溶射部材の疲労強度について*

—フレーム溶射に関する研究(第1報)—

屋良 秀夫**, 藤木 大輔***

Fatigue Strength of Sprayed Specimen*

Study on Flame Spraying (Report 1)

by Hideo Yara** and Daisuke Fujiki***

Various methods of surface treatment have been performed for improving the properties of metals and alloys. Among these surface treatment, the flame sprayed coating technique is selected, since this technique is expected to be one of the effective methods for the surface treatment.

The flame spraying used for this experiment has low cost equipment and easy maintenance, and can be adopted in various places and forms.

In this paper, the fatigue strength of the high strength steel (HT 60) is examined by the sprayed specimens with four kinds of thermal spray materials (Zn, Al, ceramics and metallizing alloy).

The results are as follows:

- 1) The surfaces of the turning and blasted specimens have a little higher hardness due to the work hardening effect.
- 2) The fatigue limit of the rotate-bending fatigue test is the same as that of the blasted specimen, and it has no relation to the blasted specimen and the kinds of spray material except the metallizing alloy material.
- 3) The microstructure of the base metal near the sprayed coating is the mixture of ferrite and pearlite.
- 4) The micrograph of the fatigue fracture surface shows mainly dimple and quasi-striation pattern.

Key Words: Fatigue strength, Fatigue limit, Fatigue fracture, Flame spraying, Spray coating

1. 結 言

溶射法は被覆する材料を溶融または半溶融状態にして高速で吹きつけ、微粒子として物体の表面に皮膜を作る表面加工技術の一つである。溶射材料として金属、セラミックスおよびサーメットなどが用いられ、種々の材質および形状を有する部材にも適用できるなど多くの利点を持っている。その用途は建築装飾に始まり鉄鋼製品の防錆が主となっていた¹⁾。しかし、高度成長期とそれに続く最近の社会環境の変化により機械や装置類の部品部材の表面の性能への関心が高まり種々の分野にも用いられるようになってきた。材料が使用環境に係わるのがその表面であるため、材料表面にのみ処理を施して新機能を付与する表面改質技術への期待が高くなっている。

このように、溶射技術の発達とともに耐摩耗性、耐熱および電気絶縁性などが同時に要求される複合目的の機能部品へと利用範囲も拡大し、近代産業の重要な地位を占めるようになってきている²⁾。さらに、最近部品部材の使用状況の苛酷化が進み、その対処の必要性によって表面処理に対する関心が一段と高まっている中で、溶射法がその一つとして注目されている³⁾。このような、いろいろな長所を持っている溶射も施工方法によっては十分注意をしなければマイナス面をもたらす場合がある。例えば、

既設の構造物あるいは部品部材などに防錆用として溶射を行うことによって、それらの寿命の低下や強度特に疲労強度の低下をもたらすようでは重要な問題となる。

そこで、本研究では設備費や維持費が安価で、いろいろな形状や場所にも適用できるガス炎を熱源とするフレーム溶射を用いて、特に既設構造物や部品部材の防錆のためにペイントの代用として延命効果の点より溶射を施した場合に、ブラスト前処理による切欠きの影響や溶射による熱の影響を調べるために、回転曲げ疲労試験を行い構造物や部品部材にどのような変化を与えるかについて硬度分布や疲労強度を測定し、また組織や疲労破面を観察して機械的性質や冶金的性質の面より研究したものである。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料および実験条件

本実験において使用した素材は一般に市販されている60 kgf/mm²級高張力鋼 HT60 材で板厚は19 mmである。その化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。Fig. 1 は回転曲げ疲労試験に用いた試験片形状を示したもので、試験片は母材の圧延方向に切り出し、試験片中心が板厚の中心とほぼ一致するように施削加工を行った。平滑部の直径は8 mm となっている。また、溶射材料は Zn, Al, メタライジング合金 (Ni, Al, Mo 合金)、セラミックス (Al₂O₃-TiO₂) をそれぞれ用いた。なお、膜厚はどの溶射材料の場合も約200 μm となっている。Fig. 2 は溶射材料を走査型電子顕微鏡で観察したもので、粉末の粒径はいずれも10-50 μm である。また、Table

*原稿受付 平成3年7月26日 昭和63年度秋季全国大会で発表

**正 員 琉球大学 Member, University of the Ryukyus

***学 生 員 琉大大学院(現日立製作所) Student member, University of the Ryukyus (Present: Hitachi Ltd)

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of specimen.

1) Chemical compositions										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Sn
HT60	0.14	0.46	1.32	0.016	0.013	0.07	0.15	0.27	0.036	0.019

2) Mechanical properties			
	Yield point MPa(kgf/mm ²)	Tensile strength MPa(kgf/mm ²)	Elongation (%)
HT60	431(44)	627(64)	33

Fig. 1 Shape of fatigue specimen. **Fig. 2** Scanning electron microphotograph of thermal spray materials.**Table 2** Chemical compositions and characteristics of thermal spray materials.

Thermal spray material	Composition (wt%)	Characteristics
Al	≦ 99%	Corrosion resistance
Zn	≦ 99%	Corrosion resistance
Ceramics	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ (97%-3%)	Wear resistance Heat resistance
Metallizing	Ni-Al-Mo (90%-5%-5%)	Friction resistance Corrosion resistance

Table 3 Thermal spray conditions.

spray material	O ₂ pressure x10 ³ Pa(kgf/mm ²)	C ₂ H ₂ pressure x10 ³ Pa(kgf/mm ²)	Air pressure x10 ³ Pa(kgf/mm ²)
Zn	235.2(2.4)	98.0(1.0)	470.4(4.8)
Al	235.2(2.4)	98.0(1.0)	509.6(5.2)
Ceramics	343.0(3.5)	98.0(1.0)	274.4(2.8)
Metallizing	343.0(3.5)	98.0(1.0)	274.4(2.8)

2は使用した溶射材料の化学成分とその特徴を示す。さらに、Table 3に疲労試験片に溶射を行った場合の溶射条件を示す。

2.2 実験装置および実験方法

供試鋼 HT60 材より疲労試験片を作成し平滑部を直圧式プラスト装置を用いてプラスト前処理を行ったのち、Zn, Al, メタライジング合金、セラミックスの粉末溶射材料を溶射した。なお、プラスト材はスチールグリッド#70である。

溶射前の試験片について旋削加工後とプラスト前処理後の平滑部の硬度分布を測定し、加工硬化あるいはプラストによる硬化を調べた。溶射後の皮膜部近傍の硬度も測定した。また、それぞれの試験片の組織観察も同時に行った。

Fig. 3 Fatigue testing apparatus.

次に、Fig. 3に示すように小野式回転曲げ疲れ試験機(回転数3600 rpm, 容量10 kgf・m)により疲労試験を行い、負荷応力と繰返し数との関係について調べた。なお、負荷応力の算定は次のように計算した。さらに疲労試験後、破断面を走査型電子顕微鏡で観察し破面の形態についても調べた。

$$M = WL/2 = 10 \cdot W \quad (\text{kg} \cdot \text{cm})$$

$$\sigma = 32M/\pi d^3 = 320W/\pi d^3$$

$$= 101.81W/d^3 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$= 9.98W/d^3 \quad (\text{MPa})$$

L cm (20 cm): 荷重点間距離, M kg・cm: 均一曲げモーメント, W kgf: 重錘の重量, σ kgf/cm²: 試験片に生ずる応力, d cm: 試験片の直径

3. 実験結果および考察

3.1 硬度分布

疲労試験に先立ち、硬度測定をしたのは硬度と疲労強度との間には相関関係があり、硬度を知ることによって疲労強度の予測に役立てるためである。また、組織にも影響を及ぼす因子の一つであるからでもある。

まず、旋削加工した試験片とプラスト前処理した試験片の硬度測定結果をFig. 4に示す。測定は平滑部を軸方向に切断した面を軸直交方向に表面から中心部へ0.5 mm 間隔で行った。負荷荷重値は2.94 N (300 gf)にした。

結果より、表面層の硬度は旋削加工した場合約 Hv 240 でプラスト前処理した場合約 Hv 270、中央部はいずれの場合でも約 Hv 210 となって旋削加工やプラスト前処理による加工硬化がそれぞれ現われていることがわかる。それらの加工硬化が疲労強度に与える影響について後述する。次に、疲労試験片の平滑部に4種類の溶射材料を用いて溶射した試験片について、溶射皮膜部の硬度測定

Fig. 4 Vickers hardness of turning and blasted specimens.

Fig. 5 Vickers hardness of sprayed coating.

結果を Fig. 5 に示す。結果より、溶射皮膜部の硬度が最も高い値を示したのはセラミックス溶射材料の場合で約 Hv 620 となっている。逆に低い値を示したのは Zn 溶射材料の場合で約 Hv 30 となっている。いずれの溶射材料の場合でも溶射は積層によって気孔の存在が見られるが、セラミックスでは粒子の結合力が強くなっていること、粉末の性質が耐摩耗用として使用されるために硬度が高くなっている。Zn と Al 溶射皮膜部の硬度が低くなっているのは積層による気孔が生じたためと考えられる。なお、素材部の硬度はフレームのために焼鈍的な効果をもたらした約 Hv 200 となっている。

4.2 疲労試験

旋削加工材とブラスト前処理材の回転曲げ疲労試験に

よって得られた S-N 曲線の結果を Fig. 6 に示す。結果より、疲労限は旋削加工材が約 250 MPa (26 kgf/mm²)、ブラスト前処理材が約 365 MPa (37 kgf/mm²) と後者の方が高い値を示している。これはブラストによる加工硬化によるものであり、ブラスト前処理による切欠きの影響は現われていないことがわかる。次に、溶射を行った試験片の S-N 曲線結果を Fig. 7 に示す。これより疲労限は溶射材料がメタライジング合金の場合は、溶射温度が高くなり素材が軟化したために少し低くなり約 315 MPa (32 kgf/mm²) となっているものと考えられる。その他の溶射材料ではブラスト前処理材の疲労限と同じ値で約 365 MPa (37 kgf/mm²) となっている。

以上のことより、回転曲げ疲労試験における疲労限は溶射する場合に前処理としてブラストにより粗面化を行うが、このブラストによる影響や溶射材料の種類にはほとんど関係なく、しかも溶射皮膜により疲労試験中に素材の熱の放散が妨げられるが、それによる影響もほとんどなくほぼブラスト前処理材の疲労限と同様な値となっている。なお、ブラスト面の表面粗さを測定した結果を Fig. 8 に示す。これより、表面粗さは約 $R_{max}=40\text{ }\mu\text{m}$ となっている。グリッドブラストとショットブラストではその目的や切欠きの度合いが少々異なるけれども、中沢

Fig. 6 S-N curves for turning and blasted specimens.

Fig. 7 S-N curves for sprayed coating specimens.

Fig. 8 Example of surface roughness.

らによるとショットブラストにより表面粗さが約 $R_{max}=60\text{ }\mu\text{m}$ となり微細な凹凸が多数できて、それが切欠き効果による疲労強度の低下が考えられるが、加工硬化と圧縮残留応力による強度上昇が切欠き効果による強度減少を十分カバーしていると報告している⁵⁾。このように、ブラスト前処理により表面の凹凸化による疲労強度へのマイナス効果が考えられるが、しかし、表面層の加工硬化によるプラス効果が働き疲労強度の低下には影響していないものと思われる。さらに、疲労強度は皮膜の強度にもほとんど関係なく素材そのものの強度に依存している。また、皮膜部で疲労強度を向上させることは出来ないこともわかった。

このことより、既設の構造物や部品部材などに防錆用として溶射を施してもブラスト前処理による切欠きの影響や疲労による強度低下がほとんどないため、構造物などの防錆の点より延命効果をもたらすために、ペイントの代わりに溶射を行ってもなんら問題のないことがわかった。

4.3 顕微鏡組織および疲労破面観察

溶射後、素材と皮膜近傍の顕微鏡組織観察結果を Fig. 9 に示す。いずれの溶射材料の場合でも皮膜部には気孔が観察され、防錆用として使用する場合には封孔処理を施せばその効果がさらに向上するものと考えられる。界面に近い素材の組織は、どの溶射材料においてもほぼ同様でフェライトとパーライトの混在組織となっているが、メタライジング合金溶射材料の場合は溶射温度が少々高くなっている関係で焼鈍と同じ効果をもたらす微細組織となっている。

次に、回転曲げ疲労試験によって得られた応力の違いによる破断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果の一例を Fig. 10 に示す。皮膜部には溶射材料に関係なく上述と同様に気孔が見られ、素材部には負荷応力に関係なく破断の安定成長領域部には疲労破面にしばしば観察されるストレーション状模様が観察され、最終破断部には延性破壊であるデンプル破面が多く見られる。しかし、メタライジング合金溶射材料の場合、低負荷応力の破面においては最終破断部にリバーパターンが観察される。

5. 結 言

フレーム溶射を用いてブラスト前処理された HT60 材へ溶射を行い、硬度分布や回転曲げ疲労試験を行った結果、本研究の範囲内で下記のような結論を得た。

1) 旋削やブラスト前処理による加工硬化が見られるが、溶射を行うことによりわずかに軟化している。また、溶射皮膜部の硬度はセラミックス溶射材料の場合が高く、Zn 溶射材料の場合が低くなっている。

2) 回転曲げ疲労試験による疲労限は、ブラスト前処理の影響や溶射材料の種類、さらに溶射皮膜の硬度にもほとんど関係せず、ほぼブラスト前処理材の疲労限約 365 MPa (37 kgf/mm^2) と同じ値となっている。そのため、既設の構造物の防錆用として溶射を施しても疲労強度の減少をとまなうこともなく、構造物の延命効果をもたらすことができるものと思われる。

3) 溶射皮膜近傍の顕微鏡組織観察において、いずれの溶射材料とも皮膜部は気孔が存在し、防錆用として使用する場合には封孔処理が必要となる。また、素材部の組織は、フェライトとパーライトの混在組織となっている。

4) 疲労試験によって得られた破断面の走査型電子顕微鏡観察において、素材部には疲労破面の特徴的なストレーション状模様や延性破面であるデンプル破面が多数見られる。しかし、メタライジング合金溶射材料の場合で低負荷応力時の破断面にはリバーパターンが観察される。

参 考 文 献

- 1) 関、石川：溶射技術の適用と問題点、日本機械学会誌、Vol. 82, No. 724 (1979), p. 270-275.
- 2) 長坂：金属溶射の現状と問題点、日本金属学会会報、Vol. 22, No. 12 (1983), p. 1021-1028.
- 3) 蓮井：最近の溶射技術、溶接技術、Vol. 32, No. 11 (1984), p. 19-24.
- 4) 石橋：金属の疲労と破壊の防止、養賢堂 (1967), p. 24.
- 5) 中沢、本間：金属の疲労強度、養賢堂 (1982), p. 51.

Fig. 9 Microstructures of sprayed coating zone.

Fig. 10 Typical fractographs of fatigue fracture surface.

異材継手の界面強度に関する基礎的研究*

寺崎 俊夫**, 秋山 哲也**, 上脇 悟***

Study of Interfacial Strength of Bonded dissimilar Materials*

by Toshio Terasaki**, Tetsuya Akiyama** and Satoru Kamiwaki***

Effects of specimen sizes and loading types on an interfacial strength of bonded dissimilar materials were investigated. The energy release rate, $\mathcal{G}$, was used for estimating the strength.

Resin and steel were used for the dissimilar materials. The Implant type specimens were tested under both tension and torsion loading types. $\mathcal{G}$ -value was calculated by the finite element method (FEM).

The larger the diameter of the specimen is, the lower tensile and/or torsional strengths is, in each loading type. However, as $\mathcal{G}$ -value almost shows constant value in each loading type, $\mathcal{G}$ -value becomes useful parameter for estimating an interfacial strength of the joint bonded dissimilar materials.

Key Words: Dissimilar materials, Interfacial Strength, Implant type specimen, Energy release rate $\mathcal{G}$

*原稿受付 平成3年10月17日

**正 員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute of Technology

*** 九州工業大学学生 Student, Kyushu Institute of Technology