

溶射によるコンクリートの表面仕上げ工法に関する研究 (その1)

——溶射皮膜の基本特性——

小川 晴果 長尾 覚博 住野 正博 斉藤 裕司
林 好正 青山 幹 中根 淳 川地 武

Study on Thermal Spray Coatings for Concrete (Part 1)

——Fundamental Properties of Thermal Spray Coatings——

Haruka Ogawa Kakuhiko Nagao Masahiro Sumino Hiroshi Saito
Yoshimasa Hayashi Tsuyoshi Aoyama Sunao Nakane Takeshi Kawachi

Abstract

This paper reports on experimental studies of new applications of thermal spray coatings such as of metals and ceramics for concrete. The following conclusions were obtained as a result of the studies: ① Flame, electric arc, and plasma spray methods are applicable to concrete. ② Thicknesses of coatings differ according to the thermal spray materials and methods. Thick coatings are obtained by use of flame spray methods and low melting-point materials. ③ Derogatory effects of thermal spray heat on concrete are almost nonexistent. ④ Thermal spray coatings are porous so that base treatments and finish coatings are necessary to secure durability of the coatings. ⑤ In spite of concrete being in wet condition, good adhesion and adequate thickness of coatings can be obtained by use of special epoxy resin primer base treatments provided with sufficiently rough surfaces.

概要

この報告は、溶射技術を用い、金属、セラミックなどの皮膜をコンクリート表面に形成する新しい仕上げ工法の開発を目的とした実験検討結果に関するものである。この結果、以下のことが明らかになった。① フレーム、アーク及びプラズマの各溶射方法によりコンクリート下地面に金属、セラミックなどの皮膜の形成が可能である。② 溶射皮膜厚は溶射方法、溶射材料により異なり、同一材料ではフレーム溶射がアーク、プラズマ溶射に比べて膜厚が大となり、また融点の低い材料ほど膜厚は大となる。③ 溶射によるコンクリート表面の熱劣化はほとんどない。④ 溶射皮膜はポーラスなため耐久性を向上させるための下地処理及び封孔処理が必要である。⑤ 適度な粗面を形成する特殊変性エポキシ樹脂系プライマーによる下地処理を行うことにより、溶射材料の種類や下地コンクリートの含水率にかかわらず仕上げ材として十分な膜厚と接着強度を得ることができる。

1. はじめに

溶射は、1910年にスイスで開発され、わが国には1992年に導入された。当初溶射は、橋梁、鉄塔、船舶などの大型鋼構造物、軽工業製品の防錆・防食加工に用いられてきたが、近年になって、航空機、自動車、原子炉などの部品、部材の機能向上まで幅広く用いられるようになってきている。しかし、モルタル・コンクリートをはじめとするセメント系下地材への溶射については、下地に及ぼす熱影響、接着性及び耐久性などについて不明な点が多くこれまでほとんど実施されていなかった¹⁾。

本報告では、溶射によってコンクリート表面に皮膜を形成する新しい仕上げ技術の可能性について検討するため、現場打ち及びプレキャストコンクリート部材に適用可能な溶射技術を選択し、溶射によって形成される皮膜の基本特性について調査した。さらに、溶射皮膜のコン

クリート下地に対する接着性と膜厚確保のための下地処理方法について検討を行うとともに、熱冷繰返しによる促進劣化試験を行い溶射皮膜の接着耐久性についても検討を行った。

2. 溶射の概要とコンクリートに適用する際の問題点

JIS H8200(溶射用語)によると、溶射の定義は「燃焼または電気エネルギーを用いて溶射材料を加熱し、溶融またはそれに近い状態にした粒子を素地に吹き付けて皮膜を形成すること」と示されている。溶射はその熱源の種類に応じて図-1のように分類される²⁾。

これら溶射方法のうち、建築構造物の壁面などの広い面積を連続的に溶射でき、コンクリートに適用可能と思われるものを検討した結果、フレーム、アーク及びプラズマ溶射が挙げられ、その特徴をまとめると表-1となる。図-2はフレーム溶射装置の概要であるが、ガスに

表一 各溶射方法の特徴

溶射方式	溶射材料		熱源(温度)	溶射粒子の加速方法
	形状	種類		
フレーム	粉末	金属	アセチレン、プロパンなどの燃料ガスと酸素の混合フレーム(3,000℃)	圧縮空気 燃焼炎
	線材	セラミックス プラスチック		
アーク	線材	金属	直流電源によって発生するアーク(4,200℃)	圧縮空気
プラズマ	粉末	金属 セラミック	プラズマガス(1,000~20,000℃)	プラズマ ジェット

よる熱源で溶射材料を溶融し、圧縮空気です射粒子を素地に付着させ皮膜を形成するものである。アーク、プラズマとも熱源が異なるものの基本的な原理は同様である。

溶射は高温の熱源で溶射材料を溶融し下地に溶着させる工法であるため、コンクリート下地に適用する場合には、下地の熱劣化について確認する必要がある。また、溶射皮膜のコンクリート下地との接着性や膜厚が仕上げ材として十分でかつ耐久性に優れていることが要求される。

このような問題を検討するため、以下に示す皮膜の基本特性に関する実験を行った。

3. 溶射皮膜の基本特性に関する実験

溶射皮膜の基本特性として、a. 皮膜の形成状態及び膜厚、b. 溶射時のコンクリート下地への熱影響、c. 皮膜の接着強度、d. 皮膜の透気性について検討した。

3.1 実験概要

3.1.1 使用材料 下地コンクリートパネル及び透気試験用供試体の作成に用いたコンクリートは、建築構造物の壁体を想定した仕様（スランプ18±2.5 cm、空気量4±1%、設計基準強度 $\sigma_{c28} = 210 \text{ kgf/cm}^2$ ）とした。セメントは普通ポルトランドセメントを、粗骨材としては石灰岩碎石（コンクリートパネル用）及び硬質砂岩碎石（透気試験用）を用いた。また、細骨材には、山砂を用い、AE減水剤を混和剤として用いた。

溶射材料は、融点の高低により錫（融点約230℃透気試験のみ）、アルミ（融点約660℃）、クロムステンレス鋼（融点約1,400℃）、酸化チタン（融点約2,000℃、プラズマ溶射のみ）の4種類を選定した。

3.1.2 実験方法

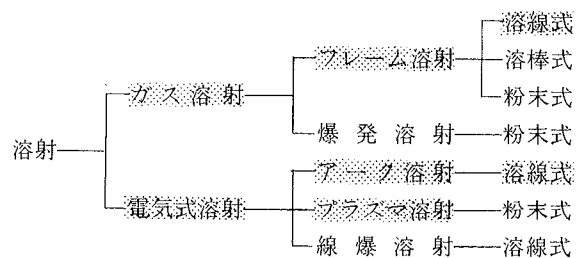
(1) 供試体の作成 コンクリートは、溶射時（材令28日以降）まで20±3℃、65±5% R. H. 気中養生とした。

溶射皮膜の形成状態及び膜厚、溶射時のコンクリート下地への熱影響、皮膜の接着強度については図-3に示す壁体を想定したコンクリートパネルを用い、皮膜の透気性についてはφ10×10 cm 円柱供試体を用いた。

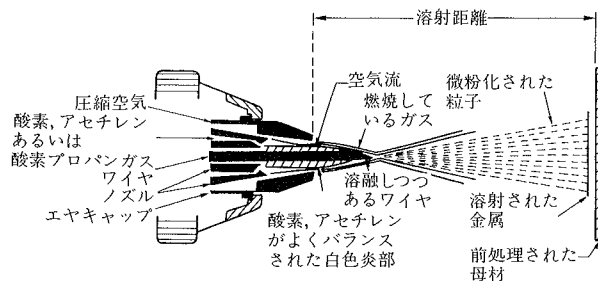
コンクリート下地表面のレイタンスを除去した後、フレーム、アーク及びプラズマ溶射装置を用いて溶射を行った。ただし、透気性の実験についてはフレーム溶射のみとした。皮膜厚を変化させるため、溶射装置が同一箇所を通過する往復回数（パネル一往復の所要時間は約

表二 コンクリートパネルの種類と形状

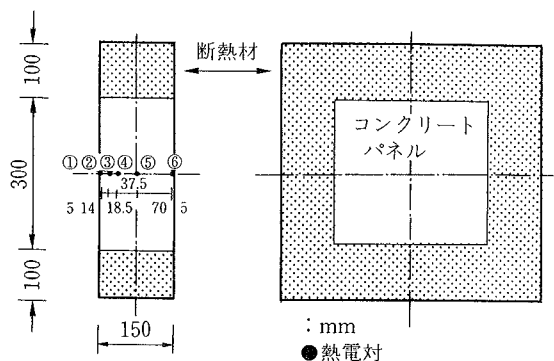
シリーズ	溶射方法	溶射の往復回数	溶射材料	コンクリートパネル数
I	フレーム	1.0	アルミ	6
		1.5	ステンレス	
		2.0		
II	アーク	1.0	アルミ	6
		1.5	ステンレス	
		2.0		
III	プラズマ	1.0	アルミ	9
		1.5	ステンレス	
		2.0	酸化チタン	



図一 溶射の分類



図二 フレーム溶射装置の概要

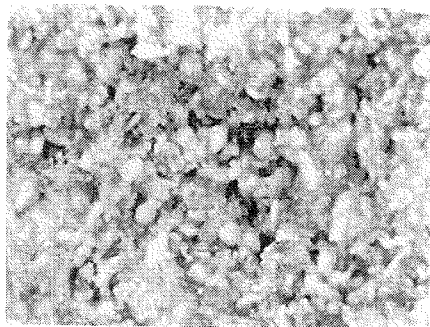


図三 コンクリートパネルの形状寸法

30 sec.)を1.0、1.5、2.0往復の3水準とした。また、コンクリート下地と溶射装置との距離はフレーム、アーク溶射で約20 cm プラズマ溶射で約10 cm とした。

コンクリートパネルの種類と数量を表二に示す。

(2) 測定方法 皮膜の形成状態は皮膜表面及び断面を顕微鏡で観察した。膜厚測定にはエクセリン膜厚計を



写真一1 溶射皮膜表面の様子
(フレーム溶射, アルミ)



写真一2 溶射皮膜断面の様子
(フレーム溶射, アルミ)

用いた。溶射時のコンクリート下地の表面温度はアルメルクロメル表面温度測定用熱電対及び断面内の温度分布を銅-コンスタンタン熱電対により前述の図-3に示す位置で測定した。溶射皮膜の接着強度は、溶射皮膜に40×40 mmの切り込みを入れ、鋼製アタッチメントをエポキシ樹脂系接着剤で貼り付け建研式引張り試験機を用いて測定した。皮膜の透気性は、定圧法により供試体両端面間に2 kgf/cm²の差圧を負荷し経時的な透気量を測定した²⁾。

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 皮膜の形成状態及び膜厚 顕微鏡を用い溶射皮膜の状態を観察した一例を写真一1～2に示す。溶射皮膜は溶融した粒子が素地に溶着して扁平になった層が蓄積し、その素地との接着は機械的な投錨効果により形成されることがわかる。また、各溶射方法別の皮膜の形成状態を比較すると、アーク、プラズマに比較してフレーム溶射ではコンクリート表面に形成される皮膜厚が大きく、また凹部にも十分入り込んでいる様子が観察された。図-4に溶射装置が一往復した時の膜厚の測定結果を示す。これより、フレーム溶射-アルミニウム及びプラズマ溶射-アルミニウムの条件で膜厚が大となり、他の条件ではそれらに比較して膜厚は小となっている。すなわち溶射方法及び溶射材料によって膜厚にはかなりの差が生じ、融点の低い材料ほど皮膜が形成されやすいことが推察される。従って、溶射材料の選択にあたってはそれらの特性を十分把握する必要があると考えられる。さらに、金属溶射皮膜による仕上げで、皮膜を研磨し光

溶射方法	溶射材料	溶射皮膜厚の範囲(μm)(1往復)	
		100	200
フレーム	アルミニウム ステンレス	≡≡≡	≡≡≡≡≡≡≡≡
アーク	アルミニウム ステンレス	≡≡	≡≡≡
プラズマ	アルミニウム ステンレス 酸化チタン	≡≡≡≡≡	≡≡≡

図-4 溶射皮膜厚の測定結果 (溶射回数一往復)

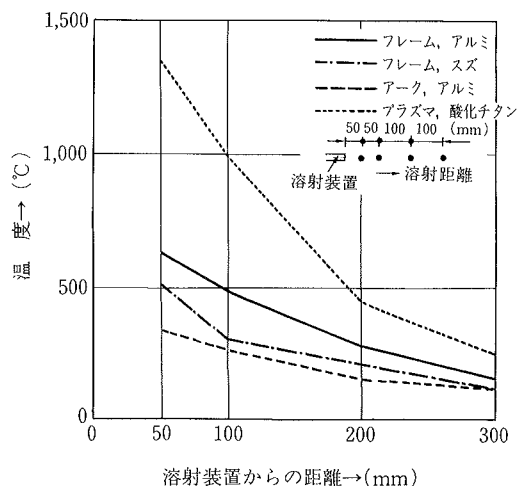


図-5 溶射装置からの距離と溶射粒子の温度

沢を得る場合には、ある程度厚い皮膜が必要と考えられ、そのような観点から各溶射方法を比較するとフレーム溶射が装置の簡便さ及び施工能率の観点から最適ではないかと判断される。

3.2.2 溶射時のコンクリートへの熱影響 溶射時のコンクリートの受熱温度は溶射粒子温度の影響を受けると考えられる。図-5は溶射方法、溶射材料を異にする溶射粒子の温度が溶射装置からの距離によってどのように変化するかを、便宜的な方法であるが熱電対を用いて測定した結果である。溶射装置の熱源の温度が高く、溶射材料の融点が高いほど溶射粒子の温度が高くなることがわかる。

コンクリートの受熱温度の測定例を図-6に示す。コンクリート表面温度は溶射装置が通過する瞬間に一時的に上昇するが、表面温度の上昇に伴うコンクリート内部の顕著な温度上昇はほとんど認められなかった。また、一時的に上昇する表面温度も最大で約200°C程度であった。溶射粒子の温度はかなり高温であってもコンクリートの熱容量がはるかに大きいので、粒子が素地に溶着すると直ちに冷却されることがわかる。また既往の研究によると、この程度の温度範囲ではコンクリートの顕著な強度特性の劣化はないと推察される³⁾。

3.2.3 溶射皮膜の接着強度 溶射装置がコンクリートパネル表面を往復する回数と接着強度との関係を図-

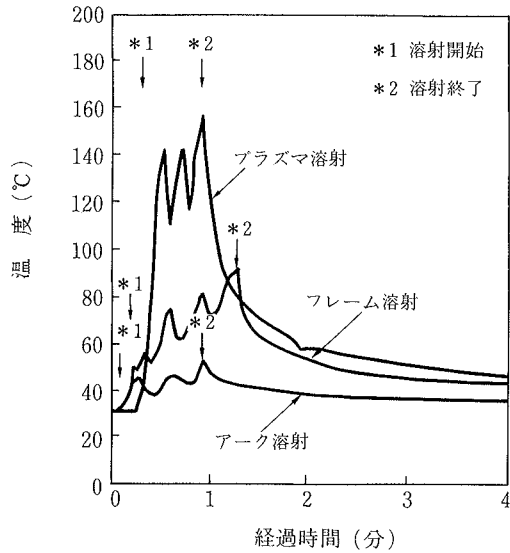


図-6 溶射時のコンクリート表面温度

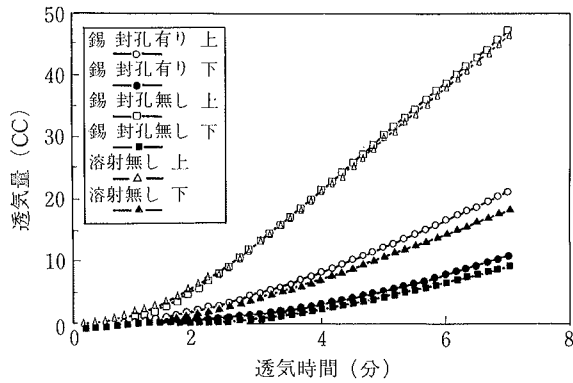


図-8 透気試験結果

7に示す。往復回数が増大するほどフレイム溶射-アルミ、プラズマ溶射-アルミの組合せでは接着強度が低下し、他は往復回数にはかかわらずほぼ 20 kgf/cm² 前後であった。特にフレイム溶射-アルミの場合、2 往復目における接着強度が低かった。この理由は、2 往復目の所要時間が設定よりも長かったため皮膜厚が大となり、その冷却時の熱変形により接着強度が低下したためと推察される。接着強度と皮膜厚との関係については、より詳細に検討する必要がある。また、この実験ではコンクリートの下地処理をレイタンスを取り除くのみとしたが、皮膜厚を増しても接着性が確保できる下地処理方法を検討する必要があると考える。

3.2.4 溶射皮膜の透気性 錫の溶射皮膜についてその透気性を調査した結果を図-8に示す。コンクリート供試体の打込み方向上下間で透気量にかなり差が認められるものの、溶射皮膜の有無による透気量にはほとんど差がなく、溶射皮膜はポーラスであることがわかる。溶射皮膜にフッ素樹脂による封孔処理を施すと、その透気性はかなり小さくなることから金属皮膜の溶射皮膜内部への水分の浸透を防止し、光沢保持等の耐久性を向上させる上で封孔処理は有効と考えられる。

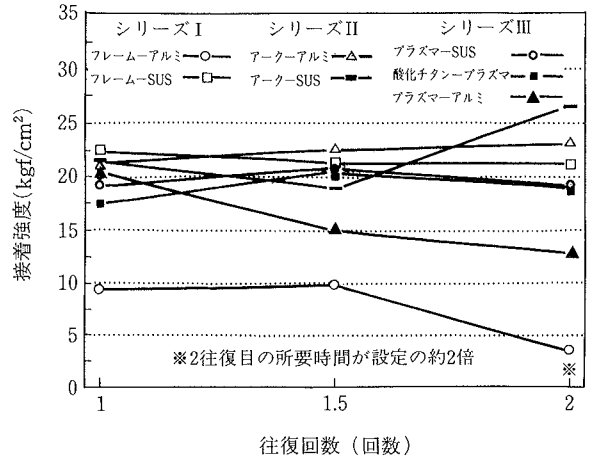


図-7 皮膜の接着強度試験結果

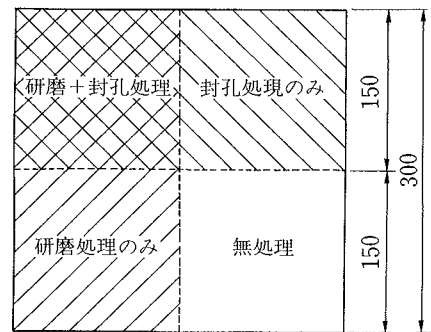


図-9 表面処理の割り付け

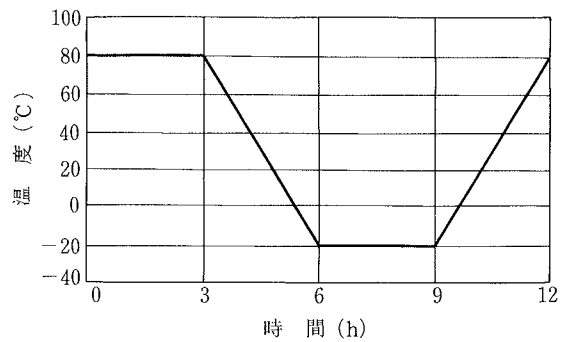


図-10 熱冷繰返し条件（1サイクル）

4. 下地処理方法に関する実験

溶射皮膜の接着性と膜厚確保のための下地処理方法及び熱冷繰返しによる促進劣化をうけた場合の溶射皮膜の接着耐久性について検討した。

4.1 実験概要

4.1.1 使用材料 下地コンクリートは、3.1.1に準じた。但し、接着耐久性については JIS A5304（舗装用コンクリート平板）に準拠したコンクリート歩道板（300×300×60 mm）を用いた。下地処理用プライマーは、特殊変性エポキシ樹脂に微粒分（珪砂，ガラス粉，タルク）を混入したものを用いた。溶射材料としては、錫，アルミ及び銅（融点約1,083°C，接着耐久性試験のみ）を用いた。封孔処理材にはフッ素樹脂クリアー塗料を用いた。

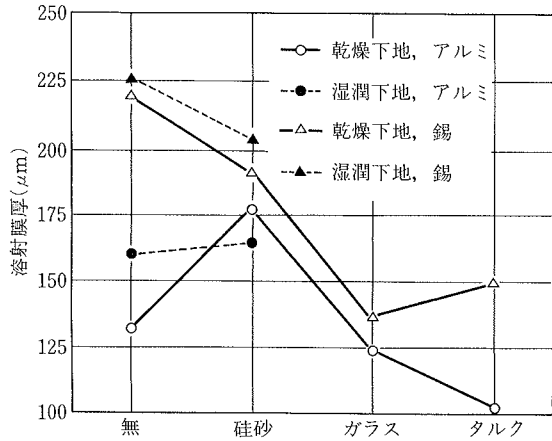


図-11 プライマーの種類による溶射膜厚

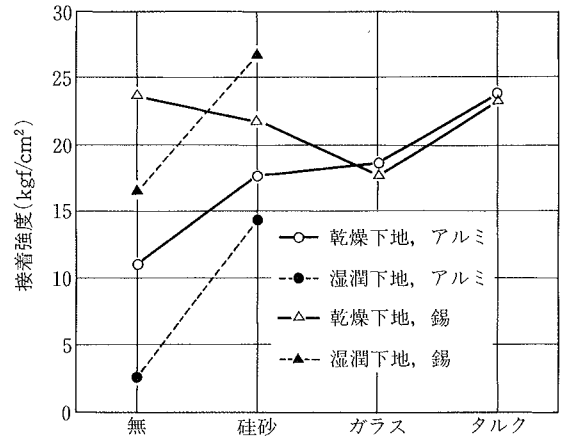


図-13 プライマーの種類による接着強度

実験因子 アイテム	水 準 カテゴリー	溶射膜厚(μm)											効 果 カテゴリースコア	
		-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30				
下地の 含水状態	湿潤													-0.917
	乾燥													0.458
溶射金属 の種類	アルミ													-18.646
	錫													18.646
下地処理 の方法	無処理													18.271
	珪砂混入													18.771
	ガラス混入													-28.479
	タルク混入													-45.604
研磨処理 の有無	有り													-2.396
	無し													2.396
封孔処理 の有無	有り													5.688
	無し													-5.688

図-12 溶射皮膜厚に対する要因効果 (サンプル数 n=144 寄与率 R²=0.7526)

実験因子 アイテム	水 準 カテゴリー	接着強度(kgf/cm²)											効 果 カテゴリースコア	
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3				
下地の 含水状態	湿潤													-1.859
	乾燥													0.850
溶射金属 の種類	アルミ													-2.593
	錫													2.631
下地処理 の方法	無処理													-4.109
	珪砂混入													2.489
	ガラス混入													-0.841
	タルク混入													3.188
研磨処理 の有無	有り													-0.093
	無し													0.094
封孔処理 の有無	有り													1.325
	無し													-1.268

図-14 接着強度に対する要因効果 (サンプル数 n=144 寄与率 R²=0.4048)

4.1.2 実験方法

(1) 供試体の作成 下地コンクリートの養生は溶射時まで気中(20±3℃, 65±5% R.H.)及び標準水中養生の2種類とした。所定の下地処理を施した後フレーム溶射機を用いて金属溶射を行った。膜厚管理は150μ以上を目標とし、予備試験結果に基づき溶射時間を一定にすることにより行った。溶射後金属光沢を得るための研磨及び封孔処理を行った表面処理の割り付けを図-9に示す。

(2) 測定方法 膜厚及び接着強度の測定は3.1.1に準じて行った。接着耐久性については、供試体をプログラム恒温槽内に入れ、図-10に示す要領で熱冷繰返し(-20~80℃, 12h, 1サイクル)を行った。10, 30, 50, 70及び100サイクルごとに試験体を恒温層内より取り出しJIS K5400(塗料一般試験方法)のXカットテープ法に準じて溶射皮膜の接着性の評価を行った。

4.2 実験結果及び考察

4.2.1 溶射膜厚 溶射膜厚の測定結果の一部(研磨及び封孔処理を行ったもの)を図-11に示す。また、溶射膜厚に及ぼす各種実験因子の要因効果を明確にするため、溶射膜厚を目的変数とする多変量解析(林式数量化I類)

を行った。図-12に各種要因効果の解析結果を示す。

溶射膜厚に最も影響しているのは、下地処理の方法であった。エポキシ樹脂に珪砂を混入したものの膜厚が大となったが、ガラス及びタルク微粉末を混入したものは所定の膜厚が得られなかった。これは珪砂ほどの顕著な凹凸が下地表面に形成されなかったことによると推察される。溶射皮膜の下地への接着機構は投錨効果による機械的結合とされており、鋼材面に溶射を施す場合にはプラストによる粗面形成が一般的である⁵⁾。コンクリート下地の場合にもプライマーによる適切な粗面形成が溶射膜厚を確保する上で重要と考える。また、下地処理方法及び溶射時間が同じでも溶射材料によって形成された膜厚に差が生じた。今回の実験ではアルミに比べ融点の低い錫の方が膜厚が大きくなり、下地コンクリートが湿潤である場合に特にその傾向が顕著であった。

一方、金属溶射面の光沢を得るための研磨処理による溶射膜厚の減少はほとんど認められなかった。

4.2.2 接着強度試験結果 接着強度試験結果の一部(研磨及び封孔処理を行ったもの)を図-13に示す。また、溶射膜厚の場合と同様に接着強度を目的変数とする多変量解析を行った結果を図-14に示す。

接着強度に最も影響しているのは、下地処理の方法であった。プライマー処理を行うことにより下地の含水状態にかかわらず良好な接着強度が得られた。また、溶射材料の種類により接着強度は大きく異なり、錫の方がアルミよりも接着強度は大きかった。特にアルミは下地含水状態の影響を強く受け、湿潤下地面に対してはプライマー処理を行わないと接着強度が著しく低下した。一方研磨処理による接着強度の低下は認められなかったが、封孔処理は接着強度の向上に寄与していると考えられる。

4.2.3 接着耐久性 熱冷サイクル後の溶射皮膜の接着性能の評価結果を図-15～17に示す。

珪砂を混入したエポキシ樹脂プライマーによる下地処理を行うことにより、銅のような高融点金属に対しても良好な接着耐久性が得られることが確認された。銅とアルミでは、プライマー処理を行わず封孔処理も行わないと接着性が著しく低下した。但し、プライマー処理を行わなくても封孔処理を行うことにより、溶射皮膜の凝集力が高まり接着性がかなり改善されることが判明した。

一方、錫に関してはプライマー処理の有無にかかわらず熱冷サイクルを受けても良好な接着性を有していた。

5. まとめ

今回の実験を通じて以下の各項が明らかになった。

- ① フレーム、アーク及びプラズマの各溶射方法によりコンクリート下地面に金属、セラミックなどの皮膜の形成が可能である。
 - ② 溶射皮膜厚は溶射方法及び溶射材料により差が生じ、同一溶射材料では、フレーム溶射がアーク、プラズマ溶射に比較して膜厚が大となり、かつ融点の低い材料ほど膜厚は大となる傾向がある。
 - ③ 溶射によるコンクリートの熱劣化は溶射粒子が直接コンクリートに溶着する場合でもほとんどない。
 - ④ 金属を溶射する場合には、皮膜の形成状態及び施工能率を考慮するとフレーム溶射が最適と判断される。
 - ⑤ 溶射皮膜はポーラスなためコンクリート下地及び外気から皮膜への水分の影響を遮断し、耐久性を向上させるための下地処理及び表面処理が必要と考えられる。
 - ⑥ 適度な粗面を形成するエポキシ樹脂プライマーによる下地処理を行うことにより、溶射材料の種類や下地コンクリートの含水率にかかわらず十分な膜厚、接着強度及び接着耐久性が得られる。
 - ⑦ 金属溶射皮膜の光沢を得るための表面研磨処理は溶射膜厚にほとんど影響はなく接着強度の低下にもつながらない。
 - ⑧ 溶射皮膜の耐久性を向上させるための封孔処理（フッ素樹脂クリアー塗料によるトップコート）は溶射皮膜の凝集力を高め接着性を改善する効果がある。
- 今後、溶射皮膜の耐候性、下地ひびわれに対する追従性等について引き続き検討を行いコンクリートの新しい仕上げ工法として実用化を図っていきたい。

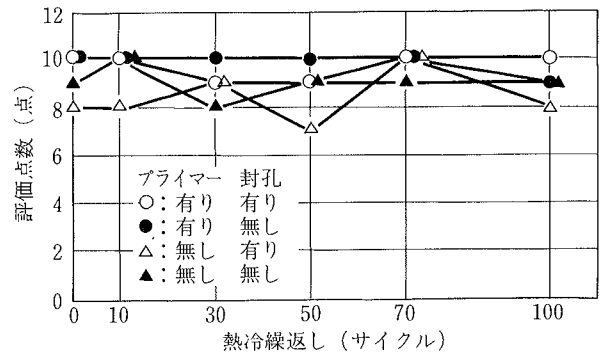


図-15 錫溶射皮膜の接着耐久性

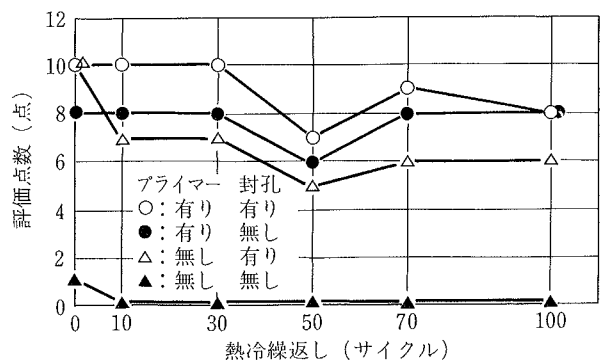


図-16 アルミ溶射皮膜の接着耐久性

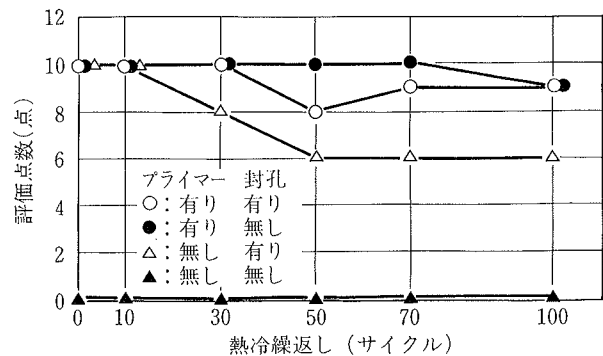


図-17 銅溶射皮膜の接着耐久性

参考文献

- 1) 青山 幹, 林 好正, 小川晴果: コンクリートの金属溶射仕上げ工法の開発, 溶射技術, Vol. 10, No. 2, p. 76~84, (1990,12)
- 2) 長滝, 氏家: コンクリートの透気性, セメントコンクリート, No. 455, p. 24~31, (1985, 1)
- 3) 北原 繁: 溶射方式, 表面技術, Vol. 41, No. 10, p. 9~13, (1990)
- 4) U. シュナイダー: コンクリートの熱的性質, 技法堂出版, p. 64~71, (1983,12)
- 5) 日本溶射協会編: 溶射ハンドブック, (株)新技術開発センター, p. 25~35, (1990)