第Ⅰ部門　　静ひずみモニタリングによる吊橋センターステイロッドの破断検知

関西大学　学生員　○井上陽介，正会員　石川敏之
本州四国連絡高速道路（株）　正会員　河野晴彦，栄翔太，溝上善昭

1. はじめに

西瀬戸自動車道の大島と今治の間に架かる来島海峡第一大橋（橋長 960 m，補剛箱桁吊橋）では，強風時に補剛桁と主ケーブルとの橋軸方向の相対変位を抑制し，ハンガーロープに曲げ等の付加的な応力が発生することを防ぐことを目的としてセンターステイが設置されており，設置時に一定の軸力が導入されている．センターステイのロッド（以下，ロッド）は，過去に疲労によるき裂，破断が生じたことが確認されているため，定期的に点検を実施しているが，ロッドにはカバーが設置されているため，間欠的な点検等ではき裂の進展，破断を早期に発見することが困難である．したがって，来島海峡第一大橋のロッドでは，LPWA を用いた IoT データロガーによる静ひずみモニタリングが行われており，**図-2** に示すように，ロッドの静ひずみの変化によって，上り線今治側のロッドの破断の兆候を検知できたことが報告されている[1), 2)]．

破断したロッドの交換後も来島海峡第一大橋の上下線各 1 か所ずつ IoT データロガーによるロッドのモニタリングが行われており，本研究では，継続して実施しているモニタリングの結果について報告する．

2. IoT データロガーによる静ひずみ計測

上下線ともに，今治側のロッドの静ひずみがモニタリングされている．ひずみの計測位置はロッドの最小断面部の中央の上側（以下，天側）（*U*）と下側（以下，地側）（*L*）である．下り線の地側ではロッドのカバーを取り外さずに設置していたため，地側から約 60° の位置の静ひずみを計測している．

本研究では，低コストで通信可能な LPWA（Low Power Wide Area）を用いた IoT データロガーにより静ひずみを計測している．IoT データロガーには，シングルボードコンピューターArduino Nano（互換機）を用い，ひずみの計測にロードセル用 24 ビット AD コンバータ HX711，LPWA として Sigfox（breakout board）を用いている．製作した IoT データロガーは，ロッドのカバー内に収めるために，7500 mAh のバッテリーとデータロガーをセパレートした構造とし，ロッドのカバー内に設置されている．静ひずみの計測にはゲージ長 1 mm のひずみゲージ（350 Ω）を用いている．計測は 2024 年 5 月 30 日に開始し，タイマーモジュールを用いて，夜間（23 または 24 時台），早朝（4 または 5 時台）および昼間（セットした時の確認用として，下り線で 14 時台，上り線で 15 時台）にデータを送信するようにセットされている．これにより，1 日当たり 2~3 回計測データを取得している．**図-2** は，2024 年 7 月 15 日に発生した，上り線側のロッドの破断を検知した事例である[1), 2)]．

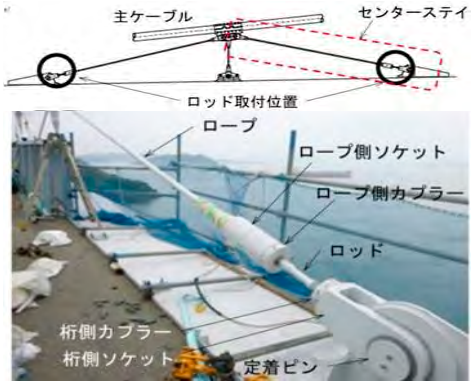


図-1　センターステイ

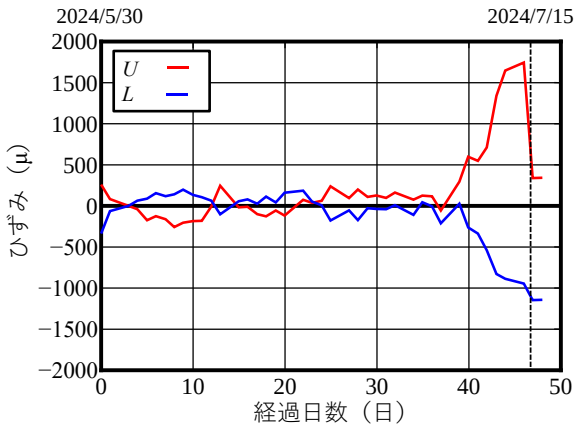


図-2　静ひずみ計測結果

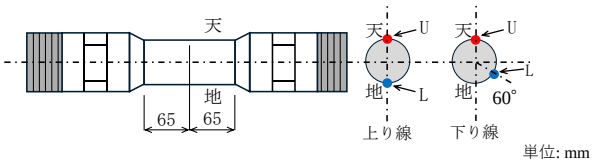


図-3　ひずみゲージ添付位置

3. 静ひずみモニタリング結果

上り線の静ひずみの経時変化を**図-4** に，下り線の経時変化を**図-5** に示す．なお，下り線は計測開始前にロッドが破断し，交換を実施した今治側のロッドで計測している．上下線共に 2026 年 7 月 20 日までの比較的交通量が少ない夜間のみの計測結果を示している．なお，車両通過の影響を除するために天側のひずみ範囲が 10 μ 以上のデータは削除している．

図-4 に示すように，上り線では，ロッドを再設置し，静ひずみ計測を再開（2024 年 10 月 17 日）以降，下り線と同様

に天側と地側にひずみ差が生じている．ただし，2024 年 8 月～11 月の間で，メインケーブルにケーブル検査車が仮設されていたため，ひずみ変化が生じたものと考えられる．上り線では，計測開始から 400 日以降に大きな静ひずみの変化が見られた．その際に現地確認を行った結果，今治側および大島側のロッドカバーに外観上の問題は見られなかった．**図-2** から，静ひずみを計測しているロッドでは，疲労き裂が進展した場合，天側では引張，地側では圧縮側にひずみが変化する．しかし，静ひずみの変化が**図-2** と異なっていたため，大島側のロッドでき裂が発生，進展している可能性があるため，静ひずみモニタリングによる監視を続けた．484 日後（2025 年 9 月）にも大きな静ひずみの変化が見られたが，舗装工事が実施されていたため，静ひずみが変化した可能性が考えられる．

下り線では，計測開始以降，天側と地側のひずみの差が生じ始めている．これは，温度上昇によるセンターステイの伸び量と補剛桁・ハンガーの形状保持によるセンターステイの伸び量の差によりセンターステイに張力が導入され，ロッドに反りが生じたためと考えられる [1), 2)]．計測開始から約 125 日には突如ひずみが減少した．これは，上り線のロッドを再設置したタイミングと一致しているため，ロッドを交換した影響と考えられる．また，747 日目（2026 年 6 月 16 日）以降，下り線の天側の静ひずみが大きく低下したため，翌日の 6 月 17 日に点検を行ったところ，静ひずみを計測していた下り線今治側のロッドではなく，下り線大島側のロッドの破断が確認された（**図-6**）．したがって，モニタリングしていないロッドの破断が生じた場合でも，対となっているロッドの静ひずみが大きく変化することで，ロッドの破断が検知できた．また，**図-4** より，下り線のロッドの破断によって，上り線側のロッドの静ひずみも変化していることがわかる．このように，ロッドの静ひずみモニタリングによって，迅速にロッドの破断が検知でき，早急な復旧が出来るようになった．

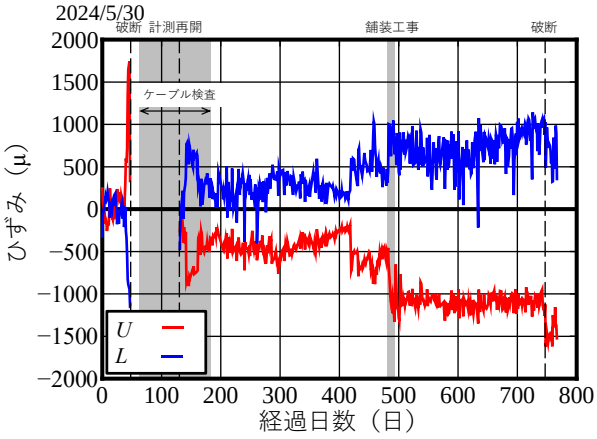


図-4　上り線今治側のロッドの静ひずみ計測結果

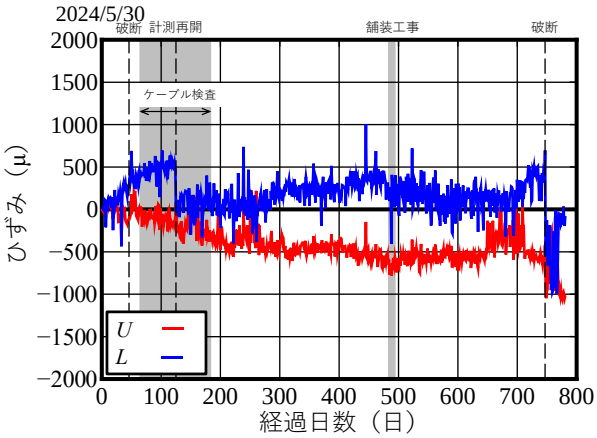


図-5　下り線今治側のロッドの静ひずみ計測結果



図-6　下り線大島側のロッドの破断の様子

4.　おわりに

本研究では，来島海峡第一大橋のセンターステイロッドに IoT ひずみ計測機器を設置し，ロッドの静ひずみの変化をモニタリングした．本研究の主な結論を以下に示す．

1) 上り線のロッドを再設置し，センターステイに軸力を導入した際に，下り線のセンターステイロッドの静ひずみも変化することが明らかになった．
2) 2026 年 6 月 16 日以降，上下線共に天側，地側のひずみが減少し，翌日，点検を行ったところ，破断が確認された．このことから，モニタリングしていないロッドの破断が生じた場合でも，上下線で 1 対のロッドの一つの静ひずみモニタリングにより，ロッドの破断が検知できることが明らかになった．

今回の計測中に破断した下り線大島側のロッドは，今後取り換え予定があるため，下り線大島側のロッド再設置後の上下線今治側のロッドの静ひずみの変化について，引き続きモニタリングを行う予定である．

参考文献

1) 栄翔太，藤田憲二，後藤稜平：LPWA 無線ひずみ計測による遠隔監視手法の実践，本四技報，Vol49，pp.16-21，2025.
2) 栄翔太，横井芳輝，藤田憲二，河野晴彦，後藤稜平，溝上善昭，石川敏之：IoT を活用した吊橋センターステイロッドの遠隔監視手法の試行，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol4，pp.85-94，2025.

Yosuke INOUE，Toshiyuki ISHIKAWA，Haruhiko KONO，Shota SAKAE，Yoshiaki MIZOKAMI
K720094@kansai-u.ac.jp