ジンクリッチペイント塗装摩擦面を有する高力ボルト接合部の すべり耐力に及ぼす高温熱影響

EFFECT OF HIGH TEMPERATURE ON THE SLIP LOAD OF HIGH-STRENGTH BOLTED FRICTION JOINTS TREATED WITH ZINC-RICH PAINT

安部 武雄*, 古村 福次郎**, 金 和 中***

Takeo AVE, Fukujiro FURUMURA and Wha-Jung KIM

The slip load of high-strength bolted friction joints with zinc-rich painted surfaces subjected or subjecting to high temperatures were investigated. The joint specimens were subjected to various temperature-time histories from 150 to 500°C. Consequently, the slip load and the slip displacement of the high-strength bolted friction joints with painted surfaces were obtained and it was clarified how the temperatures affected the slip load of these joints.

Keywords : *fire, high temperatures, high-strength bolted joint, slip load, slip coefficient, zinc-rich paint*
火災, 高温, 高力ボルト接合, すべり荷重, すべり係数, ジンクリッチペイント

1. はじめに

建築鋼構造物は一般に防錆処理としてペイント塗装が施されているが, 高力ボルト摩擦接合面は所定のすべり係数を確保するために, 黒皮を除去した後, 屋外に自然放置して発生させた赤錆面またはブラスト処理面^{1,2)}が原則とされているため, 接合部が塗装の切れ目となり防錆上の弱点となりやすい。それゆえ, 摩擦面も含めて接合部にペイント塗装処理を施すことは, 防食性・耐久性向上および現場作業(浮錆除去や塗装作業など)の軽減のための有効な手段となりうる。すでに, 直接風雨に晒される鋼橋桁など, より過酷な環境条件にある構造物を建設する土木分野では, 無機ジンクリッチペイントで塗装した高力ボルト摩擦接合面に関する研究³⁻⁶⁾に基づいて, ペイント塗装面に関する検討を行い, 厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布した高力ボルト摩擦接合継手接合面の塗装仕様を『道路橋示方書』⁷⁾に規定している。

近年, 建築分野においても, 有機および無機ジンクリッチペイントを摩擦面に塗装した接合部の耐力に関する研究⁸⁻¹⁰⁾が試みられ, 無機ジンクリッチペイント塗装の有効性に関する有用な知見を得ており, 高力ボルト摩擦接合部の防錆処理の一つとして有効な手法となりうるものと思われる。しかしながら, 高力ボルト摩擦接合継手が火災により高温加熱を受けた場合の力学的性状を検討するために行われた既往の研究¹¹⁻¹⁵⁾は, いずれも摩擦接合面を発錆させた赤錆面またはブラスト処理などの試験体によるものであり, ペイント塗装により防錆処理された状態の接合面に関する火災時を対象とした実験は行われておらず, その性状は明らかにされていない。

本研究は, 『道路橋示方書』の規定に従って塗装された厚膜型無機ジンクリッチペイント塗装摩擦面を持つ高力ボルト摩擦継手の高温

度におけるすべり耐力を実験的に明らかにすることを目的としたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は, 加熱冷却後引張試験用および熱間引張試験用の2種類を製作した。試験体形状は, 片側2ボルト接合, 2面摩擦型とし, すべり係数が1.0となっても摩擦接合部の接合板に降伏は生じない板厚(接合板25mm, 添え板13mm)のものとした。

使用鋼材は接合板がSM50YB, 添え板がSM50YAである。試験体の接合板および添え板は, それぞれの鋼板の圧延方向に切削加工した。加熱冷却後引張試験体(A型試験体: 48体)および熱間引張試験体(B型試験体: 27体)の寸法・形状をFig. 1に示す。使用鋼材の力学的性質および化学成分をTable 1および2に示す。

高力ボルトは, JSS II09に規定されるトルシア形高力ボルトS10T, M22を使用した。ボルトセットの種類は座金の材質のみ異なる2種類を用いた。使用鋼種はボルト材にBOLTEN-110Nを, ナット材にS40Cを用い, 座金材にはS45C(B1 bolt-set type)およびNSW20B(B2 bolt-set type)を用いた。ボルトセットの力学的性質および化学成分をTable 3および4に示す。

試験体の摩擦面はショットブラスト処理を施し, 摩擦面も含めて, アルキルシリケート系厚膜型無機ジンクリッチペイントで, 塗膜厚70 μ を目標に塗装した。なお, 本ペイントの耐熱温度は, 短時間で500°C耐用, 長時間で300°C耐用である。

試験体は, すべて同一工場で, 同一条件のもとで製作し, 試験場に搬入後, トルシア形ボルト締付け機を使用してボルトの締めつけ

* 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

** 東京工業大学 名誉教授・工博

*** 慶北大学校工科大学(韓国) 副教授・工博

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Honorable Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Kyungpook National Univ., Dr. Eng.

Fig. 1 Shape and size of test specimens

Fig. 2 Schematic diagram of measuring assembly

を行った。なお、高力ボルトの締付けに先立ち、各ボルトセット5本について導入軸力を軸力計によって検定した。平均ボルト導入軸力は、21.7ton (B1 bolt-set type) および23.0ton (B2 bolt-set type) であった。また、試験体の組立時に、接合部のペイント塗膜厚を膜厚計によって測定した (Fig. 9 参照)。

2.2 試験装置

試験装置は、150ton ヴォールドウィン大型万能試験機および同試験機付属の大型電気炉を用いた。電気炉は、円筒形で縦に2分されており、内径30cm、外形70cm、高さ100cmのものである。電気炉の最高温度は900℃まで上昇させることができるよう設計されている。電気炉のヒーターは、上・中・下の3段に分かれており、それぞれ独立に電圧を調整できる。電気炉の温度制御には、サイリスタ駆動パルス形PID式自動温度制御器を用いた。

電気炉の上下部分の断熱は、石綿およびケイ酸カルシウム板によって行った。なお、熱間引張試験の場合は、試験機の上下部分のチャックおよび伸び計をファンによって空冷した。

試験体の温度は、上下端ボルト位置の添え板表面および接合板の突合せ部中央 (隙間内部) の3点に、CA熱電対を取り付け、5秒間隔の打点式高温記録計およびデジタル自動温度測定器を用いて測定記録した。なお、試験体の温度は、試験体中央部温度測定点の温度で制御した。

試験体のセット状況およびすべり量測定治具関係は、Fig. 2に示した。熱間引張試験のすべり量測定は、すべり量を接合板と添え板

Table 1 Mechanical Properties of Steel Plates

Steel Grade (JIS)	Plate Thickness (mm)	Yield Strength (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SM50YA	13	43.9	56.9	23.9
SM50YB	25	42.8	57.9	26.3

Table 2 Chemical Compositions of Steel Plates

Steel Grade (JIS)	Plate Thickness (mm)	Chemical Composition (%)								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	V	Nb
		X 100			X 1000		X 100			
SM50YA	13	16	37	136	20	9				2
SM50YR	25	16	42	142	25	4	16	15	5	

Table 3 Mechanical Properties of Bolt-sets

	Materials	Yield Strength (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (HRC)
Bolt	BOLTEN-110N	105.0	111.0	17	65	33
Nut	S40C					26
Washer	S45C					40
	NSW20B					40

に取り付けられた4本のステンレス鋼棒によって炉外に取り出し、歪みゲージ型ダイヤルゲージを用いて測定した。加熱冷却後引張試験のすべり量は、別のすべり量測定治具を制作し、同じ歪みゲージ型ダイヤルゲージを用いて測定した。すべり量の測定は、上下片側の摩擦面のみを測定し、荷重とすべり量の関係をX-Yレコーダーを用いて記録し、すべり現象を起こした後の部分まで測定した。

なお、加熱冷却後のボルトセットの各種材料試験は、別の試験装置を用いて行った。各温度における一定温度保持時間は1時間であり、空冷後、各種実験を行った。

2.3 実験方法

試験シリーズは、AB1, AB2, AB3, BB1, BB2およびCB1の6

種類であり、各名称の頭文字は、Aが加熱冷却後引張試験、Bが熱間引張試験、Cが載荷加熱引張試験を、これに続く文字(B1, B2, B3)がボルトセット種別を示している。なお、B3は加熱冷却後、新品ボルトセット(B1 Bolt-set)に交換したことを意味している。

試験温度は、200～500℃の範囲で50℃の温度間隔を基本とした。なお、AB2, BB2シリーズの試験温度は、加熱温度の影響が顕著になると予想される350および400℃を中心に設定した。

試験温度における試験体の上下温度と中央温度の差は、いずれの試験においても、2, 3の例を除いて、常に±10℃以内であった。

1) 加熱冷却後引張試験 (AB1, AB2, AB3シリーズ)

試験体の加熱は、電気炉を試験場床面に設置して行った。試験体は、原則として、各温度3体とし、同一加熱条件の試験体3体を1セットとして、加熱用治具の所定位置に取付け、炉内に設置して加熱した。試験体の中央温度が目標温度に到達後、約1～1.5時間程度その温度にとどめ、以後、炉外に取り出して空冷した。全試験体の加熱処理終了後、室温で引張試験を行い、X-Yレコーダーを用いて荷重-すべり量曲線を求めた。

なお、新品ボルト(B1 Bolt-set)に交換するAB3シリーズ試験体のボルト交換は、接合部にずれが生じないように、内側2本、外側2本の順にボルト交換作業を行った。

2) 熱間引張試験 (BB1, BB2シリーズ)

熱間引張試験では、電気炉を試験機に取り付けて実験を行った。試験体は、原則として、各温度2体とした。試験体を試験機にセットした状態で加熱し、試験体の中央温度が所定温度に到達後、約1～1.5時間程度その温度にとどめた後、引張試験を行い、X-Yレコーダーを用いて荷重-すべり量曲線を求めた。

3) 載荷加熱引張試験 (CB1シリーズ)

作用荷重は、すべり荷重に近い荷重を作用させなければ加熱中にすべりを生じないとの報告¹⁵⁾もあるが、熱影響により摩擦面のペイント塗膜が軟化し、すべりを誘発する可能性を考慮した。BB1シリーズの結果を参考にして、試験温度は摩擦面の変化が微小と思われる200～400℃の範囲で100℃間隔とし、作用荷重は400℃のすべり荷重の約50% (14ton)を作用させた。試験体を試験機にセットし、所定荷重を作用させた状態で加熱し、試験体の中央温度が、所定温度に到達後、約1～1.5時間程度その温度にとどめた後、引張試験を行った。荷重-すべり量曲線は、昇温過程も含めてX-Yレコーダー上に記録した。なお、試験体は、各温度1体とした。

3. 実験結果および考察

各試験体種別の荷重-すべり量曲線の例をFig. 3～4に示す。図中の実線は試験体セット時の上部すべり面、点線は下部すべり面の荷重-すべり量曲線である。これらの荷重-すべり量曲線はよく類似しており、すべり初期に急激なすべりが観察され、その後、すべりは徐々に進行して支圧状態に移行していることが理解できる。また、加熱冷却後引張試験の場合、試験時にすべり音を発するものは比較的少なく、すべり音を発する場合も、かすかなすべり音にとどまった。一方、熱間引張試験の場合、試験時にすべり音を発するものは

Table 4 Chemical Compositions of Bolt-sets

	Material	Chemical Composition (%)										
		C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Cu	Ni	Cr	B
		X 100				X 1000				X 100		
Bolt	BOLTEN110N	19	19	76	22	3	54				69	20
Nut	S40C	41	19	75	20	20			1	2	14	
Washer	S45C	47	22	81	22	11				1	17	
	NSW20B	24	23	110	24	10		18				12

Table 5 Heat Treatment Conditions of Bolt-sets

	Materials	Heat Treatment	
		Quenching Temp. (°C)	Annealing Temp. (°C)
Bolt	BOLTEN110N	880	440
Nut	S40C	Forging	580
Washer	S45C	860	400
	NSW20B	880	290

Fig. 3 Examples of Load-deflection Curves for AB1 series

Fig. 4 Examples of Load-deflection Curves for BB1 series

比較的多く、特に、BB1シリーズの450～500℃の試験では、継続的なすべり音を発しながらすべりを生じた。

実験より得られたすべり試験結果をTable 6～11に示す。表中のすべり係数は見かけの摩擦係数(すべり荷重/初期ボルト軸力×4)である。ただし、新品ボルトセットに交換したAB3シリーズのすべり係数は、真の摩擦係数である。

なお、400℃以上の加熱を受けた試験体は、ボルトの焼き付きがひ

どく、解体時にボルトがねじ切れるものもあり、ボルト交換の困難さを示している。

3.1 加熱履歴を受けたボルトセット

1) ボルトセットの力学的特性

高温加熱履歴を受けたボルト（4号試験片および製品）の降伏点および引張強度と温度の関係を Fig. 5 (a) に示す。降伏点、引張強度および製品引張強度は、400℃までの加熱温度範囲では熱による影響はほとんどないことが明らかである。しかしながら、500℃加熱では無加熱のものに比べ、降伏点および引張強度ともに25%程度低下し

Table 6 Test results (AB1 series)

Temp. (°C)	Sp. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
20	1	49.5			0.570		55.0	52.7
		60.5			0.697		0.634	0.607
	2	50.6			0.583		50.8	
		50.9			0.586		0.585	
	3	51.8			0.597		53.3	
		54.8			0.631		0.614	
	46	52.8			0.608		51.9	
		50.9			0.586		0.597	
200	4	62.1			0.715		59.9	59.0
		57.6			0.664		0.690	0.680
	5	60.0			0.691		58.5	
		57.0			0.657		0.674	
	6	61.1			0.704		58.8	
		56.4			0.650		0.677	
250	7	58.0			0.668		58.7	57.7
		59.3			0.683		0.676	0.664
	8	55.7			0.642		56.5	
		57.2			0.659		0.650	
	9	58.8			0.677		57.9	
		57.0			0.657		0.667	
300	10	57.0			0.657		57.0	56.6
		56.9	S.N.		0.656		0.656	0.652
	11	56.1	S.N.		0.646		53.5	
		50.9	S.N.		0.586		0.616	
	12	54.4	S.N.		0.627		59.4	
		64.4	S.N.		0.742		0.684	
350	13	52.2	S.N.		0.601		51.9	49.0
		51.6	S.N.		0.594		0.598	0.565
	14	48.5	S.N.		0.559		47.0	
		45.4	S.N.		0.523		0.541	
	15	46.7	S.N.		0.538		48.3	
		49.8	S.N.		0.574		0.556	
400	16	37.5	S.N.		0.432		37.0	36.0
		36.5			0.421		0.426	0.414
	17	38.4			0.442		36.8	
		35.1			0.404		0.423	
	18	33.5	S.N.		0.386		34.1	
		34.7			0.400		0.393	
450	47	20.1			0.232		19.0	19.0
		17.8			0.205		0.218	0.218
500	19	10.7			0.123		11.1	11.1
		11.4			0.131		0.127	0.128
	20	11.3			0.130		12.0	
		12.6			0.145		0.138	
	21	10.3			0.119		10.3	
		10.3			0.119		0.119	

S.N: slip noise

Table 7 Test results (AB2 series)

Temp. (°C)	Sp. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
350	22	49.0		S.N.	0.533		48.0	47.7
		47.0		S.N.	0.511		0.522	0.518
	23	45.6			0.496		48.8	
		52.0		S.N.	0.565		0.530	
	24	45.3		S.N.	0.492		46.2	
		47.0		S.N.	0.511		0.502	
400	25	35.8		S.N.	0.389		36.7	35.9
		37.5		S.N.	0.408		0.398	0.391
	26	36.6		S.N.	0.398		36.6	
		36.6		S.N.	0.398		0.398	
	27	35.3			0.384		34.6	
		33.8			0.367		0.376	
450	48	18.2			0.198		17.6	17.6
		17.0			0.185		0.191	0.191

S.N: slip noise

Table 8 Test results (AB3 series)

Temp. (°C)	Sp. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
200	28	63.8			0.735		62.9	63.0
		62.0			0.714		0.725	0.726
	29	65.3			0.752		63.6	
		61.8			0.712		0.732	
	30	63.7			0.734		62.6	
		61.5			0.709		0.721	
250	31	64.1			0.738		64.3	63.9
		64.5			0.743		0.741	0.737
	32	61.4			0.707		62.2	
		63.0			0.726		0.717	
	33	67.7			0.780		65.3	
		62.9			0.725		0.752	
300	34	63.5			0.732		63.7	64.5
		63.8			0.735		0.733	0.743
	35	64.7			0.745		64.7	
		64.7			0.745		0.745	
	36	64.9			0.748		65.2	
		65.4			0.753		0.751	
350	37	62.9			0.725		63.3	63.4
		63.6			0.733		0.729	0.730
	38	63.9			0.736		64.2	
		64.4			0.742		0.739	
	39	61.9			0.713		62.8	
		63.6			0.733		0.723	
400	40	63.2			0.728		63.4	64.2
		63.6			0.733		0.730	0.739
	41	66.5			0.766		66.2	
		65.8			0.758		0.762	
	42	62.8			0.724		62.9	
		63.0			0.726		0.725	
500	43	53.8			0.620		49.9	50.0
		45.9	S.N.		0.529		0.574	0.576
	44	52.5			0.605		51.2	
		49.8			0.574		0.589	
	45	51.5	S.N.		0.593		49.0	
		46.5	S.N.		0.536		0.565	

S.N: slip noise

Table 9 Test results (BB1 series)

Temp. (°C)	SP. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
150	19	49.7			0.573		49.4	49.4
		49.1			0.566		0.569	0.569
200	1	51.4			0.592		50.6	50.1
		49.8			0.574		0.583	0.578
	2	53.6			0.618		50.1	
		46.5			0.536		0.577	
	3	50.6			0.583		49.8	
		48.9			0.563		0.573	
250	4	48.6			0.560		49.2	49.3
		49.8			0.574		0.567	0.567
	5	49.3		S.N.	0.568		49.3	
		49.3		S.N.	0.568		0.568	
300	7	45.2		S.N.	0.521		45.2	43.9
		45.2			0.521		0.521	0.505
	8	40.5			0.467		42.6	
		44.6		S.N.	0.514		0.490	
350	10	39.5		S.N.	0.455		39.9	39.7
		40.3		S.N.	0.464		0.460	0.457
	11	38.7		S.N.	0.446		39.4	
		40.1		S.N.	0.462		0.454	
400	13	29.3			0.338		29.3	29.3
		29.3		S.N.	0.338		0.338	0.338
	14	29.3		S.N.	0.338		29.3	
		29.3		S.N.	0.338		0.338	
450	20	18.8		I.S.N.	0.217		18.8	18.8
		18.8		I.S.N.	0.217		0.217	0.217
500	16	10.9		I.S.N.	0.126		10.2	10.3
		9.4		I.S.N.	0.108		0.117	0.118
	17	10.7		I.S.N.	0.123		10.4	
		10.1		I.S.N.	0.116		0.120	

S.N: slip noise

I.S.N: intermittent slip noise

Table 10 Test results (BB2 series)

Temp. (°C)	Sp. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
300	21	46.5		S.N.	0.505		44.1	44.1
		41.6		S.N.	0.452		0.479	0.480
	22	45.5		S.N.	0.495		44.2	
		42.9		S.N.	0.466		0.480	
350	23	42.2		S.N.	0.459		41.8	40.2
		41.3		S.N.	0.449		0.454	0.437
	24	39.9		S.N.	0.434		38.6	
		37.3		S.N.	0.405		0.420	
400	25	29.0		S.N.	0.315		28.9	28.5
		28.8			0.313		0.314	0.309
	26	28.1			0.305		28.0	
		27.9		S.N.	0.303		0.304	
450	27	20.3			0.221		19.1	19.1
		17.9			0.195		0.208	0.208

S.N: slip noise

Table 11 Test results (CB1 series)

Temp. (°C)	Sp. No.	Slip Load (ton)		Slip Noise	Slip Coefficient		Mean Values	
		Upper	Lower		Upper	Lower	Slip Load (ton)	Slip Coefficient
200	18	51.8			0.597		49.7	49.7
		47.5			0.547		0.572	0.572
250	6	47.5		S.N.	0.547		47.5	47.5
		47.5			0.547		0.547	0.547
300	9	45.9			0.529		45.9	45.9
		45.9		S.N.	0.529		0.529	0.529
350	12	39.2			0.452		39.2	39.2
		39.2		S.N.	0.452		0.452	0.452
400	15	30.9		S.N.	0.356		30.9	30.9
		30.9		S.N.	0.356		0.356	0.356

S.N: slip noise

ている。

高温加熱履歴を受けたボルトセットの伸びおよび絞りとの関係を Fig. 5(b)に示す。伸びおよび絞りは、400℃までの加熱温度範囲では熱による影響はほとんどないことが明らかである。しかしながら、500℃加熱では無加熱のものに比べ、伸びは約26%、絞りは約10%程度増加しており温度の影響を受けている。

高温加熱履歴を受けたボルトセットの力学的特性の温度依存性は、ボルトの焼き戻し温度 (Table 5 参照) との関係より妥当なものであり、400℃までの熱履歴ではボルト自体の力学的性質にあまり影響はないが、500℃程度の熱履歴を受けるとボルトの健全性がかなり損なわれることを示している。

2) ボルトセットの硬度

高温加熱履歴を受けたボルトおよびナットの硬度試験結果を Fig. 6(a)に示す。ボルトの硬度は400℃までの加熱温度範囲では熱による影響はほとんど受けていないが、500℃加熱では無加熱のものに比べ、30%程度低下している。また、ナットの硬度は、500℃加熱においてもなお熱による影響はほとんど受けていない。

高温加熱履歴を受けた座金の硬度試験結果を Fig. 6(b)に示す。

座金の硬度は、S45C の場合、400℃までの加熱温度範囲では熱による影響はほとんど受けていないが、500℃加熱では無加熱のものに比べ、20%程度低下している。しかしながら、NSW20B 材の座金で

Fig. 5 Mechanical Properties of Bolt-sets subjected to high temperatures

は、350℃においても無加熱のものに比べ約20%程度低下しており、より低い温度から熱による影響を受けている。

高温加熱履歴を受けたボルトセットの温度依存性は、ボルト・ナット・座金の焼き戻し温度 (Table 5 参照) との関係より妥当なものと考えられる。

3.2 加熱冷却後引張試験

AB1シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(a)に示す。

AB1シリーズの200～300℃の範囲における平均すべり係数は、無加熱試験の場合に比べ、約10%前後の増加している。その後の平均

Fig. 6 Hardness of bolt-sets subjected to high temperatures

すべり係数は、350°Cで7%程度の低下であるが、300~500°Cの高温領域側では550°Cを零とする直線に沿って急激に低下する。

AB2シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(a)に重ねて示す。AB2シリーズの350~450°Cの範囲における平均すべり係数は、AB1シリーズの場合と同様に550~600°Cを零とする直線に沿って急激に低下する。平均すべり係数は、AB1シリーズの場合に比べ、350°C加熱で約8%程度、400°C加熱で約5%程度低めの値となっている。この原因として、座金および初期ボルト軸力の相違による影響が考えられるが、座金はかなり拘束されており、変形しにくい状況にあるものと考えられるので、初期ボルト軸力の大きさの差によるリラクセーション量の相違の影響が大きいものと考えられる。

AB3シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(c)に重ねて示す。AB3シリーズは、新品ボルトセットに交換して、ボルトの導入軸力を明確にしているため、ボルトセットの熱履歴が除去されており、真の摩擦係数が得られている。平均すべり係数は、200~400°Cの温度範囲において、約0.74程度の高い値を、500°Cにおいても無加熱試験の結果と大差のないすべり係数(約0.57)を有しており、規定値0.45を十分満足している。

また、Fig. 7(c)に示した AB3シリーズと AB1シリーズの差は新品ボルトセットに交換したことによるものであり、ナット、座金および接合部材の局所的な変形の影響は比較的小さいことが予想されることから、田中らの研究^{14,15)}で指摘されているように、主なすべり耐力低下の原因はボルトのクリープひずみに起因する応力緩和であるものと考えられる。

3.3 熱間引張試験

BB1シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(b)に示す。

Fig. 7 Slip coefficient versus temperatures

BB1シリーズの150~250°Cの範囲における平均すべり係数は、無加熱試験の結果に比べ、約6%程度減少している。その後の平均すべり係数は、300°Cで17%程度の低下であるが、300~500°Cの高温領域側では550°Cを零とする直線に沿って急激に低下する。

BB2シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(b)に重ねて示す。BB2シリーズの300~450°Cの範囲における平均すべり係数は、BB1シリーズの場合と同様に550°Cを零とする直線に沿って急激に低下する。平均すべり係数は、BB1シリーズの場合に比べ、約5~9%程度低めである。この原因は、先に述べたように、初期ボルト軸力の大きさの差によるリラクセーション量の相違の影響が大きいものと考えられる。

CB1シリーズのすべり係数と温度の関係を Fig. 7(b)に重ねて示す。CB1シリーズは、加熱過程に作用荷重の影響を受けて、すべりを生じることにはなかった。平均すべり係数は、BB1シリーズの約±5%程度の差であり、実験誤差を考慮すれば有意差はない。なお、すべり性状はBB1シリーズと同様であり、すべり初期に急激なすべりを生じることから、すべり荷重に近い作用荷重が働かなければ、加熱過程にすべりを生じることはないものと考えられる。

また、Fig. 7(c)に示した BB1シリーズと AB1シリーズの結果の差は、熱間における接合材およびボルト材のヤング率の低下、接合材の引張力に対する細りやすさ、摩擦面の变化などが考えられるが、材料の力学的性質があまり変化しない温度範囲(300°C以下)においても、かなりの差を生じている。したがって、熱間の摩擦面は、冷却後のものと比較し、かなり異なった性状を示すものと考えられる。また、試験体の解体後の摩擦面は、450および500°C加熱の場合、2つのボルト孔を囲む形状で変色していた。この点に関する詳細は後節で述べる。

加熱中のすべり耐力 (Table 9~11 参照) は、常温時の高力ボルト2本分の2面せん断面の設計に用いるすべりに対する長期許容耐力²⁾ ($Rsa = m\mu N_t / \nu = 24.6 \text{ ton}$) と比べると、400°C加熱の場合、この値を約16%程度上回っており、400°C加熱以下であれば、火災中にすべりは生じ難いものと考えられる。

3.4 既往の実験結果との比較

既往の研究のうち、すべり係数が明らかにされているものを整理し、本論の実験結果と比較して、Fig. 8に示した。なお、本研究における使用ボルトはF10Tボルトであるが、既往の研究における実験結果にはF11Tボルトのものも含めて示した。

Fig. 8 Comparison with the research result of the bygones

加熱冷却後引張試験の場合、すべり係数の温度依存性の傾向は、既往の実験結果の下限値をたどる傾向を示している。また、熱間引張試験の場合、すべり係数の温度依存性の傾向は、既往の実験結果のほぼ中央値に近い値をたどる傾向を示している。

新品ボルトセットに交換した試験体およびボルトの締め直しを行った試験体の引張試験の場合、すべり係数の温度依存性の傾向は、既往の実験結果の下限値をたどる傾向を示している。しかしながら、200~400 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲におけるすべり係数は、無加熱の値より21%高いすべり係数値を示しているが、500 $^{\circ}\text{C}$ では無加熱の値より約20%程度低下している。この実験ではボルトの初期導入軸力は明確にされているので、加熱による無機ジンクリッチペイント塗装面の劣化が摩擦係数の低下の原因となっていることは明らかである。

3.5 摩擦面の塗膜について

厚膜型ジンクリッチペイント塗膜厚測定結果を Fig. 9 に示す。

道路橋示方書によれば、ペイント塗膜厚は、1) 接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚30 μm 以上、2) 接触面の合計乾燥塗膜厚90~200 μm の条件が規定されている。本研究に使用した試験体の塗膜厚測定結果は、この条件を十分満足している。

すべり試験後に撮影した試験体摩擦面の状態の例を Photo. 1 に示す。加熱後の摩擦面はやや黒ずんだ表面をしており、ボルト・ネジ部についても同様な状態であった。これはボルトセットの油や表面処理剤などが、炭化したものと考えられる。摩擦面のペイントは、150~400 $^{\circ}\text{C}$ 加熱のものではやや退色しており、引き剥がされたような表面をしている。なお、ペイントの塗膜強度および付着力の劣化はない。これに対し、450および500 $^{\circ}\text{C}$ 加熱の場合、まったく異なったものとなっている。450 $^{\circ}\text{C}$ 加熱での摩擦面のペイントは、2つのボルト孔を囲み、くびれのある卵形で薄茶褐色に変色しており、卵形内部の塗膜は脆く、粉状である。卵形外部のペイントは退色しているが、塗膜強度および付着力の劣化はない。500 $^{\circ}\text{C}$ 加熱での摩擦面のペイントは、くびれのある卵形の輪郭部は白く、その内部は茶褐色に変色している。輪郭部の白い部分および内部の茶褐色の部分ともに塗膜は脆く、粉状である。卵形外部のペイントは退色しているが、塗膜強度および付着力の劣化はない。

加熱を受けた試験体から採取した塗膜を酸(硝酸:塩酸=1:3)で溶解し、原子吸光法で分析した結果を整理して Table 12 に示す。なお、無機質ジンクリッチペイントの塗膜成分は、重量百分率で亜

鉛粉末(平均粒径5 μ) 80Wt%, シリカ系顔料 13Wt%, エチルシリケート7Wt%である。

Table 12 より、摩擦面外部の亜鉛量は、熱影響を受けていない塗膜の亜鉛量80%に比べ少ないものの極端な変化はない。しかし、輪郭部から内部へと、亜鉛量は極端に減少し、酸不溶物が増加している。なお、酸不溶物は、赤外線分析の結果シリカ(SiO_2)であった。これらの分析結果より、摩擦面の輪郭部および内部の塗膜が劣化し、粉状になったのは、塗膜中のエチルシリケートがシリカに変化したものと考えられる。また、摩擦面の内部が茶褐色に変色したのは鉄の酸化物生成によるもので、輪郭部が白く変色したのは亜鉛の酸化と考えられる。

亜鉛量は輪郭部および内部で少なくなっているが、外部の亜鉛量から判断すると、消失したものとは考えにくい。それゆえ、詳細は不明であるが、輪郭部および内部でシリカが多いことから、大部分の金属亜鉛が酸に溶けないシリカによって被覆され、分析上亜鉛が検出できなかった可能性が考えられる。

4. まとめ

本論文では、道路橋示方書の規定に従って、厚膜型無機ジンクリッチペイントを摩擦接合面に塗布した高力ボルト摩擦接合継手の熱間

Fig. 9 Paint thickness of Butt and Splice Plates

Table 12 The analysis result by the atomic absorption method

Temp. (°C)	Picking surface	Picking position	Wt(%)		
			Zn	Fe	Insoluble residue
500	FS	Inside	18.9	9.3	68.8
		Contour	36.3	16.5	53.8
		Outside	63.2	0.6	18.5
	UFS	Outside	66.1	0.3	16.3
450	FS	Inside	26.3	6.7	61.5
		Outside	70.3	1.4	18.8
	UFS	Outside	67.1	1.0	19.1

FS: Friction surface

UFS: Unfriction surface

Photo. 1 Fraying surfaces after heating

および加熱冷却後のすべり耐力試験を行い、その高温性状を実験的に明らかにした。得られた主な結論は次のとおりである。

- 1) 加熱冷却後引張試験体の摩擦係数は、新品ボルトに交換した試験結果から真の摩擦係数が得られており、200～400℃の温度範囲では、すべり係数は0.7以上が確保できる。
- 2) 熱間引張試験体の摩擦係数は、接合材およびボルト材の力学的性質があまり変化しない温度範囲(300℃以下)においても、かなりの差を生じていることから、加熱中の摩擦面は加熱後と比較し、かなり異なった性状を示すものと考えられる。
- 3) 摩擦面のペイントは450℃以上の加熱をうけると、ボルト周りの軸圧の影響を強く受ける部分は劣化が著しく、粉末状となり、摩擦係数の低下に影響を及ぼす。

- 4) 実験結果から、高力ボルト摩擦接合部が高温熱履歴を受けた場合の再使用可能な最高部材温度は、350℃とするのが適当と考えられる。ただし、ボルトの交換を前提とすれば、この温度を400℃とすることも可能であるが、この場合、加熱によるボルトとナットの焼き付きのため、ボルトの交換作業が困難なものとなる。

謝辞

本研究の機会を与えて下さいました名古屋高速道路公社の関係者の皆様に心より感謝いたします。

また、試験体の製作には三菱重工業株式会社の方々に、組立の際には日鐵ボルト株式会社の方々にご協力いただきました。ここに記して心より謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 (JASS 6), 1996
- 2) 日本建築学会：高力ボルト接合設計施工指針, 1997
- 3) 石沢成夫, 多田 修, 伊東 孝：塗膜, 溶射膜を接合面にもつ高力ボルト継手の耐力, 土木技術, 28巻7号, pp.53-60, 1973.7
- 4) 山本善行, 久保 操：接合面にジンクリッチペイントを塗装した摩擦接合継手のすべり試験, 橋梁と基礎, pp.14-18, 1978.3
- 5) 篠原洋司, 西川和廣, 田中良樹：無機ジンクリッチを塗布した高力ボルト摩擦接合継手すべり耐力実験と塗装使用案, 土木技術資料, 第29巻, 第1号, pp.37-42, 1987
- 6) 藤原 稔, 村越 潤, 田中良樹：高力ボルト摩擦接合継手に関する試験調査—接合面に無機ジンクリッチペイントを塗布した継手の耐力等(その2), 土木研究所資料, 第2796号, 1989.8
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 1991年
- 8) 五十嵐定義, 脇山広三, 勘坂幸弘, 藤澤一善：摩擦面にジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合部のすべり実験およびラクセーション実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.449-452, 1984.6
- 9) 脇山広三, 菊川春三, 勘坂幸弘, 八木 毅：摩擦面にジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩擦接合部のすべり実験およびラクセーション実験(塗膜厚の影響について), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.533-536, 1985.5
- 10) 堀園義昭, 平井敬二, 福田 章：ジンクリッチペイントを施した高力ボルト摩擦接合部のすべり試験(その1：実験概要, その2：結果及び考察), 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.1625-1628, 1992.8
- 11) 斎藤 光, 前川修二, 安藤三郎：ボルト摩擦接合継手の耐火性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.891-892, 1968.10
- 12) 北後 寿, 木村栄一, 松下一郎：高力ボルト摩擦接合法の耐火性能に関する実験(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.893-896, 1968.10
- 13) 藤本盛久, 北後 寿, 古村福次郎：高力ボルト摩擦接合継手の耐火性能に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第184号, pp.17-28, 1971.6
- 14) 田中淳夫, 小久保勲, 古村福次郎：高温加熱を受けた高力ボルト摩擦接合部の性状について, 日本建築学会論文報告集, 第252号, pp.45-56, 1977.2
- 15) 田中淳夫, 小久保勲, 古村福次郎：高力ボルト摩擦接合継手の高温加力試験, 日本建築学会論文報告集, 第286号, pp.13-21, 1979.12

(1999年9月10日原稿受理, 1999年11月18日採用決定)