

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

Field tests for evaluation of 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
室蘭工業大学
室蘭工業大学
室蘭工業大学
北海道道路エンジニアリング(株)

○フェロー 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正会員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 赤代 恵司 (Keiji Shakushiro)

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¹⁾。また、構造物や部材にセンサなどを取り付け振動特性や応力状態の経年変化をモニタリングし、それらを分析することで構造性能を診断する手法(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)~4)}。

著者らの研究グループにおいても、これまで北海道内の橋梁を対象に振動実験を実施し、固有振動数や振動モードを特定するとともに、有限要素法による固有振動解析結果との比較によって、維持管理を見据えた橋梁の健全度評価を行ってきた^{5), 6)}。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、初期状態からの変動を適切に評価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(初期状態)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径間連結PCコンポ橋を対象に、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配置位置を、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、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橋梁である。表より、上部構造形式は、橋長140m、幅員10.5mの4径間連結PCコンポ橋である。同橋梁は3主桁で構成され、主桁は支間ごとに橋台あるい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、図-2に示すように場所打ちの横桁と床版で桁を一

表-1 弁財天大橋の諸元

路線	函館江差自動車道
型 式	4 径間連結 PC コンポ橋 (3 主桁)
橋 長	140 m
支 間	33.6 m + 2@33.7 m + 33.6 m
幅 員	10.5 m
竣 工	令和3年度供用予定

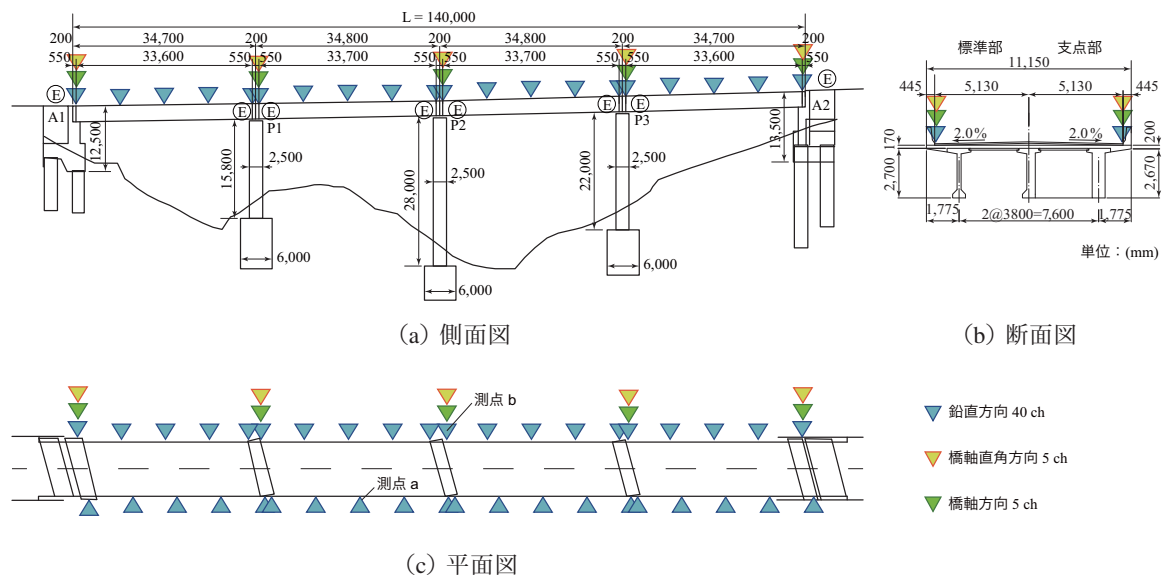


図-1 一般図および振動計配置図

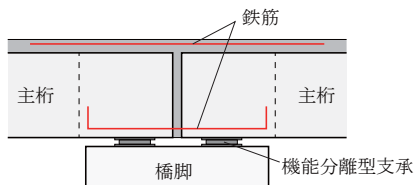


図-2 主桁の連結構造



写真-1 対象橋梁の全景

橋梁側に設置、データ送信



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

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、縦断勾配は 3% である。写真-1 には橋梁の全景写真を示している。なお、本振動実験は、未供用(供用開始前)の 2021 年 9 月 26 日に実施した。

3. 振動実験の概要

3.1 加速度の計測方法

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 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。

図-3 に本計測システムの概要を示す。各振動計はアンプユニットと接続され、無線 LAN を介して、5 ms のサンプリングタイムで収録用 PC に送信される。また、50 点の振動波形は受信アンテナと接続されたノート PC 2 台を用いて収録可能となっている。



(a) 1台走行



(b) 2台直列走行



(c) 2台並列走行

写真-2 大型車両による加振状況

3.2 実験方法

実験は、(1) 重量調整された大型車両(重量: 20 t) 通行後、(2) P1-P2 スパン中央部によ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。

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) 片側車線を 1 台のみが走行する場合、(b) 幅員中央部を 2 台の大型車を直列に一方方向に走行させる場合、あるいは(c) 両側車線を使用し大型車 2 台を並列に走行させる場合など、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

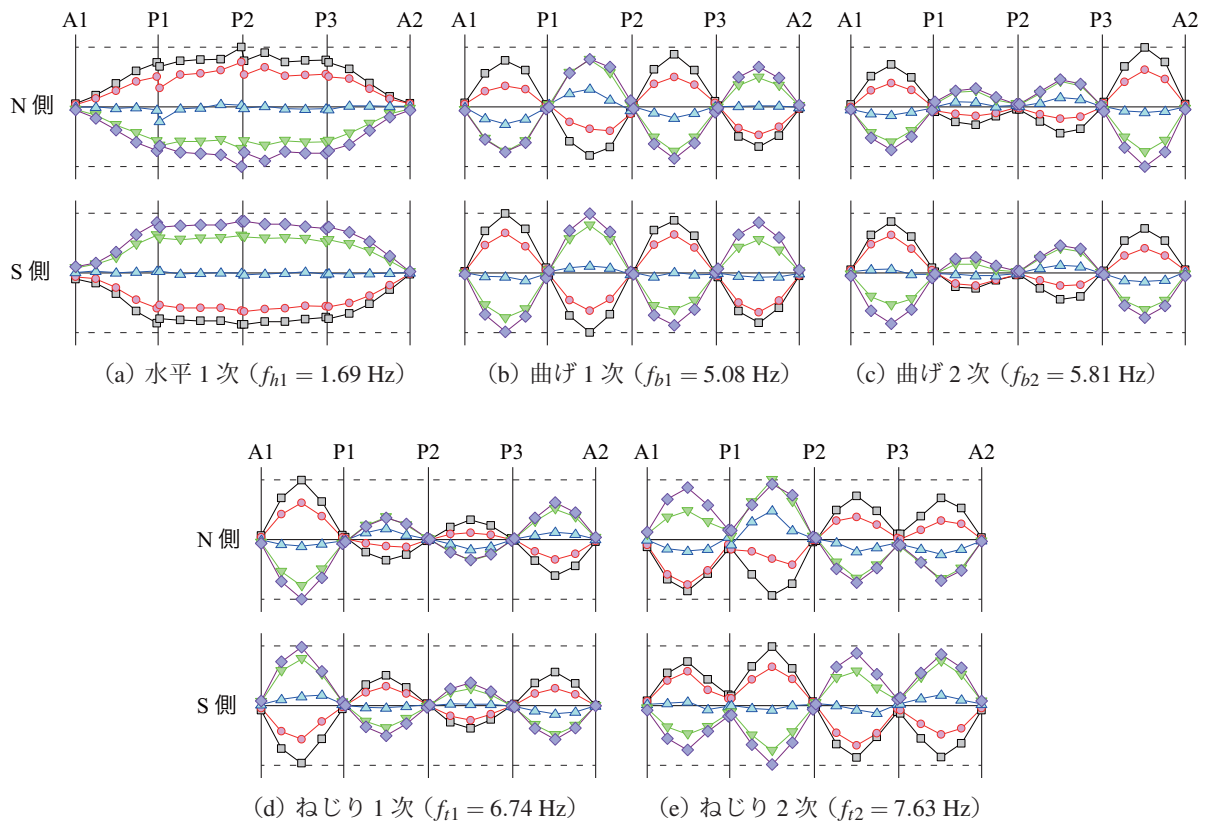
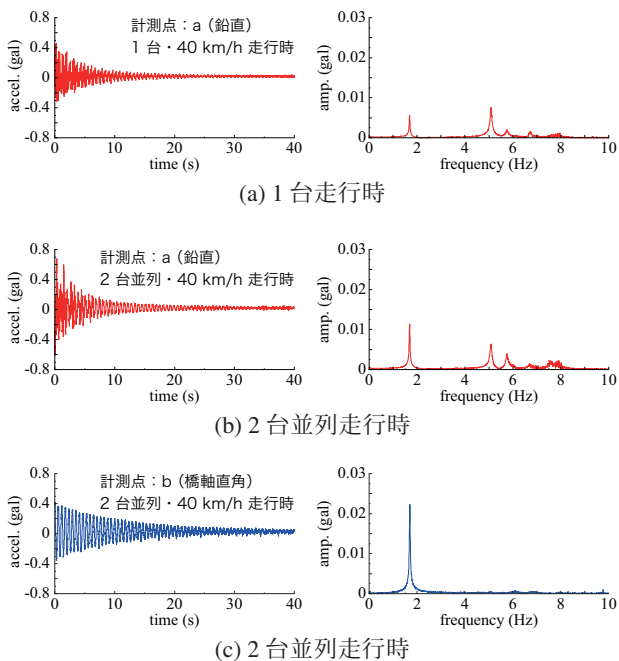

 図-5 振動モード分布 ($V = 40 \text{ km/h}$, 2台並列走行時)


図-4 加速度波形およびフーリエスペクトルの一例

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-4には、実験結果の一例として、大型車両を一方

に1台あるいは2台並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。(a), (b)図より、大型車両を1台あるいは2台並列に走行させた後の鉛直方向加速度に関する自由振動波形を見ると、最大0.4~0.6 gal程度の加速度が得られており、車両台数による影響は小さいことが確認される。一方、フーリエスペクトルを見ると、(b)図に示す2台並列走行時のスペクトル振幅が(a)図に示す1台走行時のそれよりも若干大きく示されていることが分かる。また、同図より、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。

(c)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0.4 gal程度と鉛直方向加速度と同程度であることが分かる。一方、フーリエスペクトルを見ると、そのスペクトル振幅は鉛直振動の場合よりも2倍以上も大きく、かつ1.7Hz前後にのみ卓越振動数が確認される。

4.2 振動モード分布

図-5には、図-4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、2台の車両が並列に時速40km/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。図中の点線は、基準となるS側の正規化振幅を示している。また、振動モード分布は1/8周期ごとに表示している。

図-5より、本加振実験では、5つの振動モードを特定できたものと判断した。(a)図に示す水平1次振動モードを見ると、両橋台(A1, A2)を節とし、中間橋脚(P1~P3)支

表-2 固有振動数の比較

固有振動 モード	固有振動数 (Hz)						
	1 台	2 台直列		2 台並列		人力 加振	常時 微動
	40 km/h	30 km/h	40 km/h	30 km/h	40 km/h		
水平 1 次	1.71	1.70	1.68	1.71	1.69	1.70	—
曲げ 1 次	5.08	5.12	5.10	5.13	5.08	5.06	5.13
曲げ 2 次	5.76	5.78	5.74	5.80	5.81	5.73	5.70
ねじり 1 次	6.81	6.99	6.77	6.77	6.74	6.76	6.83
ねじり 2 次	7.63	7.61	7.66	7.71	7.63	7.61	7.66

承部においても鉛直振幅が確認され、さらにその振幅は上下流側で符号が異なることからねじり振動を伴っていることが分かる。また、図-4(c)に示す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非常に大きいことから、橋梁は橋軸直角方向に移動しているものと判断される。したがって、この振動モードは、橋梁全体が橋軸直角方向に水平移動する振動モードであるものと判断した。

(b)図の曲げ 1 次振動モードを見ると、橋梁全体で連続したモード分布を呈しており、各主桁における橋軸方向の連結構造は、十分な剛性を有しているものと判断される。(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、またその振幅は両橋台側の端支間(A1-P1 および P3-A2 区間)が大きくなっている。

(d),(e)図に示すねじり 1 次、2 次振動モードに関しても、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確認される。なお、2つのねじり振動モードを比較すると、1 次モードでは上下流側の振幅が各径間で逆転しているのに対し、2 次モードでは上下流側の振幅が P2 橋脚を中心として逆転していることが分かる。

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したものである。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は若干異なるものの、2台直列走行の30km/hにおけるねじり2次振動モードを除き、各加振方法による差は1%以下であり、いずれの加振方法においても曲げおよびねじり振動モードとそれに対応する固有振動数を特定することが可能であることが分かる。また、常時微動計測に関しては、橋梁全体が橋軸直角方向に水平移動する振動モードについては特定が困難であることも確認される。

5. まとめ

本研究では供用開始前の4径間連結PCコンボ橋を対象に、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、以下のようになる。

- 1) 車両走行後の自由振動を計測することにより、低次の固有振動モードおよび固有振動数を特定できることを確認した。
- 2) 常時微動および人力加振によっても車両走行加振と同じように低次の振動特性を把握できることを確認した。
- 3) 2つの橋台(A1, A2)が節となり、橋梁全体が橋軸直角方向に水平移動する振動モードが存在することを確認した。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、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, 岡本覚人, 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径間連結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.