

## (5) 通信用光ケーブルを用いた橋梁添架設備の ボルト外れ検知に関する基礎検証

池口 雄大<sup>1</sup>・田代 善彦<sup>2</sup>・飯田 大輔<sup>3</sup>・脇坂 佳史<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> 正会員 NTT アクセスサービスシステム研究所 シビルシステムプロジェクト

<sup>3,4</sup> 非会員 NTT アクセスサービスシステム研究所 アクセスメディアプロジェクト

(茨城県つくば市花畑 1-7-1)

E-mail:yuuta.ikeguchi.da@hco.ntt.co.jp

橋梁には、通信用ケーブルを敷設するための管路が添架されており、維持管理のために定期点検を実施している。点検項目の内、管路を固定しているボルトの緩みや外れの確認は設備脱落による第三者加害の危険性から重要項目として位置付けている。現在は、目視により点検を行っているが、ボルトは数量が多く、かつ設備裏等の隠れた箇所に設置されているケースでは足場や梯子を用いるため、全数を精密に確認することは多大な稼働を要する。本稿では、管路内に敷設してある既存の通信用光ケーブルを振動センサとして利用することで、管路を固定するボルトの緩みや外れを検出できるかについて検証した。敷設した光ケーブルから加速度センサと同様の振動を測定できること、フーリエ変換による固有振動数の変化からボルトの外れ状態を検出できることを確認した。

**Key Words:** bridge, fiber sensing, eigenvalue analysis, bolt inspection, vibration analysis

### 1. はじめに

電力、通信、ガス、水道等のインフラ企業や自治体は、全国に多くの管路設備を有している。一般的に管路は地中に埋設されているが、河川や線路を横断する際には、地中を掘削できないため、橋梁に管路を添架している。

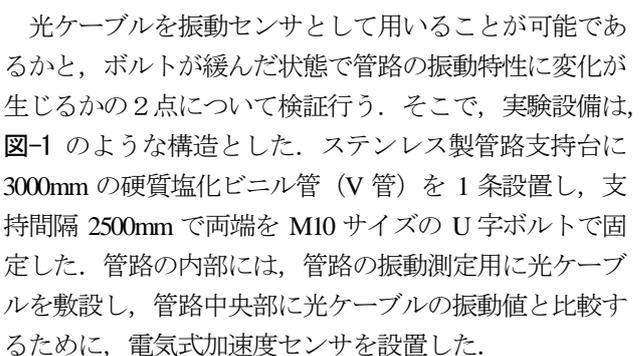
日本電信電話（NTT）では、通信用ケーブルを全国に敷設するため約4万橋の橋梁に管路設備を添架し、これらの管路を安全に維持管理するために、定期的な目視点検を行っている。点検項目では、管路の腐食、外れ、塗装剥がれ等があるが、管路を固定するボルトの緩みや外れは、設備落下による第三者加害や通信断をもたらす可能性が高いことから、重要な点検項目として位置付けている。しかしながら、ボルトは数量が多くかつ設備裏等の隠れた箇所に設置されているケースでは足場や梯子を用いるため、全数を精密に確認することは多大な稼働を要する。このような背景からボルトの緩みや外れを簡単に確認できる方法が求められている。

村上らは、地面にボルトで固定された鋼管柱の振動数を測定することによって、ボルトの緩みや外れを確認する方法を提案している<sup>1)</sup>。しかし、片側固定端の鋼管柱と違い、添架設備は、両側固定端であるため、振動特性の違いが分かっていない。加えて、橋梁は地上から数メ

ートル離れた場所にあるため、添架設備の振動を測定するセンサを設置することは困難となる。

そこで、簡易にボルトを点検する方法として、管路内に敷設されたケーブルの内、通信用光ケーブルを加速度センサとして用いることによって、管路の振動数より、ボルトの緩みや外れを検知する技術に着手する。本稿では、基礎検証として、管路内に敷設した光ケーブルが振動センサとして有効に測定ができるかと、その測定値からボルトの緩みや外れが検出できるかについて、基礎的な検証を行ったので報告する。

### 2. 検証の概要

光ケーブルを振動センサとして用いることが可能であるかと、ボルトが緩んだ状態で管路の振動特性に変化が生じるかの2点について検証を行う。そこで、実験設備は、図-1のような構造とした。ステンレス製管路支持台に3000mmの硬質塩化ビニル管（V管）を1条設置し、支持間隔2500mmで両端をM10サイズのU字ボルトで固定した。管路の内部には、管路の振動測定用に光ケーブルを敷設し、管路中央部に光ケーブルの振動値と比較するために、電気式加速度センサを設置した。

### 3. 両端型光干渉計を用いた振動測定検証

#### (1) 光センシングについて

光センシングは、センサであるファイバを透過、散乱した光の振幅波長や位相、波長の変化により、振動、歪み、温度、圧力、電流といった様々な物理量を測定することができる。ファイバに沿った線状の測定対象において連続的な測定量を得ることができ、ファイバを面的に配線することで、対象の面的な情報を得ることも可能であるため、橋梁やトンネルといったインフラ設備の振動検知や歪検知、プラント設備の内圧・漏れ検知、侵入者検知などに活用されている<sup>2)</sup>。本検証において、光ケーブルで測定した振動特性の変化を検知するためには、動的歪を測定する必要があり、光センシングでは干渉型センサや FBG センサ等の測定方式がある。本検証では橋梁添架設備に敷設された通信用光ケーブルを活用して振動を測定したいため、光ファイバに加工を施す必要がある FBG センサは不適切と判断し、干渉型センサを採用した。また、干渉型センサの中でも、今回はマツハツェンダー光干渉計を用いた。

マツハツェンダー光干渉計は、入力させたレーザ光を1×2 カプラでセンシングファイバとリファレンスファイバへ分岐させ、測定部と参照部を通過後、3×3 カプラで3つの検出器に受信させる。今回作成した光干渉計の全体構成を図-2 に示す(両側端子型光干渉計)。

光干渉計は、光の位相変化から振動を捉えることができる。光の位相の変化量 $\Delta\phi$ については、以下の式で表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_0}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{n_0}{2} [(1 - \nu_f)P_{12} - \nu_f P_{11}] \right\} \int_{L_f} \varepsilon_f dx \quad (1)$$

このとき、 $n_0$ は光の屈折率、 $\lambda$ は光の波長、 $\nu_f$ はポアソン比、 $P_{11}$ と $P_{12}$ はポッケルス効果、 $L_f$ 、 $\varepsilon_f$ はそれぞれ光ファイバの長さ歪を表す。

積分記号より前部分は光ファイバから与えられる一定数であり、全体の光位相変化 $\Delta\phi$ は光のファイバの歪と比例しており、歪の積分は以下のように得られる。

$$\int_{L_s} \varepsilon_f dx = \frac{\Delta\phi}{\frac{2\pi n_0}{\lambda} \left\{ (1 - \nu_f)P_{12} - \nu_f P_{11} \right\}} \quad (2)$$

また、光ファイバの歪平均は以下ようになる。

$$\varepsilon_{avg} = \frac{\int_{L_s} \varepsilon_f dx}{L_f} = \frac{\lambda \Delta\phi}{2L_f \pi n_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2} n_0^2 [(1 - \nu_f)P_{12} - \nu_f P_{11}] \right\}} \quad (3)$$

これらの式より、光の位相変化量 $\Delta\phi$ が測定、計算できれば、歪を計算することが可能である。

3×3 カプラの3つの出力は、3出力のいずれかで120°の位相ずれが生じ、以下の式で表される。

$$I_1 = C + D \cos \left( \Delta\phi(t) - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (4)$$

$$I_2 = C + D \cos \left( \Delta\phi(t) + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (5)$$

$$I_3 = C + D \cos(\Delta\phi(t)) \quad (6)$$

このとき、Cは中央値で振幅Bによって出力に変化が生じることがある。(4)~(6)式を用いて、位相変化量の時間微分 $\Delta\phi(t)'$ を以下の式で算出する。

$$\Delta\phi(t)' = \frac{\sqrt{3}((I_3 - I_2)I_1' + (I_1 - I_3)I_2' + (I_2 - I_1)I_3')}{2(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 - I_1I_2 - I_2I_3 - I_3I_1)} \quad (7)$$

最終的に(7)式で積分した値を時間毎に算出することで、光の位相変化量 $\Delta\phi$ を求めることができる。

本構成において、センシングファイバ部分が橋梁添架設備の光ケーブルに該当する。将来的には通信用光ケーブルを用いて測定を行うが、今回の基礎検証では光ケーブル自体の振動特性混入の可能性を排除し、実験設備の振動特性のみを測定するため、センシングファイバはパッチコードを用いた。

#### (2) 検証パターン

ボルト締結状態は、デジタルトルクレンチを用いてトルク値を設定することによって、「はずれ」「ゆるみ」「固定」状態を再現した。作業員が固定状態まで締め付けた際のトルク値10N・mを固定状態と設定し、ゆるみ

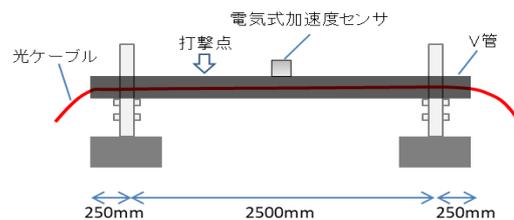


図-1 橋梁添架設備を模擬した実験設備

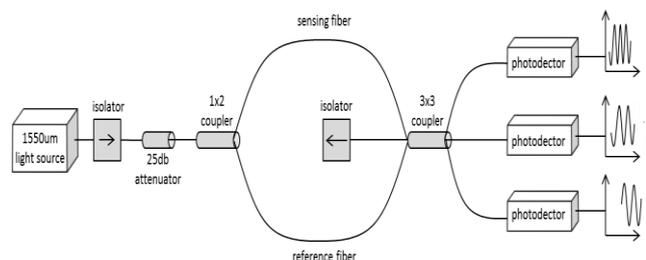


図-2 両側端子型光干渉計の構成

状態を固定状態の 1/2 の軸力である 5N・m、はずれ状態は軸力 0%の 0N・m とした。加振方法については、車両振動を想定し、管路中央をハンマーで打撃し 3 回繰り返す試験を実施した。各測定パラメータについて、光干渉計はサンプリング周波数：100kHz、サンプリング数：50,000、電気式加速度センサはサンプリング周波数：10kHz、サンプリング数：10,000 とした。

### (3) 解析方法

振動解析は、高速フーリエ変換(FFT)にて固有振動数を算出し、最大ピーク値を解析値とした。電気式加速度センサは管路に対して鉛直方向の振動データを用いて解析を行った。光干渉計・電気式加速度センサ共に、サンプリング秒数は振動発生から 2 秒間、窓関数処理はハニング窓を用いた。

### (4) 検証結果

光干渉計で測定した振動データの固有値解析結果と電気式加速度センサの固有値解析結果を表-1 に示す。

表-1 より、ボルト固定・外れ状態では固有振動数が 2.0Hz 変化する結果となった。また、光干渉計と加速度センサの解析結果を比較すると、すべてのトルク値において固有振動数が一致しているため、両側端子型の光干渉計でも適切な振動データが測定できていることが確認できた。しかしながら、緩み状態は光干渉計・加速度センサ共に変化が生じなかった。両側端子型光干渉計で振動データと固有値解析結果の一例を図-3、図-4a~4c に、電気式加速度センサの固有値解析結果の一例を図-5 に示す。

光干渉計の実用可能性の確認として、両側端子型光干渉計での基礎検証を実施し、光ケーブルで測定した振動データからボルト外れ状態の検知が可能であることが分かった。しかしながら、今回用いた両側端子型の光干渉計を実際の橋梁添架設備に適用するには、リファレンスファイバを橋梁区間に 1 心構築する必要があるため、適用は困難であると考えられる。そこで、4 章では、橋梁区間に新たにリファレンスファイバを構築する必要のないシステム構成に改良を行い、再度検証を実施した。

表-1 両側端子型光干渉計と電気式加速度センサの固有値解析結果

| ボルト状態 | トルク値 [N・m] |    | 光干渉計 (両側端子型) [Hz] | 電気式加速度センサ [Hz] |
|-------|------------|----|-------------------|----------------|
|       | 左          | 右  |                   |                |
| 外れ    | 0          | 10 | 16.0              | 16.0           |
| 緩み    | 5          | 10 | 18.0              | 18.0           |
| 固定    | 10         | 10 | 18.0              | 18.0           |

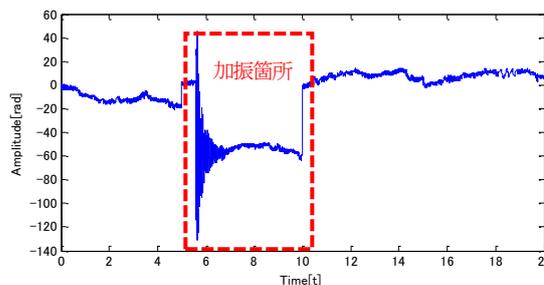


図-3 両側端子型光干渉計で測定した振動データ

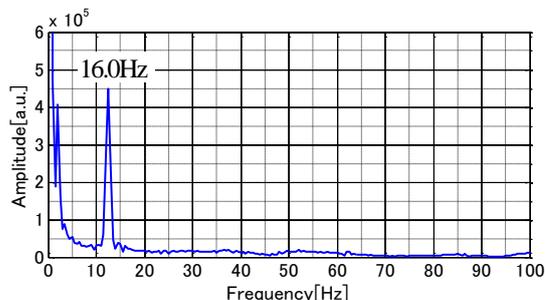


図-4a 外れ状態の固有値解析結果

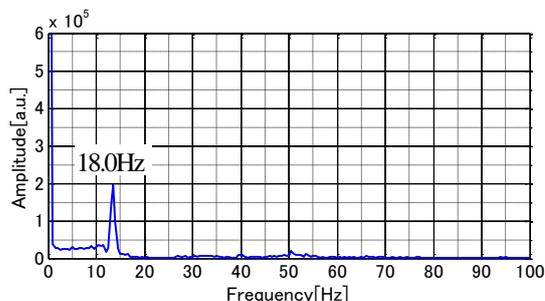


図-4b 緩み状態の固有値解析結果

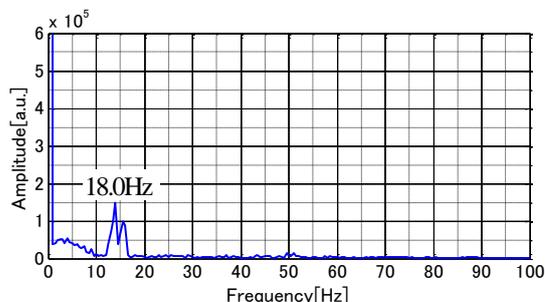


図-4c 固定状態の固有値解析結果

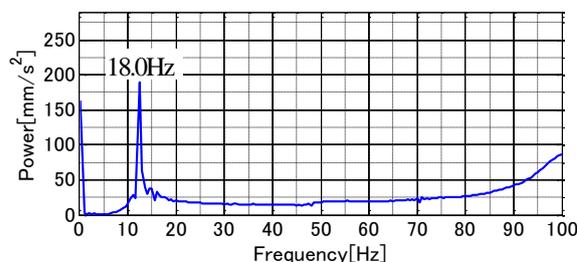


図-5 固定状態の固有値解析結果 (電気式加速度センサ)

## 4. 片側端子型光干渉計を用いた振動測定検証

### (1) 光干渉計の改良について

新たに改良を行った片側端子型では、センシングファイバの先端にミラーを取り付けることで、センシングファイバを通過した入力光を反射させ、反射した光をサーキュレータにて検出器に送る構成に変更することで、カブラの取り付けは片側のみとした。なお、このとき入力光や検出器の構成は変更していない。改良した光干渉計の構成図を図-6に示す（片側端子型光干渉計）。

このように片側端子型にすることで、実際の橋梁添架設備において新たにリファレンスファイバを構築する必要は無く、光ケーブルの片側にミラーを設置するだけで振動を測定することができる。

### (2) 検証結果

改良した片側端子型光干渉計を用いて、同様の試験パターンにて試験を実施した。片側端子型光干渉計の固有値解析結果と、同時に測定した電気式加速度センサの固有値解析結果を表-2に示す。

従来の両側端子型光干渉計や電気式加速度センサ同様、固定状態とはずれ状態で固有振動数が異なり、トルク値の上昇につれ固有振動数が上昇していく傾向を示した。さらに、両側端子型光干渉計では変化が生じなかったゆるみ状態の固有振動数は、片側端子型光干渉計では1Hzの変化が生じた。

しかしながら、両側端子型光干渉計と同様の実験設備を用いて同様の検証を行ったにも関わらず、各ボルト状態において固有振動数が異なる結果となった。このことから、ボルト軸力の僅かな違いが固有振動数に変化をもたらした可能性があると考えられる。

## 5. まとめ

本稿では、光ケーブルを光干渉計として振動センサとして測定できるかと、振動特性からボルトの緩みや外れを検知できるか検証を行った。

光干渉計の測定方式としては、両側端子と、より現場での運用を考慮した片側端子型の2種類で検証した。両側端子では、電気式加速度センサと同様の固有振動数が取得できた。片側端子では、同様の固有振動数にはならなかったが、ボルトの外れ状態から固定状態に変化させた際に固有振動数の変化を捉えることができた。このことから、光干渉計は電気式加速度センサの代替として有効であることが確認された。

管路の振動特性によるボルトの緩み検知では、ボルトのはずれ状態は両側端子型、片側端子型ともに検知できた。一方で、緩み状態を安定的に検出することはできなかった。本検証では、両側端子型の緩み状態は固定状態と比較して固有振動数が変化しなかったが、片側端子型で変化したことを考慮すると、固有振動数の変化は軸力のわずかな変化生じる可能性が示唆される。そのため、緩み状態を細分化した検証を今後実施する必要がある。

また、今回は周波数分解能0.5Hzのため、片側端子型で生じた電気式加速度センサとの乖離は測定誤差の可能性がある。今後、周波数分解能を向上させて測定する必要がある。

今回の模擬設備は管路と架台の単純構造であったが、実際の橋梁添架設備では、管種の違いや継手の存在、複数支持点構成など、複雑な構造物となっている。様々な設備構成に則した検証を継続して実施し、ボルトの緩みや外れの検知技術を確立する必要がある。

光センシングについては、今回は光干渉計を用いたが、今後様々な測定方式を採用することで、より実環境の測定に適した光センシング技術の確立を目指す。

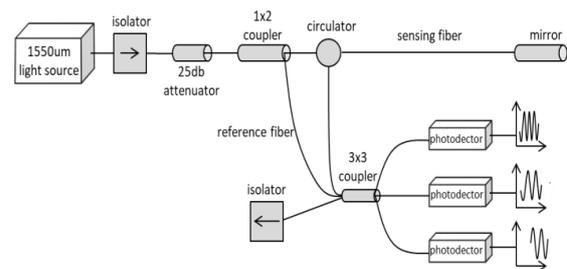


図-6 片側端子型光干渉計の構成

表-2 片側端子型光干渉計の固有値解析結果

| ボルト状態 | トルク値 [N・m] |    | 光干渉計 (方側端子型) | 電気式加速度センサ |
|-------|------------|----|--------------|-----------|
|       | 左          | 右  |              |           |
| 外れ    | 0          | 10 | 15.0         | 15.5      |
| 緩み    | 5          | 10 | 16.0         | 16.0      |
| 固定    | 10         | 10 | 17.0         | 16.5      |

## 参考文献

- 1) 村上琢哉, 武田勝昭: ボルトの緩みの定量的評価に関する基礎的検討, 土木学会第57回年次学術講演会, I-573, 2002, 9.
- 2) 光防災センシング振興協会: 光ファイバセンサ入門, p. 137-141, 2012.
- 3) Shih-Chuan Her \*and Chih-Min Yang: Dynamic Strain Measured by Mach-Zehnder Interferometric Optical Fiber Sensors, *Sensors* 2012, 12, 314-3326, doi:10.3390/s120303314, 2012.