

本州四国連絡橋公団 正会員 田島 二郎
 同 正会員 村瀬佐太美
 ㈱日本製鋼所 大西 敬三

1 緒言

長大吊橋のタワーリンク・ピン部は高荷重低速揺動運動を長期間受け、かつ構造上、軸受部材の交換が困難なことから、設計計画の段階で摩耗対策を十分考慮する必要がある。すなわち、中央径間1000m前後の道路・鉄道併用吊橋で連続補剛トラスを用いた場合、軸受部に加わる最大荷重は4000t前後に達し、かかる高面圧での低速揺動下の摩耗特性に関する調査は少なく、設計データの収集が必要となった。

そこで本報ではタワーリンク・ピン部の摩耗特性におよぼすピン材質の影響および軸受部の面圧の影響、さらに軸受部のクリアランス（ピン、ブッシュの径差）の影響などについて調査した結果を報告するものである。

なお、試験に際してはタワーリンク・ピン部の摩擦挙動を実験室的に再現するため、新たに摩耗試験機を設計製作し試験に供した。供試ピンは一般炭素鋼、高強度低合金鋼およびマルテンサイト系ステンレス鋼の3種とし、軸受材には固体潤滑剤を埋込んだ高力黄銅ブッシュをそれぞれ試験に供した。

2 摩耗試験機

表-1 タワーリンクピン実体と試験機仕様の比較

ピン部最大荷重を4000tと仮定し、長大吊橋ピン部の特殊な摩擦挙動を再現した摩耗試験機の仕様を実際の設計仕様と比較して表-1に示す。摩耗試験機の原理図を図-1に示すが、半径12mmのクランク運動をリンク機構でピン揺動運動を作る形式であり、荷重は万能試験機の圧縮力を用いた。試験中摩擦力および荷重を随時記録し、荷重のチェックおよび摩擦係数の算出を行なった。さらにブッシュ材の摩擦面から1mmの位置でサーモカップルにより温度測定を行なった。

項目	タワーリンクピン実体	試験機
最大荷重時最大面圧	520kg/cm ²	520kg/cm ² (試験面圧)
最大荷重	4000t	8t (試験荷重)
ピン直径	1300mm	60mm
軸受有効長さ	950mm	42mm
揺動振幅角	±1.9°	±1.9°
すべり振幅	±4.25mm	±2mm
平均すべり速度	~2.13mm/sec	2mm/sec

3 試験片

3.1 試験用ピン 供試ピンの材質として一般炭素鋼としてSF55、高強度低合金鋼としてSCM2相当および耐腐食性も考慮して高強度マルテンサイト系ステンレス鋼としてSUS431をそれぞれの鋼種の代表材として選定した。表-2に供試ピンの化学成分、機械的性質を示すが製造要領はJIS規格に準拠した。図-2aに供試ピンの形状を示す。

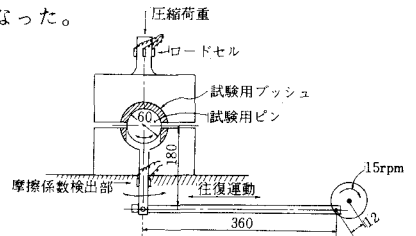


図-1 摩耗試験機原理図

3.2 試験用ブッシュ 軸受部面圧が高いことおよび長期間潤滑剤の有効な供給が困難であることから、ブッシュ金属ベースに高力黄銅を用い、かつフッ素樹脂系の固体潤滑剤を埋込んだ軸受(2分割型)を用いた。

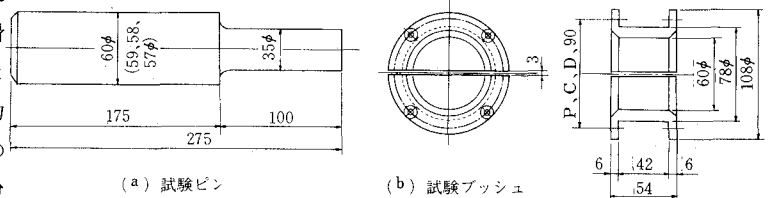


図-2 供試材寸法

表-3に化学成分と機械的性質を、図-2bに形状をそれぞれ示す。

4 試験方法

4.1 面圧の設定

すべり軸受の摩擦面での面圧の算出法として実験的、理論的検討が多くなされているが本報では余弦面圧分布(180°余弦分布による

90°有効面圧分布)の最大面圧を採用した。すなわち荷重F、直径D、有効軸受長さLとした場合、最大面圧Pmaxは(1)式で与えられる。

$$P_{max} = F / DL / \int_0^{\pi/4} \cos^2 \varphi d\varphi \approx 1.6 F / DL \dots\dots\dots (1)$$

試験面圧として表-1に示した標準面圧520kg/cm²の他、130、300、750kg/cm²の4条件とした。ただしピン、ブッシュの径差に関する試験で上記520kg/cm²の試験荷重と同じく8tと設定した。

4.2 摩耗量の測定 ピンの摩耗量は表面アラサを測定し、表面プロフィールから算出、同時に重量、直径の減少量を測定した。一方ブッシュ肉厚減少量を測定し、これをブッシュ摩耗量とし、合せて重量変化も測定した。

またピン、ブッシュの摩擦面の表面アラサの変化を小坂式表面アラサ計で測定し、摩耗特性を検討した。

4.3 摩擦係数の測定 試験中の摩擦抵抗をピン揺動アームに添付したトルク検出部から最大摩擦力を検出し、これを荷重で除して見かけ上の最大摩擦係数を求めた。

5 試験結果と検討

5.1 摩耗特性におよぼす材質の影響

標準面圧520kg/cm²一定とし10³~

10⁵回の断続および連続繰返し摩擦試験結果を図-4、5に示す。図-4は摩耗繰返し数に対するピン直径変化を示すが、長時間摩擦によりピン材質間に顕著な有意性が認められ、10⁵回ではSF55、SCM 2相当、SUS431の順に摩耗量が小さくなり、特にSUS431の10⁵回での摩耗量はSF55ピンの約1/2以下である。これらはピン材質選定の1つの方向を示唆するものと考えられる。なおブッシュの摩耗量も同様に検討したが、相手ピン材質による顕著な差は認められなかった。図-5にピン、ブッシュの摩擦面アラサの変化を示すがピン材質による高力黄銅ブッシュとの初期摩耗の差が明瞭に認められ、特にSF55では5×10⁴以降急速にアラサが増加する傾向にある。一方摩擦係数はピン材質に依らずほぼ0.06~0.07

表-2 供試ピン材の化学成分と機械的性質

ピン材質	化 学 成 分 (%)							機 械 的 性 質				
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Mo	$\sigma_{0.2}$ Kg/mm ²	σ_B Kg/mm ²	E ℓ %	RA %	Hv
SF55	0.36	0.30	0.55	0.14	0.12	0.19	0.05	31.7	58.0	28.0	48.5	158
SCM 2相当	0.43	0.28	0.78	0.23	1.07	0.16	0.22	69.1	89.3	2.2	62.8	260
SUS431	0.12	0.51	0.70	1.63	16.0	0.13	0.02	59.2	76.8	23.6	40.2	206

表-3 ブッシュ金属ベース(高力黄銅)の化学成分(%)と機械的性質

	化 学 成 分 (%)							機 械 的 性 質		
	Mn	Cu	Al	Fe	Sn	Pb	Zn	σ_B Kg/mm ²	E ℓ %	Hv
規格(ASTM B22Alloy B)	2.5/5.0	60/65	5.0/7.5	20/4.0	<0.2	<0.2	Bal	>75	>10	
実 績	3.30	63.4	5.43	2.75	<0.01	<0.01	2.49	84.9	20.8	247

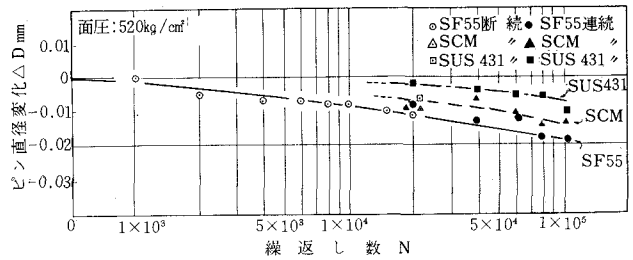


図-4 ピン摩耗量におよぼす材質の影響

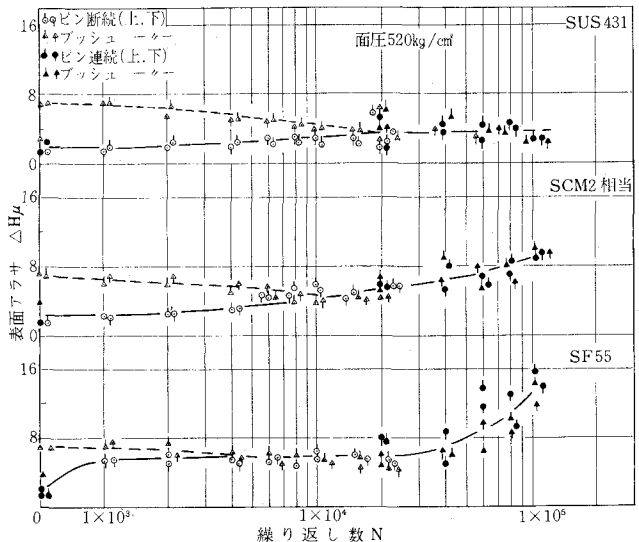


図-5 繰返し摩擦による表面アラサの変化

程度であり、固体潤滑剤の効果が認められた。
同様に摩擦面近傍での温度上昇は、 5×10^3 繰返摩擦後一定となり、高々 8°C 程度であった。

5.2 摩耗特性におよぼす面圧の影響

面圧を $130 \sim 750 \text{ kg/cm}^2$ に変えた時の SUS431 と高力黄銅ブッシュ材の摩耗量をそれぞれ図-6、7 に示す。その結果、面圧の増加に伴ってピン、ブッシュの摩耗量はほぼ比例的に増加する傾向にあり、 10^6 回摩擦後も異状な摩耗は認められなかった。一方、摩擦係数は低面圧ほど高い値を示すが、 0.09 を超えることはなかった。面圧 $300, 520 \text{ kg/cm}^2$ で 10^6 回摩擦後の摩擦係数は約 0.08 であった。

5.3 摩耗特性におよぼすピン、ブッシュのクリアランスの影響
ブッシュの内径を 60 mm と一定とし、SUS431 ピンの直径を $59, 58, 57 \text{ mm}$ とした時のピンの摩耗量を図-8 に示す。その結果、 10^5 回以下の摩擦ではピン径比 (=ブッシュ径/ピン径) が 1.034 以上になると摩耗量の増加が著しくなり、特にピン径比が 1.053 の場合、ピン、ブッシュの摩耗量とも 60 mm ピンの $2 \sim 3$ 倍となる。

この傾向は図-9 に示すようにクリアランス増加に伴う見掛け上の面圧の増加が原因の一つと考えられる。

6 結言

タワーリンク・ピン部の摩耗特性におよぼす材質面圧およびピン、ブッシュ材の径差の影響を特別に製作した摩耗試験機で調査した(軸受材に固体潤滑剤埋込型高力黄銅ブッシュを用いた)。その結果、

- (1) ピン摩耗量に対する材質間の有意差は表-4 に示すように顕著に認められ、SF55、SCM2 相当、SUS431 の順に摩耗量は小さく、SUS431 の場合 10^6 回摩擦後も極端な摩耗は認められなかった。
- (2) 面圧を $130 \sim 750 \text{ kg/cm}^2$ と増加すると摩耗量は比例的に増加するが異常摩耗に発展することはない。
- (3) ブッシュ径/ピン径の比が 1.034 以上になると摩耗量は急激に増加する傾向が認められた。

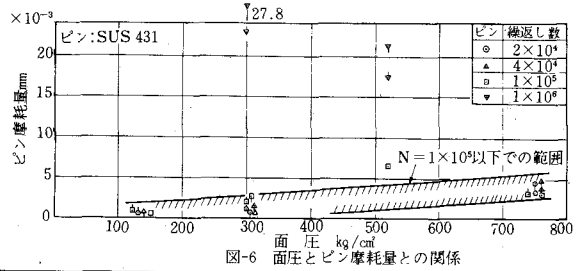


図-6 面圧とピン摩耗量との関係

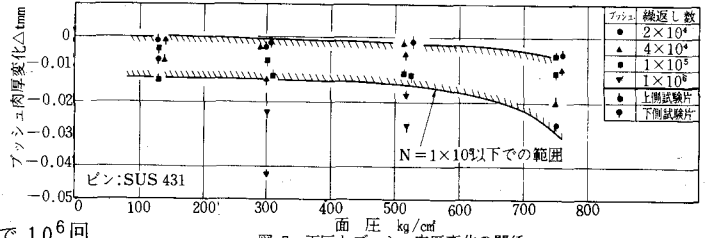


図-7 面圧とブッシュ肉厚変化の関係

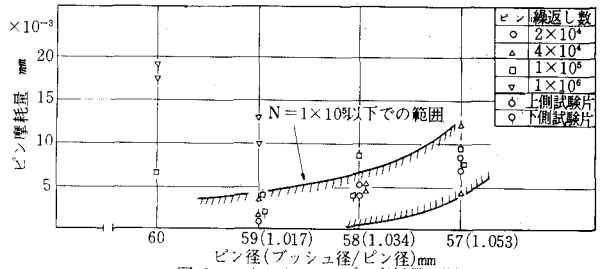


図-8 クリアランスとピン摩耗量との関係

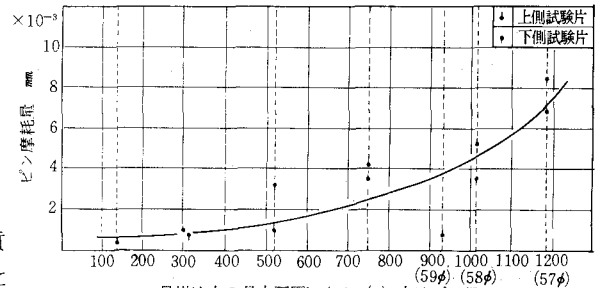


図-9 見掛け上の最大面圧 kg/cm^2 、() 内はピン径
接触幅測定結果より求めた許容支圧面圧におけるピンの摩耗量
(2×10^4 回試験、 750 kg/cm^2 以下は接触角 $\phi = 0 \sim \pi/4$ として計算)

表-4 長期間繰返摩擦での摩耗量と比摩耗量

材質	面圧 kg/cm^2	ピン径 mm	繰返 し数	摩耗量 (上下の平均)		比摩耗量※	
				ピン mm	ブッシュ mm	ピン	ブッシュ
SUS431	520	60	10^6	18.3×10^{-3}	22.5×10^{-3}	0.044×10^{-1}	0.053×10^{-1}
"	520	"	10^5	6.7×10^{-3}	11.6×10^{-3}	0.16×10^{-1}	0.28×10^{-1}
SF 55	520	"	"	29.1×10^{-3}	10.8×10^{-3}	0.70×10^{-1}	0.26×10^{-1}
SCM 2相当	520	"	"	10.0×10^{-3}	7.1×10^{-3}	0.24×10^{-1}	0.17×10^{-1}

※ $\frac{\text{mm}}{\text{kg} \cdot \text{m}}$

文献 1) 土木学会・本州四国連絡橋綱上部構造に関する調査報告書(別冊4) 吊橋タワーリンク設計の指針 (昭和51・3予定)

2) 樋浦：橋梁工学、コロナ社