

## 非接触振動計測を用いた既設PC橋梁の構造同定に関する研究

長崎大学		修(工)	○牧野	高平
長崎大学	正会員	工博	松田	浩
長崎大学		博(工)	森田	千尋
九州大学	正会員	博(工)	佐川	康貴

Abstract : The vibration measurement method is utilized simply to evaluate bridge's structural performance. The decreased stiffness of the structure due to damage, causes a change in the natural vibration modes and natural frequencies. Numerous studies have been conducted to evaluate the health of bridges using this change. In this study, the vibration measurements of PC hollow slab bridge were carried out using Laser Doppler Velocimeter that can be non-contact and long distance measurement. The natural frequency and vibration mode of the target bridge was calculated from the measurement results. In addition Three-dimensional FEM analysis was performed. The vibration characteristics identification of the target bridge was conducted from comparison of these results. From the above, the health evaluation of PC bridge using vibration measurement by LDV was examined.

Key words : Laser Doppler Velocimeter , Natural Frequency , Vibration Mode Shape

## 1. はじめに

近年、簡便に実施可能な橋梁点検手法の一つとして振動計測が用いられている。損傷などによる構造物の剛性低下により、固有振動数や固有振動モードなどの振動特性の指標に変化が生じることが広く知られており、この変化を利用した橋梁の健全度評価法に関する研究が数多く実施されている<sup>1) 2)</sup>。しかし、従来の加速度計を用いて対象物全体の振動モードを計測しようとした場合、多くのセンサーの設置に複雑な配線作業が生じるほか橋梁の架設条件によってはセンサーの設置が制限される場合がある。そこで本研究では、長距離・非接触計測が可能なレーザドップラ速度計<sup>3)</sup> (以下、LDV) の実橋梁への適用について検討を行った。LDVは、レーザのドップラ効果を利用した速度計測システムであり、その計測原理から非接触かつ長距離での計測が可能である。さらに、時刻同期を取った2台のLDVを用いて計測を行い結果をつなぎ合わせることで計測点の制限なく対象物の振動モード形状を推定することが可能となる。本研究では、供用中の2径間連続PC中空床版橋を対象として、時刻同期を取った2台のLDVを用いて振動計測を実施し、固有振動数算出および固有振動モードの推定を行った。あわせて三次元FEM解析を実施し両者の比較から対象橋梁の振動特性の同定を行った。これらの結果から、LDVによる振動計測を用いたPC橋梁の健全度評価に関する検討を行う。

## 2. レーザドップラ速度計

### 2.1 概要

LDVは、レーザのドップラ効果を利用し、レーザを照射した対象物の計測器に対して近づいてくる、または離れていく速度を計測するシステムである。照射されたレーザ光は、光の波となって入射光として対象物にぶつかり反射するが、対象物が入射光に対して離れていく場合、入射光と比較し反射光の波長は長くなる。反対に、入射光に対して対象物が近づいてくる場合、反射光の波長は短くなる。この波長の変化を測定することで非接触での速度の検出が可能となる(図-1)。また、検出された速度にFFT(高速フーリエ変換)処理を行うことで固有振動数を算出することが出来る(図-2)。

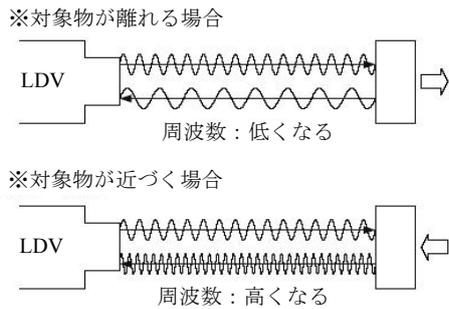


図-1 計測原理

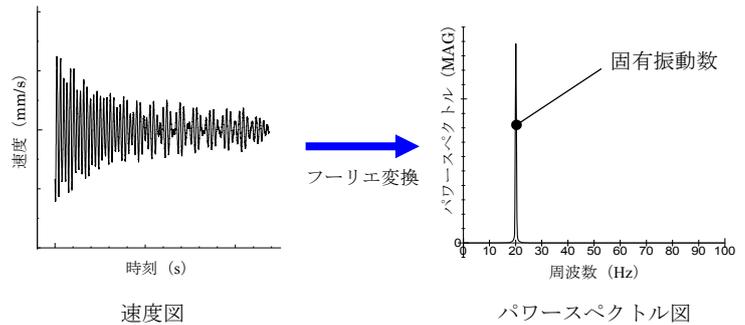


図-2 固有振動数算出

### 2.2 固有振動モード計測

本研究では、LDVを用いた実橋梁の振動モード推定に関する検討を行っている。振動計測から振動モードを同定するためには、基準とする計測点の振幅と他の計測点の振幅との比および位相関係がわかれば良い。しかし、実際には計測器の数に制限があり、橋梁全体で同時に時系列波形が得られない場合が多い。そこで、本研究では部分的な振動モードの同定を複数回行い、重複する計測点の相対ベクトルで正規化することで、橋梁の全体の固有振動モードを算出する手法を用いた<sup>4)</sup>。この手法によれば、計測点を重複させながら振動計測を行うことで橋梁全体の振動モード形を同定することができる。これまで加速度計などによる本手法を用いた全体振動モード同定に関する研究が行われてきたが、本研究では同様の手法で2台のLDVを用いて橋梁全体の振動モード同定に関する検討を行った。

2台のLDVを用いて振動モード形を同定するための計測方法を図-3に示す。始めに計測1で2台のLDVによって振動計測を行い、フーリエ振幅スペクトルと計測された2点の位相差を求める。計測1終了後、1台のLDVの計測点を変更し、計測2を行う。計測2でも計測1と同様に、振幅スペクトルと位相差を求める。計測1と計測2の結合方法を図-4に示す。計測1と計測2の共通する点において、フーリエ振幅スペクトルの平均値を求める。次に計測1、計測2における残りの点に、この平均値に対しての元のフーリエ振幅スペクトルの比率を求め、残りの点のフーリエ振幅スペクトルの修正を行う。これ以降は、LDVの計測点の変更される毎の計測に対して、同様の処理を行うことで、部分的な振動モードから全体の振動モード形の同定を行う。

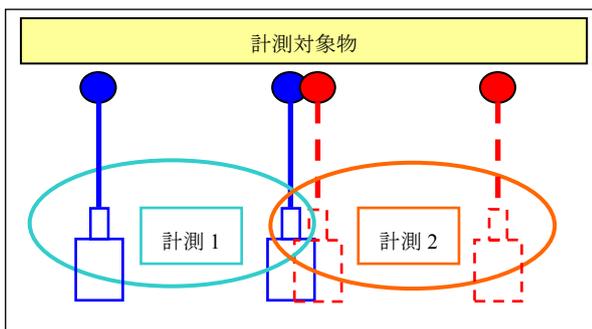


図-3 計測方法

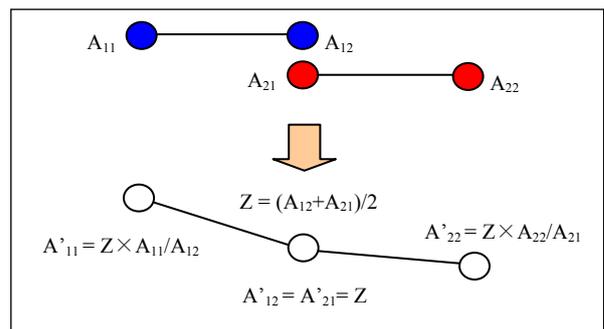


図-4 計測結果結合方法

### 2.3 計測精度照査

LDVによる実橋梁の計測にあたり、計測精度、適用性について検討を行った。筆者らはこれまでにLDV計測における計測距離と固有振動数の関係について検討を行っている。アルミニウム製の試験体を使用した振動実験では、計測距離を5mから50mまで変化させて計測を行った結果、計測距離に関わらず固有振動数は一定かつ既存の加速度計と同一の値を示した<sup>5)</sup>。また、過去に実施した複数の鋼橋における振動計測では、計測条件に関係なく各橋梁の明確な固有振動数を得ることができ、その値は三次元有限要素解析により推定される値とほぼ同程度の値であった<sup>6)</sup>。

本研究では、実橋梁を対象として固有振動数とあわせて固有振動モードの計測を実施した。2台のLDVを使用した固有振動モード推定手法を実橋梁へ適用するにあたり、鋼製試験体を用いた振動実験を行いその適用性について検討した。実験概要を図-5に鋼製試験体 (SS400材,  $t=4.5\text{mm}$ ) 概要を図-6に示す。試験体両端部はコンクリート製の土台にボルトで固定し、LDV計測点にはレーザの反射光量を確保するため再帰性反射シールを貼付した。計測精度の検証のためLDV計測点近傍に加速度計を設置し、あわせて計測を行った。試験体上部からレーザを照射し、計測距離を1.0m, 5.0m, 8.5m, と変化させて計測を行った。計測時には、解析から推定される各次数の振動モード形状の最大振幅箇所近傍に打撃による加振を行った。

固有振動数の計測結果を表-1に示す。計測距離によらず得られた固有振動数の値は一定の値を示しており、かつ加速度計の値とほぼ一致していることが確認できる。次に、計測距離1.0mにおける1次固有振動モードの加速度計との比較結果を図-7に示す。図-7は試験体中央列の振動モードを表しているが、LDVから得られた振動モードは加速度計の値とほぼ一致している。次に、各計測距離での計測から得られた1次および3次固有振動モードを図-8, 9に示す。各次数において計測距離によらず、ほぼ同一の固有振動モードが得られたことが確認できる。図-10にLDV計測結果から算出した1次から3次の固有振動モードを示す。

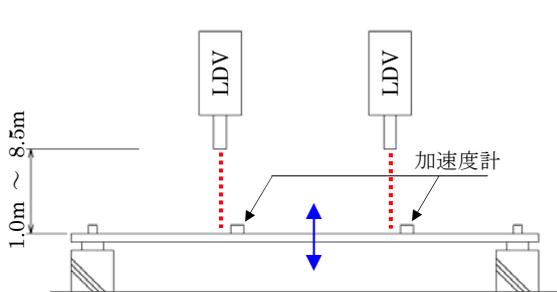


図-5 振動実験概要

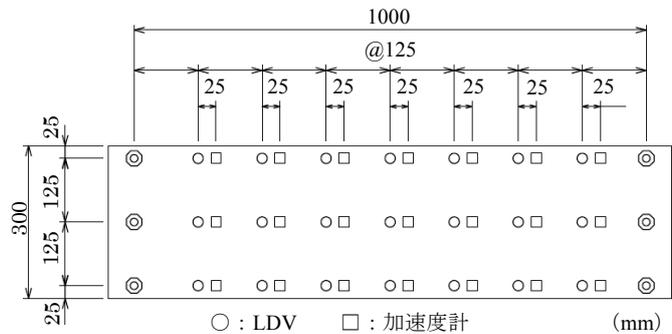


図-6 試験体概要

表-1 固有振動数計測結果

	計測距離 (m)	固有振動数 (Hz)	加速度計 (Hz)	誤差 (%)
1次	1.0	22.34	22.34	0.00
	5.0	22.22		0.51
	8.5	22.22		0.51
2次	1.0	53.34	53.33	0.02
	5.0	53.22		0.21
	8.5	53.22		0.21
3次	1.0	61.27	61.26	0.02
	5.0	61.08		0.29
	8.5	61.12		0.23

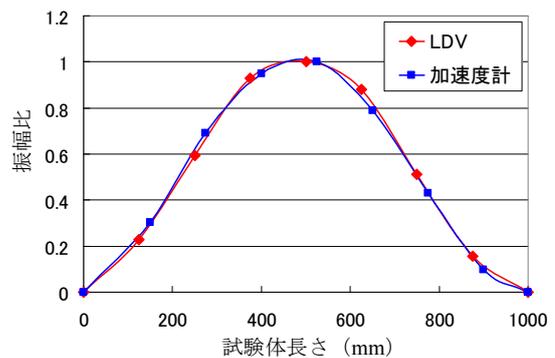


図-7 振動モード比較 (加速度計)

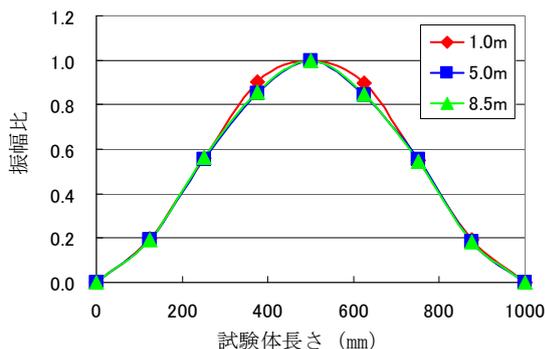


図-8 振動モード比較 (1次)

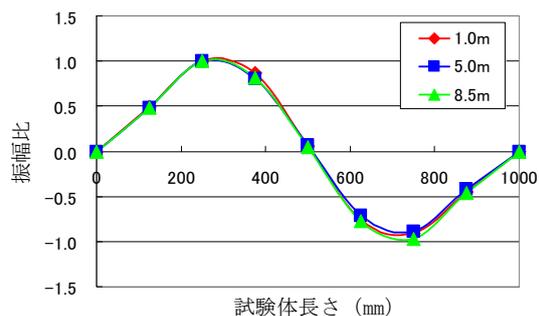


図-9 振動モード比較 (3次)

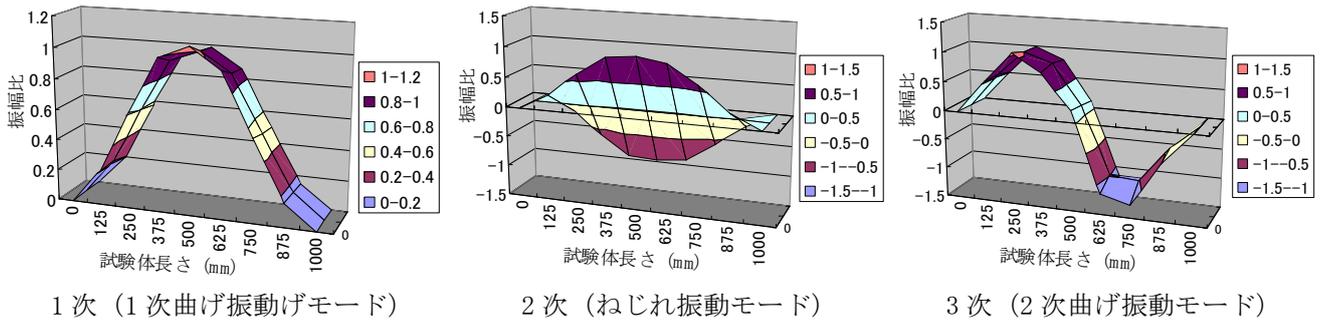


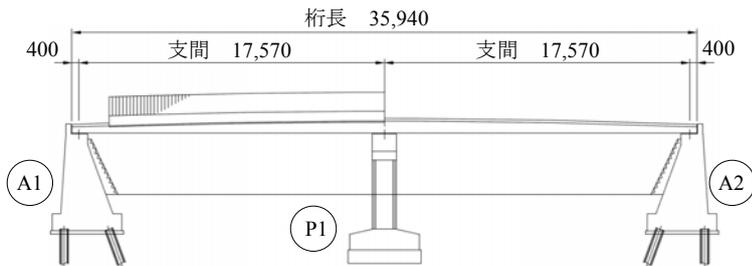
図-10 固有振動モード図

### 3. 実橋梁振動計測

#### 3.1 対象橋梁および計測概要

本研究では、既設のポストテンション方式2径間連続中空床版橋を対象として計測を実施した。本橋梁には主桁下面全体にアルカリシリカ反応に起因すると考えられるひび割れが生じている。対象橋梁の概要を図-11に示す。

LDV計測における計測点を図-12に示す。計測点は各径間の三次元的なモード形状推定を目的として格子状に各径間9点（計測点a1～a9, b1～b9）および橋軸方向の橋梁の全体モード形状推定を目的として床版端部に橋軸方向の8点（計測点1～8）を設定した。前者の計測点は、下部工に平行垂直に施工された型枠目地を基準としたため、橋軸と傾斜角10度を有している（便宜上、以降の記述では橋軸方向、および橋軸直角方向と記載する）。床版下面の各計測点に再帰性反射シールを貼付し、各計測点のほぼ直下からレーザを照射して計測を行った。計測距離は約1.5mから2.5m程度、計測時間は30秒とした。計測状況を図-13に示す。計測は時刻同期を取った2台のLDVを用いて2点の計測点の組合せを変えながら順次実施した。各計測点組合せ毎に2回の計測を実施し、得られた振幅比の平均値を用いて振動モードの推定を行った。なお、計測時は車両規制などは行わず、一般車両通行時のランダムな加振状態で計測を行った。計測結果のうちFFT処理を行う区間を車両通過時、通過後など変化させたが算出される固有振動数に明確な差が見られなかったことから、全計測で対象区間を計測全体（30秒）で統一した。



橋梁概要

橋格	1等橋
構造形式	ポストテンション方式 PC2径間連続中空床版橋
橋長	36.00m
桁長	35.94m
支間長	2×17.54m
幅員	2.0+7.00+2.00=11.00m
斜角	80° 00'

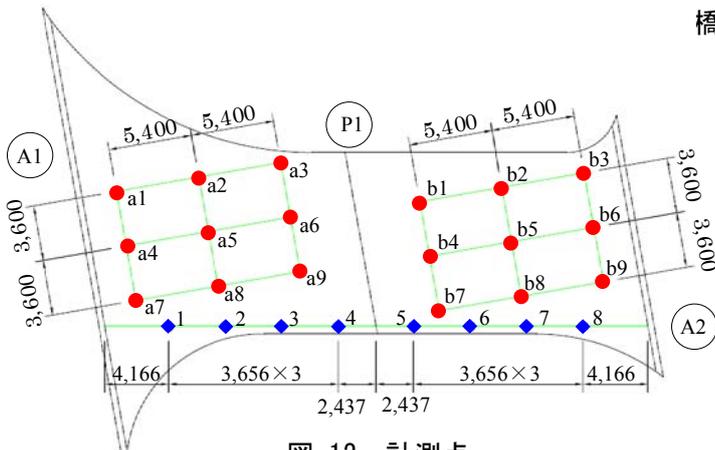


図-12 計測点



図-13 計測状況

### 3.2 解析概要

計測により推定した対象橋梁の固有振動モードの妥当性評価を目的として三次元有限要素モデルを用いて固有値解析を実施した。解析モデルを図-14, 15に, 解析に使用した材料特性を表-2に示す。全ての部材をソリッド要素でモデル化した。境界条件は, A1橋台をピン支持, P1橋脚およびA2橋台をローラー支持とした。

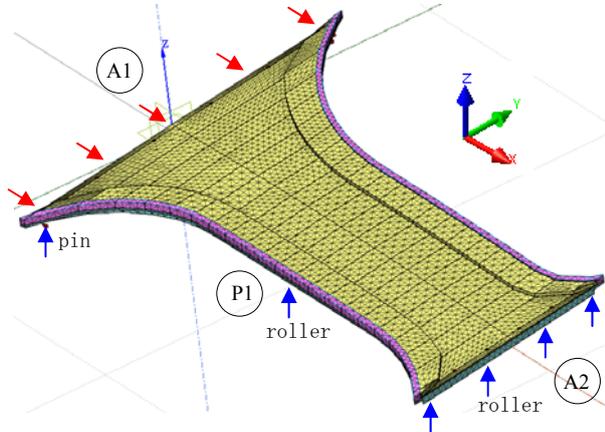


図-14 解析モデル (全体)

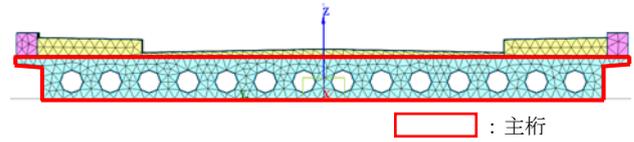


図-15 解析モデル (断面)

表-2 材料特性

部材	主桁	地覆, 舗装
線弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	24,900	19,800
ポアソン比	0.2	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,300	

### 3.3 結果

計測および解析から得られた固有振動数を表-3に示す。解析結果は, 1次では計測値に対して1%程度低かったのに対して2次では6%程度高い値となった。次に, 計測結果から推定した固有振動モードと解析値の比較結果を図-15, 16に示す。図-15は格子状に設定した計測点 (計測点a1~a9, b1~b9) から得られた各径間の三次元振動モード形状, 図-16は計測点1~8から得られた橋梁全体の振動モード形状を表す。計測から得られた各径間の三次元振動モード形状は, 両次数ともに曲げ振動モード形状を示しているが, 1次モードは橋軸直角方向の振幅がほぼ一定であるのに対して, 2次モードでは同一方向に振幅の差が確認できる。解析においても同様の傾向が見られ, 両者は類似の振動モード形状を示している。一方, 橋梁全体の振動モードは, 1次では計測値と解析値がほぼ一致しているのに対して, 2次ではその結果に差が見られる。全体的なモードは類似の傾向を示しており, P1-A2径間のモード形状はほぼ一致しているものの, 計測でのA1-P2径間の振幅が解析値と比較して小さい。言い換えれば, 計測値は解析値と比べてA1-P1径間に対するP1-A2径間の振幅の比率が大きいといえる。

本橋梁はコア採取による強度調査が実施されているが, 複数個所のコアから算定された線弾性係数には10,100~24,900N/mm<sup>2</sup>と大きなばらつきが見られた。2次固有振動数の計測値が解析値に対して低かったことから使用材料の線弾性係数の低下が推測される。しかし, 計測された固有振動モードおよび複数個所の強度試験の結果から, その剛性低下は橋梁全体ではなく, 一部あるいはある特定の範囲にわたるものでないかと考えられる。また, 本橋梁に生じているひび割れの一部には規則性があり, その剛性低下が方向依存性を有している可能性もあわせて推測される。現状の本橋梁の振動特性を解析的に再現しようとした場合, これらの材料特性を考慮する必要がある。また, 計測結果との比較から健全度を評価するには, 橋梁の初期状態の正確なモデル化が重要であるが, より正確な解析モデル構築には, 支承部の形状などを考慮した境界条件に関する更なる検討が必要であると考えられる。

表-3 固有振動数比較

	計測値 (Hz)	解析値 (Hz)	差異 (%)
1次	4.87	4.80	-1.36
2次	6.67	7.10	6.49

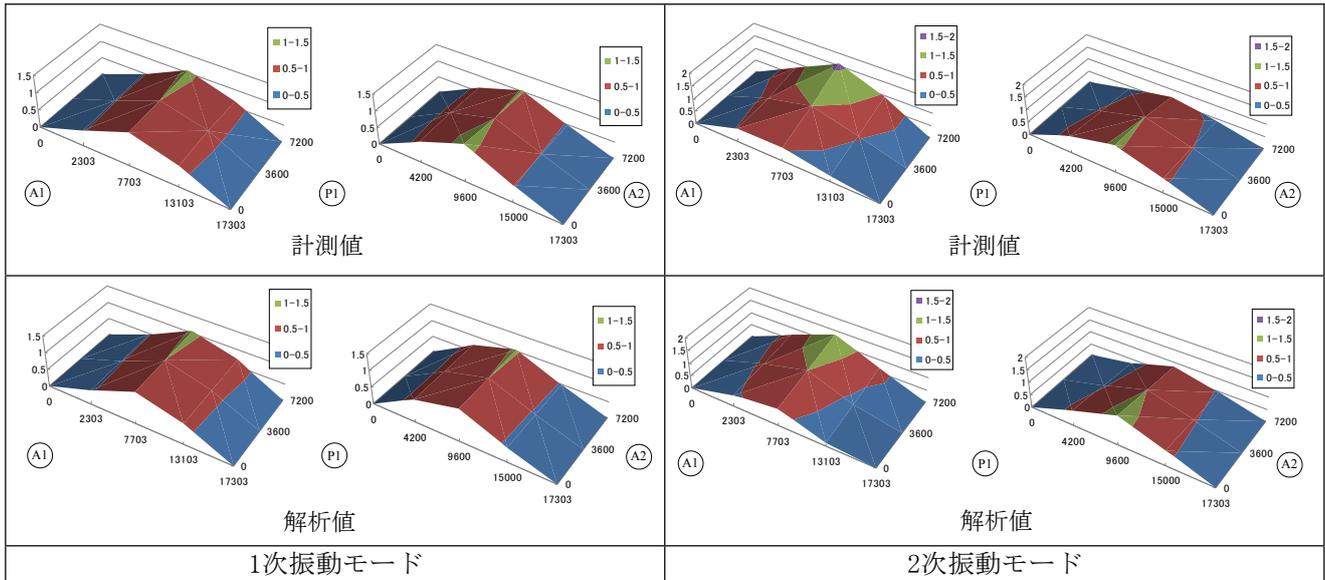


図-15 固有振動モード比較 (計測点 a1~a9, b1~b9)

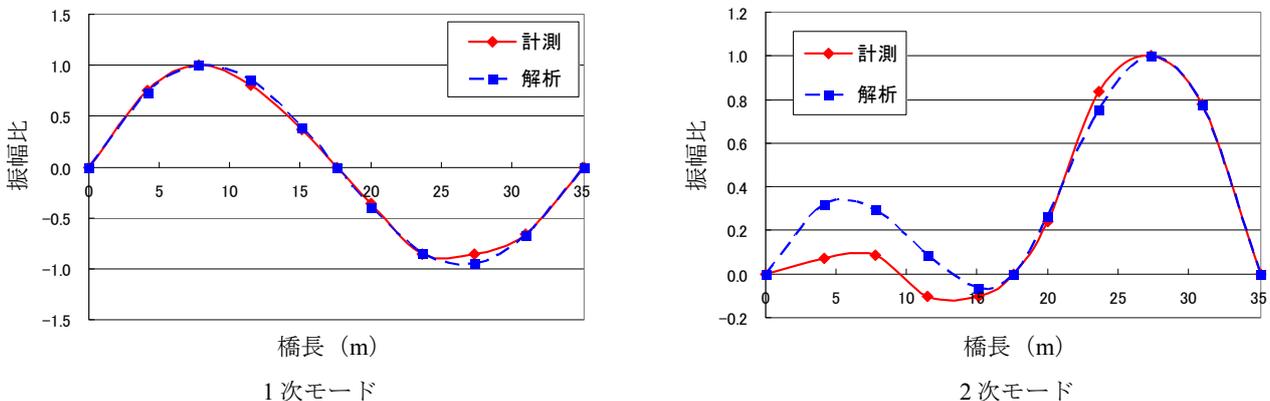


図-16 固有振動モード比較 (計測点 1~8)

4. まとめ

本研究では、長距離・非接触計測が可能なLDVを用いた既設橋梁の振動計測および健全度評価に関する検討を行った。対象としたPC橋梁の計測結果から算出された固有振動数および固有振動モードは、その計測条件から事前の鋼板試験体を用いた実験結果と照らし合わせて妥当であると考えられる。解析結果との比較から剛性の低下などを大まかに推定することができたが、LDV振動計測を用いたより詳細な診断手法を確立するには、境界条件の設定を含めた実橋梁の初期状態の正確な解析モデル化および変状などによる材料特性の変化の解析モデルへの反映方法の検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、(財)日本建設情報総合センターの研究助成を受けて実施したものです。計測実施にあたり協力頂いた長崎大学大学院の永山隼君、池田遼介君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川谷 他, 模型桁車両走行実験における橋梁振動特性と異常診断, 土木学会年次学術講演会, I-521, 2010.9
- 2) 北野 他, プレストレストコンクリート道路橋の振動計測, 土木学会年次学術講演会, v-149, 2011.9
- 3) 上半文昭, 構造物の振動を非接触で計る, RRR, Vol.4, pp.22-25, 2007
- 4) 宮下 他, 二台の無線LAN加速度計による橋梁の振動モード形同定, 土木学会年次学術講演会, I-496, 2006.9
- 5) 牧野 他, レーザドップラ速度計を用いた振動計測による実橋梁の構造同定, 実験力学, 11(3), pp.43-50, 2011.9
- 6) 牧野 他, 既設鋼橋の3次元有限要素解析と振動計測, 鋼構造年次論文報告集, 第19巻, p625-630, 2011.11