

IV. ボルト試験方法に関する検討WG

ボルト試験方法に関する検討

ボルト試験方法に関する検討WGメンバー

部会長

南 邦明

鉄道建設・運輸施設整備支援機構

ボルト試験方法に関する検討WG 目次

1. はじめに	IV-1-	1
参考文献	IV-1-	2
2. キャリブレーション試験方法の検討	IV-2-	1
2-1 概論	IV-2-	1
2-2 キャリブレーション試験Ⅰ	IV-2-	1
2-2-1 使用ボルト	IV-2-	1
2-2-2 試験Ⅰの試験方法	IV-2-	2
2-2-3 試験Ⅰで用いるボルト径の計測	IV-2-	2
2-2-4 試験Ⅰの試験結果	IV-2-	3
2-3 キャリブレーション試験Ⅱ	IV-2-	5
2-3-1 試験Ⅱの試験方法	IV-2-	5
2-3-2 試験Ⅱの試験結果	IV-2-	5
2-4 キャリブレーション試験の統計調査	IV-2-	6
2-4-1 調査概要	IV-2-	6
2-4-2 調査結果	IV-2-	6
2-5 キャリブレーション試験の考察と改良提案	IV-2-	12
2-6 結論	IV-2-	13
参考文献	IV-2-	14
3. リラクセーション試験方法に関する検討	IV-3-	1
3-1 概論	IV-3-	1
3-2 試験体の説明	IV-3-	1
3-2-1 試験体の使用材料，形状および種類	IV-3-	1
3-2-2 摩擦面処理	IV-3-	3
3-2-3 膜厚の測定	IV-3-	3
3-2-4 ボルトの締付け	IV-3-	4
3-3 リラクセーション試験方法	IV-3-	4
3-3-1 キャリブレーション試験	IV-3-	4
3-3-2 リラクセーション試験	IV-3-	5
3-4 リラクセーション試験結果	IV-3-	5
3-4-1 試験Ⅰの試験結果	IV-3-	5
3-4-2 試験Ⅱの試験結果	IV-3-	8
3-4-3 試験Ⅲの試験結果	IV-3-	9
3-5 既存データも含めた初期値の影響の分析	IV-3-	11
3-5-1 軸力導入初期（30 秒間）の軸力低下の影響	IV-3-	11

3-5-2	初期値の違いによる 672 時間後の軸力残存率の差	IV-3-	12
3-5-3	摩擦面の違いによる残存率差が及ぼす影響度	IV-3-	13
3-5-4	軸力導入時のボルト軸力と軸力残存率	IV-3-	14
3-5-5	初期値の設定の違いによるばらつきの影響	IV-3-	14
3-6	リラクセーション試験の初期値のあり方	IV-3-	15
3-6-1	初期値の設定が試験結果に及ぼす影響の考察	IV-3-	15
3-6-2	リラクセーション試験の初期値のあり方の考察	IV-3-	17
3-7	結論	IV-3-	17
	参考文献	IV-3-	18
4.	変位量によるすべり判定値の検討	IV-4-	1
4-1	概論	IV-4-	1
4-2	試験体の説明	IV-4-	1
4-2-1	試験体の使用材料, 形状および種類	IV-4-	1
4-2-2	ボルト締付け	IV-4-	2
4-2-3	摩擦面処理および粗さ・膜厚・鍍厚の測定	IV-4-	2
4-3	すべり耐力試験	IV-4-	3
4-3-1	ボルト軸力の計測	IV-4-	3
4-3-2	すべり耐力試験方法	IV-4-	4
4-3-3	ボルト軸力計測結果	IV-4-	4
4-3-4	すべり係数算出結果	IV-4-	5
4-3-5	すべり時の変位量の計測結果	IV-4-	5
4-4	すべり時の変位量の考察	IV-4-	6
4-4-1	No. 1 ボルト (内側ボルト) 位置での変位量	IV-4-	6
4-4-2	母板間 (すべり側と固定側の母板) での変位量	IV-4-	9
4-5	結論	IV-4-	11
4-6	おわりに	IV-4-	11
	参考文献	IV-4-	12

1. はじめに

鋼橋の現場接合において、昭和40年以前はリベット接合が主流であったが、昭和40年代に入り徐々にボルト接合が適用され始めた。現在では、溶接接合を適用する場合もあるが、ボルト接合は、工期が短く、作業性もよく、さらに品質管理も容易など、施工性に優れている。これらの理由もあり、現在では、ボルト接合が現場接合の主流になっている。ボルト接合を適用する場合、一般に高力ボルト摩擦接合継手を用いている。

道路橋示方書では昭和48年、鉄道の建造物設計標準では昭和45年にボルトに関する基準が示された。現在の道路橋示方書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)を塗布した状態を基本としている。このため、それ以外の摩擦面を用いる場合には、ボルト試験を実施してからその適用を検討しており、これまで数多くのボルト試験が行われてきた。

ボルト試験では、導入軸力試験、リラクセーション試験あるいはすべり耐力試験が実施されるが、これらの試験方法の詳細に明確な規定はなく、試験実施者の判断で行われているのが現状である。

そこで、WG4では、WG2およびWG3で実施した試験データおよび既往のデータを用いて、ボルト試験に関して明確にされていない試験条件を検討することとした。具体的には、以下の3テーマである。

(WG4のテーマ)

- ・キャリブレーション試験方法の検討(第2章)
- ・リラクセーション試験方法に関する検討(第3章)
- ・変位量によるすべり判定値の検討(第4章)

第2章で検討するキャリブレーション試験に関して、リラクセーション試験やすべり耐力試験を行うときに、ボルト軸力の計測を行うが、その際、事前にボルトにひずみゲージを貼付けた上でボルトに荷重を与え、荷重とひずみの関係を調べるキャリブレーション試験を実施し、ボルト軸力算出に用いる換算率を求める。そして、計測したひずみに換算率を乗じボルト軸力を算出するが、キャリブレーション試験方法が換算率に及ぼす影響やその特性は明確ではなかった。本研究は、換算率に及ぼす影響因子を明確にし、試験方法の改良案を示すことを目的とした実験研究および調査研究である。本実験では、キャリブレーション試験を行い、換算率に及ぼす影響因子を既往のデータも含め検証した。これらの結果から、キャリブレーション試験の改良提案を行い、換算率の適用の留意点を示した。

第3章で検討するリラクセーション試験は、ボルト締付け後からある設定した期間内(例えば1ヶ月)における軸力低下を調べる試験である。試験の実施において、試験開始時を締付け直後とする場合や、締付け直後から30秒後等、ある程度時間を置く場合もあり、初期値の定義は明確にされていなかった。

リラクセーションによるボルト軸力の低下は、締付け直後が大きいことは知られているが、これまで初期値の設定方法が、試験結果に及ぼす影響を定量的に評価されていなかった。本研究は、リラクセーション試験における初期値の影響を明確にすることを目的に行った実験的研究である。本研究では、リラクセーション試験を行い、締付け直後から30秒間のボルト軸力低下の影響が試験結果に及ぼす影響を明

確にし、リラクセーション試験における初期値のあり方を示した。

第4章で検討する変位量によるすべり判定値の検討に関して、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験では、すべりの判定は、すべった時に荷重が下がり変位が大きくなった時としている。ただし、荷重の低下がほとんどなく変位が大きくなるケースでは、近年、建築鉄骨の基準³⁾で示されている変位量0.2mmに達した時の荷重値をすべりと判定する場合がある。ただし、建築分野では摩擦面は赤錆面であり、これまで摩擦面の違いによるすべり時の変位量については明確にされてこなかった。本研究は、摩擦面に応じた変位量によるすべり判断の目安値を提案することを目的に行った実験的研究である。本実験では、無機ジンクリッチペイントやブラスト等、異なる5タイプの摩擦面を有する高力ボルト継手を用いてすべり耐力試験を実施し、すべり時の変位を計測した。また、既往の研究におけるすべり時の変位量も調べた上で、摩擦面に応じた変位量によるすべり判断の目安値を提案した。

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，2017.11.
- 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)，2009.7.
- 3) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.3.

2. キャリブレーション試験方法の検討

2-1 概論

鋼橋の架設現場における部材の接合では、一般にボルト接合を適用しており、高力ボルト継手の試験もこれまで数多く行われてきた。高力ボルト摩擦接合継手のボルト試験においては、リラクゼーション試験やすべり耐力試験が実施されるが、試験方法の詳細に明確な規定はなく、実施者の判断で行われているのも事実である。その1つにキャリブレーション試験がある。

リラクゼーション試験やすべり耐力試験では、ボルト軸力の計測を行うが、その際、計測したひずみに鋼のヤング係数を乗じることでボルト軸力は算出でき、この方法を用いることもある。しかしながら、ボルト材料のヤング係数のばらつきやボルト径の寸法公差も生じることもある。このため、ボルトにひずみゲージを貼付けた上で引張荷重を与え、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験を一般に実施している。この試験状況は図 2-1-1 に示すように、ボルトを専用治具にセットし、荷重を載荷させて行っている。一般にボルト製造会社で行うケースが多いが、大学等の研究機関で行うこともある。ただし、キャリブレーション試験方法が換算率に及ぼす影響やその特性は明確でなかった。本研究は、換算率に及ぼす影響因子を明確にし、試験方法の改良案を示すことを目的とした実験研究および調査研究である。本実験では、キャリブレーション試験を行い、換算率に及ぼす影響因子を既往のデータも含め検証した。これらの結果から、キャリブレーション試験の改良提案を行い、換算率の適用の留意点を示した。



図 2-1-1 キャリブレーション試験の一例

2-2 キャリブレーション試験 I

2-2-1 使用ボルト

本試験で使用する高力ボルトの材料特性を表 2-2-1 に示す。使用ボルトは、本節で示す試験 I では六角ボルト F10T(M22) のボルト長 85mm と 90mm を使用し、次章で述べる試験 II では F10TW(M22) のボルト長 75mm のボルトを用いた。

表 2-2-1 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値

ボルト 径・長さ・規格	ボルト						ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)	試験 番号
	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)		
M22×85(F10T)	1019	1074	19	69	332	32	25	40	0.131	試験I
M22×90(F10T)	1008	1062	18	69	328	32	26	38	0.135	
M22×75(F10TW)	995	1058	20	67	320	32	26	38	0.132	

2-2-2 試験 I の試験方法

試験 I は、表 2-2-1 で示した 2 種類のボルトを対象とし、それぞれ 3 本、合わせて 6 本のボルトを用いて実施した。試験は、図 2-2-1 に示すように、ボルト軸部に 2 枚のひずみゲージを取り付け、ボルト頭部とナット部を専用治具にセットし引張荷重を与え、荷重ごとにひずみを計測した。試験はボルト製造会社 A 社で実施した。

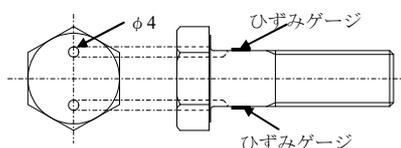


図 2-2-1 ひずみゲージの取り付け

2-2-3 試験 I で用いるボルト径の計測

換算率は、一般に 3 本のボルトの平均値を用いている。これは、同じボルト内（同じ線材）においても、換算率にばらつきが生じるからである。その 1 つの要因にボルト径の寸法公差が考えられる。そこで、製造ロットおよび製造番号が同じボルトに対し、ボルト径の計測をデジタルノギス計(0.01mm)を用いて行った。

計測は、M22×85 で 130 本、M22×90 では 110 本のボルト径を対象に行った。計測箇所はボルト頭から 5mm 離れた軸部、ナット側ねじ部から 5mm 離れた軸部、およびその中央部の 3 ヶ所とし、1 ヶ所につきそれぞれ 2 回（十字の方向に）、合わせて 1440 ヶ所を計測した。

計測結果を表 2-2-2 および図 2-2-2 に示す。これらの結果に示すように、ボルト径は部位によって若干異なり、両ボルトともに、ボルト頭側>ナット側>中央部となった。また、全箇所の平均値は、M22×85 で 21.69mm、M22×90 では 21.77mm であり、ボルト軸力の計測を行う中央部では前者で 21.65mm、後者では 21.74mm であった。次項の 2-2-4 では、これらの結果を用い、標準ボルト径 22mm に対しマイナス側の径が換算率に及ぼす影響を考察する。

表 2-2-2 ボルト径計測結果の集計 (単位:mm)

	M22×85				M22×90			
	頭側	中央部	ナット側	平均	頭側	中央部	ナット側	平均
平均値	21.72	21.65	21.69	21.69	21.80	21.74	21.76	21.77
標準偏差	0.0668	0.0508	0.0522	0.0639	0.0827	0.0919	0.0926	0.0924
最小値	21.53	21.52	21.54	-	21.52	21.52	21.52	-
最大値	21.89	21.82	21.85	-	21.97	21.96	21.94	-

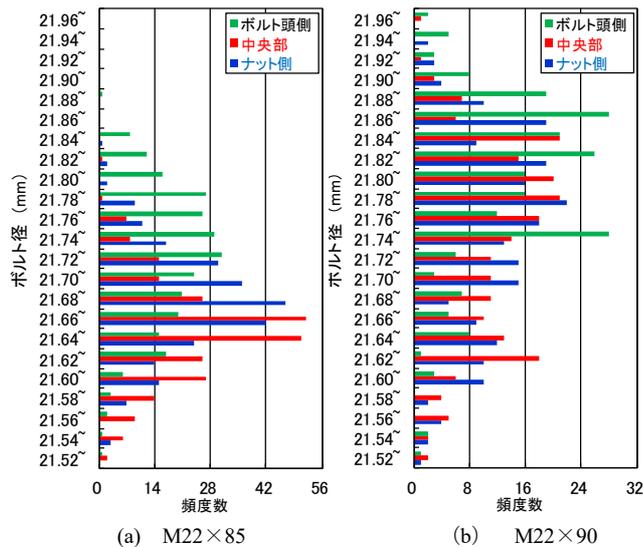


図 2-2-2 ボルト径計測結果の頻度分布

2-2-4 試験 I の試験結果

a) 換算率

表 2-2-3, 表 2-2-4 にそれぞれ M22×85 および M22×90 の試験結果を示す. ここで示す換算率は, 荷重をひずみで除して求めた値であり, ここでは各ボルトの算出結果とその平均値を示している. ここで示す全てのボルト, 全ての荷重域での換算率の平均値 (36 データ) がボルト軸力計測で用いる換算率 (M22×85 : 0.07415, M22×90 : 0.07447) であり, これに計測したひずみを乗じればボルト軸力が算出される. また, 図 2-2-3 はこれらの結果を図示したものであり, この直線の傾きが換算率を示している.

これらの結果に示すように, 製造ロットが同じボルトであっても, 換算率はボルト No.1, 2, 3 によっても若干異なっていることが判る. また, 荷重値によっても異なっており, いずれのボルトにおいても, 荷重が小さければ換算率が高くなる結果であった. 図 2-2-4 は荷重と換算率の関係を示したものである. 必ずしも直線分布であるとは言えないが, 右肩下りの傾向は明確であった. また, 荷重値が最も小さい 50kN のデータはばらつきが大きいように思われ, さらに, 各ボルトの標準偏差にも違いが見られた.

b) ヤング係数比

鋼のヤング係数(205,000N/mm²)および標準ボルト径(22mm)で求めた換算率(以下, ヤング係数算定値)は, 0.07793 (M24 の場合 0.09274) となる. ここでは計測して求めた換算率をヤング係数算定値で除した求めた比率をヤング係数比と称し, 表 2-2-3, 表 2-2-4 ではこれらの算出結果も示している. ここで示すヤング係数比が 100%より低い場合, ボルトのヤング係数が鋼のヤング係数より低いことを示している.

表 2-2-3, 表 2-2-4 に示すヤング係数比の平均値は, それぞれ 95.15%, 95.56%であり, その場合のヤング係数は 195,058N/mm², 195,898N/mm² となり (標準ボルト径と仮定), 両者ともに鋼のヤング係数よりも低くなった. ただし, 同じボルトであってもばらつきが生じており, 例えば, 表 2-2-4 に示す M22×90 では 2.98% (97.35-94.37) の違いが生じており, 言い換えると両ボルトでは約 3%のヤング係数の違いが生じる結果となる. ただし, 同じ製造ロットでは同じ線材を使用しており使用材料の影響は考え難く, この差は計測誤差あるいはボルト径の寸法公差等と考えるのが妥当である.

表 2-2-3 M22×85 の荷重-ひずみ関係
と換算率算出結果(試験 I)

荷重 (kN)	ひずみ(μ)				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	680	665	660	668	0.07353	0.07519	0.07576	0.07481
100	1355	1340	1335	1343	0.07380	0.07463	0.07491	0.07444
120	1625	1610	1605	1613	0.07385	0.07453	0.07477	0.07438
140	1895	1875	1875	1882	0.07388	0.07467	0.07467	0.07440
160	2165	2145	2145	2152	0.07390	0.07459	0.07459	0.07436
180	2440	2415	2420	2425	0.07377	0.07453	0.07438	0.07423
200	2715	2690	2690	2698	0.07366	0.07435	0.07435	0.07412
220	2990	2960	2960	2970	0.07358	0.07432	0.07432	0.07407
240	3265	3240	3240	3248	0.07351	0.07407	0.07407	0.07388
260	3545	3515	3515	3525	0.07334	0.07397	0.07397	0.07376
280	3820	3790	3790	3800	0.07330	0.07388	0.07388	0.07368
300	4095	4070	4060	4075	0.07326	0.07371	0.07389	0.07362
A.平均換算率					0.07361	0.07437	0.07446	0.07415
B.標準偏差					0.00023	0.00041	0.00053	0.00055*
C.ヤング係数比(%)					94.47	95.44	95.55	95.15
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					0.83	1.90	2.41	1.09**

表 2-2-4 M22×90 の荷重-ひずみ関係
と換算率算出結果(試験 I)

荷重 (kN)	ひずみ(μ)				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	670	640	670	660	0.07463	0.07813	0.07463	0.07576
100	1340	1300	1350	1330	0.07463	0.07692	0.07407	0.07519
120	1615	1565	1625	1602	0.07430	0.07668	0.07385	0.07492
140	1880	1830	1900	1870	0.07447	0.07650	0.07368	0.07487
160	2155	2105	2175	2145	0.07425	0.07601	0.07356	0.07459
180	2430	2375	2445	2417	0.07407	0.07579	0.07362	0.07448
200	2700	2640	2720	2687	0.07407	0.07576	0.07353	0.07444
220	2980	2915	2995	2963	0.07383	0.07547	0.07346	0.07424
240	3255	3190	3275	3240	0.07373	0.07524	0.07328	0.07407
260	3530	3465	3560	3518	0.07365	0.07504	0.07303	0.07390
280	3810	3755	3840	3802	0.07349	0.07457	0.07292	0.07365
300	4090	4040	4120	4083	0.07335	0.07426	0.07282	0.07347
A.平均換算率					0.07404	0.07586	0.07354	0.07447
B.標準偏差					0.00043	0.00108	0.00051	0.00124*
C.ヤング係数比(%)					95.01	97.35	94.37	95.56
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					1.64	4.96	2.32	2.98**

* : 全データ(36)での標準偏差。 ** : 3本のボルト間でのヤング係数比 (2.05×10⁶で算出した場合との比率)の最大値と最小値との差

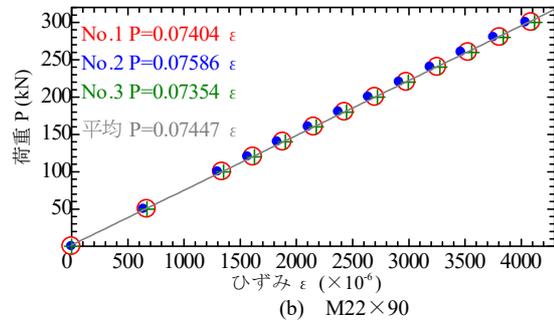
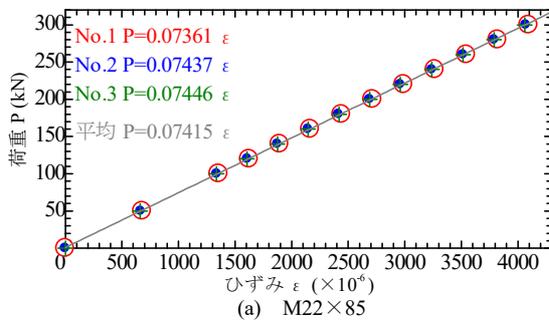


図 2-2-3 荷重とひずみの関係(試験 I)

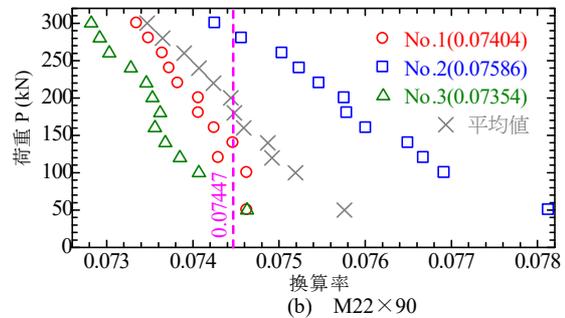
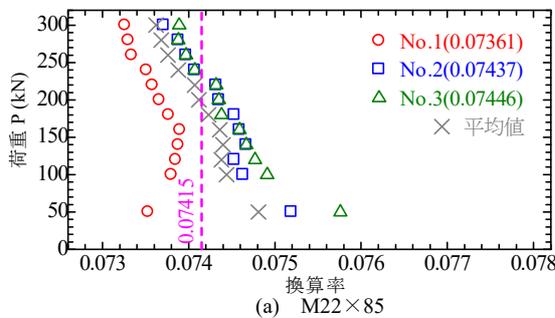


図 2-2-4 荷重と換算率の関係(試験 I)

c) ボルト径の影響の考察

2-2-4 b)で示したように、標準ボルト径で計算したヤング係数比は、M22×85 で 95.15%、M22×90 では 95.56%であった。これらを前項の 2-2-3 で示したボルト径の計測結果の平均値(表 2-2-2)で計算すると、それぞれ 98.25%、97.86%となり、前者で 3.10%、後方で 2.30%の違いが生じ、ボルト径の寸法公差の影響が生じる結果となった。

次に、中央部における最大値と最小値の差は、M22×85 で 0.30mm(21.82-21.52)、M22×90 では 0.44mm (21.96-21.52)であり、同じ製造ロットであっても差異が生じていた。同様にこれらの結果が換算率に及ぼす影響は前者で 2.81%、後者では 3.96%の違いが生じるものと考えられ、ボルト径の寸法公差による換算率の違いも生じると考えられる。

2-3 キャリブレーション試験 II

2-3-1 試験 II の試験方法

試験 II は、表 2-2-1 で示した M22×75 を対象とし、3 本のボルトを用いて前節と同様に試験を行った。さらに No.3 ボルトでは塑性域に入らない荷重の範囲で 3 回繰り返してひずみ計測を行い、3 回目は通常行っている塑性域に達する荷重(300kN)まで載荷した。これは、3 本のボルトでの換算率の差異の要因に、載荷等による試験上（計測上）の誤差も考えられるため、同じボルトで 3 回行うことにより、その影響を確認することとした。その他の基本的な試験方法は試験 I と同じであるが、試験 I と異なるボルト製造会社 B 社で実施し、計測する荷重レベルや荷重の分割数は異なっている。

2-3-2 試験 II の試験結果

a) 換算率

表 2-3-1 に試験 II の結果を示す。これらの結果に示すように、試験 I と同様、製造ロットが同じボルトであっても、換算率はボルト No.1, 2, 3 によって異なっていた。また、荷重値によっても換算率は異なっており、荷重が小さければ換算率が高く、これについても No.1 ボルトを除けば、試験 I と同様の結果であった。図 2-3-1(a)は荷重と換算率の関係を示すが、平均値の分布で判断しても曲線的な分布であり明確な傾向は見られないが、200kN 以上のデータのみで判断すれば、図 2-2-4 と同様右肩下りの傾向を示した。明確な傾向は見られなかった要因は、No.1 ボルトの 50kN, 100kN がその他の計測結果と大きな違いがあり、その影響が生じた結果と考えられる。

表 2-3-1 M22×75 の荷重-ひずみ関係と換算率算出結果(試験 II)

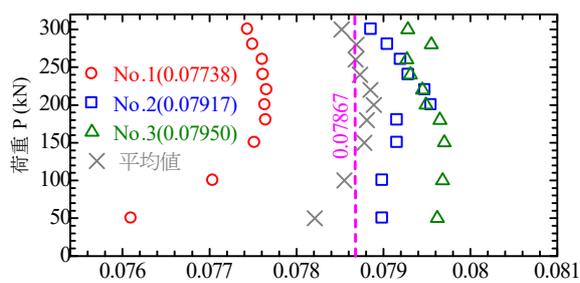
荷重 (kN)	ひずみ(μ)				換算率(荷重/ひずみ)			
	No.1	No.2	No.3	平均	No.1	No.2	No.3	平均
50	657	633	628	639	0.07610	0.07899	0.07962	0.07821
100	1298	1266	1255	1273	0.07704	0.07899	0.07968	0.07855
150	1935	1895	1882	1904	0.07752	0.07916	0.07970	0.07878
180	2318	2274	2260	2284	0.07765	0.07916	0.07965	0.07881
200	2576	2514	2516	2535	0.07764	0.07955	0.07949	0.07889
220	2833	2768	2769	2790	0.07766	0.07948	0.07945	0.07885
240	3092	3027	3026	3048	0.07762	0.07929	0.07931	0.07873
260	3350	3283	3280	3304	0.07761	0.07920	0.07927	0.07868
280	3613	3542	3520	3558	0.07750	0.07905	0.07955	0.07869
300	3874	3804	3784	3821	0.07744	0.07886	0.07928	0.07852
A.平均換算率					0.07738	0.07917	0.07950	0.07867
B.標準偏差					0.00048	0.00022	0.00017	0.00100*
C.ヤング係数比(%)					99.30	101.60	102.02	100.96
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					1.99	0.89	0.56	2.72**

表 2-3-2 No.3 ボルトでの 3 回繰り返し載荷での換算率算出結果

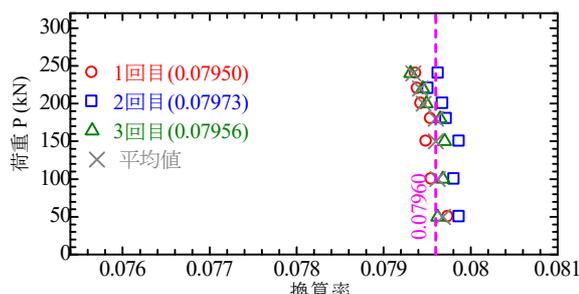
荷重 (kN)	ひずみ(μ)				換算率(荷重/ひずみ)			
	1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均
50	627	626	628	627	0.07974	0.07987	0.07962	0.07974
100	1257	1253	1255	1255	0.07955	0.07981	0.07968	0.07968
150	1887	1878	1882	1882	0.07949	0.07987	0.07970	0.07969
180	2263	2258	2260	2260	0.07954	0.07972	0.07965	0.07963
200	2518	2510	2516	2515	0.07943	0.07968	0.07949	0.07953
220	2771	2767	2769	2769	0.07939	0.07951	0.07945	0.07945
240	3024	3014	3026	3021	0.07937	0.07963	0.07931	0.07944
A.平均換算率					0.07950	0.07973	0.07956	0.07960
B.標準偏差					0.00013	0.00013	0.00014	0.00016*
C.ヤング係数比(%)					102.02	102.31	102.09	102.14
D.ヤング係数比のMax-Min(%)					0.49	0.47	0.50	0.29**

注) 表 2-3-2 のデータは表 2-3-1 の No.3 ボルトの試験時において塑性域に入らない荷重範囲で 3 回載荷して算出した換算率。

*: 全データでの標準偏差。 **: 3 本のボルトのヤング係数比の最大値と最小値との差



(a) M22×75



(b) No.3 ボルトでの 3 回繰り返し載荷

図 2-3-1 荷重と換算率の関係(試験 II)

b) ヤング係数比

表 2-3-1 に示すヤング係数比の平均値は、100.96%であり試験 I と異なり 100%を超えた。これは次章で示すが材料の影響である。また、同じボルトであってもばらつきが生じており、2.72% (102.02-99.30) の違いが生じており、これについては試験 I と同等であった。これらの違いは、約 3%ボルト軸力算定結果に違いが生じることを意味している。

c) ボルト径の影響について

計測に先立ち、ボルト軸方向の中央部にてボルト径を計測したが、No.1, No.2, No.3 ボルトでそれぞれ、21.87, 21.88, 21.87mm であり、ボルト径の違いは認められなかった。このため、上記で述べた個々のボルトによる換算率の違いは、ボルト径の影響ではないと考えられる。

d) 試験上（計測上）の誤差の影響について

表 2-3-2 および図 2-3-1(b)に、No.3 ボルトにおける 3 回繰り返し計測した結果を示す。図 2-3-1(b)に示す横軸間隔は、図 2-2-4 および図 2-3-1(a)と同様としている。これらの結果に示すように、同一ボルトで繰り返し载荷の計測では、必ずしも試験結果は一致しない。しかし、図 2-3-1(a)と比較して誤差は小さく、また、表 2-3-1、表 2-3-2 に示す標準偏差も小さくなっており、同一ボルトで行った場合、試験上（計測上）の誤差はほとんどないと考えられる。ただし、これは試験用治具にセットされた状態での繰り返し载荷であり、試験用治具からボルトを取り外し、再度ボルトをセットした場合も、同様の結果になるとは言い切れない。これについては、今後の検討課題である。

2-4 キャリブレーション試験の統計調査

2-4-1 調査概要

本調査は、当部会で実施したボルト試験¹⁾⁻⁴⁾、また鉄道・運輸機構⁵⁾⁻¹³⁾および駒井ハルテック^{14),15)}でのボルト試験、さらに公開されているボルト試験¹⁶⁾で行ったキャリブレーション試験結果を調査した。調査対象は、M22 と M24 とし、主にボルト製造会社で実施された試験データとした。

調査できたデータ数量は、74 試験データである。なお、キャリブレーション試験は、2-2、2-3 で示したように、1 つのデータで 3 本のボルトを用いて行われるが、調査データの内、3 試験で 2 本、2 試験では 5 本のボルトを用いて行われたこともあり、合わせて 223 本ボルトの統計調査である（数量の詳細は表 2-4-1 を参照）。

2-4-2 調査結果

a) ボルト長の影響

調査結果の集計値を表 2-4-1 に示し、図 2-4-1 には横軸にボルト長、縦軸に換算率を示す。調査できたボルト種別は、F10T, F10TW, S10T, S14T および F8T である。なお、図 2-4-1 に示すように、M22 では 70mm 以下のボルト、M24 では 75mm 以下のボルトでは明らかにその他のボルトより換算率は高く、特に M24 では顕著であり、表 2-4-1 ではこれを考慮して整理している。これらの短いボルト（以下、短ボルト）を除けば、換算率にはボルト長の影響は見られなかった。

図 2-4-1(a)に示す F10T(S10T, S14T も含む)-M22 は、ボルト種別による明確な差異は見られず、70mm を超えるボルトにおいて、換算率は表 2-2-3, 表 2-2-4 と同様、ヤング係数算定値よりも低く、ヤング係数比で示すと、例えば F10T で 96.59%, S10T では 97.26%であった。一方、70mm 以下では、逆にヤ

ング係数算定値よりも高く、F10T で 103.52%，S10T では 104.96%であった。なお、データ数量は少ないが S14T においても、F10T や S10T と大きな違いはみられなかった。

図 2-4-1(b)に示す F10T(S10T,S14T も含む)-M24 においても、ボルト種別による差異は見られないが、75mm を超えるボルトにおいて、換算率は、M22 とは逆にヤング係数算定値より高く、ヤング係数比で示すと、F10T で 101.24%，S10T では 104.68%であり、さらに、75mm 以下では、F10T では 115.08%と高かった。

図 2-4-1(c)に示す F8T-M22 においては、70mm を超えるボルトの換算率は、ヤング係数算定値よりも低く、ヤング係数比で示すと 96.32%であり、F10T-M22 と大きな違いは見られず、また、100%を超えるデータは見られなかった。一方、70mm 以下では、ヤング係数算定値よりも高く、106.80%であった。

図 2-4-1(d)に示す F8T-M24 は、F10T-M24 と同様、ヤング係数算定値よりも高く、75mm を超える場合ヤング係数比は 101.43%，75mm 以下では、117.42%であった。

表 2-4-1 キャリブレーション試験の統計調査結果の集計

ボルト			数量	換算率					ヤング係数比 (%)				
規格	径	長さ		平均値	標準偏差	最大値 Max	最小値 Min	Max-Min	平均値	標準偏差	最大値 Max	最小値 Min	Max-Min
F10T	M22	>70	37	0.0752	0.002177	0.0802	0.0721	0.0080	96.5	2.774	102.9	92.5	10.3
		≦70	6	0.0806	0.002105	0.0844	0.0782	0.0061	103.5	2.701	108.3	100.4	7.8
F10TW	M22	>70	9	0.0762	0.001920	0.0794	0.0744	0.0049	97.8	2.464	101.9	95.5	6.3
		>70	21	0.0757	0.001805	0.0801	0.0734	0.0066	97.2	2.383	102.8	94.2	8.5
S10T	M22	≦70	3	0.0817	-	0.0827	0.0811	0.0015	104.9	-	106.1	104.1	2.0
		>70	3	0.0767	-	0.0774	0.0758	0.0016	98.5	-	99.4	97.3	2.0
F10	M24	>75	28	0.0938	0.002657	0.1009	0.0885	0.0124	101.2	2.864	108.8	95.4	13.4
		≦75	5	0.1067	0.001784	0.1097	0.1055	0.0004	115.0	1.921	118.3	113.7	4.6
S10	M24	>75	3	0.0970	-	0.0972	0.0968	0.0004	104.6	-	104.8	104.4	0.4
		>75	3	0.0909	-	0.0929	0.0891	0.0037	98.0	-	100.1	96.1	4.0
F8	M22	>70	48	0.0750	0.001366	0.0767	0.0703	0.0064	96.3	1.749	98.5	90.3	8.2
		≦70	9	0.0832	0.001630	0.0855	0.0809	0.0046	106.8	2.092	109.8	103.8	5.9
	M24	>75	39	0.0940	0.002101	0.0983	0.0897	0.0086	101.4	2.263	106.0	96.7	9.3
		≦75	9	0.1089	0.001786	0.1127	0.1069	0.0057	117.4	1.927	121.6	115.3	6.2

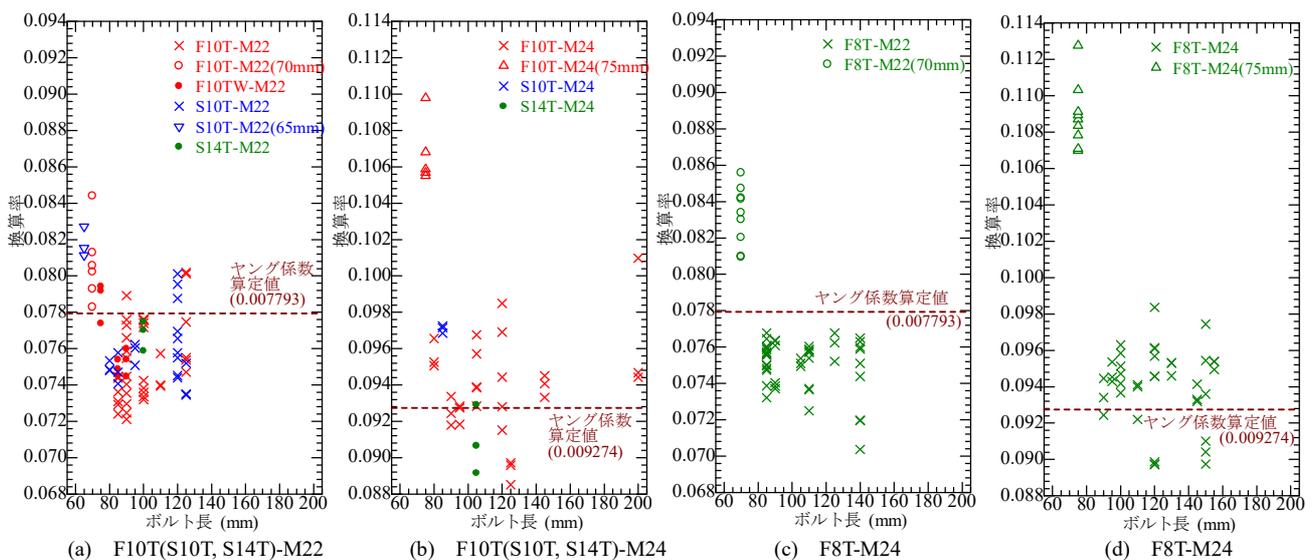


図 2-4-1 換算率とボルト長の関係

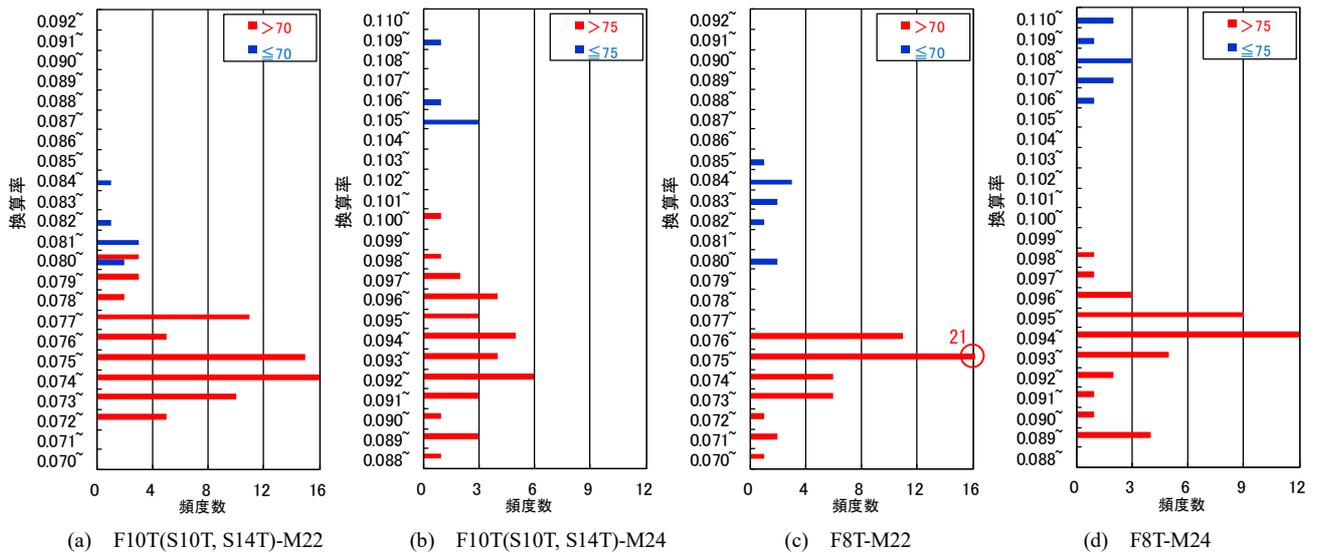


図 2-4-2 換算率の頻度分布

図 2-4-2 に換算率の頻度分布を示す。短ボルトを除く赤線のデータ（ここでは S10T および S14T は F10T と違いはほとんどなく全ボルトを含めたデータである）で判断すると、F10T-M24 はデータの範囲が広く、ピークが無い頻度分布であるが、それ以外はピークがあり、特に F8T-M22 では狭い範囲での分布状態であった。表 2-4-1 で示す標準偏差においても、 $F10T-M24 > F10T-M22 > F8T-M24 > F8T-M22$ であった。また、平均値（短ボルトを除く）は、F10T-M22, F10T-M24, F8T-M22, F8T-M24 でそれぞれ、0.07526, 0.09389, 0.07507, 0.09407 であり、S10T-M22 および S10T-M24 では、それぞれ 0.07577, 0.09708 であった。

以上のように、短ボルトを除けば、実際の換算率はヤング係数算定値より M22 では低く、逆に M24 では高くなる。仮に、ヤング係数算定値でボルト軸力を算定すれば、計測で求めた換算値に対し、表 2-4-1 で示したヤング係数比のパーセンテージのボルト軸力が算出されることとなる（例えば F10T-M22(>70mm)では実際の軸力の 96.59%となる）。このため、事情によりキャリブレーション試験が行えない場合は、表 2-4-1 で示した換算率の平均値を用いることを推奨する。

b) 引張強度（材料）の影響

図 2-4-3 は横軸にボルトの引張強度、縦軸に換算率を示す。図中には引張強度に対する換算率の回帰直線を示し、表 2-4-2 は回帰分析結果を示す。なお、調査データにおいて、一部引張強度が不明なデータもあり、これについてはプロットしていない。また、F10T においては、S10T との違いはなく合わせて回帰分析を行っている。

図に示すように、F10T-M24(>75mm)を除けば、いずれのボルト種別やボルト径においても、引張強度が高くなれば換算率は低くなる負の相関が見られた。相関係数においても、F8T-M24(≤75mm)を除けば 0.40 を超え、相関ありと判断でき、0.70 を超える強い相関も見られた。2-3 の試験結果は、F10TW であるのに関わらずヤング係数算定値より換算率が高かったのは、図 2-4-3(a)に示すように、引張強度が低いことが要因と判る。

以上のように、換算率は引張強度と負の相関が認められたが、鋼のひずみ計測において、ヤング係数が同じであれば材料強度の影響はなく、言い換えると、換算率と引張強度との相関は生じないと考えられる。すなわち、引張強度が高い場合、ボルト材料のヤング係数は高くなっていると考えることが妥当である。

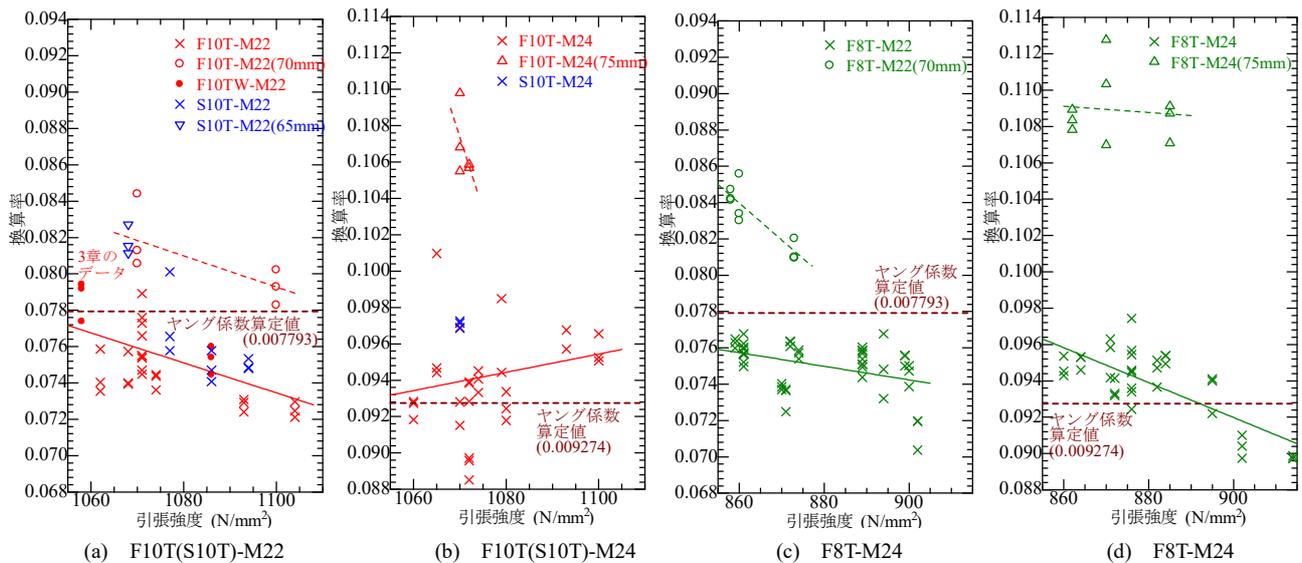


図 2-4-3 換算率と引張強度関係

表 2-4-2 回帰分析の集計結果

計測位置	ボルト		回帰直線	相関係数	備考
	径	長さ			
F10T	M22	70mm超え	$y = -0.8245 \times 10^{-5}x - 0.1642$	-0.555	図-2-4-3(a)
		70mm以下	$y = -0.8557 \times 10^{-5}x + 0.1734$	-0.737	
	M24	75mm超え	$y = 0.50244 \times 10^{-5}x + 0.0259$	0.210	図-2-4-3(b)
		75mm以下	$y = -0.79585 \times 10^{-4}x + 0.9589$	-0.489	
F8T	M22	70mm超え	$y = -0.3742 \times 10^{-5}x + 0.1079$	-0.416	図-2-4-3(c)
		70mm以下	$y = -0.2034 \times 10^{-4}x + 0.2589$	-0.880	
	M24	75mm超え	$y = -0.9607 \times 10^{-5}x + 0.1784$	-0.798	図-2-4-3(d)
		75mm以下	$y = -0.1712 \times 10^{-5}x + 0.1238$	-0.097	

c) 荷重値（ボルト軸力）の影響

表 2-2-3, 表 2-2-4, 表 2-3-1, 表 2-3-2 および図 2-2-4, 図 2-3-1 で示したように, 換算率は荷重値により異なるが, 試験で用いるボルトの換算率は, すべての荷重値の平均値を用いている. そこでは, 荷重の影響を明確にすることとした.

図 2-4-4, 図 2-4-5 は横軸に荷重値, 縦軸には換算率 (平均換算率) と各荷重での換算率を差し引いて求めた値を示している. 例えば, 表 2-2-3 に示す M22×85 の No.1 ボルトでは, 平均換算率は 0.07361 であるが, 荷重が 50kN 時の換算率は 0.07353 でありその差は 0.0008, 荷重が 300kN の時の換算率は 0.07326 でその差は-0.0027 であり, 図 2-4-4, 図 2-4-5 の縦軸はこの換算率の差 (以下, 換算率差) を示している. また, 図中には各荷重値での平均値とその平均値を用いて求めた回帰直線を示している.

図 2-4-4 に示す短ボルトでない場合 (M22: >70mm, M24:>75mm) では, 荷重が大きくなれば, 換算率差は小さくなり, ある荷重値を境 (後に明確にするが 182kN 付近) に換算率差は負に転じ, さらに荷重が高くなれば負の換算率差が大きくなる傾向が示された. また, 回帰直線の傾きに大きな違いなく, この傾向にボルト種別やボルト径の影響はないと考えられる. なお, F8T-M24 のみ若干傾きが大きいのように思われるが, これは 50kN の平均値が異常に高くなった影響であり, 図 2-4-4 (d)中に示すように, これを除いた回帰直線で判断すれば, ほぼ傾きは同じになった.

一方、図 2-4-5 に示す短ボルトでは、データ数は少ないが、M22 では図 2-4-4 とほぼ同等であった。図 2-4-5(d)に示す F8T-M24 では右肩下がりの傾向は同じであるが傾きが大きい。これは 50kN の平均値が大きくその影響であり、図中の点線はこの 50kN のデータを除いて求めた回帰直線を示しているが、それでもその他の回帰直線の傾きより大きかった。さらに、図 2-4-5(b)に示す F10T-M24 では逆に右肩上がりの相関となった。以上のように、M24 の短ボルトでは、その他のボルトと一部で傾向が異なった。ただし、データ数量が少ないため、これが偶然なのかどうかは現在のところ不明である。

図 2-4-6(a)は、横軸に荷重値、縦軸に F10T-M24($\leq 75\text{mm}$)および F8T-M24($\leq 75\text{mm}$)を除いた換算率差の平均値を示し、これらを用いた回帰直線を示している。この回帰直線を用い縦軸が 0($y=0$)になる荷重値は 182kN であり、現在の換算率算定法は、ボルト軸力が 182kN であれば軸力算定に影響のない換算率である。言い換えると 182kN 付近のボルト軸力であれば精度よくボルト軸力を計測できるが、それより大きくても小さくてもボルト軸力の誤差が生じてくるものと考えられる。その影響度は、 $4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$ (回帰式の傾き)となる。

図 2-4-6(b)は、横軸に荷重値、縦軸に換算率差の標準偏差を示す。図 2-4-3(b)および図 2-4-4(b)で示したように、F10T-M24($> 75\text{mm}$)ではばらつきが大きかったが、図 2-4-6(b)で示す標準偏差も大きいことが判る。その他のデータでは、ボルト種別やボルト径による標準偏差に大きな違いは見られないが、50kN の標準偏差はボルト種別に依らず高く、分布幅が広いことが判る。これらを考慮すると、現状のキャリブレーション試験を行う場合において、より精度よく換算率を算出するには、ばらつきが大きい 50kN のデータは除外して換算率を算定するのがよいと考えられる。

d) 1 試験データ (3 本)内での試験結果の違いについて

表 2-2-3, 表 2-2-4, 表 2-3-1 で示したように、1つの試験データ(3 本)内であっても換算率が異なり、ヤング係数比の最大値と最小値の差 (表 2-2-3, 表 2-2-4, 表 2-3-1 中に示す D.ヤング係数比の Max-Min) では 2.9%の違いが生じる場合もあり、言い換えると 2.9%ボルト軸力に違いが生じることとなる。そこで、1 試験データ内で換算率にどの程度の違いが生じるかを明確にするため、図 2-4-7 には 74 データにおけるヤング係数比の Max-Min を縦軸に、横軸にはボルト長で示す。

図に示すように、ボルト長との関係性はなく、全体的にばらつきがあり、3%以下となるデータが多いが、16 データでは 3%を超えた。また、最大では 7.1%なる場合も見られたが、これは図 2-4-1(b)で示すように、F10T-M24 のボルト長 200mm のデータであり、このデータでは 3 本中 1 本が極端に高くなるデータが存在したからである。なお、ボルト種別による明確な違いは見られず、平均値は M22 で 1.87%、M24 では 2.21%であった。

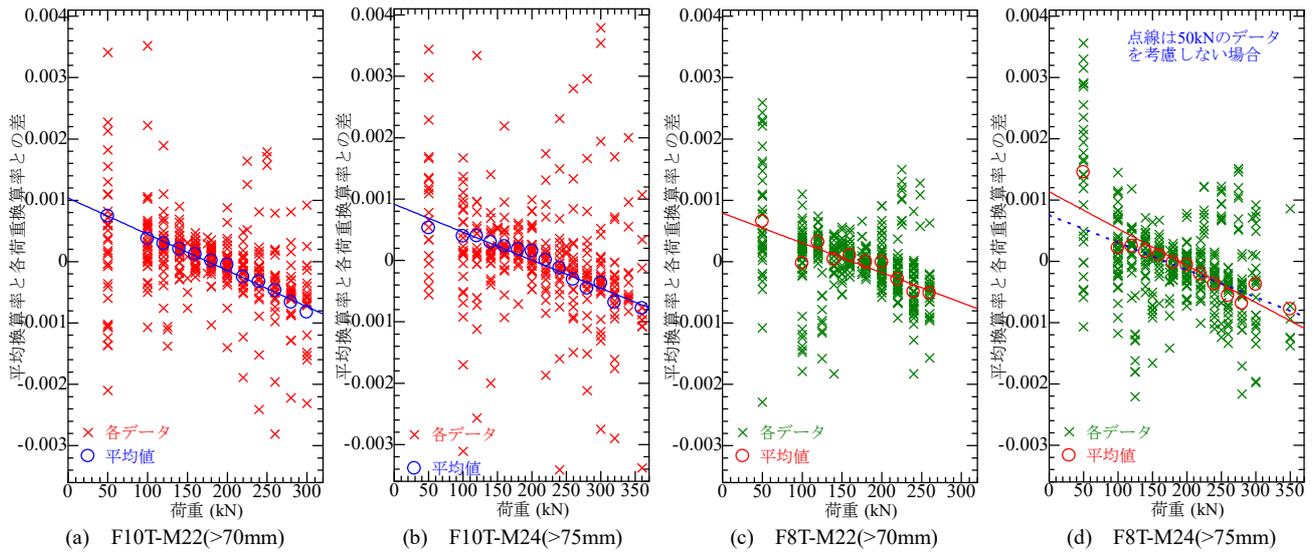


図 2-4-4 平均換算率と各荷重時での換算率との差 I (短ボルトでない場合)

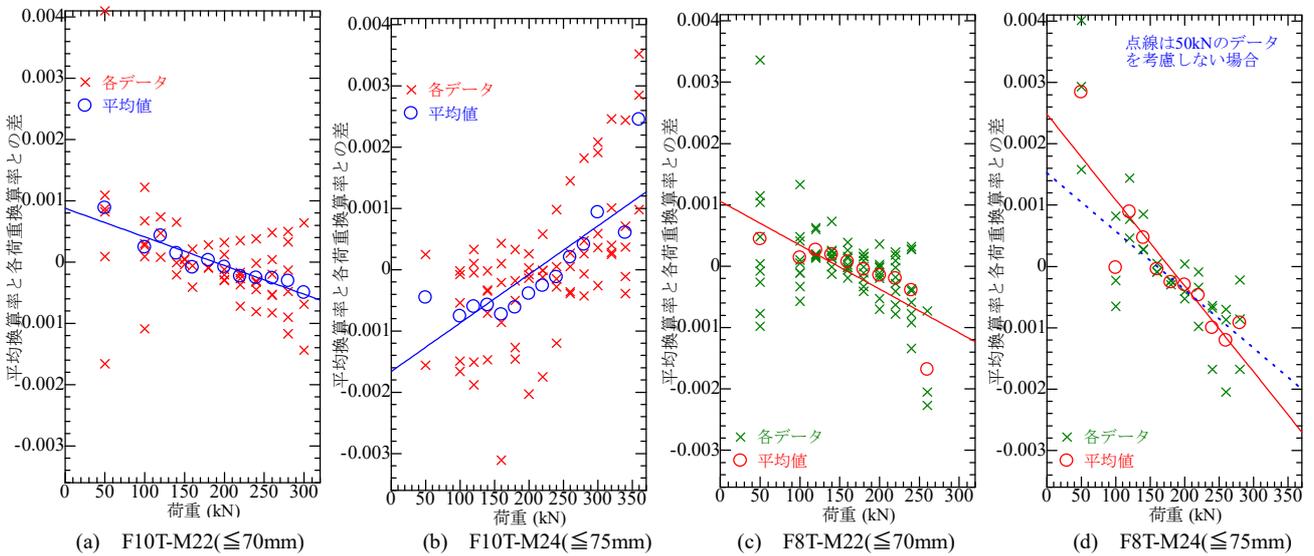


図 2-4-5 平均換算率と各荷重時での換算率との差 II (短ボルトの場合)

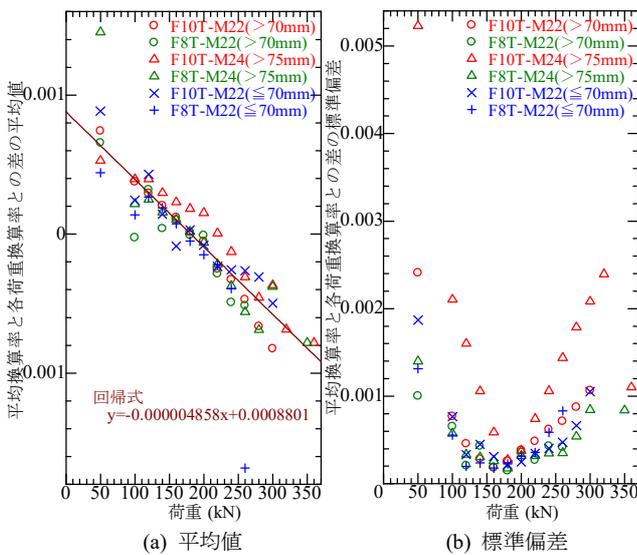


図 2-4-6 平均換算率と各荷重値換算率との差

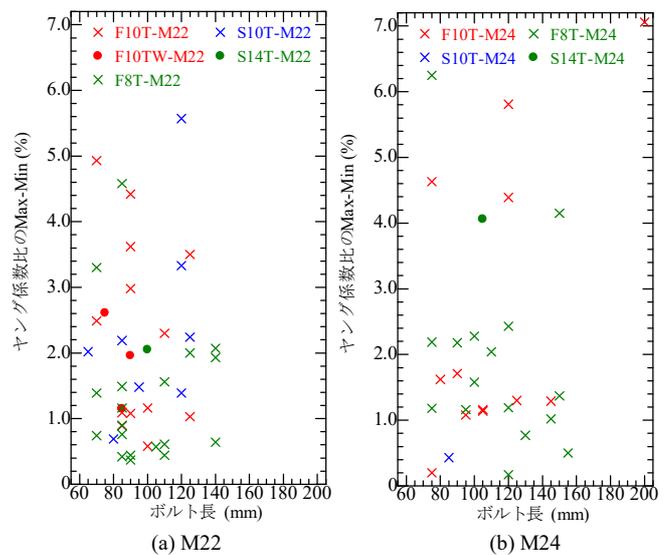


図 2-4-7 1 データ (3 本) 内でのヤング係数比の Max-Min (%)

2-5 キャリブレーション試験の考察と改良提案

これまで述べてきたように、キャリブレーション試験は荷重（ボルト軸力）依存性がある。そこで、本章では、これがどの程度、ボルト軸力測定に影響するのかを示し、荷重依存性を考慮したキャリブレーション試験の改良案を検討する。

前節の 2-4 で述べたように、現在の換算率算定方法では、ボルト軸力が 182kN 付近では精度よく計測できる換算率であると考えられる。これは、低い荷重域から高い荷重域までの載荷試験で得られた換算率の平均値を用いているからである。実際に計測されるボルト軸力は導入軸力付近であり、例えば、F10T-M22 であれば導入軸力は 226kN でありその差 44kN となるが、これがどの程度影響するのかをまず調べてみる。

荷重による影響については、図 2-4-6(a)で示したように、影響度を表す回帰式の傾きは $4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$ であり、これを用いて 44kN の影響を算定すると、換算率として 0.00021 の違いが生じると考えられる。M22 のヤング係数算定値は 0.07793 であり、その影響度として 0.27%、言い換えると導入軸力として 0.27%の違いが生じることとなる。同様に、導入軸力が 262kN である F10T-M24 では 0.42%影響することとなる。

荷重依存性を考慮した、より精度の高い換算率となるキャリブレーション試験方法としては、導入軸力のみ荷重値でキャリブレーション試験を行い、これで求めた換算率を用いればよいと考えられる。その際、複数回の繰り返し載荷をするのが良いと考えられる。ボルト試験では同じ試験を 3 回行う場合や 5 回行う場合があるがより精度の高い換算率とするため、1 本のボルトにつき 5 回、これを 3 本のボルトで行うのがよいと考えられる。この方法であれば、15 データで求めた換算率であり、従来の方法より少ない計測回数（表 2-2-3, 表 2-2-4 では 36 データ）でのキャリブレーション試験となる。なお、この試験方法で換算率を算定したとしても、精度よく算出されるボルト軸力の範囲は、導入軸力付近である。例えば、予備締め（導入軸力の 60%）のボルト軸力（M22 では 136kN, M24 では 157kN）であれば、先と同様にその影響度を算定すれば、M22 では 0.56%, M24 では 0.55%の違いが生じる。そのため、これらの影響を考慮して換算率を補正するのがよいと考えられる。なお、補正に用いる図 2-4-6(a)の回帰式($4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$)は、F10T-M24 および F8T-M24 を除いて算定したものであるが、これらのボルトでも適用できる可能性はある。しかし、現状ではこれを明言するのは困難な状況であり、適用の範囲外とするのがよいと考えている。

上記で示したキャリブレーション試験の改良案をまとめると、キャリブレーション試験は、ボルトの導入軸力（例えば、F10T-M22:226kN, F10T-M24:262kN）である荷重値を載荷し、そのひずみから換算率を算定する。これを 1 本のボルトで 5 回、3 本のボルト行いその平均値を用いる。なお、換算率は軸力依存性があるので、予備締め計測を行う等、導入軸力と大きく異なるボルト軸力を計測する場合には、 $4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$ に応じた換算率の補正を行うのがよい。なお、この補正は、M24 でボルト長が 75mm 以下では行わないのがよい。

2-6 結 論

本研究は、換算率に及ぼす影響因子を明確にし、試験方法の改良案を示すことを目的とした実験研究（3 試験データ 9 ボルト）および調査研究（74 試験データ 223 ボルト）である。本研究から得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) F10T-M22 のボルト径の計測結果において、中央部（ボルト軸方向）の平均値は 21.7mm であり、ボルト径の最大値と最小値の差は 0.4mm であった。これは、換算率に違いが生じる要因の 1 つと考えられる。
- (2) 換算率は、短いボルト（短ボルト）でなければボルト長による換算率の差異はない。ここでいう短ボルトとは、M22 では 70mm 以下、M24 では 75mm 以下のボルトである。
- (3) 調査結果（表 2-4-1）による換算率の平均値は（短ボルトを除く）、F10T-M22, F10T-M24, F8T-M22, F8T-M24 でそれぞれ、0.07526, 0.09389, 0.07507, 0.09407 であった。また、S10T-M22 および S10T-M24 では、それぞれ 0.07577, 0.09708 であった。これらは、ヤング係数算定値（鋼のヤング係数および標準ボルト径で算出した場合のことであり、M22 で 0.07793, M24 では 0.09274）より M22 では低く、逆に M24 では高かった。なお、短ボルトは、いずれのボルト種別およびボルト径においても、換算率は高くなった。
- (4) 換算率は、引張強度が大きくなれば低くなる負の相関が認められた。ただし、鋼のひずみ測定において、ヤング係数が同じであれば材料強度の影響はないと考えられ、引張強度が高い場合、ボルト材料のヤング係数は高くなっているものとするのが妥当である。
- (5) 換算率は、1 試験で 3 本のボルトを用いて算出するが、同じ製造ロットのボルトであっても、換算率に若干の違いが生じた。調査結果におけるヤング係数比の最大値と最小値の差の平均値は、M22 で 1.87%、M24 では 2.21% となり、最大では 7.1% となる場合もあった。
- (6) 換算率は、荷重（ボルト軸力）の影響を受け、荷重が高ければ、換算率は低くなる傾向が示された。その影響度は、 $4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$ である。
- (7) 現在のキャリブレーション試験方法（低い荷重域から高い荷重域でのひずみの平均値を使用）は、ボルト軸力が 182kN 付近であれば、精度よく計測できる試験方法であると考えられる。ただし、換算率は軸力の影響を受けるので、ボルトの導入軸力（M22: 226kN, M24: 262kN）の計測では、F10T-M22 で 0.27%、F10T-M24 では 0.42% の誤差が生じる。
- (8) 現在のキャリブレーション試験方法を用いて換算率の精度を上げるには、ばらつきが大きい低い荷重域(50kN)のデータは除外して換算率を算定するのがよい。さらに、精度を向上させる試験方法として、ボルトの導入軸力となる荷重を載荷し、そのひずみから換算率を算定するのがよい。これを 1 本のボルトで 5 回、3 本のボルト行いその平均値を用いる。なお、換算率は荷重依存性があるので、導入軸力と大きく異なるボルト軸力域を計測する場合には、 $4.858 \times 10^{-6}/\text{kN}$ に応じた換算率の補正を行うのがよい。

参考文献

- 1) 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, 2019.2.
- 2) 南 邦明, 田村 洋, 白旗弘実, 内田大介, 吉岡夏樹, 濱 達矢: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験におけるすべり発生時の変位量, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 2, pp. 249-256, 2019.8.
- 3) 白旗弘実, 南 邦明, 藤野大地, 宮井大輔, 矢野将太, 横田 渉: F10T を用いた高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角法の適用の検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 1, pp. 1-14, 2020.1.
- 4) 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. 427-439, 2012.6.
- 5) 南 邦明, 徳富恭彦, 清水織恵, 河村健一, 森井茂幸: 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の導入軸力確認試験, 土木学会論文集 A1, Vol. 69, No. 1, pp. 133-138, 2013.4.
- 6) 南 邦明, 吉原伸行, 徳富恭彦, 鈴木茂弘: りん酸塩処理した溶融亜鉛めっき接合面の高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.69.No.3, pp.467-480, 2013.10.
- 7) 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, 2017.1.
- 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, 2018.1.
- 9) 南 邦明, 横山秀喜, 徳富恭彦, 森井茂幸: 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.74.No.3, pp.385-398, 2018.10.
- 10) 南 邦明, 横山秀喜, 斉藤雅充, 村上貴紀: 厚膜型無機ジンクリッチペイントを施し 15%増し締めした高力ボルト継手に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文集, Vol. 75, No.2, pp127-140, 2019.5.
- 11) 南 邦明, 横山秀喜, 斉藤雅充, 村上貴紀: 金属溶射を施したフィラープレートを有する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.75, No.3, pp.320-331, 2019.11.
- 12) 南 邦明, 横山秀喜, 天野貴文: 一次締め 24 時間後に本締め施工する高力ボルト継手における継手形式および板厚の影響, 土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 1, pp. 61-66, 2020.1.
- 13) 筒井康平, 南 邦明, 横山秀喜, 天野貴文, 田村 洋: 表裏面で仕様の異なる摩擦面における高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動 (土木学会論文集 A1 投稿中)
- 14) 金城 力, 峯山智也, 吉岡夏樹, 山口隆司: 施工段階を配慮した 2 回締め高力ボルトセットを用いた高力ボルト摩擦接合継手の適用性に関する研究, 日本鋼構造協会 鋼構造論文集, Vol.24, No.93, pp39-53,2017.3
- 15) 大西孝典, 溝口孝夫, 吉岡夏樹, 齋藤史郎, 篠崎裕一: 両側に補強部材を連結する 2 段締めナットの開発, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I -446,2014.9
- 16) 国土交通省 国土技術政策研究所: 国土技術政策総合研究所資料 No.827,2016.2.

3. リラクゼーション試験方法に関する検討

3-1 概 論

鋼橋の現場接合には、溶接接合とボルト接合があるが、ボルト接合を用いる場合、一般に高力ボルト摩擦接合継手を用いている。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)を塗布した状態を基本としている。このため、それ以外の摩擦面を用いる場合には、ボルト試験を実施してからその適用を検討しており、これまで数多くのボルト試験が行われてきた。ボルト試験では、リラクゼーション試験やすべり耐力試験が実施されるが、試験方法の詳細に明確な規定はなく、試験実施者の判断で行われているのが現状である。その1つにリラクゼーション試験における試験開始の初期値の設定方法が挙げられる。

リラクゼーション試験は、ボルト締付け後からある設定した期間内(例えば1ヶ月)における軸力低下を調べる試験であるが、その際、試験開始時を締付け直後とする場合や、締付け直後から30秒後等、ある程度時間を置く場合もあり、初期値の定義は明確にされていなかった。リラクゼーション試験は、本来、締付け直後から行うべきと考えられるが、この場合、締付け直後の軸力低下にばらつきが生じ、このばらつきが試験結果に大きく影響することが考えられていた。これに配慮し30秒後程度する場合が多いが、この間の軸力の低下は大きいのも事実である。ただし、これまで初期値の設定方法が、試験結果に及ぼす影響を定量的に評価されていなかった。

本研究は、リラクゼーション試験における初期値の設定方法が試験結果に及ぼす影響を明確にすることを目的に行った実験的研究である。本研究では、導入軸力、無機ジンクの膜厚および摩擦面の違いをパラメータとした高力ボルト摩擦接合継手試験体を作成した。これらの試験体を用いてリラクゼーション試験を行い、軸力導入時から30秒間のボルト軸力低下の影響が試験結果に及ぼす影響を明確にし、リラクゼーション試験における初期値のあり方を示した。

3-2 試験体の説明

3-2-1 試験体の使用材料、形状および種類

本試験で使用した鋼材および高力ボルトの材料特性を表3-2-1、表3-2-2に示す。本研究では、パラメータの異なる試験I、試験IIおよび試験IIIの3試験を実施することとし、試験体はそれぞれT1、T2、T3の3種類を用いた(図3-2-1参照)。使用鋼材は、T1はSM570、T2およびT3ではSM490Yを用い、使用ボルト(すべり側)は、高力六角ボルトF10T(W)-M22とし、ボルト長は75mm(T1)、90mm(T2)および85mm(T3)のボルトを用いた。

図3-2-1に試験体形状を示す。試験体の β 値は、設計ボルト軸力(205kN)、使用鋼材の降伏強度、すべり係数を0.45で算出し、T1、T2およびT3でそれぞれ0.47、0.43および0.59となる試験体である。なお、試験体はすべり側と固定側を設定した。

試験体の種類を表3-2-3に示す。T1試験体は導入軸力をパラメータとした試験体であり、ここでは4レベルの導入軸力となるようナット回転角を変えた試験体(N1~N4)である。T2試験体は無機ジンクの膜厚をパラメータとした試験体であり、膜厚は厚膜(P1)と薄膜(P2)の2種類である。T3試験体は摩擦面

処理方法をパラメータとした試験体であり、摩擦面には無機ジンク(薄膜)(P)、赤さび(R)、ブラスト(B)、グラインダー(G)の4種類である。T1, T2, T3 試験体でそれぞれ4種類, 2種類, 4種類, 合わせて10種類の試験体を用いた。試験体数は各3体作成し、合わせて30体を試験に供した。なお、本研究はリラクセーション試験を対象としたものであるが、本試験体はすべり耐力試験も考慮したものである。すべり耐力試験結果については、別途報告することを考えている。

表 3-2-1 使用鋼材の機械的性質

試験体形状	鋼種	板厚(mm)	機械的性質		
			降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	伸び(%)
T1 (試験I)	SM570	14	653	701	32
	SM570	10	608	635	30
T2 (試験II)	SM490YB	25	451	560	23
	SM490YA	12	434	465	25
T3 (試験III)	SM490YB	19	437	530	23
	SM490YA	12	430	519	23

表 3-2-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値

ボルト 径・長さ・規格	ボルト								トルク 係数値 (平均値)	備考	
	4号試験片				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)			
M22×75(F10TW)	995	1058	20	67	320	32	26	38	0.132	T1	
M22×70(S10T)*	1049	1105	20	74	324	32	27	40	-		
M22×90(F10T)	1008	1062	18	69	328	32	26	38	0.135		T2
M22×85(F10T)	1019	1074	19	69	332	32	25	40	0.131		T3

注) *: 固定側で使用。

表 3-2-3 試験体の種類

試験体		接触面	鋼材		ボルト	β値	本締め
形状	名称		板厚(mm)				
			t	ts			
T1 (試験I)	N1	無機ジンク(標準)	14	10	F10TW ×75	0.47	回転角90°
	N2						回転角75°
	N3						回転角70°
	N4						回転角60°
T2 (試験II)	P1	無機ジンク(厚膜)	25	12	F10T× 90	0.43	設計ボルト 軸力の10% 増し締め
	P2						
T3 (試験III)	P	無機ジンク(薄膜)	19	12	F10T× 85	0.59	
	R	赤さび(自然さび)					
	B	ブラスト(Sa2.5)					
	G	グラインダー					

注)β: 設計ボルト軸力, 使用鋼材の降伏強度, すべり係数 0.45 で算定

t: 母板, ts: 添接板

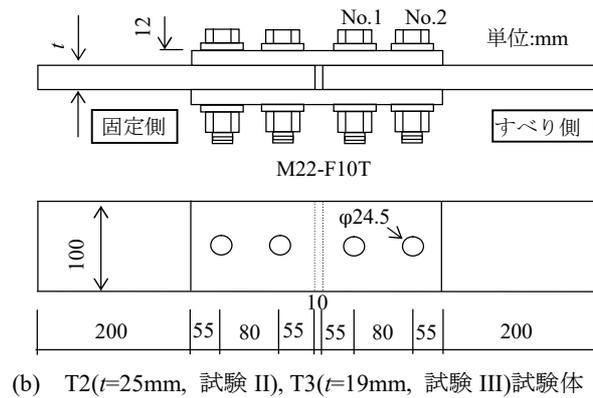
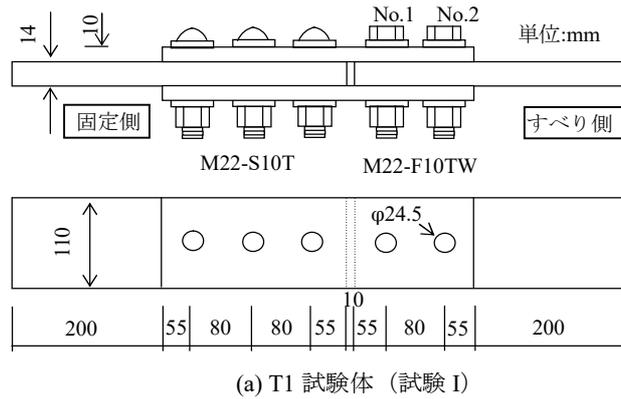


図 3-2-1 試験体形状

3-2-2 摩擦面処理

摩擦面処理は、T3 の G 試験体を除いて、まず、グリッドブラストにて素地調整 (ISO Sa2.5: 75 μm Rzjis 以下) を行った。その後、T3 の B 試験体は、試験の実施まで発錆させないように留意した。

次に、無機ジंकを塗布する T1 の全試験体は、無機ジंकを標準膜厚 75 μm 塗布し、T2 の P1 試験体は 100 μm 、T2 の P2 試験体および T3 の P 試験体は 50 μm を目標に塗布した。これらの試験体は、塗装後約 1 ヶ月間、工場内で乾燥させた後に試験場へ搬送した。

T3 の R 試験体は、自然さびを発錆させるため、約 2 ヶ月間、屋外で曝露した。次に、T3 の G 試験体では、グラインダー (サンダー) 処理を行った。その後、試験の実施まで発錆させないように留意した。

試験体の製作は、T2, T3 は同じ橋梁製作会社で同時に行い、T1 は別の橋梁製作会社で行った。

3-2-3 膜厚の測定

無機ジंकの膜厚は、リラクセーションによる軸力低下に影響する。そこで、膜厚の計測を行った。測定位置は、図 3-2-2 に示すボルト孔周辺の 2 ヶ所 (試験 I では 4 ヶ所) とし、膜厚測定は、渦電流式膜厚計を用いて行った。

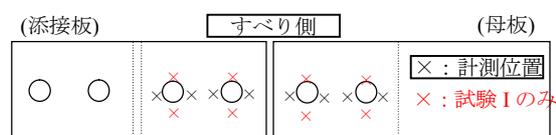


図 3-2-2 膜厚の計測位置

各試験体の膜厚測定結果を表 3-2-4 に示す。これらの結果は、各試験体の平均値を示している。膜厚測定結果において、N 試験体は標準膜厚の 75 μm に対し、70.2~75.4 μm と概ね想定通りであった。P1 試験体は目標の 100 μm に対し 126.2 μm と想定より若干厚く、P2 試験体は目標の 50 μm に対し 57.5 μm とほぼ想定通りとなり、P1 と P2 では膜厚の違いが大きく異なる試験体となった。P 試験体は、ほぼ想定通りの 52.9 μm であった。

表 3-2-4 無機ジンの塗装膜厚計測結果

試験体		膜厚 [μm]									
形状	名称	1体目[-1]			2体目[-2]			3体目[-3]			3体の平均
		母板	添接板	平均	母板	添接板	平均	母板	添接板	平均	
T1	N1	78.4	72.7	75.5	77.8	73.0	75.4	78.3	72.3	75.3	75.4
	N2	73.3	70.3	71.8	69.1	64.5	66.8	70.5	73.6	72.0	70.2
	N3	73.4	67.2	70.3	79.4	67.7	73.5	82.3	69.7	76.0	73.3
	N4	78.4	66.7	72.6	82.0	72.5	77.3	77.8	74.1	75.9	75.3
T2	P1	99.4	126.6	117.5	116.8	131.5	126.6	135.6	133.9	134.4	126.2
	P2	48.6	49.4	49.1	72.4	57.5	62.4	66.7	58.4	61.1	57.5
T3	P	63.4	57.6	59.5	51.5	50.2	50.6	55.2	45.2	48.5	52.9

3-2-4 ボルトの締付け

T1 試験体のボルト締付けにおいて、一次締めは 150N $\cdot\text{m}$ でボルトを締付け、本締めは、ナット回転法を用いて、文献 3)を参考に回転角を N1, N2, N3, N4 でそれぞれ、90°, 75°, 70°, 60°で締付けた。なお、固定側のボルトについては、S10T をシャーレンチで締付けた。

T2, T3 試験体のボルト締付けにおいて、一次締めは設計ボルト軸力の 60%、本締めは、設計ボルト軸力の 110%を目標に締付けた。なお、固定側のボルトについては、さらに 20kN 増し締めした。

3-3 リラクセーション試験方法

3-3-1 キャリブレーション試験

ボルト軸力の計測を行う際、計測したひずみに鋼のヤング係数を乗じることでボルト軸力は算出できるが、ボルト材料のヤング係数のばらつきやボルト径の寸法公差が生じることもある。そこで、ボルト軸力の計測に際し、表 3-2-2 に示すすべり側の 3 種のボルトに対し、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験（1 種類のボルトのつき 3 本のボルトを使用）を実施し、ひずみからボルト軸力を算出するための換算率を求めた。

キャリブレーション試験は、図 3-3-1 に示すように、2 枚のひずみゲージをボルト軸部に貼付し、ボルトを専用治具にセットした上でボルトに引張荷重を与え、荷重とひずみの関係から換算率を求めた。なお、試験はボルト製造会社で実施した。

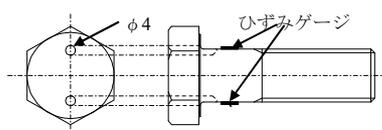


図 3-3-1 ひずみゲージの取り付け

試験結果の一例として、試験Ⅰで使用する F10TW-75 の結果を図 3-3-2 に示す。以下に示す換算率は、荷重をひずみで除して求めたものであり、この直線の傾きが換算率を示している。なお、すべての荷重値での平均値がボルト軸力計測で用いる換算率である。図 3-3-2 に示すように、3 本のボルトで大きな違いはなく、F10TW-75 の換算率は 3 本の平均値 0.07867 とした。同様にして求めた F10T-90 (試験Ⅱ) および F10T-85 (試験Ⅲ) はそれぞれ、0.07447, 0.07415 であった。

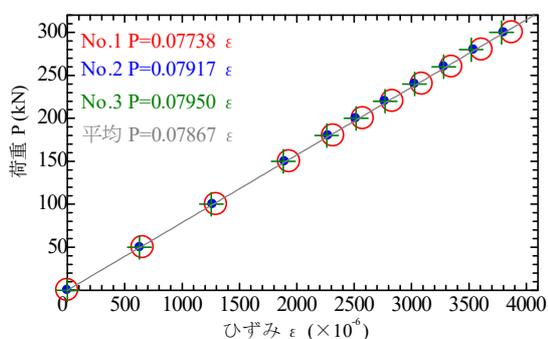


図 3-3-2 キャリブレーション試験結果 (F10TW-75)

3-3-2 リラクゼーション試験

リラクゼーションによる軸力低下を調べるための軸力の計測は、すべてのすべり側のボルトに対して実施した。リラクゼーション試験は、キャリブレーション試験と同様、ボルト軸部に 2 枚のひずみゲージを貼付し (図 3-3-1)、それらのゲージ出力 (ひずみ値) の平均値に前項の 3-3-1 で求めた換算率を乗じ、トルクレンチによりボルトを締付ける際のボルト軸力を算出した。

リラクゼーション試験は、表 3-2-3 で示した 10 ケースであり、合わせて 60 本のボルトで実施した。試験Ⅰは、ボルト製造会社で実施し、計測期間は 558 時間(23 日)とした。その際、軸力導入時 (初期値) の定義は、締付け 3 秒後とした。軸力の計測は、軸力導入時とそこから 30 秒後を手動計測で行い、その後は経過時間とともに計測間隔を大きくして軸力計測を行った。また、温度の影響に配慮し、計測の際、ダミーボルトを用いて行った。次に、試験Ⅱおよび試験Ⅲは、横浜国立大学で同時に実施し、計測期間は 672 時間(28 日)とした。ここでは、10 秒ごとに自動計測できるようにデータロガーをセットし、軸力導入時の定義は、軸力導入後に出力されるひずみの最大値とした。このため、締付け直後 (0 秒後) から最大で 9 秒遅れが生じる可能性があることはご了承いただきたい。また、30 秒後とは、軸力導入時とした時点から 30 秒経過した時とした。

試験Ⅱでは、P1-1, P2-1 の固定側のボルト 4 本において、動ひずみ計を用い、1 秒毎に締付け直後 (0 秒後) から 120 秒間の軸力を計測し、0 秒~120 秒間の軸力変動を詳細に調べた。

3-4 リラクゼーション試験結果

3-4-1 試験Ⅰの試験結果

a) 軸力導入初期 (3 秒後, 30 秒後) の計測結果

表 3-4-1 に軸力導入初期のボルト軸力計測結果を示す。ここで示す設計値比率とは、設計ボルト軸力 (205kN) に対する計測軸力の比率を示している。なお、ボルト締付け後、ひずみゲージの不具合により、一部のボルトでは、計測が不能になったケースが生じたため、表中に-で示している。

表 3-4-1 軸力導入初期でのボルト軸力計測結果と 30 秒のリラクゼーションによる軸力低下の影響(試験 I)

試験体		ボルト軸力								軸力低下値 30秒後 [kN]			軸力残存率 30秒後 [%]						
分類	名称	軸力導入時(3秒後) N_a [kN]				軸力導入時から30秒後 N_b [kN]				平均			平均						
		ボルトNo.		平均	設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	設計値比率(%)										
		No.1	No.2			No.1	No.2			No.1	No.2	No.1	No.2	標準偏差					
無機 ジンク	N1-1	276.5	281.5	279.0	136.1	271.7	275.8	273.8	133.5	130.3	4.8	5.7	5.3	3.9	98.3	98.0	98.1	98.6	0.47
	N1-2	269.9	242.4	256.2	125.0	267.1	238.3	252.7	123.3		2.8	4.1	3.4	99.0	98.3	98.7			
	N1-3	278.8	276.2	277.5	135.4	275.2	274.0	274.6	134.0		3.6	2.2	2.9	98.7	99.2	99.0			
	N2-1	253.3	250.7	252.0	122.9	251.4	247.7	249.6	121.7	119.0	1.9	3.0	2.4	3.3	99.2	98.8	99.0	98.6	
	N2-2	249.4	241.2	245.3	119.7	245.2	-	245.2	119.6		4.2	-	4.2		98.3	-	100.0		
	N2-3	229.2	252.8	241.0	117.6	224.3	250.3	237.3	115.8		4.9	2.5	3.7		97.9	99.0	98.5		
	N3-1	223.0	250.1	236.6	115.4	220.1	245.6	232.9	113.6	110.9	2.9	4.5	3.7	3.0	98.7	98.2	98.4	98.7	
	N3-2	228.8	229.9	229.4	111.9	225.1	227.8	226.5	110.5		3.7	2.1	2.9		98.4	99.1	98.7		
	N3-3	220.1	230.1	225.1	109.8	217.3	228.3	222.8	108.7		2.8	1.8	2.3		98.7	99.2	99.0		
	N4-1	212.5	210.4	211.5	103.1	210.2	207.7	209.0	101.9	100.5	2.3	2.7	2.5	3.0	98.9	98.7	98.8	98.6	
	N4-2	202.6	218.1	210.4	102.6	199.5	216.4	208.0	101.4		3.1	1.7	2.4		98.5	99.2	98.9		
	N4-3	202.8	208.1	205.5	100.2	197.6	205.1	201.4	98.2		5.2	3.0	4.1		97.4	98.6	98.0		

軸力導入時(3秒後)のボルト軸力は、設計値比率の平均値で示すと、N1, N2, N3, N4 でそれぞれ、132%, 120%, 112%, 102%とほぼ 10%の違いで軸力が導入された。30 秒後にはそれぞれ 130%, 119%, 110%, 101% に低下し、低下する軸力で示すと N1, N2, N3, N4 でそれぞれ 3.9kN, 3.3kN, 3.0kN, 3.0kN と導入軸力が高ければ若干であるが軸力低下が大きかった。ただし、軸力残存率で示すと 98.6%(N3 は 98.7%)と違いはなく、導入軸力に比例した軸力低下となっていることが判る。また、表中には各試験体 6 体中での標準偏差を示しているが、明確な傾向は見られず、軸力導入初期において、導入軸力の大きさの違いによる軸力残存率のばらつきの影響は生じないものと考えられる。

b) 軸力導入時から 558 時間後の残存軸力の計測結果

表 3-4-2 には軸力導入時から 558 時間後の残存軸力を示し、軸力低下値および軸力残存率に関しては、初期値を軸力導入時(3秒後)とした Case1 と 30 秒後とした Case2 を示す。

558 時間後の残存軸力は、設計値比率の平均値で示すと、N1, N2, N3, N4 でそれぞれ、119%, 108%, 100%, 90%まで低下した。Case1 の軸力低下値は、N1, N2, N3, N4 でそれぞれ 28.0kN, 26.2kN, 25.6kN, 23.9kN と導入軸力が高いとリラクゼーションによる軸力低下が大きくなった。ただし、軸力残存率で示すとそれぞれ 89.7%, 89.3%, 88.9%, 88.6%とむしろ導入軸力が低い方が、軸力残存率は低くなった。一方、Case2 の軸力残存率は N1, N2, N3, N4 でそれぞれ 91.0%, 90.6%, 90.0%, 89.9%であり、平均値では、Case1 に比べ 1.15~1.30%pt の範囲で Case1 の方が軸力残存率は小さかった。

表 3-4-2 558 時間後の残存軸力計測結果と 558 時間後のリラクゼーションによる軸力低下の影響(試験 I)

試験 体 名称	558時間後(23日後)の ボルト軸力 N_c [kN]				Case1(初期値を3秒後とした場合)					Case2(初期値を30秒後とした場合)					軸力残存率の差 (Case2-Case1) [%pt]					
					軸力低下値 558時間後 [kN]		軸力残存率 558時間後 [%]		標準 偏差	軸力低下値 558時間後 [kN]		軸力残存率 558時間後 [%]		標準 偏差						
	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		平均	ボルトNo.			平均	ボルトNo.		平均							
No.1	No.2	設計値比率(%)		No.1	No.2		No.1	No.2	No.1		No.2	No.1		No.2						
N1-1	248.2	252.0	122.0	118.5	28.3	29.5	28.0	89.8	89.5	89.7	1.26	23.5	23.8	24.1	91.4	91.4	91.0	1.33	1.59	1.85
N1-2	236.3	216.4	110.4		33.6	26.0		87.6	89.3		30.8	21.9	88.5		90.8	0.92		1.54		
N1-3	254.4	250.1	123.0		24.4	26.1		91.2	90.6		20.8	23.9	92.4		91.3	1.19		0.73		
N2-1	227.7	225.0	110.4	108.0	25.6	25.7	26.2	89.9	89.7	89.3	1.03	23.7	22.7	22.9	90.6	90.8	90.6	0.74	0.68	1.09
N2-2	224.3	-	109.4		25.1	-		89.9	-		20.9	-	91.5		-	1.54		-		
N2-3	200.6	226.6	104.2		28.6	26.2		87.5	89.6		23.7	23.7	89.4		90.5	1.91		0.90		
N3-1	198.8	223.2	102.9	99.9	24.2	26.9	25.6	89.1	89.2	88.9	0.34	21.3	22.4	22.6	90.3	90.9	90.0	0.48	1.17	1.64
N3-2	202.4	204.6	99.3		26.4	25.3		88.5	89.0		22.7	23.2	89.9		89.8	1.45		0.82		
N3-3	194.7	204.8	97.4		25.4	25.3		88.5	89.0		22.6	23.5	89.6		89.7	1.14		0.70		
N4-1	187.7	187.1	91.4	90.3	24.8	23.3	23.9	88.3	88.9	88.6	0.38	22.5	20.6	20.9	89.3	90.1	89.9	0.77	0.97	1.16
N4-2	180.5	192.6	91.0		22.1	25.5		89.1	88.3		19.0	23.8	90.5		89.0	1.38		0.69		
N4-3	179.8	183.4	88.6		23.0	24.7		88.7	88.1		17.8	21.7	91.0		89.4	2.33		1.29		

図 3-4-1 は縦軸に軸力残存率，横軸に経過時間を対数で表示した試験結果を示し，図中の直線は経過時間に対する回帰直線を示している．図に示すように，Case2 の回帰直線は Case1 の上側にあるが，いずれの試験体においても，Case1 と Case2 では傾きに大きな違いはなかった．ただし，導入軸力が低ければ，軸力残存率は小さくなる傾向を示し，また，回帰直線の傾きが大きくなった．これは，導入軸力の大きさが軸力残存率に及ぼす影響は，3-4-1 a) で示したように軸力導入初期の影響は小さく，長い時間を経て軸力が低下したときに生じたからと考えられる．また，N1 の Case2 を除けば，相関係数は 0.90 を超えた．

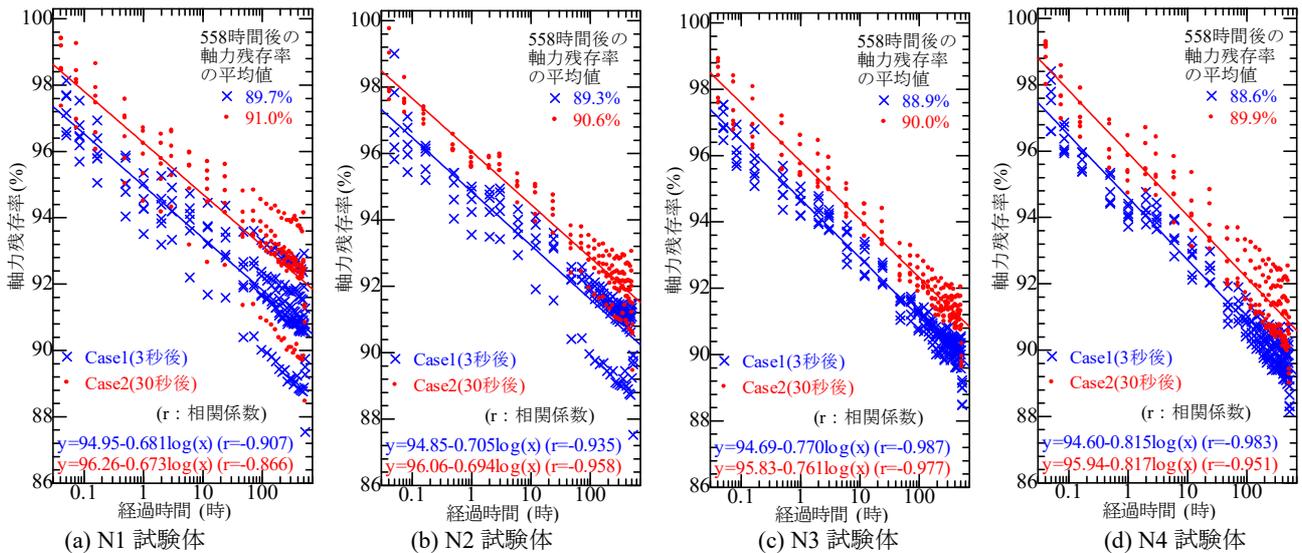


図 3-4-1 試験 I の軸力残存率と経過時間の関係

図 3-4-2 は，Case1 と Case2 の軸力残存率を比較するため図化したものであり，図中の数値は Case1 の軸力残存率を示している．平均すれば Case1 と Case2 の差は N1, N2, N3, N4 でそれぞれ 1.3%pt, 1.2%pt, 1.2%pt, 1.3%pt でほとんど違いはなかった．個々の結果でみると，N2-3-1(N2-3 の No.1 ボルト)や N4-3-1 のように，その他の試験体より若干 Case1 と Case2 の差に違いが生じる場合も見られたが，それ以外は違いがほとんどなかった．

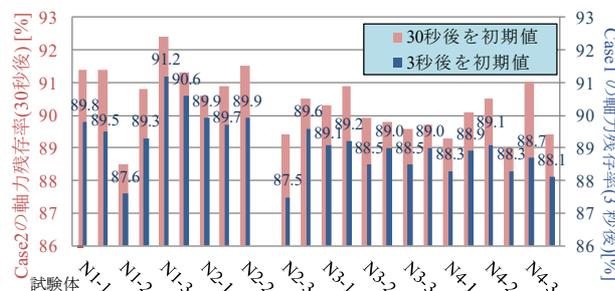


図 3-4-2 Case1 と Case2 の軸力残存率の比較(試験 I)

3-4-2 試験 II の試験結果

a) 軸力導入初期（最大値，30 秒後）の計測結果

表 3-4-3 に試験 II の軸力導入初期におけるボルト軸力計測結果を示す。軸力導入時（最大値）のボルト軸力は、設計値比率の平均値で示すと、P1, P2 でそれぞれ、114%, 110%であり、P2 は想定通りであったが、P1 は想定より高い軸力が導入された。30 秒後にはそれぞれ 112%, 108%に低下し、低下する軸力で示すと P1, P2 でそれぞれ 3.3kN, 4.7kN と厚膜の P1 の方が低下値は小さかった。3-4-2 b) でも示すが、長期のリラクセーションによる軸力低下は膜厚が厚い方が大きくなるが⁴⁾、軸力導入時から 30 秒後（短期）ではその逆の結果となった。これは P1-1 の 2 本のボルトで軸力低下が極端に低く、これを除けば薄膜と同等であり、膜厚の影響ではなく、ばらつきの範囲と考えるのが妥当である。また、軸力残存率で示すと P1 で 98.6%, P2 では 97.9%となった。なお、標準偏差は P2 の方が若干大きい、大きな違いではなかった。

表 3-4-3 軸力導入初期でのボルト軸力計測結果と 30 秒のリラクセーションによる軸力低下の影響(試験 II)

試験体	ボルト軸力											軸力低下値 30秒後 [kN]			軸力残存率 30秒後 [%]						
	分類	名称	軸力導入時(最大値) N_a [kN]				30秒後 N_b [kN]														
			ボルトNo.		平均	設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		平均	標準偏差				
無機 ジンク (厚膜)	P1-1	236.8	235.5	236.1			115.2	113.8			236.0	234.8		235.4	114.8			112.2	0.7	0.7	0.7
		P1-2	233.9	234.8	234.3	114.3	229.1		228.5	228.8	111.6	4.8	6.3	5.5	97.9	97.3	97.6				
		P1-3	231.6	227.4	229.5	112.0	228.0		223.6	225.8	110.2	3.6	3.8	3.7	98.4	98.3	98.4				
無機 ジンク (薄膜)	P2-1	-	223.4	223.4	109.0	109.5	-	222.5	222.5	108.6	107.5	-	0.9	0.9	4.7	-	99.6	99.6	97.9	1.21	
		P2-2	224.4	222.9	223.6		109.1	221.6	216.2	218.9		106.8	2.8	6.6		4.7	98.8	97.0			97.9
		P2-3	225.7	227.0	226.4		110.4	218.4	221.2	219.8		107.2	7.3	5.9		6.6	96.8	97.4			97.1

b) 軸力導入時から 672 時間後の残存軸力の計測結果

表 3-4-4 には軸力導入時から 672 時間後の残存軸力を示す。672 時間後の残存軸力は、設計値比率の平均値で示すと、P1, P2 でそれぞれ 98.4%, 96.2%まで低下し、両者ともに設計ボルト軸力を下回った。軸力低下値は、Case1 では P1, P2 でそれぞれ 30.4kN, 27.0kN と膜厚が厚いとリラクセーションによる軸力低下が大きく、軸力残存率においてもそれぞれ 87.0%, 88.0%と膜厚の影響が生じた。一方、Case2 の軸力残存率は、P1, P2 でそれぞれ 87.9%, 89.9%であり、Case1 に比べ P1 で平均 0.9%pt, P2 では 1.9%pt, Case1 の方が軸力残存率は低かった。

表 3-4-4 672 時間後の残存軸力計測結果と 672 時間後のリラクセーションによる軸力低下の影響(試験 II)

試験体名称	672時間後(28日後)の ボルト軸力 N_c [kN]				Case1(初期値を最大値とした場合)						Case2(初期値を30秒後とした場合)						軸力残存率の差 (Case2-Case1) [%pt]					
					軸力低下値 672 時間後 [kN]		軸力残存率 672 時間後 [%]				軸力低下値 672 時間後 [kN]		軸力残存率 672 時間後 [%]									
	ボルトNo.		設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		標準偏差	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		標準偏差	ボルトNo.		平均				
P1-1	210.7	211.5		103.0	98.4		26.1	24.0		30.4	89.0		89.8	87.0		2.76	25.4		23.3	27.9	89.2	90.1
P1-2	197.6	-	96.4	36.2		-	84.5	-	31.4		-	86.3	-		86.3		-	1.77	-			
P1-3	196.4	-	95.8	35.2		-	84.8	-	31.6		-	86.1	-		86.1		-	1.34	-			
P2-1	-	194.4	94.8	96.2	-	29.0	27.0	-	87.0	88.0	1.16	-	28.1	22.3	-	87.4	89.9	1.64	-	0.36		
P2-2	200.0	198.7	97.2		24.4	24.2		89.1	89.1			21.6	17.6		90.2	91.9			1.11	2.74		
P2-3	195.5	199.8	96.4		30.2	27.2		86.6	88.0			22.9	21.4		89.5	90.3			2.88	2.33		

図3-4-3は、Case1とCase2の軸力残存率を比較したものである。P2-2やP2-3のようにCase1とCase2の差が大きい場合も見られたが、特異なデータは見られず、その他のデータに大きな違いは見られなかった。

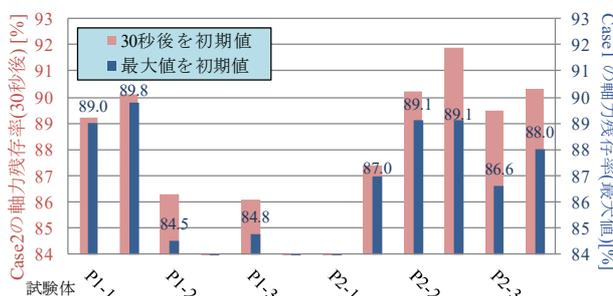


図3-4-3 Case1とCase2の軸力残存率の比較(試験II)

3-4-3 試験IIIの試験結果

a) 軸力導入初期(最大値, 30秒後)の計測結果

表3-4-5に試験IIIの軸力導入初期におけるボルト軸力計測結果を示す。軸力導入時(最大値)のボルト軸力は、設計値比率の平均値で示すと110%~113%の範囲にあり、概ね想定した軸力が導入された。30秒後にはP, R, B, Gでそれぞれ108%, 111%, 109%, 111%に低下し、低下する軸力で示すとそれぞれ4.3kN, 3.8kN, 4.4kN, 2.4%であった。以前に著者ら^{4),5),6)}は、粗面状態(赤さび, ブラスト)における長期リラクセーションによる軸力の低下は、無機ジンクより小さくなることを示したが(3-4-3 b)でも同様)、軸力導入初期ではGのみ低下値が小さく、それ以外大きな違いはみられなかった。また、特異なデータが各試験体で見られ、P-3-1では軸力低下が9.9kNと大きいデータも見られた。同様に、R-2-1では10.3kN, B-1-2では13.3kN, G-2-2においても5.9kNの低下と同じ試験体内で大きな違いが生じ、試験I等では見られなかった特異なデータが見られた。軸力残存率の平均値は、98.1%~99.0%の範囲にあった。

表3-4-5 軸力導入初期でのボルト軸力計測結果と30秒のリラクセーションによる軸力低下の影響(試験III)

試験体	分類	名称	ボルト軸力								軸力低下値 30秒後 [kN]				軸力残存率 30秒後 [%]				
			軸力導入時(最大値) N_a [kN]				30秒後 N_b [kN]				平均		標準偏差		平均		標準偏差		
			ボルトNo.		平均	設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	ボルトNo.					
			No.1	No.2							No.1	No.2				No.1	No.2		No.1
無機ジンク	P	P-1	225.3	224.4	224.9	109.7	223.1	222.2	222.7	108.6	2.2	2.2	2.2	4.3	99.0	99.0	99.0	98.1	1.28
		P-2	225.1	226.3	225.7	110.1	222.2	221.3	221.8	108.2	2.9	5.0	3.9	4.3	98.7	97.8	98.2		
		P-3	227.4	220.6	224.0	109.3	217.5	216.8	217.2	105.9	9.9	3.8	6.8	4.3	95.6	98.3	96.9		
赤さび	R	R-1	232.9	229.8	231.4	112.9	232.4	227.4	229.9	112.1	0.5	2.4	1.5	3.8	99.8	99.0	99.4	98.4	1.51
		R-2	232.7	235.0	233.9	114.1	222.4	233.7	228.1	111.2	10.3	1.3	5.8	3.8	95.6	99.4	97.5		
		R-3	239.3	221.7	230.5	112.4	235.6	217.3	226.5	110.5	3.7	4.4	4.1	3.8	98.5	98.0	98.2		
ブラスト	B	B-1	224.4	240.1	232.3	113.3	222.7	226.8	224.8	109.6	1.7	13.3	7.5	4.4	99.2	94.5	96.8	98.1	1.90
		B-2	226.2	233.9	230.1	112.2	224.8	229.5	227.2	110.8	1.4	4.4	2.9	4.4	99.4	98.1	98.7		
		B-3	221.5	225.3	223.4	109.0	217.2	224.1	220.7	107.6	4.3	1.2	2.8	4.4	98.1	99.5	98.8		
グラインダー	G	G-1	230.2	236.1	233.2	113.7	226.1	234.4	230.3	112.3	4.1	1.7	2.9	2.4	98.2	99.3	98.8	99.0	0.97
		G-2	229.0	229.1	229.1	111.7	229.0	223.2	226.1	110.3	0.0	5.9	3.0	2.4	100.0	97.4	98.7		
		G-3	225.3	226.7	226.0	110.2	223.2	226.1	224.7	109.6	2.1	0.6	1.4	2.4	99.1	99.7	99.4		

b) 軸力導入時から 672 時間後の残存軸力の計測結果

表 3-4-6 に軸力導入時から 672 時間後の残存軸力を示す。672 時間後の残存軸力は、設計値比率の平均値で示すと、P, R, B, G でそれぞれ 96%, 105%, 103%, 107% となり、P では設計ボルト軸力を下回った。これらの結果に示すように（試験 II の結果も含め）、無機ジンクは軸力低下が大きく、著者ら^{4),5),6)}は、導入軸力は設計ボルト軸力の 15% 増しがよいことを示した。

Case1 において、軸力低下は、P, R, B, G でそれぞれ 29.7kN, 14.9kN, 19.3kN, 12.1kN (P>B>R>G) となり、摩擦面によりリラクセーションによる軸力低下が異なった。軸力残存率で示すと P, R, B, G でそれぞれ 86.8%, 93.5%, 91.6%, 94.8% となった。一方、Case2 の軸力残存率は、P, R, B, G でそれぞれ 88.6%, 95.2%, 93.6%, 95.4%、Case1 に比べ軸力残存率は平均 0.66~1.98%pt の範囲で Case1 の方が軸力残存率は小さかった。

表 3-4-6 672 時間後の軸力計測結果と 672 時間後のリラクセーションによる軸力低下の影響(試験 III)

試験体名称	672時間後(28日後)のボルト軸力 N_c [kN]				Case1(初期値を最大値とした場合)						Case2(初期値を30秒後とした場合)						軸力残存率の差 (Case2-Case1) [%pt]									
					軸力低下値 672時間後 [kN]			軸力残存率 672時間後 [%]			軸力低下値 672時間後 [kN]			軸力残存率 672時間後 [%]												
	ボルトNo.		設計値比率(%)	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		標準偏差	ボルトNo.		平均	ボルトNo.		標準偏差	ボルトNo.		平均								
P-1	201.4	203.5		98.8	23.9		20.9	29.7		89.4	90.7		86.8	5.07		21.7	18.7		25.1	90.3	91.6	88.6	4.74	0.88	0.90	1.80
P-2	-	205.9	100.4	-	20.4	-	91.0		-	91.0	-	15.4			-	93.0	-	93.0		-	2.06			-	2.06	
P-3	188.8	176.0	89.0	38.6	44.6	83.0	79.8		83.0	79.8	28.7	40.8			86.8	81.2	86.8	81.2		3.78	1.40			-	-	
R-1	-	-	-	-	-	14.9	-	-	93.5	1.30	-	-	10.8	-	-	95.2	1.02	-	-	1.68						
R-2	-	-	-	-	-		-	-			-	-		-	-			-	-		-	-	-	-	-	-
R-3	226.0	205.3	105.2	13.3	16.4		94.4	92.6			94.4	92.6		9.6	12.0			95.9	94.5		95.9	94.5	1.48	1.88	-	-
B-1	-	214.4	104.6	-	25.7	19.3	-	89.3	91.6	1.56	-	12.4	14.4	-	94.5	93.6	0.95	-	5.24	1.98						
B-2	211.8	215.4	104.2	14.4	18.5		93.6	92.1			93.6	92.1		13.0	14.1			94.2	93.9		94.2	93.9	0.58	1.77	-	-
B-3	202.4	206.5	99.7	19.1	18.8		91.4	91.7			91.4	91.7		14.8	17.6			93.2	92.1		93.2	92.1	1.81	0.49	-	-
G-1	217.5	217.9	106.2	12.7	18.2	12.1	94.5	92.3	94.8	1.87	8.6	16.5	10.5	96.2	93.0	95.4	1.67	1.71	0.67	0.66						
G-2	221.3	-	108.0	7.7	-		96.6	-			96.6	-		7.7	-			96.6	-		96.6	-	0.00	-	-	-
G-3	-	216.9	105.8	-	9.8		-	95.7			-	95.7		-	9.2			-	95.9		-	95.9	-	-	0.25	-

図 3-4-4 は、試験 III における Case1 と Case2 の軸力残存率を比較したものである。G では平均すれば Case1 と Case2 の差は 0.7%pt と特に小さく、P, R, B ではそれぞれ、1.8%pt, 1.7%pt, 2.0%pt であり、特に B-1-1 では差が大きかった。また、表 3-4-6 に示す標準偏差は、いずれの試験体においても、Case2 より Case1 の方が大きかった。

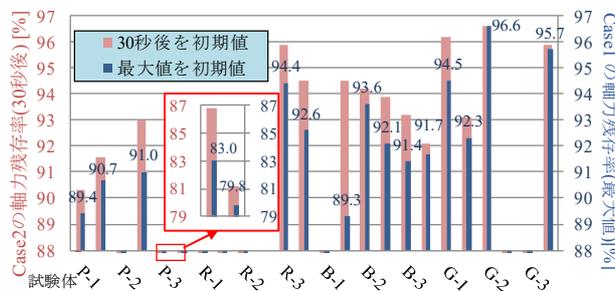


図 3-4-4 Case1 と Case2 の軸力残存率の比較(試験 III)

3-5 既存データも含めた初期値の影響の分析

3-5-1 軸力導入初期（30 秒間）の軸力低下の影響

本節では、前節で示した試験 I～III の試験結果に、著者らが以前に実施した試験結果^{3),7),8)}も加え、初期値の設定方法による影響を明確にすることとした。

図 3-5-1 は、本試験結果および過去の試験結果^{3),7),8)}における軸力導入時から 30 秒間の軸力低下値を示し、表 3-5-1 にはこれらの集計結果を示す。図 3-5-1(a)は無機ジンク以外の摩擦面、図 3-5-1(b)は無機ジンクにおける軸力低下値を縦軸に、横軸には軸力導入時の軸力（初期導入軸力）を示している。また、図中には各摩擦面の回帰直線を実線で示しており、本試験データと重複している過去の試験結果（赤錆、ブラスト、無機ジンク（標準））については点線で示している。図 3-5-1(c)は無機ジンクにおけるボルト長の影響を確認するため横軸をボルト長で示し、図 3-5-1(d)は無機ジンクの頻度分布を示す。なお、無機ジンク以外はすべてボルト長が 85mm であり、ボルト長との関係は示しておらず、またデータ数量も少ないので頻度分布を示すことができないことはご了承ください。

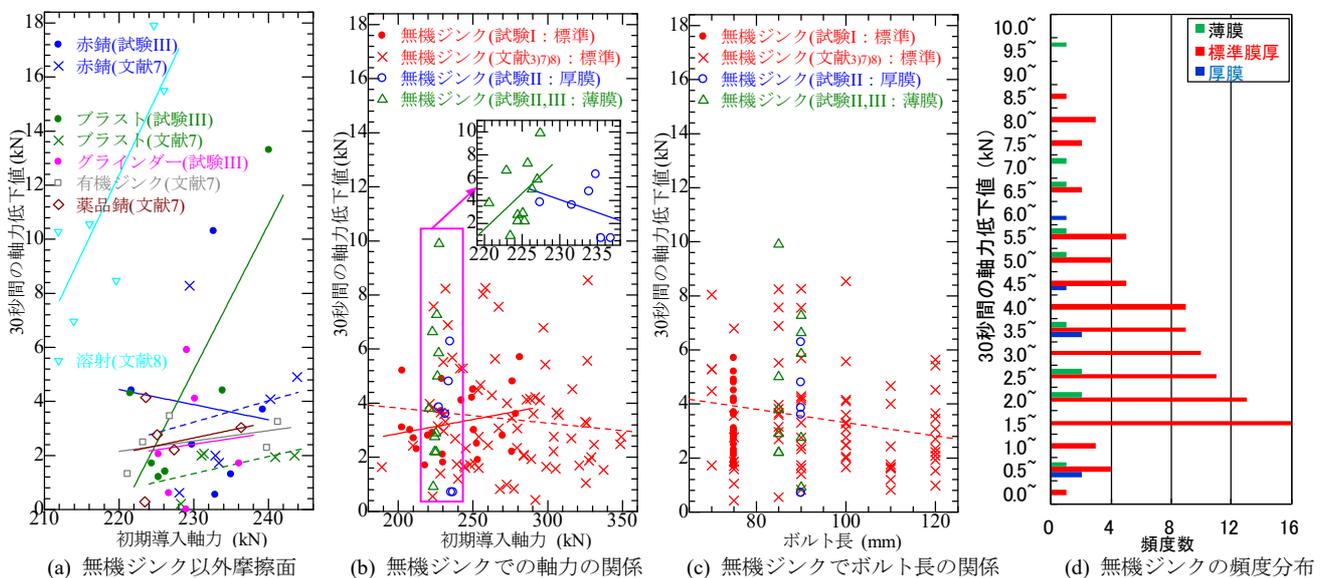


図 3-5-1 軸力導入時から 30 秒間での軸力低下値

表 3-5-1 軸力導入時から 30 秒間の集計結果

摩擦面	数量	30秒間の軸力低下値(kN)				30秒後の軸力残存率(%)			
		最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差
赤錆	12	0.5	10.3	3.7	3.02	95.6	99.8	98.4	1.30
ブラスト	11	0.2	13.3	3.1	3.59	94.5	99.1	98.7	1.49
グラインダー	6	0.0	5.9	2.4	2.23	97.4	100.0	99.0	0.97
有機ジンク	5	1.3	3.5	2.6	0.85	98.5	99.4	98.9	0.36
薬品錆	5	0.3	4.1	2.5	1.42	98.2	99.9	98.9	0.63
溶射	6	7.0	17.9	11.6	4.22	92.0	96.8	94.7	1.80
無機ジンク	115	0.4	9.9	3.5	1.96	95.7	99.9	98.6	0.82

図 3-5-1(a)に示すように、回帰直線の傾きは赤錆（試験 III）を除けば右肩上がりであった。特に、ブラスト（試験 III）および溶射（文献 8）では傾きが大きかった。前者では 1 つのデータで極端に軸力低下の大きいデータが存在したからであり偶然とも思われるが、後者は F8T を使用しており⁸⁾、軸力低下が大きいデータは導入軸力が高く、ボルトが塑性域に入ったことにより傾きが大きくなったものと考え

られる。なお、導入軸力が及ぼす影響については、文献5)でも同様の結果を示した。これは長期のリラクゼーションによる軸力低下であるが、軸力導入初期(30秒間)でもその影響が生じることが明らかとなった。また、軸力低下値も摩擦面によって若干異なり、その傾向は長期リラクゼーション試験結果^{6),7),8)}と同様であった。

図3-5-1(b)において、文献データではばらつきが生じ、回帰直線の傾きはむしろ右肩下りの傾向を示したが、本試験の試験I(標準)と試験II,III(薄膜)では右肩上がりであった。無機ジンの軸力低下の平均値は3.5kNであり、道示や鉄道標準で示されている粗面状態(赤錆、ブラスト)や無機ジンでは、軸力低下値は3.1~3.7kNの範囲にあり、摩擦面による軸力低下に大きな違いは生じなかった。

図3-5-1(c)はボルト長との関係を示す。回帰直線の傾きは右肩下りでボルト長が長くなれば、軸力低下が小さくなることが示された。長期リラクゼーションによるボルト長(板厚)の影響については文献9)で示したが、軸力導入初期でも同様の軸力低下傾向が見られた。

図3-5-1(d)は無機ジンの頻度分布を示す。厚膜や薄膜では頻度も少なく、ばらつきが生じている。一方、標準膜厚では1.5kNをピークとする釣り鐘型の分布であり、ピークは平均値より低い位置にあった。

軸力導入時から30秒後の軸力残存率の集計結果は表3-5-1に示している。表3-5-1に示すように、軸力残存率は溶射では94.7%とその他の摩擦面より低かったが、これを除けば98.4~99.0%の範囲にあり、摩擦面により軸力残存率に大きな違いは見られなかった。

3-5-2 初期値の違いによる672時間後の軸力残存率の差

本項では、初期値の違いが試験結果に及ぼす影響を定量的に評価するため、672時間後の軸力残存率の違いを示すこととした。ここでは、表3-4-2、表3-4-4、表3-4-6で示した軸力導入時を初期値としたCase1と30秒後を初期値としたCase2の軸力残存率の差を示し、初期値の影響を明確にすることとした。なお、表3-4-2に示す試験Iでは558時間後の軸力残存率であるが、試験II,IIIとの整合性をとるため、試験Iでは図3-4-1で示した回帰直線から672時間後の軸力残存率に補正した値で比較した。同様に文献データについても、文献7),10)で示した回帰直線を用いて軸力残存率を補正し、すべてのデータを672時間後の補正值で比較検討した。

図3-5-2(a),(b),(c)は、672時間後のCase1とCase2の軸力残存率の差(以下、残存率差)を縦軸に示し、表3-5-2はこれらの集計結果を示している。

図3-5-2(a)は無機ジン以外の摩擦面における初期導入軸力との関係を示す。なお、赤錆(試験III)は表3-4-6で示したように計測の不具合により2データしか取れなかったので回帰直線は示していない。図3-5-2(a)に示すように、縦軸は図3-5-1(a)と異なるものの、各データの分布状態や回帰直線はこれとほぼ同じであり、初期の軸力低下値の影響が672時間後の残存率差に表れることが判る。表3-5-2で示す残存率差の平均値は、グラインダーでは0.66%ptと小さく、逆に溶射では4.41%ptと大きく、これらを除けば1.05~1.49%ptの範囲にあり、摩擦面による残存率差に大きな違いは見られなかった。

図3-5-2(b)は無機ジンの試験結果であるが、試験Iの回帰直線の傾きはほとんどなく、それ以外は図3-5-1(b)と同様であった。残存率差の平均値は1.2%ptであり、図3-5-2(a)で示したその他の摩擦面(グラインダー、溶射を除く)と大きな違いは見られなかった。

図3-5-2(c)は無機ジンにおけるボルト長との関係を示すが、回帰直線の傾きは右肩下りでボルト長

が大きくなれば、残存率差は小さくなった（図 3-5-1(c)と同様）。

図 3-5-2(d)は無機ジンの頻度分布を示すが、標準膜厚では 0.6%pt をピークとする分布であり、この箇所のみ吐出した分布状態であるが、1.3~1.5%pt をピークとするなだらかな凸形の分布であった。

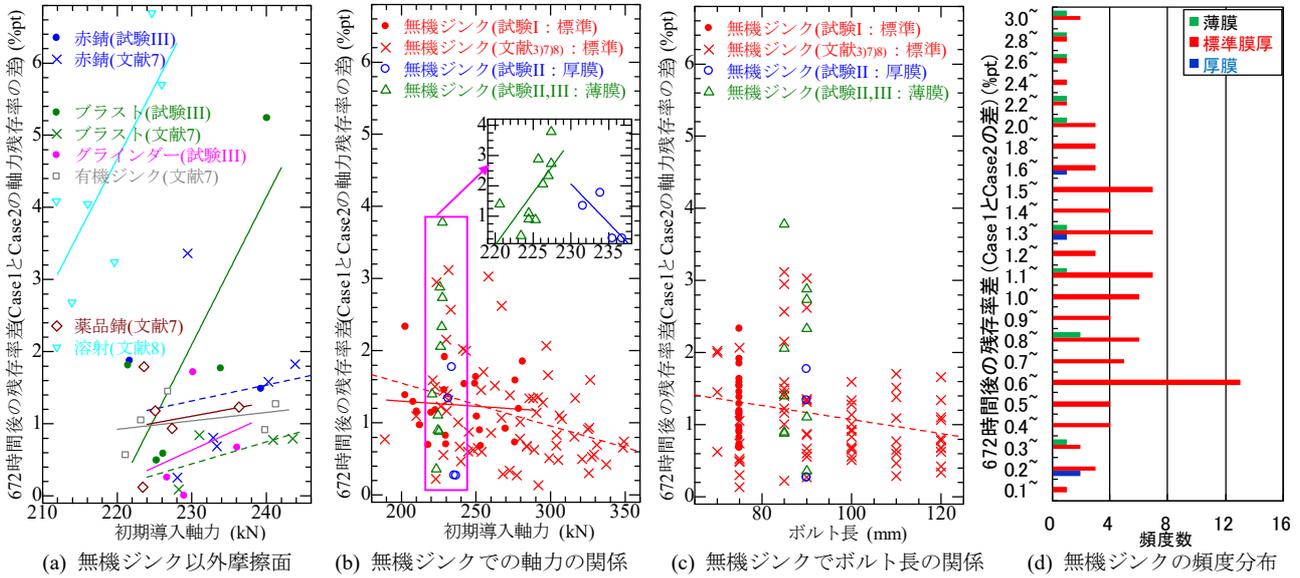


図 3-5-2 672 時間後の残存率差 (Case1 と Case2 の軸力残存率の差)

表 3-5-2 残存率差とその影響度 (率) の集計結果

摩擦面	数量	残存率差 (%pt)			Case2の 軸力残存率 平均値(%)	影響度 (%)	
		標準 偏差	最小値	最大値			
赤錆	8	0.957	0.25	3.36	93.5	22.9	
ブラスト	9	1.553	0.09	5.24	95.1	27.9	
グラインダー	4	0.755	0.00	1.71	95.5	14.6	
有機ジンク	5	0.338	0.56	1.44	94.4	18.8	
薬品錆	5	0.608	0.12	1.79	1.05	96.3	28.2
溶射	6	1.513	2.68	6.69	4.41	83.5	26.6
無機ジンク	105	0.716	0.14	3.78	1.21	91.0	13.4

注) 影響度は Case2 の軸力低下率(100-残存軸力率)に対する残存率差の割合

3-5-3 摩擦面の違いによる残存率差が及ぼす影響度

前項で示したように、摩擦面の違いによる残存率差は小さく、赤錆、ブラストおよび無機ジンクでは、残存率差はそれぞれ 1.48%pt, 1.38%pt, 1.21%pt であり大きな違いは見られなかった。本項ではこれらの残存率差が、摩擦面の違いによるリラクゼーション試験結果に及ぼす影響を定量的に評価することとした。

表 3-5-2 には Case2 の 672 時間後の軸力残存率およびその影響度 (率) を示している。ここで示す影響度は、Case2 の軸力低下率 (100-軸力残存率) に対する残存率差の割合である。これらの結果に示すように、赤錆やブラストでは軸力残存率は無機ジンクより高く、残存率差の違いが少なくても影響度が大きいことが判る。赤錆、ブラストおよび無機ジンの影響度はそれぞれ、22.9%、27.9%、13.4%であり、言い換えると、初期値を軸力導入時とするのか、あるいは 30 秒後とするのかにより、リラクゼーション試験結果が、例えば、ブラストでは 27.9%の違いが生じることを意味する。なお、最も残存率差が大きかったのは溶射(4.41%)であったが、溶射は 672 時間後の軸力低下も大きく、影響度は 26.9%であり、影響度が最も高かったのは軸力残存率が最も高い薬品錆(28.2%)であった。

3-5-4 軸力導入時のボルト軸力と軸力残存率

前項では、軸力導入時と 30 秒後との残存率差を示したが、その間、いつの時点の影響が大きいのか、あるいはどのようなばらつきが生じるのかは不明であった。そこで、軸力導入時から 10 秒毎に自動計測を行った試験 II、試験 III および文献 7) のデータを対象に、軸力導入時(N_0)、10 秒後(N_{10})、20 秒後(N_{20}) および 30 秒後(N_{30}) の軸力の推移および軸力残存率を示すこととした。

図 3-5-3 にこれらの結果を示す。図に示すように、10 秒後までに一気に軸力が低下する場合や 10 秒後より 20 秒後の方が軸力は高くなる場合など特異なケースもあったが、多くのデータは時間の経過と共に軸力は低下し、10 秒後までの軸力低下が大きく、10 秒後からは緩やかに軸力が低下していた。また、10 秒までの軸力低下にばらつきが生じていた。

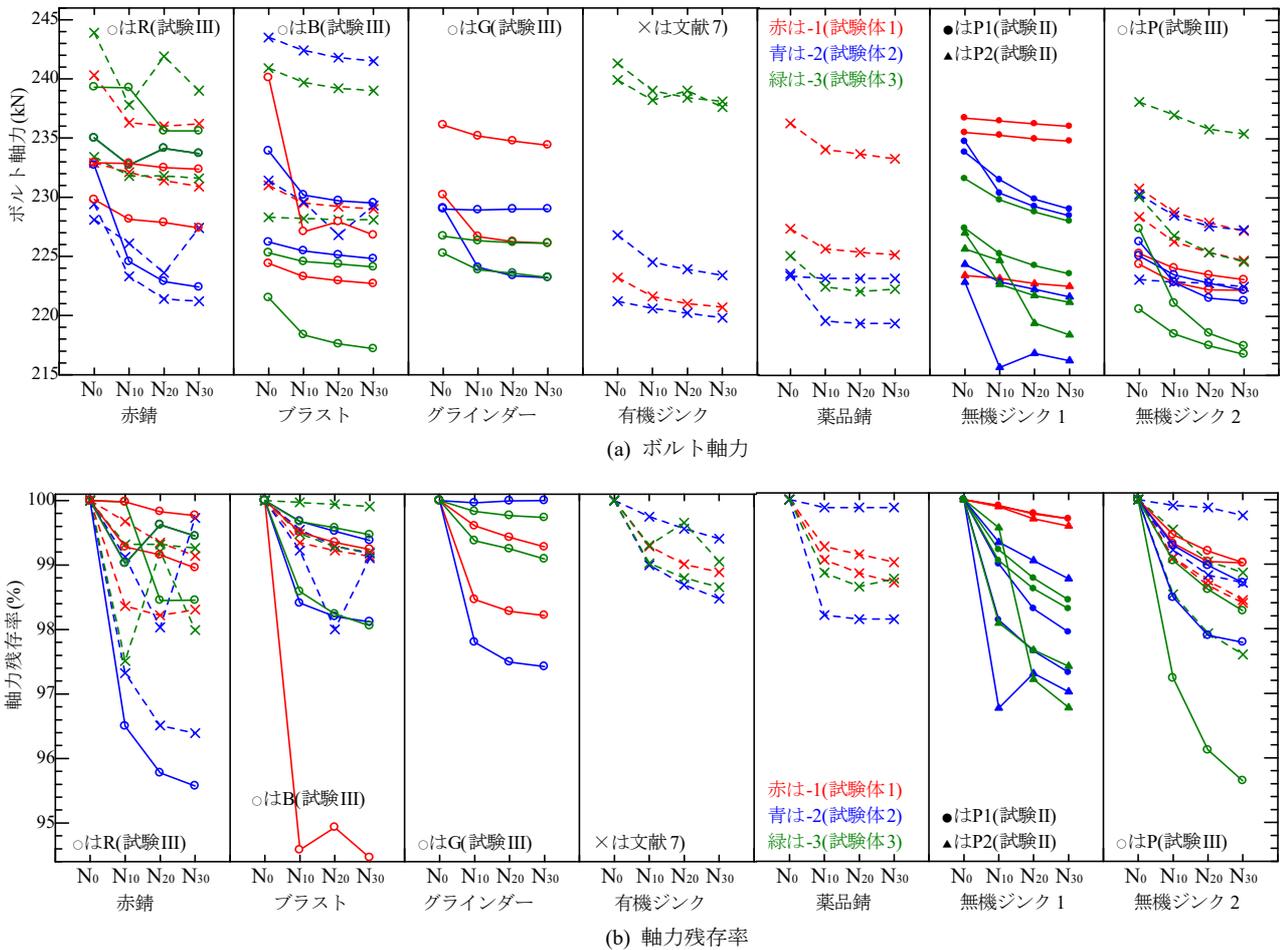


図 3-5-3 軸力導入初期(N_0 :0 秒後, N_{10} :10 秒後, N_{20} :20 秒, N_{30} :30 秒後)におけるボルト軸力と軸力残存率

3-5-5 初期値の設定の違いによるばらつきの影響

672 時間後の軸力残存率は、表 3-4-4、3-4-6 で示したように、Case1(N_0)と Case2(N_{30})を比較すれば、多くのデータで Case1 の標準偏差の方が高かった。そこで、本項では、初期値の設定方法の違いによる試験結果のばらつきを明確にすることとした。

図 3-5-4 には、図 3-5-3 で示した試験データにおける N_0 、 N_{10} 、 N_{20} および N_{30} を初期値とした 672 時間後の軸力残存率の標準偏差を示す。ここで示す標準偏差は表 3-4-4、表 3-4-6 で示した Case1(N_0)お

び Case2(N₃₀)であり、同様に、N₁₀およびN₂₀についても算定し、さらに、文献7)データの軸力残存率の標準偏差を加えたものである。図 3-5-4 に示すように、赤錆や無機ジンの P2 のように傾向が不明なケースもあったが、その他のケースでは右肩下りの傾向が示された。これらの結果に示すように、初期値を遅く設定した方が、リラクセーション試験結果のばらつきは小さくなることが示された。

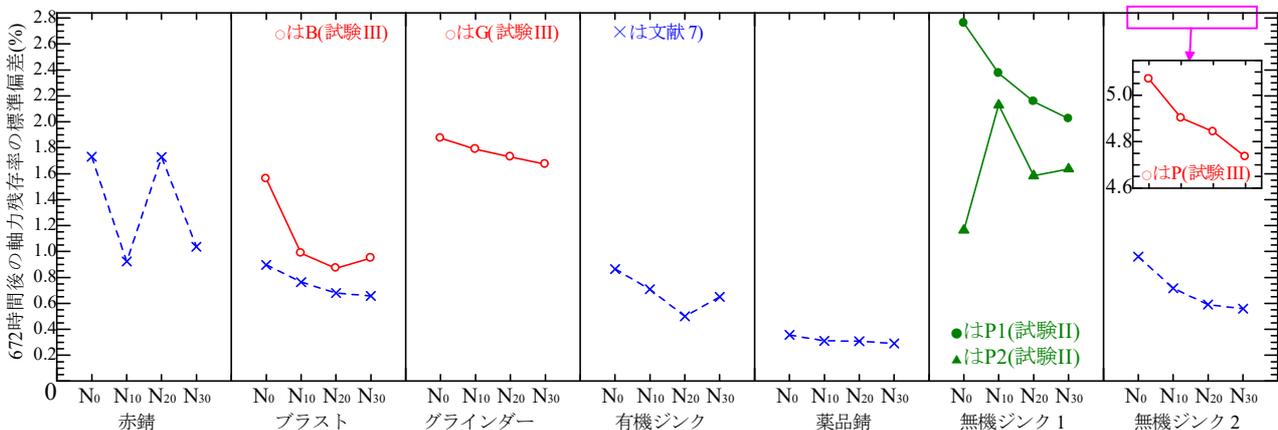


図 3-5-4 初期値の設定の違い(N₀:0 秒後, N₁₀:10 秒後, N₂₀:20 秒, N₃₀:30 秒後)による 672 時間後の軸力残存率の標準偏差

3-6 リラクセーション試験の初期値のあり方

3-6-1 初期値の設定が試験結果に及ぼす影響の考察

前節の 3-5-4 では、締付け後 10 秒間の軸力低下の影響は大きいことを示した。本節では、この 10 秒間の影響を詳細に示した上で、リラクセーション試験の初期値のあり方を考察することとした。

図 3-6-1 に試験 II で実施した動ひずみ計測による締付け直後から 120 秒間の軸力計測結果を示す。図 3-6-1(a)は締付け直後(0 秒)を初期値とした軸力残存率を縦軸に示したものであり、図 3-6-1(b)は締付けから 1 秒後を初期値とした場合、同様に、図 3-6-1(c)(d)(e)(f)はそれぞれ、2 秒後、3 秒後、10 秒後、30 秒後を初期値とし、その初期値から 120 秒後の軸力残存率を示している。なお、P2-1 において、締付けから 14 秒から 23 秒間はひずみにノイズが入り、ひずみに特異性が発生したので、この間は直線分布で示している。また、表 3-6-1 は、図 3-6-1 で示した各経過時間における軸力残存率の 4 本の平均値を示し、その標準偏差も示している。

図 3-6-1(a)に示すように、締付け直後を初期値とした場合、締付けから 3 秒までの軸力低下が大きかった。特に 1 秒までの軸力低下が大きく、軸力残存率の平均値で示せば 99.1% (0.9%低下) であった。120 秒後には軸力残存率は平均で 95.1%となり、P2-1 では 93.6%となった。また、ばらつきも大きいですが、これは、1 秒までの軸力低下でのばらつきが大きいことがその後の軸力残存率のばらつきの要因になったと考えられる。

図 3-6-1(b)は 1 秒後を初期値とした軸力残存率を示すが、図 3-6-1(a)と比較して軸力低下の状況は異なり、わずか 1 秒の違いであるがその影響は大きいことが判る。120 秒後の軸力残存率は 96.1%と、図 3-6-1(a)の結果(95.1%)と比較すると 1%の違いが生じる結果となった。

さらに、図 3-6-1(c),(d),(e)はそれぞれ初期値の設定秒数を変更させた結果を順に示しており、順に軸

力変動のばらつきや 120 秒後の軸力残存率も小さくなっていることが判る。特に、図 3-6-1 (d) の 3 秒後以降は、その直後の軸力残存率のばらつきは小さく、軸力変動も安定していることが判る。図 3-6-1 (f) は 30 秒後を初期値とした結果であるが、締付け直後(0 秒)の図 3-6-1 (a) とは分布状態が大きく異なっており、軸力残存率の違いで示すと、図 3-6-1 (f) では 120 秒後の軸力残存率は 98.5% となり、図 3-6-1 (a) の結果(95.1%)と比較すると 3.4% の違いが生じる結果となった。ただし、30 秒後を初期値とした場合、その後の 5 秒間は軸力残存率の低下は非常に小さく安定した状態であり、また、ばらつき (標準偏差) は小さくなることは事実である。これらのことから、これまで 30 秒後等、ある程度時間を経過した時点を手動試験の初期値とする場合が多かったものと考えられる。

表 3-6-1 各初期値における各経過時間での軸力残存率の平均値および標準偏差 (単位: %)

初期値	1秒後		2秒後		3秒後		10秒後		20秒後		30秒後		120秒後		備考
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0秒後	99.1	0.367	98.6	0.449	98.4	0.467	97.3	0.613	96.8	0.824	96.4	0.859	95.1	1.158	図-3-6-1(a)
1秒後	99.5	0.156	99.3	0.287	99.2	0.257	98.2	0.551	98.1	0.609	97.3	0.766	96.1	1.199	図-3-6-1(b)
2秒後	99.8	0.166	99.6	0.151	99.5	0.246	98.6	0.457	98.2	0.332	97.7	0.650	96.5	1.084	図-3-6-1(c)
3秒後	99.9	0.099	99.7	0.111	99.4	0.282	98.9	0.254	98.4	0.301	97.9	0.458	96.8	0.978	図-3-6-1(d)
10秒後	99.9	0.105	99.8	0.185	99.9	0.234	99.9	0.735	99.0	0.334	98.7	0.503	97.8	0.994	図-3-6-1(e)
30秒後	100.0	0.027	99.9	0.102	99.9	0.073	99.7	0.194	99.5	0.197	99.4	0.293	98.5	0.568	図-3-6-1(f)

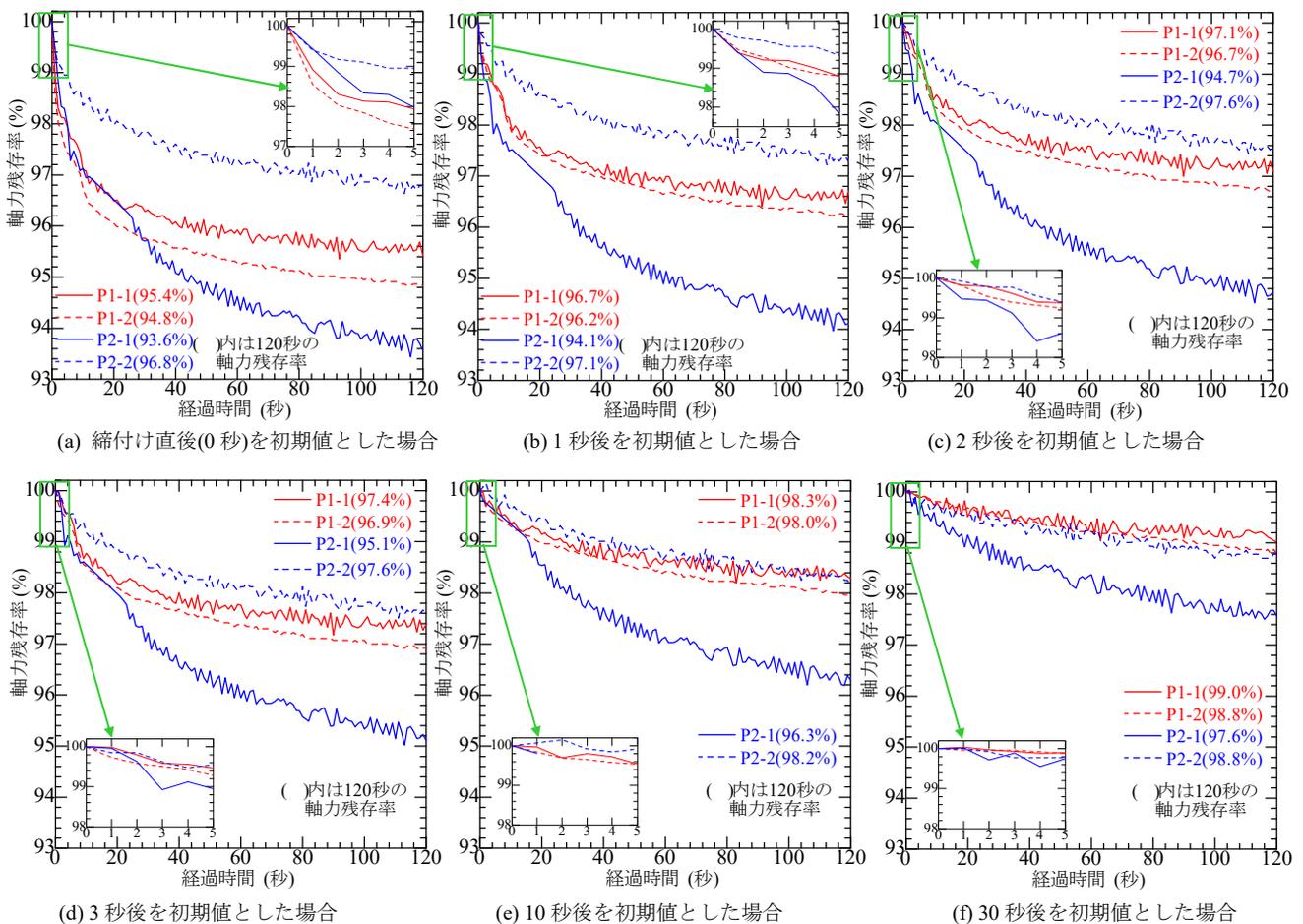


図 3-6-1 動はずみ計測結果に基づく初期値の設定の違い(0,1,2,3,10,30 秒後)による 120 秒後の軸力残存率

3-6-2 リラクセーション試験の初期値のあり方の考察

前項の 3-6-1 で示したように、リラクセーションによる軸力低下が最も大きいのは締付けから 1 秒間であり、また、軸力低下のばらつきも大きかった。ただし、本来のボルトのリラクセーションは、締付け直後を初期値とした図 3-6-1 (a)の軸力変動挙動であると考えられ、図 3-6-1(f)の 30 秒後を初期値とした挙動とは大きく異なったが、現状では後者の挙動でリラクセーションを評価するケースが多いのも事実である。

しかしながら、0 秒後を初期値とすれば、ばらつきが過大であるとも言え、1, 2 秒後を初期値とした場合では多少であるがばらつきは改善され、図 3-6-1(d)の 3 秒後では P2-1 を除けば、大きく改善されていることが判り、表 3-6-1 で示す標準偏差においても小さくなっていった。試験 I の Case1 はこの 3 秒後を初期値とした結果であり、30 秒後を初期値とした Case2 と比較しても、ばらつきの違いもほとんどみられず、標準偏差で判断すれば、むしろ Case1 の方が低かった (表 3-4-2)。

以上のことから考えると、締付け直後の軸力低下の影響および試験結果のばらつきを抑えることに配慮し、リラクセーション試験の初期値は締付け 3 秒後とすることを推奨する。なお、従来から適用している 30 秒後を初期値とする場合には、表 3-5-2 で示した初期の軸力低下の影響を考慮した上で試験を実施する必要があると考えられる。また、今後、リラクセーション試験結果を報告する際、初期値の設定方法を示すことが重要であると考えられる。

3-7 結 論

本研究は、リラクセーション試験における初期値の設定方法が試験結果に及ぼす影響を明確にし、初期値のあり方を示すことを目的とした研究である。本研究から得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) 導入軸力が高くなれば、軸力導入時から 30 秒間の軸力低下は大きくなった。ただし、導入軸力に比例した軸力低下値となり、軸力残存率に違いは見られなかった。
- (2) 無機ジンクを施した継手において、軸力導入時から 30 秒間の軸力低下における膜厚の影響は確認できなかった。また、ボルト長が長くなれば軸力低下は小さくなった。
- (3) 軸力導入時から 30 秒間の軸力低下は、黒皮を除去した粗面状態 (赤錆, ブラスト) および無機ジンクにおいて、赤錆で 3.7kN, ブラストで 3.1kN, 無機ジンクでは 3.5kN の軸力低下 (表 3-5-1) となり、摩擦面によって若干異なるが大きな違いではなかった。ただし、グラインダーと溶射を除く。
- (4) 初期値を軸力導入時とした Case1 と 30 秒後とした Case2 における 672 時間後の軸力残存率の差は、赤錆で 1.48%pt, ブラストで 1.38%pt, 無機ジンクでは 1.21%pt であり、摩擦面による大きな違いはなかった。ただし、672 時間後の軸力残存率は摩擦面によって異なり、Case1 と Case2 の試験結果の違いを示す影響度は、赤錆で 22.9%, ブラストで 27.9%, 無機ジンクでは 13.4%となった。これは、赤錆やブラストのようにリラクセーションによる軸力低下が小さい場合では影響度は高くなり (表 3-5-2), 初期値を軸力導入時とするのか、あるいは 30 秒後とするのかにより、リラクセーション試験結果はブラストでは 27.9%の違いが生じることとなる。
- (5) 初期値を締付け直後 (0 秒後) とした場合、締付けから 3 秒までの軸力低下が大きく、特に 1 秒までの軸力低下が顕著であり、1 秒間の軸力低下率は 0.9%, 120 秒後には 4.9%まで低下した。初期値を 30 秒後とすれば、その直後の軸力低下は小さく 120 秒後でも 1.5% (軸力低下率) となり、初期値の設定法の違いによって軸力低下挙動は大きく異なった (図 3-6-1)。

- (6) 初期の軸力低下の影響および試験結果のばらつきを抑えることに配慮し、リラクセーション試験の初期値は締付け3秒後とすることを推奨する。なお、従来から適用していた30秒後を初期値とする場合には、結論(4)で示した初期の軸力低下の影響(表 3-5-2)を考慮した上で、試験を実施する必要があると考えられる。また、今後、リラクセーション試験結果を報告する際、初期値の設定方法を示すことが重要であると考えられる。

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，2017.11.
- 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)，2009.7.
- 3) 白旗弘実，南 邦明，藤野大地，宮井大輔，矢野将太，横田 渉：F10T を用いた高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角法の適用の検討，土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 1, pp. 1-14, 2020.1.
- 4) 南 邦明：厚膜型無機ジंक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, 2017.1
- 5) 南 邦明：厚膜型無機ジंक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, 2018.1.
- 6) 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, 2019.2.
- 7) 南 邦明，田村 洋，白旗弘実，内田大介，吉岡夏樹，濱 達矢：高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験におけるすべり発生時の変位量，土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 2, pp. 249-256, 2019.8.
- 8) 筒井康平，南 邦明，横山秀喜，天野貴文，田村 洋：表裏面で仕様の異なる摩擦面における高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動（土木学会論文集 A1 投稿中）
- 9) 南 邦明，横山秀喜，斉藤雅充，村上貴紀：厚膜型無機ジंकリッチペイントを施し 15%増し締めした高力ボルト継手に関する 2,3 の考察，土木学会論文集 A1, Vol.75.No.2, pp.127-140, 2019.5.
- 10) 南 邦明，横山秀喜，徳富恭彦，森井茂幸：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.74.No.3, pp.385-398, 2018.10.

4. 変位量によるすべり判定値の検討

4-1 概論

鋼橋における架設現場での部材の接合は、溶接接合を適用する場合もあるが、作業効率がよいボルト接合が主流であり、これまで高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験は数多く行われてきた。

すべり耐力試験は、徐々に荷重を上げて行き、すべりが生じた時の荷重値をすべり耐力としている。その際、すべりの判定は、一般にすべった時に荷重が下がり変位が大きくなった時としている。多くの試験体では、この方法ですべり耐力を判定することは可能である。ただし、荷重の低下がほとんどなく変位が大きくなるケースもあり、その際のすべり時の判定方法は明確でなかったが、近年、変位量 0.2mm に達した時の荷重値をすべりと判定する場合もある。これは建築分野で推奨している判定方法¹⁾であるが、建築鉄骨における摩擦面は赤錆が基本である。ただし、これまで摩擦面の違いによるすべり時の変位量については明確にされてこなかった。

本研究は、摩擦面に応じた変位量によるすべり判断の目安値を提案することを目的に行った実験的研究である。本実験では、摩擦面に無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）、ブラスト、赤錆、有機ジンクリッチペイント（以下、有機ジンク）および錆促進剤で発錆させた錆（以下、薬品錆）を有する高力ボルト摩擦接合試験体を作成した。これらを用いてすべり耐力試験を実施し、すべり時の変位を計測した。また、既往の研究におけるすべり時の変位量も調べた上で、荷重の低下がほとんどなく変位が大きくなるケースにおける変位量によるすべり判断の目安値を提案した。

4-2 試験体の説明

4-2-1 試験体の使用材料、形状および種類

本試験で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 4-2-1、表 4-2-2 に示す。試験体の母板および添接板には SM490Y を使用した。使用ボルトは、六角ボルト F10T(M22)とし、首下長さ 85mm のボルトを用いた。

表 4-2-1 使用鋼材の機械的性質

鋼種	板厚 (mm)	機械的性質		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SM490YA	12	430	519	23
SM490YB	19	437	530	23

表 4-2-2 使用ボルトの機械的性質とトルク係数

等級	ボルト	ボルト 4号試験片				ボルト	ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	製品 硬さ(HRC)			
F10T	M22×85	1049	1093	18	73	33	26	41	0.122

図 4-2-1 に試験体形状（土木学会の標準試験片²⁾を使用)を示すが、 β 値は、設計ボルト軸力(205kN)、使用鋼材の降伏強度(437N/mm²)、すべり係数を 0.40, 0.45 で算出（後に示す式(1)(2)を用いて）すれば、それぞれ 0.52 および 0.59 となる試験体である。なお、試験体は固定側とすべり側を設定した。試験体の種類は、摩擦面に無機ジンク（試験体 A）、ブラスト（試験体 B）、赤錆（試験体 C）、有機ジンク（試験体 D）および薬品錆（試験体 E）を施した 5 種類の試験体を用いた。試験体は各種 3 体作成し、合わせて 15 体を試験に供した。

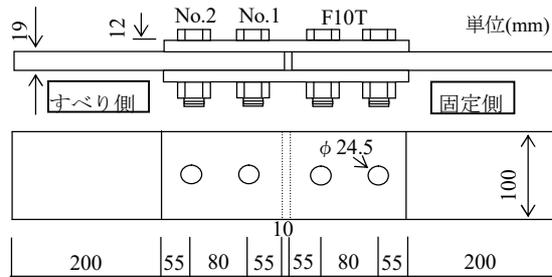


図 4-2-1 試験体形状

4-2-2 ボルトの締付け

ボルト締付けにおいて、一次締めは設計ボルト軸力の 60%、本締めは、設計ボルト軸力の 110%を目標に締付けた。なお、固定側（すべらせない側）のボルトについては、さらに 20kN 増し締めした。

4-2-3 摩擦面処理および粗さ・膜厚・錆厚の測定

摩擦面処理は、E 試験体を除く試験体では、まず、グリッドブラストにて素地調整 (ISO Sa2.5: 75 μ mRzjis 以下) を行った。その後、試験体 A, D は、それぞれ無機ジンクおよび有機ジンクを標準膜厚 75 μ m 塗布した。塗装後約 1 ヶ月間、工場内で乾燥させた（その後、試験場へ搬送し、約 3 ヶ月後に試験体を組み立てた）。また、試験体 C は、自然錆を発錆させるため、約 2 ヶ月間、屋外で曝露した。E 試験体では 2 種ケレン相当の下地処理を行い、建築鉄骨で一般に使用する錆促進剤を 2 回塗り、その後、2 日間室内で乾燥させた。なお、C, E 試験体は、錆発後、浮き錆をワイヤブラシで除去した。

摩擦面の状況を明確にさせるため、表面粗さおよび膜厚（錆厚）の計測を行った。粗さ計測は、表面粗さ計(サーフテスト SJ-210)を用いて、評価長 8mm で十点平均粗さ(Rzjis)を求めた。測定位置は、図 4-2-2 に示すようにボルト孔周辺とし、測定数は 5 種類の試験体に対し 1 体計測することとし、1 つのボルト孔に対し、母板および添接板の片面各 4 ヶ所とした。測定時期は、試験体 A, D は塗装後、試験体 B はブラスト後、試験体 C, E は曝露後（発錆後）とした。次に、試験体 A で塗装膜厚、試験体 C, E では錆厚を測定することとし、膜厚（錆厚）測定は、渦電流式膜厚計(SWT9300)を用いて行った。測定位置は、ボルト孔周辺の 2 ヶ所とした。

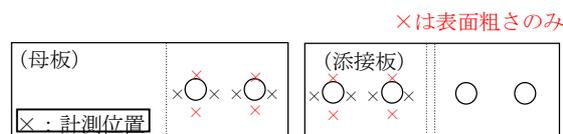


図 4-2-2 表面粗さおよび膜厚の計測位置

各試験体の表面粗さおよび膜厚（鍍厚）測定結果を表 4-2-3 に示す。これらの結果は、各ボルト孔の平均値を示している。粗さ計測結果の平均値は 7.86~35.2 μm であった。膜厚測定結果において、無機ジंकおよび有機ジंकで大きな違いはなく、膜厚の平均値は 81.7~92.1 μm であり、ばらつきは少なく、目標の 75 μm に対し 6.7~17.1 μm 大きい値であった。また、鍍厚の平均値は、赤鍍で 56.8~63.7 μm 、薬品鍍では 17.3~21.4 μm と両方で約 3 倍の違いが生じていた。

表 4-2-3 表面粗さおよび膜厚計測結果

試験体	分類	名称	表面粗さ		平均値	膜厚(C1,E1~C3,E3は鍍厚)		平均値
			粗さ[μm]			厚み[μm]		
			母板	添接板		母板	添接板	
無機ジंक	A1		19.6	19.5	19.6	81.9	83.3	82.6
	A2		—	—	—	85.8	77.7	81.8
	A3		—	—	—	79.1	86.8	82.9
プラスト	B1		34.1	36.2	35.2	—	—	—
	B2		—	—	—	—	—	—
	B3		—	—	—	—	—	—
赤鍍	C1		21.4	23.9	22.7	58.7	54.8	56.8
	C2		—	—	—	58.9	68.4	63.7
	C3		—	—	—	60.2	57.5	58.9
有機ジंक	D1		7.11	8.60	7.86	86.1	98.0	92.1
	D2		—	—	—	88.2	81.1	84.7
	D3		—	—	—	82.3	81.0	81.7
薬品鍍	E1		14.7	12.2	13.46	19.8	14.8	17.3
	E2		—	—	—	21.0	21.9	21.4
	E3		—	—	—	22.6	19.0	20.8

4-3 すべり耐力試験

4-3-1 ボルト軸力の計測

導入軸力およびすべり耐力の評価を行うため、ボルト軸力を計測した。ボルト軸力は、計測したひずみ値に鋼のヤング係数値を乗じることで算出できるが、ボルトのヤング係数値の材料誤差あるいはボルト径の製造誤差が生じることもある。そこで、荷重とひずみの関係から換算率を求めるキャリブレーション試験を実施した。その結果を図 4-3-1 に示す。ここでは 3 本のボルトで実施したが大きな違いはなく、その平均値でひずみからボルト軸力を算出するための換算率を求めた。

計測はすべり側のすべてのボルトに対して実施し、図 4-3-2 に示すように、ボルト軸部にひずみゲージを取り付け、それらのゲージ出力（ひずみ値）の平均値に換算率を乗じボルト軸力を算出した。その際、ボルト軸部のひずみゲージの位置は、試験体として組み立てた際に、母材板厚中央となるようにした。

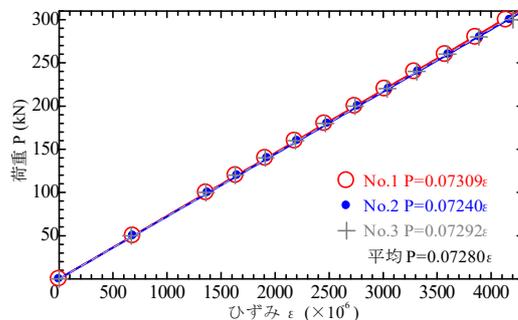


図 4-3-1 キャリブレーション試験
(荷重とひずみの関係)

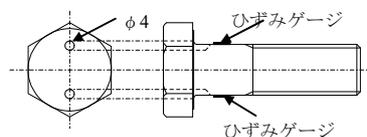


図 4-3-2 ひずみゲージの取り付け

4-3-2 すべり耐力試験方法

すべり耐力試験は、ボルト締付け後、672時間（28日）経過後に実施した。試験には荷重能力1000kNの万能試験機を用い、試験体両端部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。試験時には、図4-3-3に示すように、No.1ボルト（内側ボルト部）における母板と添接板間の相対変位および母板間の変位を測定するため、クリップゲージを設置して測定した。計測には動ひずみアンプ（DPM-911B）を用い、0.01秒毎に荷重と変位量を測定した。

すべり耐力は、継手部がすべった時に荷重が下がるか、あるいは下がらなくても添接板と母板の相対変位等が大きくなったときの荷重とした。なお、荷重低下は、試験機の荷重計および動ひずみアンプのデータ（荷重-変位の関係）から判断した。



図 4-3-3 変位計測位置

4-3-3 ボルト軸力計測結果

ボルト軸力計測結果およびすべり耐力試験結果を、表4-3-1に示す。締付け軸力は、各試験体の平均値において、設計ボルト軸力の110~113%であり、概ね想定通りの軸力が導入されていた。すべり試験直前（672時間後）においては、各試験体の平均値は設計ボルト軸力の100%~110%、軸力残存率は89.9~96.9%と表面処理により大きく異なり、特に無機ジンの残存軸力は小さかった。

表 4-3-1 ボルト軸力計測およびすべり耐力試験結果

試験体		ボルト軸力								軸力残存率 672時間後 [%]		すべり 荷重P [kN]	すべり 音	すべり係数					
		締付け直後 N_a [kN]				試験直前(672時間後) N_b [kN]													
		名称	ボルトNo.		平均	設計値比率 (%)	ボルトNo.		平均					設計値比率 (%)	μ_s	μ_b			
無機 ジンク	A1	227.2	224.8	226.0	110.2	110.7	204.7	201.8	203.2	99.1	99.5	89.9	あり	464	0.566	0.571	0.599		
	A2	222.5	227.3	224.9	109.7		201.2	205.7	203.5	99.2		90.5		89.9	508	0.619		0.624	
	A3	224.6	235.4	230.0	112.2		201.5	209.4	205.5	100.2		89.3		496	0.605	0.604			
ブラ スト	B1	226.3	229.0	227.7	111.1	113.3	209.7	223.1	216.4	105.6	109.8	95.0	あり	515	0.628	0.595	0.597		
	B2	241.5	229.3	235.4	114.8		232.8	*	232.8	113.6		98.9		96.9	522	0.637		0.655	0.560
	B3	239.0	228.1	233.5	113.9		229.9	222.2	226.0	110.3		96.8		575	0.702	0.636			
赤錆	C1	230.9	236.2	233.5	113.9	112.7	216.6	219.9	218.2	106.5	104.8	93.4	あり	642	0.783	0.736	0.745		
	C2	221.2	227.4	224.3	109.4		206.1	212.5	209.3	102.1		93.3		93.0	633	0.771		0.780	0.756
	C3	239.0	231.7	235.3	114.8		217.2	216.2	216.7	105.7		92.1		644	0.786	0.743			
有機 ジンク	D1	225.0	220.8	222.9	108.7	110.9	207.2	207.8	207.5	101.2	104.8	93.1	なし	263	0.321	0.317	0.298		
	D2	223.4	219.9	221.6	108.1		211.7	209.4	210.5	102.7		95.0		94.4	262	0.320		0.311	0.311
	D3	237.6	238.1	237.8	116.0		227.7	225.0	226.3	110.4		95.2		241	0.294	0.266			
薬品 錆	E1	233.3	225.2	229.2	111.8	110.1	224.5	216.9	220.7	107.6	106.1	96.3	あり	653	0.796	0.740	0.745		
	E2	223.2	219.4	221.3	108.0		214.0	212.2	213.1	103.9		96.3		96.3	648	0.790		0.790	0.760
	E3	230.7	222.2	226.5	110.5		223.0	214.0	218.5	106.6		96.5		643	0.784	0.736			

4-3-4 すべり係数算出結果

すべり係数は式(1)を用いて算出し、その結果は表 4-3-1 に示している。表 4-3-1 では、設計ボルト軸力(N_s)およびすべり試験直前の軸力(N_b)で算出したすべり係数 μ_s 、 μ_b を示したが、すべり耐力の評価は後者で行った。

$$\mu = \frac{P}{m \cdot n \cdot N} \quad (1)$$

μ : すべり係数, P : すべり荷重,
 m : 接触面数, n : ボルト本数, N : ボルト軸力

すべり時は大きな音が発生し（有機ジンクを除く）、荷重の低下（微小な低下の場合もあったが）は明確であった。すべり係数 μ_b は、摩擦面により違いが生じているが、無機ジンクとブラストはほぼ同じで 0.60 と高く、さらに、赤錆と薬品錆では 0.75 のすべり係数を有していた。なお、有機ジンクのすべり係数は無機ジンクの約 1/2 と低かった。これは高摩擦型の有機ジンクではなく、一般の有機ジンクであったためであり、表 4-2-3 で示した表面粗さも無機ジンクの 1/2 以下であった。

表 4-3-2 変位の計測結果

試験体		すべり時の変位量[mm]			
分類	名称	No.1ボルト	母板間		
無機ジンク	A1	0.057	0.088	0.202	0.249
	A2	0.116		0.271	
	A3	0.090		0.275	
ブラスト	B1	0.123	0.143	0.366	0.372
	B2	0.163		0.378	
	B3	*		*	
赤錆	C1	*	0.201	*	0.529
	C2	0.227		0.522	
	C3	0.174		0.535	
有機ジンク	D1	0.051	0.054	0.167	0.161
	D2	0.056		0.154	
	D3	*		*	
薬品錆	E1	0.111	0.092	0.321	0.341
	E2	0.110		0.375	
	E3	0.055		0.327	

* : 計測不能（固定側からすべり等）

4-3-5 すべり時の変位量の計測結果

すべり時の変位の明確な定義はなく、本研究では、最大荷重（すべり耐力）から荷重が低下したときの母板-添接板間等の相対変位量をすべり時の変位と定義した。すべり時の変位計測結果を表 4-3-2 に示す。なお、表中の*については、試験直前に軸力の割増しを行った訳ではなかったこともあり、固定側からすべりが発生するなど、計測ができなかった試験体を示している。これらの結果に示すように、変位量は表面処理により大きく異なっており、有機ジンク<無機ジンク<薬品錆<ブラスト<赤錆の順となり、塗装系は変位量が小さいことが判る。また、錆でも薬品錆と赤錆では大きく異なった。その理由として、表 4-2-3 に示すように、錆厚が大きく異なったことが 1 つの大きな要因であると考えられる。次に、計測位置によっても異なっており、No.1 ボルト位置に対し母板間では約 2.5~3.0 倍、母板間の方が大きかった。詳細については、次節の 4-4 で既往の文献データも含めて考察する。

図 4-3-4 に各試験体のすべり荷重と変位の関係（固定側からすべった試験体は除く）を示す。図中に示す×はすべり発生時を示している。これらの図に示すように、荷重と変位の関係は、摩擦面により大きく異なっていることが判る。また、同じ摩擦面であっても No.1 ボルト位置と母板間においても大きく挙動が異なっていることが判る。

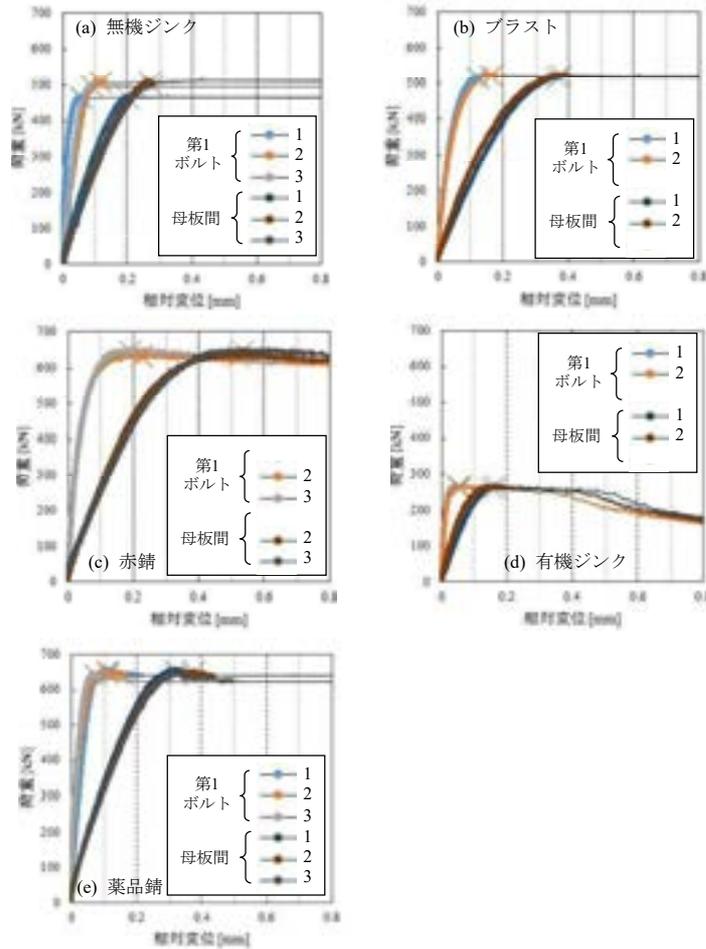


図 4-3-4 載荷時の荷重と変位の関係

4-4 すべり時の変位量の考察

4-4-1 No.1 ボルト（内側ボルト）位置での変位量

図 4-4-1 に本試験結果および既往の文献データを含めた No.1 ボルト位置での変位量を示し、横軸にはすべり係数 μ_b およびすべり降伏耐力比 β （以下、 β ）で示した。ここで示す β は式(2)を用い、その際、使用鋼材（表 4-2-1）の降伏強度およびすべり荷重値（表 4-3-1）を使用した。なお、文献データの試験体概要を表 4-4-1 に示した。また、図 4-4-2 には既往の文献データの詳細なパラメータを示し、これらの結果から変位に影響する特殊なデータ（フィラー付き継手および封孔処理ありの溶射）については、図 4-4-1 では削除して示した。さらに、図 4-4-1(a)では μ_b と変位、図 4-4-1(b)では β と変位との回帰直線を示し、これらの回帰直線式および相関係数については表 4-4-2 に示した。なお、道路橋示方書⁹⁾（以下、道示）および鉄道構造物等設計標準¹⁰⁾（以下、鉄道標準）では、ブラストと赤錆の両者に対し黒皮を除去した粗面状態（以下、粗面状態）として扱っており、また、両者の実験結果に大きな違いはなく、回帰直線ではブラストと赤錆の両者を合わせて粗面状態として整理した。

$$\beta = \frac{P}{(W \cdot d) \cdot t \cdot \sigma_{ys}} \quad (2)$$

β : すべり降伏耐力比, P : すべり荷重,
 W : 幅, t : 板厚, d : 孔径, σ_{ys} : 降伏強度

表 4-4-1 文献データ^{3)~8)}の試験体の概要

文献番号	鋼材(母板)			ボルト			試験体		備考	
	規格	降伏強度(N/mm ²)	板厚(mm)	規格	径(mm)	長さ(mm)	幅(mm)	ボルト本数		孔径(mm)
3)	SM490Y	434	25	F10T	22	90	100	2	24.5	(*1)
	SM490Y	437	19	F10T	22	90	100	2	24.5	(*2)
4)	SM490Y	368	28	F10T	22	100	100	2	24.5	
5)	SM490A	406	19	F8T	22	85	100	2	24.5	
6)	SM490Y	402	22	F10T	22	90	120	3	24.5	
7)	SM490A	323	50	F10T	36	175	152	3	40.0	太径
	SM490A	323	50	F10T	36	175	130	3	40.0	太径
	SM490A	323	50	F10T	22	150	122	7	24.5	多列
	SM490A	323	50	F10T	22	150	102	7	24.5	多列
	SM490A	386	19	F10T	22	85	126	3	24.5	
8)	SMA490W	429	22	F10T	22	90	90	2	24.5	

*1): 1面摩擦と2面摩擦で実施.

*2): フィラー付き継手

表 4-4-2 回帰分析(μ および β と変位量の関係)の集計結果

計測位置	摩擦面	横軸	回帰直線	相関係数	備考	
No.1 ボルト	無機ジंक 粗面状態 薬品錆 溶射	μ_b	$y=0.29416x-0.08470$	0.504	図-4-4-1(a)	
			$y=0.19603x+0.03662$	0.462		
			$y=0.13533x-0.00314$	0.305		
			$y=0.05175x+0.06782$	0.453		
	無機ジंक 粗面状態 薬品錆 溶射	β	$y=0.04111x+0.05178$	0.299		図-4-4-1(b)
			$y=0.06757x+0.11660$	0.539		
			$y=0.00849x+0.09108$	0.413		
			$y=0.03726x+0.07194$	0.383		
母板間	無機ジंक 粗面状態 薬品錆 有機ジंक	μ_s	$y=1.13236x-0.31057$	0.643	図-4-4-3(a)	
			$y=0.75103x-0.11040$	0.859		
			$y=0.14522x+0.16166$	0.157		
			$y=1.02867x-0.16899$	0.918		
	無機ジंक 粗面状態 薬品錆 有機ジंक	β	$y=0.46034x-0.08356$	0.937	図-4-4-3(b)	
			$y=0.64916x-0.19047$	0.886		
			$y=0.33526x-0.01687$	0.754		
			$y=0.59003x-0.09108$	0.914		

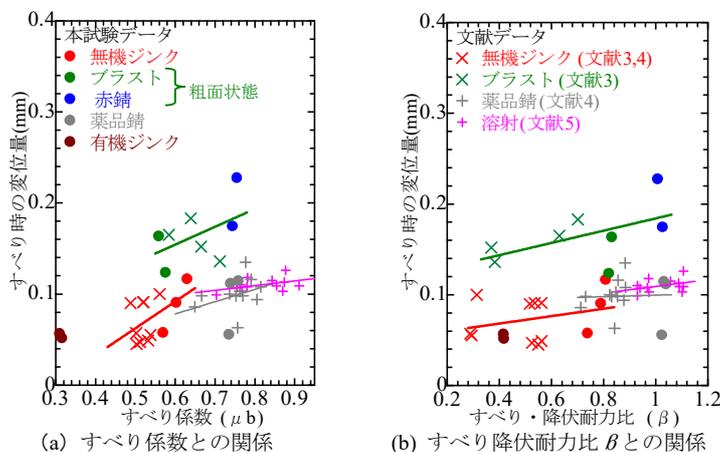


図 4-4-1 No. 1 ボルト位置でのすべり時の変位量

図 4-4-1 に示すように、粗面状態ではすべり時の変位は 0.12~0.23mm であり、建築分野¹⁾では 0.2mm をすべりの判断基準としているが、これは赤錆を前提としていることを考えると、分布の上限側である 0.2mm をすべりの判断の目安値とするのは妥当と考えられる。一方、無機ジंकでは、変位は 0.05~0.12mm にあり、粗面状態と同様、上限側をすべりの判断目安と考えれば 0.1mm をすべりの判断目安とするのがよいと考えられる。同様に、有機ジंकや溶射についても、0.1mm をすべり判断目安とするのがよいと考えられる。なお、薬品錆では、赤錆とは異なり、むしろ無機ジंकと同等であると考えられ、0.1mm をすべりの判断目安とするのがよいと考えられる。

図 4-4-1(a)に示すように、すべり係数 μ_b との関係については、いずれの摩擦面においても、 μ_b が大きくなれば変位も大きくなる傾向が示され、回帰直線の傾きが小さい薬品鍍では相関係数は 0.305 と弱い相関であるが、それ以外は 0.4 を超え、相関があると判断できる。次に、図 4-4-1(b)に示すように、 β が大きくなれば変位も大きくなる相関がいずれの摩擦面にも見られ、相関係数は 0.299~0.539 の範囲にあり、弱い相関 (>0.2) もしくは相関あり (>0.4) と判断できる。また、本試験および文献データの範囲においては、無機ジंकと粗面状態では約 0.09mm 幅で平行な回帰直線が示されており、粗面状態のすべり判定基準が 0.2mm とすれば、無機ジंकのすべり判定目安を 0.1mm とするのがよいことは、これらの結果からもわかる。なお、何れも回帰直線の傾きは小さく、No.1 ボルト位置での変位は β の影響は小さい。すなわち、試験体形状による変位量の影響が小さいと考えられる。

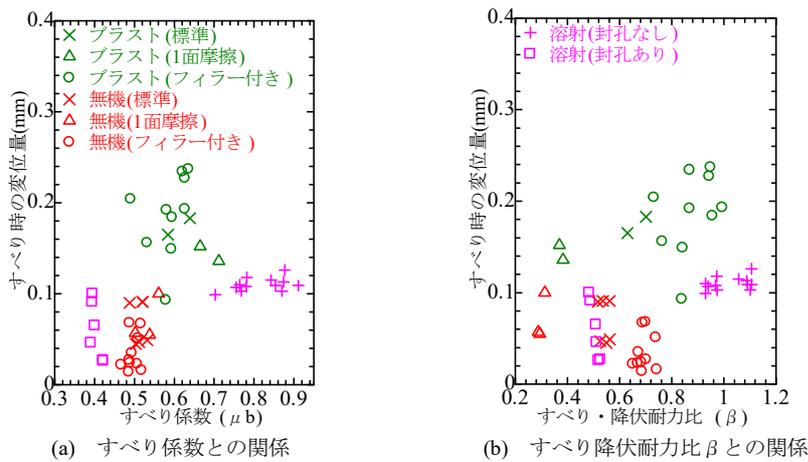


図 4-4-2 すべり時の変位に及ぼす因子 (No.1 ボルト位置)

図 4-4-2 に示す各パラメータの影響については、標準的な試験体 (通常の 2 面摩擦) に対し、1 面摩擦継手では変位量に違いはなく、図 4-4-1 はこれらの試験体も示した。ただし、フィラー付きの試験体については、多くがフィラーと母板の接触面ですべりが発生したが、フィラーと添接板面からすべりが発生した場合もあり、現状ではすべり挙動が明確でなく、また、無機ジंकでは明らかに、標準的な試験体より変位量は小さいので、図 4-4-1 はこれらの試験体を示さなかった。なお、ブラストではフィラーを有する継手も、標準的な試験体と違いなく、ほぼ回帰直線上にあると考えられるが、無機ジंकと整合性をとるため、図 4-4-1 はこれらの試験体を示さなかった。また、溶射においても、封孔処理なし (溶射金属面) と有機系の塗装である封孔処理ありでは変位量が異なることから、封孔処理ありについても図 4-4-1 では示さなかった。ただし、封孔処理剤は有機系の塗装でもあり、有機ジंकと比べて大きな違いはないことが判り、むしろ封孔処理した溶射面は、有機ジंकに分類するのがよいと考えられる。

以上を踏まえ、道示および鉄道標準に示されている摩擦面を適用する場合のすべり耐力試験において、荷重の低下がほとんどなく変位が大きくなるケースにおけるすべり判定目安の変位量の提案値を表 4-4-3 に示す (次項の結果も含む)。No.1 ボルト位置におけるすべり判定目安の変位量は、無機ジंकで 0.1mm、粗面状態では 0.2mm とするのがよいと考えられる。なお、ここでは道示および鉄道標準に示されていない摩擦面については表中に記載しなかったが、有機ジंक、薬品鍍および溶射 (封孔処理なし) では 0.1mm とするのがよいと考えられる。ただし、1 面摩擦は適用の範囲と考えられるが、無機ジंकのフィラー付き継手および封孔処理ありの溶射は対象外である。

4-4-2 母板間（すべり側と固定側の母板）での変位量

図 4-4-3 には本試験結果および既往の文献データの母板間の変位量を示し、横軸にはすべり係数 μ_s と β で示した。なお、文献データはボルト軸力を計測していないケースが多く、ここでは、本試験データも含め設計ボルト軸力で評価した μ_s で示した。さらに、図 4-4-3(a)は μ_s と変位、図 4-4-3(b)では β と変位との回帰直線を示し、その回帰直線式および相関係数を表 4-4-2 に示した。また、図 4-4-4 には文献データの詳細なパラメータを示し、これらの結果から変位に影響する特殊なデータ（多列ボルト継手）については、前項と同様、図 4-4-3 でも削除して示した。

図 4-4-3 に示すように、前項の 4-4-1 で示した No.1 ボルト位置より変位は大きく、また、変位の分布幅も広く、無機ジンクや粗面状態では 0.13~0.65mm の範囲にあった。これらのばらつきの影響もあり、建築分野¹⁾では No.1 ボルト付近を計測位置としているものと考えられる。ただし、ボルト製造会社等の試験では、従来から参考値とする意味から母板間の変位が計測されており、また、容易に計測できるのも事実である。

図 4-4-3(a)に示すように、 μ_s が大きくなれば変位量も大きくなる傾向がみられ、薬品鍍では相関ありと判断できないが、無機ジンクでは相関係数が 0.64 と相関ありと判断でき、さらに、粗面状態や有機ジンクでは相関係数は 0.8 を超え、強い相関が確認できた。ただし、無機ジンクでは、すべり係数が 0.6 付近におけるデータでばらつきも生じる結果となった。一方、図 4-4-3(b)に示す β で整理すれば、表 4-4-2 に示すように、薬品鍍でも相関係数は 0.75 であり、粗面状態では 0.89、無機ジンクでは 0.91、有機ジンクでは 0.94 と強い相関がみられた。無機ジンクではすべり係数が 0.6 付近で変位量にばらつきが生じた（図 4-4-3(a)）が、 β で整理するとこれらのデータにおけるばらつきは解消されており、相関係数も 0.64 から 0.91 と強い相関となった。これは、すべり係数は 0.6 程度で違いは少ないが（大きな違いは生じない）、同じすべり係数であっても β は異なっているからと考えられ、その影響がすべり時の変位に違いが生じるものと考えられる。これらの結果が示すように、母板間では β の影響を大きく受けるため、すべり判定の目安を検討する場合、 β を考慮して設定する必要がある。

回帰直線に用いたデータの β 平均値は、無機ジンク、粗面状態および薬品鍍は大きな違いはなくその平均値は 0.8611、有機ジンクは低く 0.5993 であった。これらの値に表 4-4-2 で示した回帰直線式に代入すると、変位量は、無機ジンクで 0.313mm、粗面状態で 0.361mm、有機ジンクでは 0.263mm、薬品鍍では 0.271mm となる。これらは各摩擦面におけるすべり時の平均変位推定値を示しているが、先と同様、上限値付近（平均変位推定値より高め）をすべりの目安値と考えれば、道示および鉄道標準に示されている無機ジンクおよび粗面状態における母板間でのすべり判定の目安は、それぞれ 0.35mm、0.4mm がよいと考えられる（表 4-4-3）。その他の摩擦面として、薬品鍍および有機ジンクでは 0.3mm とするのがよいと考えられる。

図 4-4-4 に示す各パラメータの影響について、標準的な試験体（通常の 2 面摩擦）に対し、膜厚が変われば変位量も異なっているが、これについては β で整理できる。同様に、ブラストの強弱（Sa2 1/2 および Sa1：言い換えると表面粗さ）で変位量の違いも生じたがこれについても β で整理できる。さらに、太径(M36)でも回帰直線上にある。ただし、多列（7列）の場合では、若干傾向が異なった。これは、試験体の変形の影響と考えられ、試験体の長さが長いため、その他の試験体と傾向が異なったものと考えられる。このため、多列は図 4-4-3 では示さなかった。

母板間では、すべり係数や β の影響が大きかったが、これは荷重増加に伴う試験体の変形量の影響と

考えられる。すなわち、すべり係数や β が大きいということは、すべり耐力時の荷重値が大きく、これに伴う母板や添接板の変形が大きくなったことの影響と考えられる。特に、母板間ではこのような試験体の変形の影響を大きく受けるため、表 4-4-2 で示した回帰直線の傾きや相関係数が大きかった。前節で示した No.1 ボルト位置においても、局所的な変形の影響のみであるが、それでも、回帰直線は右肩上がりで、弱い相関あるいは相関ありと判断できる相関係数であった。

以上の結果から、先に示した母板間でのすべり判定の目安の適用範囲は、表面処理の品質（膜厚や表面粗さ等）によらず、標準試験片²⁾を用いることを前提すればよいと考えられる。なお、今後、データ数量を増やし、本提案の信頼性を向上させていくことは重要であると考えられる。

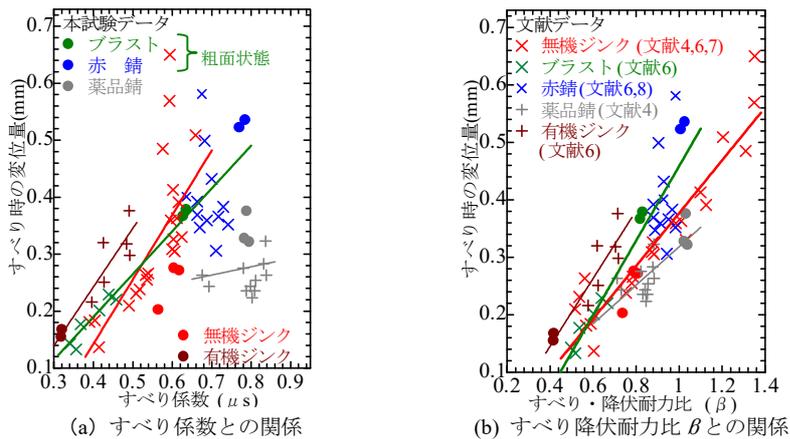


図 4-4-3 母板間でのすべり時の変位量

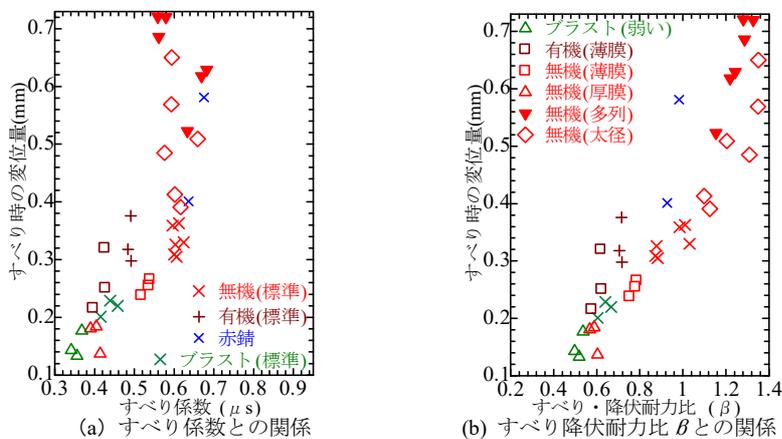


図 4-4-4 すべり時の変位に及ぼす因子（母板間）

表 4-4-3 すべり判断目安値の提案

摩擦面	変位計測位置	
	No.1ボルト (内側ボルト)	母板間
無機ジンク	0.10mm	0.35mm
粗面状態 (プラスト, 赤錆)	0.20mm	0.40mm

注) 母板間では、標準試験片²⁾を使用することを前提。

4-5 結 論

本研究は、摩擦面に応じた変位量によるすべり判断の目安値を提案することを目的に行った実験的研究である。本研究から得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) すべり時の変位は、表面処理方法および測定位置により大きく異なった。
- (2) すべり係数 μ やすべり降伏耐力比 β が大きくなれば、すべり時の変位量が大きくなる相関関係が認められた。特に、母板間（固定側とすべり側の母板間）の計測におけるすべり降伏耐力比 β との関係では、強い相関が認められ（図 4-4-3(b)）、相関係数は無機ジンクで 0.91、粗面状態（ブラスト、赤錆）では 0.89 であった（表 4-4-2）。
- (3) 変位量によるすべり判断の目安値として、No.1ボルト（内側ボルト）位置では、無機ジンクで 0.1mm、粗面状態では 0.2mm がよいと考えられる（表 4-4-3）。また、薬品錆、有機ジンクおよび溶射では 0.1mm とするのがよいと考えられる。
- (4) 変位量によるすべり判断の目安値として、母板間では、無機ジンクで 0.35mm、粗面状態では 0.4mm がよいと考えられる（表 4-4-3）。また、薬品錆および有機ジンクでは 0.3mm とするのがよいと考えられる。なお、母板間では試験体形状の影響を大きく受けるため、この適用は標準試験片²⁾を使用した場合とする。

4-6 おわりに

これまで高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験は、数多く行われてきたが、その際、試験体のすべりが明確な場合は、現状のすべり耐力（すべり荷重）の判定法に問題はないと考えられる。ただし、荷重の低下がほとんどなく変位が大きくなる場合、すなわち、すべり時の荷重が不明瞭な場合におけるすべりの判定は解明すべき点多かった。そこで、このようなケースにおけるすべりの判定が適切に行えるよう（容易に判断できる）、本研究では、摩擦面に応じた変位量によるすべり判断の目安値を提案した（表 4-4-3）。

これまで、このようなすべり時の荷重が不明瞭な場合、建築分野で推奨しているすべり判定値 0.2mm¹⁾を、摩擦面に依らず適用している場合もあった。ただし、建築鉄骨におけるボルト継手部の摩擦面は、赤錆が基本である。そこで、摩擦面の違いにより異なるすべり判断の目安値を示したことにより、すべり耐力試験の試験精度が向上するものと考えられる。

また、従来からボルト製造会社等では、母板間での変位を計測した試験が行われてきた。これは、クリップゲージの装着が容易だからである。本研究では、母板間での変位による判定値も示したが、これで判定を行えば、変位計測を伴うすべり耐力試験がより容易に行えるものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.3.
- 2) 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)，2006.12.
- 3) 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, 2019.2.
- 4) 吉岡夏樹，本多克行，山口隆司，齊藤史朗，森本 洗，佐々木 研：錆促進剤塗布後の曝露期間に着目した摩擦接合継手のすべり試験，土木学会第73回年次学術講演会, I-180, 2018.8.
- 5) 南 邦明，横山秀喜，徳富恭彦，森井茂幸：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.74, No.3, pp.385-398, 2018.10.
- 6) 森 猛，南 邦明，井口 進，山口隆司：接合面処理方法と品質を考慮した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A, Vol.64, No.1, pp.48-59, 2008.1.
- 7) 南 邦明，森 猛，堀川秀信：50mm厚鋼板を用いた太径ボルト(M36)のすべり耐力試験，土木学会論文集A, Vol.62, No.2, pp.267-278, 2006.4.
- 8) 井上大地，内田大介，浅野浩一，貝沼重信，増本岳：耐候性鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合面の表面性状とすべり係数，鋼構造年次論文報告集, Vol.25, pp.48-54, 2017.11
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋・鋼部材編，2017.11.
- 10) 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)，2009.7.