

光ファイバ技術とIoT技術を併用した長大橋の維持管理に向けた一検討

One consideration on applicability of optical-fiber sensor with IoT technology for maintenance management of long-span bridges

室蘭工業大学大学院	○名誉会員	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	正 員	瓦井 智貴	(Tomoki Kawarai)
日揮 (株)	非 会 員	吉村 直樹	(Naoki Yoshimura)
(株)安藤ハザマ	正 員	澤田 純之	(Sumiyuki Sawada)
宮地エンジニアリング (株)	正 員	永谷 秀樹	(Hideki Nagatani)
北海道開発局室蘭開発建設部	正 員	高野 眞司	(Shinji Takano)

1. はじめに

北海道開発局の橋梁長寿命化修繕計画¹⁾によれば、北海道内の国道に建設されている橋梁は合計4,354橋となっている。その中で2020年度時点で建設後50年を経過した橋梁数は1,382橋であり、10年後には2,294橋、20年後には2020年の2倍以上の2,783橋に達する。このような状況下で、5年に一度の目視点検を実施し健全度の評価と共に効率的な対策を施して、緊急時には重要性が増す国道ネットワークの安全性・信頼性を確保しなければならない。

その中で、中小橋梁に関する維持管理、補修補強は比較的容易である。しかしながら、水深が深く川幅の広い河川橋梁や深い谷を跨ぐ長大橋梁の場合には、精度の高い目視点検も容易なことではなく、点検を効率的に実施するための支援技術の進展が期待される。

また、このような長大橋の場合には、目視点検のみでは耐荷性や劣化度に関する精度の高い評価も難しいものと推察され、主要部材のひずみ等を計測することによって、その応力度あるいは橋梁全体の固有振動特性を把握することも必要になるものと判断される。

維持管理を目的として部材の応力度を求めるためにひずみ計測を実施する場合には、通常ひずみゲージ貼り付け部の研磨と共に多少の風雨に対しても絶縁性を確保できるようにひずみゲージの防水処理やキャプタイヤケーブルを用いた配線が必要となる。そのため、確実なデータ取得のためには専門的な知識と共に多大な労力を要する。また、年度毎あるいは5年に1度の計測は、ひずみゲージの接着性や絶縁性の観点からひずみゲージを再利用することが不可能であるため、通常は同様な作業が要求される。これより、ひずみゲージを用いることによって主要部材の応力レベルでの経年劣化を評価し維持管理することは、事実上不可能に近いものと判断される。

従って、設置作業が容易で対象橋梁の応力レベルや振動性状を遠隔で把握可能、かつ10年オーダーの継続的な計測も容易に実施可能な計測システムの構築が望まれるところである。

このような観点から、著者らは設置が容易な光学ストランドとIoT技術を併用した計測システムを長大橋の維持管理に適用することを最終目的に、その可能性を検討するために、試行的に長大吊橋である白鳥大橋に本システムを設置し、波形の取得と共に2,3の検討を行ったの

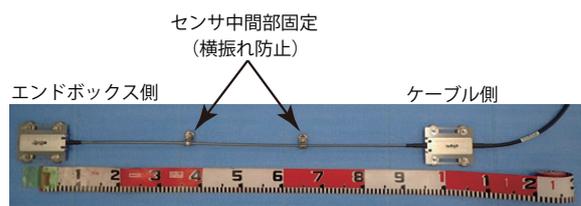


図-1 光学ストランド



図-2 モニタリングステーション部

表-1 計測器の仕様

項目	仕様
ストランド長	1,000 mm
計測範囲	3 mm (3,000 μ)
分解能	1 μm (1 μ strain)
サンプリング周波数	100 Hz
使用時温度	-10°C ~ +52°C

で報告する。

2. 計測システムの概要

2.1 ひずみ計測部

図-1には、ひずみ計測のための光学ストランドを示している。また、表-1には、その仕様一覧を示している。光学ストランドは、図あるいは表に示されているように、全長が1,000 mmであることより部材の1,000 mm区間における平均ひずみを評価することとなる。そのため、パン長の短い部材の場合には精度の高いひずみ分布を求めることができないことに注意しなければならない。また、



写真-1 白鳥大橋の全景

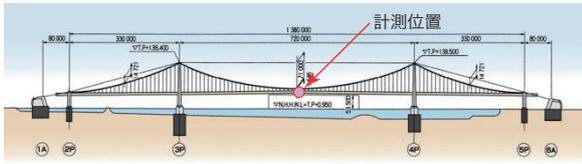


図-3 計測機器の設置位置(側面図)

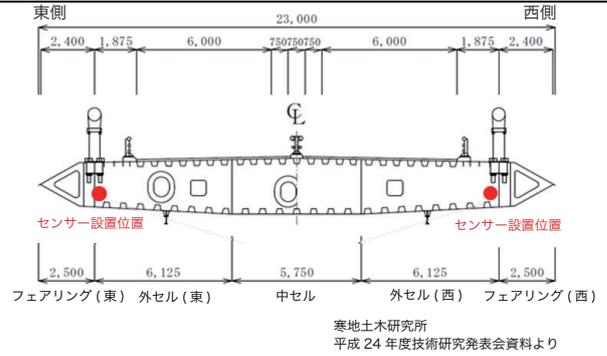


図-4 計測機器の設置位置(断面図)

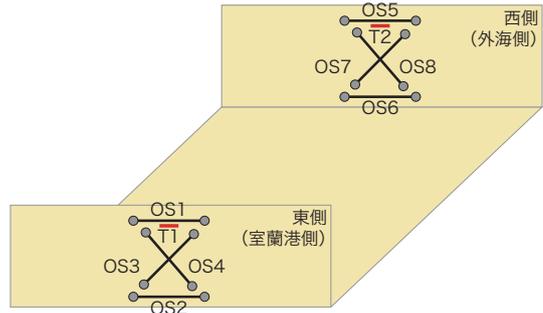


図-5 各センサ設置位置の詳細



図-6 上下縁ひずみ測定用センサ設置状況

計測範囲が最大3mmであることより、地震時挙動を計測する場合のように正・負のひずみを必要とする場合には、設置時に初期伸びを与えることにより計測が可能になる。

設置は、光学ストランドを強力磁石あるいは接着剤を用いて固定するのみであり、ひずみゲージ貼り付け時のように防水処理等の必要はなく、一度の設置作業のみで長期モニタリングが可能になる。

2.2 モニタリングステーション部

図-2には、モニタリングステーション部を示している。キャビネットの高さは500mm程度である。その機能には、3G/4G通信規格を使用したインターネットにより、離れた場所からリアルタイムで双方向からのアクセスが可能である。

また、ひずみ計測のための光学ストランド以外にも、温度計や振動計測用の加速度計等のアナログセンサを接続することができるため、特に災害発生時には複数の動的応答に関する情報が収集でき、総合的な対応が可能になる。

計測したデータに関しては、インターネットを通してサンプリングタイムの設定やアラートレベルの設定をする機能を有している。サンプリングタイムは、動的計測時には100Hzのデータ取得が可能であり、静的計測時には1~86,400s(1日)までの設定が可能である。また、温度補正機能や関数設定による簡易な分析機能も有している。取得したデータは、専用クラウド上に保存される。アラートの設定に関しては、動的と静的計測時に対して、最低値、中間値、最大値の3つの閾値をEメールやSMS経由で設定可能である。なお、1ステーションには、最大8chまでの光学ストランドが設置可能である。

3. 長大橋梁の振動計測

3.1 対象橋梁及び計測器設置位置

本研究では、光学ストランドとIoT技術を活用した計

測システムに関する長大橋梁の維持管理への適用性を検討するために、試行的に室蘭港を跨ぎ室蘭市陣屋町と祝津町を結ぶ白鳥大橋に設置した。白鳥大橋は、東日本最大の吊橋であり(写真-1, 図-3), 橋長1,380m, 中央径間720mの3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋で、補剛桁は鋼床版箱桁形式を採用している。

図-3, 図-4には、白鳥大橋における計測器の設置位置を示している。本研究では、計測器を中央径間のスパン中央断面における両最外縁主桁部に設置することとした。図-5には、中央断面における各センサの配置位置を示している。本研究では、図に示すように、曲げひずみを計測するために各主桁の上下縁に合計4ch, せん断ひずみを計測するために主桁外側にクロスに合計4ch設置した。また、T1/2は温度センサ設置位置を示している。図-6には、一例として曲げひずみ計測のためのセンサの設置状況を示している。

3.2 収録波形の一例

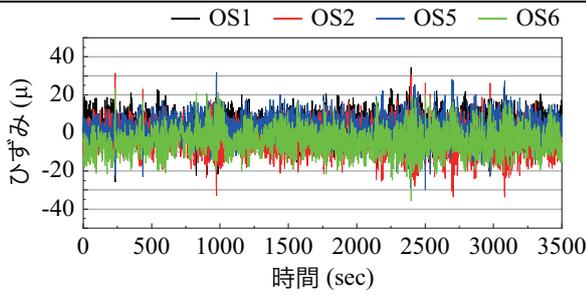


図-7 計測したひずみの時刻歴波形

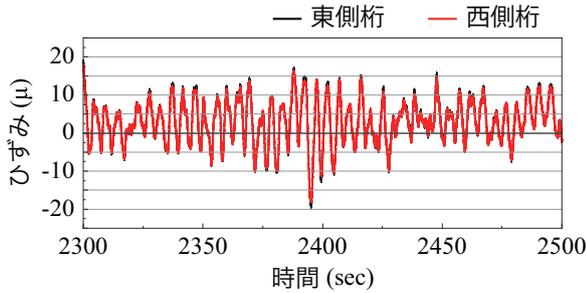


図-8 鉛直曲げひずみの時刻歴波形の比較

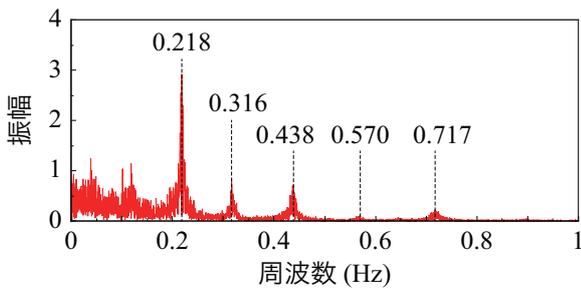


図-9 鉛直曲げひずみ波形のスペクトル分布

表-2 鉛直曲げ振動の固有振動数(Hz)比較

振動モード	起振実験	数値解析	常時微動	本研究結果
対称1次	0.129	0.115	0.115	
対称2次	0.218	0.215	0.220	0.218
対称3次	0.435	0.435	0.436	0.438
逆対称1次	0.149	0.128	0.151	
逆対称2次	0.317	0.318	0.317	0.316
逆対称3次	0.568	0.566	0.540	0.570

図-7には、2021年6月4日の午前10時からの約1時間に渡って記録したひずみの時刻歴波形の内、各桁の上下縁ひずみ波形成分のみを重ねて示している。なお、当日の気温は摂氏14°C、南東の風、風速10.9 m/s前後である。図より、最大振幅は風速が約11 m/sにおいても30 μ程度と非常に小さいことが分かる。

以下に、収録波形において比較的応答振幅の大きい2,300 s(午前10時38分過ぎ)~2,500 s(200 s間)の波形を取り出し、鉛直曲げひずみ成分と水平曲げひずみ成分について、その波形性状と周波数分析による各固有振動モードに対する振動数について検討を行うこととする。

3.3 鉛直曲げひずみ波形

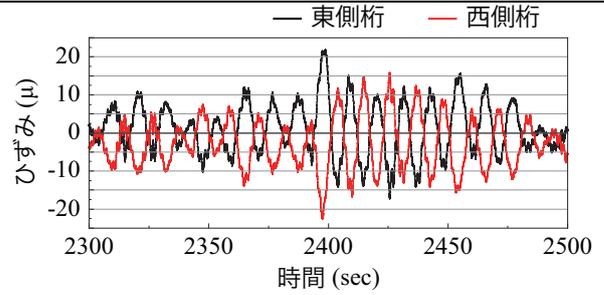


図-10 水平曲げひずみの時刻歴波形の比較

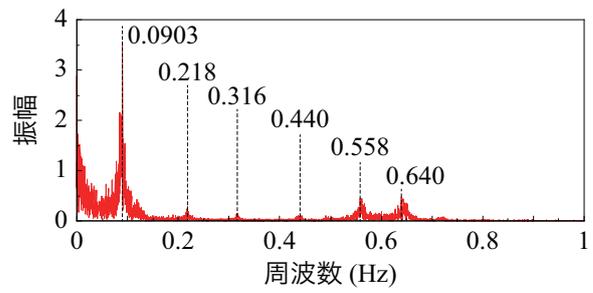


図-11 水平曲げひずみ波形のスペクトル分布

表-3 水平・鉛直曲げ振動の固有振動数(Hz)比較

振動モード	起振実験	数値解析	常時微動	本研究結果	
鉛直	対称1次	0.129	0.115	0.115	
	対称2次	0.218	0.215	0.220	0.218
	対称3次	0.435	0.435	0.436	0.440
	逆対称1次	0.149	0.128	0.151	
	逆対称2次	0.317	0.318	0.317	0.316
	逆対称3次	0.568	0.566	0.540	
水平	対称1次	0.099	0.082	0.095	0.090
	対称2次	0.560	0.517	0.573	0.558

各桁の鉛直曲げひずみ成分は、上縁ひずみから下縁ひずみを差し引きして軸ひずみ成分を除去することにより求まる。具体的には、東側桁、西側桁でそれぞれ $(OS1-OS2)/2$ 、 $(OS5-OS6)/2$ として算出される。

図-8には、両桁の波形を比較して示している。図より、両波形は時間的および振幅的にほぼ一致していることが分かる。このことは、東桁と西桁でほぼ同位相かつ同程度の応力状態で挙動し、ねじれ振動が励起していないことが分かる。最大曲げひずみは20 μ程度である。

図-8を基に、スペクトル解析を実施して卓越固有振動数を探索すると、図-9のように示される。ここで得られた各固有振動数を竣工直後に実施された起振実験結果や数値解析、常時微動観測で得られた結果²⁾と比較すると、表-2のように示される。なお、本研究では計測システムを上記の通り中央径間のスパン中央断面に設置していることにより、対称と逆対称1次振動モードに関する固有振動数は検出されない。表より、本システムを用いて収録したデータから求められた固有振動数は、起振実験結果等とほぼ一致していることが分かる。

3.4 水平曲げひずみ波形

各桁の水平曲げひずみ成分は、上縁ひずみと下縁ひず

みを足し合わせて鉛直方向曲げひずみ成分を除去することにより抽出することができる。具体的には、東側桁、西側桁でそれぞれ $(OS1+OS2)/2$ 、 $(OS5+OS6)/2$ として算出される。

図-10には、両桁の波形を比較して示している。図より、両波形は時間的には位相が半周期ずれ、振幅的にはほぼ一致していることが分かる。このことは、中立軸が幅員方向の中央部に位置していることを意味している。最大曲げひずみは 22.5μ 程度で、鉛直曲げひずみと同程度であることが分かる。

鉛直曲げひずみ波形と同様に、図-10を基に、スペクトル解析を実施して固有の卓越振動数を探索すると、図-11のように示される。ここで得られた各固有振動数を鉛直曲げひずみ波形と同様に、竣工直後に実施された起振実験結果や数値解析等で得られた結果²⁾と比較すると、表-3のように示される。表より、水平方向曲げの対称1次及び2次振動モードが卓越して示されているが、同時にスペクトル値は小さいものの鉛直方向曲げ振動モードの固有振動数も検出されていることが分かる。また、本研究で得られた水平方向曲げに関する固有振動数は、起振実験結果あるいは解析結果と類似の値を示していることが分かる。

以上より、本システムを用いることにより、各方向の曲げひずみ成分の検出と卓越する固有振動数も適切に評価可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、長大橋の応力や耐荷性状の観点からの維持管理を効率的に実施することを目的に、センサの設置作業が容易で、かつ長期的な計測が遠隔で可能な計測シ

ステムとして、光学ストランドとIoT技術を併用したシステムの導入を提案した。また、試行的に長大吊橋である白鳥大橋の中央径間スパン中央断面に提案のシステムを設置し、波形の取得と共に鉛直及び水平曲げひずみ成分を抽出し、スペクトル解析によって各振動モードの固有振動数の特定を試みた。

検討の結果、取得したひずみ波形を用いることにより、主要部材の健全度評価に重要な主桁の鉛直・水平曲げひずみ振幅やその固有振動特性を適切に評価可能であることが明らかになった。

今後さらにデータを蓄積し、建設後50年を超えた長大橋梁への適用に向けて、さらに検討を重ねていきたいと考えている。

謝辞

提案のシステムを白鳥大橋に設置し計測を実施するに当たり、北海道開発局 室蘭開発建設部福原潤二氏には多大なご協力を戴きました。この場を借りて深く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：橋梁長寿命化修繕計画、
https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_iji/ud49g700000091rs-att/ud49g700000092nk.pdf
(最終閲覧日：2021年12月10日)
- 2) 新山 淳, 佐藤昌志, 池田憲二, 菅原登志也, 佐藤浩一：白鳥大橋の固有振動数評価に関する常時微動観測法の適用性, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp.469-477, 2001.