

# 先端技術を用いたインフラ構造物の 点検調査の効率化と高精度化に関する研究

宮濱晃一\*・松田浩\*・山口浩平\*・林謙介\*・河村太紀\*\*

## Research on the efficiency and precision improvement of the inspection survey of the infrastructure structure using the advanced technology

by

Koichi MIYAHAMA\*, Hiroshi MATSUDA\*, Kohei YAMAGUCHI\*, Kensuke HAYASHI\* and Taiki KAWAMURA\*\*

Laser Doppler velocimetry that can be performed by remote non-contact as measurement using advanced technology Measurement using sampling moiré camera to improve inspection efficiency And to verify its measurement accuracy

**Key words :** Natural frequency, Laser Doppler Velocimeter, Sampling Moire Camera

### 1. 序論

高度経済成長期を中心に大量に道路橋が建設され、我が国の交通や経済を支えてきた。

しかし、橋梁は近年、老朽化とともに交通量の増加や過積載車両の増加に伴い、劣化などの変状が顕在化し維持管理不足が問題視されるようになった。

現在の橋梁の点検は近接目視点検が行われているが、中には点検が高所にわたるものや大掛かりな作業・足場が必要な場合もあり、莫大な費用と時間を要する。また技術者不足などもあり橋梁の維持管理は全国的に大きな課題となっている。このような課題に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および診断法、効率的で信頼性が高く低コストの手法などである。<sup>1)</sup>

光学的レーザ計測技術を用いて数 10m の遠距離計測が可能なレーザドップラ速度計(以下 LDV)は簡易に振動特性や動的変位の計測を行うことができ、橋梁下での損傷検知への活用が期待できる。非接触かつ長距離計測が可能な LDV は設置や撤去作業も容易なため、効率的で安全な振動計測が行える。

同様に遠隔非接触で計測が行えるサンプリングモアレカメラ(以下 SMC)は各種構造物の奥行き方向を含む微小変位を多点同時に高速で測定でき、今後、作業時間の短縮や通行規制などの利便性の低下の抑制など人材、技術の解決への貢献が期待できる。

本研究では、本研究では先端技術を用いた計測として、遠隔非接触で行えるレーザドップラ速度計サンプリングモアレカメラを用いてそれぞれ振動計測変位計測を行い、橋梁を計測対象として点検の効率化を考察するとともにその計測精度を検証することを目的とする。

### 2. 計測機器概要

#### 2.1 LDV

LDV はレーザ光のドップラー効果を利用して対象物(移動体)の速度を検出している。ドップラー効果について Fig.1 に示す。照射されたレーザ光は入射光として対象物に衝突するが、対象物が入射光に対し離れる場合は、反射光の波長は長くなり、周波数は低くなる。逆に対象物が入射光に対し近づく場合は、反射光の波長は短くなり、周波数は高くなる。LDV はこの波長変化を測定することで、対象物の速度を非接触で測定するものである。

物体に照射するレーザ光の周波数を、物体の速度を、照射するレーザ光の波長を、入射光と物体の移動方向がなす角度をとすると、物体からの反射光の周波数は式(1)となる。

$$f_r = \frac{\lambda_0 \cdot f_0 + v \cdot \cos \theta}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos \theta} \cdot f_0 \quad (1)$$

よって、入射光に対する反射光の周波数の変化量は式(2)となる。

$$f_D = f_r - f_0 = \frac{2v \cdot \cos \theta \cdot f_0}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

ここで、であるので、ドップラー周波数は、式(3)で近似される。

$$f_D \approx 2v \cdot \cos \theta / \lambda_0 \quad (3)$$

LDV で使用されるレーザ光の波長はきわめて安定しているため、ドップラー周波数とターゲットの移動速度は比例関係にある。レーザ光の照射方向と物体の移動方向とのなす角が得られれば、ドップラー周波数から、物体の移動速度を求めることができる。レーザ光の照射方向と物体の移動方向とのなす角について Fig.2 に示す。<sup>2)</sup>

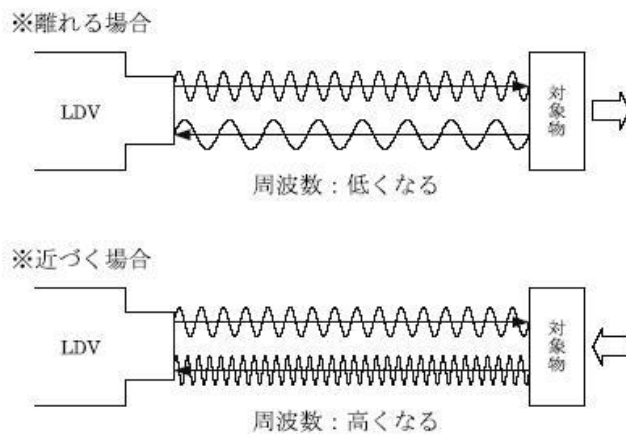


Fig.1 ドップラー効果

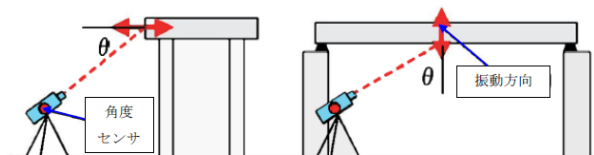


Fig.2 レーザ光の照射方向と物体の移動方向となす角

## 2.2 SMC

サンプリングモアレカメラ (SMC) とは、格子を描いた物体をカメラで撮影することによりその物体の変位やひずみの二次元分布を高精度に計測する。特徴として

- 1) XYZ 変位を遠隔からカメラで計測可能。
  - 2) 高速撮影が可能。
  - 3) 24 時間以上の測定にも対応している。
- などが挙げられる。<sup>3)</sup>

すだれを重ねることで、元のすだれにはない新たな縞模様が現れる。これをモアレ縞といい、すだれの変形に応じて縞模様も大きく変形する。この特性を利用し、解析を行うことで変位を計測することができる。この原理を利用したのがモアレ法である。

変形した格子をテレビカメラやデジタルカメラで撮影しても同様のモアレ縞が発生することがある。サンプリングモアレ法はこれを利用した方法である。<sup>4)</sup>

## 3. 切断桁を対象とした载荷試験

本章では、健全な状態の切断桁を対象に LDV と SMC を用いてそれぞれ振動計測、変位計測を行い、その実測値と FEM 解析によって得られた解析値とを比較し精度の検証を行う。また、振動計測においては静的载荷試験を行い健全から、ひび割れ発生、鉄筋降伏、破壊の段階ごとに振動計測を行い劣化による固有振動数の変化を確認する。

### 3.1 試験体概要

本実験で使用された試験体は RCT 桁橋を解体した物である。試験体寸法は(高さ) 880 mm×(幅) 370 mm×(長さ) 7000mm である。引張部の主鉄筋は D25 (SD295) を 8 本使用し、スターラップを 27 本使用した。詳細を Table.1, Fig.3 に示す。

Table.1 材料特性 (規格値)

	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (×10 <sup>8</sup> N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	—	28	30	2.2
引張鉄筋 (SD295-D25)	295	200	—	—
せん断鉄筋 (SD295-D8)	295	200	—	—

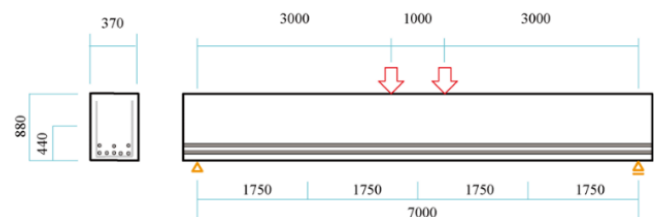


Fig.3 試験体

### 3.2 載荷試験概要

本試験では、株式会社東京測期研究所製の圧縮型ロードセルを使用した。長期間にわたって安定した測定が可能であり、取り扱いも簡単であることが特徴である。静的載荷試験は2点集中載荷で行い、曲げ先行させるように載荷点をとる。

### 3.3 振動計測

健全時、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時、破壊時での各固有振動数の比較を行うために各段階で3回ずつ振動計測を行った。ひび割れ発生荷重( $P_{cr}$ )、鉄筋降伏荷重( $P_y$ )、最大荷重( $P_u$ )はあらかじめ算出し、到達時に一度除荷し、計測を行うこととした。

機材はLDV、接触式加速度計を使用し、梁中央部をハンマリングする。計測1回はFig.4にならい5回行う。しかし、実際の計測では3の位置での計測は困難であったため、1, 2, 4, 5の点のみで計測を行った。計測の様子をFig.5に示す。精度比較の際は接触式である加速度計を真値とする。

### 3.4 変位計測

機材はSMCと接触式変位計を使用した。ターゲットについては格子間隔6mmの2次元格子ターゲットを使用した。ターゲットの位置をFig.6に示す。

### 3.5 3D計測

3Dレーザスキャナーを用いて試験体の3D計測を行った。目的として寸法を計測器具で測るとは別に3D計測データとして保存しておくことで解析の際より精度の高い解析モデルを作成することを狙いとしている。試験体全体を囲むように計測を行いさらに試験体の上面と下面からも計測を行った。完成した3DモデルをFig.7に示す。

### 3.6 FEM解析

あらかじめ計測しておいた寸法や材料特性を当てはめ解析モデルを作成した。この材料特性については、より精度を高めるため切断桁を解体し、実測値を求めた。実測値の材料特性をTable.2に示す。支持条件についてはピン/ローラーに設定した。固有振動数を求める際には、固有値解析を行い、変位計測の際にはFEM解析を行った。

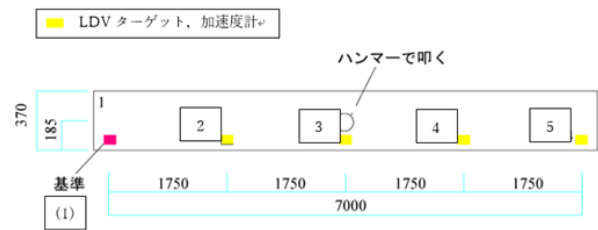


Fig.4 振動計測位置



Fig.5 LDVによる振動計測の様子

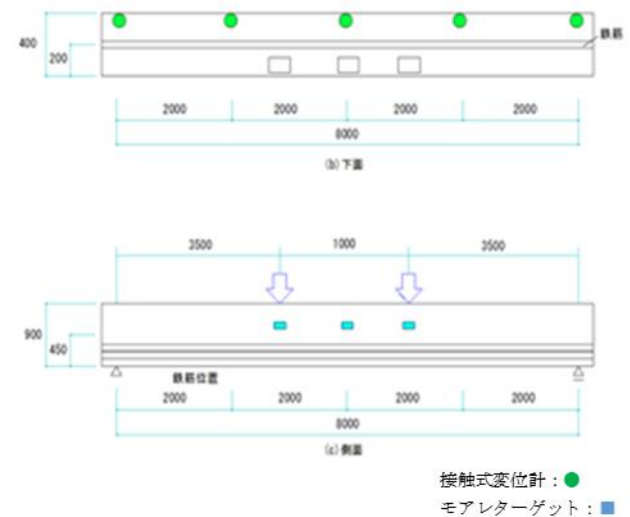


Fig.6 ターゲットの位置

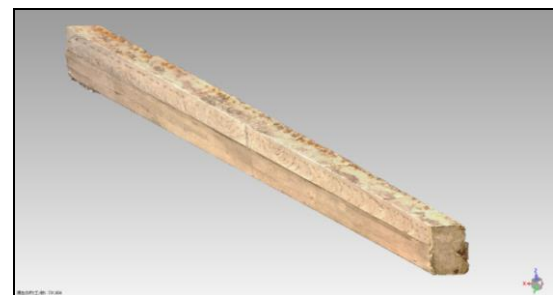


Fig.7 切断桁 3Dモデル

Table.2 材料特性（実測値）

	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\times 10^5 \text{ N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
コンクリート	— <sup>4)</sup>	19.4 <sup>4)</sup>	31.6 <sup>4)</sup>	2.2 <sup>4)</sup>
引張鉄筋 (SD295-D25)	352 <sup>4)</sup>	197 <sup>4)</sup>	—	—
せん断鉄筋 (SD295-D8)	352 <sup>4)</sup>	198 <sup>4)</sup>	—	—

### 3.7 計測結果

#### (1) 振動計測

実測値と解析値の結果を Table.3 に示す。LDV と加速度計の固有振動数を比較したところ 2 次固有振動数にあたる位置に加速度計の 1 次固有振動数が見つかった。このことから LDV では計測できた 1 次固有振動数が加速度計では検知出来なかったと推測できる。2 次固有振動数同士を比較したところおおむね値が一致していた。また、健全から破壊までの各段階の固有振動数の比較を Table.4, Fig.8 に示す。Fig.8 から読み取れるとおり LDV と加速度計どちらも破壊が進展するにつれて固有振動数が下がる傾向がみられた。

解析値については 1 次固有振動数が 9.45Hz, 2 次固有振動数が 22.4Hz という結果が得られ、実測値と差が生じてしまった。考えられる原因として健全時としていた状態の切断桁は、すでに劣化が進展しており、先述したような固有振動数の変化の傾向から解析値に比べ実測値が低くなったと考えられる。

#### (2) 変位計測

実測値と解析値を合わせたものを図-8 に示す。変位計による実測値と解析値はよく一致していたため、載荷試験中の計測は精度よく行っていたことがこの結果からわかった。このことを踏まえた上で SMC での実測値と解析値を比較したところ、荷重が小さい間は変位が微少であったため誤差が多少出てしまったが、100kN 以降では誤差はほぼ 5% 以内に収まっていることが分かった。

### 3.8 考察

振動計測においては LDV と加速度計の値はよく一致する結果が得られた。加速度計を真値として見た場合、LDV の精度は十分見込めることが分かった。また、健全から破壊が進むにつれて固有振動数が下がる傾向が見られた。このことから RC 構造物は劣化により固有振動数は下がる傾向が見られるのではないかと考えた。

解析値と実測値の比較については、すでに対象の切断桁は劣化しており、健全であるとしている解析値よりも上記の固有振動数の変化の傾向から誤差が生まれたと考えられる。

変位計測においては SMC、接触式変位計、解析値のどの値もおおむね一致する結果が得られた。この結果を踏まえた上で接触式変位計と比べると SMC は設置が容易であるため十分有用性が期待出来ることが確認出来た。

Table.3 実験値と解析値の比較

	1 次固有振動数(Hz)	2 次固有振動数(Hz)
LDV	8.67	20.08
加速度計	—	19.67
解析値	9.45	22.4

Table.4 健全から破壊までの各段階の固有振動数

1次固有振動数(Hz)			2次固有振動数(Hz)		
	LDV	加速度計		LDV	加速度計
健全	8.67		健全	20.08	19.67
ひび割れ	8.38		ひび割れ	19.62	19.51
鉄筋降伏	8.03		鉄筋降伏	19.52	19.19
破壊	6.33		破壊	8.46	17.21

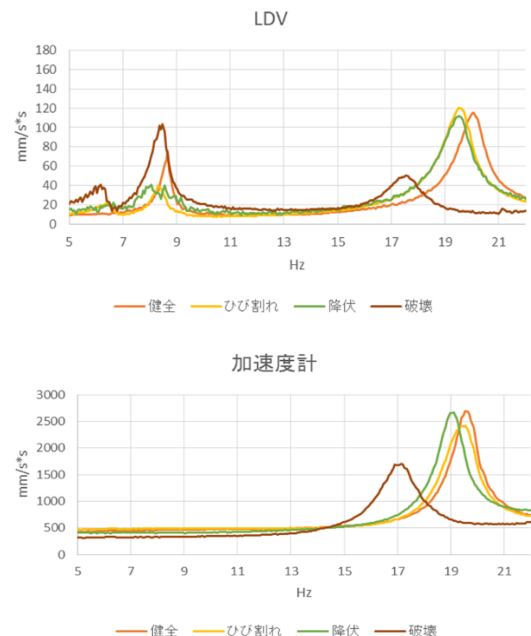


Fig.8 健全から破壊までの各段階の固有振動数

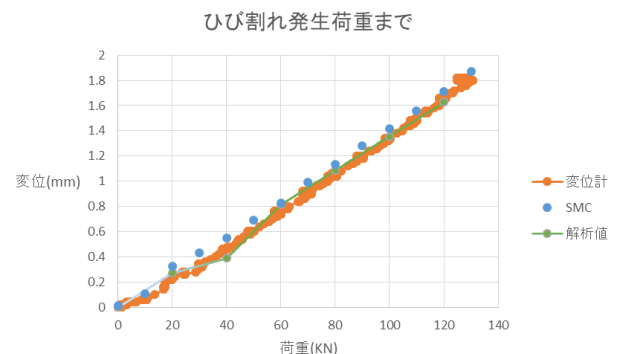


Fig.9 変位計測における実測値と解析値の比較



#### 4. RC 橋を対象とした载荷試験

本章では、現場での実用性を確認するために RC 橋を対象に LDV を用いて振動計測を行い、解析値との固有振動数の比較を行った。

また、载荷試験中は SMC と接触式変位計を用いて変位計測も行い、その 2 つを比較することで精度の検証を行う

##### 4.1 橋梁概要

6 径間で構成された RCT 桁橋であり、主な詳細については Fig.10 に示す。また本橋梁は外観からの目視確認において Fig.11 のように損傷が見られ、特第 6 径間においては Fig.12 のように損傷が激しい箇所が見られた。

##### 4.2 载荷試験概要

载荷には総量 10ton のトラックを使用した。概要図については Fig.13 に示す。Fig.14 に示すような D-0 といった英数字はトラックの前輪を示しており、D→A→B→C の順でトラックを一旦止め、変位計測を行い、それを 0, 1, 2, 3 のラインで行っていく。

##### 4.3 振動計測

LDV を用い振動計測を行った。計測値点については Fig.15 に示す。サンプリング周波数は 500Hz とし、計測時間は 100 秒で G2 点と G3 点付近をハンマーで加振した。主桁の下部に事前に反射ターゲットを設置し桁下から LDV のレーザを照射し計測を行った。計測風景を Fig.16 に示す。

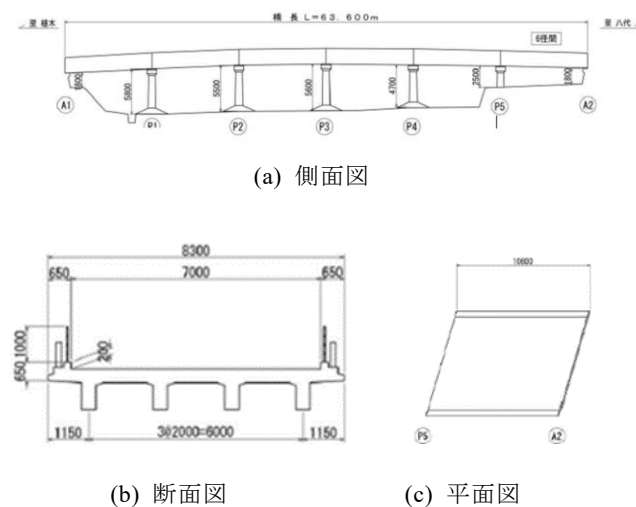


Fig.10 設計図面図



Fig.11 舗装の異常



Fig.12 主桁の剥離

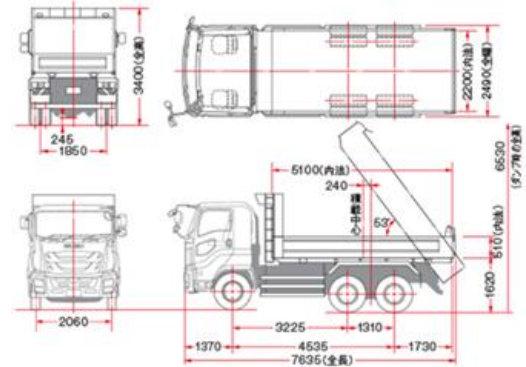


Fig.13 トラック概要図

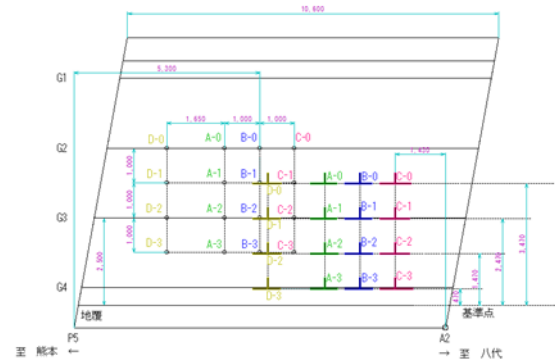


Fig.14 トラック位置図

● : LDV ターゲット。

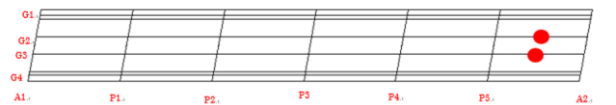


Fig.15 LDV のターゲット位置



Fig.16 LDV による計測風景

#### 4.4 変位計測

3章での切断桁の計測の時と同様にSMCに加え精度比較のため接触式変位計を用いて変位計測を行った。ターゲットと計測風景をそれぞれ写真-6、写真-7に示す。それぞれの計測位置については図-13、図-14に示す。SMCのターゲットは6mm間隔の2次元格子ターゲットを使用した。

#### 4.5 3D計測

3Dレーザスキャナーを用いて計測を行った。計測点を図-15に示す。1回約5分の計測を橋面上から5回、桁下から11回、合計16回の計測を行った。計測時間は合計約1時間30分である。計測から得られた点群データを用いて、3D点群モデルの作成を行った。作成した点群モデルを図-16に示す。

目的については3章5節でも述べたとおり、3Dデータを用いることで解析の際より精度の高い解析モデルを作成することを狙いとしている。

#### 4.6 FEM解析

FEM解析では弾性梁要素を使用した。使用したコンクリートの材料特性は圧縮強度30MPa、ヤング率は28GPaであり、鉄筋の材料特性は圧縮強度345MPa、ヤング率は200GPaである。支持条件はピン/ローラーで設定し、固有値解析を行った。

#### 4.7 計測結果

##### (1) 振動計測

計測結果を表-6に示す。G2点での鉛直1次固有振動数の平均の値とG3の平均の値からさらに平均を取ったところ12.193Hzという結果が得られた。この値を第6径間での鉛直1次固有振動数として解析値との比較を行った。作成された解析モデルから固有値解析を行ったところ、鉛直1次固有振動数の値が14.147Hzという結果が得られた。ここで計測値と解析値を比較したところ、計測値の方が1次固有振動数よりも2Hzほど低い結果が得られた。



Fig.17 格子ターゲット Fig.18 SMCによる計測風景

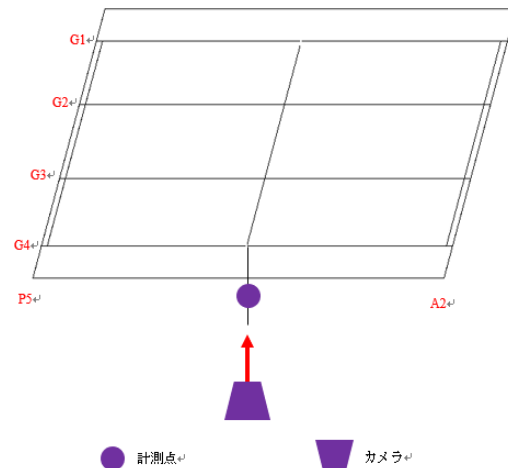


Fig.19 SMCの設置個所

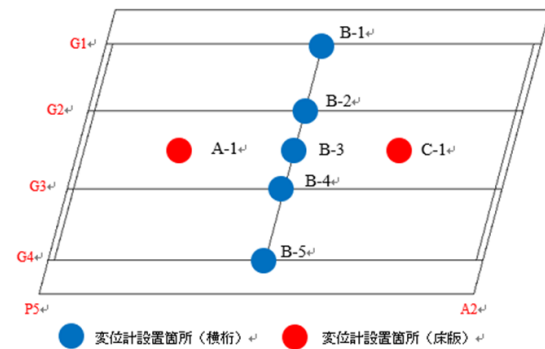


Fig.20 接触式変位計の設置個所



Fig.21 RC橋の3Dモデル

Table.5 振動計測結果

鉛直1次固有振動数	第6径間 G2	第6径間 G3
1	13.671	13.671
2	12.512	12.512
3	9.948	10.846
平均	12.044	12.343

## (2) 変位計測

それぞれの変位計測で平均を取ったものを Table.6 に示し、0 地点から 3 地点の各影響線を Fig.22 に示す。0 地点、1 地点においては影響線で見ると、差が大きく、3 地点でもやや差が見られたが 2 地点においては SMC を用いて計測した値と変位計の値がほぼ一致する結果が得られた。そこで変位計を基準として相対誤差を計算したところ 2 地点が一致していることが分かった。

## 4.8 考察

振動計測においては計測値の方が解析値よりも低いことが分かった。先述したように第 6 径間は損傷が酷いことから実橋の状態でも劣化が進むと固有振動数が下がる結果が得られた。

変位計測においては 0 地点と 1 地点での計測結果に差が表れた原因として、SMC の計測点と载荷点が離れているため検知出来る変位が微小になってしまい精度が落ちてしまったと考えられる。しかし、载荷点の近い 2 地点や 3 地点は比較的精度よく計測を行うことが出来たため载荷点によっては SMC でも十分計測が可能であることが分かった。

## 5. まとめ

本研究では先端技術を用いた計測として光学的非接触式の計測である LDV と SMC を使用して各計測を行った結果、以下の結論が得られた。

- ① 切断桁、実橋どちらの状態でも劣化が進展するにつれて固有振動数が下がる傾向が見られた。
- ② LDV の振動計測については広く使われている接触式加速度計との値とよく一致していたため精度は見込めることが分かった。
- ③ SMC より得られた計測値については、精度は高いが変位の大きさなどの条件に影響されやすいことが分かった。しかし、設置の容易さを考えると条件さえ整えられれば十分効率化が見込めることが分かった。

Table.6 各変位計測結果

	D0 <sup>⓪</sup>	A0 <sup>⓪</sup>	B0 <sup>⓪</sup>	C0 <sup>⓪</sup>
SMC <sup>⓪</sup>	-0.07mm <sup>⓪</sup>	-0.09mm <sup>⓪</sup>	-0.11mm <sup>⓪</sup>	-0.11mm <sup>⓪</sup>
変位計 <sup>⓪</sup>	-0.05mm <sup>⓪</sup>	-0.07mm <sup>⓪</sup>	-0.08mm <sup>⓪</sup>	-0.07mm <sup>⓪</sup>
	D1 <sup>⓪</sup>	A1 <sup>⓪</sup>	B1 <sup>⓪</sup>	C1 <sup>⓪</sup>
SMC <sup>⓪</sup>	-0.13mm <sup>⓪</sup>	-0.17mm <sup>⓪</sup>	-0.19mm <sup>⓪</sup>	-0.19mm <sup>⓪</sup>
変位計 <sup>⓪</sup>	-0.09mm <sup>⓪</sup>	-0.13mm <sup>⓪</sup>	-0.13mm <sup>⓪</sup>	-0.12mm <sup>⓪</sup>
	D2 <sup>⓪</sup>	A2 <sup>⓪</sup>	B2 <sup>⓪</sup>	C2 <sup>⓪</sup>
SMC <sup>⓪</sup>	-0.13mm <sup>⓪</sup>	-0.19mm <sup>⓪</sup>	-0.21mm <sup>⓪</sup>	-0.19mm <sup>⓪</sup>
変位計 <sup>⓪</sup>	-0.15mm <sup>⓪</sup>	-0.2mm <sup>⓪</sup>	-0.21mm <sup>⓪</sup>	-0.19mm <sup>⓪</sup>
	D3 <sup>⓪</sup>	A3 <sup>⓪</sup>	B3 <sup>⓪</sup>	C3 <sup>⓪</sup>
SMC <sup>⓪</sup>	-0.25mm <sup>⓪</sup>	-0.33mm <sup>⓪</sup>	-0.34mm <sup>⓪</sup>	-0.33mm <sup>⓪</sup>
変位計 <sup>⓪</sup>	-0.22mm <sup>⓪</sup>	-0.27mm <sup>⓪</sup>	-0.28mm <sup>⓪</sup>	-0.27mm <sup>⓪</sup>

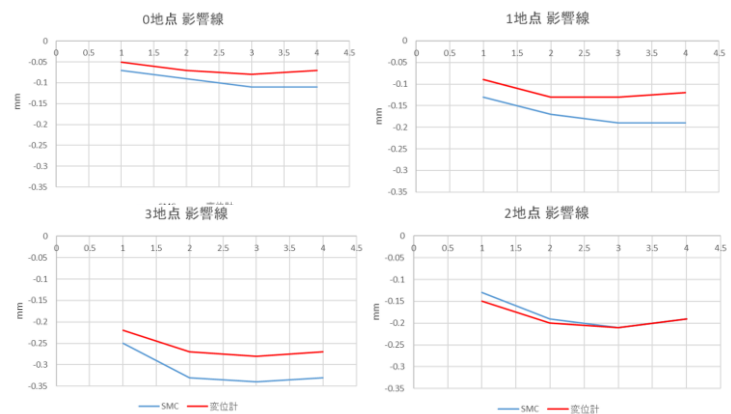


Fig.22 各地点の影響線

## 参考文献

- 1) 国土交通省 国土交通省 国土交通省 HP  
([http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf))
- 2) 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第 311 号 1981 年 7 月 p.49-58
- 3) 共和電業サンプリングモアレ法  
(<http://www.kyowa-ei.com/jpn/product/special/smc2-2/index.html>)
- 4) 森本，藤垣，榎谷：サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/54/1/54\\_1\\_32/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/54/1/54_1_32/_pdf)