

積雪寒冷地における鉄筋防食材の効果に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 30

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

研究担当者：安中新太郎、島多昭典、菊田悦二、林田宏、
内藤勲、清野昌貴、檜木俊一、川村浩二、
中村直久、高玉波夫、佐藤圭洋、太田日出
春、渡辺淳、鈴木哲、長谷川諒、村中智幸

【要旨】

本研究は、凍結防止剤等による局部的な鉄筋腐食への対策として、各種鉄筋防食材の適用性、効果の評価方法、施工・維持管理の留意点等について取りまとめて活用を図り、積雪寒冷地のコンクリート構造物の長寿命化に貢献することを目的とする。平成 26～27 年度は、鉄筋防食における既往研究や施工実績などの資料収集を行い、各種防錆手法や北海道の国道における断面補修を伴う防錆実績のとりまとめ、防錆を行った橋梁や覆道の現地踏査、および各種防錆手法（亜硝酸、塩分吸着剤、犠牲陽極）を用いた簡易的な鉄筋腐食促進試験を行った。平成 28～30 年度はこれらに加え、塩分内在の供試体を作製して腐食促進試験を行った。これら促進試験の結果から、各防錆材の特性を確認するとともに、暴露環境下においてはいずれも腐食抑制効果が期待できること、また、鉄筋に錆や塩分が残っていると防錆材を塗布しても腐食が進行する可能性があるなどといった留意点が明らかになった。

キーワード：腐食、鉄筋、防錆、防食、亜硝酸、塩分吸着、犠牲陽極、断面補修

1. はじめに

積雪寒冷地の鉄筋コンクリート構造物では、海岸部の飛沫や凍結防止剤の影響、古い構造物では海砂の使用などにより、橋梁桁端部や橋台・橋脚、壁高欄、覆道の柱などに局部的な鉄筋の腐食が多く見られるようになってきている（写真-1.1）。

腐食とは、コンクリート中の鉄筋の酸化反応（アノード反応）と溶存酸素の還元反応（カソード反応）が進むことによって生じる現象であり、鉄筋腐食は耐荷力の低下等、構造性能に影響を及ぼし、安全性の低下や構造物全体の寿命を縮める要因となる。これまでの鉄筋腐食対策は、新設時のエポキシ被覆鉄筋や塗装被覆、大規模な補修では電気防食、脱塩対策などがとられてきており、それらの基準は整備されている。一方で、亜硝酸系、塩分吸着剤、犠牲陽極などを用いた防錆材による局部的、小規模な断面補修については、その評価方法や耐久性・持続性、工法選定など適用にあたっての留意点等が明確ではない。

本研究では凍結防止剤等による局部的な鉄筋腐食への対策として、各種鉄筋防食材の適用性、効果の評価方法、施工・維持管理の留意点等について取りまと

めて活用を図り、積雪寒冷地のコンクリート構造物の長寿命化に貢献することを目的としている。

2. 各種防錆手法について

亜硝酸系の防錆剤は、腐食により破壊された鉄筋の不動態被膜を亜硝酸イオンが再生し、鉄筋表面に腐食しにくい環境を形成する²⁾。塩分吸着剤は、塩分吸着剤の分子間に腐食因子である塩化物イオンを吸着・固定化し、それと同時に吸着剤の分子間に保持している亜硝酸イオンを放出することで亜硝酸系の防錆剤と同様の腐食しにくい環境を形成する³⁾。一方、犠牲陽極による防錆手法は、鉄よりイオン化傾向の高い（錆びやすい）亜鉛を鉄筋に接触させ、亜鉛を先に腐食させ鉄筋を腐食から守る⁴⁾というものである。耐用年数は設置



写真-1.1 都市部壁高覧における鉄筋腐食事例

する亜鉛の量に依存するため、一概には言えないが、約30年効果が持続すると示しているメーカーもある。

表-2.1は、メーカーカタログやホームページなどから収集した鉄筋防錆剤、塩分吸着剤、犠牲陽極の取扱社数をまとめたものである。

鉄筋防錆材（写真-2.1は施工状況例）は比較的古くから用いられ、取り扱うメーカーも多いが、その成分は多種多様で、その効果の優劣は不明である。この中でも、亜硝酸リチウム系の鉄筋防錆剤は取り扱うメーカーが比較的多い。施工は腐食した鉄筋をケレンした後、亜硝酸リチウム系成分が混入したモルタル等を鉄筋に塗布し、場合によっては、はつりだしたコンクリート面やポリマーセメントモルタル（以下PCM）等の断面補修材にも亜硝酸リチウムを混入して修復するものである。

塩分吸着剤を混入した鉄筋防錆手法については、取り扱うメーカーが複数社あった。その施工方法は、亜硝酸とほぼ同様である（写真-2.2）。

これらに対して、犠牲陽極を用いた防錆手法は、鉄よりイオン化傾向の高い亜鉛とそれを覆う保護材からなる固形材を鉄筋に取り付けるタイプのものである（写真-2.3 赤枠部）。

表-2.2はホームページや参考文献などから防錆や腐食に関する平成2年（1990年）以降の既往研究について調査したものである。各種防錆手法の開発者（メーカー）や大学による論文が多く見受けられた。腐食メカニズムについては、マクロセル腐食に関するものが多く、各種防錆手法を比較したような研究は見受けられなかった。

表-2.3はヒアリングや資料収集により把握した北海道の国道における防錆材使用実績（予定含む）である。防錆修復年度は平成16年度から27年度であり、比較的近年に施工されたものが多い。その防錆手法は、鉄筋防錆剤、塩分吸着剤、小型犠牲陽極とどの手法ともに実績があるが、最近では塩分吸着剤による補修が増加している傾向にある。

3. 施工事例

本章では、亜硝酸系防錆剤、塩分吸着剤、犠牲陽極を施工した北海道の橋梁や覆道について、防錆材の効果の持続状況を把握するために現地踏査を行った結果を報告する。

3.1 亜硝酸系防錆剤の塗布事例

表-2.1 鉄筋防錆手法 (H26 年調べ)

分類	主要材料	取扱社数
鉄筋防錆剤	亜硝酸リチウム系	12
	亜硝酸カルシウム	3
	エポキシ樹脂系	5
	その他(キレート系等)	9
塩分吸着剤	亜硝酸塩系	5
犠牲陽極	亜鉛	4



写真-2.1 鉄筋防錆剤の塗布状況



写真-2.2 塩分吸着剤の塗布状況



写真-2.3 犠牲陽極の設置状況

表-2.2 既往研究の概要 (H26 年調べ)

分類	細別	扱数
腐食メカニズム	—	45
腐食評価	非破壊試験関連	34
	電気化学的測定関連	37
鉄筋防錆手法	鉄筋防錆剤関連	40
	塩分吸着材関連	31
	犠牲陽極関連	23

表-2.3 北海道の国道における防錆材使用実績 (H26 年調べ)

分類	材料	施工箇所	件数
鉄筋防錆剤	亜硝酸リチウム系	海岸部・都市部	4
	アミノカルボキシレートベース	海岸部	2
塩分吸着剤	亜硝酸塩	海岸部	11
犠牲陽極	亜鉛	海岸部・内陸部	5

写真-3.1は、都市部跨線橋における鉄筋防錆剤による防錆処理前後の写真である。架設は昭和46年であり、建設後約40年が経過している。防錆処理は平成26年11月に施工、処理後の撮影は平成28年10月と補修後約2年を経過しているが断面補修部に大きな変状は認められない。なお、本個所における断面補修は、鉄筋に亜硝酸リチウム系防錆剤を塗布し、断面補修材にも亜硝酸リチウム系の防錆剤を混入したPCMを採用している。



写真-3.1 A橋（都市部）

3.2 塩分吸着剤の塗布事例

写真-3.2は、日本海沿岸部に位置する橋梁の橋脚写真である。竣工は昭和48年と建設後約40年が経過している。平成19年に部分的な断面補修工が施されたが、その2年後に再劣化（マクロセル腐食と思われる）が生じ、塩分吸着剤を配合した全断面補修が平成22年に行われているが約10年を経過した平成26年10月の現地踏査では、外観上に大きなクラックや錆汁など目立った劣化症状が見受けられないことから、防錆効果が持続していると考えられる。



写真-3.2 B橋 橋脚（海岸部）H26.10

写真-3.3は、B橋と同様、日本海の海岸部に位置する覆道柱部の補修前後の写真である。建設後約30年が経過している。平成23年に塩分吸着剤を配合した部分断面補修が行われているが、平成26年10月の現地踏査では、外観上の変化はなく再劣化は認められない。



補修前 補修後

写真-3.3 C覆道柱（海岸部）

3.3 犠牲陽極の設置事例

写真-3.4は、日本海沿岸部に位置する橋梁桁端部の補修前後の写真である。昭和47年に竣工し建設後約40年が経過している。平成17年に犠牲陽極を設置し、断面補修が行われているが、約10年を経過した平成27年10月の調査では変状は認められなかった。



防錆処理後（H27.10）
写真-3.4 D橋 桁端部（海岸部）

写真-3.5は、内陸部に位置する橋梁の桁下部の写真である。昭和32年に竣工し、建設後約60年が経過している。平成25年に犠牲陽極を設置し、断面補修が行われているが約10年を経過した平成27年10月の調査では、変状は認められなかった。

4. 各種防錆材の腐食促進試験

本章では、配合条件や塩分濃度などが亜硝酸、塩分吸着剤、犠牲陽極の腐食抑制効果に及ぼす影響を把握するため、室内における腐食促進試験と暴露試験を行い、鉄筋の腐食面積の測定等により腐食抑制効果を評価した。

4.1 実験計画

4.1.1 供試体作製



断面補修前（H25） 断面補修後（H27.10）
写真-3.5 E橋 桁下部（内陸部）

表-4.1 供試体概要

(a) 腐食面積測定用 (L=200 mm)

No.	セメント種類	W/C (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	かぶり厚 (mm)	供試体	腐食促進方法	
						乾燥条件	湿潤条件
NM70-内3	N	70	3	35	モルタル (C:S=1:3)	70°C 10%RH	70°C 80%RH
BM70-内3	BB	70	3				
BM55-内3 ^{※1}	BB	55	3				
BM70-内9	BB	70	9.1	30	コンクリート		
NC70-内3	N	70	3				
BM70-内3-2cm	BB	70	3	20	モルタル	暴露環境	
NC70-内3	N	70	3	30	コンクリート		

※1 全塩分量を測定する供試体

(b) 防錆材の効果範囲確認用 (L=400 mm)

塗布側			無塗布側			かぶり厚 (mm)	供試体	腐食促進方法	
セメント種類	W/C (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)	セメント種類	W/C (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)			乾燥条件	湿潤条件
N	55	0	BB	70	3	20	モルタル (C:S=1:3)	70°C 10%RH	70°C 80%RH

表-4.1 (a)に腐食面積測定用の供試体概要を示す。セメントは普通ポルトランドセメント (N) と高炉セメントB種 (BB) とし、水セメント比 (W/C) は55%と70%とした。また、塩化物イオン濃度が3 kg/m³と9.1 kg/m³となるよう塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入した供試体と無混入の供試体を作製した。供試体はモルタルまたはコンクリートで作製し、鉄筋と供試体表面の距離 (かぶり厚さ) はモルタルでは20および35 mm、コンクリートでは30 mmとした。

供試体名の表記例は次のとおりである。(例: BM 70-内3-2cm) 最初の文字がセメント種類 (N、B)、2番目の文字が供試体種類 (モルタル→M、コンクリート→C)、その次に続く数字がW/C (55,70)、ハイフンの後ろは塩分の供給方法と塩化物イオン量 (練混ぜ時混入の場合→内3) 最後にかぶり厚さ (かぶり20 mmの場合のみ記載) を示している。

表-4.1 (b)に防錆材の効果範囲確認用の供試体概要を示す。防錆材の塗布部から離れた範囲で防錆効果が生ずるか確認を行うために供試体長軸方向の片側200 mmを防錆材で補修した「塗布側」、残りの200 mmを補修を行っていない「無塗布側」とした。

防錆方法はいずれも亜硝酸、塩分吸着剤、犠牲陽極の3種類とし、比較用に防錆材を用いない無塗布の供試体も作製した。測定項目として自然電位と全塩分量、腐食面積率を腐食促進試験後に測定した。

モルタルについてはセメント砂比を1:3とし、表-4.1にあるセメント種類とW/Cで作製した。コンクリートについては配合を表-4.2に示す。セメントはNを用い、W/Cは70%とし、細骨材率 (s/a) は48%で作製した。また、細骨材はモルタルおよびコンクリートで同様のものを用い、表乾密度は2.67 g/cm³である。粗骨材は表乾密度2.67 g/cm³と2.68 g/cm³の骨材を50:50で併用した。塩分は塩化ナトリウムの試薬 (特級) を練混ぜ水に溶かして用いた。

図-4.1に供試体寸法を示す。モルタル供試体では53×53×200 mm (かぶり厚20 mm)、83×83×200 mm (かぶり厚35 mm) ならびに53×53×400 mm (かぶり厚20 mm) の供試体を作製した。コンクリート供試体では100×100×200 mm (かぶり厚30 mm) の供試体を作製した。鉄筋はφ13 mmの丸鋼を使用した。

4.1.2 試験方法

(a) 高温腐食促進試験

鉄筋の腐食促進にはJCI-SC3⁵⁾を参考とした乾湿繰返し試験と乾燥と塩水に浸漬を繰り返す乾燥浸漬繰返し試験を行った。

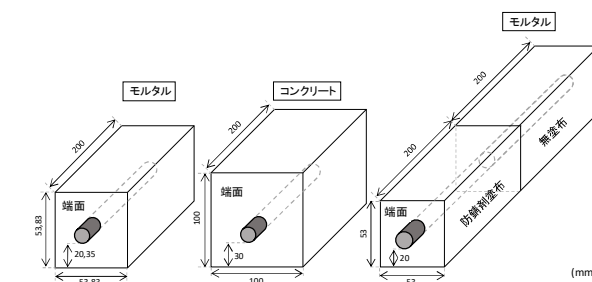


図-4.1 供試体寸法

表-4.2 コンクリートの配合表

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
N	70	48	4.5	165	236	916	995

試験を行った。

供試体作製後に20°C封かんで7日まで養生を実施した後、両端面と露出した鉄筋にエポキシ樹脂を塗布した。その後、乾湿繰返し試験では温度60~70°Cで相対湿度80%程度の湿潤状態を3日間、温度60~70°Cで相対湿度10%程度の乾燥状態4日間を1サイクルとして鉄筋の腐食促進を行った。

JCI-SC3では、乾燥時の温度条件を10~15°C相対湿度70%以下としており、これに対し本試験では温度条件を高く設定していることから、以降本試験を「高温腐食促進試験」と呼ぶ。

(b) 自然電位測定

乾燥行程が終了する毎に、ASTM C 876⁶⁾に準拠し、硫酸銅の照合電極を用いて自然電位の測定を行った。測定方法は、打設面を水に30分程度浸してから、露出させた鉄筋と測定機器をつなげ、照合電極を鉄筋の真上となる供試体の打設面に当てて測定を行った。この測定は供試体解体を伴う腐食面積測定の実施時期を判

表-4.3 自然電位における鉄筋腐食判定基準

自然電位 E(mV)	鉄筋腐食の可能性
$-200\text{mV} < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$	不確定
$E \leq -350\text{mV}$	90%以上の確率で腐食あり

断するためのものであり、腐食の判断は表-4.3に示す-350mV以下となった時点とした。

(c) 腐食面積測定

前項で述べた腐食発生時に供試体を解体し、鉄筋表面の腐食部分を透明シートにトレースし腐食面積率を求めた。

(d) 塩化物イオン量の測定

塩化物イオン量の測定は電位差滴定法を用いて行った。試料は打設面から10 mm層毎に切断し、表面から深さ10 mmの試験片と深さ20~30 mmの試験片を用いて測定を行った。

4.2 室内試験結果

4.2.1 腐食面積試験

図-4.2に普通セメントを使用した場合の結果を示す。普通セメントを使用した場合、亜硝酸系の防錆剤の塗布により腐食面積を90%程度低減できる結果となった。また、塩分吸着剤では約10%の腐食抑制効果に止まった。犠牲陽極では鉄筋に腐食は確認されなかった。

図-4.3に高炉セメントを用いた場合の結果を示す。高炉セメントを使用した場合、亜硝酸系では90%程度の腐食抑制効果となった。

塩分吸着剤では30%程度の腐食抑制効果が確認された。普通セメントのケースより効果が高まったのは、高炉セメントが普通セメントより塩化物イオンの浸透に対する抑制効果が高く、塩分吸着剤が塩分を固定化する時間を確保できたためと考えられる。

また、犠牲陽極では腐食は確認されなかった。

図-4.4に水セメント比の影響を示す。一般的にW/Cの高い供試体ほど組織が粗になり、水や塩分が入り込む空隙が多くなるため腐食しやすくなると想定していたが、亜硝酸、塩分吸着剤では想定とは異なりW/Cの高いBM70-内3よりW/Cの低いBM55-内3で腐食面積率が大きくなっていった。この原因について現在は明らかとなっていない。一方で犠牲陽極ではW/Cによらず腐食は確認されなかった。また、無塗布でもW/Cによらず同程度の腐食面積率であるため、今回の試験でW/Cの影響を確認することはできなかった。

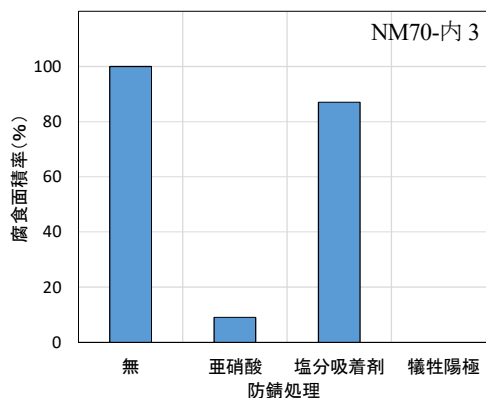


図-4.2 普通ポルトランドセメントを用いた場合

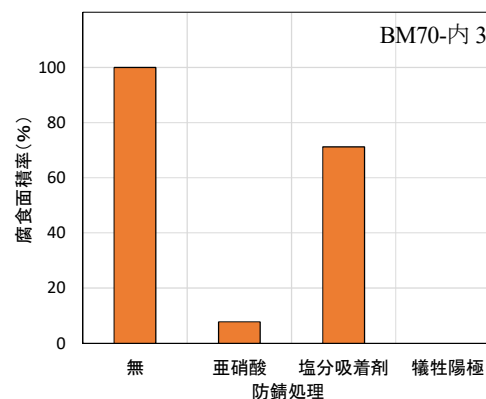


図-4.3 高炉セメントを用いた場合

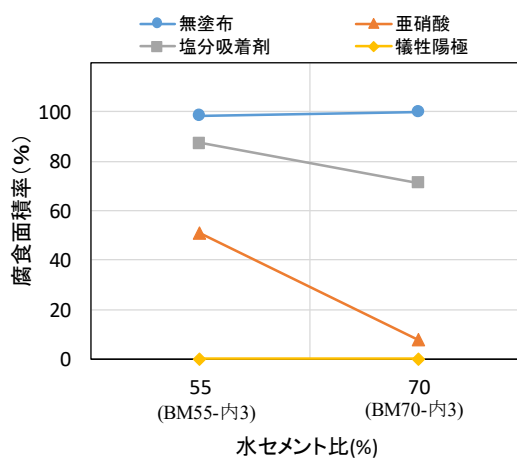


図-4.4 水セメント比の影響

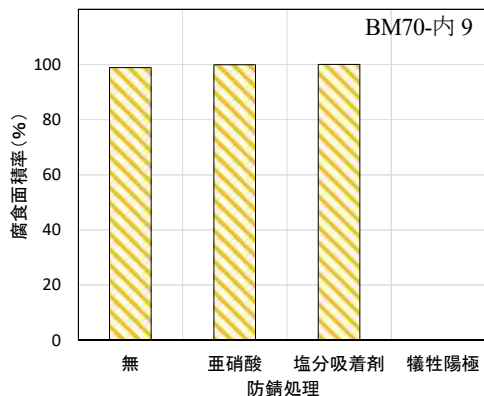


図-4.5 塩化物イオン量 9.1kg/m³ の場合

図-4.5に塩化物イオン混入量 9.1 kg/m^3 の結果を示す。亜硝酸系、塩分吸着剤では無塗布の鉄筋と同じように全面が腐食しており、これらの方法では腐食抑制効果を上回る塩化物イオン量下にあることが確認された。一方、犠牲陽極では鉄筋表面に酸化亜鉛が付着していたが、鉄筋の腐食はなく、防錆効果を維持できていることが確認できた。

図-4.6にコンクリート供試体を用いた結果を示す。無塗布では腐食面積率35%程度であったが、亜硝酸の使用により7%程度の腐食面積率となった。また、塩分吸着剤の腐食面積は約13%であった。犠牲陽極はここでも腐食が確認されなかった。

図-4.7にかぶり厚さ20 mmの結果を示す。無塗布では腐食面積は80%程度であった。また、亜硝酸と塩分吸着剤では10%以下の腐食面積であった。犠牲陽極では腐食は確認されなかった。ただし、犠牲陽極はメーカーの推奨かぶり厚さが35 mm以上必要である。

また、同一条件でかぶりのみ35 mmと異なる図-4.3のBM70-内3と比較するとかぶり厚が薄いにもかかわらず全般に腐食面積率は小さい。これについては理由が明らかとなっていない。

図-4.8にモルタル練混ぜ時に塩化物イオンを 3 kg/m^3 混入した供試体の試験終了時の塩化物イオン量とモルタル表面からの深さの関係を示す。なお、深さの呼称は各試験片の中心の深さとする。全ての供試体において、深い位置ほど塩分濃度が高くなっているが、これは乾燥期間中に表面側の含水量が低下し、それに伴い塩化物イオンが含水量の高い中心側に移動したためと考えられる。

また、塩分吸着剤では25 mmの深さで無塗布や亜硝酸と比べて塩分量が多くなっているが、これは塩分吸着剤が吸着した塩分が含まれているため塩分量が高くなっていると考えられる。

一方、犠牲陽極では5 mmの深さで他の供試体より多く塩化物イオンが検出された。これは犠牲陽極の亜鉛を保護している部材が塩分の深さ方向への拡散を阻害したことが原因と考えられる。しかし、25 mm付近で塩分吸着剤と同程度の塩化物イオン量となった原因は不明である。

以上の室内試験結果をまとめると次のようになる。

犠牲陽極は、塩化物イオン量が極端に多い環境であっても鉄筋の腐食を抑える効果があることが分かった。しかし、犠牲陽極は他の防錆材と比較してコストが高く、また、施工には35 mm以上のかぶり厚さが必

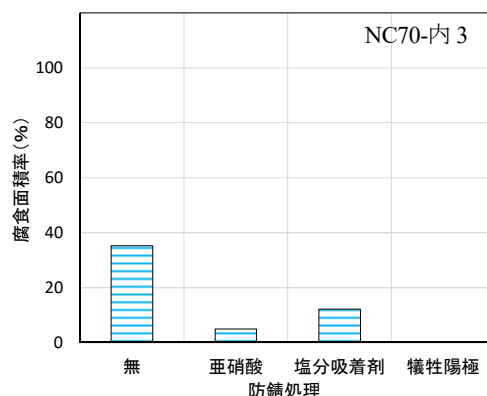


図-4.6 コンクリート供試体の影響

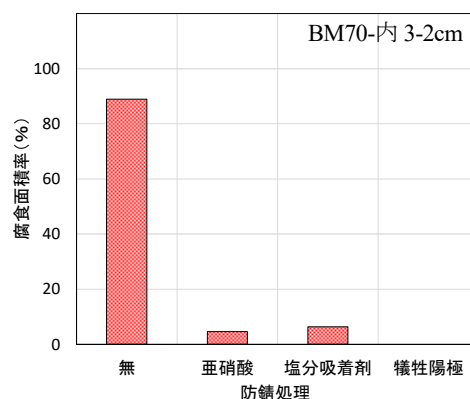


図-4.7 かぶり厚さ 20 mm の場合

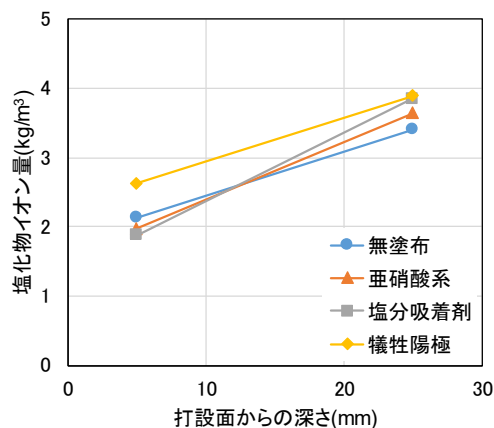


図-4.8 深さ毎の全塩分量 (BM55-内3)

要となるため、環境や施工上の条件、コスト等を比較のうえ使用を検討する必要がある。

亜硝酸系は、塩化物イオンが 3 kg/m^3 程度以下であれば腐食抑制効果が高い。しかし、塩化物イオン量が極端に多い環境では必要な腐食抑制効果が得られない可能性がある。そのため、対象物の塩化物イオン量を適切に評価した上で使用することが望ましい。

塩分吸着剤は、亜硝酸系と同様に塩化物イオン量の適切な評価が必要であるが、またさらに、普通セメントを用いるよりも高炉セメントを用いる方が腐食面積が減少していることから、普通セメントと高炉セメントでは効果が異なることに留意する必要がある。また、本研究における実験では、亜硝酸系の防錆剤と比較すると腐食面積が大きいのが、これは、今回、短期間で腐食が進行するように条件を設定したことから、塩分吸着過程より早く鉄筋表面に腐食環境が形成されたためと考えられる。従って実際の現場環境での適用性については、この結果のみに依らず、現場環境に合致した腐食促進条件において腐食抑制効果を確認する必要がある。

4.2.2 防食効果範囲

図-4.9に防錆材の腐食範囲を示す。中央の赤点線を境界に左側は防錆材を塗布した「塗布側」、右側は「無塗布側」であり、図中の黒色は鉄筋の腐食範囲を示している。無塗布供試体では、塩化物イオンが混入されている無塗布側では腐食が発生しており、塩化物イオンが混入されていない塗布側との境界部でも腐食が発生している。加えて、亜硝酸や塩分吸着剤でも、境界部をわずかに越えて腐食が確認された。

また、犠牲陽極の場合は、無塗布側の約30 mmまでの範囲で錆が発生しなかった。これは、犠牲陽極の防錆メカニズムが他と異なり無塗布側約30 mmまで腐食が抑制されたためと考えられる。ただし、犠牲陽極の製品仕様上の腐食抑制範囲は300 mm程度とあり、室内試験ではカタログ上の防錆範囲を実現するには至らなかった。

一方で、防錆材無塗布側の腐食発生箇所は供試体の底面側の鉄筋表面で多く発生しており、ブリージング水により腐食が促進されたと考えられる。

4.3 暴露環境下における防錆効果の確認

図-4.10に暴露試験の結果を示す。暴露試験は道路橋示方書における塩害地域区分Aの沖縄県大宜味村で行い、供試体は海岸から数mの位置に設置し約2年間の腐食促進を行った。

(a) 塩化物イオン量

「表面」の測定位置は5 mmの深さ、「鉄筋周辺」の測定位置は25 mmの深さの値を示している。表面では供試体作製時よりも多い塩化物イオン量5 kg/m³であるが、鉄筋周辺の塩化物イオン量はいずれも供試体作製時と同等の3 kg/m³前後であることから、本実験の暴露環境下では飛来塩分の影響はないものと考えられる。

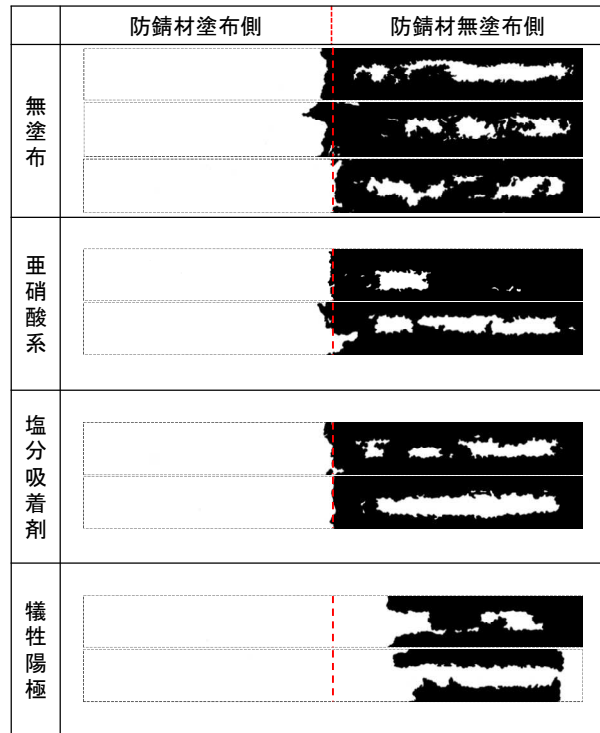
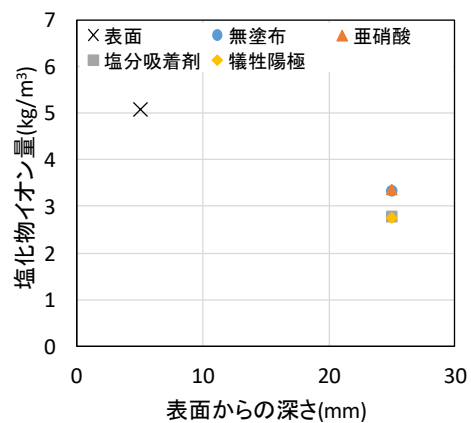
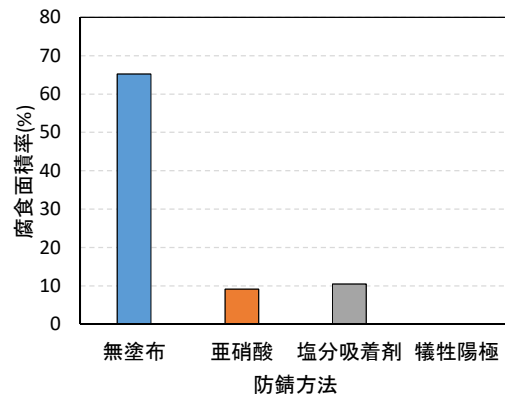


図-4.9 防錆材の腐食抑制範囲



(a) 塩化物イオン量腐食面積率



(b) 腐食面積率

図-4.10 暴露2年目の結果

表-4.4 高温腐食促進試験および暴露試験による防錆効果の比較表

・促進環境				・暴露環境			
かぶり厚	35mm以上		35mm未満		かぶり厚	35mm以上	
塩化物イオン量	9kg/m ³	3kg/m ³		9kg/m ³	3kg/m ³	塩化物イオン量	3kg/m ³
補修材	モルタル	モルタル	コンクリート	モルタル	モルタル	補修材	モルタル
亜硝酸	×	◎	◎	×	◎	亜硝酸	◎
塩分吸着剤	×	△※1	○※1	×	△※1	塩分吸着剤	◎
犠牲陽極	◎	◎	◎	◎※2	◎※2	犠牲陽極	◎

◎：防錆効果有り ○：防錆効果を期待できる △：防錆効果ほとんど無し ×：防錆効果無し

※1 高温乾燥環境という特別な条件の結果であることに留意すべき

※2 必要かぶり厚さ以上とする

(b) 腐食面積率

室内における高温腐食促進試験結果（図-4.6）と比べると、無塗布鉄筋の腐食面積率が約60%と2倍程度高い。また、犠牲陽極では鉄筋に腐食は確認されなかった。さらに、亜硝酸と塩分吸着剤では10%程度が腐食した。

暴露試験では室内試験と比べ塩分吸着剤の腐食抑制効果が高くなっている。下村らの⁷⁾研究によると、相対湿度によってコンクリート中の水分が存在できる細孔半径が決まると示されている。日平均の相対湿度が50～90%程度で変動している沖縄では、室内試験ほど鉄筋周囲が乾燥せず、酸素の移動を鈍化させるコンクリート中の水分の存在割合が相対的に高く、塩分吸着剤が腐食抑制環境を整える余裕ができたためこのような結果となったと考えられる。

以上の結果は飛来塩分の影響に係らない暴露環境下のものとなったが、犠牲陽極については錆が発生せず、腐食抑制に最も有効な材料であることがわかった。また、亜硝酸系と塩分吸着剤については、どちらも無塗布のケースに対し腐食面積が1/6以下に抑えられており、腐食抑制効果が高いことが確認された。

4.4 試験結果総括

表-4.4 に高温腐食促進試験および暴露試験による防錆効果の比較表を示す。犠牲陽極の場合、塩分量が高い環境にあっても腐食抑制効果が期待できる。しかし、かぶり厚が35mm未満の場合には、表面の補修材が剥落したり水が浸入しやすくなるなど耐久性や美観に影響が出る可能性がある。

一方、亜硝酸系や塩分吸着剤では、塩化物イオンが9kg/m³以上存在していると防錆効果を得られないため、コンクリート中の塩分量に注意が必要である。

また、塩分吸着剤は室内の促進試験より暴露試験で高い防錆効果を示したことから、防錆効果を発揮する

ためには一定の時間が必要なことを確認した。今後はより多くの試験条件でデータ収集を行う必要があると考える。

5. 施工時の留意事項

本章では、亜硝酸、塩分吸着剤、犠牲陽極を用いた断面補修時の留意点について、主に写真を用いて解説する。

5.1 鉄筋のケレン

写真-5.1は鉄筋ケレンの状況である。ケレンでは腐食した鉄筋の錆除去が目的であるため、塩分や錆が残りやすいはつり部が深い場合や鉄筋の裏側、孔食部（写真-5.2）においてもケレンを十分に行うことが重要である。

5.2 鉄筋防錆および断面補修



写真-5.1 鉄筋ケレン状況



写真-5.2 鉄筋の腐食状況

写真-5.3は防錆剤の塗布状況の写真である。鉄筋の裏側や鉄筋が重なっている場所では塗りむらが生じやすいため、メーカーの設計値（面積当たり塗布量や塗布厚）に留意して施工を行う必要がある。

写真-5.4は亜硝酸リチウム入りPCMによる断面補修状況である。防錆剤塗布後は劣化因子の進入を防ぐために断面補修材で補修を行うことが一般的である。このとき、2層塗りなど数回に分けて施工を行う場合には、鉄筋の裏側や層間に水や塩分の通り道となる欠陥を生じさせないように施工することが重要である。

特に、写真-5.5に示す犠牲陽極の場合には、亜硝酸や塩分吸着剤と異なり、鉄筋より幅の広い犠牲陽極を設置する。このため、犠牲陽極の裏側に断面補修材が十分に充填されていない可能性があるため注意が必要である。

また、防錆効果を高めるため断面補修材にも亜硝酸系の防錆剤を添加している製品が市販されているが、一般的に亜硝酸系は硬化促進作用を有していることが知られており、気温の高い時期に施工する場合には可使用時間が想定より短くなる場合がある。そこで、十分にハンドリングできないまま施工を行ってしまうと断面補修材の耐久性や鉄筋に悪影響を及ぼす可能性があるため施工時の気温等に注意する必要がある。

6. まとめ

局部的な鉄筋腐食対策に用いられる防錆材として亜硝酸系、塩分吸着剤、犠牲陽極について、その適用性、効果の評価方法、施工・維持管理の留意点等を以下にとりまとめる。

各種防錆材の腐食促進試験

腐食促進試験によって得られた結果から各種防錆材に関する留意点をまとめると以下のとおりである。

- 1) 亜硝酸系の防錆剤は塩化物イオンが 3 kg/m^3 程度までであれば腐食抑制効果が高い。しかし、塩化物イオン量が極端に多い環境では腐食抑制効果は期待できない。そのため、対象物の塩化物イオン量を適切に評価した上で使用することが望ましい。
- 2) 塩分吸着剤は、普通セメントより高炉セメントにおいて、腐食抑制効果が高いことが分かった。これは、高炉セメントの塩化物イオンの拡散係数が小さいことに起因するものと考えられる。
- 3) 犠牲陽極は、塩化物イオン量が極端に多い環境であっても鉄筋の腐食を抑える効果がある。しかし、



写真-5.3 防錆剤塗布状況



写真-5.4 断面補修状況



写真-5.5 犠牲陽極設置状況

犠牲陽極は他の防錆材と比較してコストが高く、また、施工には一定以上のかぶり厚さが必要となるため、環境や構造物の条件、コスト等を比較して犠牲陽極の使用を検討する必要がある。

- 4) 暴露環境下では亜硝酸系の腐食面積率が約10%であり、無塗布の鉄筋の1/6の腐食面積率となった。塩分吸着剤は亜硝酸と同程度の腐食面積率となり、高温腐食促進試験より高い防錆効果が得られた。これは暴露環境下では促進試験ほど鉄筋周囲が乾燥せず腐食抑制環境を形成しやすかったためであると考えられる。犠牲陽極では鉄筋に腐食が生じることはなく、促進環境と同様の結果となった。腐食抑制効果が最も高い結果となった。

施工時の留意点

防錆材を用いた小規模な補修を行うときに注意すべき施工時の留意点については次のとおりである。

- 1) 再劣化を防ぐため十分にケレンを行い、錆を取り除くことが重要である。特に除去が困難な鉄筋の裏側や孔食が発生している箇所では十分に注意してケレンを行うことが重要である。
 - 2) 断面補修材の施工には、劣化因子の通り道となる欠陥を生じさせることなく補修材を充填することが重要となる。また、気温が高い場合、断面補修材に亜硝酸系の混和剤が添加されていると、亜硝酸系の硬化促進作用により可使時間が想定より短くなる可能性があるため、施工時の気温等にも注意が必要である。
- 参考文献**
- 1) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，第 4131 号，pp.2-3, 2009.
 - 2) 小林一輔：防せい剤，コンクリート工学，Vol.16, No.3, pp.38-40, 1978.3
 - 3) 佐々木孝彦，飯島亨，立松英信，大城武：塩分吸着剤を用いて補修した供試体の鉄筋腐食性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp.379-384, 2001.
 - 4) 平石剛紀，新井淳一，坂田昇，須田久美子：犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.1431-1436, 2002.
 - 5) JCI 基準集：JCI-SC3 塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法－乾湿繰返し法－，日本コンクリート工学協会，2004.4
 - 6) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999.
 - 7) 下村匠，小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.631-636, 1992.