

# 光学的計測法を用いた中小橋梁の構造特性同定に関する研究

林謙介\*・河村太紀\*\*・木本啓介\*\*\*・山口浩平\*\*\*\*・  
杉江匡彦\*\*\*\*・松田浩\*\*\*\*

## Study on identification of structural characteristics of short and medium span bridges by optical measurement method

by

Kensuke HAYASHI\*, Taiki KAWAMURA\*\*, Keisuke KIMOTO\*\*\*,  
Kohei YAMAGUCHI\*\*\*\*, Kunihiko SUGIE\*\*\*\* and Hiroshi MATSUDA\*\*\*\*

The number of medium and small span bridges managed by local governments is enormous, there are also no design documents and even the year that was constructed is unknown. In this study, three bridges with different structural types of steel truss bridge, PC bridge, RC bridge were three dimensionally measured and restoration design was done. In addition, 3D FE analysis was performed using 3D data, and the structural characteristics were identified by comparison with the natural frequency and deflection of the actual bridge. Optical measurement methods such as laser Doppler velocimeter and sampling Moire camera were used for actual measurement.

**Key words** 3D measurement, restoration design, structural identification, 3D-FE analysis

### 1. はじめに

我が国では戦後急速に道路交通網が整備され、現在では全国に約 70 万橋の橋梁が存在している。このうち、建設後 50 年を超えた橋梁の割合は 2013 年では約 20%であったが、2033 年には約 70%にも増加する見通しである<sup>1)</sup>。さらに、地方自治体が管理する中小スパン橋梁数は膨大であり、加えて設計図面がなく、架設年すら不明な橋梁も多い。

橋梁点検は近接目視が法令化されているが、近接目視を行う際には、仮設足場の設置やロープワークが必要になる場合があり安全面に問題を抱えている。加えて市町村では財政難のために足場や高所作業車の手配が困難な場合がある。さらに、点検のための交通規

制は経済的損失に繋がり、重要路線であれば交通規制が難しい場合もある。

一方、損傷や腐食等の材料劣化や外観変状を見つけてることができるが、安全性、落橋の可能性、通行止めや補修の必要性を明確に判断する診断にはまだ多くの課題が残されている。

このような課題に対処するために現在求められている点検・維持管理手法は、安全な作業、技量に頼らない点検及び診断法、効率的で信頼性が高く低コストな手法、リスクや必要な措置が判断できる手法、設計図書がない場合の対処法、等々である。そのための解決方法として、構造特性同定を用いた性能・リスク評価が挙げられる。これは以下の①～⑧に示すように、

平成30年6月25日受理

\* 大学院工学研究科総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

\*\* 日本工営株式会社 (NIPPON KOEI CO., LTD.) 研究当時大学院工学研究科前期博士課程学生

\*\*\* 大学院工学研究科システム科学部門 (Division of System Science)

\*\*\*\* 株式会社富士ピー・エス (Fuji P.S Corporation)

- ①\_ 設計図書がない場合は 3D 計測,
  - ②\_ FEM 解析モデルの作成,
  - ③\_ FEM 解析,
  - ④\_ 実橋梁計測の実施,
  - ⑤\_ 解析結果と実計測結果の比較・性能評価・構造特性同定,
  - ⑥\_ 構造物ヘルスマニタリング,
  - ⑦\_ 設計荷重の載荷・照査によるリスク評価,
  - ⑧\_ デジタルデータベースの構築
- の図 1 に示すフローが考えられる<sup>2)</sup>.

本研究では、鋼トラス橋、PC 橋、RC 橋の異なる構造形式の橋梁を対象として、上記の①～⑤を適用し、実橋梁の構造特性同定への適用性を検討することを目的とした。

また、前記①～⑤の過程における手法のユーザビリティや汎用性などについても検討した。なお、使用する計測機器等については、従来の計測機器を使用するとともに、3D レーザスキャナ、レーザトップラ速度計（以下：LDV）、サンプリングモアレカメラ(以下：SMC)などの最新の開発機器を用いて、できる限り仮設足場を使用しない計測法を用いて計測を実施し、その有効性と有用性について検討した<sup>3), 4)</sup>。

## 2. 鋼トラス橋（橋梁 A）に対する構造特性同定

### 2.1 橋梁概要

対象橋梁は単純下路トラス形式の鉄道橋であり、詳細は表 1、写真 1、図 2 に示す。なおこの橋梁を橋梁 A と呼称する。

### 2.2 振動計測

LDV を用い振動計測を行った。サンプリング周波数を 500Hz とし、計測時間は 100 秒で橋梁中央点をハンマーで加振した。また計測箇所は図 2 の赤丸地点の縦桁の下部とした。その際得られた速度波形をサンプリング点数 8192 で FFT 処理を行い、固有振動数を算出した。

### 2.3 3D 計測

3D レーザスキャナを用い橋梁の 3D 計測を行った。橋梁 A は支間長 69m であるため、1 回 10 分の計測を 9 回行い 1 時間 30 分程度の計測を行った。この際得られた点群から 3D モデルを作成した。これを図 3 に示す。

このように全体的な形状は計測することはでき一般図程度の寸法の算出はできたが、各部材の断面形状や詳細寸法を計測できるような 3D モデルは作成できなかった。これは閉断面では内部、上弦材では上部、I 型鋼ではフランジとウェブの溶接部にレーザの影が発

生するためと考えられる。このため板厚等の詳細な寸法は実測を行う必要があるが、同時に 3D 計測を行うことで作業時間の短縮が期待できる。この 3D モデルより得られた橋長等の一般図程度の寸法を用い FEM 解析モデルを作成した。詳細寸法は設計図書のものを用いた。

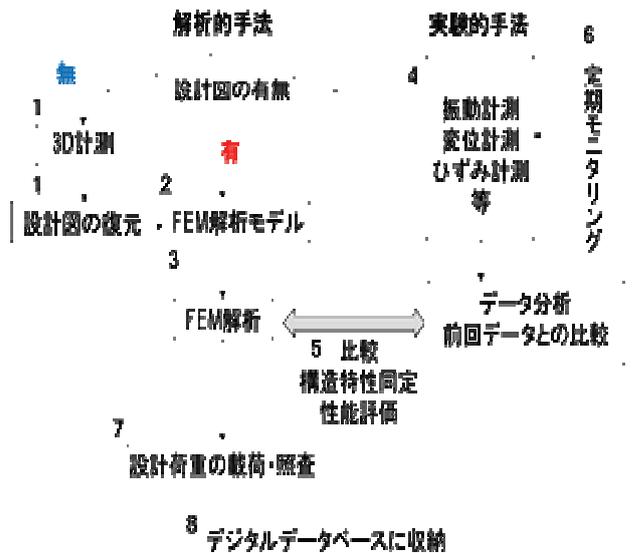


図 1 構造特性同定概要

表 1 橋梁 A 詳細

架設年	不明	斜角	無
支間長	69.2 m	支承	鋼製（ピン・ローラー）
主構間隔	5.4 m	設計活荷重	KS-12
主構高	8.5 m	形式	軌道マクラギ直結式



写真 1 橋梁 A の様子

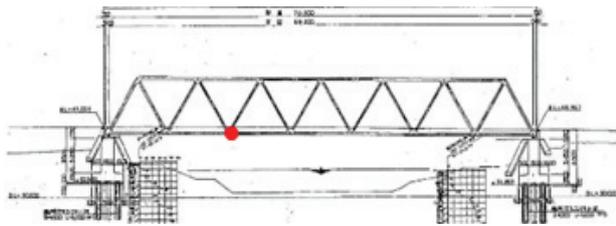


図 2 橋梁 A 一般図



図 3-1 3D モデル 全体図



図 3-2 3D モデル上弦材(左)・箱断面(右)

## 2.4 FEM 解析

FEM 解析では弾性梁要素 (Bernoulli-Euler) を使用した。使用した鋼材の材料特性はヤング率 200GPa, 単位体積重量 77kN/mm<sup>3</sup>, ポアソン比 0.3 である。ここで支持条件や部材の材端条件による影響を確認するために支持条件, 主要部材・主要部材以外の材端条件を変えた解析ケース 1~4 を作成し, 固有振動解析を行う。

## 2.5 計測値と FEM 解析結果の比較

実計測および FEM 解析により得られた固有振動数を表 2 に示す。この表の赤字で示した箇所は解析と計測値が一致していた箇所である。表 2 より, 以下のことが考察できる。

- ・主要部材・主要部材以外の材端条件について

主要部材以外の材端条件の影響はほとんど無いことがみてとれる。しかし, 主要部材の材端条件については, 影響が見られる。鉛直 1 次モードだけで比較した場合には影響がほとんど見られないが, ねじれ 1 次モードではその差が顕著に表れている。このことから, 振動計測を用いてトラス橋の構造特性同定を行う場合には, 鉛直モードだけでなく, ねじれモードも捕らえられる計測を行う必要がある。また本橋においては,

主要部材の材端条件は剛とした場合が解析値と計測値が一致している。

- ・支持条件について

鉛直 1 次モードに着目して, 計測結果と解析結果を比較した場合には, 解析ケース 1, 3 がよく一致しているのに対し, 解析ケース 2, 4 は 10%以上乖離している。これより, 水平方向の拘束度の変化については固有振動数変化から特定できることが分かる。またその結果, 橋梁 A の支承部の水平方向成分は設計時の性能を保っていると判断できる。

## 2.6 部材の損傷に対する構造特性同定

次に部材が損傷した場合の固有振動数の変化から, 部材の損傷を検知できるか検討した。今回は部材の損傷として, 部材の節点部での破断とボルト抜け落ちによる材端条件の変化 (剛結からピン結合) を対象とした。損傷箇所は湿潤状態が保たれる床組と斜材の接合部とした。これらの損傷を与えた解析モデルの固有振動数と健全時の固有振動数を比較した。なお, 固有振動数は鉛直振動モードに着目した。この損傷部材の概要を図 4 に示し, 結果を表 3 に示す。

この結果より, ボルト抜け落ちでは固有振動数に変化は見られなかった。部材の破断では, 斜材が破断した場合は固有振動数に大きな変化が見られたが, 下弦材が破断した場合には変化が見られなかった。これより, 固有振動数をモニタリングすることで斜材の破断を検知できると考えられる。

またこれらの部材の損傷に関しては現在開発中である, 「たわみの影響線の変化率」を用いることで損傷部材の特定が可能になると考えられる<sup>5)</sup>。

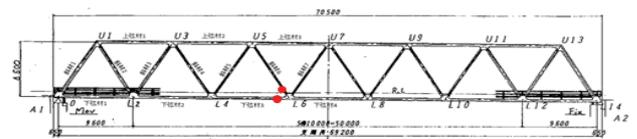


図 4 損傷位置概要 赤丸の位置に損傷を与える

表 3 解析値一覧 (鉛直振動モード)

損傷部材	損傷場所	損傷ケース	固有振動数(Hz)	
			1 次	2 次
なし	なし	なし	3.8	-
斜材 6	L6	破断	3.1	4.2
下弦材 3	L6	破断	3.9	-
斜材 6	L6	ボルト抜け 落ち	3.9	-
下弦材 3	L6	ボルト抜け 落ち	3.9	-

表 2 計測値と解析値の比較

解析ケース	支持条件	主要部材	主要部材以外	1次固有振動数(Hz)			2次固有振動数(Hz)			3次固有振動数(Hz)		
				計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値
1	固定 /可動	剛結	剛結	2.2	2.2	100%	3.8	3.9	103%	5.7	5.7	98%
			ピン		2.2	100%		3.9	101%		5.5	95%
		ピン	剛結		1.8	78%		3.9	102%		4.8	84%
			ピン		1.8	78%		3.8	101%		4.7	82%
2	固定 /固定	剛結	剛結	2.4	107%	4.3	113%	5.7	99%			
			ピン	2.4	107%	4.2	112%	5.5	96%			
		ピン	剛結	1.8	79%	4.3	113%	4.8	84%			
			ピン	1.8	79%	4.2	111%	4.7	82%			
3	ピン /ロー ラー	剛結	剛結	2.1	96%	3.9	102%	5.6	98%			
			ピン	2.1	96%	3.8	101%	5.4	95%			
		ピン	剛結	1.6	73%	3.9	102%	4.8	83%			
			ピン	1.6	73%	3.8	100%	4.7	81%			
4	ピン /ピン	剛結	剛結	2.3	103%	4.3	113%	5.7	99%			
			ピン	2.3	103%	4.2	111%	5.5	96%			
		ピン	剛結	1.7	74%	4.3	113%	4.8	83%			
			ピン	1.7	74%	4.2	111%	4.7	82%			
		振動モード		水平1次		鉛直1次		ねじれ1次				

3. PC 橋(橋梁 B)に対する構造特性同定

3.1 橋梁概要

対象橋梁は 2 径間単純ポステン T 桁橋であり、その 1 径間を対象とし、今後は橋梁 B と呼称する。詳細は表 4, 写真 2, 図 5 に示す。

表 4 橋梁詳細

架設年	1960 年	斜角	約 60°
支間長	16.0 m	支承	ゴム支承
総幅員	5.2 m	設計活荷重	TL-14



写真 2 橋梁 B の様子

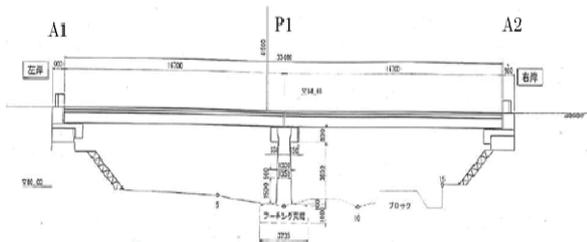


図 5 橋梁 B 一般図

3.2 振動計測

振動計測には橋梁 A と同様の条件で LDV を用いた。計測点は G3 桁の支間長 1/3・1/2・2/3 地点である。

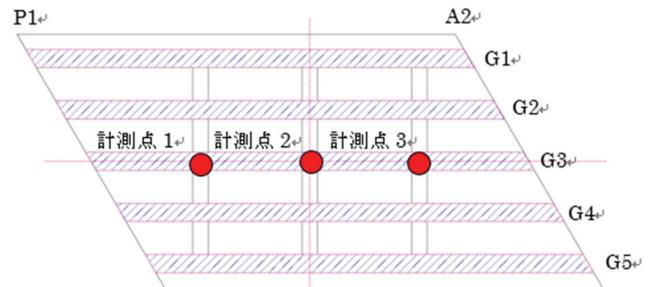


図 6 橋梁 B LDV 計測位置

3.3 変位計測

この橋梁では載荷試験を行った。載荷にはラフタークレーン (26.74t) を用い、橋梁中央に配置し載荷した。この際の橋梁中央部地覆直下の変位を、桁下より設置した変位計を用いて計測した。

3.4 3D 計測

3D レーザスキャナを用い橋梁の 3D 計測を行った。この橋梁 B は支間長 16m であるため 1 回 10 分の計測を橋面上から 2 回と桁下から 3 回の合計 5 回の 1 時間程度の計測を行った。この際得られた点群から 3D モデルを作成した。これを図 7 に示す。図 7 に示すように橋長・支間長等の一般図レベルの寸法だけでなく、断面形状や部材の形状・寸法といった詳細な寸法も算出可能な 3D モデルが作成できた。これは橋梁 B がコンクリート橋であり、断面が一様であるためレーザーの影が発生せず、橋梁全体に照射することができたためだと考えられる。

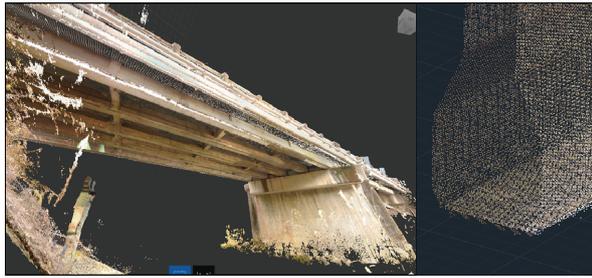


図 7 3D モデル 全体図(左) 部材詳細(右)

3.5 FEM 解析

橋梁 B では解析モデル作成の効率化のために簡易モデルである骨組み解析モデル作成し、固有値解析と変位計測と同様の静的荷重を作用させ解析を行った。また比較のために、各部材を詳細に再現・作成したソリッド解析モデルも使用する。

3.6 計測値と FEM 解析結果の比較

実計測および FEM 解析により得られた固有振動数と変位を表 5 に示す。表 5 より、骨組み解析モデルでは、支持位置を図心とした場合には固有振動数・変位に大きな差が生じた。これにより骨組み解析モデルでは支持点を桁下端部にする必要があると判断できる。

また支持条件がピン／ピンでよく一致したことから実橋梁ではピン／ピン（両端ピン支持）と同様の条件となっていると判断できる。しかし対象橋梁の設計条件を確認すると単純支持となっており解析結果と異なるものとなっている。ここで実際の橋梁支承部を確認すると、地面にベタ置きに近い状態になっており水平方向成分が拘束されていることが見てとれた。また既往の研究にて実橋の可動支承部にはクーロン摩擦が作用し水平方向には設計条件通りの挙動を示さないことが多いことが示されている。これらのことよりピン支持が妥当だと判断でき、固有振動数と変位を構造同定することで支持条件が実際にはピン支持と判明できた。

4. RC 橋（橋梁 C）に対する構造特性同定

4.1 橋梁概要

対象橋梁は上り線が鉄筋コンクリート T 桁橋，下り線が鉄筋コンクリート床版橋で構成される単径間の橋梁であり，鉄筋コンクリート T 桁橋を対象とし，今後は橋梁 C と呼称する。橋梁 C の詳細を表 6，図 8，図 9，写真 3 に示す。

4.2 振動計測

振動計測には橋梁 A と同様の条件で LDV を用いた。計測点は G1・G2・G4・G6・G7 桁の支間長 1/4・2/4・3/4 地点と G3・G5 桁の支間長 2/4 地点である。

4.3 変位・ひずみ計測

この橋梁 C でも変位計測・鉄筋のひずみ計測を行った。また非接触変位計測も同時に行い精度検証を行った。この際の真値は接触式変位計とする。接触式変位計測は G1・G4・G7 の A1 支承部付近・支間 1/4 地点・支間 2/4 地点・支間 3/4 地点・A2 支承部付近の桁下部または桁下部付近の変位を計測した。鉄筋のひずみ計測は，G1 の支間 1/4 地点・2/4 地点・3/4 地点，G4 の支間 2/4 地点，G7 の支間 2/4 地点の主鉄筋をはつり出しひずみゲージを付着させひずみを計測した。非接触変位計測には SMC を使用した。この SMC とはカメラを用い，計測物に付着させた格子ターゲットを撮影し，その画像から変位を計測する光学的計測法である。この格子ターゲットを G7 の支間 2/4 地点の桁側面に付着し，約 4m 離れた土手からカメラで撮影し変位を計測した。荷重には 20t のコンクリートブロック（10t を 2 つ）を G4 の支間長中央に 3 回・G7 の支間長中央に 2 回・G1 の支間長中央に 2 回ずつ順番に設置し活荷重とした。計測位置と荷重点・荷重点の詳細を図 7 に示す。

次にこの荷重で得られた結果を接触式変位計と SMC で比較し精度検証を行った。これを表 5 に示す。これより，SMC はでは精度よく変位計測を行えなかったと分かる。

表 5. 計測値と解析値の比較

解析ケース	解析モデル	支持位置	支持条件	固有振動数(Hz)						変位(mm)		
				鉛直1次			ねじれ1次					
				計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値	計測値	解析値	解析値/計測値
A	骨組み解析	図心	ピンローラー	8.7	5.5	63%	10.5	8.5	81%	2.21	4.64	210%
B			ピン		5.5	63%		8.5	81%		4.64	210%
C		ピンローラー	5.5		63%	10.3		98%	4.66		211%	
D		ピン	9.5		109%	11.2		107%	1.88		76%	
E	ソリッド解析	桁下鉄部	ピンローラー	5.4	62%	9.3	89%	4.82	218%			
F			ピン	8.2	94%	10.0	95%	2.19	99%			



解析ケース	解析モデル	支持位置	支持位置
□	骨組み解析	図心	ピン/ローラー
□			ピン/ピン
□		桁下端部	ピン/ローラー
□			ピン/ピン
□	ソリッド解析	桁下端部	ピン/ローラー
□			ピン/ピン

4.5 計測値とFEM解析結果の比較

計測値と解析値を図8から図10, 表8に示す。

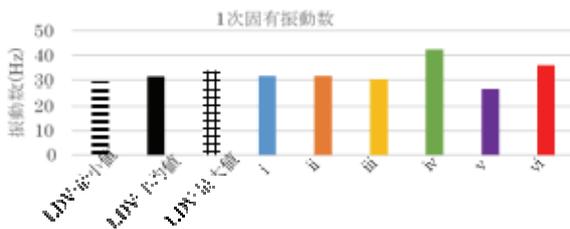


図8 計測値と解析値の比較 (1次固有振動数)

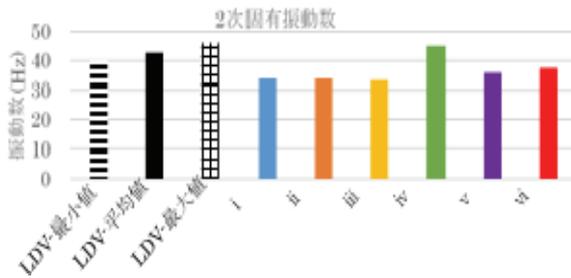


図9 計測値と解析値の比較 (2次固有振動数)

表8 計測値と解析値の比較 (固有振動数)

解析ケース	測定位置	1次固有振動数 (Hz)		2次固有振動数 (Hz)		
		計測値	解析値	計測値	振動数	振動モード
iii	最小	30.2	鉛直1次	LDV	33.7	ねじれ1次
	平均			33.8	ねじれ1次	
	最大			33.2	ねじれ1次	
	G1			42.5	鉛直1次	
iv	平均	27.0	ねじれ1次	LDV	35.7	鉛直1次
v	平均	36.0	ねじれ1次	LDV	42.7	鉛直1次
vi	平均	36.0	ねじれ1次	LDV	37.3	鉛直1次

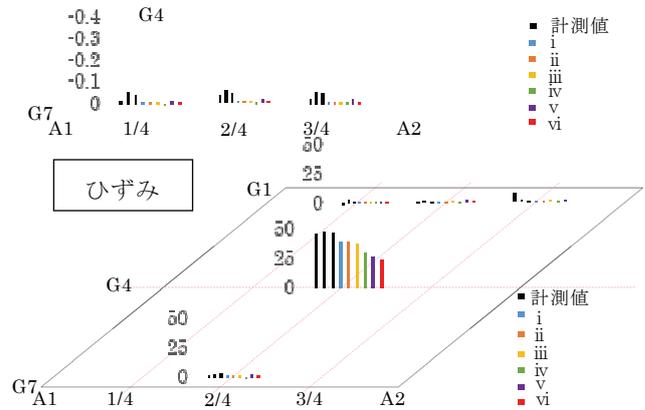


図10 計測値と解析値の比較

・変位計測

G4の計測点では解析値と計測値に大きな差が生じておらず、おおむね一致していると考えられるため、精度よく構造特性同定を行えたと判断できる。これはG4が荷点直下であるため変位が0.3mm程度発生し精度よく変位を計測・解析できたためだと考察できる。なおG1・G7に関しては、変位が微小であるため比較・検討を行う必要はないと判断した。

・ひずみ計測

G4の計測点では解析値と計測値に大きな差が生じておらず、おおむね一致していると考えられるため、精度よく構造特性同定を行えたと判断できる。これはG4が荷点直下であるためひずみが40μ程度発生し、精度よくひずみを計測・解析できたためだと考察できる。なおG1・G7に関しては、ひずみが微小であるため比較・検討を行う必要はないと判断した。

・振動計測

振動計測に関しても、解析値と計測値大きな差が生じておらず、おおむね一致していると考えられるため、構造特性同定を行えたと判断できる。

## 5. 考察とまとめ

### (1) 橋梁 A

・3D レーザスキャナにて作成した3Dモデルは橋梁一般図レベルの図面の代用になり得る。

・3D計測と実測を組み合わせることで詳細な設計図書が効率よく作成が可能である。

・弾性梁要素を用いた振動解析での結果は実振動計測結果とよく一致した。

・構造特性同定の結果、対象橋梁の支承の水平方向成分の性能低下は発生しておらず、設計条件であるピン・ローラーの支持条件であることが確認できた。

・固有振動数をモニタリングすることで斜材の破断を検知できる。

これらより、構造特性同定が可能であることを確認でき、支承の水平方向成分の性能評価を行うことができた。また、部材破断の検知の可能性を見出せた。

### (2) 橋梁 B

・解析モデルは桁下端部で支持する必要がある。

・構造同定の結果、橋梁 B はピン支持となっている。

・PC橋では3Dレーザスキャナにて取得した点群データが設計図書の代用になり得る。

・骨組解析モデルでも精度よく構造同定が可能である。

以上より、簡便で効率よく構造同定が行うことができ、また、橋梁の支持条件を把握することができた。橋梁のリスクや安全性を評価できる可能性を見出せた。

### (3) 橋梁 C

振動・変位・ひずみの構造特性を同定をすることができた。しかし振動計測・固有振動数を用いた構造特性同定は橋梁 A のような高い精度ではなかったため、支承部等の評価は行わなかった。

各橋梁での固有振動数の解析値と計測値の一致性を図 11 に示し比較した。この図から橋梁 A・B では精度よく一致しているが、橋梁 C では±10%程度の差であることがわかる。この原因として橋梁 C は他の橋梁に比べ固有振動数が高い振動数であったことが考えられる。この要因としては以下が考えられる。

・コンクリート橋は鋼橋に比べ単位長さ当たりの質量が大きく、橋梁の剛性が剛くなったため。

・幅員に対する橋長が短く橋梁が剛くなったため。

・橋梁 C は斜橋であり、拘束が大きくなったため。

これらの要因を正しく解析において再現できておらず、精度が他の橋梁に比べ、解析結果と実測値に差が生じたと考えられる。また実振動計測でも振動数が大きく変化してしまい、正確に固有振動数が算出できてい

ない可能性がある。

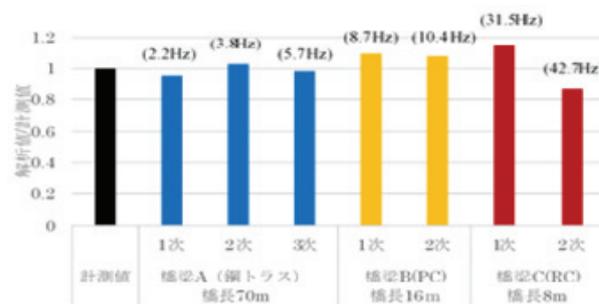


図 11 各橋梁の解析値と計測値の一致性

## 6. 結論

本研究では、鋼トラス橋、PC橋、RC橋の異なる形式の橋梁を対象として、実橋梁の構造特性同定への適用性を検討することを目的とし検討を行った。その結果、鋼トラス橋（橋梁 A）・PC橋（橋梁 B）・RC橋（橋梁 C）のすべてにおいて構造特性同定を行うことができた。これにより、これらの形式の橋梁に対しては構造特性同定を適用させることが可能である。

## 7. 今後の課題

今後は、鋼トラス橋では、前述した「たわみの影響線の変化率」を用いた損傷部材の特定を進めていくことで、実装化につながると考えられる。RC橋では、他の橋梁、特に橋長の長い振動しやすいものに対して構造特性同定を行い、適用性を再度確認する必要があるとともに、解析モデルの精度向上の必要がある。

## 謝辞

3D計測はクモノスコープレーション(株)廣瀬眞理氏にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 国土交通省 HP ([http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobol\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobol_1.pdf))
- 加藤、島田：橋梁実測振動特性の統計解析、土木学会論文報告集 p.49-58
- 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発、鉄道総研報告、第21巻、第12号、pp.17-22、2007.12.
- 森本、藤垣、梶谷：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測、
- 武田、中島ほか：たわみの影響線を利用した橋梁の劣化箇所同定の試み、土木学会平成28年度全国大会第71年次学術講演会講演概要集、I-071、2016.9.