

構造用鋼溶接部における防食塗装の長期劣化挙動に関する実験的研究

名古屋大学大学院
名古屋大学大学院

○廣畠 幹人
伊藤 義人

Experimental Study on Long-term Deterioration Behavior of Paint Coating on Welded Part of Structural Steel

by Mikihito HIROHATA, Yoshito ITOH

1. 緒言

社会基盤構造物の損傷、劣化が顕在化してきており、適切な補修補強による維持管理を行い構造物の長寿命化を図ることの重要性が強く認識されるようになっている。鋼構造物の主たる損傷の要因のひとつは腐食であり、塗装や金属被覆による防食の適用や、耐候性鋼の使用により腐食劣化を抑制することが一般的である^{1,2)}。現在のところ、鋼構造物の腐食対策として防食塗装が最も広く用いられている。防食塗装についてはこれまでに種々の塗装系が実用化され、実環境における長期間の曝露試験や、実環境と対応関係がある環境促進実験により防食塗装の長期的性能の検証がなされてきた^{3~6)}。

これらの性能検証実験には、母材鋼板に塗装を施し、塗装にクロスカット等の初期欠陥を設けた試験片が一般に用いられてきた。一方、溶接部は母材と比べ幾何学的形状が複雑であり、溶接金属と母材の異種金属接触や溶接残留応力など腐食劣化特性に影響を及ぼす溶接部特有の因子が存在する。そのため、溶接部における防食塗装の劣化特性が母材一般部とどのように異なるのかについては不明な点が多い。

本研究では、鋼溶接部の防食塗装の長期的な劣化特性を明らかにするための基礎的検討を行う目的で、一連の環境促進実験を実施した。鋼板上に溶接ビードを設けた供試体（溶接部供試体と称す）と鋼板のみの供試体（母材供試体と称す）に防食塗装を施し、実環境と相関性が高いとされるS6サイクル塩水噴霧複合サイクル環境促進実験⁵⁾に供した。400日間（1600サイクル）の環境促進実験結果に基づき、溶接部と母材一般部の防食塗装の劣化特性の相違について検討、考察した。

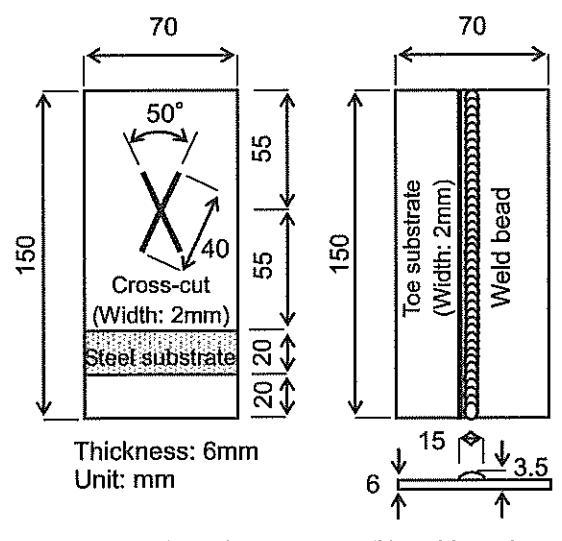


Fig. 1 Test specimen

2. 実験供試体および実験方法

2. 1 実験供試体

母材供試体および溶接部供試体の形状と寸法をFig.1に示す。板厚6mmのSM490A材を長さ150mm、幅70mmに切断し母材供試体とした。また、母材供試体と同じ鋼板にCO₂ガスアーク溶接によりビードオンプレート

Table 1 Mechanical properties of materials

	Base metal	Weld metal
Type	SM490A	YFW-C50DM
Y. P. (MPa)	413	530
T. S. (MPa)	542	590
Elongation (%)	22	29

Table 2 Welding conditions

Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Heat input (J/mm)
210	26	5	1092

Table 3 Chemical compositions (wt%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S
Base metal	0.17	0.27	1.5	<0.01	0.015	<0.01	0.013	0.001
Weld metal	0.086	0.42	1.4	<0.01	0.015	0.015	0.013	0.003

溶接を施した後、溶接始終端を除いて鋼板を長さ 150mm、幅 70mm に切断し、溶接部供試体とした。用いた溶接ワイヤは JIS Z 3313 に準拠する軟鋼～490MPa 級鋼用のフラックス入りワイヤ（YFW-C50DM、直径 1.2mm）である。母材および溶接ワイヤの機械的性質（ミルシート値およびカタログ値）を Table 1 に、溶接条件を Table 2 に示す。また、鋼材の化学成分の分析結果を Table 3 に示す。

母材供試体および溶接部供試体に Table 4 に示す C-5 塗装系（鋼構造物用重防食塗装）の防食を施した²⁾。母材供試体は、防食塗装の劣化特性を検討した既往の研究で用いられたものと同じである^{5,6)}。後述する溶接部供試体の止端露出部の幅と統一するため、クロスカットの線幅は 2mm とした。溶接部供試体については、実溶接構造物の止端部に発生した疲労き裂による防食塗装の損傷を模擬し、片方の溶接止端部に直線状の鋼板素地露出部を設けた（止端露出部と称す）。すなわち、溶接止端部に幅 2mm のマスキングテープを貼付してから塗装を行い、乾燥後にこれを剥がすことによって止端部の鋼板素地を露出させた。

溶接部供試体を切断し、断面を観察することで溶接部の塗装膜厚を測定した。溶接部の切断面の観察例を Fig.2 に示す。1 つの断面につき母材部、溶接止端部、溶接ビード側部および頂部 4箇所の断面観察を実施した。5 つの断面に対し撮影した顕微鏡写真から膜厚を測定し、その平均値として求めた各部位の膜厚を Table 5 に示す。

母材部に比べ、止端部の膜厚は 130μm 程度厚く、ビード側部の膜厚は 40μm 程度薄かった。また、ビード頂部の膜厚は母材部に比べ 130μm 程度薄かった。本実験では、供試体を水平に設置しスプレーにより塗装したため、ビード頂部および側部では塗料が流れ、平坦な母材部に比べ膜厚が薄くなったものと考えられる。一方、止端部には塗料が滞留し、膜厚が比較的厚くなつたものと推察される。ただし、いずれの部位の膜厚も鋼道路橋防食・塗装便覧に記載される基準²⁾を満足していた。また、各部位の塗装に損傷や異常はないことを目視により確認した。

2. 2 実験方法

環境促進実験には複合サイクル試験機（スガ試験機社製）を用い、既往の研究⁵⁾で実環境との相関性が高いことが示されている S6 サイクル（JIS Z2371）を採用した。S6 サイクルの詳細を Fig.3 に示す。この条件は、①実験槽内温度 30±2°C、5%濃度の塩水噴霧を 0.5 時間、②95%の湿潤を 1.5 時間、③50±2°C の熱風乾燥を 2.0 時間、④30±2°C の温風乾燥を 2.0 時間、合計 6 時間を 1 サイクルとするものである。実験期間は 1600 サイクル（400 日）とし、400 サイクル（100 日）ごとに供試体を実験槽内から取り出し、防食塗装の劣化性状を観察した。

Table 4 Specification of C-5 paint system

Treatment	Paint type	Amount (g/m ²)	Thickness (μm)
Surface preparation	Blasting ISO Sa 2 1/2	—	—
Primer	Inorganic zinc rich primer	600	75
Mist coat	Epoxy resin paint	160	—
Under coat	Epoxy resin paint	540	120
Middle coat	Fluororesin paint	170	30
Top coat	Fluororesin paint	140	25

Table 5 Measured coating thickness

Part	Coating thickness (μm)	
	Average	Standard deviation
Base metal	358	12
Weld toe	481	26
Bead side	313	18
Bead top	221	48

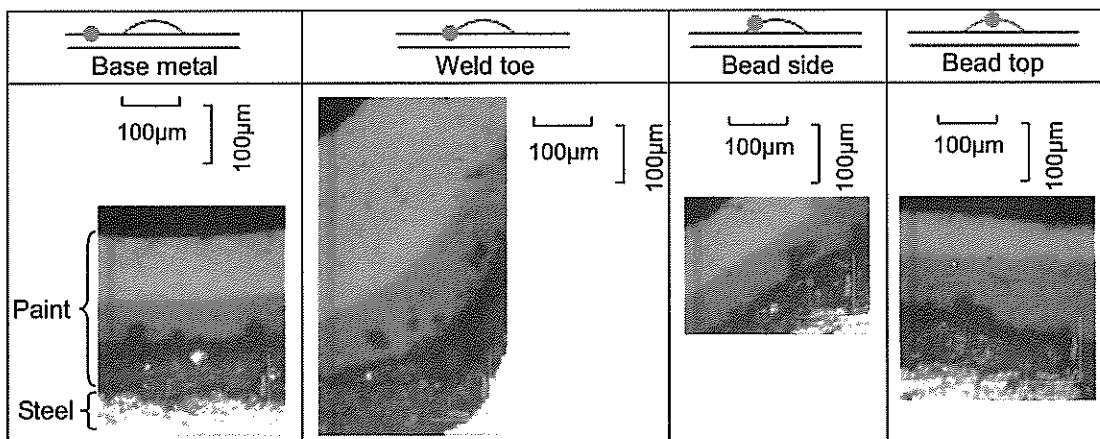


Fig. 2 Cross sections of painted weld specimen

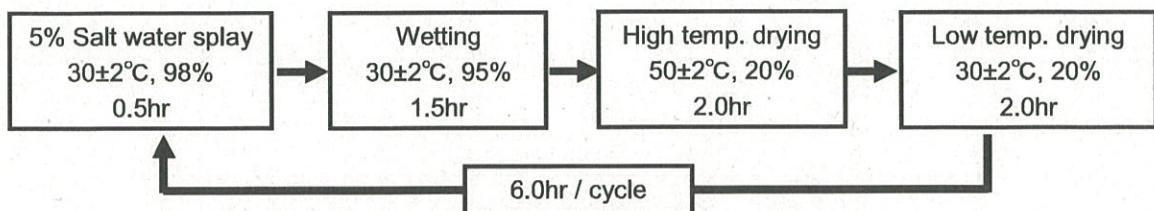


Fig. 3 Accelerated exposure experiment conditions (S6 cycles)

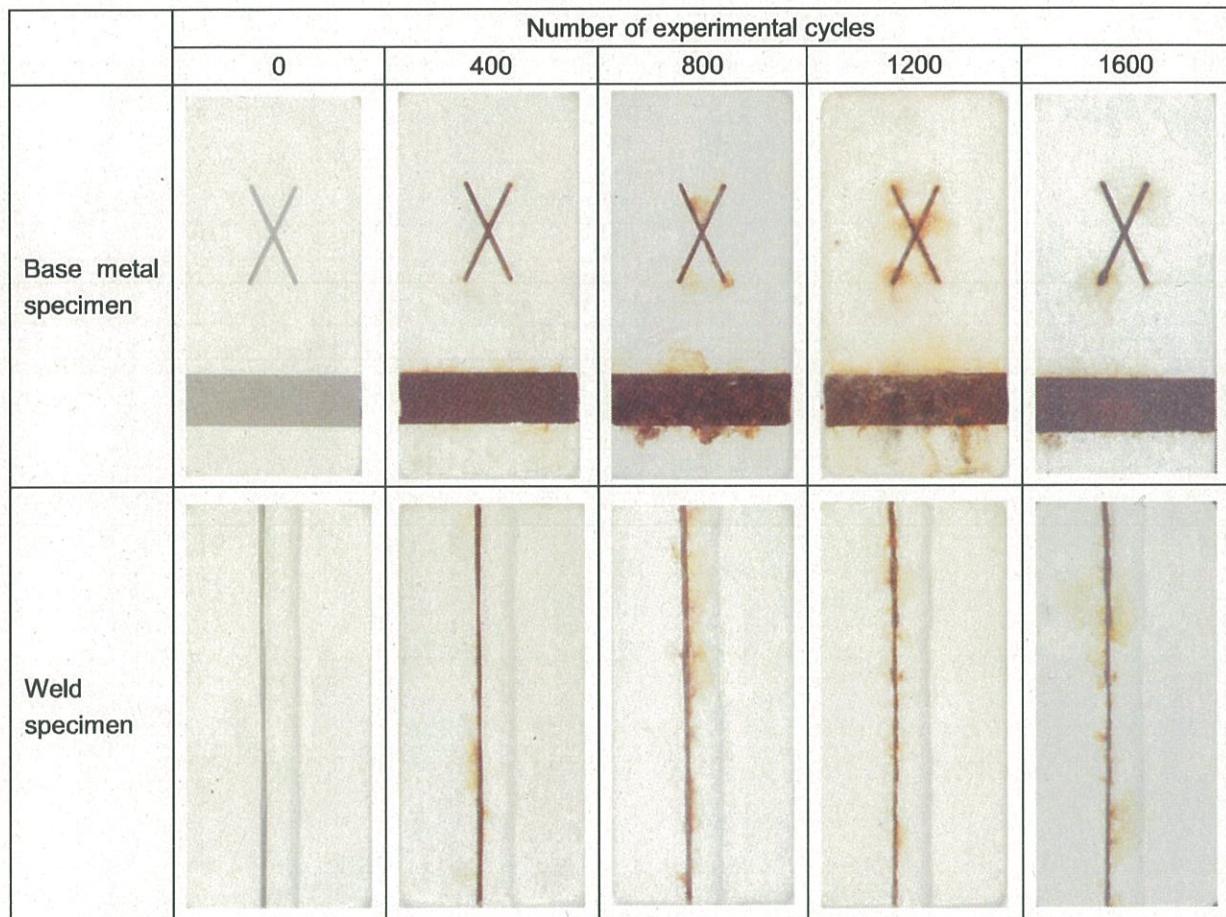


Fig. 4 Appearance of specimens

3. 実験結果

3. 1 外観観察

実験前および400サイクルごとに実験槽内から取り出した供試体の外観観察結果をFig.4に示す。母材供試体、溶接部供試体とともに実験開始から400サイクルではクロスカット部、素地露出部および止端露出部において赤錆の発生が確認された。その後、実験サイクルの増加と共に錆量が増加したが、800サイクル、1200サイクル、1600サイクル経過後も上記の塗装初期欠陥以外の箇所では錆の発生は確認されなかった。

3. 2 表面形状計測

各サイクルの実験終了後、レーザ変位計を用いて供試体の表面形状を計測した。表面形状計測では、供試体端部の塗装健全部に基準点3点を設けた。計測点の間隔は縦横0.3mmである。母材供試体のクロスカット部周辺の表面形状計測結果の一例(800サイクル)をFig.5(a)に示す。クロスカット部周辺において素地鋼材の腐食による塗装のふくれが観察された。供試体下部の素地露出部においても、素地鋼材と塗装の境界部で塗装のふくれが発生し、実験サイクルの増加と共にふくれが進展した。

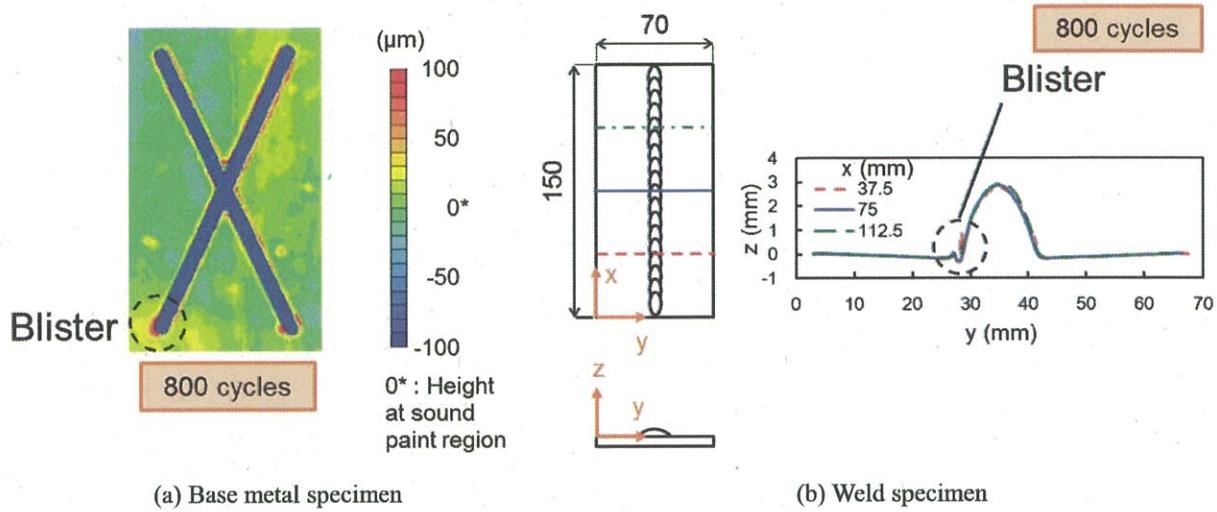


Fig. 5 Surface shape measurement results

また、レーザ変位計を用いて溶接部供試体の表面形状を計測した結果の一例（800サイクル）をFig5(b)に示す。図には、各実験サイクル終了後における供試体の3つの断面($x=37.5, 75, 112.5\text{ (mm)}$)の表面形状を示している。図中、点線で丸く囲った領域は止端露出部であるが、この周囲に実験サイクルの増加と共に塗装のふくれが確認された。止端露出部の母材側（図の左側）、溶接ビード側（図の右側）の両方にそれぞれ塗装のふくれが確認された。

3. 3 ふくれ体積の推移

塗装欠陥部の素地鋼材が露出している部分からの鋸の広がりおよび塗装の損傷を評価する指標として、塗装のふくれを用いることの有効性が既往の研究により示されている^{6~8)}。そこで、本研究においても塗装のふくれに注目し、溶接部供試体の塗装の劣化特性について検討する。

なお、本研究におけるふくれの定義は、塗装の健全部から $50\mu\text{m}$ 以上の塗装の隆起が生じた領域の体積とし^{6~8)}、レーザ変位計による表面凹凸形状の計測結果から塗装のふくれ体積を求めた。塗装の健全部は、母材供試体ではクロスカット部および素地露出部から離れた位置で塗装の劣化、損傷が確認されていない領域とした。溶接部供試体においては、素地鋼材を露出させていない溶接止端部（Fig.5(b)、溶接ビードの右側の止端部）周辺の領域とした。

母材供試体のクロスカット部および溶接部供試体の止端露出部における塗装のふくれ体積の推移をFig.6に示す。形状の異なるクロスカット部および止端露出部のふくれ体積を比較するため、両者のふくれ体積を欠陥の長さ（クロスカット部： $40\text{mm} \times 2$ 本、止端露出部： 150mm ）で除した単位欠陥長さあたりのふくれ体積を示している。また、母材供試体および溶接部供試体3体ずつのふくれ体積の平均値（M）および標準偏差（S）を示している。

母材供試体のクロスカット部では、400サイクルではほとんどふくれが生じていなかったが、その後の実験サイクルの増加と共にふくれ体積が増加した。800サイクルから1200サイクルにかけて、ふくれ体積が大きく増加したが、1200サイクルから1600サイクルの間はふくれ体積の増加はほとんどなかった。一方、溶接部供試体の止端露出部については、400サイクルの時点ですべてのふくれが生じ、その後も実験サイクルの増加と共にふくれ体積が増加した。1600サイクルの実験終了時点では、母材供試体のクロスカット部に比べ、溶接部供試体の止端露出部のふくれ体積の平均値は約15%大きかった。しかし、母材供試体のクロスカット部のふくれ体積のはらつきがやや大きく、現段階で溶接部供試体の止端露出部と比較して明確な差が生じていると判断することは困難と言える。

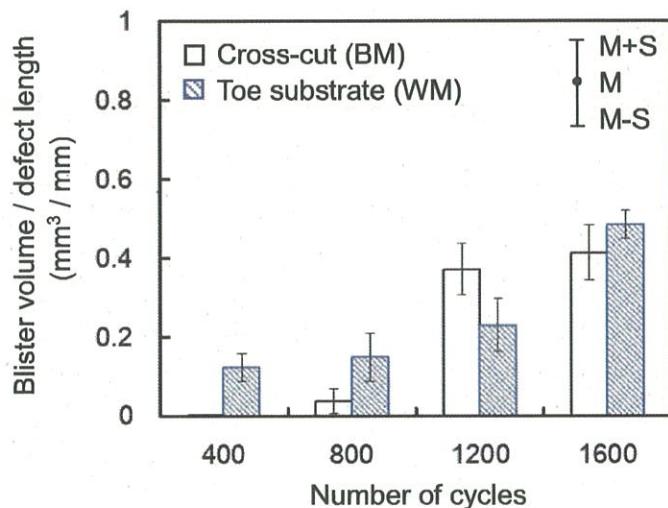


Fig.6 Relationship between blister volume and experimental cycles

3. 4 考察

本実験で使用した供試体の母材と溶接金属の化学組成を比較すると、Table 3 に示すように溶接金属の方が母材よりも炭素含有量が少なかった。構造用鋼の場合、炭素含有量が少なくなると塩化物環境下における腐食速度が低下することが知られている⁹⁾。また、Table 5 および Fig.2 に示すように、溶接部供試体の止端部の塗装膜厚は母材部に比べ厚くなっていた。化学組成および塗装膜厚の観点からは溶接止端部の方が母材部よりも腐食が生じにくい傾向にあると考えられるが、1600 サイクルの本実験結果からは、母材供試体のクロスカット部に比べ溶接部供試体の止端露出部の劣化（ふくれ体積）がやや大きかった。

本実験と同時に 1200 サイクルまで実験槽内に配置していた防食塗装を施していない母材供試体と溶接部供試体を比較すると、Fig.7 に示すように溶接部供試体の止端部には塩分が滞留しやすい傾向があることを目視で確認した。防食を施した供試体においても、平坦な母材部に比べ、溶接止端部には塩分が付着、滞留しやすい傾向にあったため、溶接部供試体の止端露出部の防食塗装の劣化が母材供試体のクロスカット部と同程度、あるいはやや大きくなったものと推察される。

しかし、本実験の範囲（1600 サイクル）では母材供試体と溶接部供試体の防食塗装の劣化挙動の相違を十分に明らかにできていないため、今後さらに環境促進実験を継続し、検討を実施していく。

4. 結言

構造用鋼溶接部における防食塗装の劣化挙動を検討するため、SM490A とそれにビードオンプレート溶接した供試体に鋼構造物用の重防食塗装を施し、400 日間（1600 サイクル）の塩水噴霧複合サイクル環境促進実験を実施した。

得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 溶接部供試体を水平に設置してスプレーにより防食塗装を施した場合、ビード頂部では塗料が流れ、平坦な母材部に比べ膜厚が 130μm 程度薄くなった。同様に、ビード側部は母材部に比べ膜厚が 40μm 程度薄くなかった。一方、止端部には塗料が滞留し、膜厚が母材部よりも 130μm 程度厚くなかった。
- (2) 塗装欠陥の単位長さあたりのふくれ体積を塗装の劣化指標とすると、溶接止端部に設けた素地露出部と平滑な母材部に設けたクロスカット部における塗装の劣化挙動は異なっていた。母材供試体のクロスカット部では、400 サイクルではほとんどふくれが生じていなかったが、その後の実験サイクルの増加と共にふくれ体積が増加した。800 サイクルから 1200 サイクルにかけて、ふくれ体積が大きく増加したが、1200 サイクルから 1600 サイクルの間はふくれ体積の増加はほとんどなかった。一方、溶接部供試体の止端露出部については、400 サイクルの時点でふくれが生じ、その後も実験サイクルの増加と共にふくれ体積がした。
- (3) 1600 サイクルの実験終了時点では、母材供試体のクロスカット部に比べ、溶接部供試体の止端露出部のふくれ体積の平均値は約 15% 大きかった。しかし、母材供試体のクロスカット部のふくれ体積のばらつきがやや大きく、現段階で溶接部供試体の止端露出部と比較して明確な差が生じていると判断することは困難であった。
- (4) 化学組成および塗装膜厚の観点からは溶接止端部の方が母材部よりも腐食が生じにくい傾向にあると考えられるが、平坦な母材部に比べ形状が複雑な溶接止端部には塩分が付着、滞留しやすかったため、溶接部供試体の止端露出部の防食塗装の劣化が母材供試体のクロスカット部と同程度、あるいはやや大きくなつたものと推察される。

本実験の範囲（1600 サイクル）では母材供試体と溶接部供試体の防食塗装の劣化挙動の相違を十分に明らかにできなかつたため、今後さらに環境促進実験を継続し、検討を実施していく。

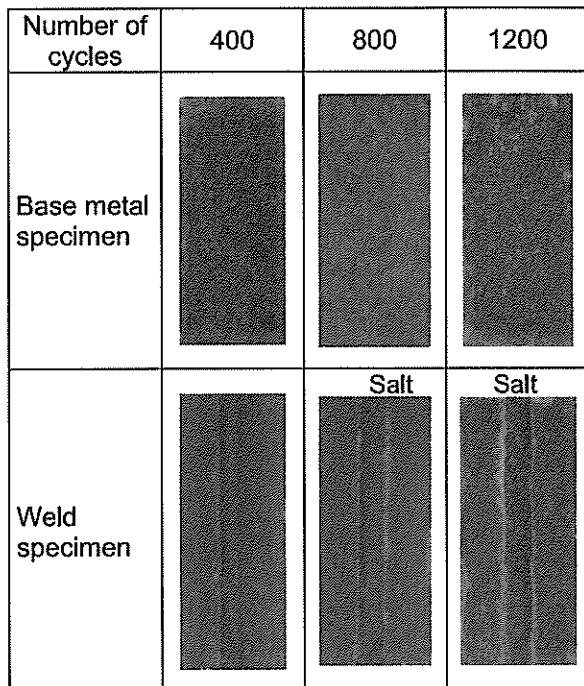


Fig.7 Surface appearance of non-coated specimens

参考文献

- 1) T. Natori, K. Nishikawa, J. Murakoshi and T. Ohno: Study on Characteristics of Corrosion Damages in Steel Bridge Members, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.668/I-54 (2001), 299-311. (in Japanese)
- 2) Japan Road Association: 鋼道路橋防食・塗装便覧, Maruzen (2005). (in Japanese)
- 3) Japanese Society of Steel Construction : 重防食塗装, Giho-do (2012). (in Japanese)
- 4) H. Fujiwara and Y. Tahara : Research on the Correlativity of Outdoor Exposure Test of Painting Test Piece with Corrosion Test for Steel Bridge Painting, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.570/I-40 (1997), 129-140. (in Japanese)
- 5) Y. Itoh, K. Iwata and S. Kainuma: Accelerated Exposure Tests on Environmental Durability for Steels and the Evaluation of Accelerated Coefficient, Journal of Structural Engineering, Vol.48A (2002), 1021-1029. (in Japanese)
- 6) I. Kim, Y. Itoh, T. Hida, A. Koyama and Y. Kutsuna : Accelerated Corrosion Tests for Evaluating Corrosion Degradation of Steel Bridge Painting Systems, Journal of Structural Engineering, Vol.52A (2006), 803-812. (in Japanese)
- 7) Y. Itoh, Y. Shimizu and A. Koyama: Durability of Steel Bridge Paint Systems for Combined Cyclic Corrosion Tests with Salt Water Spray and Acid Rain Spray, Journal of Japan Society of Civil Engineers, A, Vol.63, No.3 (2007), 506-517. (in Japanese)
- 8) Y. Itoh, S. Tsubouchi and I. Kim: Corrosion Deterioration Characteristics of Various Repainted Steels Considering Accelerated Exposure Test Results, Journal of Japan Society of Civil Engineers, A, Vol.64, No.3 (2008), 556-570. (in Japanese)
- 9) H. H. Uhlig and R. W. Revie: 腐食反応とその制御 (第3版), Sangyo Toshyo (1997), 117. (in Japanese)