

露出鉄筋への応急措置として実施される除錆・防錆技術

前堀伸平・三浦正純

1. はじめに

コンクリート構造物の定期点検において、局部的に腐食した露出鉄筋等が発見された場合、恒久対策が実施されるまでの応急措置として、さびの除去（除錆）を施した上で、防錆剤の塗布（防錆）を施すことが一般的であり、その際に用いる防錆剤は様々な種類が開発されている。一方で、既に腐食した鉄筋へ適用した場合、防錆剤の効果持続性（耐用期間）については未だ不明な点が多く、評価方法も整理されていないのが現状である。

このようなことから、新技術活用方式の1つである「テーマ設定型（技術公募）」により、求める評価指標、要求水準、試験方法等のリクワイヤメントを明確にした、「露出した鉄筋等に対する除錆・防錆技術」が公募され、応募された技術についての技術比較表が、新技術情報提供システム（NETIS）で令和4年3月に公表されている¹⁾。

テーマ設定型実証を実施する第三者機関等に選定されている当センターでは、技術比較表作成にあたっての参考資料を取りまとめた。本報告では、参考資料を作成する際に実施した技術的検討に基づき、公表されている技術比較表の理解の助けとなるよう、除錆・防錆技術に求められる性能およびその評価方法について解説する。

2. 除錆・防錆技術に求められる要求性能

今回対象とする技術は、管理者がコンクリート構造物の定期点検等に際して、発見された露出鉄筋に対して、応急措置としてすぐに実施することを想定しており、点検作業の範囲内で容易に実施できる技術であることが求められる。また、応急措置後の一定期間（数か月～数年）はそのままの状態となることが想定され、その後本復旧（断面修復等の補修工事）が実施される。以上の流れを踏まえると、求められる要求性能（リクワイヤメント）は、おおよそ以下の3項目に大別される。

A: コンクリート構造物の点検で、局部的に腐食した露出鉄筋等が発見した際に、簡易な方法で施工できる技術であること【施工性】

B: 施工後から本復旧までの一定期間、大気中で防食効果を維持できる技術であること【防食性】

C: 適用後に本復旧（断面修復を想定）を実施するにあたって支障のない技術であること【本復旧時の適応性】

上記について、それぞれ表-1に示す要求性能が技術比較表で設定されている。以下、防錆剤の効果を理解する上で重要と考えられる防食性能から、設定されている要求性能および要求性能を明確にするため実施された共通試験の内容について解説する。

3. 防食性能について

3.1 鉄筋の防食機構

コンクリート構造物の鉄筋は、通常コンクリート中の高いpH環境下で鉄筋の表面に酸化皮膜（不動態皮膜）を形成し、腐食から守られている。しかし、腐食した露出鉄筋を大気に晒されている状態で放置すると、大気中から供給される水や酸素により、さびを起点とした鉄筋の酸化（腐食）が進行する。したがって、鉄筋腐食の進行を抑制するため何らかの措置を施す必要があり、最も一般的な措置として防錆剤の塗布が挙げられる。防錆剤の防食原理としては、以下に示すメカニズムに大別できる。

被覆防食：鉄表面を防錆剤が被覆することにより、水や酸素などの腐食因子が鉄表面に供給される速度を低下させ、腐食の進行を抑制する。

さび浸透固化による緻密化：鉄表面に生成したさび層の微細な空隙中に防錆剤が浸透固化して空隙を埋めることで、さび層中に保持される水分量が減少し腐食を抑制させるとともに、さび層が緻密化され腐食因子の透過速度を低下させることで、腐食の進行を抑制する。

さび転換による安定化：腐食に寄与する不安定なさびを、防錆剤の作用により化学反応を生じさせ

表-1 技術比較表で設定された要求性能項目

要求性能			備考	
A:定期点検時に簡易に施工できること	施工が容易であること	A-1	前処理(塗布前の準備)が煩雑でないこと	
		A-2	特殊な装備や作業資格は不要であること	
		A-3	材料の取扱いが容易であること	
		A-4	短時間で施工できること (遅くとも同日内に施工が完了する)	共通試験により確認
		A-5	施工品質が容易に確保できること	共通試験により確認
	施工管理が可能であること	A-6	施工管理方法が明示されていること 施工完了の有無が容易に判別できること	共通試験により確認 共通試験により確認
B:施工後、一定期間大気中で防食性能が維持されること	大気中で防食性能が一定期間維持されること	B-1	防食機構が合理的に説明されていること	
		B-2	防食性能が一定期間持続すること	共通試験により確認
	腐食が進行した鉄筋に適用できること	B-3	さび面に対しても防食性能が発揮できる	共通試験により確認
C:施工後に断面修復を実施するにあたって支障がないこと	施工した被膜を除去する場合	C-1	施工した被膜を容易に除去できること	共通試験により確認
	施工した被膜を除去しない場合	C-2	断面修復時に残存被膜と断面修復材の付着が確保できること 断面修復後に残存被膜がアルカリ環境下で変質することで断面修復材との付着性が低下しないこと	

安定な形態のさびに変化させることで、鉄表面に存在するさびが腐食に寄与する影響を抑制する。

不働態皮膜形成(高pH化)：防錆剤の作用により鉄筋の表面を高いpH環境とし、鉄表面に不働態皮膜を形成させて、更なる腐食(酸化)を抑制する。

塩分固定による腐食速度抑制：さび中の塩化物イオンに防錆剤が作用し、腐食に寄与しないよう固定化させることで、腐食の進行を抑制する。

犠牲防食：鉄よりイオン化傾向の高い亜鉛等を含む防錆剤を鉄の表面に塗布することで、鉄よりも先に腐食(イオン化)させ、鉄の腐食を抑制する。

3.2 防食性能についての共通試験の概要

防錆剤の効果持続性(耐用期間)は、各技術が根拠とするメカニズムに基づいて、それぞれ独自の評価法による試験結果が示されているため、それらを統一的に比較することは困難である。また、鉄筋のさびが残存する状態における防錆剤の耐用期間は、ほとんど示されていないのが現状である。そこで、実際の構造物に即した使用環境において、防食原理の異なる防錆剤の耐用期間をそれぞれ示せるように、防食性能についての共通試験の内容を検討した。

共通試験では、まず腐食の程度が異なる鋼材をそれぞれ作製した。次に、それぞれの腐食鋼材に対して各技術で想定している除錆・防錆処理を施した。その上で、JIS K 5600「塗料一般試験方法」を参考にして、塩水噴霧および乾湿繰返しによる促進腐

食試験を実施し、防錆剤で被膜された鋼材の腐食進行状況を定期的に観察することにより、防錆剤の耐用期間についての評価を行うものとした。

3.3 試験片の種類と作製

JIS K 5600で一般的に用いられているクーポン試験片の鋼板(種類SS400、70mm×150mm×5mm)を準備し、腐食環境の異なる現場を想定して、①無腐食試験片、②塩分の多いさび試験片(a)、③塩分の少ないさび試験片(b)の3種類を作製した。①無腐食試験片は、防錆剤の基本的な防食性能を評価するものであり、鋼板の不働態皮膜を除去したものをを用いた。他のさび試験片に対する比較基準となる。②さび試験片(a)は、塩分の多い環境下で生成されるさびを模擬したものであり、無腐食試験片を図-1に示す促進腐食条件で14サイクル暴露して作製した。③さび試験片(b)は、塩分の少ない環境下で生成されるさびを模擬したものであり、無腐食試験片を図-1に示す中の塩水濃度を5%から0.1%に変更した促進腐食条件で14サイクル暴露して作製した。



図-1 促進腐食条件

土研センター

3.4 現場での作業を考慮した除錆処理条件の設定

鉄の表面に発生したさびが残っていると、さび自体が酸化剤として働き、更なる腐食を進行させる可能性があるため、出来る限り除錆しておくことが望ましい。一方、点検時の応急措置として実施する簡易な除錆方法では、発生したさびを完全に除去することは難しい。共通試験では、各技術で想定している除錆方法および工具類を参考に、現場での実施が可能な以下の方法による除錆処理を実施した。なお、除錆処理はすべて同一の作業員が実施した。

手工具を用いる技術では、さび試験片(a)はまず表面に生成したこぶ状さびをハンマリングにより叩き落した後、真鍮ワイヤブラシで表面に残っているさびを落とし刷毛で表面を清掃した。除錆処理後の電磁膜厚計による残存さび厚の測定結果は90 μ m程度であった。さび試験片(b)はまず表面に生成した浮きさびをスクレーパーでそぎ落とした後、真鍮ワイヤブラシで表面に残っているさびを落とし刷毛で表面を清掃した。除錆処理後の電磁膜厚計による残存さび厚の測定結果は370 μ m程度であった。

犠牲防食による防食原理を採用している技術では、地鉄面と防錆剤を接触させる必要があるため、いずれのさび試験片も電動工具であるサンダー（研磨紙#36）で地鉄面が半分程度以上露出するよう研削した。

3.5 促進腐食条件の設定と実環境期間の考え方

除錆処理したさび試験片および無腐食試験片に対し、各技術で想定している塗布方法に従い、それぞれ防錆剤の塗布（防錆処理）を実施した。

防錆処理した試験片は、図-2に示すJIS K 5600-7-9「塗膜の長期耐久性-サイクル腐食試験方法-塩水噴霧/乾燥/湿潤」のサイクルDの条件により、促進腐食試験を3ヶ月（360サイクル）まで実施した。

また、防錆処理をしない無腐食試験片についてもあわせて促進腐食試験を実施し、1ヶ月ごとに腐食による板厚減耗量を測定した。測定結果より得られた板厚減耗量（腐食速度）と促進腐食期間の関係を図-3に示す。また、日本各地の地域において、一

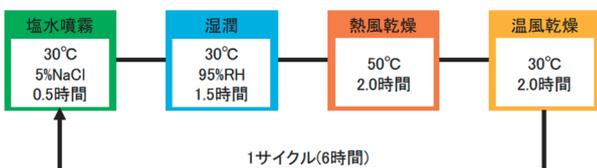


図-2 促進腐食試験(JIS K 5600-7-9 サイクルDの条件)

定期間内における鋼材の腐食量を暴露試験によって調べ、大気環境の区分ごとに整理した結果²⁾を図-4に示す。図-3より促進腐食試験1ヶ月での板厚減耗量は約0.04mmであり、これは図-4の海岸部での年間腐食量と同程度、他の地域での4~5年の腐食量に相当している。したがって、促進腐食試験1ヶ月は、海岸部での1年間、他の地域での4~5年間の暴露による腐食に相当すると考えることができる。

上記を踏まえて、防錆処理後（試験前）、1ヶ月（120サイクル）、2ヶ月（240サイクル）、3ヶ月（360サイクル）の計4回、それぞれ試験片の状態について、表-2に示すJIS K 5600-8「塗膜劣化の評価」の評価基準に準拠して、さび、はがれ、膨れの各項目について、それぞれ外観目視により評価した。

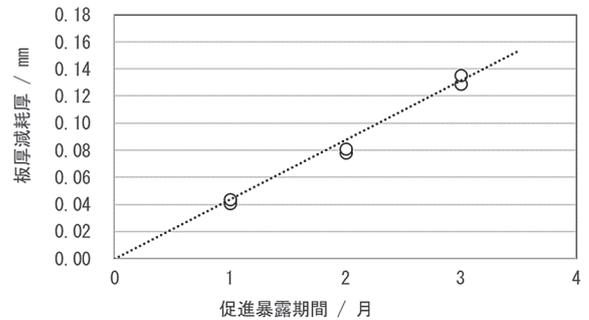
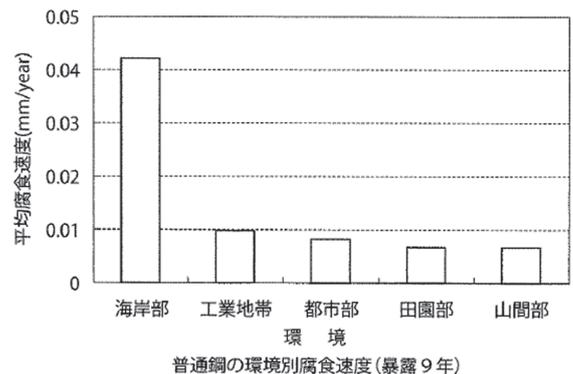


図-3 防錆処理をしない無腐食試験片のサイクルDでの板厚減耗量



普通鋼の環境別腐食速度(暴露9年)
図-4 環境ごとの鋼材腐食量²⁾

表-2 外観目視の評価基準 (JIS K 5600-8)

さびの等級	はがれ		膨れ	
	さびの面積 (%)	はがれの等級	はがれの面積 (%)	膨れの等級
Ri 0	0	0	0	なし
Ri 1	0.05	1	0.1	1
Ri 2	0.5	2	0.3	2
Ri 3	1	3	1	3
Ri 4	8	4	3	4
Ri 5	40~50	5	15	5

4. 施工性について

4.1 施工工程に関わる評価の視点

除錆・防錆技術の施工工程は、露出鉄筋に対する除錆を含めた前処理工程と、鉄筋に対する防錆剤の塗布工程に大別される。前処理工程においては、さび除去に用いる工具、さび除去の方法や程度などが各技術により異なる。塗布工程においては、攪拌や練混ぜ等による防錆剤の準備方法、防錆剤の塗布方法、塗布量や塗布回数、養生期間などが各技術により異なる。各技術を実際に現場へ適用するにあたっては、施工品質を確保しつつ、短時間で容易に施工できるかが評価の視点となる。そこで、施工性についての共通試験を実施して、各技術の施工時における留意点を確認するとともに、施工工程ごとに要する時間を定量的に評価した。

4.2 施工性についての共通試験

鉄筋（種類SD345、呼び名D19、L=500mm）を図-1に示す促進腐食条件（塩水濃度を5%から0.1%に変更）で14サイクル暴露して腐食させた後、その腐食鉄筋をモルタルの表面に半分程度埋込んだ模擬試験体（B700×W200×H50mm）を作製した。橋梁等の点検現場での施工を想定して、腐食鉄筋を埋込んだ面が下面および鉛直面となるよう2体の模擬試験体を設置し、それぞれに対して試験を実施した。

前処理工程での除錆作業に手工具を用いる場合、さびをハンマリングにより叩き落した後、真鍮ワイヤブラシを用いて表面の浮きさびを除去した。電動工具を用いる場合、サンダー（研磨紙#36）を用いてさびを除去し、地鉄を露出させた。塗布工程は各技術で想定している塗布方法にしたがって、材料準備や養生期間を含めた作業を順次行い、各々の作業にかかる施工時間（分）を記録した。ここまでの一連の作業は、特別な技能を持たない同一の作業員がすべて実施した。また、施工品質を確保する上での作業時の留意点を作業員から聴取して記録した。

5. 本復旧時の適応性について

断面修復による本復旧時に、露出鉄筋に施工した防錆被膜をそのまま除去しない場合には、鉄筋コンクリートとしての性能を損ねないため、被膜と断面修復材の付着が良好であり、被膜が断面修復材中で化学的に安定であることが求められる。

一方で断面修復の施工工程では、露出鉄筋周辺の既存コンクリートのはつり作業を行った後、はつりで露出させた鉄筋に対して電動工具を用いてさび落とし（ケレン）を実施するため、その際にあわせて防錆被膜も除去することが一般的である。この場合には、被膜を容易に除去できることが求められる。

そこで、施工性についての共通試験で防錆剤を塗布した模擬試験体を1ヶ月間屋外暴露した後、再び2体の模擬試験体をそれぞれ塗布時の向きに設置し直し、ケレン作業に通常用いられる電動工具（SUSカップワイヤ）を用いて、防錆剤の被膜の除去作業を行い、作業に要する時間（分）を記録して、被膜の除去が容易に行えるか確認した。この除去作業についても、同一の作業員がすべて実施した。

6. おわりに

道路橋などコンクリート構造物の供用年数が長期化している現在、今後は定期点検等の実務において、コンクリート構造物の露出鉄筋が発見されることが想定される。その際、コンクリート構造物の置かれた環境や作業性などを鑑みた上で、技術比較表を参考にして、より適切かつ合理的な除錆・防錆技術が選択・活用されていくことが望まれる。

また、技術比較表の要求性能や共通試験の内容や結果等を参考にして、更に優れた除錆・防錆技術の開発が進められることも想定される。本稿がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubtheme/theme_settings
- 2) (公社)日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、2014.3

前堀伸平



(一財) 土木研究センター
企画・審査部 次長
MAEHORI Shinpei

三浦正純



(一財) 土木研究センター
材料・構造研究部 部付
部長、博士 (工学)
Dr. MIURA Masazumi