

摩擦接合のプライマー除去範囲の検討

The Primer-Removed Area of the Bolted Joint for friction type

村松正義*, 三ッ木幸子**,

Masayoshi MURAMATSU and Yukiko MITSUGI

* トピー工業株式会社 鉄構事業部 設計部 (〒120 東京都千代田区四番町5-9)

** トピー工業株式会社 鉄構事業部 技術開発部 (〒120 東京都千代田区四番町5-9)

In the previous report, 88 slip tests of bolted joints for friction type were carried out to consider the removing methods of the primer (JIS K 5633) on the contact surface. As the result of the tests, the relationship between the primer-removed area and the friction coefficient was conducted.

In this report, the distribution of the stress, produced by the axial force of the bolt, on the contact surface is calculated by three dimensional FEM. And the relationship between the primer-removed area and the friction coefficient is studied by the distribution of the stress and a simple model.

Key Words: bolted joint for friction type, slip test, contact surface

1. はじめに

摩擦接合ではすべり荷重を限界荷重とするため、すべり荷重を決定するボルト軸力、接触面などの管理について規定がなされている。現行の道路橋示方書¹⁾では、継手の許容力は、すべり係数を0.4として高力ボルト1本当たりの許容力の形で与えられている。これにしたがひ、接触面の処理は以下の3つに分けられて規定されている。

1) 接触面を塗装しない場合は、黒皮を除去して粗面とする。

2) 接触面を塗装する場合は厚膜型無機ジンクリッチペイントを使用する。

3) 接触面に1), 2)以外の処理を施す場合は、0.4以上のすべり係数を十分確保しなければならない。

接触面のエッチングプライマー(ウォッシュプライマー)を除去した場合は、この規定のうち3)の対象となる。

そこで、著者らは、このプライマーの除去方法を実験により検討を行ない、除去範囲とすべり係数の関係を導いている²⁾。

本研究では、この除去範囲とすべり係数の関係の妥当性を、3次元FEM解析により、接触面でのボルトの軸力の伝達範囲を求めて検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

図-1に示すようなボルト本数が片側2本、合計4本の2面摩擦継手について実験を行なっている。母材断面は100mm×22mm、添接板の板厚は11mmで材質はSM490Yを

使用している。なお、88体の実験を行ない、この試験体の内4体については、添接板の板厚は11mmの2倍の22mmである。縁端距離は応力方向で40mm、直角方向で50mmで、ボルト間隔は75mmである。また高力ボルトはM22(F10T)

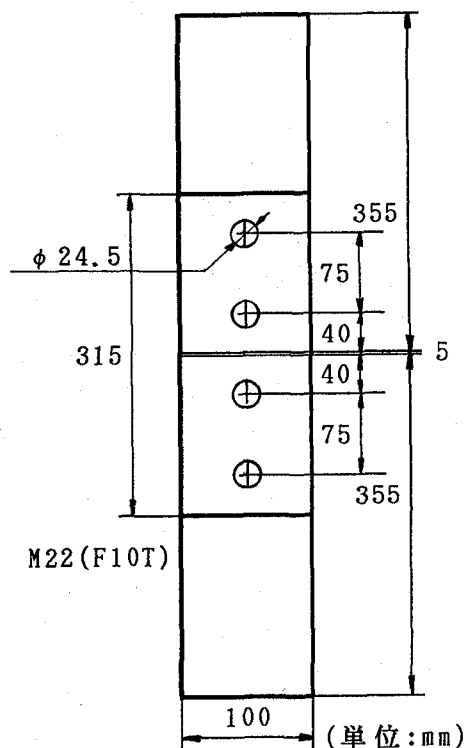


図-1 試験体

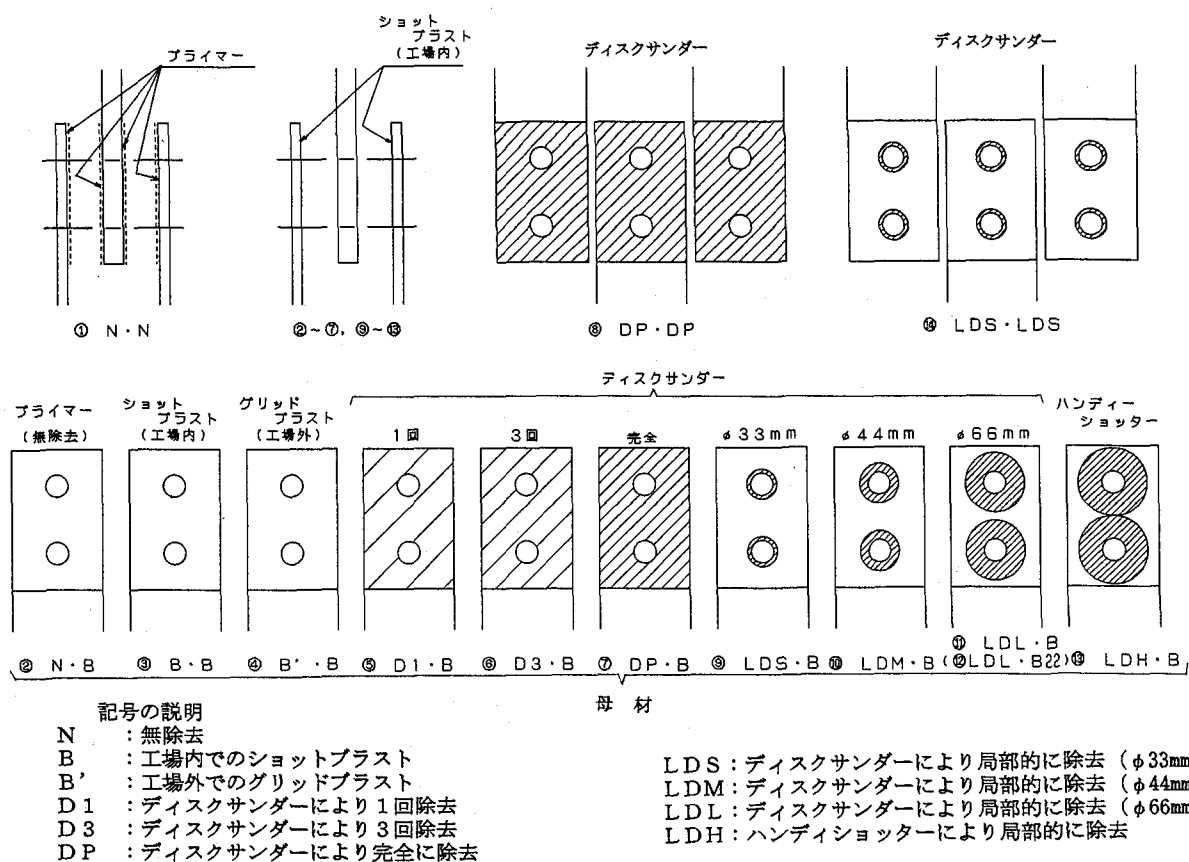


図-2 試験体タイプと表面処理方法

を採用し、道路橋示方書にしたがい、ボルト孔はφ24.5mmとし、最大で設計値の10%増しの22.55tonfの軸力をトルクレンチで導入している。

2.2 接触面の処理

表面処理方法については、エッチングプライマー(JIS JIS K 5633 膜厚15μm)で処理を行ない、この原板を用いて試験体を製作し、この試験体の添接板および母材の接触面の状態を変化させて、図-2に示す14ケースの試験体を製作した。各試験体の記号は、左側が母材、右側が添接板の処理方法を表す。

まず、比較ケースとして両面無除去(プライマーのまま)のケース(N・N)を設定した。つぎに、実用性を考慮して添接板については工場内の自動ラインの除去方法すなわちショットブラストによる処理を採用し、母材について除去方法を変化させてケースを設定した。すなわち、母材については次のように変化させて11ケース設定した。

- 1) 比較ケースとしての無除去(N・B)
- 2) 実際に使用されている条件としてのグリッドブラストによる全面除去(B'・B)
- 3) 比較のためのショットブラストによる全面除去(B・B)
- 4) 工数低減を目的として除去度を変化させたディスクサンダーによる全面除去(D1・B, D3・B, DP・B)
- 5) 工数低減を目的とした処理範囲を決定したディスク

サンダーによる部分除去(軸力伝達範囲: LDL・B, バリ取り範囲: LDS・Bおよび座金投影面: LDM・B)

6) 部分除去をした場合の板厚の影響の調査(LDL・B22)

7) 工数低減を目的として特殊工具を用いた部分除去(LDH・B)

4)の除去度の変化は、ディスクサンダーでかける回数を1回(D1・B)、3回(D3・B)とした除去および完全にプライマーがなくなるまでの除去(DP・B)の3種類を設定した。

5)の除去範囲については、図-3に示すように座金から45°の角度で軸力が伝達されると仮定して、ボルト孔を中心にφ66mmの範囲(軸力伝達範囲)を完全に除去したもの(LDL・B)、バリ取りと一緒に除去することを想定してφ33mmを完全除去したもの(LDS・B)および座金の投影面積(φ44mm)を完全除去したもの(LDM・B)である。

6)は、LDL・Bと同じ66mmの除去範囲で添接板の板厚を22mmとしたもの(LDL・B22)である。これは文献3)で添接板が厚くなると、プライマー除去による板厚減少によってすべり荷重が小さくなるなどの結果が報告されているので、この板厚の影響を調査するものである。

7)においては作業性の改善の観点から、ハンディショッターで母材を部分除去したもの(LDH・B)である。この工具は黒皮取りのために開発されたものでボルト孔をガイドにφ75mm程度の範囲でプライマー除去ができる。

さらに、添接板と母材の両方について、ディスクサン

ダーを用いて接触面の全面を完全除去したケース(DP・DP)とφ33mmを完全除去したケース(LDS・LDS)を設定した。

2.3 発錆のための除去後の放置期間

プライマー除去後屋外に放置すると除去した部分に錆が発生し、すべり係数が増加することが考えられるため、この影響を検討している。そこで、全14ケースのうち、N・N、N・B、B'・B、D1・B、DP・B、LDS・B、LDM・B、LDL・B、LDL・B22およびLDH・Bの10ケースについては、屋外で2ヶ月放置した後、ボルトを締め付けて、すべり試験を行なった。なお、LDM・BとLDL・B22については放置後の試験だけを行なっている。

2.4 実験方法

実験は引張荷重を載荷して主すべりを起こした時点の荷重をすべり荷重とし、このすべり荷重から締め付け時の軸力用いてすべり係数を求めている。

表-1に示すように、除去直後については12ケース、2ヶ月放置後については10ケース、1ケース各4体合計88体のすべり試験を行なっている。

2.5 実験結果

すべり試験の結果について、各ケースのすべり係数について、最大値と最小値および4体の平均値を図-4に示した。すなわち、横幅一定の矩形の上辺は最大値を、下辺は最小値を示し、矩形の幅より若干長い横棒で平均値を示した。また、除去直後は白抜きで、2ヶ月後は矩形に影を付けて区別した。

この結果を用いて、ディスクサンダーで母材の接触面を除去した2ヶ月放置後の試験に着目し、ボルト孔を中心とした除去範囲(直径)とすべり係数の関係を示した

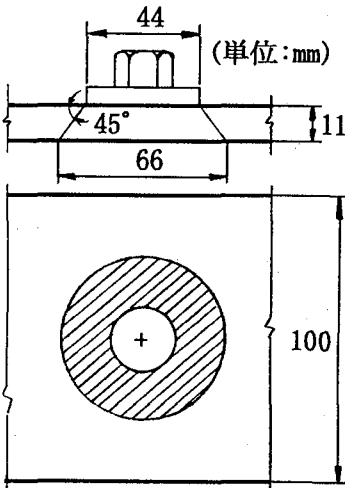


図-3 軸力伝達範囲 (プライマー除去範囲)

表-1 試験ケースと試験体数

試験体	母材	添接板	試験体数		
			除去直後	2ヵ月後	合計
N・N	N	N	4体	4体	8体
N・B	N	B	4体	4体	8体
B・B	B	B	4体	—	4体
B'・B	B'	B	4体	4体	8体
D1・B	D1	B	4体	4体	8体
D3・B	D3	B	4体	—	4体
DP・B	DP	B	4体	4体	8体
DP・DP	DP	DP	4体	—	4体
LDS・B	LDS	B	4体	4体	8体
LDM・B	LDM	B	—	4体	4体
LDL・B	LDL	B	4体	4体	8体
LDL・B22	LDL	B22	—	4体	4体
LDH・B	LDH	B	4体	4体	8体
LDS・LDS	LDS	LDS	4体	—	4体
合計	—	—	48体	40体	88体

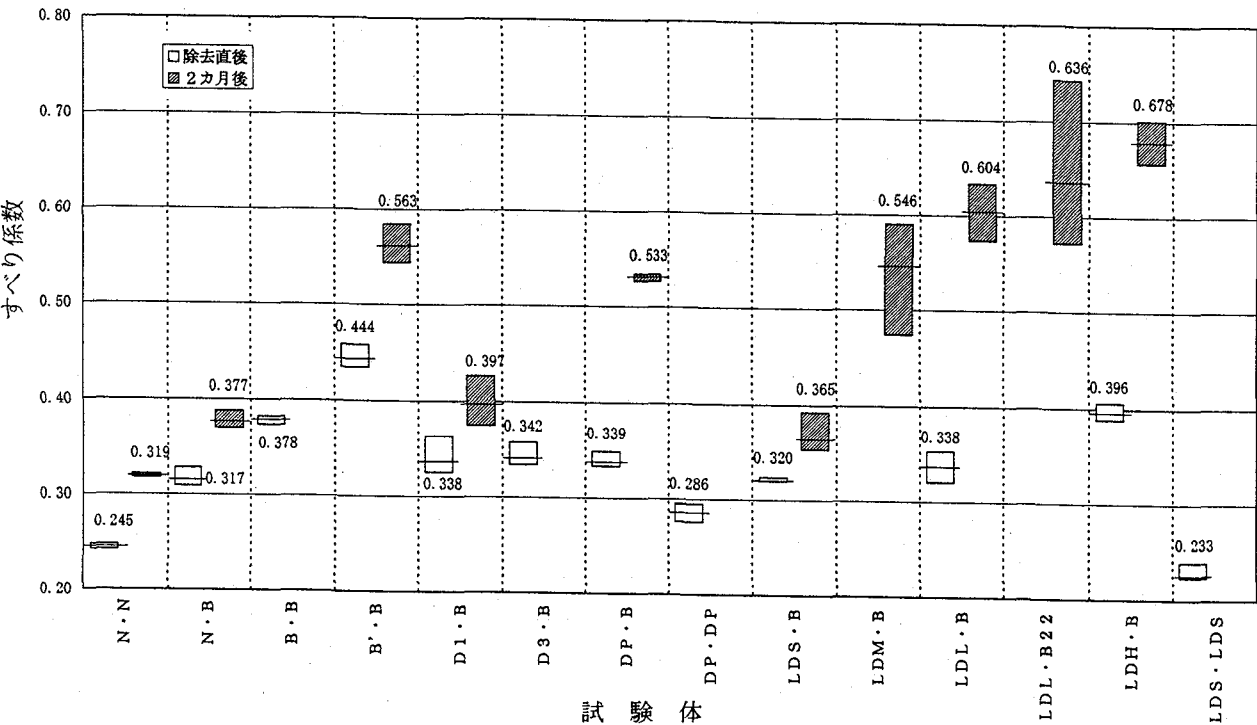


図-4 すべり試験結果

ものが図-5である。この図では、除去範囲が座金範囲から外径が66mmに大きくなるまではすべり係数も増大しているが、全面を除去するとかえって減少するという結果が得られている。すなわち、座金範囲程度を除去しておけば、全面を除去した場合と同じ効果があるという結果が得られている。

したがって、添接板11mmの場合に、0.4のすべり係数を確保するには、膜厚15 μ m程度のエッチングプライマー（JIS K 5633）の除去範囲は座金の投影範囲でも充分であるという結論を導いている。

そこで、本研究では、接触面でのボルトの軸力によって生じる応力の分布を、3次元FEM解析により求め、ここで求めた応力分布と簡単なモデルによって、実験結果を再検討し、すべり係数を確保するためのプライマーの除去範囲を検討する。

3. FEM解析

3.1 解析モデル

図-1の試験体について母材の厚さを22mm、添接板の厚さを11mmとして、対称性を考慮し1/4について解析を行なった。要素分割は図-6のように行なった。すなわち、添接板については板厚方向に3要素、母材については、板厚の半分に対して3要素に分割し、板厚方向の格点間隔は約4mm程度になっている。また、座金は外径44mmで、孔径は24.5mmであり、この間を3分割しており、約7mmの間隔で分割している。対称性より、境界条件を図-7のように設定した。すなわち、母材板厚中央面上のすべての格点で境界条件を与えており、図-7はこれを側面から見た様子を表している。荷重については、ボ

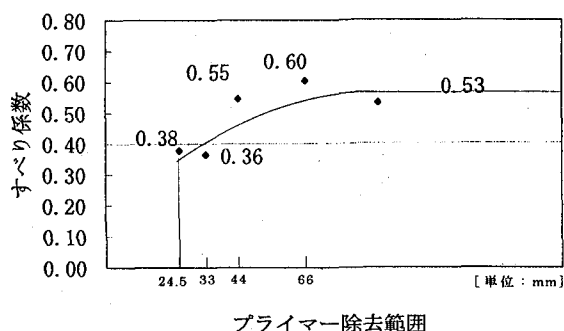


図-5 すべり係数とプライマー除去範囲

ルト軸力だけが導入された状態を仮定し、座金面に20.081kgf/mm²の等分布荷重を載荷した。この等分布荷重は、実験で用いているボルト導入軸力22.55tonfを座金面積で除して求めた値である。なお、すべりを起こす前の状態を想定し、接触面に不連続面は設けずに、母材と添接板を一体構造として解析した。

解析には、ANSYS-PC/Revision4.4を使用した。

3.2 解析結果

解析結果について、板厚方向の応力についてコンターによって図-8に示す。図-9は、図-8の2つの孔の中心を通る断面について示したものである。座金のほぼ外周位置で8.38kgf/mm²と、座金位置で載荷した等分布荷重20.081kgf/mm²の半分より小さくなっている。

ここで、接触面への座金の投影面で伝達される力の総和を求め、導入されたボルト軸力全体に対する割合を計算すると84%になった。すなわち、導入された力の84%が座金の投影面で伝達されるという結果を得た。

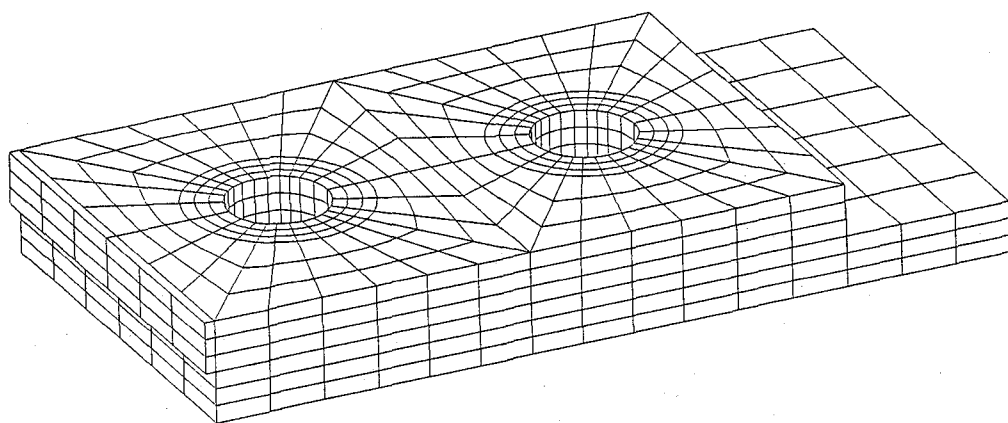


図-6 要素分割

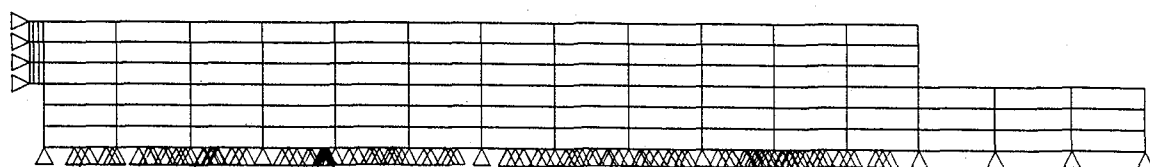


図-7 境界条件

4. 考察

4.1 すべり係数算出モデル

ここで、プライマー処理や発錆で部分的にすべり係数の異なる接触面を持つ摩擦接合の継手全体としてすべり係数を求める場合の算出モデルを次式のように仮定する。

$$\mu_o = \frac{\sum N_i \cdot \mu_i}{\sum N_i} \quad (1)$$

ここで、 μ_o ：継手全体のすべり係数

N_i ：ボルト軸力により接触面に生じるボルト軸方向の応力の部分*i*に働く力

μ_i ：部分*i*の接触面の状態によって決るすべり係数（部分すべり係数）

部分すべり係数 μ_i は、部分*i*の接触面の状態で決ると考え、本論文では処理方法の違いで変化すると考えている。なお、物理的には、剛性などに影響を与える材質、面の粗さなどでもこの状態は表現される。

4.2 座金面積だけ処理した場合のすべり係数の試算

母材の座金部分だけのプライマーを除去した試験体(LDM・B)の発錆後の継手全体のすべり係数を、この継手タイプにおいても、3.で求めたFEM解析結果が成立すると仮定して、式(1)を用いて、すべり係数を試算してみる。

実験結果より、母材接触面の全面的プライマーをディスクサンダーで完全除去(DP・B)した後、発錆させた場合のすべり係数は0.533で、この値を除去部の部分すべり係数として用いる。母材のプライマーをそのまま残した場合(N・B)の発錆後のすべり係数は0.377で、これを除去しない部分の部分すべり係数とする。

一方、ボルト軸力による応力は、FEM解析より、座金の投影部分で84%の軸力が伝達されるという結果を得ている。

したがって、母材の座金部分だけのプライマーを除去した試験体(LDM・B)の発錆後の継手全体のすべり係数は、式(1)により以下のように求まる。

$$0.533 \times 0.84 + 0.377 \times 0.16 = 0.508$$

これに対して、実験結果は0.546と、計算値より0.04程度すなわち約1割大きい値になっている。

4.3 部分除去部が発錆した場合のすべり係数の検討

文献2)では、プライマーを除去した場合の板厚の減少量および発錆した場合の板厚の増加量を、母材の図-10に示す位置の板厚をマイクロメータにより計測することにより検討を行なっている。

まず、プライマー除去による板厚減少量を検討するため、除去前と除去後の各試験体の各測定点の計測結果をディスクサンダーの場合を図-11に、ハンディショッタ

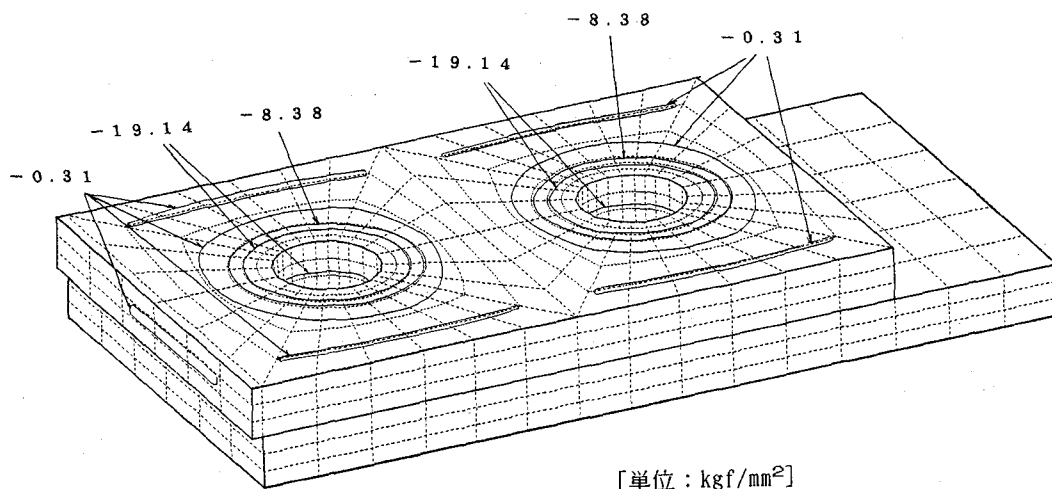


図-8 応力コンター図

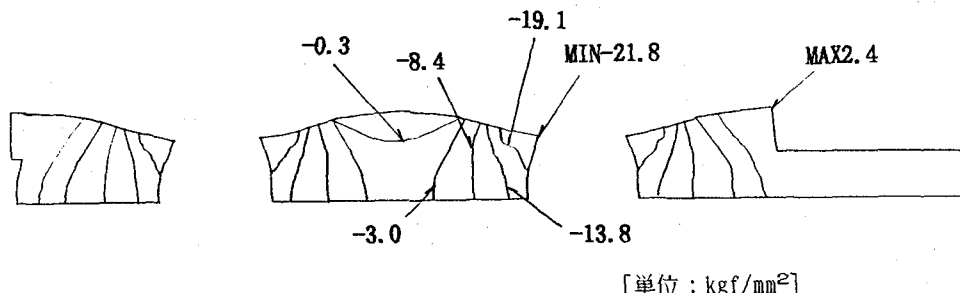


図-9 孔の中心を通る断面での応力コンター図

ーの場合を図-12に示す。平均値で考察するとディスクサンダーによってプライマーを除去した場合の板厚の減少量は0.06mm、ハンディショッターでは0.03mmという結果を得ている。

次に、発錆による板厚の増加量を検討するため、同様に、除去後と放置後の計測結果を図-13に示す。発錆による板厚の増加は平均して0.10mmになる。

したがって、発錆した部分はプライマーが除去されない部分(面)より、平均してディスクサンダーでは0.04mm、ハンディショッターでは0.07mm出ている(凸)ことがわかる(図-14参照)。また、各試験体の母材1枚毎に、平均値を求めた場合も、1ケースを除いてすべてのケースで、錆による板厚増加量の方が板厚減少量より大きい。また、小さくなった1ケースについても、減少量が0.051で、増加量が0.047とほぼ等しい。

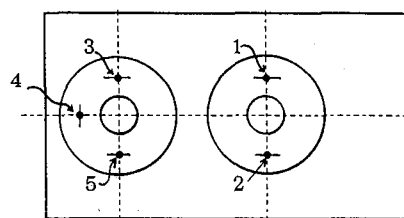


図-10 板厚測定位置

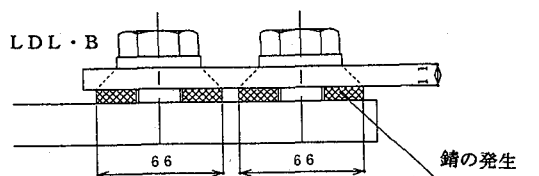


図-14 接触側の板の表面から凸に出た除去部の錆

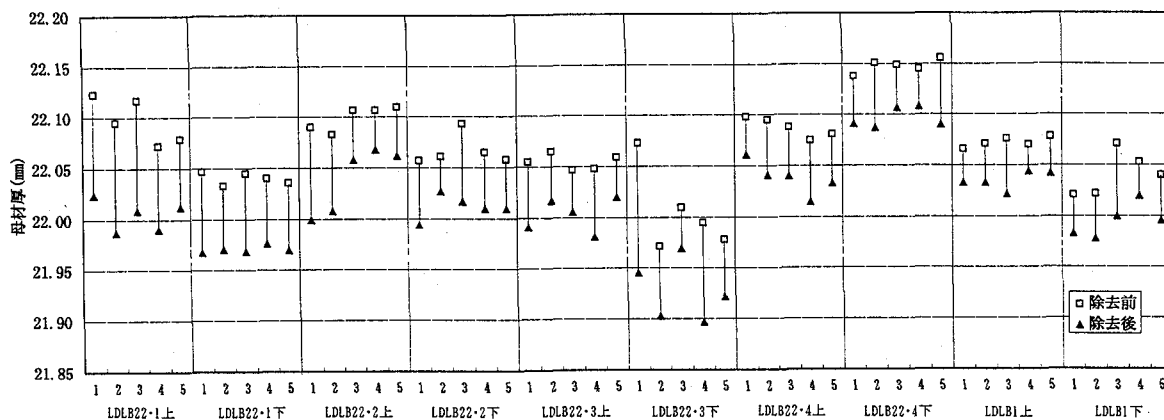


図-11 板厚減少量 (ディスクサンダー)

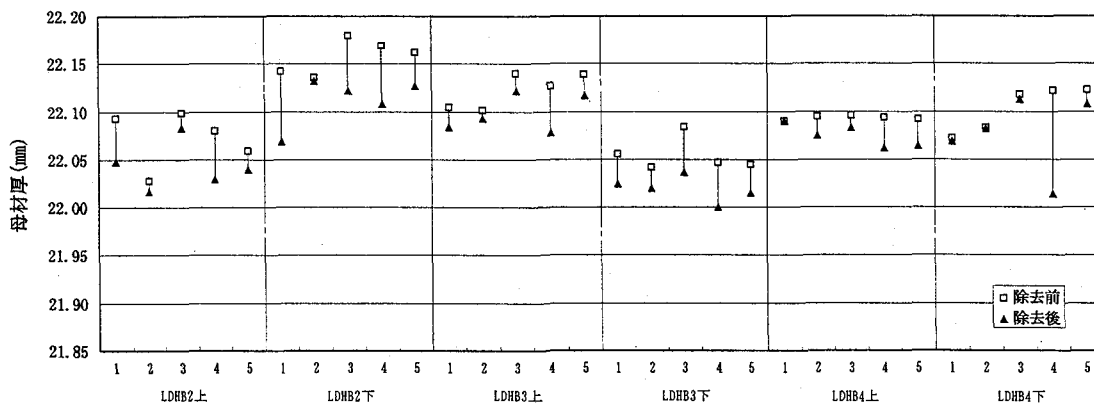


図-12 板厚減少量 (ハンディショッター)

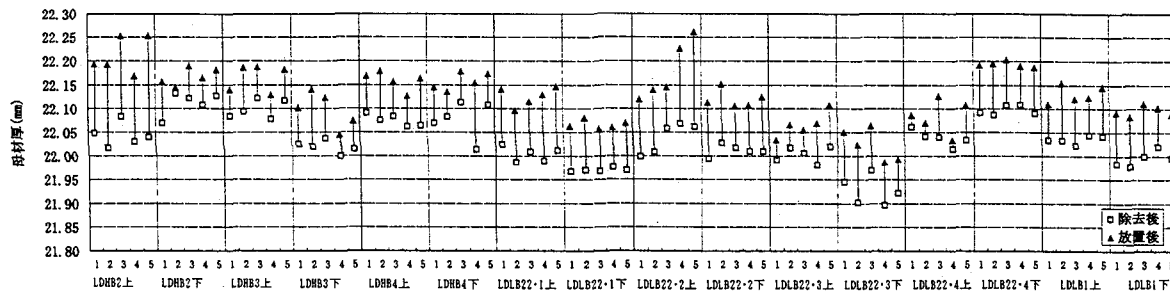


図-13 発錆による板厚増加量

錆はプライマーより剛性が大きいことを考えると、この発錆を起こしたプライマー除去部により伝達されるボルトの軸力の割合が、FEM解析で仮定したものより大きいことが考えられる。このため、実験値0.546は、前項で計算した値0.508よりも0.04程大きい値を示したものと考えられる。

ここで、軸力の100%が除去部の錆で伝達されると仮定すると、式(1)より、発錆した除去部の部分すべり係数 μ_i は、試験体LDM・Bで0.546、試験体LDL・Bで0.604になる。この値は、平均値で比較しているので、ばらつきの問題はあるが、全面を処理した場合の0.533より大きい傾向を示している。

これについて、微小すべりの視点から検討を加える。

4.4 微小すべりの視点からの検討

力の伝達機構から、DP・Bでは、荷重の増加にともない添接板の端部で、母材と添接板のひずみの差が大きくなり、この部分で主すべりを起こす前に微小すべりを起こすことが考えられる。この微小すべりを起こした部分のすべり係数は、主すべりを起こす時点では下がり、全体のすべり係数が小さくなると考えられる。

この現象を式(2)で表現する。

$$\mu = \frac{0.8 \times \mu_0 N_{\text{slip}} + \mu_0 N_{\text{not, slip}}}{N} \quad (2)$$

ここで、
 N_{slip} : 微小すべりを起こした接触面に働く軸力
 $N_{\text{not, slip}}$: 微小すべりを起こさない接触面に働く軸力
 N : ボルト軸力 ($= N_{\text{slip}} + N_{\text{not, slip}}$)
 μ_0 : 微小すべりを起こさない場合のすべり係数

式(2)では、文献4)に、一旦すべりを起こすと、すべり係数はすべりを起こす前のすべり係数 μ_0 の80%程度になることが報告されているので、微小すべりを起こした部分の部分すべり係数を $0.8\mu_0$ とした。

この式からわかるように微小すべりを起こした場合の μ は、 μ_0 より小さくなるという結論が得られる。

なお、部分除去し、発錆させた試験体(LDL・B、LDM・Bなど)については突然大きな音を立てて主すべりを起こしたが、DP・Bでは荷重の上がらない状態が少し続いた後に主すべりを起こしたことが観察された。このことから、DP・Bでは微小すべりが徐々に起き、主すべりに至っていることが、また、部分除去した試験体では微小すべりがほとんど起こらずに突然主すべりが起こることが推

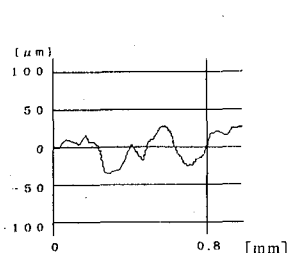


図-15(a) 断面曲線（法線方向）

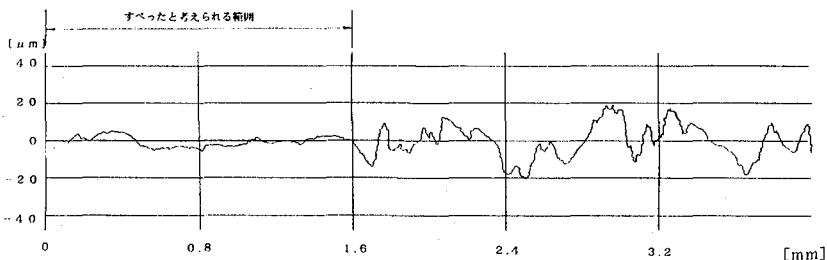


図-16 すべり部の断面曲線

測される。
 ここで、部分除去した試験体では、(2)の N_{slip} がゼロに近付き、 μ が μ_0 に近付くと考えられる。このため、継手全体としてのすべり係数については、部分除去後発錆させた試験体の方が、全面除去後発錆させた試験体より大きい傾向を示したものと考えられる。

4.5 添接板の板厚のすべり係数への影響

板厚の影響を把握するため、外径が66mmの発錆をさせた部分除去について、添接板の板厚を22mmに変えてすべり試験を行なっている。この結果、板厚が22mmでは、すべり係数が平均値で0.636という結果を得ている。11mmでは0.604であるので、若干大きい、ばらつきのことを考慮すればほぼ等しい結果と考えてよいであろう。

ここで、板厚が厚くなれば、一般に、接触面に至るまでに軸力はより広い範囲に伝達し、すべり係数を確保するためより広い範囲のプライマーを除去しなければならないと考えられる。しかしながら、錆部が凸に突出している、同じ66mmの範囲でほぼ同じすべり係数が得られたものと考えられる。

4.6 表面粗さからの検討

すべり係数は表面粗さによって変化する。本試験では、一部について母材について粗さを計測している。この計測結果について最大高さ R_y を表-2に示す。

表-2 表面粗さ（単位：μm）

	発錆前	発錆後
プライマー	35.50	—
ディスクサンダー	7.17	58.40
ハンディショッター	42.56	75.90

ディスクサンダーおよびハンディショッターでは、発錆後、 R_y の値は大きくなっている。その増加量は、ディスクサンダーの方が大きい。また、 R_y の値だけ見ればプライマーもディスクサンダーの5倍の値を示している。また、ハンディショッターの発錆前も、ディスクサンダーの発生後の7割程度ある。このように、 R_y の値は、すべり係数に影響を及ぼすが、絶対的な指標ではない。

ここで、さらにハンディショッターについては方向性があるので注意しなければならない。表の値は孔の中心から法線上で計測したものである。一方、試験体の辺に平行に計測すると、値は約半分になり、断面形状も図-15に示すように異なる。

一方、図-16はすべり試験後、ボルトを弛めて解体し、接触面を観察したときに、孔周辺に光沢をもった部分が観察されたので、光沢部のこれに隣接する光沢のない部分を連続して計測した場合の断面形状を示す。これは、ハンディショッターの場合の形状である。光沢部はすべりを起こして、凸部が削り落とされた部分と考えている。ブラスト処理した場合の結果ではあるが、光沢のある部分の R_y は $16.6\mu\text{m}$ 、光沢のない部分は $54.2\mu\text{m}$ であった。

すべりを起こすことによるすべり係数の低下を裏付けるものである。

4.7 錆の利用の問題

錆の利用にあたって、錆の剛性が問題となる。浮き錆びはもちろん除去しなければならない。この他、グリッドブラストについて12ヵ月暴露によって錆を発錆させた場合の軸力の減少率は、錆がない場合の3.5%程度に対して、7.0%程度であるという報告⁵⁾があるので、この視点からの検討が必要と考えられる。

本実験では、プライマー膜厚が $15\mu\text{m}$ と薄いため、軸力の低下の影響は少ない⁶⁾ものとして、締め付け直後、すべり試験を行なった。今後、ことに錆の利用を積極的に利用するためには、この視点からの検討が必要である。

4.8 部分除去の実用化にあたってのその他の注意

1) ここで実用化にあたっては、施工誤差もあり、座金の位置が仮定した位置からずれることも考えられるので、外径について約20mmの余裕をとって外径 66mm を除去するのが安全と考えられる。

2) 文献3)では、黒皮の除去を仮定して0.3mmの板厚差を仮定し、除去部で力が伝達しにくい構造を対象としている。これに対して、エッチングプライマーの場合、プライマー層が $15\mu\text{m}$ と薄いので、本実験では錆による板厚の増加量が0.10mmと、プライマー除去による板厚の減少量より大きく、この部分ではほとんどの軸力が伝達されているという結論を導いている。すなわち、本研究では、文献3)で仮定した構造モデルとは異なった構造を対象としている。

採用に当たっては、プライマーの厚さと種類を確認する必要がある。

3) 本研究では、錆の活用を大きな課題としているが、添接部は防錆が問題とされる。したがって、この点からも検討をする必要があるものと考えられる。

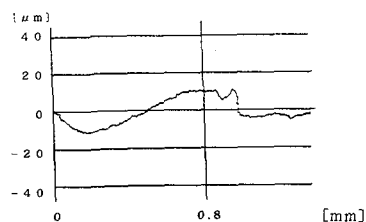


図-15(b) 断面曲線 (辺に平行)

4) 日本建築学会の高力ボルト接合設計施工指針⁷⁾に示めされる錆の活用は有用と考えられる。このためには、錆の種類、程度、ならびに、錆の処理方法（例えば浮き錆びを払う程度）などによるすべり係数違いの把握を行なう必要があると考えられる。

5) 板厚が母材22mm、添接板11mmの場合の検討であるので、例えば、添接板の板厚が厚くなると必要除去範囲も大きくなることが考えられるが、この寸法とかなり異なる場合には、別途検討を行なう必要がある。

5. まとめ

エッチングプライマー (JIS K 5633, 膜厚 $15\mu\text{m}$) の除去方法を実験により検討を行ない、この時、導いた除去範囲とすべり係数の関係を検討するため、3次元FEM解析により、接触面でのボルトの軸力の伝達範囲を求めて検討を行ない、以下の結論を得た。

- 1) 摩擦接合のボルトの軸力の接触面での伝達について、継手を一体化して3次元FEM解析を行なった結果、M22 (F10T) の高力ボルトを使用し、板厚が母材22mm、添接板11mmの場合、84%が座金の投影面で伝達されるという結果が得られた。
- 2) M22 (F10T) の高力ボルトを使用し、板厚が母材22mm、添接板11mmの場合、エッチングプライマーの除去は、座金投影面より若干余裕をとった外径60mm程度の範囲のプライマーの除去を行なえば、0.4のすべり係数を確保するには十分である。ただし、除去部分を発錆させて、この部分の部分すべり係数を確保する必要がある。

謝辞

本研究にあたり、北島道氏には多大な御協力を頂いた。ここに、記して、深謝致したいと思います。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編) ・同解説, 1990.
- 2) 村松正義, 北島道, 西園広之, 三ツ木幸子：摩擦接合接触面のプライマー除去方法の検討, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, Vol. 2, 1994. 11.
- 3) 脇山広三, 小林正樹：グライNDER処理をした高力ボルト摩擦接合部の接触圧分布, 鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集, Vol. 1, 1993.
- 4) 三ツ木幸子, 近藤明雅, 山田健太郎：軸力を低減した高力ボルト継手の挙動, 構造工学論文集, Vol. 34A, 1988.
- 5) 成宮隆雄, 百瀬敏彦：高力ボルト摩擦接合継手の設計と耐力, 宮地技報, No. 4, 1988
- 6) 社団法人鋼材倶楽部・日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成ーリベット接合・高力ボルト接合, 1977. 3.
- 7) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針, 1983.

(1995年 9月18日受付)