

IoT と光ファイバ技術を用いた既設長大橋の常時微動計測に関する一検討

A consideration on microtremor observation of existing long-span bridge by using optical fibre sensors and IoT technology

室蘭工業大学

室蘭工業大学

安藤ハザマ

日揮(株)

宮地エンジニアリング(株)

北海道開発局室蘭開発建設部

名誉会員 岸徳光 (Norimitsu Kishi)

正会員 小室雅人 (Masato Komuro)

〇正会員 澤田純之 (Sumiyuki Sawada)

非会員 阿南誠一 (Seiichi Anan)

正会員 永谷秀樹 (Hideki Nagatani)

非会員 大平利光 (Toshimitsu Oohira)

1. はじめに

近年、建造から数十年経過したインフラ構造物に対して長寿命化が求められ、維持管理の重要性が再認識されている。その中で、維持管理は実際の現地業務を伴う近接目視点検などが主流であり、計測機器を活用した管理は未だ進んでいないのが現状である。一方、計測技術や通信技術の発展により IoT、ICT を利活用した計測が比較的容易となり、また、コンパクトな計測も可能になってきている。しかしながら、維持管理については従来型による管理も対応可能であり、調査経験技術者が多く、同一調査による結果比較が可能な状況を鑑みると、初期投資を伴う新技術の導入には困難な状況と考えられる。また、新技術を使用した際の費用対効果も現時点では明確といえず、その懸念の払拭には実橋梁や実規模模型による検証が必要なことも、新技術の導入を踏み留まる要因の一つと考えられる。

吊り橋などの長大橋の管理計測は、加速度計などによる計測管理が主として挙げられる。平時よりモニタリングによる計測を実施し、その結果から卓越振動数、変形剛性やひずみなどで分析し、その変化を捉えることにより、異常時の変状把握が可能になると考えられる。

一方、技術の進歩により様々な計測機器が開発・改良され、目的に適した計測機器の選定が比較的容易になった。また、計測機器もさることながら、昨今では IoT 技術を活用することによって、施設から離れた場所において、気象条件や交通量に対応した計測が適宜実施可能になっている。

このような観点から、本研究では、設置が容易でかつ IoT を利用して計測の遠隔操作が可能な無線方式の光学ストランドひずみ計を使用した長大橋の効率的な維持管理の可能性について検討を行うこととした。対象橋梁は、室蘭港に敷設されている白鳥大橋である。

2. 概要

2.1 対象橋梁

本計測の対象とした白鳥大橋は、室蘭市を通る国道 37 号に架かる東日本最大の吊橋である(写真-1 参照)。本橋梁は、室蘭港を跨ぎ室蘭市陣屋町と祝津町を結ぶもので、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。竣工後 22 年経過しており、現在はその長寿命化や



写真-1 白鳥大橋の全景



写真-2 計測機器の設置状況

表-1 計測機器の仕様

項目	内容
計測区間長	1,000mm
計測範囲	3 mm (3000 μ m)
分解能	最大10 μ m
サンプリング周期	静的：1data/hour 動的：最大100Hz (100 data/sec)
使用温度範囲	-10~40°C

合理的な維持管理のため、種々の対策が実施されている。

白鳥大橋は、前述のように室蘭港を跨いでいることより、通年強い海上風に晒されている。冬季には気温も低く季節風が吹くため、強風により通行止めとなる場合もある。

2.2 計測機器

本橋梁の計測には、検長部に光ファイバを用いた自立型のひずみ計を用いて評価することとした。写真-2 には橋梁内における計測機器の設置状況を示している。計測機器は、光学ストランドが配線されたセンサ部(橋長 1,000mm)の両端にミニステーション、エンドボックスが接続されており、ミニステーション内にはリチウム電

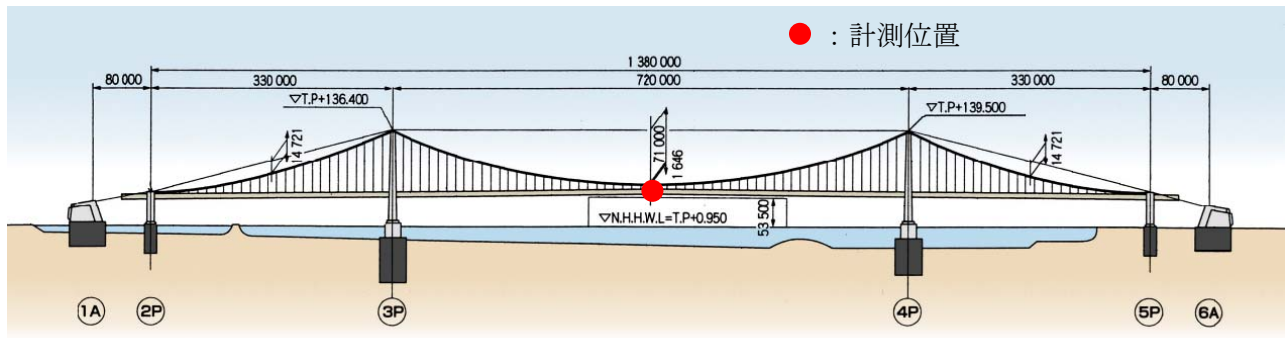


図-1 計測機器の設置位置(白鳥大橋の側面図)

池, 無線アンテナ, メモリが内蔵されている。また, SMS モジュールを取り付けることにより, インターネットプロバイダーを介して専用クラウドにデータが自動アップロードされる IoT 技術を適用したシステムとなっている。

表-1 には, 計測機器の主な仕様を一覧にして示している。本計測機器は, 検長が 1,000mm の長軸のひずみ計測機器である。計測範囲は 3,000 μ , 分解能は公称値が 10 μ であるが, 1 μ までの測定が可能である。データ取得は, 静的計測の場合で 1data/hour, 動的計測の場合で最大 100Hz である。

本計測機器の設置作業手順は, 1) 計測位置の位置出し, 2) 専用治具の取り付け, 3) 計測器の設置・調整, であり 15 分程度で設置が完了した。なお, 計測機器の設置時は, センサ部に一定の緊張力を与えた状態で固定する必要があるため, ミニステーションとエンドボックスの固定時に緊張力を与えた状態で設置した。本計測システムの特徴は, 電源内蔵型であるため電源の配線が不要であること, 計測機器が非磁性体であるため鋼製部材の計測の場合には強力磁石(ネオジウム磁石など)を用いて簡易に設置可能であること, が挙げられる。

2.3 計測の概要

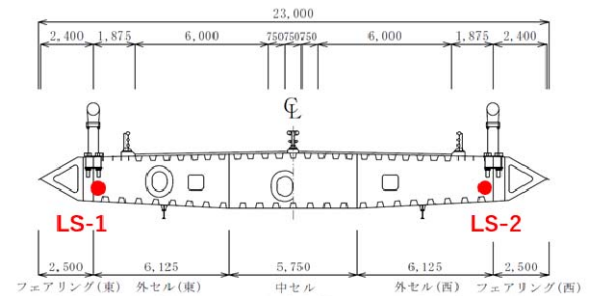
図-1, 図-2 には, 計測機器の設置位置を示している。計測位置は白鳥大橋の中央径間中央部の東西の外セル内のフェアリング側に各 1 か所とした。設置位置はセル下面から 300 mm の位置とし, 橋軸方向の計測とした(写真-2 参照)。計測機器の名称は, 東側のセル内(室蘭港側)に設置したセンサを LS-1, 西側のセル内(外海側)に設置したセンサを LS-2 とした。計測機器は 10 月 27 日に設置し, 専用クラウドを介してデータ回収を開始した。表-2 には, 気象庁ホームページより取得した動的データ取得時の室蘭市の環境条件を示している。

計測時の外力条件は, 風による揺れおよび通行車両による揺れが発生している状況であった。また, 10 月 27 日~28 日は白鳥大橋の工事に伴う片側通行規制があり, 中央径間部まで車両が停止する時間帯が確認された。

3. 計測結果

3.1 静的データ

図-3 には, 取得した補剛桁の静的な相対軸方向ひずみデータの例を示している。データは 1data/hour であり,



寒地土木研究所
平成24年度技術研究発表会資料より

図-2 計測機器の設置位置(中央部断面図)

表-2 計測日時における室蘭市の気象情報

計測日時	環境			
	風速※	風向※	気温※	セル内温度
2020年10月27日10時頃	4.0	西北北	13.1	13.5
2020年10月28日10時頃	2.2	南	13.7	12.5
2020年12月8日10時頃	8.0	西北北	1.3	2.0

※気象庁データより

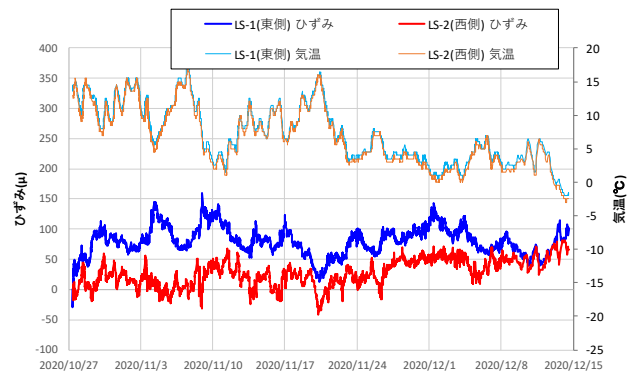


図-3 10/27 を基準とした補剛桁の
静的な相対軸方向ひずみデータの一例

10 月 27 日から 12 月 14 日までのデータを示している。なお, ひずみ値は設置時(10/27 10:00)の第 1 データを初期値とし, その値からの相対変化量として整理している。また, ひずみ値は温度補正処理を施している。

図より, ひずみデータを見ると, 数日間にわたる大きな動きと日変化とみられる短周期的なデータの重ね合わせとして確認される。このひずみデータは温度上昇・下降の動きに対応していることが分かる。今後, データを長期的に取得し, 検証をすることで, 日変動や季節変動

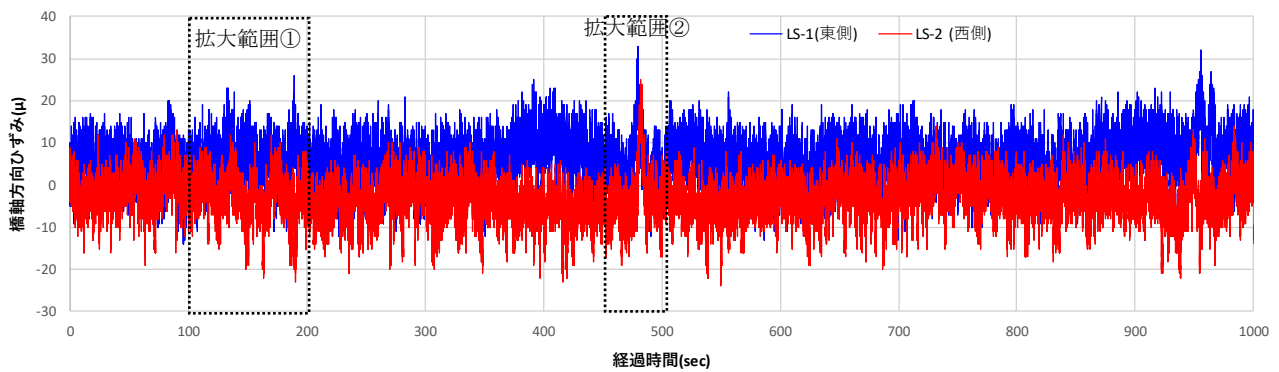
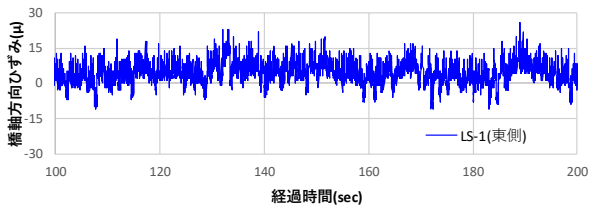
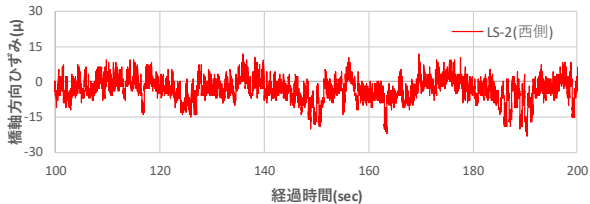


図-4 補剛桁の動的な相対軸方向ひずみデータの一部(12月8日測定)

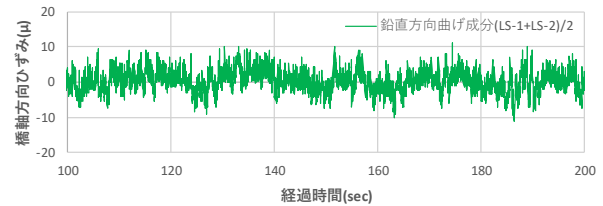


(a) LS-1(東側)波形

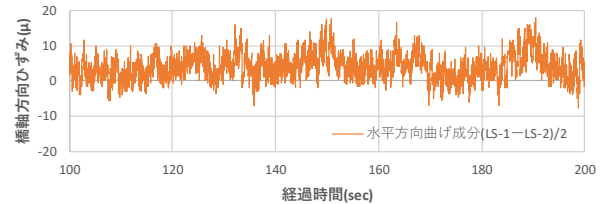


(b) LS-2(西側)波形

図-5 相対軸方向ひずみデータ(拡大範囲①)



(a) 鉛直方向曲げ成分



(b) 水平直方向曲げ成分

図-7 各成分の経時変化データ(拡大範囲①)

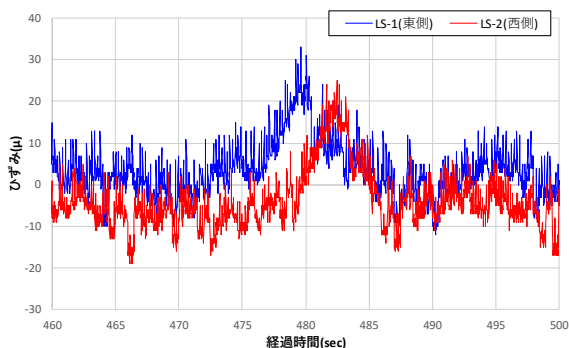


図-6 車両通過時の動的データの一部(拡大範囲②)

の検出、維持管理に資する情報取得、更には地震等の緊急点検時等の一助になるデータが得られると考えられる。

3.2 動的データ

図-4には、12月8日に取得した動的データの全生波形を、図-5にはその波形の一部を拡大して示している。動的データはサンプリング周波数 50Hz で取得しており、約 16 分の連続計測を実施したものである。本波形は、各計測機器のデータ取得時の第 1 データを基準に相対変化量として整理している。なお、計測時間が比較的短時間で温度変化が小さいため、温度補正は行っていない。

図より、本波形には通常車両通行時の波形と見られる短周期の波形成分と、橋梁全体として発生する波形と

見られる固有振動的な低周波成分が確認できる。各計測機器の測定値に着目すると、 $-20\mu \sim 30\mu$ の範囲で変動しており、その変化も捉えられている。また、図-6には、車両通行時の動的データの一部として拡大して示しているが、通過時には約 30μ のひずみ増加が確認できることから、本計測機においても車両通行による橋梁振動等を十分な感度で計測できるものと判断される。

図-7には、LS-1、LS-2 の加算平均、差分処理を行ったひずみデータの経時変化を示している。ここでは、100 秒間のデータのみを一例として示した。本計測では、橋梁中央部の同一断面内の測定を行っていることから、加算平均処理を行うことによって鉛直方向の曲げ振動成分を求めることができ、差分処理を施すことによって風等による水平方向の揺れに伴う水平曲げ振動成分を求めることができる。図より、加算平均処理を実施した波形成分を見ると、ひずみ値は 0μ を中心とした $\pm 10\mu$ 程度の変動を示していることが分かる。差分処理による水平方向の曲げ成分の波形を見ると、ひずみ値は $-8 \sim 18\mu$ と引張側に偏っていることが分かる。これより、計測時点では中央径間部は LS-1 側(東側)に凸な状態になっていることが推定される。気象庁のデータより、測定時の室蘭市には西北西の風 8.0m/s が吹いており、気象条件とも整合性が取れていることが分かる。以上の計測結果より、本計測においても補剛桁の卓越した振動性状を推定出来る可能性が示された。

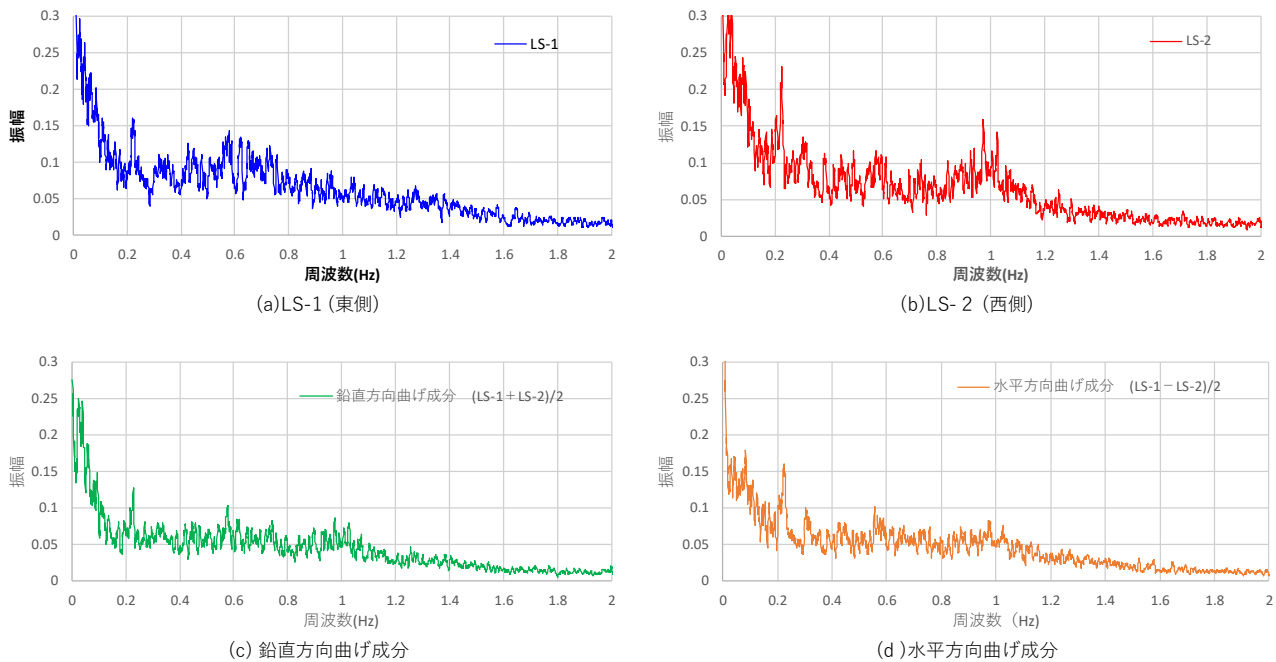


図-8 フーリエ変換によるスペクトル解析結果の一覧

3.3 スペクトル解析による振動特性評価の試み

本節では、12月8日に計測した連続16分間の動的データ(サンプリング 50Hz)の波形を用いてスペクトル解析を行った。

図-8には、LS-1/LS-2の単独波形、LS-1/LS-2両波形を加算平均した鉛直方向の曲げ成分、差分処理した水平方向の曲げ成分に関する解析結果を示している。なお、本橋梁は長大橋であることから、低次固有振動数に着目することとし、周波数2Hzまでの結果を示している。

単独波形成分の結果を見ると、(a)図のLS-1では0.2Hz、0.6Hz近傍で、(b)図のLS-2では0.2Hz、1.0Hz近傍でピークが確認される。(c)図に示す鉛直方向の曲げ成分に関する結果を見ると、0.2Hz、0.6Hzおよび1Hz付近にピークが見られることが分かる。また、(d)図に示す水平方向の曲げ成分波形に関する結果においても、鉛直方向の曲げ成分とほぼ同じ振動数においてピークが確認される。なお、第1ピークである0.2Hz付近の卓越振動数は、建設時に実施された加振実験結果¹⁾や常時微動観測^{2),3)}による鉛直対称2次振動モード(加振実験: 0.218 Hz, 常時微動: 0.220 Hz)と類似した結果となっている。しかしながら、本計測ではひずみデータが少ないことから、今後はデータを蓄積するとともに、固有振動数に関する既往の実験結果^{1)~3)}との比較を行い、本システムによる評価手法の妥当性についてさらなる検討が必要であるものと判断される。

5. まとめ

本論文では、IoTシステムを活用した光学ストランドひずみ計を使用して白鳥大橋の振動計測を実施し、計測

値による評価、スペクトル解析による卓越振動数の振動特性評価を試みた。本計測結果の範囲では以下の事項が明らかになった。

- 1) 橋梁の同一断面に2か所以上の計測を実施することにより、橋梁の卓越振動の把握の可能性が示された。
- 2) 光学ストランドを利用したひずみ計測においても、振動計による計測と同様に固有振動特性等の評価の可能性が示された。

今後、様々な気象・環境条件のデータを蓄積することにより、各時点における橋梁振動特性把握、維持管理に資するデータの提供が可能になるものと判断される。

謝辞

本橋梁計測に当たり、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頂きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高田敦, 渋谷元, 藤野陽三, 坂本良文, 菅原登志也, 後藤浩之: 白鳥大橋の起震実験に関する報告, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.502-503, 1999.
- 2) 新山惇, 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.
- 3) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, 土木学会論文集 No.689/I-57, 261-274, 2001.