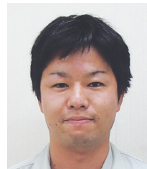


亜鉛・アルミ擬合金溶射摩擦接合面のすべり試験

Slip Test of Friction-Joining Faces Thermally Sprayed with Zinc-aluminum Pseudo Alloy



緒方 裕己^{*1}
Yuki OGATA



矢部 泰彦^{*2}
Yasuhiko YABE



山下 修平^{*3}
Shuhei YAMASHITA

要旨

防錆対策の1つとして、高力ボルト摩擦接合面に金属溶射（以後、溶射という）を採用する場合、すべり耐力の確認試験の実績はあるものの、溶射皮膜厚の変化など種々の要因に着目した事例は少なく、実施工における施工管理方法を定めるに至っていない。そこで本試験では、①摩擦接合面における目標膜厚の設定、②フィラーPLの適用、③インターバル（塗装間隔）の設定、に着目し、各種パラメーターの変化によりすべり試験を行うことで、金属溶射面のすべり耐力への影響について検証した。なお、溶射の仕様は、Zn-Al擬合金溶射（PAZL工法、MS工法）に限定した。

キーワード：Zn-Al擬合金溶射，すべり試験

1. はじめに

防食仕様に亜鉛・アルミ擬合金金属溶射（以下、Zn-Al擬合金溶射）を採用した場合、摩擦接合面の仕様に関しては以下の3つの仕様が考えられる。

- ① 無機ジンクリッチペイント（75 μ m）
- ② Zn-Al擬合金溶射+封孔処理剤
- ③ Zn-Al擬合金溶射（無封孔）

摩擦接合におけるすべり耐力の観点からは、①無機ジンクリッチペイントが道路橋示方書にもその適用について明確に記載されており望ましいが、溶射と塗装が混在することになり施工性の面から避けたいところである。

また、②・③の仕様においても実績があり採用が可能であると考えられるが、過去の実験結果を見ると②の封孔処理を施した場合は、封孔処理を施さない場合に比べ摩擦係数が3割～5割程度低く、実験によっては設計で求められる摩擦係数0.4を下回るケースも確認されている。

以上のことから、施工性及び摩擦接合におけるすべり耐力の観点において、摩擦継手部については図-1に示す塗り分けにすることが望ましいと考えられる。しかしながら、Zn-Al擬合金溶射摩擦接合面におけるすべり耐

力に関しては、各々の工事にてすべり試験を実施し確認を行っているものの、各種パラメーターに着目し試験を行ったケースが少なく実施工における施工管理方法を定めるに至っていない。そこで今回、各種パラメーターの変化によりすべり試験を実施することで、実施工における管理方法について検証を行う事とする。

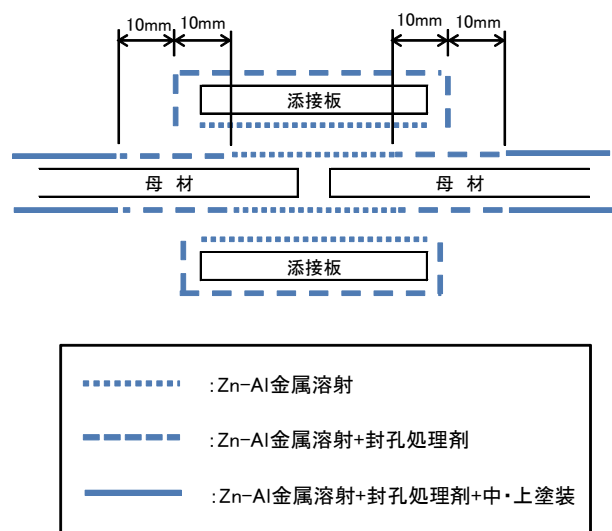


図-1 継手部の塗り分け（工場）

*1 千葉工場技術部計画グループ副主任

*2 千葉工場技術部計画グループサブリーダー

*3 千葉工場技術部計画グループ主任

2. すべり耐力に及ぼすパラメーター

現場継手部のすべり耐力は（摩擦係数×軸力）で決定される。そのため、継手性能を考える上では、「リラクセーションによるボルト軸力低下」及び「Zn-Al擬合金溶射面のすべり係数」の観点から検討する必要がある。

リラクセーションは、ボルト締付けによって接触面が局部的に押しつぶされ、ボルト締付け長さが極微量であるが短くなることによって生じる。そのため、溶射皮膜厚が厚くなればなるほどその影響は大きくなると考えられ、溶射皮膜厚の上限値を定める必要がある。また、実施工においては母材の板厚差によりフィラーPLを挿入することがあるが、フィラーPLを入れた場合、摩擦接触面における溶射皮膜の層が増えリラクセーションへの影響が懸念されるためその影響についても検証する必要がある。

すべり係数については、摩擦接合面の状態が大きく左右される事から溶射工法の違いによりその差が生じるものと考えられる。また、工場溶射から現場継手部の施工までには数週間～数カ月のインターバルが生じることから、封孔処理を施していない溶射皮膜の変状によるすべり係数の低下が懸念される。

以上を踏まえ、本検討においては図-2に示すすべり試験を実施することにした。

3. 試験体について

試験体は、JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材（SS400）以上とし、形状は参考文献¹⁾にある標準試験片を参考に決定した。なお、試験体の塗り分けを図-3に示す。摩擦接合面の仕様は、封孔処理剤がすべり係数へ影響を及ぼすため無封孔の溶射仕様とした。

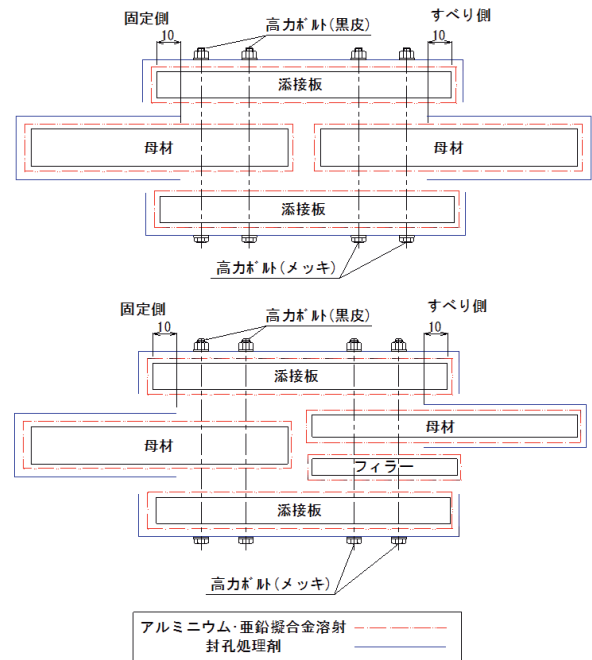


図-3 試験体の塗り分け

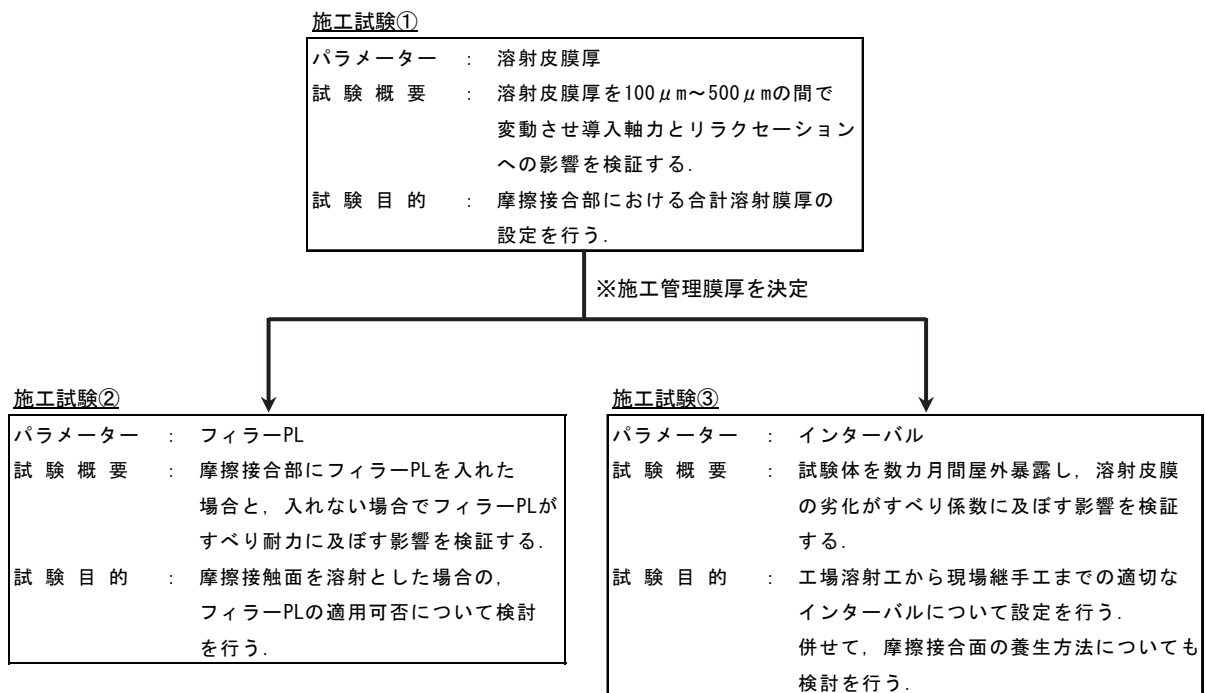


図-2 施工試験のパラメーター

4. 試験要領

(1) 試験体組立要領

本試験で使用した溶融亜鉛めっき高力ボルト（以下高力ボルト）のセットの種類は1種A、等級は、ボルトF8T（M22）、ナットF10T、座金F35とした。なお、孔径はM22標準孔（φ24.5）とした。試験体は、片側をすべり側とし、反対側を固定側とした。すべり側にはボルトの締め付け軸力を測定するため、**図-4**に示すように、ワイヤーストレインゲージ（以下WSG）を貼付した高力ボルトを使用し、固定側に使用する高力ボルトには六角高力ボルト（F10T）を用いWSGの貼付けは行わないものとした。高力ボルトの締め付けは、一次締め、本締めの2段階で行い、一次締めはプレセット型トルクレンチを使用し、所定の一次締めトルク値でナットを回転させて行った。一次締めの後、ボルト、ナット、座金及び部材にわたりマーキングを施した本締めは、ナット回転角法を用いて、目標角度120°までナットを回転させて締め付けた。ボルト締め付けの様子を**図-5**に示す。（なお、ボルト締め付け及びすべり試験は、神鋼ボルト株式会社（本社・工場）において実施した。）

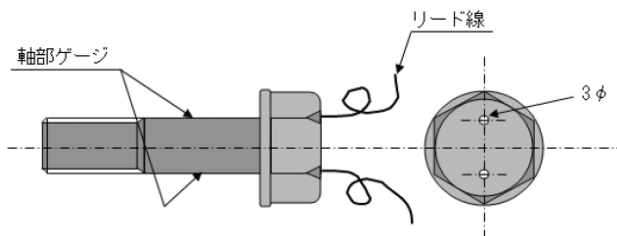


図-4 ワイヤーストレインゲージ貼付け要領



図-5 ボルト締め付けの様子

(2) リラクゼーション試験

締め付け軸力の減衰測定は、締め付け直後から以下の間隔で測定を行った。

締め付け直後、3分、5分、10分、30分、1時間、2時間、3時間、6時間、12時間、24時間、48時間、72時間…480時間

減衰率の算出は、供試ボルト（3本）の平均値を用いて算出した。計算式は、下記による。

$$\text{減衰率 (\%)} = 1 - \frac{\text{測定軸力}}{\text{締め付け直後の軸力}} \times 100$$

なお、測定期間20日間は、参考文献²⁾の「20日間経過後の締め付け軸力の減衰率は安定していた」という結果をもとに設定した。

(3) すべり試験

すべり試験は、高力ボルト締め付け後20日（およそ480時間程度）経過した後、試験体を引張試験機に垂直にセットした。試験体の固定側については約20°程度の追締めを行った。

荷重はすべりが発生するまで徐々に載荷した。すべりの確認は次のいずれかの現象が生じた時とし、その荷重を測定した。

- すべり音が発生したとき
- 引張試験機の指針が停止または下降したとき
- 試験体のけがき線がずれたとき

すべり係数の算出方法は、次の計算式より算出した。

$$\mu = \frac{P}{m \times n \times N}$$

P：すべり荷重
 m：接合面の数（m=2）
 n：ボルト本数（n=2）
 N：締め付けボルト軸力

すべり試験の様子を**図-6**に示す。

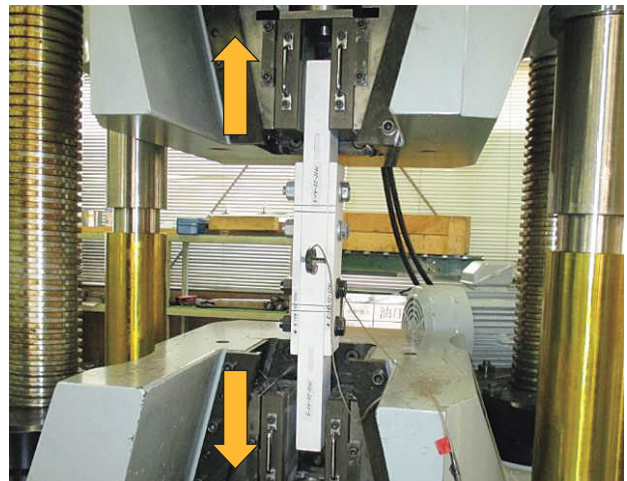


図-6 すべり試験の様子

5. 試験結果

(1) リラクゼーション試験の結果

ボルトの導入軸力は、トルク法によって締め付けを行い、F8Tの設計ボルト軸力として165kNを目安に締め付けた。

施工試験①の結果を図-7に示す。締め付け直後から480時間で軸力は安定しており、溶射皮膜厚の増加に伴い、軸力の減少は大きくなる傾向が見られた。高力ボルトの締め付けにより、溶射皮膜が押し潰され軸力低下が生じるため、膜厚が大きいとその影響も大きくなると考えられる。溶射膜厚 $200\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ は軸力減少が10%以上生じているため、フィラーPLを挿入した時のさらなる低下を懸念して、施工管理膜厚は $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ に設定した。

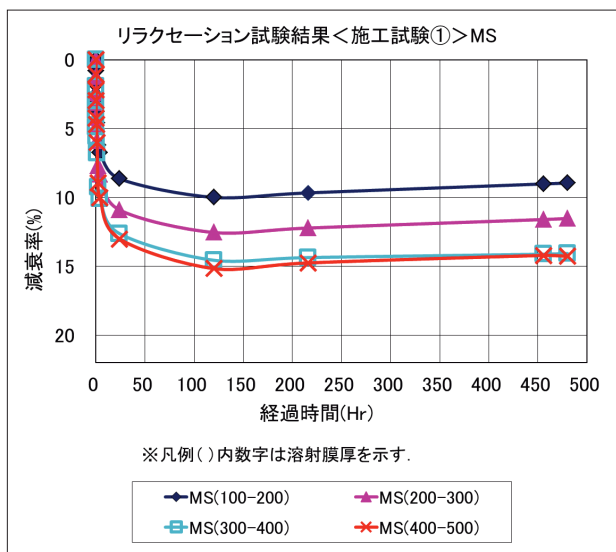
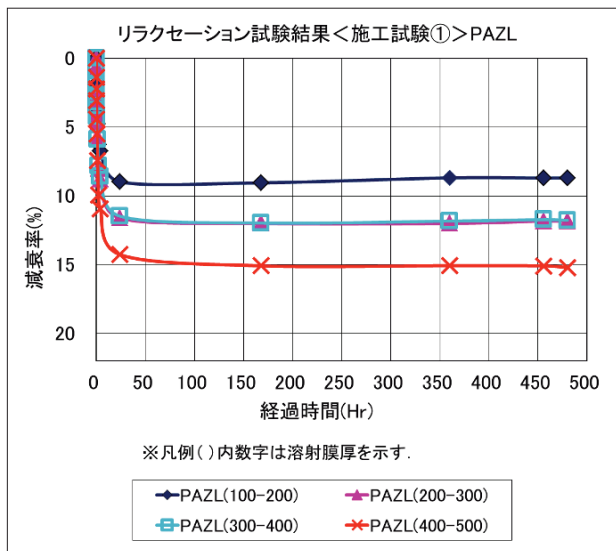


図-7 リラクゼーション試験の結果 (施工試験①)

施工試験②の結果を図-8に示す。フィラーPLを挿入した場合と挿入しない場合では、フィラーPLを挿入することでボルト軸力が2%程度低下することが確認できた。フィラーPLを挿入することで摩擦接合面の層数は2倍になるため、リラクゼーションへの影響が大きくなると考えられる。

なお、フィラーPLと母材及び添接板の間に肌隙は見られなかった。

また、フィラーPLを挿入しない場合のリラクゼーションが、溶射皮膜厚が同じである施工試験①の結果よりも大きくなっている。施工試験②では板厚25mmのフィラーPLを挿入しているため、施工試験①よりも試験体の母材厚が大きくなっている。

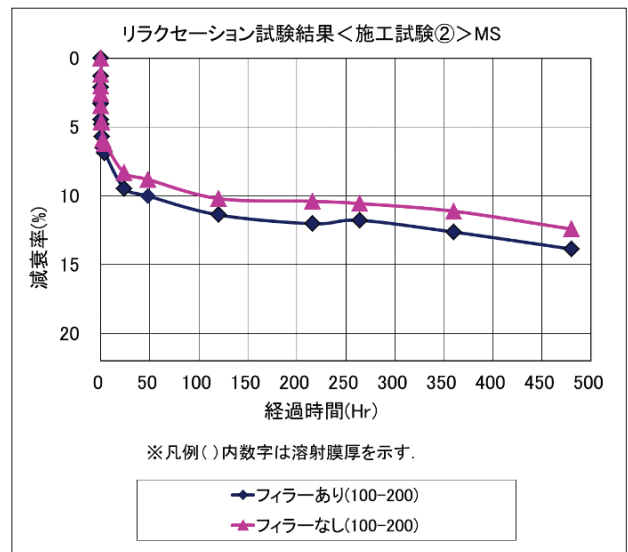
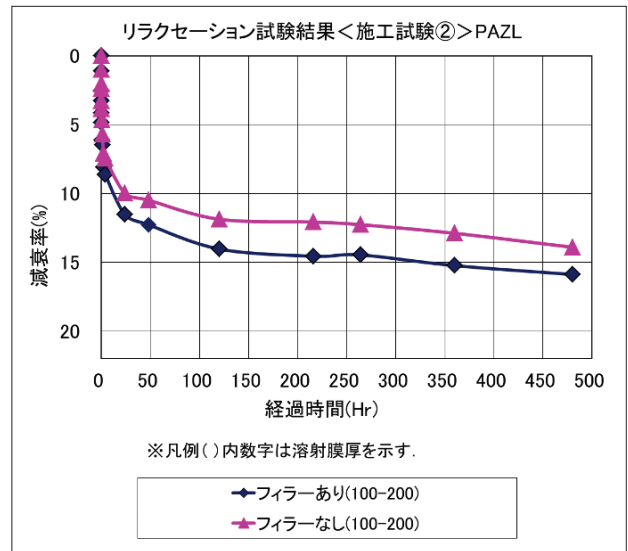


図-8 リラクゼーション試験の結果 (施工試験②)

施工試験③の結果を図-9に示す。曝露初期状態と各曝露期間でのリラクゼーションには、各試験体でバラつきはあるものの大きな差異はなく、3ヶ月間の曝露ではほとんど影響がないと考えられる。曝露試験による溶射皮膜の変状については、図-10に示すとおり摩擦接合面のみ時間経過とともに変色が生じた。摩擦接合面は封孔処理を施していないため、溶射皮膜に含まれる亜鉛が酸化してグレーに変色したと思われる。

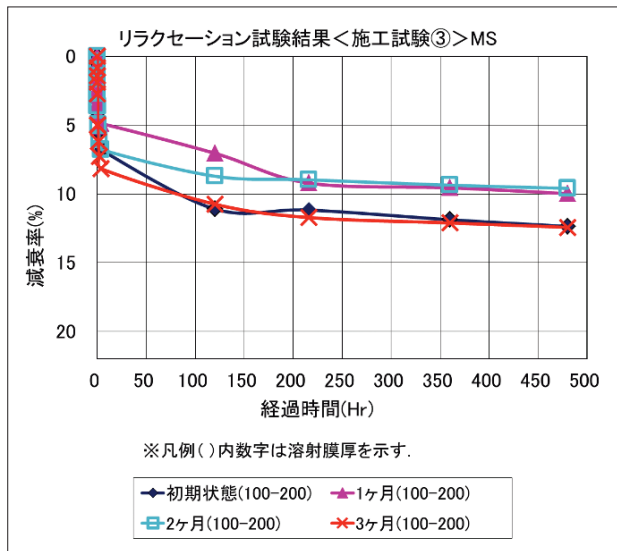
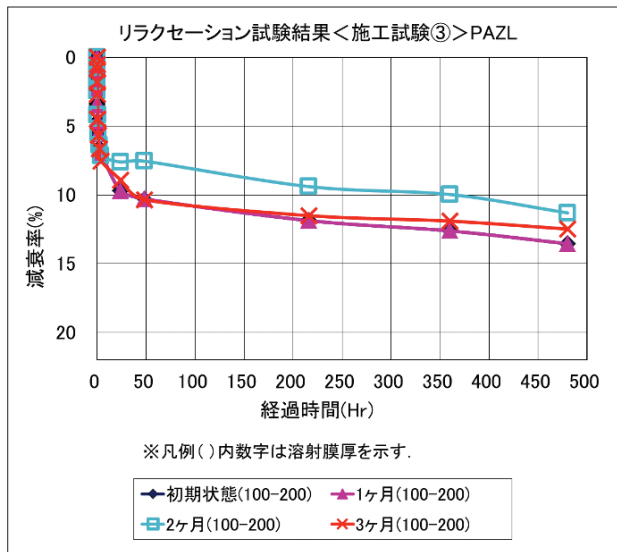


図-9 リラクゼーション試験の結果 (施工試験③)

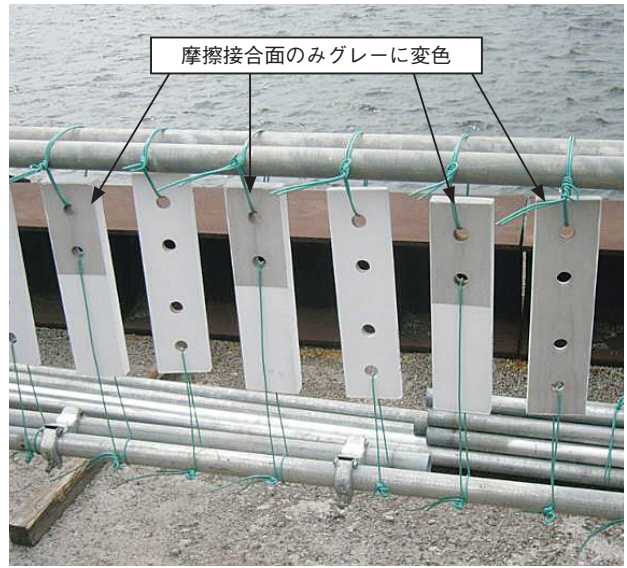


図-10 曝露中の試験体

(2) すべり試験の結果

ボルト締付け後480時間経過した試験体を用いてすべり試験を行った。各試験体のすべり試験の結果を表-1、2、3に示す。

いずれの試験体もすべり係数は設計基準値0.45を大きく上回ることが確認できた。一般に、拡大孔や肌隙によりすべり係数は10%程度低下すると言われているが、それを考慮してもすべり耐力が期待できることが分かった。

表-1 すべり試験の結果 (施工試験①)

すべり試験の結果 (施工試験①)									
工法	設定膜厚	試験体番号	平均膜厚 (μm)	(1)初期導入軸力N1(kN)			(4)N1の見かけのすべり係数 μ1		
				(2)締付後480hr軸力N2(kN)	(3)すべり荷重(kN)	(5)N2のすべり係数 μ2	(6)締付後480hr減衰率(%)	(7)	(8)
PAZL	<A> 100 ~ 200 μm	1	150	214.9	196.2	465	0.541	0.593	8.7
		2	158	213.5	194.1	494	0.578	0.636	9.1
		3	163	229.8	210.8	487	0.530	0.578	8.3
	 200 ~ 300 μm	4	266	237.1	216.5	497	0.524	0.574	8.7
		5	250	213.2	187.9	451	0.529	0.600	11.9
		6	258	210.9	185.7	471	0.558	0.634	11.9
	<C> 300 ~ 400 μm	7	361	237.3	209.3	452	0.476	0.540	11.8
		8	360	196.9	168.6	433	0.550	0.642	14.4
		9	353	206.1	176.8	450	0.546	0.636	14.2
	<D> 400 ~ 500 μm	10	455	230.0	210.0	450	0.489	0.536	8.7
		11	456	218.1	185.0	470	0.539	0.635	15.2
		12	453	212.4	178.6	438	0.516	0.613	15.9
MS	<A> 100 ~ 200 μm	1	169	221.3	201.2	657	0.742	0.816	9.1
		2	175	216.7	197.3	651	0.751	0.825	9.0
		3	181	236.0	216.0	643	0.681	0.744	8.5
	 200 ~ 300 μm	4	282	234.7	210.0	657	0.700	0.782	10.5
		5	300	208.5	184.0	668	0.801	0.908	11.8
		6	265	203.6	180.2	644	0.791	0.893	11.5
	<C> 300 ~ 400 μm	7	386	222.0	194.1	652	0.734	0.840	12.6
		8	390	211.4	181.6	644	0.762	0.887	14.1
		9	374	211.5	181.0	665	0.786	0.919	14.4
	<D> 400 ~ 500 μm	10	497	235.3	206.6	630	0.669	0.762	12.2
		11	492	225.1	193.0	637	0.707	0.825	14.3
		12	490	204.1	172.2	623	0.763	0.904	15.6

表一2 すべり試験の結果（施工試験②）

すべり試験の結果（施工試験②）									
工法	フィルターの有無	試験体番号	平均膜厚(μm)	(1)初期導入軸力N1(kN) (2)締付後480hr軸力N2(kN) (3)すべり荷重(kN)			(4)N1の見かけのすべり係数μ1 (5)N2の実すべり係数μ2 (6)締付後480hr減衰率(%)		
				(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
PAZL	<A>あり	1	168	214.3	180.8	557	0.650	0.770	15.6
		2	161	215.4	180.9	613	0.711	0.847	16.0
		3	163	212.7	178.9	572	0.672	0.799	15.9
	なし	4	169	230.7	198.3	647	0.701	0.816	14.0
		5	172	228.8	192.6	647	0.707	0.840	15.8
		6	166	225.3	191.9	633	0.702	0.825	14.8
MS	<A>あり	1	151	219.8	189.8	604	0.687	0.796	13.6
		2	153	224.2	194.8	617	0.688	0.792	13.1
		3	172	233.0	205.3	641	0.688	0.781	11.9
	なし	4	166	227.9	200.1	659	0.723	0.823	12.2
		5	168	233.1	204.2	673	0.722	0.824	12.4
		6	179	228.4	199.7	672	0.736	0.841	12.6

表一3 すべり試験の結果（施工試験③）

すべり試験の結果（施工試験③）									
工法	曝露期間	試験体番号	平均膜厚(μm)	(1)初期導入軸力N1(kN) (2)締付後480hr軸力N2(kN) (3)すべり荷重(kN)			(4)N1の見かけのすべり係数μ1 (5)N2の実すべり係数μ2 (6)締付後480hr減衰率(%)		
				(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
PAZL	<A>初期	1	179	221.7	190.9	648	0.731	0.849	13.9
		2	178	235.2	202.6	656	0.697	0.809	13.9
		3	172	215.2	183.2	619	0.719	0.845	14.9
	1ヶ月	4	172	221.6	203.1	642	0.724	0.790	8.3
		5	166	219.9	201.4	630	0.716	0.782	8.4
		6	172	230.8	211.5	627	0.679	0.741	8.4
	<C>2ヶ月	7	163	220.4	194.3	568	0.644	0.731	11.8
		8	171	226.7	201.1	607	0.669	0.755	11.3
		9	164	229.0	203.7	621	0.678	0.762	11.0
	<D>3ヶ月	10	177	242.9	218.0	752	0.774	0.862	10.3
		11	171	245.1	218.1	624	0.636	0.715	11.0
		12	177	235.6	208.5	605	0.642	0.725	11.5
MS	<A>初期	1	168	220.0	188.4	690	0.784	0.916	14.4
		2	177	227.9	196.9	688	0.755	0.874	13.6
		3	170	216.2	186.6	650	0.752	0.871	13.7
	1ヶ月	4	172	240.1	226.4	642	0.668	0.709	5.7
		5	175	233.3	215.9	626	0.671	0.725	7.5
		6	167	233.9	216.0	614	0.656	0.711	7.7
	<C>2ヶ月	7	169	228.7	205.5	627	0.685	0.763	10.1
		8	169	223.2	199.9	562	0.629	0.703	10.4
		9	157	232.5	207.4	586	0.630	0.706	10.8
	<D>3ヶ月	10	169	240.3	213.5	613	0.638	0.718	11.2
		11	164	240.9	214.0	612	0.635	0.715	11.2
		12	161	242.3	214.3	628	0.648	0.733	11.6

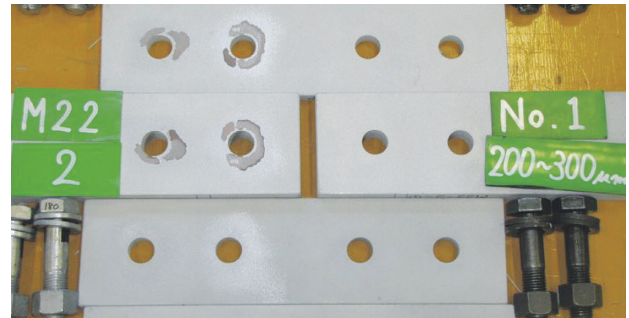
(3) すべり試験後の接合面の状況

代表で各試験体のすべり試験後における摩擦接合面の状況を図一11、12、13に示す。すべり側において、摩擦により溶射皮膜が剥がれていたため、溶射皮膜の密着性に問題があると考え、引張試験機による密着性試験を行ったが、所定の密着力を満足することが確認できた。

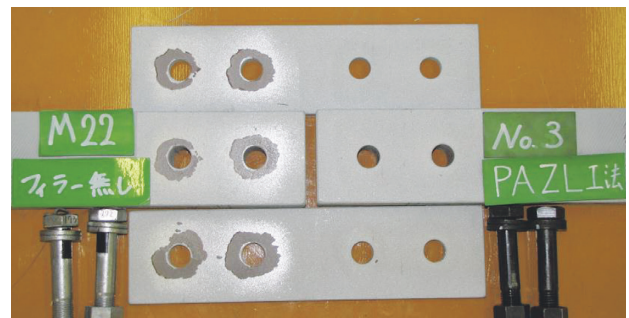
また、溶射皮膜は基材（粗面形成剤塗付面）と物理的に密着するので、表面粗さのみでなく、基材の表面粗さパラメーターRSm/Rz-JISを小さくすると溶射皮膜の密着力は良好となる。粗面化処理後のRSm/Rz-JIS比は2.2～

2.7と高い密着力を示す結果であった。

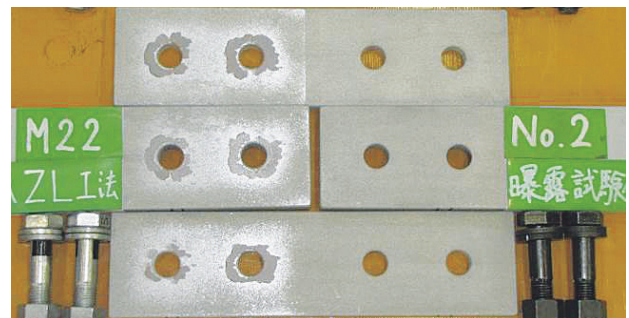
※RSm：凹凸の平均隙間、Rz-JIS：十点平均粗さ



図一11 すべり試験後の状況（施工試験①）



図一12 すべり試験後の状況（施工試験②）



図一13 すべり試験後の状況（施工試験③）

6. まとめ

本試験では、摩擦接合面における溶射皮膜厚の変化など種々の要因に着目し、各種パラメーターの変化によりすべり試験を行うことで、金属溶射面のすべり耐力への影響について検証した。

溶射皮膜厚の変化による影響としては、膜厚の増加に伴いボルト軸力が低下することが確認できた。目標膜厚は100～200μmが妥当であると考えられる。

フィルターPLによる影響としては、フィルターPLを挿入することでボルト軸力が低下することが確認できた。

曝露試験による影響としては、3ヶ月間の曝露ではリラクゼーションへの影響は見られなかった。

また、各種パラメーターの変化によるすべり係数はいずれも設計基準値0.45を大きく上回っており、すべり耐力への影響は見られなかった。

今後は、長期曝露や拡大孔によるすべり耐力への影響についても検証していきたいと考えている。

7. おわりに

本試験を進めるにあたり、ご協力を頂いた皆様に深く感謝を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 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)、P46、2006.12
- 2) 宇部興産機械(株)堀越氏、アークアルミ溶射添接部における摩擦接合すべり試験について、土木学会第58回年次学術講演会、2003.9

2016.3.8 受付

グラビア写真説明

市道坂下津1号線 九島大橋(上部工) 建設工事

本橋梁は愛媛県宇和島市坂下津と、九島の蛤を結ぶ海上橋梁です。九島は周囲約12km、人口900人余りの離島で、この橋ができる前は1日9本のフェリーが本島への唯一の手段でした。この橋の完成により島の住民の方々の利便性の向上や島の発展に寄与できるものと思っています。

本工事はエム・エムブリッジ株式会社と弊社とのJVで施工されました。桁の製作は中央径間と両側径間の3部ブロックに分け、中央径間を弊社千葉工場、両側径間をエム・エムブリッジにて製作しました。各々の工場で作られた桁は台船により現地まで輸送され、3回に分けて起重機船による大ブロック架設が行われました。架設当日はいずれも天気に恵まれ、朝早くから大勢の地元の住民の方々が見学のために集まりました。(熱海 晋)

平成24年度 社会資本整備総合交付金(全国防災) 工事

小道木大橋は、長野県飯田市と静岡県浜松市を結ぶ国道152号の内、小道木バイパス区間の遠山川を跨ぐ橋長118.5m、アーチ支間95.0mの上路式逆ローゼ桁橋です。152号長野県事業区間(L=21.1km)の内、橋梁2橋、トンネル2箇所を含め、小道木バイパス(L=1.7km)は、その整備によって地区間距離の半減と狭小幅員・線形不良の解消などの効果が期待されています。

本工事では無重力状態における鋼桁の出来形形状の再現に挑み、組立部材の安定性を確保できる倒立による一体仮組立を長野県内の工場にて実施しました。倒立一体仮組立実施時には、高強度で軽量、コンパクトなアーチ支保工の採用、各施工ステップと並行した枠組足場の設置、実際に現場作業を行う作業者の手による仮組作業を行うことで、安全性及び実施工における作業性の向上を図りました。

また、アーチ橋の倒立一体仮組立は、県内でも稀にみる仮組方法であったことから、多くの方々にご参加頂き見学会も実施いたしました。(野村 洋)