

# 吊橋のケーブルとサドルの摩擦に関する実験

## AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FRICTION BETWEEN CABLE AND SADDLE OF 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

When a long suspension bridge which has relatively small ratio of side span length and center span length is designed, friction resistance between cable and saddle becomes an important problem. An experimental investigation was performed by use of equipment which simulated condition of real bridge. As the result, the slipping behavior of cable was made clear. Furthermore, it became clear that maximum friction coefficient came to about 0.33 in the case that contact surface of saddle was as ground-off, but about 0.48 if this saddle surface was galvanized with pure zink.

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

### 1. ま え が き

現在計画されている首都高速道路12号線の吊橋（仮称・東京港連絡橋）は、道路の平面線形と航路幅の関係から、中央径間長に比較して側径間長が非常に短く、その側径間比（側径間長と中央径間長の比）は0.2となっている。吊橋においては、主塔にできるだけ曲げを生じさせないために、中央径間側のケーブルと側径間側のケーブルのそれぞれの張力の水平分力がほぼ等しくなるように設計される。この吊橋のように側径間比の小さい吊橋では、主塔のサドルにおける中央径間側と側径間側のケーブルの傾斜角は側径間の方がかなり大きくなるために、中央径間側のケーブル張力に比べて側径間側のケーブル張力がかかなり大きくなる。その結果、この張力差によってケーブルがサドル上を滑動しようとする。したがって、その滑動を防止することが設計上の重要な問題となる。側径間比の小さい既存の長大吊橋としては、George Washington 橋、Matadi 橋および Humber 橋があり、側径間比はそれぞれ0.17、0.19 および0.2である。

この滑動に対する抵抗力は主に、ケーブルのサドルにおける折れ角によって生じるケーブル自身の押し付け力によるサドル底面と側面の摩擦抵抗である。この押し付け力によって底面と側面に伝達される垂直力の大きさはよくわからないので、設計においてはサドル側面がないと仮定して摩擦抵抗を算定している。さらに抵抗力を増大させる方法としては、締め付けボルトによって垂直力を増加させる方法や側径間側のケーブルの一部を主塔あるいはサドルに定着させる方法（この定着したストランドはエキストラストランドと一般によばれている）などがある。ケーブルをボルトによってサドルに締め付ける方法は、その締め付け力が長期的に減少すること等の問題があり、主塔のサドルにおいてはこれによって増加する摩擦抵抗を本格的に設計に取り入れた例はほとんどない。また、エキストラストランドをサドルに定着できる本数には限度があり、通常2、3本程度である。上記の既存の吊橋ではこのエキストラストランド方式を用いている。東京港連絡橋はこれらの吊橋に比較して、地震時の荷重条件等が厳しいために、滑動に対する条件がさらに厳しく、ケーブルの張力差は地震時で約37 MN（側径間ケーブル張力は215 MN、中央径間は178 MN）、常時で約29 MN（それぞれ238 MN および209 MN）である。

\* 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)

ケーブルとサドルの摩擦係数を、実際の吊橋で測定した例が2橋<sup>1),2)</sup>ある。そのいずれも0.3であった。ケーブル試験体を用いた実験のほとんどは、それをケーブルバンド等で覆い、そのバンドをボルトによって締め付けた状態で、ケーブルとバンドを相対的に移動させることによって摩擦係数を求めている<sup>3)~6)</sup>。これらの摩擦係数の測定結果は、Delaware River 橋に関するもの<sup>3)</sup>が0.194~0.21、関門橋に関するもの<sup>4),5)</sup>が0.16~0.35、および本州四国連絡橋に関するもの<sup>6)</sup>は0.16~0.44であった。これらの試験では、試験条件がほぼ同じであるにもかかわらず、ばらつきが非常に大きい。また、この試験方法では、すべりの生じた時点が明確ではなかったと報告されている<sup>6)</sup>。実際の状態を再現しようとする試みも行われている<sup>7)</sup>。この実験では、ケーブルの上端を固定し、下端に錘をぶら下げ、ケーブルの中央で水平に固定されたサドルとケーブルが接触している。この接触位置は、ケーブル固定点よりややね出しているために、その位置でケーブルは折れ角が生じている。摩擦力の測定方法は、まずケーブルを揺すって摩擦力を切り、その初期張力を測定し、次にジャッキによってケーブルを上の方に引き上げて、そのときの最大張力を測定し、この最大張力と初期張力の差を摩擦力とし、それとサドル底面の垂直力の比を摩擦係数としている。しかし、この実験結果は、摩擦係数が0.15~0.48とばらつきが大きい。これは試験方法に問題があるためと考えられる。すなわち、測定された摩擦力はサドルの底面のものだけでなく側面のもも含まれていること、またこの側面とケーブルとの接触状態が一定しなかったこと、さらにケーブルの折れ角が浅いためにそのような誤差が測定値に大きな影響を及ぼしたこと等のためである。このように、実橋での摩擦係数の測定結果は0.3であるにもかかわらず、実験室での試験結果はばらつきが大きく、信頼性に乏しいために、今までのほとんどの吊橋では、設計摩擦係数として0.15が用いられている。なお、Delaware River 橋の設計摩擦係数は0.2である。

本研究は、実際の橋のケーブルとサドルの状態を再現した試験装置を用いて、サドルの表面処理等を変えてすべり実験を行うことによって、ケーブルのすべり性状を把握し最大摩擦係数を求めるとともに、摩擦係数を増大させる表面処理方法を見出すことを第一の目的としている。また、すべり荷重が加わった状態で、時間とともにどの程度ボルトの締め付け力が減少するかを調べた。これらの実験で、微小であるが長期的なすべりがあることがわかった。常時でも上記したように本橋梁はかなり大きなすべり力が生じているので、この微小なすべりの停止とその最終すべり量を確認することは設計上重要である。したがって、その微小すべりが停止するまですべり

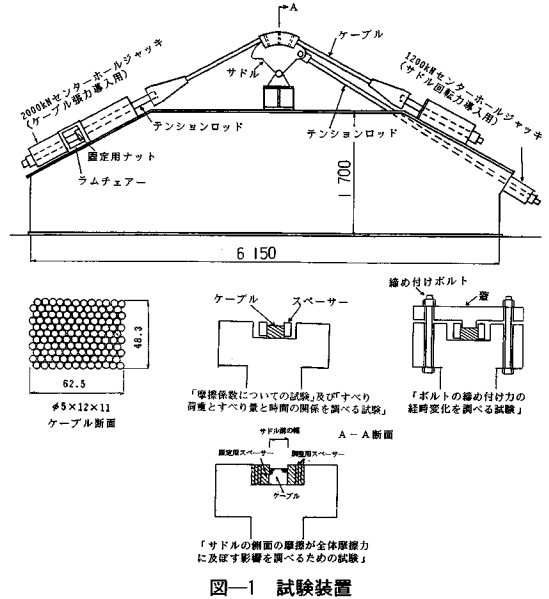


図-1 試験装置

荷重を一定に保持し、停止を確認した後に荷重を増加させる試験を行い、すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べた。さらに、サドルの側面が全体の摩擦抵抗に及ぼす影響についても調べた。

## 2. 試験体と試験方法

### (1) 試験体

試験装置の全体図を図-1に示す。ケーブル試験体は純亜鉛めっき（めっき厚300g/m<sup>2</sup>）をした直径5mmのワイヤー（JIS G 3502に規定するSWRS 77 Bの線材）132本で構成された長方形断面（横12列62.5mm、縦11段48.3mm、単斜方配列）の平行線ストランドである。このケーブル試験体は実橋のケーブルに比べて非常に短いので、サドル底面でケーブルがなじむように中央でサドル底面とほぼ同じ曲率半径をつけて製作した。ケーブル試験体は合計3本で、一体のみワイヤーに防錆処理を行った。しかし、この防錆処理したケーブル試験体は最初に試し試験に使い、この段階で防錆膜が剥離してしまっただけで、摩擦に対するその効果を確認することができなかった。

「予備試験」では、写真-1に示すように、ケーブルをそのままサドル上に載せたが、「摩擦係数についての試験」、「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」および「ボルトの締め付け力の経時変化を調べる試験」では図-1および写真-2に示すように、サドル上でケーブルを初期の断面形状に保持する目的で、サドル底面の長さより長い2つのスペーサーによってケーブルの両側面を挟み、このスペーサーはサドルの外側でチャ

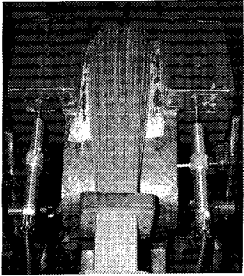


写真-1 「予備試験」のケーブル載荷状態

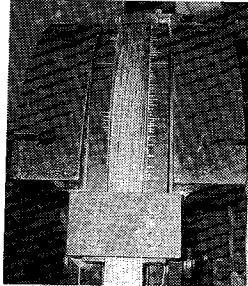


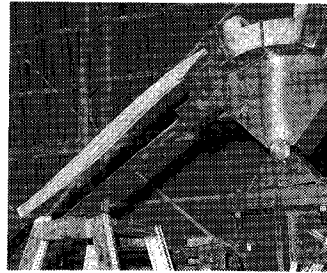
写真-2 「摩擦係数についての試験」および「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」のケーブル載荷状態

ンネルによって上面を固定した。2つのスペーサーとケーブルの幅の合計はサドルの底面幅より小さく、スペーサーの下面はサドルに直接接触しないようになっているので、ケーブルの下面とサドル底面だけが接触するように設計されている。

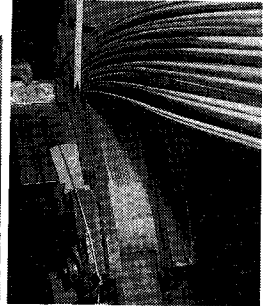
「ボルトの締め付け力の経時変化を調べる試験」では、図-1のように、スペーサーによってケーブル両側面を挟んだ後にボルトによって蓋を締め付けるようになっている。蓋から伝達される締め付け力をケーブルにだけ伝えるために、蓋の下面にケーブル幅よりやや狭い突起がある。これらの試験では、スペーサーとサドルの側壁が接触していないかどうかを目視で確認しながら試験を行った。

「サドル側面の摩擦が全体摩擦力に及ぼす影響を調べるための試験」では、摩擦に及ぼすワイヤーのさびや汚れの影響についても調べることを目的とした。上記の試験後約1年間屋内に放置したケーブル試験体を用いた。図-1と写真-3 (b) に示すように、まず固定および調整用スペーサーをサドルにセットすることによってサドル溝の幅を確定させた後にケーブルをセットした。サドル溝の幅と全体摩擦力の関係を調べるために、調整用スペーサーの枚数を変化させることによってサドル溝の幅を変化させた。固定用スペーサーは写真-3 (b) に示すようにガセットによってサドルと一体となって動くように設計されている。実橋の状態を再現するために次のような工夫を行った。実橋ではケーブル全体をサドルにセットするまでケーブル全体の形状を保持するための部品はセットされない。このケーブル試験体ではソケットの口元以外は、形状保持のためのクランプは使用せず、ワイヤーどうしをフリーの状態にした(写真-3 (a))。

サドル試験体は、材質はSCW 49で、接触面積の影響を調べる目的で、半径500 mmおよび750 mmの2組



(a)



(b)

写真-3 「サドルの側面の摩擦が全体摩擦力に及ぼす影響を調べるための試験」の方法

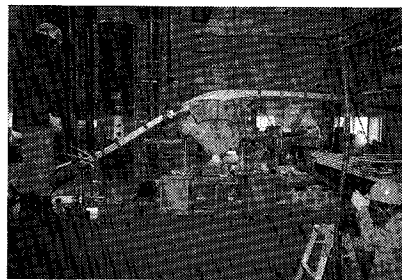


写真-4 新しい試験シリーズを開始する前にケーブルを初期状態に戻す作業

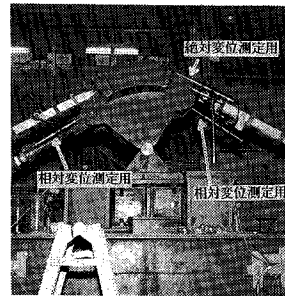


写真-5 絶対変位と相対変位の測定方法

製作した。ケーブルと接触するサドルの中心角は、2組とも本橋梁とほぼ同じ $57^\circ$ である。「摩擦係数についての試験」ではこの2組のサドルを用いたが、他の試験では半径500 mmのものを用いた。

## (2) 試験方法

ケーブルを(1)で述べた状態にサドル上にセットした後、図-1に示すように左側の2000 kN センターホールジャッキでテンションロッドを引き込むことによってケーブルに張力を導入し、この張力が保持されるようにラムチェア位置のナットでテンションロッドを固定する(この張力を初期張力とよぶ)。ただし、「ボルトの締め付け力の経時変化を調べる試験」の場合は、その初期張力導入後に蓋を6本のボルトでそれらの軸力が

ほぼ等しくなるようにモニターしながら締め付ける。それから、すべりが生じるまで、右側の1200 kN センターホールジャッキによってテンションロッドを引き込むことによって徐々にサドルに回転力を加える（以降すべり試験とよぶ）。ただし、「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」では、ジャッキコントロールシステムによってジャッキの荷重を一定にした状態（誤差±10 kN）で、サドルの微小なすべり量の時間的変化を観測した。なお、「予備試験」を除き新しい試験シリーズに入る場合（試験条件が少しでも変わった場合）は、まず写真-4に示すように片側のソケットをテンションロッドからいったんはずし、クレーンによってケーブルを2点吊りしケーブル中央付近のワイヤー間の摩擦を切り、再びセット（初期状態とよぶ）してから試験を開始した。

ケーブルの左右の張力は、テンションロッドに張り付けたそれぞれ4枚のひずみゲージによって測定した。サドルに加える回転力および締め付けボルトの軸力は、それぞれテンションロッドおよびボルトに張り付けた4枚のひずみゲージによって測定した。ケーブルとサドルのすべりを観測するために、写真-5に示すように架台に固定した1/1000 mmの変位計でサドル底面から24 mm 回転中心に対して離れた位置のサドルの回転変位（半径500 mm および750 mm のサドルに対して、それぞれの回転中心から524 mm および774 mm の位置、以降絶対変位とよぶ）を測定した。この変位には、すべりによるケーブルとサドルのずれ以外に、回転力によって生じた左右のケーブルの伸びの違いによるサドルの回転変位も含まれている。この回転変位の影響を除くために、「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」では、絶対変位とともに、写真-5に示すようにケーブルに固定した変位計によって相対的なサドルの回転変位（相対

変位とよぶ）の測定も追加した。この測定箇所は、サドルの引き込み側とその反対側の2か所である。この試験では、半径500 mm のサドルの変位測定位置は、回転中心から400 mm 離れた位置である。また、主要な測定値はディスプレイでモニターしながら実験を行った。

### 3. 試験結果

#### (1) 予備試験

まず、ケーブルとサドルの摩擦について定性的な性状を把握し、本試験の方法を決定するための資料を得るために予備試験を行った。摩擦面に無機系シンクリッチプライマを塗布した半径500 mm のサドルと防錆処理したケーブル試験体を用いてすべり試験を十数回行った後に、予備試験を開始した。

本橋梁のケーブルのワイヤーとサドル底面の最大接触圧はワイヤー1本当たり約2 kN/cm である。この試験装置では、同じ接触圧となる初期張力は約1200 kN である。摩擦力に及ばず接触圧の影響を調べるために、初期張力  $T_0$  を100 kN, 200 kN, 400 kN, 600 kN, 800 kN および1000 kN ですべり試験を行った。サドルに与える回転力（以降、すべり荷重とよぶ）は原則として比較的低い一定速度で増加させた。1回のすべり試験の終了ごとに、ケーブル張力とすべり荷重を零に戻してから、ケーブルをサドルに載せたままサドルを元の位置に戻して次のすべり試験を行った。すべり荷重と絶対変位量の関係を図-2に示す。いずれの荷重-変位曲線も、最初は直線的に変化する部分、次に変位がやや大きくなり直線より離れる部分、および最後に荷重がほとんど増加せず変位が大きくなる部分に分けることができる。最初の直線は前記したようにすべり荷重によって生じた左右のケーブルの弾性的伸びの違いによる変位と考えられるので、ワイヤーとサドル底面がまだ付着している状態と

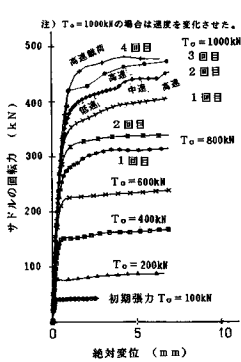


図-2 ケーブル初期張力を変化させた場合のすべり荷重と変位の関係

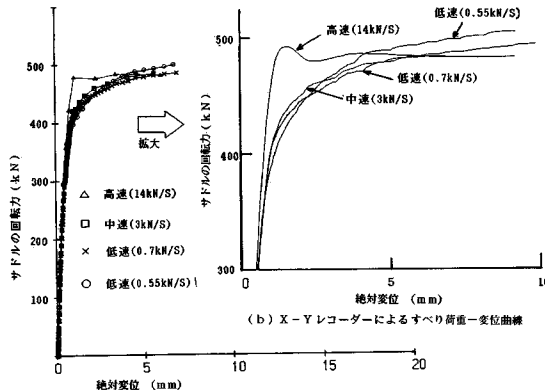


図-3 すべり荷重の増加速度を変化させた場合のすべり荷重と変位の関係

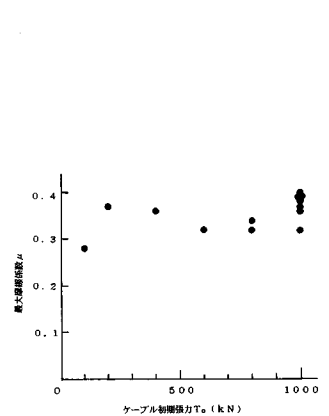


図-4 ケーブル初期張力と最大摩擦係数の関係

考えられる。この直線を延長した直線と曲線との横座標（変位）の差は、ケーブルとサドルのずれであるが、そのほとんどはすべり量と考えられる。なぜならば、junction growth におけるすべり出し変位 ( $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{cm}$ )<sup>10)</sup>に比較して、そのずれははるかに大きいからである。以降、この直線より荷重-変位曲線が離れる点をすべり出し点とよぶことにする。 $T_0=1000 \text{ kN}$  で4回繰り返す。荷重-変位曲線が安定した後、荷重増加速度を変えて4回すべり試験を繰り返した結果を図-3に示す。速度は、低速が約  $0.55 \text{ kN/s}$  と約  $0.70 \text{ kN/s}$ 、中速が約  $3.0 \text{ kN/s}$  および高速が約  $14.0 \text{ kN/s}$  である。高速の場合、すべり出す荷重の位置がかなり高く、最大値を生じた後それよりやや低い荷重で連続的にすべりを生じる。これと比較して、低速と中速の曲線の傾向はよく一致しており、すべり出す荷重の位置が高速に比較して低く、測定範囲内（約  $10 \text{ mm}$ ）では顕著なピークをもたず傾きが徐々に小さくなりながら単調に増加した。

ケーブルがサドル上をすべる場合、各接触点の摩擦係数  $\mu$  が一定であると仮定すると、サドルの両端のケーブル張力  $T_1, T_2$ （ただし  $T_1 < T_2$ ）と摩擦係数  $\mu$  の関係は、次式（オイラーの式<sup>9)</sup>）で表わすことができる。したがって、この摩擦係数は非常にたくさんの個々の接触点の平均値と考えられる。

$$\mu = \frac{\log_e(T_2/T_1)}{\theta}$$

ここで、 $\theta$  はケーブルが巻き付いたサドルの中心角である。本研究では、測定されたケーブルの左右の張力をこの式に代入して摩擦係数を求めた。各すべり試験の最大摩擦係数と初期張力の関係を図-4に示す。最大摩擦係数は測定範囲内での摩擦係数の最大値を用いた。初期張力すなわち接触圧の大きさにかわらず、摩擦係数がほぼ一定であることがわかる。平均値  $\bar{\mu}$  および標準偏差  $\rho$  は、

$$\bar{\mu} \pm \rho = 0.36 \pm 0.04$$

である。

以上の予備試験の結果を踏まえて、本試験では、すべり試験は原則として3回以上行い、荷重増加速度は中速

度を標準とした。

(2) 摩擦係数についての試験

表-1 に試験条件と試験結果を示す。試験条件は、サドル底面の表面処理が、無機系ジンクリッチプライマを塗布した場合、 $600 \text{ g/m}^2$ の亜鉛を溶射した場合および無処理の場合の3種類、使用サドルが半径  $500 \text{ mm}$  および  $750 \text{ mm}$  の2種類、ケーブル初期張力が  $1200 \text{ kN}$  および  $600 \text{ kN}$  の2種類である。これらの条件を組み合わせると合計7種類のすべり試験シリーズを行った。半径  $500 \text{ mm}$  のサドルは、「予備試験」後に底面をグラインダで仕上げてジンクリッチプライマ塗布してから約1週間後にNo.1シリーズを行った。次にグラインダでそのプライマを除去してから約1時間後にNo.2シリーズおよびNo.3シリーズをその順で行った。次に底面をグリッドプラストし亜鉛を溶射してから約1日後にNo.5シリーズを行った。そして「ボルトの締め付け力の経時変化を調べる試験」および「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」を行った後にNo.7シリーズを行った。その間サドル底面は人為的な処理は行っていない。ただし、No.7シリーズの前に、それ以前の試験ではすべり量の測定限界が約  $10 \text{ mm}$  であったのを約  $100 \text{ mm}$  まで測定できるように装置を改造した。半径  $700 \text{ mm}$  のサドルは、防錆のために底面に塗布されていた無機系ジンクリッチプライマをグラインダで除去してから約1時間後にNo.4シリーズを行った。それから底面をグリッドでプラストし亜鉛を溶射してから約1日後にNo.6シリーズを行った。

図-5 に試験結果である摩擦係数と絶対変位の関係を示す。表-1 に、各試験シリーズの最大摩擦係数および最初の試験におけるすべり出し点の荷重を摩擦係数に換算した値も示す。摩擦係数-変位曲線（以降、摩擦曲線とよぶ）がピークをもたない場合は、絶対変位が約  $10 \text{ mm}$  のときの値を最大摩擦係数とした。

実験室で一般に行われている小さな slider のすべり性状は、最大摩擦力に達するまでは前に述べたようにご

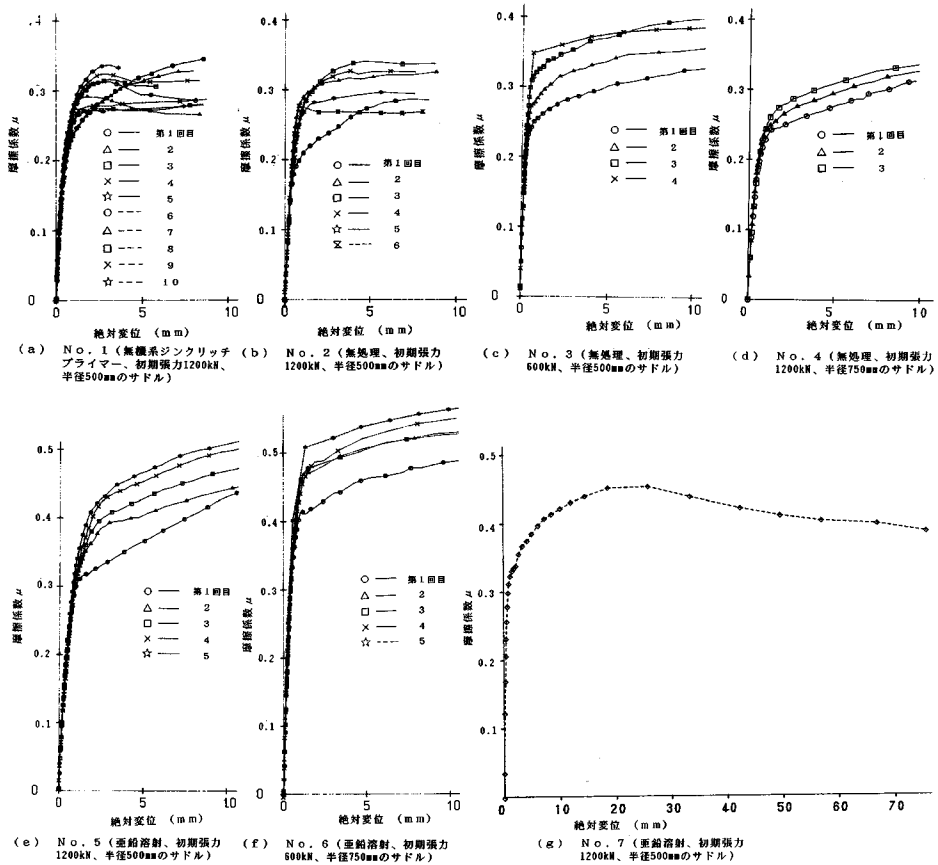
表-1 試験条件と試験結果

No.	試験条件			試験結果					
	サドル底面の表面処理 無機系ジンクリッチプライマ	サドル半径 (mm)	初期張力 (kN)	回数	摩擦係数		第1回すべり試験のすべり出し点		
					最大値	平均±標準偏差			
1	○	×	500	1200	10	$0.31 \pm 0.02$	亜鉛溶射以外	0.22	亜鉛溶射以外
2	×	×	500	1200	5	$0.31 \pm 0.03$	射以外の平均	0.19	射以外の平均
3	×	×	500	600	4	$0.37 \pm 0.04$	平均	0.23	平均
4	×	×	750	1200	3	$0.31 \pm 0.04$	0.33	0.23	0.22
5	×	○	500	1200	5	$0.47 \pm 0.04$	溶射の平均	0.31	溶射の平均
6	×	○	750	600	5	$0.53 \pm 0.04$	平均	0.40	平均
7	×	○	500	600	2	$0.44 \pm 0.02$	0.48		0.36

(注1) 変位-摩擦係数曲線がピークを持たない場合は、変位が約  $10 \text{ mm}$  の時の値を摩擦係数の最大値とした。  
 (注2) No.7の試験は「すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験」の完了後に、続けて荷重を増加させた試験も含んでいる。また、この試験シリーズでは初期状態にもどさないで試験を開始した。



写真-6 サドルに亜鉛を溶射した場合の試験後のサドルとケーブルの表面状態 (サドルの亜鉛が線状に剥けている)



図—5 摩擦係数と変位の関係

く小さな変位しか生じない（最大摩擦力と垂直力の比は最大静止摩擦係数とよばれている）。いったんすべりが生じると摩擦抵抗は最大摩擦力以下となる。これに対してケーブルのすべり性状は、図—5に示すように比較的小さな摩擦係数ですべり出すが、すべり出してからも摩擦抵抗が増大していくのが特徴である。また各試験シリーズで、試験を繰り返すごとにすべり出す位置が高くなる傾向である。比較的小さな摩擦係数ですべり出すのは、ケーブルはある程度の弾性的自由度があり、接触状態の異なる多くの接触点があるので、最もすべりやすい点から逐次すべるためと考えられる。このことは、前記した荷重増加速度が低速より高速の方がすべり出す位置が高いことから裏付けられる。すなわち、高速の場合は、ケーブル全体がほぼまとまってすべると考えられる。

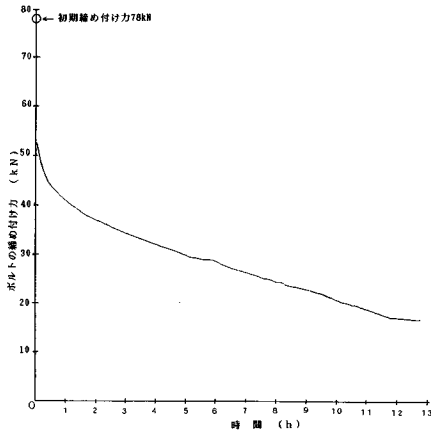
酸化膜や汚れが摩擦力を非常に低下させることおよびそれらを除去しても大気中ではすぐ再び発生することはよく知られている<sup>9)</sup>。No.2シリーズでは約1時間前に表面をグラインダで仕上げたにもかかわらず、実験室で行われたかなり清浄な鋼どうしの摩擦係数0.8<sup>10)</sup>に比較

してかなり小さい(0.33)。これは実験室の場合と比較すると酸化膜が厚かったり汚れがひどいためと思われる。このNo.2シリーズと無機系ジंकリッチプライマをサドル表面に塗布したNo.1シリーズの結果はほとんど同じである。この理由は、プライマの膜は破壊されやすいので摩擦係数にはほとんど影響を与えないが、下地金属の表面をほぼ仕上げの状態に維持する効果があるためと考えられる。これらの摩擦係数の測定結果と前記の実橋での摩擦試験<sup>1),2)</sup>の測定結果とよく一致している。

硬い金属の上に軟らかい金属の薄膜で覆うと、その膜が破れない場合は非常に摩擦抵抗が小さくなることはよく知られている<sup>9)</sup>。しかしサドルの表面(鋼)にそれに比較して軟らかい亜鉛を溶射した場合は、それ以外の場合に比較して、表—1および図—5に示すように明らか

表—2 すべり試験中のボルト締め付け力の变化

No.	ボルトの締め付け力 (kN)		
	すべり試験開始時 (P <sub>0</sub> )	絶対変位10mm時 (P <sub>10</sub> )	P <sub>10</sub> /P <sub>0</sub>
1	5.9	3.5	0.59
	6.2	3.1	0.50
	7.1	4.8	0.68
	11.5	6.8	0.59
2	11.5	8.0	0.70
	12.0	8.5	0.71



図—6 ボルト締め付け力の経時変化

ズの試験を行った。初期締め付け力の導入方法は、ケーブルの長手方向の3列のボルトの各列ごとに2人で同時にその2本のボルトを締め付けた。その締め付け順序は、中央の列、外側の列およびその反対側の列の順である。所定の締め付け力が導入されるまで、これを繰り返した。締め付けをするごとに、他の列のボルトの軸力がかなり変動するために、ほぼ所定の締め付け力を導入するのに約30分もかかった。試験結果を表—2に示す。すべり試験を行っている約10分間の間にボルトの締め付け力が30%~50%も減少することがわかる。これが、前に述べたように過去にケーブルバンド状のもので行った試験結果のばらつきが大きかったことの原因と考えられる。

に最大摩擦係数が大きく、その平均値は0.48で、約50%大きい。また、繰り返しすべり試験を行っても摩擦力の低下はほとんど生じていない。写真—6に亜鉛溶射した場合の試験後のサドル表面とケーブル下面の状況を示す。サドルの表面の亜鉛は線状に剝離している。これらのことを考えるとワイヤーの接触圧(本試験で初期張力が600kNの場合で、ヘルツの接触圧力が約1200MPa)が大きいので、溶射亜鉛の膜を貫通してワイヤーの鋼とサドルの鋼が直接接触していると推定される。ジンクリッチプライマを塗布した場合より亜鉛溶射の方が最大摩擦係数が大きいのは、溶射亜鉛の方が下地の鋼面を清浄に保つ効果があるためと推定される。

次に、ボルトの初期締め付け力を78kNとし、すべり荷重を一定(サドルの回転力が188kN)に保持した状態でボルトの締め付け力の変化を長時間にわたって観測した。その試験結果を図—6に示す。初期締め付け力78kNは、すべり荷重を一定に保った時点で52kN(減少率は33%)に減少した。その後も、最初は急激に減少するが約1時間後から比較的緩やかになり単位時間当たりの減少率はほぼ一定となった。約12時間後には約17kN(合計減少率78%)に減少したが、その時間当たりの減少率はかなり小さくなった。

半径750mmのサドルは500mmのものより接触面積が50%大きい。No.2シリーズとNo.4シリーズの結果を比較すると、接触面積の差による摩擦係数の差はほとんどないといえる。

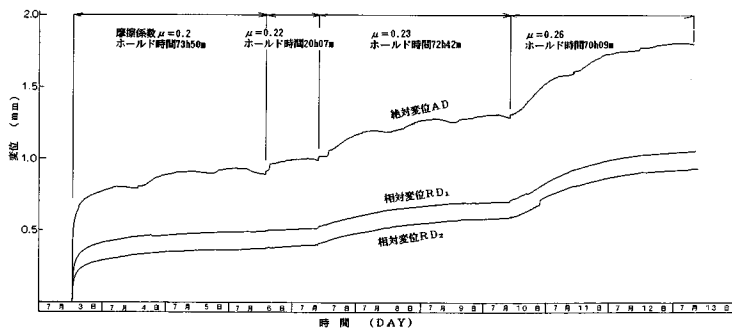
これは、長時間にわたってワイヤーどうしが横方向にすべることによってケーブル断面が変化すること等のためと考えられる。ボルト締結力の減少量はサドル側壁(この場合はスペーサー)の剛性が影響するので、この試験の結果をそのまま実際のサドルに当てはめることはできない。しかし、ボルトの締め付け力によって生じる摩擦力を設計に取り入れる場合は、ボルトの締め付け力の管理方法等について慎重な検討が必要であると考えられる。

(3) ボルトの締め付け力の経時変化を調べる試験

(4) すべり荷重とすべり量と時間の関係を調べる試験

この試験のケーブルの初期張力は600kNである。まず、すべり試験を行っている間(約10分間)にボルトの締め付け力がどの程度減少するかを調べた。ボルトの初期締め付け力が約70kNと約120kNの2シリーズ

すべり荷重を連続的に増加させると、ケーブルはすべりが生じてからも摩擦抵抗が増大していくことがわかっ



図—7 変位と経過時間の関係

た。しかし、すべり始めてからある一定の荷重に保持してもすぐにはそのすべりが停止しないこともわかった。今までの実験ではこの停止を十分に確認することができなかった。本試験はそれを確認するために、すべり荷重を一定に保持してすべり変位が停止したのを確認後、すべり力を段階的に増加させた。その一定に保持した荷重は、摩擦係数に換算して0.2、0.22、0.23および0.26である。

図一七に試験結果である変位と経過時間の関係を示す。それぞれの値は、試験開始からの累積である。RD<sub>2</sub>とRD<sub>1</sub>は、それぞれサドルの引き込み側と反対側の相対変位である。また、ADは絶対変位である。図に示すように絶対変位は、ある程度時間が経過した後は、一日周期で振動している。これは、絶対変位がすべり変位、ケーブルの伸びおよび温度変化による架台やケーブルの伸縮等を含んでいるので、すべり変位とケーブルの伸びが落ち着いた後は、温度変化による影響が顕在化するためと考えられる。これに対して、相対変位は単調に増加している。相対変位も、変位計の取り付け位置と測定位置の間のケーブルが温度変化の影響を受けるが、その長さが短いので、全体としてはほとんど温度の影響を受けないと想定される。したがって、すべり変位が停止したかどうかは、相対変位によって判断した。なお、変位の増加が1時間当たり1μ程度になったとき、変位が停止したことにした。

まず、摩擦係数換算で0.2まですべり荷重をゆっくり増加させて、その荷重を一定に保持（ホールド）した。最初は変位が急増するが、約20時間後に変位増加速度がかなり低下した。しかし、その後はかなり長時間にわたって変位は徐々に増加する。ようやく約74時間後に変位が停止したので、摩擦係数換算で0.22にすべり荷重を増加させて、再びホールドした。約20時間後に変位が停止したので、摩擦係数換算で0.23に増加させてホールドした。約73時間後に変位が停止したので、摩擦係数換算で0.26に上げてホールドした。約70時間後、試験場の使用期限となったために、変位は停止していなかったが、やむなくホールドを解除した。しかし、変位増加速度はかなり遅くなっており、このままホールドを続ければ変位は完全に停止すると想定される。相対変位のほとんどはすべりによるケーブルとサドルの相対的変位と考えられるので、以上の結果から次のことがいえる。

(1) 摩擦係数換算で0.23のすべり荷重まではすべりが停止することが確認された。0.26では途中でホールドを解除したが、すべり変位-時間曲線の傾向から、すべりが停止するものと想定される。

(2) すべり荷重をホールドしてからすべりが停止するまでは、かなり時間がかかる。摩擦係数換算で0.23

では、約3日かかってすべりが停止したが、0.26では3日かかっても停止しなかった。

(3) すべり荷重を上げるごとにすべり変位は増加する。摩擦係数換算で0.26でホールドを解除した時点で、すべり変位の累計は約1mmであった。

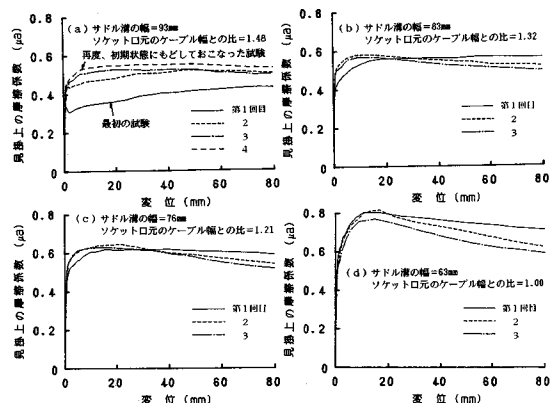
(4) サドル引き込み側の変位RD<sub>2</sub>に比べて反対側のRD<sub>1</sub>の変位が、荷重に大ききにかかわらず約0.1mm大きいのは、ケーブルをサドルにセットし初期張力をかけた時点で残ったサドル上のケーブルの長手方向の緩みが、サドルに回転力を与えたときに伸び、その量がRD<sub>1</sub>に付加されたためと想定される。

(5) サドルの側面の摩擦が全体摩擦力に及ぼす影響を調べるための試験

サドル底面に1200g/m<sup>2</sup>の亜鉛を溶射し、他のすべり試験を十数回行った後そのままの状態での試験を行った。固定用スペーサーの摩擦面には1200g/m<sup>2</sup>の亜鉛を溶射しパーズンな状態でこの試験を開始した。またケーブル初期張力は600kNである。試験結果を表一3と図一8に示す。これらに示されている摩擦係数は、前記のオイラーの式から求めたもので、全体の摩擦力と側面がないと仮定した場合の垂直力との比を意味している。各摩擦面ごとの摩擦係数と区別するために見掛け上の摩擦係数μ<sub>a</sub>と表現した。表にはすべり試験を行った順番も記す。まずサドル溝の幅を93mm（ソケットの口元での幅に対して1.48倍）で試験を行った。図一8に示すように、最初に行った試験の結果は、それ以降（2回目以降）の試験結果に比較してすべり出しがかなり早く、最大摩擦係数も小さい。他の試験が終わった後

表一3 試験条件と試験結果

番号	サドル溝の幅(mm)	サドル溝の幅とソケット口元のケーブルの幅との比	最大摩擦係数	
			測定結果	平均値±標準偏差
1	93	1.48	①0.44, ②0.52, ③0.53, ④0.55	0.53±0.02 [④は除く]
2	83	1.32	①0.57, ②0.58, ③0.57	0.57±0.01
3	76	1.21	①0.62, ②0.65, ③0.63	0.63±0.02
4	63	1.00	①0.81, ②0.82, ③0.77	0.80±0.03



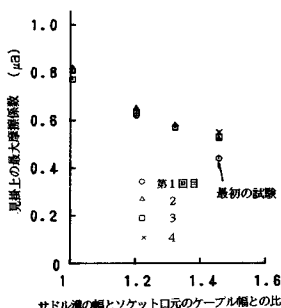
図一8 サドル溝の幅を変えた場合の摩擦係数-変位の曲線



に最初の試験と同じようにケーブルを初期状態に戻して試験を行った結果は、2回目以降のすべり試験の結果とほぼ一致した。したがって、最初の試験の摩擦係数が小さいのは、接触する材料表面のさびや汚れのためと考えられる。このケーブルは屋内に約1年間放置したので、ケーブルをハンマーで叩くとさびが粉状に空間に広がる状態であった。前記したように本実験では、ワイヤーの防錆処理の効果を直接確認することができなかったが、防錆膜によって摩擦係数が増大するワイヤーの実験結果<sup>8)</sup>がある。この膜は剝離しやすいが、前記のジंकリッチプライマの効果と同様に、表面の酸化を抑制することによって摩擦抵抗を低下させない効果があると推定される。最初の試験ですべり出すといった摩擦力がやや低下するが、それからすべり量が大きくなるに従って摩擦抵抗が徐々に増大する。すべり出しても摩擦力が増大することおよび試験を繰り返すごとにすべり出す位置が高くなることは、ケーブルの共通なすべり性状である。これは、ケーブルがすべると接触面が磨かれるために、凝着結合力が増大するためと考えられる。ケーブルを初期条件に戻して試験をすると一般にすべり出す位置が再び低くなる理由は、ワイヤーのすべり線がその前の試験で磨かれたすべり線と異なるからと考えられる。

見掛け上の最大摩擦係数の測定結果の平均値と標準偏差も表一3に示す。ただし、サドル溝の幅を93mmで行った試験において、最初に行った試験の結果は、平均値等の計算から除外した。

図一9に、見掛け上の最大摩擦係数とサドルの溝の幅をソケットの口元のケーブルの幅で無次元化した値との関係を示す。全体の摩擦力は、サドル底面と側面の摩擦力である。サドルの溝の幅が小さくなるに従って、側面方向の垂直力が増加するので、その摩擦力は増加する。一方、底面の垂直力は、側面の上下方向の摩擦によって減少するので、その摩擦力は減少する。図一9に示すように、幅が小さくなるに従って、全体の摩擦力が大きくなるのがわかる。幅が一番大きいとき、すなわち93mmのときの摩擦係数は、前記の試験結果との比較から



図一9 最大摩擦係数とサドル溝の幅の関係

ケーブル側面の摩擦がない場合の摩擦係数に近いと考えられる。これに対して溝の幅がソケットの口元の幅に等しい場合の摩擦係数は約1.5倍である。実際のケーブルのサドル上とそれ以外の部分の幅の比は1に近い。したがって、実橋のサドル部全体の摩擦力は通常設計で考慮されているサドル底面の摩擦力よりかなり余裕があると考えられる。しかし、この余裕分は、ケーブル施工方法やケーブルの形状・大きさ（実際のケーブル断面は本試験のケーブル断面の100倍くらいである）等の多くの要素の影響を受けると考えられるので、精度よく算定するのは困難と思われる。

#### 4. 結 論

この研究で得られた主な結論は次のとおりである。

(1) ケーブルのすべり性状は、比較的小さな摩擦係数ですべり出すが、すべり出してから摩擦抵抗が増大していき、最大値に達した後も低下が緩やかなことが特徴である。また試験を繰り返すごとに、すべり出しの摩擦係数が高くなる傾向である。比較的小さな摩擦係数ですべり出す理由は、ケーブルはある程度の弾性的自由度があり、接触状態の異なる多くの接触点があるので、最もすべりやすい点から逐次すべり出すためと考えられる。またすべり出しても摩擦抵抗が増大するのはケーブルがすべると接触面が磨かれるために、凝着結合力が増大するためと考えられる。

(2) サドル表面をグラインドで仕上げしてから約1時間後に試験を行った場合とグラインドで仕上げが無機系ジंकリッチプライマを塗ってから約1週間後に試験を行った場合の最大摩擦係数がほとんど差がなく、平均で0.33であった。ほとんど差がない理由は、このプライマの膜は破壊されやすいので摩擦係数にほとんど影響を及ぼさないが、下地金属の表面をほぼ仕上げ状態に維持する効果があるためと考えられる。これに対して、亜鉛溶射した場合は、最大摩擦係数が約50%大きい平均で0.48であった。繰り返しすべり試験を行ってすべり面の亜鉛がかなり剥けても最大摩擦力はほとんど低下しないことから、亜鉛の効果は上記のプライマと同様に、それそのものの強度が摩擦係数に影響を及ぼさないが、下地金属の表面を汚れや酸化から防いで清浄な状態に保つことであると推定される。溶射亜鉛の方が摩擦係数が大きいのは、そのプライマより下地金属をより清浄な状態に保つ効果があるためと推定される。

(3) すべり出しの摩擦係数以上で、すべり荷重を一定に保持した場合、それ以降も微小なすべりが残存する。この微小なすべりが停止するまでかなりの時間を要する。サドルの表面を亜鉛溶射しすべり試験を十数回行った後に、すべり荷重を摩擦係数換算で0.23で保持し、

すべりが停止するのを確認した。すべり量の累計は1 mm 以下であった。また、0.26 ではすべりの停止を完全には確認できなかったが、試験完了時のすべり量の増加速度はかなり遅くなっており、このまま保持を続ければ変位は完全に停止すると想定される。

(4) 締め付けボルトを用いたすべり試験では、試験を行っている約10分間の間にボルトの締め付け力が30%~50%も低下した。また、12時間一定にすべり荷重を保持した実験では合計78%も減少した。これは、長時間にわたってワイヤーどうしが横方向にすべることによってケーブル断面が減少するためと考えられる。したがって、これによって生じる摩擦抵抗力を設計に取り入れる場合は、ボルトの締め付け力の管理方法等について慎重な検討が必要である。

(5) サドルとケーブルの全体摩擦力は、サドル底面と側面の摩擦力によって構成されている。サドルの溝の幅が小さくなるに従って全体の摩擦力は増大する。したがって、通常の設計で考慮するサドル底面の摩擦力よりかなり余裕がある。しかし、この余裕分は、ケーブルの施工方法やケーブル断面・形状等の影響を受けると考えられるので、精度良く算定することは困難である。

謝 辞：試験の実施に際しては、フジケンエンジニアリングの賀久三義氏、秦 耕一氏、村上和幸氏、日本大学電子工学科 菊池靖彦氏および新日本技研の高橋真太郎氏の協力を得ました。特に秦 耕一氏には論文とり

まとめの協力もしてもらいました。新日本製鉄橋梁構造部 西川幸男次長には本研究のためにご助言および文献をいただきました。また、本研究をまとめるにあたって、新日本技研 高尾孝二博士にはご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 神戸市：ジョージワシントン橋(その3) 上部構造の設計, No. 22, pp. 34, 1966.
- 2) ICE: Forth Road Bridge, pp. 25, 1967.
- 3) Final Report of the Boad Engineers to the Delaware River Bridge Joint Commission of the State of Pennsylvania and New Jersey, 1927.
- 4) 湊 理寅：吊橋用のケーブルに関する実物大実験, R&D/Vol. 18, 1968.
- 5) 湊 理寅：吊橋用のケーブルに関する2, 3の問題, R&D/Vol. 21, 1971.
- 6) 本州四国連絡橋公団・新日本製鉄・神戸製鋼所：本州四国連絡橋・ケーブル付属品の調査, 1976.
- 7) 本州四国連絡橋公団・神戸製鋼所・新日本製鉄：本州四国連絡橋・大鳴門橋側塔部ケーブル挙動実験(その1), 1979.
- 8) 八幡製鉄・神戸製鋼所：平行線ケーブル亜鉛メッキ鋼線の防錆試験・中間報告I, 1969.
- 9) 曾田範宗・パウデン・テイパー：固体の摩擦と潤滑, 1985.
- 10) 小泉：滑り出し変位とこがり出し変位, 潤滑, 第30巻, 第1号, 1985.

(1988. 5. 4・受付)