

白鳥大橋メインケーブル定着部近傍における軸方向ひずみの短期計測

Short-term axial strain measurement of cable near anchoring section of Hakucho-Ohashi bridge

室蘭工業大学大学院
釧路工業高等専門学校
北海道開発局室蘭開発建設部

○正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
福田 孝志 (Takashi Fukuda)

1. はじめに

北海道の南西部、室蘭港に架かる白鳥大橋は、供用開始後約18年が経過し、主塔や主桁などの塗膜劣化やハンガーロープ定着部の腐食等が確認されている^{1),2)}。本論文では、これらの損傷の中でメインケーブル定着部近傍に発生している塗膜の割れに着目し、その要因を検討するためにケーブル定着部近傍に生じる軸方向ひずみを計測した。また、計測期間中には、グースアスファルトも含めた舗装の全面打ち替えが実施されており、それらがケーブルの軸方向ひずみに与える影響についても検討を行った。

2. 白鳥大橋の概要と現状

白鳥大橋(写真-1)は北海道室蘭港に建設された吊橋であり、1985年に着工後、14年に及ぶ建設期間を経た後1998年に供用が開始された。日本で唯一、積雪寒冷地に建設された中央径間長720mの3径間2ヒンジ補剛吊橋である(図-1参照)。

同橋梁は、供用開始後18年(施工期間を考慮すると各部材は20年以上)が経過しており、鋼材の防食機能の劣化が徐々に顕在化し始めている。写真-2には、補剛桁およびハンガーロープ定着部近傍の塗膜劣化状況の一例を示している¹⁾。現在、これらの損傷箇所を対象に補修対策を鋭意実施している。また、写真-3に示すように、メインケーブル定着部近傍(2P, 3P, 4P, 5P)には、S字ワイヤラッピングに沿うような塗膜割れが確認されている。一方、定着部近傍以外については、このような塗膜割れは確認されていない。したがって、効率的な維持管理を実施するためには、これらの塗膜割れの要因を調査しておくことが重要であるものと考えられる。

3. 計測概要

3.1 計測位置および計測期間

前述のように白鳥大橋のメインケーブルにおいて、その定着部近傍で塗膜割れが確認されている。ここでは、これらの要因を分析するために、側塔(2P)におけるケーブル定着部近傍部を対象にひずみゲージを貼付し現地計測を実施した。なお、白鳥大橋のメインケーブルには、図-2

に示すように世界初のS字ワイヤラッピング工法が採用され、S字型ワイヤと柔軟型塗装(柔軟型エポキシ樹脂塗料3層+柔軟型ふっ素樹脂塗料1層、膜厚195 μ m)を組み合わせた防食対策が施されている³⁾。

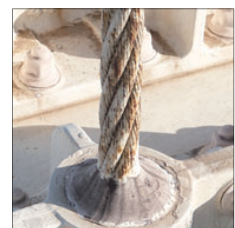
図-3には、側塔(2P)近傍のメインケーブル定着部近傍におけるひずみゲージ添付位置を示している。ひずみゲージは、端ケーブルバンドから1mおよび8mの断面とし、図に示すようにメインケーブルの上下左右の4箇所に貼付している。また、1m位置の断面(計測箇所L)にはひずみゲージ近傍に熱電対を設置し、ケーブルの温度変化も測定している。なお、ひずみゲージはブリッジボックスを介し、また熱電対は直接データレコーダに接続して計測した。サンプリング周波数を2Hzとした。計測は2016年9月4日から同年10月14日までの約40日間であり、ひずみに関しては計測開始時に零バランスを取った。



写真-1 白鳥大橋の全景



(a) 補剛桁



(b) ハンガーロープ

写真-2 劣化状況

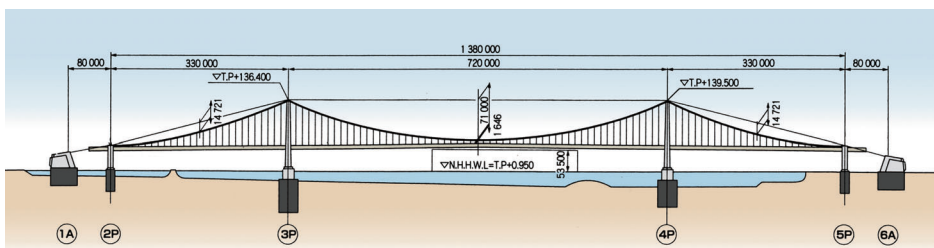


図-1 白鳥大橋の形状寸法



写真-3 塗膜割れの状況(2P)

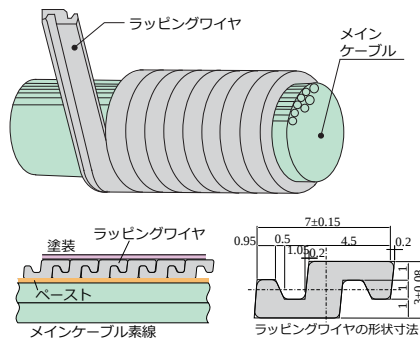


図-2 S字ワイヤラッピング工法

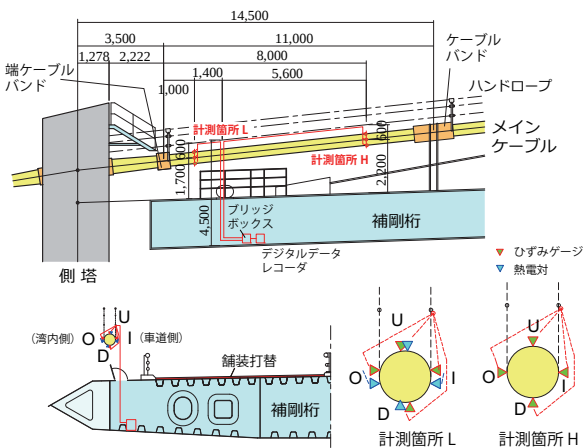


図-3 計測位置

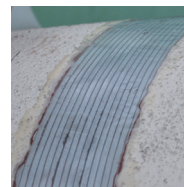
なお、サンプリング周波数を2 Hzと設定したことにより、計測期間内には膨大なデータが記録された。一方で、それらのデータを詳細に分析するためには多大な時間を要することから、本論文では60秒ごとに間引いたデータを用いて考察を行うこととした。

また、計測期間内における風速および風向は、白鳥大橋のスパン中央部に設置された風速計により測定した。測定期間は2016年9月4日午前0時から同年10月15日午前0時までとし、風速および風向は観測時刻の前の10分間の平均値を用いて整理した。総データ数は5,905であるが、計測器の不具合などにより、風速の有効データ数は5,443、風向は4,577であった。

3.2 ひずみゲージの貼付作業

前述のように白鳥大橋のメインケーブルにはS字ワイヤラッピング工法が採用されており、張力変動や温度変化に対してS字型ワイヤが伸縮することにより、メインケーブル内部への水分の浸入を防止する構造となっている(図-2参照)。本論文では、このような構造を有するケーブルの軸方向ひずみを適切に測定するために、以下の手順によりひずみゲージを貼付することとした。

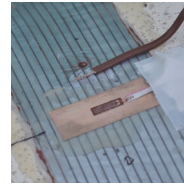
1. 計測断面(2箇所)を中心に幅70 mm程度の範囲を対象にケレン作業を行い、塗膜除去を行う。
2. 塗膜除去後、汚れを取り除き接着剤を塗布し、計測断面を含むケーブル周方向の一体化を図る(写真-4a)。
3. ボンド硬化後、S字ワイヤラッピング間の隙間の開きの程度を平均的に計測するために、計測位置(各断面4箇所)にりん青銅板をケーブル軸方向に接着する



(a) 塗膜除去



(b) りん青銅板の接着



(c) ひずみゲージの接着



(d) 自己融着テープによる養生

写真-4 ひずみゲージ貼付工程

(写真-4b)。

4. ひずみゲージ専用の接着剤を用いて、りん青銅板にひずみゲージを接着する(写真-4c)。
5. ひずみゲージの接着を確認し、ひずみゲージとケーブルを保護するようにして、りん青銅板全体を覆うように自己融着テープを貼り付ける(写真-4d)。
6. 防水を完璧にするために、自己融着テープ接着部を覆うように接着剤を塗布する。
7. 接着剤の硬化後、ひずみゲージを保護する目的でメインケーブルの周方向に白ビニールテープを巻きつける。
8. なお、計測断面Lについては、写真-4(c)に示すようにひずみゲージ近傍にS字ワイヤラッピングに接触するようにして熱電対も設置している。

4. 計測結果および考察

4.1 風速および風向

図-4には、計測期間における風配図(風向および平均風速の頻度)を32方位で示している。また、図-5には平均風速の時刻歴データを示している。図より、風向は西北西から北西が卓越しており、白鳥大橋の橋軸直角方向に強い風が吹いていることが分かる。なお、この傾向は、過去の計測データ⁴⁾とよく一致している。また、最大風速は23 m/s、平均風速は約6.5 m/sであった。

4.2 舗装打換えの影響

図-6には、舗装打換え作業による死荷重の変化と各計測点におけるひずみの時系列データを示している。なお、計測期間中における舗装打換えは、2P-3Pの全区間および3P-4P区間の一部とし、メインケーブルの湾内側(図-3参照)の1車線のみを施工した。したがって、図中の死荷重は2P-3P区間の片側のみの変動を意味している。

図より、ケーブルの着目断面によって異なるひずみ変動が確認できる。ケーブル上端のひずみ(LU, HU)に着目すると、死荷重が軽減されるとともに、ひずみが若干圧縮側に推移する傾向が確認される。一方、グースアスファルト(基層)が敷設されるとともに徐々にひずみは増大し、完全に復旧された10月6日以降は初期値よりも大きくなっている。また、この傾向はLUの方が顕著となっている。

ケーブル下端のひずみ(LD, HD)に着目すると、いずれ

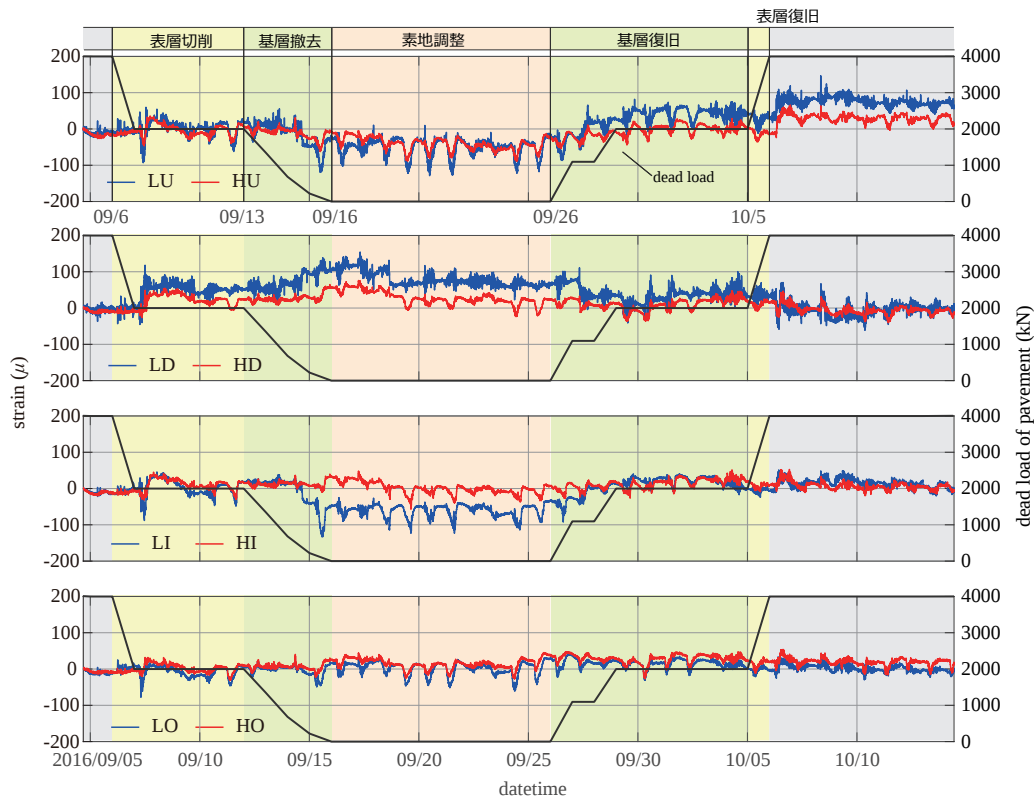


図-6 各計測点におけるひずみの時系列データにおよぼす舗装打換え作業の関係

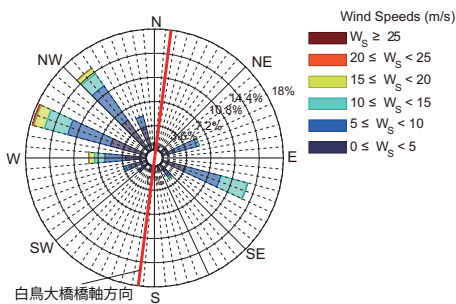


図-4 風配図(2016/9/4-2016/10/15)

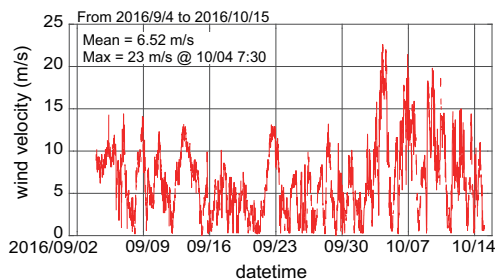


図-5 風速データ(2016/9/4-2016/10/15)

の場合も死荷重が軽減されるとともにひずみは増大し、その後、舗装の打換えが完了するとほぼ初期ひずみに戻ることが確認される。なお、死荷重の軽減に対する変動幅を比較すると、LDの方がHDの場合よりも大きい。

ケーブル内外(左右)端のひずみ変動に関しては、内側のLIを除き死荷重の増減による影響は小さいことが確認される。なお、LIに関しては舗装が完全に撤去された状況においてひずみが大きく減少しているが、現時点では

表-1 計測期間における各計測点のひずみ一覧

計測		軸方向ひずみ		
箇所	断面	最大値(μ)	最小値(μ)	最大振幅(μ)
L	U	146.64	-128.73	275.37
	D	154.41	-61.42	215.83
	I	51.27	-133.08	184.35
	O	41.06	-77.86	118.92
H	U	66.03	-88.91	154.94
	D	75.97	-40.36	116.33
	I	52.59	-56.92	109.51
	O	53.88	-31.72	85.60

この要因は明らかになっていない。

以上の結果を総合的に判断すると、舗装の撤去作業により死荷重が軽減される場合には、メインケーブルのたわみ(曲率)が緩やかになることから、上端ひずみは上端ケーブルが若干伸びることより(S字ワイヤラッピングの隙間が小さくなる傾向を示し)圧縮側に、下端ひずみは下端ケーブルが縮むことより(S字ワイヤラッピングの隙間が大きくなる傾向を示し)引張側に推移する傾向を示すものと考えられる。一方、中立軸に相当する内外(左右)端のひずみに関しては死荷重の増減による影響が小さいことが確認された。

なお、いずれのひずみ値においてもある間隔で明確なピークが見られるが、これは後述するように日射によるケーブルの温度上昇と連動していることを確認している。

表-1には、計測期間における各計測点の最大、最小ひずみおよび最大振幅を一覧にして示している。表より、最大振幅に着目すると、計測箇所では定着部に近いL断面の方が、断面内の測点では上側ひずみ(U)が大きいことが分かる。

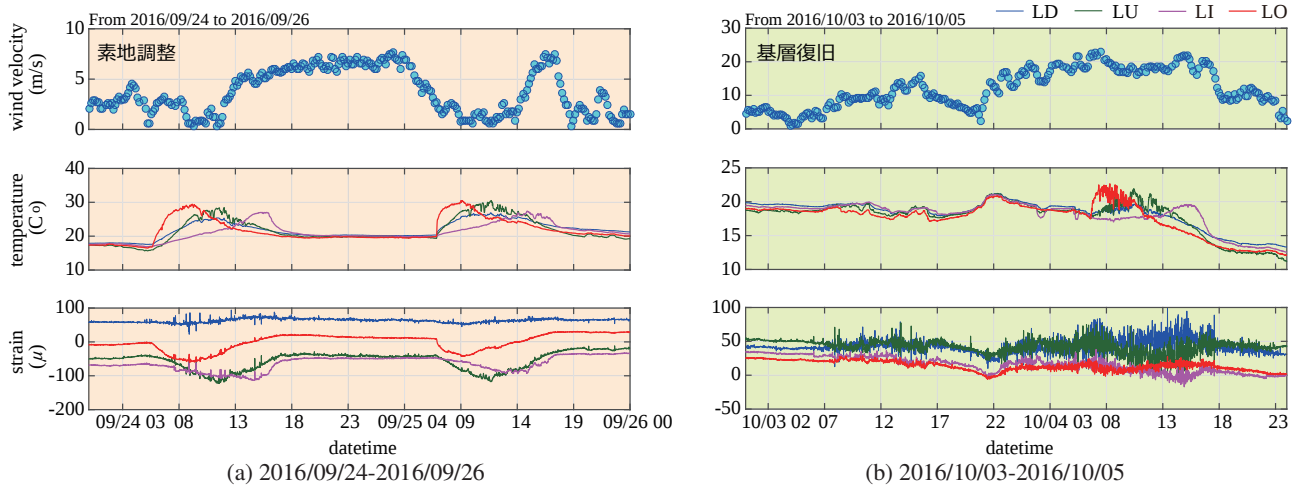


図-7 平均風速，ケーブル表面の温度変化とひずみの時系列データ

4.3 平均風速，ケーブル表面の温度およびひずみの時系列

図-7には，平均風速，ケーブル表面の温度およびひずみの時系列データとして，(a)9月24日から9月26日，および(b)10月3日から10月5日までを示している．前者は計測期間内の平均風速，後者は最大風速が観測された期間である．

(a)図に着目すると，ケーブル表面の温度は東側に位置する湾内側のLOが日の出とともに急激に温度が上昇していることが分かる．上・下側のLU,LDは，LOよりも少し遅れて温度が上昇している．なお，車道側のLIは，他の計測点よりも緩やかに温度が上昇し午後3時頃に最大値を示している．いずれの計測点も日の入りによって，ほぼ一定値に収束していることが分かる．これらの温度変化に追従するように，各計測点の軸方向ひずみも変動している．LO,LU,LIについてはケーブル表面の温度が上昇するとともに，ケーブルも伸びる傾向を示すことより(S字ワイヤラッピングの隙間が小さくなる傾向を示し)軸方向ひずみは減少する傾向を示している．なお，ケーブル表面の温度が約10℃上昇すると，ひずみは50μ程度減少していることを確認している．これは，上述のようにケーブルが伸びる傾向を示すことにより，対応してS字ワイヤラッピングの隙間が小さくなる傾向を示し，軸方向ひずみが減少することによるものと推察される．一方，下面のLDについては，温度上昇によるひずみの変動は小さいことが分かる．

なお，平均風速が6～8 m/s程度(風向：東南東)を示した9月24日18時から9月25日4時までのひずみを見ると，ほぼ一定値を示しており，この程度の風速ではメインケーブルのひずみに及ぼす影響は小さいことが確認される．

(b)図に示す最大風速(風向：西北西)を含む10月4日0時から18時までのひずみを見ると，ケーブル上下側のLDおよびLUのひずみ変動が大きく，側面のLI,LOは小さいことが確認される．このことは，風速が20 m/s程度で風向が橋軸直角方向の場合には，メインケーブル定着近傍部は上下(鉛直)に振動しているものと推察される．

5. まとめ

本論文では，メインケーブル定着部近傍に確認された塗膜割れの要因を調査するために，定着部近傍の2断面

を対象に，ひずみゲージを貼付しケーブル軸方向ひずみについて約40日間の計測を行った．本計測期間内に得られた結果を整理すると，以下のとおりである．

1. メインケーブルの軸方向ひずみは，舗装の打換えによる死荷重の変化に追従して変動する．
2. ケーブルの表面温度が約10℃上昇すると，S字ワイヤラッピングの隙間が小さくなり，軸方向ひずみは50μ程度減少する．
3. 平均風速が6～8 m/s程度の場合には，ケーブルに大きなひずみの変動は見られない．
4. 一方で風速が20 m/s程度でかつ風向が橋軸直角方向に近い場合には，ケーブルの上下端の軸ひずみは大きく変動することから，定着部近傍は上下(鉛直)に振動しているものと推察される．

なお，本研究ではメインケーブル側面に確認された塗膜割れの要因を特定するまでには至らなかった．今後は，生データを用いた詳細な分析を実施し，塗膜割れの要因の特定を試みる予定である．

謝辞：本研究の実施にあたり，(株)ドーコン・菅原登志也氏ならびに室蘭工業大学構造力学研究室の学生諸君には，ひずみゲージの貼付作業など多大なるご協力を頂いた．ここに深く感謝の意を表する．

参考文献

- 1) Okada, T., Naruse, Y., Kishi, N., Komuro, M., Sakai, M., and Nishi, H.: An approach for maintaining the Hakucho-Ohashi bridge, The 9th International Cable Supported Bridge Operator's Conference(ICSBOT2016), June 19-22, 2016, Halifax, Nova Scotia, Canada (CD-ROM)
- 2) Fukuhara, J., Fujimoto, H., Onodera, H., Shimada, T., Sasaki, Y., and Takahashi, K.: Hakucho-Ohashi Bridge-Inspecting the current deterioration state of the hanger ropes, The 9th International Cable Supported Bridge Operator's Conference(ICSBOT2016), June 19-22, 2016, Halifax, Nova Scotia, Canada (CD-ROM)
- 3) 小井田 剛，山地健次，高田 敦：白鳥大橋ケーブル防食工事について－S字ラッピング工法－，第40回(平成8年度)北海道開発局技術研究発表会，pp. 259-264, 1996.
- 4) 広瀬哲司，石原 勝，小笠原 章，渋谷 元，小賀坂俊昭：白鳥大橋架橋地点における風の特性について，昭和60年度北海道開発局技術研究発表会，pp. 52-57, 1986.