室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

既設四径間連続曲線鈑桁橋の固有振動特性に関する現地振動実験及び数値解析的検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学地域共同研究開発センター 公開日: 2019-03-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 川瀬, 良司, 小室, 雅人, 岸, 徳光, 栗橋, 祐介 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009779

既設四径間連続曲線鈑桁橋の固有振動特性に関する現地振動実験及び数値解析的検討

川瀬　良司[*1]，小室　雅人[*2]，岸　徳光[*3]，栗橋　祐介[*2]

1　はじめに

我が国では，高度経済成長期に数多くの道路橋が建設されており，今後，建設後 50 年以上経過した道路橋は急増することになる．一般的な道路橋の耐用年数は 50 年といわれており，これらの橋梁を安全に供用し続けるには，損傷・劣化度診断技術や合理的な補修･補強工法の確立が重要である．

近年，既設橋梁の維持管理や劣化度診断を行う手法として，橋梁の固有振動特性の経年劣化に着目した評価法（SHM）が検討されている．この手法は，定期的に固有振動特性や減衰定数を測定し，それらのデータを蓄積することによって，橋梁の経年劣化の程度や地震災害等における損傷の有無を評価するものである．

著者らの研究グループでは，これまで北海道内の多数の橋梁を対象に現地振動実験を実施し，固有振動数や固有振動モードの特定を行ってきた．さらに，有限要素法による固有振動解析結果と実験結果との比較によって，橋梁の健全性評価を試みてきた [1)-3)]．しかしながら，既往の研究では，比較的長い多径間橋梁に対する検討はあまり実施されていないのが現状である．

このような観点より，本研究では，建設後 28 年が経過した既設四径間曲線鈑桁橋を対象に，今後の合理的な維持管理を行う上で重要と考えられる現時点の固有振動特性評価を目的として現地振動実験および固有振動解析を実施した．

*1：株式会社 構研エンジニアリング
*2：室蘭工業大学 くらし環境系領域
*3：釧路工業高等専門学校

2　橋梁概要

本研究で対象とした橋梁は，北海道内にある曲線橋（橋長 144 m，曲線半径 $R \simeq 200$ m）であり，昭和 63 年（1988 年）に竣工された四径間連続曲線鈑桁橋である．写真 1 には対象橋梁の全景を，また図 1 には対象橋梁主径間部の一般図および断面図を示している．橋梁は 4 主桁で構成されており，床版には 6 %の横断勾配が付いている．表 1 には，振動実験を実施した主径間部の橋梁諸元を示している．

写真 1　橋梁全景

表 1　対象橋梁の諸元

型　式	四径間連続曲線鈑桁橋
橋　長	144 m
支　間	36 m
幅　員	車道 8.5 m
竣　工	昭和 63 年（1988 年）

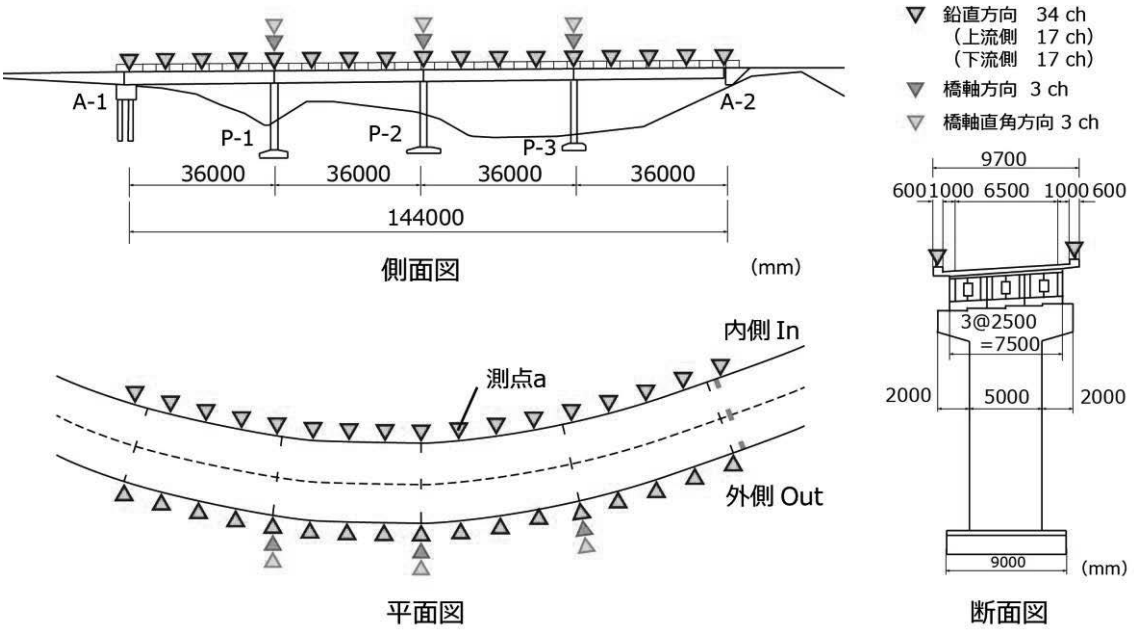


図１　主径間部の一般図および振動計配置図

3　振動実験の概要

3.1　振動計の配置

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に示すようにサーボ型加速度計を橋梁上部工に 40 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 34 点（感度方向：鉛直方向，片側 17 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，P-1，P-2，P-3 橋脚上の外側地覆に計 6 点（感度方向：橋軸方向および橋軸直角方向）の振動計を設置した．

3.2　実験方法

実験は，常時微動および大型車両走行後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．橋梁振動は重量調整された大型車両（20 ton ダンプトラック）を幅員中央部に走行させることによって励起させることとし，車両走行速度，走行台数を変えた全 13 ケースの加速度データを測定した．なお，大型車両走行後は速やかに交通規制を行い，他の交通振動を排除することにより自由振動状態を確保した．

計測は，図２に示す計測システムを用いて，振動計から出力される加速度データをデジタルレコーダーにて一括収録した．なお，サンプリング時間は 5 msec とした．写真２には大型車両を用いた振動実験状況を示している．

写真２　大型車両による実験状況

得られた加速度波形をもとにフーリエスペクトル解析から得られる卓越振動数や位相スペクトルを用いて，固有振動モードおよび固有振動数の特定を行った．

図２　計測システム

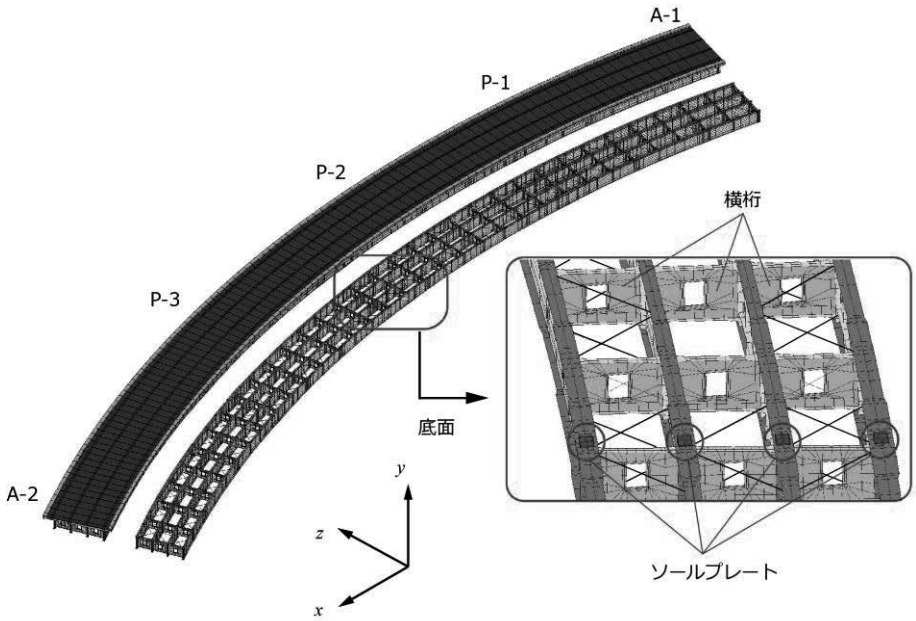


図３　有限要素モデル

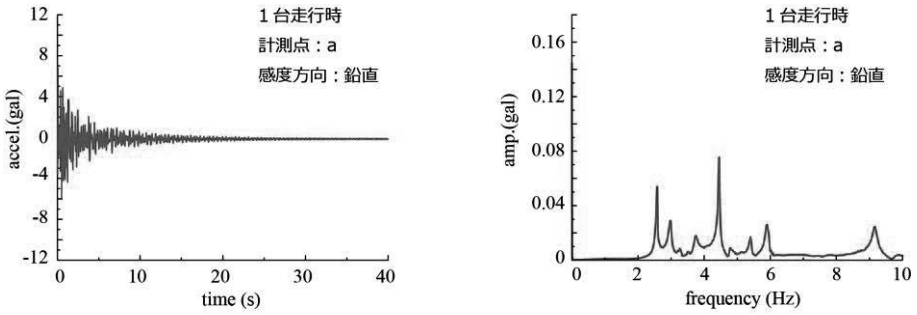
3.3　振動数の決定方法

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，以下の過程に基づいて実施した．すなわち，

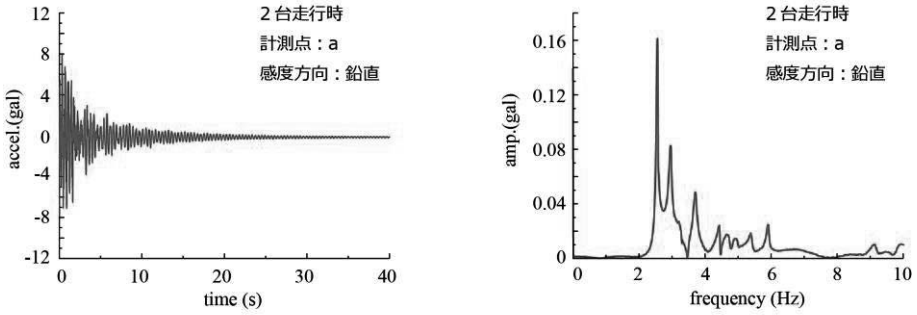
1) 常時微動状態，および大型車両通過後の自由振動状態における全加速度波形を収録する．
2) 全測点の収録波形に関する 120 秒間について FFT 処理を施し，フーリエスペクトルを求める．
3) 主要な測点において計測された応答波形のフーリエスペクトルから固有振動数と考えられる卓越振動数を抽出し，フーリエスペクトル，位相スペクトル分布を用いて波形を生成する．
4) 固有振動モードを求めるために，3)で求めた各測点における卓越振動数近傍のフーリエスペクトル，位相スペクトル分布を用いて波形を生成する．
5) 4)で求められた各測点の加速度波形について，振幅の大きい測点の波形を基準にして 1/8 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　数値解析の概要

数値解析モデルは建設当時の設計図書を参考に可能な限り詳細にモデル化を行った．図３には，数値解析に用いた有限要素モデルを示している．主桁などの鋼材部には 4 節点シェル要素，RC 床版部には 8 節点ソリッド要素，上下横構には 2 節



(a)　１台走行時



(b)　２台走行時

図４　加速度波形の一例とそのフーリエ振幅（V = 50 km/h）

点ビーム要素を用いた．なお，高欄や橋脚，橋台に関しては，振動特性に及ぼす影響が小さいと考えられることから，本研究ではモデル化を省略した．総節点数および総要素数はそれぞれ 42,670, 37,267 である．表２には，使用した物性値を一覧にして示している．

境界条件は，図３に示すソールプレートの節点に与えることとし，設計条件に基づき，A1 橋脚の支承を固定支承，他の橋脚の支承を理想的な可動支承とした．なお，数値解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS[4)]を使用した．

表２　材料物性値一覧

材料	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	単位体積質量 (ton/m³)
鋼材	200	0.3	7.85
RC 床版	25	0.167	2.40
アスファルト	98	0.35	2.30

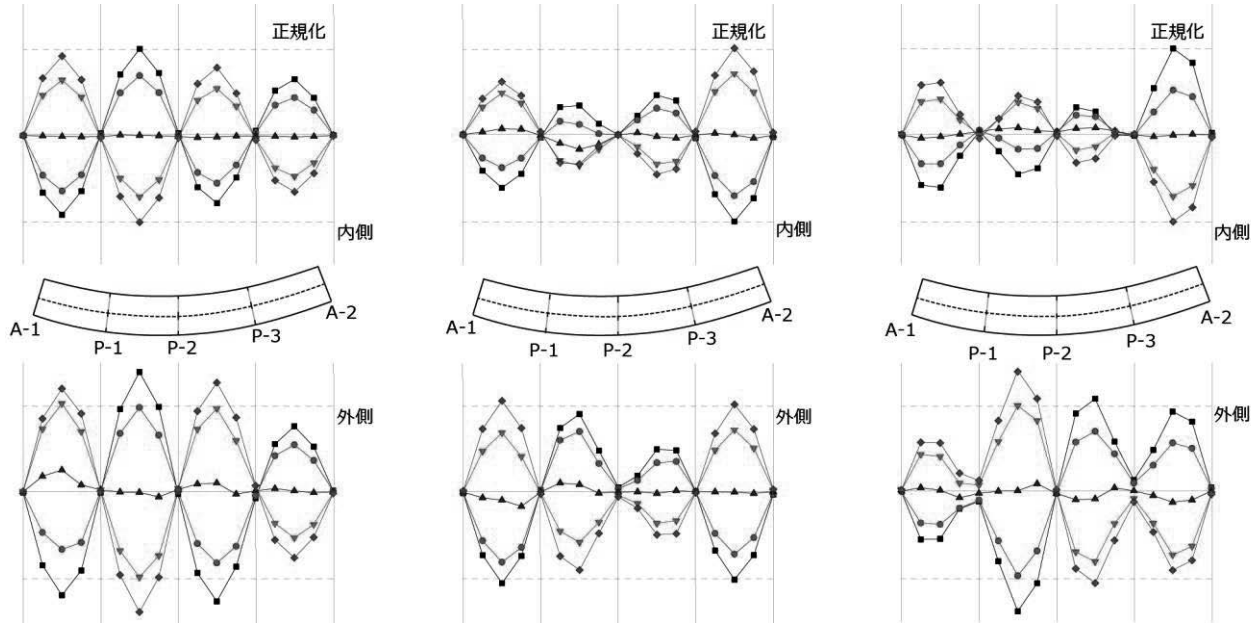
5　実験結果および考察

5.1　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，図１に示す測点 a における大型車両通行後（V = 50 km/h）の加速度波形と，その加速度波形から得られたフーリエ振幅を示している．図より，最大加速度振幅は走行台数で異なり，１台走行時では最大 6.8 gal，２台走行時では最大 8.0 gal 程度の加速度振幅が得られている．加速度波形から得られたフーリエスペクトルには複数の卓越振動数が存在することが分かる．また，測点によって得られる卓越振動数が異なる．これは，振動モードによって着目する測点部が節となるような場合にはスペクトル値が小さくなるため，卓越振動数が明確に現れないことを意味している．これらの卓越振動数を基に，固有振動モードの特定を行った．

5.2　振動モード分布

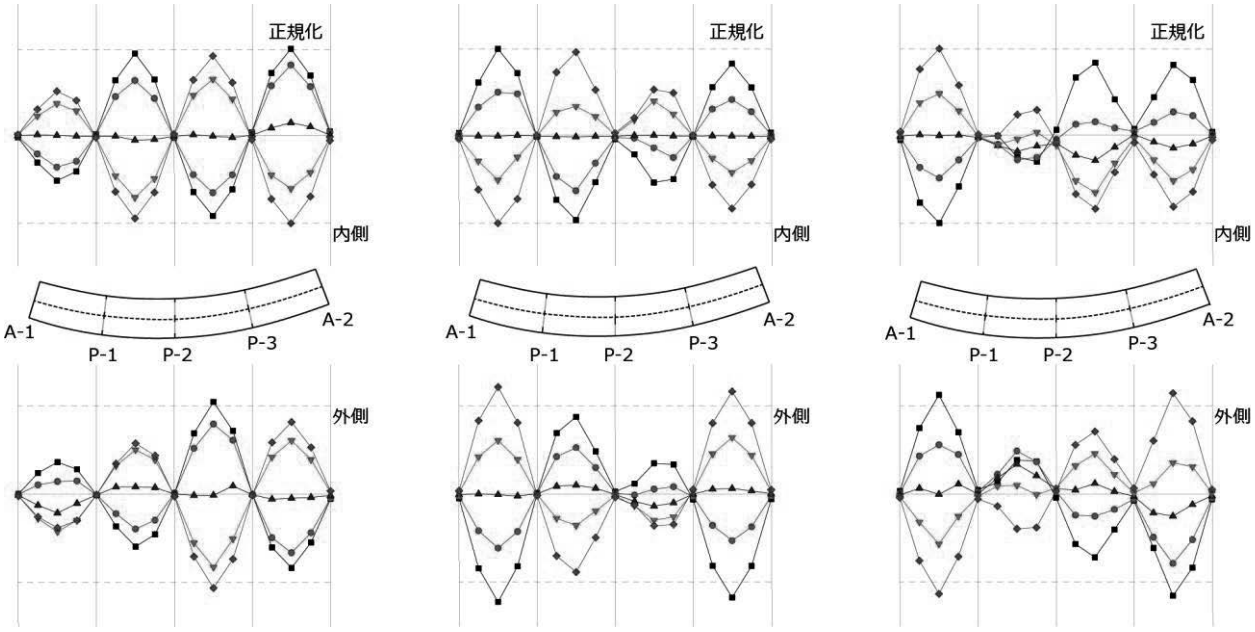
図５には，図４に示した加速度スペクトルをもとに特定された振動モードを示している．全ての



(a) 曲げ 1 次振動モード
(f_1 = 2.58 Hz)

(b) 曲げ 2 次振動モード
(f_2 = 3.26 Hz)

(c) 曲げ 3 次振動モード
(f_3 = 3.73 Hz)



(d) ねじり 1 次振動モード
(f_4 = 4.45 Hz)

(e) ねじり 2 次振動モード
(f_5 = 4.78 Hz)

(f) ねじり 3 次振動モード
(f_6 = 5.41 Hz)

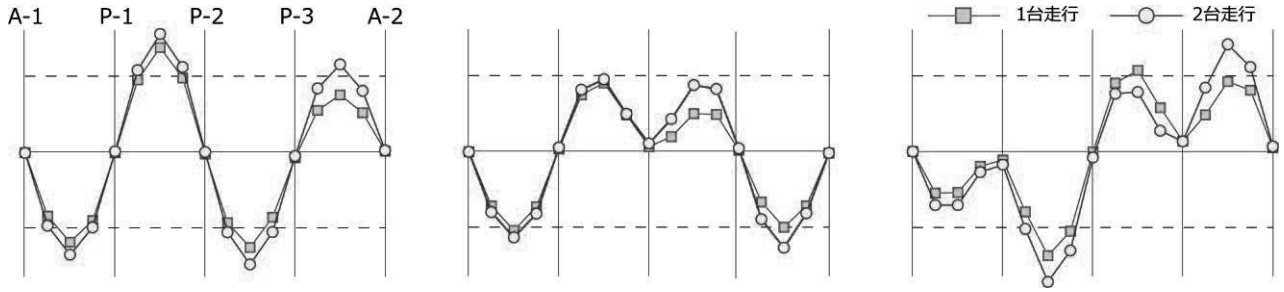
図 5　振動モード分布（1 台走行時，V = 50 km/h）

振動モードは内側の最大振幅が 1 となるように正規化している．図中の点線は，基準となる内側の正規化振幅を示しており，振動モード分布は 1/8 周期ごとに表示している．

図 5 より，曲げ 2 次，3 次およびねじり 2 次，3 次振動モードにおいて支点上で若干の振動が確認されるものの，その他では節と腹が明確に現れており，本振動実験では，ねじり 3 次振動モードまでの 6 つの振動モードの特定ができたものと考えられる．

表３　実験条件および数値解析結果による固有振動数の比較

振動モード	固有振動数 (Hz)					
	実験結果				固有振動解析結果	
	１台走行	２台走行			設計条件	固定条件
	50 km/h	50 km/h	40 km/h	30 km/h		
曲げ 1 次振動	2.58	2.55	2.58	2.57	2.45	4.06
曲げ 2 次振動	3.26	3.28	3.24	3.22	2.74	4.51
曲げ 3 次振動	3.73	3.71	3.72	3.72	3.64	4.68
ねじり 1 次振動	4.45	4.43	4.45	4.45	-	-
ねじり 2 次振動	4.78	4.75	4.76	4.73	-	-
ねじり 3 次振動	5.41	5.39	5.34	5.38	-	-



(a) 曲げ 1 次振動モード　　(b) 曲げ 2 次振動モード　　(c) 曲げ 3 次振動モード

図６　振動モード分布比較（外側，V = 50 km/h）

また，各固有振動モードを詳細に着目すると，最低次固有振動モードである曲げ 1 次振動モード（a 図）に関しては，各径間の振幅に若干の差異が見られるもののほぼ対称の振動モード分布であることが分かる．一方，曲げ 2 次振動を含む高次振動モードでは，各径間の振幅が異なり，必ずしも対称とはなっていない．これは，本実験では車両走行後の減衰自由振動波形をもとにモードを特定していることから，高次振動モードになるほど対称な振動モードを特定することは難しいことを示唆している．なお，内側と外側の振幅を比較すると，後者の方が前者よりも大きく示されている傾向が見られる．これは，曲線桁特有の現象であり，ねじり剛性の影響によるものと考えられる．

5.3 車両走行速度が固有振動数に及ぼす影響

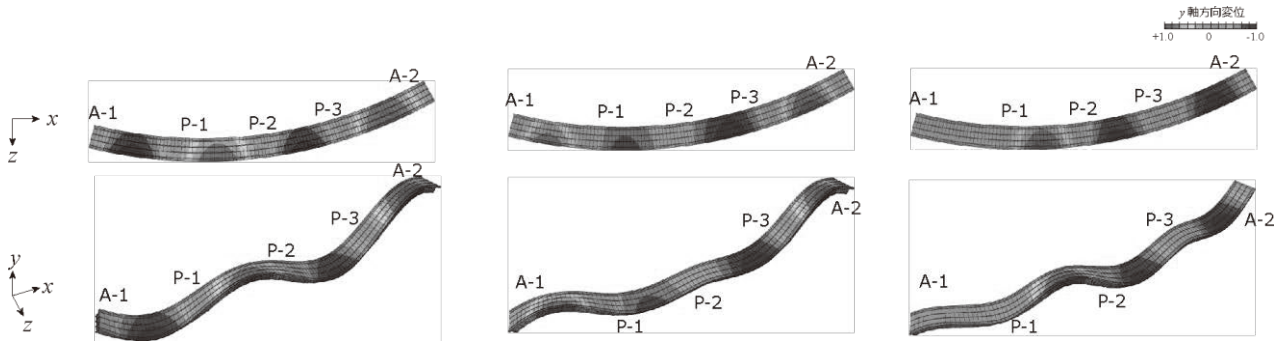
表３には，本実験結果により特定された代表的な実験ケースにおける固有振動数を，後述の固有振動解析結果と比較して示している．なお，固有振動解析では，設計条件（理想的な可動支承）の他に支承条件を全て固定支承に変更した場合の結果についても示している．

表より，実験結果の固有振動数に着目すると，車両走行速度および走行車両数にかかわらず固有振動数はほぼ等しい値を示している．これより，車両走行速度が固有振動数に及ぼす影響は小さいことが分かる．

5.4 車両走行台数による振動モード分布の比較

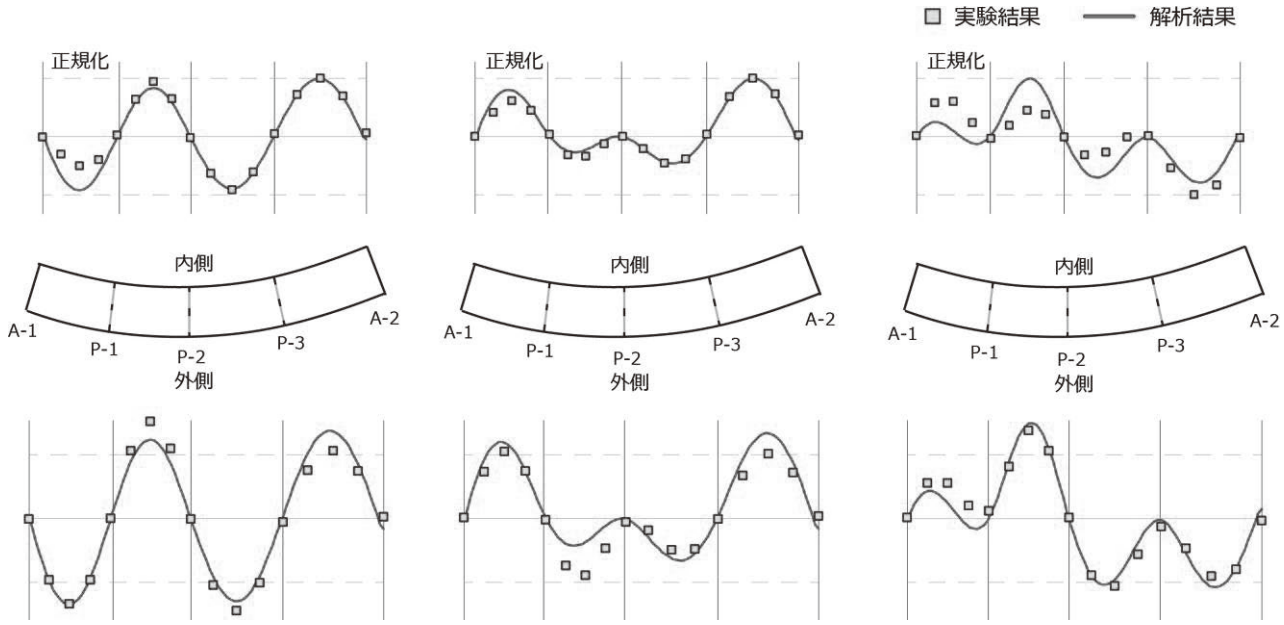
図６には，車両台数が１台および２台の場合について，曲げ 3 次振動モードまでを比較したものである．ここでは，車両走行速度 V = 50 km/h の場合における橋梁外側の振動モード分布を示している．

図より，１台および２台走行時における振動モード分布を比較すると，いずれの場合も節と腹が明確に確認できることが分かる．さらに，いずれの振動モードにおいても，２台走行時の振幅が１台走行時のそれよりも大きく示されている．このことは，車両走行時に励起される橋梁の振動振幅は，走行台数によって影響を受けることを示唆している．



(a) 曲げ 1 次振動モード (f_1 = 2.45 Hz)　(b) 曲げ 2 次振動モード (f_2 = 2.74 Hz)　(c) 曲げ 3 次振動モード (f_3 = 3.64 Hz)

図 7　固有振動解析から得られる振動モード分布（支承：設計条件）



(a) 曲げ 1 次振動モード　(b) 曲げ 2 次振動モード　(c) 曲げ 3 次振動モード

図 8　振動モード分布の比較

これより，比較的長い橋梁の固有振動特性を適切に把握する場合には，橋梁に与える起振力が大きいほど効果的であることが確認される．

6　固有振動解析結果と実験結果の比較

6.1　固有振動モードの比較

図 7 には，支点条件を設計条件とした場合の固有振動解析から得られた曲げ振動モード（変形倍率：10,000 倍）を示している．また，図 8 には実験結果と解析結果から得られる振動モードを比較して示している．なお，前述のように実験結果からは，ねじり振動モードも特定されているが，本数値解析結果からはそれらに対応する振動モードは確認されていない．この点に関しては今後の検討課題としたい．

図 8 より，曲げ 1 次（a 図），曲げ 2 次振動モード（b 図）に着目すると，数値解析結果では，いくつかの径間で実験結果と異なる形状を示しているものの，全体的には両者はほぼ一致していることが分かる．また，(c)図に示す曲げ 3 次振動モードの場合にも，内側のモード分布に若干の差異が見られるものの，外側の分布形状は概ね一致しているものと判断される．

6.2　固有振動数の比較

表３より, 解析結果の固有振動数に着目すると, 設計条件（理想的な可動支承）の場合には，いずれの振動モードにおいても実験結果よりも小さいことが分かる．一方，全ての支承条件を固定支承とする場合には，いずれの場合も実験結果よりも固有振動数は大きく示されていることから，実橋梁の支承は，設計条件と固定支承の間に位置しているものと考えられる．このことは，実際の可動支承には，摩擦抵抗が存在することから，これらの影響を解析モデルに適切に反映させる必要があることを示唆している．

以上より，本橋梁は設計図書に基づいた有限要素モデルによる固有振動解析結果と実験結果を比較すると，橋梁の全体系に及ぼす大きな損傷や劣化はなく，建設当時の健全性を有しているものと推察される．

7　まとめ

本研究では，既設四径間連続曲線鈑桁橋の固有振動特性の把握を目的として，現地振動実験および有限要素法による固有振動解析を実施した．本研究の範囲内で得られた結果を整理すると，以下の通りである．

1) 車両走行後の振動計測により，低次の固有振動数および固有振動モードを特定した．
2) 曲げ振動において内側と外側で振幅が異なることを確認した．これは曲線橋特有の現象である．
3) 本実験結果と数値解析結果を比較すると，低次の固有振動モードおよびその振動数は概ね一致している．
4) 3) より, 本橋梁は当初設計時から大きな損傷はなく，建設当時の健全性を有していると推察される．

謝　辞

振動実験の実施にあたっては，室蘭工業大学構造力学研究室の学生諸君に多大なるご協力を頂いた．実験データの整理に関しては，同研究室の今井勇輝君（現㈱新技術コンサル）にご助力を頂いた．ここに深く感謝の意を表する．

参考文献

1) 小室雅人，川瀬良司，栗橋祐介，岸　徳光：二径間連続非合成曲線鈑桁橋の固有振動特性に関する現地振動実験，土木学会北海道支部論文報告集，CD-ROM，72，A-42，2015.
2) 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, 15, 269-276, 2007.
3) 山本修司，小室雅人，川瀬良司，岸　徳光：床版打換えによる鋼合成桁橋の固有振動特性に関する実験的検討，鋼構造年次論文報告集，21，825-831，2013.
4) ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.13, Dassault Systèmes Simulia Corp.