

吊橋サドルの摩擦抵抗向上対策としての水平摩擦板の効果

EFFECT OF HORIZONTAL FRICTION PLATE AS A METHOD TO INCREASE FRICTION RESISTANCE OF 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

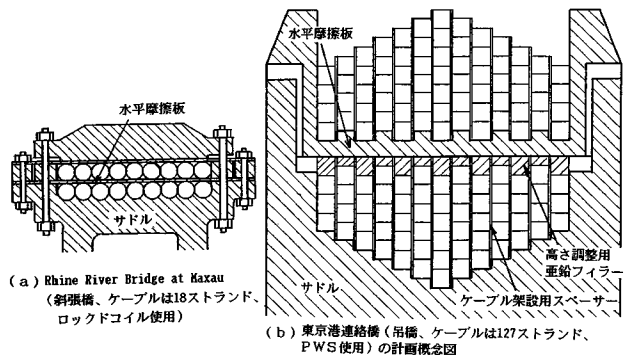
An experimental investigation on effect of horizontal friction plate as a method to increase friction resistance of saddle of suspension bridge was performed. As a result, it became clear that whole maximum friction resistance was less than total of maximum friction resistances on each contact surface. Furthermore, behaviors of friction between wire and steel galvanized with pure zink, between zink plates, and between wire and zink plate were made clear.

Keywords: suspension bridge, friction, cable, saddle

1. ま え が き

吊橋のケーブルとサドルの滑動に関して、著者らは前論文¹⁾で下記のことについて明らかにした。サドル面に亜鉛を溶射することによって、機械仕上げのままあるいは無機ジンクリッチプライマーを塗布した場合より最大摩擦係数を大きくすることができる。亜鉛を溶射した場合の最大摩擦係数は、従来のほとんどの長大吊橋の設計摩擦係数である0.15よりかなり大きい。しかし、このことを考慮しても、首都高速道路12号線の吊橋（仮称・東京湾連絡橋）は、塔頂部における中央径間側と側径間側のケーブルの張力の差が従来のどの長大吊橋より大きいために、それらの吊橋で用いられているエキストラストランド方式²⁾（張力の大きい側のケーブルの一部をサドルや塔に定着する方法）を用いても滑動に対する抵抗力が不足する。また、締め付けボルトによって垂直力を増加させて摩擦抵抗を増大させる方式³⁾は、ボルトの軸力が長期的に減少するので、この方式は維持管理上で問題がある^{1), 4)}。

長大吊橋には実施例はないが、斜張橋には図—1(a)に示すように水平摩擦板を用いた例^{5), 6)}がある。この方法では、サドル底面、水平摩擦板の上下面などの設計で考慮する摩擦面に対する垂直力に、それぞれの面の摩擦係数を乗じた値の合計を全体の摩擦抵抗と考えている。したがって、その抵抗力を増加させる方法としては非常に効率が良い。図—1(b)は現在検討している本橋梁の水平摩擦板を用いた塔頂サドルの概念図である。サドルおよび水平摩擦板の摩擦面に摩擦抵抗の増大と防錆を目的として亜鉛を溶射する予定である。しかし、斜張橋と異なりケーブル断面がはるかに大きいために、水平摩擦



図—1 塔頂サドル

* 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)

板下面では、高さ調整用の複数枚重ねた亜鉛フィラー等を用いる必要がある。したがって、水平摩擦板の下面では、その下面と亜鉛フィラーが接触する面、亜鉛フィラーどうしが接触する面あるいは亜鉛フィラーと下段ケーブルが接触する面ですべる可能性がある。このようにそれぞれの摩擦面の材料が異なる場合に上記の重ね合わせが有効であるかについて研究した例はほとんどない。

本論文は、このような水平摩擦板の効果について研究した場合を報告する。

2. 試験体と試験方法

(1) 試験体

試験装置を図-2に、試験体の形状を図-3に示す。サドル試験体は、実橋と同じ材質（SCW 49）で、ケーブルとの摩擦面は実橋と同じ仕上げを行ったうえで 1200 g/m^2 （厚さ約 $170 \mu\text{m}$ ）の亜鉛を溶射した。サドル

底面の半径は 500 mm で、ケーブルと接触するサドルの中心角は本橋梁とほぼ同じ 57° である。

ケーブル試験体は、純亜鉛めっきした直径 5 mm のワイヤー（JIS G 3502に規定される SWRS 77 Bの線材）で構成された平行線ストランド(PWS)である。このケーブルは、サドル底面でケーブルがなじむように中央部に曲率をつけて製作した。ケーブル試験体（FP試験体）は合計で2組製作した。

FP試験体はワイヤー72本で構成されたケーブルで、その断面の中央に摩擦板（材質 SM 50 Y）があり、摩擦板のガセットはロードセルを介してサドルに固定されている。実橋ではケーブルはサドルと架設用スパーサー（図-1(b))によって断面形状がほぼ一定に保たれていると考えられるので、図-3に示すように接触荷重によってその断面形状がくずれないようにサドルと接触する位置にH型の治具を用いた。摩擦板の2つの摩擦面

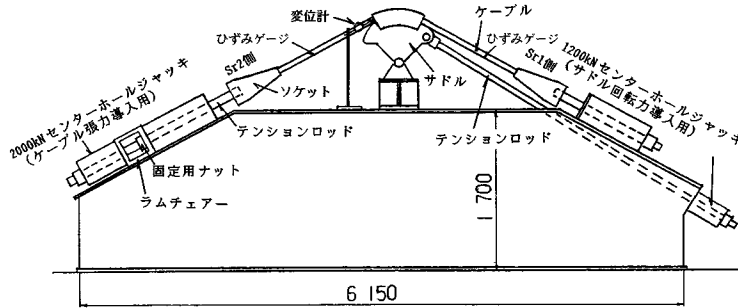


図-2 試験装置

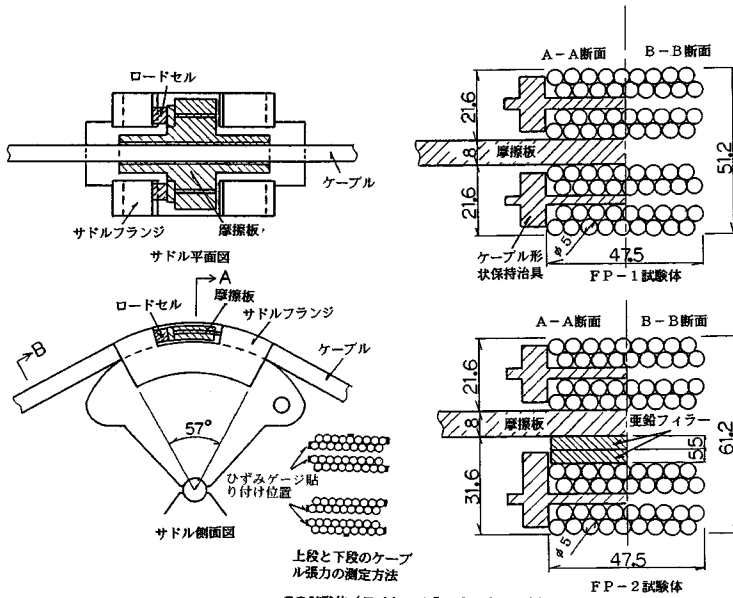


図-3 試験体の形状

は、サドル底面と同じ状態に仕上げて1200 g/m² (厚さ約170 μm)の亜鉛を溶射した。FP-1試験体では、上段および下段のケーブルのワイヤーが摩擦板と直接接触している。したがって、3つの摩擦面(摩擦板上下面およびサドル底面)とも接触する材料は同じである。FP-2試験体では、実際の橋梁を想定して摩擦板の下面と下段のケーブルの上面の間に板厚5 mmの2枚の亜鉛板(JIS H 2107 亜鉛地金 1種蒸留亜鉛地金)を挟んだ。その他の摩擦面はFP-1試験体と同じである。

(2) 試験方法

すべり試験の方法は図-2に示すように、ケーブル試験体をサドル上にセットし、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約600 kNの張力を導入し、この張力が一定に保持されるようにラムチェアー位置のナットでテンションロッドを固定した(この張力を初期張力とよぶ)。このときの接触圧力は、サドル底面でワイヤー1本当たり約1 kN/cm、摩擦板で約0.5 kN/cmである。次に、明確な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サドルにピン連結されたテンションロッドを引き込むことによってサドルに比較的遅い載荷速度で回転力(すべり力)を与えた。ケーブル左右の張力およびサドルに与える回転力は、それぞれのテンションロッドに貼り付けた4枚のひずみゲージによって測定した。製作上の誤差で上段と下段のケーブルの張力が異なるので、それぞれの張力の違いを調べるために、図-2に示すように、ソケットから約400 mm離れた位置の上段と下段のケーブルのワイヤーにそれぞれ5枚ずつひずみゲージを貼った(図-3)。また、摩擦板の摩擦力は、図-3に示すように摩擦板のガセットとサドルフランジの間に設置したロードセルによって測定した。ケーブルとサドルのすべり変位を測定する目的で、図-2に示すように架台に固定した1/100 mm目盛り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(ケーブルの中央付近)のサドルの回転変位を測定した。すべり試験は同じ条件で約3回ずつ行った。

まず、FP-1試験体を用いて3種類のすべり試験を行った。1つは、写真-1に示すように摩擦板が最初から機能している場合、すなわち摩擦板がサドルに固定されている場合で、摩擦板の上下面とサドル底面の3面で摩擦が生じる場合である。2つ目は、ロードセルを取り除いて摩擦板が固定されていない場合、すなわちワイヤーとサドル底面だけのすべり試験である。3つ目の試験は、サドル底面でかなりすべってから摩擦板を機能させた場合の摩擦抵抗を調べる目的である。この試験では、やはりロードセルを取り除いて、最初はサドル底面だけですべり、その変位が約20 mm以上になったときに摩

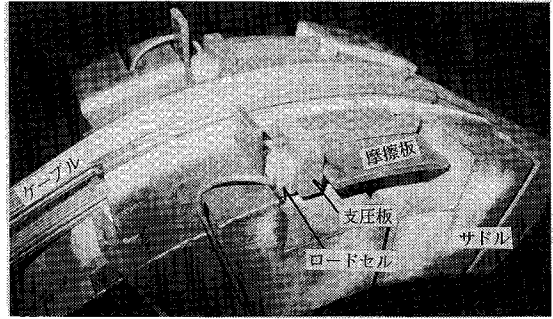


写真-1 摩擦板を最初から機能させた場合の試験状況

擦板のガセットがサドルフランジに接触・固定されるようにした。

FP-2試験体では、上記の3種類の試験以外に、実際の摩擦板の下面を想定して、ケーブルと亜鉛溶射した鋼の間に複数の亜鉛フィラーを挟んだ場合のすべり性状を調べる目的で、ケーブル下面とサドル底面の間に板厚3 mmの2枚の亜鉛板(材質は上記の亜鉛フィラーと同じ)を挟んで、摩擦板を固定しない状態でのすべり試験を行った。これらのFP-2試験体では、FP-1試験体のすべり試験で傷のついたサドル底面をグラインダーによって仕上げ、再び亜鉛を溶射して試験を開始した。

3. 試験結果

ケーブルがサドル上をすべる場合、各接触点の摩擦係数 μ が一定であると仮定すると、 μ とサドルの両端のケーブル張力 T_1 、 T_2 (ただし $T_1 < T_2$)の関係は次式(オイラーの式⁷⁾)で求められる。ただし、摩擦板が機能している場合は、この値は全体の摩擦力とサドル底面における垂直力との比を意味している。その場合、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_a と表現した。

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

ここで、 θ はケーブルが巻き付いたサドルの中心角である。

試験条件と試験結果を表-1に示す。最大摩擦係数の測定結果の平均値と標準偏差も示す。ただし、この平均値等の計算からサドルがパーজনな状態(摩擦面がまだ傷ついていない状態)で行った試験の結果は除外した。それぞれのケーブル試験体は、サドルがパーজনな状態から試験を開始した。パーজনな状態のすべり試験を1回目(最初の試験)としたすべり試験の順番も表に示した。

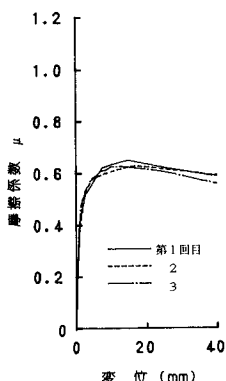
図-4～図-6にFP-1試験体の試験結果を示す。前論文¹⁾で示したように、この図の摩擦係数 μ と変位の関係(以降、摩擦曲線とよぶ)で最初の直線の部分はすべ

表—1 FP試験体の試験条件と試験結果

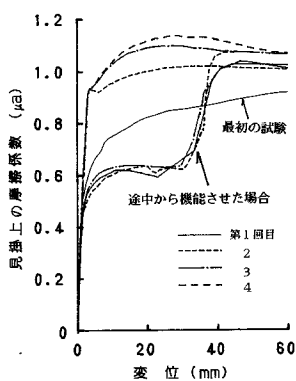
ケーブル試験体名	摩擦板の状態	すべり面の材料	最大摩擦係数	
			測定結果 (○などは試験の順番)	平均値±標準偏差
FP-1	機能させない	ワイヤーと亜鉛溶射した鋼	①0.65, ⑤0.63, ⑦0.63	0.64±0.01
	最初から機能させる	〃	①0.96, ②1.02, ④1.10, ⑥1.14	1.09±0.06 [①は除く]
	途中から機能させる	〃	①1.03(0.62), ③1.08(0.64), ⑧1.04(0.64)	1.05±0.08(0.63±0.01)
FP-2	機能させない	〃	②0.54, ⑤0.57, ⑦0.54	0.55±0.02
		亜鉛板どうし	③0.35(0.15), ④0.23(0.13), ⑥0.22(0.13)	0.25±0.05(0.13±0.01)
	ワイヤーと亜鉛板	⑧0.42, ⑨0.43, ⑩0.44	0.43±0.01	
	最初から機能させる	ワイヤーと亜鉛溶射した鋼、 および亜鉛板どうし	①0.87, *④1.17, *⑥1.29	
	途中から機能させる	ワイヤーと亜鉛溶射した鋼、 および亜鉛板どうし	*③1.00(0.57)	

(注1) () は摩擦板がまだ機能していない時の最大摩擦係数、{ } は動摩擦状態での摩擦係数の最小値である。

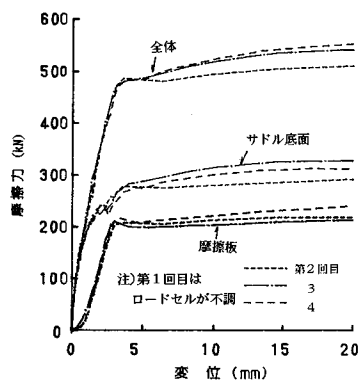
(注2) *は亜鉛フィラーと形状保持治具が接触したために摩擦係数が大きくなった試験の結果である。



図—4 摩擦板を機能させない場合の摩擦係数-変位の曲線



図—5 摩擦板を機能させた場合の摩擦係数-変位の曲線



図—6 摩擦板を最初から機能させた場合の摩擦力-変位の曲線

り力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で、この直線を延長した直線と曲線との横座標(変位)の差のほとんどがすべり量と考えられる。なお、図に示した番号は、同じ試験条件で行った試験の順番を表す。図—4に、摩擦板を機能させない場合、すなわち亜鉛溶射した鋼とワイヤーの場合の摩擦曲線を示す。その接触圧力は、溶射亜鉛とめっき亜鉛の影響を無視するとヘルツの圧力で約1200MPa(鋼のヤング率およびポアソン比は、それぞれ 2.06×10^5 MPaおよび0.3とした)である。最大摩擦係数の測定結果の平均値と標準偏差は、 0.64 ± 0.01 で誤差が非常に小さい。

図—5に、摩擦板を最初からおよび途中から機能させた場合の見掛けの摩擦係数 μ_a と変位の関係を示す。図—6は摩擦板を最初から機能させた場合の摩擦力と変位の関係を示す。この図には、摩擦板の摩擦力、サドル底面の摩擦力およびそれらの合計を示した。摩擦板の摩擦力はロードセルで測定した値であり、合計の摩擦力は左右のケーブル張力の差である。サドル底面の摩擦力は合計の摩擦力から摩擦板の摩擦力を引いた値である。摩擦

板を最初から機能させた場合の摩擦曲線の傾向は、前記の摩擦板を機能させない場合とほぼ一致する。すなわち、すべり出してからも摩擦抵抗が増大し、最大値に達した後は緩慢に低下する。最初の試験ではかなりすべり出しが早く、またピークがない。亜鉛溶射した場合、ケーブルがすべっていくと磨かれ、ケーブルとサドルの鋼面どうしの真実接触面積が増加することによって摩擦抵抗が増加する¹⁾。すべり出しが早いのは、サドルの摩擦面がバージンの場合、繰り返し試験を行った後に比べて亜鉛膜の影響で全体の凝着結合力が小さいためと考えられる。実橋では一般にサグ調整のために、ケーブルをサドル上で数cmすべらせる。そのときの接触圧力は小さいので、ワイヤーとサドル底面等の供用期間中の摩擦面の状態は、この試験の1回目と2回目の中間の状態と想定される。また、ピーク値がないのは単に測定範囲内で最大値に達しなかったためと考えられる。図—6に示すように、摩擦板に摩擦力が生じる時期はサドルに回転力を与えたときより少し遅れる。摩擦板のガセットはロードセルを介して、くさびを用いることによってサドルフラ

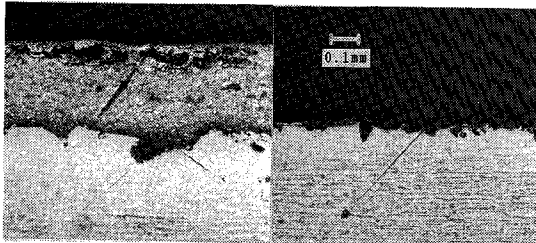
ンジに直接接触するようにしているが(写真-1), その部分に少しは遊びがあるためにこの遅れが生じたと考えられる。1回目の最大摩擦係数は0.97であった。2回目以降の摩擦曲線の差は小さく, 最大摩擦力の平均値は1.09で摩擦板を機能させない場合に比べて1.7倍である。

途中から摩擦板を機能させた場合について図-5を示す。まだ摩擦板の機能していない状態での最大摩擦係数の平均値と標準偏差は, 0.63 ± 0.01 で上記の同じ条件の試験結果と非常によく一致する。摩擦板が機能した後の最大摩擦係数の平均値は1.05で, 最大値に達した後の摩擦曲線は最初から機能した場合の摩擦曲線とよく一致する。

写真-2および写真-3は, FP-1試験体の試験終了後の摩擦板およびワイヤーの断面写真である。写真-2

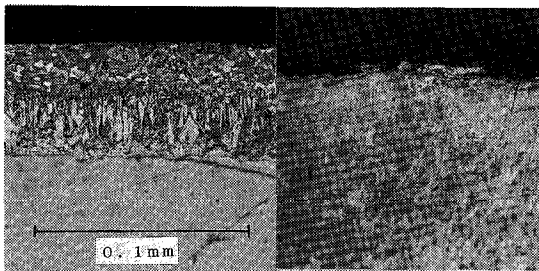
(a)はワイヤーと接触しなかった部分の写真である。下地金属(鋼)の表面がグリッドによるブラストによって最大約100 μm の凹凸がついていること, およびその凸部から計って約200 μm の亜鉛層があることがわかる。写真-2(b)はすべった部分の写真である。亜鉛がほとんど剥げて, 下地金属の面が摩擦によって当初より平らになっていることがわかる。写真-3(a)および(b)は, それぞれ摩擦板と接触しなかった部分およびすべった部分の写真である。すべった部分では, 亜鉛めっき層およびその合金層が完全に剝離し鋼部分が露出している。これらのことは, 「本橋梁とほぼ同じ接触圧の条件における亜鉛溶射した鋼とケーブルのすべりでは, 下地金属である鋼どうしが実接触している。」との前論文の推定¹⁾を裏付けている。なお, 溶射亜鉛の効果はその論文で述べたように, 下地金属面をかなり清浄に保ち, その凝着力を大きくすることである。

図-7と図-8にFP-2試験体の試験結果を示す。図-7に, 摩擦板を機能させない状態で, 接触する材料を3種類変化させてすべり試験を行った結果を示す。1つ目は, 亜鉛溶射したサドル底面とケーブルの摩擦の試験である。この試験はFP-1試験体で行った条件と同じであるが, 最大摩擦係数はそれよりやや小さく平均で0.55であったが, 摩擦曲線の傾向は一致した。両方の試験の平均は0.59である。2つ目の試験は, 実橋の水平摩擦板の下面を想定した試験で, FP-2試験体の下面とサドル底面の間に板厚3mmの2枚の亜鉛板(材質は前記の亜鉛板と同じ)を挟んで5回すべり試験を行った。この亜鉛板は, 実橋の状態に近づけるため, 約1時間水中に入れて発錆させた後に試験場の床にしばらく放置した。すべる可能性のある面は, ケーブル下面と亜鉛板が接する面, 亜鉛板どうしが接する面および亜鉛板とサドル底面が接する面の3面であるが, すべりが生じた面はすべて亜鉛板どうしが接する面であった。この接触圧力は約20MPaである。このすべりは図-7(b)に示すように, 付着状態から急激に摩擦力が低下した。その後は典型的なスティック-スリップ現象を呈し, すべりが生



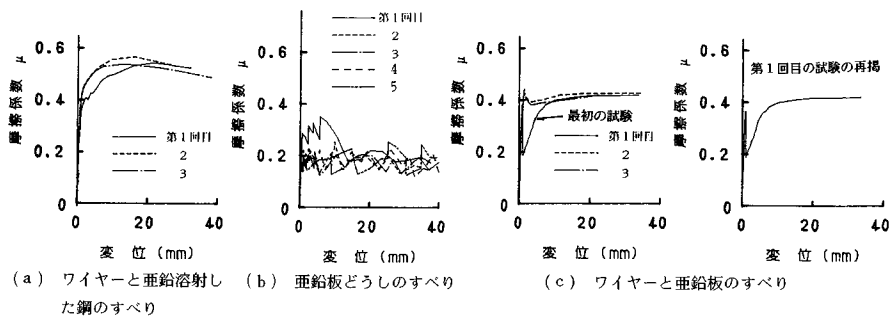
(a) 接触しなかった部分 (b) すべった部分

写真-2 水平摩擦板の試験後の断面写真



(a) 接触しなかった部分 (b) すべった部分

写真-3 ワイヤーの試験後の断面写真



(a) ワイヤーと亜鉛溶射した鋼のすべり (b) 亜鉛板どうしのすべり

(c) ワイヤーと亜鉛板のすべり

図-7 摩擦板を機能させない場合の摩擦係数-変位の曲線

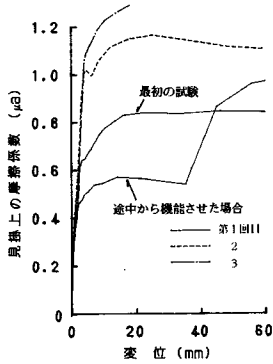


図-8 摩擦板を機能させた場合の摩擦係数-変位の曲線

じるごとに音を発し急激に摩擦力が低下した。最大摩擦係数の平均値と標準偏差は、 0.25 ± 0.05 で他の条件で行った試験に比較してばらつきが大きい。すべっているときの最小摩擦係数の平均は0.13であった。なお、動摩擦係数はこの値と最大摩擦係数の平均値である⁸⁾。試験後の亜鉛板の摩擦面を写真-4に示す。表面はつるつるしていて、凝着があまり強くなかったことを表わしている。すべり試験を繰り返すことによって、酸化膜や汚れが剥離し、とも金現象によって摩擦力が増加することを期待したが、ほとんど変化がなかった。摩擦係数が小さかった理由は、面接触であるので接触圧力が小さい(約20 MPa)のために酸化膜や汚れがあまり破壊されなかったので凝着が小さいままであったためと考えられる。3つ目の試験は、グリッド No.100 (JIS G 5903 铸造ショットおよびグリッド、最大直径1.1 mmの表面がでこぼこした鉄の粒)を、亜鉛板と亜鉛板の間および亜鉛板とサドル底面の間に散布して行った。その方法は写真-5のように下側の亜鉛板の両面に接着材を用いてグリッドを貼り付け、その硬化後に2枚の亜鉛板をケーブル下面とサドル底面の間にセットした。グリッドを挟んだ面ではすべりは生ぜず、いずれも亜鉛板とケーブルの接する面ですべった。この接触圧力は、めっき亜鉛の影響を無視するとヘルツの圧力で約1000 MPa(亜鉛板のヤング率およびポアソン比は、それぞれ 1.08×10^5 MPaおよび0.25とした)である。図-7(c)に示すように、このすべりはいずれも最初のすべりで少し摩擦力が低下するが、それ以後は徐々に増加しほとんど一定の摩擦力ですべった。ただし、第1回目の試験では、最初のすべりによる摩擦力の低下が大きかった。最大摩擦係数の平均は0.43で、亜鉛溶射した鋼面よりやや小さい。写真-6に試験後の上側の亜鉛板の上の表面を示す。下側の3本の平行な傷が、グ

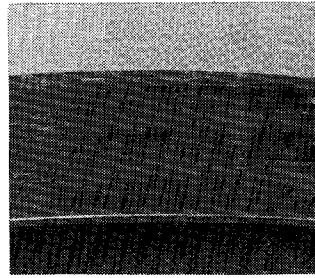


写真-4 亜鉛板どうしですべった後の亜鉛板の表面状態

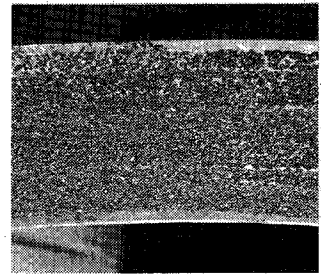


写真-5 グリッドの貼り付け状態の亜鉛板の表面状態

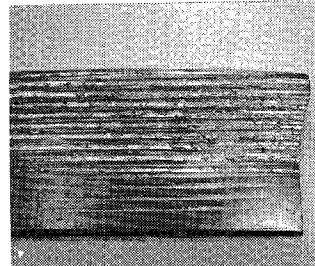


写真-6 試験後の亜鉛板の表面状態

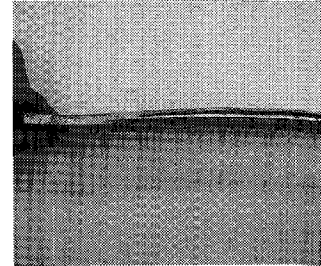


写真-7 亜鉛板の側面が形状保持治具によって深く掘り起こされた状態

リッドを使用する前、すなわちこの面ですべらなかつたときに垂直方向の荷重によって生じたものである。その上側の深い傷はグリッドを使用したときにワイヤーがすべったときの傷である。板の先端が塑性変形によって延びている。すべることによって傷がかなり大きくなるのがわかる。これは前者が主に垂直力による塑性変化であるのに対して、後者はすべりによって凝着部がむしり取られる(せん断破壊)からである。以上の結果から、実際の橋では、亜鉛フィラーどうしが接触する面にはグリッドを挟むこと、亜鉛フィラーとワイヤーの摩擦面には上記の急激な摩擦力の低下を防ぐ対策を施した方がよいと考えられる。

図-8に、摩擦板を最初からおよび途中から機能させた場合の見掛けの摩擦係数 μ_a と変位の関係を示す。これらの試験では、後で行った試験ほど最大摩擦係数が大きかった。写真-7は解体後の摩擦板の下面と下段ケーブルの上面の間に挟んだ上側の亜鉛板の状況である。その側面に形状保持治具によって深い掘り起こしの傷がついている。すなわちすべり試験の繰り返しによってワイヤーが亜鉛板にだんだん深く食い込むとともに板が薄く延びることによって、上側の亜鉛板と形状保持治具が強く接触したために、その抵抗が最も摩擦係数の小さい亜鉛板どうしの摩擦力に付加された結果、後の試験ほど合計の摩擦力が大きくなったわけである。したがって、実際の設計にあたってはこのような亜鉛フィラーの変形を

考慮に入れるとともに、水平摩擦板とサドルのフランジの隙間は使用期間中に接触しないように十分な余裕をもたせる必要がある(図-1(b)参照)。第1回目の試験の最大摩擦係数は0.87で、摩擦板を機能させなかった場合の1.58倍である。

4. 水平摩擦板の効果についての考察

図-9はサドル、摩擦板およびケーブルの荷重関係を表わしたものである。摩擦板およびサドル底面に生じる摩擦力をそれぞれ R_f および R_s とすると、それらは次

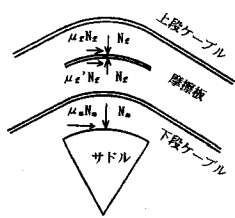


図-9 サドル上の荷重関係

式で表わされる。

$$R_f = (\mu_f + \mu'_f) N_f \dots\dots\dots (1)$$

$$R_s = \mu_s N_s \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 N_f および N_s はそれぞれ摩擦板およびサドル底面における垂直力の合計、 μ_f 、 μ'_f および μ_s はそれぞれ摩擦板上面、下面およびサドル底面の摩擦係数である。オイラーの式から求められる見掛けの摩擦係数 μ_a は、

$$\mu_a = (R_f + R_s) / N_s \dots\dots\dots (3)$$

である。式(2)と式(3)から N_s を消去し、 μ_s について整理すると、

$$\mu_s = (\mu_a R_s) / (R_f + R_s) \dots\dots\dots (4)$$

となり、右辺は測定値から求まる値であるから、式(4)によってサドル底面の摩擦係数 μ_s が求まる。

式(1)と式(2)を式(3)に代入すると、見掛けの摩擦係数 μ_a は、

$$\mu_a = \frac{(\mu_f + \mu'_f) N_f + \mu_s N_s}{N_s} = (\mu_f + \mu'_f) \frac{N_f}{N_s} + \mu_s \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、垂直力の合計はケーブルの初期張力に

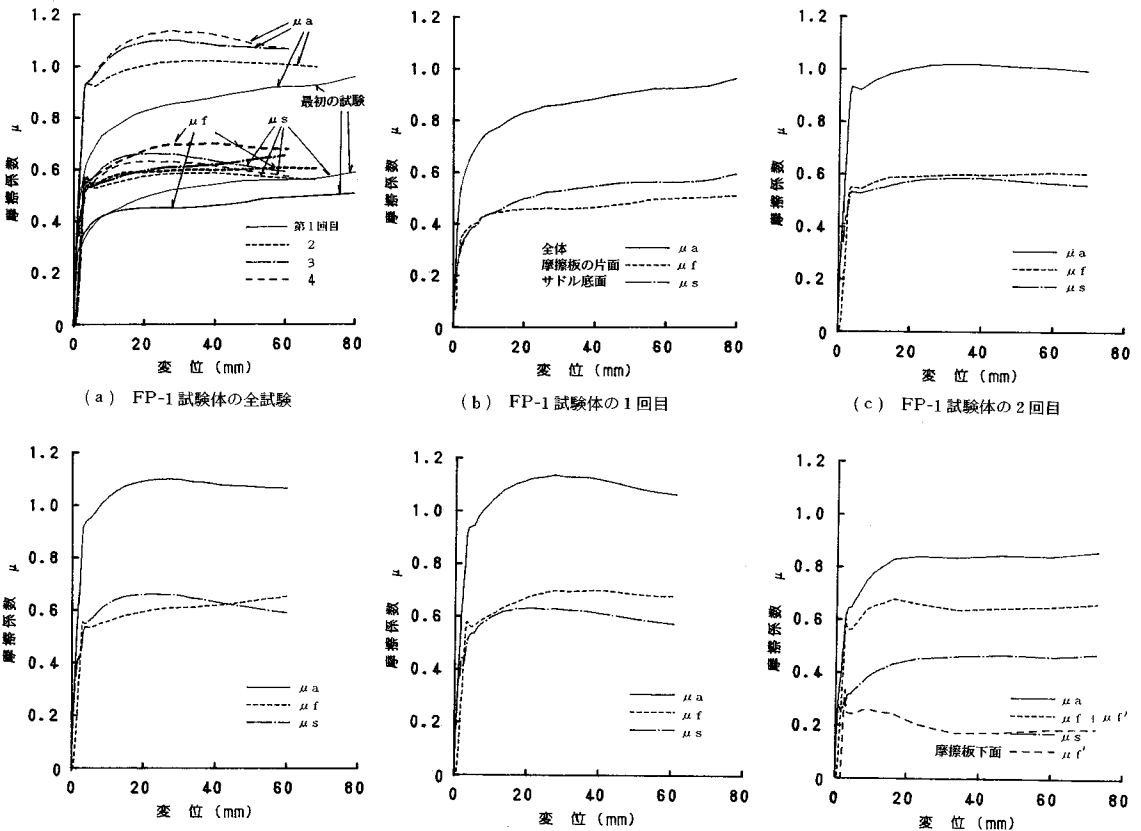


図-10 FP-1試験体の各摩擦面ごとに計算された摩擦係数-変位曲線および測定された見掛け上の摩擦係数-変位曲線

図-11 FP-2試験体の第1回目の試験の各摩擦面ごとに計算された摩擦係数-変位曲線および測定された見掛け上の摩擦係数-変位曲線

比例すると考えられるから、上段および下段のケーブルの初期張力をそれぞれ T_u および T_l とすると、

$$N_f/N_s = T_u/(T_u + T_l) \dots \dots \dots (6)$$

となり、これを式(5)に代入して整理すると、

$$\mu_f + \mu'_f = (\mu_a - \mu_s) \frac{(T_u + T_l)}{T_u} \dots \dots \dots (7)$$

となり、右辺は測定値から求まる値であるから、式(7)によって摩擦板両面の摩擦係数の和 $\mu_f + \mu'_f$ が求まる。

上段および下段のケーブルの初期張力は、それぞれのケーブルのワイヤーの応力の平均値に断面積を乗じることによって求めた。ワイヤーの応力の計算に用いたヤング係数は、 1.98×10^5 MPa⁹⁾である(なお、ワイヤーの断面積には亜鉛めっき層も含まれるので、見掛け上、鋼のヤング係数より小さくなる)。

FP-1 試験体の摩擦板の両面の接触する材料は同じであるので、それらの摩擦係数はほとんど同じと考えられる。したがって、それらの摩擦係数は、

$$\mu_f = \mu'_f = (\mu_a - \mu_s) \frac{(T_u + T_l)}{2 T_u} \dots \dots \dots (8)$$

である。この試験体のサドル底面および摩擦板の摩擦係数を、それぞれ式(4)および式(8)によって計算した結果を図-10に示す。また、この図には測定結果の見掛け上の摩擦係数 μ_a も示す。図-10(a)にすべての結果を示す。最初に行った試験以外で、摩擦板およびサドルのすべての摩擦曲線はかなりよく一致している。最初に行った試験を除いた摩擦板およびサドル底面の最大摩擦係数の平均と標準偏差は、それぞれ 0.63 ± 0.04 および 0.65 ± 0.05 で摩擦板を機能させなかった試験の結果とよく一致する(表-1)。図-10(b)から(e)に各試験ごとの摩擦曲線を示す。第1回目の試験および第2回目の試験では、摩擦板とサドル底面の摩擦曲線の傾向がよく似ている。第3回目と第4回目の試験は、摩擦板よりサドル底面の摩擦の方が早めに最大値に達している。したがって、摩擦板とサドル底面の摩擦力がそれぞれ最大値に達する変位は、一般には一致しない。すなわち、摩擦板付きサドルの全体の最大摩擦力は、摩擦板の最大摩擦力とサドル底面の最大摩擦力を重ね合わせたものより一般に小さい。しかし、ワイヤーと亜鉛を溶射した鋼の摩擦のように最大摩擦係数に達した後の低下が緩慢な場合、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と考えられる。

図-11にFP-2試験体の第1回目のすべり試験の摩擦板の上面、下面およびサドル底面の摩擦係数をそれぞれ示す。摩擦板の上面と下面の摩擦係数は次のような仮定で計算した。FP-1試験体の摩擦板の上面、下面およびサドル底面の3つの摩擦面はそれぞれ接触する材料は同じである。その場合、各面の摩擦係数と変位の関係は

ほぼ一致した。FP-2試験体の摩擦板の上面とサドル底面のそれぞれの摩擦面の接触する材料は同じである。

よって、摩擦板の上面の摩擦係数 μ_f とサドル底面の摩擦係数 μ_s を同じと仮定した。したがって、摩擦板下面の摩擦係数は次式となる。

$$\mu'_f = (\mu_f + \mu'_f) - \mu_s \dots \dots \dots (9)$$

摩擦板下面は亜鉛板どうしですべったのが観測された。摩擦板下面の摩擦係数と変位の関係は、前記の亜鉛板どうしのすべり試験の摩擦曲線に近い(図-7)。したがって、上記の仮定の妥当性が裏付けられる。FP-2試験体では、サドル底面の摩擦係数が最大値になるときに摩擦板下面の摩擦係数が最大値になるときは全く一致しない。全体の摩擦力が最大になったときには、摩擦板下面の亜鉛板どうしの面ではすでにその最大摩擦係数よりかなり小さい動摩擦係数になっている。このことから、ケーブルと亜鉛溶射した鋼の摩擦のように最大値に達するまで徐々に増加し、それから徐々に減少する摩擦挙動を示す面と亜鉛板どうしのように付着状態から急激に摩擦係数が減少する摩擦挙動をする面の2つの摩擦面が共存する場合、全体の摩擦力が最大となるときは後者の面の摩擦係数は動摩擦係数に等しいと想定される。また、共存する複数の摩擦面のすべてが後者のような面の場合、全体の摩擦力が最大になったときにおいて、それらの面のうちでかなりの面の摩擦係数は動摩擦係数に等しくなっていると推定される。

5. 結 論

吊橋の水平摩擦板付きサドルについて、実際とほぼ同じ荷重条件ですべり試験を行った結果、得られた主な結論は次のとおりである。

(1) 水平摩擦板の下面とケーブルの間には、高さ調整用の複数枚重ねた亜鉛フィラーがあるので、水平摩擦板の下面 (1200 g/m^2 (厚さ $170 \mu\text{m}$) の亜鉛を溶射した鋼面) と亜鉛フィラーが接触する面、亜鉛フィラーどうしが接触する面および亜鉛フィラーとケーブルが接触する面の3面ですべる可能性がある。

それらのうちで亜鉛板どうし(接触圧力が約 20 MPa)の最大摩擦係数が最も低く、平均で 0.25 であった。この摩擦挙動は、付着状態から急激に摩擦力が低下した後、典型的なスティック-スリップ現象を示した。試験の繰返しによって、とも金現象による摩擦力の増大を期待したが、ほとんど変化がなかった。これは、面接触のために接触圧力が小さいので、酸化膜や汚れがあまり破壊されず凝着が小さいままであったためと考えられる。しかし、接触面にグリットを挟むと非常に摩擦係数が大きくなる。したがって、実橋では、亜鉛フィラーどうしが接触する面および亜鉛フィラーと水平摩擦板の接触する面

にはグリッドを挟んだ方がよい。

ケーブルと亜鉛板をすべらせた場合（ワイヤー1本当たり約1 kN/cm, すなわちヘルツの接触圧力で約1000 MPa）の最大摩擦係数の平均は0.43で, 1200 g/m²（厚さ170 μm）の亜鉛を溶射した鋼面の場合（ワイヤー1本当たり約1 kN/cm, すなわちヘルツの接触圧力で約1200 MPaの条件で0.59）よりやや小さい。その摩擦挙動は, 最初のすべりでいったん少し摩擦力が低下するが, それから徐々に増加しほぼ一定の摩擦力ですべる。

(2) 水平摩擦板付きサドルのように摩擦面が複数ある場合, それぞれの面の摩擦力が最大と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, ケーブルと亜鉛を溶射した鋼の摩擦挙動のように最大摩擦力に達した後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と考えられる。

謝 辞：本試験の実施に際して, 東京製綱土浦工場の石井恒男係長をはじめとした加工課の皆さん, およびフジケンエンジニアリングの賀久三義氏と秦 耕一氏の協力を得ました。また, 玉川大学 赤岡 純教授, オイレス工業 安部 亘研究部長および新日本製鉄橋梁構造

部ケーブル技術室の杉田卓男室長・堂垣内光弘部長代理にはご助言および文献をいただきました。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, 投稿中。
- 2) たとえば, 土木学会：マタディ橋工事誌, 技報堂出版, 1986。
- 3) 田中・藤井：大鳴門橋ケーブルサドルの設計, 本四技報, Vol. 5, No. 18, 1981。
- 4) 本州四国連絡橋公団・本州四国連絡橋エンジニアリング：因島大橋橋体点検調査業務, 1986。
- 5) 波田野・鈴谷・河島：末広大橋上部工の設計と施工, 橋梁と基礎, 1975。
- 6) Podolny, Scalzi: Construction and Design of Cable-Stayed Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1986。
- 7) たとえば, 田中久一郎：摩擦のお話, 日本規格協会, 1986。
- 8) 曾田範宗訳・パウディン・テイパー：固体の摩擦と潤滑, 1985。
- 9) 本州四国連絡橋公団第2建設局児島工事事務所・新日本製鉄・神戸製鋼：下津井瀬戸大橋ケーブル工事詳細設計報告書, 1986。
- 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. 10. 23・受付)