

4 径間連続 PC 箱桁橋の固有振動特性評価に関する現地振動実験

Field tests for evaluation of natural vibration characteristics of a four-span continuous PC box girder bridge

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)
(株)構研エンジニアリング	フェロー	川瀬 良司	(Ryoji Kawase)
北海道道路エンジニアリング(株)	正員	赤代 恵司	(Keiji Shakushiro)

1. はじめに

我が国のインフラ施設は、高度経済成長期に集中的に整備され、今後急速に老朽化することが懸念されている。そのような環境下において、近年、インフラ施設の戦略的かつ合理的な維持管理にむけて、IoT や AI などを用いた様々な技術が開発、検証、実用化されている¹⁾。また、構造物や部材に各種センサなどを設置し、それらを常時モニタリングすることによって、構造性能の診断手法(構造ヘルスマモニタリング, SHM)も盛んに研究されている^{2),3)}。一方で、常時モニタリングをもとに構造性能を診断するためには、費用も嵩むことからすべてのインフラ施設に対して適用することは難しい。

このような背景のもと、著者らの研究グループでは、北海道内の既設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を特定するとともに、設計図書を参考に有限要素モデルを構築し、その固有振動解析結果との比較によって、健全度の評価を試みてきた^{4),5)}。一方で、供用開始後の橋梁の場合には、経年劣化によって部材の損傷や支承機能の低下、あるいは補修・補強などにより、供用開始時(初期状態)とは異なることから、供用開始後からの変化を適切に把握することは容易なことではない。これは、白鳥大橋などに代表される長大橋梁を除き、一般的に供用開始時における構造性能を載荷実験や振動実験などにより調査・確認している橋梁は極めて少ないことによる。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

用開始前の橋梁の構造性能を把握しておくことは極めて重要であると考えられる。

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、その固有振動特性を把握するための振動実験を実施した。ここでは、車両走行後や人力加振後の自由振動、あるいは常時微動を計測することによって、橋梁の固有振動特性の把握を試みた。

2. 橋梁概要

図-1には対象橋梁の一般図および振動計の設置位置を、表-1には橋梁の諸元を示している。本研究で対象とした橋梁は、夕張市から旭川市に至る国道452号に架設された4径間連続PC箱桁橋(橋長274m, 幅員8m)である。同橋は、図-1や写真-1からも分かるように曲線かつ縦断勾配(最大勾配3.6%)を有する特徴的な形状となっている。下部構造形式はA1, A2が逆T式橋台、P1~P3が張出し橋脚となっており、いずれの橋台、橋脚においても支承

表-1 対象橋梁の諸元

路線	国道452号
型式	4径間連続PC箱桁橋
橋長	274m
支間	45m + 116m + 66m + 45m
幅員	8m

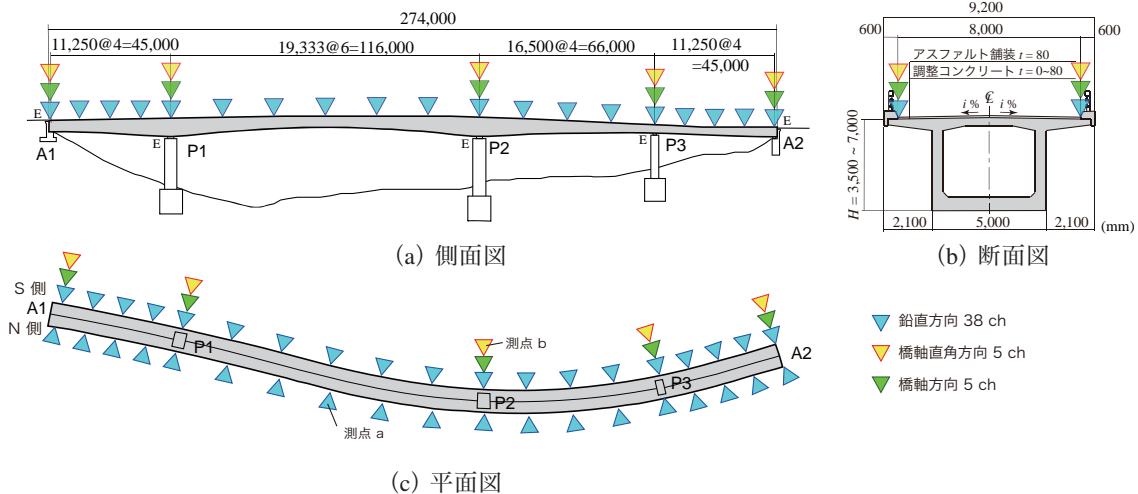


図-1 一般図および振動計配置図

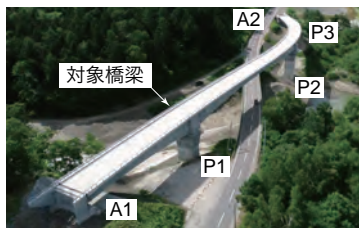


写真-1 対象橋梁の全景

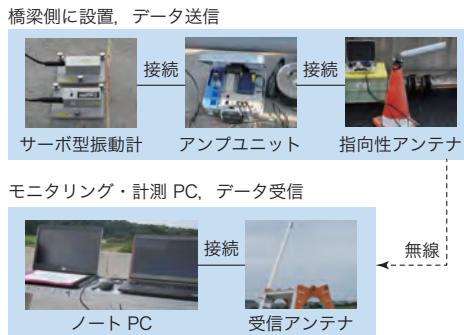


図-2 計測システムの概要図



(a) 1台走行 (b) 2台直列走行

写真-2 大型車両による加振状況

部には鉛プラグ入り積層ゴム支承が用いられている。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-1には橋梁の全景写真を示している。

3. 振動実験の概要

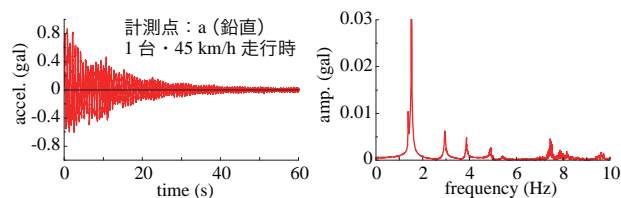
3.1 振動計の配置および計測方法

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、全ての橋台と橋脚上のS側地覆部に計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。

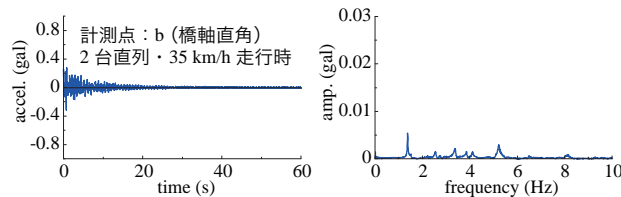
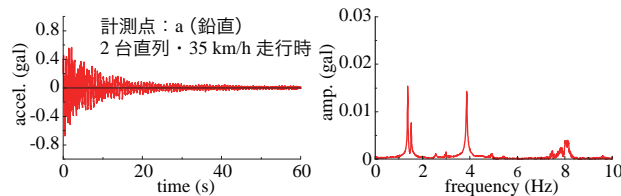
図-2には本実験で使用した計測システムの概要を示している。サーボ型振動計から出力は、アンプユニット、無線LANを介して受信用アンテナに接続されたノートPCに送信される。本実験では、すべての振動計からの加速度データを5msのサンプリングタイムで2台のノートPCに収録した。

3.2 実験方法

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



(a) 1台走行時



(b) 2台直列走行時

図-3 加速度波形およびフーリエスペクトルの一例

写真-2には、大型車両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)幅員中央部を1台のみが走行する場合、あるいは(b)幅員中央部を2台の大型車が直列に一方方向に走行する場合など、走行速度や進行方向を変えて複数回実施した。

3.3 振動数の決定方法

実測加速度波形を用いた固有振動モードおよび固有振動数の決定方法は、以下の仮定に基づいて実施した。

- 1) 大型車両通過後、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)を使用して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考えられる卓越振動数を抽出し、フーリエスペクトル、位相スペクトル分布を用いて波形を生成する。
- 4) 固有振動モードを求めるために、3)で求めた各測点における卓越振動数近傍のフーリエスペクトル、位相スペクトル分布を用いて波形を生成する。
- 5) 4)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1/8周期毎に橋軸方向全測点における振幅値を用いて振動モードを求め、モードの節および腹の位置が各周期毎で移動せず、振動モードが連成していないことを確認し、固有振動モードを決定する。

4. 実験結果および考察

4.1 計測加速度波形とフーリエスペクトル

図-3には、実験結果の一例として、大型車両を一方方向

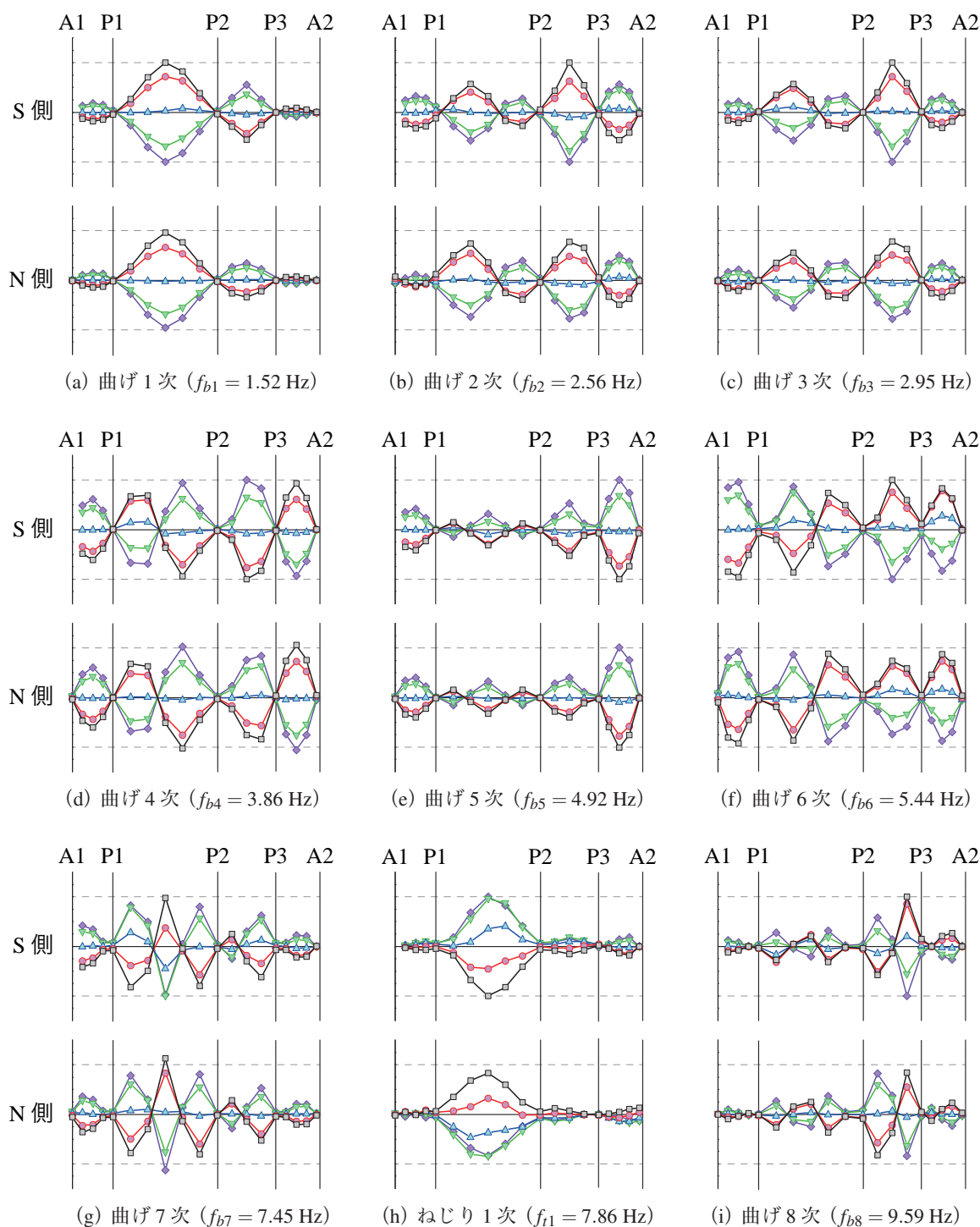


図-4 振動モード分布 ($V = 45 \text{ km/h}$, 1台走行時)

に1台あるいは2台直列に走行させた後に得られた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およびbである。なお、(a)、(b)図における車両の走行速度は、それぞれ45、35 km/hである。

(a)、(b)図より、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、1台走行時および2台直列走行時の場合において最大加速度は、それぞれ0.9、0.6 gal程度となっており、1台走行時の方が2台直列走行時よりも、最大加速度は大きく示されている。これは、1) 1台走行時の方が走行速度が大きいこと、および2) 2台直列走行時

においては、安全性の観点から車両間隔を確保したことで両車両の走行位置によっては振動を抑制する方向に作用した可能性があるものと推察される。(a)、(b)図に示すフーリエスペクトルを見ると、鉛直振動に関しては複数の卓越振動数が存在することが分かる。

次に、(b)図に示す橋軸直角方向の加速度波形を見ると、最大加速度は0.3 gal程度と鉛直方向加速度の1/2以下と小さいものの、いくつかの卓越振動数が確認される。

4.2 振動モード分布

図-4には、図-3に示したフーリエスペクトルをもとに特定した本橋梁の固有振動モード分布図の一例を示し

ている。ここでは、1台の車両が時速45 km/hで走行した場合の結果を示している。なお、上下流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図で下流(S)側の最大振幅が1となるように正規化している。また、図中の点線は、基準となるS側の正規化振幅を示しており、振動モード分布は1/8周期ごとに表示した。

図-4より、本振動実験では、9つの振動モードを特定できたものと判断した。まず、(a)図に示す曲げ1次振動モードを見ると、連続橋であることより径間ごとに最大振幅の正負が異なる曲げ振動モードが確認できる。また、図-3(b)に示す橋軸直角方向におけるフーリエスペクトルを見ると、同振動モードにおける振動数付近のスペクトル振幅が最も大きく示されており、橋梁は橋軸直角方向にも振動しているものと判断される。

(b)、(c)図の曲げ2,3次振動モードを見ると、両者ともに最大径間(P1-P2区間)の中央部において節が確認され、類似の振動モードを呈している。しかしながら、(b)図の曲げ2次振動モードの場合には、図-3(b)に示すP2橋脚上における橋軸直角方向のフーリエスペクトルにおいて小さな振幅が確認されることから、鉛直曲げ振動と橋軸直角方向に振動する振動モードが連成しているものと考えられる。これらの2つの振動モードは、本橋梁が曲線かつ縦断勾配を有することに起因しているものと考えられる。なお、曲げ3次振動モードでは、橋軸直角方向への振動はほぼ励起していないことを確認している。

(d)~(g)および(i)図に示す曲げ4~8次振動モードでは、N側、S側において節や腹の位置および振幅の大きさがほぼ同程度の振動分布性状を呈していることが分かる。

(h)図に示すねじり1次振動モードを見ると、最大径間(P1-P2区間)における振幅が最大を示しており、かつN側とS側で振幅の方向が異なることが確認される。

なお、本実験結果からは9つの振動モードを特定したが、これらの実験結果については、別途三次元有限要素モデルを用いた固有振動解析などを通して検証する必要がある。

4.3 各走行ケースによる固有振動数への影響

表-2には、本研究で実施した3種類の振動実験により特定された固有振動数を一覧にして示している。表には、車両走行台数および走行速度等が異なるもののほか、人力加振および常時微動による結果も示している。

表より、加振方法によって得られる固有振動数や振動モードに若干差異が確認できるものの、各加振方法による固有振動数の差は1%以下であることが分かる。本実験においては走行速度 $V=45$ km/hによる1台の車両走行の場合のみ9つの振動モードが特定されている。また、常時微動計測では、低次あるいは高次の振動モードの特定が困難である傾向も確認される。

なお、著者らの既往の研究において連続PCラーメン橋の場合には、低次の曲げ振動モードのみが特定されているのに対し⁶⁾、本実験ではねじり振動モードも含めて高次の振動モードまでを特定することができた。これは、既往の研究では(1)剛性の高いラーメン形式であり、かつ(2)縦断勾配が小さく、ほぼ直線橋であるのに対し、本橋梁は曲線かつ縦断勾配も大きい特徴を有することに起因しているものと考えられる。

表-2 実験結果より得られた固有振動数の比較

No.	固有振動モード	固有振動数 (Hz)					
		1台		2台直列		人力加振	常時微動
		45 km/h	20 km/h	35 km/h	20 km/h		
1	曲げ1次	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	-
2	曲げ2次	2.56	2.56	2.56	2.56	-	-
3	曲げ3次	2.95	2.95	2.95	2.97	2.94	2.94
4	曲げ4次	3.86	3.86	3.86	3.85	3.86	3.86
5	曲げ5次	4.92	4.91	4.93	4.90	4.89	4.91
6	曲げ6次	5.44	5.41	5.40	5.42	5.43	5.43
7	曲げ7次	7.45	-	-	7.48	7.47	7.47
8	ねじり1次	7.86	7.81	-	7.86	-	-
9	曲げ8次	9.59	-	-	-	9.59	-

5. 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把握するための振動実験を実施した。ここでは、車両走行後や人力加振後の自由振動、あるいは常時微動を計測することによって、橋梁の固有振動特性の把握を試みた。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようなになる。

- 1) 車両走行後の自由振動を計測することにより、9つの固有振動モードおよび固有振動数を特定した。
- 2) 常時微動および人力加振においても、車両走行加振と必ずしも対応はしていないものの、同様な振動特性を把握できることを確認した。
- 3) 8次までの曲げ振動モードに加え、比較的高次の振動数帯においてねじり1次振動モードを確認した。

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) 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) 新山惇, 佐藤昌志, 小室雅人, 岸徳光：供用後27年経過した三径間連続鋼床版斜張橋の自由振動特性, 構造工学論文集, Vol. 47A, 1093-1102, 2001.
- 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.