

溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合継手の すべり特性および疲労強度

Slip Properties and Fatigue Strength of Galvanized Joints Fastened with High Strength Bolts

福島 公*

Isao Fukushima

村山 哲夫**

Tetsuo Murayama

浜岡 喬***

Takashi Hamaoka

Synopsis:

The hot-dip galvanizing process was applied to all steel members of the Akashi Service Area Bridge in Japan built in 1976. This report compares five types of joint surface treatment in terms of static and dynamic behaviors that were tested along with the planning and designing of the bridge. These types were arranged in decreasing order of the first slip load as follows: S5(sand blasted after masked galvanizing), S4(sand blasted without galvanizing), S2(sand blasted after galvanizing), S3(grit blasted after galvanizing), and S1(as galvanized). Only S2, S4 and S5 showed the slip coefficient over 0.4 which was stipulated in specifications for highway bridges(Japan Road Association, 1972). The fatigue strength of 28.5(S1), 24.0(S2) and 22.2kg/mm²(S5) were observed after 2×10⁶ loading cycles. Thus, the S2 type treatment was evaluated best in consideration of both anticorrosion and the mechanical behaviors, and applied to the construction of the above bridge in full measure.

1. ま え が き

川崎電機工業(株)が日本道路公団大阪建設局から受注した明石 SA (Service Area) 橋(昭和51年12月竣工)は、第2神明道路の本線上を横断する単純合成桁の道路橋で、支間39m、幅員11.5m、桁高2mを有し、鋼板桁から現場接合部の高力ボルトに至るまで、防錆対策としてすべて溶融亜鉛めっき(以下めっきと記す)が施されている。め

っきの橋梁への適用は比較的早く、Hビーム橋について多くの実績を重ねてきたが、本橋のような鋼板桁に関する施工例は非常に少ない。従来、これら橋梁の現場高力ボルト摩擦接合部(以下摩擦接合部と記す)には、材片接触面に接合面めっき(以下めっきと記す)処理がなされめっき高力ボルトが用いられているので、この部分が防錆対策上の弱点となっている。塗料による防錆処理の耐用年数は比較的短く、鋼橋の場合は一定期

• 日本道路公団本社企画課

*** 川崎電機工業(株)(現 川鉄鉄構工業(株))千葉工場工場長
(昭和52年8月16日原稿受付)

** エンジニアリング事業部建設技術部構造技術センター

間ごとの再塗装工事が必要とされている。しかし道路を供用しながらの工事は、経費が割高になるばかりでなく危険が増大し、本橋のような跨道橋では、本線上の走行車輛に対する危険防止の見地からも、再塗装工事はきわめて困難な条件下にあるといえる。

いっぽう、めっき鋼板の耐食性は環境条件および亜鉛の付着量によっても異なるが、塗料の3～4倍であると言われており、めっきは使用鋼材の防食維持管理の観点からは理想的な方法と考えられる。めっき橋梁に関する設計・施工上の問題は、日本道路公団と日本橋梁建設協会（以下橋建協と記す）の共同研究¹⁾により解明され、その対応策は設計施工示方書(案)²⁾の形でまとめられている。しかし、これは標準的な指針を示しているに過ぎないので、本橋の建設に際し、施工性と安全性に関する技術的問題を明らかにすることを目的として、実橋と同一条件のもとで以下の試験を計画した。

- (1) 鋼板桁に関するめっき試験
- (2) めっきボルトに関するトルク試験およびおくれ破壊試験
- (3) めっきボルトの腐食試験
- (4) めっき摩擦接合継手に関するすべり試験および疲労試験

これらを試験工事として川崎電機工業㈱が一括受注し、(1)、(2)のうちトルク試験のみを同社が担当し、高度な実験技術を必要とする(2)のおくれ破壊試験と(3)を当社技術研究所表面処理研究室が、(4)を当社構造技術センターがそれぞれ分担して実施した。

本報は(4)に関する結果をまとめたものである。

2. 既往の主な研究

2.1 すべり特性

めっき被膜は非常に軟らかく、強靱で延性に富む純亜鉛層と硬くてもろい合金層から構成されている³⁾。このような被膜の組成が、めっき摩擦接合継手に関するすべり耐力や疲労強度などの静的および動的な特性を特徴づけている。

めっき摩擦接合継手では、材片接触面に存在す

るめっきの軟質被膜が非常に変形しやすく、初期すべりに対するすべり係数 μ はきわめて小さい値を示す。W.H.Munse⁴⁾、D.J.Laurie Kennedy⁵⁾、吉田、田中⁶⁾らの研究によれば、 $\mu=0.09\sim0.30$ の範囲にあり、平均値で0.15程度である。しかし、いったんすべりが生じるとその後すべり係数は大きくなり、すべり耐力は急激に増加する。この現象はゆ着(lock up)と呼ばれ、継手部の材片が接触面で相互にすべることによりめっき被膜が変形密着し、なじみがさらによくなるためであると説明されている。また、初期すべり耐力の増加を図る方法としては、めっき後材片接触面に種々の表面処理を施すことが有効であり、これにはワイヤーブラッシング、サンドブラストなどが考えられる。W.H.Munse、P.C.Birkemoveは、ワイヤーブラッシングで $\mu=0.27\sim0.33$ 、サンドブラストで $\mu=0.45\sim0.53$ 、グリットブラストで $\mu=0.37\sim0.49$ のすべり係数が得られたとそれぞれ報告⁷⁾している。

摩擦接合継手のすべり耐力は、材片接触面の状態や粗さの影響を微妙に受ける。吉田、坂口、青山らは、統計的手法を用いてめっき摩擦接合継手のすべり試験結果を解析し、すべり耐力の増加に対するめっき表面の白錆の効果を明らかにした⁸⁾。さらに表面粗さとすべり係数に関する回帰分析の結果から、設計値0.4を確保するには、めっき表面において70S以上の粗さが必要であると結論づけている。

2.2 疲労強度

めっき被膜の純亜鉛層の下には、比較的にもろく亀裂が発生しやすいFeとZnの合金で形成されると層³⁾があり、繰返荷重により疲労亀裂の発生点となりやすいので、めっき鋼板は不めっき鋼板よりも低い疲労強度を示す。D.J.Laurie Kennedyは、板厚6.3mm、幅50mm、平行部長さ100mm、降伏応力度37kg/mm²(mill test 52.6ksi)の試験片を用いてめっき鋼板と不めっき鋼板の疲労試験を行い、前者の 2×10^6 回疲労強度を後者と比較すると、応力集中係数2.4の中央孔を有するノッチ付試験片の場合28%減、ノッチなし試験片の場合4.9%減であると報告⁹⁾している。

一方、橋建協では板厚22mmのSM 50YBとSM 58Qの鋼板に関し、Vノッチ付試験片とノッ

、チなし試験片を用いて、めっき被膜が疲労強度に与える影響を明らかにしている¹⁾。この研究結果によれば、 2×10^6 回疲労強度に対し、SM 50YB についてはノッチ付の場合めっき鋼板が 23.2 kg/mm^2 、不めっき鋼板が 17.7 kg/mm^2 で前者が 31% 高く、ノッチなしの場合めっき鋼板が 23.2 kg/mm^2 、不めっき鋼板が 35.2 kg/mm^2 で逆に前者が 34.1% 低くなっている。SM 58Q についてはノッチなしの場合めっき鋼板が 31.8 kg/mm^2 、不めっき鋼板が 44.2 kg/mm^2 で前者が 28.1% 低い。ノッチ付試験片については、不めっき鋼板の 2×10^6 回疲労強度が実測されていないので両者の比較はできないが、めっき鋼板が 22.8 kg/mm^2 を示し、SM 50YB ノッチ付めっき鋼板と同程度となっている。

SM 50YB に関するノッチ付めっき鋼板の 2×10^6 回疲労強度が不めっき鋼板のそれを上回ったのは、めっき被膜がノッチ先端を覆ったためこの部分の応力集中が緩和され、疲労強度がノッチの切欠効果よりもめっき層の亀裂発生に支配されたためと説明されている。

摩擦接合継手は、材片軸方向力が接触面の摩擦抵抗力で伝達されることとボルト孔の応力集中が緩和されることにより疲労に対して有利になる。また、めっきは材片間の lock up 効果²⁾により摩擦接合継手の疲労強度には影響を与えないと言われている。D.J. Laurie Kennedy の研究結果⁵⁾によれば、4 本の高力ボルト (ASTM A325、直径 $\frac{1}{2} \text{ in}$ 、長さ 2 in) を 2 列 2 段に配置して組立てた摩擦接合継手に関するめっき継手と不めっき継手の 2×10^6 回疲労強度はともに 31.7 kg/mm^2 となり、両者に差は認められなかった。

3. すべり試験

3-1 供試体

供試体は、実橋に採用された接合部の条件に合わせて材質を SM 50Y とし、寸法を Fig. 1 に示すようにボルト孔径 24.5 mm 、母材板厚 28 mm 、添接板板厚 22 mm と 19 mm 、幅 95 mm とした。これら接合面の表面処理は、実橋のめっき工程を考慮のうえ、めっき後の処理条件 2 種類 (S2, S3)、不めっき処理 1 種類 (S4)、比較材としてめっき

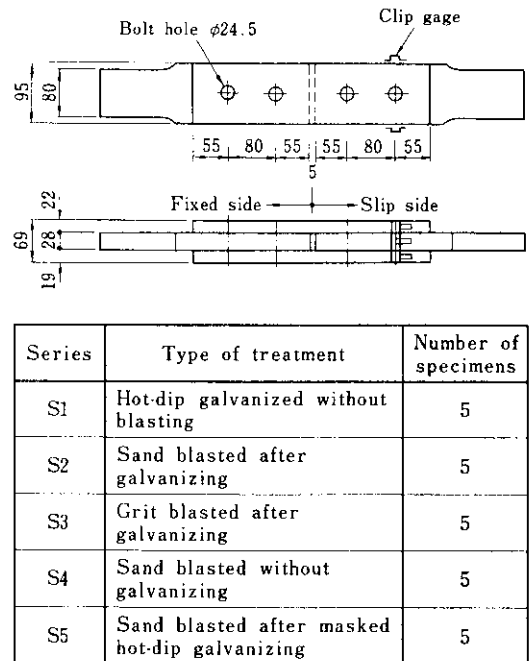


Fig. 1 Details of slip test specimens

のまま (S1) と従来法 (S5) を加えて Fig. 1 に示す 5 種類を採用した。ボルトは接合部片側あたり 2 本を 1 列に配置し、計測点数を減らして接合部のすべり状態が正確に観察、記録できるように非実験区間の固定側と実験区間のすべり側に分けて締付けた (Photo. 1 参照)。

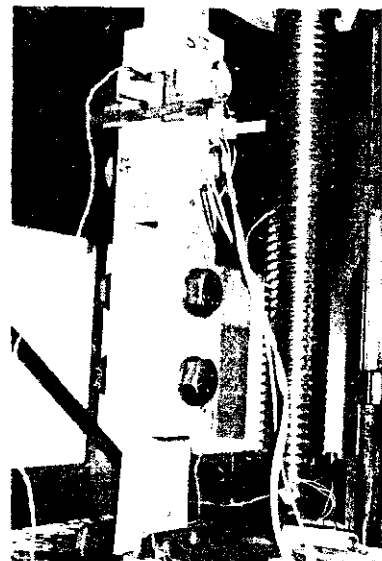


Photo. 1 Static tension test setup

前者には普通高力ボルト F11T×M22 を用い、いわゆる耐力点検法⁹⁾で締付導入軸力の増加を図った。後者には実橋と同一条件で製作しためっき高力ボルト F8T×M22 を用いて、ボルト軸部対称位置に貼付したひずみゲージ 2 枚 (Fig. 2 参

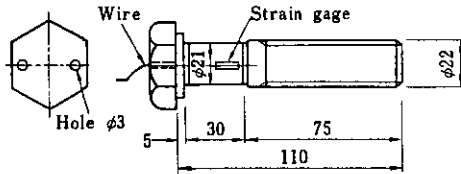


Fig. 2 Bolt specimens

照)の測定値により導入軸力を管理した。すなわち、較正曲線としてあらかじめ同一ロッドの供試ボルト 5 本の軸力-ひずみ曲線を求めておき、その平均曲線から標準導入軸力 18.2t に相当するひずみ量 2.380×10^{-6} を読み取り、この値を目標値としてボルト軸力を測定しながらトルクレンチで締付け、導入軸力のばらつきを最小にするように配慮した。

3・2 試験方法

本試験における第一の検討事項は、すべり係数に関しその大きさおよび表面粗さとの相関関係を求めることにあるが、参考資料としてボルト導入軸力の時間的変化および荷重-すべり曲線をも併せ求めることとした。試験には(株)島津製作所製 REH-50 形材料万能試験機を用い、供試体の軸方向に引張荷重を加えながら母材と添接板間の相対すべり量を供試体側面に装着したクリップゲージ(以下 C・G と記す)により X-Y レコーダーで自動記録し、さらに荷重 5t 間隔にボルト軸方向ひずみ量をストレインメーターで測定した。

すべり荷重は、急激なすべりが生じた場合(ボン荷重)あるいは荷重増加中に荷重計の指針が最初に停止したときの値として判定できるが、供試体がチャック間ですべるとこれがあいまいとなり、すべり荷重を確実に把握できなくなる。この点を考慮してチャックのなじみを良好にするため、初期載荷として 5~10t まで引張荷重を加えた後いったん 0 に戻してからあらためて載荷した。

すべり荷重が求めれば、接合部のすべり係数 μ は

$$\mu = \frac{P_s}{n \cdot N}$$

ただし P_s : すべり荷重 (t)

n : 摩擦面の数 (2)

N : ボルト導入軸力 ($2 \times 18.2t$)

より計算できる。

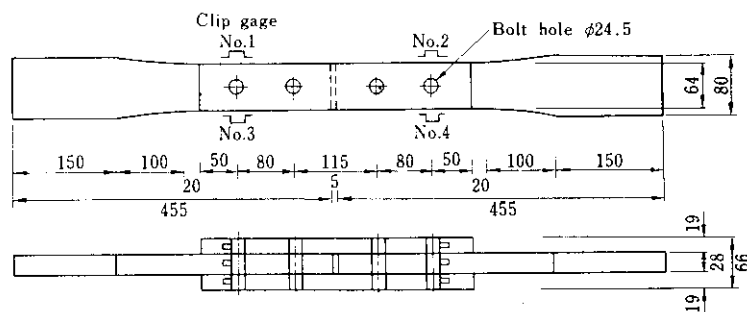
4. 疲労試験

4・1 供試体

供試体に用いるめっき鋼板自身の疲労強度は、既往の研究でめっき鋼板のそれよりも低下することが明らかにされている⁵⁾。しかし、2・2 で述べたように、めっき鋼板の疲労強度はめっき鋼板に比して 34% 低下するが、許容応力を下回らないこと、およびノッチ部については応力集中が緩和される傾向も見られること等を考慮して、母材には疲労に関して何ら問題がないと判断し、本実験の焦点を摩擦接合継手にしぼることとした。

S2, S3 シリーズのうち、前述のようにすべり係数が設計値 0.4 を満足した S2 シリーズを試験対象とし、比較のため S1, S5 シリーズを加えた 3 シリーズについて疲労試験を実施した。実橋はめっきを前提としているので S4 は省略した。供試体の材質、ボルトおよび板厚はすべり試験と同一であるが、供試体の板幅については、Fig. 3 に示すようにすべり試験の 95mm に対し疲労試験 64mm とした。これは、高応力部において繰返荷重に対する母材の最大応力がすべり応力を下回るように計画し、接合部のボルトが支圧状態に移行する前に母材で疲労破断が生じる断面としたためである。

本実験は疲労強度を求めるばかりでなく、繰返荷重に伴うめっき摩擦接合継手のすべり係数の変化および繰返数とすべり量の関係などの把握をも目的としたので、供試体の組立てに際しては、疲労試験後の供試体についてすべり係数が求められるように、すべり側および固定側の区別を廃止し両者とも同一条件で締付けた (Photo. 2 参照)。



Series	Specimen No.	Applied test		
		Slip test before fatigue test	Fatigue test	Slip test after fatigue test
S1	1		○	○
	2		○	○
	3		○	○
	4		○	●
	5		○	○
	6	○	○	○
S2	7		○	○
	8		○	○
	9		○	●
	10		○	○
	11		○	○
	12	○	○	○
	13	○	○	●
	14	○	○	○
S5	15		○	●
	16		○	○
	17		○	○
	18	○	○	○

● Failed at splice plate

Fig. 3 Details of fatigue test specimens

このようにすれば、疲労破断側の母材を取換えることにより、非破断側についてすべり試験が実施可能となり、繰返荷重を受けた摩擦接合継手に関するすべり係数が実測できる。また、一部の供試体に関しては疲労試験前にすべり試験を行い、いったんすべりを発生させたものについて疲労試験と50万回の繰返荷重を与えたのち再度すべり試験を実施するよう計画した。Fig. 3にこれら18体の供試体の試験内容を示すが、No.4, No.9, No.13, No.15の4供試体は添接板で破断したので、繰返荷重載荷後すべり係数の測定ができな

った。

4・2 試験方法

Rosenhausen型疲労試験機(100/150t)を用い、下限を2tとし、上限を変化させて片振り引張荷重試験を実施した。供試体を試験機に取付けてから、繰返荷重の載荷に先立ちめっき被膜接触部分のなじみをよくするため、上限値の1/2程度まで引張荷重を加えたのちいったん0に戻した。さらに、手動操作で所定の振幅の繰返荷重を数回負荷しながら異常なすべり現象が生じていないこ

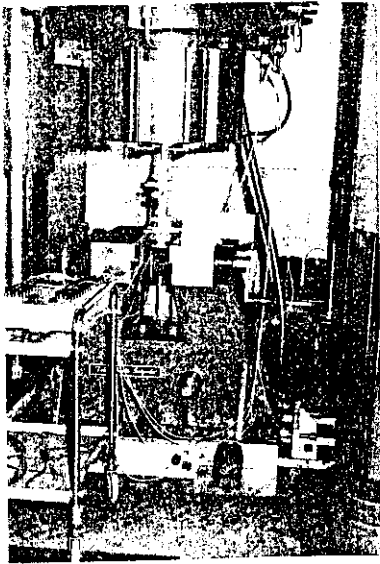


Photo. 2 Fatigue test setup

とを確認のうえ、300回/minの繰返速度で自動運転に入った。このときの静的な引張荷重および繰返引張荷重の載荷に伴う母材と添接板間の相対的なすべり量は、外側の2本のボルト軸位置で供試体両側面に取付けた4個のC-Gにより、荷重の一定繰返数で断続的に自動記録した。

5. 実験結果と考察

5.1 すべり試験

Fig. 4にX-Yレコーダーで記録した代表的な荷重-すべり曲線を示す。すべり係数の算定根拠としては、すべり荷重は一般に初期すべり発生時の荷重をとる。S5シリーズのようなショットブラスト処理の場合、ボン荷重と言われるように音を伴って急激にすべりが生じ、初期すべり発生時の確認はきわめて容易である。これに対してS1のように接合面にめっき被膜があると母材と添接板間のすべりが漸増するので、すべり荷重を明確に把握することは困難であり、したがってFig. 4の荷重とすべりの関係から求めなければならない。ここでは荷重-すべり曲線が水平になる点を初期すべりと考え、このときの荷重と標準ボルト軸力を用いてすべり係数を算出した。

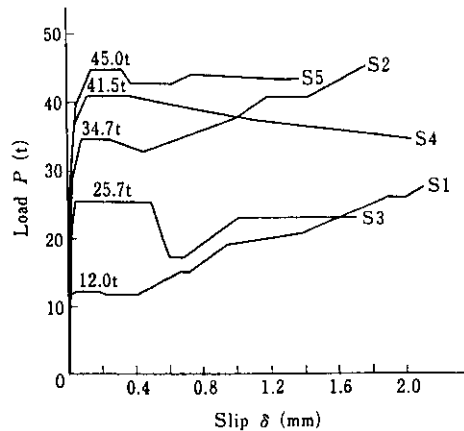


Fig. 4 Load-slip curves for static test

S1とS2では初期すべりが発生したのち、すべり耐力が徐々に増加し、ゆ着現象が顕著に現れてくる。しかし、S3についてはこの現象の発生は認められない。X-Yレコーダーの記録結果から算定すれば、初期すべり量の大きさはS1, S2, S3でいずれも0.05mm以下、S4, S5では0.1mm程度であるが、Fig. 4の荷重-すべり曲線からみて、めっき被膜が存在することにより比較的早くからすべりが発生することがわかる。

Fig. 5にすべり係数の測定値の平均と分布幅を示し、その際の導入ボルト軸力をFig. 6に示す。これら各シリーズの平均すべり係数は、S1が0.18, S2が0.46, S3が0.37, S4が0.59, S5が0.58で、そのばらつきもかなり大きい値となっている。め

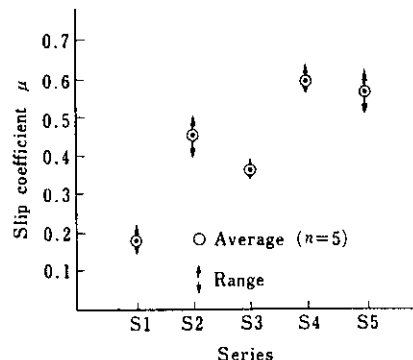


Fig. 5 Comparison of slip coefficients for different surface treatments

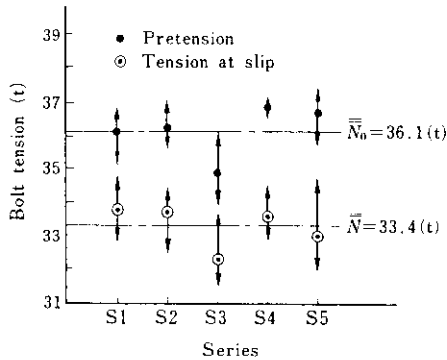


Fig. 6 Comparison of applied bolt tension for different surface treatments

めっき後のブラスト処理仕様を異にする S2 と S3 では S2 の方がすべり係数が大きく、設計値 0.4 をほぼ満足している。この原因としては、めっき後の表面処理法であるサンドブラストとグリットブラストの差、あるいはめっき被膜の厚さによる差などが考えられる。表面拡大写真による観察では S2 の方がきわめて細かい。また表面粗さ測定記録波形に関しても、山の高さはほぼ同値を示しているが、単位長さに含まれる山の数 S2 の方がはるかに多い。めっき被膜の厚さについては、S2 が 175~300 μ 、S3 が 200~380 μ であり、S3 の方が厚めになっている。

Fig. 7 に表面粗さとすべり係数の関係を示す。

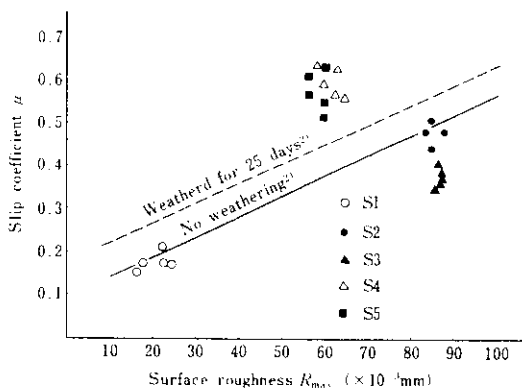


Fig. 7 Effect of surface roughness on slip coefficient

供試体の表面は橋建協が実施した実験条件²⁾に合せ、めっき後 3 週間大気中に暴露して白錆を発生させたが、本実験で得られたすべり係数は橋建協の結果²⁾よりも低い値となり、白錆がない場合のすべり係数と同一勾配を示した。この差の原因を明らかにすることは困難であるが、実橋に関する安全性の確認と製作上および施工上の管理目標は明確にし得た。

5.2 疲労試験

破断位置は、Table 1 に示すように

- (1) 母材の外側ボルト孔
- (2) 添接板の内側ボルト孔
- (3) 添接板端部よりわずかに内側に入った母材側の点

の 3 箇所に分類できる。(1)は最大応力位置であり、大部分の供試体はここで破断している。(2)の破断は S2 の供試体 No.9, No.13 の場合に生じた。これら供試体の破面観察により、添接板側のめっき表面の微細なきずを疲労亀裂発生点としていることが認められた。(3)の破断は S1 の供試体 3 体中 2 体に生じている。これら 2 体は、繰返荷重により母材と添接板の密着性が改善され、両者が一体化して外力を伝達して応力が平均化されたため、ボルト孔が弱点にはならなかったものと考えられる。

Fig. 8 の S-N 曲線から 2×10^6 回疲労強度を

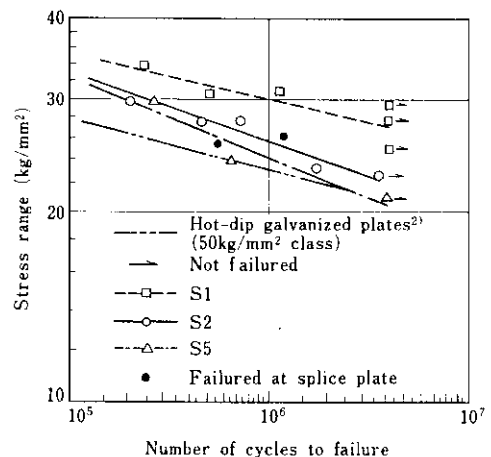


Fig. 8 S-N curves for different surface treatments

Table 1 Summary of fatigue test results

Series	No.	Load range (t)	Stress range (kg/mm ²)	Number of cycles	Failure modes
S1	1	12.5~0.5	31.6~1.3	4.9×10^5	
	2	10.5~0.5	26.6~1.3	4.0×10^6	Not failed
	3	11.5~0.5	29.1~1.3	4.2×10^6	Not failed *
	4	12.2~0.5	30.9~1.3	4.0×10^6	Not failed *
	5	14.0~0.5	35.4~1.3	2.4×10^5	
	6	13.0~0.5	32.9~1.3	1.13×10^6	
S2	7	35~2	31.6~1.8	2.03×10^5	
	8	28~2	25.3~1.8	1.74×10^5	
	9	31~2	28.0~1.8	1.21×10^6	
	10	27~2	24.4~1.8	3.7×10^6	Not failed *
	11	33~2	29.8~1.8	7.4×10^5	
	12	33~2	29.8~1.8	4.6×10^5	No-failure test *
	13	30~2	27.1~1.8	5.1×10^5	
	14	27~2	24.4~1.8	8.48×10^5	
S5	15	35~2	31.6~1.8	2.59×10^5	
	16	29~2	26.2~1.8	6.14×10^5	
	17	25~2	22.6~1.8	4.0×10^6	Not failed *
	18	27~2	24.4~1.8	5.0×10^5	No-failure test *

* Subjected to slip test after repeated loading

求めると、純断面で S1 が 28.5kg/mm²、S2 が 24.0kg/mm²、S5 が 22.2kg/mm² で、この順に低くなっている。また、これらの結果を母材の降伏点応力および引張強度に対する 10^6 および 2×10^6 回疲労強度の比で示せば Table 2 のようになり、いずれも母材の 2×10^6 回疲労強度よりも高い値を示した。これはボルトの高い導入軸力により、ボルト孔周辺の集中応力が緩和されることおよび

めっき被膜のゆ着現象により応力伝達が円滑に行われることのためと考えられる。本実験においてもめっき層の最も厚い S1 の疲労強度が高く、続いてめっき後サンドブラスト処理した S2、めっき層のない S5 の順となった。

繰返応力によるめっき被膜のゆ着現象は、すべり耐力の増加として現れる。疲労試験前後におけるすべり係数に関し、各シリーズ内で極端に飛び

Table 2 Fatigue strength in comparison with mechanical properties

	Mechanical properties (kg/mm ²)		Fatigue strength (kg/mm ²)		C/A	C/B
	A Y.P.	B U.T.S.	1×10^6 cycle	2×10^6 cycle		
S1	39.0	56.0	30.0	28.5	0.73	0.51
S2	39.0	57.0	26.0	24.0	0.62	0.42
S5	39.0	57.0	24.5	22.2	0.57	0.39

離れた実測値を除いて平均値と分布幅を示せば Fig. 9 が得られる。図中●印と△印は実質上同条件である。ばらつきが大きいものの、S2 と S1 では lock up 効果が認められ、いっぽう表面処理を施していない S5 については明瞭な効果は認められない。この結果は過去の試験データ^{4,5)}に照らしても妥当なものである。

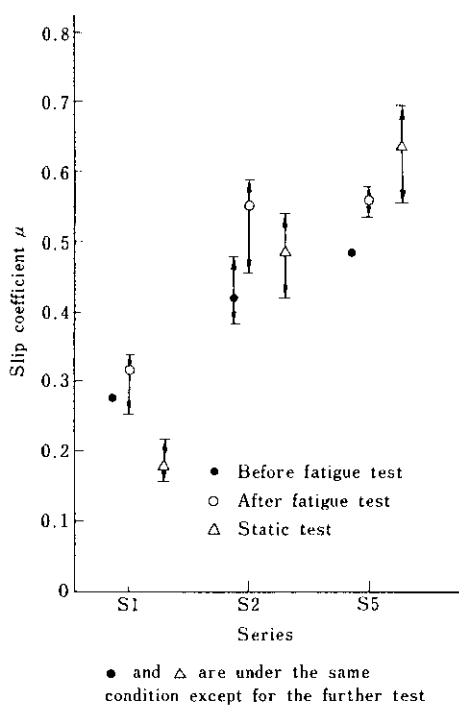


Fig. 9 Comparison of slip coefficients between static slip tests before and after fatigue tests

6. むすび

長期防食法として亜鉛めっきを施した全溶融亜

鉛めっき橋梁、明石 SA 橋の高力ボルト摩擦接合部についての安全性を確認するため、継手表面処理法の異なる 5 シリーズの静的すべり試験および片振り引張荷重の繰返試験を実施し、次のような結論を得た。

(1) すべり試験結果

- 初期すべり発生荷重は、不めっき処理後サンドブラスト処理 S5、めっきせずサンドブラスト処理 S4、めっき後サンドブラスト処理 S2、めっき後グリットブラスト処理 S3、溶融亜鉛めっきのまま無処理 S1、の順に低くなっている。
- めっき処理の供試体では、ゆ着現象により初期すべり発生後すべり耐力が増大する。
- すべり係数は、S2, S4, S5 の 3 シリーズで設計値 0.4 を満足した。

(2) 疲労試験結果

- 2×10^6 回疲労強度 (kg/mm^2) は、S1 (28.5), S2 (24.0), S5 (22.2) の順に低くなり、摩擦面にめっき被膜が存在することにより疲労強度が増大する傾向が認められる。
- 繰返荷重を受けた供試体のすべり係数は、S1 で疲労試験前 0.283, 疲労試験後 0.303, S2 で疲労試験前 0.424, 疲労試験後 0.587, S5 で疲労試験前 0.485, 疲労試験後 0.554 となり、S2, S5 の 2 シリーズでは疲労試験前に比して、すべり係数がそれぞれ 38% および 14% 増加したが、S1 ではあまり変化しなかった。

以上の実験結果および継手の防食性を併せ考えると、S2 の継手表面処理条件が最も有効と判断され、本条件に従って施工される SA 橋は所定の構造性能を十分満足し得ると考えられる。

最後に、本実験の計画から実施に際し、建設省土木研究所佐伯彰一室長、川崎重工業(株)吉田竜生氏から数々の貴重な助言をいただいたことを記し、深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団名古屋支社、日本橋梁建設協会：鋼板桁の溶融亜鉛めっき、(1973)
- 2) 日本道路公団名古屋支社、日本橋梁建設協会：溶融亜鉛めっき鋼板桁橋設計施工示方書(案)、(1973)
- 3) 日本金属学会、日本鉄鋼協会ほか：鉄鋼材料便覧、(1967)、228、[丸善]
- 4) W.H.Munse: Structural Behavior of Hot Galvanized Bolted Connection, 8th Int. Conf. on Hot Dip Galvanizing

- 5) D. J. Laurie Kennedy : High Strength Bolted Galvanized Joints, Proc. of ASCE ST12, (1972)
- 6) 吉田, 田中 : 高力ボルトによる溶融亜鉛めっき継手の接合について その4, 日本建築学会学術講演梗概集, (1975), 2292
- 7) W. H. Munse, P. C. Birkemove : High-Strength Bolting of Galvanized Connection, Symp. of Bolting Galvanized Connection and New Steel Design Specification
- 8) 吉田, 坂口, 青山 : 高力ボルトによる溶融亜鉛めっき継手の接合について その2, 日本建築学会学術講演梗概集, (1973), 2389
- 9) 西村昭ほか : 耐力点検出法による高力ボルト軸力のばらつき 国宝東大寺大仏殿瓦屋根新築工事, 川崎製鉄技報, 8(1976)1, 132

