

# LDV を用いた長距離固有振動数計測による構造健全度評価に関する基礎的研究

長崎大学大学院 学生会員 ○宮崎 翼, 長崎大学大学院 学生会員 川林 大祥  
長崎大学 正会員 松田 浩 長崎大学, 正会員 森田 千尋, 長崎大学 非会員 山下 務

## 1. 序論

構造物は、疲労や環境要因による顕著な材料劣化、地震による損傷などにより、構造物の剛性が低下し、揺れの増大や固有振動数の変化を引き起す。これらの変化は振動計測のモニタリングが有効であると考えられる。社会基盤施設の振動計測によるモニタリングでは、高精度かつセンサの設置に高所・危険作業が伴わず、センサの配線作業が煩わしくないこと、などが求められる。このような要求性能を満たす振動計測モニタリングとして、レーザドップラ速度計(LDV)を利用した常時微動計測によるモニタリング手法が適用されている事例がある。

そこで本研究では、長距離非接触測定が可能である LDV (図 1) を用いて、変状発生の有無と固有振動数との関係性や実橋の計測への適用性の検討を行うことを目的としている。

## 2. レーザドップラ速度計の概要

本計測器は構造物にレーザ光を照射し、その反射光を受光する。このドップラ効果を利用して物体の速度を非接触で検出するものである。さらに、検出した速度の FFT 処理を行うことで物体の固有振動数を求めることができる。また、数 m～数十 m 離れた場所から構造物の振動計測を行うことができるため、従来の振動計測におけるセンサ設置にかかる時間や高所作業による危険を伴う作業を回避することができる。また、LDV のもう一つの特徴として、比較的大きな応答から常時微動まで計測可能である。

## 3. RC 梁の固有振動数計測

スパン 1300mm の RC 梁に 4 点曲げ載荷試験を行い、健全時と損傷時における振動特性がどのように変化するかを検討する。計測方法は一定載荷毎に試験機から試験体を取り外し、LDV と加速度計で固有振動計測を行う。計測時の境界条件はコンクリート標準示方書 (JIS-A-1127) の記述に基づき、支持台にはゴムを使用し両端自由端とした。試験体概要を図 2 に示す。

### 3.1 理論式

理論式には両端自由はりの振動数方程式を用いた。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{wA}} (\lambda_1)^2 \quad (1)$$

ここで、 $E$  : 弾性係数、 $I$  : 断面二次モーメント、 $w$  : 単位重量、 $A$  : 断面積、 $\lambda_1$  : 無次元係数。

それぞれのパラメータ値を表 1 に示す。これより算出した初期の振動数は 260.81Hz である。

### 3.2 RC 梁の実験結果と考察

実験より得られた 4 点曲げ載荷試験結果を表 1 に示す。初期振動数を理論値と比較して、LDV では誤差 5.6%、加速度計では誤差 8.6% であり、精度よく計測できたと言える。実験結果から、全体として振動数が低下している事がわかる。それは荷重-変位曲線の傾きの変化から剛性の低下が発生したためであると考えられる。10kN においては固有振動数の減少率が 17% であったが、ひび割れは目視できなかった。また、変位が最も増大した 20-30kN では、振動数の減少率が約半分に減少していることがわかる。

今回の実験結果から、固有振動数を計測することによりひび割れが目視できない状態でも剛性の低下が生じていれば、変状発生の有無を確認することができる。また、この変化は従来の計測方法である加速度計とほぼ同じ計測精度で LDV により計測することができた。



図 1 : レーザドップラ速度計

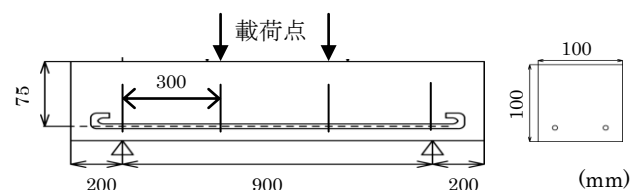


図 2 : 試験体概要

表 1 : RC 梁のパラメータ値

| $E(\text{N/m}^2)$ | $I(\text{m}^4)$ | $w(\text{N/m}^3)$ | $A(\text{m}^2)$ | $\lambda_1$ | $\ell(\text{m})$ |
|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------|------------------|
| 4.32E+10          | 8.33E-06        | 2350              | 0.01            | 4.73        | 1.3              |

表 2 : 4 点曲げ載荷試験結果の比較

|          | 0kN    | 10kN   | 20kN   | 30kN   |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 加速度計(Hz) | 238.28 | 203.12 | 195.31 | 134.77 |
| LDV(Hz)  | 246.09 | 203.12 | 195.31 | 134.77 |
| 振動数減少率   | 0%     | 17%    | 21%    | 45%    |

※減少率=(初期 - 各載荷時)/初期×100

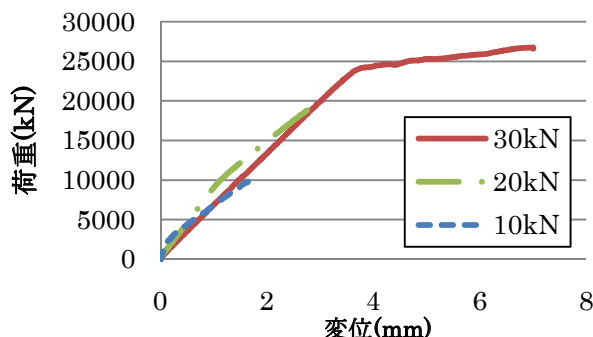


図 3 : 荷重－変位曲線

#### 4. 実橋の固有振動数計測

計測対象とした橋梁は、図 3 に示す長崎県西彼杵郡長与町に位置する中尾城公園内の歩道橋である。橋梁形式はワーレントラス橋であり、橋長は 110m である。橋梁の振動計測は LDV で行い、動的非線形解析ソフト UC-win/Frames (3D) による解析結果との比較を行い、LDV の実橋への適用性を検討した。

##### 4.1 計測概要

本計測では、2 台の LDV を用いて 2 点同時計測を行った。これより、2 点における振動数同定とともに、2 点の位相差から低次モードの推定を行う。また、加振方法は人力による強制加振とし、励起が容易な中央点に加振を行った。計測点を図 5 に示す。

##### 4.2 解析モデル

本解析は上弦材、下弦材、斜材、垂直材に梁要素を適用し、境界条件は中尾城公園の歩道橋の設計書に基づき一端完全固定、他端・中央部付近はローラー支持とした。解析モデルを図 6 に示す。

##### 4.3 実験結果と解析結果の比較

2 台の LDV の計測結果と解析結果を表 3 に示す。2 台の LDV の計測結果に誤差はなく、計測された波形の位相差も微小であることから卓越した振動数は鉛直方向の曲げ振動を計測していると推定できる。このことから、解析結果における 1 次、4 次、6 次の固有振動数 (図 7, 8, 9) であると考えられる。計測結果と解析結果に若干の誤差が見られるが、これは中央部付近の橋脚のモデル化が困難であったため、モデル化していないことが原因ではないかと考えられる。そのため、今

後はより単純な橋梁で検討を行い、実橋への適用と振動特性の同定を行いたいと思う。

#### 5. まとめ

- RC 梁の実験では、変状発生の有無による固有振動数の変化を計測することができた。
- 長距離非接触測定を可能とした LDV を用いることで橋梁の固有振動数計測に適応できることがわかった。

#### 【参考文献】

- 1) 上半文昭, 構造物の振動を非線形で測る, 2007
- 2) 小坪清眞, 入門建設振動学, 森北出版株式会社, pp153-156.
- 3) 土木学会 「2005 年制定 コンクリート標準示方書[規準編] JIS 規格集」, 2005.



図 4 : 中尾城公園歩道橋

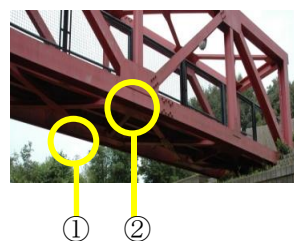


図 5 : 計測点

表 3 : 実験・解析結果の比較

| モード    | 固有振動数(Hz) |      |      |
|--------|-----------|------|------|
|        | 1次        | 4次   | 6次   |
| LDV1   | 2.08      | 4.52 | 6.59 |
| LDV2   | 2.08      | 4.52 | 6.59 |
| 位相差(°) | 0.16      | 0.6  | 0.3  |
| 解析結果   | 2.14      | 4.51 | 6.89 |
| 誤差     | 3.0%      | 0.2% | 4.0% |

※誤差=(解析 - 実験)/解析×100

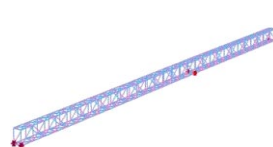
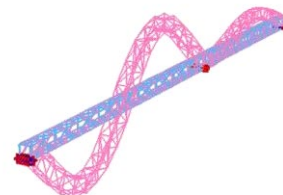


図 6 : 解析モデル

図 7 : 1 次モード  
(2.14Hz)図 8 : 4 次モード  
(4.51Hz)図 9 : 6 次モード  
(6.89Hz)