行速度や進行方向を変えて複数回の実験を実施した。

図-2には, 実験結果の一例として, 1台の大型車両を走行速度 $V=45\text{ km/h}$ で走行させた場合における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である。なお, スペクトル解析には, 32,768 ( $2^{15}$ ) 個のデータ(163.84秒間)を使用した。図より, 鉛直方向加速度に関する自由振動波

形を見ると, 最大0.9 gal程度の加速度が得られており, 車両走行後における減衰自由振動が確認される。また, フーリエスペクトルより, 複数の卓越振動数が存在することが分かる。

### 4. 数値解析の概要

図-3には, 本研究で用いた数値解析モデルを示している。ここでは振動特性を適切に評価するために, 対象橋梁の平面線形や縦断勾配, あるいはゴム支承の形状などを, 実構造と同様に可能な限り詳細にモデル化している。上部工や支承, 下部工には全て8節点固体要素を使用した。

鉛プラグ入り積層ゴム支承に関しては, 上下鋼版とその間のゴム材を図に示すように簡易にモデル化しており, ゴム材の弾性係数については設計時の値を参考に設定した。コンクリート部材については, 設計時の圧縮強度をもとに弾性係数を算出し, 密度やポアソン比については公称値を用いた。なお, 実構造では鉄筋やPCケーブルなどが非常に多数かつ複雑に配置されているが, 本解析モデルにおいては, それらをモデル化せずに断面形状のみを忠実に再現している。また, 実際の橋梁では橋脚下部は地盤で覆われているものの, 本解析ではそれらの地盤の影響を無視し, 橋台底面もしくは橋脚のフーチング上面を完全固定と仮定した。

### 5. 数値解析結果および考察

#### 5.1 振動モード分布の比較

図-4には, 固有振動解析結果から得られた各振動モード分布を別途実施した振動実験結果と比較する形で示して

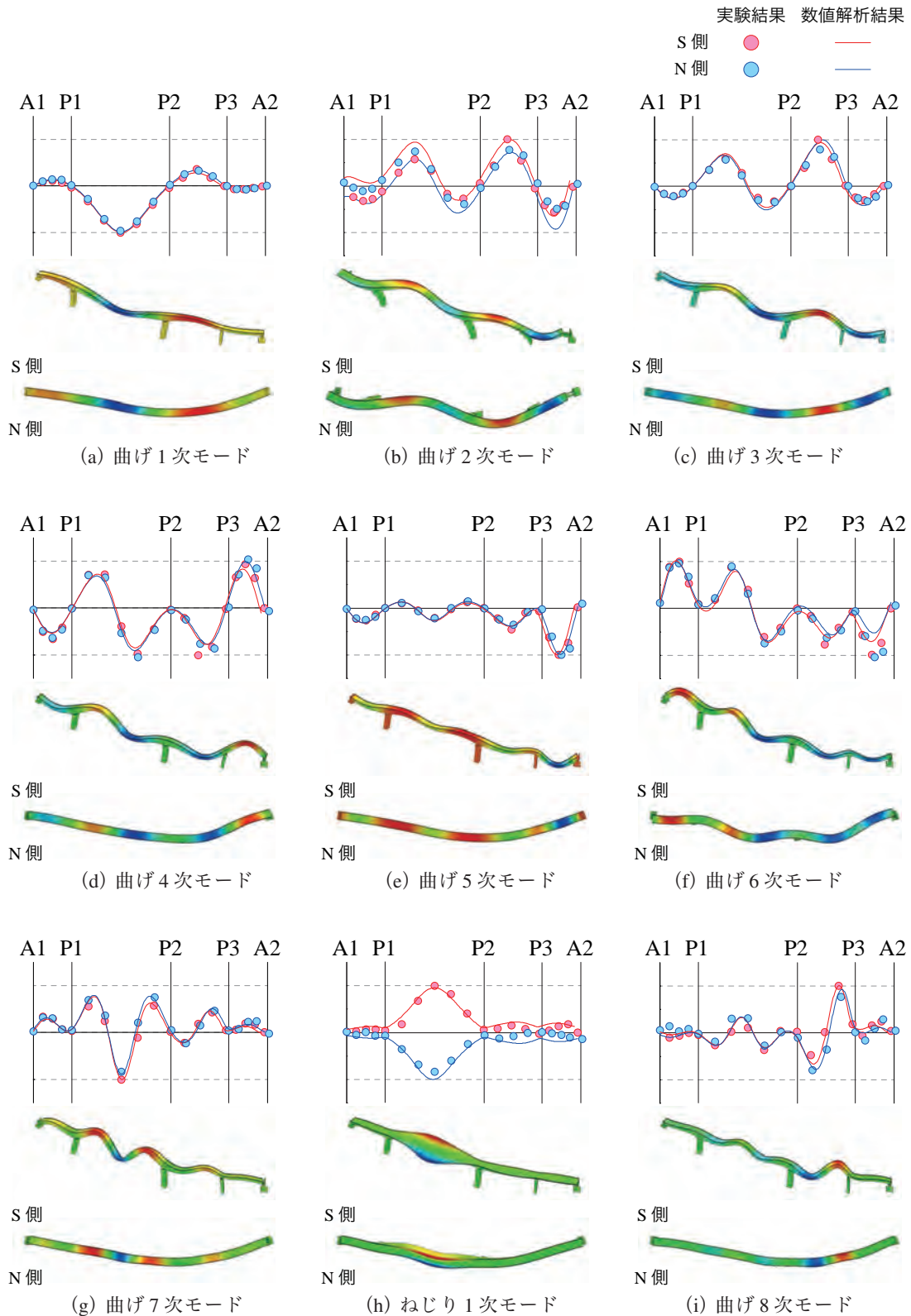


図-4 実験結果と数値解析結果に関する振動モード分布の比較

いる。なお、青線はN側、赤線はS側における振動モードを表しており、固有振動解析から得られる橋梁全体の振動モードについても併せて示している。また、N側とS側の振幅を比較するために、すべての振動モードにおいてS側の最大振幅が1となるように正規化している。

図-4より、実験結果(○印)からは、曲げ振動モードの

他、ねじれ振動モードを含む9つの振動モードが特定されている。一方、実線で示される数値解析結果を見ると、全体的な振動モードに関しては、概ね実験結果の変形状況を評価しているものと考えられる。

各振動モードについて詳細に着目すると、(a)図に示す曲げ1次振動モードでは、両橋台(A1, A2)および各橋脚

表-1 数値解析結果と実験結果の固有振動数の比較

No.	固有振動モード	固有振動数 (Hz)	
		実験結果	数値解析結果
1	曲げ1次	1.51 ~ 1.53	1.51 (-1.3%)
2	曲げ2次	2.52 ~ 2.56	2.64 (+4.8%)
3	曲げ3次	2.94 ~ 2.97	3.01 (+2.4%)
4	曲げ4次	3.84 ~ 3.88	3.96 (+3.1%)
5	曲げ5次	4.86 ~ 4.93	4.87 (-1.2%)
6	曲げ6次	5.39 ~ 5.44	5.43 (+0.7%)
7	曲げ7次	7.45 ~ 7.49	7.64 (+2.6%)
8	ねじり1次	7.81 ~ 7.89	8.09 (+3.6%)
9	曲げ8次	9.57 ~ 9.67	9.65 (+0.8%)

( ): 実験結果との最大誤差

(P1-P3)を節とし、かつ最大支間(P1-P2区間)において最大振幅が生じていることが確認される。また、その振幅はN側とS側で等しいことより、曲げ振動のような挙動を示していることが分かる。一方、数値解析結果における橋梁全体の振動モードでは、橋脚が橋軸直角方向に変形していることを確認している。これより、同振動モードは鉛直方向の曲げ振動を主とするものの、橋軸直角方向にも振動が伴うモードであるものと考えられる。

(b),(c)図の曲げ2,3次振動モードを見ると、最大支間(P1-P2区間)の中央部において節があり、かつN側とS側において同様な振動モードを呈していることが分かる。なお、実験結果における曲げ2次振動モードの場合には、橋軸直角方向の振幅も確認されていることより、鉛直曲げの他、橋軸直角方向にも振動する連成モードであることを確認している。また、数値解析結果を見ると、A1-P1区間側において実験結果と振幅が異なるものの、P2-A2区間側では両者は概ね一致していることが分かる。曲げ3次振動モードでは、解析結果と実験結果は概ね対応しており、また全体系の振動モードにおいても橋軸直角方向に関する振動はほぼ励起していないことから、鉛直曲げ振動が支配的であるものと判断される。

(d)~(g),(i)図に示す曲げ4~8次振動モードにおいては、いずれの振動モードにおいても、実験結果と数値解析結果はともに節や腹の位置および最大振幅などが両者でほぼ一致していることが分かる。

最後に、(h)図に示すねじり1次振動モードを見ると、実験結果および数値解析結果ともに最大支間(P1-P2区間)で最大振幅を示しており、かつその振幅がN側とS側で異なることが見て取れる。また数値解析結果における全体系の振動モードからも分かるようにねじり振動モードを呈していることが分かる。なお、数値解析結果と実験結果には若干の差異が確認される。

## 5.2 各固有振動数に関する比較

表-1には、本研究で実施した数値解析結果より特定された固有振動数を、実験結果と比較する形で一覧にして整理している。表より、曲げ2次振動モードおよびねじり1次振動モードにおいて解析結果は実験結果の固有振動数よりも若干大きく評価しているものの、その差は5%以下となっている。なお、それ以外の振動モードに関しては数値

解析結果は実験結果の固有振動数をほぼ適切に評価していることが確認できる。

## 6. まとめ

本研究では供用開始前の4径間連続PC箱桁橋を対象に、その固有振動特性を評価するための固有振動解析を実施した。ここでは、得られた数値解析結果と別途実施した現地振動実験結果の比較を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 有限要素法を用いた三次元固有振動解析によって、数値解析結果から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。
- 2) 各振動モードに対応する固有振動数に関しては、曲げ2次およびねじり1次振動モードにおいて、数値解析結果は実験結果を若干過大に評価するものの、それ以外の振動モードに関しては実験結果を適切に再現していることが確認された。

## 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の久井昭史君、元流朱音さんをはじめとする学生諸君には振動実験およびデータ解析などの協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する。

## 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-開発技術概要-, 2018.
- 2) 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚：鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 3, 516-534, 2010.
- 3) 門田峰典, 宮森保紀, 岡本寛人, 綿崎良祐, 三上修一, 齊藤剛彦：スマートセンサを用いた3次元加速度計測による横断歩道橋の振動特性同定とFEMモデル構築に関する一検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70, No.2, L887-L897, 2014.
- 4) 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, 269-276, 2007.
- 5) 川瀬良司, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 赤代恵司, 鈴木健太郎：4径間連結PCコンポ橋の固有振動特性評価に関する現地振動実験, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 78, A-12, 2022.
- 6) 牛渡裕二, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 伊藤浩, 五十嵐元次：4径間連結PCコンポ橋の固有振動特性評価に関する数値解析的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 78, A-13, 2022.