

Ⅲ. ボルト施工基準に関する検討WG

ボルト施工基準に関する検討

ボルト施工基準に関する検討WGメンバー

WGリーダー	田村 洋	横浜国立大学
幹事長	内田 大介	法政大学
部会員	茂呂 充	(株)長大
〃	吉岡 夏樹	(株)駒井ハルテック
〃	濱 達矢	(株)三井 E&S 鉄構エンジニアリング

ボルト施工基準に関する検討WG 目次

1. 接触面数に応じた導入ボルト軸力に関する検討	Ⅲ-1-	1
1-1 はじめに	Ⅲ-1-	1
1-2 試験体とその製作状況	Ⅲ-1-	4
1-2-1 使用材料	Ⅲ-1-	4
1-2-2 試験体の種類	Ⅲ-1-	5
1-2-3 試験体の継手形式と形状	Ⅲ-1-	6
1-2-4 摩擦面処理	Ⅲ-1-	7
1-2-5 ボルトの締付け	Ⅲ-1-	9
1-3 接触面数と導入軸力量に関する検討（シリーズ I）	Ⅲ-1-	10
1-3-1 接触面数と導入軸力が軸力低下に及ぼす影響	Ⅲ-1-	10
(1) リラクセーション試験方法	Ⅲ-1-	10
(2) リラクセーション試験結果	Ⅲ-1-	11
(3) 接触面数および膜厚の影響	Ⅲ-1-	15
(4) 導入軸力の影響	Ⅲ-1-	15
1-3-2 接触面数とボルト軸力がすべり係数に及ぼす影響	Ⅲ-1-	16
(1) すべり耐力試験の方法	Ⅲ-1-	16
(2) すべり耐力試験の結果	Ⅲ-1-	17
(3) 偏心の影響	Ⅲ-1-	19
(4) 接触面数およびボルト軸力の影響	Ⅲ-1-	20
1-4 接触面数と無機ジंकの膜厚に関する検討（シリーズ II）	Ⅲ-1-	21
1-4-1 接触面数と無機ジंकの膜厚が軸力低下に及ぼす影響	Ⅲ-1-	21
(1) リラクセーション試験方法	Ⅲ-1-	21
(2) リラクセーション試験結果	Ⅲ-1-	22
(3) 接触面数および膜厚の影響	Ⅲ-1-	24
1-4-2 接触面数と無機ジंकの膜厚がすべり係数に及ぼす影響	Ⅲ-1-	25
(1) すべり耐力試験の方法	Ⅲ-1-	25
(2) すべり耐力試験の結果	Ⅲ-1-	25
1-5 接触面に応じた導入ボルト軸力の考察	Ⅲ-1-	28
1-5-1 既報の試験結果との比較	Ⅲ-1-	28
1-5-2 1万時間後の軸力残存率の推定	Ⅲ-1-	29
1-5-3 接触面数を考慮した導入ボルト軸力の提案	Ⅲ-1-	31
1-6 まとめ	Ⅲ-1-	32
第1章 参考文献	Ⅲ-1-	32
第1章 付録	Ⅲ-1-	34

2.	異種接合面継手に関する先行研究と採用実績の調査	Ⅲ-2-	1
2-1	はじめに	Ⅲ-2-	1
2-2	異種接合面継手の定義と分類	Ⅲ-2-	1
2-3	異種接合面継手に関する文献調査	Ⅲ-2-	2
2-3-1	文献調査の方法	Ⅲ-2-	2
2-3-2	文献調査の結果	Ⅲ-2-	2
2-4	異種接合面継手に関する施工の実績調査	Ⅲ-2-	4
2-4-1	実績調査の方法	Ⅲ-2-	4
2-4-2	実績調査の結果	Ⅲ-2-	4
2-4-3	各接触面の現場施工に関する調査の方法	Ⅲ-2-	5
2-4-4	各接触面の現場施工に関する調査の結果	Ⅲ-2-	5
2-5	まとめ	Ⅲ-2-	6
	第2章 参考文献	Ⅲ-2-	6
	第2章 付録 先行研究で報告されている異種接合面継手の実験データ	Ⅲ-2-	7
3.	異種接合面継手の適用性に関する実験的検討	Ⅲ-3-	1
3-1	はじめに	Ⅲ-3-	1
3-2	本研究における対象継手と接触面処理	Ⅲ-3-	1
3-2-1	試験体諸元	Ⅲ-3-	1
3-2-2	接触面処理	Ⅲ-3-	4
3-2-3	ボルト締め	Ⅲ-3-	8
3-3	異種接合面継手のボルト軸力推移（シリーズ I）	Ⅲ-3-	8
3-3-1	リラクセーション試験の方法	Ⅲ-3-	9
3-3-2	リラクセーション試験の結果	Ⅲ-3-	9
3-3-3	ボルト軸力低下の支配因子	Ⅲ-3-	11
3-4	異種接合面継手のすべり挙動（シリーズ I）	Ⅲ-3-	12
3-4-1	すべり耐力試験の方法	Ⅲ-3-	13
3-4-2	すべり耐力試験の結果	Ⅲ-3-	13
3-4-3	観察されたすべり性状	Ⅲ-3-	15
3-4-4	すべり係数	Ⅲ-3-	20
3-5	異種接合面継手のボルト軸力推移（シリーズ II）	Ⅲ-3-	24
3-5-1	リラクセーション試験の方法	Ⅲ-3-	24
3-5-2	リラクセーション試験の結果	Ⅲ-3-	24
3-5-3	ボルト軸力低下の支配因子	Ⅲ-3-	26
3-6	異種接合面継手のすべり挙動（シリーズ II）	Ⅲ-3-	26
3-6-1	すべり耐力試験の方法	Ⅲ-3-	26
3-6-2	すべり耐力試験の結果	Ⅲ-3-	27
3-6-3	得られたすべり係数	Ⅲ-3-	29

3-7 異種接合面継手の適用性	Ⅲ-3- 32
3-7-1 タイプ A	Ⅲ-3- 32
3-7-2 タイプ B	Ⅲ-3- 33
3-8 まとめ	Ⅲ-3- 34
第 3 章 参考文献	Ⅲ-3- 35
第 3 章 付録 1 表面粗さ評価値に及ぼす評価長さの影響	Ⅲ-3- 36
第 3 章 付録 2 すべり耐力試験データ (シリーズ I)	Ⅲ-3- 39
第 3 章 付録 3 すべり耐力試験データ (シリーズ II)	Ⅲ-3- 56
第 3 章 付録 4 荷重-母板ひずみデータ	Ⅲ-3- 67

1. 接触面数に応じた導入ボルト軸力に関する検討

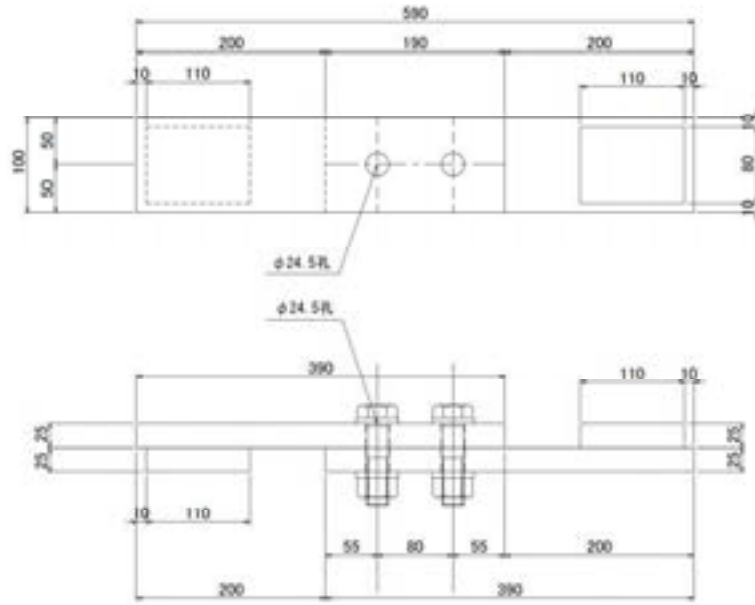
1-1 はじめに

現行の道路橋示方書¹⁾（以下、道示）および鉄道構造物等設計標準²⁾（以下、鉄道標準）において、高力ボルト摩擦接合継手（以下、ボルト継手）を用いる場合、摩擦面の処理は、黒皮を除去した粗面状態（以下、粗面状態）および厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を塗布した摩擦面を基本としている。これらの基準において、無機ジンクの適用が許容されたのは、道示ではH2年度³⁾、鉄道標準ではH4年度⁴⁾からであり、それ以前はグリッドブラスト処理（以下、ブラスト）や赤錆状態といった粗面状態のみであった。そして、H2年度の道示⁵⁾で摩擦面に所定の条件で無機ジンクを塗布した場合のすべり係数が0.45と規定され、粗面状態の0.4よりも大きくなったこともあり、現在の鋼橋製作の現場において、新設構造物では、そのほとんどが無機ジンクを塗布した摩擦面を適用している。

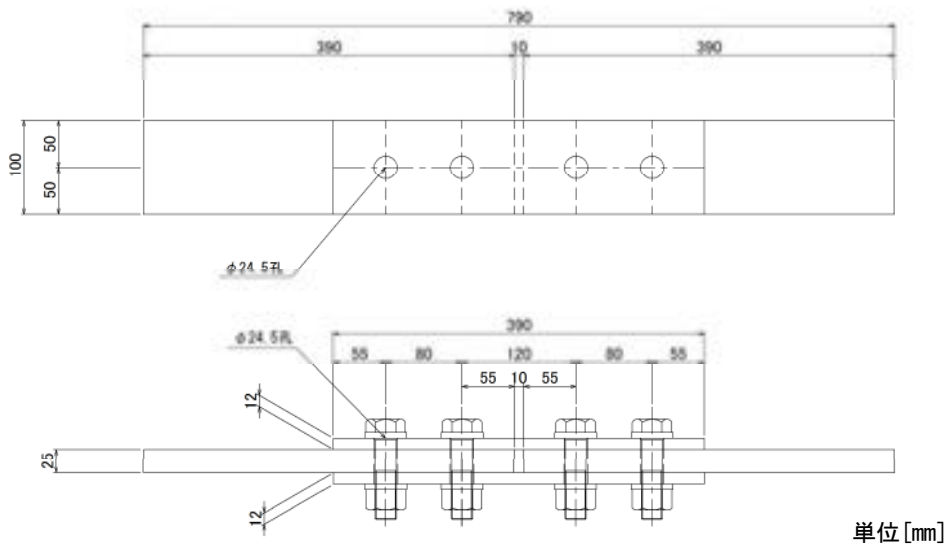
高力ボルトの導入軸力について、締付け方法としては一般に、トルク法が用いられている。道示¹⁾や鉄道標準²⁾では、トルク法でのボルト締付けに対して、設計ボルト軸力に対して10%増しの締付けを規定している。これは、トルク係数値やすべり係数のばらつき、クリープやリラクセーションなどの影響を考慮したものであり、無機ジンクの適用が許容された後も変わることはなかった。

既往の研究⁶⁾では、リラクセーションによるボルト軸力の低下は、摩擦面の処理が粗面状態の場合、締付け1年後には約4%となり、残り約6%でトルク係数値やすべり係数のばらつき等の影響を考慮できることが示されている。しかしながら、摩擦面に無機ジンクを塗布した場合には、粗面状態と異なり、締付け1年後には約11%ボルト軸力は低下し、10%増し締めではトルク係数値やすべり係数のばらつきなどその他の影響をボルト軸力では考慮仕切れないことも確認されている。また、無機ジンクの塗布量については、塗布した場合のリラクセーションは膜厚が厚くなるほど大きくなるということも報告されている⁷⁾。

文献(6,8)では、無機ジンクを塗布した場合には、設計ボルト軸力の15%増し締めで行えば、軸力低下後の残存軸力は粗面状態と同等となり、ボルト継手の安全性・信頼性が向上することが示されている。ただし、このような増し締めに関する議論は、フィラープレート（以下、フィラー）の挿入がなく、かつ2面摩擦（図1-1-1(b)参照）のボルト継手を前提としている。フィラーを挿入したボルト継手（図1-1-1(c)(d)参照）については、これまですべり耐力試験は実施されてきたが⁹⁾⁻¹²⁾、無機ジンクを塗装した継手のリラクセーションによる軸力低下については明確にされていない。この軸力低下は摩擦面の数にも影響を受けると考えられ、フィラーを挿入すれば実質的な摩擦面数は増加し、軸力低下が大きくなると推察される。逆に、1面摩擦（図1-1-1(a)参照）では、2面摩擦より軸力低下が小さくなると予想されるが、どの程度の軸力低下となるのかは不明である。さらに、これらの影響を考慮して導入軸力を変化させた検証は、これまで実施されていなかった。



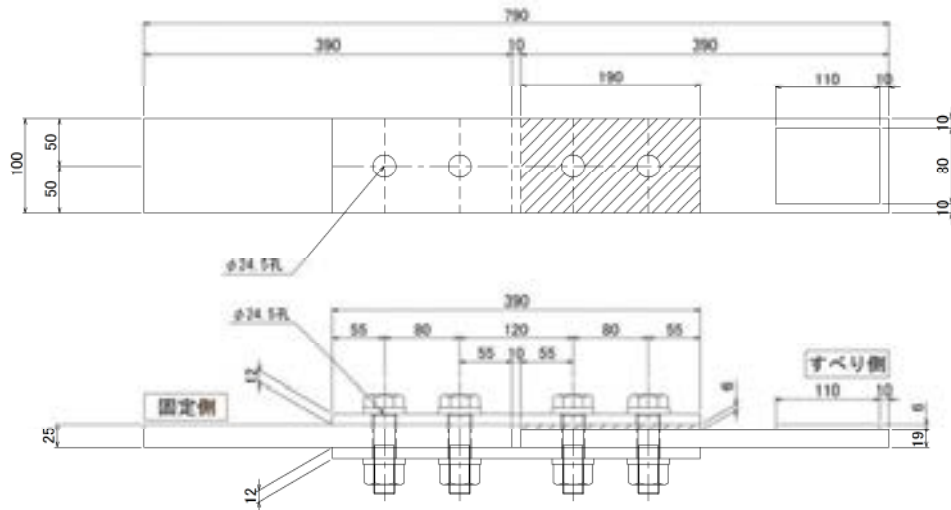
(a) 継手形式 1 (1面摩擦)



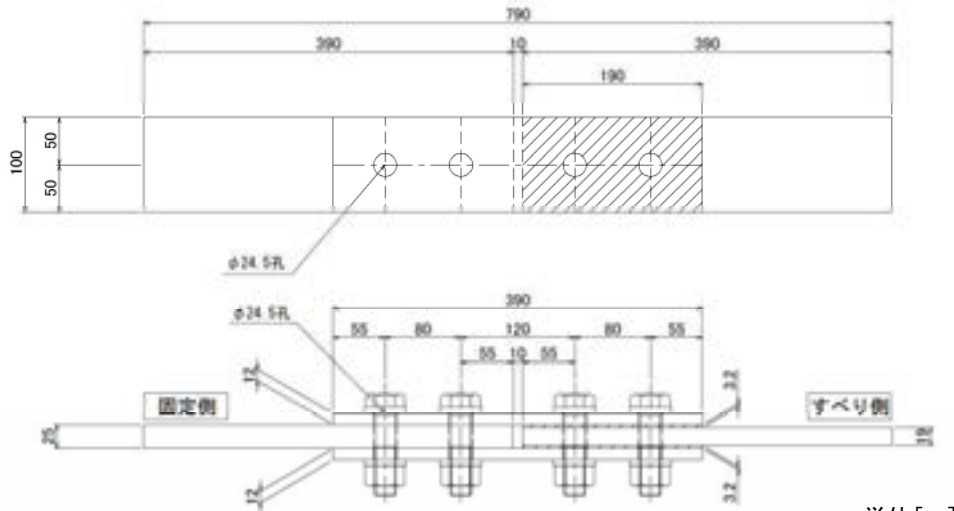
単位 [mm]

(b) 継手形式 2 (2面摩擦)

図 1-1-1 試験体形状



(c) 継手形式 3 (2面摩擦, フィラー1枚)



(d) 継手形式 4 (2面摩擦, フィラー2枚)

単位 [mm]

図 1-1-1 試験体形状 (続き)

本検討は、ボルト継手の安全性・信頼性を向上させることを目的とし、供用後も所定のボルト軸力を確保するための摩擦接合面に応じたボルト導入軸力を検討することを目的とした。そのために、大きく分けて2種類の検討を行った。シリーズⅠでは図 1-1-1 に示した摩擦面数の異なる4種類の継手形式を対象に、摩擦面に塗布する無機ジンク厚を標準膜厚（道示¹⁾の条件の中央値）となる75 μ mを目標として試験体を製作し、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施した。

シリーズⅡでは、図 1-1-1 (b)～(d) に示す継手形式2～4の3種類について摩擦面に塗布する無機ジンク厚に着目し、塗布する膜厚の目標を道示¹⁾の条件の下限（50 μ m）と上限（100 μ m）とした試験体を製作した。そして、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施した。

最後にシリーズⅠとシリーズⅡの検討結果について、これまで実施された既存のリラクセーション試験結果との比較も行い、摩擦接合面の違いによる軸力低下の実態を明確にした上で、摩擦面数に応じた導入軸力を提案した。

1-2 試験体とその製作状況

本節では、シリーズⅠとシリーズⅡの検討で用いた試験体とその製作状況として、使用材料、試験体の種類、継手形式、形状、摩擦面処理、ボルト締付け方法について述べる。

1-2-1 使用材料

試験体に使用した鋼材および高力ボルトの材料特性をそれぞれ表 1-2-1、表 1-2-2 に示す。母板および連結板には板厚 12, 19, 25mm の SM490Y を使用し、フィラーは 3.2, 6mm の SS400 を用いた。ボルトは F10T(M22)とした。また、PA, PB シリーズにおける 3.2 mm のフィラーはミルシートがなく、材質・強度ともに不明である。

表 1-2-1 使用鋼材の機械的性質および化学成分

(a) P, B シリーズ

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)					適用場所
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	
SS400	3.2	288	441	40	0.15	0.03	0.47	0.014	0.007	継手形式4の フィラープレート
	6	337	446	31	0.13	0.20	0.65	0.021	0.005	継手形式3の フィラープレート
SM490YA	12	430	519	23	0.15	0.19	1.10	0.011	0.005	継手形式2,3,4の 連結板
SM490YB	19	437	530	23	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007	継手形式3,4の 母板
	25	434	527	25	0.15	0.17	1.08	0.015	0.004	継手形式1,2,3,4の 母板

(b) PA, PB シリーズ

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質			化学成分 (%)					適用場所
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	
SS400	3.2	ミルシート未入手								継手形式4の フィラープレート
SM490Y	6	378	542	27	0.17	0.44	1.46	0.013	0.004	継手形式3の フィラープレート
	12	434	565	25	0.16	0.27	1.39	0.022	0.005	継手形式2,3,4の 連結板
	19	446	565	28	0.16	0.32	1.42	0.014	0.003	継手形式3,4の 母板
	25	451	560	23	0.17	0.3	1.38	0.008	0.003	継手形式2,3,4の 母板

表 1-2-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値

等級	ボルト径	首下 長さ (mm)	有効 断面積 (mm ²)	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)	備考
				4号試験片				製品		製品	製品		
				降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	引張荷重 (kN)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)	硬さ (HRC)		
F10T	M22	90	303	1,030	1,071	19	69	330	33	27	40	0.131	P, Bシリーズ
F10T	M22	90	303	1,008	1,062	18	69	328	32	26	38	0.135	PA, PBシリーズ

1-2-2 試験体の種類

試験体の種類を表 1-2-3 に示す。試験体のパラメータは、①摩擦面処理（無機ジंक 50・75・100 μ m, ブラスト），②継手形式（摩擦面数，フィラーの有無；図 1-1-1 参照）および③増し締め率（10・15・20%）とし，試験体は 18 種類とした。試験体は各種 3 体製作したため，その総数は 54 体である。表中の継手形式と摩擦面処理，増し締め率については，以降の節で説明する。

なお，本試験ではまずシリーズ I として，P および B シリーズのすべり耐力試験を実施した後，別研究のすべり耐力試験に使用した鋼板を再度素地調整および塗装し，シリーズ II として，PA・PB シリーズの試験体製作および試験を実施した。

表 1-2-3 試験体の種類とパラメータ

試験体名	①摩擦面処理	②継手形式	すべり降伏耐力比 β	③軸力の増し締め率
P1-15	無機ジンクリッチペイント 75 μ m	継手形式1 (1面摩擦)	0.31	15%
P2-15		継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
P3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
P3-20			0.84	20%
P4-15		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.81	15%
P4-20			0.84	20%
B1-10	ブラスト	継手形式1 (1面摩擦)	0.24	10%
B2-10		継手形式2 (2面摩擦)	0.49	10%
B3-10		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.64	10%
B3-15			0.68	15%
B4-10		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.64	10%
B4-15			0.68	15%
PA2-15	無機ジンクリッチペイント 50 μ m	継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
PA3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
PA4-20		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.84	20%
PB2-15	無機ジンクリッチペイント 100 μ m	継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
PB3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
PB4-20		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.84	20%

1-2-3 試験体の継手形式と形状

図 1-1-1 に対象とする継手形式を示す。継手形式 1 は 1 面摩擦，継手形式 2 は 2 面摩擦，継手形式 3 はフィラー 1 枚が挿入された 2 面摩擦，継手形式 4 はフィラー 2 枚が挿入された 2 面摩擦である。継手形式 3 は板厚変化部で広く用いられる形式であり，継手形式 4 は鉸桁のウェブや箱桁の縦リブ等の接合部で板厚の中心を合わせるときに用いる継手形式である。継手形式 3 および 4 は 2 面摩擦に分類されるが，実質的な摩擦面の数はそれぞれ 3 と 4 である。そこで本報告書では，誤解を招かないようフィラー 1 枚を接触面数 3，フィラー 2 枚を接触面数 4 とし，以降は実摩擦面の数を接触面数と呼ぶこととする。

試験体は，すべり降伏耐力比 β が最も大きくなる継手形式 3 および 4 のフィラー付き試験体の寸法（板厚，板幅）が標準試験片寸法¹³⁾と一致するよう設計した。また，本研究ではボルト軸力の低下に及ぼす接触面数の影響を評価することを目的としており，ボルト首下長さの影響を排除させるため，使用したボルトはすべての試験体でボルト首下長さ 90mm に統一した。このため，継手形式 3, 4 よりすべり側の母板厚が大きい継手形式 1 および 2 のすべり降伏耐力比 β は小さくなった。各試験体ともに標準孔を用い，ボルトピッチ(P)や縁端距離(e)は，標準試験片¹³⁾と一致させた。また，継手形式 1 および 3 については，載荷試験機で両端を掴めるよう平板を溶接し合計厚をそろえた。

1-2-4 摩擦面処理

無機ジンの摩擦面処理では、図 1-2-1 に示すように、ブラストによる素地調整を行った後に、無機ジンを目標膜厚 P シリーズ：75 μm 、PA シリーズ：50 μm 、PB シリーズ：100 μm で塗布した。ブラストの摩擦面処理は、黒皮を除去した粗面状態を想定しており、図 1-2-1 に示す素地調整のみを行ったものである。図 1-2-2 に無機ジンの塗装状況を示す。

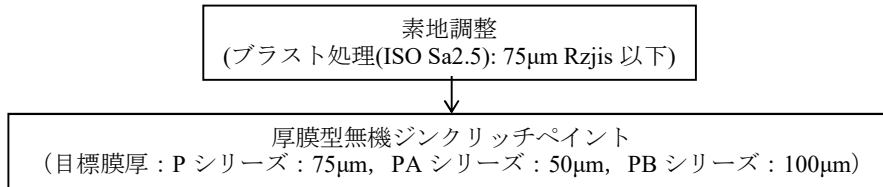


図 1-2-1 無機ジン試験体の作業手順



図 1-2-2 無機ジンの塗装状況

摩擦面の処理状態を把握するために、ボルト孔周辺 (図 1-2-3) に対して、表面粗さ計測と無機ジンの膜厚計測を行った。表面粗さ計測には表面粗さ計(SJ-210)を用いて、P3-15, 20 のすべてのフィラーを対象に評価長 8mm で十点平均粗さ(Rzjis)を求めた。膜厚計測には電磁誘導式膜厚計 (膜厚計 SWT-9300) を用い、無機ジンの試験体においてすべり側 (すべり耐力試験においてすべらせる側、図 1-1-1 の各図右側) のすべてのボルト孔周辺を計測した。

PA, PB シリーズでは、粗さは同様の計測器で各試験体 1 体ずつとし、連結板は母板との接触面、母板およびフィラーは両面、すべり側を計測した。膜厚は電磁誘導式膜厚計 (膜厚計 SWT-9100) を用い、すべての試験体の両面、すべり側を計測した。

表面粗さ測定結果を図 1-2-4 に示す。無機ジンはブラストよりも Rzjis の平均値は低いものの、ばらつきは大きいことが示されている。また、膜厚ごとに比較すると膜厚が薄くなるほど、最大値が高くなっている。

膜厚計測結果を図 1-2-5 に示す。計測箇所に対するそれぞれの膜厚平均値は P シリーズ：83 μm 、PA シリーズ：59 μm 、PB シリーズ：108 μm であり、多少のばらつきはあるが、それぞれの目標膜厚に近い値であることを確認した。図 1-2-5 (b) (e) は P, PA および PB シリーズの塗装厚を試験体ごとに整理した結果であるが、試験体別にみると、試験体 P1-15, P2-15 では平均膜厚は 90 μm を超え、平均値の最大と最小で約 20 μm の違いが生じていた。同様に PA シリーズでは 11 μm 、PB シリーズでは 31 μm の違いが生じていた。

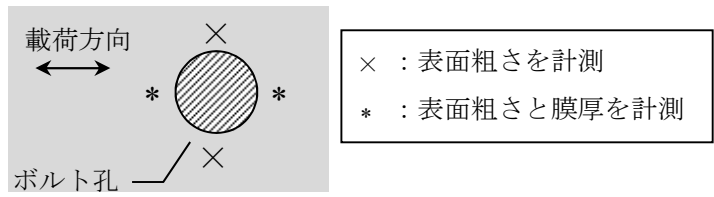
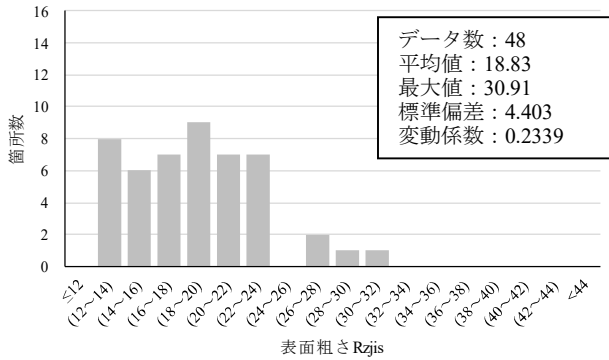
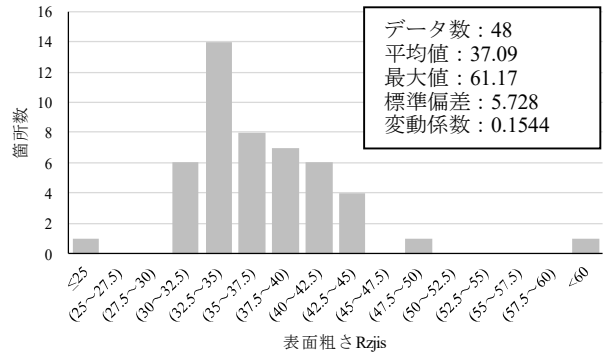


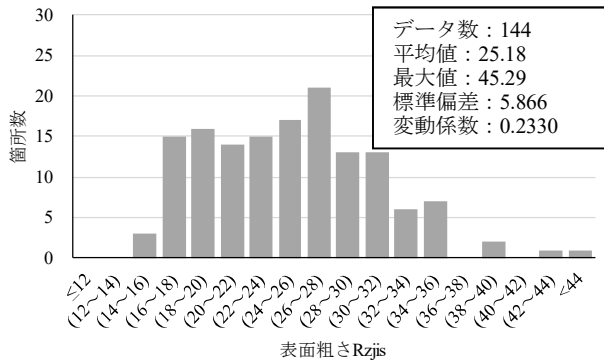
図 1-2-3 表面粗さおよび膜厚の計測位置



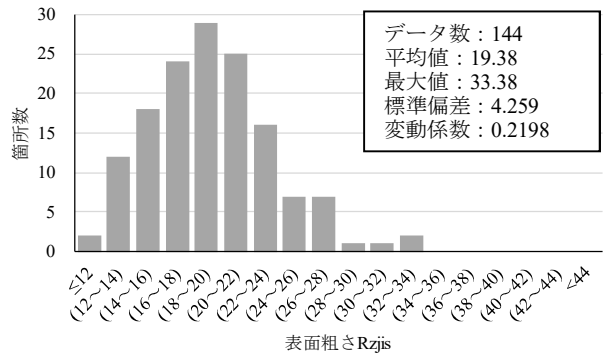
(a) 無機ジンク 75 μm (P3-15, 20 のフィラー)



(b) ブラスト (B3-15, 20 のフィラー)

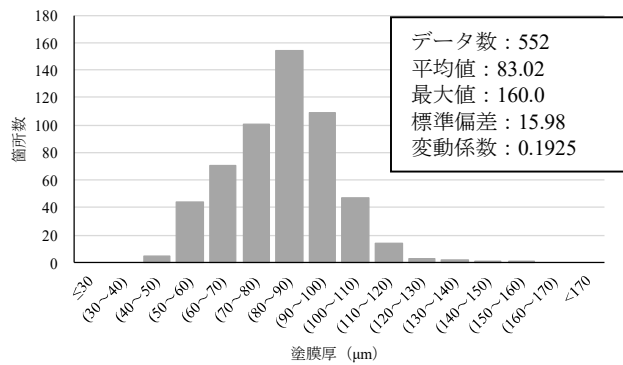


(c) 無機ジンク 50 μm (PA シリーズ)

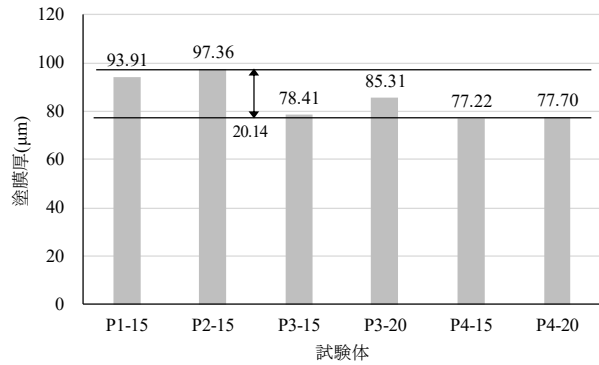


(d) 無機ジンク 100 μm (PB シリーズ)

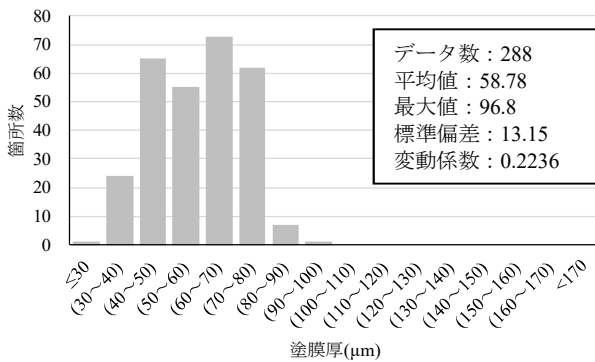
図 1-2-4 ボルト孔周辺における表面粗さの測定結果



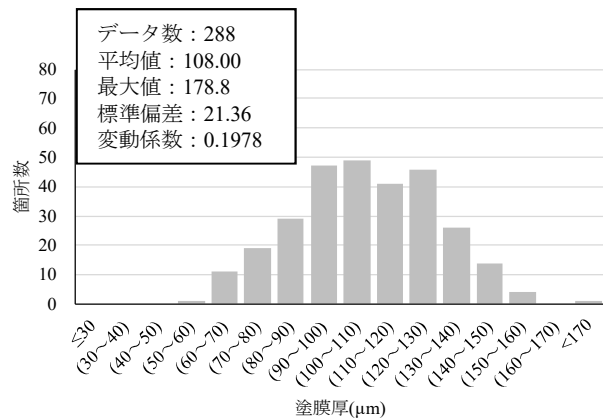
(a) P シリーズ試験体全体



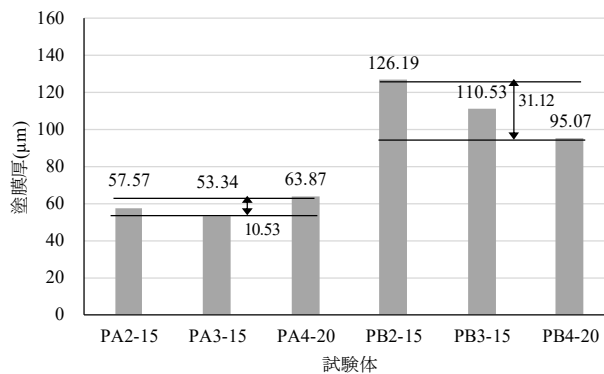
(b) P シリーズ試験体毎に整理



(c) PA シリーズ試験体全体



(d) PB シリーズ試験体全体



(e) PA, PB シリーズ試験体毎に整理

図 1-2-5 ボルト孔周辺における膜厚の測定結果

1-2-5 ボルトの締付け

ボルトの締付けはトルク法で実施した。導入軸力の設定にあたって、無機ジंकでは既往の研究⁶⁾に示される軸力低下^{6),8)}を考慮し、増し締め率 15%を基本とした。ブラストでは、道示¹⁾および鉄道標準²⁾に則り、増し締め率 10%を基本とした。なお、接触面数の多い試験体については、摩擦面処理に関わらず、さらに 5%増し締め率が高い 20%のケースも設定した。

締め付けの際は、一次締めは設計ボルト軸力の 60%、本締めは導入軸力が表 1-2-3 に示した増し締め率を考慮した値になるようにトルクレンチを用いて締め付けた。なお、試験体の固定側（すべり耐力試験においてすべらせない側、図 1-1-1 の各図左側）のボルトについては、表 1-2-3 で示した増し締め率を考慮した導入軸力からさらに 20kN 増し締めした。

1-3 接触面数と導入軸力量に関する検討（シリーズ I）

シリーズ I では図 1-1-1 に示した摩擦面数の異なる 4 種類の継手形式を対象に、摩擦面に塗布する無機ジンク厚を道示¹⁾の条件の中央値となる 75 μ m を目標として試験体を製作し、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施した。

1-3-1 接触面数と導入軸力が軸力低下に及ぼす影響

本項では、はじめにシリーズ I におけるリラクセーション試験方法を説明し、試験結果に基づいて、接触面数とボルト導入軸力がその後の軸力低下に及ぼす影響について考察する。

(1) リラクセーション試験方法

リラクセーション試験は、ボルト締め付け時点から 28 日間（672 時間）行った。試験対象は、すべり側の合計 72 本のボルトとし、ボルト軸力をひずみゲージ（ゲージ長 5mm）により計測するため、ボルト頭にリード線を通すための孔を明け、ボルト軸部（母材板厚の中央位置）にひずみゲージ 2 枚を取付けた（図 1-3-1）。このゲージ 2 枚の出力の平均値を軸ひずみとし、これに換算率を乗じることで軸力を取得した。換算率は、事前に各ロット 3 本のボルトについてキャリブレーション試験を行い決定した。キャリブレーション試験結果を表 1-3-1 に示す。また、リラクセーション試験中は室内に安置し、その状況の一例を図 1-3-2 に示す。

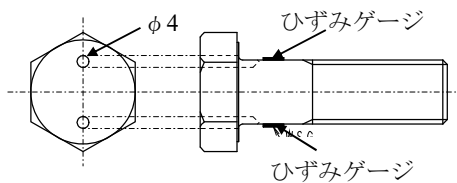


図 1-3-1 ひずみゲージの取り付け

表 1-3-1 キャリブレーション試験結果

試験ケース	等級	ボルト径	首下長さ (mm)	荷重/ひずみ (kN/ ϵ)
P, Bシリーズ	F10T	M22	90	0.07727



図 1-3-2 計測状況の一例（写真は 3 章シリーズ I）

(2) リラクゼーション試験結果

リラクゼーション試験結果を表 1-3-2 に示す。締付け直後（約 30 秒後）と 28 日後におけるボルト軸力の計測結果を、それぞれ導入軸力と残存軸力として示し、導入軸力の設計ボルト軸力に対する比率（設計軸力比率）、軸力残存率についても示している。なお、計測不具合等により計測不能となったボルトについては、表中で「×」で示している。すべり耐力試験を数日に亘って実施したため、軸力計測は 28 日経過後も継続し、すべり耐力試験直前まで行った。ただし、計測期間の統一を図るため、ここでは 28 日までの計測結果を示している。

導入軸力は、P4-20、B3-10 を除けば、目標値より 1～3% 高い軸力が導入されており、概ね目標軸力であった。

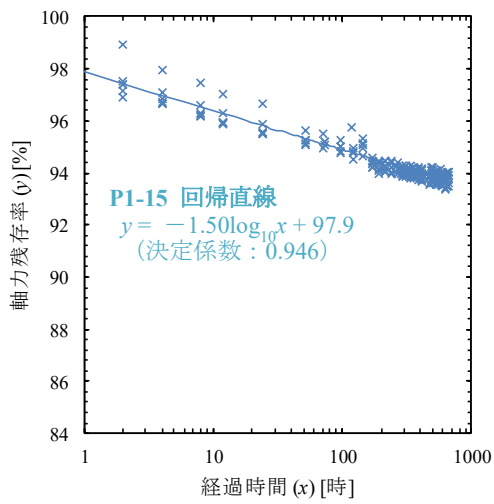
試験体の種類ごとの軸力残存率の経時変化を図 1-3-3、1-3-4 に示す。図中には、計測結果に関する回帰直線と決定係数も示している。

以降の節では、これら試験結果に基づいて軸力低下に及ぼす接触面数と導入軸力の影響について考察する。

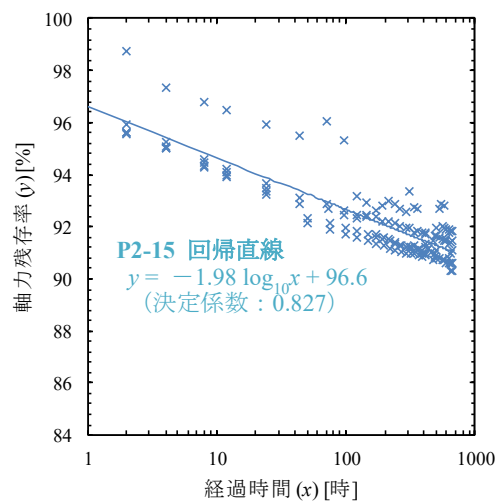
表 1-3-2 導入軸力およびリラクセーション集計結果

試験体			ボルト軸力											軸力 残存率 [%]		
			締付け直後（導入軸力）： N_a [kN]						672時間後の軸力（残存軸力）： N_b							
			ボルトNo.		平均	設計軸力比率 （%）		ボルトNo.		平均	設計軸力比率 （%）					
			No.1	No.2				No.1	No.2							
無機 ジンク 75 μ m	P1-15	-1	243	242	242.5	240.8	118.3	117.5	228	227	227.5	225.8	111.0	110.2	93.8	93.8
		-2	239	235	237.0		115.6		225	220	222.5		108.5		93.9	
		-3	237	249	243.0		118.5		221	234	227.5		111.0		93.6	
	P2-15	-1	242	235	238.5	239.0	116.3	116.6	219	214	216.5	217.0	105.6	105.9	90.8	91.0
		-2	235	×	235.0		114.6		213	210	211.5		103.2		90.6	
		-3	241	246	243.5		118.8		221	225	223.0		108.8		91.6	
	P3-15	-1	250	237	243.5	242.3	118.8	118.2	226	214	220.0	220.0	107.3	107.3	90.3	91.0
		-2	243	247	245.0		119.5		221	×	221.0		107.8		90.9	
		-3	244	233	238.5		116.3		226	212	219.0		106.8		91.8	
	P3-20	-1	246	258	252.0	247.2	122.9	120.6	221	233	227.0	222.5	110.7	108.5	90.1	90.0
		-2	248	242	245.0		119.5		223	219	221.0		107.8		90.2	
		-3	244	245	244.5		119.3		220	219	219.5		107.1		89.8	
	P4-15	-1	×	×	×	239.3	×	116.7	×	×	×	211.8	×	103.3	×	88.9
		-2	238	249	243.5		118.8		211	220	215.5		105.1		88.5	
		-3	235	×	235.0		114.6		210	206	208.0		101.5		89.4	
	P4-20	-1	262	259	260.5	256.5	127.1	125.1	229	228	228.5	226.7	111.5	110.6	87.7	88.4
		-2	254	256	255.0		124.4		225	226	225.5		110.0		88.4	
		-3	252	256	254.0		123.9		225	227	226.0		110.2		89.0	
ブラスト	B1-10	-1	229	229	229.0	230.8	111.7	112.6	224	224	224.0	226.2	109.3	110.3	97.8	98.0
		-2	236	228	232.0		113.2		233	223	228.0		111.2		98.3	
		-3	233	230	231.5		112.9		228	225	226.5		110.5		97.8	
	B2-10	-1	237	226	231.5	231.2	112.9	112.8	229	220	224.5	224.8	109.5	109.7	97.0	97.3
		-2	230	226	228.0		111.2		226	220	223.0		108.8		97.8	
		-3	240	228	234.0		114.1		233	221	227.0		110.7		97.0	
	B3-10	-1	231	206	218.5	221.5	106.6	108.0	220	203	211.5	217.3	103.2	106.0	96.8	97.1
		-2	×	×	×		×		×	222	222.0		108.3		×	
		-3	224	225	224.5		109.5		217	220	218.5		106.6		97.3	
	B3-15	-1	247	240	243.5	240.7	118.8	117.4	241	229	235.0	231.2	114.6	112.8	96.5	97.0
		-2	236	245	240.5		117.3		228	238	233.0		113.7		96.9	
		-3	×	238	238.0		116.1		219	232	225.5		110.0		97.5	
	B4-10	-1	240	225	232.5	237.2	113.4	115.7	231	218	224.5	228.2	109.5	111.3	96.6	96.2
		-2	239	234	236.5		115.4		230	223	226.5		110.5		95.8	
		-3	245	240	242.5		118.3		235	232	233.5		113.9		96.3	
	B4-15	-1	257	257	257.0	251.8	125.4	122.8	248	248	248.0	243.2	121.0	118.6	96.5	96.6
		-2	248	240	244.0		119.0		240	231	235.5		114.9		96.5	
		-3	251	258	254.5		124.1		241	251	246.0		120.0		96.7	

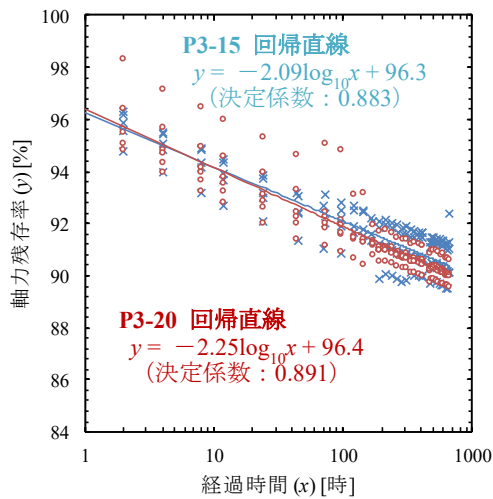
注) 設計軸力比率：計測ボルト軸力／設計ボルト軸力，×：測定不能箇所



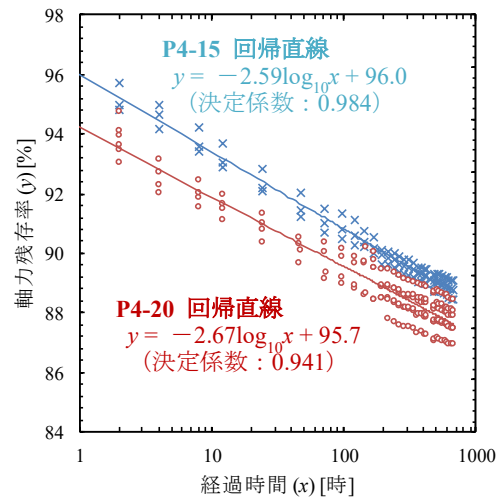
(a) 継手形式 1



(b) 継手形式 2

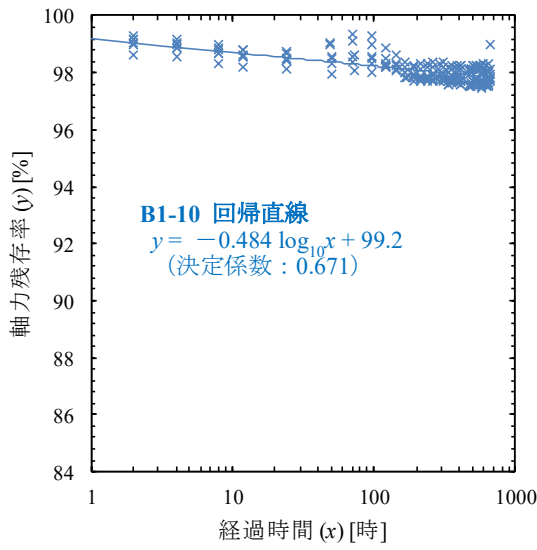


(c) 継手形式 3

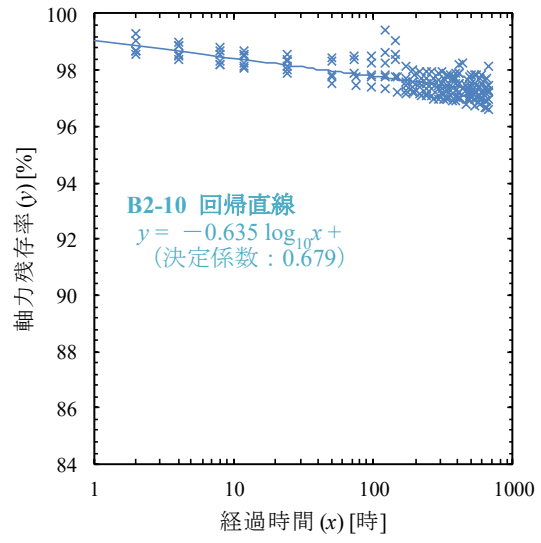


(d) 継手形式 4

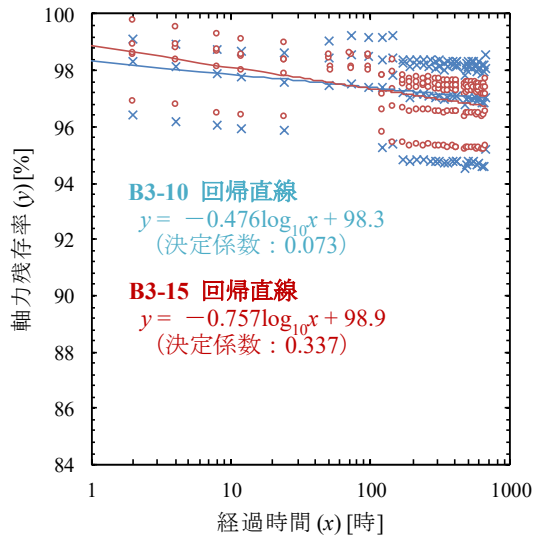
図 1-3-3 リラクセーション試験における軸力残存率の推移 I (摩擦面処理 : 無機ジンク)



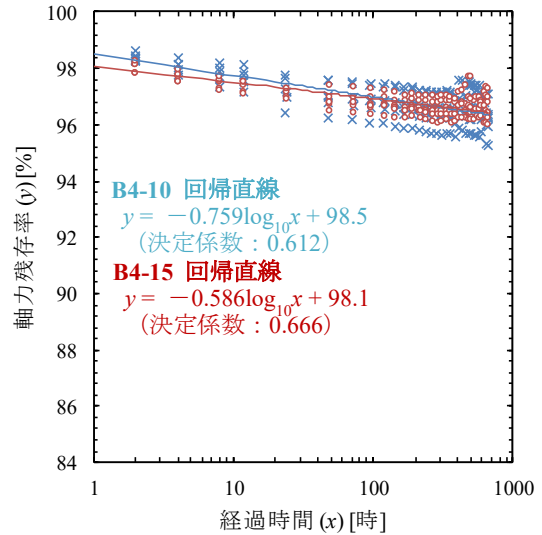
(a) 継手形式 1



(b) 継手形式 2



(c) 継手形式 3



(d) 継手形式 4

図 1-3-4 リラクゼーション試験における軸力残存率の推移 II (摩擦面処理 : プラスト)

(3) 接触面数および膜厚の影響

無機ジंकの結果（図 1-3-3）においては、接触面数の影響は明瞭であり、回帰直線においても接触面数が多いほど軸力の低下が著しいことが示されている。これは、ボルトが締付ける合計塗膜厚（以下、締付け膜厚）の違いによって生じたものと考えられる。

締付け膜厚の影響を評価するため、ボルト孔周辺における無機ジंकの推定合計膜厚と軸力残存率の関係を図 1-3-5 に示す。ここで示す推定合計膜厚とは、試験体ごとの平均値として、膜厚計測で得られた各試験体のすべり側ボルト孔周辺の平均膜厚（図 1-2-5 (b)）に、塗膜面数（継手形式 1：4 面，継手形式 2：6 面，継手形式 3：8 面，継手形式 4：10 面）を乗じて求めた。軸力残存率についても試験体平均値を示している。図 1-3-5 には、推定合計膜厚が大きいほど軸力の低下が大きくなる関係が示されている。この関係に基づくと、試験体 P1-15, P2-15 において、平均膜厚が他の試験体と同程度であった場合には、実測値よりも若干と思われるが高い軸力残存率を保持していたものと推察される。

一方、ブラストの結果（図 1-3-4）においては、計測結果のばらつきが大きいのが、28 日後の軸力残存率等において、接触面数が多いほど軸力低下傾向がわずかに認められる。ブラスト処理された表面においても極わずかにクリープが発生し、その影響が接触面数に応じて顕在化した可能性がある。ただし、最も影響がある継手形式 4 においても、残存軸力率は 96%と軸力残存率は無機ジंकと比べ高かった。

以上のように、無機ジंकにおいては締付け膜厚に起因した接触面数の影響が顕著であることが示された。

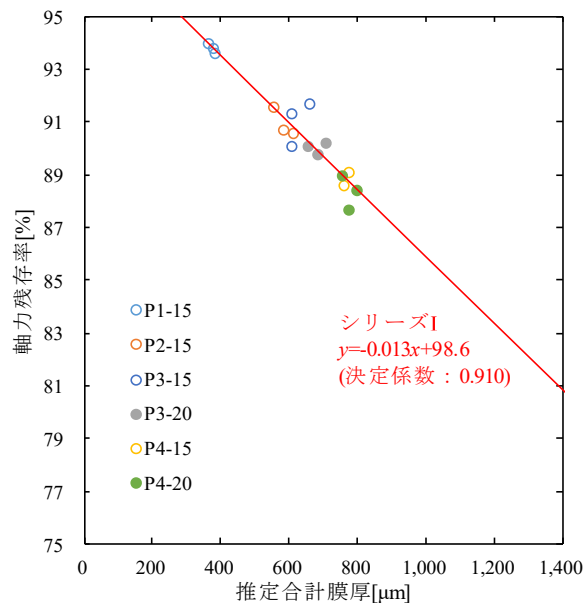


図 1-3-5 推定合計膜厚と軸力残存率の関係

(4) 導入軸力の影響

導入軸力の影響に関して、表 1-3-2 に示すように無機ジंकの同じ継手形状においては、増し締め率が高い試験体の軸力低下がわずかに大きくなる傾向が示されている。そこで、個々のボルトの導入軸力と 28 日後の軸力残存率の関係を図 1-3-6 に、表 1-3-3 には図 1-3-6 に示した回帰直線について回帰係数、切片、決定係数を示している。図 1-3-6 (a) の横軸目盛において、括弧内の数値は設計軸力 205kN に対す

る比率を示す。既往の研究⁸⁾では、無機ジンクにおいて、導入軸力が高いほど残存軸力の低下が大きくなる傾向が示されたが、その傾向が認められたのは締付け膜厚が大きいP4-15, 20でのみであった。これは、導入軸力が高いと締付けによる無機ジンクのクリープが大きくなるためと考えられる。ただし、それ以外の試験体では明確な傾向は確認できなかった。同様に、ブラストにおいても、導入軸力の影響は確認できなかった。

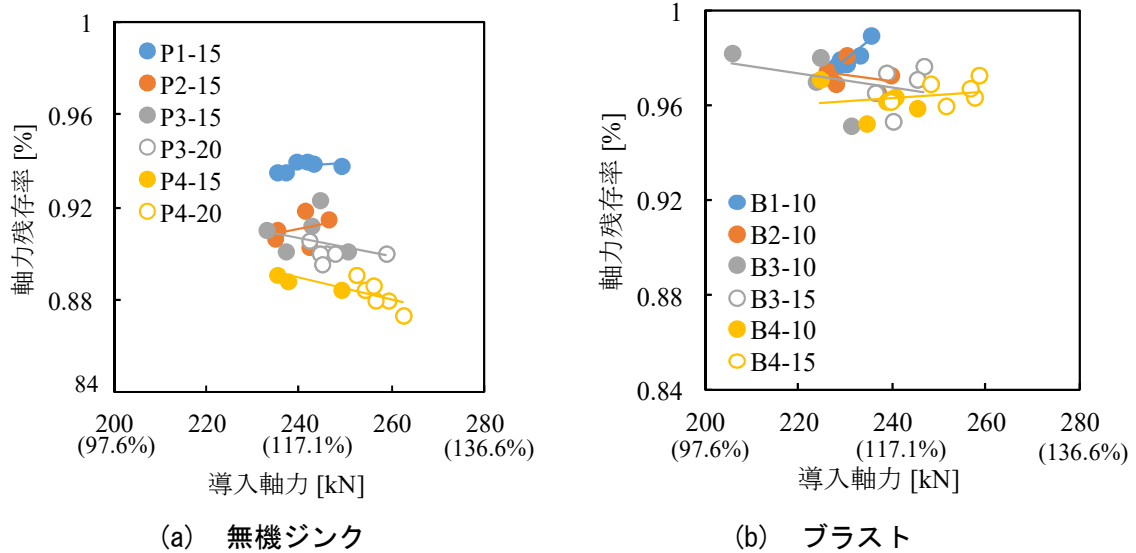


図 1-3-6 28 日経過後の軸力残存率の比較（括弧書きの数値は設計軸力 205kN に対する比率）

表 1-3-3 回帰係数, 切片, 決定係数のまとめ

摩擦面処理	試験体名	回帰係数 (/kN)	切片	決定係数
無機ジンク 75 μ m	P1-15	1.74×10^{-2}	89.6	1.52×10^{-1}
	P2-15	4.01×10^{-2}	81.4	9.82×10^{-2}
	P3-15, P3-20	-3.75×10^{-2}	99.6	9.66×10^{-2}
	P4-15, P4-20	-4.58×10^{-2}	99.9	5.54×10^{-1}
ブラスト	B1-10	1.55×10^{-2}	62.3	8.27×10^{-1}
	B2-10	-2.46×10^{-2}	103	7.74×10^{-2}
	B3-10, B3-15	-2.89×10^{-2}	104	1.16×10^{-1}
	B4-10, B4-15	1.41×10^{-2}	93	6.73×10^{-2}

1-3-2 接触面数とボルト軸力がすべり係数に及ぼす影響

本項では、はじめにすべり耐力試験方法を説明し、試験結果に基づいて、接触面数とボルト軸力がすべり係数に及ぼす影響について考察する。

(1) すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は、リラクセーション試験後に実施した。試験には載荷能力 1,000kN の万能試験機を

用いた。本試験では、試験体両端部それぞれ約 120mm の範囲をチャックで固定し、引張荷重を 2kN/s 程度の速度で主すべりが生じるまで与えた。試験の状況を図 1-3-7 に示す。

試験時には、荷重および試験体に発生するひずみを 10Hz で計測した。その際、図 1-3-8 に示すすべり側の内側のボルト軸位置 (No.1 ボルト) における母板と連結板間の相対変位を測定するため、クリップゲージを設置してすべり時の変位を計測した。また、母板の曲げひずみ計測については、ひずみゲージ (ゲージ長 5mm) によって行った。すべり耐力 (荷重) は、主すべりの発生によって大きな音を伴って荷重が下がったとき (荷重と変位の関係に大きな変化が見られたとき) の荷重とした。



図 1-3-7 载荷状況

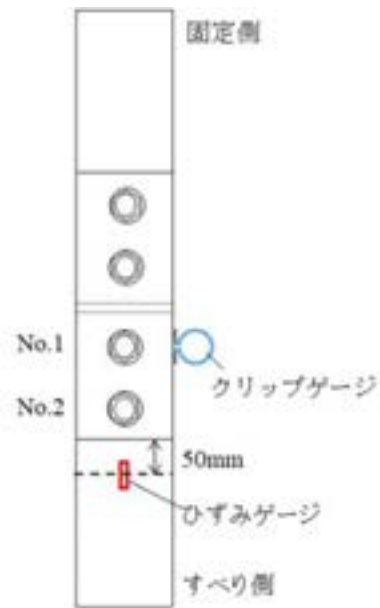


図 1-3-8 測定箇所

(2) すべり耐力試験の結果

载荷試験結果を表 1-3-4 に示す。いずれの試験体でも、主すべり発生時には明瞭な荷重低下と大きなすべり音が発生したため、すべり耐力は明確であった。表中には、すべり時の変位量も示している。建築分野では開口変位 0.2mm をすべりとしているが¹⁴⁾、建築鉄骨は摩擦面を赤さびとすることが基本であり、無機ジンクの場合については開口変位が 0.1mm を下回っていることから、すべりを評価する場合の変位量として 0.2mm は過大であることがわかる。ブラストについては 0.2mm の変位量を準用できると考えられ、本試験では B3-15-2, B4-10-1, B4-10-3, B4-15-2 の 4 試験体で、すべり時の変位量が 0.2mm を超えていた。しかし、これらの試験体における 0.2mm 時点の荷重は、それぞれ 458.7kN, 540.0kN, 591.4kN, 589.3kN であり、表 1-3-4 に示したすべり耐力と最大でも 5kN 程度の違いであったので、統一性を図るため、ここでは変位量ではすべりの判定を行わなかった。図 1-3-9 には試験で得られた無機ジンク、ブラスト双方のすべり荷重と変位の関係の一例を示すが、両方で荷重と変位の関係が若干異なっていることが判る。

すべり係数 μ_b は、すべり耐力試験直前の軸力に基づくもので次式により求められる。

$$\mu_b = \frac{P}{mnN_b} \quad (1-3-1)$$

ここに、P はすべり耐力、m は摩擦面数 (本論文で独自に定義した接触面数とは異なり、継手形式 1 では 1、それ以外の継手形式では 2)、n はボルト本数 (すべての試験体で 2)、 N_b はすべり耐力試験直前

の軸力である。一方、 μ_s は(1)式において N_b の代わりに設計ボルト軸力(N_s : 205kN)で算出したすべり係数であり、設計の便宜のために参考として示している。そこで、以下のすべり耐力の評価はすべり係数 μ_b で行うこととする。

表 1-3-4 に示したように、全体的に無機ジンクよりブラスの方がすべり係数が高くなっていた。無機ジンクにおいて、すべり係数 μ_b は 0.50 を下回る場合も見られたが、設計すべり係数 0.45 を上回っており、その他は 0.50 を超える耐力を有していた。また、ブラストの中では、B3-15-2 と B3-15-3 ですべり係数 μ_b が若干低い値となったが、これらの試験体では軸力比（内側ボルト/外側ボルト）が低くその影響も考えられた。図 1-3-10 に軸力比とすべり係数 μ_b の関係を示す。ブラストでは、軸力比が低いと μ_b は小さくなる傾向となったが、無機ジンクではその逆の傾向が示され、軸力比の影響とは考え難く、B3-15-2 および B3-15-3 において、すべり係数 μ_b が低くなった原因の詳細は不明である。

以降では、これらの試験結果に基づいて、すべり係数 μ_b に及ぼす偏心（曲げ）、接触面数およびボルト軸力の影響について考察する。

表 1-3-4 すべり耐力試験集計結果

試験体	試験直前の軸力 N_b [kN]					すべり 耐力 P [kN]	すべり係数			曲げひずみ [$\mu\epsilon$]	すべり 時の 変位 量 [mm]			
	ボルトNo.			軸力比 (注1)	μ_s		μ_b							
	No.1	No.2	平均											
無機 ジンク	P1-15	-1	223	233	228.0	0.96	256	0.624	0.596	0.561	0.534	1072	1014	0.100
		-2	255	215	235.0	1.19	236	0.576		0.502		930		0.057
		-3	217	231	224.0	0.94	241	0.588		0.538		1039		0.055
	P2-15	-1	219	213	216.0	1.03	460	0.561	0.545	0.532	0.516	99	—	0.049
		-2	212	208	210.0	1.02	430	0.524		0.512		-84		0.047
		-3	221	226	223.5	0.98	450	0.549		0.503		46		0.045
	P3-15	-1	225	214	219.5	1.05	429	0.523	0.525	0.489	0.496	613	711	0.024
		-2	218	×	218.0	×	441	0.538		0.506		974		×
		-3	215	211	213.0	1.02	421	0.513		0.494		547		0.035
	P3-20	-1	220	232	226.0	0.95	440	0.537	0.520	0.487	0.480	609	673	0.027
		-2	223	219	221.0	1.02	430	0.524		0.486		620		0.014
		-3	219	218	218.5	1.00	408	0.498		0.467		791		0.022
P4-15	-1	×	×	×	×	×	×	0.520	×	0.511	×	—	×	
	-2	205	214	209.5	0.96	432	0.527		0.516		-42		0.067	
	-3	209	205	207.0	1.02	420	0.512		0.507		-8		0.023	
P4-20	-1	228	227	227.5	1.00	463	0.565	0.556	0.509	0.505	0	—	0.051	
	-2	224	226	225.0	0.99	439	0.535		0.488		-23		0.068	
	-3	224	226	225.0	0.99	466	0.568		0.518		23		0.016	
ブラ スト	B1-10	-1	221	220	220.5	1.00	314	0.766	0.721	0.712	0.658	1201	1164	0.136
		-2	230	223	226.5	1.03	271	0.661		0.598		1101		×
		-3	229	225	227.0	1.02	302	0.737		0.665		1190		0.152
	B2-10	-1	229	220	224.5	1.04	574	0.700	0.655	0.639	0.602	-20	—	0.183
		-2	226	220	223.0	1.03	521	0.635		0.584		473		×
		-3	227	215	221.0	1.06	516	0.629		0.584		144		0.165
	B3-10	-1	220	203	211.5	1.08	513	0.626	0.627	0.606	0.591	931	874	×
		-2	224	221	222.5	1.01	528	0.644		0.593		953		0.149
		-3	217	220	218.5	0.99	501	0.611		0.573		738		×
	B3-15	-1	241	228	234.5	1.06	545	0.665	0.603	0.581	0.535	849	573	0.192
		-2	229	238	233.5	0.96	459	0.560		0.491		433		0.204
		-3	218	232	225.0	0.94	479	0.584		0.532		437		0.156
B4-10	-1	225	214	219.5	1.05	545	0.665	0.677	0.621	0.612	17	—	0.234	
	-2	230	224	227.0	1.03	526	0.641		0.579		-14		0.093	
	-3	236	232	234.0	1.02	595	0.726		0.636		-41		0.237	
B4-15	-1	248	249	248.5	1.00	623	0.760	0.737	0.627	0.616	51	—	0.193	
	-2	240	232	236.0	1.03	592	0.722		0.627		63		0.227	
	-3	247	256	251.5	0.96	599	0.730		0.595		-17		0.184	

(注) 軸力比=内側軸力/外側軸力、 μ_s :設計ボルト軸力で算出、 μ_b :試験直前のボルト軸力で算出、×:測定不能箇所

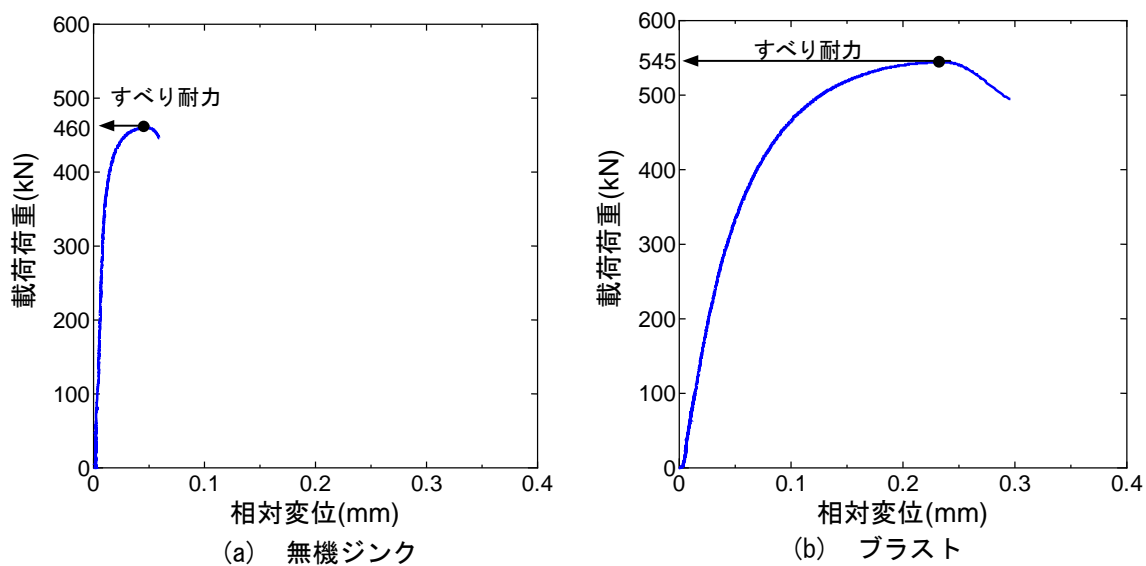


図 1-3-9 荷重と相対変位の関係の一例

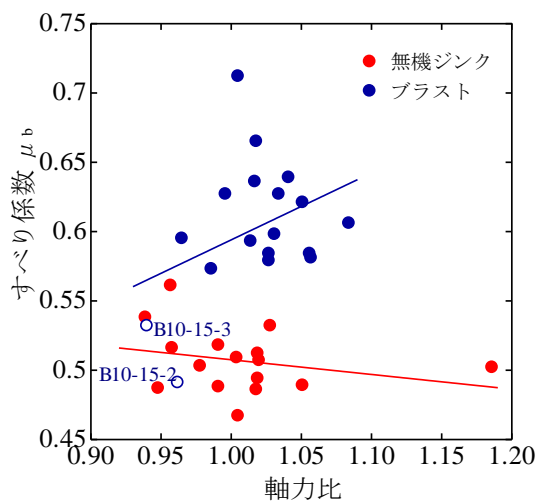


図 1-3-10 軸力比とすべり係数の関係

(3) 偏心の影響

表 1-3-4 には、すべり側母板表裏面のひずみゲージの計測結果から算出した曲げひずみ（以下、曲げひずみ）も示している。継手形状 1, 3 では、母板中心軸のずれによる偏心曲げモーメントによって曲げひずみが発生していることが判る。図 1-3-11 は、各試験体における曲げひずみとすべり係数の関係を示したものである。継手形式 2 と比較し、フィラーを用いた継手形式 3 では、すべり係数 μ_b は若干小さかったが大きな違いではなく、これについては比較的近い形状の試験体を対象とした宮地ら⁹⁾の試験結果とも一致する。逆に、曲げの影響が最も大きい継手形式 1 では、むしろ継手形式 2 よりすべり係数 μ_b は大きく、曲げひずみとすべり係数の間に明瞭な関係は見られなかった。

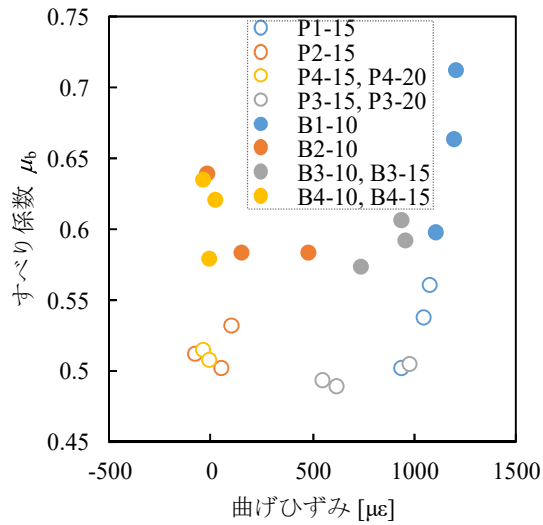


図 1-3-11 曲げひずみとすべり係数の関係

(4) 接触面数およびボルト軸力の影響

図 1-3-12 は縦軸にすべり係数 μ_b 、横軸には試験直前のボルト軸力を示している。ここでは、全試験体を示しており接触面数の影響も比較できる。図 1-3-12 において、無機ジンクの場合、すべり係数 μ_b は接触面数や軸力の影響をほとんど受けないことを示している。一方、ブラストの場合においては、継手形式 3 の試験体のすべり係数が他よりやや低い値を示すとともに軸力との間に負の相関が示されている。しかしながら、接触面数がさらに多い継手形式 4 では、継手形式 3 よりもやや高いすべり係数が示されており、また、軸力とはほとんど相関が見られないことから、接触面数や軸力の影響は明確でないと判断できる。

以上のように、本検討で対象とした条件において、偏心による曲げ、接触面数、ボルト軸力の影響は認められなかった。

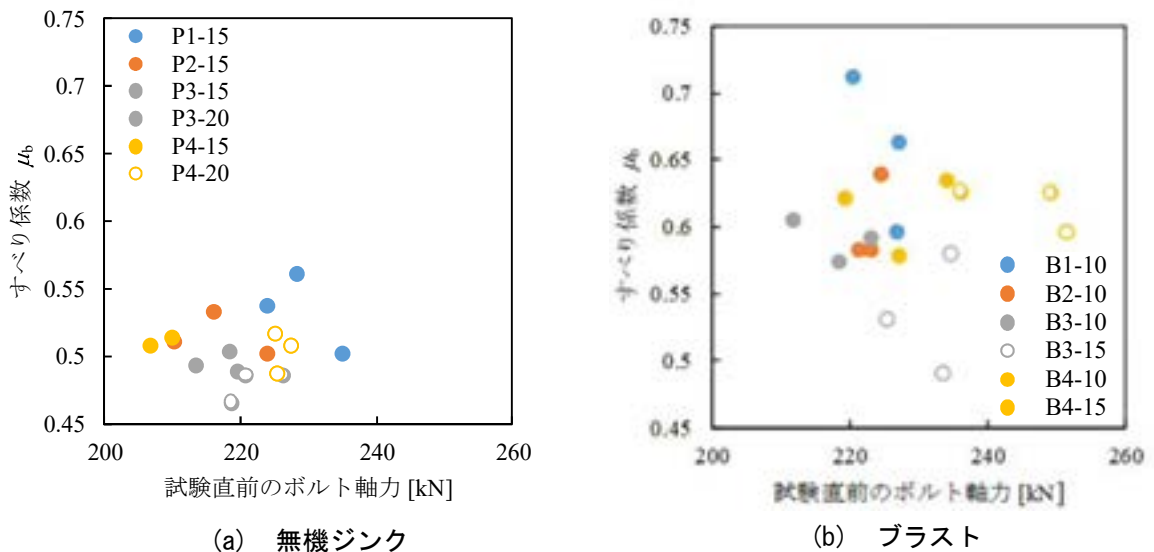


図 1-3-12 ボルト軸力とすべり係数の関係

1-4 接触面数と無機ジンの膜厚に関する検討（シリーズⅡ）

シリーズⅡでは、図 1-1-1 (b)～(d)に示す継手形式 2～4 の 3 種類について摩擦面に塗布する無機ジンク厚に着目し、塗布する膜厚の目標を道示¹⁾の条件の下限（50 μm ）と上限（100 μm ）とした試験体を製作した。そして、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施し、シリーズⅠの検討結果も踏まえて摩擦面数に応じた導入軸力を提案した。

1-4-1 接触面数と無機ジンの膜厚が軸力低下に及ぼす影響

本項では、シリーズⅡにおけるリラクセーション試験結果に基づいて、接触面数と無機ジンの膜厚がその後の軸力低下に及ぼす影響について考察する。

(1) リラクセーション試験方法

リラクセーション試験は、ボルト締付け時点から 28 日間（672 時間）行った。試験対象は、すべり側の合計 36 本のボルトとし、ボルト軸力をひずみゲージ（ゲージ長 1mm）により計測するため、ボルト頭にリード線を通すための孔を明け、ボルト軸部（母材板厚の中央位置）にひずみゲージ 2 枚を取付けた（図 1-4-1）。このゲージ 2 枚の出力の平均値を軸ひずみとし、これに換算率を乗じることで軸力を取得した。換算率は、事前に各ロット 3 本のボルトについてキャリブレーション試験を行い決定した。キャリブレーション試験結果を表 1-4-1 に示す。また、リラクセーション試験中は室内に安置し、その状況を図 1-4-2 に示す。

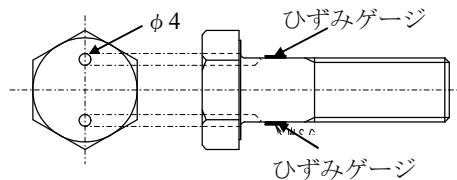


図 1-4-1 ひずみゲージの取り付け

表 1-4-1 キャリブレーション試験結果

試験ケース	等級	ボルト径	首下長さ (mm)	荷重/ひずみ (kN/ ϵ)
PA, PBシリーズ	F10T	M22	90	0.07447



図 1-4-2 計測状況

(2) リラクゼーション試験結果

リラクゼーション試験結果を表 1-4-2 に示す。締付け直後（約 30 秒後）と 28 日後におけるボルト軸力の計測結果を、それぞれ導入軸力と残存軸力として示し、導入軸力の設計ボルト軸力に対する比率（設計軸力比率）、軸力残存率についても示している。なお、計測不具合等により計測不能となったボルトについては、表中で「×」で示している。すべり耐力試験を数日に亘って実施したため、軸力計測は 28 日経過後も継続し、すべり耐力試験直前まで行った。ただし、計測期間の統一を図るため、ここでは 28 日までの計測結果を示している。

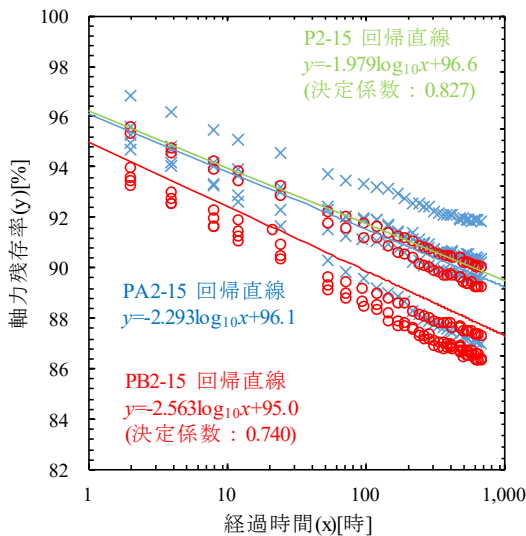
導入軸力は、すべての試験体で目標値より低い軸力が導入されているが、概ね目標軸力であった。試験体の種類ごとの軸力残存率の経時変化を図 1-4-3 に示す。図中には、計測結果に関する回帰直線と決定係数も示している。シリーズ I の結果も参考として載せている。シリーズ I の試験のボルトの増し締め率は継手形式 2 が 15%、継手形式 3 が 15%、継手形式 4 が 20%である。

以降では、これら試験結果に基づいて軸力低下に及ぼす接触面数と無機ジंकの膜厚の影響について考察する。

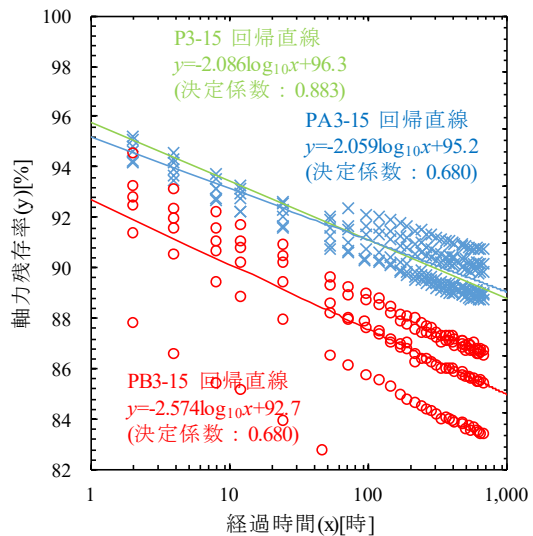
表 1-4-2 導入軸力およびリラクセーション集計結果

試験体		ボルト軸力											軸力 残存率[%]			
		締め付け直後(導入軸力)[kN]						672時間後の軸力(残存軸力)[kN]								
		ボルトNo.		平均	設計軸力 比率(%)	ボルトNo.		平均	設計軸力 比率(%)							
		No.1	No.2			No.1	No.2									
無機 ジンク 50μm	PA2-15	-1	×	223	223	221	108.8	107.6	×	194	194	197	94.6	96.2	87.0	89.4
		-2	222	216	219		106.8		200	199	200		97.3		91.1	
		-3	218	221	220		107.1		196	200	198		96.6		90.2	
	PA3-15	-1	225	233	229	229	111.7	111.9	203	211	207	205	101.0	100.2	90.4	89.5
		-2	224	226	225		109.8		198	201	200		97.3		88.7	
		-3	232	236	234		114.1		209	210	210		102.2		89.5	
	PA4-20	-1	236	×	236	236	115.1	115.3	207	×	207	208	101.0	101.4	87.7	87.9
		-2	240	231	236		114.9		209	×	209		102.0		88.7	
		-3	239	236	238		115.9		209	206	208		101.2		87.4	
無機 ジンク 100μm	PB2-15	-1	236	235	236	230	114.9	112.2	211	212	212	202	103.2	98.5	89.8	87.7
		-2	229	228	229		111.5		198	×	198		96.6		86.7	
		-3	228	224	226		110.2		199	193	196		95.6		86.7	
	PB3-15	-1	232	225	229	227	111.5	110.6	201	188	195	190	94.9	92.6	85.1	83.8
		-2	221	223	222		108.3		189	193	191		93.2		86.0	
		-3	231	228	230		112.0		184	×	184		89.8		80.2	
	PB4-20	-1	233	236	235	238	114.4	115.9	188	196	192	197	93.7	96.3	81.9	83.0
		-2	240	243	242		117.8		201	201	201		98.0		83.2	
		-3	240	234	237		115.6		202	196	199		97.1		84.0	

注) 設計軸力比率：計測ボルト軸力／設計ボルト軸力，×：測定不能箇所

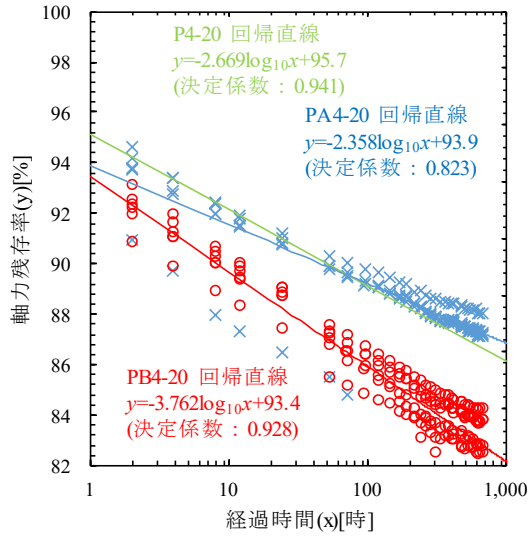


(a) 継手形式 2



(b) 継手形式 3

図 1-4-3 リラクセーション試験における軸力残存率の推移



(c) 継手形式 4

図 1-4-3 リラクゼーション試験における軸力残存率の推移 (続き)

(3) 接触面数および膜厚の影響

締付け膜厚の影響を評価するため、ボルト孔周辺における無機ジंकの推定合計膜厚と軸力残存率の関係を図 1-4-4 に示す。ここで示す推定合計膜厚とは、試験体ごとの平均値として、膜厚計測で得られた各試験体のすべり側ボルト孔周辺の平均膜厚 (図 1-2-5(e)) に、塗膜面数 (継手形式 1 : 4 面, 継手形式 2 : 6 面, 継手形式 3 : 8 面, 継手形式 4 : 10 面) を乗じて求めた。軸力残存率についても試験体平均値を示している。また、参考にシリーズ I の回帰式を合わせて示す。図 1-4-4 には、シリーズ II においてもシリーズ I と同様に推定合計膜厚が大きいほど軸力の低下が大きくなる関係が示されている。

以上のように、無機ジंकにおいては締付け膜厚に起因した接触面数および膜厚の影響が顕著であることが示された。

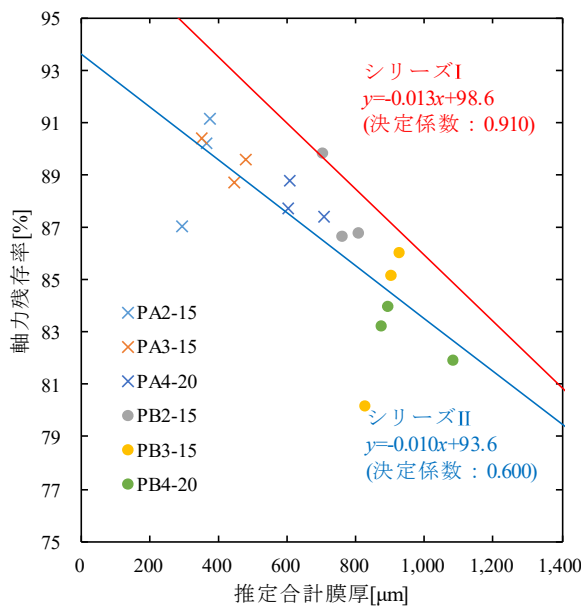


図 1-4-4 推定合計膜厚と軸力残存率の関係

1-4-2 接触面数と無機ジンクの膜厚がすべり係数に及ぼす影響

本項では、はじめにすべり耐力試験方法を説明し、試験結果に基づいて、接触面数と無機ジンクの膜厚の違いがすべり係数に及ぼす影響について考察する。

(1) すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は、リラクセーション試験後に実施した。試験には載荷能力 2,000kN の万能試験機を用いた。本試験では、試験体両端部それぞれ約 120mm の範囲をチャックで固定し、引張荷重を 2kN/s 程度の速度で主すべりが生じるまで与えた。試験の状況を図 1-4-3 に示す。

試験時には、荷重および試験体に発生するひずみを 100Hz で計測した。その際、図 1-4-4 に示す位置にクリップゲージとひずみゲージを設置した。クリップゲージはすべり側の内側のボルト軸位置 (No.1 ボルト) における母板と連結板間の相対変位と母板間の相対変位を計測した。ひずみゲージ (ゲージ長 5mm) では母板の曲げを計測した。主すべりの発生は、大きな音を伴って荷重が下がったとき、あるいは荷重と変位の関係に大きな変化が見られたときと判断し、すべり耐力 (荷重) 荷重とした。



図 1-4-3 載荷状況

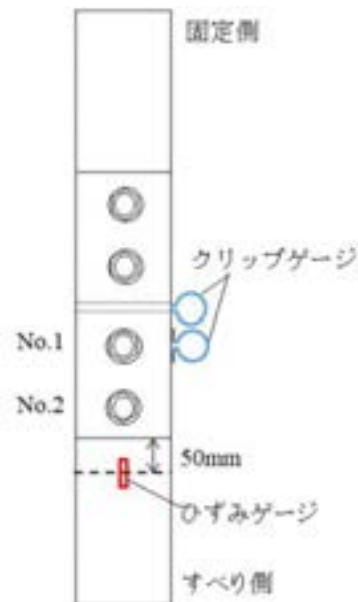


図 1-4-4 測定箇所

(2) すべり耐力試験の結果

載荷試験結果を表 1-4-2 に示す。主すべり発生時には明瞭な荷重低下と大きなすべり音が発生したものと荷重が低下し始めるものの 2 種類があったが、これらと無機ジンクの膜厚や継手形式による傾向は確認できなかった。図 1-4-5 に No.1 ボルト位置の相対変位の一例を示す。薄膜の PA 試験体では大半の試験体で図 1-4-5 (a) に示すように、主すべり後はなだらかに荷重が低下しながら変位が増加したが、厚膜の PB 試験体の 9 体中 4 体で図 1-4-5 (b) に示すように、荷重が急激に低下した後になだらかな低下に移行するものがあった。なお、表 1-4-2 にはすべり荷重時の相対変位の値も示しているが、前項に示した標準膜厚における無機ジンクの試験体と同様に、No.1 ボルト位置の相対変位は 0.1mm を下回るものが大半であるが、薄膜の PA 試験体では、0.2mm に近いものもあった。なお、母板間の相対変位についても概ね 0.2mm を上回っていた。

表 1-4-2 のすべり係数 μ_b は式 (1-3-1) を用いて $m=2$ と $n=2$ を代入して求めている。 μ_s は式 (1-3-1) において N_b の代わりに設計ボルト軸力 (N_s : 205kN) で算出したすべり係数である。 すべり係数 μ_b は全ての試験体で設計すべり係数 0.45 を上回っていることが確認できる。 また、すべり係数 μ_b は3種類の継手形式の全てで厚膜の PB 試験体のほうが薄膜の PA 試験体よりも大きくなる傾向が確認できる。 図 1-4-6 にすべり係数 μ_b と試験直前の軸力の関係を示している。 すべり係数 μ_b と試験直前の軸力には明確な相関性が確認できない。

図 1-4-7 は荷重とひずみの関係の一例である。 図中には表裏面のひずみ値から算出した曲げひずみも示しているが、前項の結果と同様、フィラーを用いた継手形式 3 で曲げひずみが確認できる。

表 1-4-2 すべり耐力試験集計結果

試験体			試験直前の軸力 N_b [kN]			すべり耐力 P [kN]	すべり係数				相対変位 (mm)	
			ボルト No.		平均		μ_s		μ_b		母板-連結板間	母板間
			No.1	No.2								
薄膜	PA2-15	-1	×	193	193.0	478	0.619	0.579	0.583	0.553	0.075	0.248
		-2	199	198	198.5	457	0.576		0.557		0.091	0.218
		-3	195	198	196.5	426	0.542		0.520		0.128	0.192
	PA3-15	-1	202	210	206.0	459	0.557	0.555	0.560	0.556	0.199	0.281
		-2	198	201	199.5	434	0.544		0.529		0.057	0.229
		-3	208	213	210.5	474	0.563		0.578		0.155	0.262
	PA4-20	-1	207	×	207.0	522	0.630	0.620	0.637	0.627	0.064	0.388
		-2	208	×	208.0	536	0.644		0.654		0.208	0.566
		-3	208	205	206.5	484	0.586		0.590		0.185	0.304
厚膜	PB2-15	-1	210	211	210.5	523	0.621	0.655	0.638	0.641	0.079	0.280
		-2	196	×	196.0	526	0.671		0.641		×	0.296
		-3	198	193	195.5	527	0.674		0.643		0.098	0.292
	PB3-15	-1	201	198	199.5	492	0.617	0.627	0.600	0.585	0.063	0.270
		-2	188	192	190.0	477	0.628		0.582		0.065	0.279
		-3	185	×	185.0	471	0.636		0.574		0.062	0.229
	PB4-20	-1	188	194	191.0	507	0.664	0.655	0.618	0.627	0.147	0.281
		-2	200	202	201.0	519	0.646		0.633		0.091	0.302
		-3	201	194	197.5	517	0.654		0.630		0.137	0.349

(注) μ_s 設計ボルト軸力で算出, μ_b 試験直前のボルト軸力で算出, ×: 測定不能箇所

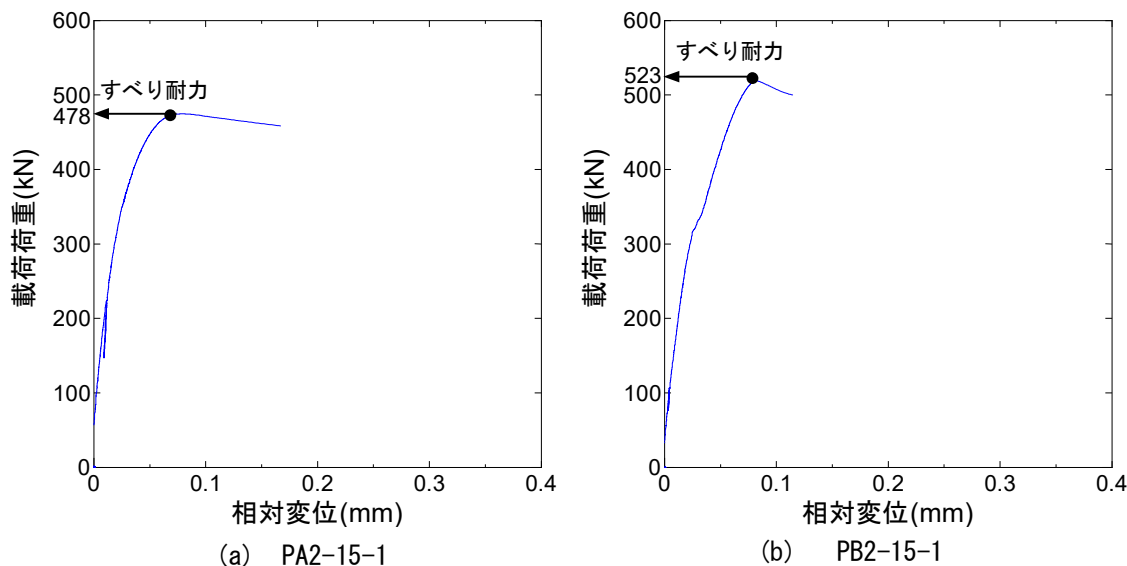


図 1-4-5 荷重と相対変位の関係の一例

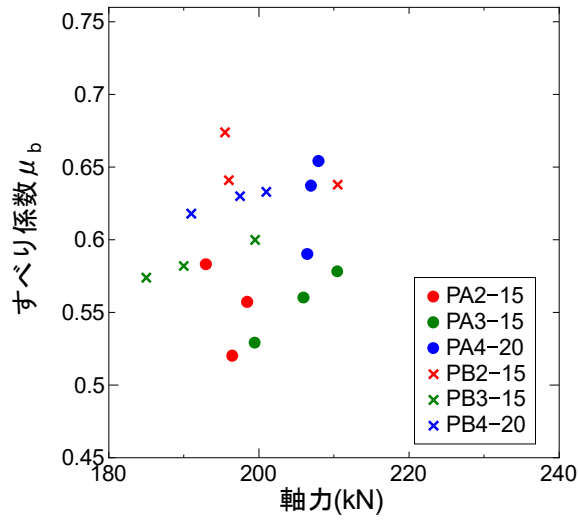
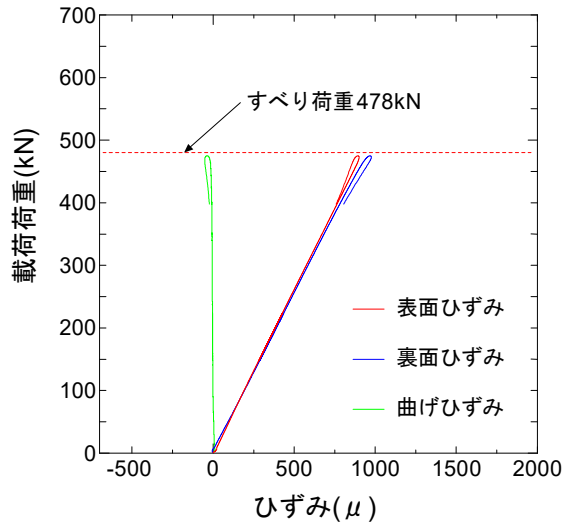
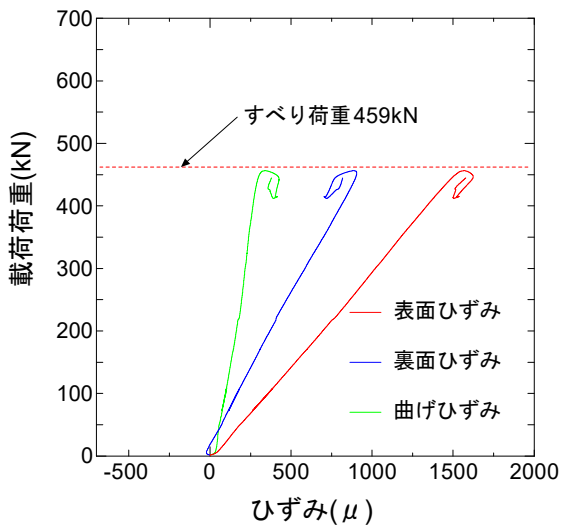


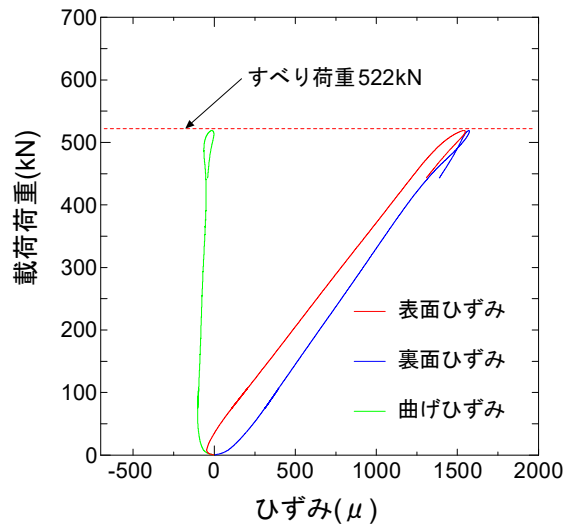
図 1-4-6 ボルト軸力とすべり係数の関係



(a) PA2-15-1



(b) PA3-15-1



(c) PA4-20-1

図 1-4-7 荷重とひずみの関係の一例

1-5 接触面数に応じた導入ボルト軸力の考察

本項では、シリーズ I とシリーズ II の試験結果と既報の試験結果との比較を行うとともに、締付けから 1 万時間経過後の軸力残存率を推定し、これらの結果より接触面数を考慮した導入ボルト軸力を提案する。

1-5-1 既報の試験結果との比較

図 1-5-1 に、文献 6) で調査された既往の研究の締付け後のボルト軸力の経時変化と、文献 6, 8) の試験結果の回帰直線（両試験結果を合わせた直線）および、シリーズ I とシリーズ II の継手形式 2（2 面摩擦）における回帰直線を示す。文献 6), 8) の無機ジンクの結果は標準膜厚に近い塗布量での試験体の結果である。

図 1-5-1 に示すように、無機ジンクの回帰直線の傾きはブラストの場合と比較して大きい。無機ジンクおよびブラストの双方ともに、シリーズ I の各回帰直線は既往の研究結果から得られる回帰直線と比較的良く一致しており、先行研究との整合性を確認することができる。特に、ブラストにおける文献 6) の試験結果と本試験結果の回帰直線はほぼ一致していた。また、文献 6) で調査した 1 年間（8760 時間）のデータとシリーズ I の試験結果の回帰直線は、ほぼ同等の傾きであることから、シリーズ I の試験体の軸力残存率を推定するにあたり、ボルト締付けから 28 日間（672 時間）の試験で得られた回帰直線を約 1 年後まで外挿し得ることを示す結果と考えられる。無機ジンクの結果についてはシリーズ II の回帰直線も示しているが、薄膜の PA2 試験体、厚膜の PB2 試験体とも、標準膜厚の試験結果とは異なっており、これらの傾きの違いは、無機ジンクの膜厚の違いを表していると考えられる。無機ジンクの膜厚に着目した場合の長期リラクセーションの結果は当部会で調査した限りはないが、ここでは便宜上、回帰直線を外挿することにより約 1 年後の軸力残存率を推定する。

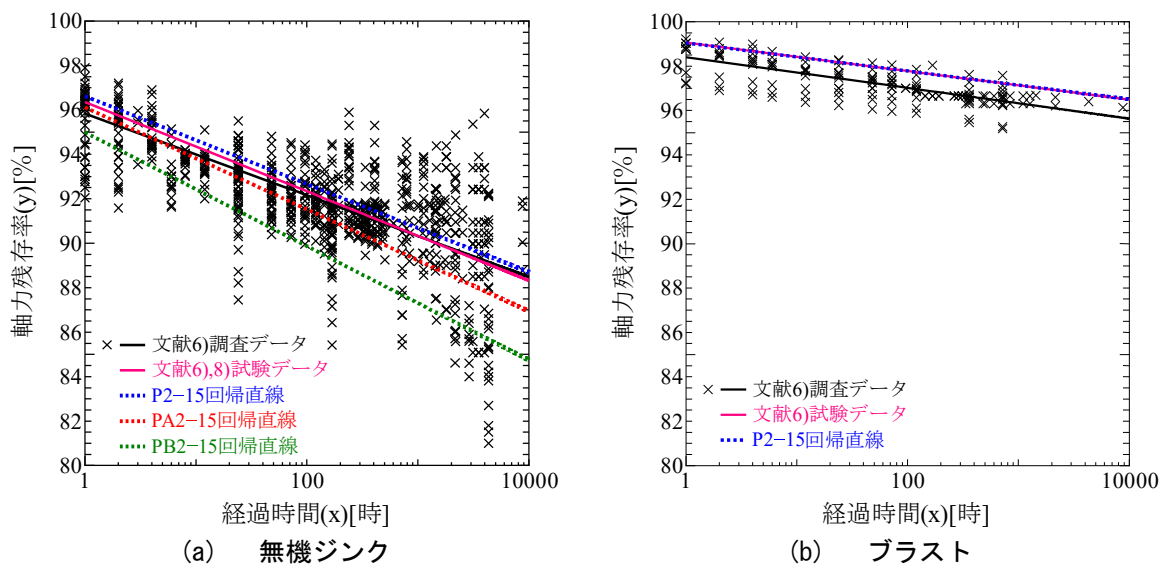


図 1-5-1 先行研究 6), 8) との軸力低下の比較

1-5-2 1万時間後の軸力残存率の推定

前項における考察を踏まえて、図 1-3-3, 図 1-3-4, 図 1-4-3 に示した軸力残存率に関する回帰直線を、ボルト締付けから 1 万時間まで外挿し、1 万時間後の軸力残存率ならびに設計軸力比率を推定した。

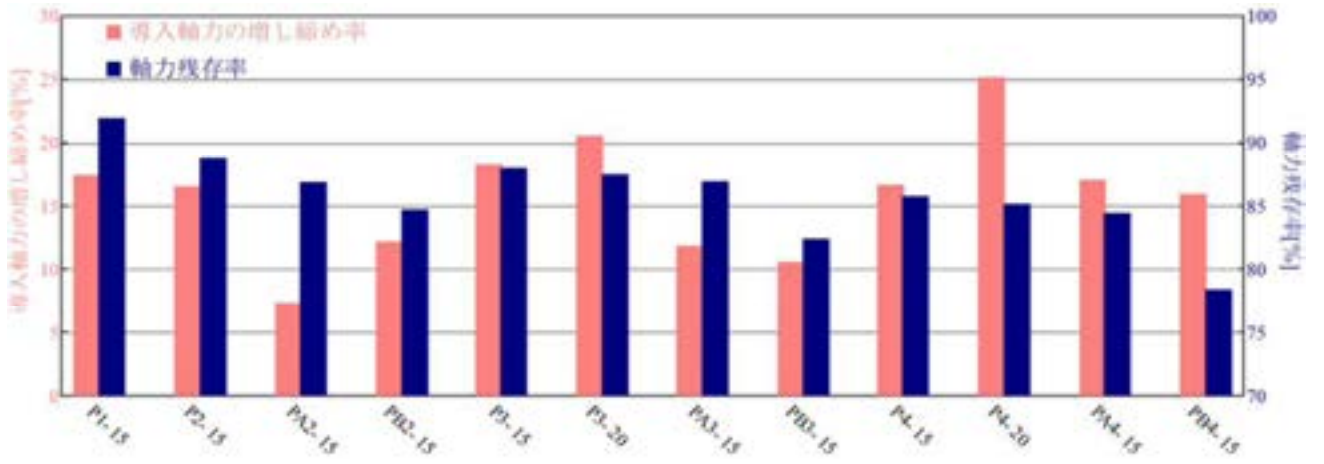
図 1-5-2 に摩擦面を無機ジンクとした場合、図 1-5-3 に摩擦面をブラストとした場合の軸力残存率と残存軸力の設計軸力 (206kN) に対する比率を示す。これらの図では、実際の増し締め率の同種試験体平均値と対比して各推定結果を示している。

図 1-5-2 の無機ジンク試験体の結果をみると、継手形式 1 の倍場合には、1 万時間後であっても軸力残存率が 85%を超えており、設計軸力を満足していることが確認できる。無機ジンクの膜厚もパラメータとした継手形式 2~4 について、フィラーのない継手形式 2 では、標準膜厚の P2 試験体の結果をみると、軸力残存率が 85%を超えて設計軸力も満足しており、文献 (6),(8) で提案されている 15%増し締めが妥当であることがわかる。薄膜の PA2 試験体と厚膜の PB2 試験体は軸力残存率が 86.9%, 84.7%であった。設計軸力比率は 93.5%, 95.1%と 100%を下回ったが、導入軸力の増し締め率が目標値の 15%であれば、101.0%, 97.9%となり、設計軸力をほぼ満足する結果となった。

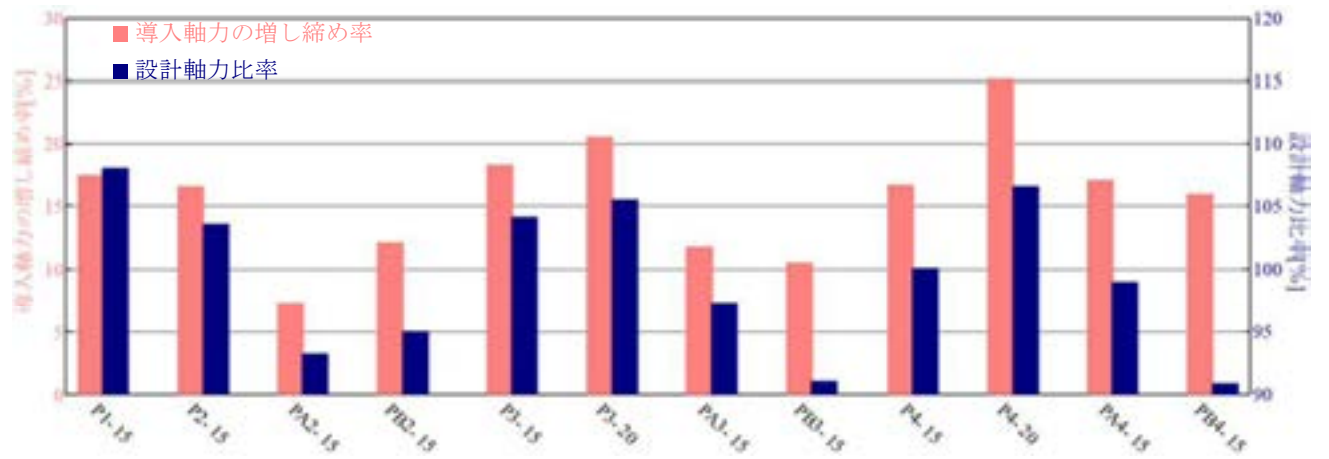
フィラーを 1 枚有する継手形式 3 について、標準膜厚の P3 試験体の結果をみると、増し締め率が 15%, 20%の双方の試験体とも軸力残存率が 85%を超えて設計軸力も満足している。薄膜の PA3 試験体と厚膜の PB3 試験体は軸力残存率が 87.0%, 82.4%であった。設計軸力比率は 97.3%, 91.1%と 100%を下回った。なお、導入軸力の増し締め率が目標値の 15%であったと仮定すると、それぞれの設計軸力比率は 100.4%, 95.5%となる。

フィラーを 2 枚有する継手形式 4 について、標準膜厚の P4 試験体の結果をみると、増し締め率が 15%, 20%の双方の試験体とも軸力残存率が 85%を超えて設計軸力も満足している。しかし、P4-15 試験体では増し締め率が目標値を 2%上回っており、目標値で締め付けた場合には、設計軸力を下回る結果となる。薄膜の PA4 試験体と厚膜の PB4 試験体は軸力残存率が 84.4%, 78.3%であった。設計軸力比率は 99.0%, 90.9%と 100%を下回った。なお、導入軸力の増し締め率が目標値の 20%であったと仮定すると、それぞれの設計軸力比率は 101.9%, 94.9%となる。

図 1-5-3 のブラスト試験体の結果をみると、1 万時間後の軸力残存率が無機ジンクの場合より高いことが確認できる。そして、フィラーを有する場合には、増し締め率が 10%であっても、1 万時間後の設計軸力比率は 100%を超えてることが確認できる。

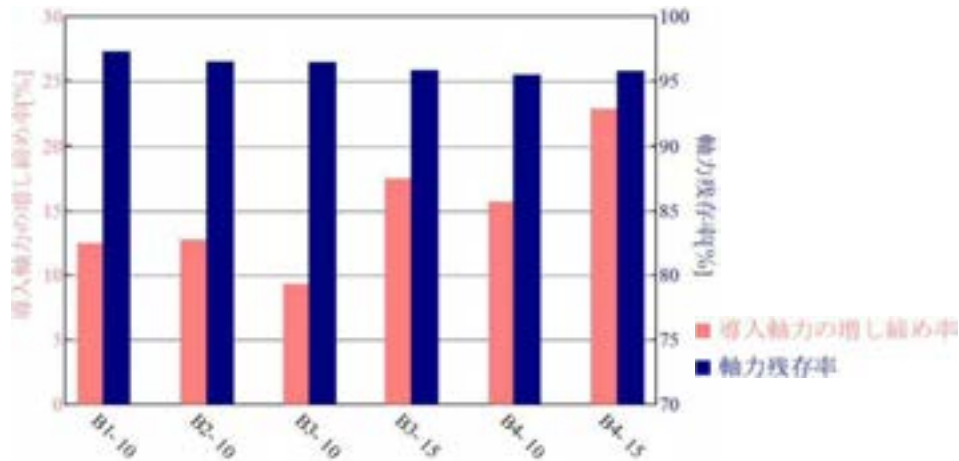


(a) 導入軸力の増し締め率と軸力残存率

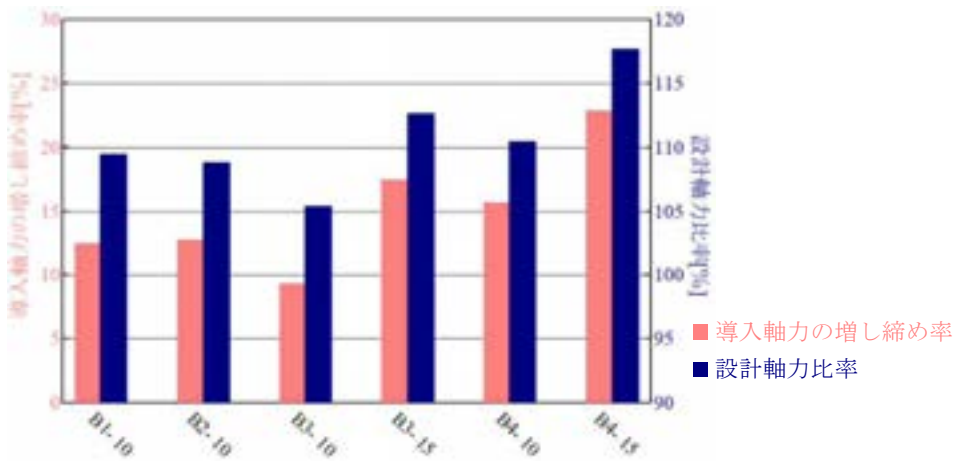


(b) 導入軸力の増し締め率と設計軸力比率

図 1-5-2 接触面を無機ジンクとした試験体の 1 万時間後におけるボルト軸力



(a) 導入軸力の増し締め率と軸力残存率



(b) 導入軸力の増し締め率と設計軸力比率

図 1-5-3 接触面をブラストとした試験体の 1 万時間後におけるボルト軸力

1-5-3 接触面数を考慮した導入ボルト軸力の提案

前項に示した結果より接触面を無機ジंकとした場合、継手形式 1 については導入軸力の増し締め率が 15% で 1 年後にも設計軸力を満足すると考えられる。継手形式 2 については、厚膜とした PB2 試験体で 1 年後の軸力が設計軸力を若干下回る結果となった。この要因の一つとして PB2 試験体については目標膜厚 100 μm に対し、実際の膜厚が平均で 126 μm と厚かったことも考えられる。継手形式 3 についても、厚膜とした PB3 試験体で 1 年後の軸力が設計軸力を下回る結果となった。この要因としては実際の膜厚が平均で 111 μm と厚かったこと、3 体の試験体のうち、1 体の軸力残存率が 80.2% と極端に低かったことが挙げられる。継手形式 4 については、標準膜厚の結果からは増し締め率 15% では設計軸力を満足しない可能性があることがわかる。増し締め率を 20% とした場合は、厚膜とした PB4 試験体が実際の膜厚が平均で 95 μm 目標値よりもやや低いものの、1 年後の軸力が設計軸力を下回る結果となった。

接触面をブラストとした場合には、接触面数によらず、道示¹⁾の規定である設計ボルト軸力に対する

10%増しの締付けが妥当であると考えられる。

以上のように、接触面を無機ジンクとした場合、厚膜の場合には、継手形式2, 3, 4に対して 増し締め率 15%, 15%, 20%では不足し、さらなる増し締めも考えられる。しかし、実際の高力ボルト継手部における無機ジンク塗布の施工を考えると、通常の管理が行われていれば、これらの 4, 6, 8 面ある塗装面の全てが厚膜となる可能性は低いと想定され、フィラーなし、とフィラー1枚, 2枚の場合の増し締め率はそれぞれ 15%, 15%, 20%で良いと考えられる。表 1-5-1 に本部会で推奨する、接触面数に応じた導入軸力の増し締め率を示す。

表 1-5-1 導入ボルト軸力の推奨値（増し締め率で表示）

摩擦面（数）	増し締め率	
	無機ジンク	ブラスト (粗面状態)
1面摩擦	15%	10%
2面摩擦		
2面摩擦(フィラー1枚)		
2面摩擦(フィラー2枚)	20%	

1-6 まとめ

本章では、高力ボルト摩擦接合継手のトルク法によるボルト締付けの際の設計ボルト軸力に対する増し締め率について、摩擦面の数がリラクセーションとすべり耐力に及ぼす影響に着目し、実験的な検討を行った。摩擦面は、無機ジンクを塗布した場合とブラストの2種類とし、摩擦面の数は1面摩擦継手とフィラーの枚数を0, 1, 2枚とした3種類の2面摩擦継手の合計4種類とした。このうち、フィラーを有する継手では増し締め率もパラメータとし、無機ジンクを塗布した2面摩擦継手については無機ジンクの膜厚もパラメータとした。そして、実験結果より、接触面をブラストとした場合には、接触面数によらず、道示¹⁾の規定である設計ボルト軸力に対する10%増しの締付けが妥当であることを確認するとともに、無機ジンクを塗布した場合の接触面数に応じた導入軸力の推奨値を示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編，2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)，2009.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋編，1990.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)，2009.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋編，2012.
- 6) 南 邦明：厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した摩擦面で15%増し締めした高力ボルト試験，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 1, pp. 32-39, 2017.
- 7) 日本鋼構造協会：高力ボルト接合技術の現状と課題，JSSC テクニカルレポート No.96, 2013.3.
- 8) 南 邦明：厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した高力ボルト継手における導入軸力の影響の考察，土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 1, pp. 58-63, 2018.
- 9) 宮地真一，小枝芳樹，望月秀之：フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動について，構造工学論文集, Vol.44A, pp55-60, 1998.3.
- 10) 高橋秀幸，宮坂淳一：フィラープレートを有する高力ボルト摩擦接合継手の耐力，宮地技報, No. 11, pp. 147-152, 1995.

- 11) 寺尾圭史, 名取暢: フィラーを用いた高力ボルト摩擦接合継手に関する検討, 横河ブリッジ技報, No. 26, pp. 66-72, 1997.
- 12) 高井俊和, 彭雪, 山口隆司: フィラープレートの板厚が高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 1, pp. 1-9, 2015.
- 13) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006.
- 14) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006.5.

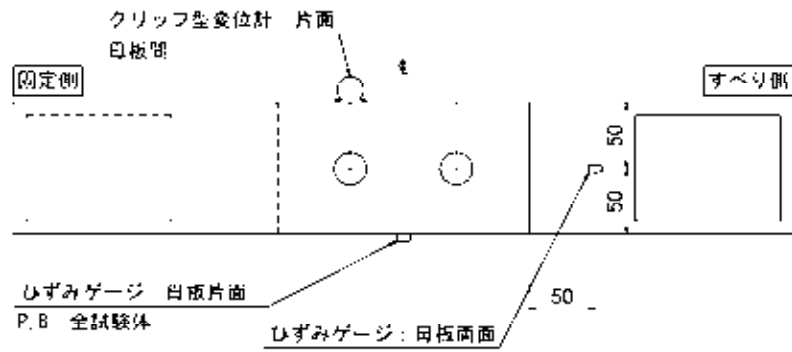
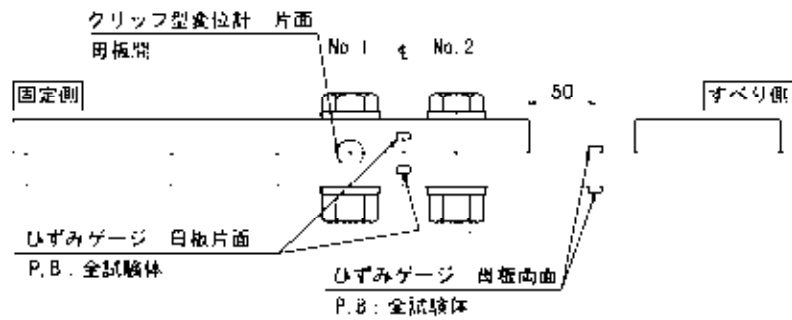
第1章 付録

1-1 すべり耐力試験の条件

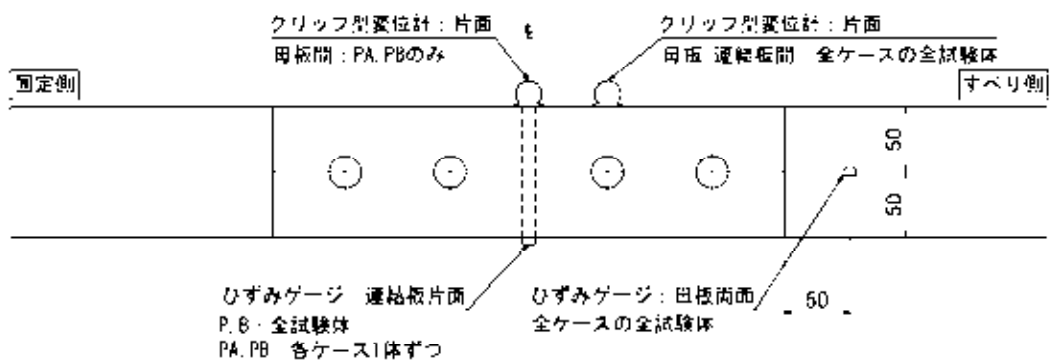
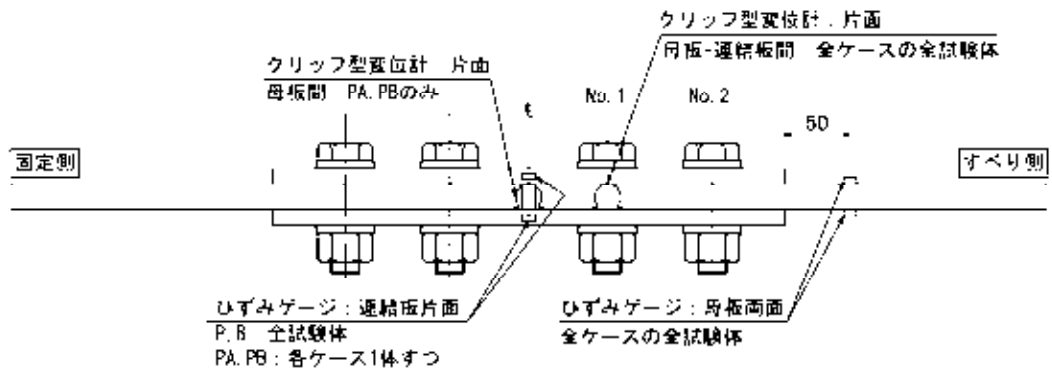
各試験体のすべり耐力試験の荷重-相対変位関係，荷重-ひずみ関係およびすべり耐力試験後のすべり面の状況を以下に示すあたり，試験ケースの一覧を付表 1-1-1，測定箇所を付図 1-1-1 に示す。

付表 1-1-1 試験体の種類とパラメータ

試験体名	①摩擦面処理	②継手形式	すべり降伏 耐力比 β	③軸力の 増し締め率
P1-15	無機ジンクリッチペイント 75 μ m	継手形式1 (1面摩擦)	0.31	15%
P2-15		継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
P3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
P3-20			0.84	20%
P4-15		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.81	15%
P4-20			0.84	20%
B1-10	ブラスト	継手形式1 (1面摩擦)	0.24	10%
B2-10		継手形式2 (2面摩擦)	0.49	10%
B3-10		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.64	10%
B3-15			0.68	15%
B4-10		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.64	10%
B4-15			0.68	15%
PA2-15	無機ジンクリッチペイント 50 μ m	継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
PA3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
PA4-20		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.84	20%
PB2-15	無機ジンクリッチペイント 100 μ m	継手形式2 (2面摩擦)	0.61	15%
PB3-15		継手形式3 (2面摩擦, フィラー1枚)	0.81	15%
PB4-20		継手形式4 (2面摩擦, フィラー2枚)	0.84	20%



(a) 継手形式 1

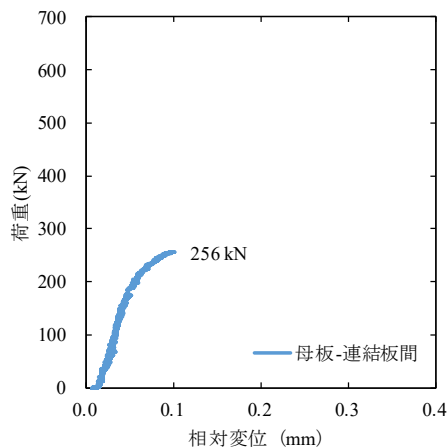


(b) 継手形式 2~4

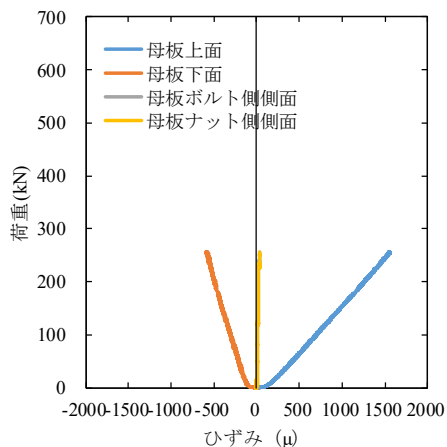
付図 1-1-1 測定箇所

1-2 すべり耐力試験データ

各試験体のすべり耐力試験の荷重-相対変位関係、荷重-ひずみ関係を以下に示す。

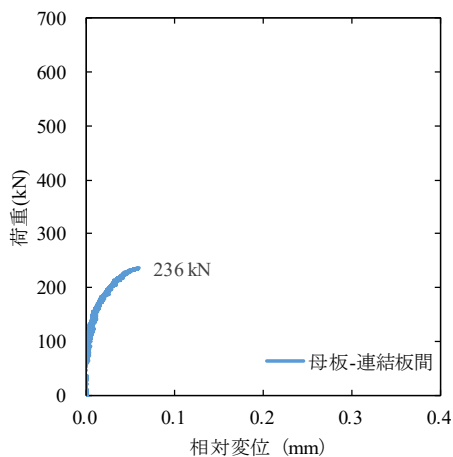


(a) 荷重-相対変位関係

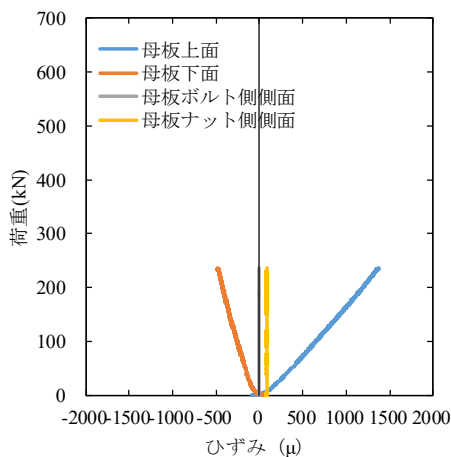


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-1 P1-15-1

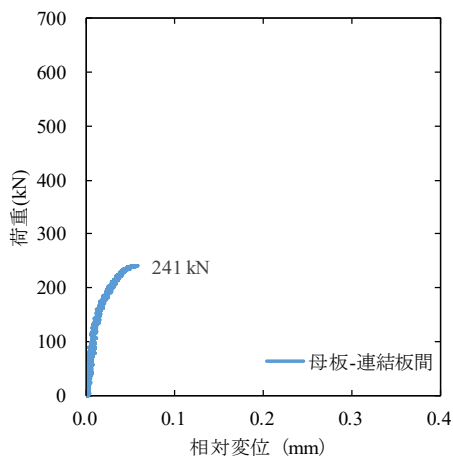


(a) 荷重-相対変位関係

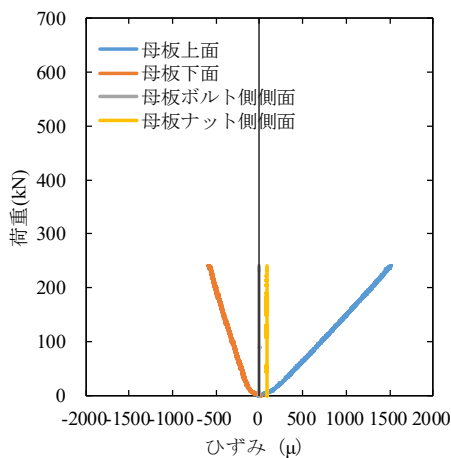


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-2 P1-15-2

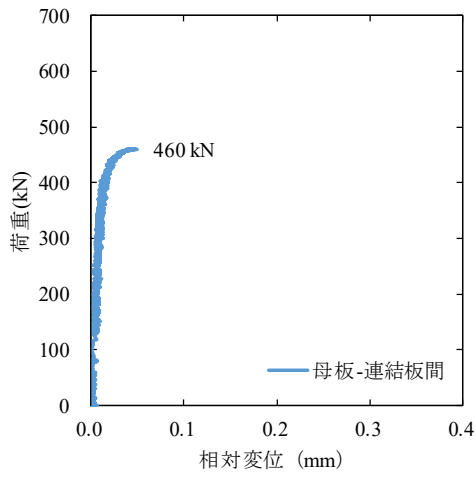


(a) 荷重-相対変位関係

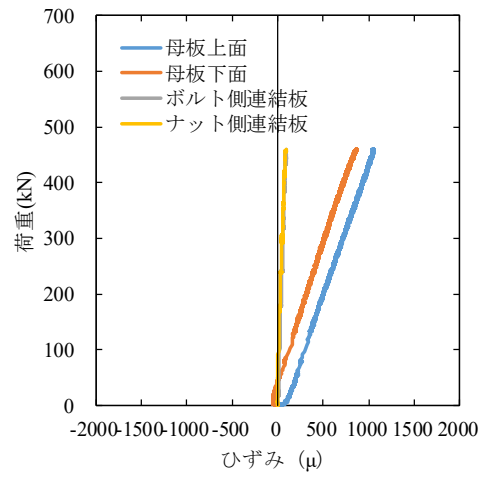


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-3 P1-15-3

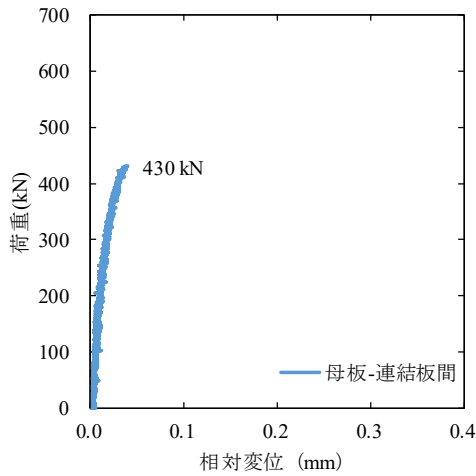


(a) 荷重-相対変位関係

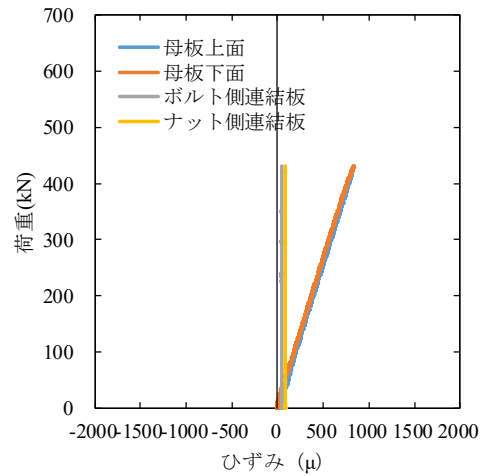


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-4 P2-15-1

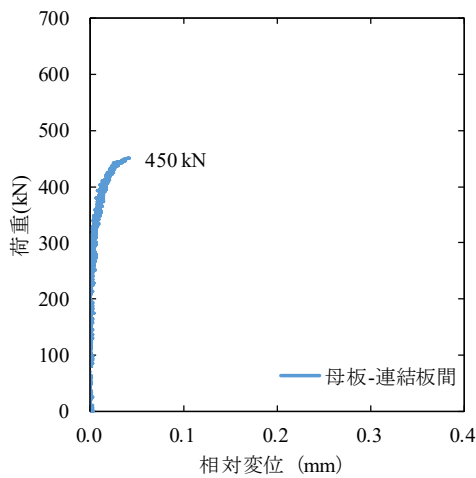


(a) 荷重-相対変位関係

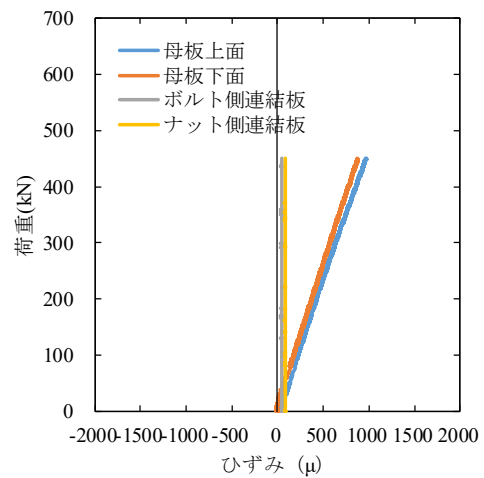


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-5 P2-15-2

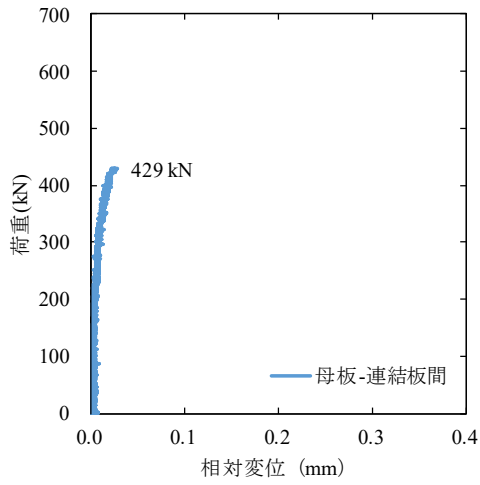


(a) 荷重-相対変位関係

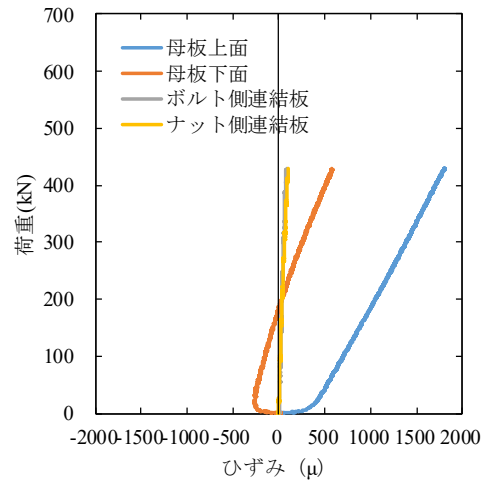


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-6 P2-15-3

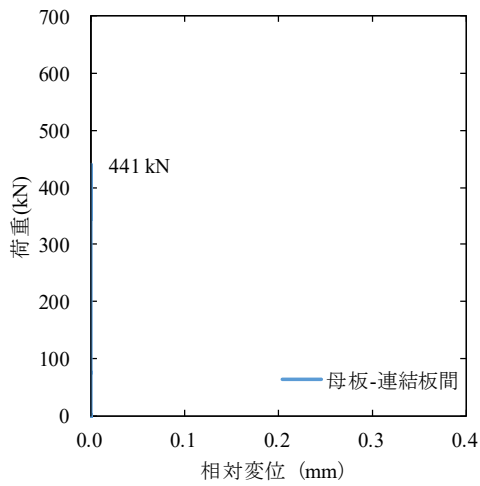


(a) 荷重-相対変位関係

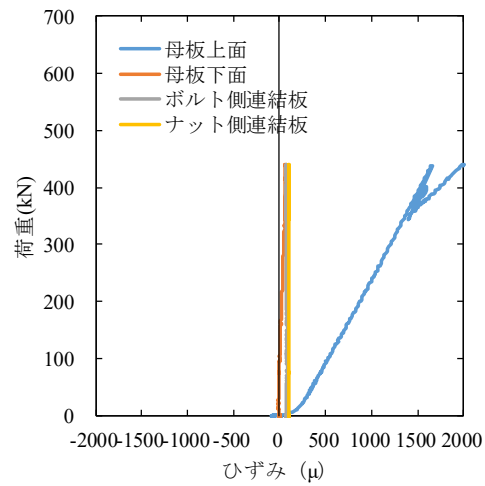


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-7 P3-15-1

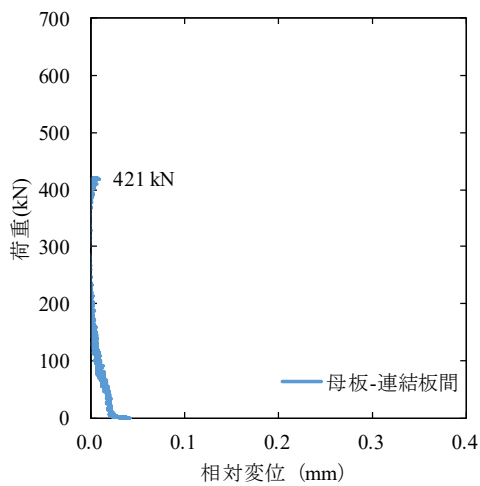


(a) 荷重-相対変位関係

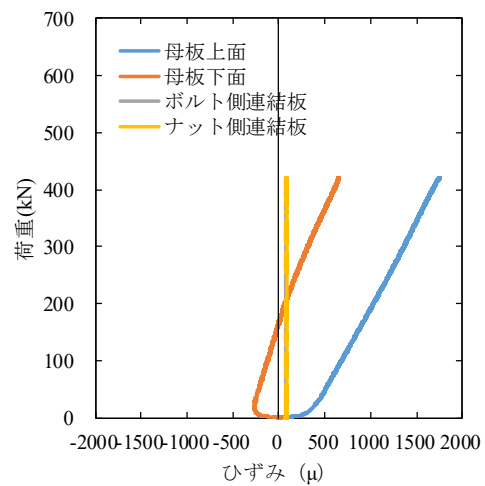


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-8 P3-15-2

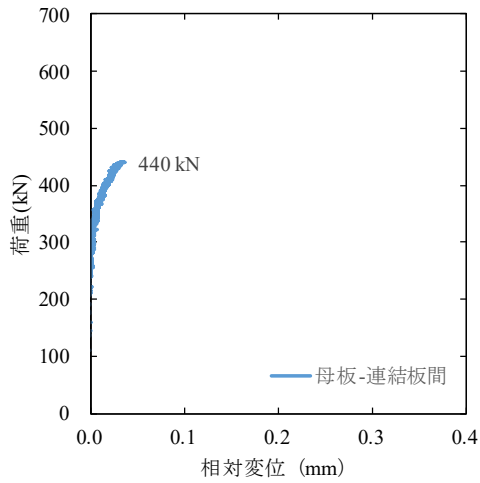


(a) 荷重-相対変位関係

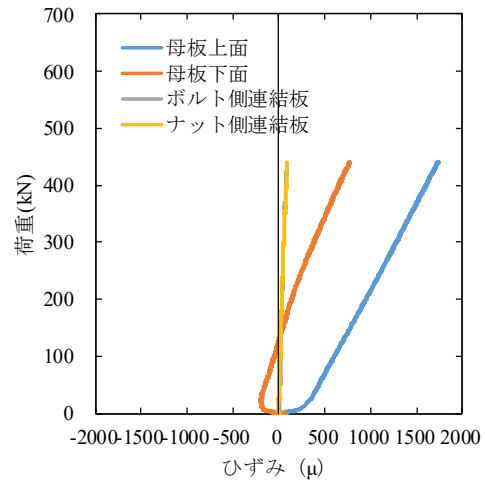


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-9 P3-15-3

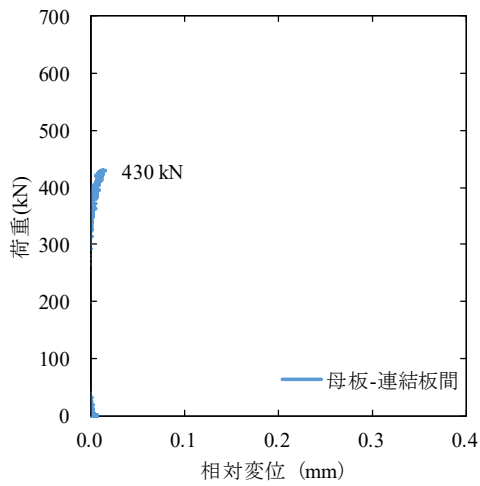


(a) 荷重-相対変位関係

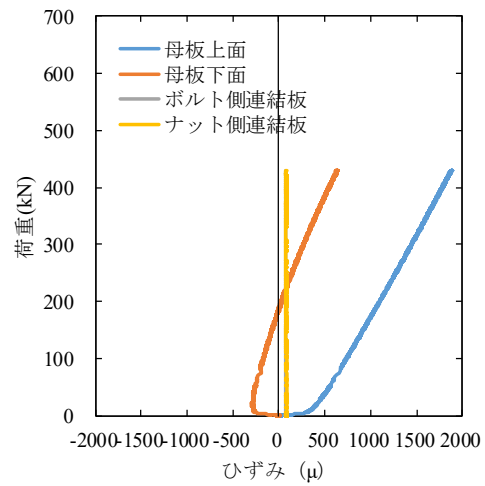


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-10 P3-20-1

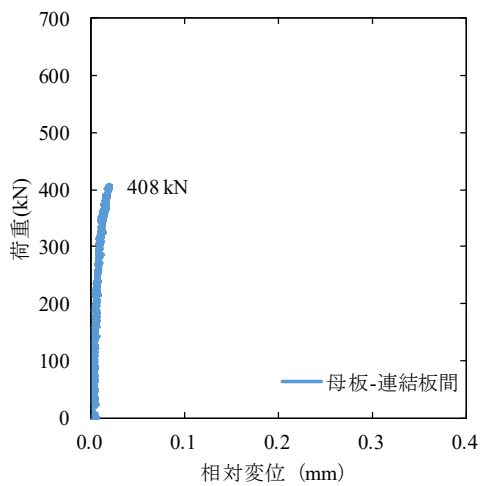


(a) 荷重-相対変位関係

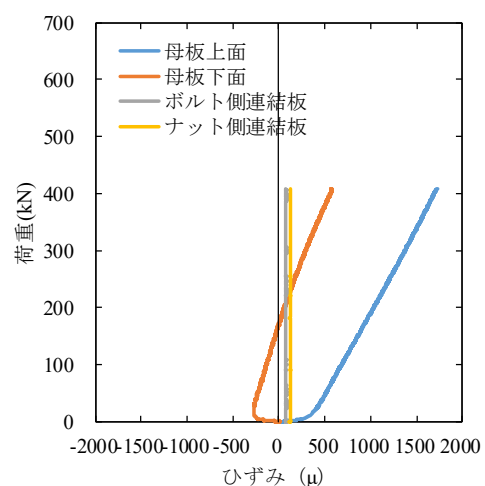


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-11 P3-20-2



(a) 荷重-相対変位関係



(b) 荷重-ひずみ関係

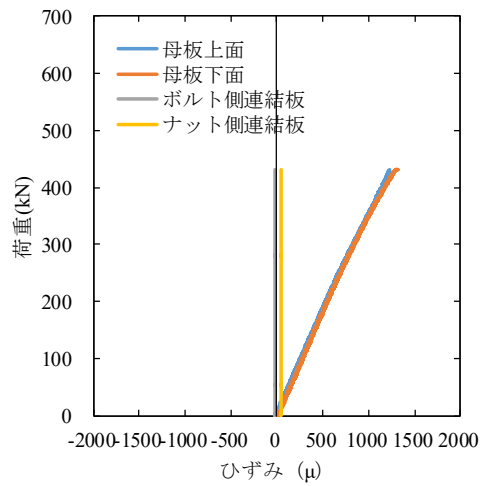
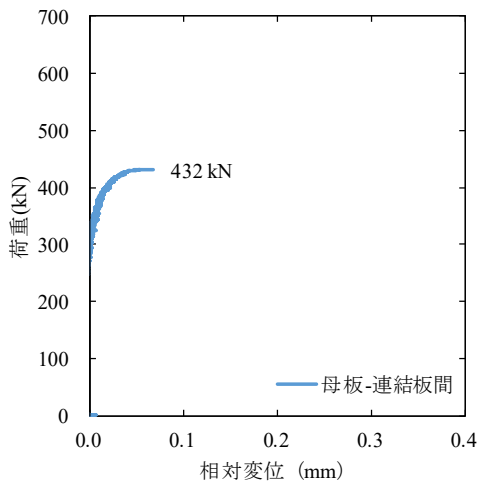
付図 1-2-12 P3-20-3

計測不能によりデータなし

(a) 荷重-相対変位関係

(b) 荷重-ひずみ関係

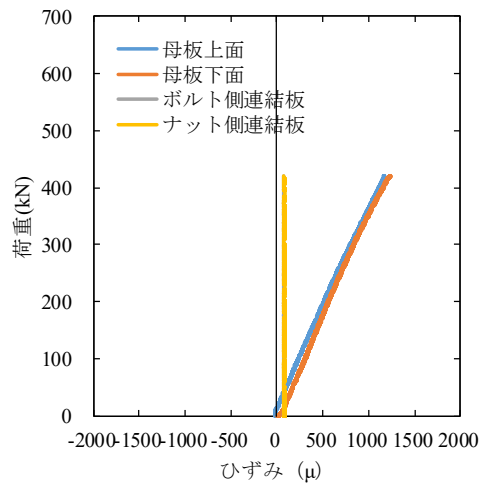
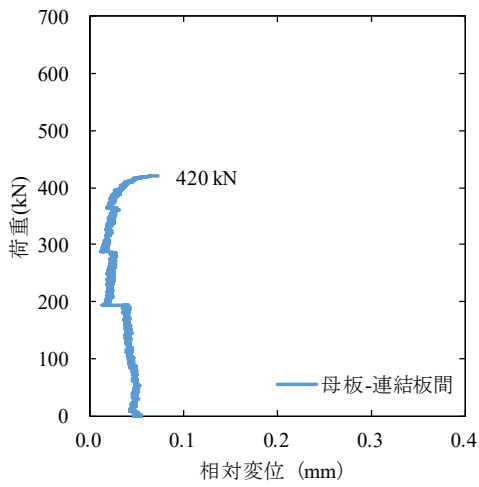
付図 1-2-13 P4-15-1



(a) 荷重-相対変位関係

(b) 荷重-ひずみ関係

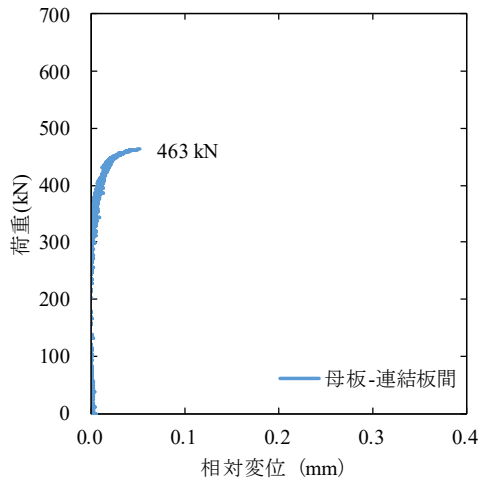
付図 1-2-14 P4-15-2



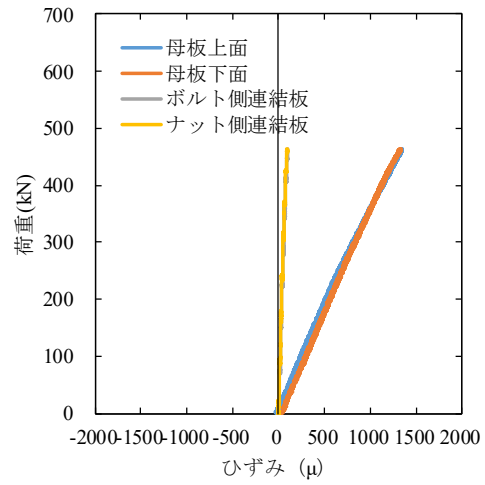
(a) 荷重-相対変位関係

(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-15 P4-15-3

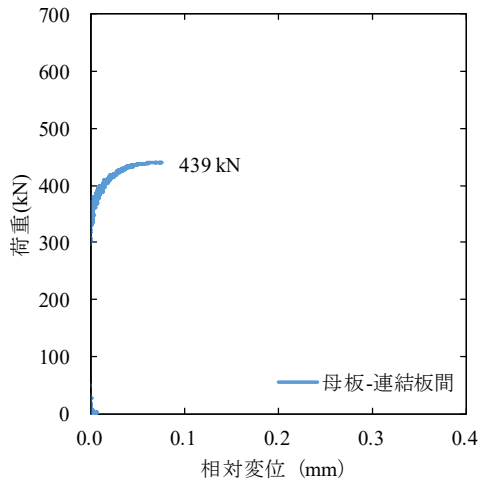


(a) 荷重-相対変位関係

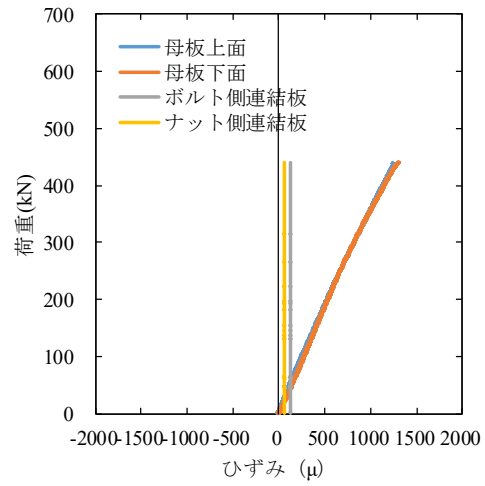


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-16 P4-20-1

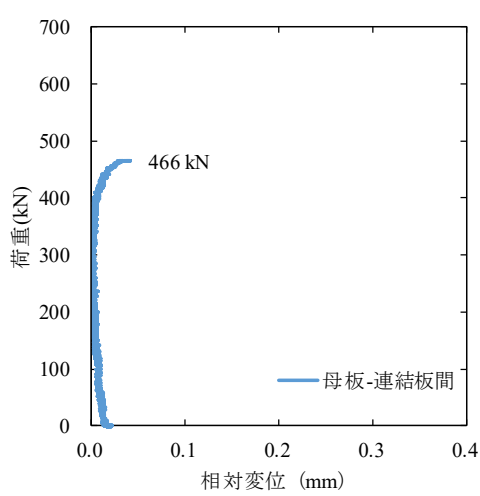


(a) 荷重-相対変位関係

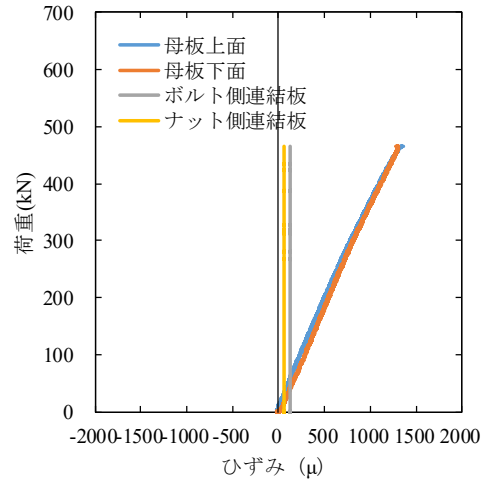


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-17 P4-20-2

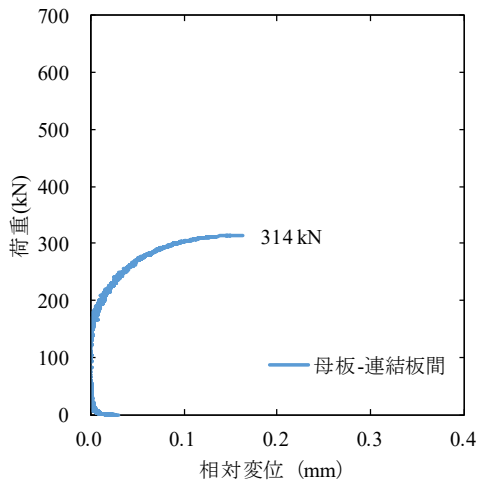


(a) 荷重-相対変位関係

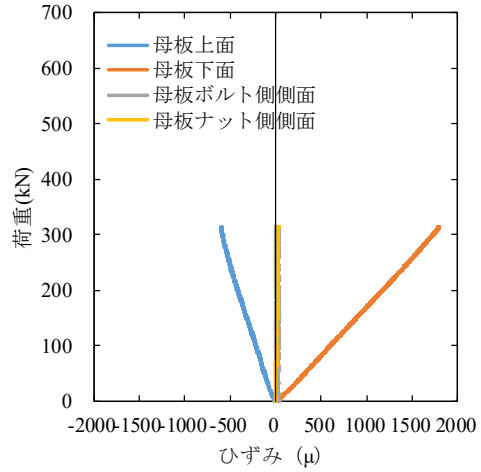


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-18 P4-20-3

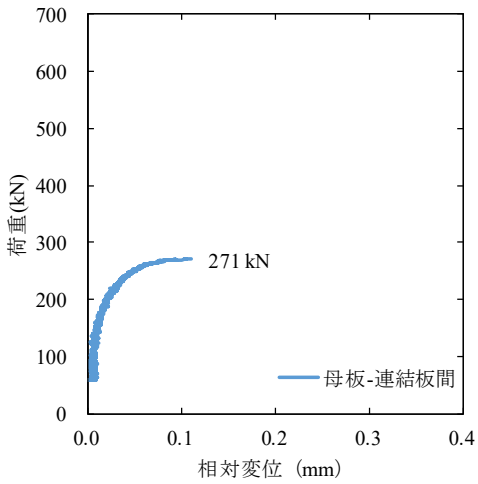


(a) 荷重-相対変位関係

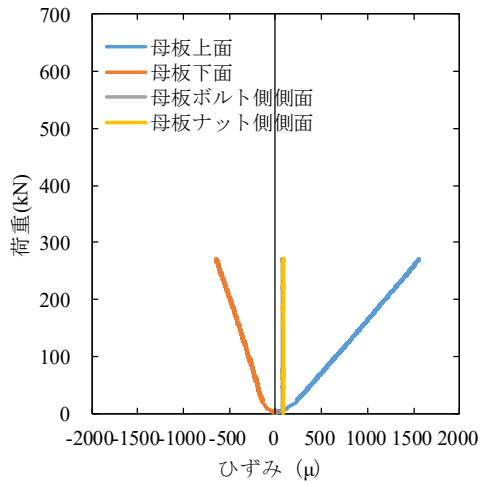


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-19 B1-10-1

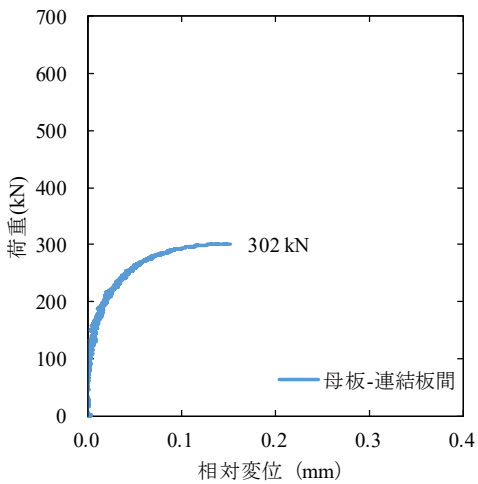


(a) 荷重-相対変位関係

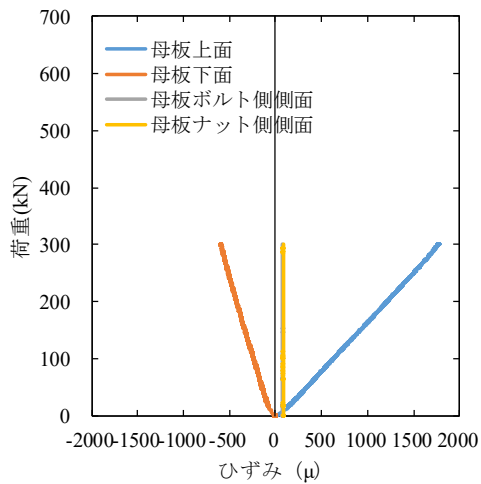


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-20 B1-10-2

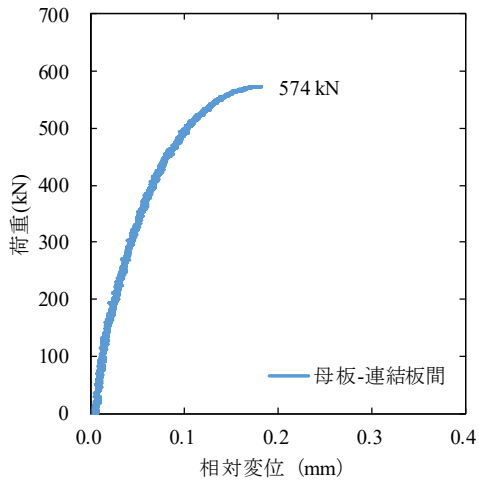


(a) 荷重-相対変位関係

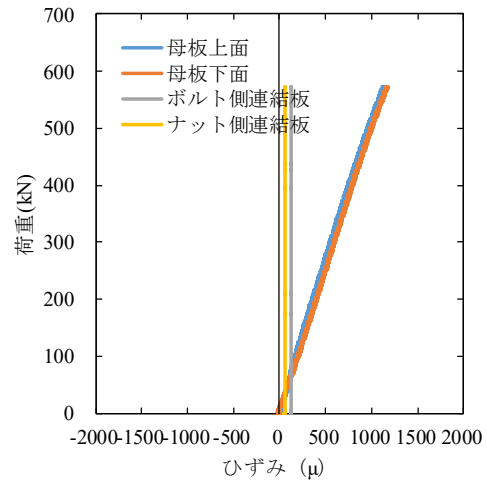


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-21 B1-10-3

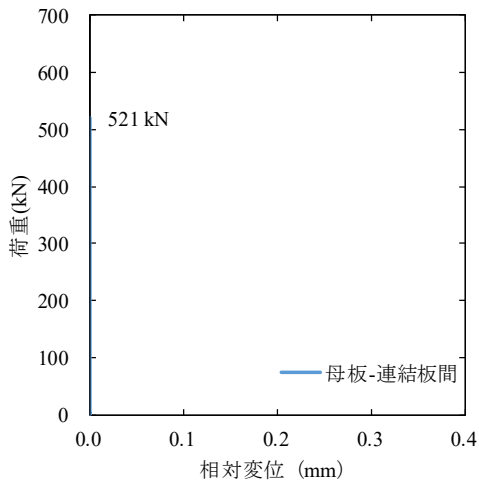


(a) 荷重-相対変位関係

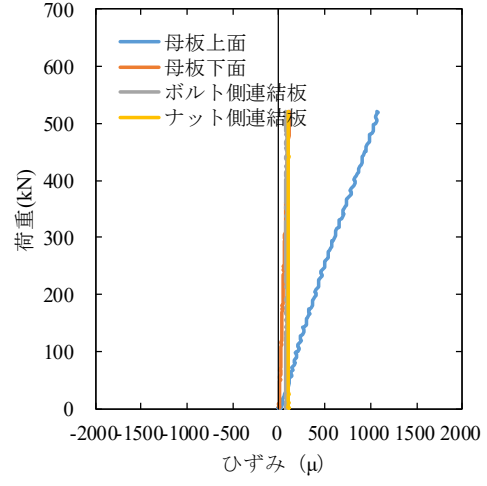


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-22 B2-10-1

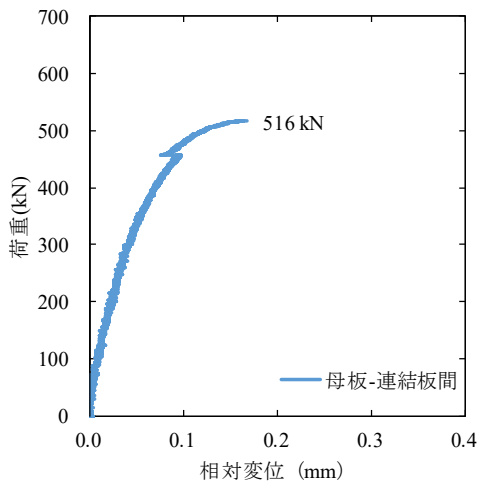


(a) 荷重-相対変位関係

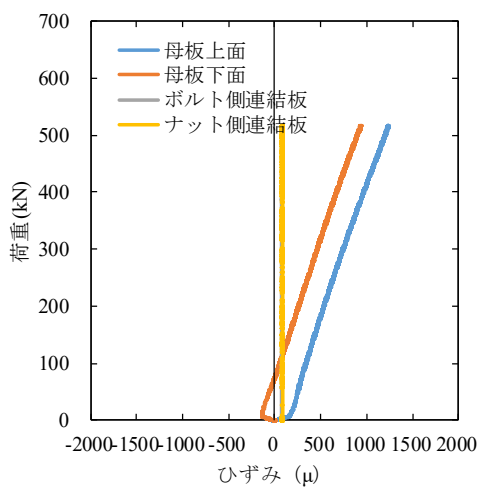


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-23 B2-10-2

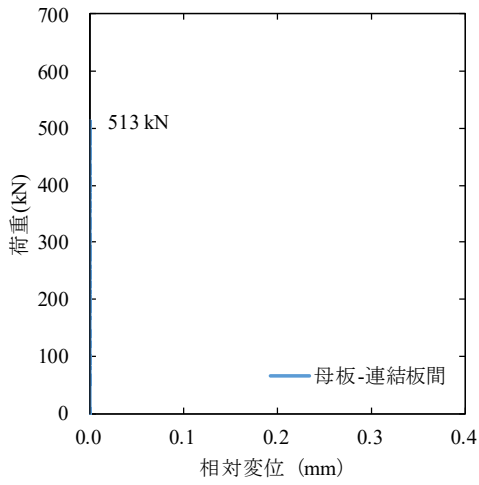


(a) 荷重-相対変位関係

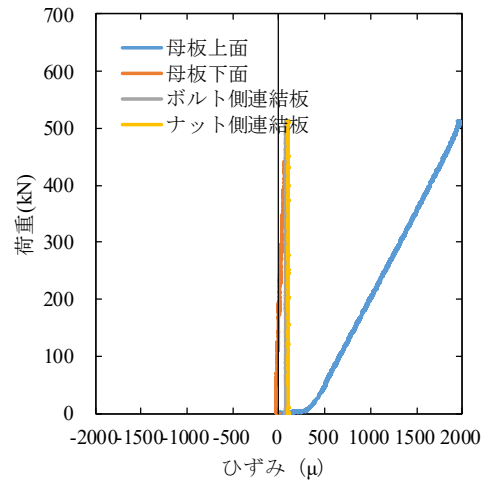


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-24 B2-10-3

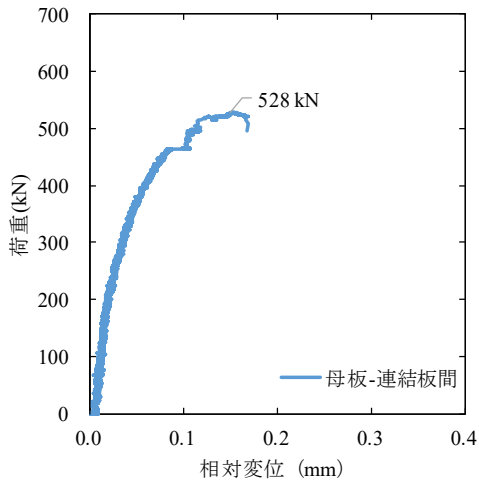


(a) 荷重-相対変位関係

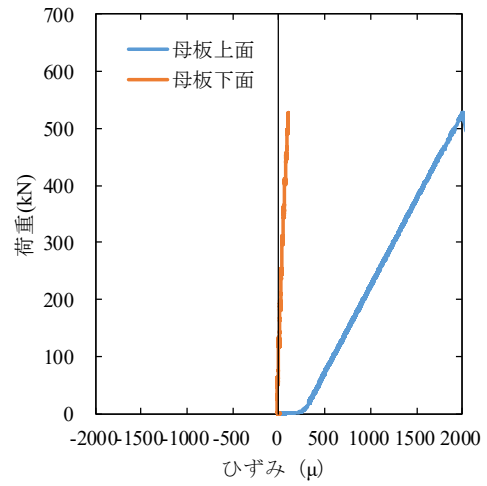


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-25 B3-10-1



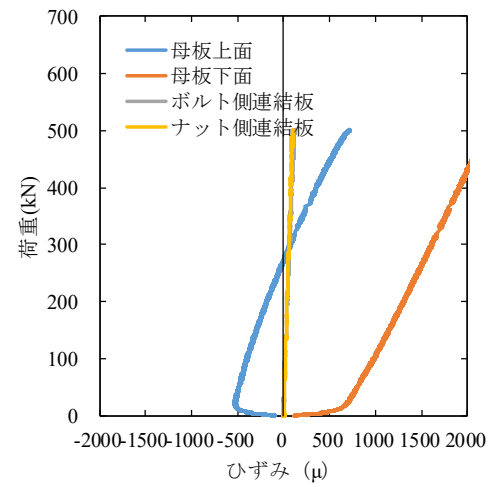
(a) 荷重-相対変位関係



(b) 荷重-ひずみ関係

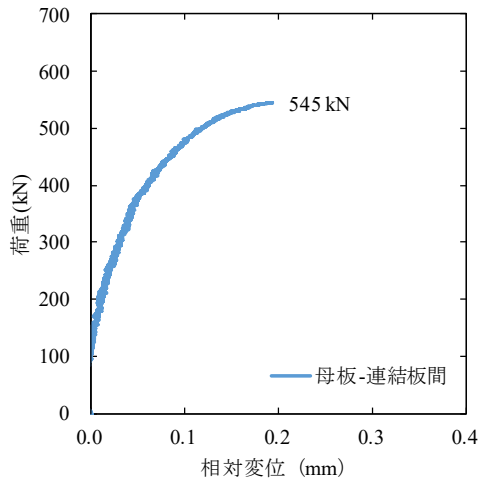
付図 1-2-26 B3-10-2

計測不能によりデータなし

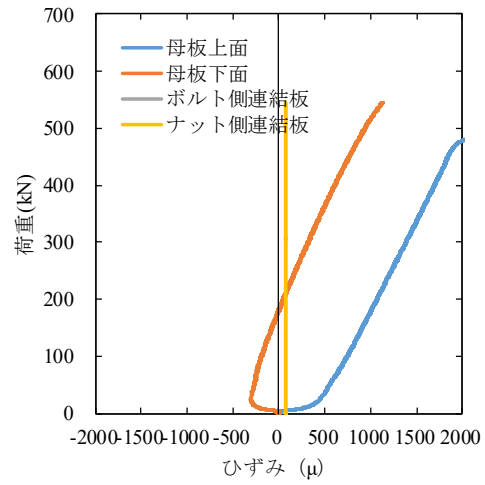


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-27 B3-10-3

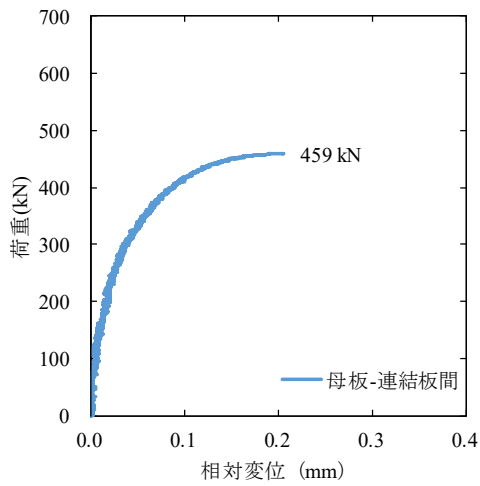


(a) 荷重-相対変位関係

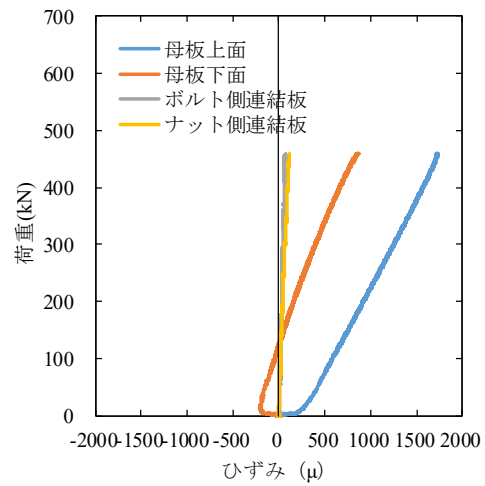


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-28 B3-15-1

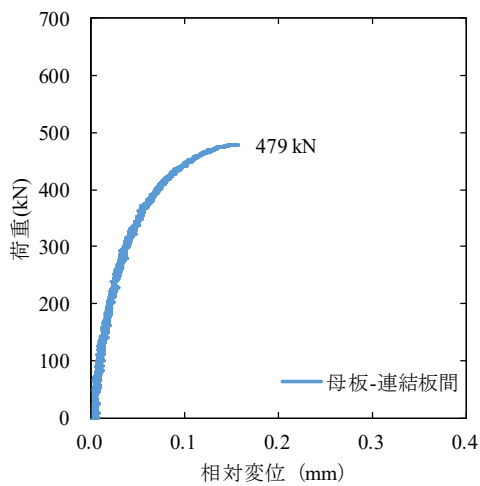


(a) 荷重-相対変位関係

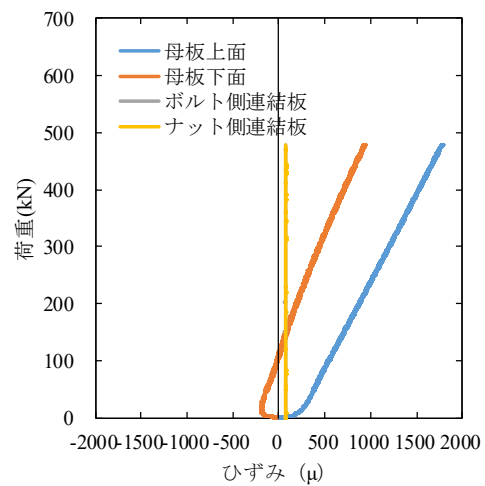


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-29 B3-15-2

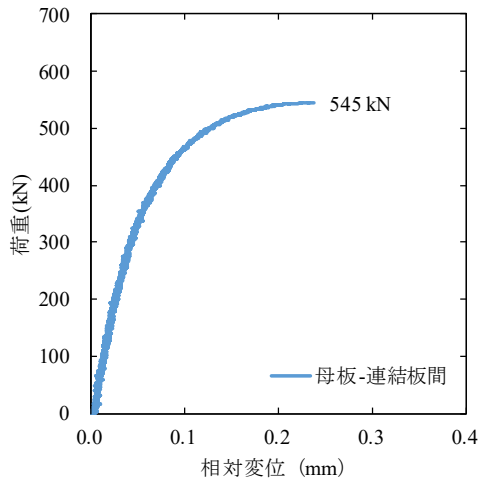


(a) 荷重-相対変位関係

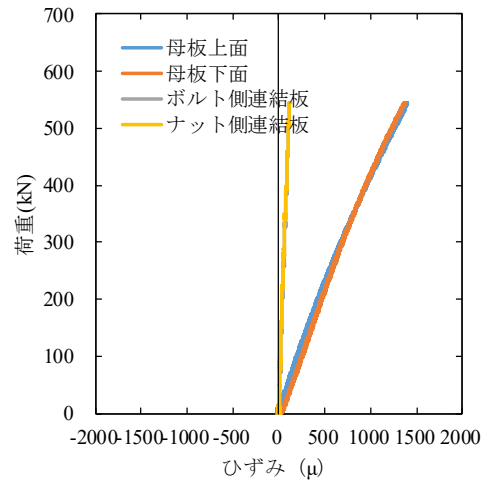


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-30 B3-15-3

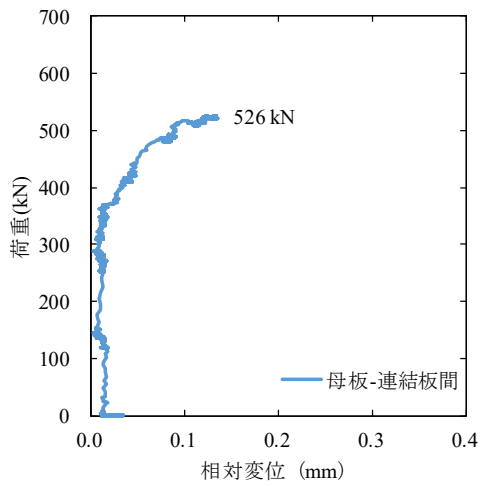


(a) 荷重-相対変位関係

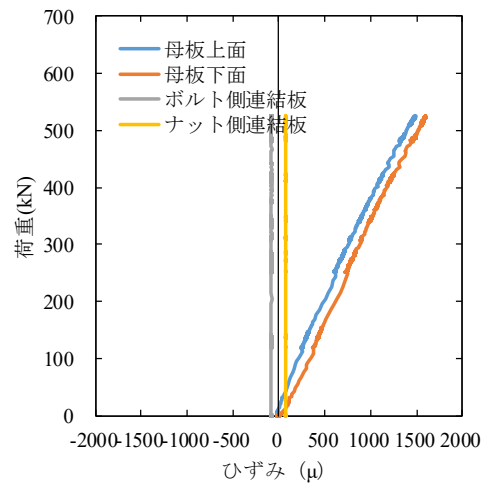


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-31 B4-10-1

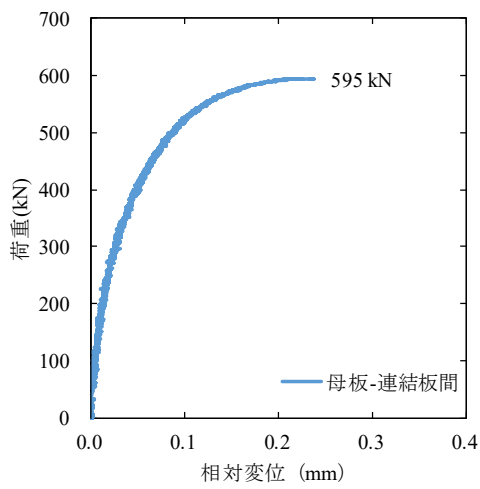


(a) 荷重-相対変位関係

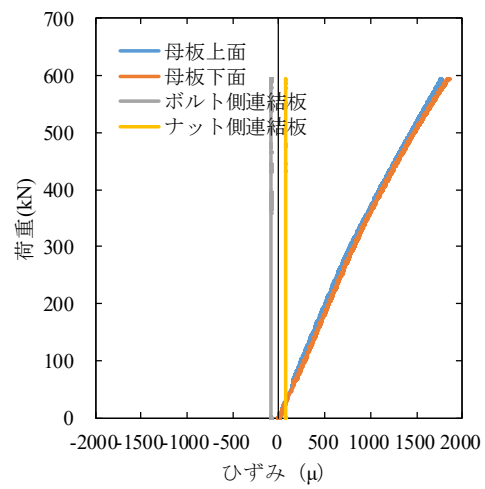


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-32 B4-10-2

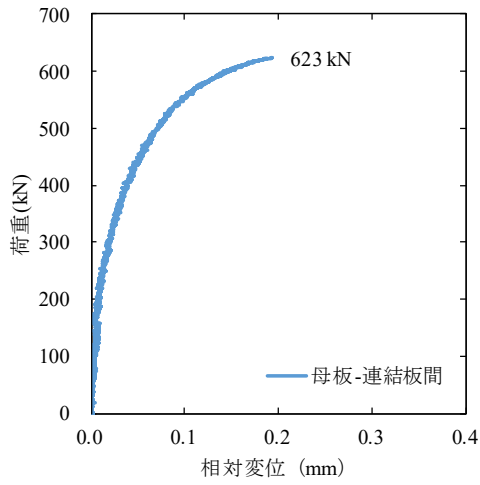


(a) 荷重-相対変位関係

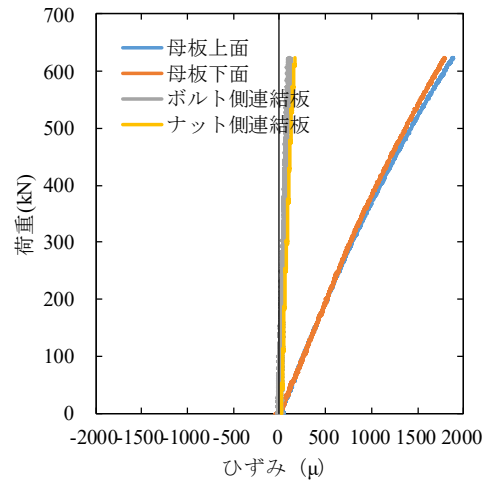


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-33 B4-10-3

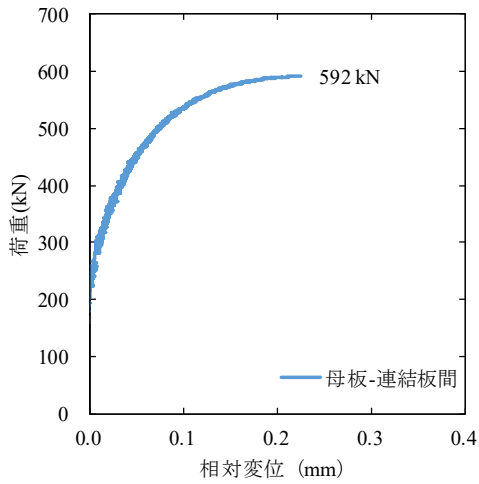


(a) 荷重-相対変位関係

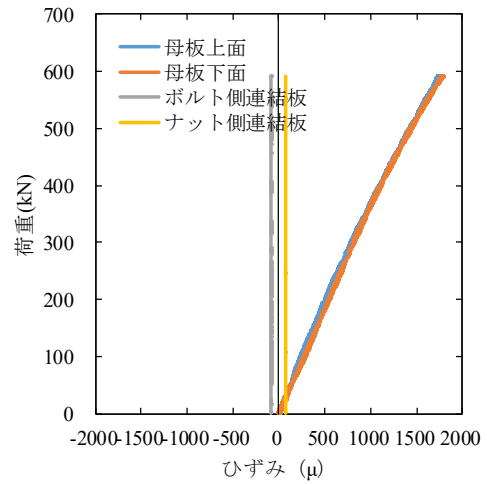


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-34 B4-15-1

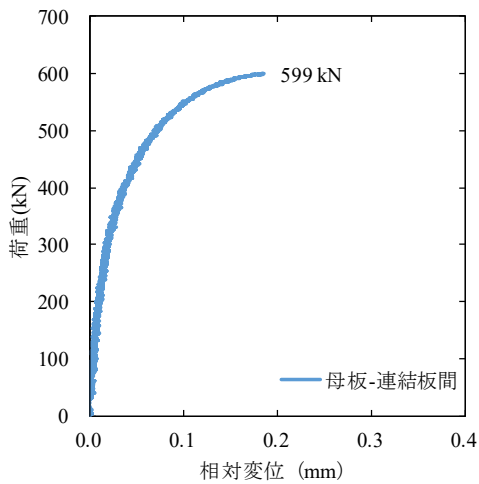


(a) 荷重-相対変位関係

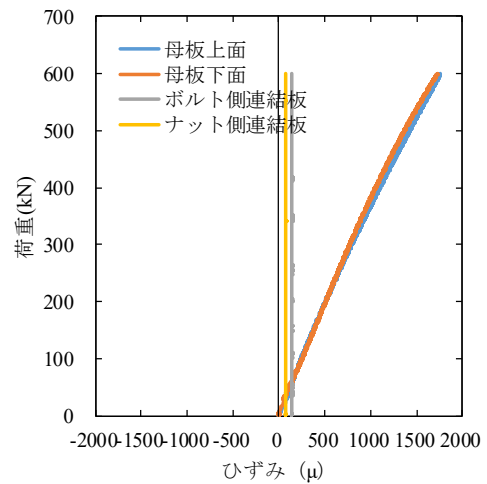


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-35 B4-15-2

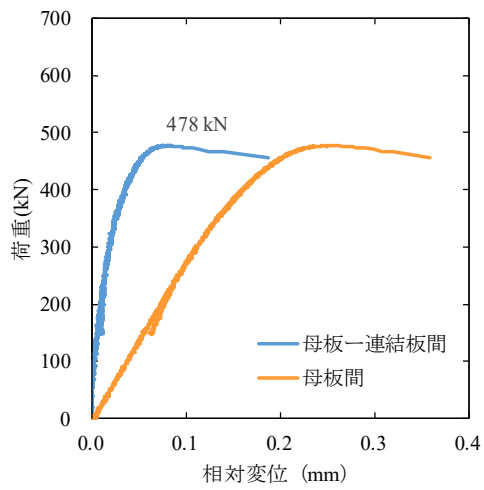


(a) 荷重-相対変位関係

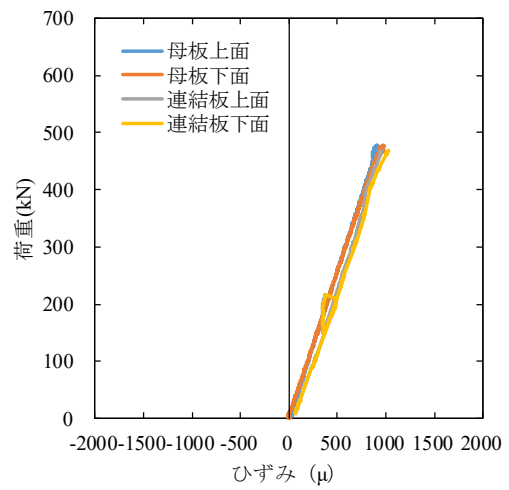


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-36 B4-15-3

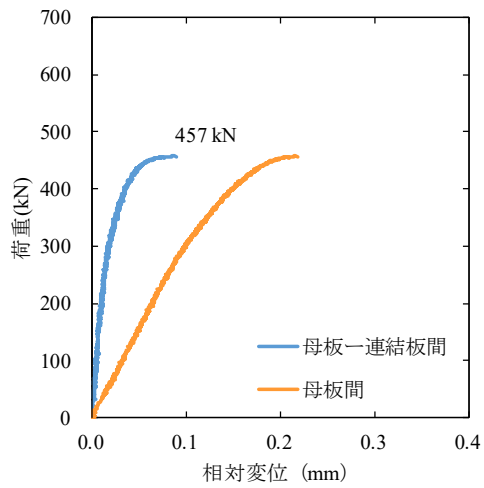


(a) 荷重-相対変位関係

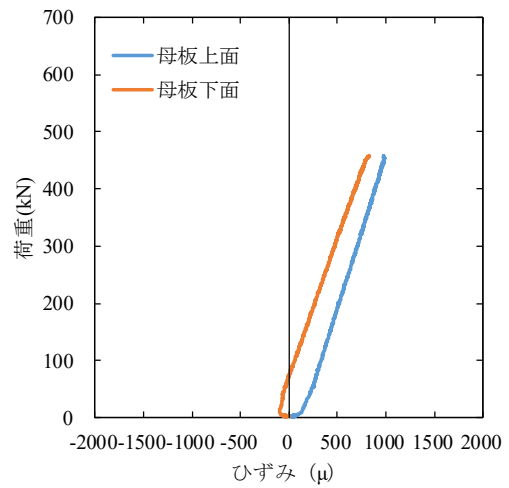


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-37 PA2-15-1

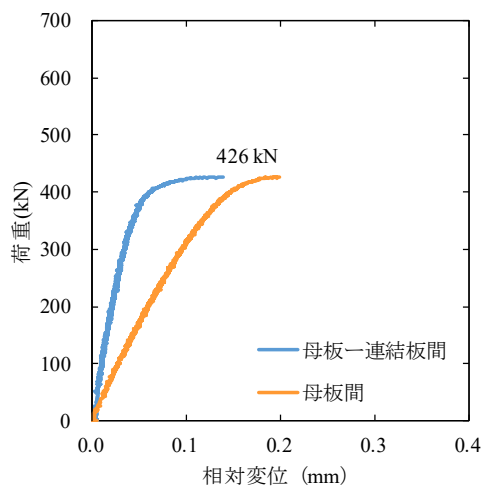


(a) 荷重-相対変位関係

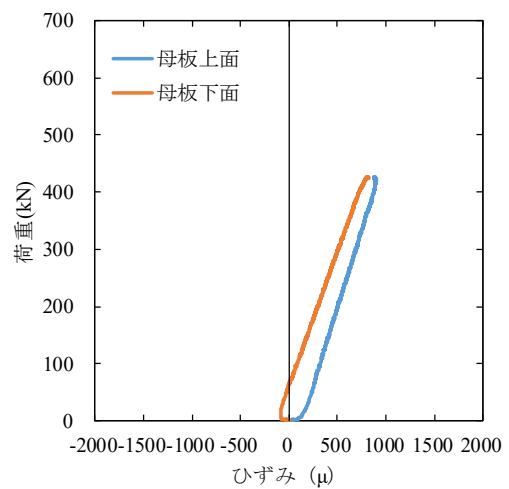


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-38 PA2-15-2

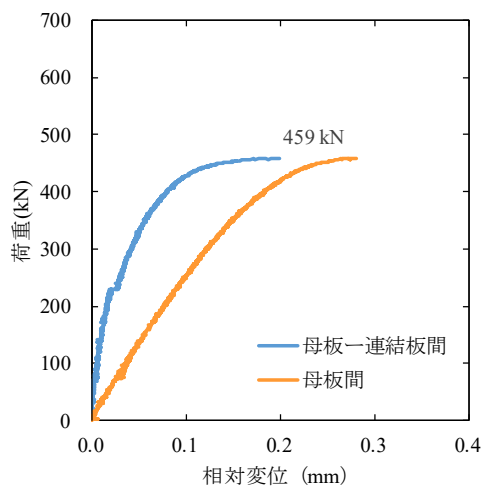


(a) 荷重-相対変位関係

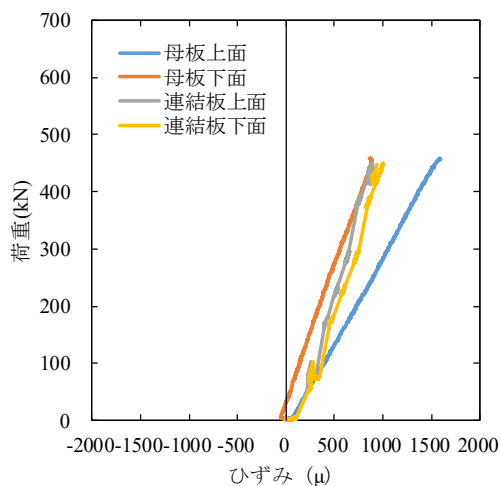


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-39 PA2-15-3

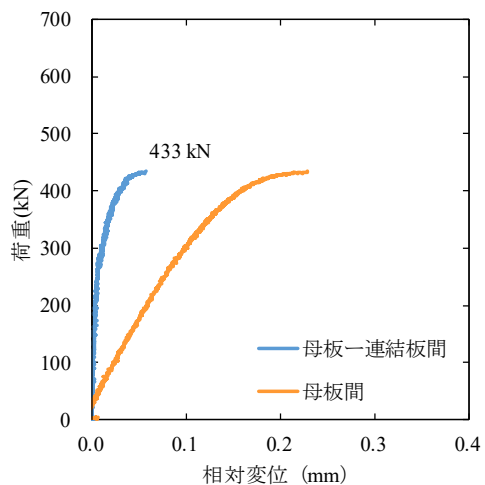


(a) 荷重-相対変位関係

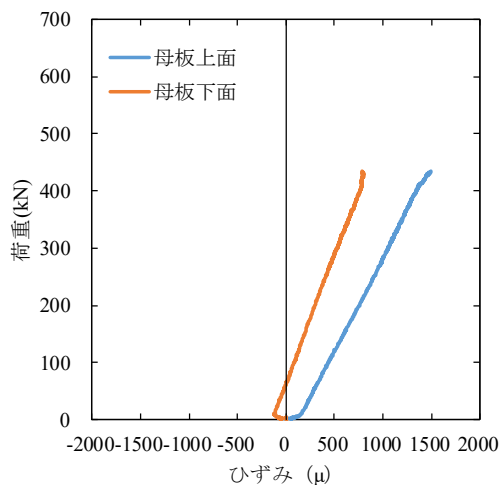


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-40 PA3-15-1

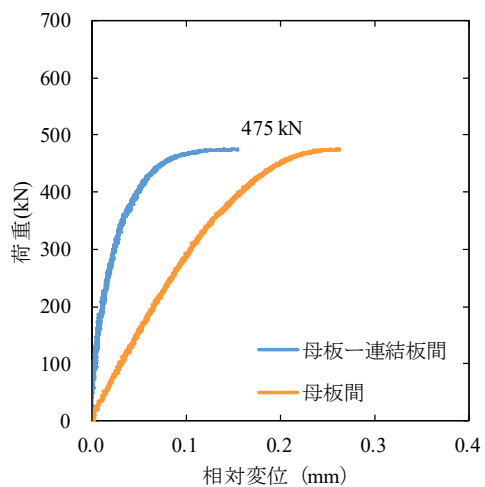


(a) 荷重-相対変位関係

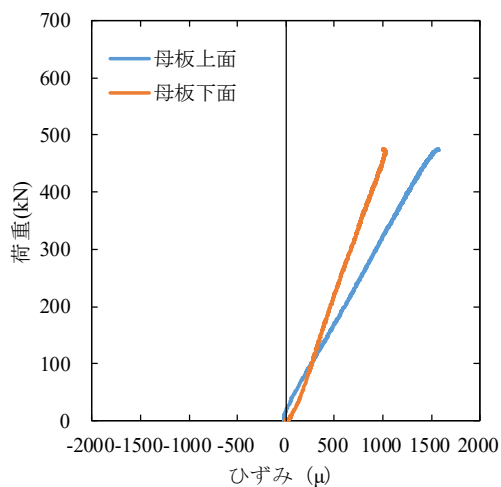


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-41 PA3-15-2

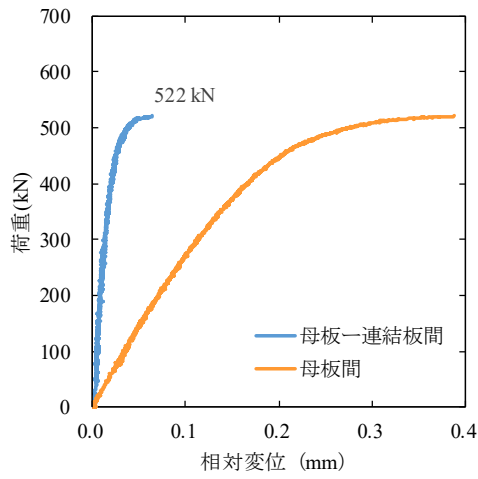


(a) 荷重-相対変位関係

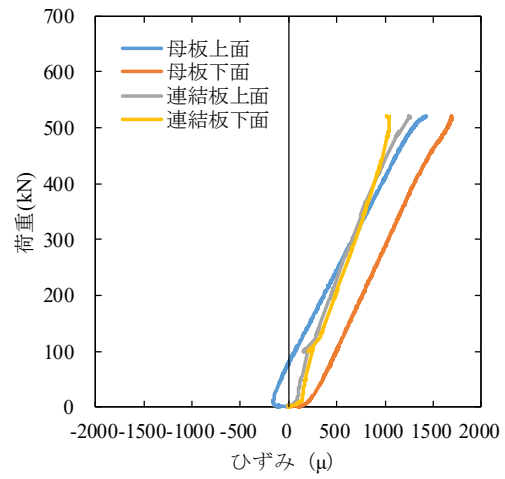


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-42 PA3-15-3

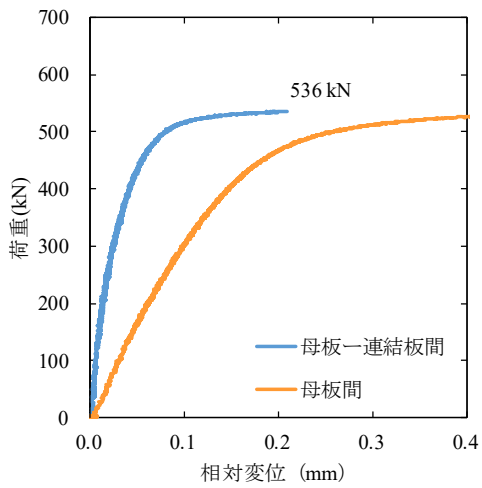


(a) 荷重-相対変位関係

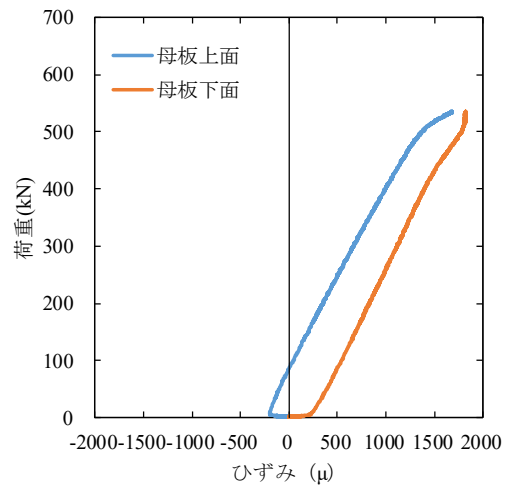


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-43 PA4-20-1

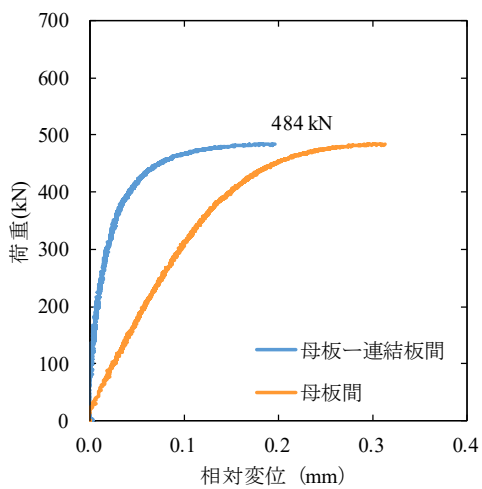


(a) 荷重-相対変位関係

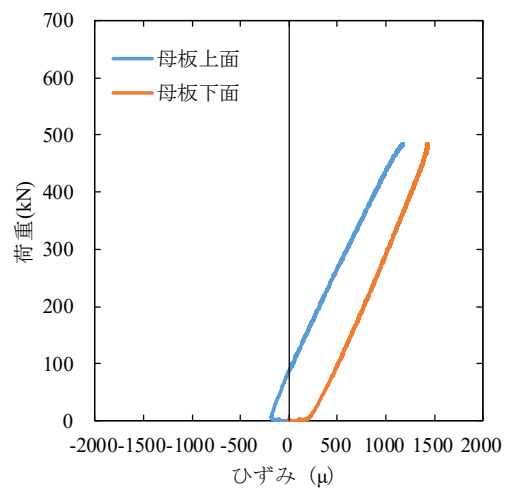


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-44 PA4-20-2

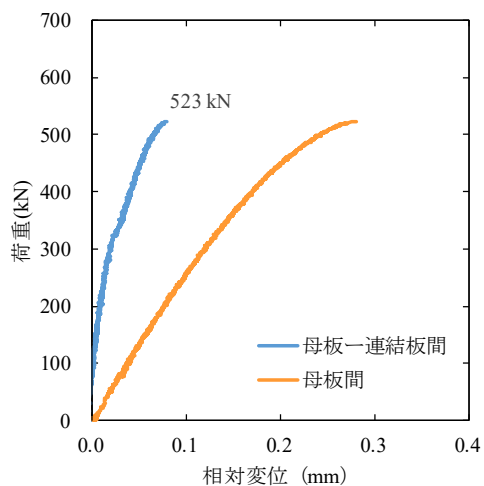


(a) 荷重-相対変位関係

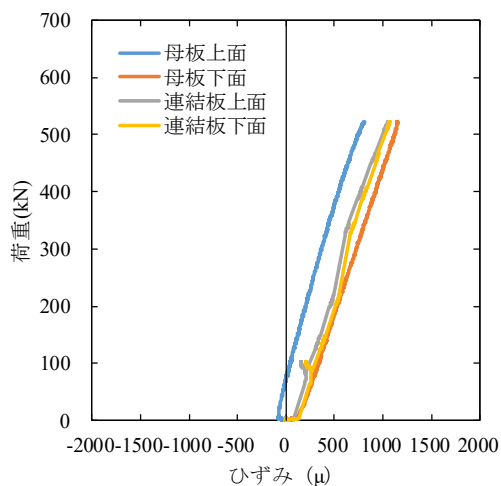


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-45 PA4-20-3

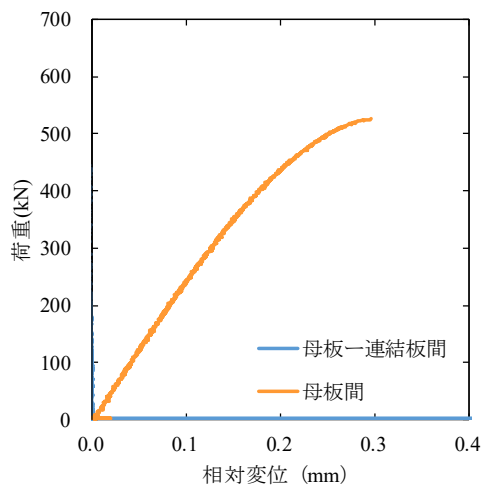


(a) 荷重-相対変位関係

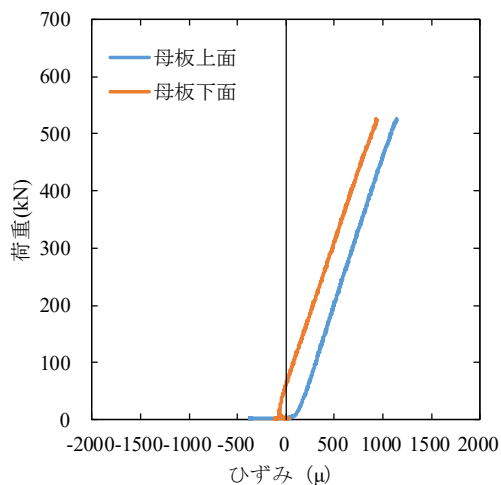


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-46 PB2-15-1

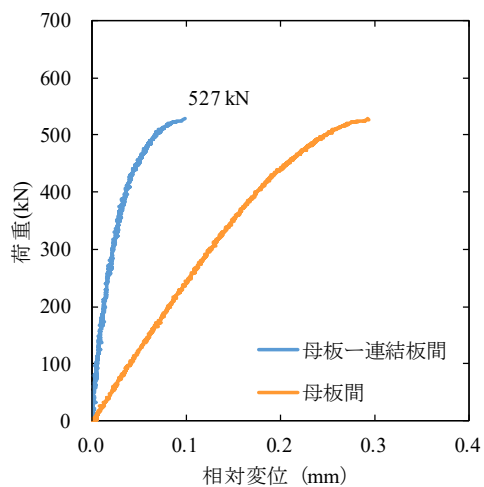


(a) 荷重-相対変位関係

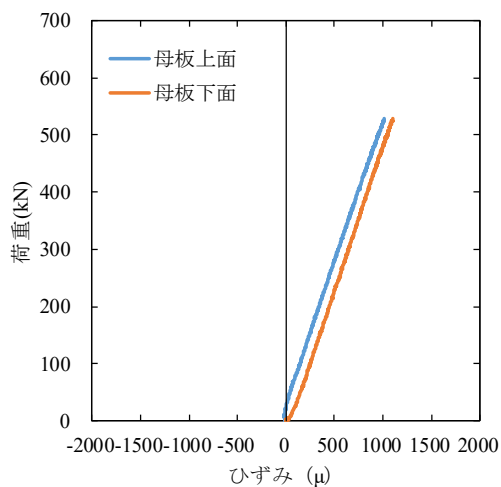


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-47 PB2-15-2

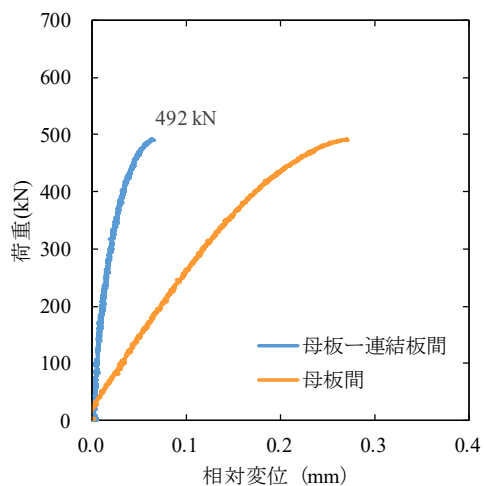


(a) 荷重-相対変位関係

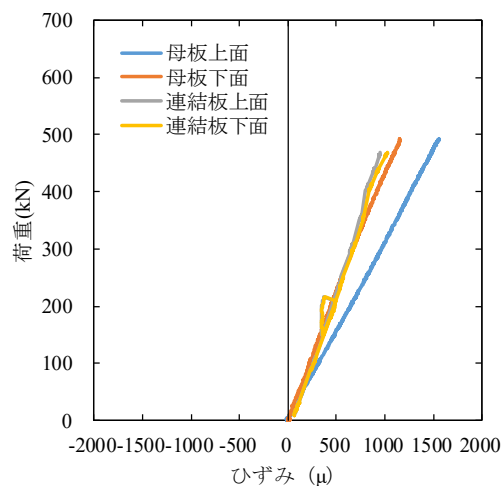


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-48 PB2-15-3

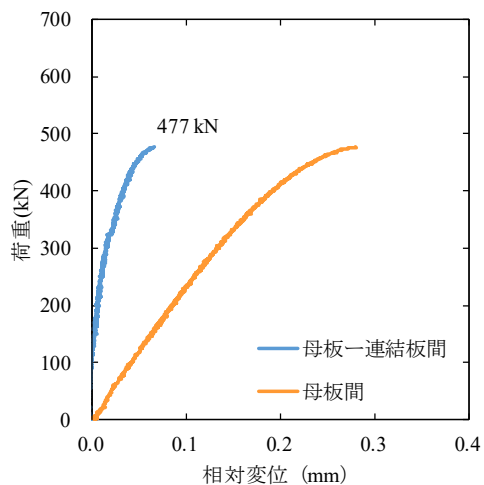


(a) 荷重-相対変位関係

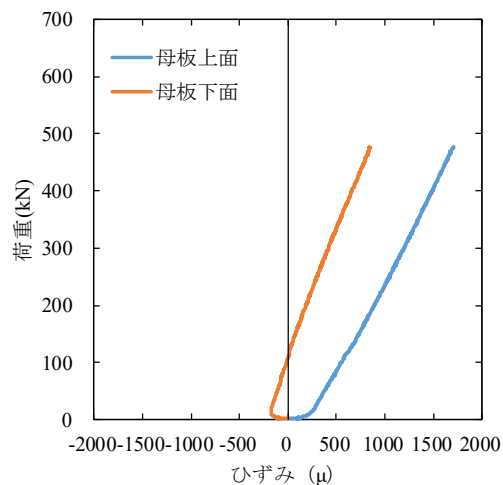


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-49 PB3-15-1

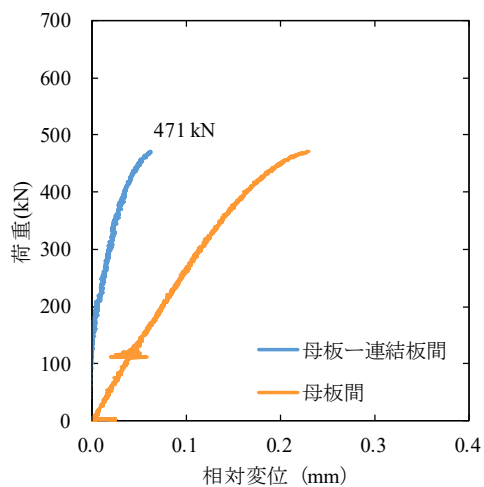


(a) 荷重-相対変位関係

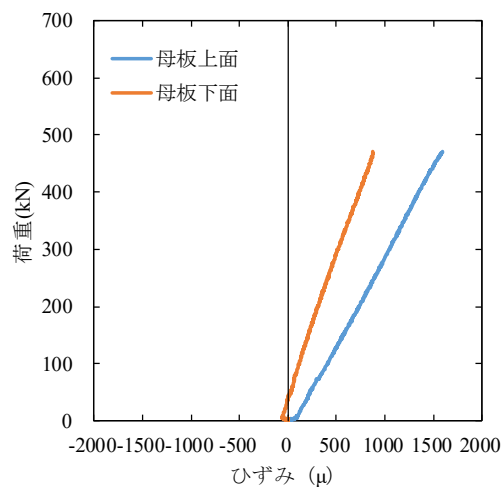


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-50 PB3-15-2

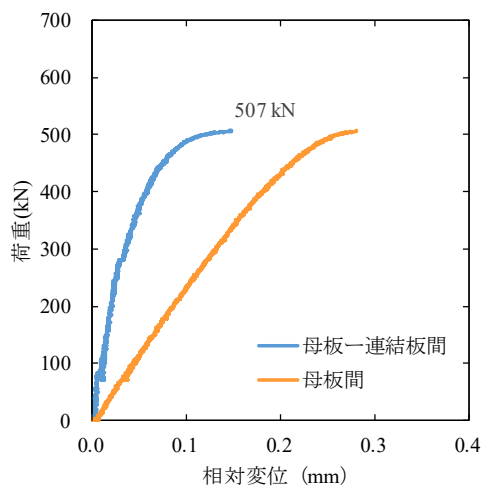


(a) 荷重-相対変位関係

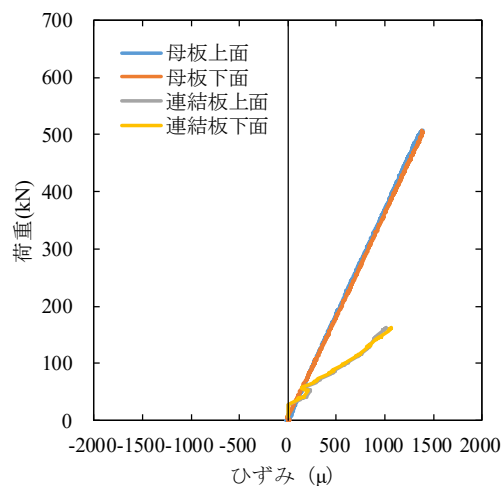


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-51 PB3-15-3

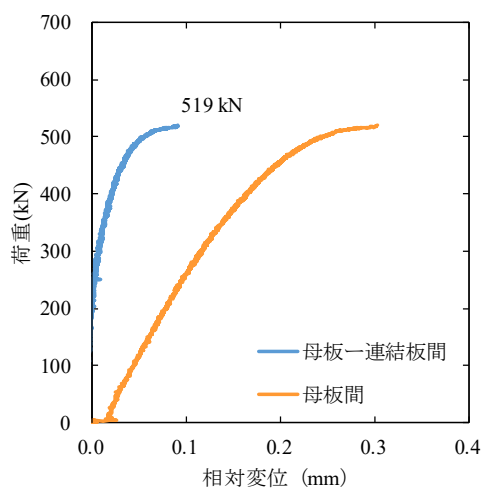


(a) 荷重-相対変位関係

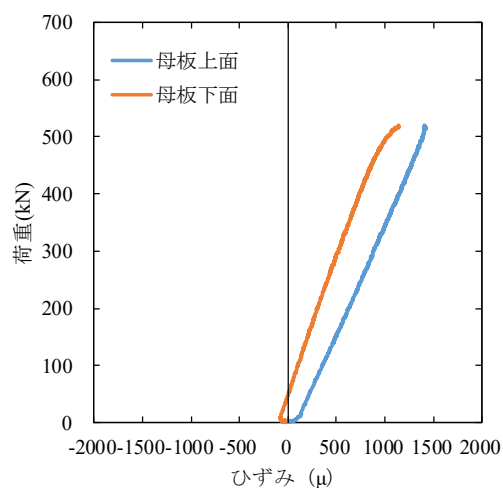


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-52 PB4-20-1

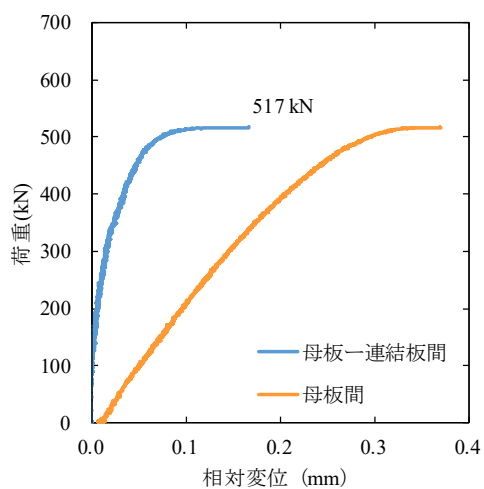


(a) 荷重-相対変位関係

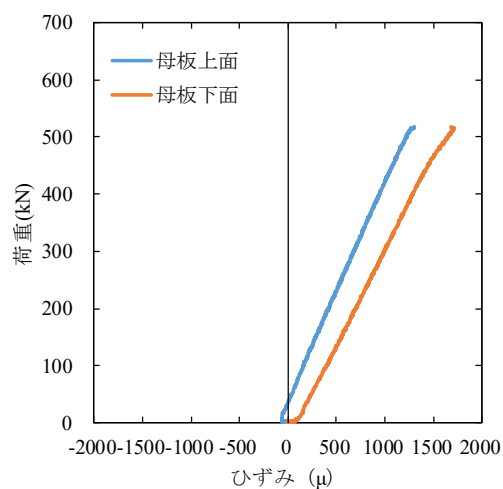


(b) 荷重-ひずみ関係

付図 1-2-53 PB4-20-2



(a) 荷重-相対変位関係

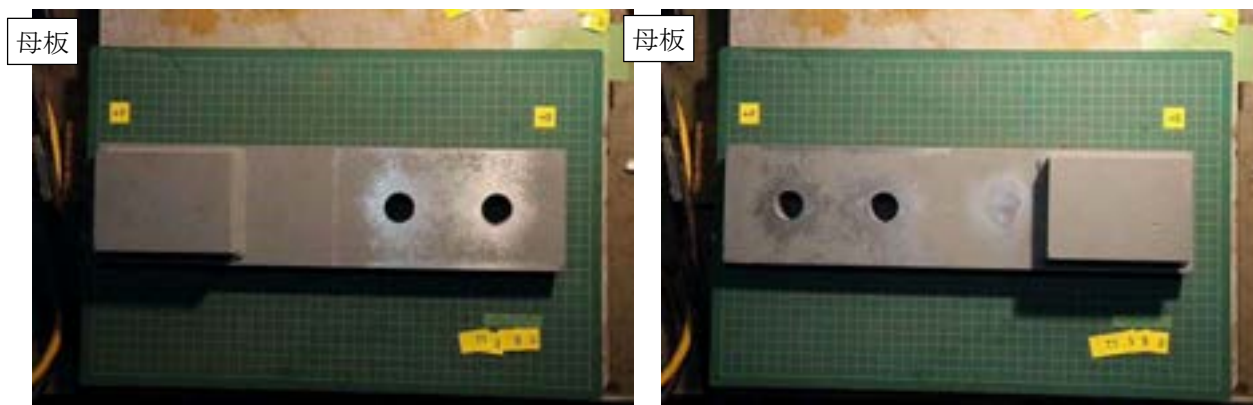


(b) 荷重-ひずみ関係

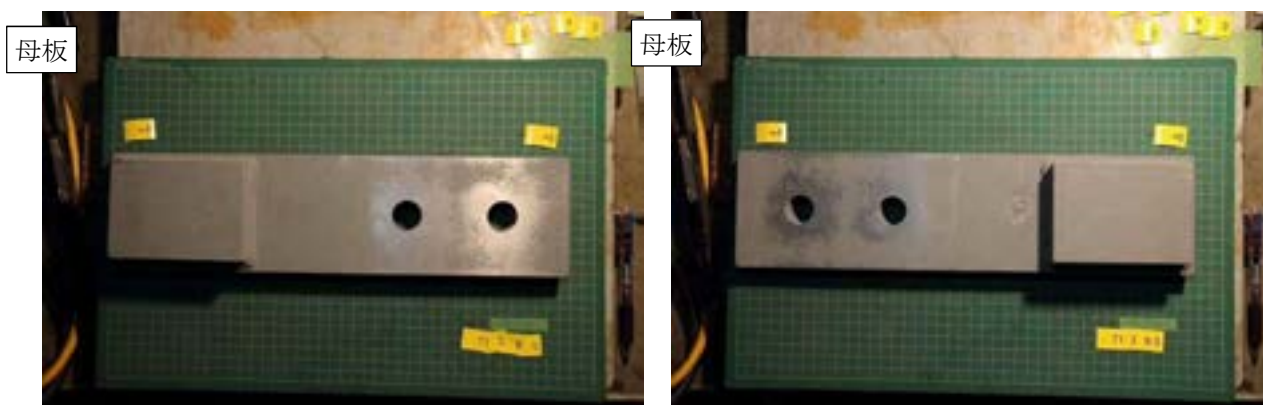
付図 1-2-54 PB4-20-3

1-3 すべり耐力試験後の接触面

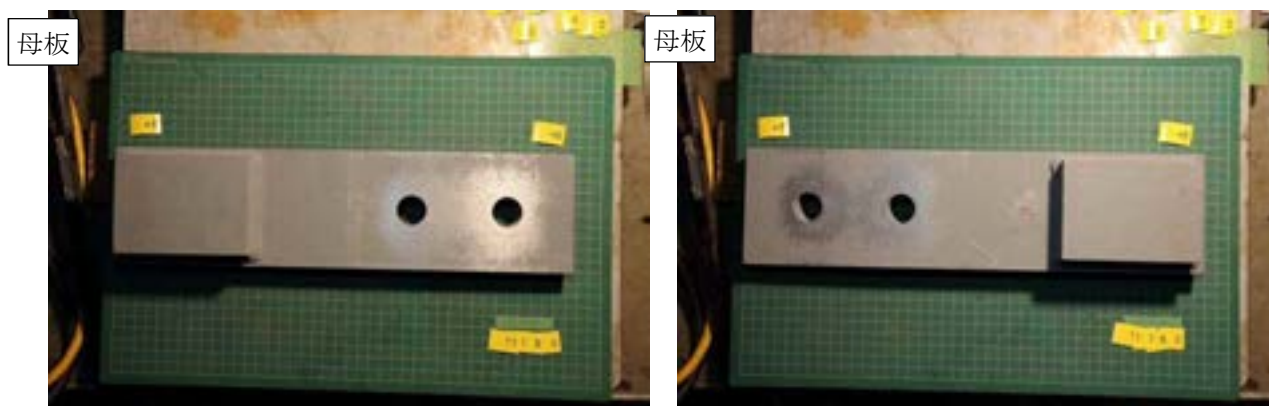
各試験体のすべり耐力試験後におけるすべり面の状況を以下に示す。



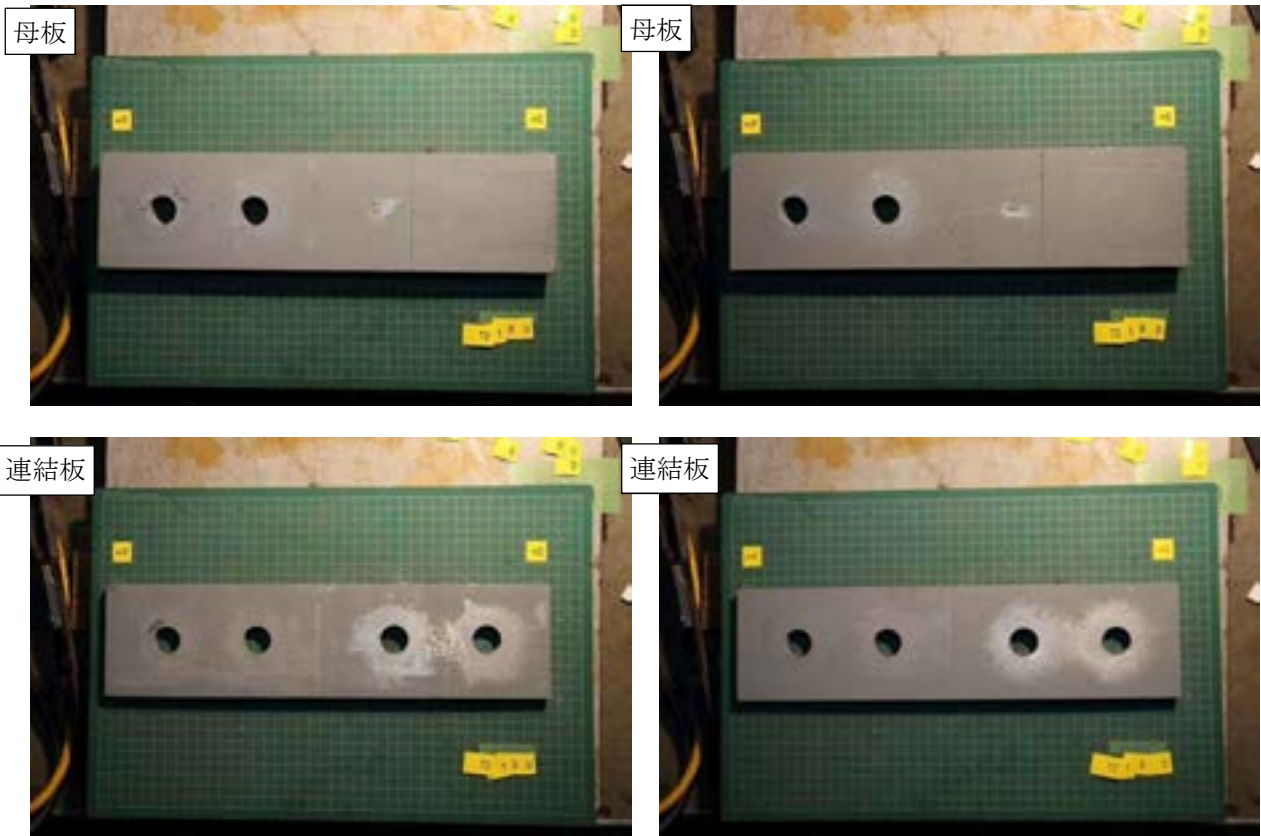
付図 1-3-1 試験体 P1-15-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



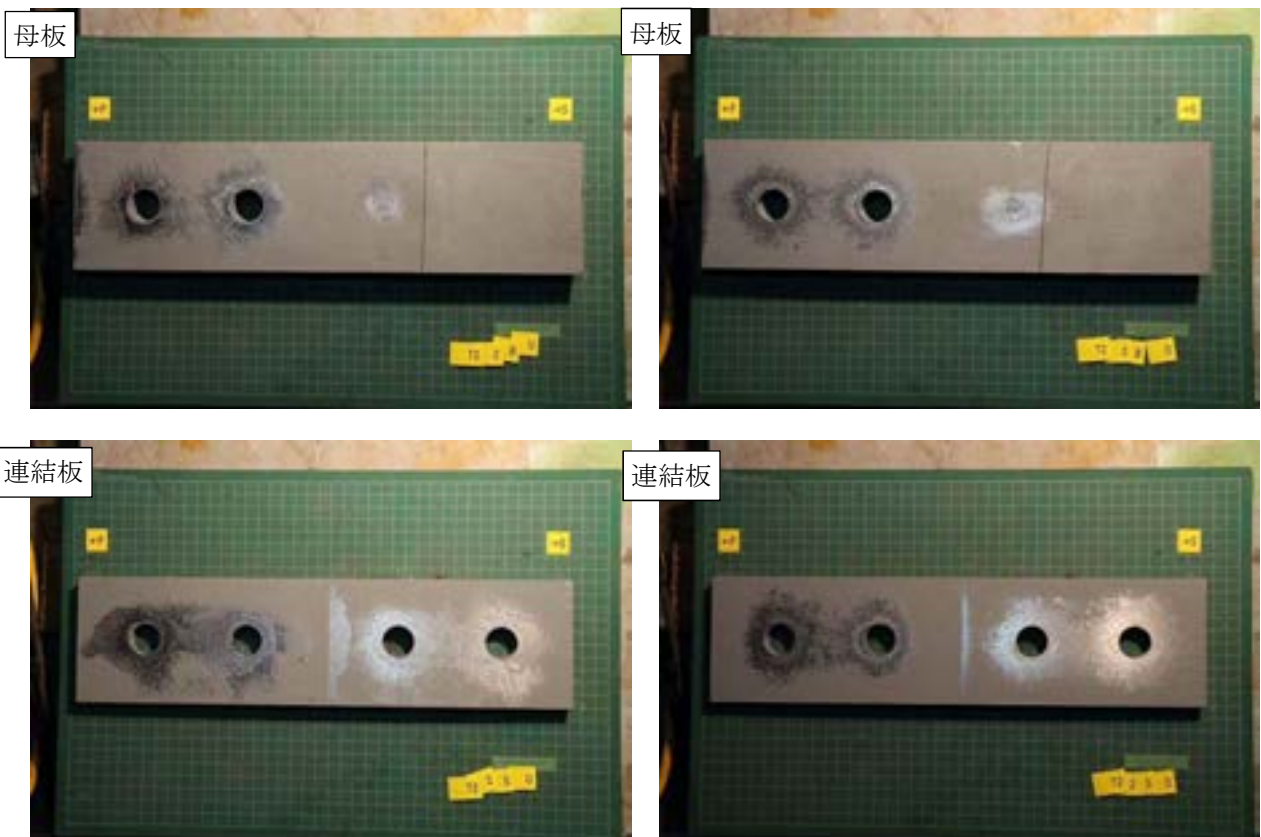
付図 1-3-2 試験体 P1-15-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 1-3-3 試験体 P1-15-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 1-3-4 試験体 P2-15-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

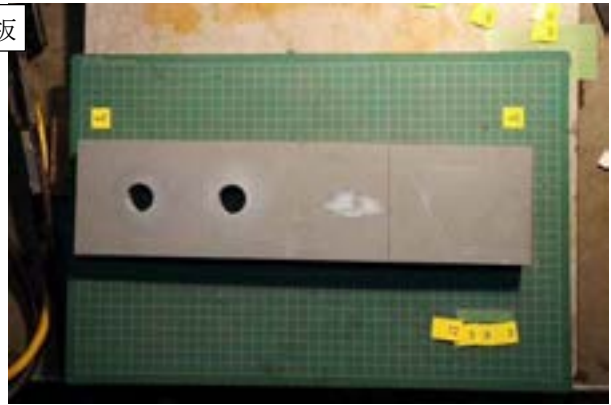


付図 1-3-5 試験体 P2-15-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



付図 1-3-6 試験体 P2-15-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



付図 1-3-7 試験体 P3-15-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



付図 1-3-8 試験体 P3-15-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



付図 1-3-9 試験体 P3-15-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



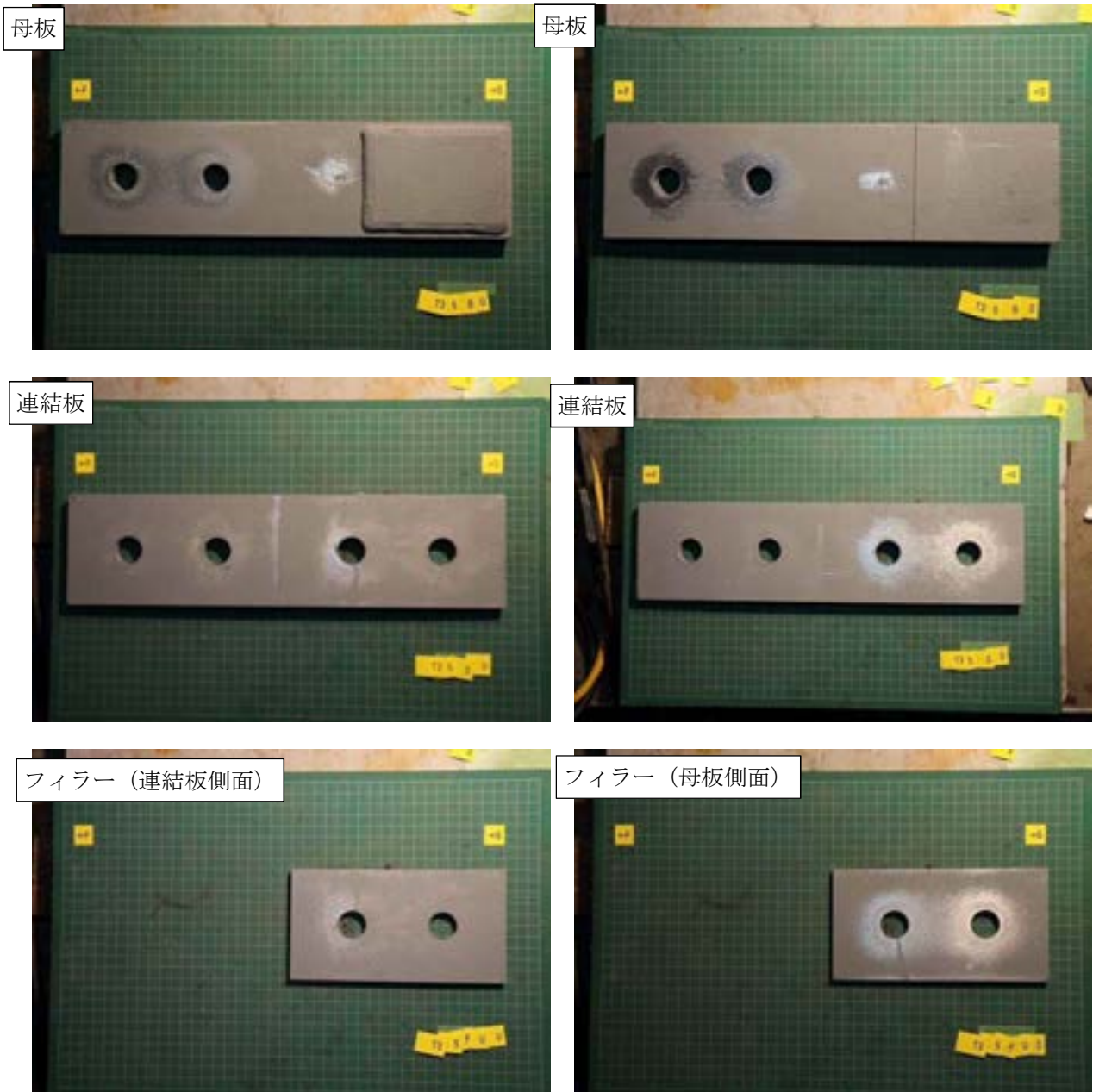
フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



付図 1-3-10 試験体 P3-20-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-11 試験体 P3-20-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）

母板



母板



連結板



連結板



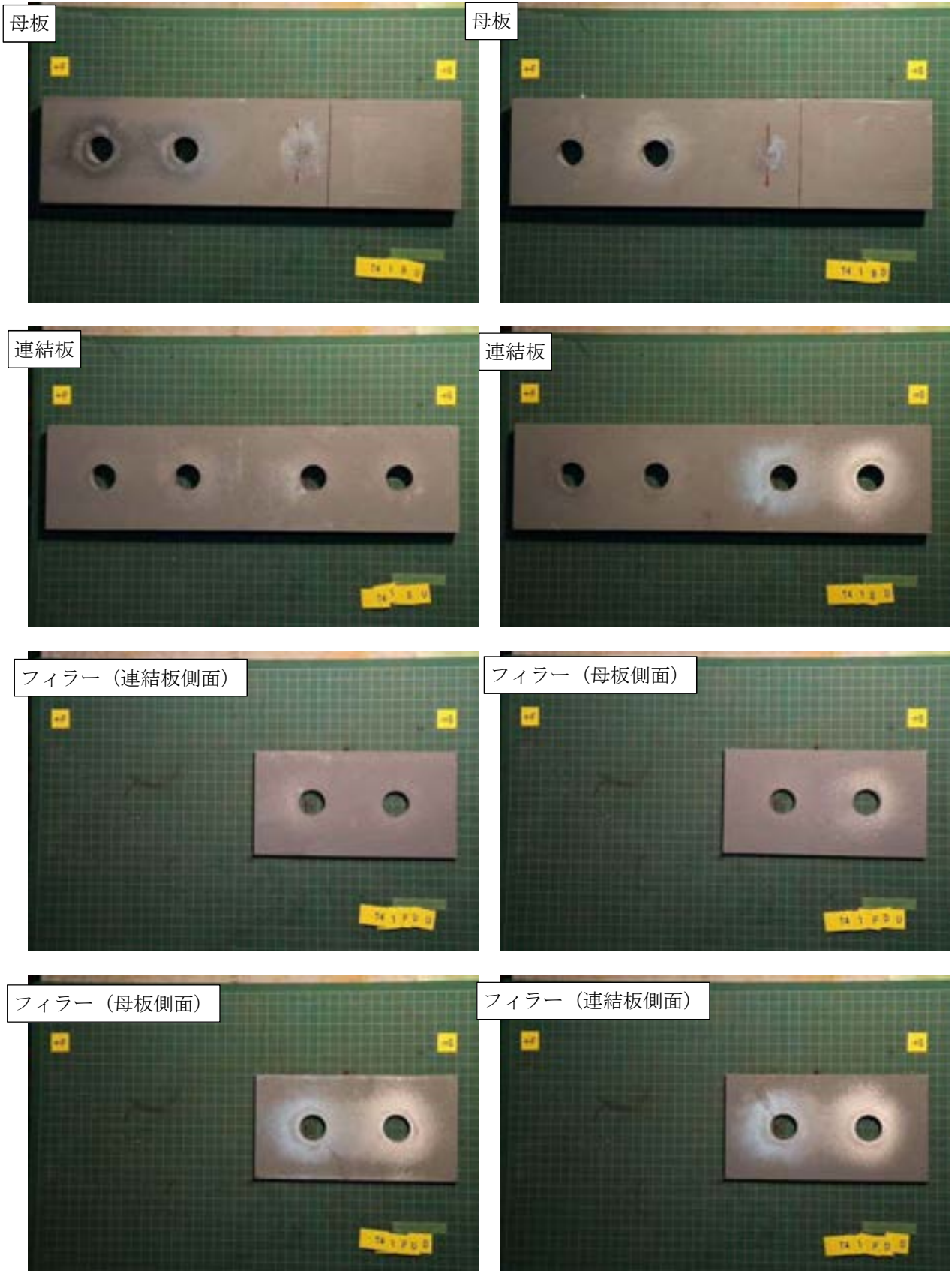
フィラー (連結板側面)



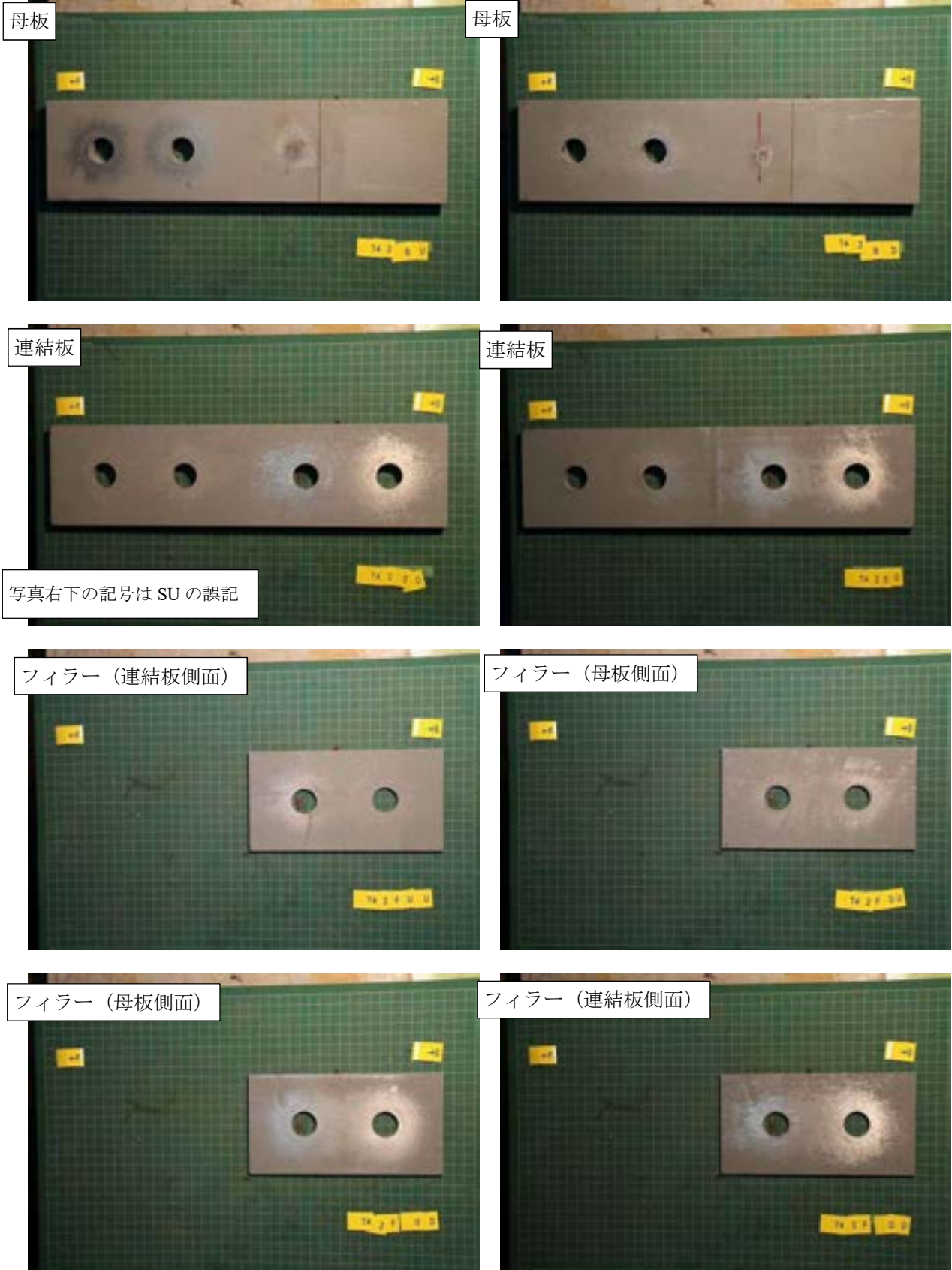
フィラー (母板側面)



付図 1-3-12 試験体 P3-20-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-13 試験体 P4-15-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 1-3-14 試験体 P4-15-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-15 試験体 P4-15-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-16 試験体 P4-20-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-17 試験体 P4-20-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



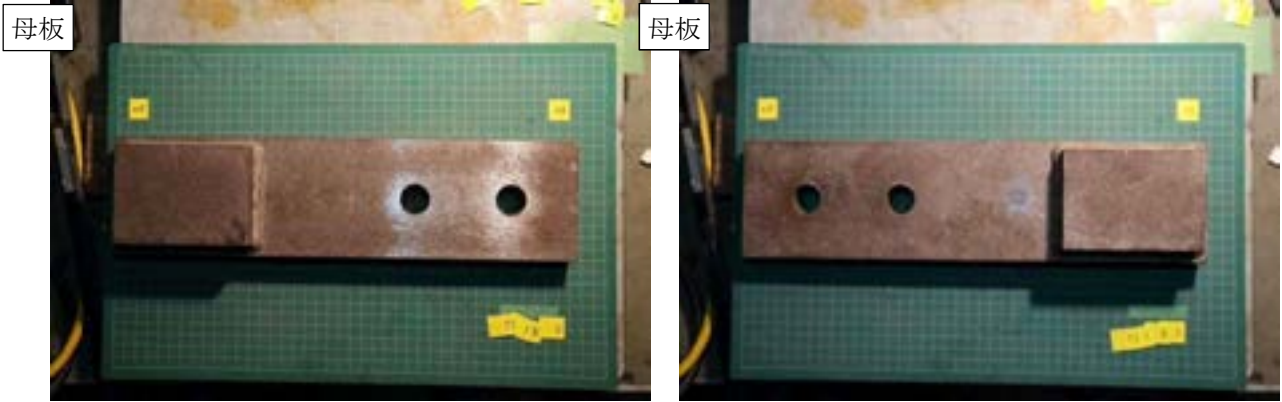
フィラー (母板側面)



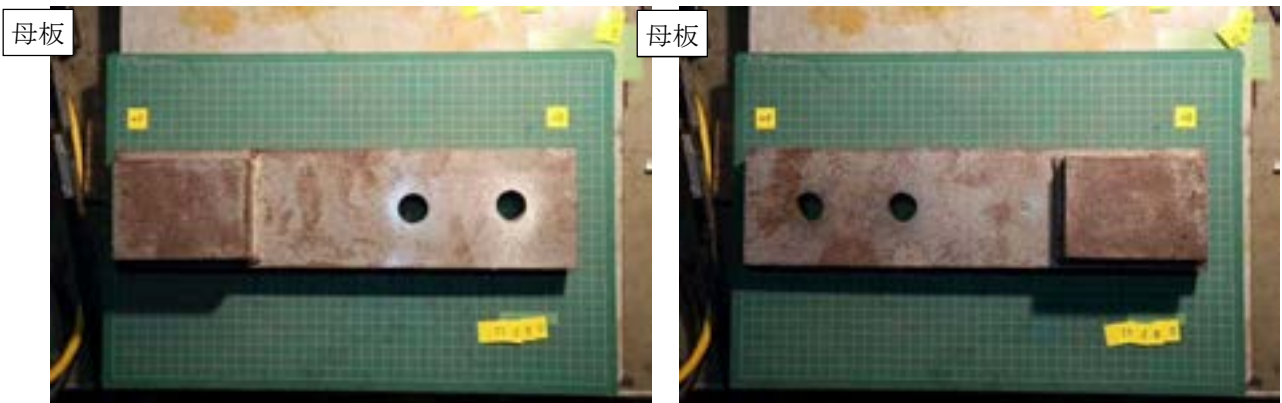
フィラー (連結板側面)



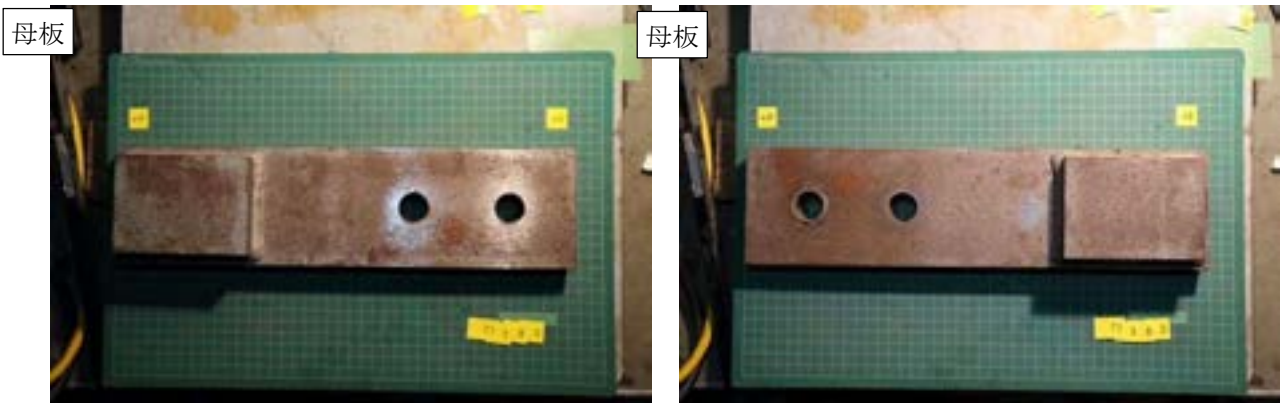
付図 1-3-18 試験体 P4-20-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



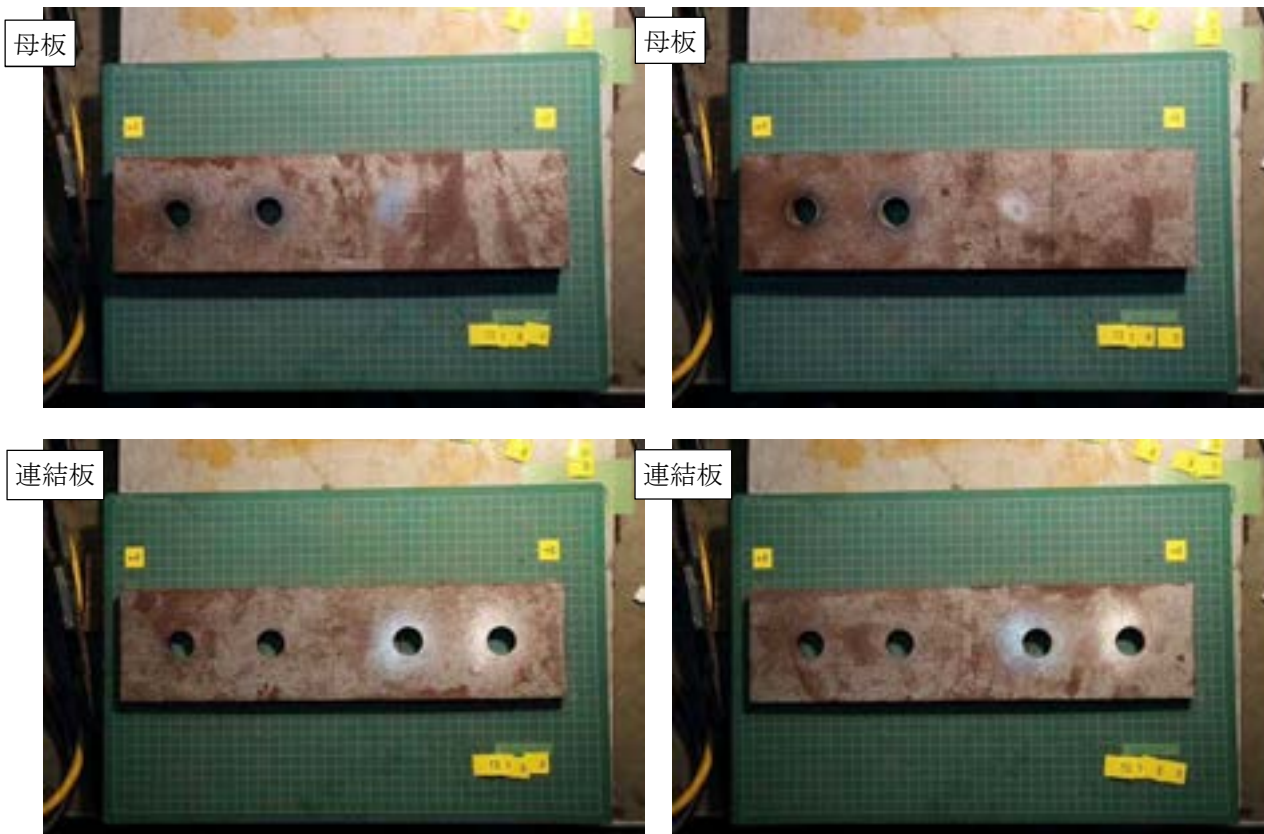
付図 1-3-19 試験体 B1-10-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



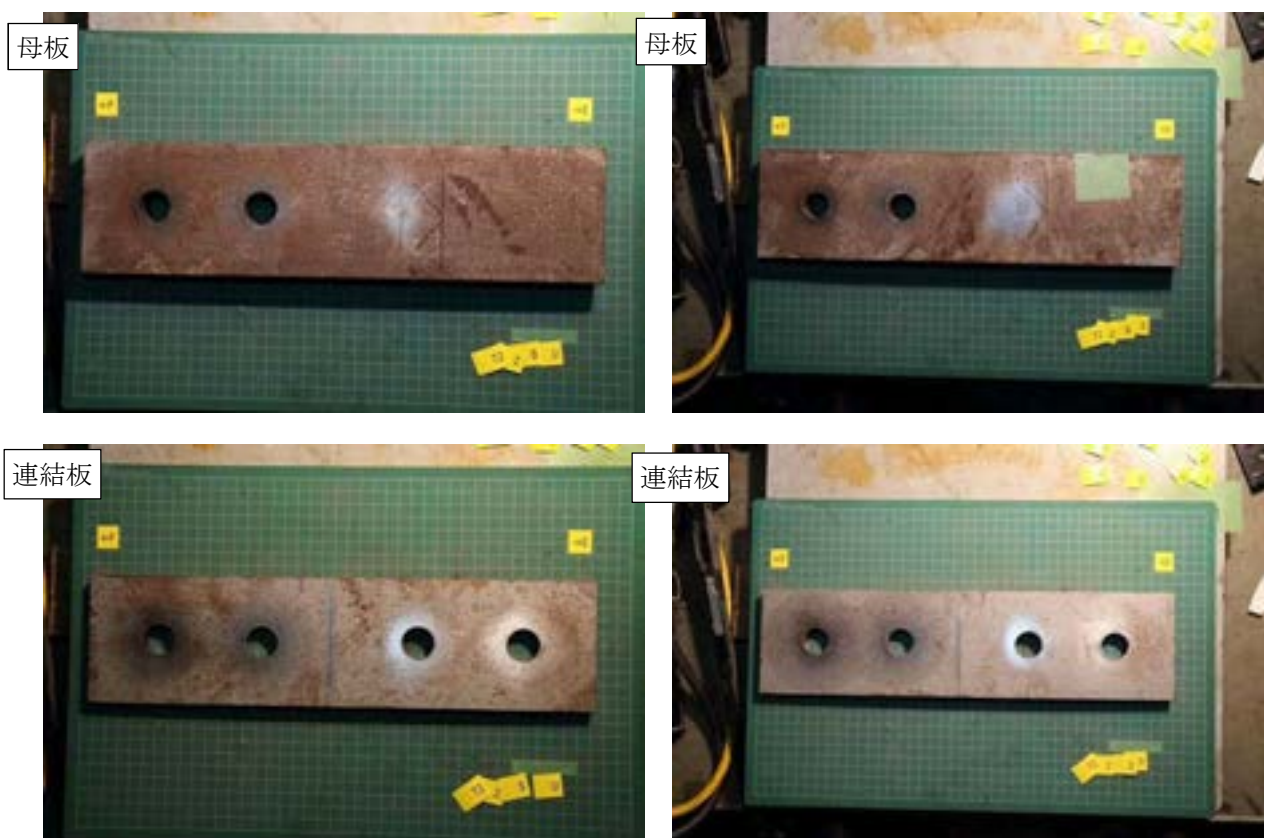
付図 1-3-20 試験体 B1-10-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



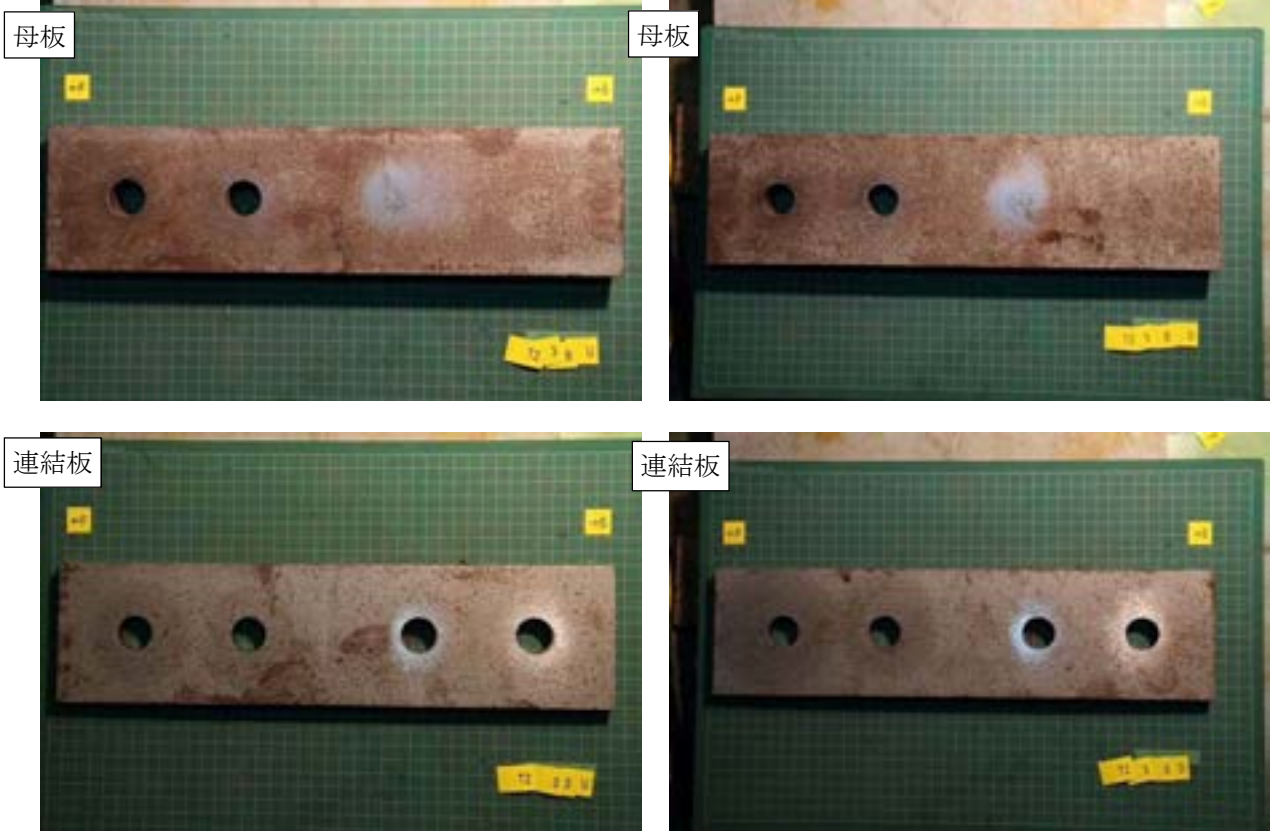
付図 1-3-21 試験体 B1-10-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



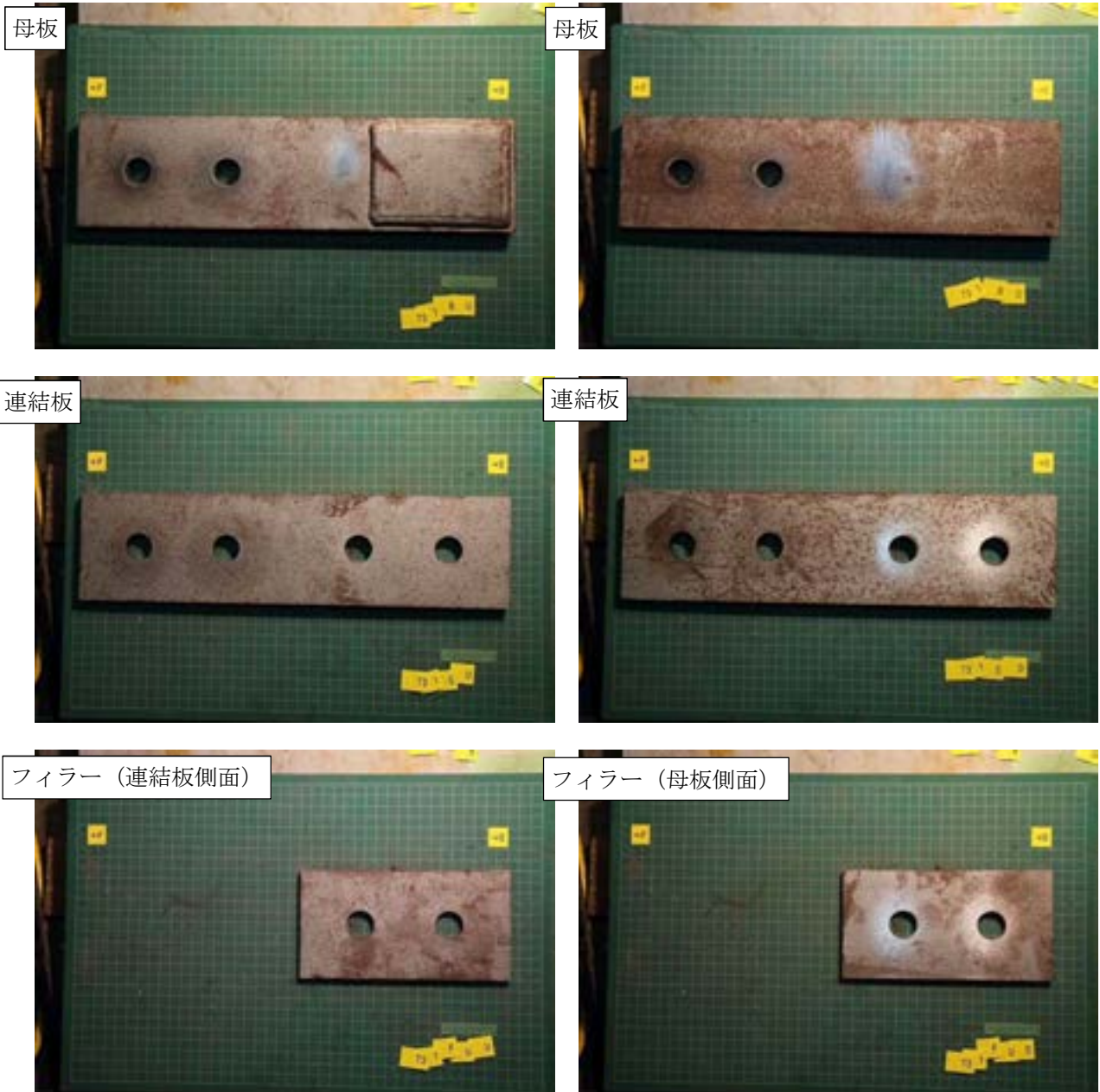
付図 1-3-22 試験体 B2-10-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



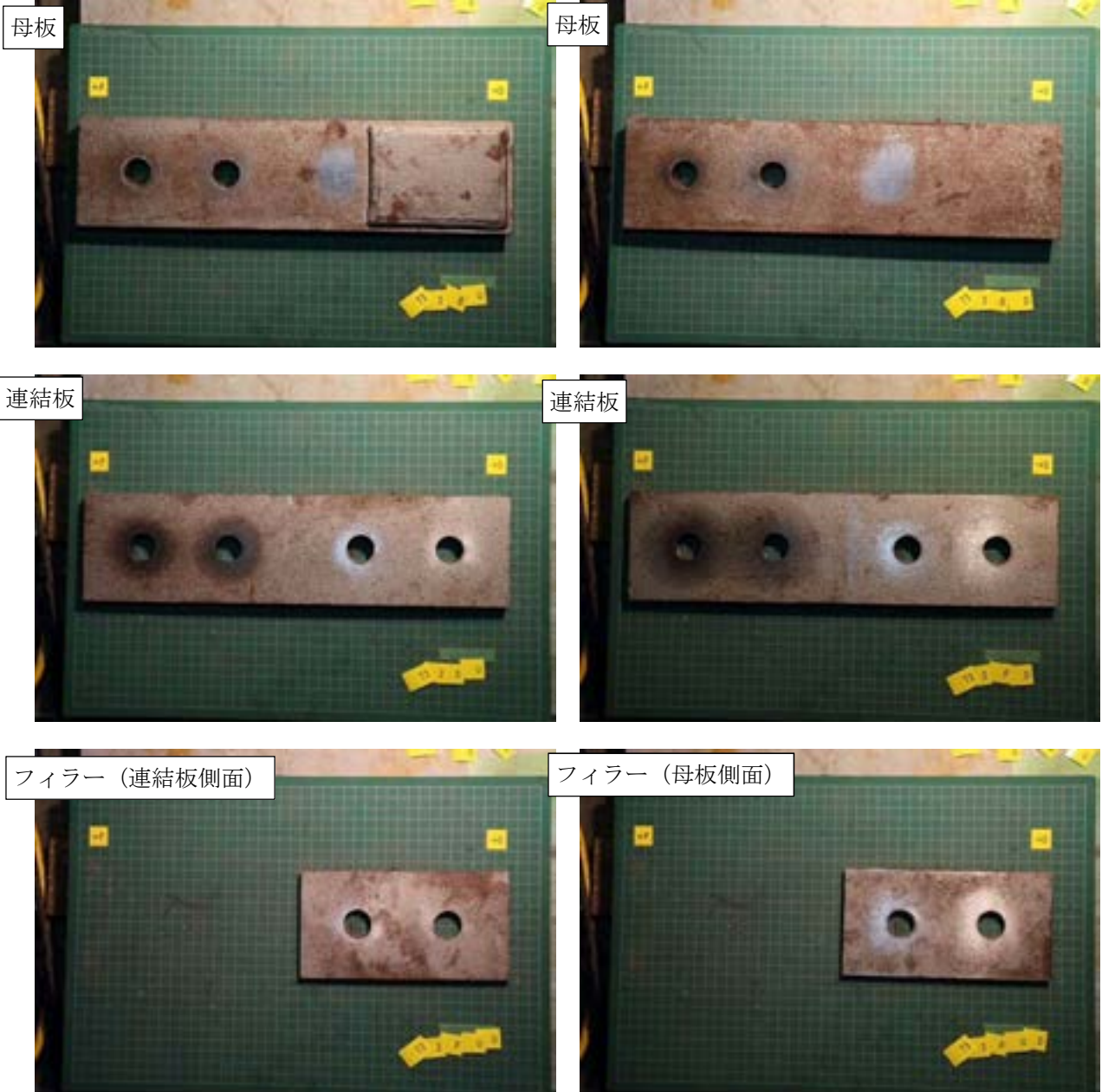
付図 1-3-23 試験体 B2-10-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



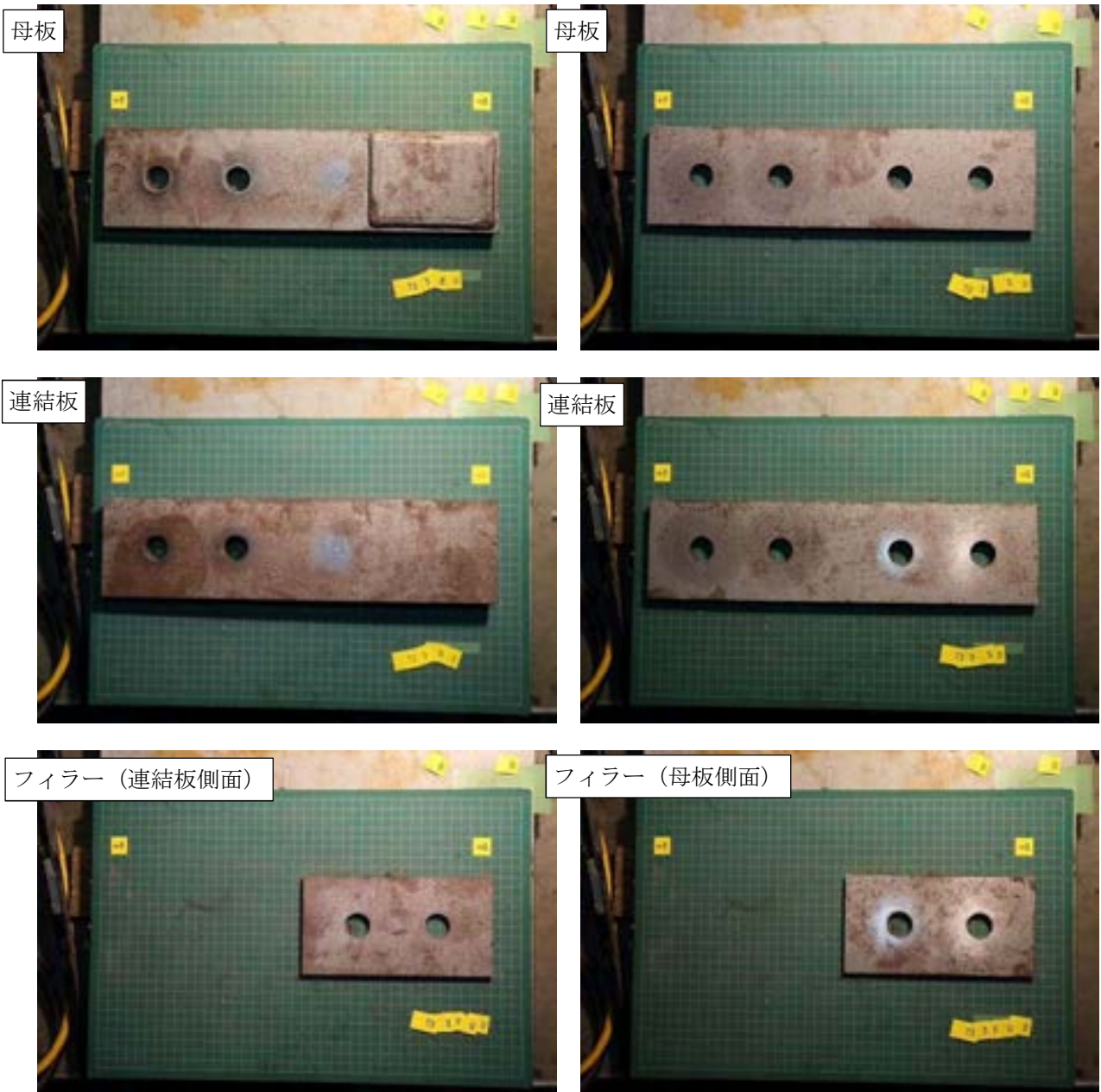
付図 1-3-24 試験体 B2-10-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



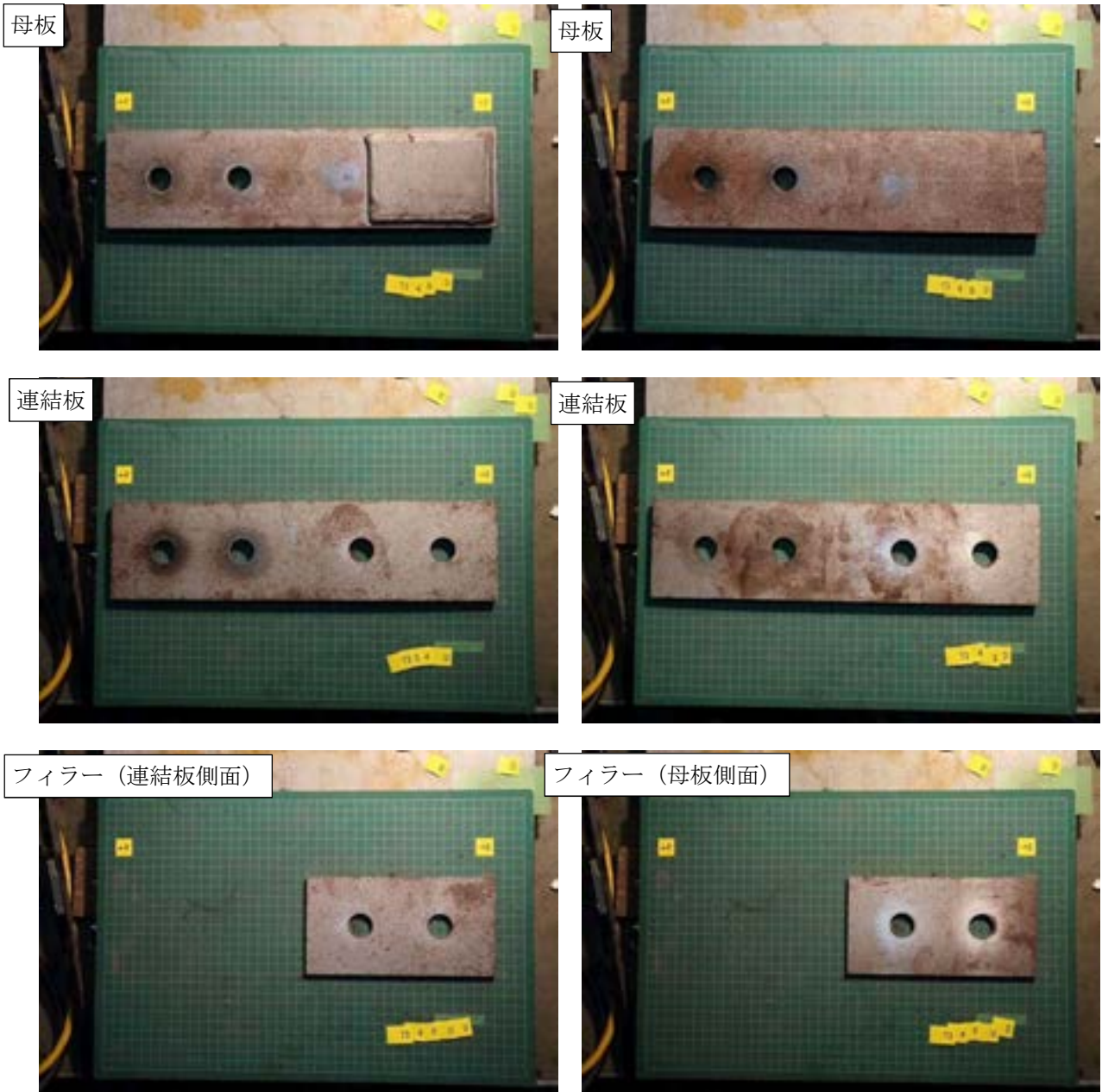
付図 1-3-25 試験体 B3-10-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



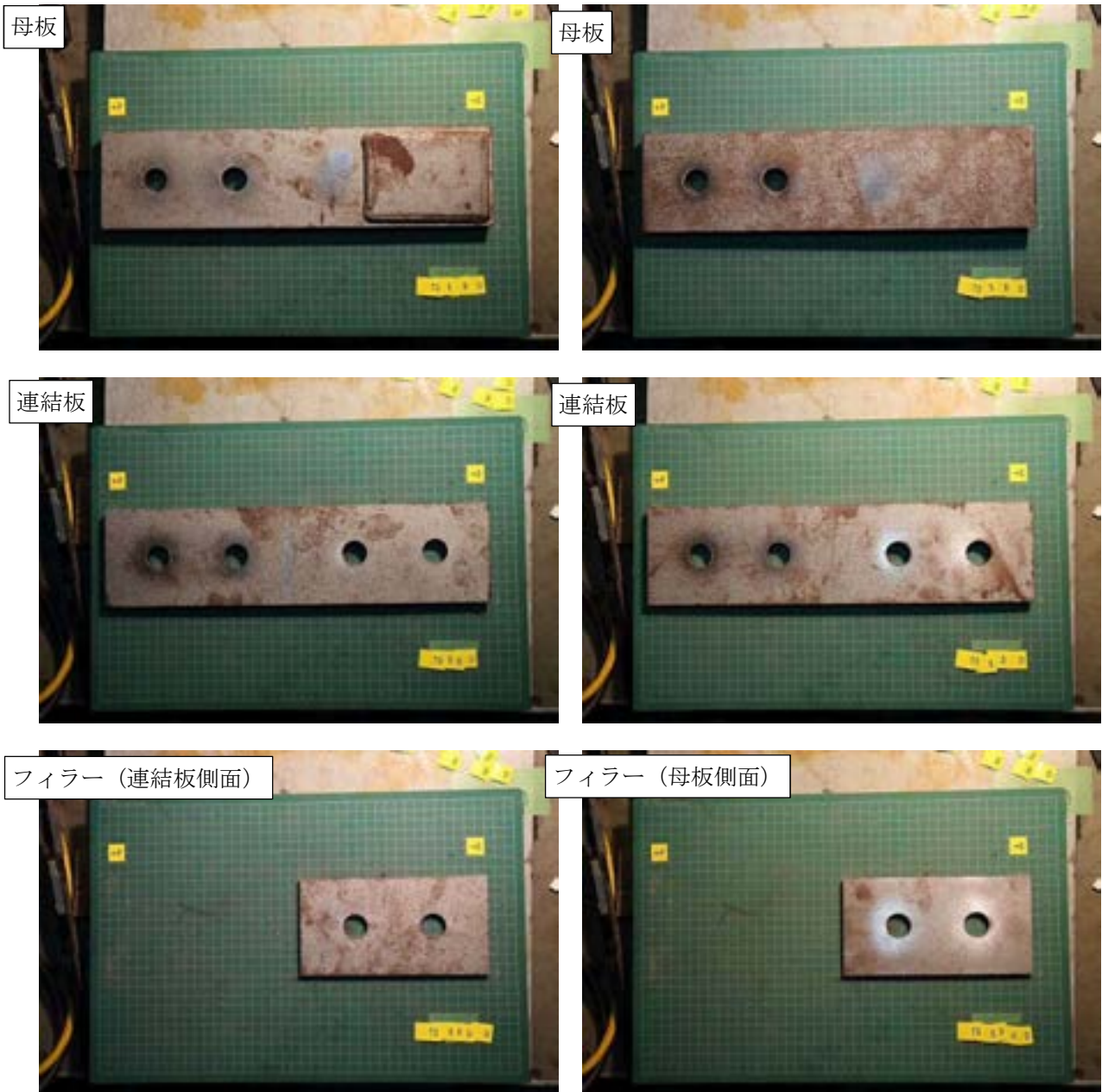
付図 1-3-26 試験体 B3-10-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



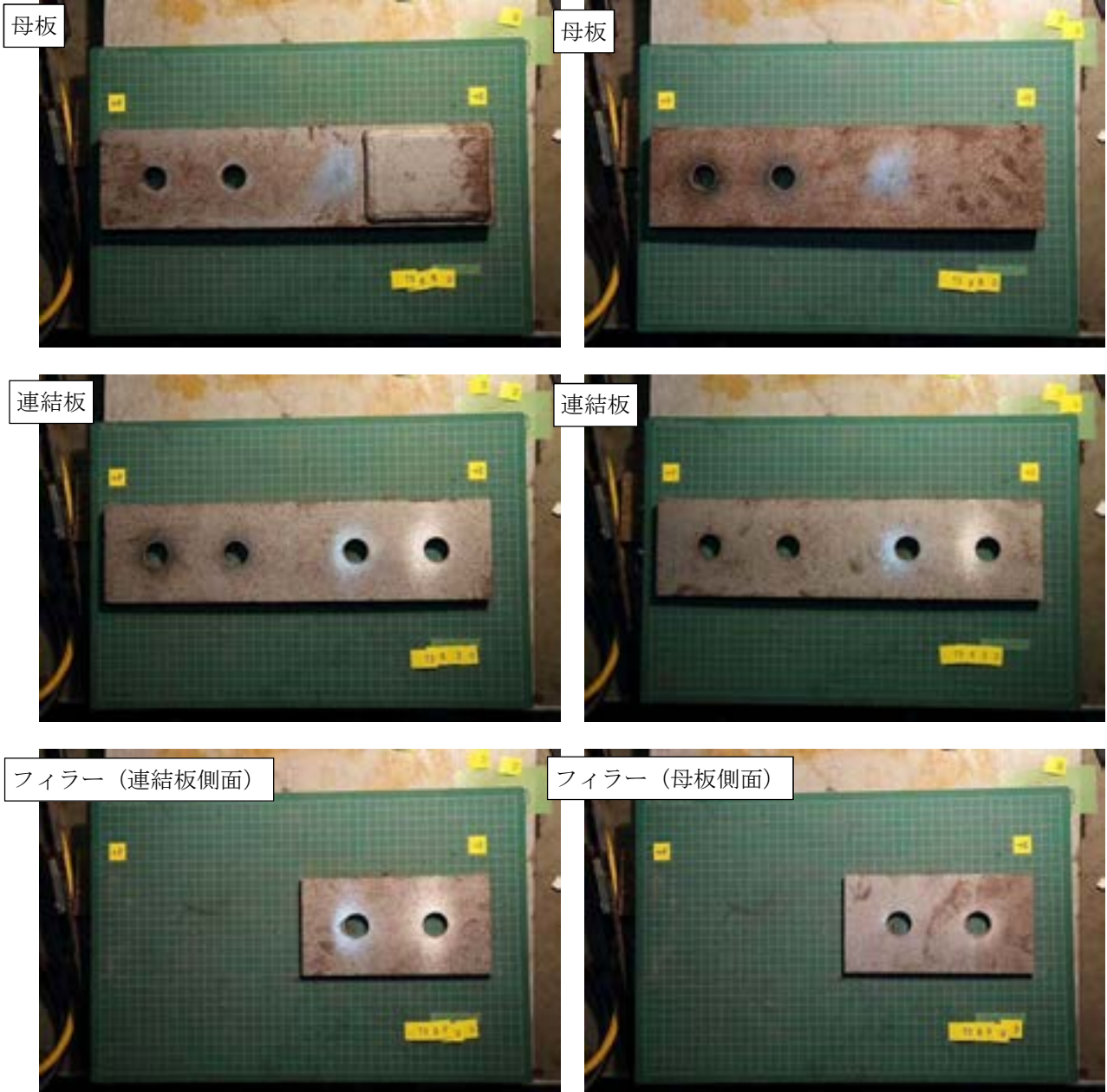
付図 1-3-27 試験体 B3-10-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 1-3-28 試験体 B3-15-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 1-3-29 試験体 B3-15-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 1-3-30 試験体 B3-15-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



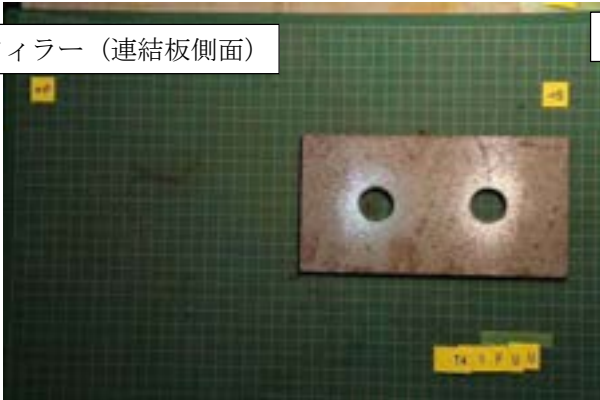
連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



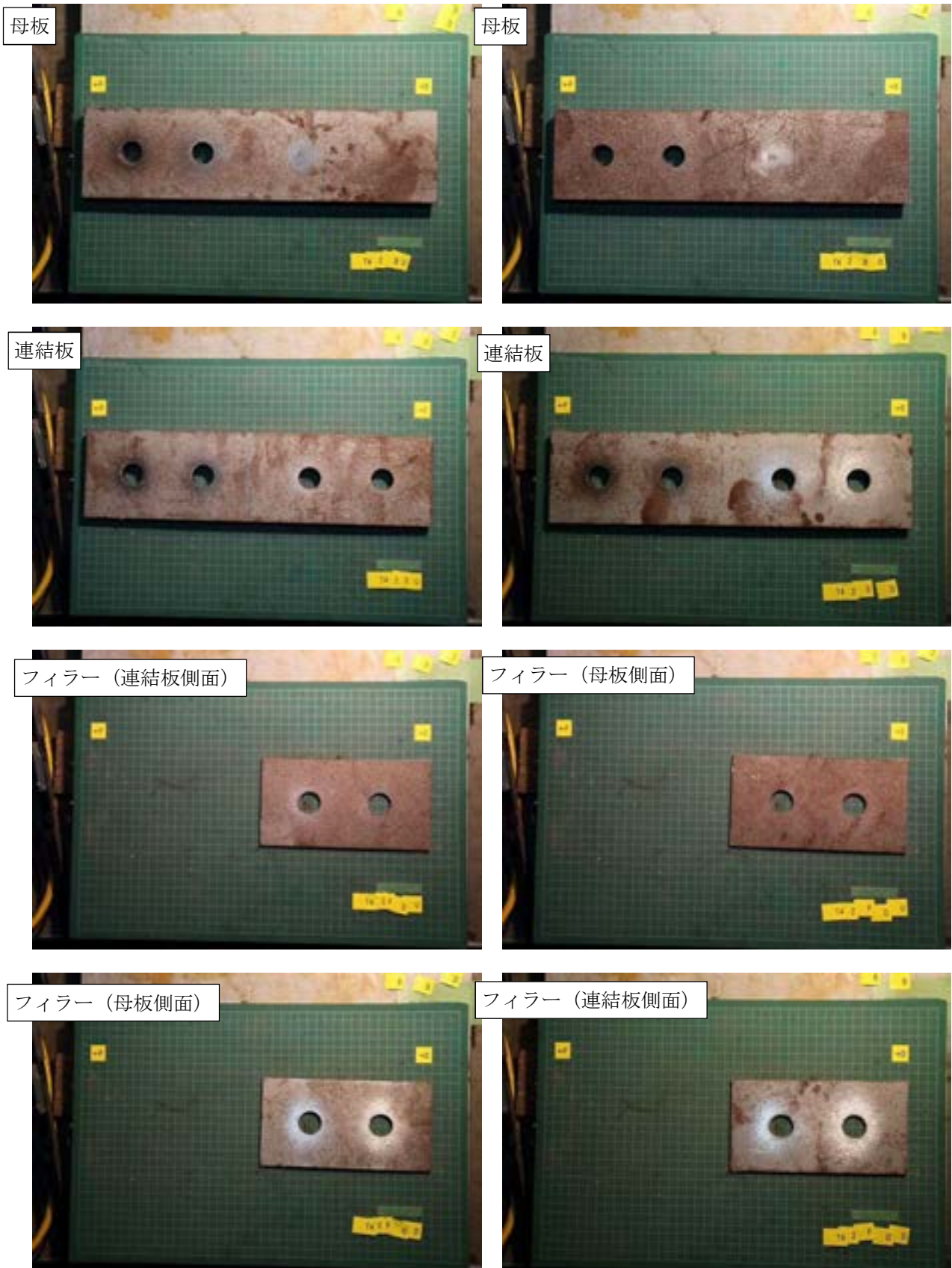
フィラー (母板側面)



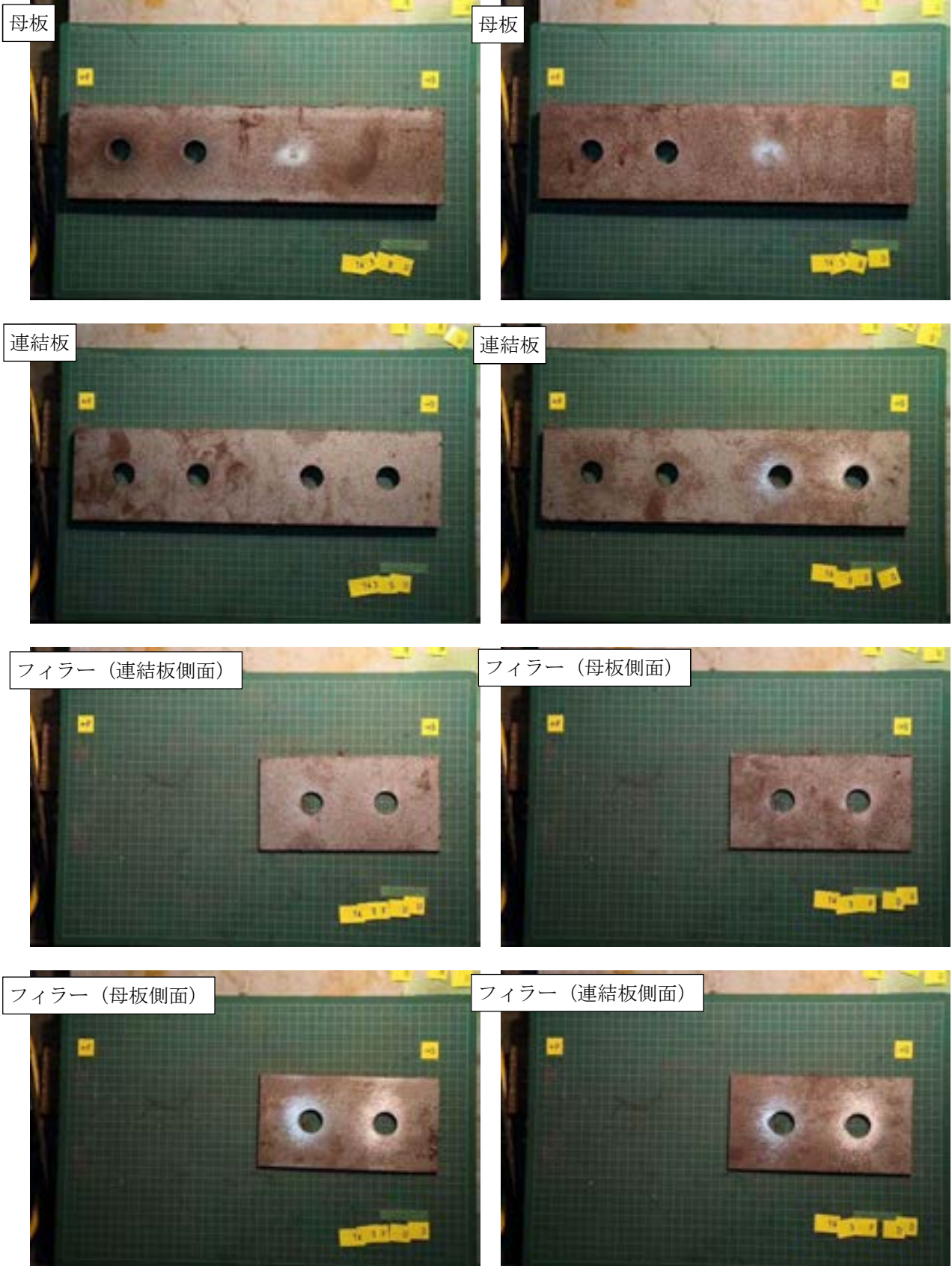
フィラー (連結板側面)



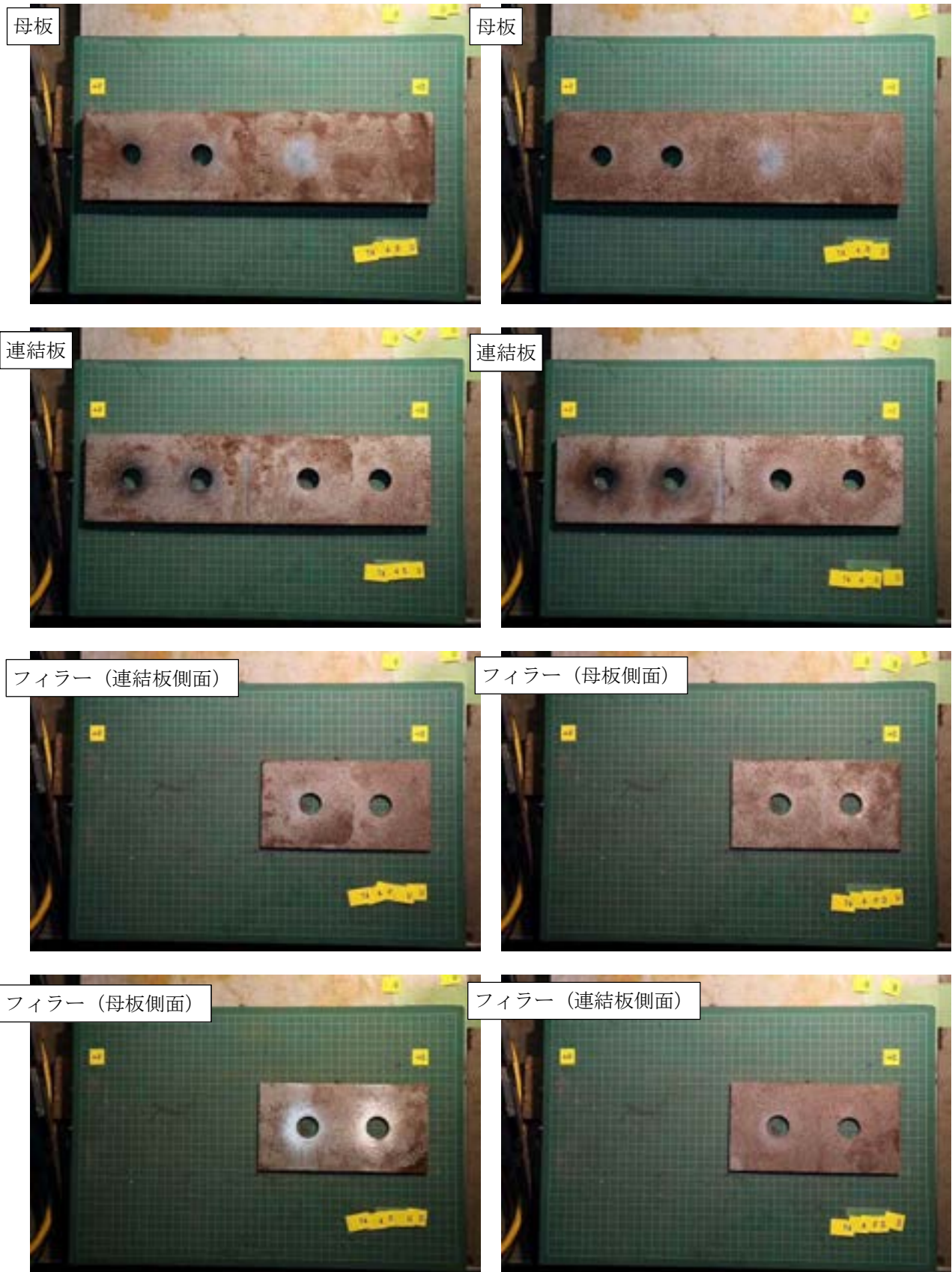
付図 1-3-31 試験体 B4-10-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



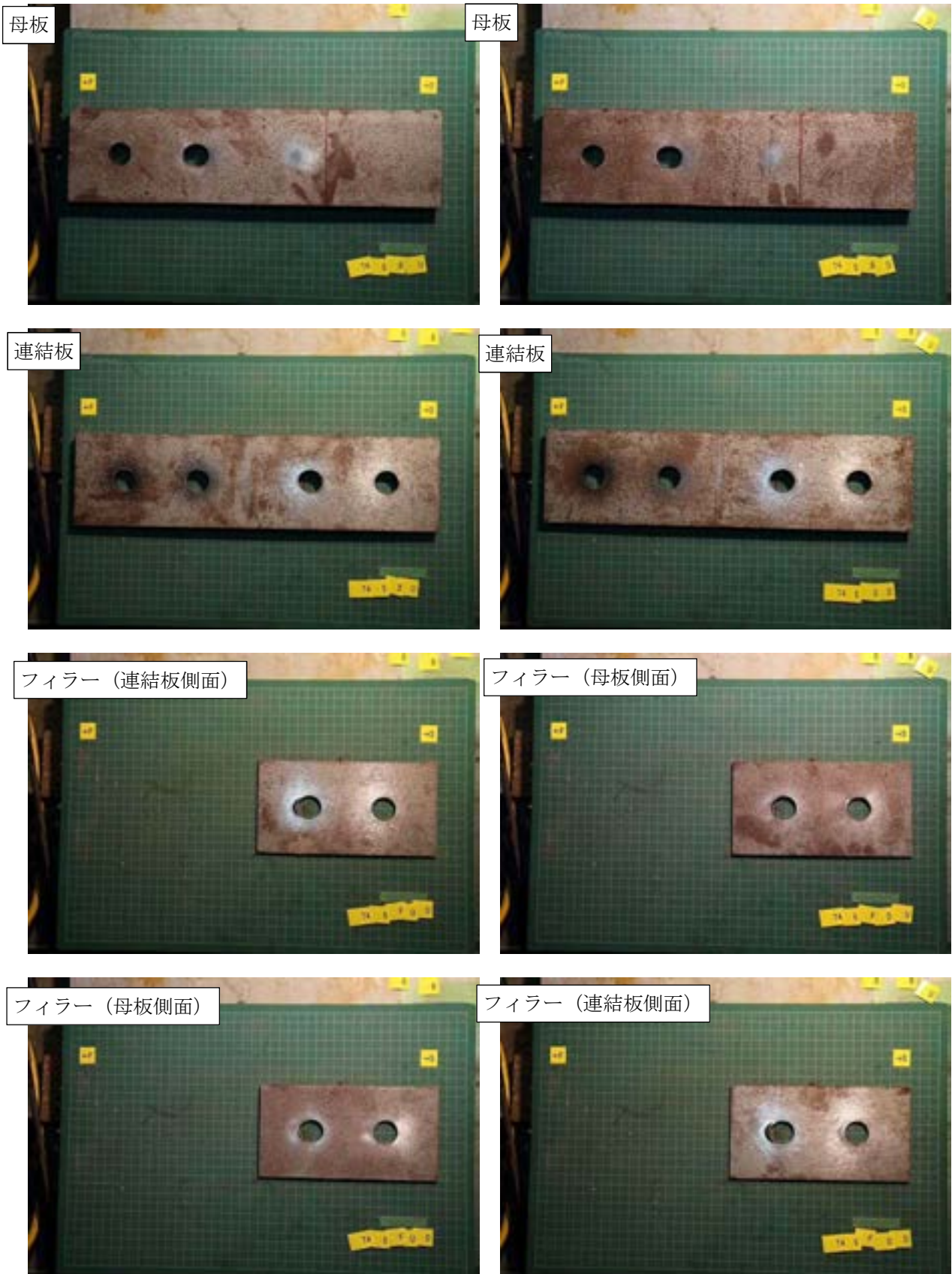
付図 1-3-32 試験体 B4-10-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



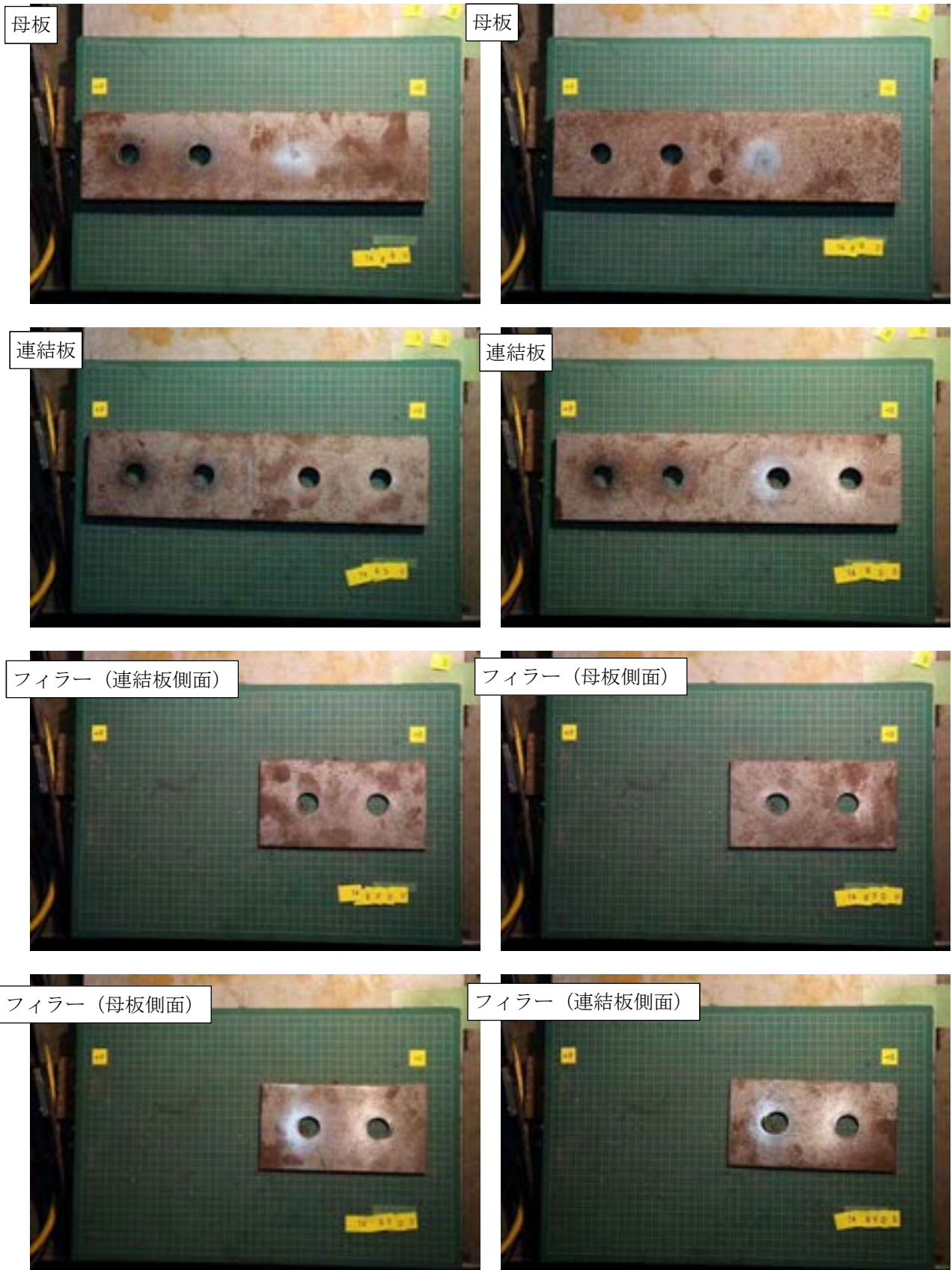
付図 1-3-33 試験体 B4-10-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-34 試験体 B4-15-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-35 試験体 B4-15-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 1-3-36 試験体 B4-15-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 1-3-37 試験体 PA2-15-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-38 試験体 PA2-15-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



付図 1-3-39 試験体 PA2-15-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)

付図 1-3-40 試験体 PA3-15-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-41 試験体 PA3-15-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



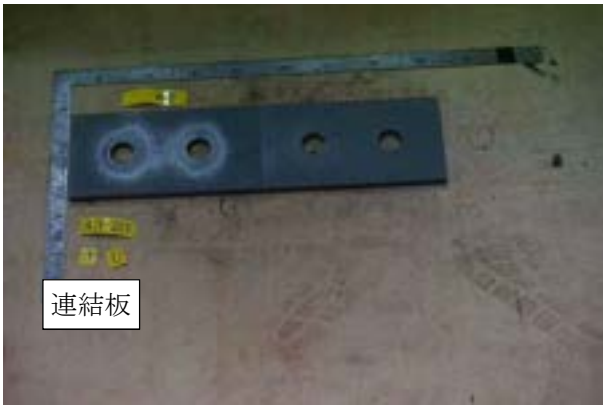
付図 1-3-42 試験体 PA3-15-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 1-3-43 試験体 PA4-20-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-44 試験体 PA4-20-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



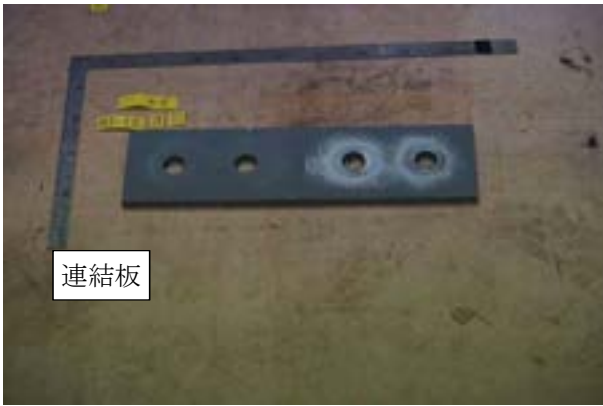
付図 1-3-45 試験体 PA4-20-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-46 試験体 PB2-15-1 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-47 試験体 PB2-15-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 1-3-48 試験体 PB2-15-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 1-3-49 試験体 PB3-15-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー（連結板側面）



フィラー（母板側面）



付図 1-3-50 試験体 PB3-15-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



付図 1-3-51 試験体 PB3-15-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-52 試験体 PB4-20-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-53 試験体 PB4-20-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



フィラー (連結板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (母板側面)



フィラー (連結板側面)



付図 1-3-54 試験体 PB4-20-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)

2. 異種接合面継手に関する先行研究と採用実績の調査

2-1 はじめに

高力ボルト摩擦接合継手においては、継手ごとに統一された接触面仕様とすることが原則となっている。しかしながら、異種接合面継手を採用することで、以下に示すように施工性の向上が期待出来る可能性がある。

- ・ 鋼箱桁では母板表面で異なる接触面仕様とすることで施工性の向上が期待できる。
- ・ 母板と連結板で接触面仕様が異なる異種接合面継手が適用できれば、橋りょうの補修工事等において連結板（工場製作）と異なる現場施工性の高い仕様を既存の母板接裏面で塗装の仕様が異なる場合があり、継手部においても表裏触面に採用することができる。

異種接合面継手に関する研究は今なお不足しているもののその適用性に関して複数の報告がなされている。また、適用が実際に検討されたり採用に至ったりした例も少なからずあるものと考えられる。そこで、その適用性に関する先行研究と採用実績の調査を行った。本章では、まず異種接合面継手の定義と分類を行ったうえで、その結果について報告する。

2-2 異種接合面継手の定義と分類

ひとつの高力ボルト継手において複数の接触面仕様を適用した継手は異種接合面継手と呼ばれている。本報告ではさらに、異種接合面継手を以下の2種類の継手に分類する。

- ① タイプ A：母板の表面と裏面で接触面仕様が異なる異種接合面継手

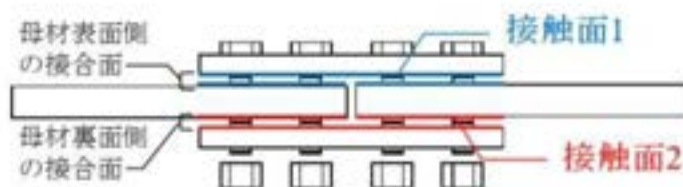


図 2-2-1 タイプ A の接触面仕様

- ② タイプ B：母板と連結板で接触面仕様が異なる異種接合面継手

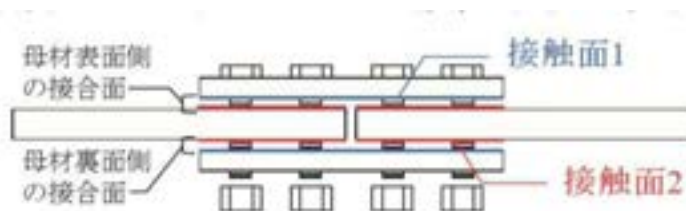


図 2-2-2 タイプ B の接触面仕様

2-3 異種接合面継手に関する文献調査

2-3-1 文献調査の方法

① 調査対象

以下に示す土木・建築分野の構造系論文集を中心に文献収集・読み込みを行った。

- 土木学会論文集 (1944～2017)
- 同年講 講演概要集 (1937～2017)
- 同 構造工学論文集 (2008～2017)
- 日本鋼構造協会 鋼構造論文集 (1994～2018)
- 同 鋼構造年次論文集・報告集 (1993～2017)
- 建築分野の構造系論文集

② 文献内容の取りまとめ

収集した文献の内容について、以下の内容について抜き出し表に取りまとめた。

- 試験体形状
- 試験体区分
- すべり/降伏耐力比
- 接触面処理 (仕様)
- すべり係数

2-3-2 文献調査の結果

確認した 29 件の文献のうち 25 件を収集した。(一覧表を表 2-3-1 に示す。)

その内、タイプ A を対象とした文献が 7 件、タイプ B を対象とした文献が 17 件であり、後者の試験体による報告が多い。

また、接触面処理方法については、各文献で多種多様の仕様にて報告されている。

なお、収集した文献において報告されているすべり係数の試験値については、章末の付録 1 にとりまとめた。

表 2-3-1 異種接合面継手に関する先行研究の収集文献リスト

異種接合面継手に関する先行研究の文献収集リスト

タイトル	掲載誌	試験体形状	摩擦面処理(仕様)
1 亜鉛アルミ合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究	土木学会論文集A1 Vol.68, 2012 P.427-439	タイプA	表面:無機ジंक 裏面:亜鉛アルミ溶射
2 亜鉛アルミ合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手の導入軸力確認試験	土木学会論文集A1 Vol.69, 2013 P.133-138	タイプA	表面:無機ジंक 裏面:亜鉛アルミ溶射
3 接合面が鋼材粗面と無機ジंकリッチペイント面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の提案	土木学会論文集A1 Vol.70, 2014 P.137-149	タイプB	母板:ディスクサンダー, プラスト処理 連結板:無機ジंक
4 片面に金属溶射を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数とすべりメカニズムに関する実験的研究	構造工学論文集Vol.61A, 2015.03 P.597-604	タイプB	母板:無機ジंक, プリストルプラスト 連結板:亜鉛アルミ溶射
5 無機ジंकリッチペイント面とそれと異なる接合面処理がなされた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験	構造工学論文集Vol.58A, 2012.03 P.803-813	タイプB	母板:2種ケレン, グリッドプラスト 有機ジंक, プリストルプラスト 連結板:無機ジंक
6 経年無塗装耐候性鋼材を用いた異種接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に関する実験的研究	構造工学論文集Vol.60A, 2014.03 P.632-641	タイプB	母板:保護性さび, 2種ケレン, 3種ケレン, グリッドプラスト 連結板:グリッドプラスト, 無機ジंक, アルミ亜鉛溶射
7 摩擦面の状態が高力ボルト継手のすべり耐力に及ぼす影響	第59回年次学術講演会 2004.09 P.1171-1172,	タイプB	母板:有機ジंक 連結板:無機ジंक
8 異種接合面処理を有する摩擦接合継手のすべり耐力試験	第66回年次学術講演会, 2011 P.491-492	タイプB	母板:1種ケレン, 2種ケレン, 有機ジंक, プリストルプラスター 連結板:無機ジंक
9 仕様の異なる摩擦接合面の継手性能に関する試験報告	第67回年次学術講演会 2012.09 P.679-680	タイプA	表面:無機ジंक 裏面:無塗装
10 高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)	鋼構造論文集 9(36), 2002.12 P.19-28	タイプB	母板:ショットプラスト, 錆止めペイント, ショットプラスト, 赤錆, 仕上げペイント 連結板:平行波形加工
11 経年無塗装耐候性鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験	鋼構造論文集 16(63), 2009.09 P.37-48	タイプB	母板:プラスト, グライnder, 無処理 連結板:プラスト, 無処理
12 添板摩擦面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩擦接合部のボルト配置とすべり係数に関する研究	鋼構造論文集 24(93), 2017.03 P.55-63	タイプB	母板:プラスト 連結板:アルミ溶射
13 連結板接合面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数およびリラクゼーション特性に関する実験的研究	鋼構造論文集 24(96), 2017.12 P.81-90	タイプB	母板:プラスト, 無機ジंक 連結板:アルミ溶射
14 薬剤処理を施した高力ボルト摩擦接合の摩擦面に関する基礎的研究	鋼構造年次論文報告集,第1巻, 1993.07 P.7-14	タイプB	母板:グライnder, 黒皮剥離剤, 錆発錆促進剤 連結板:グリッドプラスト, 錆発錆促進剤
		タイプA	表面:グライnder, 黒皮剥離剤, 錆発錆促進剤 裏面:グライnder, 黒皮剥離剤, 錆発錆促進剤
15 摩擦接合接触面のプライマー除去方法の検討	鋼構造年次論文報告集,第2巻, 1994.11 P.651-658	タイプB	母板:エッチングプライマー, ショットプラスト, グリッドプラスト, グライnder 連結板:エッチングプライマー, ショットプラスト
16 フィラーを有する高力ボルト一面摩擦接合継手のすべり耐力	鋼構造年次論文報告集,第14巻, 2006.11 P.639-646	タイプB	母板:無機ジंक 連結板:亜鉛メッキ(リン酸塩処理)
17 亜鉛めっきHTB及び接合面を暴露後に組立てた継手のすべり耐力	鋼構造年次論文報告集,第19巻, 2011.11 P.289-294	タイプB	母板:無機ジंक 連結板:亜鉛メッキ(リン酸塩処理)
19 追加孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力実験	鋼構造年次論文報告集,第24巻, 2016.11 P.37-44	タイプA	表面:金属溶射(Al,Mg合金) 裏面:無機ジंक
21 高力ボルト摩擦接合部発錆処理面に及ぼす諸変数の影響	日本建築学会近畿支部研究報告集 2013 P.457-460	-	母板:グライnder, 自然発錆 連結板:グライnder, 自然発錆
22 表面処理・締付け施工法を変数とした高力ボルト摩擦接合部のすべり実験:その1 実験概要と締付け施工法による影響	日本建築学会学術講演梗概集, C-1 2010.09 P.655-656	タイプA	表面:ショットプラスト+自然錆, グライnder+自然錆 ショットプラスト+薬品錆 裏面:ショットプラスト
23 表面処理・締付け施工法を変数とした高力ボルト摩擦接合部のすべり実験:その2 表面処理による影響	日本建築学会学術講演梗概集, C-1 2010.09 P.657-658	-	-
24 硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究	日本建築学会構造系論文集,第494号, 1997.04 P.123-128	タイプA	表面:プラスト処理 裏面:波形突起
27 異種接合面処理における摩擦接合継手のすべり耐力試験	日本道路会議論文集(CD-ROM), 第29巻	タイプB	母板:グリッドプラスト, 有機ジंक(2種ケレン), 1種ケレン, プリストルプラスト 連結板:無機ジंक(1種ケレン)
28 高力ボルト摩擦接合継手への改良した錆促進剤の適用に関する検討	駒井ハルテック技報, Vol. 7, 2017 P.45-52	タイプB	母板:薬品錆 連結板:無機ジंक, 自然錆
29 非めっき構造物とめっき構造物境界部における溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合すべり耐力に関する実験	日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工 2013.08 P.1187-1188	タイプB	母板:亜鉛メッキ(リン酸塩処理), ジंकリッチスプレー塗装 連結板:亜鉛メッキ+グリッドプラスト

試験体形状: タイプA: 母板の表面と裏面で接触面仕様が異なる異種接合面継手
タイプB: 母板と連結板で接触面仕様が異なる異種接合面継手

2-4 異種接合面継手に関する施工の実績調査

2-4-1 実績調査の方法

当部会の鋼橋製作会社 6 社（駒井ハルテック、巴コーポレーション、日本ファブテック、三井E&S 鉄構エンジニアリング、宮地エンジニアリング、横河ブリッジ）を対象にタイプ A およびタイプ B の施工採用実績に関する調査を行った。なお調査対象期間は過去 10 年程度である。

2-4-2 実績調査の結果

タイプ A に関して表 2-4-1 に示す通りの結果が得られた。道路橋では外面を無塗装仕様としたタイプ A の継手の採用が複数確認された。鉄道橋では、無機ジンクと有機ジンクを組合わせた事例があった。これは、将来の継ぎ足しを想定し内面を無機ジンクとしていた箱断面橋脚の端部を実際に継ぎ足すにあたって、橋脚外面を現場施工で有機ジンク（高摩擦型）とし、内外それぞれで母板に対応する接触面の連結板を使用した継手であった。

また、調査の結果、耐候性鋼を用いた箱桁における接触面仕様の使い分けが発注者の意向で見送られた事例があったことも判明した。タイプ A の採用にあたっては、過去の採用事例やすべり耐力試験結果も参照しつつ、発注者と慎重な協議を行うことが求められている。

タイプ B に関して表 2-4-2 に示す通りの結果が得られた。道路橋では、無機ジンク塗布された連結板に相対する母板の接触面仕様として、ブラスト、動力工具、有機ジンク、赤さび、金属溶射といった様々な処理の実績が確認された。ここで動力工具とは、グラインダー等の一般的な回転式工具によって仕上げた接触面とブリストルブラスター等の縦回転式工具によって仕上げた接触面の双方を指す。図 2-4-1 に回転式工具と縦回転式工具の写真を示す。動力工具については最多の 3 社で実績があり、現場施工に適した動力工具がタイプ B の継手で多用されている状況がうかがえる。金属溶射と無機ジンクの組合せは、鉸桁橋梁の新設工事におけるものであり、無機ジンク仕様の連結板に対し、母板の接触面仕様を一般部に合わせて金属溶射とした事例であった。鉄道橋では、無機ジンクを塗布した連結板に、母板にはブラスト、動力工具、有機ジンクを含むタイプ B の実績が確認された。動力工具については 2 社で施工実績が確認された。以上のように、道路橋および鉄道橋ともに、補修・補強工事での連結板は、無機ジンク以外の接触面を適用した実績はなかった。

なお、道路橋においては、既設橋脚への横梁の追加工事に際して、赤さび（自然さび）の母板に対し連結板を無機ジンクとすることが検討されたが、最終的には実績不足から先行工区に合わせて連結板も赤さびとしタイプ B の適用を見送った事例があったこともわかった。

表 2-4-1 異種接合面継手タイプ A の施工実績

	ブラストと 無機ジンク	赤さびと 無機ジンク	有機ジンクと 無機ジンク	金属溶射と 無機ジンク
道路橋	1社	2社	0社	2社
鉄道橋	0社	0社	1社	1社

表 2-4-2 異種接合面継手タイプ B の施工実績

	ブラストと 無機ジンク	赤さびと 無機ジンク	有機ジンクと 無機ジンク	金属溶射と 無機ジンク	動力工具と 無機ジンク
道路橋	2社	2社	1社	1社	3社
鉄道橋	1社	0社	1社	0社	2社



図 2-4-1 動力工具の写真（左：回転式工具、右：縦回転式工具）

2-4-3 各接触面の現場施工に関する調査の方法

異種接合面継手の適用性の検討にあたり、当部会では各接触面の現場施工時の施工性を調査、整理した。当部会の鋼橋製作会社、三井E & S鉄構エンジニアリングの工場製作技術者および現場架設技術者を対象に各接触面の作業性能に関するアンケートを実施した。評価項目は作業性と環境性に大別し、作業性は、作業速さ(面積/時間)と必要な設備、環境性は、騒音と粉塵等の飛散に分けた。

2-4-4 各接触面の現場施工に関する調査の結果

表 2-4-3 に示すように、8種類の接触面に関して、現場施工時の作業性能を整理した。評価対象の接触面は、素地系として(a) ブラスト(素地調整程度 1種, ISO Sa2 1/2 相当¹⁾)、(b) 動力工具(素地調整程度 2種, ISO St3 相当)とした。被覆系としては、(c) 無機ジンク、(d) 有機ジンク、(e) 赤さび(自然さび)、(f) 赤さび(薬剤さび)、(g) 金属溶射を対象としている。それぞれ、次節で示す異種接合面の採用実績と今後の動向を考え選定した。被覆系では、下地処理として素地調整程度 1種または 2種がなされていることを評価の前提としつつも、素地系との区別のため下地処理後の工程を評価することとした。

まず、素地系の評価結果について述べる。(a) ブラスト(素地調整程度 1種)に関しては、継手耐力と作業速さにおいて優れており塗装系の下地処理も含め、継手耐力としては最もよい処理方法である。しかしながら、騒音と粉塵等の飛散がともに大きく、必要な設備も多く(通常は工場で施工)、また大型でもあり、現場作業としては最も課題が多い処理法であると考えられる。(b) 動力工具(素地調整程度 2種)については、環境性はやや改善され、設備が小型であり作業性もよく実績が多いが、継手耐力が低いのが現状である。縦回転式工具については、一般的な回転式工具より継手耐力は向上するものの、作業速さが劣るとの指摘もあった。以上のように、素地系は、継手耐力と現場作業性は、相反する結果になると考えられる。

表 2-4-3 各接触面の現場施工時の作業性能

接触面仕様		継手 耐力	作業性		環境性		備考
			作業速さ (面積/時間)	必要な 設備	騒音	粉塵等 の飛散	
素地系	(a)プラスト(素地調整程度1種)	○	○	×	×	×	ケレン後に養生が必要
	(b)動力工具(素地調整程度2種)	×	△	○	△	△	ケレン後に養生が必要
被覆系	(c)無機ジンク	○	△	×	○	△	素地調整程度1種含む, スプレー塗り
	(d)有機ジンク	×	△	△	○	△	素地調整2種含む, スプレー塗り, 高摩擦型でない一般塗料
	(e)赤さび(自然さび)	○	×	○	○	○	素地調整程度2種含む, さび厚24 μ m以上
	(f)赤さび(薬品さび)	○	△	○	○	○	素地調整程度2種含む
	(g)金属溶射	○	△	×	△	△	素地調整程度1種含む, 封孔処理を行わない場合

評価記号の意味

- ・継手耐力
- ・必要な設備
- ・粉塵等の飛散

- ：高い, △：普通, ×：低い
- ：少ない, △：普通, ×：多い
- ：少ない, △：普通, ×：多い

- ・作業速さ
- ・騒音

- ：速さ, △：普通, ×：遅い
- ：小さい, △：普通, ×：大きい

つぎに、被覆系の評価結果を述べる。(c) 無機ジンクは継手耐力が高く、騒音も小さい点が評価されたが、必要な設備が多いとされた。また、下地処理は素地調整程度1種で行う必要があり、先に述べたように現場での作業性としての課題も多い。よって現場で採用されることは稀であると考えられる。(d) 有機ジンクは、高摩擦型ではない通常の有機ジンクリッチペイントを対象としたため継手耐力が低いと評価された。ただし、有機ジンクの下地処理は素地調整程度2種であり、無機ジンクより現場での作業性はよい。なお、高摩擦型の有機ジンクは現在使用頻度が低く、既設橋梁の補修・補強工事のように小ロットでは入手困難と判断し、高摩擦型でない有機ジンクで検討した。(e) 赤さび(自然さび)については、多くの項目で高く評価されたが、数か月にわたり発せいを待つ必要があることから作業速さが最も低いとせざるを得なかった。(f) 赤さび(薬品さび)は数日程度で発せいするため、多くの項目で高く評価されるとともに作業速さも普通と評価された。なお、薬品さびを用いたボルト継手は、建築分野では多くの実績はあるが、土木分野では実績がほとんどないのが現状である。(g) 金属溶射は、下地処理は素地調整程度1種であり、また、必要な設備が多く環境性も普通であり、作業性と環境性に関して高く評価された項目はなかった。ただし、封孔処理を行わない溶射面の継手耐力は高いと判断した。

2-5 まとめ

本章では、本報における異種接合面継手の定義を示し、タイプAとタイプBに分類した。そして、すべり耐力の観点から異種接合面継手の適用性について調査した既往の報告をまとめ、タイプBに関する実験的研究の報告が多いことなどを明らかにした。そして、異種接合面継手の採用実績について調査し、現場施工に適した動力工具がタイプBの継手で多用されていることなどを示した。また、各接触面の現場施工時の作業性能について工場製作技術者および現場架設技術者の意見を収集し、その長短を整理した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014. 3.

第2章 付録 先行研究で報告されている異種接合面継手の実験データ

論文題目	亜鉛アルミ鍍合金塗料を施した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究			
著者・所属	南 邦明(鉄道建設・運輸施設整備支援機構), 斉藤 豊丸, 横山 秀高, 杉本 一郎, 柴島 隆男, 増水 尚彦, 長崎 英二			
掲載誌、公開年	土木学会論文集A1 Vol.68, 2012			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプA		タイプA	
鋼種	SM490Y		SM490Y	
すべり/滑り耐力比				
摩擦面処理	表面	無機ジンク	表面	無機ジンク
	裏面	亜鉛アルミ塗料	裏面	亜鉛アルミ塗料
すべり係数	最大値	0.51	最大値	0.48
	平均値	0.50	平均値	0.47
	最小値	0.49	最小値	0.47
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分				
鋼種				
すべり/滑り耐力比				
摩擦面処理	母板		母板	
	連結板		連結板	
すべり係数	最大値		最大値	
	平均値		平均値	
	最小値		最小値	
備考	試験体の種類1,2の違いはボルト孔径 種類1: φ24.5 種類2: φ26.5 			

論文題目	亜鉛アルミ鍍合金塗料を施した高力ボルト摩擦接合継手の導入軸力確認試験			
著者・所属	南 邦明(鉄道建設・運輸施設整備支援機構), 徳富 尚彦, 清水 龍也, 河村 健一, 森井 茂幸			
掲載誌、公開年	土木学会論文集A1 Vol.69, 2013			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプA			
鋼種	SS400, SM490Y			
すべり/滑り耐力比				
摩擦面処理	表面	無機ジンク	母板	
	裏面	亜鉛アルミ塗料	連結板	
すべり係数	最大値	-	最大値	
	平均値	-	平均値	
	最小値	-	最小値	
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分				
鋼種				
すべり/滑り耐力比				
摩擦面処理	母板		母板	
	連結板		連結板	
すべり係数	最大値		最大値	
	平均値		平均値	
	最小値		最小値	
備考	リラクゼーションのボルト軸力低下の確認をする試験のため、すべり係数に関する報告はされていない。			

論文題目	接合面が鋼材断面と無機ジンクリッチペイント面の高力ボルト摩滅接合継手のすべり係数の提案				
著者・所属	丹波 寛夫(阪神高速技術センター), 行藤 晋也, 木村 聡, 山口 隆司, 杉浦 邦臣				
掲載誌, 公開年	土木学会論文集A1 Vol.79, 2014				
試験体形状					
	試験体の種類 1		試験体の種類 2		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/荷役耐力比	-		すべり/荷役耐力比	-	
摩滅面処理	母板	Fの付イ- (通常)	摩滅面処理	母板	Fの付イ- (弱め)
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.30	すべり係数	最大値	0.28
	平均値	0.28		平均値	0.26
	最小値	0.27		最小値	0.24
	試験体の種類 3		試験体の種類 4		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/荷役耐力比	-		すべり/荷役耐力比	-	
摩滅面処理	母板	鋼線イ- イ	摩滅面処理	母板	Fの付イ
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.21	すべり係数	最大値	0.48
	平均値	0.20		平均値	0.45
	最小値	0.19		最小値	0.42
備考					

論文題目	片面に金属溶射を用いた高力ボルト摩擦接合部手のすべり係数とすべりメカニズムに関する実験的研究				
著者・所属	栗野仕秀 (横河ブリッジ)、小塚崇 (東神高速道路株式会社)、山口隆司 (大阪市立大学)				
掲載誌、公開年	構造工学論文集Vol. 61A, 2015				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	不明		鋼種	不明	
ヤング/降伏耐力比	0.644		ヤング/降伏耐力比	0.644	
摩擦面処理	母板	無機ジンク	摩擦面処理	母板	無機ジンク
	連結板	Al-Mg溶射		連結板	Al-Mg溶射
すべり係数	最大値	0.74	すべり係数	最大値	0.66
	平均値	0.67		平均値	0.62
	最小値	0.60		最小値	0.60
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	不明		鋼種	不明	
ヤング/降伏耐力比	0.644		ヤング/降伏耐力比	0.644	
摩擦面処理	母板	無機ジンク	摩擦面処理	母板	無機ジンク
	連結板	Al-Mg溶射		連結板	Al-Mg溶射
すべり係数	最大値	0.63	すべり係数	最大値	0.67
	平均値	0.61		平均値	0.65
	最小値	0.60		最小値	0.63
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	不明		鋼種	不明	
ヤング/降伏耐力比	0.644		ヤング/降伏耐力比	0.644	
摩擦面処理	母板	無機ジンク	摩擦面処理	母板	プラストAプラスト
	連結板	Al-Mg溶射		連結板	Al-Mg溶射
すべり係数	最大値	0.56	すべり係数	最大値	0.82
	平均値	0.55		平均値	0.81
	最小値	0.54		最小値	0.79
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・試験体の種類1は、一部として着色剤を添加した無機ジンクの試験体を含む。 ・試験体の種類2は、無機ジンクの目標膜厚を30μmとしている（他では90μm）。 ・試験体の種類3は、溶射距離を100mmとしている。 ・試験体の種類4は、溶射距離を300mmとしている。 ・試験体の種類5は、母板の表面調整をRa0.5μm程度としている（他では10μm程度）。 				

論文題目	無機ジンクリッチペイント面とそれと異なる接合面処理がなされた高力ボルト摩擦接合部手のすべり耐力試験				
著者・所属	丹波寛夫（阪神高速道路局技術センター）、木村聡（大阪市立大学大学院）、杉山英樹（阪神高速道路）、山口博司（大阪市立大学大学院）				
掲載誌・公開年	構造工学論文集Vol. 58A, 2012				
試験体形状			$e = 55 \text{ [mm]}, p = 80 \text{ mm}, t1 = 28 \text{ mm}, t2 = 16 \text{ mm}$ 高力ワンサイドボルトの試験体では、 $e = 60 \text{ [mm]}, p = 90 \text{ mm}, t1 = 25 \text{ mm}, t2 = 12 \text{ mm}$		
	試験体の種類 1		試験体の種類 2		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	0.66		すべり/耐力耐力比	0.66	
摩擦面処理	母板	2種ケレン	摩擦面処理	母板	グリッドブラスト
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.54	すべり係数	最大値	0.69
	平均値	0.51		平均値	0.58
	最小値	0.45		最小値	0.66
	試験体の種類 3		試験体の種類 4		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	0.66		すべり/耐力耐力比	0.66	
摩擦面処理	母板	有機ジンク	摩擦面処理	母板	ブラスト+ブラスト
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.38	すべり係数	最大値	0.59
	平均値	0.37		平均値	0.57
	最小値	0.35		最小値	0.54
備考	・試験体の種類1の中には、一部として高力ワンサイドボルトの結果も含んでいる				

論文題目	経年無変異耐熱性鋼材を用いた異種接合面を有する高力ボルト摩部接合部手のすべり係数に関する実験的研究				
著者・所属	橋本匡太郎（京都大学大学院）、山口隆司（大阪市立大学）、鈴木文弥（横河ブリッジ）、石原一伸（日立造船）、杉浦邦征（京都大学）				
掲載誌、公開年	構造工学論文集Vol. 60A, 2014				
試験体形状	<p>$e = 55 \text{ [mm]}, g = 80 \text{ mm}, l_1 = 22 \text{ mm}, l_2 = 12 \text{ mm}$</p>				
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	異種接合型	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wN-nB		すべり/荷役耐力比	0.72 wE-nB	
摩擦面処理	母板	保護性さび	摩擦面処理	母板	3種ケレン処理
	連結板	グリッドプラスト		連結板	グリッドプラスト
すべり係数	最大値	0.49	すべり係数	最大値	0.43
	平均値	0.44		平均値	0.41
	最小値	0.40		最小値	0.40
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wG-nB		すべり/荷役耐力比	0.72 wN-nP	
摩擦面処理	母板	3種ケレン処理	摩擦面処理	母板	保護性さび
	連結板	グリッドプラスト		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.43	すべり係数	最大値	0.51
	平均値	0.43		平均値	0.47
	最小値	0.42		最小値	0.40
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wE-nP		すべり/荷役耐力比	0.72 wG-nP	
摩擦面処理	母板	3種ケレン処理	摩擦面処理	母板	3種ケレン処理
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.42	すべり係数	最大値	0.49
	平均値	0.40		平均値	0.43
	最小値	0.39		最小値	0.37
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wB-nP		すべり/荷役耐力比	0.72 wN-nA	
摩擦面処理	母板	グリッドプラスト	摩擦面処理	母板	保護性さび
	連結板	無機ジンク		連結板	アルミ溶射
すべり係数	最大値	0.53	すべり係数	最大値	0.84
	平均値	0.47		平均値	0.82
	最小値	0.41		最小値	0.80
試験体の種類9		試験体の種類10			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wE-nA		すべり/荷役耐力比	0.72 wG-nA	
摩擦面処理	母板	3種ケレン処理	摩擦面処理	母板	3種ケレン処理
	連結板	アルミ溶射		連結板	アルミ溶射
すべり係数	最大値	0.78	すべり係数	最大値	0.82
	平均値	0.71		平均値	0.79
	最小値	0.59		最小値	0.75
試験体の種類11		試験体の種類12			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490		鋼種	母板：SMA490、連結板：SM490	
すべり/荷役耐力比	0.72 wB-nP		すべり/荷役耐力比	0.72 wG-nA	
摩擦面処理	母板	グリッドプラスト	摩擦面処理	母板	3種ケレン処理
	連結板	アルミ溶射		連結板	アルミ溶射
すべり係数	最大値	0.86	すべり係数	最大値	0.82
	平均値	0.86		平均値	0.79
	最小値	0.85		最小値	0.75
備考					

論文題目	摩擦面の状態が高力ボルト継手のすべり耐力に及ぼす影響			
著者・所属	高 邦明(サクラダ), 森 望, 杉谷 隆夫			
掲載誌・公開年	第59回年次学術講演会, 2004			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプB		試験体区分	
鋼種	SS400		鋼種	
すべり/耐力耐力比	-		すべり/耐力耐力比	
摩擦面処理	母板	有機ジンク	摩擦面処理	母板
	連結板	無機ジンク		連結板
すべり係数	最大値	0.53	すべり係数	最大値
	平均値	0.50		平均値
	最小値	0.44		最小値
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分			試験体区分	
鋼種			鋼種	
すべり/耐力耐力比			すべり/耐力耐力比	
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板
	連結板			連結板
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値
	平均値			平均値
	最小値			最小値
備考				

論文題目	異種接合面処理を有する摩擦接合継手のすべり耐力試験				
著者・所属	木村 聡(大阪市立大), 山口 隆司, 丹羽 寛夫, 村松 政夫, 岡上 直浩, 杉山 裕樹				
掲載誌・公開年	第66回年次学術講演会, 2011				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	-		すべり/耐力耐力比	-	
摩擦面処理	母板	2種ケレン	摩擦面処理	母板	
	連結板	無機ジンク		有機ジンク	
すべり係数	最大値	0.54	すべり係数	最大値	0.38
	平均値	0.53		平均値	0.36
	最小値	0.49		最小値	0.35
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	-		すべり/耐力耐力比	-	
摩擦面処理	母板	1種ケレン	摩擦面処理	母板	
	連結板	無機ジンク		アノキストルプラスター	
すべり係数	最大値	0.69	すべり係数	最大値	0.59
	平均値	0.68		平均値	0.57
	最小値	0.66		最小値	0.54
備考					

論文題目	仕様の異なる摩擦接合面の耐摩耗性に関する試験報告			
著者・所属	清水 義樹(サクラダ), 石崎 雄一			
掲載誌、公開年	第67回年次学術講演会, 2012			
試験体形状				
	図-2 試験体の形状・寸法			
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプA		試験体区分	
鋼種	SMA400AW		鋼種	
すべり/降伏耐力比 β	-		すべり/降伏耐力比 β	
摩擦面処理	表面	無機ジソク	摩擦面処理	母板
	裏面	無塗装		連結板
すべり係数	最大値	0.56	すべり係数	最大値
	平均値	0.55		平均値
	最小値	0.55		最小値
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分			試験体区分	
鋼種			鋼種	
すべり/降伏耐力比 β			すべり/降伏耐力比 β	
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板
	連結板			連結板
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値
	平均値			平均値
	最小値			最小値
備考	無塗装部はプラスト後に2週間の屋外暴露を行い表面粗度を60 μm (Rz)程度とした。			
				図-3 すべり係数測定結果

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敬二(西日本工業大学), 宇野権方(新日本製鉄), 竹内一郎(新日本製鉄)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第9巻, 2002年12月				
試験体形状					
	図-1 タイプB本底試験体形状寸法		図-2 タイプB本底試験体形状寸法		
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.47		すべり/降伏耐力比 β	0.47	
摩擦面処理	母板	ショットブラスト	摩擦面処理	母板	錆止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	1.12		平均値	0.88
	最小値			最小値	
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.77		すべり/降伏耐力比 β	0.77	
摩擦面処理	母板	ショットブラスト	摩擦面処理	母板	無装
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	1.17		平均値	1.11
	最小値			最小値	
備考					

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敏二(西日本工業大学),宇野暢芳(新日本製鉄),竹内一郎(新日本製鉄)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状					
	試験体の種類5		試験体の種類6		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.77		すべり/降伏耐力比 β	0.77	
摩擦面処理	母板	錆止めペイント	摩擦面処理	母板	錆止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	1.05	最大値	1.03	
	平均値		平均値		
	最小値		最小値		
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.77		すべり/降伏耐力比 β	0.77	
摩擦面処理	母板	ショット	摩擦面処理	母板	赤錆
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	0.41	最大値	0.42	
	平均値		平均値		
	最小値		最小値		
備考	試験体7、試験体8は平行波目				

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敏二(西日本工業大学),宇野暢芳(新日本製鉄),竹内一郎(新日本製鉄)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状					
	試験体の種類9		試験体の種類10		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.77		すべり/降伏耐力比 β	0.77	
摩擦面処理	母板	錆止めペイント	摩擦面処理	母板	ショットブラス
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	0.27	最大値	1.20	
	平均値		平均値		
	最小値		最小値		
試験体の種類11		試験体の種類12			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 β	0.77		すべり/降伏耐力比 β	0.77	
摩擦面処理	母板	赤錆	摩擦面処理	母板	錆止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	1.19	最大値	1.09	
	平均値		平均値		
	最小値		最小値		
備考	試験体9は平行波目、試験体10,11,12は波目ピッチ1.5				

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敬二(西日本工業大学),宇野暢方(新日本製鉄),竹内一郎(新日本製鉄)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状	<p>図-1 2面1本形試験体形状</p>		<p>図-2 2面2本形試験体形状</p>		
試験体の種類13		試験体の種類14			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/耐力耐力比	0.77		すべり/耐力耐力比	0.71	
母材表面処理	母板	仕上げペイント	母材表面処理	母板	ショットブラスト
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	1.13		平均値	1.25
	最小値			最小値	
試験体の種類15		試験体の種類16			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/耐力耐力比	0.71		すべり/耐力耐力比	0.75	
母材表面処理	母板	錆止めペイント	母材表面処理	母板	ショットブラスト
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	1.13		平均値	1.26
	最小値			最小値	
備考	試験体13は波目ピッチ1.5、試験体14,15は母材板厚32mm(F10T),試験体16は母材板厚32mm(F14T)				

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敬二(西日本工業大学),宇野暢方(新日本製鉄),竹内一郎(新日本製鉄)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状	<p>図-1 2面1本形試験体形状</p>		<p>図-2 2面2本形試験体形状</p>		
試験体の種類17		試験体の種類18			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/耐力耐力比	0.75		すべり/耐力耐力比	0.71	
母材表面処理	母板	赤錆	母材表面処理	母板	錆止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	1.10		平均値	0.95
	最小値			最小値	
試験体の種類19		試験体の種類20			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/耐力耐力比	0.75		すべり/耐力耐力比	0.92	
母材表面処理	母板	仕上げペイント	母材表面処理	母板	ショットブラスト
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値	0.93		平均値	1.06
	最小値			最小値	
備考	試験体17,18,19は母材板厚32mm(F14T),試験体20は2面2本形式				

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敬二(西日本工業大学),宇野暢芳(新日本製鉄),竹内一部(新日本製鉄)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状					
	図1 2面1本試験体形状		図2 2面2本試験体形状		
試験体の種類21					
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 μ	0.92		すべり/降伏耐力比 μ	0.92	
摩擦面処理	母板	赤錆	摩擦面処理	母板	黒止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	1.06	すべり係数	最大値	0.97
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
試験体の種類23					
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 μ	0.92		すべり/降伏耐力比 μ	0.71	
摩擦面処理	母板	黒皮	摩擦面処理	母板	ショットブラスト
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	1.12	すべり係数	最大値	1.20
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
備考	試験体21, 22, 23, 24は2面2本				

論文題目	高すべり係数接合部に関する実験的研究(母材の表面処理がすべり特性に与える影響)				
著者・所属	平井敬二(西日本工業大学),宇野暢芳(新日本製鉄),竹内一部(新日本製鉄)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第9巻,2002年12月				
試験体形状					
	図1 2面1本試験体形状		図2 2面2本試験体形状		
試験体の種類25					
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SN400		鋼種	SN400	
すべり/降伏耐力比 μ	0.71		すべり/降伏耐力比 μ	0.71	
摩擦面処理	母板	赤錆	摩擦面処理	母板	黒止めペイント
	連結板	平行波形加工		連結板	平行波形加工
すべり係数	最大値	1.20	すべり係数	最大値	1.16
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
試験体の種類27					
試験体区分	タイプB		試験体区分	試験体の種類	
鋼種	SN400		鋼種		
すべり/降伏耐力比 μ	0.71		すべり/降伏耐力比 μ		
摩擦面処理	母板	黒皮	摩擦面処理	母板	
	連結板	平行波形加工		連結板	
すべり係数	最大値	1.18	すべり係数	最大値	
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
備考	試験体25, 26, 27は2面2本				

論文題目	経年無塗装耐候性鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験					
著者・所属	坂井田実(京都大学), 杉浦邦征(京都大学), 山口隆司(大阪市立大学), 村上茂之(岐阜大学), 橋本國太郎(京都大学)					
掲載誌、公開年	鋼構造年次論文報告書第14巻, 2009年9月					
試験体形状						
	試験体の種類 1		試験体の種類 2			
	試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
	鋼種	SMA490W		鋼種	SMA490W	
	すべり/降伏耐力比	0.504		すべり/降伏耐力比	0.495	
	摩擦面処理	母板	ブラスト	摩擦面処理	母板	グラインダ
		連結板	ブラスト		連結板	ブラスト
	すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
		平均値			平均値	
		最小値			最小値	
最大値		0.53	最大値		0.51	
平均値		0.51	平均値		0.51	
最小値		0.52	最小値		0.50	
試験体の種類 3		試験体の種類 4				
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB		
鋼種	SMA490W		鋼種	SMA490W		
すべり/降伏耐力比	0.458		すべり/降伏耐力比	0.454		
摩擦面処理	母板	電動ワイヤブラシ	摩擦面処理	母板	手動ワイヤブラシ	
	連結板	ブラスト		連結板	ブラスト	
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値		
	平均値			平均値		
	最小値			最小値		
最大値		0.48	最大値		0.54	
平均値		0.47	平均値		0.51	
最小値		0.46	最小値		0.47	
備考						

論文題目	経年無塗装耐候性鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験					
著者・所属	坂井田実(京都大学), 杉浦邦征(京都大学), 山口隆司(大阪市立大学), 村上茂之(岐阜大学), 橋本國太郎(京都大学)					
掲載誌、公開年	鋼構造年次論文報告書第14巻, 2009年9月					
試験体形状						
	試験体の種類 5		試験体の種類 6			
	試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
	鋼種	SMA490W		鋼種	SMA490W	
	すべり/降伏耐力比	0.519		すべり/降伏耐力比	0.54	
	摩擦面処理	母板	無処理	摩擦面処理	母板	無処理
		連結板	ブラスト		連結板	無処理
	すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
		平均値			平均値	
		最小値			最小値	
最大値		0.57	最大値		0.48	
平均値		0.53	平均値		0.43	
最小値		0.50	最小値		0.37	
試験体の種類		試験体の種類				
試験体区分			試験体区分			
鋼種			鋼種			
すべり/降伏耐力比			すべり/降伏耐力比			
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板		
	連結板			連結板		
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値		
	平均値			平均値		
	最小値			最小値		
最大値			最大値			
平均値			平均値			
最小値			最小値			
備考	試験体 6 のみ連結板板厚10mm(他試験体は6mm)					

論文題目	赤錆摩耗面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩耗接合部のボルト配置とすべり係数に関する研究				
著者・所属	東 清三郎(新日鉄住金), 野井 隆(吉川工業)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第24巻第93号, 2017年3月				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490		鋼種	SM490	
すべり/降伏耐力比 μ	0.81		すべり/降伏耐力比 μ	0.78	
摩耗面処理	母板	ブラスト	摩耗面処理	母板	ブラスト
	連結板	アルミ溶射		連結板	アルミ溶射
すべり係数	最大値	0.80	すべり係数	最大値	0.72
	平均値	0.79		平均値	0.71
	最小値	0.79		最小値	0.69
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490		鋼種	SM490	
すべり/降伏耐力比 μ	0.8		すべり/降伏耐力比 μ	0.89	
摩耗面処理	母板	ブラスト	摩耗面処理	母板	ブラスト
	連結板	アルミ溶射		連結板	アルミ溶射
すべり係数	最大値	0.76	すべり係数	最大値	0.99
	平均値	0.76		平均値	0.92
	最小値	0.75		最小値	0.95
備考					

論文題目	赤錆摩耗面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩耗接合部のボルト配置とすべり係数に関する研究				
著者・所属	東 清三郎(新日鉄住金), 野井 隆(吉川工業)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第24巻第93号, 2017年3月				
試験体形状					
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプB		試験体区分		
鋼種	SM490		鋼種		
すべり/降伏耐力比 μ	0.87		すべり/降伏耐力比 μ		
摩耗面処理	母板	ブラスト	摩耗面処理	母板	
	連結板	アルミ溶射		連結板	
すべり係数	最大値	0.89	すべり係数	最大値	
	平均値	0.87		平均値	
	最小値	0.85		最小値	
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分			試験体区分		
鋼種			鋼種		
すべり/降伏耐力比 μ			すべり/降伏耐力比 μ		
摩耗面処理	母板		摩耗面処理	母板	
	連結板			連結板	
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
備考					

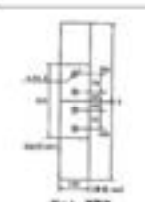
論文題目	連結板接合面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数およびリラクセーション特性に関する実験的研究				
著者・所属	東 満三郎(新日鉄住金),高木優任(新日鉄住金),山口隆司(大阪市立大学)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第24巻第96号,2017年12月				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y	鋼種	SM490Y		
すべり/降伏耐力比 μ	0.34	すべり/降伏耐力比 μ	0.34		
摩擦面処理	母板	プラスト	摩擦面処理	母板	無機ジंक
	連結板	アルミ溶射	連結板	アルミ溶射	
すべり係数	最大値	0.94	最大値	0.81	
	平均値	0.93	平均値	0.81	
	最小値	0.91	最小値	0.80	
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y	鋼種	SM490Y		
すべり/降伏耐力比 μ	0.34	すべり/降伏耐力比 μ	0.34		
摩擦面処理	母板	ディスクサンダー	摩擦面処理	母板	ディスクサンダー
	連結板	アルミ溶射	連結板	アルミ溶射	
すべり係数	最大値	0.76	最大値	0.75	
	平均値	0.75	平均値	0.74	
	最小値	0.74	最小値	0.73	
備考	試験体3はディスクサンダー(標準)、試験体4はディスクサンダー(弱め)				

論文題目	連結板接合面にアルミ溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数およびリラクセーション特性に関する実験的研究				
著者・所属	東 満三郎(新日鉄住金),高木優任(新日鉄住金),山口隆司(大阪市立大学)				
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第24巻第96号,2017年12月				
試験体形状					
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y	鋼種	SM490Y		
すべり/降伏耐力比 μ	0.34	すべり/降伏耐力比 μ	0.34		
摩擦面処理	母板	プラスト	摩擦面処理	母板	無機ジंक
	連結板	アルミ溶射	連結板	アルミ溶射	
すべり係数	最大値	0.85	最大値	0.74	
	平均値	0.85	平均値	0.72	
	最小値	0.84	最小値	0.70	
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y	鋼種	SM490Y		
すべり/降伏耐力比 μ	0.34	すべり/降伏耐力比 μ	0.34		
摩擦面処理	母板	無機ジंक	摩擦面処理	母板	無機ジंक
	連結板	アルミ溶射	連結板	アルミ溶射	
すべり係数	最大値	0.75	最大値	0.77	
	平均値	0.73	平均値	0.76	
	最小値	0.72	最小値	0.76	
備考	試験体6は無機ジंक塗布量103 μ m、試験体5は無機ジंक塗布量236 μ m、試験体6は無機ジंक塗布量337 μ m				

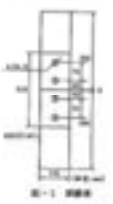
論文題目	薬劑処理を施した高力ボルト摩擦接合の摩擦面に関する基礎的研究				
著者・所属	加村隆志(日本工科大学),北後 寿(日本工科大学)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第1巻,1993年7月				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/締付耐力比 μ	0.96		すべり/締付耐力比 μ	0.96	
摩擦面処理	表面	グラインダ	摩擦面処理	表面	高圧射流
	裏面	グラインダ		裏面	高圧射流
すべり係数	最大値	0.59	すべり係数	最大値	0.59
	平均値	0.58		平均値	0.56
	最小値	0.58		最小値	0.52
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/締付耐力比 μ	0.96		すべり/締付耐力比 μ	0.96	
摩擦面処理	表面	熱処理促進剤	摩擦面処理	表面	熱処理促進剤
	裏面	熱処理促進剤		裏面	熱処理促進剤
すべり係数	最大値	0.58	すべり係数	最大値	0.60
	平均値	0.57		平均値	0.58
	最小値	0.57		最小値	0.57
備考					

論文題目	薬劑処理を施した高力ボルト摩擦接合の摩擦面に関する基礎的研究				
著者・所属	加村隆志(日本工科大学),北後 寿(日本工科大学)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第1巻,1993年7月				
試験体形状					
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/締付耐力比 μ	0.96		すべり/締付耐力比 μ	0.96	
摩擦面処理	表面	熱処理促進剤	摩擦面処理	母板	グラインダー
	裏面	熱処理促進剤		連結板	グリッドG50+70
すべり係数	最大値	0.59	すべり係数	最大値	0.57
	平均値	0.59		平均値	0.56
	最小値	0.58		最小値	0.55
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/締付耐力比 μ	0.96		すべり/締付耐力比 μ	0.96	
摩擦面処理	母板	高圧射流	摩擦面処理	母板	熱処理促進剤
	連結板	グリッドG50+70		連結板	グリッドG50+70
すべり係数	最大値	0.55	すべり係数	最大値	0.57
	平均値	0.51		平均値	0.56
	最小値	0.45		最小値	0.55
備考					

論文題目	薬劑処理を施した高力ボルト摩擦接合の摩擦面に関する基礎的研究				
著者・所属	加村隆志(日本工業大学),北後 寿(日本工業大学)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第1巻,1993年7月				
試験体形状	 <p>図1 試験体形状・寸法</p>				
	試験体の種類9		試験体の種類10		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/締付耐力比 μ	0.96		すべり/締付耐力比 μ	0.96	
摩擦面処理	母板	摩擦面処理	母板	グラインダー	
	連結板	摩擦面処理	連結板	ブリアドFG00+70	
すべり係数	最大値	0.56	すべり係数	最大値	0.56
	平均値	0.55		平均値	0.50
	最小値	0.54		最小値	0.45
	試験体の種類		試験体の種類		
試験体区分			試験体区分		
鋼種			鋼種		
すべり/締付耐力比 μ			すべり/締付耐力比 μ		
摩擦面処理	表面		摩擦面処理	表面	
	裏面			裏面	
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値	
	平均値			平均値	
	最小値			最小値	
備考					

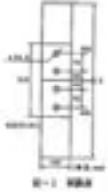
論文題目	摩擦接合接触面のプライマー除去方法の検討				
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 道(トビー工業),西園広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第2巻,1994年11月				
試験体形状	 <p>図1 試験体</p>				
	試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
すべり/締付耐力比 μ	0.5		すべり/締付耐力比 μ	0.5	
摩擦面処理	母板	エッチングプライマー	摩擦面処理	母板	
	連結板	エッチングプライマー	連結板	エッチングプライマー	
すべり係数	最大値	0.25	すべり係数	最大値	0.32
	平均値	0.25		平均値	0.32
	最小値	0.25		最小値	0.32
	試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
すべり/締付耐力比 μ	0.5		すべり/締付耐力比 μ	0.5	
摩擦面処理	母板	エッチングプライマー	摩擦面処理	母板	
	連結板	ショットブラスト	連結板	ショットブラスト	
すべり係数	最大値	0.33	すべり係数	最大値	0.39
	平均値	0.32		平均値	0.38
	最小値	0.31		最小値	0.37
備考	試験体1,3は摩擦面処理後直後に試験。試験体2,4は摩擦面処理後2か月後に試験				


論文題目	摩擦接合接合面のプライマー除去方法の検討					
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 道(トビー工業),西園広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)					
掲載誌, 公開年	機械造論文集第2巻,1994年11月					
試験体形状						
	試験体の種類9		試験体の種類6			
	試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
	鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
	すべり/荷役耐力比 β	0.5		すべり/荷役耐力比 β	0.5	
	摩擦面処理	母板	ショットブラスト	摩擦面処理	母板	グランドブラスト
		連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト
	すべり係数	最大値	0.39	すべり係数	最大値	0.46
		平均値	0.38		平均値	0.45
		最小値	0.38		最小値	0.44
試験体の種類7		試験体の種類8				
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y		
すべり/荷役耐力比 β	0.5		すべり/荷役耐力比 β	0.5		
摩擦面処理	母板	グランドブラスト	摩擦面処理	母板	グラインダで研磨	
	連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト	
すべり係数	最大値	0.59	すべり係数	最大値	0.36	
	平均値	0.57		平均値	0.34	
	最小値	0.55		最小値	0.33	
備考	試験体5,6,8は摩擦面処理直後に試験, 試験体7は摩擦面処理後2か月後に試験					

論文題目	摩擦接合接合面のプライマー除去方法の検討					
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 道(トビー工業),西園広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)					
掲載誌, 公開年	機械造論文集第2巻,1994年11月					
試験体形状						
	試験体の種類9		試験体の種類10			
	試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
	鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
	すべり/荷役耐力比 β	0.5		すべり/荷役耐力比 β	0.5	
	摩擦面処理	母板	グラインダで研磨	摩擦面処理	母板	グラインダで研磨
		連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト
	すべり係数	最大値	0.43	すべり係数	最大値	0.36
		平均値	0.40		平均値	0.34
		最小値	0.38		最小値	0.34
試験体の種類11		試験体の種類12				
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB		
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y		
すべり/荷役耐力比 β	0.5		すべり/荷役耐力比 β	0.5		
摩擦面処理	母板	グラインダで完全除去	摩擦面処理	母板	グラインダで完全除去	
	連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト	
すべり係数	最大値	0.35	すべり係数	最大値	0.54	
	平均値	0.34		平均値	0.54	
	最小値	0.33		最小値	0.53	
備考	試験体9,12は摩擦面処理直後に試験, 試験体10,11は摩擦面処理後2か月後に試験					

論文題目	摩耗接合接合面のプライマー除去方法の検討				
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 通(トビー工業),西園広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)				
掲載誌, 公開年	鋼構造論文集第2巻,1994年11月				
試験体形状					
試験体の種類13		試験体の種類14			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
ヤベリ/摩耗耐力比	0.5		ヤベリ/摩耗耐力比	0.5	
摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去	摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去
	連結板	グラインダで完全除去		連結板	ショットブラスト
ヤベリ係数	最大値	0.29	ヤベリ係数	最大値	0.33
	平均値	0.29		平均値	0.32
	最小値	0.28		最小値	0.32
試験体の種類15		試験体の種類16			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
ヤベリ/摩耗耐力比	0.5		ヤベリ/摩耗耐力比	0.5	
摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去	摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去
	連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト
ヤベリ係数	最大値	0.39	ヤベリ係数	最大値	0.59
	平均値	0.37		平均値	0.55
	最小値	0.35		最小値	0.48
備考	試験体13,14は摩耗面処理後直後に試験。試験体15,16は摩耗面処理後2か月後に試験				

論文題目	摩耗接合接合面のプライマー除去方法の検討				
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 通(トビー工業),西園広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)				
掲載誌, 公開年	鋼構造論文集第2巻,1994年11月				
試験体形状					
試験体の種類17		試験体の種類18			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
ヤベリ/摩耗耐力比	0.5		ヤベリ/摩耗耐力比	0.5	
摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去	摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去
	連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト
ヤベリ係数	最大値	0.36	ヤベリ係数	最大値	0.64
	平均値	0.34		平均値	0.61
	最小値	0.32		最小値	0.58
試験体の種類19		試験体の種類20			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
ヤベリ/摩耗耐力比	0.5		ヤベリ/摩耗耐力比	0.5	
摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去	摩耗面処理	母板	グラインダで完全除去
	連結板	ショットブラスト		連結板	ショットブラスト
ヤベリ係数	最大値	0.75	ヤベリ係数	最大値	0.41
	平均値	0.64		平均値	0.40
	最小値	0.58		最小値	0.39
備考	試験体17,20は摩耗面処理後直後に試験。試験体18,19は摩耗面処理後2か月後に試験				

論文題目	摩擦接合界面のプライマー除去方法の検討			
著者・所属	松村正義(トビー工業),北島 浩(トビー工業),西岡広之(トビー工業),三ツ木幸子(トビー工業)			
掲載誌、公開年	鋼構造論文集第2巻,1994年11月			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y	鋼種	SM490Y	
すべり/荷重耐力比 μ	0.5	すべり/荷重耐力比 μ	0.5	
摩擦面処理	母板	ヘアライン加工	母板	ブラインドで保護した母板
	連結板	ショットブラスト	連結板	ブラインドで保護した母板
すべり係数	最大値	0.70	最大値	0.24
	平均値	0.68	平均値	0.23
	最小値	0.66	最小値	0.23
試験体の種類		試験体の種類		
試験体区分		試験体区分		
鋼種		鋼種		
すべり/荷重耐力比 μ		すべり/荷重耐力比 μ		
摩擦面処理	母板		母板	
	連結板		連結板	
すべり係数	最大値		最大値	
	平均値		平均値	
	最小値		最小値	
備考	試験体17,20は摩擦面処理直後に試験。試験体18,19は摩擦面処理後2ヶ月後に試験			

論文題目	フィラーを有する高力ボルト-面摩擦接合部のすべり耐力			
著者・所属	神田恭太郎(川鉄橋梁機構),上村明弘(川鉄橋梁機構),森登(法政大学)			
掲載誌、公開年	鋼構造年次論文報告書第14巻,2006年11月			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB	
鋼種	SM400	鋼種	SM400	
すべり/荷重耐力比 μ	0.867	すべり/荷重耐力比 μ	0.363	
摩擦面処理	母板	無機ゾルック	母板	無機ゾルック
	連結板・フィラー	HDZ55→リン酸塩	連結板・フィラー	HDZ55→リン酸塩
すべり係数	最大値	0.58	最大値	0.59
	平均値	0.49	平均値	0.52
	最小値	0.45	最小値	0.56
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y	鋼種	SM400	
すべり/荷重耐力比 μ	0.321	すべり/荷重耐力比 μ	0.475	
摩擦面処理	母板	無機ゾルック	母板	無機ゾルック
	連結板・フィラー	HDZ55→リン酸塩	連結板・フィラー	HDZ55→リン酸塩
すべり係数	最大値	0.59	最大値	0.55
	平均値	0.54	平均値	0.54
	最小値	0.50	最小値	0.52
備考	試験体1は連結板片側を補剛。試験体4は2面摩擦接合			

論文題目	彫削めっきHTB及び接合面を暴露後に組立てた継手のすべり耐力			
著者・所属	第一(JFEエンジニアリング),高須賀丈広(JFEエンジニアリング),上村明弘(JFEエンジニアリング)			
掲載誌・公開年	鋼構造年次論文報告書第19巻,2011年11月			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプB	試験体区分	タイプB	
鋼種	SM400	鋼種	SM400	
すべり/耐力耐力比 μ	0.734	すべり/耐力耐力比 μ	0.807	
摩擦面処理	母板 連結板・フィルラー 無機ジント HDZ55→リン酸塩	摩擦面処理	母板 連結板・フィルラー 無機ジント HDZ55→リン酸塩	
すべり係数	最大値 平均値 最小値	すべり係数	最大値 平均値 最小値	
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分	タイプB	試験体区分		
鋼種	SM400	鋼種		
すべり/耐力耐力比 μ	0.781	すべり/耐力耐力比 μ		
摩擦面処理	母板 連結板・フィルラー 無機ジント HDZ55→リン酸塩	摩擦面処理	母板 連結板・フィルラー	
すべり係数	最大値 平均値 最小値	すべり係数	最大値 平均値 最小値	
備考	試験体2は母板に無機ジントを塗布後、約6か月暴露 試験体3は母板に無機ジントを塗布後、約9か月暴露			

論文題目	追加孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力実験			
著者・所属	山本淳史(大阪市立大学),中川隆太(大阪市立大学),山口隆尚(大阪市立大学),桑山豊六(実地エンジニアリング),山内幸哉(東京鉄骨構架),寺田豊			
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第24巻,2016年11月			
試験体形状				
試験体の種類1		試験体の種類2		
試験体区分	タイプA	試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570	鋼種	SM570	
すべり/耐力耐力比 μ	0.443	すべり/耐力耐力比 μ	0.433	
摩擦面処理	表面 表面 金属溶射(Al-Mg-Si系) 無機ジント	摩擦面処理	表面 表面 金属溶射(Al-Mg-Si系) 無機ジント	
すべり係数	最大値 平均値 最小値	すべり係数	最大値 平均値 最小値	
試験体の種類3		試験体の種類4		
試験体区分	タイプA	試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570	鋼種	SM570	
すべり/耐力耐力比 μ	0.438	すべり/耐力耐力比 μ	0.223	
摩擦面処理	表面 表面 金属溶射(Al-Mg-Si系) 無機ジント	摩擦面処理	表面 表面 金属溶射(Al-Mg-Si系) 無機ジント	
すべり係数	最大値 平均値 最小値	すべり係数	最大値 平均値 最小値	
備考	試験体1～3は引張試験(1次引張),試験体4は引張試験(再すべり) 試験体1は追加孔無し,試験体2は追加孔(直角方向),試験体3は追加孔(平行追加),試験体4は追加孔無し			

論文題目	追加孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力実験				
著者・所属	山本淳史(大阪市立大学), 中川翔太(大阪市立大学), 山口隆司(大阪市立大学), 桑山豊六(宮地エンジニアリング), 山内幸政(東京鉄骨構架), 寺田龍三				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第24巻, 2016年11月				
試験体形状					
	図-1 5種試験体の形状と寸法 (単位: mm)		図-2 6種試験体の形状と寸法 (単位: mm)		
試験体の種類5		試験体の種類6			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570		鋼種	SM570	
ヤング/降伏耐力比 α	0.209		ヤング/降伏耐力比 α	0.206	
摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)	摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)
	裏面	無機ジンク		裏面	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.30	すべり係数	最大値	0.29
	平均値	0.29		平均値	0.28
	最小値	0.27		最小値	0.21
試験体の種類7		試験体の種類8			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570		鋼種	SM570	
ヤング/降伏耐力比 α	0.436		ヤング/降伏耐力比 α	0.421	
摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)	摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)
	裏面	無機ジンク		裏面	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.62	すべり係数	最大値	0.57
	平均値	0.58		平均値	0.55
	最小値	0.54		最小値	0.53
備考	試験体5,6は引張試験(再すべり),試験体7,8は圧縮試験(1次圧縮)				
	試験体5は追加孔(直角方向),試験体6は追加孔(平行方向),試験体7は追加孔無し,試験体8は追加孔(直角方向)				

論文題目	追加孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力実験				
著者・所属	山本淳史(大阪市立大学), 中川翔太(大阪市立大学), 山口隆司(大阪市立大学), 桑山豊六(宮地エンジニアリング), 山内幸政(東京鉄骨構架), 寺田龍三				
掲載誌・公開年	鋼構造論文集第24巻, 2016年11月				
試験体形状					
	図-1 9種試験体の形状と寸法 (単位: mm)		図-2 10種試験体の形状と寸法 (単位: mm)		
試験体の種類9		試験体の種類10			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570		鋼種	SM570	
ヤング/降伏耐力比 α	0.381		ヤング/降伏耐力比 α	0.272	
摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)	摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)
	裏面	無機ジンク		裏面	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.51	すべり係数	最大値	0.39
	平均値	0.50		平均値	0.38
	最小値	0.48		最小値	0.36
試験体の種類11		試験体の種類12			
試験体区分	タイプA		試験体区分	タイプA	
鋼種	SM570		鋼種	SM570	
ヤング/降伏耐力比 α	0.25		ヤング/降伏耐力比 α	0.265	
摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)	摩擦面処理	表面	金属塗料(Al,Mg合金)
	裏面	無機ジンク		裏面	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.35	すべり係数	最大値	0.40
	平均値	0.35		平均値	0.36
	最小値	0.34		最小値	0.34
備考	試験体9は圧縮試験(1次圧縮),試験体10,11,12は圧縮試験(再すべり)				
	試験体9は追加孔(平行方向),試験体10は追加孔無し,試験体11は追加孔(直角),試験体12は追加孔(平行方向)				

論文題目	高力ボルト摩擦接合部免蝕処理面に及ぼす諸変数の影響			
著者・所属	石川基理 (大阪大学大学院), 桑原直, 柴田淳平			
掲載誌・公開年	日本建築学会近畿支部研究報告集, 2013			
試験体形状	<p>図1 試験体 図2 試験体・構造方法・計測位置 図3 試験体・構造方法・計測位置</p>			
試験体区分	試験体の種類1		試験体の種類2	
鋼種	SM490		SM490	
すべり/荷役耐力比	0.31		0.58	
摩擦面処理	母板	グラインダ	母板	自然免蝕
	連結板	グラインダ	連結板	自然免蝕
すべり係数	最大値	不明	最大値	不明
	平均値	0.25	平均値	0.55
	最小値	不明	最小値	不明
試験体区分	試験体の種類3		試験体の種類4	
鋼種				
すべり/荷役耐力比				
摩擦面処理	母板		母板	
	連結板		連結板	
すべり係数	最大値		最大値	
	平均値		平均値	
	最小値		最小値	
備考	<p>図1 試験体 図2 力の分解 図3 Cの算出</p> <p>$C = \sqrt{N^2 + F^2}$</p> <p>C*: 応度</p>			

論文題目	表面処理・締付け施工法を変数とした高力ボルト摩擦接合部のすべり実験 (その1 実験概要と締付け施工法による影響)			
著者・所属	河合隆太郎 (大阪大学大学院), 笠高裕右, 桑原直, 山口隆司, 平井敏二, 亀井義典			
掲載誌・公開年	学術講演集概集C-1, 2010			
試験体形状	<p>図1 試験体 図2 試験体・構造方法・計測位置 図3 試験体・構造方法・計測位置</p>			
試験体区分	試験体の種類1		試験体の種類2	
鋼種	SM490		SM490	
すべり/荷役耐力比	0.49		0.49	
摩擦面処理	表面	ショットブラスト+自然蝕	表面	グラインダ+自然蝕
	裏面	ショットブラスト	裏面	ショットブラスト
すべり係数	最大値	不明	最大値	不明
	平均値	0.65	平均値	0.45
	最小値	不明	最小値	不明
試験体区分	試験体の種類3		試験体の種類4	
鋼種	SM490			
すべり/荷役耐力比	0.49			
摩擦面処理	表面	ショットブラスト+薬品蝕	母板	
	裏面	ショットブラスト	連結板	
すべり係数	最大値	不明	最大値	
	平均値	0.69	平均値	
	最小値	不明	最小値	
備考	<p>SA,SB: ショットブラストの送り速度が異なる GR: グラインダ仕上げ ○1: 約1ヶ月後設置</p>			

論文題目	表面処理・締付け施工法を変数とした高力ボルト摩擦接合部のすべり実験（その2 表面処理による影響）					
著者・所属	藤原道（大阪大学大学院）、髙橋裕治、河合剛太郎、山口隆司、平井敬二、亀井義典					
掲載誌、公開年	学術講演梗概集C-1, 2010					
試験体形状	「表面処理・締付け施工法を変数とした高力ボルト摩擦接合部のすべり実験（その1 実験概要と締付け施工法による影響）」と同一試験のため、省略する。					
試験体の種類 1			試験体の種類 2			
試験体区分			試験体区分			
鋼種			鋼種			
すべり/荷役耐力比			すべり/荷役耐力比			
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板		
	連結板			連結板		
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値		
	平均値			平均値		
	最小値			最小値		
試験体の種類 3			試験体の種類 4			
試験体区分			試験体区分			
鋼種			鋼種			
すべり/荷役耐力比			すべり/荷役耐力比			
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板		
	連結板			連結板		
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値		
	平均値			平均値		
	最小値			最小値		
備考						

論文題目	硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究					
著者・所属	宇野権方（新日本製鐵鋼構造研究開発センター）、井上一朗、志村保美、駒山弘三					
掲載誌、公開年	日本建築学会構造系論文集, 1997					
試験体形状						
試験体の種類 1			試験体の種類 2			
試験体区分	タイプA		試験体区分			
鋼種	SS400, S35C		鋼種			
すべり/荷役耐力比	0.80		すべり/荷役耐力比			
摩擦面処理	表面	ブラスト処理	摩擦面処理	母板		
	裏面	波形（突起）		連結板		
すべり係数	最大値	1.12	すべり係数	最大値		
	平均値	1.04		平均値		
	最小値	0.94		最小値		
試験体の種類 3			試験体の種類 4			
試験体区分			試験体区分			
鋼種			鋼種			
すべり/荷役耐力比			すべり/荷役耐力比			
摩擦面処理	母板		摩擦面処理	母板		
	連結板			連結板		
すべり係数	最大値		すべり係数	最大値		
	平均値			平均値		
	最小値			最小値		
備考						

論文題目	摩擦接合面結核における摩擦接合継手のすべり耐力試験				
著者・所属	丹波寛夫 (阪神高速道路管技術センター)、 笠田治行 (阪神高速道路管技術センター)、 杉山祐樹 (阪神高速道路)、 岡上直浩 (阪神高速道路)、 山口隆司 (大阪市立大学大学院)、 木村聡 (大阪市立大学大学院)				
掲載誌、公開年	日本道路会議論文集(CD-ROM)、 第29巻、 2011				
試験体形状			$e = 55 \text{ [mm]}, p = 80 \text{ mm}, l_1 = 28 \text{ mm}, l_2 = 16 \text{ mm}$ $e = 60 \text{ [mm]}, p = 90 \text{ mm}, l_1 = 25 \text{ mm}, l_2 = 12 \text{ mm}$ 高力ワナサイドボルトの試験体では、		
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	0.65		すべり/耐力耐力比	0.65	
摩擦面処理	母板	グリッドプラスト	摩擦面処理	母板	有機ジンク (2種ケレン)
	連結板	無機ジンク (1種ケレン)		連結板	無機ジンク (1種ケレン)
すべり係数	最大値	0.54	すべり係数	最大値	0.38
	平均値	0.51		平均値	0.37
	最小値	0.45		最小値	0.35
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SS400		鋼種	SS400	
すべり/耐力耐力比	0.65		すべり/耐力耐力比	0.65	
摩擦面処理	母板	1種ケレン	摩擦面処理	母板	ブリストルプラスト
	連結板	無機ジンク (1種ケレン)		連結板	無機ジンク (1種ケレン)
すべり係数	最大値	0.69	すべり係数	最大値	0.59
	平均値	0.68		平均値	0.57
	最小値	0.66		最小値	0.54
備考	<ul style="list-style-type: none"> 試験体の種類1の中には、一部として高力ワナサイドボルトの結果も含んでいる ブリストルプラストによる2種ケレンにより、0.4以上のすべり係数を確保できると報告している。 				

論文題目	高力ボルト摩擦接合継手への改良した鍍金処理の適用に関する検討				
著者・所属	吉岡重樹 (駒井ハルテック)、 橋本 (駒井ハルテック)、 岡田幸彦 (駒井ハルテック)				
掲載誌、公開年	駒井ハルテック技術、 Vol. 7、 2017				
試験体形状					
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
すべり/耐力耐力比	0.44		すべり/耐力耐力比	0.44	
摩擦面処理	母板	亜品鍍	摩擦面処理	母板	亜品鍍
	連結板	無機ジンク		連結板	無機ジンク
すべり係数	最大値	0.59	すべり係数	最大値	0.53
	平均値	0.56		平均値	0.52
	最小値	0.50		最小値	0.50
試験体の種類3		試験体の種類4			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SM490Y		鋼種	SM490Y	
すべり/耐力耐力比	0.44		すべり/耐力耐力比	0.44	
摩擦面処理	母板	亜品鍍	摩擦面処理	母板	亜品鍍
	連結板	無機ジンク		連結板	自然鍍
すべり係数	最大値	0.47	すべり係数	最大値	0.72
	平均値	0.45		平均値	0.70
	最小値	0.44		最小値	0.68
備考	<ul style="list-style-type: none"> 試験体の種類1は、一部にケレン後に孔あけを実施したものを含む 試験体の種類2は、ケレン後の粗度Ra<math>5 \mu\text{m}</math> (他の種類ではRa<math>5 \mu\text{m}</math>) 試験体の種類3は、ボルト周りにのみケレンを実施 (他の種類では摩擦面全面に実施) 				

論文題目	赤めっき構造物とのめっき構造物境界部における溶融亜鉛めっき高力ボルト摩擦接合すべり耐力に関する実験				
著者・所属	岡田久志（愛知工業大学）、近藤信彦（愛知工業大学）、橋本寛秀（千葉工業大学）				
掲載誌、公開年	日本建築学会学術講演集				
試験体形式			括弧付きの数値は、括弧の中の値を参照すること		
試験体の種類1		試験体の種類2			
試験体区分	タイプB		試験体区分	タイプB	
鋼種	SMA90		鋼種	SMA90	
すべり/降伏耐力比 ¹⁾	0.79		すべり/降伏耐力比 ²⁾	0.79	
摩擦面処理	母板	溶融亜鉛メッキに りん酸処理を施す	摩擦面処理	母板	ジンク
	連結板	溶融亜鉛メッキに グリッドプラスト		連結板	溶融亜鉛メッキに グリッドプラスト
すべり係数	最大値	0.50	すべり係数	最大値	0.52
	平均値	0.48		平均値	0.49
	最小値	0.46		最小値	0.46
備考	<p>・上記はM22に関する試験結果を整理したものであるが、原著ではM16、M20、M24に関する試験結果も報告されている。</p>				

3. 異種接合面継手の適用性に関する実験的検討

3-1 はじめに

本研究では、2章の異種接合面継手に関する文献調査と施工実績調査の結果を踏まえ、異種接合面継手の試験体を製作し、すべり耐力確保の観点からその適用性に関する実験的検討を行った。本章では、まず、対象継手と接触面処理について述べ、ボルト締め後のボルト軸力推移を把握するためのリラクゼーション試験とすべり係数を評価するためのすべり耐力試験について報告する。そして、先行研究で報告されている結果も引用して、各異種接合面継手の設計すべり係数について検討する。

3-2 本研究における対象継手と接触面処理

3-2-1 試験体諸元

図 3-1-1 に本研究で使用した試験体の形状と寸法を示す。試験体の母板と連結板には、それぞれ表 3-1-1 に示す SM490YB と SM490YA を用いた。高力ボルトには、表 3-1-2 に示す F10T（呼び径 22mm、首下長さ 85mm）を用いた。試験体寸法は、試験体がすべり先行型となるよう、標準試験片¹⁾を参照して決定した。すなわち、すべり係数を 0.40 とした場合のすべり降伏耐力比 β の設計値（以下、 β_d と表す）は 0.64 となっている。ボルト孔は標準孔とし、ボルトピッチ P や縁端距離 e も標準試験片に準じるものとした。

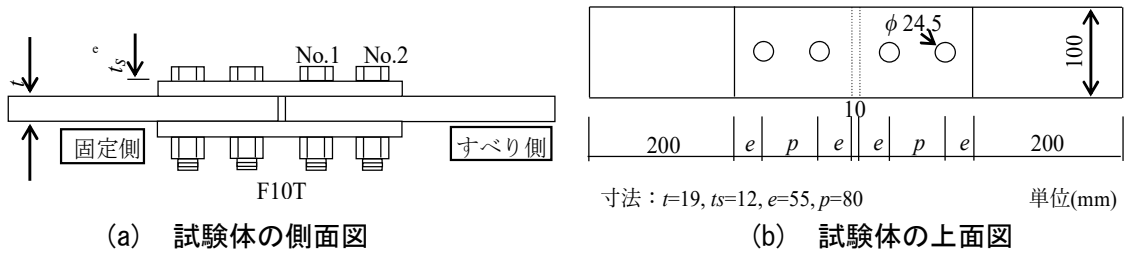


図 3-1-1 試験体の形状と寸法

表 3-1-1 試験体の材料特性（鋼板）

鋼種	板厚 [mm]	機械的性質			化学成分[%]					適用部位
		降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	伸び[%]	C	Si	Mn	P	S	
SM490YA	12	430	519	23	0.15	0.19	1.1	0.011	0.005	連結板
SM490YB	19	437	530	23	0.15	0.19	1.08	0.023	0.007	母板

表 3-1-2 試験体の材料特性（高力ボルト）

シリーズ I

等級	ボルト径	首下長さ [mm]	ボルト				ナット	座金	トルク 係数值 (平均値)		
			4号試験片				製品	製品			
			耐力 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	伸び[%]	絞り[%]	引張荷重 [kN]	硬さ (HRC)		硬さ (HRC)	
F10T	M22	85	999	1054	18	70	328	33	29	39	0.137

シリーズ II

等級	ボルト径	首下長さ [mm]	ボルト				ナット	座金	トルク 係数值 (平均値)		
			4号試験片				製品	製品			
			耐力 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	伸び[%]	絞り[%]	引張荷重 [kN]	硬さ (HRC)		硬さ (HRC)	
F10T	M22	85	1019	1074	19	69	332	32	25	40	0.131

本研究ではこのような試験体を，検討する接合面構成に応じて 18 種類製作した（表 3-1-3）．接合面構成は，継手内の各接合面の分類（タイプ A，タイプ B，または接触面が継手内で統一）と，各板の接触面の状態や仕様を表す（同表参照）．試験体は接合面構成ごとに 3 体ずつ用意したため，その総数は 54 体である．うち 33 体は 2018 年に製作し試験を実施した．残りの 21 体は 2019 年に製作し試験を実施した．2019 年の試験体は試験後の 2018 年の試験体の鋼板を再利用（表面は再処理）して製作し，どちらの年の試験体も同一の工場で作成されたが，グリットブラストで使用された研削材の状態，施工者，気温，湿度，風況等の違いの影響を考慮して，次節以降では 2018 年の試験と試験体をシリーズ I，2019 年の試験と試験体をシリーズ II と区別する．

異種接合面継手タイプ A の試験体（試験体 A と呼ぶ）としては，耐候性鋼材を裸仕様で使用した新設箱桁等のボルト継手について外面を無機ジンク塗布せず製作する場合を想定し，2 種類の接合面構成を対象とした．いずれもナット側の接触面について箱桁内面を想定した無機ジンク塗布としているが，試験体 A-b1 ではボルト頭側の接触面を発せい前の箱桁外面（粗面状態）を想定したグリットブラストに依る接触面仕上げ（以下，ブラスト）とした．これに対して，試験体 A-n1 ではボルト頭側の接触面を発せい後の箱桁外面を想定し自然さびとしている．以上のように，試験体 A は，道示や鉄標で示されている表面処理の組み合わせとした．

異種接合面継手タイプ B の試験体（試験体 B と呼ぶ）としては，既設部材への無機ジンクの代わる接触面の現場仕様や，道示・鉄道標準で使用が認められている接触面の組み合わせとして，6 種類の接合面構成を選定した．連結板はいずれも新設として無機ジンクであるが，母板の仕様はそれぞれ異なる．すなわち，試験体 B-b2 では，無機ジンク塗布を省略したブラストとしている．試験体 B-g では，狭あいな空間での簡易工具に依る方法として，動力工具（ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用）に依る接触面仕上げ（以下，グラインダー）としている．試験体 B-v では同様に，狭あいな空間での簡易工具に依る方法として，縦回転式動力工具（ブリストルブラスター）に依る接触面仕上げ（以下，縦回転式）としている．試験体 B-o では，ブラストに依る素地調整が不要な塗装仕様として，有機ジンクリッチペイント（以下，有機ジンク）塗布とした．試験体 B-n2 では，ブラストの後に発せいたした場合として自然さびとしている．試験体 B-a では，数日程度での発せいが可能であり鉄骨建築のボルト継手に採用されている¹¹⁾，さび促進剤に依る赤さび面（以下，薬剤さび）としている．以上のように，試験体 B の母板は，道示や鉄標で示されていないが，現場での作業性が良いと考えられる表面処理を用いた．

また，接触面が継手内で統一された試験体 C も用いた．試験体 C は，上述の仕様それぞれについて異種接合面継手の試験体と比較するため，9 種類の接合面構成（C-b1，C-b2，C-s，C-v，C-il，C-i2，C-o，C-n1，C-n2，C-a）となっている．なお，接触面の仕様を表す記号の中で，b1，il，n1 は 2018 年に製作された試験体における，それぞれブラスト，無機ジンク，自然さびの接触面であるのに対して，b2，i2，n2 は 2019 年に製作された試験体における，それぞれブラスト，無機ジンク，自然さびの接触面である．ブラスト同士，無機ジンク同士，自然さび同士で仕様を統一し，可能な限り同条件となるよう製作を行ったが，製作年が異なる場合には同条件とは見なせない場合もあり得ると考え，末尾に 1 または 2 を付け区別することとした．

表 3-1-3 本章の研究で使用した試験体一覧

シリーズ I

継手分類	試験体名 (接合面構成)	位置	接合面 (母板側-連結板側)	座金との接触面		
異種接合面継手	異種非接触型	A-b	ボルト頭側	ブラスト-同左	ブラスト	
			ナット側	無機ジンク-同左	無機ジンク	
		A-n	ボルト頭側	自然さび-同左	自然さび	
			ナット側	無機ジンク-同左	無機ジンク	
		異種接触型	B-v	ボルト頭側	縦回転式-無機ジンク	無機ジンク
				ナット側	同上	同上
	B-o		ボルト頭側	有機ジンク-無機ジンク	無機ジンク	
			ナット側	同上	同上	
	B-a	ボルト頭側	薬剤さび-無機ジンク	無機ジンク		
		ナット側	同上	同上		
	標準的な継手	C-b	ボルト頭側	ブラスト-同左	ブラスト	
			ナット側	同上	同上	
C-v		ボルト頭側	縦回転式-同左	*		
		ナット側	同上	同上		
C-i		ボルト頭側	無機ジンク-同左	無機ジンク		
		ナット側	同上	同上		
C-o		ボルト頭側	有機ジンク-同左	有機ジンク		
		ナット側	同上	同上		
C-n		ボルト頭側	自然さび-同左	自然さび		
		ナット側	同上	同上		
C-a		ボルト頭側	薬剤さび-同左	*		
		ナット側	同上	同上		

*動力工具(ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用)により黒皮を完全に除去

シリーズ II

継手分類	試験体名 (接合面構成)	位置	接合面 (母板側-連結板側)	座金との接触面
異種接合面継手 タイプB	B-b2	母板表側	ブラスト-無機ジンク	無機ジンク
		母板裏側	同上	同上
	B-g	母板表側	グラインダー-無機ジンク	無機ジンク
		母板裏側	同上	同上
	B-n2	母板表側	自然さび-無機ジンク	無機ジンク
		母板裏側	同上	同上
同種接合面継手	C-b2	母板表側	ブラスト-同左	ブラスト
		母板裏側	同上	同上
	C-g	母板表側	グラインダー-同左	*
		母板裏側	同上	同上
	C-i2	母板表側	無機ジンク-同左	無機ジンク
		母板裏側	同上	同上
	C-n2	母板表側	自然さび-同左	自然さび
		母板裏側	同上	同上

*動力工具(ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用)により黒皮を完全に除去

3-2-2 接触面処理

a) 粗面系

シリーズⅠのグリットブラスト仕上げでは、黒皮を完全に除去し、表面粗さパラメータ RzJIS が 75 μ m 以下となるように行った。シリーズⅡのグリットブラスト仕上げでは、再利用する鋼板の旧接触面を完全に除去し、表面粗さパラメータ RzJIS が 75 μ m 以下となるように行った。

縦回転式動力工具仕上げでは、一般的な回転式の動力工具（ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用）により黒皮を完全に除去した後、安定的な仕上がりを実現するため熟練技術者に施工を依頼した。下向き姿勢で試験体の長手方向に縦回転式工具を前後移動させ（図 3-2-1）、1 接触面（ボルト孔数 2）当たり約 2 分かけて丁寧に仕上げた。

グラインダー仕上げでは、上述のグリットブラスト仕上げ（シリーズⅡ）により旧接触面を完全に除去するとともに既設部材の接触面状態を模擬した後、動力工具（ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用）により素地調整した。最後はダブルアクションサンダーによって、素地調整程度 2 種（ISO St3 相当）まで接触面を仕上げた。安定的な仕上がりを実現するため熟練技術者に施工を依頼した。施工状況を図 3-2-2 に示す。

b) 塗膜系

無機ジンクと有機ジンクの塗布は、ボルト締めを行う約 4 か月前に実施した。乾燥塗膜厚は 75 μ m を目標値とした。無機ジンクは前項で述べたグリットブラスト仕上げと同等の除せい直後に日本ペイント製ニッペジンキー1000QC-H を塗布し、有機ジンクは動力工具（ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用）により黒皮を完全に除去した後に塗布した。有機ジンクは、高摩擦型ではなく一般のもの（以下、非高摩擦と呼ぶ）とした。

c) さび系

自然さびと薬剤さびは、動力工具（ディスクグライダーとダブルアクションサンダーの併用）により黒皮を完全に除去した粗面上に生成させた。自然さびは約 2 か月間の沿岸部（千葉県富津市）における屋外曝露に依って生成させた（図 3-2-3）。薬剤さびは、さび促進剤（ヒットロック B）に依って生成させた。さび促進剤は、ボルト締めを行う約 48 時間前に塗布（刷毛で 2 回塗り、図 3-2-4）し、その後室内環境で乾燥させた。生成後の自然さびおよび薬剤さびにおいて浮きさびは確認されなかった。



図 3-2-1 縦回転式動力工具による接触面 v の施工状況



図 3-2-2 グラインダーによる接触面 g の施工状況



図 3-2-3 接触面 n の屋外曝露状況



図 3-2-4 室内における接触面 a の乾燥状況

d) 各接触面の表面粗さ

各接触面の状況を把握するため、ボルト締め前に、表面粗さ計（サーフテスト SJ-210）を用いて粗さ計測を実施した。各接触面構成の試験体 1 体ずつを対象に、図 3-2-5 に示す位置において、表面粗さパラメータ R_{zIS} ならびに R_a を計測した。参考のために塗膜系やさび系の接触面についても計測した。各計測箇所では、評価長さを 4mm として 5 回ずつ計測した際の平均値を記録した（評価長さの影響については付録を参照されたい）。計測結果を表 3-2-1 に示す。グリットブラスト仕上げの接触面については、 R_{zIS} が $75\mu\text{m}$ 以下であったことが確認された（付表 3-2-1）。有機ジンク塗布の接触面では、 R_{zIS} と R_a が無機ジンクの場合の 1/3~1/2 程度であった。

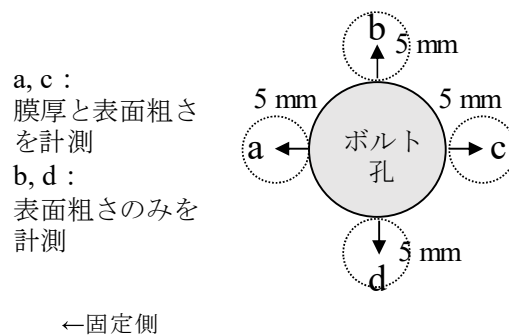


図 3-2-5 接触面に関する表面特性の計測位置

表 3-2-1 表面粗さの計測結果（続く）

シリーズ I

試験体名	R_a				R_{zIS}			
	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]		平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板
A-b-1	ブラスト	無機ジンク	ブラスト	無機ジンク	ブラスト	無機ジンク	ブラスト	無機ジンク
	11.1	5.38	1.51	0.889	39.2	18.8	5.56	3.45
A-n-1	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク
	6.38	6.15	1.01	0.889	22.1	21.7	4.32	3.69
B-v-1	縦回転式	無機ジンク	縦回転式	無機ジンク	縦回転式	無機ジンク	縦回転式	無機ジンク
	5.72	5.82	2.12	1.16	20.1	20.5	7.09	3.87
B-o-1	有機ジンク	無機ジンク	有機ジンク	無機ジンク	有機ジンク	無機ジンク	有機ジンク	無機ジンク
	1.91	5.77	0.392	1.82	7.22	20.2	1.65	5.66
B-a-1	薬剤さび	無機ジンク	薬剤さび	無機ジンク	薬剤さび	無機ジンク	薬剤さび	無機ジンク
	3.93	5.91	0.624	0.642	14.4	20.8	2.17	2.45
C-b-1	ブラスト		ブラスト		ブラスト		ブラスト	
	10.0		1.33		35.2		4.49	
C-v-1	縦回転式		縦回転式		縦回転式		縦回転式	
	3.20		0.847		11.1		3.73	
C-i-1	無機ジンク		無機ジンク		無機ジンク		無機ジンク	
	5.40		1.14		19.6		4.44	
C-o-1	有機ジンク		有機ジンク		有機ジンク		有機ジンク	
	2.05		0.396		7.85		1.62	
C-n-1	自然さび		自然さび		自然さび		自然さび	
	6.47		1.29		22.7		16.5	
C-a-1	薬剤さび		薬剤さび		薬剤さび		薬剤さび	
	3.59		0.758		13.5		2.35	

表 3-2-1 表面粗さの計測結果 (続き)

シリーズ II

試験体名	R_a				R_{z15}			
	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]		平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または 母板	裏面または 連結板	表面または 母板	裏面または 連結板	表面または 母板	裏面または 連結板	表面または 母板	裏面または 連結板
B-b2-1	ブラスト	無機ジंक	ブラスト	無機ジंक	ブラスト	無機ジंक	ブラスト	無機ジंक
	15.3	5.91	2.15	1.24	65.3	21.7	7.29	5.53
B-g-1	グラインダー	無機ジंक	グラインダー	無機ジंक	グラインダー	無機ジंक	グラインダー	無機ジंक
	4.98	5.47	1.40	1.12	25.1	19.6	6.84	4.29
B-n2-1	自然さび	無機ジंक	自然さび	無機ジंक	自然さび	無機ジंक	自然さび	無機ジंक
	5.72	6.19	2.12	0.926	20.1	22.1	7.09	3.91
C-b2-1	ブラスト		ブラスト		ブラスト		ブラスト	
	16.0		1.77		67.4		6.76	
C-g-1	グラインダー		グラインダー		グラインダー		グラインダー	
	4.99		1.35		24.7		5.90	
C-i2-1	無機ジंक		無機ジंक		無機ジंक		無機ジंक	
	5.91		1.25		21.3		4.56	
C-n2-1	自然さび		自然さび		自然さび		自然さび	
	8.20		1.27		28.0		4.86	

表 3-2-2 膜厚の計測結果 (続く)

シリーズ I

試験体名	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または 母板	裏面または 連結板	表面または 母板	裏面または 連結板
A-b	ブラスト	無機ジंक	ブラスト	無機ジंक
	-	79.1	-	10.6
A-n	自然さび	無機ジंक	自然さび	無機ジंक
	58.2	74.7	7.52	14.1
B-v	縦回転式	無機ジंक	縦回転式	無機ジंक
	-	83.3	-	13.3
B-o	有機ジंक	無機ジंक	有機ジंक	無機ジंक
	101	83.6	16.6	14.8
B-a	薬剤さび	無機ジंक	薬剤さび	無機ジंक
	19.5	77.4	4.15	10.8
C-b	ブラスト		ブラスト	
	-		-	
C-v	縦回転式		縦回転式	
	-		-	
C-i	無機ジंक		無機ジंक	
	81.8		13.2	
C-o	有機ジंक		有機ジंक	
	87.0		14.0	
C-n	自然さび		自然さび	
	59.8		8.41	
C-a	薬剤さび		薬剤さび	
	19.8		5.40	

表 3-2-2 膜厚の計測結果（続き）

シリーズ II

試験体名	平均値 [μm]		標準偏差 [μm]	
	表面または母板	裏面または連結板	表面または母板	裏面または連結板
B-b2	ブラスト	無機ジンク	ブラスト	無機ジンク
	-	61.8	-	11.5
B-g	グラインダー	無機ジンク	グラインダー	無機ジンク
	-	63.6	-	9.06
B-n2	自然さび	無機ジンク	自然さび	無機ジンク
	55.6	60.4	6.17	14.6
C-b2	ブラスト		ブラスト	
	-		-	
C-g	グラインダー		グラインダー	
	-		-	
C-i2	無機ジンク		無機ジンク	
	52.9		14.2	
C-n2	自然さび		自然さび	
	57.6		8.40	

表面粗さと同様に、ボルト締めの前に、渦電流式膜厚計（SWT9300）を使用して塗膜やさびといった被覆膜の膜厚を計測した。ただし、全試験体を対象とし、計測箇所は各ボルト孔周辺について2か所とした（図 3-2-5）。計測結果は表 3-2-2 の通りである。シリーズ I の試験体では、無機ジンクの膜厚は 80 μm 程度（目標値にほぼ一致）であり、有機ジンクの膜厚も無機ジンクと同等であった。自然さびの膜厚は薬剤さびの 3 倍程度で比較的厚かったことが確認された。シリーズ II の試験体では、無機ジンクの膜厚は 50～60 μm 程度（結果的に目標値より低め）であった。自然さびについてはシリーズ I と同等であった。

3-2-3 ボルト締め

高力ボルトの締付けはトルク法で行った。1次締めは設計ボルト軸力(205kN)の 60%、2次締めは同 110%を目標に締付けた。各試験体とも、リラクセーション試験に供するボルト 2 本を挿入する側をすべり側、その反対側を固定側として区別した。すべり側の 2 次締めにおける導入ボルト軸力は、3-4-1 で述べるひずみゲージの出力値を参照して管理した。その結果導入された軸力の計測結果は、3-4-2、3-5-2 において示す。固定側については、すべり耐力試験において先行してすべらぬよう、さらに 20kN の増し締めとした。

3-3 異種接合面継手のボルト軸力推移（シリーズ I）

本項では、リラクセーション試験の方法を説明し、得られた試験結果に基づいて、異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。

3-3-1 リラクゼーション試験の方法

リラクゼーション試験は、ボルトの締付け時点から 28 日間 (672 時間) かけて行った。試験対象は、すべり側の合計 66 本のボルトとし、ボルト軸力をひずみゲージ(ゲージ長 5mm)により計測するため、ボルト頭にリード線を通すための孔を明け、ボルト軸部(母材の板厚中央の位置)にひずみゲージ 2 枚を貼付けた(図 3-3-1)。このゲージ 2 枚の出力の平均値をボルト軸部の軸ひずみとし、これに所定の換算率を乗じることでボルト軸力を取得した。この換算率は、事前に同じロットのボルト 3 本を対象とした引張試験に依って決定されたものである。ダミーボルト(締付けをせず、試験体と同じ環境で保管)についても軸ひずみを計測し、温度補正に用いた。

3-3-2 リラクゼーション試験の結果

リラクゼーション試験の結果を表 3-3-1 に示す。締付け直後(約 30 秒後)と 672 時間後(28 日後)におけるボルト軸力の計測結果を、それぞれ導入ボルト軸力と残存ボルト軸力として示し、それぞれの軸力の設計ボルト軸力に対する比率(以下、設計軸力比率と呼ぶ)と、残存ボルト軸力の導入ボルト軸力に対する比率(以下、軸力残存率と呼ぶ)についても示している。なお、計測の不具合に因り軸力が計測できなかった項目もあり、それらは表中において×で示している。導入ボルト軸力の設計軸力比率は 106%~118%であり、3-2-3 で述べた目標値(110%)に近い値であった。

まず、試験体 C に関する軸力残存率の経時変化を図 3-3-2 に示す。図中には、接合面構成ごとに求めた回帰直線と決定係数も示している。同図からは、試験体 C において、軸力残存率が指数関数的に減衰したことが確認できる。ただし、その低下速度は接合面構成ごとに異なる傾向が示されており、28 日後

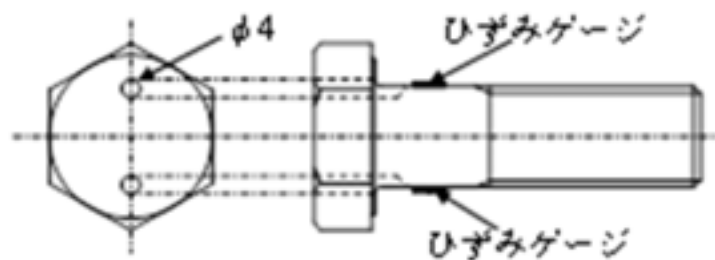
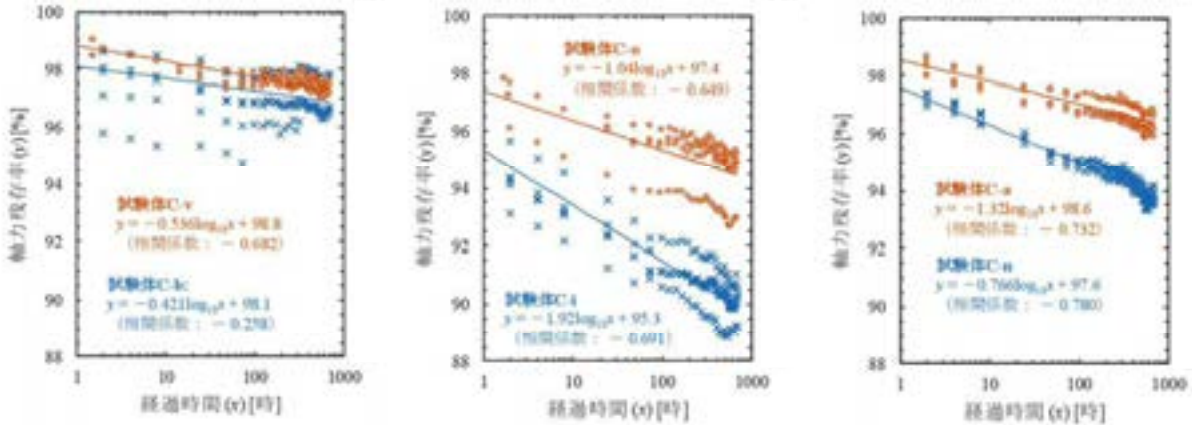


図 3-3-1 接触面に関する表面特性の計測位置

表 3-3-1 リラクゼーション試験の結果

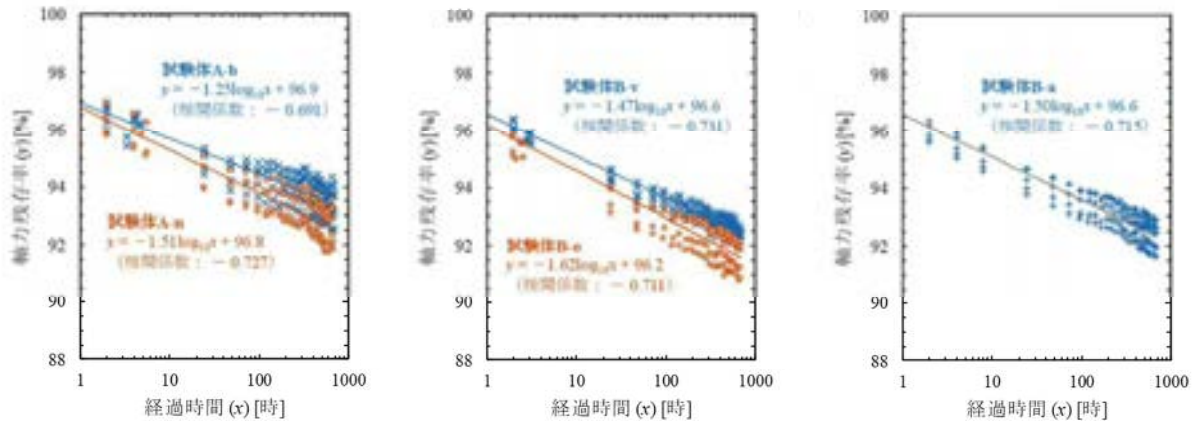
試験体	異種接合面継手の試験体															同種接合面継手の試験体														
	締付け直後					28日後					試験体平均	締付け直後					28日後													
	導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		軸力残存率 [%]			導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		軸力残存率 [%]										
第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	3体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	3体平均									
A-b	-1	226	229	110.5	111.9	212	215	103.5	104.9	93.7	93.7	C-b	-1	226	228	110.4	111.1	×	224	×	109.3	×	97.8	97.22						
	-2	217	217	105.8	105.9	204	204	99.5	99.5	94.0	94.0		-2	242	235	117.8	114.8	234	234	113.9	×	96.7								
	-3	224	225	109.5	109.8	209	209	101.9	102.0	93.1	92.8		-3	239	234	116.6	113.9	231	227	112.6	×	96.6								
A-n	-1	229	228	111.5	111.5	210	211	102.4	103.2	91.9	92.6	C-v	-1	218	224	106.4	109.4	213	218	103.8	106.5	97.6	97.4	97.38						
	-2	226	222	110.2	108	×	201	×	98.1	×	92.1		-2	241	234	117.6	114.2	235	235	114.5	×	97.4								
	-3	224	221	109.2	108.0	208	208	101.4	101.4	92.8	92.8		-3	225	227	109.8	110.8	219	221	106.9	107.9	97.4								
B-v	-1	220	226	107.3	110.0	203	209	99.1	101.8	92.3	92.5	C-i	-1	225	226	109.6	110.2	206	204	104.4	99.7	90.6	90.4	90.27						
	-2	223	225	109.0	109.9	207	208	100.8	101.4	92.0	92.3		-2	223	225	108.6	109.7	203	202.6	98.8	×	91.0								
	-3	218	224	106.4	109.3	201	201	98.3	98.3	92.4	92.4		-3	227	225	110.9	×	×	×	×	×	×								
B-o	-1	232	229	113.4	111.6	212	210	103.4	102.3	91.2	91.6	C-o	-1	225	223	109.7	108.7	209	209	102.0	102.1	94.6	93.9	94.45						
	-2	234	229	114.3	111.5	216	211	105.3	102.7	92.0	92.1		-2	220	222	109.0	108.1	210	210	102.1	102.6	95.2	94.9							
	-3	223	223	108.8	111.7	205	202	98.5	98.5	90.8	90.8		-3	228	238	115.9	116.0	×	225	×	109.8	×	94.6							
B-a	-1	229	235	111.8	109	×	198	×	96.6	×	91.7	C-n	-1	231	234	112.6	113.9	218	219.3	107.0	107.0	93.6	93.6	93.81						
	-2	216	223	105.4	113.7	198	216	104.8	105.3	91.7	92.7		-2	221	224	107.9	109.4	207	210	101.0	102.6	93.9	93.8							
	-3	231	233	114.5	117	217	216	105.9	104.8	92.5	92.5		-3	227	227	110.9	×	×	×	×	×	×	93.7							
C-a	-1	229	229	111.8	111.8	217	217	103.1	103.1	92.7	92.7	C-a	-1	233	229	113.8	111.8	224	220	109.4	107.5	96.1	96.1	96.33						
	-2	219	221	109.5	110.9	214	213	104.4	103.9	96.2	96.2		-2	225	221	109.8	108.0	217	213	105.6	103.9	95.9	96.2							
	-3	221	227	110.5	110.5	214	219	108.9	107.0	96.8	96.6		-3	219	227	112.5	110.5	212	219	104.6	106.7	96.8	96.6							

×は計測できなかった項目を表す。
平均値の計算ではこれらを除外している。



(a) 粗面系 (試験体 C-b, C-v) (b) 塗装系 (試験体 C-i, C-o) (c) さび系 (試験体 C-n, C-a)

図 3-3-2 軸力残存率の経時変化 (同種接合面継手の試験体)



(a) タイプ A (試験体 A-b, A-n) (b) タイプ B (試験体 B-v, B-o) (c) タイプ B (試験体 B-a)

図 3-3-3 軸力残存率の経時変化 (異種接合面継手の試験体)

における軸力残存率の3体平均値（接合面構成の特性を表す代表値）によると、軸力低下が著しい順に試験体 C-i, C-n, C-o, C-a, C-b, C-v となっている。

つづいて、試験体 A, B に関する軸力残存率の変化を図 3-3-3 に示す。同図においても、軸力残存率が指数関数的減衰を示している。この傾向は以降も続くと推測され、異種接合面継手においても同種接合面継手と同様に、軸力残存率が指数関数的に減衰するとみなしてよいと考えられる。また、軸力残存率の低下速度は、接合面構成ごとに多少異なる傾向が示されており、28 日後における軸力残存率の3体平均値からは、軸力低下が試験体 B-o, B-v, A-n, B-a, A-b の順位に顕著であったことがうかがえる。ただし、いずれの試験体でも軸力残存率は粗面系の試験体 (C-b, C-v) 未満であったものの試験体 C-i 以上の値であった。

3-3-3 ボルト軸力低下の支配因子

ここでは、試験体 A, B の軸力残存率を、接合面構成ごとに、試験体 C の減衰率に基づき推定することを試み、その結果から異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。推定にあたって参照する試験体 C は、試験体 A, B と同様の条件で施工された接触面を有する試験体である（以下、基準試験体と記す。異種接合面継手の各試験体について 2 種類ずつ存在する）。軸力残存率としては締付けから 672 時間後の試験体における軸力残存率の3体平均値（表 3-3-1）を用い、想定因子の異なる 2 つの方法で推定した結果の推定精度比較から支配因子を検討する。

a) 基準試験体軸力残存率の平均値による推定（方法 I）

ある接合面構成の軸力残存率 r を次式により求める。

$$\begin{aligned} r &= 1 - \delta \\ &= 1 - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_{\text{others}}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 δ はその構成の軸力減衰率、 δ_1 はその構成の第 1 種被覆膜に関連した軸力減衰率、 δ_2 は同第 2 種に関連した軸力減衰率、 δ_{others} は被覆膜以外の因子（鋼材のリラクセーション、ねじ部・ワッシャー等の影響）による軸力減衰率である。 δ_i ($i = 1, 2$) は、粗面系の接触面では 0 とする。

δ_i は、基準試験体における実測の軸力残存率 r_i (3 体平均値) より、次のように表せるものとする。

$$\delta_i = \frac{1}{2}(1 - r_i - \delta_{\text{others}}) \quad (2)$$

ここで、 δ_{others} は試験体によらないと仮定している。結局、式(1)、(2)より、 r は次のように求まる。

$$r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) \quad (3)$$

このように、基準試験体軸力残存率の平均値により r を推定する方法を、方法 I と呼ぶこととする。

b) 被覆膜以外の因子と膜厚差も考慮した推定（方法 II）

次式で求まる δ_i を式(1)に代入することで r を算定する。

$$\delta_i = \begin{cases} \frac{t_i}{t_{i,r}}(1 - r_i - \delta_{\text{others}}) & \text{(被覆膜あり)} \\ 0 & \text{(被覆膜なし)} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 t_i は r を推定する接合面構成の第 i 種被覆膜の推定合計膜厚、 $t_{i,r}$ は第 i 種被覆膜を有する基準試験体の推定合計膜厚¹²⁾である。推定合計膜厚は、各試験体における実測膜厚の3体平均値（表 3-3-2）

をボルトに締め付けられる被覆膜面数（例えば、試験体 B-v では 4、C-i では 6）で乗じることで得られる。式(4)においても δ_{others} は試験体によらないと仮定している。ただし、式(3)では δ_{others} は相殺されているが、式(4)に基づき r を算定する際には δ_{others} は必ずしも相殺されない。そこで、 δ_{others} を次のように求めることとした。

$$\delta_{\text{others}} = 1 - \frac{1}{2}(r_{\text{blast}} + r_{\text{vertical}}) \quad (5)$$

ここで、 r_{blast} と r_{vertical} は、それぞれ接合面構成 C-b と C-v の軸力残存率（3 体平均値）であり、 δ_{others} は 2.69% となった。

このように、被覆膜以外の因子として、基準試験体との膜厚の違いや、鋼材のリラクセーション、ねじ部・ワッシャー等の影響をより具体的に考慮して r を推定する方法を、方法 II と呼ぶこととする。

c) 推定結果の比較

試験体 A、B の r について、実測値と方法 I、II による推定値を比較した結果を図 3-3-4 に示す。同図は、方法 I により r を推定した場合、試験体 A に対しては実測値より小さな r を、試験体 B に対しては実測値より大きな r を与え、ボルト軸力の低下を過小評価する傾向があることを示している。一方、方法 II を用いると軸力残存率の推定値の精度が向上することが示されている。

方法 II によってより高い精度で実測値を再現できたことから、次のことが示唆される。すなわち、異種接合面継手においては、各接触面における被覆膜の有無・種類、被覆膜の膜厚、鋼材のリラクセーション、ねじ部・ワッシャー等がボルト軸力低下の支配因子であると考えられる。一方、タイプ B において、異種の接触面が接触している影響については、これを考慮しない方法 II によって実測値が高い精度で再現されたことから、今回検討した組合せにおいてその影響は小さく、高々方法 II の再現誤差程度であると推察される。

3-4 異種接合面継手のすべり挙動（シリーズ I）

本項では、はじめにすべり耐力試験について説明する。つづいて、得られた試験結果と観察されたすべり性状について報告し、先行研究の結果も引用して、異種接合面継手におけるすべり係数について考察する。

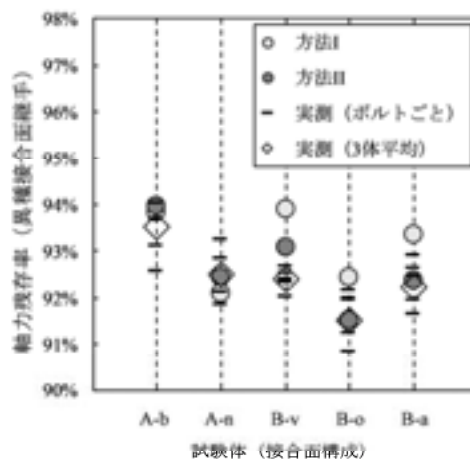


図 3-3-4 基準試験体（試験体 C）の試験結果に基づく軸力残存率の推定結果

3-4-1 すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は、リラクセーション試験後に実施した。いずれの試験体も、試験日の2日前から当日までの間に最後のボルト軸力計測（得られた軸力を以下、試験直前のボルト軸力と呼ぶ）を行ってから載荷した。試験状況を図3-4-1に示す。

載荷においては、東京工業大学が所有する載荷能力1000kNの万能材料試験機を用い、引張荷重を2kN/s程度の速度で主すべりが発生するまで単調増加させた。載荷中は、100Hzのサンプリングレートで荷重を計測した。また、母板間の相対変位、第1ボルト（すべり側の試験体内側ボルト）のボルト孔における母板-連結板間の相対変位（以下、第1ボルト孔の相対変位と呼ぶ）についても同じサンプリングレートで計測した。すべり耐力は、主すべりの発生によって大きな音（すべり音）と共に荷重低下が始まった時点の荷重値とした。

3-4-2 すべり耐力試験の結果

すべり耐力試験の結果を表3-4-1に示す。計測の不具合に因り計測できなかった項目は×で示している。表中には、主すべり発生状況も表記している。いずれの試験体も主すべり発生時に明瞭な荷重低下を示したため、すべり耐力は明確に特定できた。ただし、縦回転式、有機ジンク、自然さびの接触面を有する試験体では、すべり音が確認されない場合が多かった。

表中のすべり係数は次式により算出した。

$$\mu_i = \frac{P_{cr}}{mnN} \quad (6)$$

ここに、 P_{cr} はすべり耐力、 m (=2) は接合面数、 n (=2) はボルト本数、 N はボルト軸力、 μ_i はすべり係数であり、添え字 i はすべり係数が設計軸力を N として求めたもの ($i=1$) か、試験直前のボルト軸力を N として求めたもの ($i=2$) かを表している。表3-4-1には、すべり係数のばらつきを表す推定量として標準偏差も表記している。標本数が3ではあるが、異種接合面継手の各試験体に関する標準偏差は、標準的な継手の各試験体に関する標準偏差と同等の値であった。得られたすべり係数の具体的な比



図3-4-1 すべり耐力試験の状況

較は、3-4-4 において行う。

すべり耐力試験で得られた、各試験体の荷重-相対変位関係を図 3-4-2 に示す。同図からわかる通り、主すべりが発生するまでの間、試験体 A, B においても荷重は単調に増加した。すべり耐力までの荷重領域において、異種接合面継手はすべり耐力以下の荷重に対して同種接合面継手と同等に安定した剛性を示し得るものと考えられる。

表 3-4-1 すべり耐力試験の結果

異種接合面継手の試験体											同種接合面継手の試験体														
試験体	試験直前のボルト軸力 [kN]			すべり耐力 [kN]	すべり係数			主すべり発生状況			試験体	試験直前のボルト軸力 [kN]			すべり耐力 [kN]	すべり係数			主すべり発生状況						
	第1ボルト	第2ボルト	試験体平均		試験体ごと	μ_1		μ_2		すべり音**		第1ボルト孔	母板間***	第1ボルト		第2ボルト	試験体平均	試験体ごと	μ_1		μ_2		すべり音**	第1ボルト孔	母板間***
						3体平均	標準偏差*	3体平均	標準偏差*										3体平均	標準偏差*	3体平均	標準偏差*			
A-b	-1	212	218	215	489	0.597	0.575	0.569	0.564	1	0.127	0.301	C-b	-1	×	223	223	515	0.628	0.655	0.577	0.591	1	0.123	0.366
	-2	204	×	204	461	0.562	0.019	0.566	0.007	1	0.153	0.290	-2	233	×	233	522	0.637	0.040	0.560	0.040	1	0.163	0.378	
	-3	208	209	209	464	0.566	0.607	0.556	0.603	1	×	0.247	-3	230	222	226	575	0.702	0.636	0.636	0.636	1	(0.161)	(2.926)	
A-n	-1	209	212	211	520	0.634	0.607	0.616	0.603	1	(0.057)	(0.202)	-1	213	224	219	415	0.507	0.491	0.475	0.456	1	0.053	0.230	
	-2	×	200	200	459	0.560	0.041	0.573	0.026	1	0.107	0.286	-2	234	222	228	335	0.408	0.076	0.368	0.080	1	0.044	0.174	
	-3	208	×	208	514	0.627	0.618	0.618	0.618	1	0.043	0.248	-3	218	×	218	457	0.557	0.524	0.524	0.524	1	0.051	0.313	
B-v	-1	203	214	208	466	0.568	0.546	0.560	0.544	2	0.019	0.272	-1	205	202	203	464	0.566	0.597	0.571	0.602	1	0.057	0.202	
	-2	207	209	208	426	0.519	0.025	0.511	0.028	3	0.077	0.213	-2	201	×	201	508	0.619	0.028	0.631	0.030	1	0.116	0.271	
	-3	201	×	201	451	0.549	0.559	0.559	0.559	3	0.111	0.289	-3	201	209	205	496	0.605	0.604	0.604	0.604	1	0.090	0.275	
B-o	-1	212	207	210	333	0.406	0.401	0.398	0.397	3	0.052	0.183	-1	207	208	208	263	0.321	0.311	0.317	0.299	3	0.051	0.167	
	-2	215	205	210	331	0.404	0.007	0.395	0.003	3	0.044	0.164	-2	212	209	211	262	0.319	0.015	0.311	0.027	3	0.056	0.154	
	-3	202	×	202	323	0.394	0.400	0.400	0.400	3	0.038	0.148	-3	×	225	225	241	0.294	0.268	0.268	0.268	3	(0.100)	(1.784)	
B-a	-1	×	198	198	487	0.594	0.593	0.615	0.585	1	0.108	0.256	-1	217	220	218	642	0.783	0.780	0.736	0.745	1	(0.397)	(2.037)	
	-2	215	217	216	489	0.596	0.003	0.566	0.026	1	0.101	0.281	-2	206	212	209	633	0.771	0.008	0.756	0.010	3	0.227	0.522	
	-3	212	210	211	484	0.590	0.574	0.574	0.574	1	0.084	0.235	-3	×	216	216	644	0.786	0.745	0.745	0.745	1	0.174	0.535	
C-a	-1	224	217	221	653	0.796	0.796	0.790	0.740	0.745	1	0.111	0.321	-1	224	217	221	653	0.796	0.790	0.740	0.745	1	0.111	0.321
	-2	214	212	213	648	0.790	0.006	0.760	0.760	0.013	1	0.114	0.375	-2	214	212	213	648	0.790	0.006	0.760	0.013	1	0.114	0.375
	-3	223	214	218	643	0.784	0.784	0.736	0.736	1	0.055	0.327	-3	223	214	218	643	0.784	0.736	0.736	0.736	1	0.055	0.327	

×は計測できなかった項目を表し、平均値の計算ではこれらを除外している。
 *：母集団のばらつきを表す推定量として、不偏分散の平方根を記載した。
 **：確認された場合は1、鈍く小さい音が確認された場合は2、確認されなかった場合は3とした。
 ***：固定側からすべった試験体については、すべり側で主すべりが発生した際の値を参考値として括弧書きで記載した。

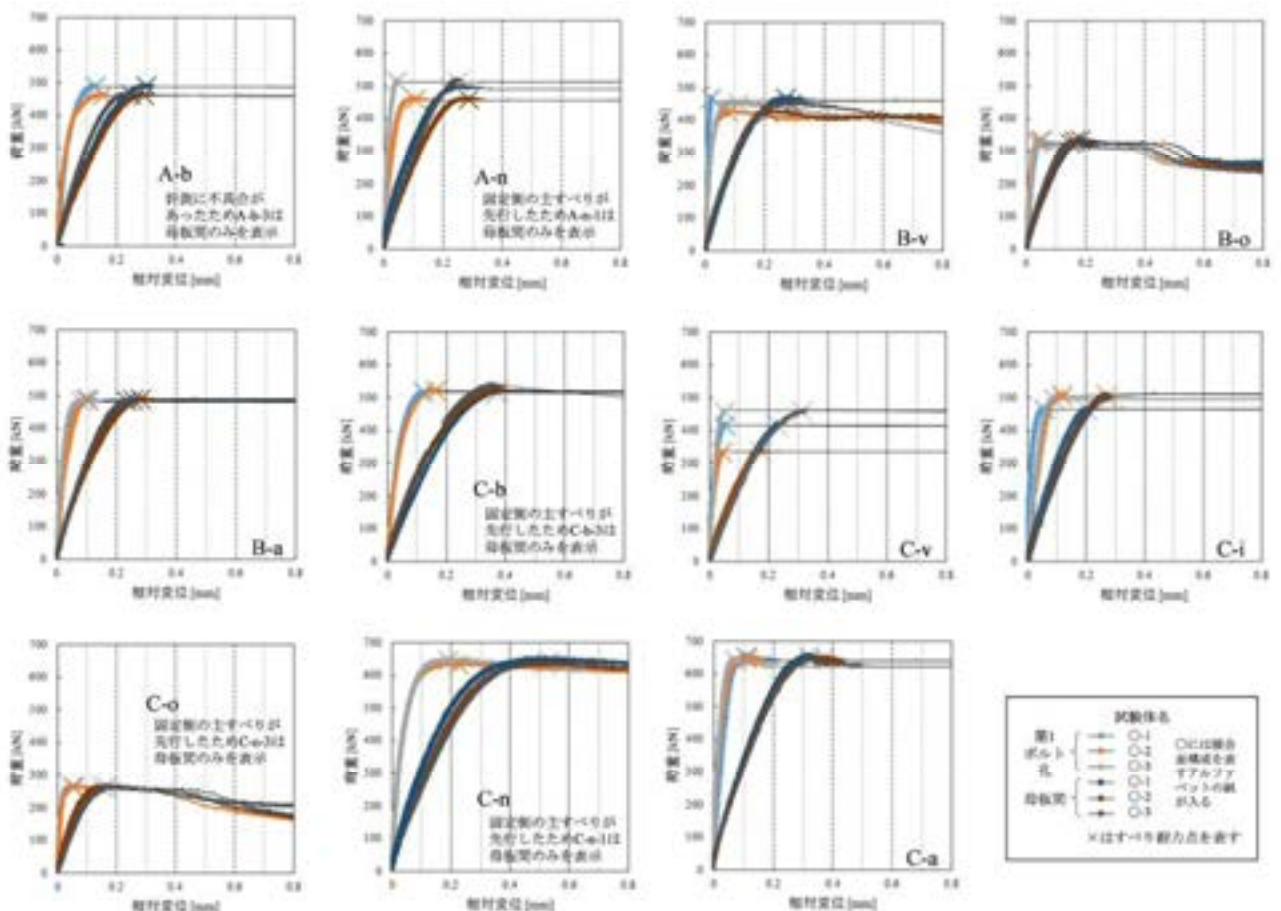


図 3-4-2 各試験体の荷重-相対変位関係

3-4-3 観察されたすべり性状

a) すべり後の接触面性状

すべり後の接触面性状を把握するため、3次元形状測定機（キーエンス VR-3200）を用いた光学計測を行った。計測は、接触面の損傷が著しいボルト孔周辺の状況を比較するため第1ボルト孔周辺を主対象とし、各接触面のすべり前後の状況を比較するため母板と接触していなかった表面（以下、非接触部と呼ぶ）についても対象とした。

まず、試験体Cの連結板に対する計測結果を図3-4-3に示す。いずれもすべり方向を紙面横方向としており、コンター図は計測で得られた高さデータを撮影画像と合成させたものである。試験体C-bの高倍率画像からは、ボルト孔周辺では粗面の細かい凸部が消失しすべり方向に筋目状の傷が発生していることが確認できる。試験体C-vの高倍率画像では、非接触部において確認できるブラシによる傷が、ボルト孔周辺では凸部を中心に消失していることがわかる。試験体C-iの高倍率画像からは、ボルト孔周辺では広い範囲で素地が露出し、塗膜が残存しているのは素地がくぼんでいる部分に限られていることがわかる。一方、試験体C-oにおいては、低倍率のコンター図からわかる通り、塗膜が剥離した領域と対面で剥離した塗膜が付着した領域が入り乱れていた。高倍率画像はボルト孔周辺の中でも塗膜の剥

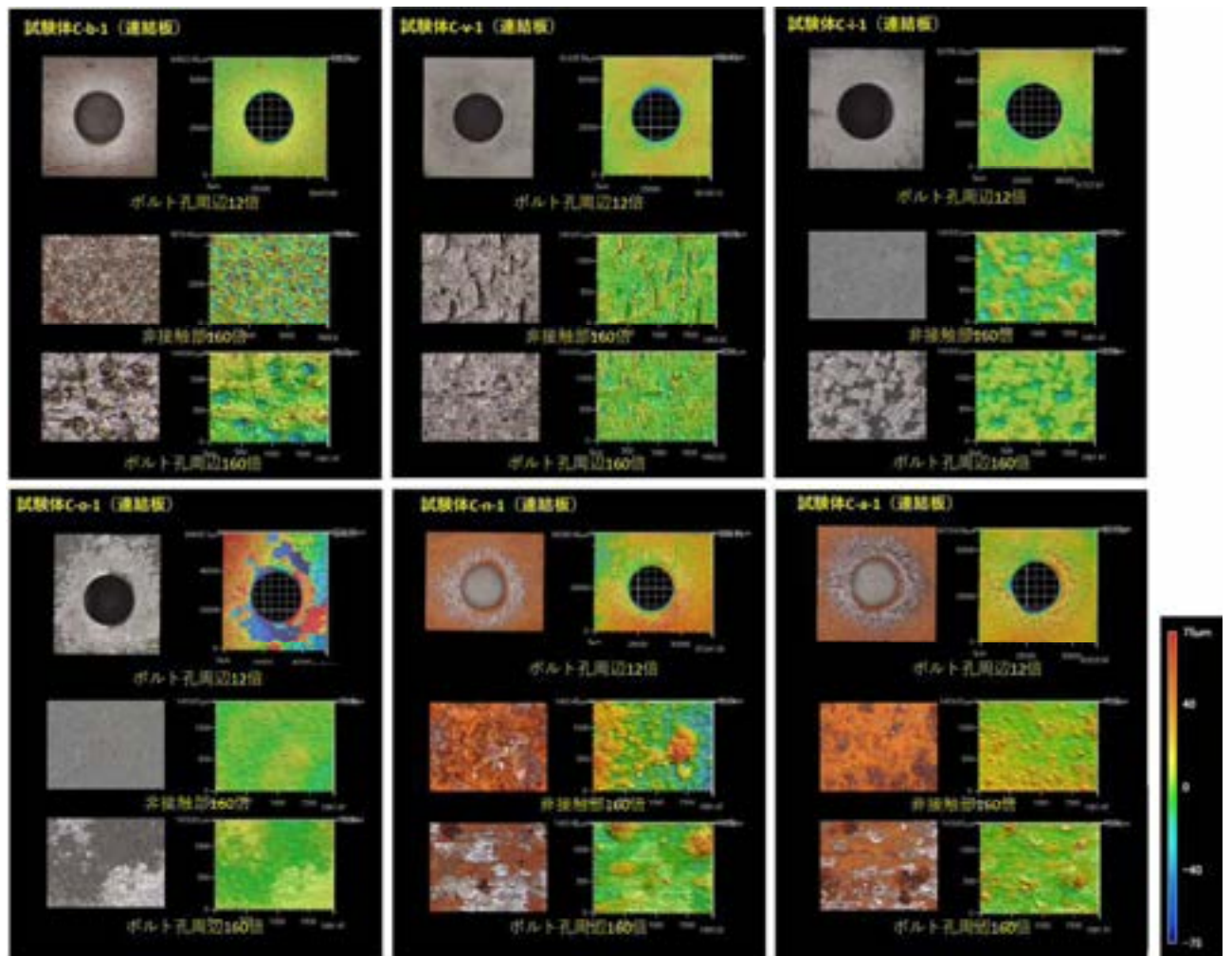


図 3-4-3 すべり後の接触面の計測結果（試験体 C）

離・付着が起きていない領域を撮影したものであり、一部に素地の露出が確認できる。このように、試験体 C-o では塗膜・素地間の界面破壊が支配的であったことがわかる。さび系の試験体 C-n, C-a に関しては、ボルト孔周辺では素地の凸部を中心にさびがすり減っている様子が示されている。

つづいて、試験体 B の連結板と母板について第 1 ボルト孔周辺の計測結果を図 3-4-4 に示す。いずれもすべり方向を紙面横方向としており、同図には比較のために試験体 C の非接触部に対する計測結果（図 3-4-3）を一部再掲している。試験体 B-v においては、高倍率画像から連結板のボルト孔周辺において接触面が著しくすり減り素地も平坦化していることが確認できる。ブラストによる素地の凹凸がほぼなくなるほど表層が素地ごと削り取られており、その程度は基準試験体(C-i)よりも著しいといえる。一方、母板側にはブラシによる傷の凸部において、連結板から絡め取られたと考えられる塗膜が多く残されており、各部ですべり方向に直交するブラシの傷が連結板の接触面に食い込みながらすべっていたものと推察される。試験体 B-o では、高倍率画像に示されているように、ボルト孔周辺においても連結板の膜厚の減少が比較的小さかったことが見てとれ、試験体 B-v とは対照的であった。母板においては、低倍率画像からわかる通り、ボルト孔周辺で塗膜が広い範囲で剥離しており、剥離と付着が入り乱れていた試験体 C-o と状況は異なっていた。剥離した塗膜は連結板に付着し残存するものもあれば、試験体解体時に剥がれ落ちたものもあった。試験体 B-o では、付着が弱いことで母板側の有機ジンク塗膜が選

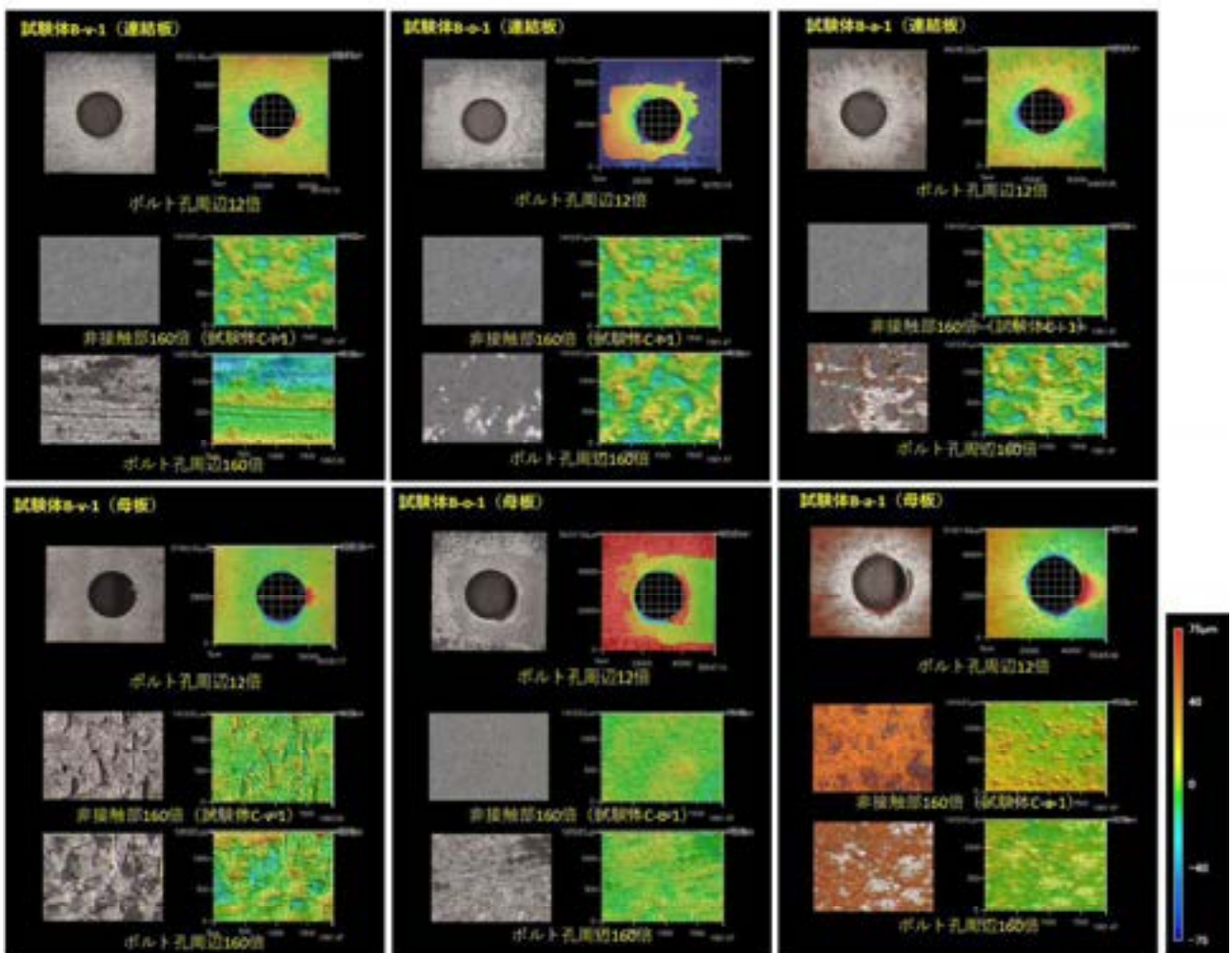


図 3-4-4 すべり後の接触面の計測結果（試験体 B）

択的に剥離したものと考えられる。試験体 B-a では、基準試験体 (C-a, C-i) の接触面の損傷状況と大きな違いは見受けられなかったが、高倍率画像に示されているように連結板側には粉末化した自然さびの付着が認められ、無機ジンクとともに自然さびもすり減っていたことが確認された。

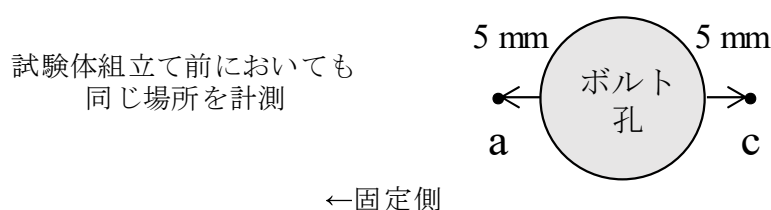
b) すべり後の膜厚

前項で確認された接触面における被覆膜の減少・剥離状況について更に検討するため、すべり試験後の接触面に対する膜厚計測を実施した。計測箇所としては、リラクセーション試験前にも計測した各ボルト孔周辺 2 か所のほか、一般部としてボルト孔の縁から 28mm 離れた 2 か所も含めた (図 3-4-5)。すべり試験後のボルト孔周辺には、ボルトによる締付けの影響とすべり時の擦れの影響が考えられる。一般部ではすべり時の擦れの影響のみが主として考えられる。

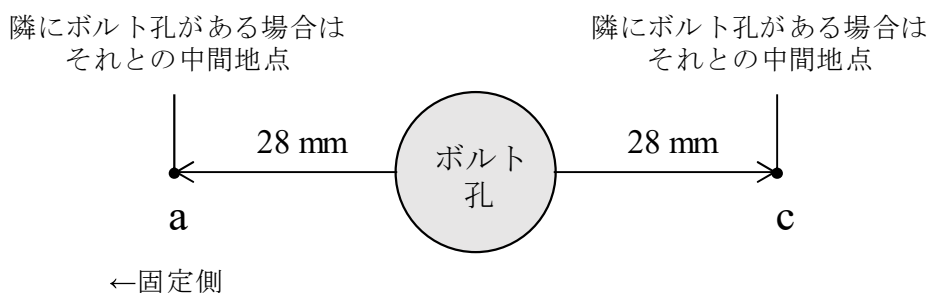
図 3-4-6 は、試験体 C-i, C-o, C-n について、ボルト締め前におけるボルト孔周辺とすべり試験後における一般部の計測結果を比較した結果である。試験体 C-i, C-n では、前者に対して後者がそれぞれ一定に近い割合で低い値を示しており、すべりに因り被覆膜の表層で擦れが生じていたと考えられる。一方、試験体 C-o では両者の差が小さく擦れはほとんど発生しなかったものと推察される。

図 3-4-7 では、これらの接合面構成の試験体について、ボルト締め前とすべり試験後におけるボルト孔周辺の計測結果を比較している。試験体 C-i, C-n については、図 3-4-6 でみたよりも大きな割合で膜厚が低下しており、すべりによる被覆膜の擦れに加え、ボルトの締付けによる被覆膜のクリープによる膜厚減少も大きかったことが示唆されている。一方、試験体 C-o では塗膜の剥離・付着によって複数の箇所においてすべり後の膜厚が大きな増減を示している。

図 3-4-8 では、試験体 B の連結板に関して、ボルト締め前におけるボルト孔周辺とすべり試験後における一般部の計測結果を比較している。試験体 B-o では塗膜の剥離が広範囲に及んでいたため、一般

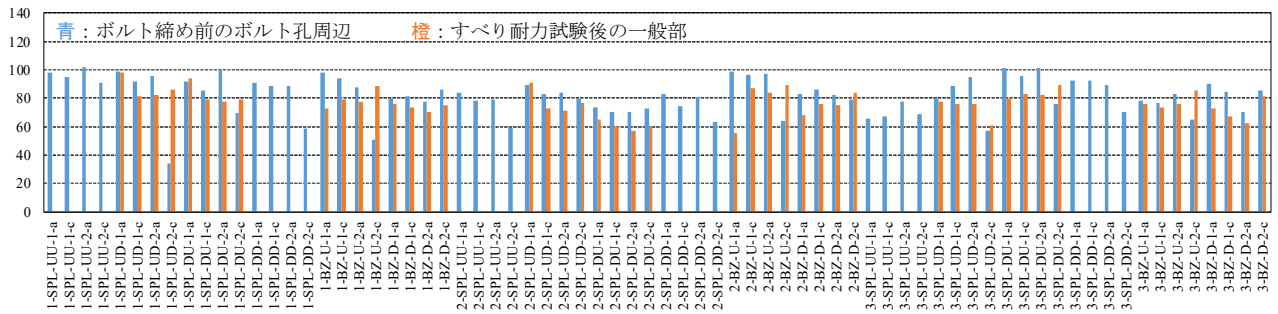


(a) ボルト孔周辺

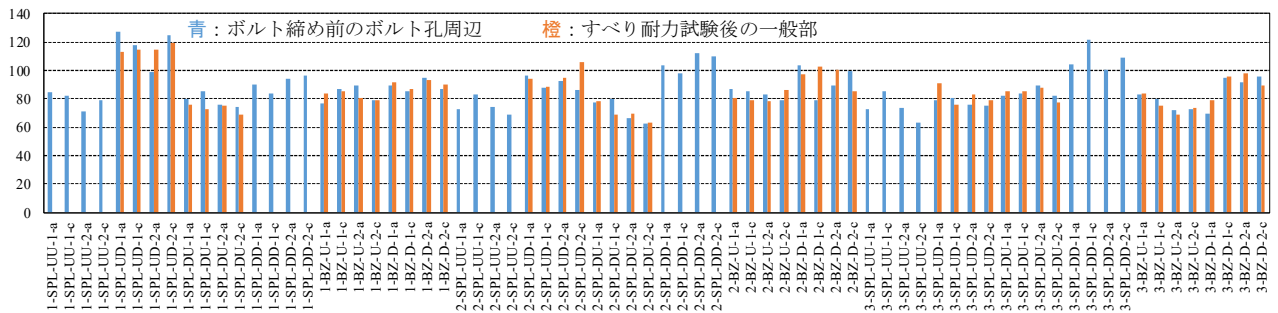


(b) 一般部

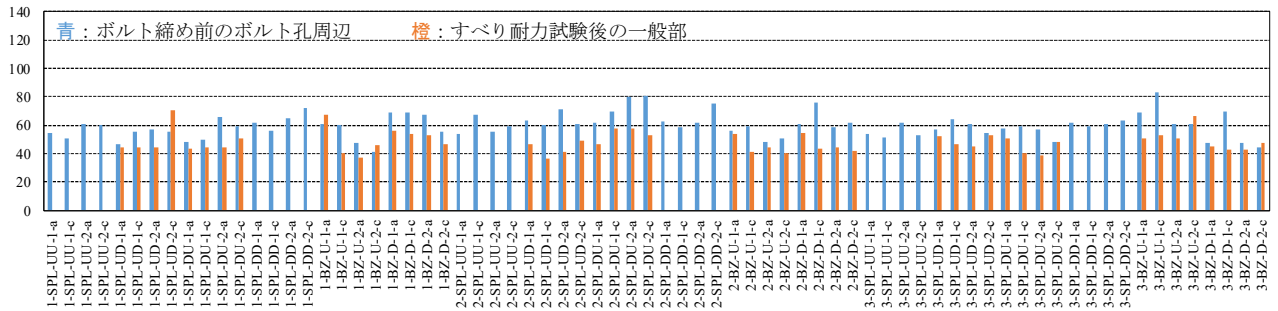
図 3-4-5 すべり耐力試験後における膜厚の計測箇所 (a, c)



(a) 試験体 C-i における膜厚 (単位: μm)



(b) 試験体 C-o における膜厚 (単位: μm)

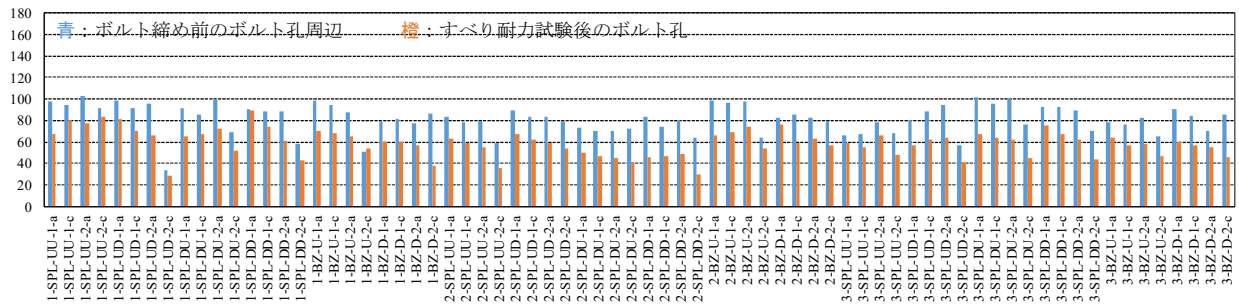


(c) 試験体 C-n における膜厚 (単位: μm)

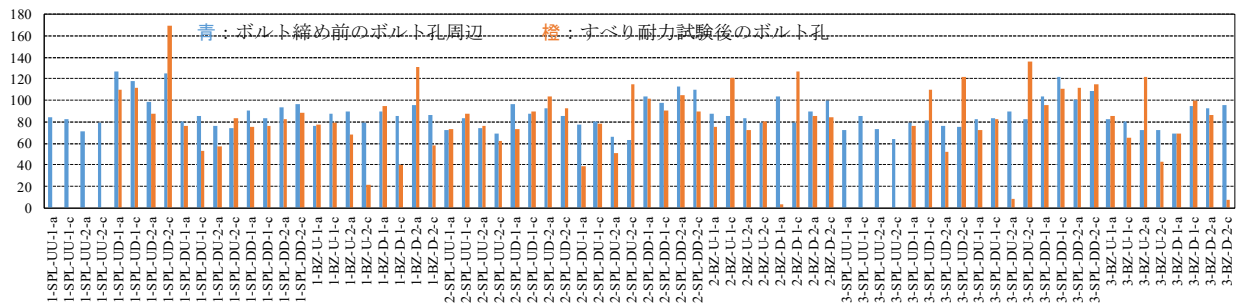
記号は計測箇所を表している。記号A-B-C-D-Eにおいて各アルファベットは次の意味である。

- A: 試験体の個体番号 (1, 2, 3)
- B: 鋼板 (SPL: 連結板側, BZ: 母板側)
- C: 接触面の位置 (UU: 上側連結板の上側, UD: 上側連結板の下側, U: 母板の上側など、ボルト頭側を上、ナット側を下と定義する)
- D: ボルト番号 (第1ボルト: 1, 第2ボルト: 2)
- E: 計測箇所 (図 3-4-5 参照)

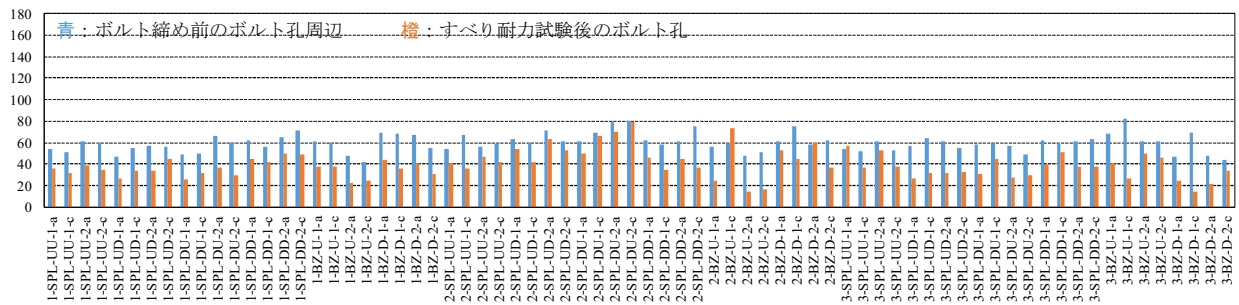
図 3-4-6 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後における一般部の膜厚 (試験体 C)



(a) 試験体 C-i における膜厚 (単位: μm)



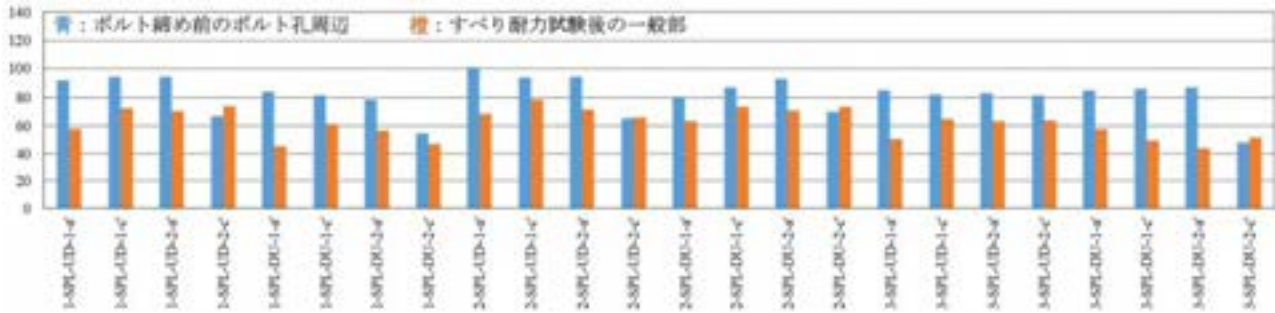
(b) 試験体 C-o における膜厚 (単位: μm)



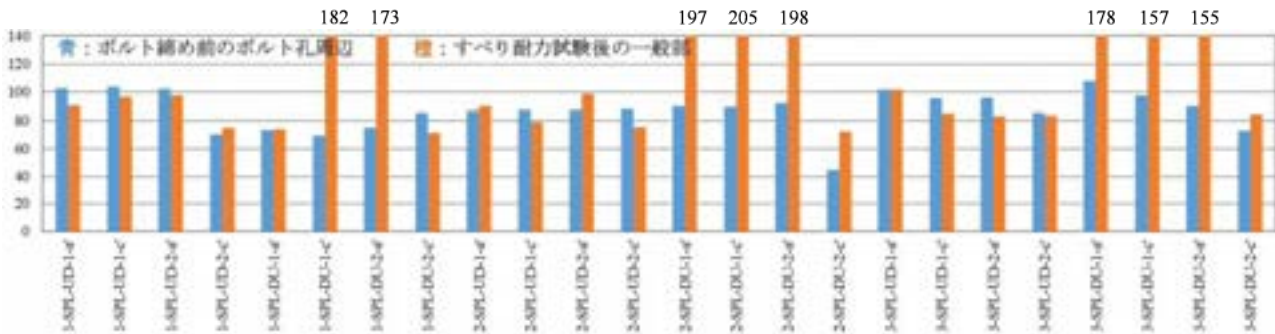
(c) 試験体 C-n における膜厚 (単位: μm)

記号は計測箇所を表している。

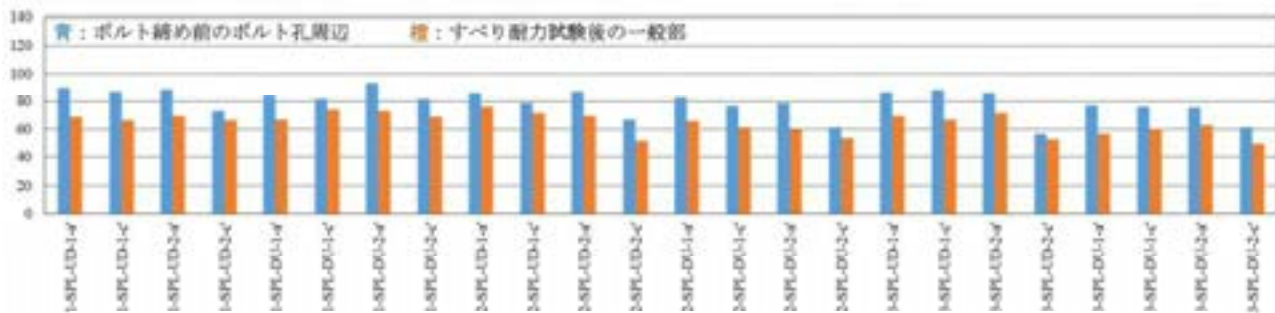
図 3-4-7 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後におけるボルト孔周辺の膜厚 (試験体 C)



(a) 試験体 B-v における膜厚 (単位: μm)



(b) 試験体 B-o における膜厚 (単位: μm)



(c) 試験体 B-a における膜厚 (単位: μm)

記号は計測箇所を表している。

図 3-4-8 ボルト締め前におけるボルト孔周辺の膜厚とすべり試験後における一般部の膜厚 (試験体 B)

部においても 8 か所で大幅な膜厚の増加が計測されている。その 8 か所を除いた計測箇所の平均値の差分 (ボルト孔周辺—一般部) は、試験体 B-v では $19.7\mu\text{m}$ 、試験体 B-o では $2.30\mu\text{m}$ 、試験体 B-a では $14.8\mu\text{m}$ である。連結板における無機ジंकの擦れによる膜厚減少は試験体 B-v、B-a において大きい傾向にあり試験体 B-o では極端に小さかったことが示されている。

3-4-4 すべり係数

a) タイプ A

図 3-4-9 は、タイプ A の試験体のすべり係数 μ_2 と基準試験体のすべり係数 μ_2 (後者は基準すべり係数と記す) を比較したものである。また、清水ら ③ の試験結果 (試験体の β_a は 0.84。試験体 A-b 相当) と、南ら ④ の試験結果 (試験体の β_a は 0.64) も併せて示している。(c) の溶射は、亜鉛アルミ擬合金溶射を指している。図中には、タイプ A の試験体における接触面の組み合わせを記号で示しており、例え

ば「ブラスト | 無機ジンク」は母板の表面側がブラストで裏面側が無機ジンクであることを意味する(以下、タイプ A に関して同様に表す)。同図では、試験体 A のすべり係数の 3 体平均値は、2 つの基準すべり係数の 3 体平均値のうち低いほう(以下 $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ とし、他方を $\bar{\mu}_2^{\text{high}}$ とする)に近い値をとる傾向が示されている。

図 3-4-10 は、次式で定義する相対評価指標 ρ_2 によって、 $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ 、 $\bar{\mu}_2^{\text{high}}$ それぞれに対するタイプ A の試験体で得られたすべり係数 μ_2 の 3 体平均値の近接度を評価した結果である。

$$\rho_2 = \frac{\bar{\mu}_2 - \bar{\mu}_2^{\text{low}}}{\bar{\mu}_2^{\text{high}} - \bar{\mu}_2^{\text{low}}} \quad (7)$$

ここに、 $\bar{\mu}_2$ は異種接合面継手の試験体のすべり係数 μ_2 の 3 体平均値であり、 ρ_2 は $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ に近ければ 0 に、 $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{high}}$ に近ければ 1 に近づく。また、 $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ より小さければ負の値を示す。

図 3-4-10 に示されているように、試験体 A-b の結果以外の試験体に関して ρ_2 は 0 付近の値となった。試験体 A-b に関しては ρ_2 が -2.54 と他よりもかなり低い値を示しているが、これは試験体 A-b では $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ と $\bar{\mu}_2^{\text{high}}$ が近接しており ρ_2 の定義式(7)の分母が 0.01 と小さかったためである。分子の絶対値も 0.03 とま

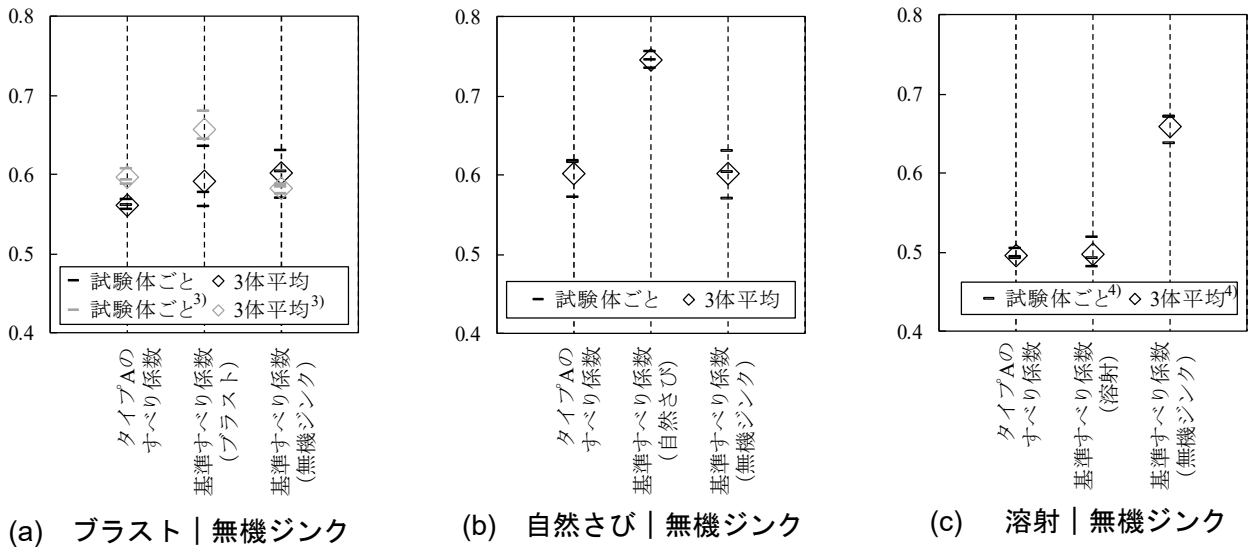


図 3-4-9 異種接合面継手タイプ A の試験体に関するすべり係数 μ_2 の比較

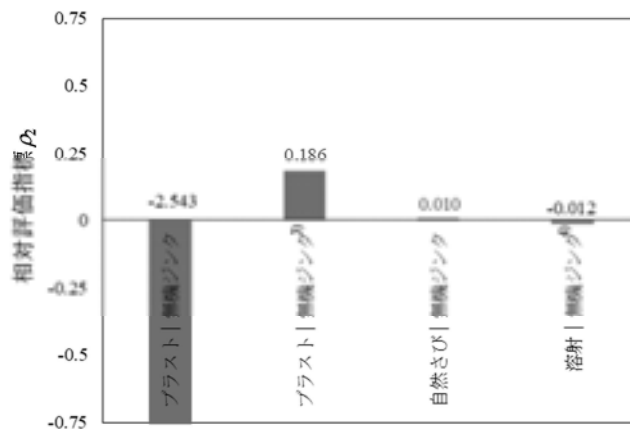


図 3-4-10 タイプ A の試験体で得られたすべり係数の基準すべり係数に対する近接度

た小さいことから、試験体 A-b についても $\bar{\mu}_2$ は $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ に近い値であるといえる。

このように、タイプ A の試験体の 3 体平均値から、タイプ A の継手のすべり係数は 2 種類の接触面のうちすべり係数（同種接合面継手での値）の低いほうに近い値を示す傾向が確認された。タイプ A の継手において、主すべりは基準すべり係数が低い側の接合面での主すべりに誘発されているものと考えられる。

b) タイプ B

図 3-4-11 では、タイプ B の試験体のすべり係数 μ_2 を基準すべり係数と比較している。ここでは、連結板の接触面を本試験の試験体と同様に無機ジンクとした、丹波ら 5), 6), 橋本ら 7), 本多ら 8), 吉岡ら 9) による結果も示している（試験体の β_d はそれぞれ、0.66, 0.72, 0.44, 0.44）。特に、本研究と試験体接

触面の施工条件が近いと考えられるものは同じ図に併記している。また基準すべり係数について、土木学会の指針（案）10) において推奨されている μ_d も赤線で併記している。また図中には、タイプ B の試験体における接触面の組み合わせを記号で示しており、例えば「縦回転式－無機ジンク」は母板側が縦回転式で連結板側が無機ジンクであることを意味する（以下、タイプ B に関して同様に表す）。(f) のグラインダーは、ディスクグラインダーやダブルアクションサンダー等の回転式動力工具で仕上げた接触面（素地調整程度 2 種、ISO St3 相当）を指している。

同図に示されているように、すべり係数は一定のばらつきを有しているものの、基準すべり係数の平均値は橋本ら 7) の自然さび－無機ジンクの結果以外は土木学会の指針（案）10) における μ_d の推奨値以上の値であった。タイプ B のすべり係数についてみると、接触面の組み合わせが縦回転式－無機ジンクと薬剤さび－無機ジンクの試験体では 0.5 以上の値が得られている。ブラスト－無機ジンクのすべり係数においては橋本ら 7) の結果以外ではすべて 0.5 以上となっている。有機ジンク－無機ジンクでは、すべり係数が 0.35～0.40 程度に留まっているが、これは一般の有機ジンク塗料を用いたためと考えられる。実際、高摩擦型の有機ジンクと無機ジンクを組み合わせたタイプ B の試験体では μ_1 として 0.51 が得られている¹³⁾。一方、タイプ B のすべり係数と各基準すべり係数を比較すると、その関係性はタイプ A と異なり様々であることがわかる。

基準すべり係数に対するタイプ B のすべり係数の関係性を ρ_2 によって評価した結果を、図 3-4-12 に示す。本試験と吉岡ら 9) における薬剤さび－無機ジンクのすべり係数および橋本ら 7) のブラスト－無機ジンクのすべり係数に関しては、 ρ_2 が 0 付近の値を示している。一方、本試験における縦回転式－無機ジンクと有機ジンク－無機ジンクのすべり係数については、 ρ_2 がそれぞれ 0.60 と 0.33 であり、異仕様の接触面を含む影響として $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ よりも高い値であったことを示している。逆に、本多ら 8) の薬剤さび－無機ジンクや橋本ら 7) の自然さび－無機ジンクでは ρ_2 がかなり低い値となっている。

縦回転式－無機ジンクの組み合わせで $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ よりも高かった理由としては、前節で試験体 B-v に関して述べた連結板側塗膜（無機ジンク）が著しく削り取られた状況から、連結板の接触面に母板の接触面が深く食込みながらすべった影響が考えられる。有機ジンク－無機ジンクで $\bar{\mu}_2$ が $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ よりも高かった理由としては、低いすべり係数を示した有機ジンクの接触面数がタイプ B の試験体と基準試験体と異なったことが考えられる。すなわち、有機ジンクの接触面数が 2 面の前者では同 4 面の後者よりも塗膜の剥離を起こす弱点の数が少なかったことが影響した可能性がある。実際、前節で述べた通り、試験体 B-o では有機ジンク塗膜においてのみ剥離が認められており、有機ジンク塗膜の弱点が主すべりを誘発

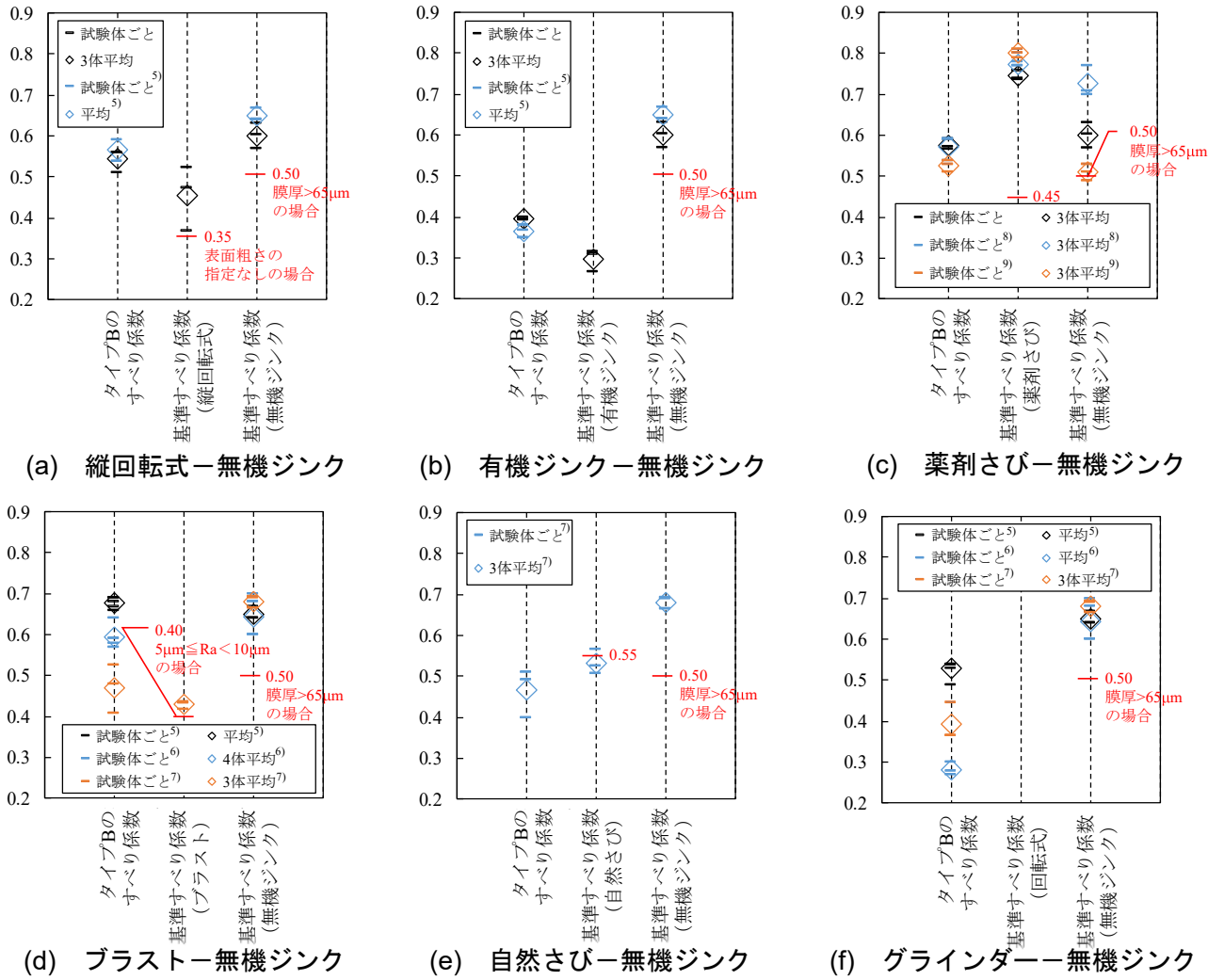


図 3-4-11 タイプ B の試験体に関するすべり係数の比較

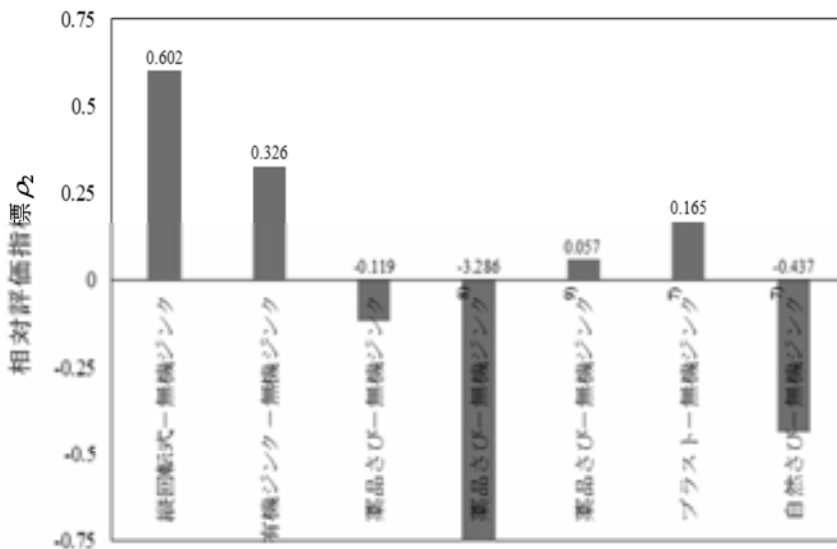


図 3-4-12 タイプ B の試験体で得られたすべり係数の基準すべり係数に対する近接度

したことが示唆されている。一方、本多ら⁸⁾の結果に関して ρ_2 がかなり低い値であった要因としては、理由は不明であるが他の薬剤さびー無機ジンクと比べて、 $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ （無機ジンク）が高かった点が挙げられる。 $\bar{\mu}_2$ については他の薬剤さびー無機ジンクとほぼ同等である。

なお、基準すべり係数データの不足により、縦回転式ー無機ジンク、有機ジンクー無機ジンク、プラスチックー無機ジンク、回転式ー無機ジンクに関する丹波ら⁵⁾、⁶⁾、回転式ー無機ジンクに関する橋本ら⁷⁾の ρ_2 は算出できなかったが、得られている基準すべり係数とタイプBのすべり係数の大きさから、多くの場合 ρ_2 は0付近以上になると推察される。

3-5 異種接合面継手のボルト軸力推移（シリーズII）

本項では、リラクセーション試験で明らかになった締付け後のボルト軸力推移について述べる。そして、3-4で扱ったシリーズI試験体で得られた試験結果とも比較し、異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。

3-5-1 リラクセーション試験の方法

リラクセーション試験は、ボルトの締付け時点から28日間（672時間）かけて行った。試験対象は、すべり側の合計42本のボルトとし、ボルト軸力をひずみゲージ（ゲージ長1mm）により計測するため、3-4-1で述べたようにボルト頭にリード線を通すための孔を明け、ボルト軸部（母材の板厚中央の位置）にひずみゲージ2枚を貼付けた。このゲージ2枚の出力の平均値をボルト軸部の軸ひずみとし、これに所定の換算率を乗じることでボルト軸力を取得した。この換算率は、事前に同じロットのボルト3本を対象とした引張試験によって決定されたものである。同じロットのダミーボルトについても計測を行い、その計測値を温度補正に用いた。

3-5-2 リラクセーション試験の結果

リラクセーション試験の結果を表3-5-1に示す。締付け直後（約30秒後）と672時間後（28日後）におけるボルト軸力の計測結果を、それぞれ導入ボルト軸力と残存ボルト軸力として示し、それぞれの軸力の設計ボルト軸力に対する比率（以下、設計軸力比率と呼ぶ）と、残存ボルト軸力の導入ボルト軸

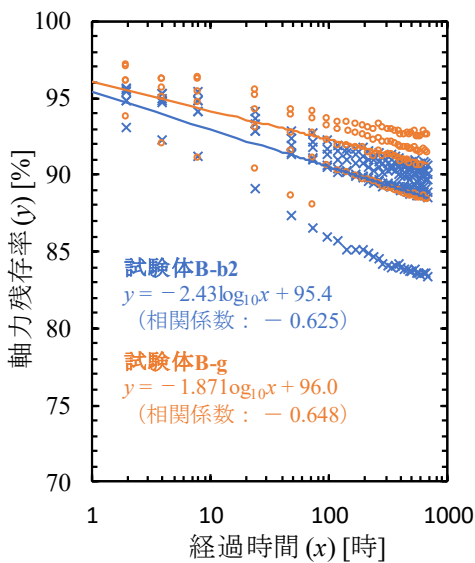
表 3-5-1 すべり耐力試験の結果

異種接合面継手の試験体											同種接合面継手の試験体																					
試験体	締付け直後				28日後							試験体	締付け直後				28日後															
	導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		軸力残存率 [%]						導入軸力 [kN]		設計軸力比率 [%]		残存軸力 [kN]		軸力残存率 [%]													
	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第2ボルト	試験体平均	3体平均		第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	第2ボルト	試験体平均	第1ボルト	試験体平均	3体平均									
B-b2	-1	220	107.5	107.4	200	198	97.5	90.7	90.1	88.54	-1	223	108.6	109.6	×	214	×	104.2	×	94.1	93.51	C-b2	-1	227	110.6	109.6	214	214	104.2	×	94.1	93.51
	-2	222	108.2	107.2	196	195	95.8	88.5	88.7		-2	225	109.7	110.8	212	214	103.3	104.2	94.2	94.0												
	-3	217	106.1	107.2	193	191	94.3	88.9	86.7		-3	229	111.9	107.6	215	214	105.1	104.2	93.9	92.7												
	-1	221	107.7	107.5	184	191	89.8	83.4	86.7		-2	217	105.9	107.6	202	204	98.7	99.7	93.2	92.7												
	-2	220	107.4	107.5	198	191	96.7	90.1	86.7		-3	224	109.3	107.6	206	204	100.7	100.7	92.1	92.7												
B-g	-1	226	110.0	106.8	206	206	100.7	91.5	91.5	90.79	-1	226	110.3	112.3	218	218	106.1	106.2	96.2	94.6	95.43	C-g	-1	234	114.3	112.3	218	218	106.3	106.2	93.0	
	-2	220	107.2	108	206	200	94.7	88.4	90.5		-2	229	111.7	110.3	221	221	107.9	107.9	96.6	96.6												
	-3	223	108.7	107.4	202	202	98.6	92.7	90.7		-3	223	108.9	110.3	×	221	×	107.9	×	96.6												
	-1	228	111.7	107.4	206	202	98.6	92.7	90.7		-2	225	109.7	110.0	×	217	×	105.8	×	95.9												
	-2	221	106.2	107.4	202	202	98.6	92.7	90.7		-3	226	110.3	110.0	217	217	105.8	105.8	95.9	95.9												
B-n2	-1	221	107.7	106.2	200	193	97.5	90.6	88.8	89.23	-1	223	108.8	108.6	201	202	98.2	98.7	90.3	90.9	88.58	C-i2	-1	222	108.4	108.6	203	202	99.3	98.7	91.6	
	-2	219	106.8	105.4	197	195	96.3	90.2	90.1		-2	222	108.4	108.2	×	206	×	100.5	×	93.0												
	-3	213	104.0	105.4	192	195	93.7	90.0	90.1		-3	221	108.0	108.2	206	206	100.5	100.5	93.0	93.0												
	-1	220	107.3	107.4	194	197	94.8	88.3	88.3		-2	217	106.1	105.9	189	182	92.1	89.0	86.8	84.0												
	-2	220	107.4	107.4	200	197	×	×	88.3		-3	217	105.7	105.9	176	182	85.8	89.0	81.2	84.0												
C-n2	-1	245	119.7	115.3	236	236	119.7	115.3	115.3	95.19	-1	245	119.7	115.3	×	×	×	×	×	×	95.19	C-n2	-1	245	119.7	115.3	×	×	×	×	×	
	-2	227	110.9	110.9	236	236	110.9	110.9	110.9		-2	227	110.9	110.9	×	×	×	×	×	×												
	-3	226	114.9	114.9	226	226	114.9	114.9	114.9		-3	226	114.9	110.5	226	216	110.2	105.2	95.9	95.2												
	-1	217	105.7	105.7	200	197	×	×	88.3		-2	217	105.7	105.9	176	182	85.8	89.0	81.2	84.0												
	-2	220	107.4	107.4	200	197	×	×	88.3		-3	217	105.7	105.9	176	182	85.8	89.0	81.2	84.0												

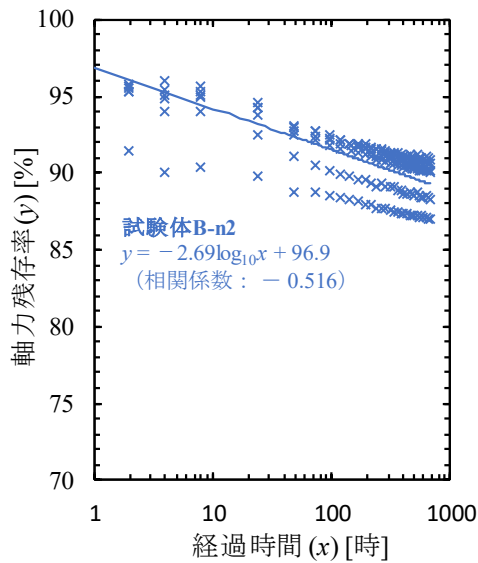
×は計測できなかった項目を表す。
平均値の計算ではこれらを除外している。

力に対する比率（以下、軸力残存率と呼ぶ）についても示している。なお、計測の不具合に因り軸力が計測できなかった項目もあり、それらは表中において×で示している。導入ボルト軸力の設計軸力比率は103%~120%であり、3-4-1で述べた目標値（110%）に概ね近い値であった。

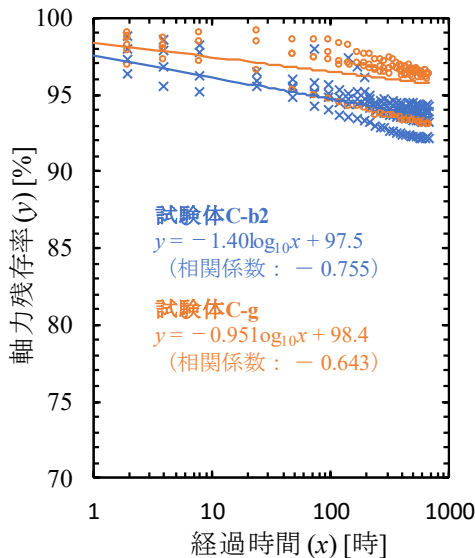
つづいて、試験体 B, C に関する軸力残存率の変化を図 3-5-1 に示す。同図においても、軸力残存率が指数関数的減衰を示している。この傾向は以降も続くと推測され、異種接合面継手においても同種接合面継手と同様に、軸力残存率が指数関数的に減衰するとみなしてよいと考えられる。また、軸力残存率の低下速度は、接合面構成ごとに多少異なる傾向が示されており、28 日後における軸力残存率を図中の回帰直線から推定すると、軸力低下が試験体 C-i2, B-b2, B-n2, B-g, C-b2, C-n2, C-g の順位に顕著であったことがうかがえる。いずれの異種接合面継手の試験体でも軸力残存率は粗面系の試験体（C-b2, C-g）および自然さびの試験体（C-n2）未満であったものの試験体 C-i 以上の値であった。



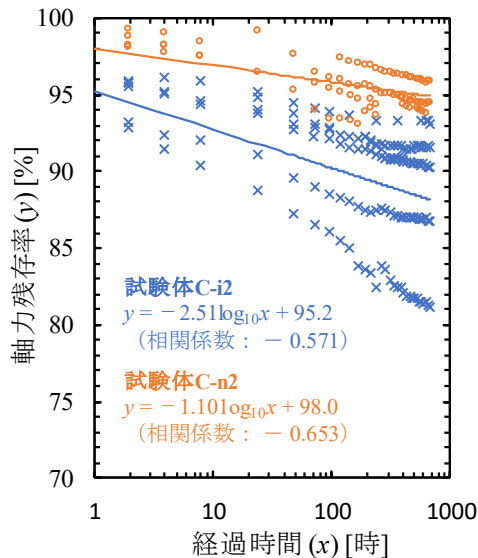
(a) 試験体 B-b2, 試験体 B-g



(b) 試験体 B-n2



(c) 試験体 C-b2, 試験体 C-g



(d) 試験体 C-i2, 試験体 C-n2

図 3-5-1 軸力残存率の経時変化

3-5-3 ボルト軸力低下の支配因子

3-3-3 と同様に、試験体 B の軸力残存率を、接合面構成ごとに、試験体 C の減衰率に基づき推定することを試み、その結果から異種接合面継手におけるボルト軸力低下の支配因子について考察する。

推定にあたっては、ブラストとグラインダーの接触面については δ_i を0とした。 δ_{others} の算定には接合面構成 C-b2 と C-g の軸力残存率（3体平均値）を用い、 δ_{others} は5.53%となった。

試験体 A, B の r について、実測値と方法 I, II による推定値を比較した結果を図 3-5-2 に示す。同図は、方法 I により試験体 B の r を推定した場合、実測値より大きな r を与え、ボルト軸力の低下を過小評価する傾向があることを示している。一方、方法 II を用いると軸力残存率の推定値の精度が向上することが示されている。

方法 II によってより高い精度で実測値を再現できたことから、本章で検討した接合面構成についても、各接触面における被覆膜の有無・種類、被覆膜の膜厚、鋼材のリラクセーション、ねじ部・ワッシャー等がボルト軸力低下の支配因子であると考えられる。一方、タイプ B において、異種の接触面が接触している影響については、これを考慮しない方法 II によって実測値が高い精度で再現されたことから、今回検討した組合せにおいてその影響は小さく、高々方法 II の再現誤差程度であると推察される。

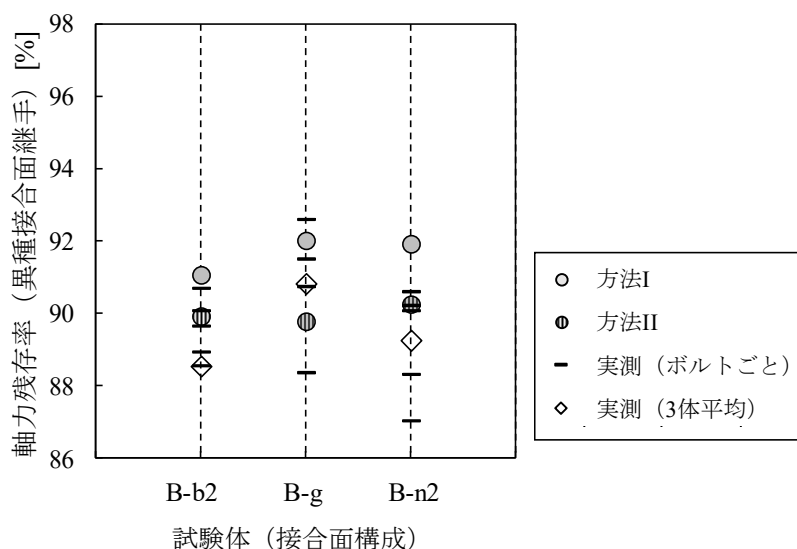


図 3-5-2 基準試験体（試験体 C）の試験結果に基づく軸力残存率の推定結果

3-6 異種接合面継手のすべり挙動（シリーズ II）

本項では、すべり耐力試験で明らかになった異種接合面継手のすべり係数について報告する。

3-6-1 すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は、リラクセーション試験後に実施した。いずれの試験体も、試験日の2日前から当日までの間に最後のボルト軸力計測（得られた軸力を以下、試験直前のボルト軸力と呼ぶ）を行ってから載荷した。試験状況を図 3-6-1 に示す。



図 3-6-1 すべり耐力試験の状況

载荷においては、横浜国立大学が所有する载荷能力 2000kN の万能材料試験機を用い、引張荷重を 2kN/s 程度の速度で主すべりが発生するまで単調増加させた。载荷中は、100Hz のサンプリングレートで荷重を計測した。また、母板間の相対変位、第 1 ボルト（すべり側の試験体内側ボルト）のボルト孔における母板-連結板間の相対変位（以下、第 1 ボルト孔の相対変位と呼ぶ）についても同じサンプリングレートで計測した。すべり耐力は、主すべりの発生によって大きな音（すべり音）と共に荷重低下が始まった時点の荷重値とした。

3-6-2 すべり耐力試験の結果

すべり耐力試験の結果を表 3-6-1 に示す。計測の不具合に因り計測できなかった項目は×で示している。表中には、主すべり発生状況も表記している。いずれの試験体も主すべり発生時にすべり音は確認されなかったが、荷重は明瞭な低下を示したためすべり耐力は明確に特定できた。

すべり耐力試験で得られた、各試験体の荷重-相対変位関係を図 3-6-2 に示す。同図からわかる通り、主すべりが発生するまでの間、試験体 B においても荷重は単調に増加した。すべり耐力までの荷重領域において、異種接合面継手はすべり耐力以下の荷重に対して同種接合面継手と同等に安定した剛性を示し得るものと考えられる。

表 3-6-2 は荷重-相対変位関係における初期軸剛性を試験体間で比較したものである。向かい合う 2 枚の母板端間（標準間隔 10mm）の相対変位に基づく母板間軸剛性と、すべり側第 1 ボルト位置の母板と連結板の相対変位に基づく第 1 ボルト孔軸剛性に加え、母板間が連結板なしに母板と同一の鋼板で連続的につながっている場合を仮定した初期軸剛性（38000 kN/mm）と母板間軸剛性の比（母板間軸剛性比と呼ぶ）を示している。同表の母板間軸剛性比に関する各試験体の 3 体平均値をみると、およそ 1/20 ~ 1/12 であり、主すべり発生前の荷重が小さい段階でも微小なすべりが漸増していることが推察される。

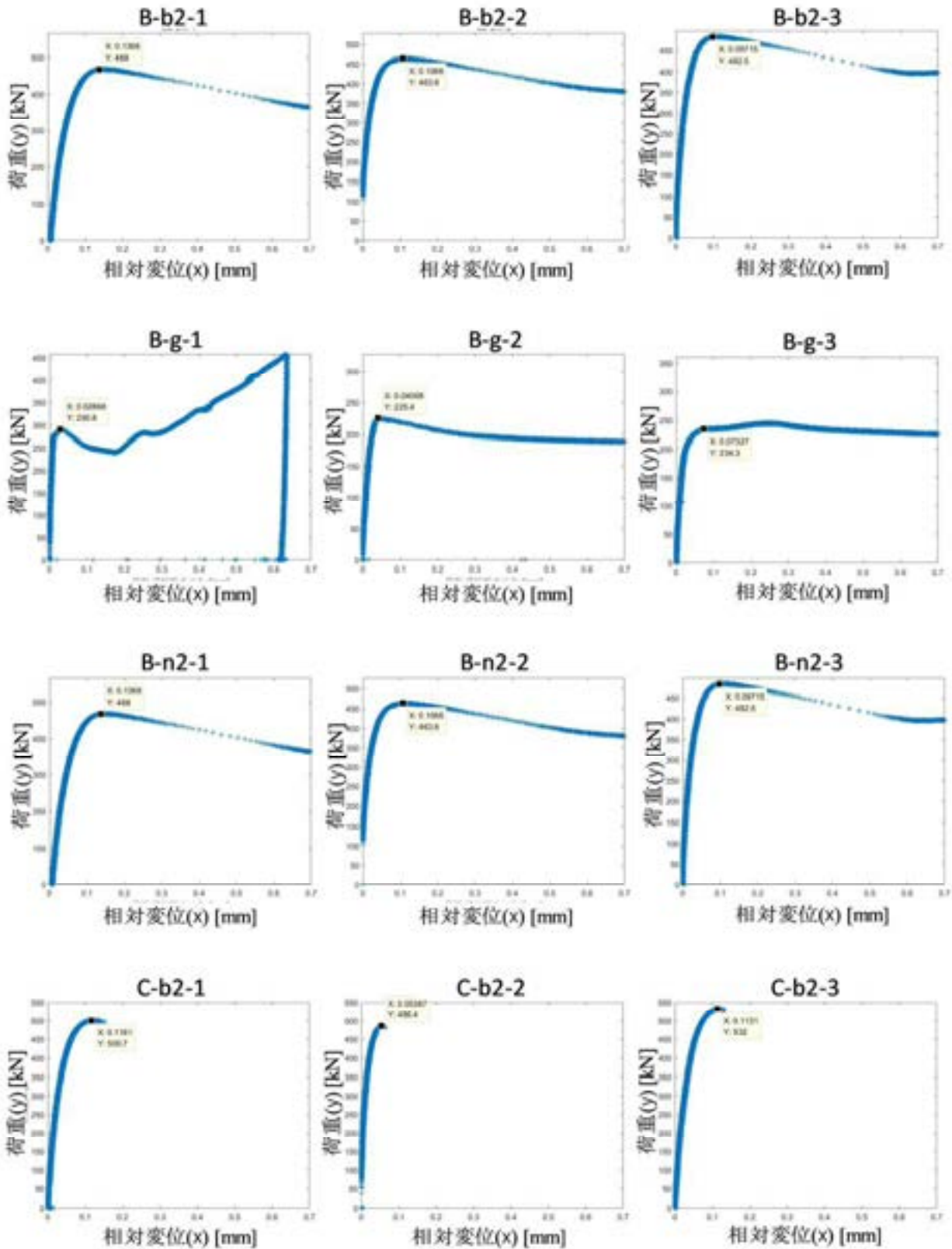
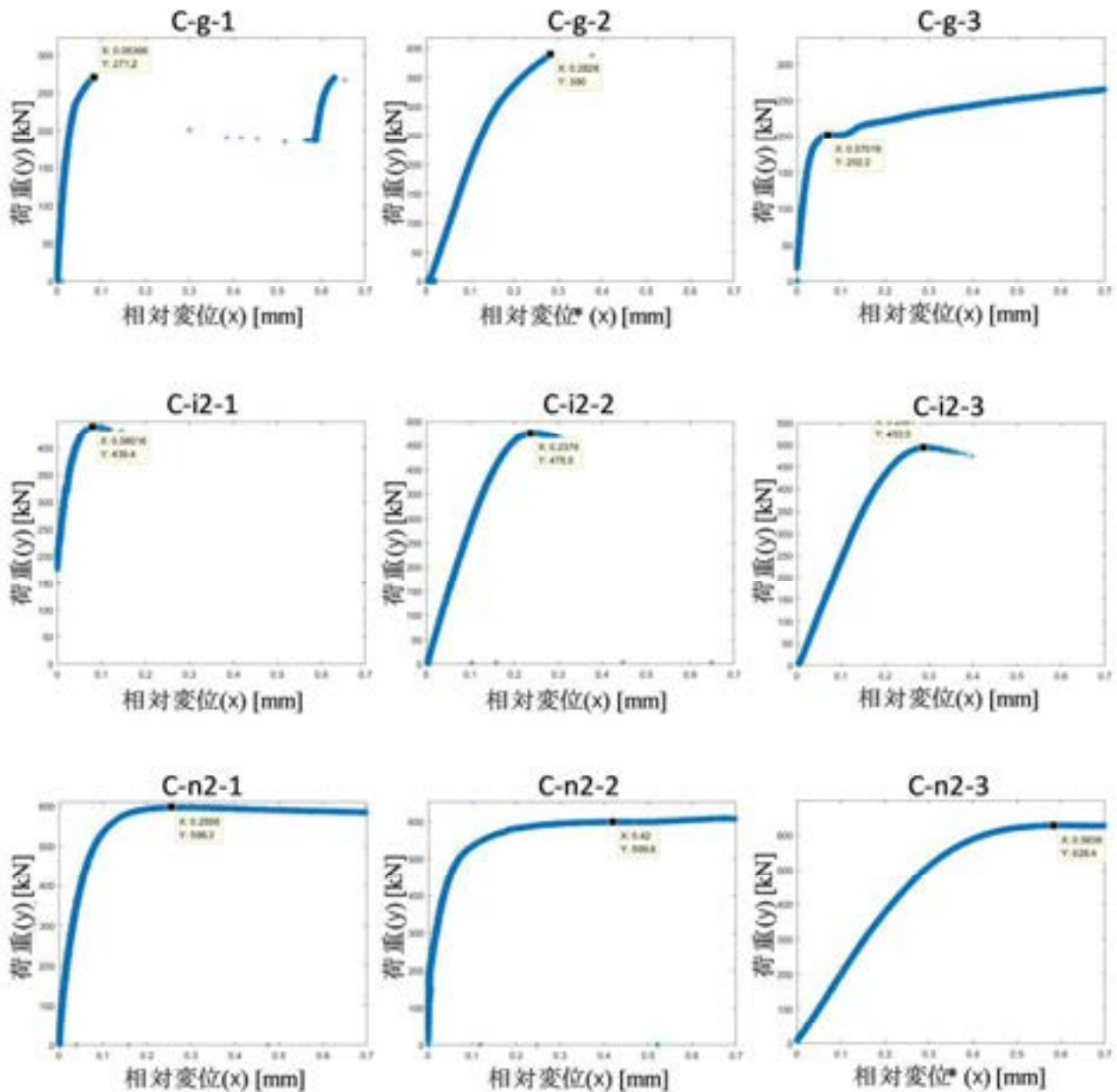


図 3-6-2 各試験体の荷重-相対変位関係 (続く)



※: 計測の不具合により第1ボルト孔における相対変位の代わりに母板間の相対変位を表示

図 3-6-2 各試験体の荷重-相対変位関係 (続き)

各試験体の3体平均値を比較すると、試験体 C-g では約 1/20 であり最も低いことがわかる。異種接合面継手の中では試験体 B-b2 と試験体 B-g では試験体 C-i2 と同等以上の母板間軸剛性比であることがわかる。

図 3-6-3 では、第1ボルト孔軸剛性と母板間軸剛性を比較している。同図から、第1ボルト孔で評価すると初期軸剛性は接合面構成によらず試験体間で大きく異なっており、主すべり発生前の微小なすべりがすべり側と固定側の接合面の全面で均一に進行する訳ではないことを示している。

3-6-3 得られたすべり係数

本節で示したシリーズ II の試験結果を図 3-4-11 に追記したものが、図 3-6-4 である。同図に示され

表 3-6-2 各試験体の荷重-相対変位関係における初期軸剛性

試験体	第1ボルト孔 試験体ごと [kN/mm]	母板間		母板間軸剛性比	
		試験体ごと [kN/mm]	平均値 [kN/mm]	試験体 ごと	平均値
B-b2	-1	1.153.E+04	2.908.E+03	1/ 13.1	1/ 12.1
	-2	2.024.E+04	2.976.E+03	1/ 12.8	
	-3	1.795.E+04	3.528.E+03	1/ 10.8	
B-g	-1	1.853.E+04	2.622.E+03	1/ 14.5	1/ 15.0
	-2	9.933.E+03	2.540.E+03	1/ 15.0	
	-3	9.674.E+03	2.459.E+03	1/ 15.5	
B-n2	-1	1.398.E+04	2.624.E+03	1/ 14.5	1/ 16.3
	-2	1.096.E+04	1.909.E+03	1/ 19.9	
	-3	9.021.E+03	2.482.E+03	1/ 15.3	
C-b2	-1	1.477.E+04	2.775.E+03	1/ 13.7	1/ 14.1
	-2	2.185.E+04	2.654.E+03	1/ 14.3	
	-3	1.272.E+04	2.668.E+03	1/ 14.2	
C-g	-1	7.588.E+03	2.178.E+03	1/ 17.4	1/ 20.2
	-2	×	×	×	
	-3	6.580.E+03	1.587.E+03	1/ 23.9	
C-i2	-1	1.056.E+04	2.563.E+03	1/ 14.8	1/ 14.7
	-2	9.422.E+03	2.738.E+03	1/ 13.9	
	-3	8.248.E+03	2.456.E+03	1/ 15.5	
C-n2	-1	1.146.E+04	3.317.E+03	1/ 11.5	1/ 15.6
	-2	1.730.E+04	2.143.E+03	1/ 17.7	
	-3	1.692.E+04	1.870.E+03	1/ 20.3	

×は計測できなかった項目を表す

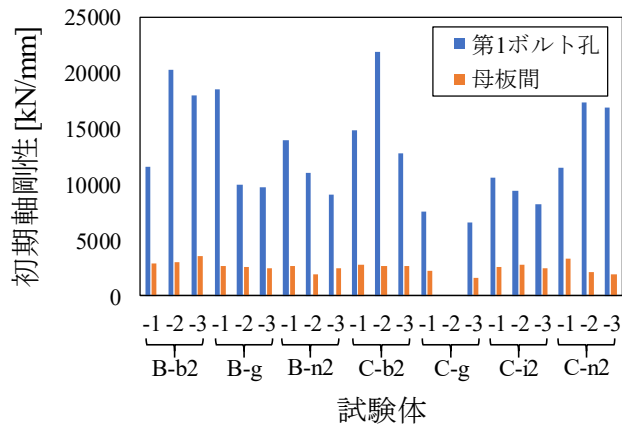
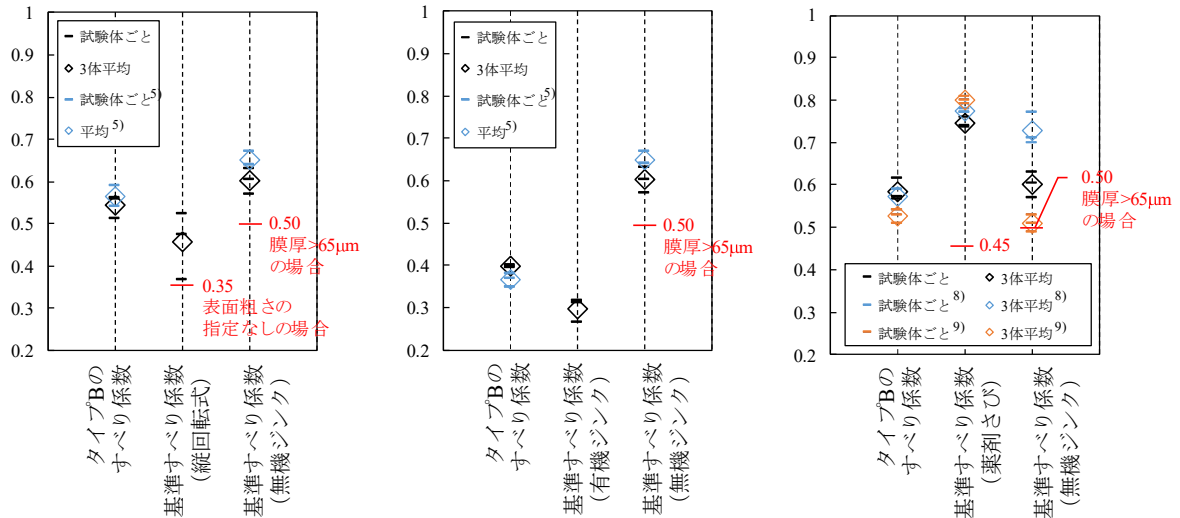
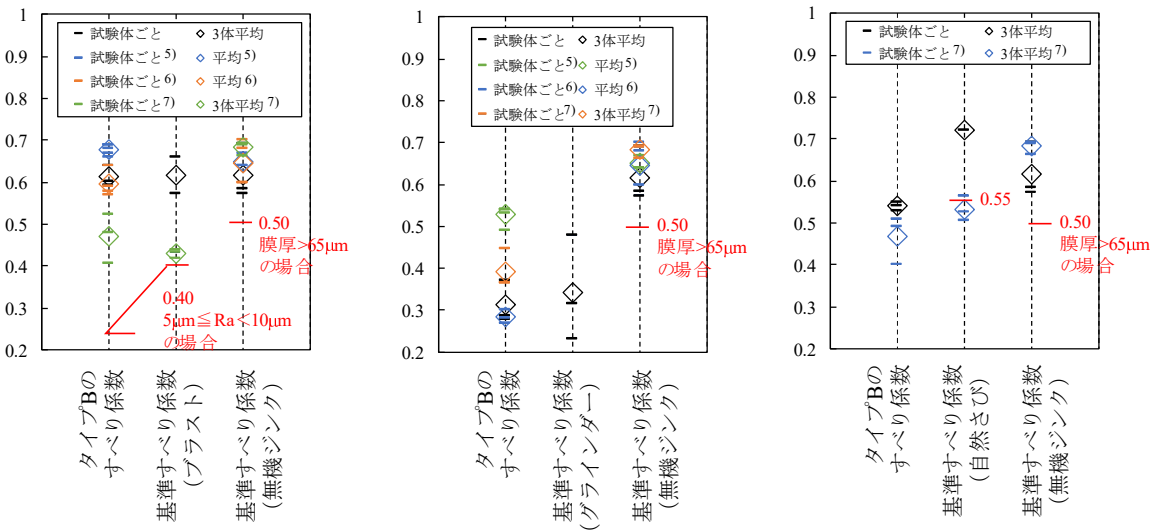


図 3-6-3 評価位置ごとの初期軸剛性の比較

ているように、すべり係数は一定のばらつきを有しているものの、基準すべり係数の平均値は橋本ら 7 の自然さび-無機ジंकの結果以外は土木学会の指針（案）¹⁰⁾における μ_d の推奨値以上の値であった。タイプ B のすべり係数についてみると、ブラスト-無機ジंकのすべり係数においては橋本ら 7 の結果以外ではすべて 0.5 以上となっている。橋本ら 7 の結果で低いすべり係数が得られた理由としては、母



(a) 縦回転式-無機ジンク (b) 有機ジンク-無機ジンク (c) 薬剤さび-無機ジンク



(d) ブラスト-無機ジンク (e) グラインダー-無機ジンク (f) 自然さび-無機ジンク

図 3-6-4 異種接合面継手タイプ B の試験体に関するすべり係数の比較

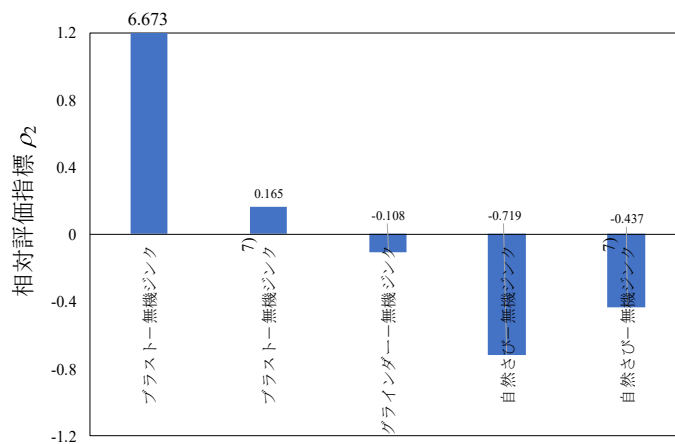


図 3-6-5 タイプ B の試験体で得られたすべり係数の基準すべり係数に対する近接度

板（ブラスト）の表面粗さが小さく、基準すべり係数（ブラスト）が低いことから分かるようにブラストの仕上りの違いによる可能性が考えられる。グラインダー—無機ジンクでは、丹波ら 5) の結果はすべり係数の平均値が 0.50 以上となっているが、それ以外の結果では 0.40 を下回っている。自然さび—無機ジンクでは、橋本ら 7) の結果で 3 体平均が 0.50 を下回るすべり係数が得られているが、これは基準すべり係数（自然さび）が本研究で得られた値より著しく低いためであると考えられる。橋本ら 7) が対象とした自然さびは耐候性鋼材の保護性さびであるため、さびの性状の違いがすべり係数に影響を与えた可能性がある。

基準すべり係数に対するタイプ B のすべり係数の関係性を 3-4 で導入した ρ_2 によって評価した結果を、図 3-6-5 に示す。ブラスト—無機ジンクの組み合わせでは、本試験と橋本ら 7) の結果の双方で 0 を超える値が得られており、得られるすべり係数は基準すべり係数 $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ 以上となっていることがわかる。グラインダー—無機ジンクでは、0 を下回る値が示されているが、この組み合わせのすべり係数の $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ との違いはわずかである。自然さび—無機ジンクでは、本試験と橋本ら 7) の結果の双方で 0 を大きく下回る値となっている。この組み合わせでは十分な $\bar{\mu}_2^{\text{low}}$ を示す接触面を用いないと、すべり係数が低い異種接合面継手となる可能性があると考えられる。この組み合わせですべり係数が低下した原因は定かではなく、従来の自然さびや無機ジンクの接触面の継手とは微視的に異なるメカニズムで主すべりが起きている可能性もあるため注意が必要である。

3-7 異種接合面継手の適用性

本節では、3-4~3-6 で述べた知見に基づき、タイプ A とタイプ B の異種接合面継手に関して、ボルト軸力低下後のすべり係数確保の観点からその適用性を考察する。そして、適用可能性が高いと考えられる継手については設計すべり係数も検討する。

3-7-1 タイプ A

3-4-3 で述べたように、タイプ A の継手においては 2 つの接合面のうちすべり係数の低いほうに誘発されてすべりが発生すると推察され、双方の接合面の基準すべり係数が十分把握されていればタイプ A は適用可能であると考えられる。特に、ブラスト | 無機ジンク、自然さび | 無機ジンクの組み合わせについては、個々の基準すべり係数についてこれまで十分なデータがあることから適用可能性は高く、道示または鉄標に準じてすべり係数の設計値 μ_d を 0.40（粗面状態相当）としてよいと考えられる。

表 3-7-1 は、実際に得られるすべり係数の設計値に対する余裕に関して、 $\bar{\mu}_2$ （試験値）と μ_d の比（以下、余裕度）をとり、タイプ A の各試験体とそれに対応する基準試験体（無機ジンク）で値を比較したものである。比較のために、双方の試験体における余裕度の比も示している。余裕度の算定にあたって、基準試験体（無機ジンク）については道示より $\mu_d = 0.45$ 、タイプ A については上記により $\mu_d = 0.40$ とした。同表では、タイプ A の試験体の余裕度が基準試験体（無機ジンク）の余裕度と同等以上であったことが示されている。これは、ブラスト | 無機ジンクと自然さび | 無機ジンクのタイプ A に関して $\mu_d = 0.40$ とすれば、道示で設計された無機ジンクの継手と同等あるいはそれよりやや大きな余裕度が期待できることを意味している。

このように、ブラスト | 無機ジンクおよび自然さび | 無機ジンクの組み合わせによるタイプ A の継手については、 μ_d を 0.40 として適用可能であると考えられる。ただし、接触面が粗面系の同種接合面継

手よりボルト軸力の低下が若干大きいため (3-3-2 参照), 無機ジンの塗膜厚が過大とならないようにするなどの配慮がなされることが望ましいと考えられる。

表 3-7-1 異種接合面継手タイプ A の試験体で得られたすべり係数の設計値に対する余裕度

	プラスト 無機ジンク	自然さび 無機ジンク	
	本試験	本試験	清水ら ³⁾
基準試験体 (無機ジンク) の余裕度	1.33	1.33	1.30
タイプAの試験体の余裕度	1.40	1.50	1.49
余裕度の比	1.05	1.13	1.15

基準試験体 (無機ジンク) における設計すべり係数は0.45とした。
タイプAの試験体における設計すべり係数はいずれも0.40とした。

表 3-7-2 異種接合面継手タイプ B の試験体で得られたすべり係数の設計値に対する余裕度

	縦回転式-無機ジンク		薬剤さび-無機ジンク		
	本試験	丹波ら ⁵⁾	本試験	本多ら ⁸⁾	吉岡ら ⁹⁾
基準試験体 (無機ジンク) の余裕度	1.33	1.44	1.33	1.62	1.13
タイプBの試験体の余裕度	1.35	1.41	1.48	1.43	1.32
余裕度の比	1.01	0.98	1.11	0.89	1.16

	プラスト-無機ジンク				自然さび-無機ジンク	
	本試験	丹波ら ⁵⁾	丹波ら ⁶⁾	橋本ら ⁷⁾	本試験	橋本ら ⁷⁾
基準試験体 (無機ジンク) の余裕度	1.37	1.44	1.43	1.52	1.37	1.52
タイプBの試験体の余裕度	1.53	1.70	1.49	1.18	1.35	1.17
余裕度の比	1.12	1.17	1.04	0.78	0.99	0.77

基準試験体 (無機ジンク) における設計すべり係数は0.45とした。
タイプBの試験体における設計すべり係数はいずれも0.40とした。

3-7-2 タイプ B

タイプ B の継手は, 主に既設構造物において $\mu_d = 0.40$ で設計された既設継手の取替え時における適用が想定される。したがって, μ_d が 0.40 程度になることをひとつの要件として適用性を検討する。

表 3-7-2 は, タイプ B の試験体とその基準試験体 (無機ジンク) に関して, 実際に得られたすべり係数の設計値に対する余裕度を比較している。有機ジンク-無機ジンクとグラインダー-無機ジンクについては, タイプ B の試験体ですべり係数 μ_2 が 0.40 を下回ったため除外して評価している。同表は, 本多ら⁸⁾の薬剤さび-無機ジンク, 橋本ら⁷⁾のプラスト-無機ジンクおよびグラインダー-無機ジンク以外においては, タイプ B の試験体の余裕度が基準試験体 (無機ジンク) の余裕度と同等以上であったことを示している。本多ら⁸⁾の結果に関しては, 3-4-4 で述べた通り, タイプ B の試験体で他の薬剤さび-無機ジンクとほぼ同等の $\bar{\mu}_2 = 0.573$ が得られており, すべり係数自体は高いといえる。橋本ら⁷⁾の結果ではいずれもタイプ B の試験体の余裕度が低いが, 母板の基準すべり係数 (プラスト) も 0.43 と低く耐候性鋼材でもあるため, プラストや自然さびの接触面状況に起因している可能性がある。なお同表の他のプラスト-無機ジンクでは基準試験体 (無機ジンク) と同等以上の余裕度が示されている。

このように, 縦回転式-無機ジンクと薬剤さび-無機ジンクについては, 基準試験体 (無機ジンク)

と同等以上の余裕度または 0.57 程度の平均すべり係数が得られている。また、リラクセーション試験ではこれらのタイプ B の試験体におけるボルト軸力の低下が基準試験体（無機ジンク）以下であったことが確認されている（3-5-2 参照）。一方、縦回転式や薬品さびの適用に際しては、作業速度、作業姿勢、作業者の熟練度等の施工条件によってすべり係数が異なる可能性があり、接触面の仕上がりに注意が必要と考えられる。これらのことから、縦回転式－無機ジンクと薬剤さび－無機ジンクの継手については、接触面の仕上がりに留意のうえ（表面粗さと膜厚の参考値は表 3-2-1、表 3-2-2 を参照のこと）、0.40 程度の μ_d の下で適用してもよいと考えられる。

ブラスト－無機ジンクについても、先行研究^{5),6)}において 0.60 前後のすべり係数が得られており、本研究でも同様のすべり係数が得られ、ボルト軸力の低下も基準試験体（無機ジンク）以下であることが確認されたため、 μ_d を 0.40 程度として適用できると考えられる。ただし、基準すべり係数が 0.40 付近の試験体ではそれと同等のすべり係数となる場合があることも報告されていることから⁷⁾、現行の基準を確実に満たす接触面施工を行い、十分な基準すべり係数の確保したうえで適用する必要がある。

グラインダー－無機ジンクについては、丹波ら⁵⁾では 0.50 を超えるすべり係数が得られている一方、橋本ら⁷⁾では約 0.40、丹波ら⁶⁾と本研究で 0.30 前後のすべり係数に留まっている。現状では実現されるすべり係数が必ずしも明確ではないことから、主部材の接合への適用性は高くないものと考えられる。

有機ジンク－無機ジンク（有機ジンクは高摩擦型でない塗料を使用）については、得られるすべり係数が 0.40 を下回る可能性が明らかとなった。タイプ B の継手のすべり特性を把握したうえで、慎重に適用の検討を行うべきである。自然さび－無機ジンクについても、今後さらに試験データを蓄積する必要があると考えられる。

自然さび－無機ジンクについては、本研究では約 0.55 のすべり係数が得られており、ボルト軸力の低下も基準試験体（無機ジンク）を上回るものではなかったことから、0.40 程度の μ_d の下で適用できると考えられる。ただし、耐候性鋼材の保護性さびを有する母板を使用した橋本らの試験体ではすべり係数は 0.45 付近であり⁷⁾、本研究の試験体と橋本らの試験体の双方で基準すべり係数 μ_2^{low} を大きく下回るすべり係数が示されているため、試験データをさらに蓄積する必要があると考えられる。

3-8 まとめ

本研究では、仕様の異なる接触面を含む高力ボルト摩擦接合継手（異種接合面継手）の適用性を明確にすることを目的に、タイプ A とタイプ B の双方の試験体を対象としたリラクセーション試験とすべり耐力試験を行い、ボルト軸力の低下挙動や軸力低下の支配因子、すべり挙動等の評価を行った。そして、先行研究の結果も引用して、適用可能性の高い継手について設計すべり係数を接触面の組み合わせごとに検討した。本研究の結論は、次の通りである。

- タイプ A の継手に関して、ブラスト | 無機ジンクおよび自然さび | 無機ジンクの組み合わせであれば μ_d を 0.40 として適用可能であると考えられる。ただし、接触面が粗面系の同種接合面継手よりボルト軸力の低下が若干大きいため、無機ジンクの塗膜厚が過大とならないようにするなどの配慮がなされることが望ましいと考えられる。
- タイプ B の継手に関して、縦回転式－無機ジンク、薬剤さび－無機ジンク、ブラスト－無機ジンクの組み合わせであれば、 μ_d を 0.40 程度として適用可能であると考えられる。ただし、接触面の仕上がりは本研究の試験体と同等であることを前提としており、とくに施工条件のばらつき等が想定され

る縦回転式と薬品さびでは品質の確保が重要である。

- 自然さびー無機ジンの組み合わせの場合も、 μ_d を 0.40 程度として適用可能であると考えられる。ただし、耐候性鋼材の保護性さびを有する母板を使用した試験体で 0.45 付近のすべり係数が示されたとの報告もあり、試験データをさらに蓄積する必要があると考えられる。

本研究では標準的と考えられる仕上がりを目標として接触面を施工したが、施工条件の違いによってすべり係数がある程度ばらつくことも想定される。したがって、異種接合面継手全般に関して今後もさらにデータが蓄積されていくことが望ましいと考えられる。

謝辞：極東メタリコン工業(株)の小寺 健史氏には、縦回転式動力工具による施工においてご協力を賜った。ここに記して各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

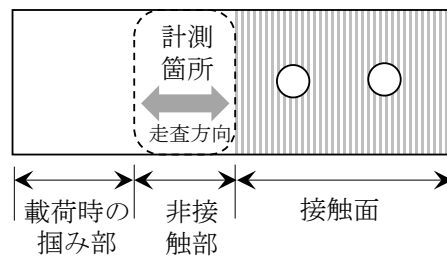
- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ15 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2006。
- 2) 清水織恵，石崎雄一：仕様の異なる摩擦接合面の継手性能に関する試験報告，土木学会第67回年次学術講演会，I-340，2012。
- 3) 南邦明，斉藤雅充，横山秀喜，杉本一朗，能島隆男，増永寿彦，長崎英二：亜鉛アルミ擬合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol. 68，No. 2，pp. 429-439，2012。
- 4) 丹波寛夫，木村聡，杉山裕樹，山口隆司：無機ジクリッチペイント面とそれと異なる接合面処理がなされた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験，構造工学論文集，Vol. 58，pp. 803-813，2012。
- 5) 丹波寛夫，行藤晋也，木村聡，山口隆司，杉浦邦征：接合面が鋼材粗面と無機ジクリッチペイント面の高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の提案，土木学会論文集 A1，Vol. 70，No. 1，pp. 137-149，2014。
- 6) 橋本国太郎，山口隆司，鈴木克弥，石原一伸，杉浦邦征：経年無塗装耐候性鋼材を用いた異種接合面を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 632-641，2014。
- 7) 本多克行，山口隆司，橘肇，吉岡夏樹，齊藤史朗，中村定明：既設構造物の高力ボルト摩擦接合継手接合面への改良した錆促進剤の適用に関する検討，構造工学論文集，Vol. 64A，pp. 491-502，2018。
- 8) 吉岡夏樹，橘肇，岡田幸児：錆促進剤塗布後の曝露期間に着目した高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験，駒井ハルテック技報，Vol. 8，pp. 39-46，2019。
- 9) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006。
- 10) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012。
- 11) 南邦明，田村洋，吉岡夏樹，内田大介，茂呂充，安藤光希：高力ボルト継手における摩擦面の数に応じた導入ボルト軸力に関する検討，土木学会論文集 A1，Vol. 75，No. 1，pp. 46-57，2019。
- 12) 南邦明，森猛，杉谷隆夫：土木学会第 59 回年次学術講演会，I-587，2004。

第3章 付録1 表面粗さ評価値に及ぼす評価長さの影響

JIS B0633:2001¹⁾では、非周期的な粗さ曲線をもつ計測対象面に対して、推定される粗さパラメータ R_a に応じて異なる評価長さを採用し表面粗さを計測することとしている。例えば、推定される R_a が $0.1\mu\text{m} < R_a \leq 2\mu\text{m}$ の場合は評価長さを 4mm, $2\mu\text{m} < R_a \leq 10\mu\text{m}$ の場合は評価長さを 12.5mm としている。ボルト継手の接触面で計測される R_a は後者の範囲に含まれる場合が多いと考えられるが、接触式の粗さ計を用いる場合、評価長さ 4mm での計測時間は同 12.5mm に対して約 1/3 に縮減される。そこで、本研究の試験体における6種類の接触面について評価長さを 12.5mm とした計測と 4mm とした計測をそれぞれ実施し、接触面の粗度を評価する際の評価長さの影響を検討することとした。

計測箇所は、固定側母板の非接触部（付図 3-1-1）とし、各試験体について長手方向にそれぞれの評価長さで5回ずつ計測した。計測には表面粗さ計（サーフテスト SJ-210）を用い、接触式計測であるため位置をずらしながら計測し、 R_a と R_{zJIS} の3体平均（15 データの平均値）を比較することで評価長さの影響を検討した。なお、ノイズ除去のために計測結果では Gaussian フィルター¹⁴⁾が使用されている。

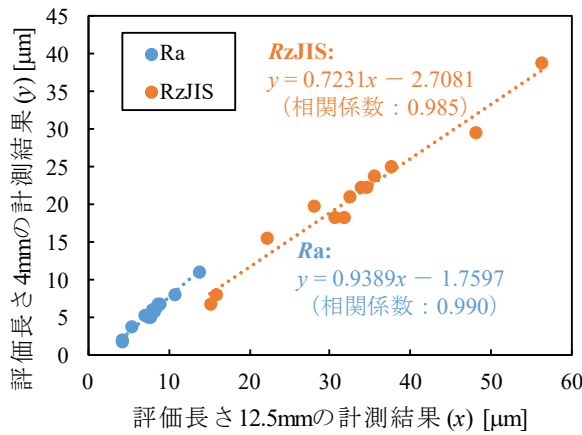
計測結果は付表 3-1-1 に示す通りであった。この結果に基づいて異なる評価長さを用いた計測結果の相関を示したものが付図 3-1-2 である。同図は、15 データの平均値で比較すれば、 R_a と R_{zJIS} のどちらのパラメータにおいても、両者の間に高い相関が顕れることを示している。



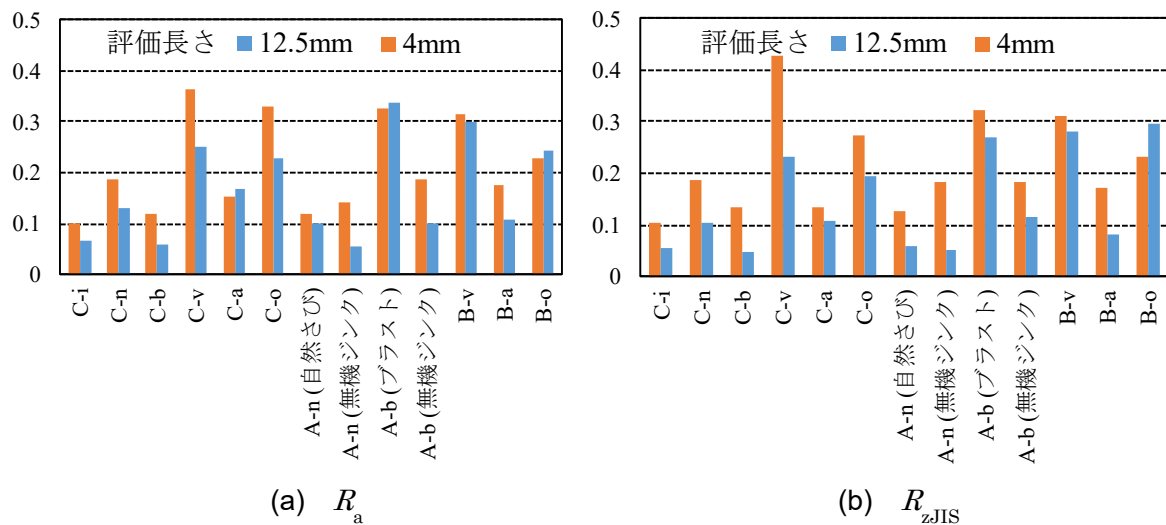
付図 3-1-1 固定側母板の非接触部における表面粗さ計測箇所

付表 3-1-1 固定側母板の非接触部における表面粗さ計測結果

粗さパラメータ		R_a		R_{zJIS}	
評価長さ		12.5mm	4mm	12.5mm	4mm
試験体	A-b(プラスト)	10.83	8.1	48.0	29.7
	A-b(無機ジंक)	7.75	5.01	31.7	18.3
	A-n(自然さび)	8.16	5.84	32.5	21.1
	A-n(無機ジंक)	7.99	6.13	33.8	22.4
	B-v	8.70	6.70	37.7	25.0
	B-o	4.26	1.81	15.20	6.8
	B-a	7.61	5.04	30.6	18.2
	C-b	13.8	11.1	56.3	38.9
	C-v	5.53	3.8	22.1	15.5
	C-i	8.36	6.3	34.5	22.4
	C-o	4.32	2.1	15.88	8.1
	C-n	9.02	6.78	35.5	23.7
	C-a	7.02	5.39	28.1	19.7



付図 3-1-2 異なる評価長さを用いた計測結果の間の相関



付図 3-1-3 表面粗さの計測値の3体平均における変動係数

付表 3-1-2 各試験体に関する平均値と各計測値の変動係数 ($n = 5$)

試験体名	平均値 [μm]	変動係数	試験体名	平均値 [μm]	変動係数
A-b-1(プラスト)	15.8	0.0612	A-b-1(無機ジंक)	7.48	0.0527
A-b-2(プラスト)	8.21	0.112	A-b-2(無機ジंक)	8.50	0.0667
A-b-3(プラスト)	8.48	0.140	A-b-3(無機ジंक)	7.27	0.0933
C-b-1	13.8	0.0445	C-i-1	8.33	0.0822
C-b-2	14.0	0.0704	C-i-2	8.53	0.0313
C-b-3	13.6	0.0531	C-i-3	8.20	0.0712
変動係数	0.235	-	変動係数	0.0616	-

付図 3-1-3 は、それぞれの評価長さの場合について 3 体平均の変動係数を示している。まず R_a に関してみると、いずれの評価長さの場合も縦回転式と有機ジंकの接触面において高い変動係数をとる傾向が示されており、これらの接触面において粗度のばらつきが大きいことがうかがえる。プラストについては変動係数が試験体 C-b で小さいものは試験体 A-b では高い値が示されている。

その理由を検討するため、評価長さ 12.5mm で計測した場合の R_a について、各試験体に関する平均値の変動係数および各計測値の変動係数を比較したものが付表 3-1-2 である。同表には参考として無機ジ

シートの接触面に対する計測の変動係数も示している。これより、ブラストでは接触面ごとの粗度のばらつきが大きく、付図 3-1-3 に示された試験体 C-b と A-b の変動係数の違いはその影響によるものと考えられる。

付図 3-1-3 における R_a の変動係数に関して、評価長さの違いの影響についてみると、評価長さが 4mm のほうが高い変動係数を示す傾向が認められるものの、評価長さ 12.5mm による計測の変動係数が 0.15 以上のもので、評価長さを 4mm とした計測の変動係数より 1.5 倍以上高い値を示すものはなかった。

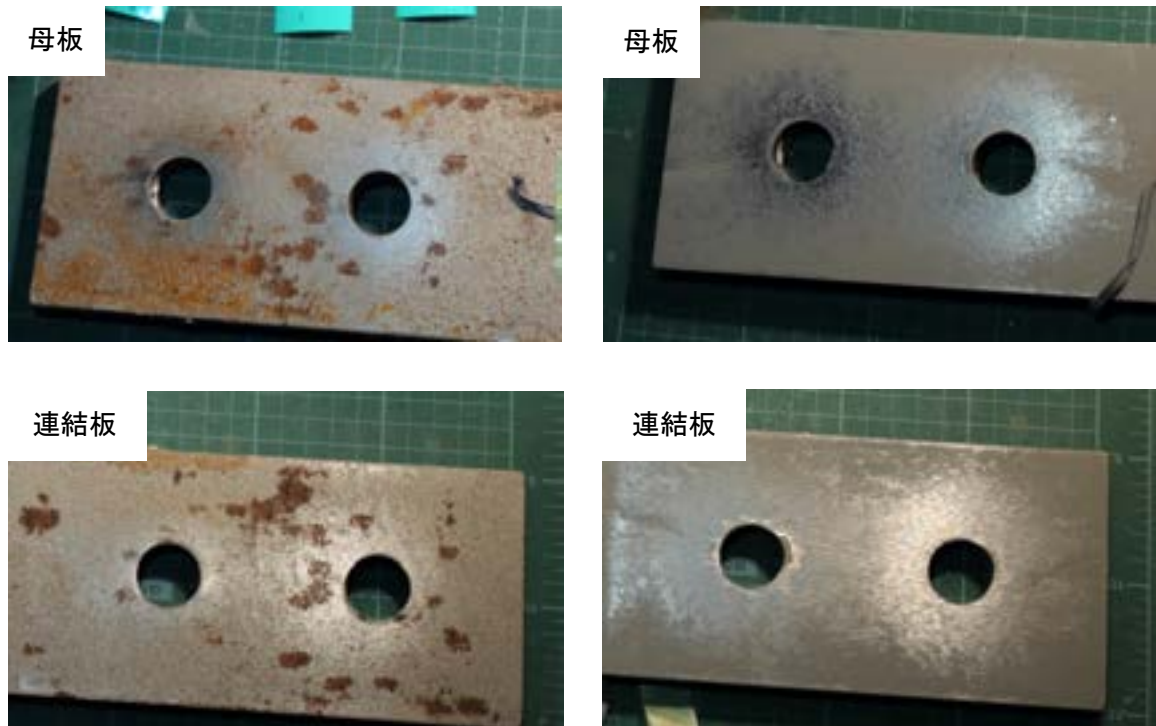
つぎに、付図 3-1-3 において R_{zIS} の変動係数についてみると、 R_a と同様に縦回転式と有機ジンクに関して高い変動係数をとる傾向が示されており、ブラストに関しても R_a と同様の傾向となっている。評価長さの違いの影響についてみると、全体として R_a の場合よりも評価長さの違いの影響が大きく顕れている。これは、 R_a が評価長さに含まれるすべての計測点高さを平均化したパラメータであるのに対し、 R_{zIS} が評価長さにおいて高さに関する上位 10 位までの計測点高さを平均化したパラメータであるためと考えられる。試験体 C-v では評価長さ 4mm の場合の計測結果において変動係数が 0.4 を超えており、ブラシに因る微細な傷が点在した縦回転式特有の接触面性状（図 3-4-3、図 3-4-4 参照）に因り評価長さの影響が特に強く顕れている可能性がある。しかしながら、試験体 C-v を除けば、 R_a と同様に、評価長さ 12.5mm による計測の変動係数が 0.15 以上のもので、評価長さを 4mm とした計測の変動係数より 1.5 倍以上高い値を示すものはなかった。

以上から、本研究では十分なデータ数の平均値を用いることを前提として、ボルト評価長さを 4mm として R_a と R_{zIS} の計測を行うこととした。

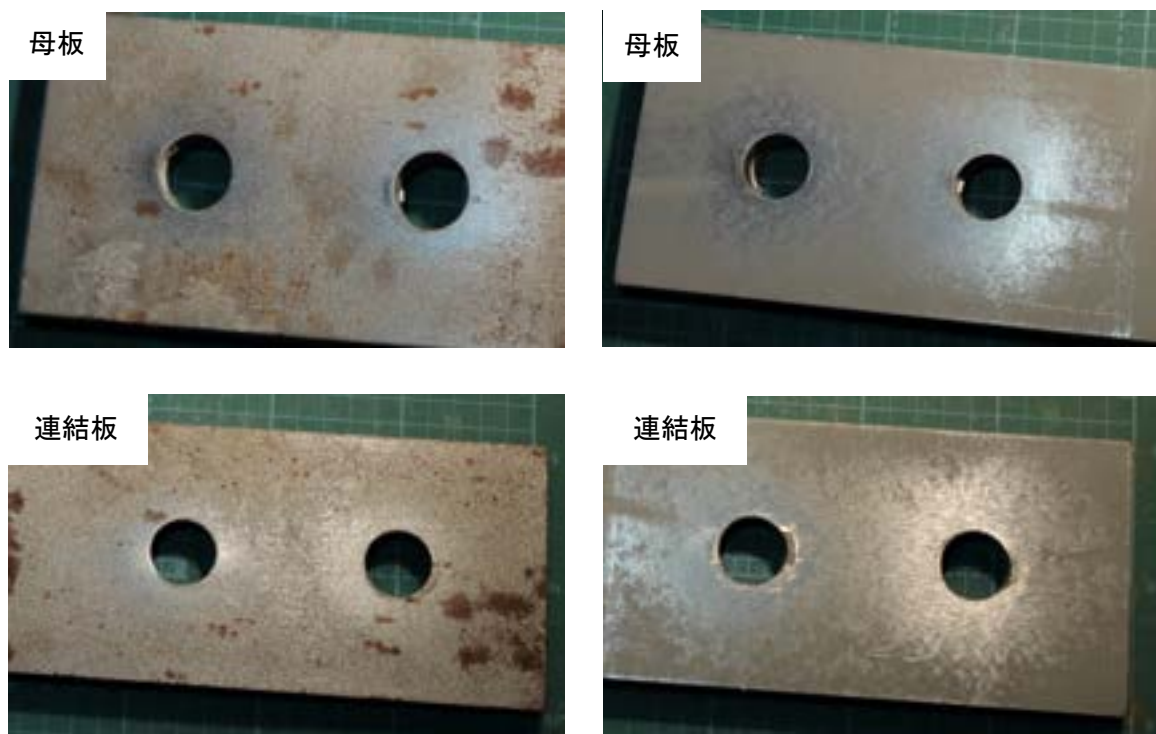
第 3 章 付録 1 参考文献

- 1) 日本工業標準調査会：JIS0633: 2001 製品の幾何特性仕様（GPS）-表面性状：輪郭曲線方式-表面性状評価の方式及び手順，2001.

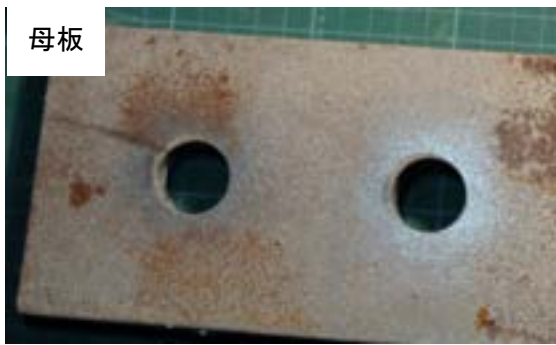
第3章 付録2 すべり耐力試験データ（シリーズI）



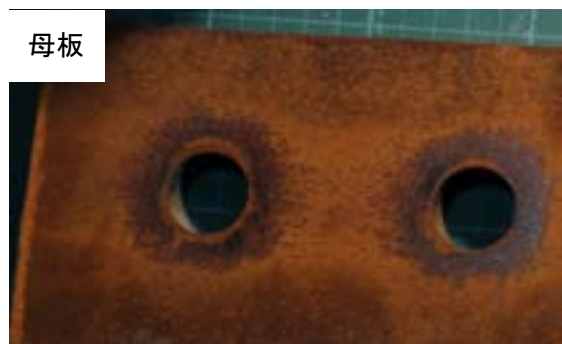
付図 3-2-1 試験体 A-b-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



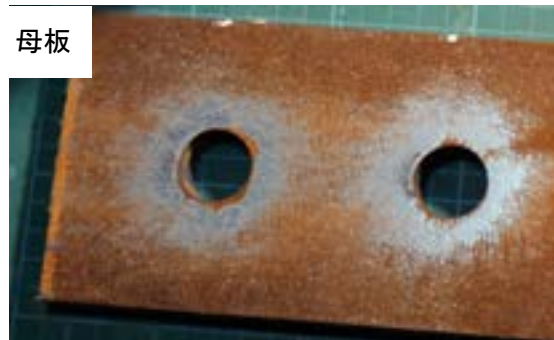
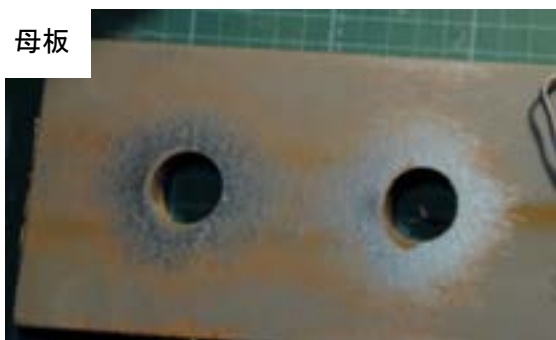
付図 3-2-2 試験体 A-b-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-2-3 試験体 A-b-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



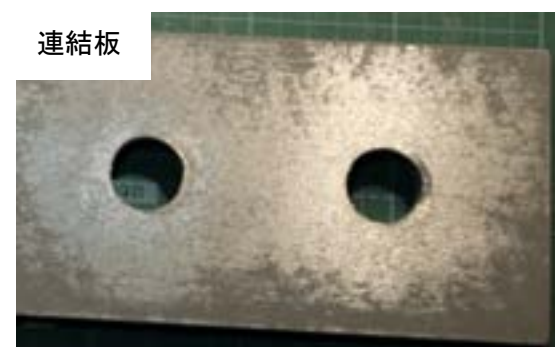
付図 3-2-4 試験体 A-n-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



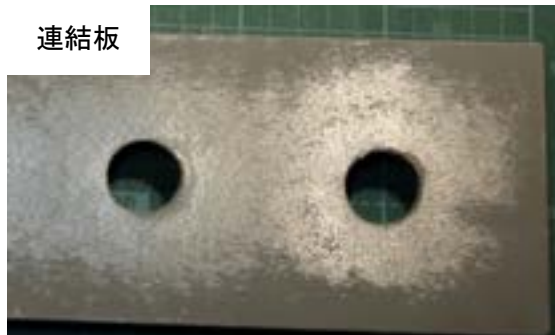
付図 3-2-5 試験体 A-n-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-2-6 試験体 A-n-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



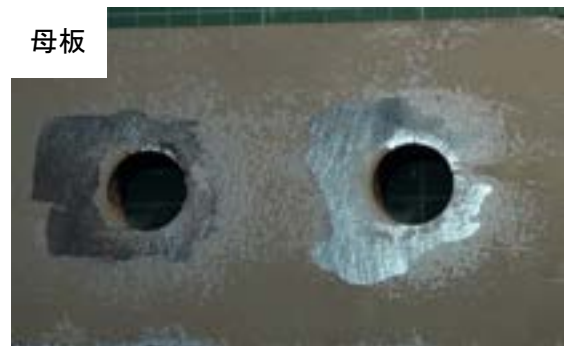
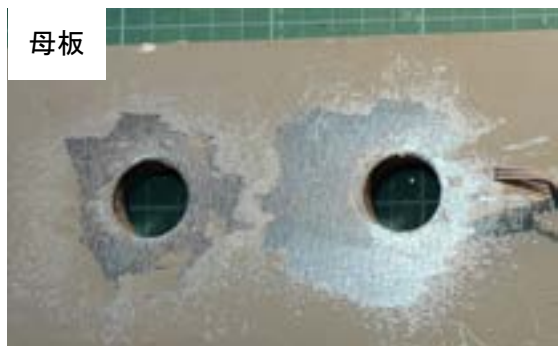
付図 3-2-7 試験体 B-v-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



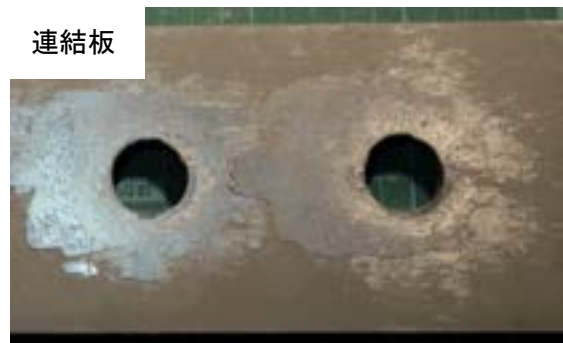
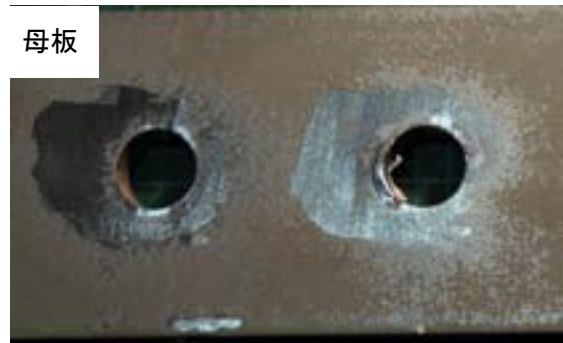
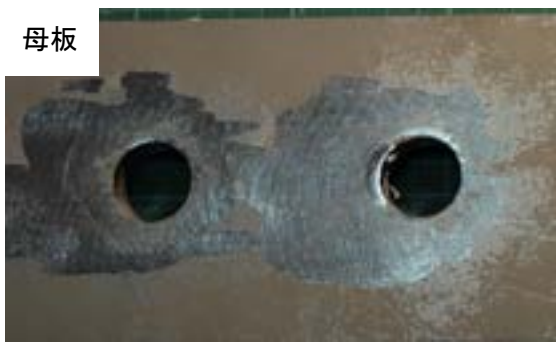
付図 3-2-8 試験体 B-v-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



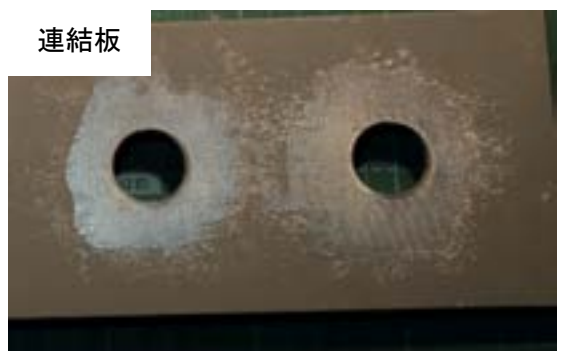
付図 3-2-9 試験体 B-v-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



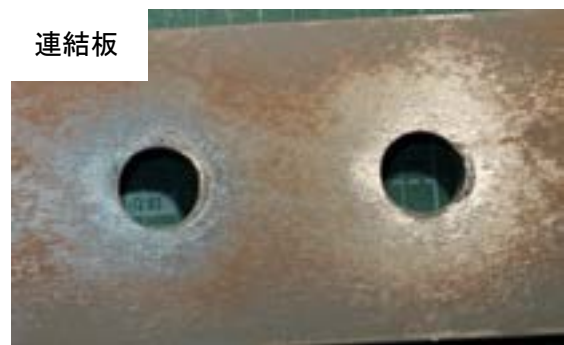
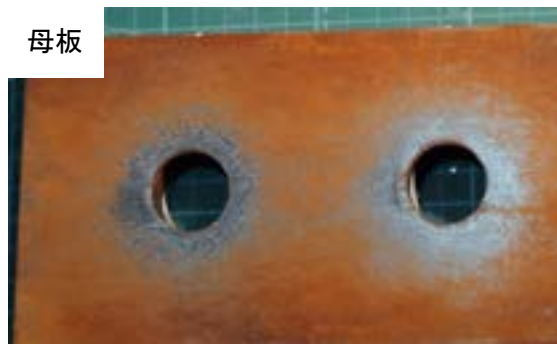
付図 3-2-10 試験体 B-o-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



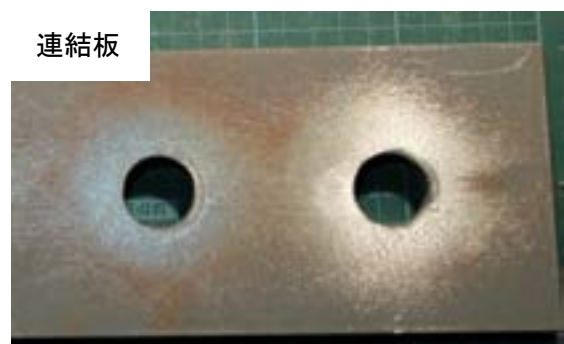
付図 3-2-11 試験体 B-o-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



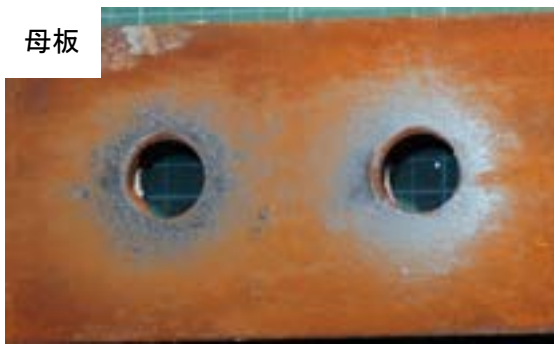
付図 3-2-12 試験体 B-o-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-2-13 試験体 B-a-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



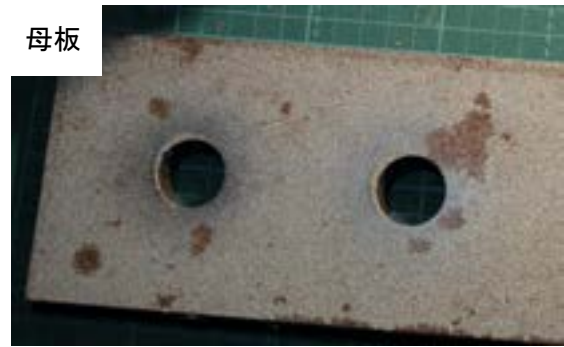
付図 3-2-14 試験体 B-a-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-2-15 試験体 B-a-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-2-16 試験体 C-b-1 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-2-17 試験体 C-b-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



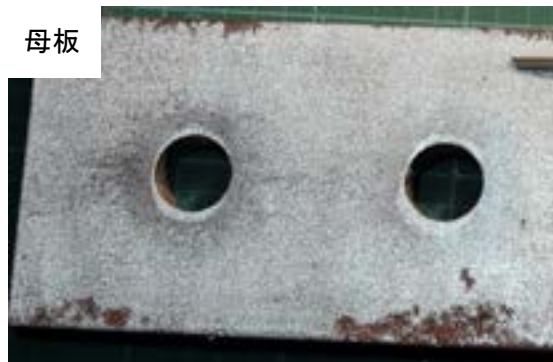
付図 3-2-18 試験体 C-b-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-2-19 試験体 C-v-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



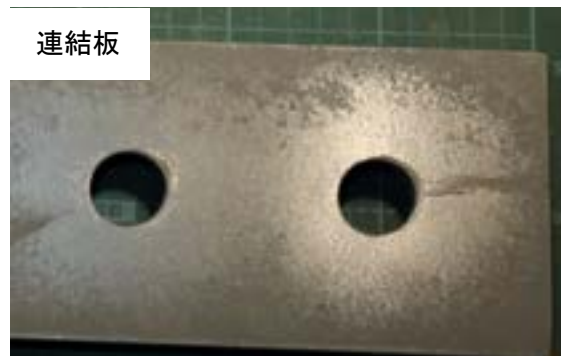
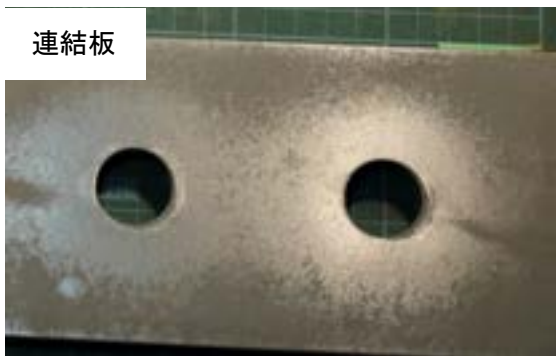
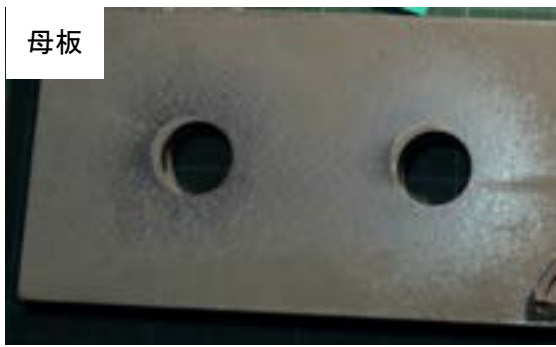
付図 3-2-20 試験体 C-v-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-2-21 試験体 C-v-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



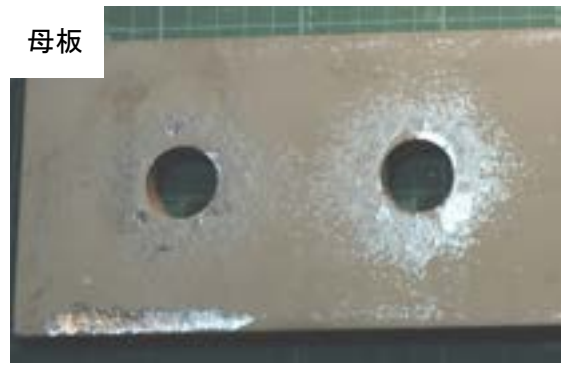
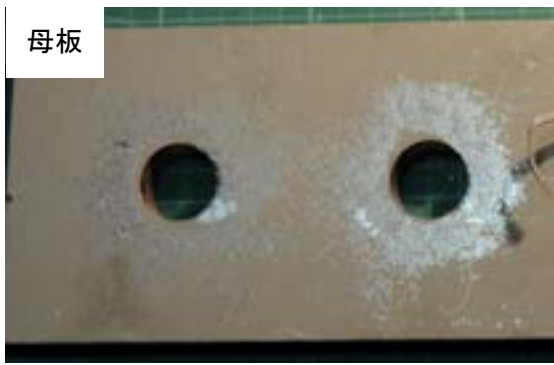
付図 3-2-22 試験体 C-i-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



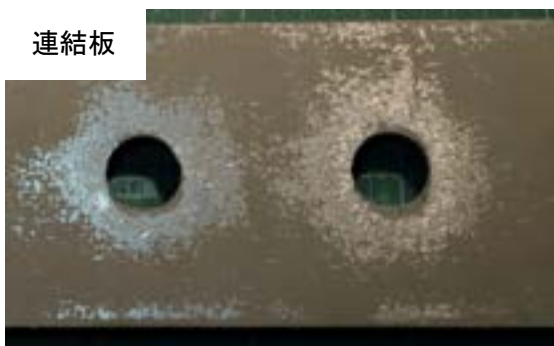
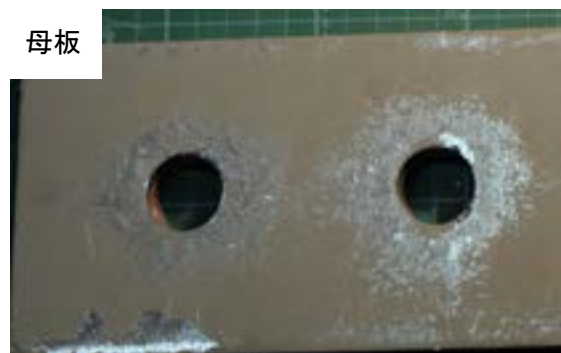
付図 3-2-23 試験体 C-i-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-2-24 試験体 C-i-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



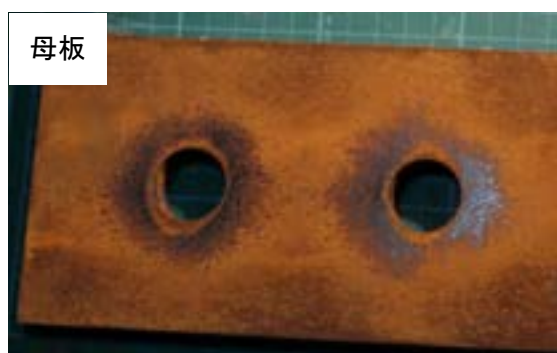
付図 3-2-25 試験体 C-o-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



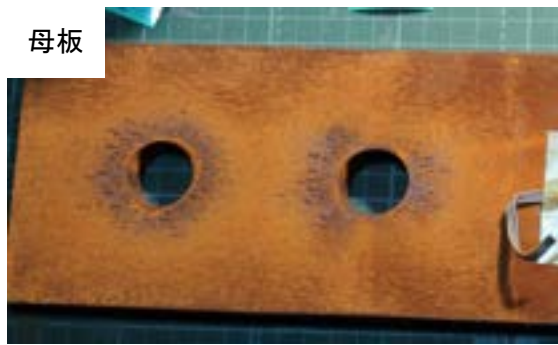
付図 3-2-26 試験体 C-o-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-2-27 試験体 C-o-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-2-28 試験体 C-n-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-2-29 試験体 C-n-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



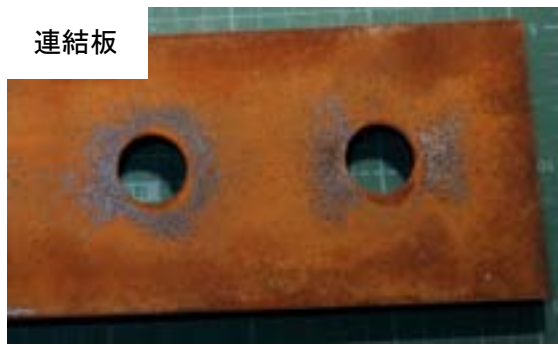
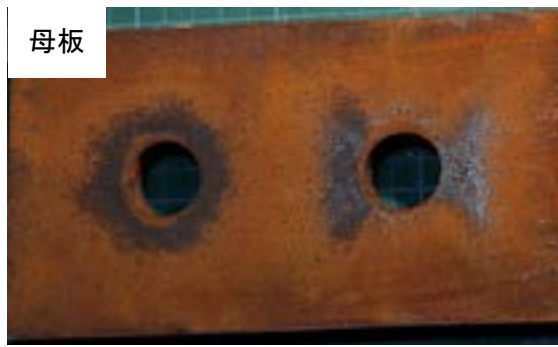
付図 3-2-30 試験体 C-n-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-2-31 試験体 C-a-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）

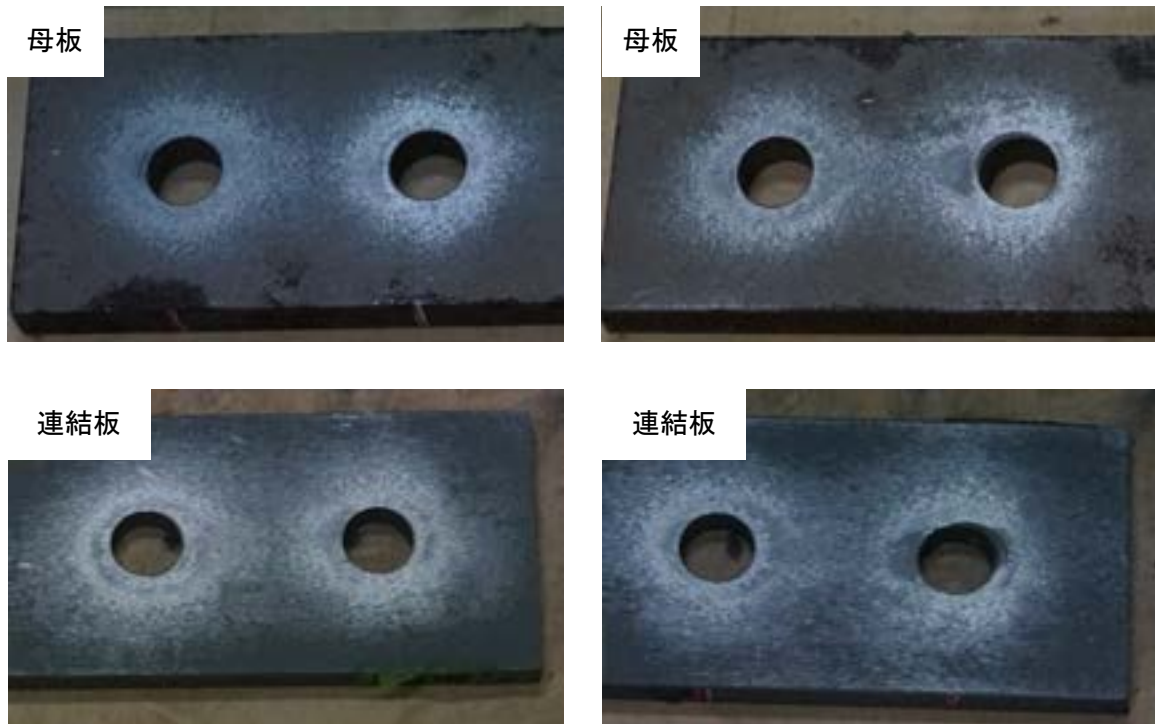


付図 3-2-32 試験体 C-a-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）

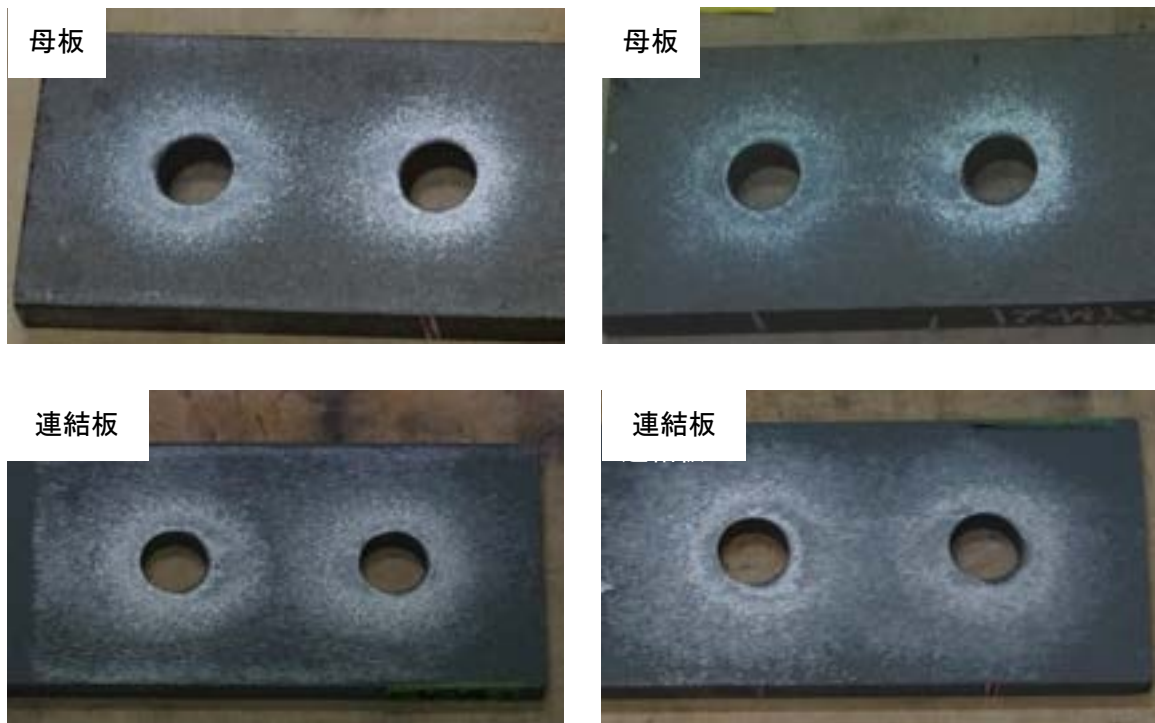


付図 3-2-33 試験体 C-a-3 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）

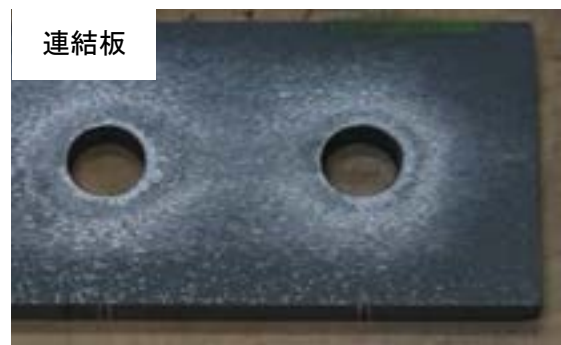
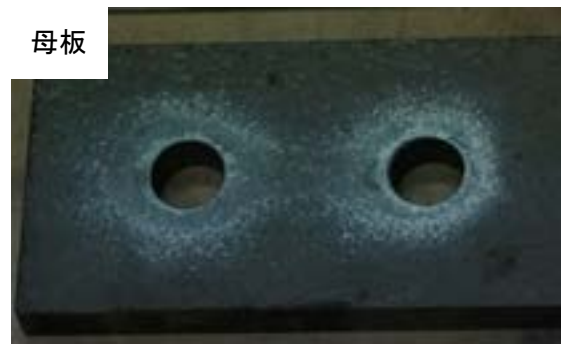
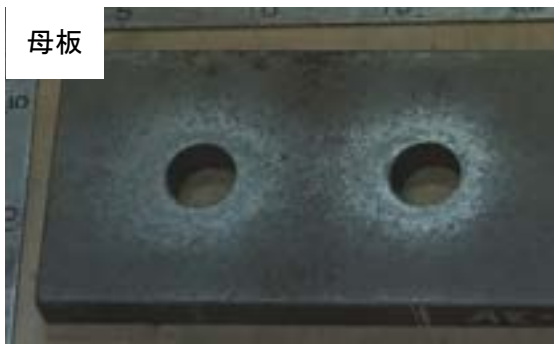
第3章 付録3 すべり耐力試験データ（シリーズII）



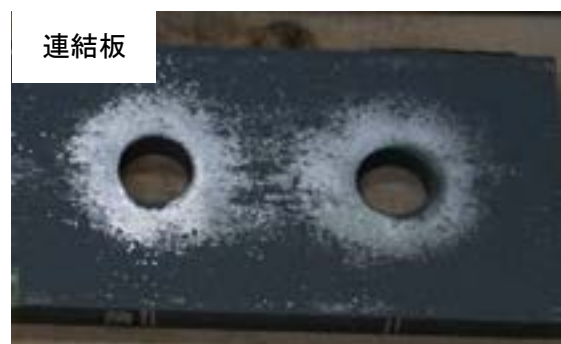
付図 3-3-1 試験体 B-b2-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



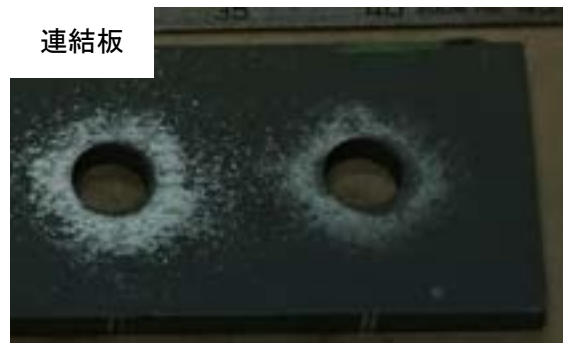
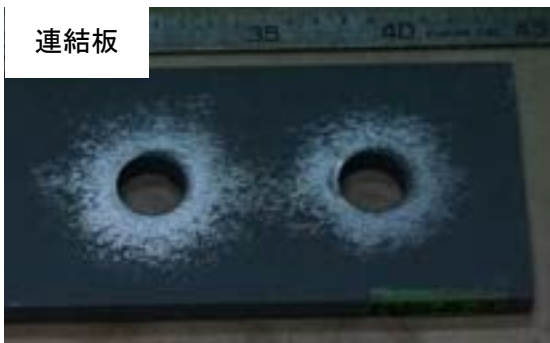
付図 3-3-2 試験体 B-b2-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-3-3 試験体 B-b2-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-3-4 試験体 B-g-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-3-5 試験体 B-g-2 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



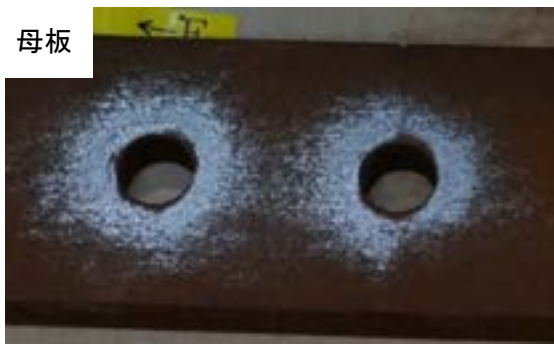
付図 3-3-6 試験体 B-g-3 すべり面の状況 (左: ボルト側, 右: ナット側)



付図 3-3-7 試験体 B-n2-1 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



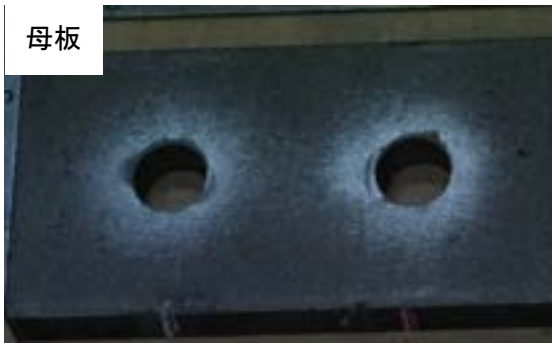
付図 3-3-8 試験体 B-n2-2 すべり面の状況（左：ボルト側，右：ナット側）



付図 3-3-9 試験体 B-n2-3 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-3-10 試験体 C-b2-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)



付図 3-3-11 試験体 C-b2-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-3-12 試験体 C-b2-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-3-13 試験体 C-g-1 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

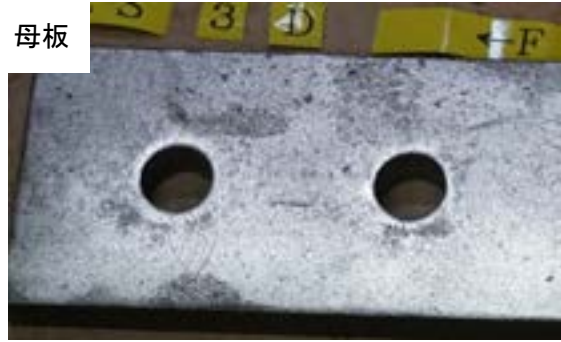


付図 3-3-14 試験体 C-g-2 すべり面の状況 (左 : ボルト側, 右 : ナット側)

母板



母板



連結板



連結板



付図 3-3-15 試験体 C-g-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)

母板



母板



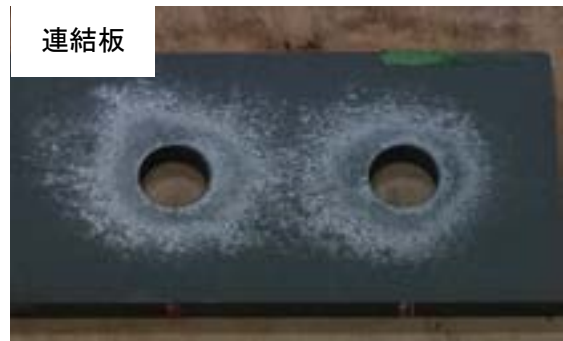
連結板



付図 3-3-16 試験体 C-i2-1 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-3-17 試験体 C-i2-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-3-18 試験体 C-i2-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)



付図 3-3-19 試験体 C-n2-1 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)

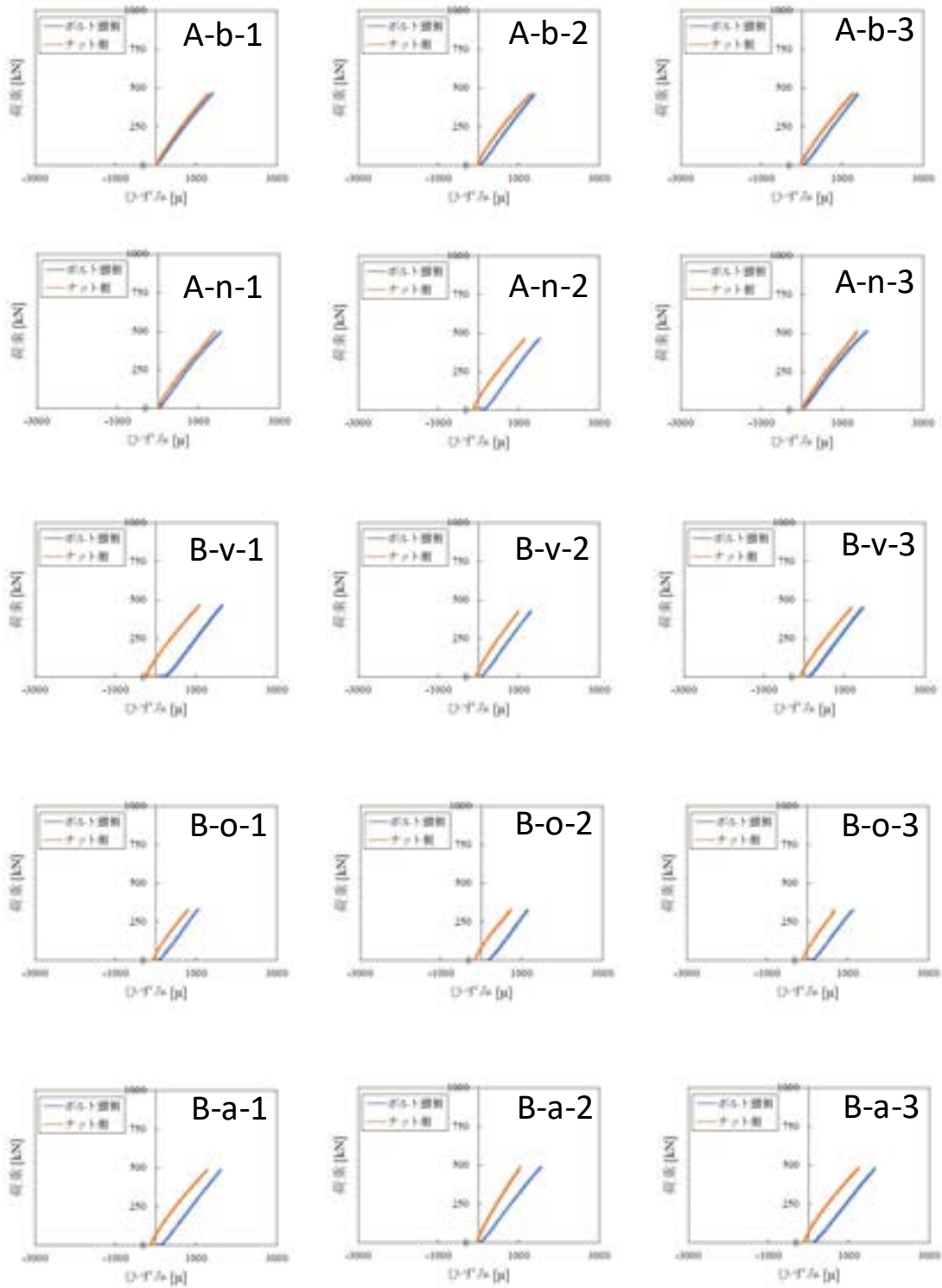


付図 3-3-20 試験体 C-n2-2 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)

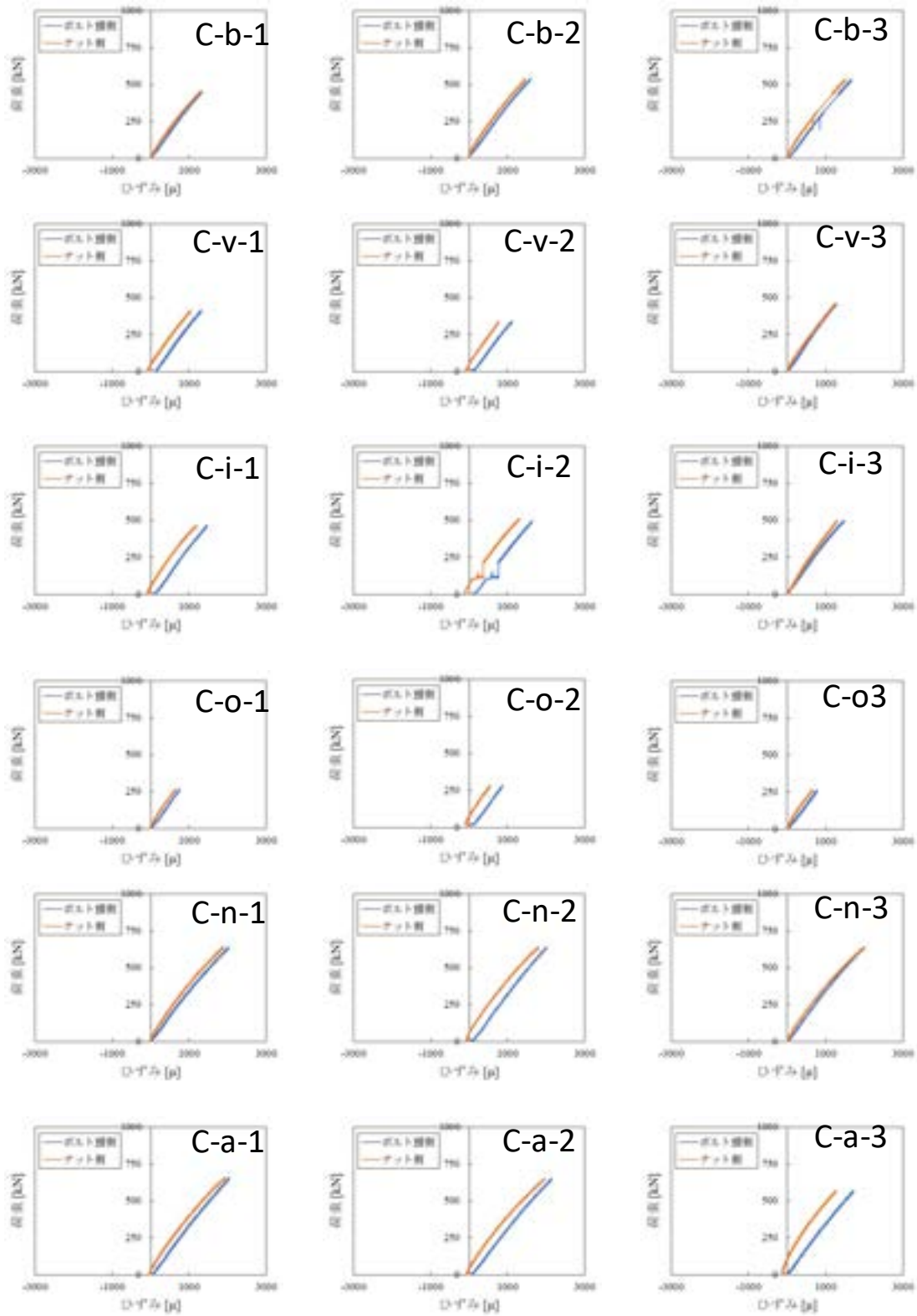


付図 3-3-21 試験体 C-n2-3 すべり面の状況 (左：ボルト側, 右：ナット側)

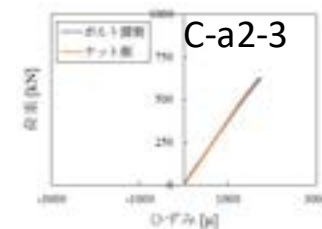
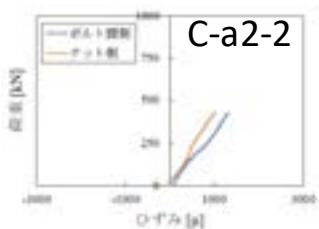
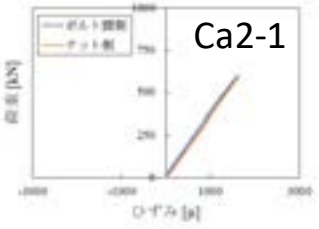
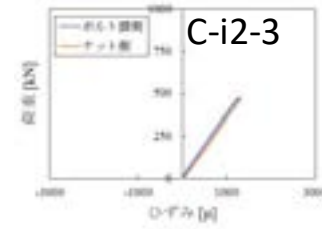
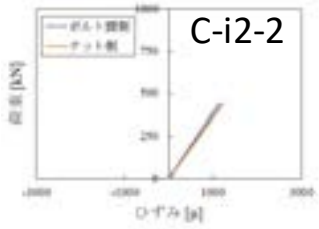
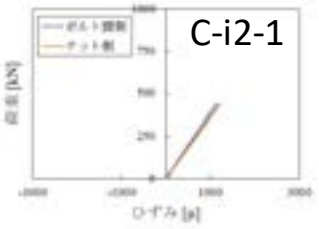
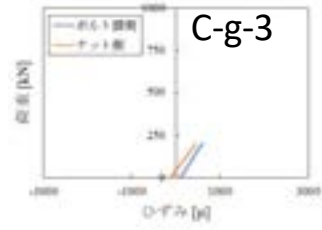
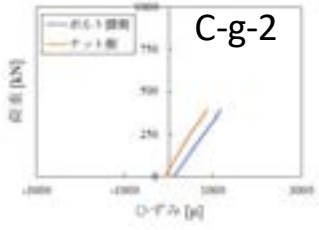
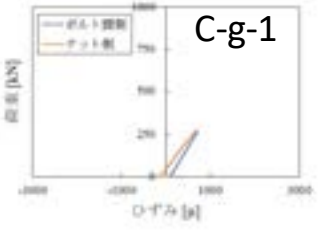
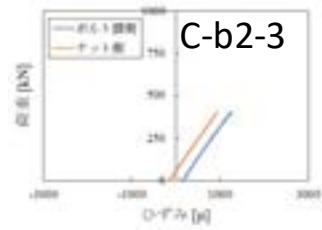
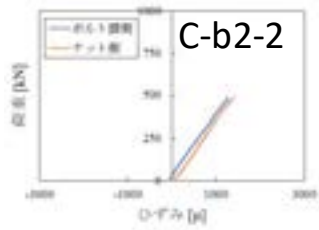
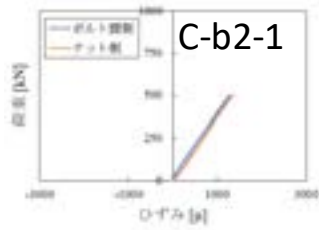
第3章 付録4 荷重-母板ひずみデータ



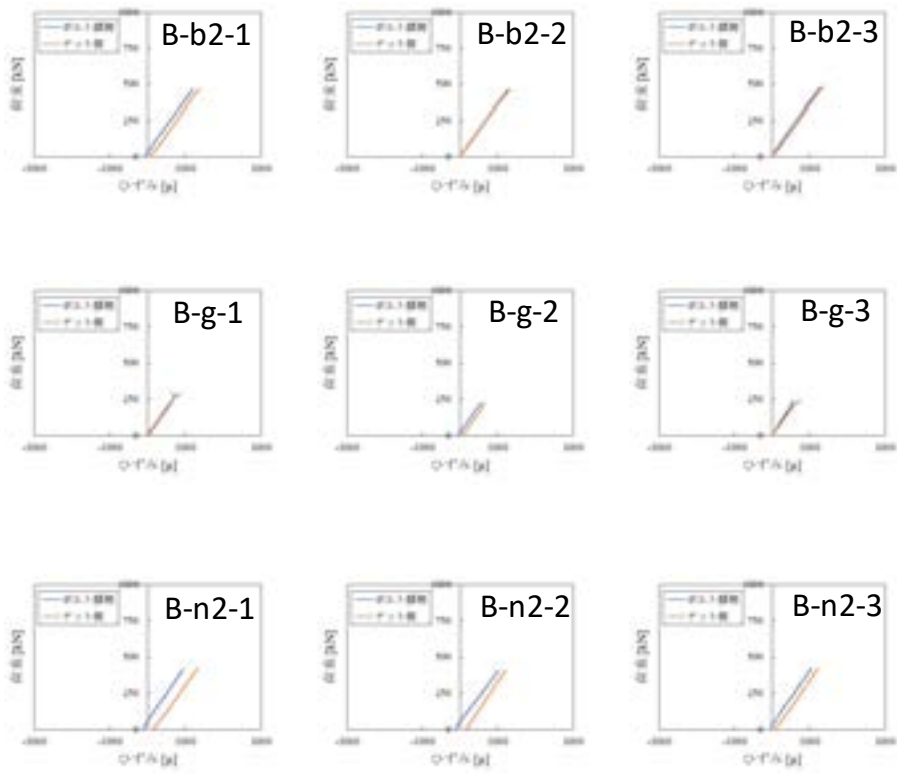
付図 3-4-1 異種接合面継手の実験データ (シリーズ I)



付図 3-4-2 同種接合面継手の実験データ (シリーズ I)



付図 3-4-3 異種接合面継手の実験データ (シリーズ II)



付図 3-4-4 同種接合面継手の実験データ (シリーズ II)