

神戸大学工学部 正会員 西村 昭
 神戸市港湾局 正会員 島田喜十郎
 三菱重工神戸造船所〇正会員 古賀 太郎
 三菱重工神戸造船所 正会員 湯治 秀郎

1. まえがき

最近の鋼橋は、電子計算機の発達と、材料の高性能化等によりスレンダーな部材が設計できるようになつたが、反面これは振動ししやすい構造を生むこととなり、付随的に部材の疲労が問題となつてきた。部材の中でもつとも重要な部分は継手であるが、動的な状態における高力ボルト継手の挙動はまだ十分に把握されていない。したがつて、ここでは高力ボルト継手の摩擦面の処理状態と静的、動的強度との関係を実験的に求め、設計、施工管理上の資料を得ようとした。本試験では継手の摩擦面の処理状態を2種類とし、その静的、動的引張強度および、これに付随した諸現象を把握するようにした。

2. 供試材料と試験片

試験片に使用した鋼板はSS41(耐蝕性)で、その機械的性質は、表-1に示すとおりである。高力ボルト、ナットは、F9T M-22を用いた。表-1 母材の機械的性質

材 質	板 厚 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ	伸び (%)	屈曲 (180°)	衝撃値 (0℃, kgm)
SS41	9	30.5	45.0	28.5	Good	3.8
耐蝕性	16	28.9	47.7	26.0	Good	7.3

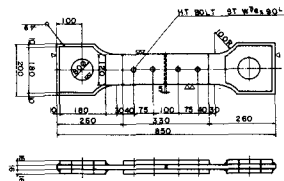


図-1 引張試験片形状

試験片の形状寸法は、図-1、2に、摩擦面の状態、数量などは表-2に示すとおりである。

表-2 試験片の摩擦面の状態

試験名	試験片	摩擦面の状態	組数
引張試験	S-1	ショットブラストのまま	3組
	S-2	ショットブラスト後 (15μ) ウオツシユプライマー 塗布	"
疲れ試験	D-1	ショットブラストのまま	12組
	D-2	ショットブラスト後 (15μ) ウオツシユプライマー 塗布	"

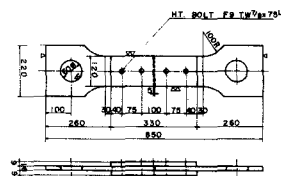


図-2 疲れ試験片形状

高力ボルトの締めつけは、トルク係数0.128、軸力17.0Ton、47.9kg-mにて行なつた。

3. 静的引張試験

試験はアムスラー200Ton型試験機を使用し、主板と側板のすべり荷重、すべり変位量、並びに破断荷重等を計測した。すべり変位の計測は、図-3に示すように、主板と側板の双方にダイヤルゲージ2個を取り付けて行なつた。計測の結果は表-3に、載荷曲線は図-4に示している。すべり荷重の判定は、負荷中に試験機の荷重指針の指示値が急激に低下したときの最大値をとり、静的すべり係数はその荷重を用いて計算した。破断荷重は、すべり変位の計測後、試験片が分離破断するまでの荷重をとつた。破断応力は、ボルト孔控除の

最小断面積で破断荷重を除した値である。

表-3 すべり荷重およびすべり係数

試験片 記号	すべり荷重 P_s (Ton)	すべり係数 μ	破断荷重 P_B (Ton)	破断応力 σ_B (kg/mm^2)
S-1-1	32.5	0.479	74.75	49.1
S-1-2	39.0	0.574	77.00	50.6
S-1-3	34.2	0.503	74.70	49.1
S-2-1	19.3	0.284	77.30	50.8
S-2-2	22.5	0.331	76.30	50.2
S-2-3	21.6	0.312	74.60	49.1

4. 動的引張試験（疲れ試験）

試験は室温中で片振り引張り疲れ試験を行なった。下限荷重は約 4~500kg で試験速度は 400c.p.m である。試験の目的は摩擦面の表面処理条件による疲れ強さの差、主板と銅板の摩擦面がすべり始める

ときの繰返し回数を求め、継手部の発熱、破断状況等についても調査することであつたが、予備試験の結果、静的引張試験によるすべり荷重では破断しないことが明らかとなり、試験は静的すべり荷重の 1.5 倍で行なつた。すべり変位の計測は、図-5 に示すように試験片の中央部の主板突合せ部に、直径 40mm のリング型変位計を取り付け、この出力を増幅器を経て、直立式電磁オシログラフに記録させた。また、荷重の検出は、ブラウン管式荷重検査器で直読するとともに、上記記録計に同時記録した。すべり荷重は図-6、7 に示す

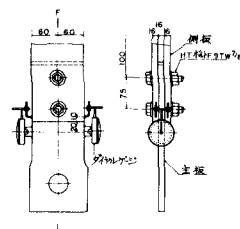


図-3 ダイアルゲージ取付詳細

ように、すべり変位が急激に増加する点の荷重を測定しこれをすべり荷重とした。動的すべり係数はこのすべり荷重を用いて計算し、繰返し荷重、繰返し応力、破断繰返し数、すべり荷重とともに表-4 に示している。すべり変位は、所定荷重設定までは大部分のすべり変形が終了し、ボルトとボルト孔が密着して、主板に塑性変形を生じた。試験片はすべりを生じた後、繰返し荷重により銅板の摩擦面が、摩擦によつて発熱したため、銅板の外縁面温度をアルコール棒温度計で計測した。その結果は、図-8、9 に示したとおりである。疲れ強さ、繰返し応力と破断までの繰返し数との関係は、図-9 に示したとおりである。この結果は、摩擦面の表面処理の条件によつて、疲れ強さに差があるが、両者ともバラツキの範囲が大きい。

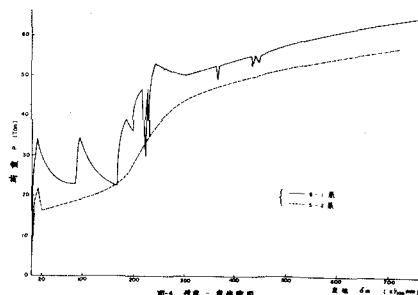


図-4 荷重・変位曲線

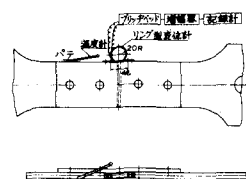


図-5 すべり変位および温度測定装置

5. 考 察

(1) 静的引張試験

1) 静的すべり係数

は、S-1系が 0.479~0.574 で、S-2系は 0.284~0.331 となつた。すべりの現象は表面処理の影響が大きく、また、図-4 に示すよ

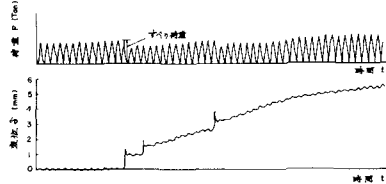


図-6 すべり現象（D-1系）

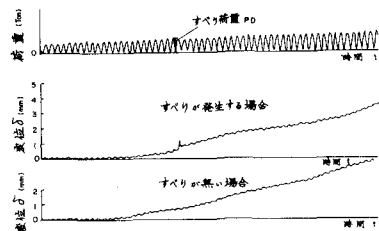


図-7 すべり現象（D-2系）

りに8-2系が1回のすべりであるのに、8-1系は数回のすべりを繰返し発生している。

2) 破断後の観察から、8-1系の摩擦面は金属相互の接触面であるため、ボルトの締付面圧が及ぶ範囲では、引かきによる焼付の現象を呈している。これに対し8-2系は全内面間の塗料膜面がせん断で破断している。

3) 引張試験による最大荷重は、全試験とも74~77tonの範囲で、表面処理条件の違いによる差は認められなかった。引張強度は 49.0 kg/mm^2 程度で、耐蝕性S841材の規格値の範囲内にある。

4) 破断部は、銅板端面に近いボルト孔の断面で引張りによるものであった。

(2) 動的引張試験(疲れ試験)

1) 繰返し荷重およびすべり変位の計測の結果から求めた動的すべり係数は、静的すべり係数と同様にD-1系よりもD-2系が小さい。すべりの現象は、図-6、7に示すように、D-1系が数回のすべりを発生するのにに対し、D-2系は1回か、または全然表われなないものもあつた。

2) 破断後の摩擦面を観察すると、D-1系は引かきによる大きな焼付きの痕跡が見られるのにに対し、D-2系ではわずかに焼付き現象があつたが、D-1系に比べるとその痕跡は非常に小さなものであつた。

3) 図-8、9に示すように、D-1系、D-2系の最高温度は70℃に達し、繰返し数が $10^4 \sim 10^5$ で破断したものもつとも多く、 10^6 まで繰返したものは 10^5 までにピーク値があり、それ以降は温度が低下する傾向を示した。この結果から摩擦面の温度は数百度に達しているのではないかと推定される。また温度が降下し始めると、すべり変位の振幅値も小さくなる傾向が見られる。

4) 図-10に示すように、D-1系とD-2系を比較すると、両者ともバラツキは大きい、D-1系がD-2系に比して約20%強い結果を示している。これまでのすべり荷重の計測結果からも明らかなように、表面処理の条件が高力ボルト継手の疲れ強さにも影響することが明らかになつた。この原因はD-2系が摩擦面間にすべり易い介在物があるため、すべり荷重が低くそのため低い荷重でボルトとボルト孔縁が密着して主板にかかる荷重割合が大き

表-4 疲れ試験結果

試験片記号	繰返し荷重 P (Ton)	繰返し力 G_N (kg/mm ²)	破断繰返し数 Nf (Cycle)	すべり荷重 P_D (Ton)	すべり係数 μ_D
D-1-1	25.0	16.4	3.5×10^4	計測せず	—
2	45.0	29.6	4.715×10^3	〃	—
3	50.0	32.9	9.685×10^3	〃	—
4	55.0	36.2	6.4×10^4	38.8	0.572
5	52.0	34.2	5.0×10^4	37.5	0.552
6	47.5	31.3	4.6×10^4	41.3	0.608
7	58.0	38.2	1.67×10^4	34.4	0.506
8	48.0	31.6	5.93×10^3	40.2	0.591
9	50.0	32.9	2.66×10^3	38.7	0.568
10	47.0	30.9	1.31×10^4	35.7	0.525
11	47.0	30.9	1.66×10^4	37.0	0.544
12	52.0	34.2	1.06×10^3	39.0	0.573
D-2-1	45.0	29.6	4.20×10^4	計測せず	—
2	35.0	23.0	2.52×10^4	26.2	0.386
3	40.0	26.3	1.58×10^4	23.8	0.350
4	50.0	32.9	2.34×10^4	25.4	0.374
5	37.5	24.7	9.29×10^3	26.8	0.390
6	43.0	28.3	2.4×10^4	25.4	0.374
7	39.0	25.7	7.83×10^3	25.4	0.374
8	39.0	25.7	5.07×10^3	現象なし	—
9	43.0	28.3	4.2×10^4	〃	—
10	43.0	28.3	2.7×10^4	22.0	0.324
11	37.0	24.3	6.47×10^3	23.0	0.339

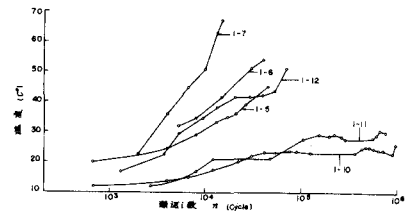


図-8 繰返し数と温度変化(D-1系)

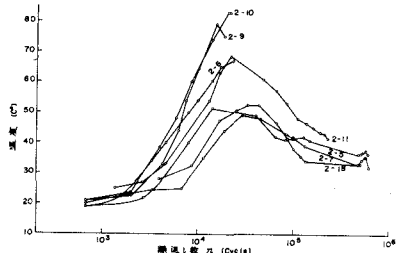


図-9 繰返し数と温度変化(D-2系)

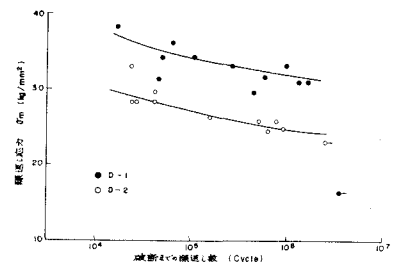


図-10 繰返し応力-繰返し数曲線

なつて疲れ破壊を生じるためと思われる。

5) 図-11に示すように、縦軸に引張強さ比 σ_B/σ_n (σ_n は孔除の最小断面積ですべり荷重を除いた応力、 σ_B は破断応力である。) 横軸に破断までの繰返し数をとると、高力ボルト継手の疲れ強さは、D-1系、D-2系とも平滑材と同等であることがわかる。一般にボルト孔等の応力集中のある材料は平滑材より疲れ強さが低下するのが普通であるが、本試験片のように、主板と側板がボルトで締付けられている場合には、すべりが生じたとはゆを力側板を流れているため、主板の荷重負担率が低くなつて応力集中の影響が小さかつたものと考えられる。

(8) まとめ

静的、動的引張試験を通じての結果を要約するとつぎのとおりである。

- 1). 静的すべり係数は、S-1系が0.479~0.574で、S-2系は0.284~0.331である。
 - 2). 動的すべり係数は、D-1系が0.506~0.608で、D-2系は0.324~0.390である。
 - 3). 表面処理条件によるすべり係数の比は、静的、動的ともK-S-1(D-1)系に対し、S-2(D-2)系は約60%程度の強度である。これは既報の値とほぼ同様の傾向を示している。
 - 4). 静的すべり係数に対し動的すべり係数は約15%程度強くなる。これは計算の基準荷重を、すべる瞬間の最大荷重にとつているからで、変動荷重としての有効値をこれの70%程度と考えると双方はほぼ同じ程度と見ることができる。
 - 5). 疲れ破壊はすべり荷重以下では生じなかつた。($N=2 \times 10^6$ まで)
 - 6). 疲れ試験時の試験片の温度上昇は、側板の外縁で70℃近く、摩擦面では数百度に達しているものと推定される。これは今後、連続的に振動するリベット継手等では考えるべき問題と思われる。
 - 7). 継手としての疲れ強さは、D-1系よりD-2系が弱くなるが、引張強さに対する時間強度の比は平滑母材と対比して両系とも十分なる強度を有している。
 - 8). 表面処理条件が、疲れ強さおよびその他の現象に影響することは明白である。このため継手摩擦面にウオッシュブライマーを塗布したまま高力ボルトを締付ける場合は、少なくとも16%程度ボルト数を増やす必要があると考えられる。
- #### 6. あとがき

以上の結果から高力ボルト継手摩擦面に介在物がある場合でも、その影響を無視できないことがはつきりした。継手すべり後の変化の状態、摩擦面の温度上昇等は現在までの試験とは違つた角度からの成果で、貴重な資料となつた。なお、本報告は著者らが計画している高力ボルトの現場施工管理上生ずる問題点を追求する一連の試験の成果の一部である。

参考文献 1) 田島二郎著 “高力ボルト摩擦接合解説”

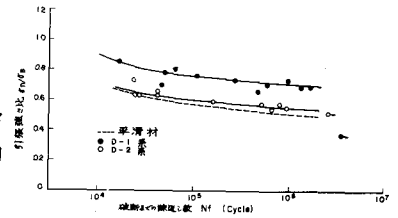


図-11 平滑材に対する疲れ強さの比較