

I-51

白鳥大橋のケーブルスリップ対策

北海道開発コンサルタント(株) 正員 篠田 孝志
北海道開発局 正員 西本 聡
北海道開発局 正員 西村 浩二
北海道開発局 正員 清見 博英

1. はじめに

白鳥大橋は、室蘭港の湾口部に位置する橋長1,380m(330m+720m+330m)の3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋である。本橋は2P、5Pに側塔を有しており、その形式は側塔頂でケーブル水平力が釣り合う $H_B = H_S$ 形式のフレキシブルタワーを採用している。側塔部でのケーブルは、その出入射角が小さくかつ左右の向きが同じなため、サドルに対するケーブル反力による摩擦抵抗力が小さく、サドル内でケーブルスリップ現象が発生しやすい。また、側塔形式がフレキシブルタワーであるため、側塔基礎、アンカレイジ基礎の変位に対して敏感な構造であり、特にケーブルスリップに対し十分な対策を要する。

本報告は、白鳥大橋での吊橋完成時およびケーブル架設時におけるケーブルスリップ対策について報告するものである。

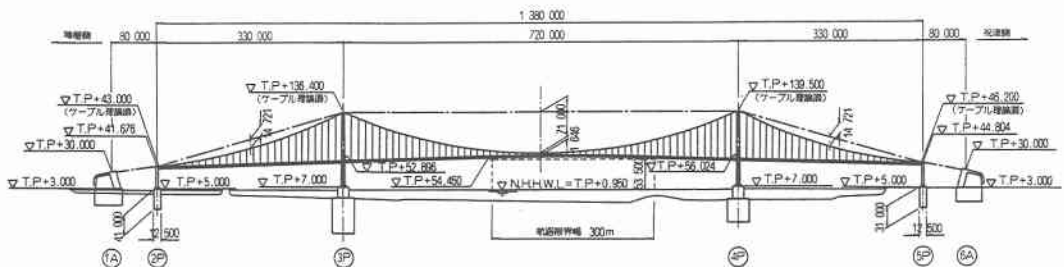


図-1 白鳥大橋側面図

2. 吊橋完成時でのケーブルスリップ対策

2-1 ケーブルスリップ対策の選定

完成時でのケーブルスリップ対策としては色々考えられるが、本橋の場合下記の3案について検討を行った。

- ①加圧方式(サドルキャップ方式)
- ②左右のケーブル張力差を低減する方式(エキストラストランド方式)
- ③摩擦方式(横スパーサー方式)

その結果、下記の理由により本橋でのケーブルスリップ対策は①加圧方式(サドルキャップ方式)と③摩擦方式(横スパーサー方式)の2案の併用を採用した。

- ・エキストラストランド方式を採用した場合、その必要本数は2Pで $n=0.44$ 本、5Pで $n=0.82$ 本となり、仮に一般ストランドと同断面のエキストラストランドを1本用いた場合逆スリップ現象が生じる。
- ・加圧方式(サドルキャップ方式)は、機械的にストランドを押付けるためサドル内の摩擦抵抗力を増加させることが出来る。
- ・摩擦方式(横スパーサー方式)は、サドル内の摩擦抵抗面を増やす事が出来る。

Countermeasures for Cable-slipping of Hakucho Ohashi

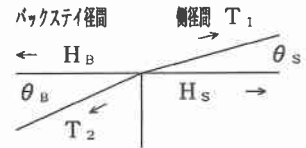
by Takasi Shinoda, Satoshi Nishimoto, Kozi Nishimura and Hirohide Kiyomi

2-2 対策工の具体的検討

2-2-1 加圧方式の検討：サドルキャップの必要締付け力

サドル内のケーブルスリップ安全率は(1)式で求まる。また、これよりケーブルスリップ安全率 ν を確保するための締付け力は(2)式となる。

$$\nu = \frac{\left\{ T_z + \frac{2P}{\alpha} \right\} \left\{ 1 - e^{-\mu\alpha} \right\}}{T_z - T_1} \quad (1)$$



$$P = \frac{\alpha}{2} \left\{ \frac{\nu_a \cdot (T_z - T_1)}{1 - e^{-\mu\alpha}} - T_z \right\} \quad (\text{ただし、} T_z > T_1) \quad (2)$$

図-2 側塔での力学モデル

ν_a : ケーブルスリップ安全率

P : サドルキャップ締付け力

μ : サドル内摩擦係数 ($\mu=0.15$)

α : $\theta_B - \theta_S$ (rad)

完成時でのケーブルスリップ安全率を常時で $\nu=2.0$ 地震時・暴風時で $\nu=1.5$ としたとき、ケーブル張力とサドルキャップの必要締付け力は表-1の通りとなる。

表-1 サドルキャップ必要締付け力

		$\theta_B(^{\circ})$	$\theta_S(^{\circ})$	$T_z(t)$	$T_1(t)$	$P(t)$
2P	常時	9.616236	4.794272	7039	6899	643
	暴風時	9.630963	6.114387	6845	6696	540
	地震時	9.629809	6.160252	6993	6741	1054
5P	常時	11.828232	4.777049	7066	6899	689
	暴風時	11.843340	6.097193	6871	6696	539
	地震時	11.842595	6.142979	7022	6741	1068

*設計締付け力 $P=1,155t$

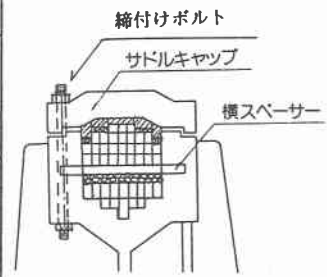


図-3 側塔サドル構造

2-2-2 摩擦方式の検討：横スパーサーの効果

前項の締付け力が万一著しく低下した場合スリップ発生のおそれがあるため、2重の安全対策として横スパーサーを設置する。その際常時の荷重状態において、横スパーサーだけの効果による安全率は $\nu > 1.2$ を確保するよう考えた。

ケーブルスリップ安全率を算定方法するにあたっては下記のように考えた。

- サドル摩擦面での摩擦抵抗力は、全ストランドの鉛直反力が伝達されるものとする。

$$f_1 = \mu (V_1 + V_2) \quad (3)$$

- 横スパーサー摩擦面での摩擦抵抗力は横スパーサー上面とストランドとの摩擦力が抵抗

するものとし、横スパーサー下面は素線フィラーの設置を考慮し摩擦抵抗面としては無視する。

$$f_2 = \mu V_2 \quad (4)$$

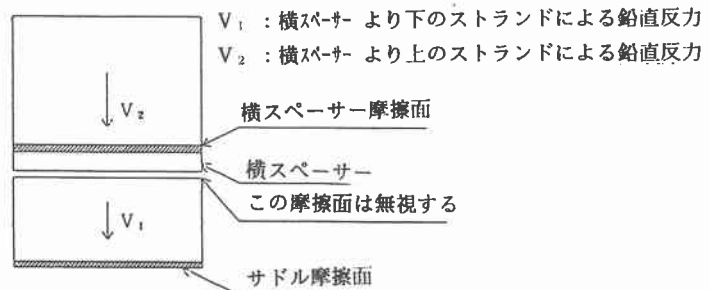


図-4 横スパーサー概念図

よってケーブルスリップ安全率は(5) 式の通りとなる。

$$\nu = \frac{\sum f}{\Delta T} = \frac{\mu (V_1 + 2 V_2)}{\Delta T} \quad (5)$$

以上の方法で安全率を求めると、常時での横スパーサーだけによる安全率は $\nu = 1.32$ となる。

3. ケーブル架設時でのケーブルスリップ対策

3-1 ケーブルスリップ力の発生要因と対策

ストランド架設時におけるケーブルスリップ力の発生要因としては、下記のことが考えられる。

- ①常時及び温度変化時における側塔サドル上でのバックステイ径間と側径間のケーブル張力の差による不平衡力。
- ②温度変化によるストランドとキャットウォーク（以下CWと言う）系の挙動の相対差による張力変化。
- ③地震、風、衝撃、等の動的作用。
- ④架設作業で発生する不平衡力

次に架設時でのケーブルスリップ対策として下記の方法が考えられる。

- a) 架設時での温度変化の影響もふくめ、ストランドの張力差を極力小さくする。
- b) CW系とストランドの挙動を近似させるか、完全に別系統とし、CWの影響を与えない構造とする。
- c) サドル部でストランドを機械的に固定する。

以上の項目についてa) ではサドル構造での対応が可能かどうか、b) についてはCWの定着構造、c) については過去の実績を踏まえ固定方法を選定する、という方法で検討し対策工を決定した。

以下に白鳥大橋で採用した具体的な対策工を示す。

3-2 側塔サドル構造

白鳥大橋の側塔でのサドル構造及び側塔形式は、完成時においてフレキシブルタワーであり、サドルと側塔は固定されている。ストランド架設時でのサドル構造を完成時と同様の固定構造とした場合、温度変化の影響によりスリップ力が発生する。

これは温度変化によるケーブルの変形に側塔が追従しようとし、水平変位を生じ、その復元力としてスリップ力が発生するためである。特にストランド架設初期において温度変化でスリップが生じやすくサゲ調整が困難となる。

よってケーブル架設時のサドル構造を可動構造とし、温度変化による影響を少なくしスリップ力を極

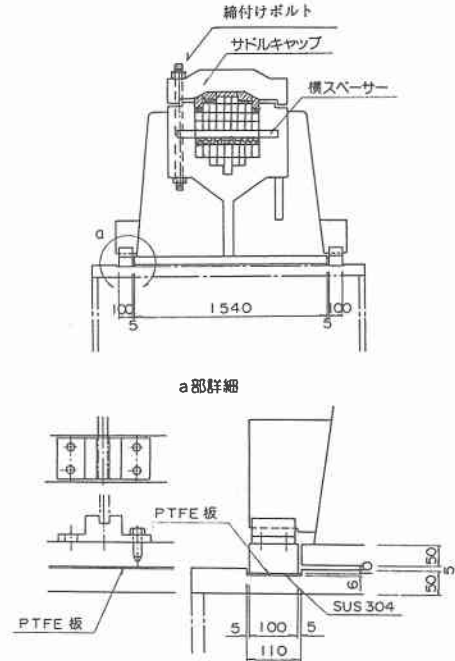


図-5 側塔サドル可動部構造

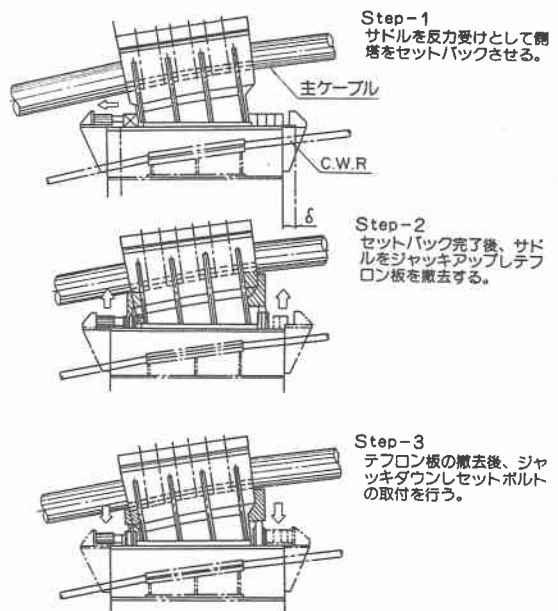


図-6 側塔のセットバック方法

力小さくした。図－5にサドルの可動構造を示す。

また架設時に可動構造とした場合、完成時には固定構造としなければならないため、図－6に示す方法で側塔をセットバックしサドルに固定した。

3-3 キャットウォークロープの定着構造

ストランドとキャットウォークとの挙動の相対差によるスリップ力の発生要因は、仮にストランド架設時にCWと同系とした場合、温度変化、塔頂変位、地震、橋軸方向の風等によってストランドとCWとの間で張力交換が生じ、ストランドにスリップ力が発生する。

よって白鳥大橋ではキャットウォークと主ケーブルを別系統とし、側塔部でのCWの定着構造を可動のサドル構造とした。図－7にそのサドル構造を示す。

3-4 ストランドの機械的固定方法

3-4-1 固定方法の選定

ストランド架設時中のサドルとの機械的固定方法としては下記の3通りが考えられる。

- ①摩擦係数を高めて抵抗力を高める方法。
- ②加圧力を与えて抵抗力を高める方法。
- ③接着力により抵抗力を高める方法。

白鳥大橋では、使用実績のある②と③を採用した。②についてはジャッキによる

押え装置の採用、③については接着剤を採用した。以下に各方法の役割及び作業の基本手順を示す。

各方法の役割

- 接着剤 ；ストランドの仮引き作業等、架設作業により生じる不平衡力
- 押え装置 ；地震、風、等の影響及び接着剤硬化までの温度変化の影響

基本手順

- ①夜間サグ調整時、ケーブル架設初期はストランドスリップの生じにくい位置にサドルを移動させる。
 - ②調整完了後、押え装置によりストランドを固定し接着剤を注入する。
 - ③昼間の温度変化、及び日照によって生ずる側塔の変形でのケーブルスリップ力は押え装置で抵抗させる
- ただし、ストランドの仮引き、サドルへの移設は接着剤が十分硬化したことを確認し行う。

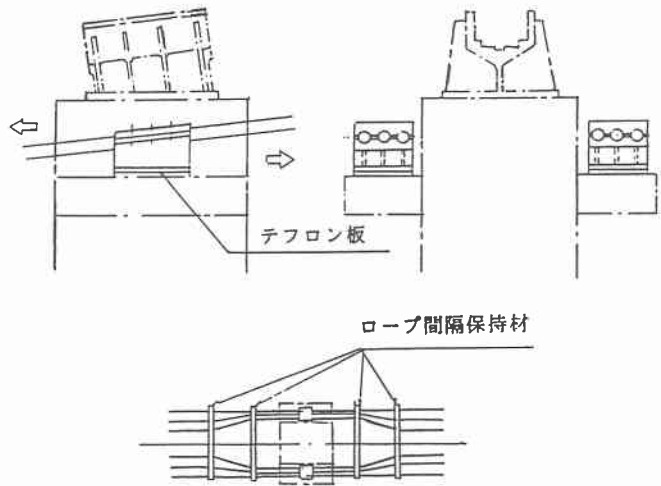
次にストランド架設時中に発生するケーブルスリップ力と、接着剤及び押え装置について述べる。

3-4-2 ストランド架設時中のケーブルスリップ力

架設時中のストランドのスリップ力を算定するにあたっては、下記の項目を考慮する。

- ①基本形状における側径間とバックステイ径間の張力差（常時）
- ②温度変化の影響（基準温度 $t=10^{\circ}\text{C}$ に対し $-5\sim+15^{\circ}\text{C}$ ）
- ③日照の影響による側塔両側面の温度差（ $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ）
- ④地震の影響（ $K_h=0.1$ ）
- ⑤架設作業の影響（ストランド仮引き作業時）

各荷重状態での設計スリップ力は表－2の通りである。



図－7 キャットウォークロープ可動構造

表-2 ケーブル架設時中のスリップ力

荷 重 状 態	ケーブルスリップ力
常時及び温度変化	$\Delta T = 1.64t/PWS$ (No1 ストランド架設時)
日照の影響	$\Delta T = 2.39t/pws$ (No1 ストランド架設時)
地震時	$\Delta T = 1.81t/PWS$ (No1 ストランド架設時)
ストランド仮引き作業時	$\Delta T = 25.8t$ (ストランド架設期間共通)

つぎに架設時中のケーブルスリップの安全率については、本体ケーブルの安全率に対し架設時割増し1.25を考慮し表-3のように考えた。

表-3 ケーブルスリップ安全率

	本体ケーブルの安全率	架設時中の安全率
常時+温度変化	$\nu = 2.0$	$\nu = 2.0/1.25 = 1.6$
地震時	$\nu = 1.5$	$\nu = 1.5/1.25 = 1.2$

3-4-3 接着剤の採用

接着剤の使用目的は3-4-1でも述べたように、ストランド架設作業での仮引き力によって生じるスリップ力に対し、サグ調整を終えたストランドが抵抗するために用いた。

接着剤の採用は大鳴門橋（本四公団）、レインボーブリッジ（首都公団）で実績はあるが、白鳥大橋のように気温の低い所での使用は初めてである。使用にあたっては架設作業時期（5月～7月）の最低気温と考えられる気温5℃での実験を行い、せん断強度を確認した。

図-8に接着剤の実験結果を示す。また、図-9にストランドと接着剤の注入箇所との関係を示す。

接着剤の注入時期はストランドのサグ調整作業が完了した段階で行うが、架設初期のストランド本数の少ない段階では接着面が少なく接着剤の効果が小さいため、仮引力に抵抗出来ない。よって注入開始時期は仮引き力に抵抗出来る接着面が確保出来るストランドの架設本数である5本になった段階で接着剤の注入を開始した。

また、接着剤の養生期間は実験結果をもとにストランド架設本数15本までは24時間、それ以降は6時間以上とした。

接着長さ $L_b = \Delta t / (2(\text{面}) * b * \sigma_B)$ (6)

Δt ; 1ストランド当り設計スリップ力

$$= 25.8t / 5 \text{ 本} = 5.2t$$

b ; 付着高さ (=64.8mm)

σ_B ; 設計付着強度 (=18 kg/cm²)

$$L_b = 5200 / (2 * 6.48 * 18) = 22\text{cm} \rightarrow 30\text{cm}$$

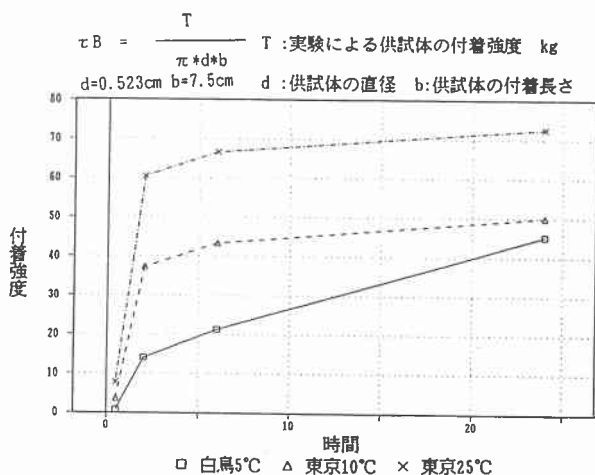


図-8 接着剤のせん断強度試験結果

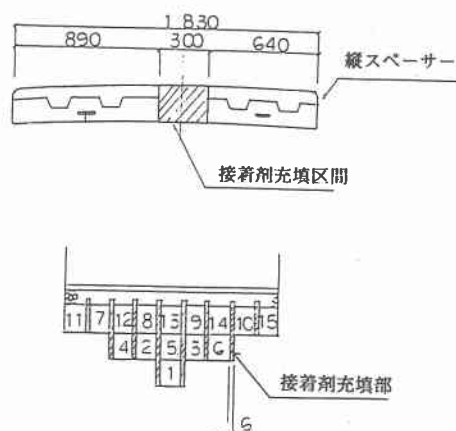


図-9 接着剤注入箇所

3-4-4 ストランド押え装置

ストランド押え装置はジャッキにより加圧し、ストランドの摩擦抵抗力を増しスリップを防ごうとする装置である。押え装置は地震に対する対策の他、ストランドサグ調整後の接着剤の硬化までのスリップ対策としても使用した。

押え装置の構造を図-9に示す。押え装置は1台に13t*7基と8t*4基のジャッキを備えており1列当り最大で8t*2基=16tの押え力を持つ。

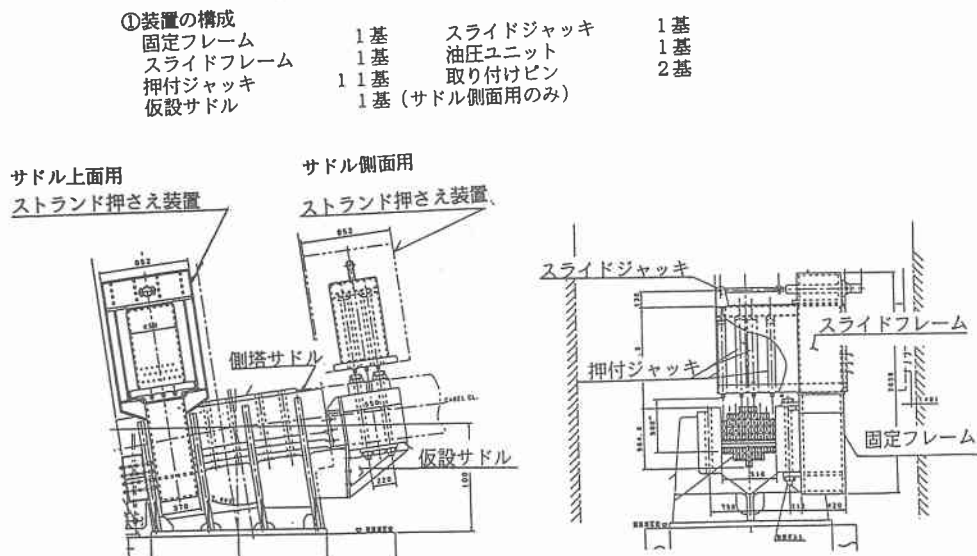


図-10 ストランド押え装置

4. 考 察

本橋の完成時でのケーブルスリップ対策は、加圧方式と摩擦方式の併用による2重の対策をほどこした。これにより加圧方式だけで、所定のケーブルスリップ安全率を確保することとした。また横スパーサーの採用により、仮に加圧方式の効果が低減しても常時では $\nu=1.32$ の安全率が確保出来ることとなった。

ケーブル架設時のスリップ対策は①サドルの可動構造②接着剤の採用及び③押え装置の使用を行った。

接着剤と押え装置については国内にて実績の有る工法であるが、架設時中だけのサドルの可動構造は国内では実績はなく初めての試みであった。工事にあたっては計画の段階と実際の工事において違いが生じ、計画を見直すこともあった。例として可動部の摩擦係数が設計での値より現場では大きな値を示し、サドルの可動に対し予定以上のスリップ力が生じた等が上げられるが、それも3つの工法を組合わせて対応した。

また、架設時中可動のサドルをストランド架設完了後側塔に固定する作業も、ケーブルの水平張力のバランスを保ちながらのサドルのジャッキアップ、ジャッキダウンを行わなければならない、当初安全面での不安もあったが、作業にあたっては十分な対策をほどこし無事サドルを側塔に固定することが出来た。

白鳥大橋のように側塔を有する吊橋、またはレインボーブリッジのように主塔の両サイドでケーブル張力が極端に異なる吊橋ではケーブルスリップの問題を避けて通ることは不可能である。今回の工事においても完成系及び架設時に対し様々な対策工を取り入れた。完成系についての結果は今後の白鳥大橋にてその答を得ることになるが、架設時については当初の計画でどれだけ実際の工事での問題点を掘り起こすかということの重要性を感じさせられた。

最後に本稿を作成するにあり、工事関係者の方々には御協力を頂きお礼を申し上げる次第です。