

吊橋ピン定着ケーブルバンドの力学特性

Mechanical behavior of a pin-connection type cable band for suspension bridges

大橋治一*、平山純一**

Harukazu OHASHI, Jun'ichi HIRAYAMA

*本州四国連絡橋公団設計部設計第二課 (〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5)

**本州四国連絡橋公団第三建設局建設部 (〒722 広島県尾道市東御所町1-20)

For suspension bridges, application of a pin-connection type cable band makes feasible for using suspender rope as a straight member. It has advantages in simplifying band to cable connection details and in making adaptive of a pararell-wire cable which has higher tensile and fatigue strength than a conventional spiral rope. In order to verify the band/bolt behavior under vertical loading and effect of vertical loading on the slip resistance, a full-scale model experiment was conducted. Also an elasto-plastic finite analysis was made to simulate the experimental result. Obtained results are; 1) bolt's additional tension is approximately 10 to 20% of applied vertical load, 2) rate of additional tension depends on stiffness and initial shape of cable, initial bolt tension, and band stiffness, and 3) slip resistance does not decrease under vertical loading.

Key words; pin-connection type, cable band, additional tension, slip resistance, elasto-plastic finite element analysis, suspension bridge, suspender rope

1. はじめに

吊橋のケーブルバンドは、補剛桁からの荷重をハンガーを介して主ケーブルに伝達する機能を有するケーブル側の構造である。バンドは、ハンガー張力の水平分力による滑りに対して、ボルトの締付けによりバンド内圧を発生させ、摩擦力で抵抗させる構造である。

わが国の長大吊橋では、ハンガーを曲げてバンドに鞍掛けする形式¹⁾が多く採用されており、ハンガーには可撓性の高いより線ロープが用いられている。しかし、ハンガーロープの耐久性向上やその桁側定着構造の簡素化を図るためには、引張強度および疲労強度の高い平行線ケーブルをハンガーとして適用することが考えられる。平行線ケーブルは曲げ部材として使用することが困難であるため、これを直線的に連結できる定着構造に変更する必要がある。すなわち、ハンガーをバンドにピンで連結するピン定着形式バンドの実用化が必要となる。

ピン定着バンドは、欧州では長大吊橋に採用されている事例があるが、わが国で本格的な長大吊橋に適用するためには解明すべき課題が多い。すなわち、鉛直荷重作用時のバンドの挙動および水平荷重作用時の滑り抵抗性を定量的に把握することである。

そこで、実物大のピン定着バンドとケーブル供試体を製作して、ハンガー張力に相当する鉛直荷重および水平荷重を載荷する実験を行った。また、バン

ドとケーブルの接触状況を再現した弾塑性FEM解析を行い、実験結果との対比を行った。これらの結果をもとに、ピン定着バンドを設計する上での基本的な事項を示した。

2. ピン定着ケーブルバンドの基本構造

ピン定着バンドに作用するハンガー張力のなかで支配的な荷重は、補剛桁の死荷重と活荷重である。中央支間長1,000m~2,000mの吊橋では、ハンガー張力に占める活荷重の死荷重に対する比率は概ね15~20%である。ピン定着バンドでは鞍掛けバンドと異なり、バンドおよびボルトの応力・変形挙動はハンガー張力の影響を受けるため、この影響を定量的に把握し、設計に考慮する必要がある。また、活荷重によりボルトには引張応力が繰り返し作用するため、疲労に対して安全性を確認しておく必要がある。

実験の対象とした吊橋は中央支間長1,000m級の流線型箱桁吊橋であり、1バンド当たりのハンガー本数は1本の平行線ケーブルで計画されている(図-1参照)。

バンドの分割方法には、横方向に2分割してボルトで縦締めする形式と、縦方向に2分割してボルトで横締めする形式がある。その使い分けは必ずしも明確ではなく両方の形式が実在するが、適用事例が多く箱桁側の定着構造がシンプルとなること等から、縦締め形式のバンドを実験の対象とした。

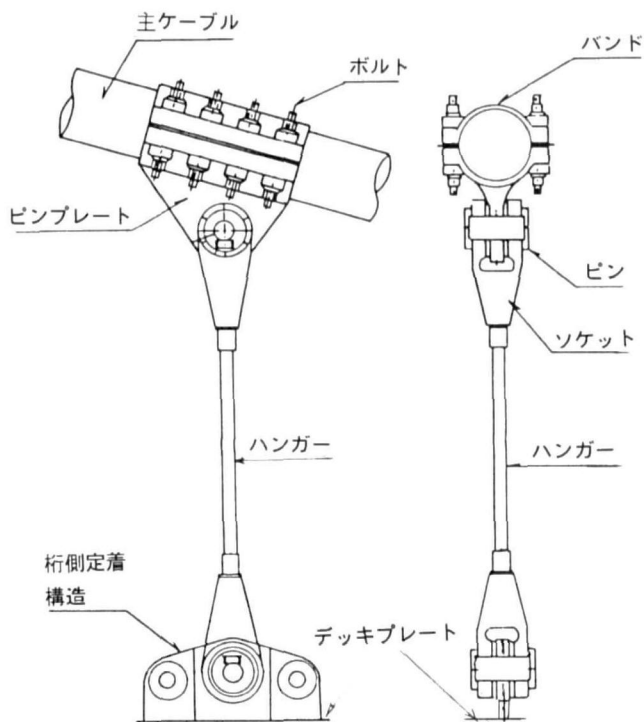


図-1 ハンガーおよびバンドの基本構造

3. 実験

中央支間長1,000m級の流線型箱桁吊橋を対象に、ケーブル許容応力度 72kgf/cm^2 の場合のケーブルに対して設計された直径50cmのピン定着バンドを用いて、以下の5種類の実験を行った。実験では、ハンガー張力の鉛直成分は鉛直荷重として、水平成分は水平荷重として負荷した。

- ①ボルト締付け後のケーブルバネ定数の把握
- ②ボルト締付け時およびハンガー張力作用時のバンド・ボルトに生じる付加応力および付加変形の把握
- ③鉛直荷重作用時のバンドの浮上がり挙動の把握
- ④ボルト締付け時およびハンガー張力作用時の滑り抵抗力の把握
- ⑤鉛直荷重に対するバンド耐荷力の把握

これらの実験を実施するために、ケーブル供試体を水平に支持し、ハンガー張力による鉛直力および水平力を載荷できるフレーム型の試験装置を作製した。ケーブル供試体の端部には、これらの荷重の載荷によって形状が崩れないように固定バンドを取付けた。この状態でケーブル供試体を試験装置にセットした。ケーブル中央部にバンド供試体を設置し、下バンドのピンプレートに装着したセンターホールジャッキによって鉛直荷重を与えた。実橋ではケーブルに張力が作用しているが、本実験ではこれを再現できていない。

滑り試験では、バンド供試体と固定バンドとの間に挿入したジャッキにより水平力を負荷した(写真-1)。

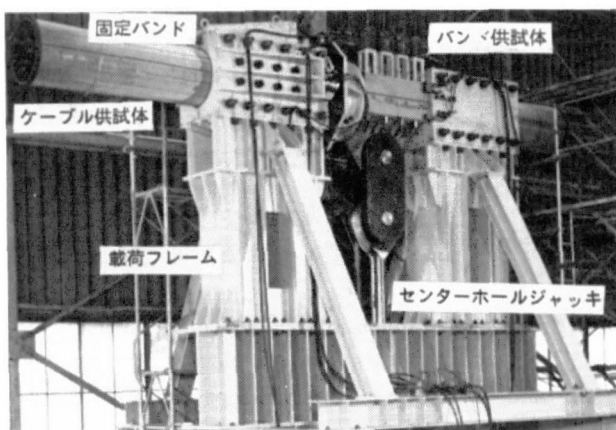


写真-1 バンド実験状況

3. 1 供試体

(1) バンド供試体

実験では、バンドの肉厚および長さ(ボルト本数)の影響を調べるために合計4体の供試体を製作した。バンドの肉厚、長さの設計は、鞍掛けバンド¹⁾として設計した。バンドの設計は肉厚と長さの組み合わせが自由に選定できるため、これまでの実績を包含する範囲として、表-1に示すような寸法とした。

表-1 バンド供試体の主要寸法

供試体	肉厚(mm)	長さ(mm)	ボルト
A	25	400	4@M36
B	40	400	4@M36
C	25	800	8@M36
D	40	800	8@M36

注) バンドの肉厚、長さは設計値である。

バンド供試体の材質としては一般のバンドにも広く用いられているSCW480を、またボルトはSNM439を用いた。ボルトの材質選定にあたっては、通常の設計で必要とされるSCM430材より高強度のものとし、実験中にボルトが破断しないように計画した。また、バンド内面には、実橋のバンドの塗装仕様と同様に一次下地処理後、厚膜型無機ジンクリッチペイント(HBS-K-5603)を $75\mu\text{m}$ 塗布した。バンド材料の機械的性質を表-2に示す。

表-2 バンド材料の機械的性質(規格値)

引張試験			衝撃試験		曲げ試験	
降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %	試験 温度	シャルピー 吸収エネルギー	内側半径 25mm	曲げ角度 90度
≥ 275	≥ 480	≥ 20	0°C	3個の平均値 $\geq 28\text{J}$	外側に亀裂を生じてはならない	

バンドの構造を図-2に示す。下バンド底には、

している。

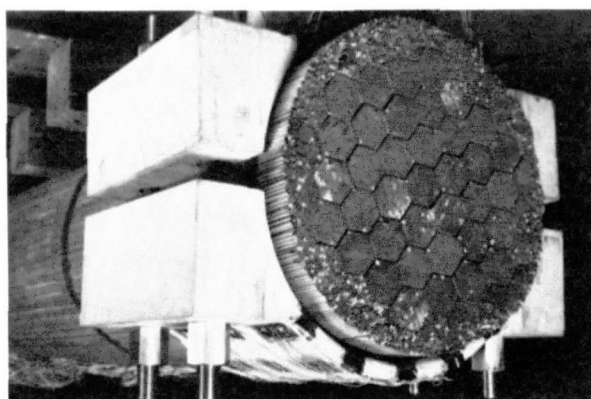


写真-1 ケーブル供試体A (素線のみ)

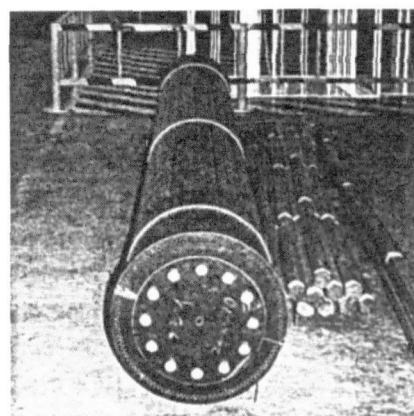


写真-2 ケーブル供試体B (鋼管の外面に素線)

図-2 バンド供試体の構造図

実験ではボルト軸力の締付け後の変化が予想されるので、以下の3種類の状態を設定した。すなわち、締付け時軸力（初期の締付け軸力） N_0 、締付け後の経時変化による軸力抜けを考慮して締付け時軸力の70%の軸力（有効締め付け力） N_e としたもの、および締付け時軸力の50%の軸力を考慮した。

(2) ケーブル供試体

バンドの被締付け体となるケーブル供試体としては、剛性の異なる同一寸法の2種類を準備した(写真-1、2参照)。実橋ケーブルには張力が作用しているが、本実験ではこれは再現できていない。このケーブル張力の影響は、3. 3ケーブルのパネ定数の評価で述べるように、パネ定数の違いとして取り扱うことができるものと考えた。

供試体Aは、 $\phi 5.23\text{mm}$ の亜鉛めつき鋼線（引張強さ 180kgf/mm^2 ）を用いた直径 50cm 、長さ 5m のケーブル供試体であり、127本の素線からなるストランドを多段に積み重ね、その後、円形状にスクイー징整形したものである。ケーブルの総素線数は7,567本であり、充実率の少ないコンパクトな状態で仕上がっている。

供試体Bは、滑り試験および耐荷力試験に用いるために鉛直荷重を載荷によりたわみがでないように、剛性を高めた供試体である。しかし、バンド内面と素線との接触状態を供試体Aと同様の状態にするため、鋼管の外表面には $\phi 5.23\text{mm}$ の素線を1層並べている。素線の端部は滑り試験時に素線が鋼管からずれることのないように、単板にボタンヘッドで固定

3. 2計測項目

実験時の計測項目を表-3に示す。

バンドの計測としては、バンドの外周および端面にひずみゲージを添付した。

ボルトの曲げ応力を計測するために、ボルト4周面にひずみゲージを添付した。また、ボルトの曲げ変形は、軸方向の3箇所の位置で変位計を用いて計測した。

また、鉛直荷重を増加させたときにバンドがケーブルから離反する状況を検知するため、下バンドの底面に幅20mm、深さ15mmの溝を設け、そこに接触型の浮上がりセンサーを設置した(図-2 参照)。

表-3 実験における計測項目

計測項目	計測内容	計測時期
ケーブル空隙率	ケーブル周長の変化量	締付時、ハンガー荷重負荷時
バンド応力	バンド歪み	締付時、ハンガー荷重負荷時
ボルト応力、変形	ボルト歪み、変位	締付時、ハンガー荷重負荷時
浮上がり荷重	ケーブル・バンドの相対変位	ハンガー荷重負荷時
ハンガー荷重	センターホールジャッキ	ハンガー荷重負荷時
滑り荷重	バンド水平変位、ジャッキ	締付時、ハンガー荷重負荷時

3. 3 ケーブルのバネとしての評価

ピン定着バンドでは、バンドの応力・変形挙動はケーブル剛性の影響を受ける。この場合のケーブルの剛性は、ケーブル周方向の単位長さあたりのバネ定数として評価できるものと考えられる。そこで、これを把握するために、ケーブルをスクイージングマシンで周囲から加圧し、その直径の変化量からバネ定数を算定した。ここで、ケーブルのバネ定数は式(1)で定義される。

$$K = P \cdot D / \delta \quad (1)$$

ここに、K：ケーブルの周方向単位長さあたりバネ定数 (kgf/cm²)

P：円周方向の圧力 (kgf/cm²)

D：ケーブルの直径の初期値 (cm)

δ：ケーブル直径の変化量 (cm)

ケーブルを外周から加圧したときのケーブル直径の変化は、締付け時の空隙率として管理されている。通常、ケーブルの空隙率は一般部で22%、バンド部で20%が基準値として設定されており、これらからケーブルバネ定数を求めることも可能である。この結果からバネ定数を求めると10³~10⁴kgf/cm²である。

しかし、ピン定着バンドに必要なケーブルバネ定数は、バンドを締付けた後のバンド部での値である。そこで、図-3に示すように、スクイージングマシンの6本のジャッキによりケーブルを外周から加圧し、加圧力と直径の変化量を測定した(図-3)。

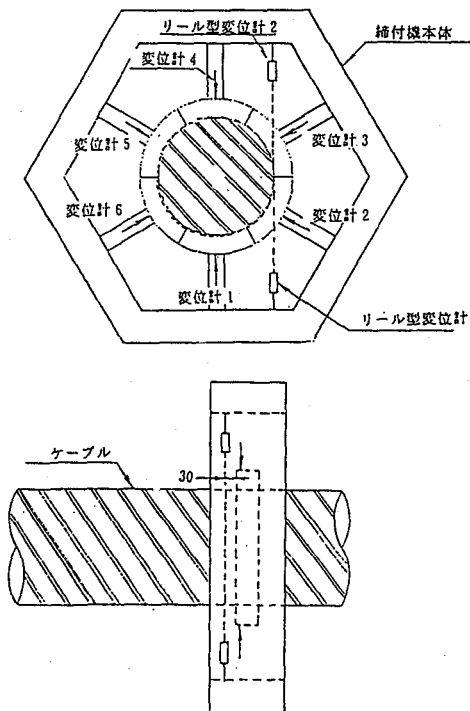


図-3 スクイージングマシンにより加圧したときのケーブル径の変化量の計測

図-4は、ケーブル供試体Aに関して、加圧力と直径の変化量を示したものである。初期の締付け段階では、素線相互の馴染みや素線の再配列が行われるため、加圧力と直径の変化量に強い非線形性がみられ、バネ定数の値は非常に小さい。しかし、十分に締付けられた後はほぼ線形的な挙動を示している。

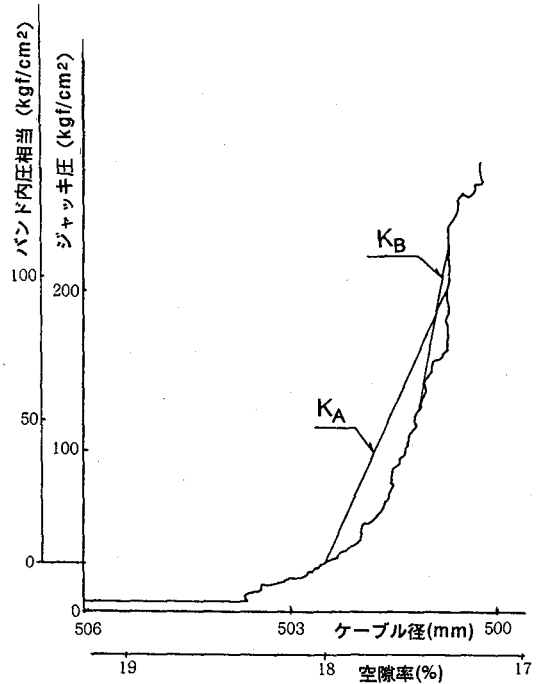


図-4 加圧力とケーブル直径の変化量 (ケーブル供試体A)

表-4は、実橋ケーブル(直径62cm)とケーブル供試体Aについて、ケーブルバネ定数の算定結果を対比したものである。実橋ケーブルでは張力が作用している点でケーブル供試体と異なるが、十分な締付けが行われた状態では両者はほぼ同じレベルであると考えられる。この結果から、ボルト締付け後の周方向単位長さあたりのケーブルバネ定数としては、10⁴~10⁵kgf/cm²が妥当な値であると考えられる。

表-4 ケーブルの周方向単位長さあたりのバネ定数

		バネ定数 (kgf/cm ²)
ケーブル供試体	一次締付けK _A	11,000
	二次締付けK _B	57,100
実橋ケーブル		7,500 - 30,000

3. 4 ボルト締付け時のバンドの挙動

(1) ボルト

ケーブルはバンドの装着が容易となるように楕円形に整形する。そのため、締付けによりボルト台座部が内側に変形する。この現象は実橋の施工でも確認されており、その結果、ボルトに曲げ変形が生じ

る。本実験でも、ボルト中央部で平均3mm程度、内側への曲げ変形が生じた。これは約1°の曲げ角度に相当する変形量である。

(2) バンド

ボルト締付け時には、バンド頂部はフープ応力が卓越する。この箇所は弾性状態にあるが、ボルト台座近傍およびピンプレート近傍の断面急変部は曲げが卓越し、部分的に塑性化している(図-8参照)。

3. 5 鉛直荷重作用時のバンドの挙動

(1) ボルト

ボルトの曲げ変形は、図-5に示すように、鉛直荷重の増加とともに増加する。鉛直荷重の作用によりボルトには付加軸力が作用し鉛直荷重の増加に比例して増加する。この付加軸力の大きさは鉛直荷重の10~20%である(図-6参照)。

鉛直荷重がボルト導入軸力(ボルト軸力の合計値)の約90%に達する付近から付加軸力の増加率は急激に大きくなり、ボルト導入軸力を超えた後ではボルト軸力は作用鉛直荷重と同じ値を示した。

バンドの離反の開始は、浮上がりセンサーの測定結果から、上述の鉛直荷重がボルト初期軸力の約90%に達した時点と判断される。これはボルトの付加軸力が急速に増大する時点と一致している。

同図には、弾塑性FEM解析の結果を併記しているが、4. 解析でも述べるように、解析と実験の結果は非常によくあっている。

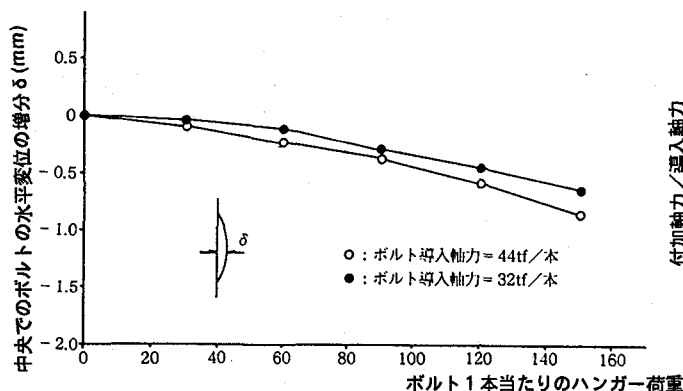


図-5 締付けから鉛直荷重を増加したときのボルトの曲げ変形の変化(バンド供試体 $t=42.3\text{mm}$, $L=400\text{m}$)

これら一連の現象は、引張ボルトの理論²⁾として説明できることが明らかである。すなわち、ハンガー張力によるボルト付加軸力 ΔN は次式によって求めることができる。この式は、ボルト付加軸力は、ケーブルのバネ定数が大きいほど、ボルトおよびバンドのバネ定数が小さいほど、小さいことを示している。

$$\Delta N = P / [1 + K_c (1/K_b + 1/K_t)] \quad (2)$$

ここに、 ΔN : ボルト付加軸力 (tf)
 P : ハンガー張力(鉛直荷重) (tf)
 K_c : ケーブルのバネ定数 (tf/cm)
 K_b : ボルトのバネ定数 (tf/cm)
 K_t : バンドのバネ定数 (tf/cm)

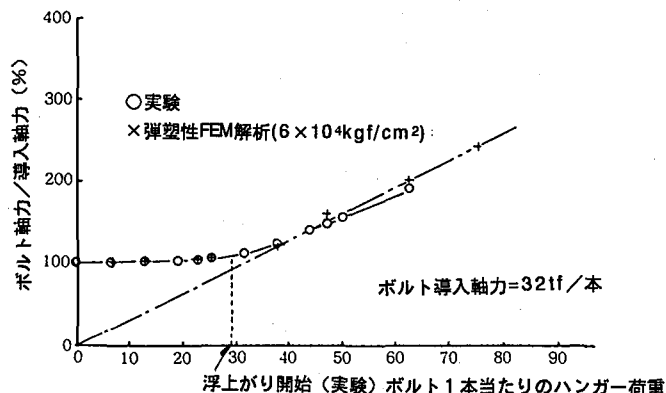


図-6 鉛直荷重によるボルト付加軸力および浮上がり荷重(バンド供試体 $t=27.3\text{mm}$, $L=800\text{m}$)

ボルトの導入軸力と付加軸力との関係を図-7に示す。この図から、ボルト導入軸力を高めるほど付加軸力の増加率は小さくなる。ボルト導入軸力としては、設計ハンガー張力(鉛直荷重)の約2~3倍以上に設定すれば、ボルトに発生する付加軸力の増加率は非常に小さく抑えることができる。ボルト付加軸力の増加率を小さく抑えることは、ボルトの疲労に対する安全性を高める意味からも重要なことである。

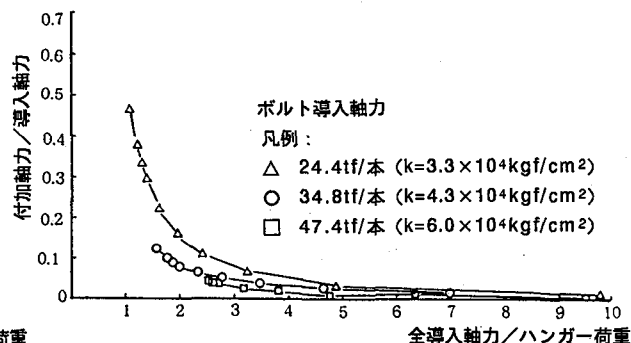


図-7 ボルト導入軸力と鉛直荷重による付加軸力(バンド供試体 $t=27.3\text{mm}$, $L=800\text{m}$)

(2) バンド

図-8に、バンド締付け時、ハンガー張力(鉛直荷重)を設計値と等しく場合、それを設計値の2あるいは3倍とした場合のバンド表面および内面でのひずみ測定結果より求めたバンド肉厚方向の応力分布を示す。なお、図の縦軸はバンド肉厚中心からの距離を示している。鉛直荷重を増加するにつれて、上バンドの全域で応力の増加がみられる。バンド頂部③では、初期の状態では締付けによりフープ応力が卓越するが、鉛直荷重が増加するにつれて曲げの影響の方が強く表れている。

下バンドのボルト台座近傍⑥では、ボルト締付け時には外側が引張応力状態にある。この箇所では鉛直荷重が比較的小さな範囲では鉛直荷重の増加につれて応力が増加するが、鉛直荷重が設計上の鉛直荷重の2倍を超える付近から、逆に外側が圧縮の傾向が表れる。最終の荷重載荷状態では外側が完全に圧縮、内側は引張で降伏領域に達している。

本実験ではセンターホールジャッキの載荷能力の関係から、鉛直荷重は設計荷重の3.3倍までしか載荷できなかったが、この状態でバンドの機能上の問題は生じていない。ただし、ピンプレート近傍では曲げモーメントにより塑性ヒンジが形成されている。

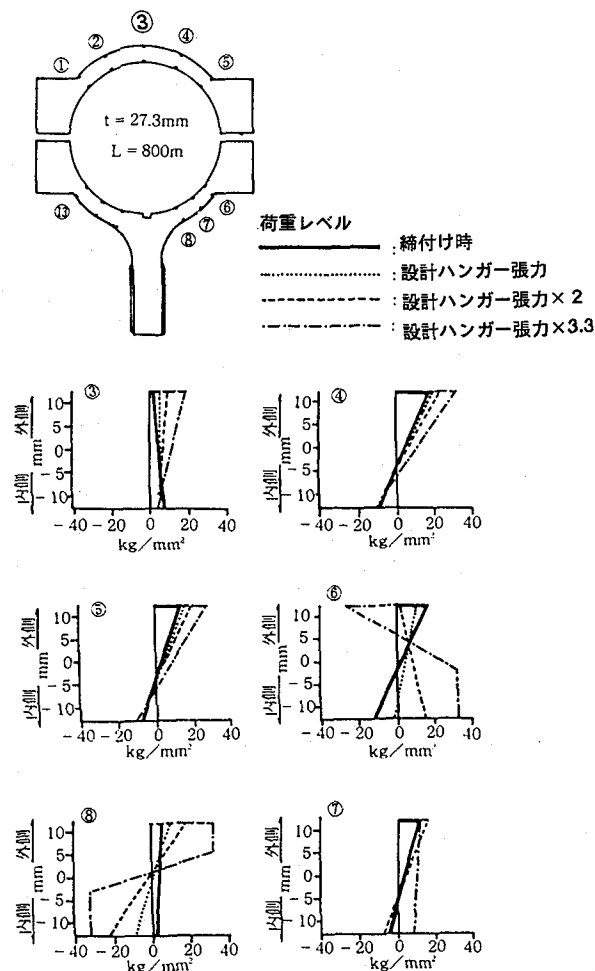


図-8 締付け後、鉛直荷重を作用したときのバンド各部の応力の変化 (バンド供試体 $t=27.3\text{mm}$, $L=800\text{mm}$)

3. 6 水平荷重作用時の滑り抵抗力

バンドとケーブルとの滑り抵抗力に関する実験は、鞍掛けバンドを対象に行われ、バンド設計上のバンドとケーブル間の摩擦係数としては、測定データのばらつきを考慮して、安全側に0.15が用いられている¹⁾。

しかし、ピン定着バンドではハンガー張力の鉛直成分がバンドの内圧分布に変化を与えるため、その滑り性状は鞍掛けバンドとは異なることが予想される。また、鉛直荷重を増加し、バンドがケーブルか

ら部分的に離れる状態 (以降、浮上がりと呼ぶ) での滑り抵抗力についても把握しておく必要がある。

そこで、ハンガー張力の作用による滑り抵抗力への影響を調べるために滑り抵抗力の実験を行った。実験では、鉛直荷重によるたわみの少ないケーブル剛性の高い供試体Bを用いて、センターホールジャッキにより所定の鉛直荷重を持続した状態で、バンド端面からジャッキにより水平荷重を負荷した。このとき、滑りを生じた荷重を滑り抵抗力とした。

滑り抵抗力 F は、一般に、ボルト締付け力 N 、摩擦係数 μ および形状係数 m を用いて式(3)のように表される⁵⁾。内圧分布が等分布である場合には形状係数は理論的に π となる。実際は、内圧分布はボルト締付け時においても等分布ではないし、また、ハンガー張力が作用すると内圧分布は変化することから、形状係数を一意的に定めることができない。そこで、ここでは内圧は等分布するという仮定で実験結果を整理した。

$$F = \mu m N \quad (3)$$

$$m = 2/\mu [1 - \exp(-\mu \pi/2)] \quad (4)$$

ここに、 F : 滑り抵抗力

μ : 摩擦係数

m : 形状係数

N : ボルト締付け力

図-9は、ボルト締付け時の滑り荷重とボルト軸力との関係を示している。摩擦係数はこの回帰曲線の傾きである。なお、回帰曲線は、本来、原点を通るべきであるが、ここでは得られる摩擦係数が安全側の評価となるように、ここでは測定データから最小二乗法によって求めた。この結果によると、摩擦係数は短バンドでは0.16、長バンドでは0.25であり、長いバンドの方が摩擦係数が高い結果となっており、この傾向は鞍掛けバンドでの実験結果¹⁾と一致している。

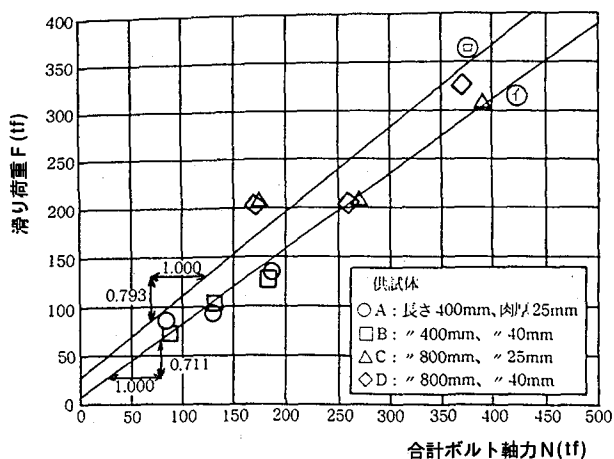


図-9 ボルト締付け時のボルト軸力と滑り荷重

図-10は、鉛直荷重作用時の滑り荷重とボルト軸力との関係を示したものであるが、摩擦係数は短バンドでは0.16、長バンドでは0.23である。なお、本図において横軸のボルト軸力は、導入軸力とハンガー張力の負荷によって生じる付加軸力の合計値を示している。以上のように、ピン定着バンドの摩擦係数としては、鞍掛けバンドの設計に用いられている0.15を十分満足している。

図-11は、鉛直荷重と滑り荷重の関係を整理したものである。ボルト初期軸力が $0.53\sigma_y$ および $0.33\sigma_y$ の実験結果にみられるように、滑り荷重は、バンドが離反を開始する以前には鉛直荷重の増加に伴い低下するが、離反後は増加する傾向がある。

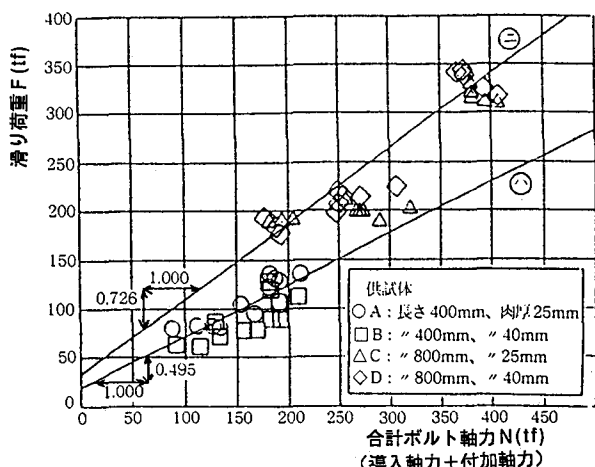
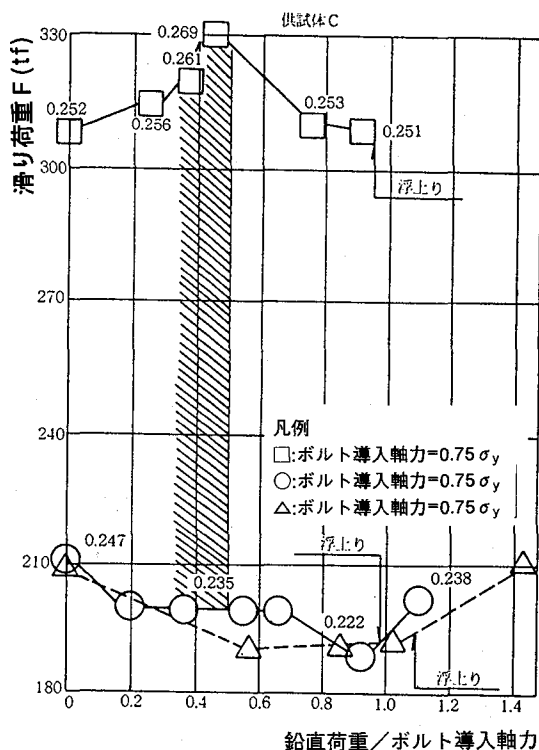


図-10 鉛直荷重作用時のボルト軸力と滑り荷重



注1) 図中の数値は、 $m=\pi$ としたときの摩擦係数である。

注2) 斜線はボルト軸力を設計鉛直荷重の2倍以上の時の範囲。

図-11 鉛直荷重と滑り荷重の関係

4. 解析

実験結果を数値解析的に検証し、また、ケーブルの形状および剛性、バンドの構造要素（肉厚、ボルト導入軸力）の違いによるバンド・ボルトの力学特性を調べるためにFEM解析を行った。

4. 1 解析方法

解析は2次元平面応力問題とし、解析モデルは図-12に示すように形状・荷重の対称性から1/2モデルとした。バンドおよびボルトの応力・変形挙動を追跡するにあたって、バンドの初期状態からボルト締付けによるバンドとケーブルが密着する状態、さらには鉛直荷重の載荷によるバンドとケーブルの離反状況を再現できるようにした。特に、実験の解析ではバンドを完全弾塑性体とし弾塑性解析を行った。

解析ではバンドの寸法形状および物理定数は、バンド供試体の実測値を用いた。ボルトは棒要素でモデル化し、ボルトの曲げ変形を表すことができるように、バンドとボルトの対応する位置に二重節点を設けた。ケーブルは解析上は弾性体として扱った。ここで、FEM解析で必要となるケーブルの弾性係数は、次式に示す厚肉円管が等圧を受けるときの円管の直径と圧力の関係を用いて、ケーブルバネ定数から置換した。なお、ポアソン係数は0.3と仮定した。

$$E = (1 - \nu) \cdot K \quad (5)$$

ここに、E：弾性係数 (kgf/cm²)

ν ：ポアソン係数

K：ケーブルの周方向単位長さ当たりバネ定数 (kgf/cm²)

解析ではケーブルの初期形状として、真円と縦長の楕円形の2種類を対象とした。楕円形は実橋の施工において、バンドのケーブルへの装着を容易にするために縦長に整形することを考慮したものである。また、真円は実橋ケーブルではあり得ないが、真円と比較する意味で解析した。

ケーブル外面とバンド内面間には、締付け前の初期状態として、上バンドと下バンドの合わせ位置で最大5mmの隙間を設けた。また、締付け時のバンドとケーブルの接触状況およびから鉛直荷重負荷による下バンドの離反状況を正確に再現するために、バンドとケーブルの隙間には接触要素を用いた。この接触要素は、二重節点間の距離がゼロとなると、圧縮力を伝達し、引張力は伝達しない特性を有する要素である。ただし、バンドとケーブル間の摩擦は解析では無視した。

解析コードは非線形解析汎用プログラムFINASである。図-12はFEM解析モデルと応力の着目点を示す。

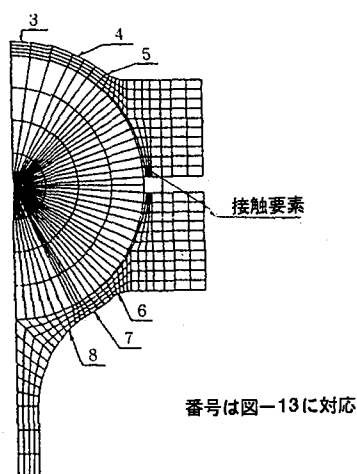


図-12 バンドとケーブルの接触を考慮したFEM解析モデルと応力の着目点

4. 2 解析結果

ボルト軸力と離反荷重（浮上がり荷重）の解析結果を表-5に総括して示す。図-12は、締付け時と設計ハンガー張力（鉛直成分）の4倍まで鉛直荷重を増加した時のバンド各部の応力の解析結果を示す。ボルトの曲げ変形については、ボルト締付け時およびハンガー張力作用時のいずれにおいても、実験と同様に、内側に曲げ変形をおこし、鉛直荷重の増大により変形が増えている。

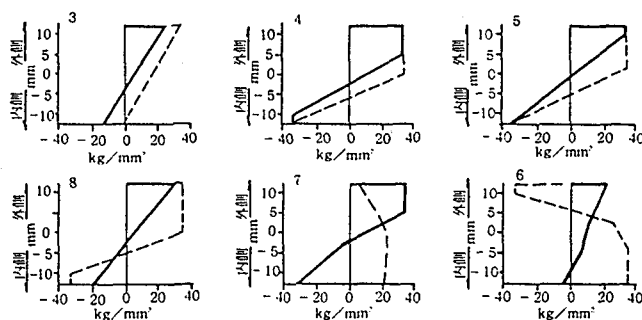
表-5 ボルト付加軸力のFEM解析結果

解析法	バンド厚 (mm)	ケーブル	バネ定数 $\times 10^3$ (kg/cm ²)	ボルト 導入軸力 (tf)	浮上がり 荷重(tf)	負荷軸力/作用力	
						浮上がり前	浮上がり後
弾性	28	楕円	60	40	28	0.168	1.02
				32	22	0.164	1.05
		真円	600	32	25	0.109	1.04
				60	44	0.171	1.00
	43	楕円	60	32	30	0.176	1.03
				32	25	0.177	1.04
弾塑性	28	楕円	60	32	23	0.152	1.11
	43			32	23	0.149	1.07

ハンガー張力作用時のボルト付加軸力の大きさは、ケーブルのバネ定数、ボルト導入軸力、ケーブル形状の違いによって影響を受ける。ケーブルのバネ定数が大きいほど、ボルト導入軸力が高いほど、ケーブルの形状が真円の方が、ボルトの付加軸力は小さい。ボルト付加軸力は、最大でも20%を超えていない。これらの解析で、図-6に示したように、鉛直荷重を負荷したときのボルト付加軸力および浮上がり挙動は実験とよく合っている。浮上がり荷重は真円の方が楕円より低い結果となっている。

バンド応力としては、図-13と図-8を対比すれ

ばわかるように、ボルト締付けから最終荷重載荷時におけるバンド各部の応力分布の変化や塑性化の状況に関して、解析は実験と比較的よく整合している。バンド頂部付近は、解析ではバンドとケーブルが常に一体と仮定しているため曲げ応力状態となっているが、実験では締付け時には滑りによりフープ応力に近い状態になっているものと考えられる。



実線：ボルト締付け時、点線：ハンガー鉛直荷重 $\times 4.0$

図-13 バンド応力の弾塑性FEM解析結果

5. まとめ

ピン定着ケーブルバンドに関する実験・解析から以下の結論が得られた。

(1) ボルト締付け時には、ボルトに曲げ変形が生じ、この曲げ変形は鉛直荷重の作用によって増加する。

(2) 鉛直荷重によるボルト付加軸力の大きさは、バンドおよびボルトの剛性、ケーブルのバネ定数およびケーブル形状によって影響を受ける。

(3) 実橋で想定される上記の要因を考慮すると、ボルト付加軸力の大きさは鉛直荷重の10～20%である。

(4) ボルト付加軸力を小さくするためには、ボルト導入軸力を高くするとが有利であり、これを設計ハンガー張力（鉛直成分）の2倍程度以上に設定しておけばよい。

(5) バンドの断面急変部（ボルト台座近傍、ピンプレート近傍）は、ボルトの締付けによって塑性化する。

(6) バンドは、鉛直荷重の増加により応力が増加する箇所と減少する箇所がある。鉛直荷重を設計ハンガー張力の3倍まで負荷すると、ピンプレート近傍は曲げ応力により塑性ヒンジ状態となる。

(7) 鉛直荷重が作用しても、バンドの滑り抵抗に顕著な低下はみられない。

(8) バンドとケーブルの接触状況を考慮した弾塑性FEM解析により、ボルト締付け時および鉛直荷重作用時のバンド・ボルトの応力・変形挙動をよく説明できる。

以上の検討結果から、バンドを設計・施工・維持管理する場合には、次の点に留意する必要がある。

(1) ボルトの曲げ変形を防止するため、球面座金を用いる等を検討する。また、ボルトには活荷重による繰り返し荷重が作用するので、ボルトの曲げ疲労に対して検討する必要がある。

(2) バンド断面急変部の応力集中を低減するため、局部の形状等を改善することが考えられる。

(3) バンドの安全性を維持するためには、供用後のボルト軸力の経年変化を管理し、適切な時期に再締付けを行う必要がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：ケーブルバンド設計要領(案)、1988年3月
- 2) 建築学会：高力ボルト接合設計施工指針
- 3) 多田：ケーブルバンド耐荷力に関する調査研究、本四技報、Vol. 3, No. 7, 1979.1
- 4) 平井敦：鋼橋Ⅲ、技報堂

(1995年9月18日受付)