

# 吊橋の水平摩擦板付きサドルの摩擦機構

## FRICITION MECHANISM OF SADDLE WITH HORIZONTAL FRICITION PLATE IN SUSPENSION BRIDGE

長谷川和夫\*・小島 宏\*\*・佐々木道夫\*\*\*・竹名興英\*\*\*

By Kazuo HASEGAWA, Hiroshi KOJIMA, Michio SASAKI and Koei TAKENA

An experimental investigation on friction behavior of saddle with horizontal friction plate was done using a prototype. On basis of the results, an analysis model was constructed. Friction mechanism of the saddle of a real suspension bridge was analyzed by the model. As the result, the mechanism was made clear. Furthermore, the result was adopted for the design of Tokyo Port Link Bridge. As an example, a reasonable design friction coefficient was established for the bridge.

*Keywords*: suspension bridge, friction, cable, saddle

### 1. ま え が き

首都高速道路12号線の吊橋(仮称・東京港連絡橋)は、既存のどの長大吊橋と比較してもケーブルとサドルの滑動に対する条件が厳しい。この滑動を防止する有効な方法として水平摩擦板(ケーブル中間に挟まれた板)によって摩擦面の数を増加させる方法が考えられる。これの効果について前論文<sup>2)</sup>で明らかにした。すなわち、それぞれの摩擦面の摩擦力が最大になる時期は一般にずれるので、全体の最大摩擦力は各摩擦面の最大摩擦力を重ね合わせた値より小さくなる。しかし、亜鉛溶射した鋼とケーブルの摩擦挙動のように最大摩擦力に達した後の摩擦力の低下が緩慢な場合は、若干控えめな設計摩擦係数を用いることによって重ね合わせが設計上で可能である。しかしこの試験では、1つのストランド(共通の一对のソケットに定着されたワイヤの集合をいう)に摩擦板を挟んだ単純な試験体を用いたので、水平摩擦板付きサドルとケーブルの摩擦機構については十分明らかにすることはできなかった。また、この摩擦機構を研究した論文は

ほとんどない。

本研究は、実際の約10分の1の水平摩擦板付きサドルの試作品を製作し、実橋の状態をできるだけ再現した条件で、常時および地震時を想定した荷重状態に対する摩擦挙動を実験的に明らかにすることによって、解析モデルを構築し、それによって実橋の摩擦機構を解明し、合理的な設計摩擦係数を設定することを目的としている。東京港連絡橋の水平摩擦板付きサドルは、この研究と前研究<sup>1),2)</sup>に基づいて設計された。

### 2. 実 験

#### (1) 試験方法

試験装置の全体を図-1に、試験体の詳細図を図-2と図-3に示す。試験体は実橋の条件とできるだけ同じにした。その主な特徴を下記に示す。

1) 水平摩擦板は、実橋において施工を容易にするために中央で2分割し、それぞれサドルに固定する。

2) ケーブル施工方法について検討した結果、摩擦板下面と下段ケーブルの上面をなじませるための(前論文<sup>2)</sup>の図-1(b)を参照)亜鉛フィラー以外にさらに微調整用の柴ワイヤが必要なことがわかった(同じく前研究<sup>2)</sup>では柴ワイヤの影響は考慮されていない)。この柴ワイヤは直径3mm程度の軟鋼ワイヤを適当な長さに

\* 正会員 首都高速道路公団・第三建設部  
(〒104 中央区八丁堀2-14-4)

\*\* 正会員 工修 首都高速道路公団・第三建設部(同上)

\*\*\* 正会員 工博 新日本技研(〒105 港区芝2-1-23)

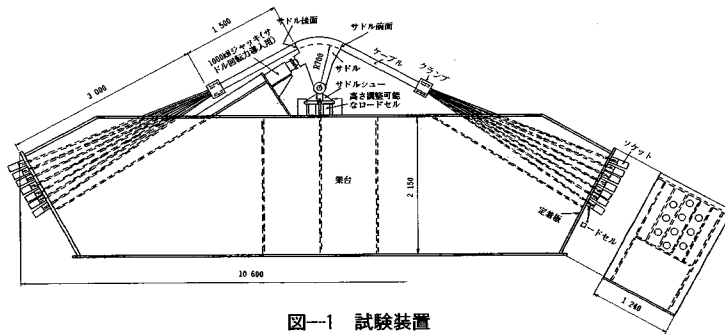


図-1 試験装置

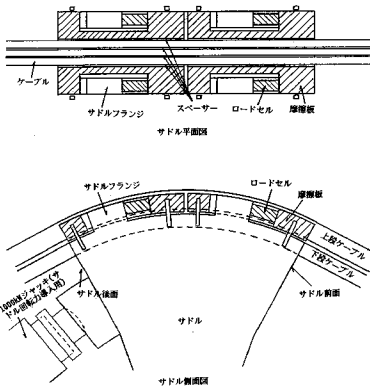


図-2 試験体の形状

切ったもので、下段ケーブルの上面と亜鉛フィラーの間にセットする。

3) ケーブルは複数のストランドで構成する。

4) 長大吊橋では、ケーブルバンドとラッピングワイヤによってケーブルは強く締め付けられている。しかし、端ケーブルバンドとサドル端の通常3mの間は、ケーブル断面形状が円形から徐々に通常六角形に変化するために、締め付けられていない。すなわち、その間はワイヤどうしの摩擦力はほとんど零と考えられる。本橋梁では、摩擦板を用いるのでケーブル断面の変化する距離が長くなること等を考慮して、ケーブル試験体のフリー区間は4.5mとした。

サドル試験体および水平摩擦板（以降摩擦板とよぶ）試験体は、材質はSCW 49で、図-3に示すように設計で摩擦抵抗を期待する面（摩擦板上下面およびサドル底面）は、グリッドでブラストした後に600 gf/m<sup>2</sup>（厚さ約85 μm）の亜鉛を溶射した。この厚さは、ワイヤのめっきの厚さの約2倍である。また、設計で摩擦抵抗を期待しない面（摩擦板の側面、サドルの側面、それらの底面の溝の側面、およびスペーサーの下面が接触する面）は、摩擦抵抗をできるだけ小さくする目的すなわち安全側の実験を行う目的で、機械仕上げし摩擦係数の小さいテフロン板をセットした。実橋では、これらの面も設計で摩

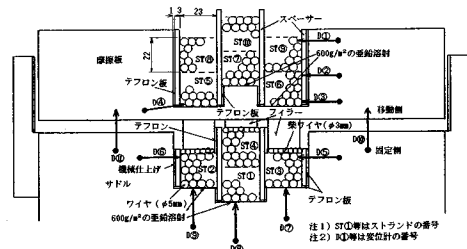


図-3 サドル前面の断面形状と変位計の設置位置

擦抵抗を期待する面と同様に亜鉛を溶射するので、この実験より大きい摩擦抵抗が得られるはずである。ケーブルと接触するサドルの中心角は57°である。サドル底面の半径は実橋の約10分の1の700mmである。摩擦板は、図-2に示すように中央で2分割されており、各摩擦板の側壁はロードセルを介してサドルのフランジに固定されている。

ケーブル試験体は10本のストランドで構成されている。各ストランドは純亜鉛めっきした直径5mmのワイヤ（JIS G 3502に規定されるSWRS 77Bの線材）20本で構成された平行線ストランド（PWS）である。このストランドは、サドル底面でケーブルがなじむように中央部で曲率をつけて製作した。図-3に示すようにサドルには4ストランド（下段ケーブル）を、摩擦板には6ストランド（上段ケーブル）をセットした。

フィラー（図-3）は長さ123mmで、板厚20mmおよび7mmの2種類である。摩擦板と接触する面にはグリッドNo.100（JIS G 5903 鋳造ショットおよびグリッド）を貼り付けた。材質は亜鉛板（JIS H 2107 亜鉛地金1種蒸留地金）である。柴ワイヤは長さ350mmで直径3.2mmの軟鋼ワイヤ（JIS G 3532 亜鉛めっき鉄線3種）である。またスペーサーは1つの摩擦板とほぼ同じ長さで板厚3mmのステンレス板（SUS 304）を用いた。

まず、サドル上に下段の各ストランドを実橋と同じようにスペーサーによってその断面形状が崩れないように順次セットする。このときソケットと架台定着板の間に

各ストランドの張力測定用のロードセルと定着長さ調整用のシムを挟む。次に、柴ワイヤ、ファイラーおよび摩擦板を順次セットする。このとき摩擦板側壁とサドルフランジ間のロードセルはまだセットしない。次に上段の各ストランドを下段と同様な方法でセットする。それからサドル端から1500 mm離れた位置でクランプによってケーブルを束ねる。このクランプの締め付け力によって生じる摩擦力をできるだけ小さくするために、この位置で各ストランドごとにテフロン板を巻いた。次に、サドルシューの下にある1000 kN ジャッキによってケーブル張力が約900 kNになるようにサドル全体をジャッキアップする。この状態では各ストランドの張力がかなりばらつきがあるので、再びジャッキダウンしてシムの厚さを調整すること、およびチェーンブロックによってソケットを引張り、ストランドどうしを相対的にずらすことによってそのばらつきを調整した。各ストランドの張力が平均値に対して約10%以内になるまでこの調整を繰り返した。このときの最終の張力を初期張力とよぶ。実際の吊橋では精度の高いサグ調整が行われるので、各ストランドの張力差はそれよりはるかに小さいと考えられる。この調整のために5時間を要した。それからシューの反力をジャッキから高さが調整できるロードセルにもり変えた。つづいて、摩擦板側壁とサドルフランジ間にロードセルをセットした。このとき4つのロードセルがそれぞれ約1 kNの負荷が生じるように、くさびで固定する。これらのワイヤの接触圧力は、実橋とほぼ同じでサドル底面でワイヤ1本当たり約2 kN/cm、摩擦板で約1 kN/cmである。これらの値はケーブル張力から算出した値である。

次に、左側の1000 kN ジャッキによって、摩擦係数で約0.7に相当する状態まで比較的遅い荷重速度でサドルに回転力（以降ただ回転力とよぶ）を連続的に加えた。この摩擦係数は、本橋梁の地震時の最大荷重状態を摩擦係数に換算した値である0.17（常時は0.11）の約4倍である。それからその回転力で約15時間、ジャッキコントロールシステムによって一定にホールドした。それから地震時を想定して摩擦係数換算で約0.7から0の間で連続的に繰り返し回転力を変動させた。

各ストランドの左右の張力、摩擦板の上下面の摩擦力の合計およびサドルの垂直反力はロードセルによって測定した。サドルの回転変位ADをサドルの回転中心から700 mm離れた位置で1/1000 mm目盛りの変位計によって測定した。個々のワイヤのすべり量を測定するために、図-4に示すように1/1000 mm目盛りのカンチレバー型変位計と治具を製作した。測定位置はサドルが回転していく前面（以降ただ前面とよぶ）である（図-1）。各測定位置を図-3に示す。変位計D①～D④、

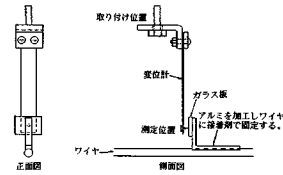


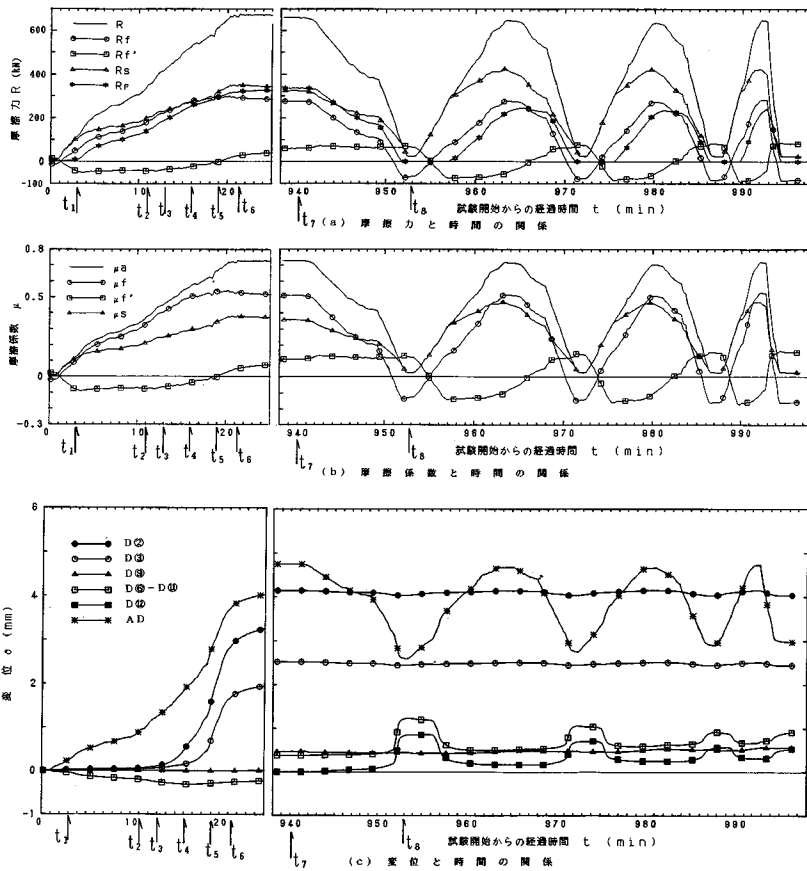
図-4 変位計の設置方法

D⑤～D⑨およびD⑩・D⑪で測定される変位は、それぞれ摩擦板に対する各ワイヤのずれ、サドルに対するワイヤのずれおよびサドルに対する摩擦板のずれを表わしている。D①～D⑨のずれには変位計の取り付け位置と測定位置の間のワイヤ（長さ約30 mm）の伸縮量が含まれているが、その量は小さい（回転力が最大になったときで約10 μm）ので、ほとんどがすべり量と考えられる（ただし、このすべり量にはすべり力の増加に伴ったワイヤのひずみの変化による局部的なすべり<sup>3)</sup>が含まれている）。したがって、D③とD④は摩擦板底面とワイヤのすべり量を、D⑦、D⑧およびD⑨はサドル底面とワイヤのすべり量を表わしている。D①とD②は摩擦板底面のすべり量とワイヤどうしのすべり量の集積した値との合計を、D⑤とD⑥はサドル底面のすべり量とワイヤどうしのすべり量の集積した値との合計を表わしている。摩擦板下面と下段ケーブルの間では、柴ワイヤとケーブルあるいは柴ワイヤとファイラーですべる可能性がある。なぜならば摩擦板とファイラーの間にはグリッドがあるため、ここでは摩擦抵抗が非常に大きいのですべりにくい。摩擦板下面のすべり量はD⑤あるいはD⑥からそれぞれD⑩あるいはD⑪を差し引いた値と考えられる。また、地震時を想定した荷重繰り返し試験で柴ワイヤとストランドST③の最上段のワイヤとの相対すべり量も測定した。これらの測定値の測定間隔は、荷重ホールド中は10分で、それ以外では約10秒である。

(2) 試験結果

結果を図-5に示す。ただし、荷重を一定にホールドした期間のうち中間の大部分は割愛した。図にはわかりやすくするために、摩擦板上面、その下面およびサドル底面に関連する曲線について、それぞれ○、□および△印で示した。

図-5(a)に摩擦力と時間の関係を示す。全体の摩擦力Rは全ケーブルの左右の張力差である。摩擦板上面の摩擦力R<sub>上</sub>は上段ケーブルの左右の張力差である。摩擦板上下面の摩擦力の合計すなわち摩擦板の反力R<sub>F</sub>はロードセルから測定できるので、摩擦板下面の摩擦力R'<sub>下</sub>は(R<sub>F</sub>-R<sub>上</sub>)で求められる。また、サドル底面の摩擦力R<sub>S</sub>は(R-R<sub>F</sub>)で求められる。図-5(b)に摩擦係数と時間の関係を示す。ケーブルがサドル底面とだけ接触する場合、各接触点の摩擦係数が等しいと仮定すると、



図—5 試験結果

その摩擦係数  $\mu$  は次式 (オイラーの式<sup>4)</sup>) で求められる。この値は接触点における摩擦力と垂直力の比を表わすが、摩擦板やサドルの側壁がある場合は、それらの側面の摩擦力を含んだ摩擦力の合計と上記の仮定で計算される底面の垂直力との比である見掛け上の摩擦係数を意味する。

$$\mu = \frac{\ln(T_2/T_1)}{\theta} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $T_1$ 、 $T_2$  はそれぞれサドル前面および後面のケーブル張力で、 $\theta$  はケーブルが巻き付いたサドルの中心角である。全体の摩擦係数  $\mu_a$  は全ケーブルの左右の張力を、摩擦板の上面の摩擦係数  $\mu_f$  は上段ケーブルの左右の張力をそれぞれ上式に代入して求めた。摩擦板の下面の垂直力は上面と同じであるので、その摩擦係数  $\mu'_f$  は次式で求められる。

$$\mu'_f = \mu_f(R_f/R) \dots \dots \dots (2)$$

また、サドル底面の摩擦係数  $\mu_s$  は下式によって求められる。

$$\mu_s = \mu_a(R_s/R) \dots \dots \dots (3)$$

図—5(c) にすべり変位およびサドルの回転変位 AD と

時間の関係を示した。図示したすべり変位は、摩擦板上面のすべり変位 (D③)、摩擦板下面のすべり変位 (D⑥ ~ D⑩)、サドル底面のすべり変位 (D⑨) および摩擦板上面のすべり変位とワイヤどうしのすべり変位の集積した値との合計 (D②) である。摩擦力、摩擦係数およびすべり変位の符号は、回転力に対して抵抗する方向を正とした。

回転力をホールドするまで、すなわち試験開始後約 21.5 分 ( $t_6$ ) までの摩擦挙動を説明する。3 分後 ( $t_1$ ) までは、すべてのすべり変位がほとんど零であることから、すべての摩擦面は凝着した状態と考えられる。摩擦板の反力 (摩擦板上下面の合計摩擦力)  $R_f$  がほとんど零で、その上下面の摩擦力  $R_f$ 、 $R'_f$  は大きさがほとんど同じで方向が逆である。回転力のほとんどがサドル底面の摩擦抵抗  $R$  によって支持されていることがわかる。各面の摩擦係数の大きさはほとんど同じである。 $t_1$  で摩擦板下面では、非常に小さな最大摩擦係数 ( $\mu'_f=0.09$ ) ですべり始めるとともに、摩擦板の反力  $R_f$  が増加していく。すなわち、この面がすべることによって、摩擦板の摩擦抵抗  $R_f$  が生じることがわかる。約 16 分後 ( $t_4$ ) に摩擦

板下面のすべり (D⑥-D⑩) が停止 (すなわち再凝着) して、この面の摩擦力  $R'_f$  が反転しプラス方向に増大していく。このすべりが停止した時間  $t_4$  (図-5(c)) と図-5(a) の摩擦力  $R'_f$  が反転する時間が正確に一致していないのは、クリープ的すべり (すべり荷重を一定にホールドしても、長期的に残存する微小すべり<sup>1)</sup>) や前記のワイヤのひずみの変化による局部的すべり等の影響と推定される。摩擦板上面では、 $t_1$  後に摩擦係数  $\mu_f$  の増加の割合が、全体の摩擦係数  $\mu_a$  のその割合よりやや小さくなる。すべり変位の最初の直線部分は局部的なすべりで、その直線の延長とすべり変位の曲線の差がワイヤの接触面全体におけるすべり量と考えられる。約 11 分後 ( $t_2$ ) に、D②が直線から離れ出した。まだ摩擦板上面 (D③) ではすべり出していないので、このとき上段ケーブル内のワイヤどうしですべり出したと考えられる。したがって、ワイヤどうしの方が摩擦板上面とワイヤの場合よりすべり出しが早い。そのとき摩擦板上面の位置での摩擦係数  $\mu_f$  は約 0.3 である。約 13 分後 ( $t_3$ ) に、摩擦板上面でもすべりが開始し ( $\mu_f$  = 約 0.4)、すべりながら摩擦抵抗が増大している<sup>1)</sup>。約 19 分後 ( $t_5$ ) に摩擦板上面が最大摩擦係数 ( $\mu_f$  = 0.55) に達するとともに、すべり量 D③が急増している。その後わずかに摩擦係数が減少している。この最大摩擦係数 0.55 は、今までのケーブル側面の摩擦のない実験結果<sup>1), 2)</sup> と良い一致を示す。すなわち、側面のテフロン板の摩擦係数が小さいので、 $\mu_f$  に及ぼす側面の摩擦抵抗の影響はかなり小さい。サドル底面では、摩擦板下面がすべり出した後 ( $t_1$ )、全体の摩擦係数  $\mu_a$  に対してその摩擦係数  $\mu_s$  の増加率がかなり小さくなっている。この面では、ホールドを開始 ( $t_6$ ) するまですべり (D⑨) は生じていない。

$t_6$  で摩擦係数が 0.73 に相当する値で回転力を約 920 分間 (試験開始から約 940 分後  $t_7$ ) ホールドした。その間、各摩擦面ではクリープ的なすべりが生じて、摩擦力の再配分が生じている。ホールド開始からの微小すべりの累積は、摩擦板上面 (D③) で 0.85 mm、摩擦板下面 (D⑥-D⑩) で 0.48 mm、サドル底面 (D⑨) で 0.48 mm (D⑧では 0.85 mm) である。

$t_7$  から地震時を想定して回転力を変動させた。回転力を第 1 回目の零に戻したとき ( $t_8$ ) 以降は、繰り返し数や回転力の載荷速度にかかわらず各面の摩擦力と全体の摩擦力の関係あるいは各面の摩擦係数と全体の摩擦係数の関係はほとんど一致する。また、摩擦板下面 (D⑥-D⑩) 以外ではほとんどすべりが生じていない。回転力の最大値におけるサドルの回転変位  $\Delta D$  は、繰り返しによってほとんど変化していない。すなわち、このような回転力の大きな変動にもかかわらず、その繰り返しによってケーブル全体とサドルがほとんどずれないことを

示している。このことと、回転力の増加速度が早い方がケーブルが一体となつてすべるのですべり出しの摩擦係数が高くなること<sup>1)</sup> を考慮すると、地震荷重のような荷重変動が急激な場合でも、常時荷重に比較してケーブルがすべりやすいということはないことを表わしている。このことから、従来の長大吊橋では地震時の安全率は常時と同じ 2 であったが、本橋梁では 1.5 に変更した。

この地震時を想定した試験では、柴ワイヤと下段ケーブル上面のワイヤ間のすべり量 (D⑩) を測定した。このすべり量の変化と摩擦板下面のすべり量 (D⑥-D⑩) の変化とほとんど一致する。すなわち、摩擦板下面のすべりは柴ワイヤと下段ケーブル間ですべっていることがわかる。その最大摩擦係数  $\mu'_f$  は、最初 0.09 だったのがすべりを繰り返すことによって約 0.15 まで上昇している。最大摩擦係数が非常に小さいのは柴ワイヤと下段ケーブルのワイヤが横方向にすべりやすいため、繰り返しによって最大摩擦係数が上昇するのは、柴ワイヤがしだいに安定した状態になるためと推定される。ケーブル工事の経験者と柴ワイヤを用いない施工が可能であるか、検討を重ねたが、現状では施工精度と工期の兼ね合いから用いざるを得ないと判断した。

### 3. 解 析

#### (1) 解析モデルの構築

前記の実験結果に基づいて構築された、ワイヤどうしのすべりを考慮に入れた水平摩擦板付きサドルとケーブルのすべりの解析モデルを図-6 に示す。この図では、繁雑になるためにワイヤを一直線で示してあるが、実際のモデルはサドル位置で  $\theta$  の折れ角がついている。この図で、 $w_1, w_2, \dots, w_m$  は、上段ケーブルのそれぞれの層に含まれるワイヤの集合 (以降、各層のワイヤという) を表わし、 $w_{m+1}, w_{m+2}, \dots, w_n$  は下段ケーブルのそれぞれである。 $l_0$  は、サドル位置からワイヤ固定点までの距離で左右同じとする。 $(T_0)_1, (T_0)_2, \dots$  は、すべり力が加わる前の各層のワイヤの張力 (初期張力) である。 $R$  はケーブルをすべらせようとする力の合計 (以降、すべり力とよぶ) すなわちケーブル左右の張力差である。 $R_1, R_2, \dots$  および  $\mu_1, \mu_2, \dots$  は、それぞれ各層のワイヤの下面の摩擦力および摩擦係数で、 $R'_f$  および  $\mu'_f$  はそれぞれ摩擦板下面の摩擦力および摩擦係数である。 $d_1, d_2, \dots$  および  $d_f$  は、それぞれ各層のワイヤの下面のすべり量および摩擦板下面のすべり量である。 $\delta_1, \delta_2, \dots$  は、すべり力が加わったときに、各層のワイヤの初期状態での接触位置が変位した量である。解析の仮定は下記のとおりである。

1) 摩擦板の側面およびサドルの側面の摩擦は無視する。

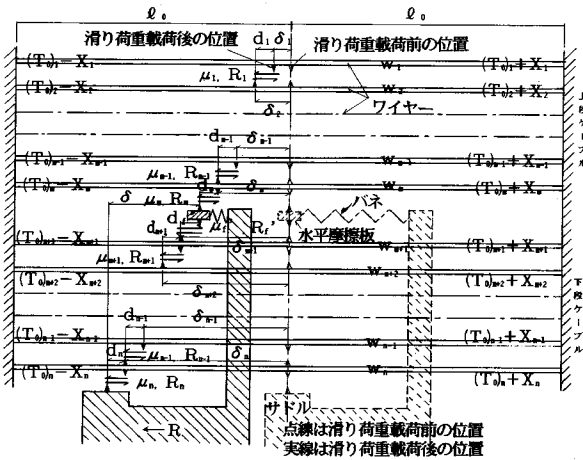


図-6 水平摩擦板付きサドルの解析モデル

2) 初期張力の状態でワイヤが接触している位置は中央のみとして、他の部分はお互いに接触していないとする。すべり力が加わったとき、摩擦力が作用する位置は、初期張力の状態におけるその中央位置とし、すべりによるずれの影響は無視する。このずれは  $l_0$  に比較して非常に小さいので解析結果に及ぼす影響は非常に小さい。したがって、すべり力の加わったときの各層のワイヤのサドル前面の張力の減少量と後面の増加量は等しい。ワイヤ  $w_1, w_2, \dots$  のこの量が、図に示す  $X_1, X_2, \dots$  である。

3) 摩擦板はサドルとばねで連結されている。このばねの係数、ばねの変位量および摩擦板反力を、それぞれ  $K, \delta$  および  $R_F$  とすると、

$$R_F = K\delta \dots \dots \dots (4)$$

となる。

4) 摩擦係数  $\mu$  とすべり量  $d$  の関係は実験結果を参考にして図-7のとおりとする。ワイヤと摩擦板あるいはサドル底面の場合、 $\mu=0.4$  ですべり出し、すべり変位  $d=0.5 \text{ mm}$  を超えると一定の  $\mu=0.55$  (最大摩擦係数) ですべる。ワイヤどうしの場合、 $\mu=0.3$  ですべり出し、 $d=1 \text{ mm}$  を超えると一定の  $\mu=0.55$  (最大摩擦係数) ですべる。柴ワイヤとケーブルの場合、すべり出すときの摩擦係数と最大摩擦係数が同じで、0.09 とする。

このモデルで実験を解析した。解析に用いたケーブル断面は、図-8に示すように上段と下段のケーブルとも矩形断面に置き換えた。そのとき、置き換えたワイヤの数が試験体のワイヤ数と一致しない場合は、合計断面積が一致するようにワイヤの直径を変化させた。摩擦板とサドルを連結するばねの係数  $K$  は、試験結果(図-5)から  $7.33 \times 10^3 \text{ kN/cm}$  とした。また、 $l_0$  は  $450 \text{ cm}$  とした。解析結果を図-9に示す。比較のために実験結果も併記する。摩擦板下面がすべるまで(図-9の①)は、

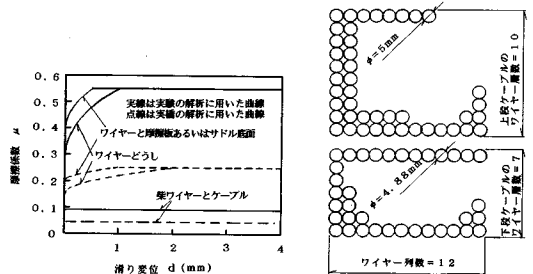
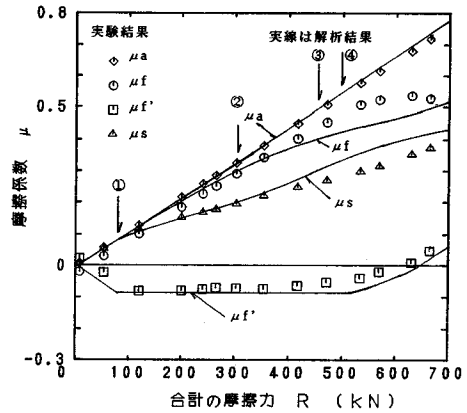
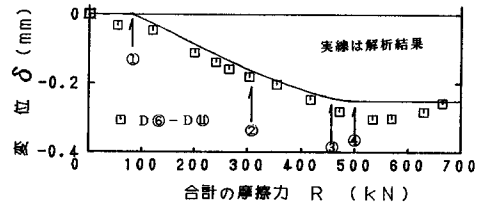


図-7 実験と実橋の解析に用いる摩擦係数 ( $\mu$ ) とすべり量 ( $d$ ) の関係

図-8 解析のためのケーブル試験体のモデル化



(a) 合計の摩擦力と摩擦係数の関係



(b) 合計の摩擦力と変位の関係

図-9 実験結果と解析結果の比較

全体、摩擦板上面およびサドル底面の摩擦係数は等しく、摩擦板下面の摩擦係数はそれらと符号が逆で絶対値が等しい。摩擦板下面の摩擦係数  $\mu'_f$  が  $-0.09$  に達し(図-9の①)その面ですべり始めると、全体の摩擦係数  $\mu_a$  に比べて摩擦板上面とサドル底面の摩擦係数が小さくなる。そして摩擦板上面に比較してサドル底面の摩擦係数の増加率が著しく低下する。このことは実験結果と非常に良い一致を示す。摩擦板上面の摩擦係数  $\mu_f$  が  $0.3$  になる(図-9の②)と上段ケーブル内のワイヤどうしがすべり出し、摩擦板上面の摩擦係数  $\mu_f$  の増加率がやや鈍化するのに対してサドル底面の摩擦係数  $\mu_s$  の増加率はやや増加する。そのとき摩擦板下面のすべり量の増加率はやや減少する。さらに、サドル底面の摩擦係数  $\mu_s$

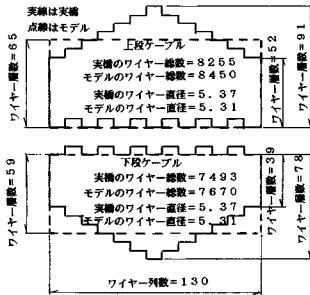


図-10 解析のための実橋ケーブルのモデル化

が0.3に達し(図-9の③)下段ケーブル内のワイヤどうしがすべり出すとそれらの傾向は助長され、やがて摩擦板下面のすべりが停止しその面で再凝着する(図-9の④)。その後、摩擦板下面の摩擦係数 $\mu'_s$ は反転しプラスの方向に向かい、摩擦板上面とサドル底面の摩擦係数をほぼ平行に増加する。全体的に解析結果と実験結果とよい一致を示しているといえる。

(2) 実橋の摩擦板付きサドルの摩擦機構の解析

本橋梁に関して、摩擦板がある場合とない場合のサドルの摩擦機構について前記の解析モデルを用いて解析した。解析のためのケーブル断面は前記と同様な方法で矩形断面に置き換えた(図-10)。ただし、摩擦面の清浄の度合いは実験室の試験体に比べて実橋のものは劣ると考えられるので、図-7に示すようにすべり出しおよび最大の摩擦係数は実験結果の約2分の1に、最大摩擦係数に達するすべり量は2倍とした。すなわち、すべり出しおよび最大の摩擦係数は、ワイヤと摩擦板あるいはサドル底面の場合でそれぞれ0.2および0.25、ワイヤどうしの場合で0.15および0.25である。柴ワイヤとケーブルの場合は、すべり出しと最大の摩擦係数とも0.045とした。また、摩擦板とサドルを連結するばねの係数 $K$ は、単位荷重に対する連結部の変位量を計算することによって求めた。その値は $10^6$  kN/cmである。サドル位置からワイヤ固定位置までの距離 $l_0$ は450 cmとした。図-11に摩擦板のある場合とない場合について解析した結果を示す。これには、全体の摩擦係数に対する各摩擦面の状態を表示するとともに、摩擦板上下面およびサドル底面の摩擦係数と全体の摩擦係数の関係を図示している。図-12に摩擦板がある場合とない場合について、代表的な全体摩擦係数(摩擦板のない場合にはこの値とサドル底面の摩擦係数とは一致する)における各摩擦面の摩擦係数の分布(この図では任意の摩擦面において下側が上側をすべり力の方向に押す場合をプラス方向としたので、摩擦板下面のみ他の図とプラス方向が逆となっている。他の図でそのようにしたのは、すべり力に対する抵抗を問題にしているからである)および断面

摩擦面 (摩擦係数)		摩擦状態 (I...滑りながら摩擦抵抗が増大する状態、II...最大摩擦係数に達し、摩擦抵抗の増大が停止したまま滑る状態、図7参照)			
摩擦無し	ケーブル内のワイヤどうし	凝着	I		
	ケーブル下面とサドル底面 ( $\mu_{os}$ )	凝着	I		
摩擦有り	上段ケーブル内のワイヤどうし	凝着		I	
	上段ケーブル下面と摩擦板上面 ( $\mu_f$ )	凝着		I	II
	柴ワイヤと下段ケーブル上面 ( $\mu_{f'}$ )	凝着	II	凝着	II
	下段ケーブル内のワイヤどうし	凝着		I	
	下段ケーブル下面とサドル底面 ( $\mu_s$ )	凝着		I	

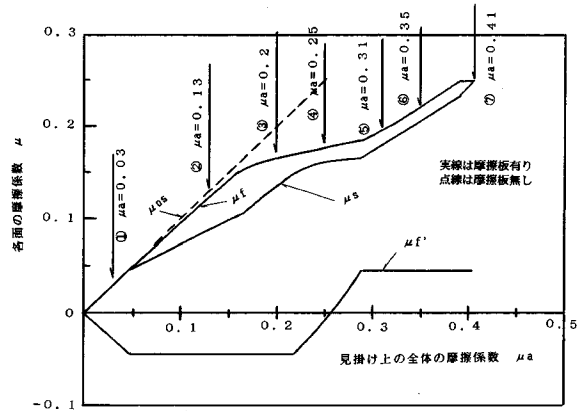


図-11 実橋における見掛け上の全体の摩擦係数と各摩擦面の関係についての解析結果

の平均応力に対する各層ワイヤの応力の分布を示した。この代表的な摩擦係数におけるそれらの分布等に関して下記に説明する。

- ①  $\mu_a=0.03$  (図示されていない) では、すべての摩擦面は凝着しているので、摩擦板の有無にかかわらず、すべての摩擦面の摩擦係数は等しくその値は $\mu_a$ に一致する。
- ②  $\mu_a=0.13$  では、摩擦板がある場合は柴ワイヤですべてになっているので、上段に比較して下段ケーブルの応力が少し高くなっているが、他の摩擦面はどれもすべっていないので上段と下段のケーブル内のそれぞれのワイヤの応力は等しい。また、摩擦板の反力が生じたので、各摩擦面の摩擦係数は全体の摩擦係数より小さくなっている。これに対して摩擦板がない場合は、どの摩擦面でもまだすべっていないので、①のときと傾向は同じである。
- ③  $\mu_a=0.2$  では、摩擦板がない場合はかなりの層のワイヤですべてになっているので、ワイヤの最大応力がかなり高くなっている(平均応力に対して約1.22倍)。これに対して摩擦板がある場合は、柴ワイヤだけでなく上段ケーブル内の下層のワイヤですべり出しているが、摩擦板の効果で、摩擦係数の最大値はさほど大きくなっておらず(約0.17)、最大応力もあまり大きくなっていない(平均応力に対して1.02倍)。
- ④  $\mu_a=0.25$  は、摩擦板のない場合の限界状態(最大摩擦係数)である。最下層のワイヤの応力は平均応力

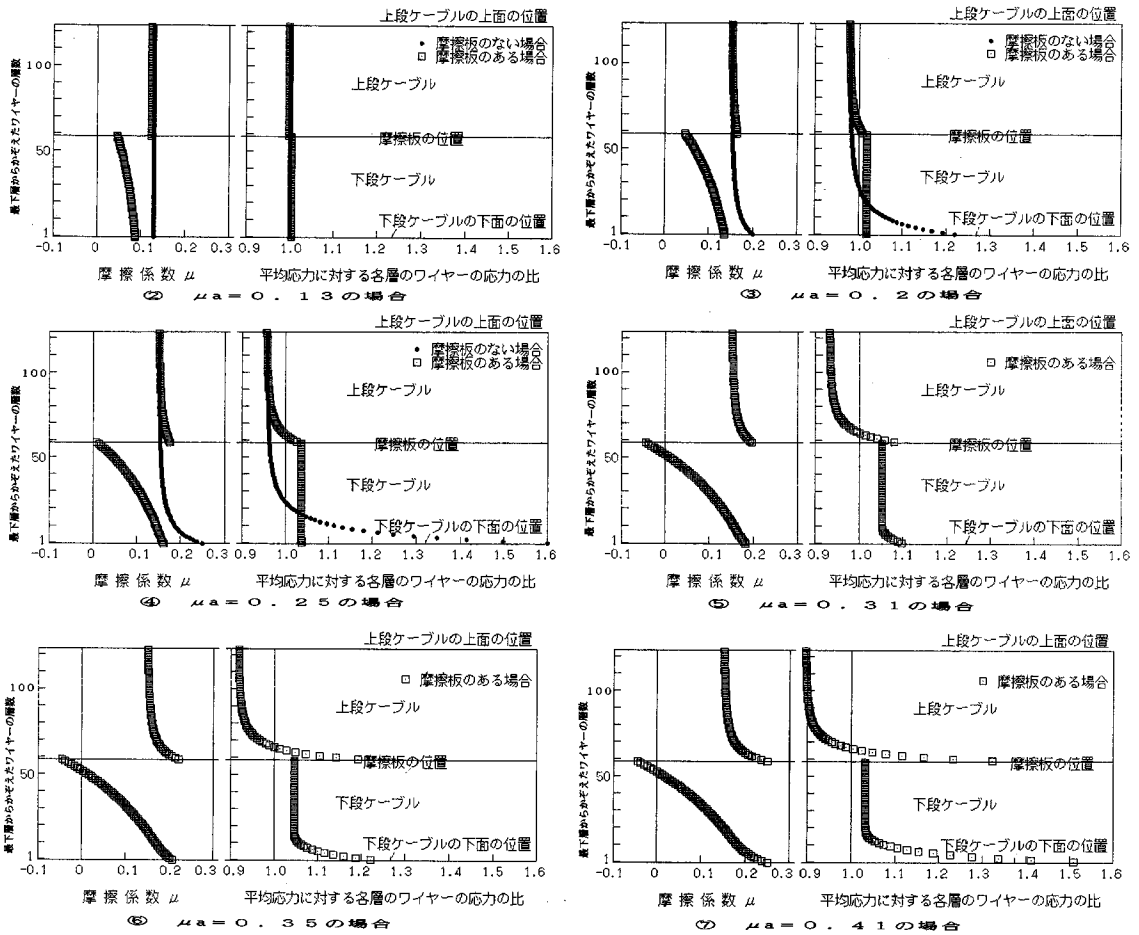


図-12 見掛け上の全体の摩擦係数(μ<sub>a</sub>)を変化させた場合のワイヤ各層の摩擦係数と応力の分布

の約1.6倍にもなっている。摩擦板のある場合は、柴ワイヤの部分で再凝着し、上段ケーブルのワイヤはさらにすべりが進行し、下段ケーブルでは最下層付近でワイヤがすべり始めたところである。摩擦板の効果で、摩擦係数の最大値はまだ約0.18と小さく、平均応力に対する最大応力も1.04程度である。

⑤ μ<sub>a</sub>=0.31は、柴ワイヤで再びすべり始めた状態である。ここで、すべての摩擦抵抗面すなわち摩擦板上下面およびサドル底面の摩擦抵抗の方向が一致したので、すべり力に対して各摩擦抵抗面が有効に抵抗するようになったわけである。このときの最大応力は平均応力に対して約1.1倍である。

⑥ μ<sub>a</sub>=0.35は、⑤とほとんど同じ状態である。最大摩擦係数はまだ平均応力に対して約1.22倍である。

⑦ μ<sub>a</sub>=0.41は、摩擦板のある場合の限界状態、すなわち摩擦板上面およびサドル底面の摩擦係数が0.25になったときの状態である。最大応力は約1.51倍になっている。このように限界状態では、一部のワイヤの応力

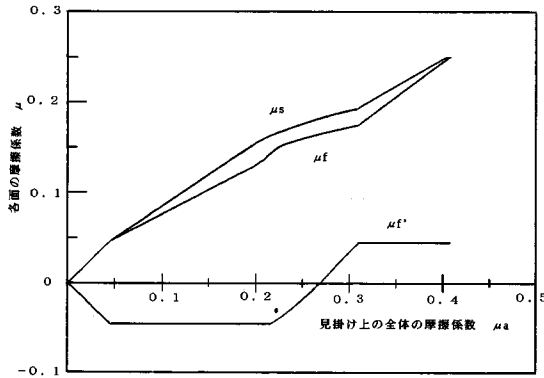
がかなり高くなる。このような状態まで設計で期待することは好ましくないので、平均応力に対して最大応力が約1.1倍となる⑤の状態を本橋梁では設計上の限界状態とした。このときの全体の摩擦係数μ<sub>a</sub>=0.31は、摩擦板上面およびサドル底面の摩擦係数を0.2、摩擦板下面の摩擦係数を0として重ね合わせた値、すなわち下式と良く一致する。そこで、種々の条件について全体の設計摩擦係数を容易に算定できるように、この式を本橋梁の設計摩擦係数の算定式とした。

$$\begin{aligned} \mu_a &= \mu_s + \mu_f \cdot (N_u / N) \\ &= 0.2 + 0.2 \times (65 / 124) = 0.305 \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ここで、N<sub>u</sub>およびNは、それぞれ上段ケーブルのワイヤ数および全ケーブルのワイヤ数である。

摩擦板とサドルを連結するばねの係数Kを前記の場合(10<sup>6</sup> kN/cm)の10分の1(10<sup>5</sup> kN/cm)にした場合について解析した結果を図-13に示す。摩擦板下面ですべり出すと、前記の場合と逆にサドル底面に比べて摩擦板上面の摩擦係数が小さいことがわかる。図-14は、





図一三 ばね係数が小さい場合 ( $K=10^5$  kN/cm) の見掛け上の全体の摩擦係数と各摩擦面の関係についての解析結果

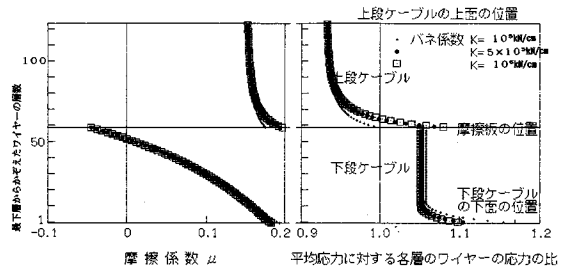
ばね係数  $K$  を  $10^6$  kN/cm,  $5 \times 10^5$  kN/cm および  $10^5$  kN/cm に変えた場合について、設計摩擦係数にはほぼ等しい  $\mu_a=0.31$  の荷重条件で各層ワイヤの応力と摩擦係数の分布を解析した結果である。ばね係数が小さいと、上段のケーブルの摩擦係数の最大値が小さくなり下段のケーブルの摩擦係数の最大値が大きくなるので、ワイヤ応力は上段ケーブルが小さくなり下段ケーブルは大きくなる。その結果、応力の最大値は大きくなる。ばね係数が  $5 \times 10^5$  kN/cm くらいになると、その最大値は平均応力に対して約 1.1 くらいに収束してくる。本橋梁では、それより若干余裕をもたせた  $10^6$  kN/cm を必要ばね係数とした。この値は、サドル端からケーブル固定端までのケーブル自身のばね係数（その間のケーブルを単位長さ変位させるに必要な張力）の約 6 倍である。

#### 4. 結 論

吊橋の水平摩擦板付きサドルの試作品を用いて常時および地震時を想定したすべり試験を行い、さらに実橋のサドルについて解析を行った結果、得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 摩擦板下面では、下段ケーブルとフィラーの間に高さの微調整用の柴ワイヤが必要である。この柴ワイヤとケーブル間の最大摩擦係数は非常に小さく 0.09 であった。この値が小さいのは、柴ワイヤとケーブルのワイヤが相対的に横方向にすべりやすいためと考えられる。

(2) 水平摩擦板付きサドルの摩擦機構は次のとおりである。すべての摩擦面が凝着している間は、サドル底面と摩擦板上面ですべり力に抵抗する方向に摩擦力が生じるが、摩擦板下面では上面と方向が反対で大きさが同じ摩擦力が生じる。したがって摩擦板には反力が生じない。摩擦板下面ですべり始めると摩擦板に反力が生じ、



図一四 全体の摩擦係数  $\mu_a$  が 0.31 で、ばね係数  $K$  を変化させた場合の摩擦係数とワイヤ応力の分布

摩擦板のない場合よりワイヤの最大応力や摩擦係数の最大値が小さくなる。さらにすべり力が大きくなると、ワイヤどうしや摩擦板上面やサドル底面ですべり始め、摩擦板下面のすべり速度が低下していき、やがてすべりが停止し再凝着する。それから摩擦板下面の摩擦力はプラス方向に向かう。ここですべての摩擦抵抗面すなわち摩擦板上下面およびサドル底面の摩擦力が、すべてすべり力に抵抗する方向にそろうことになる。そして摩擦板下面では最初と逆方向にすべり始め、やがてサドル底面あるいは摩擦板上面が逐次最大摩擦係数に達してケーブル全体が滑動する。

(3) ケーブル内のワイヤどうしのすべりは、最初は摩擦板あるいはサドル底面とワイヤの接触面が凝着したまま、上段ケーブルおよび下段ケーブルのそれぞれの下層から順次すべり出す。やがて、摩擦板あるいはサドル底面もすべり始める。このすべりによって下層のワイヤほど応力が高くなる。すべての摩擦抵抗面がそれぞれの最大摩擦係数に達したとき（極限状態）のワイヤの最大応力は、平均応力に対して約 50 % も高くなる。このような状態まで設計で期待するのは好ましくないと考えて、本橋梁では、下式を摩擦板付きサドルの設計摩擦係数  $\mu_a$  の算定式とした。この算定式で求めた値は、極限状態の摩擦係数の約 75 % に等しく、そのときの最大応力は平均に対して約 10 % 大きい。

$$\mu_a = 0.2 \times (1 + N_u / N)$$

ここで、 $N_u$  および  $N$  はそれぞれ上段ケーブルおよび全ケーブルのワイヤ数である。

(4) 本橋梁の地震時の最大荷重状態を摩擦係数に換算すると 0.17 である。試験ではこの摩擦係数の約 4 倍の 0.7 から 0 まで繰り返すすべり力を変動させた。その場合、最大摩擦係数が小さい摩擦板下面の柴ワイヤですべるが、ケーブル全体とサドルの間ではほとんどずれを生じない。この結果とすべり力の増加速度が早い方がケーブルが一体となつてすべるのですべり出しの摩擦係数が大きくなること等を考慮して、地震荷重のような荷重変動が急激な場合でも、常時荷重に比較してケーブル

が特にすべりやすいということはないと考えられるので、従来の長大吊橋では地震時の安全率は常時と同じ2であったが、本橋梁では1.5に変更した。

謝 辞：本試験の実施に際して、フジケンエンジニアリング（株）の秦 耕一氏と東京製綱（株）土浦工場の石井恒男係長の熱心な協力を得ました。新日本製鉄（株）橋梁構造部の堂垣内光弘部長代理と足立重人掛長には、吊橋のケーブル架設の実際について助言をいただきました。フジケンエンジニアリング（株）の佐藤龍三取締役営業部長には、精度の高い変位計やロードセルを製作するために努力していただきました。また、新日本技研（株）の木村文彦氏には解析データのグラフィック

化のために協力してもらいました。厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 長谷川・小島・佐々木・竹名：吊橋のケーブルとサドルの摩擦に関する実験，土木学会論文集，No.404/I-11，1989.4.
- 2) 長谷川・小島・佐々木・竹名：吊橋のサドルの摩擦抵抗向上対策としての水平摩擦板の効果，土木学会論文集，No.404/I-11，1989.4.
- 3) 酒井・森・竹名・小島：吊橋塔頂サドルとケーブルの摩擦と滑り，土木学会第44回年次学術講演会，1989.10.
- 4) たとえば，田中久一郎：摩擦のお話，日本規格協会，1986.（1989.5.27・受付）