

実験

高力六角ボルトすべり係数試験

森本 喜典¹⁾ 石井 博彦²⁾

高力ボルト摩擦接合は、鋼構造物の現場締手に用いられる一般的な接合方法であり、その継手の諸性質、摩擦接合面の状態による継手性能についても数多くの研究、調査がなされている。しかし、二面摩擦接合において、その各面の状態が異なるケースについてはあまり調査がされていない。

本報告は、二面の表面状態が各々異なる摩擦接合継手のすべり挙動について、一部故意にすべり易くしたものを含めて調査した実験結果を述べたものである。

その結果、一面がショット赤錆面で、他の一面に厚膜型ジンクリッチプライマーを塗布したものについては、十分なすべり係数が確保され、使用上問題がないことが確認された。また、一面を故意にすべり易くした場合は、継手強度はすべり易い面に支配されて、十分な強度を確保することができないことが確認された。

はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は、その摩擦接合面の状態により、継手性能が大きく変化する。

本試験は、高力ボルト摩擦接合継手（二面摩擦接合）において、一面を厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装、他の一面を通常の無塗装ショットブラスト赤錆面とする。試験体の①接合部のすべり係数②応力負荷時の本継手各部の応力分布③すべり発生時の挙動、などについて確認することを目的としたものである。

1. 試験方法

すべり試験は、一般に行われているすべり係数試験に準拠し、以下の手順により実施した。

1.1 試験体

(1) 材料

SM 50 A

(2) 形状、寸法

試験体の形状、寸法は、標準的な形状とした。また、中央部はスプライスに歪ゲージを貼付するため、25mmの間隔を設けた。試験体の形状、寸法を図-1に示す。

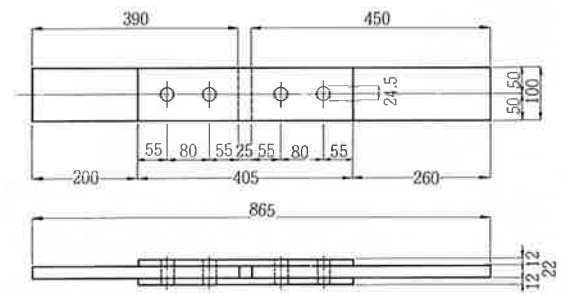


図-1 試験体の形状、寸法

(3) 試験体の表面処理および塗装条件

試験体の表面処理、塗装条件は、表-1に示すように4つのグループに分けた。グループAおよびグループDは、目的とする試験の試験体であり、グループB、Cの試験体は比較のための試験体である。

なお、グループDは一面を故意にすべり易くするためにグリスを塗布した。使用したグリスは、商品名ダフニーコロネックス EP No.0（万能グリス、リチウム（極圧剤））である。

(4) 表面処理条件

試験体接合部の表面処理はブラスト処理とし、研掃剤は表-2によった。

(5) 塗装

a. 塗装仕様

1) 大阪工場 橋梁課副課長 2) 大阪工場次長

塗装仕様は図-2に示すとおりとした。

b. 表面粗さ

ブラスト後の表面粗さは 70 μRz 以下とし Sh-2 を満足することとした。

c. 塗装膜厚

塗装は、厚膜型無機ジンクリッチペイント SDジンクプライマー ZE No.1500 (関西ペイント) を使用した。その目標膜厚は75 μとした。

表-1 試験体の表面処理と塗装条件

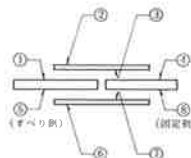
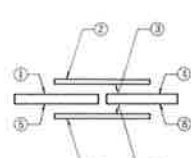
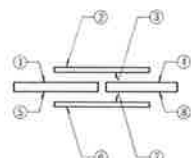

グループ	箇所	表面処理・塗装条件
A		①～④ショットブラスト後 SDジンクプライマー ZE No.1500を塗装 ⑤～⑧ショットブラストのみ
数量 (5体)		
B		①～⑧ショットブラスト後 SDジンクプライマー ZE No.1500を塗装
数量 (5体)		
C		①～⑧ ショットブラストのみ
数量 (5体)		
D	(Aと同様) グリス塗布 	Aグループの①面と⑤面 (①面に接する部分) を人工的にすべりやすく加工する。(グリス塗布)
数量 (6体)		

表-2 研掃剤

研掃材	ブラスト処理
ショット : TSH70 (粒度 0.84~0.59)	
グリット : TGE70 (粒度 1.00~0.42)	
混合比 = 50 : 50	



図-2 塗装仕様

(6) 表面粗さおよび塗膜厚の測定要領

表面粗さおよび塗膜厚の測定箇所を図-3に示す。

(7) 歪ゲージの貼付け

試験体の表面に、図-4に示すように単軸の歪ゲージを貼付け、試験時の試験体表面の応力分布を測定した。

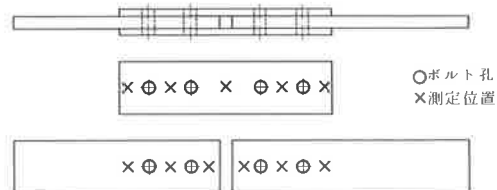


図-3 表面粗さ、塗膜厚測定位置

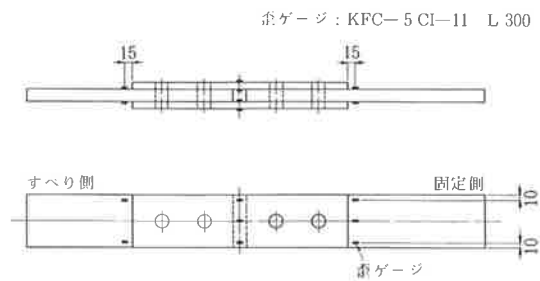


図-4 歪ゲージ貼付位置

1. 2 高力ボルト

試験に使用したボルトは、F10T M22×85 とした。使用するボルトは、すべり側、固定側とも図-5に示すように軸部に2枚の歪ゲージを直列に貼付けた。

各ボルトは、ボルト導入軸力を測定するため、予め引張試験機で、歪一軸力の校正曲線を作成し、導入軸力の管理に用いた。

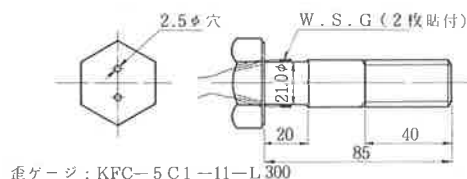


図-5 高力ボルト歪ゲージ貼付位置

1. 3 試験準備

(1) 塗装後の養生

試験体は塗装後、原則として屋外暴露とし、3週間以上経過してからボルトを締め付けた。

(2) ボルト締め付け後の放置時間

すべり試験は、ボルト締め付け後、原則として24時間経過した後行った。

1. 4 試験体の締め付け方法

(1) 試験体の組立に当たっては、摩擦面に油、塵等摩擦力を低減させるものを除去した。また、赤錆面の浮き錆はウエスで拭く程度とした。なお、グループDおよびグループBの一部の試験体では、すべり易くするために、塗装面にグリスを塗布した。

(2) ボルトの締め付けは、トルクレンチを用いて行い、ボルトの導入軸力は、静歪計を用いて歪で測定管理した。

(3) 締め付け順序は、次の通りとした。

a. 一次締め

4本のボルトに約16トン(約70%)の軸力を導入した。

b. 本締め

すべり側のボルトは、標準ボルト軸力22.6トンが導入されるように締め付けた。固定側のボルトは $22.6 \times 1.1 = 24.9$ トンのボルト軸力が導入されるよう締め付けを行った。

また、締め付けは試験体中央から端部への順で行った。

(4) 締め付け後、各試験体のすべり側および固定側に、すべり確認用のけがき線をいれた。

1. 5 すべり試験方法

(1) すべり試験は、試験体を引張試験機に垂直に取り付け、すべりが発生するまで徐々に引っ張り荷重を加えた。

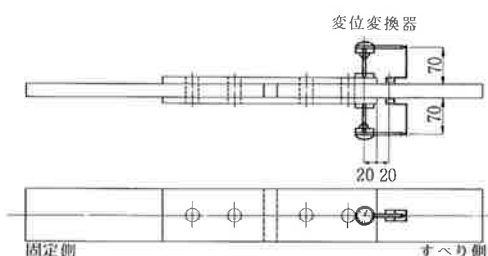


図-6 変位変換器取り付け位置

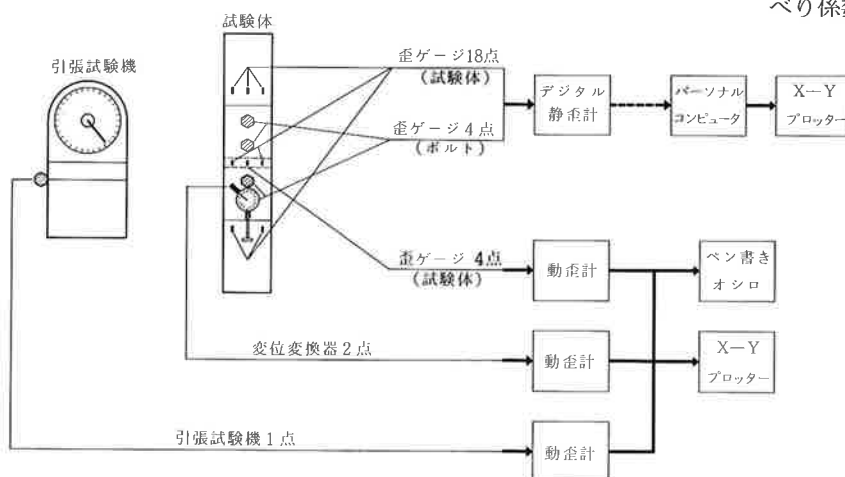


図-7 計測機器の構成ダイアグラム

(2) 試験開始前にプレロードをかけ、歪ゲージが安定した時点で試験を開始した。

(3) すべりが起こるまでの部材の変形量を、試験体に図-6のように取り付けしたダイヤルゲージ型変位変換器で測定した。

(4) ボルト軸力の導入のために用いた歪測定は、すべり試験開始からすべり発生まで継続して行い、すべり試験中のボルト軸力の変化を測定した。

(5) 引張応力の負荷時の部材表面の応力分布は、静歪計および動歪計で計測した。静歪計による歪量の測定は、原則として表-3に示す引張荷重の負荷時に、すべりが起こるまで継続して測定した。

(6) 計測機器の構成ダイアグラムを図-7に示す。

表-3 静歪測定荷重

単位: ton										
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
荷重	5	10	15	20	25	30	35	40	42	44
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
荷重	46	47	48	以後すべり発生迄 1 ton ごと						

1. 6 すべり荷重の確認

引張応力負荷時に、次のいずれかの現象が発生した時、これをすべり時点とし、このときの引張荷重をすべり荷重とした。

- a. 引張試験機の指針が停止したとき。
- b. すべり音を発生したとき。
- c. 試験体のけがき線がずれたとき。
- d. 変位変換器の記録に急激な変位量の変化があったとき。

1. 7 すべり係数の算出

すべり係数は次式により算出する。

$$\mu = P / (b \cdot m \cdot N)$$

$$\mu_1 = P / (b \cdot m \cdot N_1)$$

μ : 標準ボルト軸力より求めたすべり係数

μ_1 : すべり試験時ボルト軸力より求めたすべり係数

P : すべり荷重

b : ボルト本数 (= 2)

m : 摩擦面の数 (= 2)

N : 標準ボルト軸力
(22.6ton)

N_1 : すべり試験時ボルト軸力

2. 測定結果（すべり試験のための準備）

2.1 試験体番号および面番号

試験結果のデータの整理に用いた試験体番号および面番号は、図-8に示すとおりである。

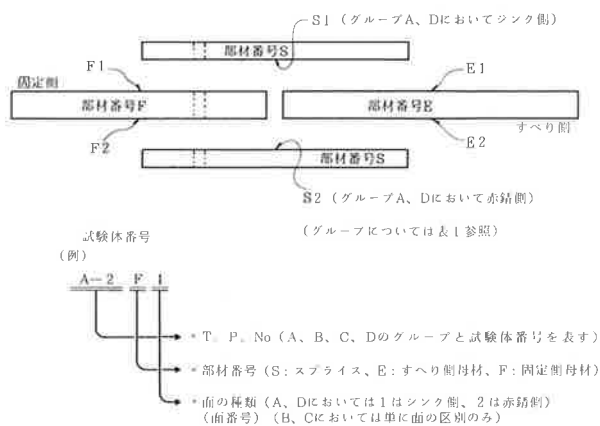


図-8 試験体番号および面番号

2.2 表面粗さおよび膜厚測定結果

各試験体の表面粗さおよび膜厚測定結果を、表-4に示す。表面粗さは各測定点とも基準値70 μ 以下の値を示している。膜厚は、目標値75 μ に対して厚目の値である。

図-9に、表面粗さ測定データの一例を示す。

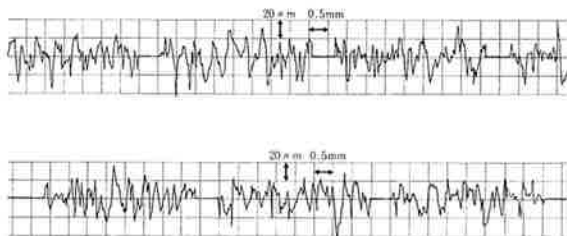


図-9 表面粗さ測定データの一例

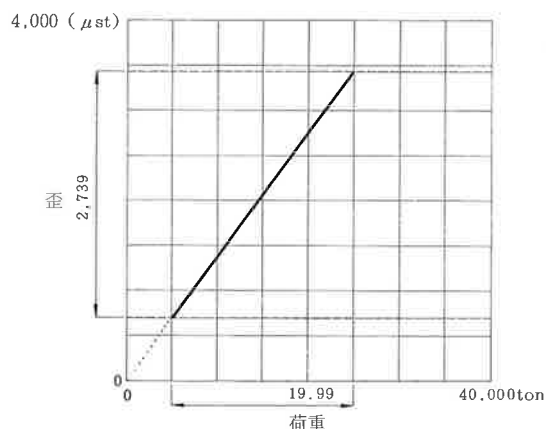
2.3 高力ボルトの歪-荷重較正結果

図-10(a)に高力ボルトの歪-荷重較正曲線の一例を示す。横軸に引張荷重、縦軸にボルトの歪量を取ったものであるが、ほぼ直線を示している。歪-荷重曲線については、使用する全てのボルトに対して求めた。

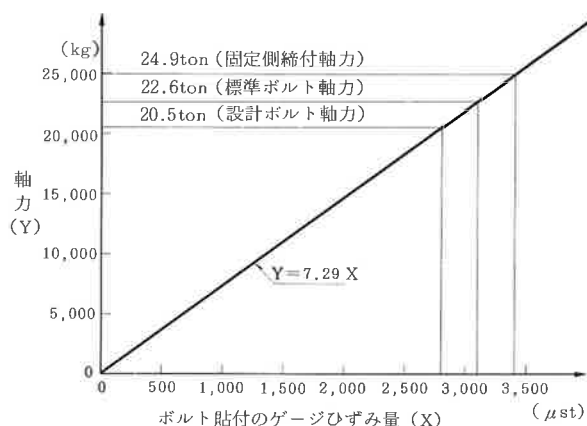
図-10(b)は、得られたデータを整理し、ボルトの歪量から軸力を求めるために作成した歪-軸力較正曲線である。22.6トンの標準ボルト軸力を導入するためには、3099 μ stの歪をボルトに対して与えればよいことが分かる。

2.4 締め付け直後のボルト軸力変化

図-11は、高力ボルト締め付け直後からのボルト軸力の変化を歪量で示したものである。この図から、ボルトの軸力は締め付け直後30分の間に大きな低下を示し、それ以降はほとんど目だった低下はみられない。したがって、ボルト締め付け後1日たてば、すべり試験に対するリラクゼーションの影響はほとんど無いと考えられる。



(a) 計測データの一例



(b) 計測データの平均化

図-10 ボルト歪荷重較正曲線

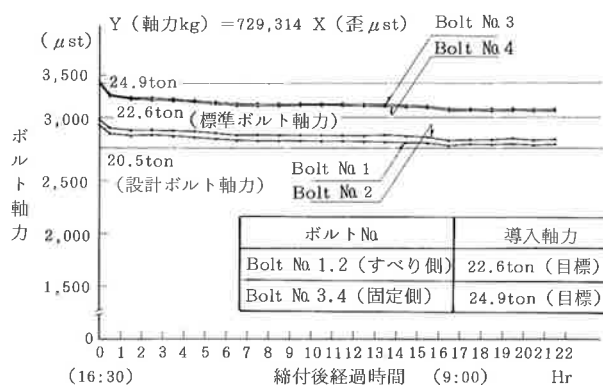


図-11 ボルト軸力の時間的変化

3. 試験結果および考察

3.1 すべり荷重およびすべり係数

すべり試験を行った試験体のすべり荷重およびすべり係数の一覧表を表-5に示す。また、表面状況とすべり係数との関係を表-5からまとめたものを表-6に示す。

表-5 すべり荷重とすべり係数

TP No	表面状況	すべり荷重 P(t) (注4)	試験時軸力 N1(t) (注1)	すべり係数 μ (注2)	試験時軸力に対するすべり係数 μ_1 (注3)	備考
A-1	一面ジンク	52.25	21.7	0.58	0.60	
A-2		56.50	20.9	0.63	0.68	
A-3		55.35	21.7	0.61	0.64	
A-4		51.51	21.9	0.57	0.59	
A-5		52.70	21.2	0.58	0.62	
B-1	二面ジンク	53.10	21.2	0.59	0.63	
B-2		58.40	21.3	0.65	0.69	
B-3		53.60	20.2	0.59	0.67	
B-4		24.20	20.6	0.27	0.29	両面グリス塗布
B-5		28.55	21.0	0.32	0.34	両面グリス塗布
C-1	二面ショット	57.30	21.6	0.63	0.66	
C-2		46.35	—	0.51	—	錆発生させず
C-3		58.35	22.3	0.65	0.65	
C-4		58.30	21.2	0.64	0.69	
C-5		60.65	22.1	0.67	0.69	
D-1	一面ジンク トグリス	35.25	21.6	0.39	0.41	ジンク面グリス ショット面 錆発生させず
D-2		48.30	21.4	0.53	0.56	
D-3		35.24	21.3	0.39	0.41	ジンク面グリス
D-4		38.60	21.5	0.43	0.45	ジンク面グリス
D-5		55.20	21.3	0.61	0.64	Aと同じ
D-6		23.77	21.8	0.26	0.27	ジンク面グリス

(注1) N₁ はすべり試験直前の値 (試験時軸力)
 (注2) ボルト軸力を標準ボルト軸力22.6TONとして計算 (μ)
 (注3) ボルト軸力をN₁として計算 (μ_1) (試験時軸力に対するすべり係数)
 (注4) Pは1回目のすべり荷重
 〇の試験体はデータ解析のため表面状況が標準状態と異なる

表-6 表面状況とすべり係数

表面状況	個数	μ (注2)		μ_1 (注2)		該当試験体
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
一面ジンク	5	0.59	0.02	0.63	0.03	A-1~A-5
一面ショット (赤錆)	3	0.61	0.03	0.66	0.02	B-1~B-3
二面ジンク	4	0.65	0.01	0.67	0.02	C-1 C-3~C-5
二面ジンクトグリス	2	0.30	0.03	0.32	0.03	B-4, B-5
一面ジンク+グリス	4	0.37	0.06	0.39	0.07	D-1, D-3
一面ショット (赤錆)	1	0.51	—	—	—	D-4, D-6
二面ショット (錆なし)	1	0.51	—	—	—	C-2
一面ジンク	1	0.53	—	0.56	—	D-2
一面ショット (錆なし)	1	0.61	—	0.64	—	D-5 (注1)

注1 スプライン側のジンク膜厚平均 174.4 μ
 注2 μ : 標準ボルト軸力 (22.6ton) に対するすべり係数
 μ_1 : 試験時軸力に対するすべり係数

表-6から、すべり係数は二面ショット (赤錆) が最も大きく、その次に二面ジンクと一面ジンク+一面ショット (赤錆) が同じ程度である。

しかし、すべり試験直前のボルト軸力から算出したすべり係数 μ_1 では、二面ショット (赤錆) と二

面ジンクとではほぼ同程度で、一面ジンク+一面ショット (赤錆) がそれよりやや低い。しかし今回の試験目的の一つである、すべり係数の確認という点からみれば、一面ジンク+一面ショット (赤錆) の接合部における最小のすべり係数は 0.57 であり、所要のすべり係数 0.4 に対し、十分なすべり係数が確保されているといえる。

なお、二面ジンクの、すべり試験時のボルト軸力から求めたすべり係数 μ_1 と、標準ボルト軸力より求めたすべり係数 μ で、 μ_1 の増加が他のグループより大きくなったのは、ジンクの塗膜が厚いため、ボルトの締め付け時からすべり試験までの間の軸力の低下が大きいためである。

ショット面に赤錆を発生させなかった試験体では、すべり係数 (0.4) は確保されているものの、赤錆を発生させたものよりすべり係数が約 0.1 低下している。今回実験を行った範囲では、二面ショット (錆なし) と一面ジンク+一面ショット (錆なし) とで、ほぼ同じすべり係数であることから、ショット (錆なし) 面のすべり係数が全体のすべりを支配しているものと考えられる。

ジンク面にグリスを塗布したものは、さすがにすべり係数 0.4 を確保するのは難しいようである。

なお後述するが、一面ジンク (グリス) + 一面ショット (赤錆) の試験体は 2 回に分けてすべりが生じており、表-5 および表-6 の値は一回目のすべり時のものである。

3.2 変位量

試験体には、S1 側 (グループA、Dにおいてはジンク側) S2 側 (同上ショット側) に 2 個のダイヤルゲージを取り付け、引張負荷時のスプラインと母材との変位量を調査した。

すべり発生時の変位量は、試験体の初期曲がりあるいはジンク材 (グループB) において明快なすべり挙動がないため、詳細な検討ができなかった。一方、すべり係数約 0.6 を確保した試験体においては約 0.2~0.4mm 変位した後急激なすべりが発生するようである。ここでは各試験体の特徴的なすべり挙動について定性的に述べる。

(1) 二面ショット (赤錆)

図-12は二面ショット (赤錆) の試験体の変位挙動を示す一例である。このタイプの試験体は図に示すように、ある変位量まで伸びると急激に大変位を生じてすべる。計測は0.2秒毎にデータを採取してプロットしているため、すべりが発生すると長くとも0.2秒以内に 1 mm以上の大変位を生じてすべっている。このタイプの試験体はすべり音を発生しなからすべった。

(2) 二面ジンク

図-13は二面ジンクの場合である。二面ショットの場合に比べて、ゆっくりすべっていることが図からわかる。このような場合、すべり発生時の変位量を特定しにくい。また、図-12と比べてすべり量の増加に応じて荷重が徐々に落ちていくのがよく分かる。なお、このように徐々にすべった試験体の場合、すべり音は発生しなかった。なお、二面ジンクの1体がすべり音を発生したものがあつた。その場合は先に述べた二面ショット(赤錆)の場合と似た変位曲線を描いた。

(3) 一面ジンク+一面ショット(赤錆)

図-14は、本試験の目的とする一面ジンク+一面ショット(赤錆)の試験体のダイヤルゲージ出力を描いたものの一例である。基本的には図-12の二面ショット(赤錆)と用じような形態を示しているが、すべり発生直前の変位量の増加は図-12に比べてやや大きいようである。

このタイプの試験体で、ジンク面とショット(赤錆)面とでは使用したアナライジングレコーダーの測定間隔0.2秒の範囲内で、同時に大きなすべりを発生しており、実用的にはすべり発生時期は二面とも同時であるとしてよいと思われる。

(4) 一面ジンク(グリス)+一面ショット(赤錆) ジンク面にグリスを塗布して、故意に一面をすべり易くした例を図-15に示す。この時すべり係数(μ)は0.43であつた。この試験体の場合、すべりは二段階に分かれて発生したが、すべりはジンク(グリス)面と赤錆面とで同時に発生していることが図-15から分かる。

図-16は、グリスを塗らない(3)項で述べた試験体で二段階に分かれすべりが発生したケースを示す。この場合の一回目のすべり量は少なく、またどちらの面のすべり量もほぼ同一である。それに比べて図-15のグリスを塗った試験体の場合、一回目のすべりからグリスを塗ったS1面のすべり量の方がショット(赤錆)面より大きい。どちらの場合も最終的なすべりはS1面(ジンク+グリス面)の方が大きくなっている。

最後に特殊なケースであるが、スプライスが一面だけすべった場合を図-17に示す。グリスを塗布したS1側が、時間軸で142.8秒のところ約0.3mmすべっている。しかし、ショット(赤錆)のS2側はほとんど変化せず、すべっていないことが分かる。この試験体は、この後一旦荷重を除いた後再度引っ張り、最終的なすべりを生じさせたが、そのときはS1側、S2側同時にすべりを

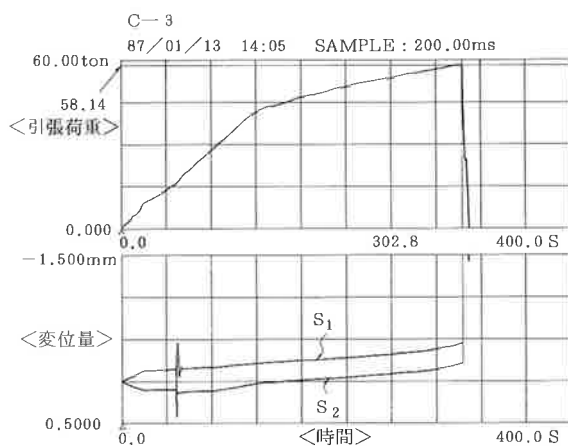


図-12 二面ショット(赤錆)

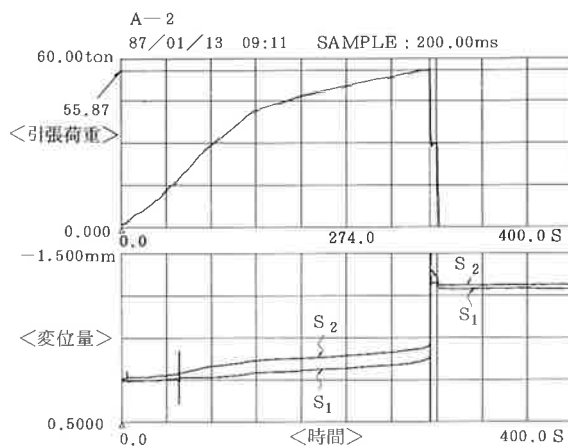


図-14 一面ジンク+一面ショット(赤錆)

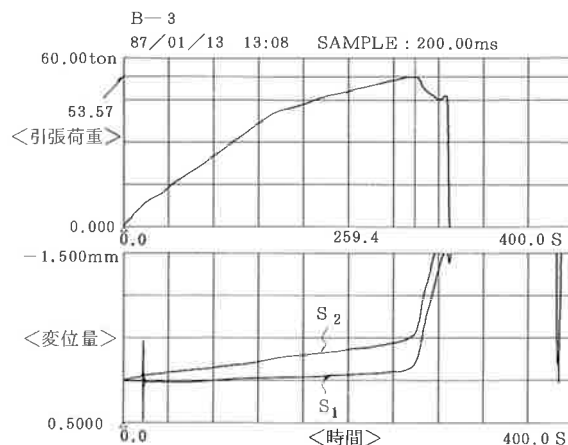


図-13 二面ジンク

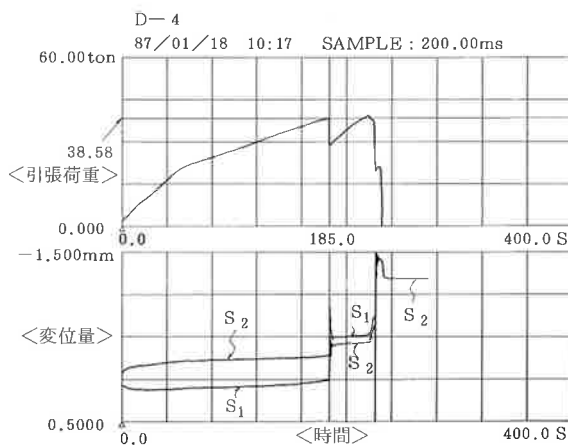


図-15 一面ジンク(グリス)+一面ショット(赤錆)

発生した。このときS2側のすべり量がS1側のすべり量の約2倍あり、ショット（赤錆）のS2側のすべりの勢いでS1側もすべったのではないかと考えられる。

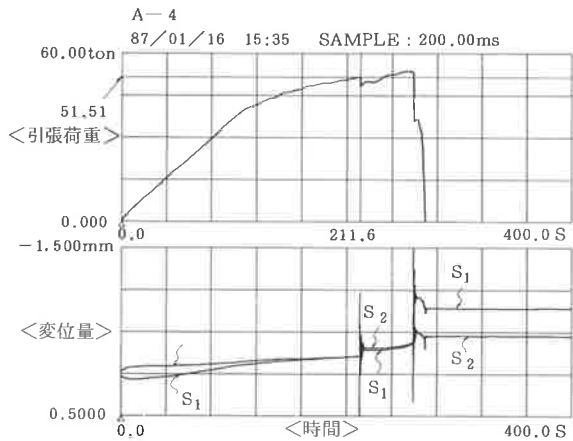


図-16 一面ジンク+一面ショット（赤錆）

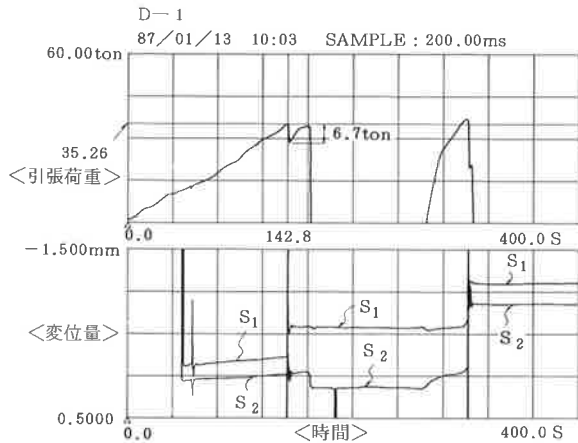


図-17 一面ジンク（グリス）+一面ショット（赤錆）

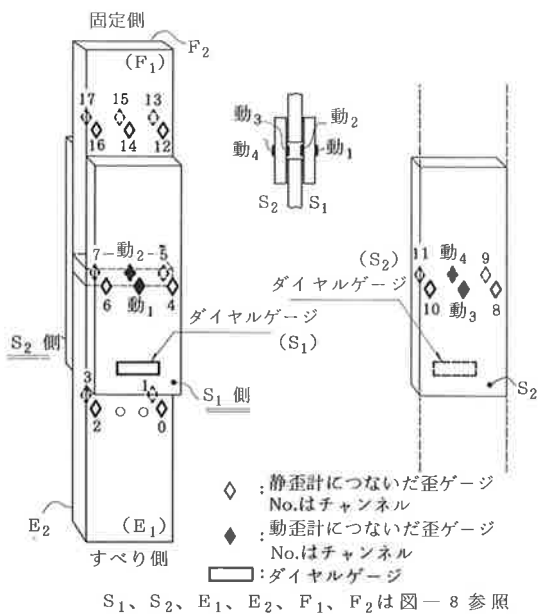


図-18 試験体歪ゲージ配置

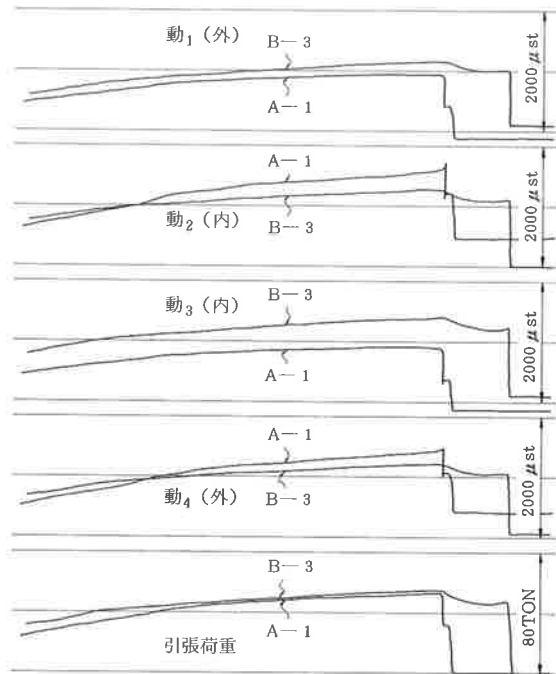
3.3 試験体表面の歪および応力変化

(1) 試験体歪ゲージ配置

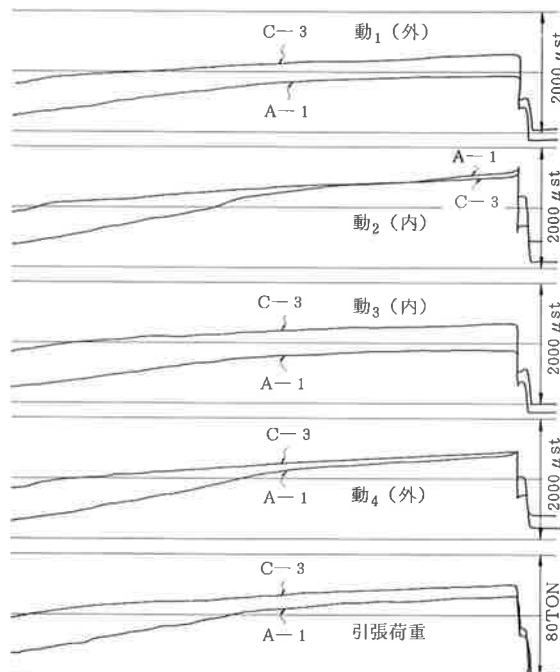
試験体に貼り付けた歪ゲージの配置を図-18に示す。この図には静歪計および動歪計の計測チャンネル番号も合わせて示す。番号の付け方は基本的にS1側（グループA、Dではジンク面側）から、またすべり側の方が若い番号になっている。

(2) 動歪計による歪変化の測定結果

一面ジンク+一面ショット（赤錆）（A-1）と二面ジンク（B-3）および二面ショット（赤錆）



(1) A-1 : 一面ジンク一面ショット（赤錆）
B-3 : 二面ジンク



(2) A-1 : 一面ジンク一面ショット（赤錆）
C-3 : 二面ジンク（赤錆）

図-19 表面状況における歪変化の比較

(C-3)の動歪計による測定結果を、比較が容易なように重ね合わせたものを図-19(1)(2)に示す。図-19(1)はA-1とB-3、図-19(2)はA-1とC-3の比較である、これらはすべり直前の引張荷重の負荷速度がほぼ同一と思われるものである。

これらの歪ゲージはスプライス2枚の中央でかつ表裏に位置するものであるが、すべり開始の少し前までは、どの試験体においてもその変化率に著しい差はない。すべり直前になってA-1試験体で少しスプライスの表裏で差がみられ、やや曲げが導入されているようである。

ところで図-20は、3.2の(3)項および図-17で述べた1面のみが先にすべりを生じた試験体の動歪計による歪測定結果を示すものである。この測定結果によると、S1側(グリス塗布面)が0.3mm程度すべったために大きな曲げ応力が発生したことがわかる。この間の状況を図示すると図-21のようになると考えられる。なお、ここでの応力計算は次式を用いた。

$$\sigma = \epsilon \cdot E \cdot G_1 / G_2$$

- σ : 応力 ϵ : 歪 E : ヤング率
- G_1 : 動歪計のゲージファクター
- G_2 : ゲージファクター

図-21から、わずか0.3mmの片方のすべりにより大きな曲げ応力がかかり、その値は引張側ですべり直前の約2倍となることがわかる。このようにすべりを生じた直後にその応力がスプライスの表裏で増減するのは、ジンク面にグリスを塗布してすべり易くした試験体のみ(例外はD-2:一面ジンク+一面ショット(錆なし))で、これはすべりを生じた後のすべり量が等しくないためであると考えられる。

以上のことより、一面ジンク+一面ショット(赤錆)の試験体ですべり直前にわずかな曲げ応力が導入されるのは、二面で表面状況が異なるためすべり直前の変位量の増加の程度に差があるからではないかと考えられる。そこで、二面ジンクの試験体と二面ショット(赤錆)の試験体のすべりの影響があまり出始めない時点(引張荷重52.5トン)でのS1側およびS2側のダイヤルゲージの変位量の平均を求めてみた。その結果を表-7に示す。

表-7の結果から判断すると、引張荷重時における変位量は両者に差はほとんどない。なお、一面ジンク+一面ショット(赤錆)の動歪計のデータより、すべり直前の曲がりかどのように与えられるかを表-8に示す。(図-21をもとに判断し、誇張して描いた。)

表-8の結果からは、傾向としてショット(赤錆)の方が同じ荷重に対するすべり直前の変位量

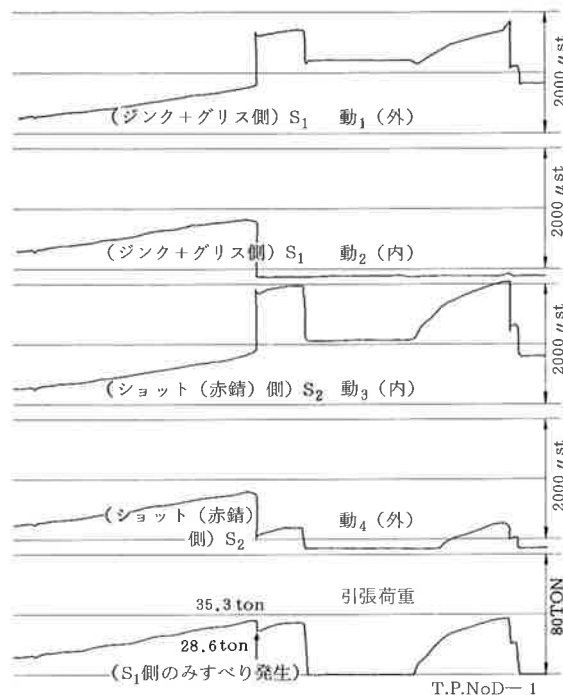


図-20 一面のみがすべりを生じた場合の歪変化

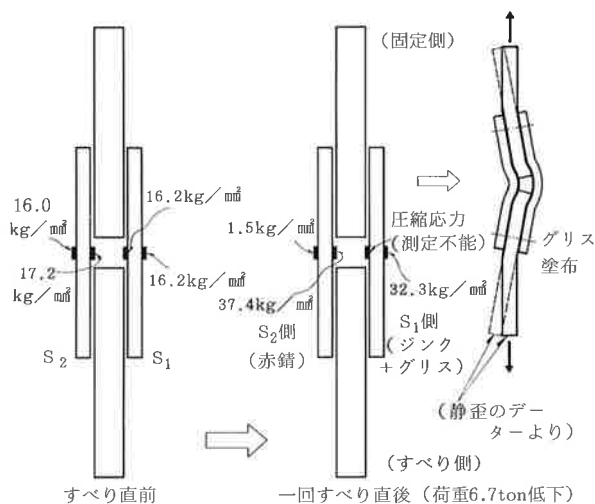


図-21 すべり前後の応力変化
一面ジンク(グリス)+一面ショット(赤錆)

が大きいのと思われる。なお、すべり後、荷重を除いた後は、全て表-8のA-1~A-4のようになっていた。これは、ジンク面はすべり始めてからでもジンク塗料の粒子がすべりの抵抗になるのに対し、ショット(赤錆)面はすべり始めると一気に大変位を生じるため、ショット(赤錆)面の方が最終的に変位量が大きくなったからであるとされる。

以上のことから、3.1の表-6に示したように、一面ジンク+一面ショットのすべり係数 μ_1 が二面ジンクあるいは二面ショット(赤錆)に比べて低くなっているのは、前述のようにすべり直

前になって曲がることに起因するのではないかと考えられる。なお、ジンク面にグリスを塗装した試験体では、全てすべり直後に図-21に示したような応力状態になり、また、そのときの変位量もグリスを塗布した面の方が大きかった。

その他、二面ジンクにグリスを塗布したものおよび二面ショット（錆なし）では特に大きな歪変化の特徴はなかった。また、一面ジンク＋一面ショット（錆なし）の試験体では、ショット（錆なし）面がちょうど一面ジンク＋一面ショット（赤錆）の場合と反対にショット（錆なし）面の摩擦抵抗がないため、すべり直後に図-21で示した状態と逆の応力状態となった。その状況を図-22に示す。

表-7 変位量の平均

表面状況	比較した荷重	変位量の平均
二面ジンク	52.5 Ton	0.22 mm
二面ショット (赤錆)	52.5 Ton	0.23 mm

表-8 すべり直前の曲がり

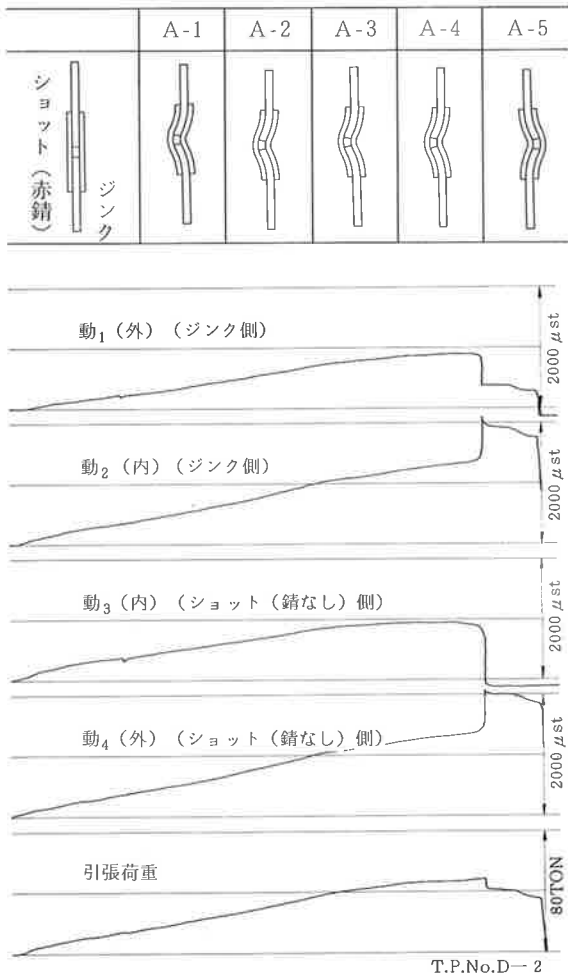


図-22 一面ジンク＋一面ショット（錆なし）の試験体の歪の変化状況

(3) 静歪計による応力分布測定結果

図-23～図-26に静歪計によるボルト軸力（歪量）および応力分布の、各引張荷重に対する変化状況の測定結果を示す。測定点が多く、各測定点の変化は読み取りにくいですが、以下のことが言える。

- ① 引張開始後、約5トン程度までは、試験体の初期曲り、チャックのつかみ具合等により、鋼板の表裏で曲げが発生している。この傾向は、

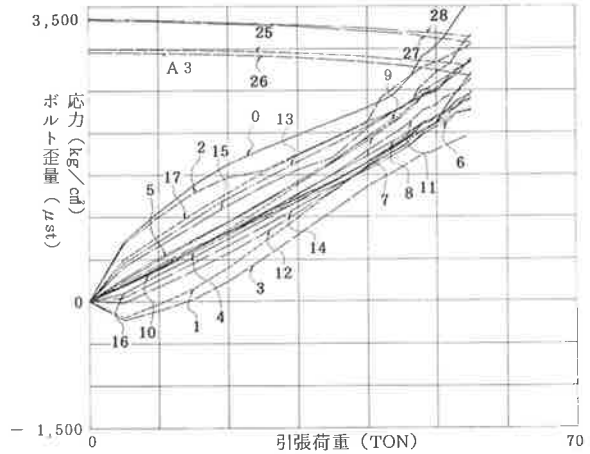


図-23 一面ジンク＋一面ショット（赤錆）

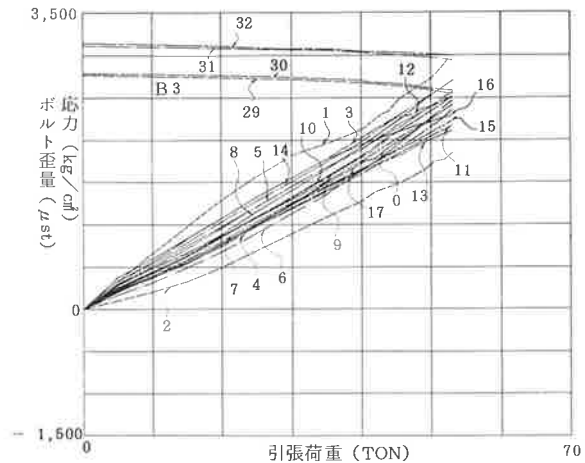


図-24 二面ジンク

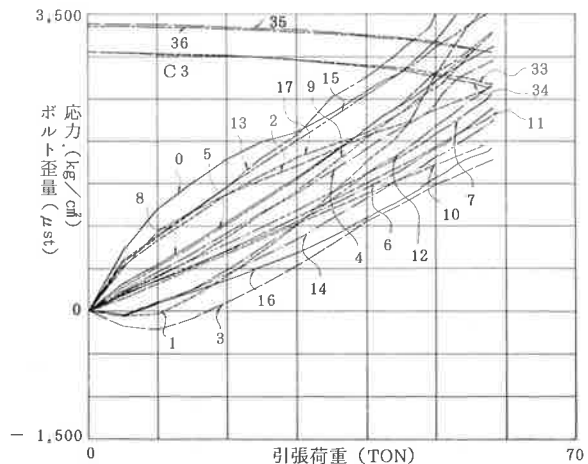


図-25 二面ショット（赤錆）

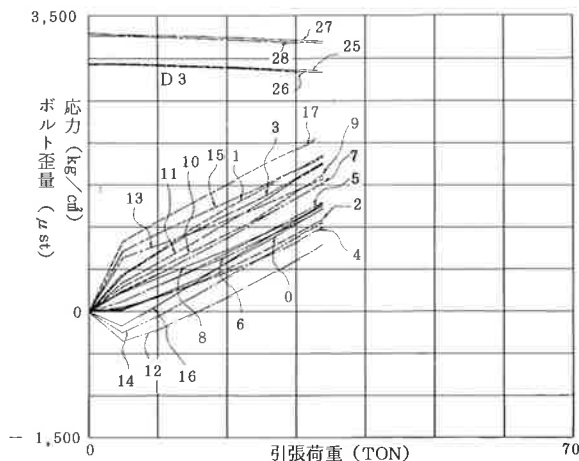


図-26 一面ジंक (グリス) + 一面ショット (赤錆)

チャンネルNo. 0 ~ No. 3、No. 12 ~ No. 17 (図-18参照) のチャック部に近い部分に大きい。

② その後、各応力は引張荷重の増加にともないほぼ一様に増加しているものが多いが、その傾きは一律ではない。これは後に述べるが、やはり試験体の表裏、左右に曲げの影響が生じているものと思われる。

以上のことから、各チャンネルのデータを、試験体の表裏、左右全て平均化して各鋼板毎の曲がりを消したものを図-27~図-31に示す。

鋼板の表裏、試験体の左右の平均をとると、どの試験体においても、引張荷重の増加とともにそれに応じて表面の応力も増加し、特に著しい差はないことがわかる。したがって局部的にはさまざまな変化が生じていても (図-23~26)、マクロ的には安定した応力増加を生じているものと考えられる。

以上の平均化処理では消去しきれないものに、試験体全体の板厚方向の初期曲がりの影響があり、試験体に初期曲がりがあるとS1側、S2側二枚のスプライスにかかる荷重に差が生じる。例えば、図-30や図-31のチャンネルNo. 4~7のスプライスS1側とNo. 8~9のS2側で応力に大きなひらき (約2.5kg/mm²) があるが、引張荷重が10トンを超えてからの応力の増加は計算値とほぼ一致しているため、この現象が試験体の初期曲がりの影響であると考えられる。また、引張荷重が40トン位から歪値から計算した応力値が計算値の増加率 (傾き) よりも大きくなる傾向にあるが、これはどの部材にもみられる傾向にあるので、応力が降伏点に近付いたための直線性からのずれであると考えられる。

ボルト軸力の変化については、引張荷重の増加にともない徐々に低下していく様子が図-23~31から分る。この軸力の低下は、締め付けられている鋼板の、引張負荷によるポアソン比に応じた減

厚のためであると考えられる。また、この場合も引張荷重が約40トン程度からボルト軸力の低下率が大きくなっているが、これは上述の鋼板に生じる歪量の増加の直線性からのずれに対応しているものと考えられる。軸力の低下量は、50トン負荷時で約2トン程度であった。

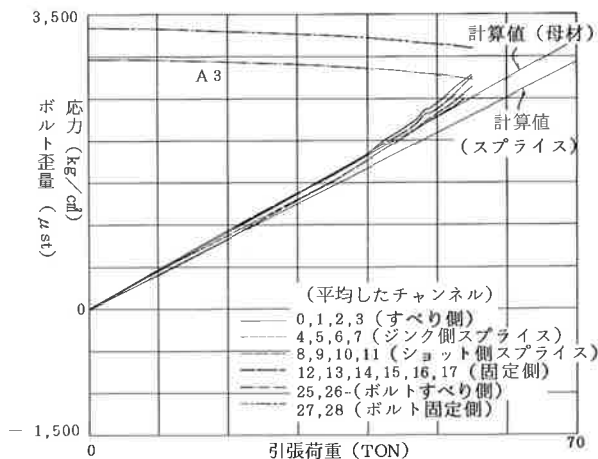


図-27 一面ジंक + 一面ショット (赤錆)

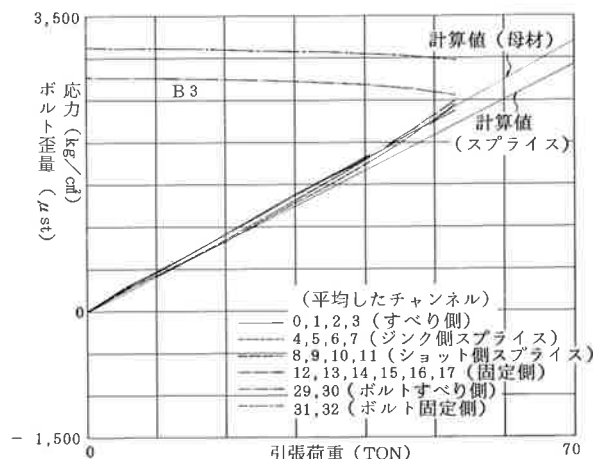


図-28 二面ジंक

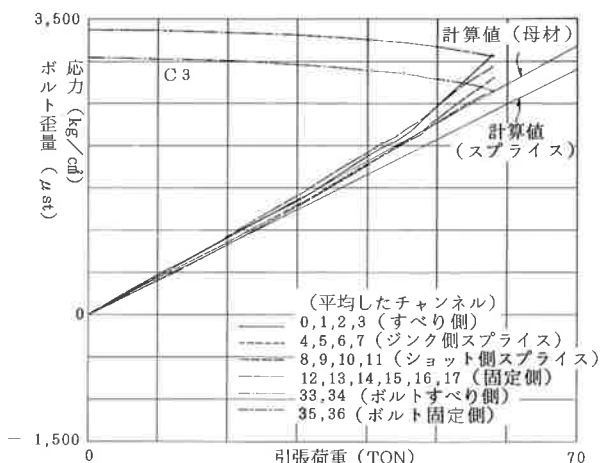


図-29 二面ショット (赤錆)

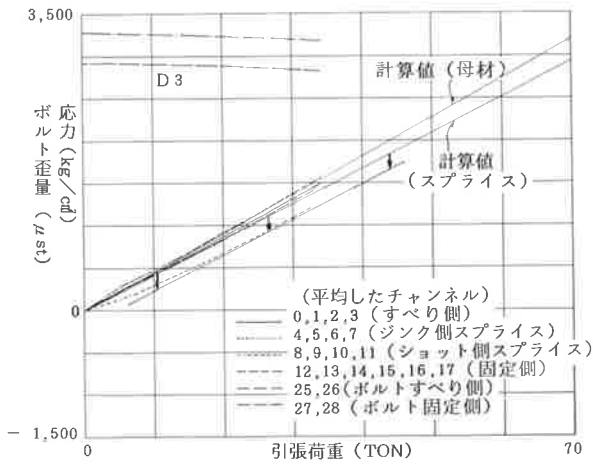


図-30 一面ジンク（グリス）+一面ショット（赤錆）

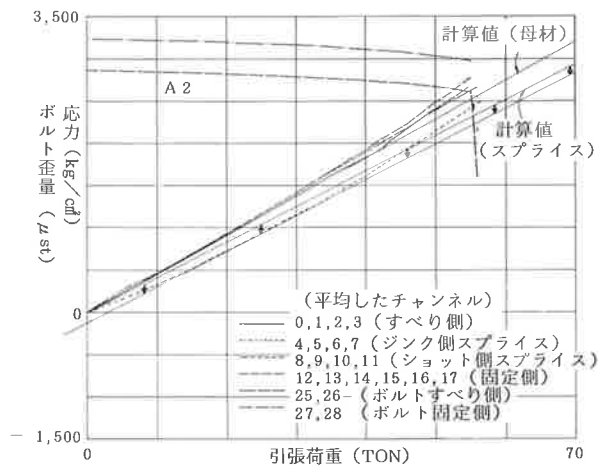


図-31 一面ジンク+一面ショット（赤錆）

4. すべり後の接合面の状況

すべり試験ですべりを発生させた後、各種表面状況の試験体を解体し、そのすべり面を観察した。写真一1～4にその状況を示す。

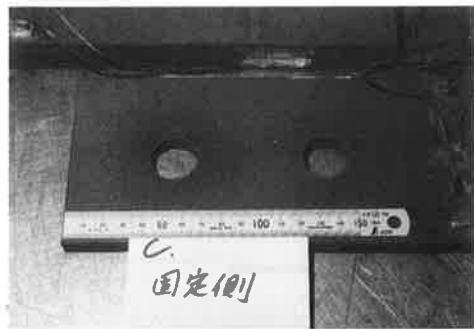
写真一1は二面ともショット（赤錆）面である。すべり側の方がボルト孔まわりの変色域がやや大きい、これはすべりのため赤錆がこすれ合って拡大したものと考えられる。すべり側、固定側いずれにしても変色域は孔を中心に約50～60mm程度で、この変色域で大部分の応力伝達が行われているものと推定される。

写真一2は、両面ジンクの試験体のものであるが、固定側に対しすべり側のジンク塗膜の乱れが著しいことが分かる。スプライス側のジンク塗料と母材側のジンク塗料がかなり強固に結合して、すべり抵抗となっているものと想像される。また、この塗膜の乱れの大きさは、写真一1と同程度であった。

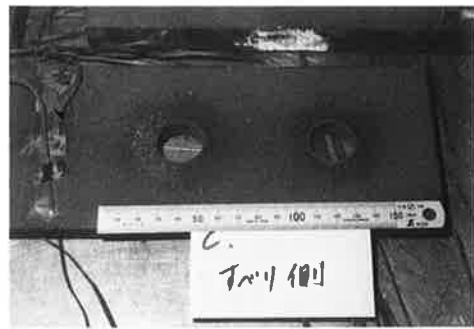
写真一3は一面ジンク+一面ショット（赤錆）の試験体両表面のすべり側のすべり後の状況を示すものである。各表面は写真一1、写真一2のすべり側

の表面状況と同じである。

写真一4はジンク面にグリスを塗布した試験体のものである。すべり面は非常に平坦で、写真一2に示したようなジンク塗膜の乱れはない。グリスが塗られているため、スプライスと母材のジンク塗料の結合がなく。これが摩擦係数の低下につながっているものと考えられる。



(a) 固定側



(b) すべり側

写真-1 二面ショット（赤錆）



(a) 固定側



(b) すべり側

写真-2 二面ジンク

ま と め

すべり試験の結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 標準ボルト軸力から算出したすべり係数 μ は二面ショット（赤錆）がいちばん大きく0.65、そして二面ジンクが0.61、一面ジンク＋一面ショット（赤錆）が0.59であった。しかし、試験直前のボルト軸力から算出したすべり係数 μ_1 は同じく0.67、0.66、0.63で、二面ジンクと二面ショット（赤錆）でほとんど差がなかった。

以上のことから、一面ジンク＋一面ショット（赤錆）のすべり係数も設計値（0.4）を充分満足していた。

(2) 動歪計による測定の結果、一面ジンク＋一面ショット（赤錆）の試験体は、すべりが近くなるに従い、ふたつの接合面の処理のちがいに、各スプライスの各々の表裏でその量はわずかであるが曲げ応力が発生しやすい傾向にあることが分かった。

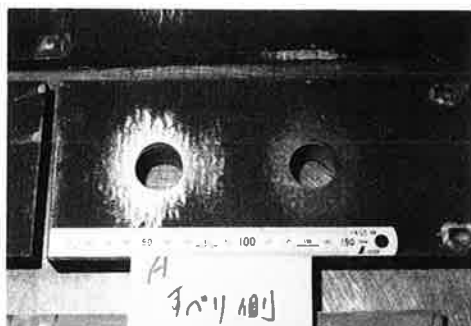
(3) 一面ジンク＋一面ショット（赤錆）の試験体においてすべりがいずれの面から発生するかについては、0.2秒以内で同時に生じており、実用的には二面とも同時であるとしてよいと考えられる。

(4) 表面処理状況の差による二枚スプライス間の応力分担については、特に明瞭な差は認められなかった。

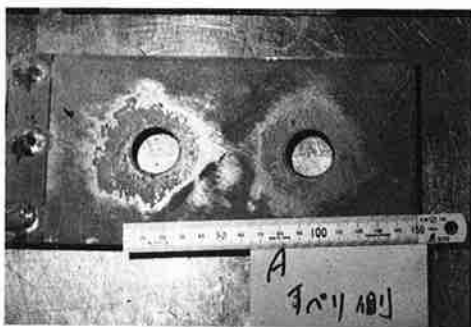
(5) すべり後の接合面の観察によると、ジンク面同志の接合においては、ボルト締め付けにより充分にジンク塗料同志が結合しており、ショット（赤錆）面同志の接合よりもすべり後の抵抗が大きく、徐々に、すべるものと考えられる。

(6) 片面が非常にすべりやすい場合（例えばグリス塗布されたような場合）、反対側のすべり係数が大きくても全体としての接合力はすべり易い側に支配される。

以上のことより、接合面に厚膜型ジンクリッチペイント塗布面とショット（赤錆）面が混在した高力ボルト摩擦接合継手は、使用上問題が無いことがわかった。

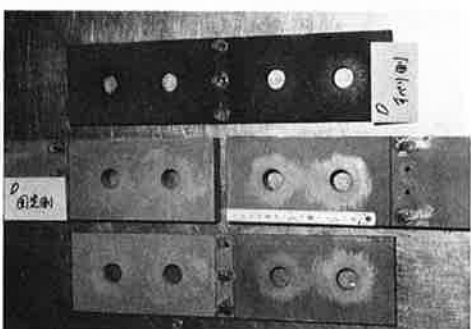


(a) ショット（赤錆面）



(b) ジンク面

写真-3 一面ジンク＋一面ショット（赤錆）



(a) 全景



(b) グリス塗布面

写真-4 一面ジンク（グリス）
＋一面ショット（赤錆）