亜鉛アルミ合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験

鉄道･運輸機構　正会員　徳富恭彦
鉄道･運輸機構　正会員　南　邦明
鉄道･運輸機構　正会員　横山秀喜
川田工業　　森井茂幸

１．はじめに

溶融亜鉛めっきボルトF8Tのボルト締付けは，ナット回転法を用い，回転量120°を基本としている．しかし，著者らは亜鉛アルミ合金溶射（以下，合金溶射）を施した摩擦面において，ナット回転量90°が適切な軸力が導入されることを示した[1]．本報告は，ナット回転量90°でボルト締付した合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手の試験体を作成し，すべり耐力試験（リラクセーションも考慮）を実施した実験報告である．

２．試験体の説明

(1) 試験体の種類および形状　**表-1**に試験体の種類を示す．合金溶射では封孔処理無(以下，封孔無)を基本としており，その場合発錆が懸念される．そこで，本試験では曝露試験片を使用した．試験体パラメータは曝露期間，曝露方向および封孔処理の有無(比較のため)とした．**図-1**に試験体形状を示す．使用ボルトは，すべり側では溶融亜鉛めっきボルトF8T(M22)，固定側はF10T(M22)とした．使用鋼材は，母板，連結板ともにSM490Aを用いた．試験体数は各種類で3体製作し，合わせて18体を試験に供した．

表-1 試験体の種類

試験体名	曝露条件		封孔処理
	曝露期間	曝露方向	
H1	1ヶ月	水平	無
V1		鉛直	
H'1		水平	有
H3	3ヶ月	水平	無
V3		鉛直	
H'3		水平	有

(2) 摩擦面の表面処理　試験体は，素地調整(Sa2 1/2)後に，標準(最小)膜厚100μmで合金溶射を行った．その後，H'1，H'3試験体のみ封孔処理を行った．

(3) 表面粗さおよびめっき膜厚の計測　測定位置は，ボルト孔周辺とし，測定数は1つのボルト孔に対し，母板および連結板の片面各2ヶ所とし，両面合わせて試験体一体あたり計36点測定した．測定時期は，溶射直後と3ヶ月後とした．測定結果を**表-2**に示す．溶射直後の各試験体では，表面粗さや膜厚にばらつきがあるものの大きな違いはなく，表面粗さは50μm程度，膜厚は標準膜厚の1.8倍程度であった．曝露3ヶ月試験体において，溶射直後と比較して，表面粗さや膜厚に違いはなく，すべり耐力等に影響するこの2項目に違いは見られなかった．また，赤錆の発生も見られなかった．

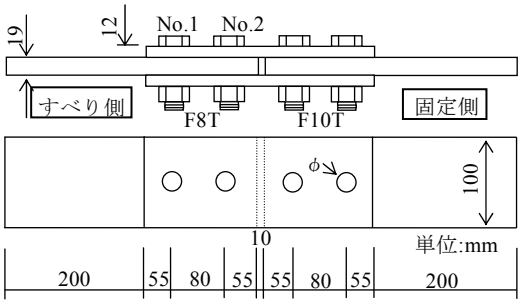


図-1 試験体形状

表-2 3ヶ月試験体の表面粗さ,膜厚計測結果

試験体名	計測時期	表面粗さ[μm Rzjis] 試験体No. No.1	No.2	No.3	平均値	溶射膜厚 [μm] 試験体No. No.1	No.2	No.3	平均値
H3	溶射直後	51	51	53	51.9	190	199	177	189
V3		42	42	41	41.6	160	166	171	166
H'3		45	55	53	51.1	189	172	191	184
H3	曝露3ヶ月後	48	50	52	50.0	182	191	181	185
V3		48	45	43	45.3	166	173	183	174
H'3		44	55	52	50.2	192	189	202	194

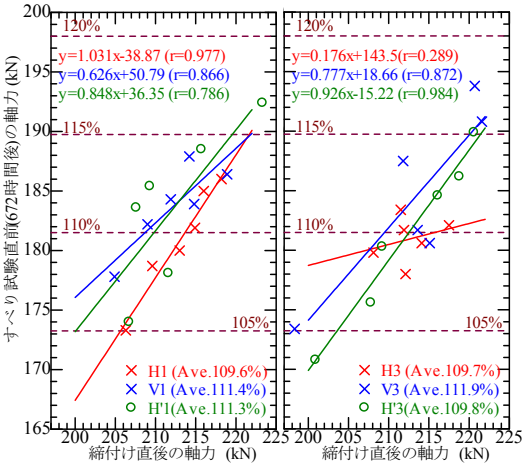
(4) ボルトの締付け　ボルト締付けは，トルク法を用い150N･mで1次締め後，ナット回転法を用いて，ナット回転量90°で本締め[1]した．なお，固定側のボルトについては，さらに30°増締めした．

(5) ボルト軸力のひずみ計測　導入軸力およびすべり係数の算出を行うため，ボルト軸部にひずみゲージを取り付け，ボルト軸力を計測した．計測は，すべり側のめっきボルト全数とした．

３．すべり耐力試験

(1) 試験方法　すべり試験は，ボルト締付け672時間後（28日後）に実施した．載荷試験には載荷能力2,000kNの万能試験機を用い，試験体のすべりが生じるまで引張荷重を徐々に加えた．試験時には，母板間の相対変位を測定するため，継手の内側ボルトの母材と連結板間にクリップゲージを設置した．すべり耐力は，継手部がすべった時に荷重が下がるか，もしくは，開口変位が0.2mm(建築分野でのすべりの判定値[2])となった時の荷重値とした．

(2) ボルト軸力計測結果　**図-2**に締付け直後の軸力と672時間後の軸力の関係を示す．締付け軸力は，ばらつきがあるが各試験体の3体の平均値においては，いずれも213kN（設計ボルト軸力の129%）であった．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109.6～111.9%であり，残存軸力率は84.9～86.6%で前報[1]と大きな違いはなく，想定通りの軸力が導入されていた．



(a)1ヶ月試験体　(b) 3ヶ月試験体

図-2 締付け軸力と試験直前の関係

キーワード：高力ボルト，導入軸力，すべり耐力試験，ナット回転法
連絡先：〒843-0024　武雄市武雄町富岡11763-1　鉄道・運輸機構　武雄鉄道建設所　TEL 0954-27-7002

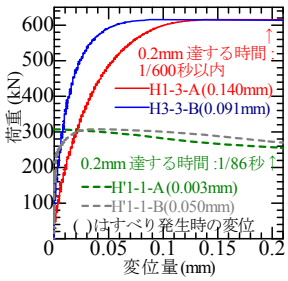


図-3 荷重と変位関係の例1

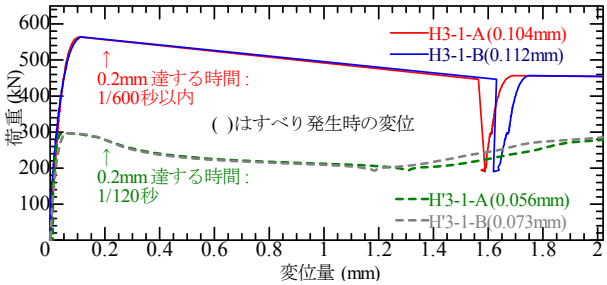


図-4 荷重と変位関係の例2

表-3 すべり耐力試験結果

試験体	すべり発生時(すべり耐力) 変位量D [mm]		荷重P [kN]	発生音	すべり係数 μ_b	
H1-1	0.109	0.117	644	あり	0.911	0.877
H1-2	0.126		644		0.878	
H1-3	0.115		615		0.843	
V1-1	0.109	0.108	635	あり	0.854	0.866
V1-2	0.103		641		0.870	
V1-3	0.113		633		0.874	
H'1-1	0.027	0.033	307	なし	0.422	0.412
H'1-2	0.046		298		0.391	
H'1-3	0.026		302		0.422	
H3-1	0.108	0.111	564	あり	0.780	0.772
H3-2	0.118		566		0.782	
H3-3	0.107		547		0.755	
V3-1	0.103	0.104	567	あり	0.768	0.745
V3-2	0.110		541		0.764	
V3-3	0.099		541		0.703	
H'3-1	0.065	0.085	297	なし	0.401	0.397
H'3-2	0.100		282		0.395	
H'3-3	0.091		284		0.394	

曝露条件の影響に関して，1ヶ月試験体では，H1(水平曝露)の方がV1(鉛直曝露)より約2%残存軸力率は低くかった．一方，3ヶ月試験体でも，封孔無では曝露方向の影響は同様の結果であるが，さらにH3ではばらつきが生じ相関係数は低くなった．封孔有ではH'3は逆にH'1より相関係数は高くなった．

(3) すべり荷重および変位量計測結果 すべり耐力試験結果を**表-3**に示し，荷重と変位の関係の一例を**図-3,4**に示す．すべり状況は，封孔処理の有無に関わらず，最大荷重に達した直後の変位は大きく，目視で判断できる状況であった．なお，封孔無の場合，大きなすべり音が発生したが，封孔有の場合，すべり音は発生しなかった．**表-3**に示すようにすべり発生時(すべり荷重時)の変位は，封孔無(H1,V1, H3,V3)の平均値では 0.10～0.12mm，封孔有(H'1, H'3)では0.03~0.09mmとばらつきがあり，H'1とH'3で差異が生じた．封孔無ではH1を除けばすべり発生から1/600秒にはすでに変位は1.0mmを超え，封孔有でも1/86秒後には0.2mmに達した．以上のように，すべりはすべての試験体で変位量0.2mm以下で発生し，また，変位量(0.2mm)ですべり耐力(荷重)と判断するケースは見られなかった．

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

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(672時間後の軸力)

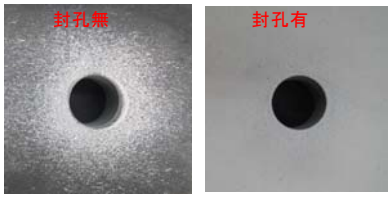


写真-1 母板すべり面(No.2ボルト)

(4) すべり係数算出結果 すべり係数は式(1)を用いて算出した．その際，ボルト軸力(N)は，すべり試験直前の軸力で算出した．封孔無(H1,V1,H3,V3)は，何れもすべり係数は0.70を超え，0.90を超える場合も見られた．曝露方向による影響については，若干であるが鉛直曝露(V1,V3)の方が水平曝露(H1,H3)より若干大きくなったが，これは誤差の範囲と考えるのが妥当である．一方，曝露期間については，曝露方向に関わらず1ヶ月試験体より3ヶ月試験体の方が約0.10，すべり係数が低くなった．**表-2**で示したすべり耐力に影響する表面粗さや膜厚は，曝露の影響は見られなかったが，曝露期間が長くなると粗さや膜厚には影響しないが，何らかの塗膜の劣化が生じたことにより，すべり係数が低下したものと考えられる．ただし，3ヶ月試験体の平均値はV3で0.75，H3で0.77と非常に高いすべり係数(μ_b)であり，封孔無では曝露期間に関わらず十分なすべり耐力を有する結果であった．一方，封孔有の場合(H'1,H'3)，曝露期間に関わらずすべり係数(μ_b)は0.40を下回る場合が約半数の試験体で見られ，封孔処理の有無ですべり耐力に大きな差異が生じた．**写真-1**にすべり面の一例を示す．封孔無では，溶射皮膜の剥がれた範囲が広く，また明らかに皮膜が剥離しており，すべりは溶射皮膜内で生じたもの推察される．一方，封孔有では，ボルト孔周辺の皮膜の剥がれがほとんどなく，封孔処理塗料表面ですべったものと推定できる．

4．まとめ

本実験から得られた，合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力特性は，以下の通りである．

(1) 合金溶射の封孔無は，曝露期間 3 ヶ月間では赤錆は発生せず，表面粗さや膜厚の変化は見られなかった．

(2) 合金溶射の残存軸力は，軸力導入 28 日後において 85~87%であり，前報 [1)]と大きな違いは見られなかった．

(3) ナット回転量 90°で締付けた場合の 28 日後の軸力は,各試験体の平均値では設計ボルト軸力の 110%～112%であり，曝露条件の違いよるリラクセーション(軸力低下)に大きな違いは見られなかった．

(4) すべり発生時の変位は，平均すれば封孔無では約 0.11mm，封孔有では約 0.04mm であった．

(5) すべり係数は，封孔無であれば0.70を超えて，さらに0.90を超える場合も見られ，高いすべり耐力を有していた．曝露期間1ヶ月では平均すれば0.87，曝露期間3ヶ月では0.76と曝露期間の影響が生じた．なお，封孔有ではすべり係数は0.40であった．以上の結果から，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おいて，封孔無を前提し，ナット回転量90°でボルトを締付けても問題ないと考えられる．

【参考文献】

1) 南 邦明，横山秀喜，德富恭彦，吉田己喜男：亜鉛アルミ合金溶射を施した高力ボルト摩擦接合継手の導入軸力試験，土木学会第72回年次学術講演会概要集I-615, 2017.9.
2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2006.3.