

リラクセーションによる軸力低下を抑えるボルト継手の施工

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
 鉄道総研 正会員 斉藤雅充
 鉄道総研 正会員 濱上洋平

1. はじめに

無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）を施した高力ボルト摩擦接合継手は、リラクセーションによるボルト軸力低下が大きく、著者は、設計ボルト軸力の15%増し締めで施工すれば、ボルト継手の安全性・信頼性が向上することを示した¹⁾²⁾。ただし、トルシア形ボルト(S10T)では12%増し程度でピンテールが破断する構造であり、より高い導入軸力での施工は困難である。そこで、S10Tでは、リラクセーションによる軸力低下を抑える施工法を検討し、ボルト継手の安全性・信頼性を向上させることを考えた。ここでは、一次締め（予備締め）後、24時間後に本締めを行う施工法を提案し、これによる軸力低下の改善効果（リラクセーション試験による）を明確にし、その継手のすべり耐力（すべり耐力試験による）を示した。

2. 試験体の説明

(1) **試験体の種類および形状** 表-1および図-1にそれぞれ試験体の種類および形状を示す。試験体は、使用ボルト、一次締め軸力および一次締めから本締めまでの時間をパラメータとした8種類であり、1種類で試験体数は3体とし、合わせて24体を試験に供した。鋼材はSM570、ボルト径はM24を使用した。摩擦面処理は、ブラスト処理(ISO Sa2 1/2)後に無機ジンクを標準膜厚75μm塗布した。塗装膜厚計測結果を表-2に示すが、膜厚は各試験体で約90μmであり、目標より厚膜であった。

(2) **ボルトの締め付け** 一次締めは、表-1に示した締め付け軸力（設計ボルト軸力の10%増し）の60,80,90%の3ケース（SHは2ケース）で行った。本締めは、その直後および24時間後とし、六角ボルト(F10T)の締め付け軸力は、S10Tを想定し設計ボルト軸力の10%増し、S10Tは通常のピンテール破断とした。なお、固定側については、さらに20kN増し締めした。

(3) **ボルト軸力のひずみ計測** リラクセーションによる軸力低下の把握およびすべり係数の算出を行うため、ボルト軸力を計測した。計測は、すべり側のすべてのボルトであり、これらのボルト軸部にひずみゲージを貼付しボルト軸力を算出した。

3. 一次締め（予備締め）のリラクセーション試験

(1) **試験方法** 一次締めによる軸力低下の大きさおよびその影響を調べるため、24時間後に本締めする試験体を対象に実施した。

(2) **試験結果** 一次締め直後および24時間後の軸力測定結果を表-3に示す。導入軸力は、60%締めは想定通りであったが、その他は想定より若干低い結果であった。24時間後には軸力は大きく低減し、塗膜のクリープにより想定される軸力低下のその多くが、この期間で発生していると言える。また、締め付け軸力が高ければ軸力残存率は低くなり、90%締め付けでは88.9%まで低下した。

4. 本締めのリラクセーション試験

(1) **試験方法** 計測期間は、本締め後792時間(33日)とした。

(2) **試験結果** 締め付け直後の導入軸力、リラクセーションによる残存軸力およびすべり耐力試験の結果を表-4に示す。導入軸力は、若干高めであるが、概ね想定していた軸力であった。792時間後の軸力残存率は、通常の施工である一次締め直後に本締めを行った試験体（TH'シリーズ）では、一次締めの大きさ依らず90%を下回ったが、24時間後に本締めを行った試験体（THシリーズ）は、

表-1 試験体の種類

試験体名	使用ボルト	一次締め	本締めまでの時間	本締め
TH'-60	F10T	60%	直後	10%増し
TH'-80		80%		
TH'-90		90%		
TH-60		60%		
TH-80	S10T	80%	24時間後	10%増し
TH-90		90%		
SH-60		60%		
SH-80		80%		

注)一次締めは、締め付け軸力に対する比率。

表-2 膜厚計測結果

試験体名	塗装膜厚 [μm]			
	-1	-2	-3	平均
TH'-60	85.5	89.3	91.3	88.7
TH'-80	90.9	91.2	92.8	91.6
TH'-90	86.7	92.8	89.3	89.6
TH-60	91.2	88.4	90.5	90.1
TH-80	89.3	94.5	92.3	92.0
TH-90	92.2	90.1	93.1	91.8
SH-60	92.8	93.2	92.1	92.7
SH-80	86.3	91.2	93.3	90.3

注)1 ボルト孔につき各2箇所計測し、4面の平均値。

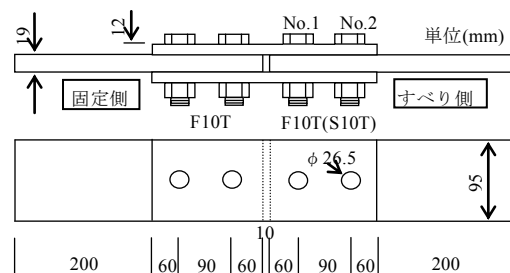


図-1 試験体形状

表-3 一次締めのリラクセーション試験結果

試験体	締付け直後			24時間後				
		軸力 [kN]		締付け 軸力 比率 [%]	軸力 [kN]		締付け 軸力 比率 [%]	軸力 残存 率 [%]
		ボルトNo.			ボルトNo.			
		No.1	No.2		No.1	No.2		
TH -60	-1	154.7	160.7	60.3	144.9	150.8	56.2	94.1
	-2	162.4	166.6		150.1	154.1		
	-3	149.9	153.3		140.7	142.2		
TH -80	-1	204.2	200.2	77.5	190.7	187.3	72.5	92.7
	-2	210.4	201.7		197.5	188.6		
	-3	199.4	201.7		186.3	188.9		
TH -90	-1	225.9	239.1	88.8	206.7	219.1	81.6	88.9
	-2	230.9	230.5		213.0	211.9		
	-3	236.4	233.5		216.6	214.9		
SH -60	-1	160.1	157.4	60.0	148.9	144.9	55.5	93.5
	-2	160.4	151.1		147.1	139.8		
	-3	157.4	157.1		146.7	145.4		
SH -80	-1	202.3	198.1	77.8	189.1	184.4	72.5	92.2
	-2	209.9	200.2		195.4	186.0		
	-3	204.9	208.1		191.2	194.3		

注) 締め付け軸力比率：計測ボルト軸力／締め付けボルト軸力
 締め付けボルト軸力：設計ボルト軸力(238kN)の10%増し

キーワード：トルシア形ボルト、15%増し締め、軸力低下、予備締め

連絡先：〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1 鉄道・運輸機構 TEL 045-222-9082

表-4 リラクセーション試験およびすべり耐力試験結果

試 験 体			リラクセーション試験												すべり耐力試験							
ボルト	一次締め	本締め	名称	締付け直後(導入軸力): N_0					792時間後の軸力(残存軸力): N_a					軸力 残存率 [%]		試験時 軸力 N_b [kN]	すべり 荷重 P [kN]	すべり係数				
				[kN]		[kN]		[kN]		[kN]		試験時軸力						設計軸力				
				ボルトNo.		軸力	設計軸力	ボルトNo.		軸力	設計軸力	試験時軸力		設計軸力								
No.1		No.2	平均	比率(%)	No.1	No.2	平均	比率(%)					μ_b	平均	μ_s	平均						
F 10 T	60 %	直 後	TH'-60	-1	264.1	262.4	263.3	110.6	235.8	234.5	235.2	98.8	89.3	89.2	240.7	528	0.548	0.555	0.557			
				-2	263.4	261.1	262.3	110.2	237.0	230.0	233.5	98.1	89.0		239.0	535	0.559	0.561				
				-3	260.2	263.8	262.0	110.1	232.1	234.8	233.5	98.1	89.1		238.9	527	0.551	0.554				
	80 %		TH'-80	-1	260.2	302.0	281.1	118.1	228.9	268.6	248.8	104.5	88.5	88.5	257.2	525	0.510	0.551	0.528			
				-2	267.2	261.2	264.2	111.0	236.8	231.8	234.3	98.4	88.7		240.9	482	0.500	0.506				
				-3	263.4	268.2	265.8	111.7	232.2	238.1	235.2	98.8	88.5		243.9	502	0.515	0.527				
	90 %		TH'-90	-1	263.9	265.7	264.8	111.3	233.7	237.7	235.7	99.0	89.0	88.9	244.6	520	0.531	0.546	0.554			
				-2	272.5	265.6	269.1	113.0	242.8	236.0	239.4	100.6	89.0		248.5	531	0.534	0.537				
				-3	266.8	269.4	268.1	112.6	236.7	239.3	238.0	100.0	88.8		244.3	533	0.545	0.559				
	60 %	24 時間 後	TH-60	-1	268.6	263.2	265.9	111.7	254.0	247.8	250.9	105.4	94.4	94.1	251.5	513	0.510	0.539	0.535			
				-2	261.3	266.9	264.1	111.0	248.7	251.9	250.3	105.2	94.8		251.3	497	0.494	0.512				
				-3	263.7	264.3	264.0	110.9	245.4	246.2	245.8	103.3	93.1		244.7	519	0.530	0.545				
	80 %		TH-80	-1	282.3	263.1	272.7	114.6	268.2	251.0	259.6	109.1	95.2	95.4	257.3	536	0.521	0.563	0.543			
				-2	264.7	263.5	264.1	111.0	253.3	249.7	251.5	105.7	95.2		251.7	518	0.514	0.544				
				-3	261.3	265.6	263.5	110.7	250.3	253.8	252.1	105.9	95.7		251.4	499	0.496	0.524				
90 %	TH-90		-1	263.9	264.1	264.0	110.9	250.8	252.0	251.4	105.6	95.2	95.0	253.6	511	0.503	0.536	0.550				
			-2	264.4	261.9	263.2	110.6	252.0	249.3	250.7	105.3	95.2		254.0	518	0.510	0.544					
			-3	267.4	270.7	269.1	113.0	253.0	255.0	254.0	106.7	94.4		255.7	544	0.531	0.571					
60 %	S 10 T	SH-60	-1	286.7	264.1	275.4	115.7	263.5	241.1	252.3	106.0	91.6	92.1	256.0	582	0.568	0.611	0.581				
			-2	295.5	278.7	287.1	120.6	273.1	256.0	264.6	111.2	92.1		264.6	545	0.514	0.572					
			-3	271.1	283.5	277.3	116.5	251.6	262.2	256.9	107.9	92.6		258.5	534	0.516	0.561					
80 %		SH-80	-1	284.8	270.8	277.8	116.7	268.4	254.9	261.7	109.9	94.2	94.6	262.7	522	0.496	0.548	0.550				
			-2	275.4	254.4	264.9	111.3	259.8	242.9	251.4	105.6	94.9		253.3	528	0.521	0.555					
			-3	271.5	263.7	267.6	112.4	256.5	251.0	253.8	106.6	94.8		253.8	520	0.512	0.546					

注) 設計軸力比率: 計測ボルト軸力/設計ボルト軸力, μ_b : 試験時の軸力(N_b)で計算, μ_s : 設計ボルト軸力($N_s=238\text{kN}$)で計算

TH'シリーズと比較すると5~6%残存軸力率は高かった。これは、ボルト締付けによる塗膜のクリープによる影響を一次締め時に受けさせた効果と考えられる。これにより、無機ジンクを施した継手であっても、リラクセーションによる軸力低下を5%程度に抑えることができた。また、S10Tを用いたSHシリーズにおいて、SH-60では軸力残存率は92%であったが、導入軸力が高かったこともあり、設計軸力比率は108%であった。以上のように、無機ジンクを施した継手において、10%増し締めであっても、一次締め後、24時間後に本締めを行えば、15%増し締め（一次締め直後に本締めを行う場合）と同等な残存軸力を有する継手となった。

5. すべり耐力試験

(1) 試験方法 すべり耐力試験は、リラクセーション試験後に実施し、2,000kNの万能試験機を用いた。試験は、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、継手上下の母材間にクリップゲージを設置して測定した。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、荷重が急激に下がり開口変位が大きくなったときのピーク荷重とした。

(2) 試験結果 表-4で示したすべり荷重(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なかったが、変位は大きく目視で判断できるすべり状況であった。また、すべり係数は、式(1)を用いて算出した。なお、ボルト軸力(N)は、すべり試験直前の軸力(N_b)で算出し、参考のため設計ボルト軸力($N_s:238\text{kN}$)でも算出した。すべり係数(μ_b)はTH'シリーズにおいて、ばらつきが生じており、また、一次締めの軸力の大きさによる明確な傾向の違いは見られなかった。次に、THシリーズにおいては、ばらつきは少なく、各試験体のすべり係数(μ_b)の平均値は0.51であり、また、SHシリーズも同等であった。TH'シリーズと比較しても差異はなく、一次締め後、24時間後に本締めを行ったボルト継手は、十分なすべり耐力を有していた。

6. まとめ

無機ジンクを施したボルト継手において、一次締め後24時間後に本締めを行えば、一次締め直後に本締めする通常の施工と比べてリラクセーションによる軸力低下は約5%小さく、S10Tにおいても15%増し締めと同等な残存軸力を実現できる継手となり、安全性・信頼性は向上するものと考えられる。また、すべり係数(μ_b)は約0.51と十分なすべり耐力が得られ、本施工法で締付けたボルト継手を適用しても実用上問題ないと考えられる。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.