

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

A consideration for evaluation of natural vibration characteristics of 5-span continuous PC rigid frame box girder bridge

(株)構研エンジニアリング ○フェロー 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
北海道開発局 福原 潤二 (Junji Fukuhara)
北海道道路エンジニアリング(株) 正会員 赤代 恵司 (Keiji Shakushiro)
室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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、構造物や部材の振動や応力状態の経年変化を把握、評価することで、剛性の低下などを損傷として検出する手法(構造ヘルスマモニタリング, SMH)も盛んに研究されている²⁾⁻⁴⁾。

著者ら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橋梁の健全度評価を行ってきた⁵⁾。一方、供用開始後数十年経過した橋梁の場合には、部材の劣化損傷や支承機能の低下などによって、供用開始時の状態とは異なることが予想されるものの、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振動特性(初期状態)を調査・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、供用開始前の固有振動特性を把握しておくことは極めて重要と考えられる。

このような背景より、本研究では供用開始前の5径間

連続PCラーメン箱桁橋梁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、車両走行後の自由振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。また、設計時に計算された骨組モデルや三次元有限要素モデルによる固有振動解析結果との比較も行った。

2. 対象橋梁の概要

本研究で対象とした橋梁は、日高自動車道の北海道新冠郡新冠町大狩部に架かる橋長261m、幅員12mの5径

表-1 大狩部橋(仮称)の橋梁諸元

路線	日高自動車道
支間	34.9 m + 3@63.0 m + 34.9 m
上部工型式	5径間連続PCラーメン箱桁橋
有効幅員	12.0 m
曲線半径	∞ ~ 900 m
下部工型式	A1, A2: 逆T式橋台, P1~P4: 壁式橋脚
竣工	令和元年(2019年) ※未供用

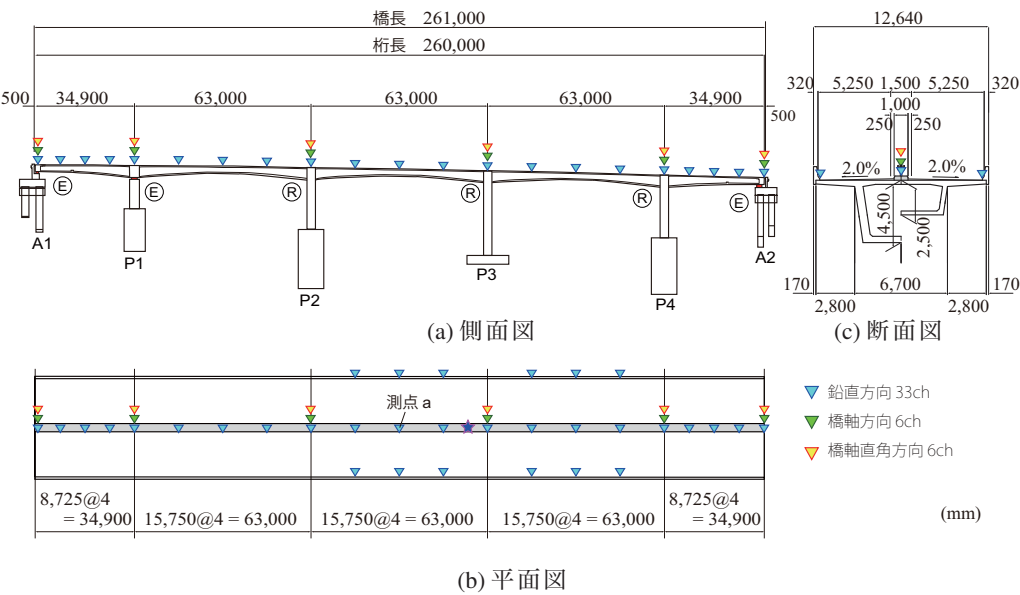


図-1 一般図および振動計配置図



写真-1 橋梁の全景



(a) 1台走行時



(b) 2台走行時

写真-2 大型車両を用いた加振状況

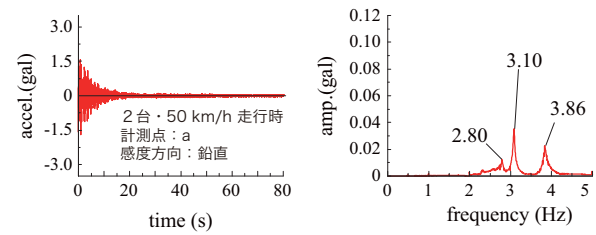
間連続PCラーメン箱桁橋である。下部工形式は、A1, A2が逆T式橋台、P1～P4は壁式橋脚であり、A1, A2橋台ならびにP1橋脚には分散支承が採用されている。図-1には対象橋梁の一般図を、表-1にはその橋梁諸元を示している。また、写真-1には橋梁の全景を示している。なお、本振動実験は、未供用(供用開始前)の2020年11月1日に実施した。

3. 振動実験の概要と結果

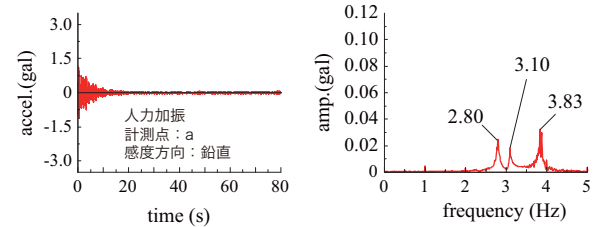
3.1 実験概要

本実験では、図-1に示すように中央分離帯および中央径間の一部に上下流側にデジタルサーボ型振動計(鉛直方向:33ch, 橋軸および橋軸直角方向:各6ch)を設置した。各振動計の感度方向は鉛直方向を基本としたが、橋台および橋脚部においては、感度方向を橋軸および橋軸直角方向とした振動計も設置した。さらに、中央径間の一部にはねじり振動を計測するために、両側の壁高欄近傍に感度方向を鉛直方向とした振動計を設置している。各振動計から出力は、無線LANを介して、5msのサンプリングタイムで収録用PCにて一括収録している。

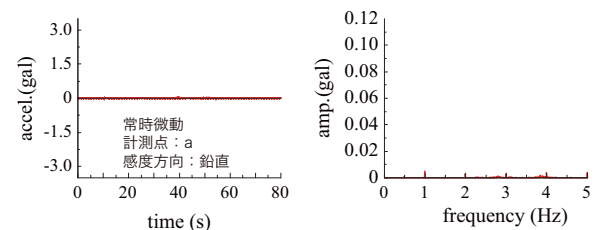
振動計測に関しては、(1)重量調整された大型車両(重量:20t)通行後の自由振動、(2)常時微動および(3)スパン中央による人力加振後の自由振動状態における加速度データを収録した。なお、振動実験は、写真-2に示



(a) 2台走行後



(b) 人力加振後



(c) 常時微動

図-2 計測波形とフーリエスペクトルの一例

表-2 固有振動数の比較

固有振動モード	固有振動数 (Hz)		
	加振方法		
	車両2台	車両1台	人力
曲げ1次	2.78 ~ 2.82	2.79 ~ 2.81	2.80
曲げ2次	3.09 ~ 3.10	3.09	3.07 ~ 3.10
曲げ3次	3.84 ~ 3.86	3.84 ~ 3.85	3.83

すように、(1)片側車線を使って大型車1台を走行させる場合のほか、(2)両側車線を使って2台の大型車を一方方向に走行させる場合について、走行速度や進行方向を変えて複数回実施してしている。

3.2 実験結果

図-2には、実験結果の一例として2台の大型車両を一方方向に通過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、車両通行後では最大1.5 gal程度、人力加振後では最大1 galの加速度が得られているのに対し、常時微動の場合には、ほぼ0 galと非常に小さいことが確認される。また、フーリエスペクトルを見ると、常時微動の場合を除き、複数の卓越振動数が存在することが分かる。これより、本実験では、常時微動を除いて固有振動特性の評価を行うこととした。なお、実験当日は穏やかな天気であり微風状態であったことから、常時微動計測では固有振動特性が評価できなかったものと推察される。

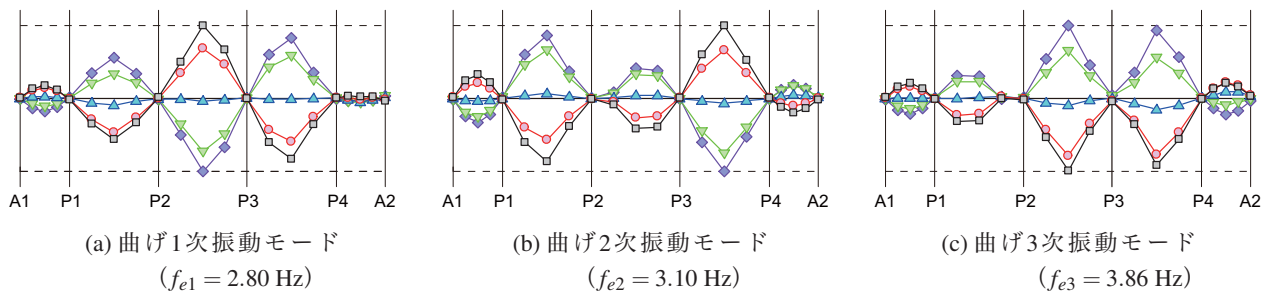


図-3 固有振動モードの一例(加振方法:車両2台, 走行速度 30 km/h)

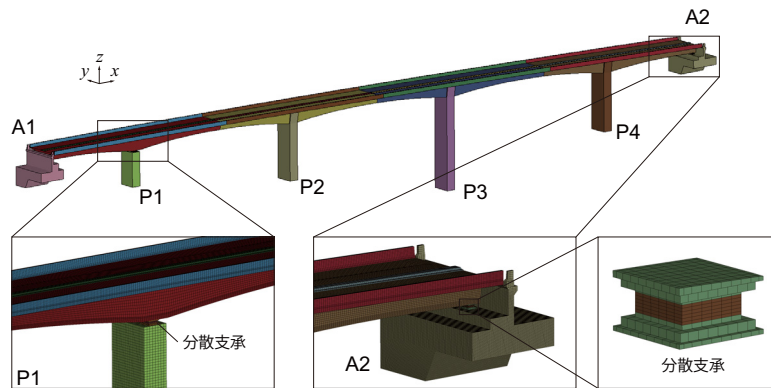


図-4 要素分割状況

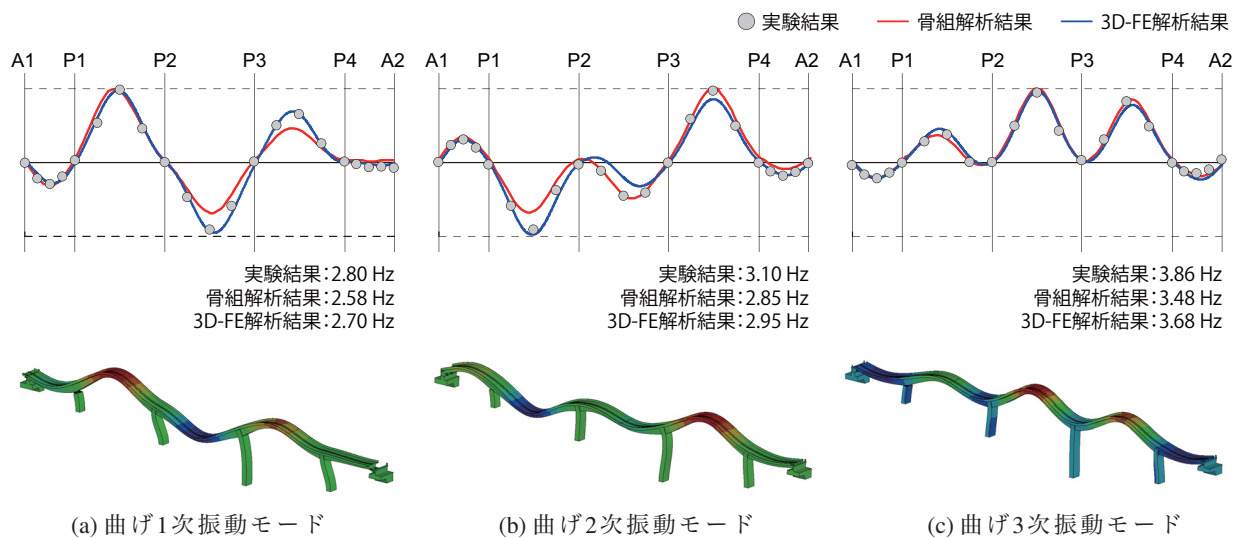


図-5 固有振動モードの比較

表-2には、本実験で特定された各振動モードに対する固有振動数を一覧にして示している。なお、各振動モードに対して固有振動数に若干の幅が示されている。これは、橋梁が平面的に若干の曲率を有していることや、車両の走行方向(上, 下流側)や台数によって励起される振動が異なることに起因しているものと推察される。なお、各振動モードの特定方法に関しては文献6)を参照されたい。

図-3には、特定された固有振動モード分布を示している。全測定ケースのフーリエスペクトルをもとに、対象橋梁の固有振動モード及び振動モード分布を特定した。なお、両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、基準となる正規化振幅を示し、振動モード分布は1/8周期ごとに表示している。

4. 固有振動解析および実験結果との比較

本研究では、今後の維持管理の観点から振動実験の他に、三次元有限要素法を用いた固有振動解析を実施し、実験データと比較・検討を試みた。ここでは、三次元有限要素解析(以後、3D-FE解析)のほか、設計時に計算された骨組解析結果も併せて検討した。なお、3D-FE解析には、LS-DYNA⁷⁾を使用した。

図-4には、固有振動解析に用いた有限要素モデルを

表－3 実験結果と数値解析結果との比較

振動モード	固有振動数 (Hz)		
	実験結果	数値解析結果	
		骨組モデル f_{a1}	3Dモデル f_{a2}
曲げ1次	2.78～2.82	2.58 (8.5%)	2.70 (4.3%)
曲げ2次	3.09～3.10	2.85 (8.1%)	2.95 (4.8%)
曲げ3次	3.84～3.86	3.48 (9.8%)	3.68 (4.7%)

() : 実験結果との誤差

示している。対象橋梁は分散支承、縦断勾配や緩やかな曲線を有していることより、橋梁全体をモデル化している。使用した要素は8節点固体要素とした。なお、実構造ではPCケーブル、鉄筋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、橋脚の下部は地盤に覆われているが、本解析では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して設定した。

図－5には、実験結果から特定された上部工における各固有振動モードについて、数値解析結果と比較したものである。

図－5(a)に示す曲げ1次振動モードに着目すると、骨組解析結果の場合には、P2-P4橋脚区間において実験結果よりも振動モードが小さく評価されていることが分かる。一方、3D-FE解析結果では、実験結果の振動モードをほぼ適切に評価している。

図－5(b)に示す曲げ2次振動モードの場合を見ると、骨組解析結果の場合にはP1-P2橋脚区間で若干振動モードが小さく評価されているものの、他の区間は実験結果とよく対応していることが分かる。3D-FE解析結果の場合には、骨組解析結果で過小評価となったP1-P2橋脚区間では実験結果とよく対応しているものの、P2-P4橋脚区間では振幅を過小評価する傾向にあることが確認される。一方、曲げ3次振動モード(図－5c)の場合には、両解析結果は実験結果と概ね一致している。

表－3には、実験結果および数値解析結果から得られた固有振動数を比較して示している。表より、いずれの振動モードにおいても、両解析結果は実験結果を若干過小評価する傾向にあることが確認できる。なお、実験結果と各数値解析結果の固有振動数を比較すると、その誤差は骨組解析で最大10%、3D-FE解析で5%程度となっている。

5. まとめ

- (1) 車両走行後および人力加振後の振動計測より、曲げ3次振動モードまでの固有振動数および振動モード分布を特定することができた。一方、常時微動計測からは、固有振動特性の評価は難しい結果となった。
- (2) 設計時に計算された骨組モデルや設計図書を用いて構築された三次元モデルを用いた固有振動解析結果より、いずれの解析結果においても実験結果の振動モードを概ね適切に評価していることが確認された。
- (3) ただし、数値解析による固有振動数は、いずれの振動モードにおいても、実験結果と比較して若干小さく評価される傾向にあることを確認した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の瓦井智貴君、日下隼図君には実験データの整理や固有振動解析など多大なご協力頂いた。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) 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, 土木学会, 構造工学論文集, 47A, 1093-1102, 2001.
- 7) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.