

### 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

Numerical study on natural vibration characteristics of a four-span connected precast post-tensioned concrete 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、既設社会基盤施設の合理的な維持管理に向けて、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)~4)</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振動実験を実施し、その振動特性を明らかにするとともに、有限要素法による固有振動解析も実施し、両者の結果を比較することで、橋梁の健全度評価を行ってきた<sup>5)~6)</sup>。一方、すでに供用が開始されている橋梁の場合には、経年劣化によって部材の損傷や支承機能の低下などにより、供用開始時の状態とは少なからず異なることが想定され、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、今後の合理的な維持管理を実施するためには、供用開始前の構造性能や振動特性を把握、評価しておくことは極めて重要であると考えられる。また、併せて構造性能や振動特性を適切に評価可能な数値解析モデルの構築も、効率的な維持管理を行う上では必要と判断される。

このような背景より、本研究では供用開始前の斜角を有する4径間連結PCコンポ橋を対象に、三次元有限要素モデルによる固有振動解析を実施した。ここでは、別途実施

した現地振動実験結果との比較によって解析モデルの妥当性を検討するとともに、斜角の有無が橋梁全体の振動特性に及ぼす影響についても数値解析的に検討を行った。

#### 2. 橋梁概要

図-1および写真-1には対象橋梁の一般図と全景写真を示している。本研究で対象とした橋梁は、函館市から江差町に至る延長約70kmの函館江差自動車道の一部である茂辺地木古内道路に架設された弁財天大橋である。上部構造形式は、橋長140m、幅員10.5mの4径間連結PCコンポ橋(3主桁)であり、各主桁は橋脚上でそれぞれ別の支承で支持されている。また、主桁の橋軸方向の連結には、場所打ちの横桁と床版で桁を一体化させることで中間支点上にジョイントがなく、連続桁と同様に走行性に優れる特徴



写真-1 対象橋梁の全景

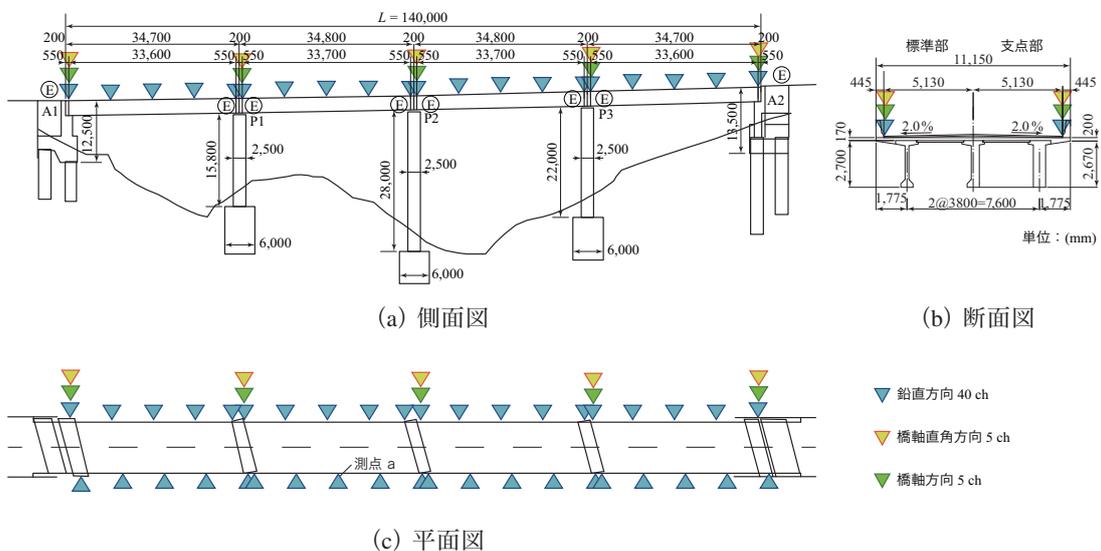


図-1 一般図および振動計配置図

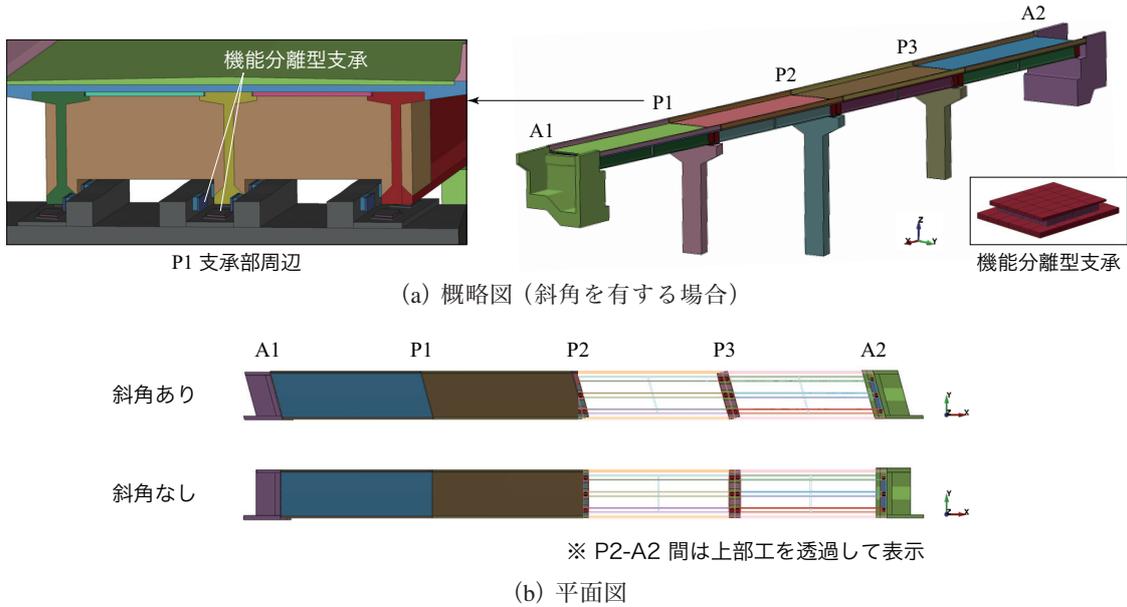


図-3 有限要素モデル



写真-2 大型車両による加振状況

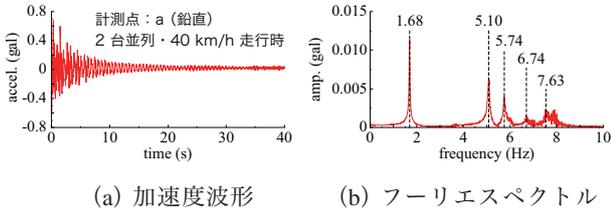


図-2 加速度波形およびフーリエスペクトルの一例

を有する。下部構造形式はA1, A2が逆T式橋台, P1~P3が張出式矩形橋脚となっており, いずれの橋台, 橋脚においても支承部には機能分離型支承が用いられている。なお, 同橋梁は75°の斜角を有している。

### 3. 振動実験概要

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50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40点(感度方向:鉛直方向, 片側20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, 全橋台・橋脚上の外側地覆に計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テナユニットと接続され, 無線LANを介して, 5msのサ

ンプルングタイムで収録用PCに送信・収録される。

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, 2台の大型車両を走行速度 $V=40$  km/hで, 並列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。なお, 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0.6 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を見ると, 複数の卓越振動数が存在することが分かる。

### 4. 数値解析概要

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, 対象橋梁の縦断勾配や斜角あるいは機能分離型支承などを, 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。

各主桁の連結部については, 実際と同様に横桁と床版によって一体化している。機能分離型支承に関しては, 主桁の下に設置される荷重支持部および主桁の側面に設置されるバッファ部のいずれも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ばね定数を参考に設定した。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断面形状のみを忠実に再現してい

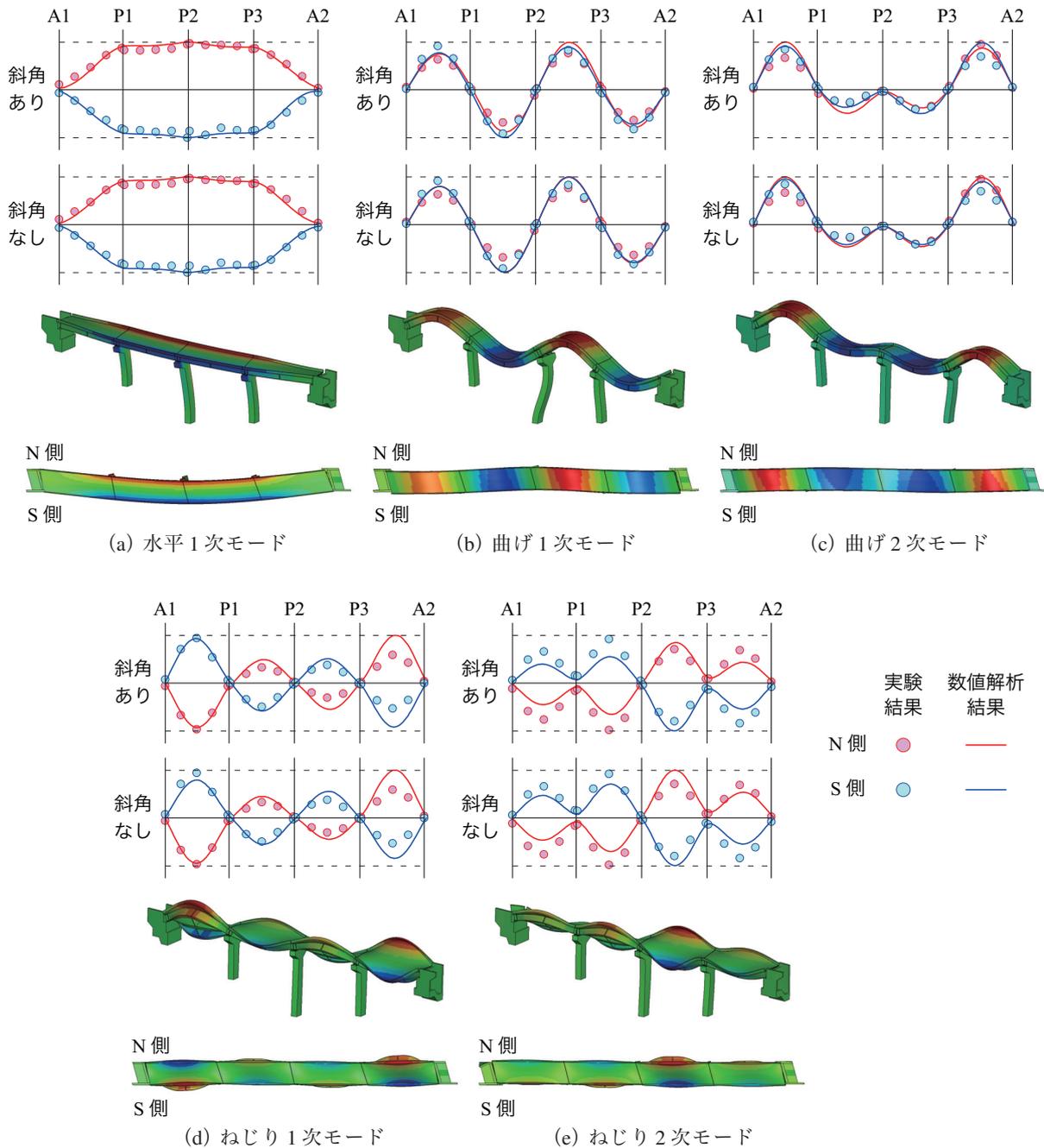


図-4 振動モード分布の比較

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。

(b)図には、本研究で用いた2種類の数値解析モデルの平面図を示している。ここでは、斜角が振動特性に及ぼす影響を検討するために、実構造と同様に斜角を有する場合と斜角を無視し直橋とした場合について固有振動解析を実施することとした。なお、直橋モデルの場合には、橋台・橋脚が橋軸方向に対して直角となるように配置した以外は全て実橋梁(斜角有り)と同じ条件とした。

## 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

ド分布を斜角の有無および別途実施した振動実験結果と比較する形で示している。なお、赤線は橋梁のN側、青線はS側における振動モードを表しており、斜角を有する場合については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示している。また、N側・S側の振幅の大きさを比較するために、すべての振動モードで最大振幅が1となるように正規化している。

図-4より、実験結果においては、水平振動モードの他、曲げ振動モードおよびねじり振動モードをそれぞれ2次までの5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、斜角の有無にかかわらず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。

詳細を見ると、(a)図に示す水平1次振動モードでは、

表-1 固有振動数の比較

固有振動モード	固有振動数 (Hz)		
	実験結果	数値解析結果	
		斜角あり	斜角なし
水平1次	1.68-1.71	1.44 (-15.8%)	1.46 (-14.6%)
曲げ1次	5.06-5.13	4.48 (-12.7%)	4.50 (-12.3%)
曲げ2次	5.70-5.81	5.02 (-13.6%)	5.01 (-13.8%)
ねじり1次	6.74-6.99	5.92 (-15.3%)	5.93 (-15.2%)
ねじり2次	7.61-7.71	6.54 (-15.2%)	6.57 (-14.8%)

( ) : 実験結果との最大誤差

両橋台 (A1, A2) を節とし、かつ P1~P3 部は同程度の鉛直振幅が生じており、さらにその振幅は N 側と S 側で正負が異なることから、ねじり振動のような挙動を示していることが分かる。一方で、数値解析結果における橋梁全体の振動モードを見ると橋脚が橋軸直角方向に変形しており、それに対応するように上部工が振動している様子がうかがえる。これより、同振動モードは橋軸直角方向に振動する水平振動モードと判断した。なお、斜角の有無による振動モードに関しては、両者でほぼ同じ分布を示していることから、水平1次振動モードに関しては、その影響は小さいものと考えられる。

(b) 図の曲げ1次振動モードを見ると、各径間の最大振幅はほぼ等しく、また橋梁全体で連続したモード分布を呈している。(c) 図に示す曲げ2次振動モードでは、P2 橋脚を中心に左右対称な振動モードを示しており、その振幅は両橋台側の端支間 (A1-P1 および P3-A2 区間) が大きいことが分かる。曲げ振動モードに関する解析結果を見ると、斜角の有無にかかわらず実験結果に類似した分布性状となっている。ただし、各径間における N 側と S 側の振幅を比較すると、斜角のない直橋の場合には両者で一致しているものの、斜角を有する場合には、いずれの径間においても両者で若干の差異が確認される。これは斜角の影響によるものと考えられる。なお、本数値解析では各主桁における橋軸方向の RC 連結構造部を一体化してモデル化しているが、その振動モード形状は実験結果とほぼ対応していることより、実構造物においても連結構造は十分な剛性を有しているものと推察される。

(d), (e) 図に示すねじり1次、2次振動モードに着目すると、実験結果では曲げ振動モードと同様に、節と腹が明確に現れていることが分かる。また、N 側と S 側で振幅の正負が異なることから、ねじり振動であることも確認される。なお、数値解析結果と実験結果を比較すると、曲げ振動モードと比較して振幅に若干の差異が確認されるものの、斜角の有無によらず振動モード分布は実験結果と定性的には対応しているものと考えられる。

## 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2種類の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たものである。

表より、斜角の有無によらず数値解析結果はいずれの振動数においても実験結果よりも12~16%程度固有振動数が小さく示されている。これは、1) 設計時のコンクリートの圧縮強度をもとに各構造体の弾性係数を設定していること、および2) 機能分離型支承を簡易にモデル化し、かつそ

の弾性係数を設計時のばね定数で評価していること、などによるものと推察される。なお、斜角の有無に関する各振動モードの固有振動数を比較すると、いずれの振動モードに対しても両者で明確な差異が確認されないことから、本橋梁においては固有振動モードも含めて斜角の有無が橋梁全体の振動特性に及ぼす影響は小さいものと判断される。

## 6. まとめ

本研究では供用開始前の4径間連結PCコンポ橋を対象に、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、本橋梁の特徴である斜角の有無が橋梁全体の振動特性に及ぼす影響について検討するために、実構造物と同様に斜角を有する場合と橋梁全体を直線状とした場合の2種類について数値解析を実施した。また、別途実施した現地振動実験結果と比較することで、数値解析モデルの妥当性についても検討を行った。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。また、斜角を有する場合には、N側とS側の振幅に若干の差異が生じることを確認した。
- 2) 各振動モードに対応する固有振動数に関しては、数値解析結果が実験結果よりも1割程度過小評価する傾向が確認された。これは、使用した材料の構成則モデルに設計条件を適用していることなどが一因と考えられる。
- 3) また、数値解析結果より、本橋梁においては斜角の有無が橋梁全体の振動特性に及ぼす影響は小さい。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、国土交通省北海道開発局函館開発建設部函館道路事務所には実験フィールドの提供など多大なご協力を頂いた。また、室蘭工業大学構造力学研究室の佐藤涼太君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) 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, L741-L749, 2013.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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評価に関する一検討, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 77, A-12, 2021.