金属溶射を施したフィラープレートに有する 高力ボルト摩擦接合継手に関する研究

南 邦明¹・横山 秀喜²・斉藤 雅充³・村上 貴紀⁴

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: minami.kun-e27b@jrtr.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: yokoyama.hid-22t3@jrtr.go.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国立市光町2-8-38)
E-mail: saito.masamichi.96@rtri.or.jp

⁴正会員 宮地エンジニアリング 技術研究所 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3)
E-mail: murakami.takanori@miyaji-eng.co.jp

本論文は、金属溶射を施したフィラープレートに有する高力ボルト摩擦接合継手に関する研究である。本研究では、同継手における適切なボルト軸力が期待できるナット回転量およびそのすべり耐力を明確にすることを目的に実施した実験的研究である。本実験では、金属溶射を施した試験体を用いて、導入軸力試験およびリラクセーション試験を行い、リラクセーション後も設計ボルト軸力を満足するナット回転量を設定した。次に、設定したナット回転量ですべり耐力試験体を作成し、リラクセーション試験およびすべり耐力試験を実施し、同継手における適切なボルト軸力が期待できるナット回転量を提案した。

Key Words : thermal spray, slip coefficient, high strength bolt, bolted connection, nut rotation method

1. はじめに

長期耐久性を実現させる防食法として、金属溶射がある。金属溶射には様々な種類の溶射金属や溶射方法があるが、鋼橋の建設工事で一般に使用する金属溶射には、亜鉛アルミ合金溶射（以下、擬合金）あるいは亜鉛アルミ合金溶射（以下、合金）等がある。これらの溶射を施した部材において、高力ボルト摩擦接合継手を用いる場合、摩擦面は図-1に示す処理が行われる。また、高力ボルトは溶融亜鉛めっきボルトF8T（以下、めっきボルト）を使用し、ボルトの締付け作業は、ナット回転法を用いる。

道路橋示方書¹⁾および鉄道構造物等設計標準²⁾では、ナット回転法を用いる場合、ナット回転量は 120° ($L \leq 5d$ (L : ボルト長さ, d : ボルト径))を規定している。これはめっき面を対象とした規定であり、溶射面にナット回転量 120° で締付けた場合、ボルトねじ部は降伏域に入り、また、導入軸力も高くなることから、著者らは表-1に示すナット回転量であれば降伏域に入らず、リラクセーション後も設計ボルト軸力を満たす軸力となることを示した³⁾⁶⁾。これらの研究では、図-1に

表-1 金属溶射におけるナット回転量(θ)

$L \leq 5d$	$5d < L \leq 6.3d$ (M22は $6.4d$)	$L > 6.3d$ (M22は $6.4d$)
90°	100°	試験により決定

L : ボルト長さ, d : ボルト径 (公称軸径)

図-1 各溶射法によるボルト摩擦面の作業手順

示すように、溶射法により摩擦面の処理方法は異なるが、擬合金³⁾⁴⁾⁵⁾および合金⁶⁾、両溶射法ともに表-1は適用できることを示した。ただし、これらの研究は、一般的な2面摩擦の継手（複せん断継手）であり、フィラープレート（以下、フィラー）を有する場合でも表-1が適用できるのかは不明であった。

表-2 使用鋼材の機械的性質および化学成分I (導入軸力試験)

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	
SM490Y	6	378	542	27	0.17	0.44	1.46	0.013	0.004	A1,B1,C1,D1のフィラー
	10	416	545	26	0.16	0.29	1.36	0.013	0.004	A2,C2のフィラー
	12	434	565	25	0.16	0.27	1.39	0.022	0.005	A1,B1,C1,D1の添接板, A3,B3,C3,B2,D2,D3のフィラー
	16	420	543	26	0.16	0.28	1.40	0.013	0.004	A2,B2,C2,D2の添接板
	19	446	565	28	0.16	0.32	1.42	0.014	0.003	A1,B1,C1,D1の母板
	25	451	560	23	0.17	0.30	1.38	0.008	0.003	A3,C3の添接板
	28	412	546	25	0.17	0.28	1.37	0.020	0.005	A2,B2,C2,D2の母板, B3,D3の添接板
	38	410	551	28	0.16	0.31	1.40	0.011	0.002	A3,B3,C3,D3の母板

表-3 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値I (導入軸力試験)

ボルト (等級 (径))	首下 長さ (mm)	有効 断面積 (mm ²)	ボルト								トルク 係数値 (平均値)
			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)	
F8T M22	90	303	824	870	23	74	268	26	26	32	0.120
	110		825	871	21	74	268	25	26	29	0.126
	140		860	902	21	69	278	26	26	29	0.141
F8T M24	95	353	801	860	22	72	303	24	24	30	0.119
	120		789	846	24	71	310	25	26	29	0.127
	150		826	876	23	69	315	27	27	30	0.135

図-2 試験体形状I (導入軸力試験)

著者らは、フィラーを有するボルト継手に関して、無機ジンクリッチペイントを施したボルト継手について検討したが、リラクセーションによる軸力低下は、一般の2面摩擦継手より大きいことを示した^{7,8)}。また、これまで、金属溶射を施したボルト継手の研究は、著者ら以外でも行われてきたが^{9,10)}、フィラーを有する金属溶射を施したボルト継手のナット回転量と導入軸力に関する検討は行われてこなかった。

本研究は、金属溶射を施したフィラーを有するボルト継手における適切なボルト軸力が期待できるナット回転量および同継手のすべり耐力を明確にすることを目的に実施した実験的研究である。本実験では、金属溶射を施した試験体を用いて、導入軸力試験およびリラクセーション試験を行い、リラクセーション後も設計ボルト軸力が満足できるナット回転量を設定した。そして、設定した回転量を用いてすべり耐力試験体を作成し、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上で、金属溶射を施したフィラーを有するボルト継手のナット回転量を提案した。

2. 導入軸力試験及びリラクセーション試験方法

(1) 試験体の使用材料および形状・寸法

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-2, 3に示す。試験体の母板および添接板には板厚6~38mmのSM490Yを使用した。使用ボルトは、めっきボルトのF8T(M22, M24)とし、ボルト長は90~150mmを用いた。

図-2に試験体形状を示す。試験体は、M22用(T1)と

M24用(T2)の2形状を使用し、ボルト長により適用板厚を選定した。また、孔径は、各試験体ともに標準孔を用いた。ボルトピッチ(P)や縁端距離(e)は、標準試験片¹¹⁾を参考に決定した。

(2) 試験体の種類

試験体の種類を表-4に示す。試験体のパラメータは、ボルト径、ボルト長およびナット回転量とした。M22およびM24において各3ボルト長、合わせて6種類のボルトを用いた。これらのボルトに対し、ナット回転量を75, 90, 120°の3角度で締付けることとした。試験体数は各ケースで1体製作し、18体を試験に供した。

溶射作業は、図-1(a)に示すように、素地調整を行った後に、粗面形成剤（エポキシ樹脂）を塗布し、亜鉛（JIS H 2107）とアルミ（JIS H 2102）の合金を用い、母板、添接板およびフィラーの表裏全面に、設計（最小）膜厚100μmで擬合金の溶射を行った。なお、図-1(a)では封孔有としているが、前報⁶⁾で示したように、封孔処理を行わなくても適切な管理を行えば防錆上の問題はなく、またすべり係数も高く、さらに封孔処理の有無による軸力低下の影響もないことなどから、本試験でも封孔処理を行わなかった。

(3) 溶射膜厚測定

溶射面の膜厚測定は、電磁膜厚計（Pro-2：サンコウ電子研究所）を用いて行った。測定位置は、図-3に示すようにボルト孔周辺とし、測定数は、1つのボルト孔に対し4ヶ所とし、母板、添接板およびフィラーの6接触面、合わせて試験体1体あたり計72点測定した。膜厚測定結果を表-5に示す。これらは各ボルト孔の

表-4 試験体の種類I (導入軸力試験)

試験 体名	板厚(mm)			試験体 形状	ボルト サイズ	ボルト締付け	
	母板 (<i>t</i>)	添接板 (<i>ts</i>)	フィラー (<i>tf</i>)			1次締め	本締め
A1-1	19	12	6	T1	M22×90 (4.1 <i>d</i>)	150 N・m	75°
A1-2							90°
A1-3							120°
A2-1	28	16	10		M22×110 (5.0 <i>d</i>)		75°
A2-2							90°
A2-3							120°
A3-1	38	25	12		M22×140 (6.4 <i>d</i>)		75°
A3-2							90°
A3-3							120°
B1-1	19	12	6	T2	M24×95 (4.0 <i>d</i>)	200 N・m	75°
B1-2							90°
B1-3							120°
B2-1	28	16	12		M24×120 (5.0 <i>d</i>)		75°
B2-2							90°
B2-3							120°
B3-1	38	28	12		M24×150 (6.3 <i>d</i>)		75°
B3-2							90°
B3-3							120°

表-5 膜厚計測結果

試験体名	溶射膜厚[μm]			
	No.1	No.2	No.3	平均
A1-1	163.1	163.9	165.4	164.1
A1-2	174.0	171.0	174.5	173.2
A1-3	164.9	163.2	165.5	164.5
A2-1	163.9	159.5	160.3	161.2
A2-2	175.8	169.3	177.0	174.0
A2-3	170.6	164.9	172.3	169.3
A3-1	168.2	166.9	168.0	167.7
A3-2	157.8	153.9	160.0	157.2
A3-3	160.6	156.5	162.1	159.7
B1-1	152.0	150.8	149.7	150.8
B1-2	155.3	150.0	153.6	153.0
B1-3	155.1	150.0	160.2	155.1
B2-1	143.2	142.1	147.6	144.3
B2-2	144.4	142.6	147.0	144.7
B2-3	148.3	142.8	141.7	144.3
B3-1	148.5	149.7	152.3	150.2
B3-2	152.4	155.3	152.3	153.3
B3-3	147.9	149.9	155.3	151.0

図-3 膜厚計測位置

図-4 ひずみゲージの取り付け

写真-1 ボルト締付け状況

図-5 導入軸力試験のフロー

6面の平均値を示している。溶射膜厚は144～174μmであり、最大と最小で30μmの違いが生じていた。また、擬合金の溶射である文献3), 4), 5)では、150～160μm程度であり、概ね同程度であった。なお、これらは粗面形成剤（非常に薄い）も含めた膜厚である。

(4) ボルト軸力の計測

導入軸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、ボルト軸力の計測に際し、表-3に示す6種のボルトそれぞれに対し、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（表-6参照）。

軸力の計測はすべてのボルトに対して実施し、ボルト軸部に図-4に示すように、2枚のゲージ（FLA-5-11-5LJCT）を貼付し、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。

(5) 導入軸力試験方法およびボルトの締付け作業

導入軸力試験において用いたナット回転法によるボ

ルトの締付け手順を図-5に示す。作業は、一次締めおよびマーキング後、トルクレンチにて本締めを行った。

導入軸力試験では、各試験体の No.1 ボルトについては、回転量を 30°ごとにボルト軸力を計測した。一方、No.2, 3 ボルトでは、所定の角度の軸力のみ計測した。これら両者の結果より、導入軸力と回転量の関係を定量的に評価することとした。締付け作業は、ボルト No.1, 2, 3 の順に締付けた。

(6) リラクセーション試験方法

リラクセーション試験は、表-4で示した18ケースであり、合わせて54本のボルトとし、計測期間は720時間(30日)とした。これは、720時間あれば概ね軸力は安定すると考えられるからである^{7),8)}。

3. 導入軸力試験及びリラクセーション試験結果

(1) 導入軸力試験の計測結果

導入軸力計測結果を表-6に示す。また、ナット回転量と導入軸力（一般に締付け 30 秒～60 秒後を導入時と定義しているケースが多いが、ここでは導入軸力直後の影響をできる限り小さくさせるため、回転直後から約 30 秒後の軸力とした）の関係を図-6に示す。

表-6 導入軸力試験の計測結果の一覧

試験体名		ボルト長L [換算率]	回転 量 (°)	初期導入軸力 (kN)										リラクゼーション(720h)後の軸力 (kN)					
				No.1ボルト (N-θ)						No.2 ボルト	No.3 ボルト	平均値	設計値 比率(%)	No.1 ボルト	No.2 ボルト	No.3 ボルト	平均値	設計値 比率(%)	
				0°	30°	60°	75°	90°	120°										
M22	A1-1	L90 (4.1d) {0.0743}	75	58.8	80.8	166.5	183.1	-	-	177.5	197.4	186.0	112.7	152.5	141.5	158.7	150.9	91.5	
	A1-2		90	52.6	101.5	158.4	-	206.0	-	212.4	198.6	205.7	124.6	167.1	170.3	160.4	165.9	100.6	
	A1-3		120	62.3	113.5	173.0	-	230.7	240.4	221.1	229.6	230.4	139.6	201.3	179.9	189.3	190.2	115.3	
	A2-1	L110 (5.0d) {0.0737}	75	47.2	83.8	131.2	151.7	-	-	170.3	171.0	164.3	99.6	122.7	140.9	141.3	135.0	81.8	
	A2-2		90	50.6	97.8	146.6	-	189.0	-	200.5	189.4	193.0	116.9	157.1	167.6	156.1	160.3	97.1	
	A2-3		120	56.1	107.3	159.6	-	210.6	229.7	223.6	225.6	226.3	137.2	195.5	189.6	191.5	192.2	116.5	
	A3-1	L140 (6.4d) {0.0716}	75	57.9	99.5	146.5	159.2	-	-	155.2	166.7	160.4	97.2	136.3	126.9	141.9	135.0	81.8	
	A3-2		90	53.5	89.3	133.0	-	175.8	-	186.9	182.1	181.6	110.1	144.6	159.4	157.9	154.0	93.3	
	A3-3		120	50.7	96.4	141.4	-	188.8	228.6	217.6	224.9	223.7	135.6	198.5	181.8	198.1	192.8	116.8	
M24	B1-1	L95 (4.0d) {0.0950}	75	69.0	141.7	196.2	255.9	-	-	248.0	251.9	251.9	131.2	216.9	207.7	209.9	211.5	109.6	
	B1-2		90	77.2	145.0	232.6	-	260.6	-	259.7	251.0	257.1	133.9	218.8	221.0	210.8	216.9	112.4	
	B1-3		120	75.7	127.8	216.5	-	261.7	268.5	275.2	272.4	272.0	141.7	227.5	236.0	229.9	231.1	119.8	
	B2-1	L120 (5.0d) {0.0973}	75	65.5	126.7	205.9	235.5	-	-	251.0	250.1	245.5	127.9	198.7	212.0	211.3	207.3	107.4	
	B2-2		90	68.5	123.2	251.3	-	248.4	-	277.5	262.9	262.9	136.9	205.9	234.6	225.3	221.9	115.0	
	B2-3		120	60.5	120.2	206.9	-	267.3	277.2	261.4	272.3	270.3	140.8	236.4	223.7	235.7	231.9	120.2	
	B3-1	L150 (6.3d) {0.0958}	75	68.4	123.9	216.5	224.9	-	-	232.9	237.8	231.9	120.8	191.7	201.0	203.0	198.6	102.9	
	B3-2		90	72.5	128.2	195.8	-	282.1	-	264.6	262.2	269.6	140.4	257.2	229.6	225.2	237.3	123.0	
	B3-3		120	74.9	136.8	203.9	-	260.0	275.8	276.3	276.3	276.1	143.8	237.7	240.6	240.9	239.7	124.2	

注) L: ボルト長, d: ボルト径, {} は2.4)で述べたキャブレション試験結果で得られた換算率。

図-6 導入軸力試験結果

図-7 既存の試験結果^{3),6)}

図中の実線は、最小二乗法を用いて求めたナット回転角に対する導入軸力の回帰曲線を3次の多項式で示している。また、比較のため、図-7には著者らが以前に行った擬合金³⁾および合金⁶⁾の導入軸力試験結果を示している。なお、既往の結果^{3),6)}において、3次の多項式が最もよい相関が得られたので、本試験結果も同様、3次式で示している。

図-6に示すように、ナット回転角の増加とともに、導入軸力は増加し、回転角75°で既に設計ボルト軸力を超えたケースもあり、回転角90°ではすべてのボルトで設計ボルト軸力(100%)を超え、各試験体の平均値はM22で110~125%にあり、M24では134~140%となった。さらに、120°ではすべてのボルトで130%を超え、M22では136~140%、M24では141~144%の軸力に達した。なお、回転角90°から120°では、角度による導入軸力の変化が小さく、ほとんど上昇していないケースもあった。これは90°を超えた場合、ボ

ルトねじ部は降伏域に達し(平行部は弾性域)、塑性変形が生じたからと考えられる。特にM24では、回帰直線のピークが105°前後に生じる結果となり、これは90°より120°の方が一部軸力が低くなった結果を反映したものと考えられる。

図-7の既往の結果と比較すると、M22では大きな違いはなく、またボルト長が短い方が導入軸力も高くなる傾向も同じであった。一方、M24ではL95やL120は大きな差はないが、L150は本試験の方が導入軸力は高く、また、本試験ではボルト長の影響が見られなかった。これは一次締めの影響(0°の軸力)であり、これについては6章で考察する。

以上のように、フィラーを有するボルト継手において、フィラーのない継手と同等な軸力が導入された。これは当然のことと言えるが、ナット回転法の導入軸力は、ボルト長(締め付け長さ)の影響はあるが、締め付け枚数(面数)の影響は生じないからである。

表-7 リラクセーション試験 (720時間) の計測結果の一覧

		720時間後の軸力残存率 [%]														
		擬合金溶射(フィラー付き)						擬合金溶射 ³⁾						合金溶射 ⁶⁾		
		M22			M24			M22			M24			M22	M24	
		L90	L110	L140	L95	L120	L150	L70	L105	L140	L75	L110	L145	L110	L120	L150
回転角	75°	81.13	82.08	84.17	83.95	84.44	85.64	85.16	88.29	87.43	87.13	86.27	87.54	86.90	87.62	87.22
	90°	80.69	83.04	84.75	84.35	84.38	87.94	86.61	87.85	91.43	87.15	88.42	88.69	86.34	89.37	88.73
	120°	82.52	84.93	86.15	84.96	85.81	86.82	86.09	88.93	91.26	87.47	88.39	90.43	87.71	89.91	89.85
平均値		81.45	83.35	85.02	84.42	84.88	86.80	85.95	88.36	90.04	87.25	87.69	88.89	86.98	88.97	88.60

図-8 回転角90°における導入軸力の集計結果

図-9 リラクセーション試験による残存軸力の結果

(2) 90°における導入軸力のデータ比較

フィラーのない金属溶射における標準ナット回転量90°での導入軸力計測結果を図-8に示す³⁾⁶⁾。ここでは、横軸にボルト長、縦軸にはボルト軸力で示している。また、図中の直線は、これら既往データから得られたボルト長さに対する導入軸力の回帰直線を示している。これらのデータの中に、本試験データをプロットし、フィラーの影響を比較することとした。なお、ボルト長が長くなれば導入軸力が小さくなるのは、ボルト長が長ければ、同じ回転量であっても単位長さ当たりに対する締付け長（回転による締付け長の減少量）の影響が小さくなるからである。

図-8(a)に示すM22において、本試験結果は、L140を除けば、ほぼ回帰直線上にあると判断できる。一方、図-8(b)に示すM24では、本試験結果は回帰直線より上部にあり、特にボルト長が長いL150では顕著であった。

(3) リラクセーション試験による軸力残存率の結果

リラクセーション試験結果として、測定した軸力を初期ボルト軸力で無次元化した軸力残存率を表-7に示す。ここでは比較のためフィラーのない既往の溶射データ³⁾⁶⁾も示している。また、図-9には横軸は経過時間、縦軸には軸力残存率の関係を示し、図中のデータは各試験体における3本の平均値を示している。

図-9に示すように、各試験体とも計測初期での軸

力低下が著しく、計測60分後には残存軸力がM22で90～92%、M24では92～94%まで減少し、24時間後にはM22、M24でそれぞれ86～90%、88～91%まで低下した。その後も軸力は低下するが、その傾きは緩やかであり、720時間後の軸力残存率は、M22で81～85%、M24では84～87%まで低下した。同じボルト径であっても軸力残存率に違いが生じたのは、ボルト長や回転角の違いであり、軸力残存率はボルト長が長ければ大きくなる傾向が示された。これは、ボルト締付けによる溶射塗膜のクリープの影響（押しつぶされる量）は、導入軸力とは逆に、ボルト長が短いと単位長さ当たりの締付け長の影響が大きくなるからである。

(4) リラクセーションの既往データとの比較

表-7には本試験の他、既往データも示したが、両者を比較すると、M22では約5%、M24では約3%本試験の方が軸力残存率は低く、フィラーの有無の影響が生じていることが判る。これは、ボルト1本が締付けける合計溶射膜厚の違いによって生じたものと考えられる。フィラーを有する場合には合計膜厚が厚くなり、これによりボルト締付けによるクリープが大きくなったことで、軸力低下も大きくなったものと考えられる。

比較のため一例として、図-10に5.0d (M22ではL110、M24ではL120)における本試験結果および既往データ³⁾⁶⁾を示す(文献3)のM22ではL105、M24で

は L110). 図中には最小二乗法で近似した時間 (対数で表示) に対する軸力残存率の回帰直線を示す.

図に示すように, 合金・擬合金あるいはボルト径に関わらず何れの表面処理状態においても, リラクセーションにばらつきが生じていた. ばらつきが生じる理由として, 溶射の膜厚, めっきボルト表面の凹凸あるいは施工誤差が考えられる.

既往の結果と比較すると, M22 では既往の擬合金と合金で若干の差はあるが, フィラー付きである本試験より両者ともに軸力残存率は高く, また, 回帰直線の傾きも本試験の方が若干大きいことが判る. 一方, M24 においては, 既往の擬合金と合金に違いはなく, 本試験データの軸力残存率は低いことが判る.

以上のように, フィラーを有するボルト継手において, フィラーのない継手より, リラクセーションによる軸力低下が大きく (M22 で約 5%, M24 で約 3%), また, ボルト長が短い方が軸力低下は大きくなる傾向が示された.

(5) すべり耐力試験に用いるナット回転量の設定

本節では, フィラーを有する金属溶射面の高力ボルト摩擦接合継手における適切なボルト軸力が期待できるナット回転量(θ)を考察し, 次章で行うすべり耐力試験でのナット回転量の設定を行う.

トルク法では, クリープやリラクセーションあるいはトルク係数値やすべり係数のばらつきなどを考慮し, 設計ボルト軸力の 110%で締付けられる. 実際には, トルシア型ボルトでは, 平均すれば 112%の軸力で締付けられるが, ばらつきが大きいのが現状である¹²⁾.

ナット回転法では, 道路橋示方書¹⁾や鉄道構造物等設計標準²⁾における回転角の基準は, $120 \pm 30^\circ (L \leq 5d)$, すなわち $90 \sim 150^\circ$ を締付け範囲としている. この

$\pm 30^\circ$ としているのは, 手締めで行った場合には, 締付け角度に誤差が生じることを考慮している. 表-1 で示した金属溶射の回転量は, $-5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ を管理標準とし提案したものである. これは, 現在ではナット回転法の専用レンチによる機械締めであれば精度よく締付けが可能だからである. ここでは, これらのことを考慮して, フィラーを有する溶射面のナット回転量を検討した. なお, ボルト長およびボルト径も考慮し, 締付けを細分化すると締付け管理が煩雑となり, 実施工では適用が困難になると考えられ, 細分化しないで回転量を検討した.

図-11 は, リラクセーションによる軸力低下も考慮した 30 日後のボルト軸力とナット回転量の関係を示す. 図中の直線は, 各ボルトにおける計測結果の平均値を示しており, 参考のため, 擬合金³⁾および合金⁶⁾の溶射の平均線も示している.

図-11(a)の M22 において, 75° ではいずれのボルトも設計ボルト軸力は満足せず, 90° でも設計ボルト軸力を満足したのは一部である. 120° では多くのボルトは 110%~120%の範囲にあり, 適切なナット回転量は 90° と 120° の間にある. 表-1 で示した文献 3), 6)データにおける 90° と同等な軸力が期待できる回転量は本試験では 105° と考えられ, その回転量であれば設計ボルト軸力の 105%~108%に収まると考えられる. そこで, 次章でのボルト締付けは 105° で行うこととした. なお, 表-1 では $5.0d$ を越えた場合では $+10^\circ$ としたが, 本試験結果ではボルト長の影響は少なかったもので, ボルト長に依らず 105° で締付けることとした.

図-11(b)の M24 では, フィラーのない継手と比較して大きな違いはなく, 90° でよいと思われる. これは, 文献 6)でも述べたが, M24 では 90° でも高め目の設定であり, フィラーを有する場合でも適用できるものと

表-8 使用鋼材の機械的性質および化学成分Ⅱ(固定側の母板)

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	
SM 490Y	25	451	560	23	0.17	0.30	1.38	0.008	0.003	C1,D1
	38	410	551	28	0.16	0.31	1.40	0.011	0.002	C2
	40	426	549	27	0.17	0.31	1.39	0.012	0.005	D2
	50	458	549	35	0.17	0.34	0.14	0.015	0.001	C3,D3

表-9 使用ボルトの機械的性質とトルク係数値Ⅱ(固定側)

ボルト (等級) (径)	首下 長さ (mm)	ボルト					ナット	座金	トルク 係数値 (平均値)	
		4号試験片				製品	製品	製品		
		降伏 強度	引張 強度	伸び (%)	絞り (%)	引張 荷重 (kN)	硬さ			
							(HRC)			
F10T M22	90	1041	1104	19	69	323	33	28	40	0.126
	110	1016	1088	18	69	329	32	28	39	0.126
	140	1018	1065	18	69	334	33	29	39	0.135
F10T M24	95	997	1064	18	67	372	32	27	39	0.128
	120	1014	1059	19	65	378	33	27	39	0.139
	150	1000	1050	19	66	376	33	26	40	0.140

図-12 試験体形状Ⅱ(すべり耐力試験)

表-10 試験体の種類Ⅱ(すべり耐力試験)

試験 体名	板厚(mm)				試験 体 形状	ボルト サイズ	ボルト締付け	
	母板 (t ₁)	母板 (t ₂)	添接板 (t _s)	フィラー (t _f)			1次 締め	本 締め
C1	25	19	12	6	T3	M22×90	150 N・m	105°
C2	38	28	16	10		M22×110		
C3	50	38	25	12		M22×140		
D1	25	19	12	6		M24×95		
D2	40	28	16	12	T4	M24×120	200 N・m	90°
D3	50	38	28	12		M24×150		

表-11 表面粗さおよび膜厚計測結果(すべり試験体)

試験 体名	表面粗さ[μm]						溶射膜厚[μm]		
	Ra			Rzjis			平均		
	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均	No.1	No.2	平均
C1-1	24.1	24.2	24.1	127.4	125.4	126.4	144.9	146.6	145.8
C1-2	24.9	24.1	24.5	126.8	128.5	127.7	144.1	144.6	144.4
C1-3	24.1	24.0	24.1	126.1	123.5	124.8	139.5	141.6	140.6
C2-1	24.4	24.6	24.5	126.2	127.7	127.0	145.8	148.0	146.9
C2-2	24.5	24.5	24.5	126.2	127.6	126.9	147.8	148.5	148.2
C2-3	22.9	23.7	23.3	124.2	126.7	125.5	141.1	142.7	141.9
C3-1	23.8	24.0	23.9	124.3	128.9	126.6	153.6	146.8	150.2
C3-2	24.4	23.8	24.1	129.2	124.9	127.1	145.6	146.9	146.3
C3-3	23.6	25.1	24.3	122.5	126.9	124.7	153.4	147.9	150.7
D1-1	24.0	24.4	24.2	128.3	126.8	127.6	146.1	147.3	146.7
D1-2	25.1	24.0	24.5	130.5	128.8	129.7	149.9	149.6	149.8
D1-3	25.0	23.1	24.0	133.6	124.2	128.9	145.7	145.4	145.6
D2-1	24.8	25.4	25.1	130.4	131.7	131.1	146.5	148.8	147.7
D2-2	24.0	25.8	24.9	123.9	134.9	129.4	145.2	143.9	144.6
D2-3	23.4	23.7	23.5	124.5	126.1	125.3	148.0	144.7	146.4
D3-1	24.0	24.6	24.3	125.7	128.2	127.0	144.2	147.8	146.0
D3-2	23.6	24.2	23.9	124.6	126.6	125.6	152.0	150.1	151.1
D3-3	25.1	24.2	24.6	130.3	129.5	129.9	149.2	149.8	149.5

図-13 表面粗さおよび膜厚の計測位置

思われる。また、M24 もボルト長の影響は少ないので、ボルト長に依らず 90°で締付けることとする。

なお、上記で設定した回転量については、次章でリラクセーション試験を再度行った上で、フィラーを有する継手のナット回転量を 6 章で再考察する。

4. すべり耐力試験の試験方法

(1) 試験体の形状・寸法および使用材料

すべり耐力試験の試験体形状を図-12に示す。試験体の孔径、ボルトピッチ(P)および縁端距離(e)は、2章と同じとした。試験体は、M22用(T3)とM24用(T4)の2形状を使用し、両者ともにすべり側と固定側を設定した。すべり側で使用した母板、添接板およびフィラーは表-2に示した鋼材であり、また、ボルトも表-3で示した同じものを用いた。一方、固定側については、その母板の鋼材の機械的性質を表-8に示し、また、使用ボルト長は、表-9に示すF10Tを用いた。

(2) 試験体の種類および摩擦面の表面処理

試験体の種類を表-10に示す。試験体は、M22、M24で各3種類、合わせて6種類とした。試験体数は、各ケースで3体製作し、合わせて18体を試験に供した。

表面粗さおよび膜厚の測定位置は、図-13に示す1孔につき4箇所とし、溶射作業直後に測定した。表面粗さは、表面粗さ計(ミツトヨ: SJ-310)を用いて、十点平均粗さ(Rzjis)および算術平均粗さ(Ra)を求めた。なお、膜厚の測定方法等については、2章と同様とした。

計測結果を表-11に示す。表面粗さ(Rzjis)は、125～131 μmの範囲にあり、ばらつきは小さかった。文献9)で示されているように、溶射面の表面粗さは70～180 μmの範囲にあり、粗さは溶射ガンと鋼材面との距離に依存することが示されているが、本試験体は一定の距離で施工されていたものと考えられる。同様に、算術平均粗さ(Ra)も24.0～25.1 μmの狭い範囲にあった。また、膜厚もばらつきは小さく、2章で示したリラク試験体と同等であった。

(3) ボルトの締付けおよびひずみ計測

ボルトの締付けは表-10に示すように、一次締め²⁾は、

表-12 ボルト軸力計測結果(すべり耐力試験)

試験体	ボルト軸力								軸力低下値 720時間後 [kN]				軸力残存率 720時間後 [%]			
	締付け直後 N_a [kN]				720時間後(30日後) 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	
	No.1	No.2			No.1	No.2			No.1	No.2			No.1	No.2		
C1-1	223.5	213.5	218.5	132.4	188.0	180.9	184.5	111.8	35.50	32.60	34.05		84.12	84.73	84.42	
C1-2	220.0	215.0	217.5	131.8	185.1	183.2	184.2	111.6	34.90	31.80	33.35	33.22	84.14	85.21	84.67	84.67
C1-3	217.5	210.6	214.1	129.7	183.6	180.0	181.8	110.2	33.90	30.60	32.25		84.41	85.47	84.93	
C2-1	206.7	211.5	209.1	126.7	170.7	175.0	172.9	104.8	36.00	36.50	36.25		82.58	82.74	82.66	
C2-2	190.8	203.7	197.3	119.5	161.7	173.8	167.8	101.7	29.10	29.90	29.50	31.73	84.75	85.32	85.04	84.63
C2-3	205.8	220.5	213.2	129.2	175.6	191.8	183.7	111.3	30.20	28.70	29.45		85.33	86.98	86.18	
C3-1	211.8	210.8	206.8	125.3	180.9	176.6	178.8	108.3	30.90	25.20	28.05		85.41	87.51	86.44	
C3-2	212.2	211.1	211.7	128.3	180.8	188.1	184.5	111.8	31.40	23.00	27.20	27.22	85.20	89.10	87.15	86.48
C3-3	188.2	185.4	186.8	113.2	159.0	161.8	160.4	97.2	29.20	23.60	26.40		84.48	87.27	85.87	
D1-1	249.7	239.0	244.4	127.3	210.7	199.5	205.1	106.8	39.00	39.50	39.25		84.38	83.47	83.94	
D1-2	244.3	241.4	242.9	126.5	203.8	202.8	203.3	105.9	40.50	38.60	39.55	38.95	83.42	84.01	83.71	83.98
D1-3	246.4	238.3	242.4	126.2	207.7	200.9	204.3	106.4	38.70	37.40	38.05		84.29	84.31	84.30	
D2-1	248.7	248.0	248.4	129.3	210.2	210.8	210.5	109.6	38.50	37.20	37.85		84.52	85.00	84.76	
D2-2	229.0	245.9	237.5	123.7	192.2	209.1	200.7	104.5	36.80	36.80	36.80	37.75	83.93	85.03	84.50	84.31
D2-3	230.8	241.7	236.3	123.0	194.2	201.1	197.7	102.9	36.60	40.60	38.60		84.14	83.20	83.66	
D3-1	232.7	234.6	233.7	121.7	194.3	201.5	197.9	103.1	38.40	33.10	35.75		83.50	85.89	84.70	
D3-2	242.9	234.0	238.5	124.2	206.0	202.5	204.3	106.4	36.90	31.50	34.20	36.28	84.81	86.54	85.66	84.27
D3-3	238.3	205.1	221.7	115.5	201.6	164.0	182.8	95.2	36.70	41.10	38.90		84.60	79.96	82.45

図-14 回転角90°における導入軸力の集計結果

図-15 720時間後の残存軸力率と溶射膜厚との関係

M22は150N・m, M24は200N・mでトルクレンチで締付け, 本締めは3章で設定したナット回転角(M22は105°, M24は90°)を回転角専用レンチで締付けた。

設定したナット回転角を再検証するため, すべり耐力試験においても, ボルト軸力(導入時と720時間後)を計測した。ひずみゲージ取付け位置や計測方法等は, 2章と同様とし, 計測したボルトは, 1つの試験体ですべり側の2本(すべてのめっきボルト)とした。

(4) すべり耐力試験の方法

すべり耐力試験は, ボルト締付けから720時間以降に実施した。試験には載荷能力2000kNの万能試験機RUE-2000kNを用いた。本試験では, 試験体両端部をチャックで固定し, 載荷速度20~25kN/sで試験体のすべりが生じるまで引張荷重を加えた。

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, 荷重が急激に下がったときとした。

5. すべり耐力試験の試験結果

(1) ボルト軸力計測結果

ボルト軸力計測結果を表-12に示す。締付け軸力は, 各試験体の平均値では, いずれも設計ボルト軸力の121~131%の範囲にあり, また, すべてのボルトで設計ボルト軸力を満足した。なお, ボルト長が短いと導入軸力が高くなる傾向は, 3章と同じであった。

(2) 720時間後の残存軸力の計測結果

720時間後の残存軸力において, 各試験体の平均値は設計ボルト軸力の102%~111%の範囲にあり, 5.0d以下の範囲では概ね想定していたボルト軸力であった。ただし, 5.0dを超えたボルト(C3, D3)では, 想定していた軸力より若干低めであり, C3-3およびD3-3では設計ボルト軸力を満足しなかった。これについては, 6章で考察する。

図-14に経過時間と軸力残存率の関係を示す。なお,

表-13 すべり耐力試験結果

試験体	すべり試験直前 の軸力 N_c [kN]			すべり 荷重 P [kN]	すべり係数			
	ボルトNo.		平均		μ_s (N_s で算出)		μ_c (N_c で算出)	
	No.1	No.2						
C1-1	187.7	180.6	184.2	645	0.977	0.984	0.875	0.887
C1-2	184.7	183.0	183.9	667	1.011		0.907	
C1-3	183.3	179.7	181.5	637	0.965		0.877	
C2-1	169.5	174.2	171.9	729	1.105	1.089	1.061	1.032
C2-2	161.3	173.6	167.5	689	1.045		1.029	
C2-3	175.5	191.4	183.5	738	1.118		1.006	
C3-1	180.6	176.2	178.4	784	1.188	1.176	1.099	1.114
C3-2	180.7	188.2	184.5	815	1.235		1.105	
C3-3	159.0	161.7	160.4	730	1.106		1.138	
D1-1	210.8	199.5	205.2	676	0.880	0.911	0.823	0.856
D1-2	204.0	202.9	203.5	727	0.947		0.893	
D1-3	207.9	201.1	204.5	696	0.906		0.850	
D2-1	210.6	210.8	210.7	842	1.096	1.028	0.999	0.972
D2-2	192.3	209.2	200.8	735	0.957		0.915	
D2-3	194.4	200.9	197.7	791	1.030		1.001	
D3-1	194.5	201.6	198.1	903	1.176	1.124	1.140	1.106
D3-2	206.2	202.7	204.5	853	1.111		1.044	
D3-3	201.7	165.1	183.4	832	1.084		1.135	

先に示したD3-3のNo.2ボルトについては、軸力低下がその他の試験体と大きく異なるので、図-14(b)ではこれを除いて示している。図に示すように、回帰直線式を見ればボルト長が短い方が軸力残存率は低くなることが判る。なお、C1とC2を比較しても大きな違いは見られないが、表-12の軸力低下値を見てわかる通り、ボルト長の影響は明確である。

図-15に溶射膜厚と720時間後の軸力残存率の関係を示す。前報⁶⁾では、膜厚が厚くなれば軸力残存率が低くなる相関がすべての試験体で見られたが、本試験でもC1, C2, C3, D1の4ケースでは右肩下りの傾向が見られ、C1を除けば相関係数も0.4を超え、相関は認められた。なお、D2, D3はその逆の傾向を示したが相関係数は低く、ばらつきの範囲と考えるのが妥当である。

(3) すべり係数算出結果

すべり係数算出結果を表-13に示す。すべり係数は式(1)を用いて算出する。

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

μ : すべり係数, P : すべり荷重(kN)
 m : 摩擦面数(=2), n : ボルト本数(=2),
 N : ボルト軸力(N) (表-13は N_s と N_c で算出)

その際、ボルト軸力(N)は、すべり試験直前の軸力(N_c)で算出し、参考のため設計ボルト軸力(N_s)でも算出した。残存軸力は高く、すべり係数を設計ボルト軸力で評価すれば過大評価となるので、すべり試験直前のボルト軸力(N_c)で算出したすべり係数 μ_c を用いて試験結果を考察することとした。なお、ボルト締付けから720時間後以降にすべり試験を実施した関係上、表-

図-16 すべり耐力試験(すべり係数)結果

12で示した720時間後の軸力(N_b)と表-13の試験直前の軸力(N_c)は若干異なっている。

表-13に示すように、M22, M24ともにすべり係数(μ_c)は0.8を下回ることはなく、高いすべり耐力を有していた。また、板厚が大きくなることによりすべり係数(μ_c)は大きくなる傾向が示され、例えば、D1と比較しD2, D3では、それぞれ0.116, 0.250大きかった。これは、文献6)と同様、添接板の板厚の影響と考えられ、添接板の板厚が厚くなれば、ボルト軸力による接触圧が均等に広い範囲に分布されたことにより、抵抗する面積が広がった効果と考えられる。

図-16に縦軸にすべり係数(μ_c)、横軸にはそれぞれRzjis, Ra, 試験時の軸力および膜厚で示す。ここでは、3データによる回帰直線を示すが、データ数量は少なく回帰直線式あるいはその相関係数を示しても必ずしも信頼性が高いとは言えないと考えられるので、ここでは傾向を掴むため、直線の図示のみに留めることとした。なお、多くの μ_c は1.0を超えたが、D2-2はその他の同じ板厚の試験体(C2, D2)と約0.1程度の違いが生じており、これについては特異な結果と考えられるので、D2は誤解を招かないよう回帰直線は示さなかった。

図-16(a)はRzjisとの関係を示すが、C3を除けば右肩上がりで、Rzjisが大きくなれば μ_c は大きくなる傾向が伺えた。これは、森ら¹³⁾の研究でも示されている結果

図-17 導入軸力と一次締め軸力との関係

と同じである。図-16(b)は R_a との関係を示すが、すべてのケースで右肩上がりであり、 R_a が大きくなれば μ_c は大きくなる傾向が伺えた。土木学会の設計指針¹¹⁾では、 R_a によりすべり係数を分類分けしている摩擦面もあるが、すべり係数は R_{zjs} より R_a の方が傾向は掴みやすいことがこれらの結果からも伺える。

図-16(c)はボルト軸力(N_c)との関係を示すが、C1とD1は軸力の範囲が狭くこれらを除けば、右肩下りで軸力が大きくなれば μ_c は小さくなる傾向が伺えた。軸力の影響については、第1著者¹⁴⁾は軸力が高い方がすべり係数は低くなる傾向を示した。これは、無機ジンクリッチペイントを施した場合であるが、溶射でも同様の結果となった。図-16(d)は溶射膜厚との関係を示すが、D3のみ右肩下りとなったが、その要因はD3-2である。これは図-16(b)で示すように、D3-2は R_{zjs} や R_a は低く、この要因でその他の試験体より μ_c が低くなったと考えられ、膜厚の影響より粗さの影響の方が大きいことが伺える。

以上のように、すべり係数 μ_c はいずれの試験体でも0.8を超え、板厚が厚くなれば μ_c も高くなり、母板厚が50mmのボルト継手では、 μ_c が1.11となった。なお、本研究では、フィラーの有無の影響の比較を行っていないが、文献7),8)ではその影響はほとんどないことを示した。これらもあり、本試験結果のすべり係数は高い結果となった。また、すべりが生じた箇所は、溶射面の境界面ではなく、溶射と粗面形成剤、あるいは粗面形成剤と鋼板との界面のどちらから発生したものと考えられる。

6. 一締めの影響の考察とナット回転量の提案

(1) 一次締めの影響とナット回転量の再考察

3章の試験結果から5章の試験で用いるナット回転量

を設定し、その回転量で締め付けた試験体を用いて導入軸力および720時間後の軸力を計測した。ただし、720時間後の残存軸力は、一部のボルトで設計ボルト軸力を下回った。そこで、本章では、その原因を調べた上で、ナット回転量を再考察した。

表-12で示したすべり耐力試験体における720時間後の残存軸力において、設計すべり係数を下回った結果は、一次締め軸力が低い場合であることが判った。そこで、一次締めの影響を明確にするため、図-17は横軸に一次締め軸力で示し、縦軸には3, 5章のデータおよび既存データ^{3),6)}の導入軸力を示す。図中で示す算定軸力範囲とは、JIS B 1186における高力六角ボルトのトルク係数値の規定値範囲(0.11~0.15)から、この範囲のボルトに対し、150N・mのトルク(M22の一次締めトルク)で締め付けられ、式(2)から算定される軸力は45.5~62.0kNとなり、それを示している。同様に、M24(一次締めトルク200N・m)であれば、55.6~75.8kNとなる。

$$k = \frac{T}{d \cdot N} \quad (2)$$

k : トルク係数値, T : トルク(N・m),
 d : ボルト径(m), N : ボルト軸力(N)

図-17に示すように、回転角が75°および90°において、本試験データの範囲では、一次締め軸力が高くなれば導入軸力も高く傾向が見られるが、120°になれば一次締めの影響は小さく、特にM24ではその影響はほとんど見られない。これは、90°を超えれば一次締め軸力が高い場合には、早い段階でボルトねじ部は降伏域に達し、それが低い場合でも120°に近い回転角で降伏域に達するからと考えられる。M22(図-17(a))において、3章と5章では前者の方が一次締め軸力は高めであるが、算定軸力範囲内のデータが多く、5章のデータ(図-17(a)の5章データは105°であることに留意)で

図-18 残存軸力と一次締め軸力との関係

は一部算定軸力範囲より低いデータがあり、これらのデータは導入軸力が低いことが判る。一方、M24(図-17(b))では、3章のデータは高い一次締めであり、逆に5章のデータでは低く、一部算定軸力範囲を下回っており、3章と5章では大きく異なっていることが判る。これにより、同じ90°で締め付けても、3章データの導入軸力は130~145kN、5章では120~130kNと軸力差が生じたものと考えられる。なお、既存データの一次締め軸力は、その多くは算定軸力範囲より低い場合が多い。これは、同じトルクで締め付けても使用ボルトや締め付け環境により、導入される一次締め軸力は異なることを意味している。これらの影響もあり、M24では3章で示した(図-8(b))既存のデータより高めの軸力が導入されたものと考えられる。

図-18は横軸に一次締め軸力を示し、縦軸に720時間後の残存軸力を示す。軸力低下後の残存軸力においても一次締めの影響は残っており、M22で設計ボルト軸力を満足しなかったのは、算定軸力範囲より低い一次締め軸力であった場合である。M24でも同様であるが、D3-3-2(5章L150の1データ)は、適切に一次締め軸力が導入されているが設計軸力は満足せず、これは特異なデータと考えるのが妥当である。

(2) ナット回転量の提案

前節で示したように、5章より3章の方が導入軸力や残存軸力は高く、これは一次締め軸力の影響であった。このため、3章で設定したナット回転角では、5章において、一次締め軸力が低い一部のデータでは、残存軸力は設計ボルト軸力を満足しない場合もあった。特に、5.0dを超える場合については、回転角を再度検討する必要があると考えられる。

M22において、表-1で示したフィラーなしと同様、5.0dを超えた場合を+10°とすれば、図-11(a)のL140の90°-120°間の直線で考えれば、約13kN上昇するので、

表-14 フィラーを有する金属溶射継手のナット回転量(θ)

径	$L \leq 5.0d$	$5.0d < L \leq 6.3d^{(*)}$	$L > 6.3d^{(*)}$
M22	105°	115°	試験により決定
M24	90°	100°	

L: ボルト長さ, d: ボルト径 (*: M22は6.4d)

一次締め軸力が低い場合でも対応できるものと考えられる。次に、M24において、5.0d以下の場合、回転量が90°であれば、一次締め軸力が算定軸力範囲を下回っても設計ボルト軸力を確保できている。また、3章では一次締め軸力が高く、5.0dを超えた場合もそれ以下と同じ回転量(90°)としたが、フィラーありでフィラーなしより低い締め付け(+10°としない)とできる明確な理由はなく、フィラーありも表-1と同じとするのがよいと考えられる。なお、フィラーありではリラクセーションによる軸力低下は大きくなるが、前報⁶⁾のフィラーなしのM24はボルト軸力が高めでの提案であり、軸力低下を考慮してもフィラーの有無に依らず同じとできると考えられる。

以上を踏まえ、金属溶射を施したフィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手における提案するナット回転量を表-14に示す。なお、表-14で示したナット回転量は、一次締めにM22で150N・m、M24では200N・mを前提としたものであるが、一締めの影響は大きく、適切な軸力が導入されていることが前提である。また、めっきボルトF8Tの使用を前提とした提案である。

7. まとめ

本研究は、金属溶射を施したフィラーを有するボルト継手(フィラー1枚、設計膜厚100μm)における適切な軸力が期待できるナット回転量および同継手のすべり耐力を明確にすることを目的に行った研究である。本研究から得られた主な結論は、以下の通りである。

- (1) フィラーを有する継手は、同じ回転量でフィラーなし継手と同等な初期導入軸力となる。また、ボルト長が短い方が導入軸力は大きくなる。
 - (2) リラクセーションによる軸力低下は、フィラーを有する場合、フィラーがない場合より M22 で約 5%, M24 で約 3%大きく、また、ボルト長が短い方が軸力低下は大きくなる。
 - (3) 720 時間 (30 日) 後の軸力残存率は、M22 で 81~85%, M24 で 84~87%となった。
 - (4) すべり係数(μ_c)は、M22, M24 とともに 0.80 を下回ることとはなく、板厚が厚くなれば μ_c も高くなり、母板厚が最も厚い(50mm)継手では、 μ_c は 1.11 となった。
 - (5) フィラーを有するボルト継手において、M22 では一次締めを 150N・m とし、ナット回転量は、ボルト長が 5d 以下では 105°, 5d を超え 6.4d 以下の場合、115°で管理するのがよいと考えられる。また、M24 では、一次締めを 200N・m とし、5d 以下では 90°, 5d を超え 6.3d 以下の場合、100°で管理するのがよいと考えられる (表-14)。なお、初期導入軸力は一次締め軸力の影響が大きく、適切な一次締め管理が重要である。
- 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) 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.
 - 4) 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.
 - 5) 南 邦明，徳富恭彦，清水織恵，河村健一，森井茂幸：ナット回転量 90°で締付けた溶射面のボルト継手のすべり耐力，JSSC 鋼構造年次論文報告集，Vol. 21, pp. 152-157, 2013.11.
 - 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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 A1, Vol. 75, No. 2, pp.127-140, 2019.5.
 - 9) 鋼構造物常温溶射研究会：鋼橋の常温金属溶射設計・施工・補修マニュアル(案)(改訂版)，2014.4.
 - 10) 村山康雄，元井邦彦，福永靖雄，松井隆行，中村聖三：アルミニウム・マグネシウム合金溶射を施した溶射高力ボルトの摩擦接合継手に関する研究，構造工学論文集, Vol.62A, pp.693-704, 2016.3.
 - 11) 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.
 - 12) 南 邦明，遠藤輝好，小峰翔一，吉岡夏樹，宮井大輔，澁谷 敦，内田大介：トルニア形ボルト S10T(M22)の導入軸力および機械的性質の統計調査，土木学会論文集 A1, Vol.74, No.2, pp.280-289, 2018.8.
 - 13) 森 猛，田坂康介，一宮 充，小笠原照夫：鋼材の表面粗さパラメータと高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数，土木学会論文集 A1, Vol.67, No.2, pp.446-453, 2011.8.
 - 14) 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.

(Received March 23, 2019)

(Accepted September 24, 2019)

A STUDY ON HIGH STRENGTH BOLTED JOINT WITH FILLER PLATES USING METAL-SPRAYED CONTACT SURFACES

Kuniaki MINAMI, Hideki YOKOYAMA, Masamichi SAITO
and Takanori MURAKAMI

For the bolted joints with filler plates using zinc-aluminum pseudo-alloy sprayed contact surfaces, the nut rotation angles of turn-of-nut tightening method and the slip coefficient for the design of the joint are not proposed because the axial force induced into the bolts and the slip capacity of the joints under those conditions have not been clarified. In order to clarify the induced axial force of the bolts, bolt-tightening tests and slip tests of joints were carried out.

Considering the influence of bolt diameter and bolt length on induced axial forces and its relaxation obtained in the bolt-tightening tests, the nut rotation angles according to different bolt sizes were proposed. As a result of the slip tests, it was found out that the slip coefficient is much larger than the standard design value.