

白鳥大橋ケーブルバンドボルトの軸力管理方法 ～管理方法の効率化によるコスト縮減～

横田 法久¹・大平 利光²・福田 悟史²

¹北海道開発局 室蘭開発建設部 道路計画課 (〒051-8524 北海道室蘭市入江町1-14)

²北海道開発局 室蘭開発建設部 室蘭道路事務所 (〒059-0025 北海道登別市大和町2丁目34-1)

白鳥大橋は、東日本最大の長大吊橋であり、今年度で供用後22年目を迎えている。その間白鳥大橋では、様々な維持管理・補修を行ってきたところであるが、その中の一つにケーブルバンドの軸力管理がある。ケーブルバンドは主ケーブルとハンガーロープを接続する重要な部材であり、適切なボルト軸力管理が重要である。頻繁な管理は計測に時間を要しコスト負担となることが問題であった。本稿ではケーブルバンドボルトの軸力計測の効率化・コスト縮減方法を紹介する。

キーワード 維持・管理, ライフサイクルコスト, 長大吊橋

1. はじめに

白鳥大橋(写真-1)は橋長1,380mの3径間2ヒンジ補剛吊桁橋で1998年6月に供用が開始された。中央径間720mは国内第10位の規模で東日本最大、積雪寒冷地における唯一の大規模吊橋である。本橋は架替えの難しい大規模橋梁であるため、長寿命化を図るためには合理的かつ計画的な管理を要するが、大規模吊橋は国内でも数えるほどしかなく、そのため維持管理に関する技術的知見も少ない。特に吊橋にしかない特殊な部材の維持管理は、試行錯誤を繰り返しながら行っているのが実情である。



図-1 位置図



写真-1 白鳥大橋

ケーブルバンドのボルトもその一つであり、ケーブルバンドをケーブル格点に固定するための重要部材と云える。バンドの構造上、締め付け力が経年的に低下していくという構造的な特徴を有するため、定期的にボルトの軸力を計測し、低下量が一定の値を超えた場合は、再度ボルトを締め直す必要がある。本橋の場合は専用のケーブル検査車をその都度設置する必要があることからコストがかかることが課題であった。今回、管理コストの縮減に向けた新たな管理手法を策定することとした。

2. ケーブルバンドの軸力管理

(1) ケーブルバンドの構造概要

ケーブルバンド(写真-2)はハンガーロープをケーブルに固定する部材で、本橋では東側ケーブル、西側ケーブルそれぞれに設置されており、合計222箇所のケーブルバンドが設置されている。



写真-2 ケーブルバンド

ケーブルバンドは、左右からケーブルを挟み込む構造でボルトで水平方向に締め付ける方式(横締め定着)を採用している。本橋には、一般バンド6種類、ステイバンド1種類の7種類のケーブルバンド形状があり、傾斜角やハンガー張力等の違いによりボルト数が各々異なる。

(表-1)

表-1 タイプ毎のボルト数・バンド数

バンド種類 (記号)	ボルト数	バンド数
一般バンド (T1)	6本	24ヶ
〃 (T2)	6本	62ヶ
〃 (T3)	8本	56ヶ
〃 (T4)	10本	46ヶ
〃 (T5)	12本	8ヶ
〃 (T6)	8本	20ヶ
ステイバンド (TS)	18本	6ヶ

(2) ケーブルバンドの軸力低下現象

ケーブルバンドにはハンガーロープ張力で下方へ滑ろうとする力が働くが、ボルトを締め付けることでバンドとケーブル間に摩擦力を発生させ滑りに抵抗している。

(図-2) 一方、ケーブルは亜鉛メッキワイヤーを束ねた構造で荷重変動によるワイヤー再配列やメッキのクリーブ現象によりケーブルの内空断面が変化することが知られている。そのため、締め付け時の内空断面が経年的に変化し、結果的にボルトの締め付け力が低下するという現象が生じる。設計計算ではこの現象を予め考慮しており、30%の軸力低下分を見込んで設計されているが、30%を超えるような低下が生じた場合には、バンド滑りの発生が懸念される。そのため、ケーブルバンドボルトの軸力管理は吊橋における重要な管理項目とされている。定期的にボルトの軸力測定を行いつつ、軸力の低下状況を把握し、30%の軸力低下が生じる前に再度ボルトを締め直すという管理を行っている。軸力の低下現象は将来的にワイヤーの再配列等により、一定値に収束すると考えられているが、それまでは繰り返し管理が必要である。(図-3)

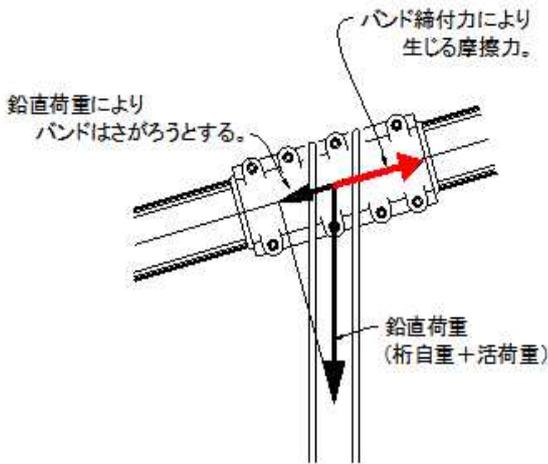


図-2 ケーブルバンドに作用する力

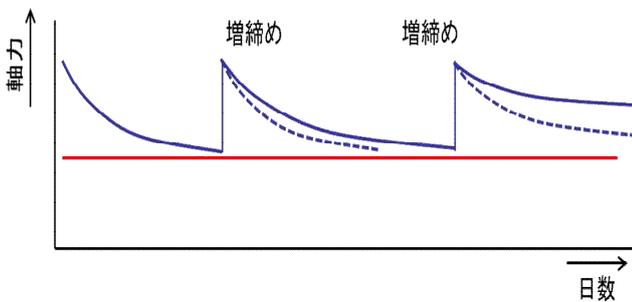


図-3 軸力管理のイメージ

3. これまでの管理方法と課題

(1) 軸力管理方法

ケーブルバンドのボルトの軸力は専用測長器(写真-3)でボルト長と基準棒長との差を計測し、その値を軸力に換算している。ボルト及び基準棒の無応力長(初期長)と軸力換算係数は建設時に測定された値を使用し式1にて算定している。

$$\text{軸力算定式: } N = k \cdot \Delta L \quad \text{式1}$$

ここで k : 軸力換算係数 (tf/mm)

ΔL : ボルトの伸び (mm)

$$\Delta L = (LB - LG) - (LB_0 - LG_0)$$

LB : ボルト長

LG : 基準棒長

LB_0 : ボルト初期長(無応力)

LG_0 : 基準棒初期長(無応力)

計測作業にはケーブル検査車(写真-4)を必要とするが、本橋の検査車は常設型ではないため、計測の度にクレーンにて設置撤去が行われている。



写真-3 専用測長器と基準棒



写真-4 ケーブル検査車

(2) 経過観察の計測対象

これまでの経過観察は設計計算で最も厳しい応力状態の30バンドを対象に、数年おきに計測を実施してきた。

図-4に示すように全径間に計測バンドが分布しているため、径間毎にクレーンを設置し検査車を設置撤去する必要があった。

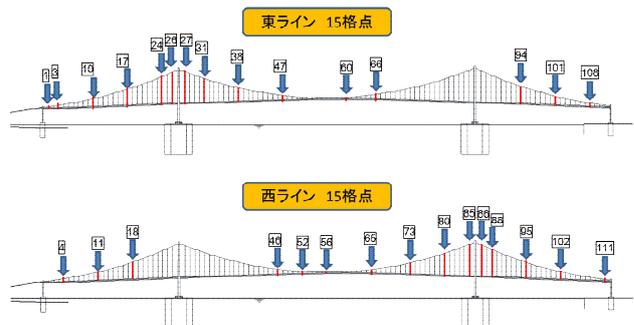


図-4 これまでの経過観察バンド

(3) これまでの管理と課題

本橋の軸力管理履歴を表-2に示す。本橋では2011年に最初の締め直しが行われたが、それまでの間（以下、第1期という）には経時変化計測が6回実施された。現在は第2期に当たるが、第1期同様、現在の管理方法では複数回計測を要しコストがかかりすぎるという課題があった。

そのため計測管理方法の見直しが求められ、①計測対象の位置と数、②予測式の補正方法、③測定頻度を管理コストに影響する項目として見直すこととした。予測式が第1期とは異なることは明らかで、また経時変化計測の回数も少なく、見直すためのデータ数も不足していた。そのため、ケーブルバンド全数の軸力調査を行い、データ数を充実させるとともに、その結果をもとに軸力低下の傾向を把握し、効率的な管理方法の検討を行った。

表-2 ケーブルバンドボルトの軸力管理履歴

	実施年	計測数
第1期	軸力導入(初期値計測)	'99 222
	①経時変化計測	'99 30
	②経時変化計測	'00 30
	③経時変化計測	'01 30
	④経時変化計測	'03 30
	⑤経時変化計測	'09 30
第2期	⑥締め直し直前の計測	'11 222
	締め直し(初期値計測)	'11 222
	①経時変化計測	'11 30
	②経時変化計測	'17, '18 222

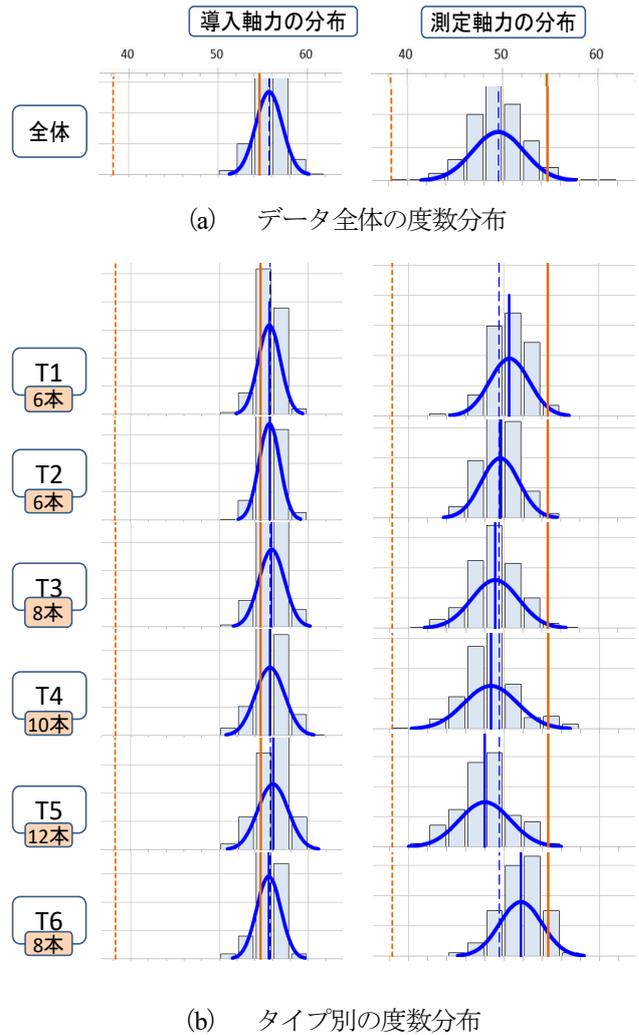


図-5 導入軸力と計測軸力の度数分布
(縦軸：ボルト个数、横軸：ボルト軸力)

4. 本橋における軸力低下の傾向

ボルトの全数調査は、'17、'18年の2カ年にかけて実施した。調査結果の度数分布を図-8に示す。(a)は一般バンド全数の集計した結果であり、(b)はバンドタイプ別に集計した結果である。これらの結果から本橋における軸力低下は以下の傾向を有することが分かるとともに、計測値のバラツキが統計学に用いられる正規分布に近い傾向であることも判明した。

- ①軸力低下に伴うデータのバラツキはボルト数に比例。
- ②T1、2、3、6の低下量は全体平均と同程度、もしくはそれ以下である。
- ③T4、5の低下量は全体平均よりも大きい。

また、第1期の記録も同様に分析した結果、同じ傾向であることが判明したことから、この傾向は本橋のケーブルバンドボルトに特有の傾向といえる。なお、図-5において、青の点線はバンド全体の平均値、実線はタイプ毎の平均、赤の実線は導入軸力の目標値、点線は導入軸力の70%値（設計安全率3.0を確保可能な軸力）を示している。

5. 新たな管理方法の策定に向けて

(1) グループによる管理の効率化

傾向が似ているバンド同士をグループ化することで管理方法は効率化できる。本橋では前述した軸力低下の傾向及び第2期データの回帰分析の結果をもとに、3つのグループ（A、B、C）に整理した。

- A：全体データと同等に推移するバンド群
- B：全体データよりも高めに推移するバンド群
- C：全体データよりも低めに推移するバンド群

(2) グループ毎の軸力低下予測

回帰分析をもとに、データ全体の予測線を基準とし、グループ毎に差分を比較した。その結果、10年目前後（3650日前後）からほぼ一定に推移することが判明した。このことから、各グループの予測式が全体予測式基準に定型化できると考えた。式3に定型化した予測式を示

し、図-6に予測グラフを示す。

$$\begin{aligned} A: & N(A) = -1.8912 \cdot \log(t) + 55.8472 \\ B: & N(B) = N(A) + 1.0 \\ C: & N(C) = N(A) - 2.0 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} A: \\ B: \\ C: \end{aligned}} \right\} \text{式3}$$

ここで N: 軸力 (tf)
t: 経過日数

(3) 計測値のバラツキ

前述したように本橋のケーブルバンドボルト軸力は、統計学で用いられる正規分布で表現できる。そのため図-7に示すように予測式（平均）に対して標準偏差の3倍を考慮することで、ほぼ全ボルトを安全側に評価することが可能になる。

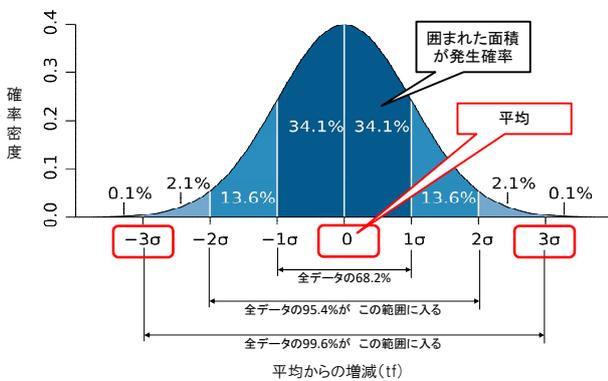


図-7 正規分布の確率密度と標準偏差の関係

6. 新たな管理方法

各グループの予測結果から、以下のことが分かった。

- ・第1期の予測データと比べると、第2期データは全体的に軸力低下が小さく、収束に向かっている。

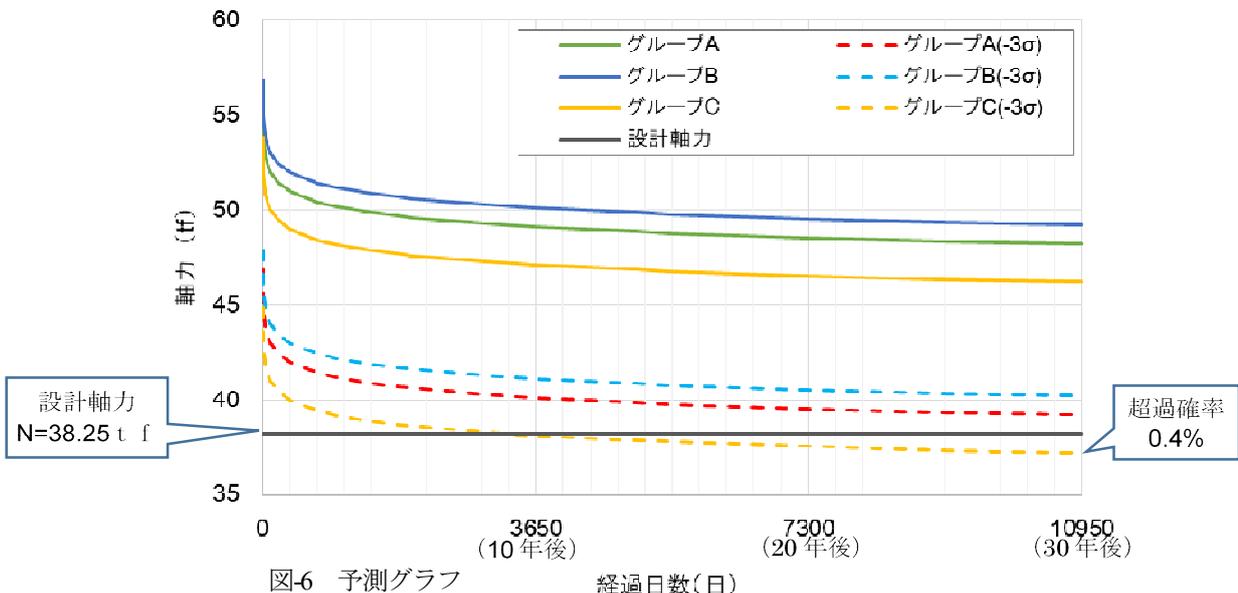


図-6 予測グラフ

バラツキ (-3σ) による低下を考慮しても設計軸力を下回る可能性は低い。

- ・グループCはバラツキを考慮した場合30年後に設計軸力を若干下回る（超過確率：0.4%）が、再締め付けを要するかどうかは現時点では評価できない。
- ・上記はあくまでも現時点での予測で、長期的な実現性に関しては引き続き検証を要する。

以上を踏まえ、本橋では今後30年間における管理方法を次のように変更することとした。新たな管理方法により、計測回数と計測バンドを絞り込むことができるため、管理コストの大幅な縮減が可能になる。

- 1) 管理方針
 - ・予測グラフによる管理へ移行。（締め直しのための計測ではなく予測グラフ再評価のための計測）
- 2) 計測対象
 - ・測径間のみでグループ（A、B、C）が網羅できることから測径間で実施。（検査車の設置撤去手間縮減）
- 3) 計測頻度
 - ・計測は10、20、30年目に実施し、予測グラフを再評価。

7. まとめ

本橋におけるボルト軸力低下の特性を明らかにすることで合理的な管理手法を策定できた。また、本手法により1回当たりの計測箇所減、計測頻度減の管理コストの縮減が可能となった。

謝辞：本稿の執筆に際し、室蘭工業大学 岸徳光特任教授、小室雅人教授、境昌宏准教授を始め、白鳥大橋維持管理計画検討会の各委員に多大なるご指導を頂いた。この場を借りて深く謝意を表す。