

腐食が進行した耐候性鋼材の塗装による補修効果の長期的検証

富山禎仁・新田弘之

1. はじめに

耐候性鋼材は適切な腐食環境下であれば無塗装でも使用できるとされ、LCC縮減への期待から、鋼道路橋への適用が増加することとなった。しかし一方で、無塗装耐候性鋼橋梁の普及に伴い、当初期待していた様な緻密なさび層が形成されず、部材の著しい板厚減を伴うほどの腐食を生じる事例も報告されるようになった¹⁾。橋の架設環境が不適切であった場合（飛来塩分量や濡れ時間が想定よりも多いなど）などのように、耐候性鋼材の腐食が短期間で進行した要因²⁾が排除できない場合や、腐食の再発生のリスクが高い場合には、塗装などによって補修を実施（防食仕様の見直し）する必要がある。

そこで、ここでは腐食が進行した無塗装耐候性鋼材を塗装で補修する際に必要となる、適切な塗装系や素地調整方法、補修時機などの技術的知見を得るために行っている、様々な仕様の塗装試験片の屋外暴露試験による長期的な補修効果の評価の取り組みを紹介する。

2. 実験方法

2.1 試験片の作製

2.1.1 腐食した耐候性鋼板の作製

本研究では未腐食の状態から腐食が顕著となった状態までを0～Ⅲまでの4段階に分類し（図-1）、各腐食レベルに属する耐候性鋼板を補修塗装することで、補修時機による塗膜耐久性への影響を評価することとした。腐食レベルⅢは「鋼道路橋防食便覧」における「さび外観評点」5段階のうちの2～1に相当し、「うろこ状さび」や「層状剥離さび」といった、いわゆる「異常なさび」が発生した段階である。ひとたび「異常なさび」が発生したならば、その原因を排除できない限り、できるだけ早く補修することが望ましい。この観点から、「異常なさび」発生以降の腐食の状態を細分化せずに「腐食レベルⅢ」

としてまとめることとした。

JIS G 3114に規定される耐候性鋼SMA490AWの平板（寸法：200×300×9 mm）を無塗装で、飛来塩分の多い海岸に2ヶ月、5ヶ月、10ヶ月と期間を変えて暴露し、各腐食レベルとなるように意図的に腐食させ、これを試験に用いた。

腐食レベル	標準写真		外観状態
	最大	最小	
0			さびの発生が全くない。
I			さびが全面まで発生していない。さび厚は薄い。
II			さびが全面まで発生している。さびは厚く、固着している。
III			さびが全面まで発生している。さびはかなり厚く、固着していない。

図-1 本研究で設定した無塗装耐候性鋼材の4段階の腐食レベルと標準写真

2.1.2 腐食した耐候性鋼板の素地調整

前項で腐食させた無塗装耐候性鋼板に対し、ブラスト処理（アルミナ研削材）あるいはディスクグラインダー処理（研削砥石）により、補修塗装前の素地調整を行った。目標の仕上がり程度（除せい度）はISO 8501-1に規定されるSa2（ブラスト処理）およびSt3（ディスクグラインダー処理）とした（図-2）。ブラスト処理については一部の鋼板で入念な仕上げ（Sa2 1/2）あるいは軽微な仕上げ（Sa1）を行い、仕上がり程度の違いによる影響も評価した。

素地調整後の処理面に塩分が残ったまま塗装すると、早期に膨れ、剥がれ等の塗膜異状や塗膜下腐食が発生することが知られており、素地調整工程でさびとともに塩分も十分に除去する必要がある。これは、耐候性鋼橋梁の補修塗装のみならず、一般的な

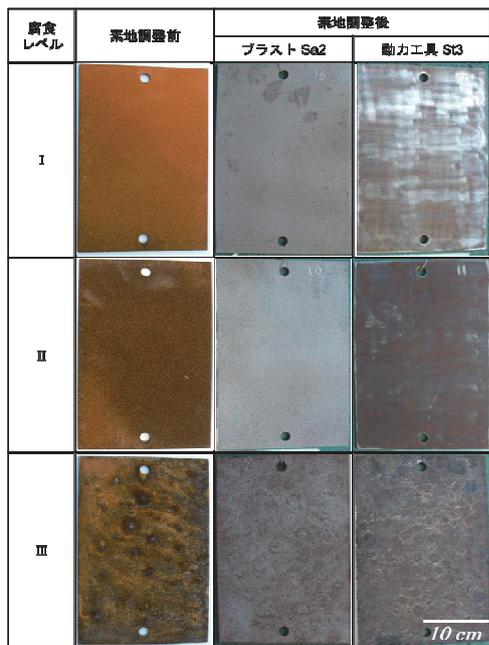


図-2 素地調整前後の耐候性鋼板の代表的な外観

塗装橋梁の塗替え塗装などでも同様である。「鋼道路橋防食便覧」では耐候性鋼材の補修塗装に関し、素地調整後の付着塩分量が50mg/m²を超える場合には、水洗などで塩分除去することが望ましいとしている。この数値は、被塗装面が「塗膜」である場合の管理基準値をもとに設定されているが、被塗装面が「鋼材」の場合でも同じ値を適用することの妥当性については十分な検証がなされておらず、暫定的な値と解釈される。素地調整後の鋼材面には、板厚方向に孔食状に進展したさびなどが除去しきれずに残存する場合があるが、このようなさび、とりわけ鋼素地とさび層との境界近傍には塩分が高濃度で蓄積されていることが多い。このようにさびに蓄積されている塩分が塗膜性能に及ぼす影響を解明するとともに、これを効率的に除去するための素地調整関連技術を確認することが目下の検討課題となっている。

本研究では、素地調整後の水洗の効果を定性的に把握するため、一部の鋼板については素地調整後に水洗を行い、十分に乾燥後、塗装した。

2.1.3 塗装

素地調整後の耐候性鋼板を直ちに塗装し、暴露試験片を作製した。試験片は仕様ごとに2枚ずつ作製した。補修塗装には、鋼道路橋の塗替え塗装で用いられる、鋼道路橋塗装・防食便覧のRc-I、Rc-III、Rc-IV塗装系を適用した(表-1)。

表-1 補修塗装系

補修塗装系	防食下地	下塗り			中塗り	上塗り
		下塗り①	下塗り②	下塗り③		
Rc-I	有機ジンクリッチペイント 75μm	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	-	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30μm	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料上塗り 25μm
Rc-III	-	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30μm	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料上塗り 25μm
Rc-IV	-	弱溶剤形 変性エポキシ樹脂塗料下塗り 60μm	-	-	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料用中塗り 30μm	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料上塗り 25μm

2.2 暴露試験

補修塗装を行った耐候性鋼板試験片(各仕様2枚ずつ)を、厳しい腐食環境にある沖縄建設材料耐久性試験施設(沖縄県国頭郡大宜味村)に暴露した。2枚のうち一方の試験片には、塗膜に鋼素地まで達する切り込みキズ(長さ100mm、幅約1mm)を入れた上で暴露試験に供した。

評価点	標準写真		発生面積
	最大	最小	
0			0.05%以下
I			0.05~0.5%
II			0.5~8.0%
III			8.0%以上

図-3 本研究で設定したさびの評価点と標準写真

日塗検基準	大きさ					発生面積率
	0	2	3	4	5	
0	0					
2		I	I	II	II	
3			I	II	II	I
4				II	III	II
5					III	III
						I
						II
						III

図-4 本研究で設定した膨れの評価点

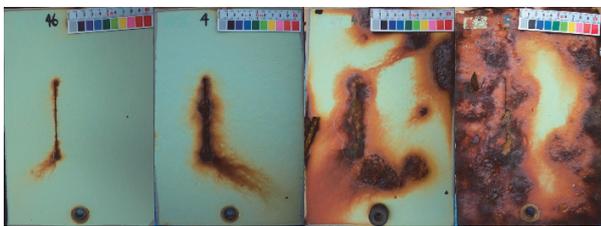
暴露により塗膜には「さび」と「膨れ」が主だった変状として現れることが想定されたため、さびについては図-3に示す標準写真を作成し、これをもとに発生程度を評価した。また、膨れについては「塗膜の評価基準(日本塗料検査協会) 3)」をもとに大きさと密度の等級付けをし、その等級から図-4に基づく評価を行った。一定の暴露期間が経過した時点

で、塗膜の変状程度と、キズ部から塗膜下に沿って進展していく腐食の程度（片側最大膨れ幅）を評価した。

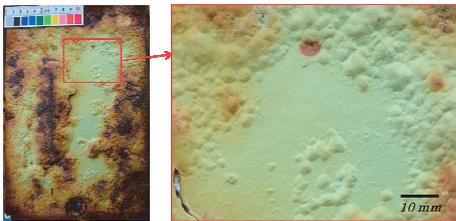
3. 暴露試験10年後の追跡調査結果と考察

3.1 暴露10年後の試験片外観

暴露10年後の時点では、補修塗装前の耐候性鋼板の腐食レベル、補修塗装時の素地調整程度、補修塗装系の違いにより塗膜外観に大きな差異が生じた（図-5）。特に劣化が著しい試験片では、表面的な塗膜の異状にとどまらず、塗膜下でも鋼材の腐食が大きく進行している状態となった。



1) Sa2 1/2 2) Sa2 3) Sa1 4) St3
(a) 素地調整程度による違い（腐食レベルⅢ→Rc-I）



(b) 塗膜に発生した膨れ（腐食レベルⅢ→St3→Rc-IV）

図-5 暴露10年後の代表的な試験片外観

3.2 各種補修塗装系塗膜のさび・膨れの評価

暴露10年後における塗膜のさび、膨れの評価点を補修塗装系別に整理し、図-6に示した。この図における評価点は2枚の試験片の平均値であり、値が大きいものほど塗膜の外観変状が大きく、劣化が進行していることを表している。

Rc-Iで補修した場合（図-6(a)）、補修時の腐食レベルがⅠではいずれも良好な塗膜状態が保たれていたが、腐食レベルがⅡやⅢになると、素地調整程度が低い動力工具（ディスクグラインダー）処理（St3）やブラスト処理（Sa1）した試験片でさびや膨れの塗膜異状が生じた。一方、補修塗装にRc-ⅢやRc-Ⅳを適用した試験片（図-6(b)、(c)）では、補修時の腐食レベルに関わらず、いずれもさびや膨れの塗膜異状を生じ、その程度は、補修時の腐食レベルが高いほど大きくなる傾向が認められた。比較のため、新品の未腐食耐候性鋼板を同様の素地調整および塗

装系で塗装し、併行して暴露しているが、これらはRc-Ⅲ、Rc-Ⅳであっても暴露10年の時点では変状無し、あるいは軽微な変状のみであった。このことから、Rc-Ⅲ、Rc-Ⅳで補修した場合に塗膜の変状が早期に進行したのは、塗装前の下地状態に原因があるものと推察される。すなわち、腐食した耐候性鋼材をディスクグラインダーで素地調整した際に、耐候性鋼材表面に固着したさびや塩分を十分に除去できず、これらが塗膜の早期劣化を引き起こす要因となったものと考えられる。ディスクグラインダー処理については、水洗の効果も認められなかった。

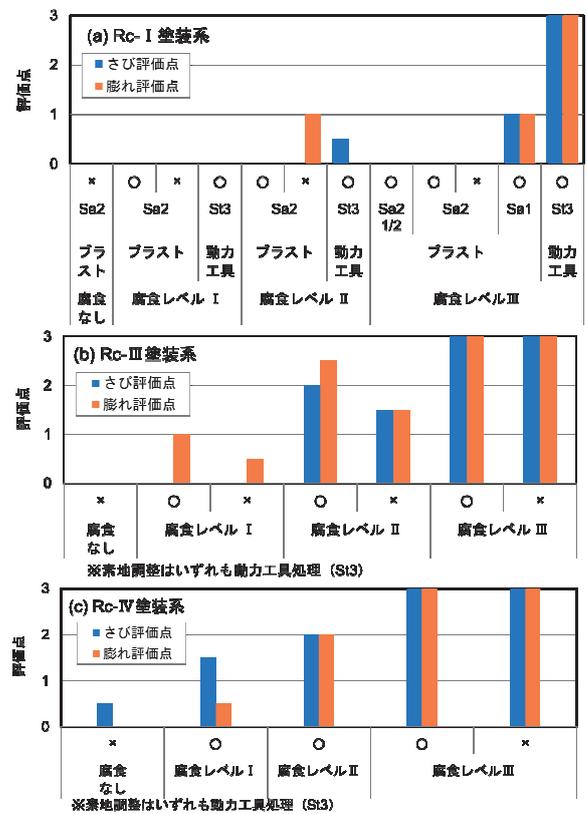
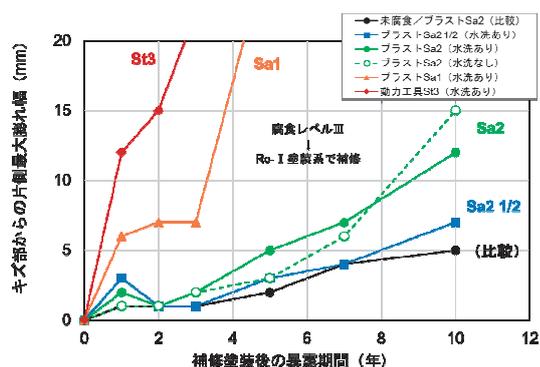


図-6 暴露試験10年後における塗膜変状の評価点（○：水洗あり／×：水洗なし）

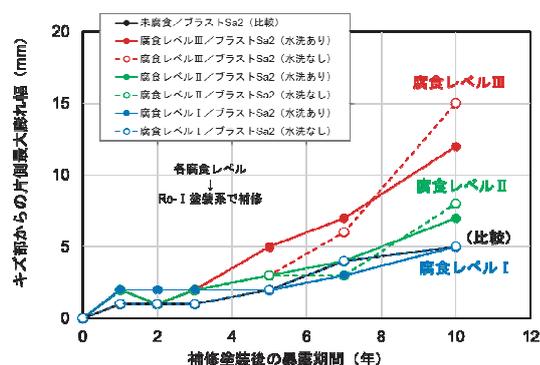
動力工具処理後に残存するさびや塩分の量を低減するため、砥石タイプのディスクよりも研削性能が高いとされる超硬合金ディスクやダイヤモンドディスクを用いて素地調整を行い、同様の試験を行った。しかし、塗膜変状が顕在化するまでの期間はやや長くなったものの、暴露10年後には砥石タイプと同等の劣化状態となり、期待した効果は得られなかった。以上のことから、腐食が進行した耐候性鋼材を補修塗装する場合、動力工具による素地調整では長期の塗膜耐久性は確保できないことが明らかとなった。

3.3 キズ部からの腐食進展程度の評価

塗膜の防食性の評価では、塗膜表面に現れる変状の程度と共に、塗膜に人工的に設けたキズ部に発生するさびが塗膜下に侵入して広がっていく程度（さびによる膨れの幅や面積）を指標とすることが多い。これは、塗膜に何らかの物理的な損傷が生じた場合を想定し、そこを起点とする腐食の抑制能を評価するためである。また、変状が生じにくい耐久性の高い塗膜の防食性を、できるだけ迅速に評価するねらいもある。



(a) 素地調整程度による違い



(b) 補修時の腐食レベルによる違い

図-7 キズ部からの腐食進展による膨れ幅の経時変化

ブラスト処理しRe-I で補修した試験片では、暴露10年の時点で塗膜外観に明確な差異はなかったが、キズ部から進展した腐食の程度を比較すると（図-7）、素地調整程度が高いほど、また、補修時の腐食レベルが低いほど小さく、新品の未腐食鋼板を塗装したものに近い水準で推移していることがわかった。

暴露10年の時点では、「水洗あり」が「水洗なし」よりもやや良好な結果となっている（図-7(b)）。ブラスト処理（Sa2）完了時の付着塩分量は30mg/m²程度であり、水洗により15mg/m²程度まで低減した。現状の管理基準値（50mg/m²）を下回る低い水準にもかかわらず、水洗の有無で腐食進展に差が生じつつあり、被塗装面の塩分を極力除去する必要があることを改めて確認した。今回は現場

での塩分管理に利用されることもある「電気伝導度法」により塩分測定を行ったが、この測定法では原理的に鋼材表面近傍の塩分しか測定できず、残存さびの深層に蓄積された塩分量は適正に評価できていない。正味の残存塩分量を現場で管理するための技術開発と併せて、管理基準値を検討していく必要があると考えている。

4. まとめ

10年間の暴露試験結果から、耐候性鋼材の補修塗装について、以下の知見が得られた。

- (1) 補修塗装前の素地調整では、ISO Sa2 1/2以上の仕上がりを目指し、ブラスト処理で入念にさびや塩分を除去すべきである。
- (2) 現場条件等で動力工具処理を選択せざるを得ない場合には、さび厚が薄く、腐食が軽微な段階で補修に踏み切り、ISO St3を目標に金属光沢が出るまで入念な素地調整をすべきである。
- (3) いずれの場合でも、補修塗装にはジंकリッチペイント層を有する重防食塗装系（たとえばRc-I）を選定することが推奨される。

今後は引き続き、水洗の有効性や、残存塩分の許容量などについて検討する予定である。

謝辞

本研究は、土木研究所と民間企業6社（関西ペイント(株)、神東塗料(株)、中国塗料(株)、日本ペイント(株)、大日本塗料(株)、日鉄防食(株)）との共同研究で行われたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木研究所ほか：鋼橋防食工の補修方法に関する共同研究報告、土木研究所共同研究報告書第414号、2010
- 2) (公社)土木学会：大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策、2019
- 3) (一財)日本塗料検査協会：塗膜の評価基準、2003

富山禎仁



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 主任研究員、博士(工学)
Dr.TOMIYAMA Tomonori

新田弘之



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr.NITTA Hiroyuki