

摩擦接合面の塗装について

大阪第3建設部 南港工事事務所 大志万 和 也

まえがき

一般に高力ボルトの摩擦接合面は、所定のすべり係数を確保するために塗装を施さないのが従来の方法であるが、「道路橋示方書」の改定（昭和55年2月）や本四公団の基準でも見られるように、最近の大型橋梁においては所定のすべり係数を確保できるならば、接合面に塗装を施すことを認める実例が多く見られるようになった。

大阪湾岸線大和川橋梁においても、工場製作が完了してから高力ボルト施工まで1～2年工場保管を行う必要があり、接合面のすべり耐力を保持するために、なんらかの対策を検討することになった。従来のように接合面を無塗装とした場合、次のような問題の発生が考えられた。

- ① 接合面に浮錆が発生し、正常な摩擦面の保持が困難であり、一定のすべり係数の確保が困難である。
 - ② 接合面より発生した錆が降雨などにより、塗装された部材を著しく汚染する。
 - ③ 部材発送前に浮錆を清掃する場合、添接板の数も多く多大の労力を要する。
 - ④ スプライス・プレートに塗装をしていない現場継手部は、現地塗装の際ケレン作業もやりにくいところであり、塗装上の欠陥となり易い。
- 上記の問題点を解決するため、過去に多くの実例があるジンクリッチ系ペイントを接合面に塗装することを検討し、その場合のすべり係数値の確認を行うこととした。

1. 試験要領

1-1 試験体の形状および寸法

試験体の形状および寸法を表-1および図-1に示す。使用高力ボルトはM22（F10T）、ボルト長さは85mmである。

表-1

	材 質	板 厚	降伏点	引張強さ
母 材	SM 50	22 (mm)	32 (MPa)	50 (MPa)
スプライス	SM 50	12	33	50 (MPa)

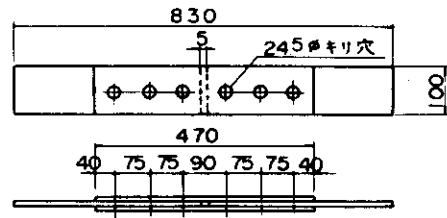


図-1 試験体の形状

1-2 塗 装

試験体加工後、サンド・ブラスト（試験1のみ）およびグリッド・ブラストで表面処理を行い塗装を行った。塗膜厚は塗膜乾燥後（塗装完了より約10日後）ケット電磁式微厚計にてボルト穴周辺を4点測定し、その平均を膜厚とした。

1-3 すべり試験

すべり試験は200tアムスラー万能試験機により行った。また、すべり点の確認にはアムスラー荷重計とグリッパ・ゲージをセットしX-Yレコーダーによる読みとを用いた。

1-4 ボルト軸力の測定

計測は高力ボルトの頭にストレンゲージを貼り

付け、そのボルト軸力の開放前と開放後とのひずみ差を計測し、さらに開放後そのボルトを使用してひずみ一軸力(ε-N)の特性曲線を作成し、開放前と開放後とのひずみ差よりボルト軸力を推定する方式とした。各ボルトのひずみ一軸力特性値はスキッドモアー型軸力計を使用し、ストレン・ゲージを貼り付けたボルトをハイドロ・トルク・レンチにより締付け、軸力計の表示軸力とワイヤー・ストレン・ゲージのひずみ値を測定しグラフにプロットした。

1-5 くり返し荷重の載荷

くり返し回数は200万回を採用し、くり返し載荷速度は毎分450とした。くり返し荷重の上限値は、目標締付力(NB=22.6t)に対する設計耐力(すべり係数 $\mu=0.4$ を採用)の20.0tとした。また、下限値は疲労試験機の性質上(供試体がチャックよりはずれないため)より3.5tとした。200万回のくり返し荷重載荷後、アムスラーにより静的すべり耐力を計測した。

2. 試験結果

試験は5段階に別けて行った。以下にその試験目的と結果を述べる。

2-1 試験(その1)

本試験は、母材と添接板の塗装仕様の組合せをいくつか想定し、その場合のすべり係数を確認するとともに、次の点を重視した予備的試験である。

- ① ショップ・プライマー(無機ジンクリッチ・ペイント15 μ)のままですべり係数0.4を確保できないか。
- ② 有機ジンクリッチ・ペイントを塗布した場合、すべり係数を確保できるか。
試験結果をまとめると以下になる。
 - ① ショット・ブラストしたままの無塗装の場合、すべり係数は0.4を確保している。
 - ② 一般的な有機ジンクリッチ・ペイントの組合せでは、すべり係数0.4を確保することは難しい。

- ③ 無機ジンクリッチ・ペイントについて、2種類の塗料について試験をしたが0.4は確保できなかった。

本試験の結果ではブラストしたままの無塗装以外にはすべり係数0.4を確保できなかったため、0.4を確保できる塗装系を見い出すべく次の試験(その2)を実施した。

2-2 試験(その2)

本試験では次の点を重視して試験を行った。

- ① 塗料のいかなる要因がすべり係数の向上に役立つか。
- ② 有機ジンクと無機ジンクの間ですべり係数に対する優劣があるのかないのかを確認する。
- ③ 塗膜厚とすべり係数の相関性を調べる。
試験結果を表-2に示す。これにより以下のようなことがいえる。
 - ① 無機ジンクの方が有機ジンクよりすべり係数値が高い。
 - ② 無機ジンクは、どのケースでもすべり係数0.4を確保しているが有機ジンクでは0.4を割っているケースもある。
 - ③ 顔料の粒子を大きくした場合、無機ジンクでは塗料面の粗度が粗くなり、すべり係数も大きくなっているが、有機ジンクでは大きな変化はない。
 - ④ 塗料中の亜鉛顔料の含有を増加させると、すべり係数が大きくなる。
 - ⑤ 塗膜厚が厚い方がすべり係数が大きくなる。
本試験の結果、有機ジンクではすべり係数0.4の確保が難しいので無機ジンクに的を絞って次の試験(その3)を実施することにした。

2-3 試験(その3)

本試験は、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(その2)の結果を考察し、無機ジンクリッチ・ペイントを塗装した摩擦接合継手の方がすべり係数が高いとの結論に達したので、集中的に無機ジンクの塗膜厚の組合せによる試験を行った。また、現状に合致したボルト穴周辺の塗膜が劣化し発錆が生じた試

表-2 試験(その2)結果

塗料	塗料の特徴	母材目標膜厚	平均膜厚	接合部目標膜厚	平均膜厚	摩擦係数	平均摩擦係数
無機ジंक ZR-OL-HB-EX1	粒子径の大きい亜鉛末を使用 (平均7 μ)	30 μ	58	30 μ	71	0.511	0.520
			54		65	0.528	
"	"	75	96	75	100	0.541	0.600
			95		102	0.658	
ZR-OL-HB-EX2	粒子径の大きい亜鉛末体質顔料を使用(平均7 μ)	75	80	75	82	0.472	0.517
			74		85	0.561	
ZR-OL-HB-EX3	樹脂の重合度アップ 粒子径の大きい亜鉛末使用	75	85	75	104	0.582	0.565
			81		94	0.549	
CARBOZINC#11	現行品(厚膜タイプ)	75	72	75	72	0.454	0.479
			70		71	0.503	
ジンキ 1000P	現行品	30	49	30	38	0.427	0.425
			49		36	0.423	
ジンキ 1000P	"	15	23	75	147	0.461	0.481
			22		159	0.500	
ジンキ 1000QC	"	75	54	75	58	0.408	0.422
			53		69	0.436	
有機ジंक ZR-EP2-HB-EX1	粒子径の大きい亜鉛末を使用 (平均7 μ)	30	49	30	56	0.361	0.369
			49		50	0.376	
"	"	75	83	75	79	0.433	0.433
			86		84	0.433	
ZR-EP2-HB-EX2	白セメント添加(3%) 粒子径の大きい亜鉛末を使用	75	72	75	79	0.430	0.449
			77		82	0.468	
ZR-EP2-HB-EX3	塗膜中の顔料 %UP	30	42	30	55	0.396	0.473
			42		50	0.549	
"	"	75	65	75	64	0.356	0.374
			73		51	0.393	
ZR-EP2-HB-EX4	樹脂の重合度 UP 粒子径の大きい亜鉛末使用	30	47	30	62	0.366	0.365
			52		51	0.364	
"	"	75	87	75	79	0.596	0.507
			81		80	0.418	
ジンキ 8000HB	現行品	75	66	75	69	0.398	0.420
			63		71	0.441	

験片を作成し、そのすべり試験を同時に行った(表-3、図-2)。その結果をまとめると以下のようなになる。

- ① 無機ジंकリッチ・ペイントの場合、前回の試験同様すべり係数は0.4を確保しており、平均して0.5程度が下限値である。
- ② 接合面の塗膜厚の変化による影響については、塗膜厚が厚いほどすべり係数は大きくなる傾向にあるが、合計膜厚が70 μ ~270 μ 程度にばらついていてもすべり係数値はあまり大きく変化していない。
- ③ 塗料メーカーによる差が多少出ているが、これは塗料中の亜鉛粒子の大きさによるものと推定される。しかし、どちらも0.5~0.6の間であり実質上問題ないと考えられる。

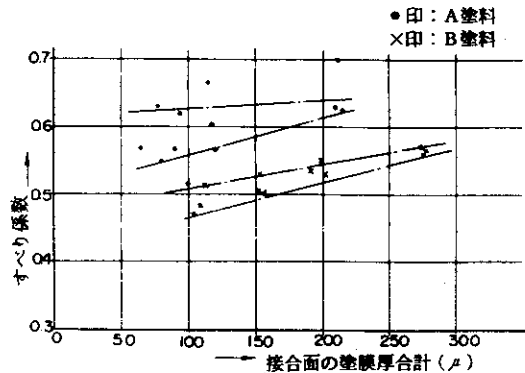


図-2 塗膜厚とすべり係数の関係

- ④ 孔明け加工時に生じる孔周辺の塗膜の劣化によるすべり係数への影響については、スプライス側の塗膜が正常であればすべり係数はそれほど大きく影響を受けることはない。
- ⑤ ボルト軸力の減少は、締付直後は急激に変化

表-3 試験(その3)結果

*塗料はすべて無機ジंक

CASE	供試体 NO	塗 装						すべり点 軸 力	摩 擦 係 数	平 均 摩 擦 係 数	備 考	
		母 材			添 接 板							
		塗 料	目標膜厚	平均膜厚	塗 料	目標膜厚	平均膜厚					
1	1-A	ZR-OL	15	20	ER-OL-HB	40	58	57.3 ¹⁰⁰	0.628	0.581	CASE 1, 3, 5, 7, 塗 装 S54.7, 14 締 付 54.8, 2 試 験 54.8, 7 導入軸力 228 [†]	
	1-B			17			68	50.0	0.548			
	1-C			13			51	51.8	0.568			
2	2-A	1000P	15	31	1000QC	40	76	432	0.472	0.491		
	2-B			32			86	44.4	0.485			
	2-C			32			89	47.2	0.515			
3	3-A	ZR-OL	15	16	ER-OL-HB	75	78	56.6	0.621	0.569		CASE 2, 4, 6, 8, 塗 装 S54.7, 19 締 付 54.8, 7 試 験 54.8, 11 導入軸力 229 [†]
	3-B			14			86	47.2	0.518			
	3-C			14			76	51.7	0.567			
3A	3A-A	〃	15	14	〃	75	71	56.1	0.632	0.651		
	3A-B			13			77	60.2	0.678			
	3A-C			12			77	57.0	0.642			
4	4-A	1000P	15	31	1000QC	75	121	46.5	0.508	0.516	CASE 3A・4A 塗 装 S54.7, 14 締 付 54.9, 18 試 験 54.9, 22 導入軸力 222 [†]	
	4-B			31			127	49.0	0.535			
	4-C			29			127	46.2	0.504			
4A	4A-A	〃	15	30	〃	75	120	51.5	0.580	0.544		
	4A-B			29			111	47.4	0.534			
	4A-C			32			96	46.0	0.518			
5	5-A	ZR-OL	15	13	ZR-OL-HB	145	122	56.0	0.614	0.616		CASE 3A・4Aはホルト 穴周辺の塗膜が劣化したもの
	5-B			14			124	51.6	0.566			
	5-C			14			115	60.8	0.667			
6	6-A	1000P	15	33	1000QC	145	171	48.9	0.534	0.541		
	6-B			33			164	50.6	0.552			
	6-C			32			152	40.2	0.537			
7	7-A	ER-OL	15	14	ER-OL-HB	215	219	47.1	0.626	0.653	供試体ボルト締付位置 可動 固定 CASE 1, 3, 3A, 5, 7 CASE 2, 4, 4A, 6, 8	
	7-B			13			211	64.2	0.704			
	7-C			13			207	57.5	0.630			
8	8-A	1000P	15	31	1000QC	215	247	51.7	0.564	0.564		
	8-B			22			244	51.4	0.561			
	8-C			32			242	52.0	0.568			

するが、2~3時間経過すると減少率も落ちつく。しかしながら、24時間経過後も完全には減少が止まることはない(図-5参照)。

2-4 試験(その4)

試験は、塗膜面(すべり面)を3か月、6か月間屋外に曝露したものを高力ボルトで締付け、すべり試験を行うとともに、高力ボルト締付後3か月、6か月放置したものについて軸力の低下およびすべり耐力の変化について合せて調査した。

試験体の塗膜厚は母材をすべて15μとし、添接板を40μ、75μ、145μ、215μとしそれぞれ2社の塗料メーカーの塗料を使用した。

(1) 塗膜曝露の影響

塗装完了後、塗膜を屋外に曝露した場合のすべり係数の変化について考察する。この実験は

工場塗装完了後現地発送までの工場仮置を想定したものである。図-3より次のことが考察できる。

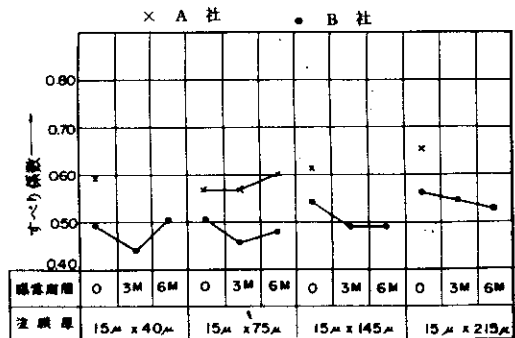


図-3 塗膜を曝露した場合のすべり係数の変化

- ① 塗装面を長期間屋外に曝露した場合、すべり係数は横ばい、または幾分減少する傾向にある。
- ② 曝露したことによってすべり係数が減少する

原因としては、塗膜の表面硬化が進行し、塗膜間のなじみが悪くなるためだと考えられる。しかし、この傾向は3か月経過時点で塗膜は完全に硬化状態に入っているため、その後のすべり係数はほぼ一定となっている。

- ③ すべり係数の減少幅は多少ばらつきはあるが0.05～0.1の範囲であり、すべり係数0.4は十分確保されている。

(2) ボルト締付後の曝露

ボルト締付直後(2日程度経過)および3か月、6か月放置した場合のすべり係数の経時変化を図-4に示す。このことより次のことが考察できる。

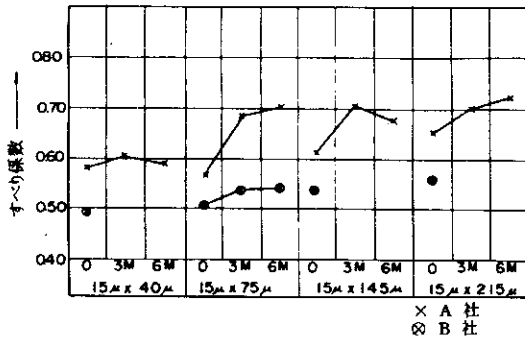


図-4 すべり係数の変化

- ① ボルトを締付けたまま放置した場合、すべり耐力は著しく増大する。経時変化による軸力の減少を加味すると(2-4.3参照)、実際のすべり係数はさらに増大していることになる。
 - ② 塗膜厚との関係に着目すると、塗膜厚が厚いほど、時間の経過とともにすべり耐力は増加する傾向にある。ただし、塗膜が75μ程度で横ばいとなりそれ以上厚くても増加率は同程度である。
 - ③ 時間とともにすべり耐力が増加するのは、接合面の塗膜が時間の経過とともに密着度が增大するためと考えられる。
 - ④ 塗料による差が多少表われているが、いずれの結果もすべり係数0.4を十分に確保している。
- (3) ボルト軸力の経時変化

図-5はボルト軸力の経時変化を膜厚別にまとめたものである。

- ① ボルト軸力は3か月後、6か月後も僅かなが

ら減少を続けている。その減少率の変化は塗膜厚の大きいほど大きい。

- ② 基準塗膜厚を15μ×75μと考えると3か月後で10%程度、6か月で約14%の軸力の減少がある。

- ③ 軸力の減少率が塗膜厚に比例しているところから考えて、その原因はボルト自身のクリープよりはむしろ接合面の塗膜のなじみによるところが大きいと考えられる。

本実験のすべり係数の値はすべてボルト締付時の導入軸力で計算している。したがって、経時変化による軸力の減少は、継手部のすべり耐力の減少には直接結びつかず、今回の試験ではむしろ増大する傾向を示している。

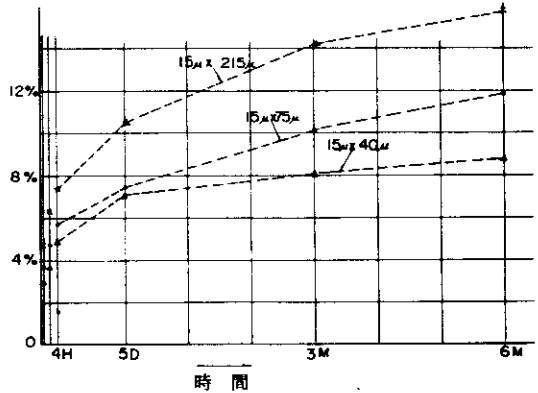


図-5 軸力の減少率

2-5 試験(その5)

200万回のくり返し荷重載荷後アムスラーにより静的すべり耐力を計測した。

ボルト締付直後のすべり係数とくり返し荷重載荷後のすべり係数値を整理すると表-4のようになる。この表より次のことが考察できる。

表-4 すべり係数の比較

使用塗料		基準膜厚	実測膜厚	ボルト締付直後	くり返し荷重載荷後	
①	母材	ZR-OL	15μ	34μ	0.569	0.611
	添接板	ZR-OL-HB	75	69		
②	母材	1000P	15	33	0.516	0.510
	添接板	1000QC	75	104		
平均				0.543	0.561	

- ① くり返し荷重載荷後も、すべり係数の減少は

なくボルト締付け直後のすべり係数と変化がない。

- ② くり返し荷重載荷時、本体とスプライスとの応力差によるずれが発生しているが、このひずみは荷重による弾性変形と考えられ、接合面の

3. 結 論

以上、5つの試験を行った結果をまとめると次のことが明らかとなった。

- ① 摩擦接合面に無機ジンクリッチ・ペイント塗布しても、すべり係数0.4は十分確保できる。ただし、ショップ・プライマー（無機ジンクリッチ15 μ ）のままでは、すべり係数が0.32～0.35程度であり、母材と添接板の合計膜厚としては80 μ は最少必要と考えられる。また、80 μ 以上の膜厚を保持しておれば、長期間塗料を曝露したり、高力ボルトを締付けた後長期間放置した場合も、すべり係数値は0.4を確保できる。
- ② 無機ジンクリッチ・ペイントを塗布した接合面は、くり返し荷重を受けた後もすべり係数は0.4を確保している。
- ③ 有機ジンクリッチ・ペイントの場合、条件によっては0.4を確保できるが、無機ジンクリッチ・ペイントに比べるとすべり係数は小さい。

あとがき

高力ボルトによる摩擦接合面の実験を1年余りにわたって行ってきたが当初目的としたショップ・プライマーのままの接合や、有機ジンクリッチ・ペイントによる接合面は現在の塗料では不可能であった。今後は塗装を行った接合面のすべりに関するメカニズムの研究が進められ、更に合理的な塗料の開発がすすめられる必要がある。しかし、今回は今までほとんど実施されていなかったくり

返し荷重に十分耐える機械的性質（強度的なもの）を有している。すなわち、ジンクリッチ・ペイントはくり返し荷重に対して十分な耐力を有する継手性能を確保できる塗装と考えられる。

- ④ 塗膜のすべり係数に影響を及ぼす因子としては次のものが考えられる。
- a) 素地調整の粗度は粗い方がよい（サンド・ブラストよりグリッド・ブラストの方が粗度が粗くすべり係数は高い）。
- b) 塗料中の亜鉛粒子を大きくすると、塗装面の粗度も粗くなり、すべり係数が大きく出る。
- c) 塗膜のせん断強度は強い方がよい。
- ⑤ 軸力減少は塗膜厚が厚い方が大きく、締め付け後6か月で13%～15.5%程度であるがすべり耐力の減少には結びつかない。

以上のような結果により、本工事においては、本体はショップ・プライマー（無機ジンクリッチ15 μ ）のままとし、スプライス・プレートの接合面のみを無機ジンクリッチ・ペイントを75 μ 塗布し、添接面の防錆とすべり係数の確保を図った。

返し荷重を受けた接合面に関する実験を行い、無機ジンクリッチ・ペイントはくり返し荷重に十分耐え得る強度を保持していることを明確にしたのは意義があったと考えられる。最後に、本実験に関し種々の助言をいただいた神戸大学西村昭教授ならびに実験を行っていただいた三菱重工業神戸造船所の方々に感謝の意を表して本報告を終る。