

吊橋ケーブルバンドすべり安全性の検討

本州四国連絡橋公団 長大橋技術センター 技術開発課 森山 彰

1. はじめに

ケーブルバンド(図-1)は、吊橋において道路面を有する桁構造(補剛桁)を吊るハンガーロープを主ケーブルに固定する部材であり、ケーブルバンドと主ケーブル間に働く摩擦によってその位置を保持している。この摩擦力は、ケーブルバンドを固定するバンドボルトに軸力を導入することにより得られるため、所要のすべり安全性を確保するためには、バンドボルトの軸力管理が必要となる。

バンドボルトには経時的に軸力抜けが生じており、所要の安全性を確保しつつ経済的な管理を行うためには、バンドボルトの再締め付けの必要性の判断や実施時期を適切に設定する必要があり、軸力抜けの進行の調査とともにケーブルバンドのすべりに対する所要の安全性に関する再評価が必要となった。以下に、これまでの検討の概要と今後の検討方針について報告する。

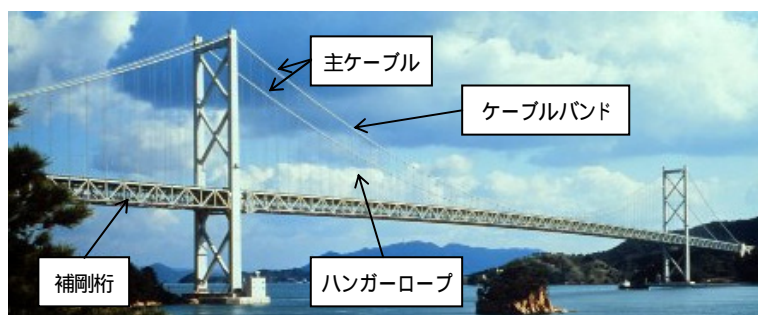


写真 - 1 吊橋の全景(因島大橋)

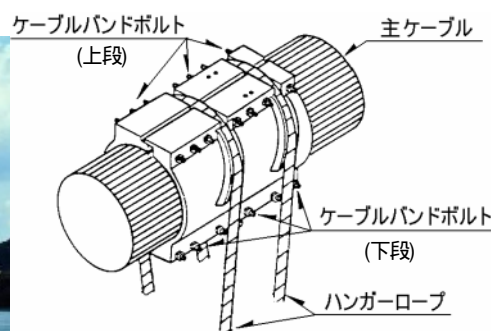


図 - 1 ケーブルバンドの構造概要

2. バンドボルト軸力抜けの実態

設計時におけるバンドボルトの導入軸力は、ケーブルバンド設計要領(案)¹⁾によりボルト締め付け力をボルトの降伏強度の75%として決定している。その際、あらかじめ導入軸力の30%の軸力抜けを想定した上で、すべり安全率3.0を確保できるようにボルト本数や径(断面積)を決定している。管理段階での本州四国連絡橋の因島大橋におけるボルトの軸力抜けの実態を図-2に示す。軸力抜け量は、時間軸を対数とすると経過時間と直線関係にあると考えられていた。しかし、長期に及ぶ実測データを整理した図-2(a)からは軸力抜け量は経過時間と直線関係となっていない。図-2(b)は時間軸を標準とした図であり、ボルト軸力はある値に漸近する傾向にあるが、その値を推定するに十分なデータがないのが実状である。

バンドボルトの降伏応力は 650N/mm^2 (SCr430) ~ 700N/mm^2 (SCM430) 程度であり、図-2を参考に仮にバンドボルトに導入軸力の50% ($250\text{N/mm}^2 = 700 \times 0.75 \times 0.5$) の軸力抜けが生じた場合のボルトのひずみ量を計算すると $=1.3 \times 10^{-3}$ 程度である。これをボルト長さの変化量に換算すると、バンドボルトの締め付け長さ $L=500\text{mm}$ (因島大橋) で $L=0.6\text{mm}$ 、 $L=910\text{mm}$ (明石海峡大橋) で $L=1.1\text{mm}$ と微小な量である(表-1)。

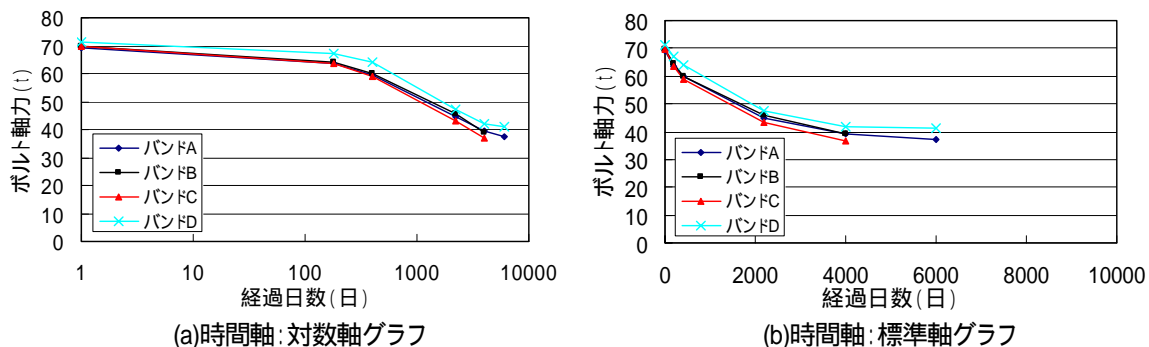


図 - 2 バンドボルトの軸力抜け

表 - 1 ケーブル諸元と軸力抜けのレベル

橋名	鋼線径 (mm)	鋼線本数 (本)	ケーブル径 (mm)	バンドボルト締付け長 L (mm)	ひずみ量	変化量 L (mm)
因島大橋	5.17	11,557	611	500	1.3×10^{-3}	0.6
大鳴門橋	5.37	19,558	826	600		0.8
南備讃瀬戸大橋	5.12	34,417	1,048	740		0.9
明石海峡大橋	5.23	36,830	1,108	910		1.1

バンドボルトに軸力抜けが生じる要因は、ケーブルが亜鉛めっきを施した鋼線の集合体であることを踏まえると、(1)鋼線の亜鉛めっき層のクリープ、(2)締付けボルトのリラクセーション、(3)応力増大によるケーブルの細り、(4)ケーブルバンドの変形、(5)荷重変動などによって生じる鋼線の再配列、(6)ケーブル内のシージングテープの変形、(7)バンドとケーブルの温度差、が想定される。

バンドボルトの軸力抜けは、上記に示すような微少量ではあるが、管理段階で時間の経過とともに確実に生じているという実態を踏まえて、これらの要因を分析・評価すると表-2 となる。各種の要因が複合的に関連して軸力抜けが生じているものと考えられるが、その中でも(1)亜鉛めっき層のクリープの占める比率が大きいと考えられた。

表 - 2 吊橋完成後におけるバンドボルト軸力抜け要因と分析

要因	分析結果	評価
鋼線の亜鉛めっきのクリープ	経時的なケーブル径の変化(再締め付け後の軸力抜け)の要因となり得る	
締付けボルトのリラクセーション	HTB (F10T)でおよそ10%、短時間で収束	
応力増大によるケーブルの細り	活荷重の占める比率は小さい、架設時の主要因	×
ケーブルバンドの変形	ボルト定着間のバンドの塑性変形は小さい	×
荷重変動などによって生じる鋼線の再配列	経時的な変化の要因とは考えにくい	
ケーブル内のシージングテープの変形	全バンドで同様の現象が生じており、局所的な影響とは考えにくい	×
バンドとケーブルとの温度差	仮に温度差が生じても軸力変化の影響は小さい	×

3. 鋼線の亜鉛めっき層のクリープ

亜鉛は鋼に比べ、弾性係数が約半分と柔らかく、再結晶温度(15~50)も著しく低く常温域にあるためクリープ的な挙動が生じやすい材料である。亜鉛めっき鋼線には、規格上300g/m²以上のめっき付着量を要求し²⁾、実績値としては350g/m²程度が確保されている。³⁾めっき付着による鋼線の線径増加量がおおよそ鋼線1本当たり0.1mmであることから、ケーブル径に占めるめっき層の全厚は、鋼線径を5mm程度と仮定するとケーブル径620mm(因島大橋)の場合でt=12mm、1,120mm(明石海峡大橋)の場合でt=22mmに相当する。

バンドボルトの締付力によって生じる側圧による亜鉛めっき鋼線のクリープ現象を調査

する目的で、室内試験を実施した(写真-2)。試験は、鋼線を直列配置してめっき層のクリープ現象を調査するケース(以下、「直列配置」という)とめっき鋼線を幅 50mm(鋼線約 9.6 本に相当) × 高さ約 50mm に鋼線 100 本をランダムに配置して鋼線の集合体としてのクリープ現象を調査するケース(以下、「マス配置」という)を実施した。なお、マス配置では空隙率を実橋ケーブルと同等の 20%程度となるように鋼線を配置した。試験結果を図-3 に示す。マス配置によるクリープ変位量は、直列配置よりかなり大きく、さらにクリープ変位の勾配も大きく、鋼線の集合体としての影響が相対的に大きいことが判明した。

長期のクリープ変位量を図-3 より得られるクリープ変位の勾配から推定すると、時間軸の取り方あるいは対象とするデータの範囲の取り方によって推定値は大きく異なる結果となった。また、直列配置の試験で側圧 (写真-2 では鉛直方向の圧縮力) の大きさを变化させた場合(49 N/mm、24.5N/mm)のクリープ変位量にはほとんど差異が見られなかった(図-3)。これは鋼線相互の接触部に生じる支圧応力が亜鉛の支圧強さを上回っていたことに起因しているものと推察される。

図-3(a)のグラフは、僅かであるが下に凸形状となっており実橋におけるボルト軸力低下の実態(図-2(a))が上に凸であることと対応している。すなわち、実橋におけるバンドボルトの軸力抜けの現象が亜鉛めっきのクリープが要因であると推定できるものであった。しかし、亜鉛めっきのクリープ量あるいは経過時間の影響を定量的に把握するまでには至らなかった。

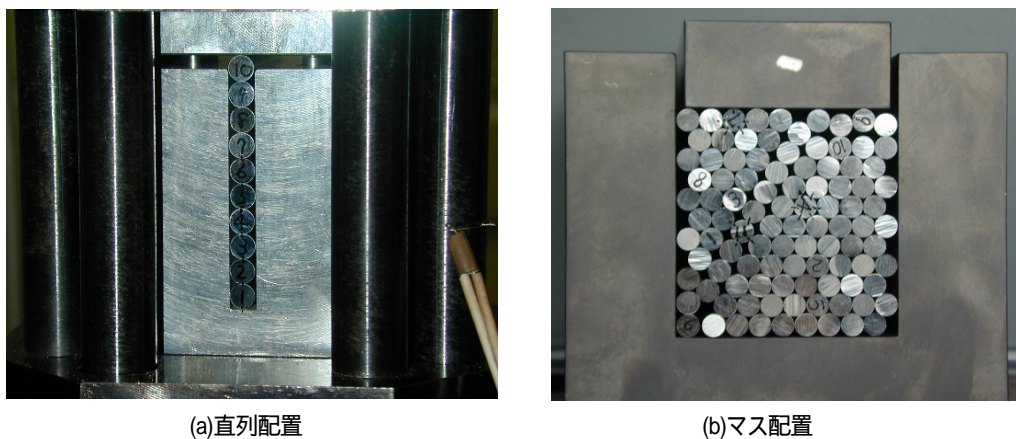


写真 - 2 亜鉛めっき鋼線のクリープ試験

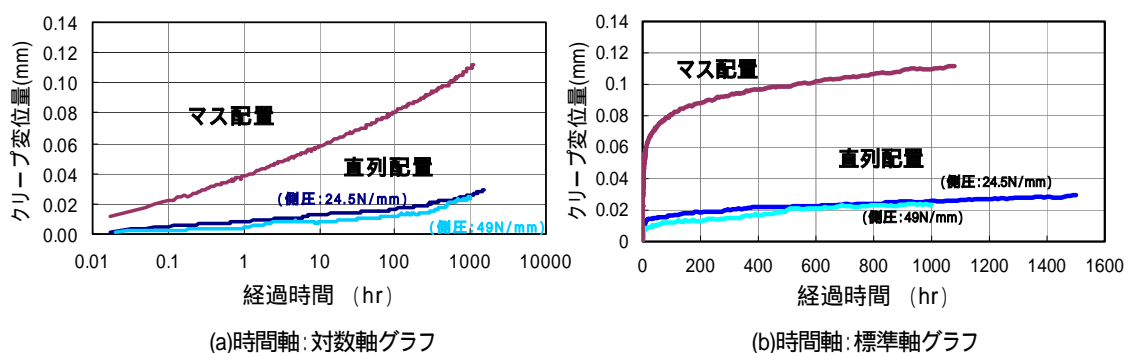


図 - 3 クリープ変位

4. すべり安全性の評価

ケーブルバンドのすべり力は、ハンガーロープ張力とケーブル傾斜角によって決定される(図-4)。すなわち、ケーブルバンドのすべり安全性の評価はハンガーロープの安全性の評価と直接的に関連がある。ハンガーロープについても、管理段階における合理的な安全性の評価が必要であり、シミュレーション解析によりハンガーロープに生じる最大の張力を推定する等の検討により安全性の評価が可能と考えている。さらに、ケーブルバンドがハンガーロープを主ケーブルに固定する部材であることから、これらの部材が保持すべき安全性のバランスを踏まえた評価を行うことが必要となる。

ケーブルバンドのすべり力に影響するもう一つの要因のケーブル傾斜角は、吊橋の幾何形状により決まる。すなわち、ケーブル傾斜角が小さい中央径間の中央付近等では、ケーブルバンドに働くすべり力も小さくなる。ケーブルバンドはすべり力($T \cdot \sin \theta$)がすべり抵抗力($m \cdot \mu \cdot T \cdot \cos \theta$)より小さくすればすべりは生じない。ここで、係数 m はバンドボルトの締付力による効果を反映した係数であり、仮にバンドボルト軸力が 0 と想定される状態の $m=1$ でも摩擦のみですべりに抵抗できるものと考えられる。摩擦係数を $\mu=0.15$ とするときの、すべりが生じない角度(deg)を求めると、

$$T \cdot \sin \theta < m \cdot \mu \cdot T \cdot \cos \theta \quad \theta < \tan^{-1} \mu (=0.15) \quad \dots (1)$$

となり、 $\theta < 8.5 \text{deg}$ であればすべりは生じないこととなる。なお、ハンガーロープはケーブルバンド上を横架して鞍掛けされているため、ハンガー張力によってバンドとケーブルの間に側圧効果(図-5)を見込むことができる。すなわち、バンドの設置位置によりバンドボルトの軸力管理の必要の有無の選別が可能と考えられる。

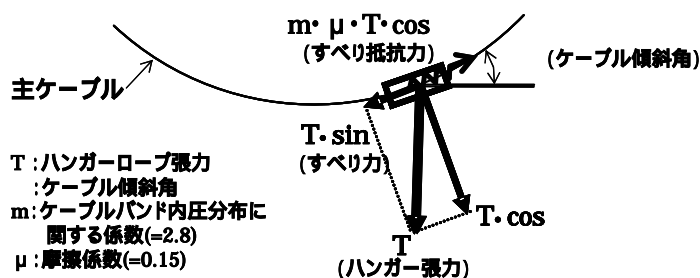


図 - 4 ケーブルバンドのすべり力

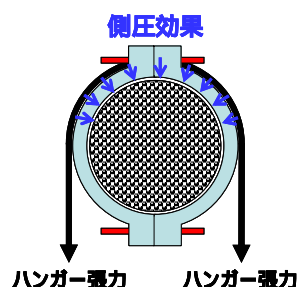


図 - 5 ハンガーロープによる側圧効果

5. おわりに

クリープ試験により、バンドボルトの軸力抜けが鋼線の垂鉛めっきのクリープが主要因であることは確認できた。しかし、軸力抜け量を時間経過に対して定量的に評価するまでのデータは得られなかった。今後、垂鉛めっきのクリープ現象を更に把握するための室内実験等の調査を行うとともに、実橋におけるバンドボルト軸力抜けの実態について、長期に及ぶデータの把握やボルト再締付け後の軸力抜けの傾向の調査を今後も継続的に行う必要がある。また、すべり安全性に関して、橋梁全体系としての安全性や使用性への影響度等の検討を踏まえた評価を行い合理的な管理へ反映したいと考えている。

- 参考文献 1) ケーブルバンド設計要領(案)、昭和 53 年 3 月、本州四国連絡橋公団
 2) 平行線ケーブル用垂鉛めっき鋼線規格 HBS G 3501、昭和 54 年 6 月、本州四国連絡橋公団
 3) 森山彰、ケーブル材料、橋梁と基礎、Vol.32, No.8、1998 年 8 月