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

南 邦明¹

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

E-mail: minami.kun-e27b@jrnt.go.jp

厚膜型無機ジンクリッチペイントを施した高力ボルト摩擦接合継手は、黒皮を除去した粗面状態と比べ、リラクセーションによるボルト軸力低下が大きい。このため、より高い導入軸力で施工することによりボルト継手の安全性・信頼性が向上するものと考えられ、著者は15%増し締めボルト施工を提案した。本報告は、15%増し締めボルト施工の信頼性を向上させるため、まず、リラクセーション試験を実施し、導入軸力の差異による軸力低下の影響を調べた。そして、15%増し締めで施工した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を実施し、継手耐力に及ぼす導入軸力の影響を考察した上で、15%増し締めした高力ボルト摩擦接合継手の安全性・信頼性を再検証した。

Key Words : high strength bolt, 15%-additional bolt axial force, zinc-rich paint, slip tests, relaxation

1. はじめに

鋼橋の現場接合において、昭和30年代はリベット接合で行われ、ボルト接合は昭和40年代に入り一般に適用され始めた。ボルトに関する基準については、鉄道ではJRS鋼鉄道橋（日本国有鉄道規格：昭和46年）、道路では道路橋示方書¹⁾（昭和48年）（以下、道示）に基準化された。当時の基準では、高力ボルト摩擦接合継手を用いる場合、摩擦面の表面処理は、黒皮を除去した粗面状態（以下、粗面状態）であった。その後、道示では平成2年、鉄道構造物等設計標準²⁾（以下、鉄道標準）では平成4年から厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を塗布した摩擦面も適用可能となり、それ以降、鋼橋製作の現場では無機ジンクを用いることが主流になっている。

ボルトの締付け作業は、一般にトルク法を用いる。トルク法でのボルト締付けは、道示や鉄道標準では設計ボルト軸力の10%増しの締付けを基本としている。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10%増しとしている。この規定は、ボルト接合が基準化された当時から示されていたものであり、言い換えると、粗面状態を前提に規定されていると言える。

粗面状態では、リラクセーションによるボルト軸力の低下は、締付け1年後には約4%となるが、残りの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³⁾。一方、無機ジンクでは、リラクセー

ションによるボルト軸力の低下は、締付け1年後には11%程度となる³⁾。すなわち、無機ジンクでは、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と考えられた。

著者は、無機ジンクを施した高力ボルト摩擦接合継手において、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になり、ボルト継手の安全性・信頼性が向上することを報告した³⁾。

本報告は、15%増し締め施工の信頼性を向上させることを目的とし、前報³⁾とは異なる塗料会社の無機ジンク塗料および異なる施工会社で製作した試験体を用いて、リラクセーション試験を実施し、導入軸力の差異による軸力低下の影響を調べた。次に、15%増し締めで施工した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験を実施し、そのすべり耐力から安全性を再確認にした。これらの試験結果から、継手耐力に及ぼす導入軸力の影響を考察し、またリラクセーションによる軸力低下程度を再確認した上で、15%増し締めした高力ボルト摩擦接合継手の安全性・信頼性を再検証した。

2. 試験体

(1) 試験体の種類、形状および使用材料

試験体の摩擦面には無機ジンクを塗布し、すべり耐力試験（すべり試験体）およびリラクセーション試験（リラク試験体）に用いた。試験体の塗装作業におい

図-1 試験体形状

表-1 膜厚計測結果

試験体 分類	試験 体名	C試験体			D試験体		
		膜厚(μm)		平均値 (母板と 添接板)	膜厚(μm)		平均値 (母板と 添接板)
		母板	添接板		母板	添接板	
すべり 試験体	C1	84.9	85.2	85.1	D1	82.7	82.3
	C4	84.5	85.2	84.9	D4	83.8	87.7
	C7	83.8	83.0	83.4	D7	81.9	87.8
	C10	84.9	85.0	85.0	D10	81.6	86.0
	C13	85.7	84.0	84.9	D13	77.1	81.8
リラク 試験体	CR1	81.8	83.8	82.8	DR1	82.4	78.5
	CR4	82.5	82.7	82.6	DR4	82.0	86.5
	CR7	85.5	87.8	86.7	DR7	83.6	80.2

表-2 導入軸力計測およびリラクセーションによる残存軸力計測結果

試験体 分類	試験 体名	C試験体							D試験体						
		締付け直後: N_a (導入軸力) [kN]				432時間後の軸力: N_b (残存軸力) [kN]			締付け直後: N_a (導入軸力) [kN]				432時間後の軸力: N_b (残存軸力) [kN]		
		ボルトNo.		平均	比率 (%)	ボルトNo.		平均	比率 (%)	ボルトNo.		平均	比率 (%)	ボルトNo.	
		No.1	No.2			No.1	No.2			No.1	No.2			No.1	No.2
リラク 試験体	CR1	227.5	225.2	226.4	110.4	205.5	205.5	205.5	100.2	90.79	DR1	230.4	235.4	232.9	113.6
	CR2	229.6	228.2	228.9	111.7	209.2	208.6	208.9	101.9	91.26	DR2	234.4	229.4	231.9	113.1
	CR3	228.1	227.7	227.9	111.2	206.2	205.8	206.0	100.5	90.39	DR3	235.0	229.0	232.0	113.2
	CR4	225.4	226.7	226.1	110.3	204.0	206.4	205.2	100.1	90.78	DR4	233.1	231.2	232.2	113.2
	CR5	229.4	227.2	228.3	111.4	207.2	203.2	205.2	100.1	89.88	DR5	228.1	221.0	224.6	109.5
	CR6	229.9	227.6	228.8	111.6	207.5	207.3	207.4	101.1	90.62	DR6	231.0	227.9	229.5	111.9
	CR7	229.4	229.4	229.4	111.9	210.0	207.9	209.0	101.9	91.09	DR7	227.3	230.3	228.8	111.6
	CR8	227.3	225.2	226.3	110.4	207.6	205.3	206.5	100.7	91.25	DR8	225.2	231.2	228.2	111.3
	CR9	231.6	226.8	229.2	111.8	209.1	205.5	207.3	101.1	90.45	DR9	231.2	228.5	229.9	112.1
	平均	228.7	227.1	227.9	111.2	207.4	206.1	206.8	100.9	90.72	平均	230.6	229.3	230.0	112.2

注) 比率とは、設計軸力比率(計測ボルト軸力/設計ボルト軸力)

て、同じ施工条件であっても施工会社によりブラストや塗装の作業環境が異なることを考慮し、C試験体(C, CR)とD試験体(D, DR)は、施工会社の異なる2社で製作した。試験体名称は、C社およびD社で製作したものに対し、それぞれすべり試験体はC1~C15, D1~D15, リラク試験体はCR1~CR9, DR1~DR9とし、合わせて48体を試験に供した。

試験体の母板には板厚22mm、添接板には12mmのSMA490Wを用いた。使用ボルトは、六角型ボルトF10TW(M22)を使用した。図-1に試験体形状を示す。本試験体のすべり降伏耐力比 β (すべり係数を0.45で算出)は0.63であり、すべり先行型の試験体である。

(2) 摩擦面処理および塗膜厚測定

摩擦面処理は、グリッドブラストで素地調整(ISO Sa2.5: 75μmRzjis以下)を行った後に、無機ジンクを標準膜厚75μm塗布した。これらの条件は、前報³⁾の試験と同一条件であり、C社、D社は前報のA社、B社とは異なる2社である。塗装の仕様は文献⁴⁾に則り、C,D試験体は同一塗料会社製品を用いることとし、これはA,B試験体とは異なる塗料会社製品である。なお、同一塗料を用いたとしても、施工会社により塗料の調合作業(塗料の攪拌)の違いで亜鉛の割合が部位によって異なったり、乾燥時の湿度・温度・期間の違いもある。さらに、施工会社により下地処理のブラストの施工の違い(凹凸度等)により、塗料との密着性が異なれば、すべり耐力の違いも生じるものと考えられ、信

頼性を向上させるため、本試験では異なる2社で試験体を製作した。

塗装膜厚計測は一部の試験体で行った。塗装面の膜厚測定は、電磁誘導式膜厚計(LM-100)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。計測は、試験体番号順に、3体に1体の割合で測定した。

膜厚測定結果を表-1に示す。各試験体の膜厚は77.1~87.8μmであり、ばらつきは少なく、目標の75μmに対し2~12μm高い値であった。

(3) 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、すべり試験体に対しては設計ボルト軸力の115%を目標に締付けた。リラク試験体では、導入軸力の影響を前報³⁾(113~121%)と併せて考察することを考慮し、前報より低い通常の110%で締付けた。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) ボルト軸力の計測

すべり耐力およびリラクセーションの評価を行うため、ボルト軸力を計測した。ボルト軸力の計測に際し、C, D試験体において、それぞれ3本のボルトを用いてキャリブレーションを行った上で、ボルト軸力の計測を行った。計測は、すべり側(すべらせる側)のすべてのボルトに対して実施し、ボルト軸部に2枚のゲージを貼付し、ボルト軸力を算出した。

図-2 リラクセーションによる軸力残存率と経過時間との関係

図-3 軸力低下値と設計軸力比率との関係

図-4 軸力残存率と設計軸力比率との関係

表-3 相関係数の集計結果

	軸力低下値と設計軸力比率の相関係数	残存軸力率と設計軸力比率との相関係数
A試験体	0.391	0.289
B試験体	0.403	0.104
C試験体	0.303	0.181
D試験体	0.116	0.034

注) A試験体およびB試験体は前報³⁾での試験結果

写真-1 リラクセーション試験状況

3. リラクセーション試験

(1) 試験方法

リラクセーション試験は、リラク試験体（CR1～CR9, DR1～DR9）のすべり側のボルトで行った。計測は18試験体、36本のボルトとし、計測期間は432時間（18日）、計測間隔は3, 5, 10, 30分, 1, 3, 6, 12, 24時間、その後1日毎に測定した。試験はボルト製造会社の室内試験場で行った。なお、リラクセーション試験後、これらの試験体もすべり耐力試験に供した。

(2) 導入軸力計測結果

表-2に締付け直後（約1分後）の導入軸力および432時間後の残存軸力計測結果を示す。導入軸力は、設計ボルト軸力の110～114%が導入された。C試験体の平均値は111%, D試験体は112%と大きな違いはなかった。

(3) リラクセーション試験結果

試験状況を写真-1に示し、リラクセーション試験

結果を図-2(a), (b)に示す。図の縦軸は、計測軸力を導入軸力で無次元化した軸力残存率であり、横軸は時間を対数で示した。図中には対数で近似した時間に対する軸力残存率の回帰直線を示した。また、図-2(c)は、前報³⁾の試験結果と前報で調査したリラクセーション試験の文献データを示し、回帰直線は、前報の試験データ（15%増し締め）と文献データ（10%増し締め）を分けて示した。文献データおよび調査条件等については、前報を参照されたい。なお、図-2(c)に示すように、720 時間後の回帰直線（前報データ）と10000 時間の回帰直線（文献データ）の傾きはほぼ一致しており、前報と同様、10000 時間まで回帰直線を示しても問題ないと判断した。

図-2(a)(b)において、締付け直後の軸力低下が著しく、導入時から30分後にはC, D試験体ともに95～97%に低下し、平均値はそれぞれ95.8%, 97.2%となった。その後も軸力は低下し、24時間後にはそれぞれ92.8%, 93.6%まで低下した。その後は、緩やかに低下し、432時間後にはC, D試験体でそれぞれ90.7%, 91.2%まで低

表-4 導入軸力計測およびすべり耐力試験結果

試験体分類	C試験体									D試験体								
	試験体名	締付け後: N_a (導入軸力)		試験直前: N_b (残存軸力)		軸力 残存率 [%]	すべり 荷重 P [kN]	すべり係数		試験体名	締付け後: N_a (導入軸力)		試験直前: N_b (残存軸力)		軸力 残存率 [%]	すべり 荷重 P [kN]	すべり係数	
		軸力 [kN]	比率 (%)	軸力 [kN]	比率 (%)			μ_s	μ_b		軸力 [kN]	比率 (%)	軸力 [kN]	比率 (%)			μ_s	μ_b
すべり試験体	C1	234	114.1	218	106.3	93.16	490	0.598	0.562	D1	234	114.1	219	106.8	93.59	556	0.678	0.635
	C2	235	114.6	219	106.8	93.19	487	0.594	0.556	D2	232	113.2	218	106.3	93.97	556	0.678	0.638
	C3	236	115.1	220	107.3	93.22	496	0.605	0.564	D3	233	113.7	219	106.8	93.99	569	0.694	0.650
	C4	236	115.1	218	106.3	92.37	504	0.615	0.578	D4	233	113.7	216	105.4	92.70	568	0.693	0.657
	C5	236	115.1	217	105.9	91.95	503	0.613	0.579	D5	233	113.7	215	104.9	92.27	539	0.657	0.627
	C6	232	113.2	215	104.9	92.67	496	0.605	0.577	D6	235	114.6	218	106.3	92.77	542	0.661	0.622
	C7	229	111.7	217	105.9	94.76	465	0.567	0.536	D7	238	116.1	220	107.3	92.44	538	0.656	0.611
	C8	236	115.1	216	105.4	91.53	510	0.622	0.590	D8	237	115.6	219	106.8	92.41	535	0.652	0.611
	C9	236	115.1	215	104.9	91.10	498	0.607	0.579	D9	236	115.1	217	105.9	91.95	567	0.691	0.653
	C10	231	112.7	213	103.9	92.21	487	0.594	0.572	D10	231	112.7	216	105.4	93.51	546	0.666	0.632
	C11	234	114.1	216	105.4	92.31	473	0.577	0.547	D11	233	113.7	214	104.4	91.85	530	0.646	0.619
	C12	237	115.6	221	107.8	93.25	478	0.583	0.541	D12	236	115.1	218	106.3	92.37	536	0.654	0.615
	C13	232	113.2	212	103.4	91.38	469	0.572	0.553	D13	237	115.6	218	106.3	91.98	546	0.666	0.626
	C14	239	116.6	219	106.8	91.63	482	0.588	0.550	D14	238	116.1	224	109.3	94.12	540	0.659	0.603
	C15	229	111.7	215	104.9	93.89	469	0.572	0.545	D15	235	114.6	222	108.3	94.47	538	0.656	0.606
平均	234.1	114.2	216.7	105.7	92.57	487.1	0.594	0.562	平均	234.7	114.5	218.2	106.4	92.96	547.1	0.667	0.627	
リラク試験体	CR1	226	110.4	206	100.2	90.77	472	0.576	0.574	DR1	233	113.6	211	102.8	90.47	536	0.654	0.636
	CR2	229	111.7	209	101.9	91.26	471	0.574	0.564	DR2	232	113.1	211	103.1	91.16	542	0.661	0.641
	CR3	228	111.2	206	100.5	90.39	474	0.578	0.575	DR3	232	113.2	212	103.5	91.42	546	0.666	0.644
	CR4	226	110.3	205	100.1	90.76	493	0.601	0.601	DR4	232	113.3	212	103.5	91.39	535	0.652	0.630
	CR5	228	111.4	205	100.1	89.88	490	0.598	0.597	DR5	225	109.6	206	100.3	91.54	567	0.691	0.689
	CR6	229	111.6	207	101.1	90.60	469	0.572	0.566	DR6	230	112.0	211	102.7	91.72	527	0.643	0.626
	CR7	229	111.9	209	102.0	91.11	457	0.557	0.547	DR7	229	111.6	208	101.7	91.08	524	0.639	0.629
	CR8	226	110.4	207	100.7	91.25	461	0.562	0.558	DR8	228	111.3	209	101.8	91.41	521	0.635	0.624
	CR9	229	111.8	207	101.1	90.45	465	0.567	0.561	DR9	230	112.1	208	101.7	90.65	513	0.626	0.615
	平均	230.4	111.2	210.7	100.9	90.72	472.4	0.576	0.571	平均	232.2	112.2	213.5	102.3	91.20	534.6	0.652	0.637

 N_b : すべり試験体は24時間後の軸力, リラク試験体は432時間後の軸力 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

下した. 10000時間後(約1年後)の推定値はそれぞれ 87.1%, 87.8%であり, 回帰直線や標準偏差において, C,D試験体で大きな違いは見られなかった.

図-2(c)の文献データにはばらつきが生じているが, 10000 時間後の推定値は 88.5%と本試験データの方が約 1%軸力低下が大きい, 大きな違いではなかった.

(4) 導入軸力がリラクセーションに及ぼす影響の考察

図-3 は, 横軸に導入軸力を設計ボルト軸力で除して求めた設計軸力比率を, 縦軸は軸力低下値を示した. また, 図中には前報の A, B 試験体の結果も示した. 図に示すように, 各試験体間でばらつきが生じており, 導入軸力の違いによる明確な傾向は見られなかった. 無機ジンクでばらつきが生じる要因として, 塗装材料, 乾燥時間, ボルト長(ボルト締付けによる接触面クリープの単位ボルト長さ当たりの違いによる影響)あるいは施工差(膜厚, プラスト作業, 塗料調合作業等)が考えられる. そこで, これらの影響が少ない各試験体の範囲内における回帰直線を図中に示し, その相関係数を表-3 に示した. 回帰直線は何れも右肩上がりであり, 相関係数も D 試験体を除けば 0.3 を超え, 弱い相関は認められた. これは締付け軸力が高くなることにより, 塗装面のクリープが大きくなることで, 軸力低下も大きくなったものと考えられる.

図-4 は, 縦軸に軸力残存率で示すが, 回帰直線の傾きは小さく, 相関係数においても 0.2 を超えたのは

A 試験体のみであった. これは, 軸力残存率の計算上(1-軸力低下値/導入軸力), 分子の軸力低下値が大きくても分母の導入軸力が大きくなったことで, 軸力残存率と導入軸力の相関はほとんど見られない結果になったものと考えられる.

4. すべり耐力試験

(1) すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験において, すべり試験体に対しては, ボルト締付け24時間後に実施した. また, リラク試験体に対しては, リラクセーション試験後(432時間後)に実施した. 試験には載荷能力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, 試験体のすべりが生じるまで引張荷重を徐々に加えた.

すべり耐力は, 継手部がすべった時に大きな音が発生し荷重が下がるか, または音が発生しなくても, 荷重が急激に下がるか, あるいは下がらなくても開口変位が大きくなったとき(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.

(2) 導入軸力の計測結果

導入軸力計測およびすべり試験結果を表-4に示す.

すべり試験体の導入軸力は, 112%~117%であり, 平均すればC試験体で114.2%, D試験体で114.5%で

図-5 設計軸力比率とすべり係数との関係

表-5 すべり係数と設計軸力比率との相関係数の集計

	試験前の計測軸力での評価	設計ボルト軸力での評価
A試験体	0.008	0.206
B試験体	0.313	0.475
C試験体	0.137	0.407
D試験体	0.307	0.175

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

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

あった。24時間後の軸力残存率は、リラク試験体と同様にC,D試験体ともに約93%であった。リラク試験体(432時間後)の軸力残存率との差は約1.7%と小さく、24時間での軸力低下が支配的であることが判る。

(3) すべり耐力試験結果

載荷試験に関して、すべり荷重(P)はすべり発生時であり、その際のすべり状況は、その多くが大きなすべり音が発生し、変位が大きく目視で判断できるすべり状況であった。すべり係数は式(1)を用い、すべり試験直前の軸力(N_b)で算出した μ_b 、設計ボルト軸力(N_s ;205kN)で算出した μ_s を表-4に示した。

C,D試験体において、すべり係数(μ_b)は0.53を超え、その範囲は0.536~0.689と設計すべり係数0.45より遥かに高い結果であった。C,D試験体の平均値は、それぞれ0.56, 0.63と、D試験体の方が0.07高かった。塗装の施工条件は両者同じであり、各社のブラスト作業および塗料調合作業等による違いが生じたものと考えられる。また、すべり試験体とリラク試験体を比較すると、有意な差とは必ずしも言えないが、C, D試験体ともにリラク試験体の方が0.01大きかった。

(4) 導入軸力が継手耐力に及ぼす影響の考察

図-5は、横軸に設計軸力比率、縦軸はすべり係数で示し、図-5(a)は μ_b 、図-5(b)は μ_s で示した。また、図-3,4と同様に図中には前報のデータおよび各試験体の回帰直線を示すが、試験体DR5(設計軸力比率:109.6%)は、最も導入軸力が低い、すべり係数 μ_b は最も高くなるという特異な結果であった。その原因は不明であるが、特異なデータを用いて統計処理を行うことは不適切な結果となる恐れが生じるので、回帰直線はこのデータを除いて示し、その相関係数を表-5に示した。なお、C, D試験体のすべり試験体のみ24時間後に試験を行ったものである。軸力導入時からの時間の影響を

μ_b ではボルト軸力で考慮できるが、 μ_s ではこの影響を考慮できない。このため、その他の試験体と一律に比較できない。そこで、24時間後から432時間後の間の軸力低下はばらつきが少なく、また4.(2)で示したようにその間に一律に1.7%軸力が低下し、これに比例してすべり荷重が1.7%低下するものと仮定し、図-5(b)ではすべり試験体の μ_s を補正して示した。

図-5(a)に示すように、すべり係数 μ_b は各試験体間でばらつきが生じており、導入軸力の違いによる明確な傾向は見られなかった。C試験体とD試験体ではすべり係数の差異が大きかったが、A, B, C試験体ではばらつきはあるものの、すべり係数は同等であると言える、D試験体の分布状態が高かったと言える。回帰直線はA試験体を除けば、右肩下がりであり、相関係数もB,D試験体では0.3を超え、弱い相関は認められた。B,C,D試験体の回帰直線を用いて推定すれば、5%導入軸力が高くなれば、すべり係数 μ_b は平均すれば約0.01小さくなった。これは、無機ジंकのすべりは一般に塗膜内で起こり、軸力が高くなれば塗膜のクリープが大きくなったことによる影響と推測される。なお、4.(3)においてリラク試験体より導入軸力が高いすべり試験体の方が μ_b は0.01小さかったが、これは本節の導入軸力が高くなればすべり係数が低くなる傾向と概ね一致した。ただし、無機ジंकではすべり係数は高く、継手耐力への影響はほとんどないと考えられる。

図-5(b)に示すすべり係数 μ_s では、導入軸力が高くなれば μ_s は大きくなり、いずれの試験体でも右肩上がりで、特にB, C試験体では相関係数は0.4を超えた。すなわち、実用上のボルト継手では、導入軸力が高くなれば、当然であるが、すべり荷重が大きくなり、継手耐力も高くなる。ただし、図-5(a)で示したように、導入軸力が高ければすべり係数 μ_b が若干低くなるので、軸力増加量に比例して継手耐力が上昇するとは言えないと考えられる。

5. 結 論

本報告は、15%増し締めボルト施工の信頼性を向上させることを目的に行った実験的研究である。本実験結果から得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) すべり耐力試験結果から、すべり係数 μ_b は C 試験体で 0.57, D 試験体で 0.63 と同じ施工条件で行っても施工会社が異なれば、すべり係数 μ_b に違いが生じた。C 試験体では前報³⁾と同等のすべり耐力を有し、D 試験体ではより高いすべり耐力であった。
- (2) リラクセーション試験結果から、432 時間後の軸力低下率は C, D 試験体ともに約 9%で、前報との差は約 1%と大きな違いは見られなかった。1 年後の低下率推定値は約 12%となり、無機ジンクの軸力低下は大きいことが再確認できた。
- (3) 同じ塗装の施工条件であっても、施工会社が異なれば、リラクセーションによる軸力低下やすべり耐力に若干の違いが生じたこともあり、これらの結果と導入軸力との相関関係は明確にならなかった。
- (4) 施工条件の影響が少ない同じ施工会社で行った同一試験体の範囲内であれば、導入軸力が高くなれば、リラクセーションによる軸力低下も大きくなる弱い相関は認められた。ただし、その程度は低かった。
- (5) 同一試験体の範囲内であれば、導入軸力が高くなれば、すべり係数 μ_b は小さくなる弱い相関は一部認められた。回帰直線で推定すると、5%導入軸力が高くなればすべり係数 μ_b は約 0.01 小さくなるが、その程度は低く、さらに、導入軸力が高いので実用上の継手耐力 (μ_s) は逆に高くなった。
- (6) 本研究では、導入軸力が継手耐力に及ぼす影響を前報の結果と併せて考察したが、その影響は小さかった。また、無機ジンクを施した継手は高いすべり耐力を有し、15%増し締めボルト施工を適用しても実用上（実施工上）問題ないことが再確認できた。

6. おわりに

本研究では、前報³⁾とは異なる塗装会社の無機ジンク塗料および異なる施工会社で製作した試験体を用いて、すべり耐力試験およびリラクセーション試験を行い、前報と同等の結果が得られ、15%増し締め施工の安全性・信頼性は再検証できたと考えている。ただし、ここでは現行の 10%増しでは安全性は確保できないことを言っている訳ではない。これは、実際のすべり係数は設計すべり係数より高く、その多くが 0.50 を超え、さらに安全率もあるからである。

これまで設計すべり係数は 0.40 で行っていたが、平成 24 年の道示の改訂により無機ジンクの設計すべり係数は 0.45 となり、継手性能に応じた設計すべり係数が適用された。ただし、安全に関する余裕代は少なくなったのも事実である。さらに、実施工においては、拡大孔や肌隙、あるいはリーマーによる孔繰り、さらには現場での接触面の品質管理が十分でない場合もあり、実すべり係数は試験データと必ずしも一致するものではない。このため、15%増しの導入軸力により、継手の安全性・信頼性を向上させることは重要であると考えている。

性能設計が進む中で、無機ジンクのすべり性能に応じた設計（設計すべり係数 0.45 の適用）が適用された。同様に、無機ジンクの軸力低下性能に応じた施工を検討することも重要であると著者は考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-II 鋼橋編，2012.3.
- 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) 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.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2005.8.

(2017. 6. 20 受付)

A STUDY ON INFLUENCE OF BOLT AXIAL FORCE ON HIGH STRENGTH BOLTED JOINTS TREATED WITH ZINC-RICH PAINT

Kuniaki MINAMI

It is known that high strength bolted joints treated with zinc-rich paint have a characteristic of large bolt axial force loss by relaxation. In this study, the friction type of high strength bolted connection specimens were made on steel plates, in which contact surfaces have inorganic zinc-rich paint, then slip tests were carried out on these specimens under 15%-additional bolt axial force.