

数種の防錆材の腐食抑制効果に及ぼす腐食促進環境の影響

長谷川 諒 村中 智幸 安中 新太郎

1. はじめに

海岸部や積雪寒冷地の鉄筋コンクリート構造物では、海水飛沫や凍結防止剤の影響と思われる塩害により、腐食した鉄筋が局部的に露出する現象が多く見られる。

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¹⁾、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ことが懸念されるため、局所的な腐食進行を抑制する延命対策が求められる。

部分的な劣化に対しては、亜硝酸イオンが鉄筋を腐食から保護する不動体被膜を再生する²⁾亜硝酸系の防錆材、また、腐食因子である塩化物イオンを吸収して代わりに亜硝酸イオンを放出することで腐食を抑制³⁾する塩分吸着剤、さらに、鉄よりイオン化傾向の高い亜鉛を用いて鉄筋の腐食を抑制する⁴⁾小型の犠牲陽極等の材料が提案・施工されているが、異なるメカニズムの防錆材の効果を相互に評価する方法が明らかになっていない。

そこで、本研究では亜硝酸系、塩分吸着剤、犠牲陽極の防錆材を用いて室内試験と暴露試験を行い、促進環境と暴露環境が腐食抑制効果に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2. 1 実験計画

実験では表-1に示す供試体を作製し、腐食促進に対する腐食抑制効果を確認した。室内試験ではセメントに普通ポルトランドセメントを用い、水結合材比(W/B)は70%とした。また、練混ぜ水には水道水に塩化ナトリウムの試薬(特級)を用いて塩化物イオン濃度を $3\text{kg}/\text{m}^3$ とした練混ぜ水を作製し使用した。腐食させる鉄筋には黒皮を除去した $\phi 13\text{mm}$ の丸鋼を用いた。防錆材には亜硝酸、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。試験項目は自然電位と腐食面積率の測定とした。供試体名(例:NM70)は、最初の文字がセメント種類(N→普通ポルトランドセメント)、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/Bを表し、W/Bの後にはコンクリートに限り、室内試験の場合はI、暴露試験の場合はOを最後に表記している。

表-2にモルタルとコンクリートの配合を示す。室内試験用のモルタルはセメント砂比を1:3とした。また、コンクリートでは細骨材率(s/a)を48%とした。細骨材の表乾密度は $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ のものを用い、粗骨材は表乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ と $2.68\text{g}/\text{cm}^3$ の骨材を50:50で併用した。

表-1 実験計画

No.	セメント種類	W/B (%)	塩化物イオン量 (kg/m^3)	かぶり厚 (mm)	供試体	腐食促進方法		防錆方法	測定項目
						乾燥条件	湿潤条件		
NM70	N	70	3	35	モルタル (C:S=1:3)	70°C	70°C	無塗布 亜硝酸系 塩分吸着剤 犠牲陽極	自然電位 腐食面積率
NC70I	N	70	3	30	コンクリート	10%RH	80%RH		
NC70O	N	70	3	20	コンクリート	暴露環境			

表-2 配合表

No.	セメント種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	B		S	G
					C	BFS		
NM70	N	70	—	327	467	—	1402	—
NC70I	N	70	48	165	236	—	916	995
NC70O	N	70	47	196	196	84	887	1000

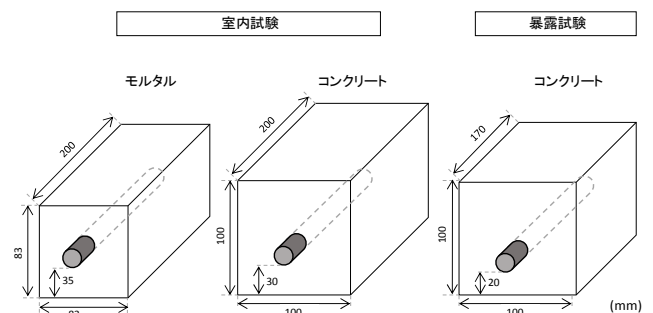


図-1 供試体寸法

暴露試験用のコンクリートは、W/Bを70%、s/aを47%とした。結合材にセメントと高炉スラグ微粉末(BFS)を7:3で用い、細骨材と粗骨材は表乾密度が2.67g/cm³の骨材を用いた。

供試体は練混ぜ終了後、2時間程度練置を行った後、型枠に打設した。

図-1に供試体寸法を示す。室内試験のモルタル供試体では8.3×8.3×20cm(鉄筋の最小かぶり厚35mm)の供試体を作製した。コンクリート供試体では10×10×20cm(鉄筋の最小かぶり厚30mm)の供試体を作製した。暴露試験用のコンクリート供試体では10×10×17cm(鉄筋の最小かぶり厚20mm)の供試体を作製した。

2. 2 試験方法

2. 2. 1 室内の腐食促進方法

鉄筋の腐食促進試験は、JCI-SC3⁵⁾を参考に乾燥と湿潤環境を繰り返す乾湿繰り返し試験を行った。

供試体作製後に20℃封かんで7日まで養生を実施した後、短辺のみからなる面と鉄筋部分をエポキシ樹脂でコーティングし、温度60~70℃で湿度80%RH程度の湿潤状態を3日間、同温度で湿度10%RH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。

2. 2. 2 自然電位測定

乾湿繰り返し試験の後、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。鉄筋腐食の判断には、表-3に示すように-350mV以下となったときの自然電位値で腐食の可能性ありと判断した。

2. 2. 3 腐食面積測定

腐食面積の測定は無塗布の供試体の自然電位が-350mVを下回ったときに他の供試体も同時に鉄筋を取り出して行った。

3. 実験結果

3. 1 室内試験

図-2にモルタル供試体における腐食面積率の測定結果を示す。普通ポルトランドセメントを使用した場合、亜硝酸系の防錆材を塗布することで腐食面積を90%程度、塩分吸着剤では約10%の腐食抑制効果が期待できる結果となった。犠牲陽極では鉄筋に腐食は確認されなかった。

表-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
-200mV < E	90%以上の確率で腐食なし
-350mV < E ≤ -200mV	不確定
E ≤ -350mV	90%以上の確率で腐食あり

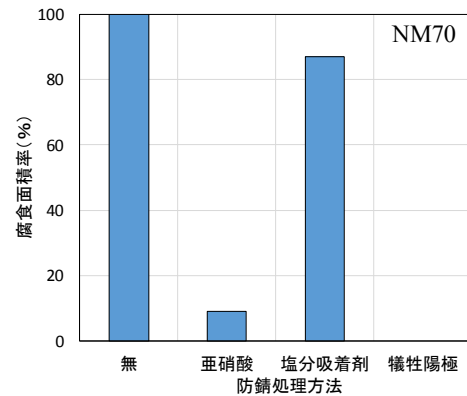


図-2 モルタル供試体における腐食面積率の測定結果

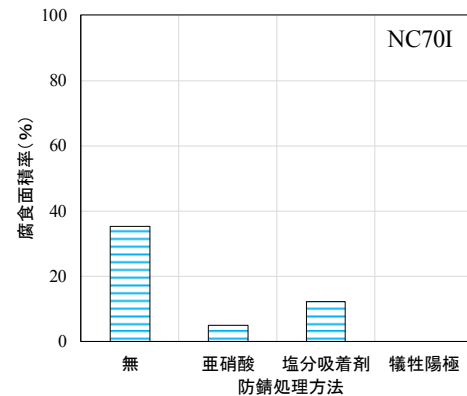


図-3 コンクリート供試体の腐食面積率の測定結果

図-3にコンクリート供試体における腐食面積率の測定結果を示す。無塗布では腐食面積率35%程度であり、亜硝酸では7%程度の腐食面積率となった。また、塩分吸着剤では約13%の腐食面積が確認された。ここでも、犠牲陽極では腐食は確認されなかった。

以上の結果より、室内試験の促進環境で犠牲陽極はモルタル、コンクリートにかかわらず腐食しないことを確認した。亜硝酸では、腐食面積率が10%程度となり比較的腐食を抑制できる結果となった。一方、塩分吸着剤は、亜硝酸と比較してモルタル供試体では約8倍、コンクリート供試体においても2倍以上の腐食面積率となった。

3. 2 暴露試験

暴露試験場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った。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。供試体の暴露状況を写真-1に、図-4に暴露期間中の自然電位を示す。自然電位は約半年ごとに測定を行った。無塗布では暴露終了時の自然電位が-450mV以下となり腐食している可能性が高い。一方で、亜硝酸と塩分吸着剤では-300mV程度となった。犠牲陽極では-900mV程度を示しているが、これは錆びたためではなく犠牲陽極に用いられる亜鉛による防食電流のためである。



写真-1 コンクリート供試体暴露状況 (赤丸箇所)

図-5に暴露期間中の自然電位と暴露後の腐食面積率を示す。腐食面積率は無塗布の供試体では約60%が腐食した。亜硝酸と塩分吸着剤では腐食面積は10%程度であり、両者の腐食抑制効果に大きな差は見られなかった。しかし犠牲陽極では鉄筋に腐食は確認されなかった。

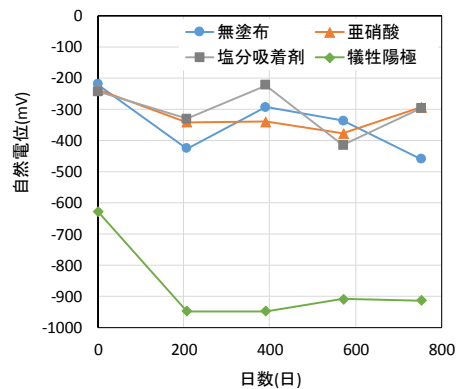


図-4 暴露期間中の自然電位

3. 3 各種防錆材の腐食抑制効果

各種防錆材の腐食抑制効果を評価するための指標として腐食抑制率を式(1)の様に定義した。

腐食抑制率

$$= \frac{\text{防錆材なしの腐食面積} - \text{防錆材ありの腐食面積}}{\text{防錆材なしの腐食面積}} \quad \dots \text{式 (1)}$$

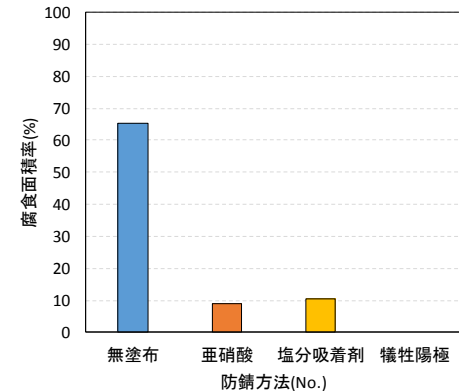


図-5 暴露後の腐食面積率

図-6に各種防錆材の腐食抑制率を示す。犠牲陽極では室内の促進環境と暴露環境による違いや、マトリクス(モルタルやペースト部のこと)による違いがあっても腐食抑制率は100%となった。これはイオン化傾向が鉄筋を覆っているマトリクスの違いや促進環境条件に影響されないことを示している。そのため、犠牲陽極中の亜鉛が消失するまで鉄筋に腐食が発生しないと考えられる。

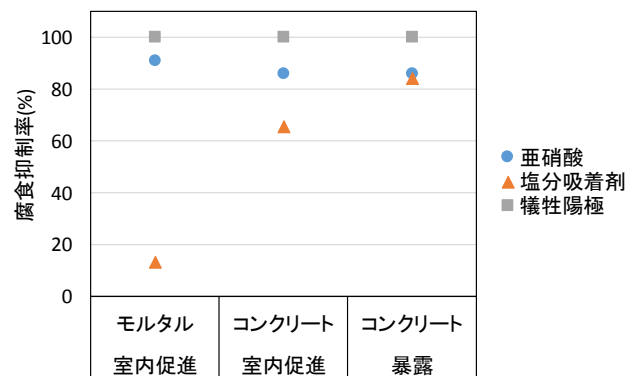


図-6 各種防錆材の腐食抑制率

亜硝酸の場合、マトリクスの違いや促進環境条件が異なっても腐食抑制効果が80~90%と高い傾向を示す結果となった。この原因として考えられるのが、防錆材を塗るときに塗りむらができてしまうため、一部で腐食が発生したことが考えられる。

一方で塩分吸着剤はモルタルよりもコンクリートで鉄筋を覆う方が腐食抑制効果は高い結果となった。これはコンクリートの粗骨材が塩化物イオンの移動を阻害した可能性が考えられる。また、塩分吸着剤では室内の促進環境よりも暴露環境において腐食抑制効果が高いことが明らかとなった。これは、室内試験においては短期間で腐食が進行するよう条件を設定したため、塩分吸着剤が塩化物イオンと亜硝酸イオンの交換を行うよりも早く鉄筋表面に腐食環境が形成されたことが理由と考えられる。一方、腐食促進作用が比較的遅い暴露環境では、塩化物イオンと亜硝酸イオンの交換が効率的に進み防錆環境が形成されたために、亜硝酸と同程度の腐食抑制効果が得られたと考えられる。

4. まとめ

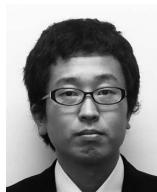
各種防錆材を用いて、鉄筋を覆うマトリクスの違いによる腐食への影響や室内の促進環境と暴露環境での腐食に及ぼす影響を確認した。その結果を以下に示す。

- 1) 犠牲陽極では、モルタルやコンクリート、室内の促進環境や暴露環境の影響を一切受けることなく腐食抑制効果が期待できる。
- 2) 亜硝酸では、防錆材を塗布していないものに比べ80~90%の高い腐食抑制効果が期待できる。
- 3) 塩分吸着剤では、室内試験の促進環境において他の防錆材より腐食抑制効果は低い結果となったが、暴露環境下では国内において最も厳しい飛来塩分地

域のひとつである沖縄において、亜硝酸と同等の腐食抑制率となり、通常の使用においては同等の腐食抑制効果を期待できると考えられる。

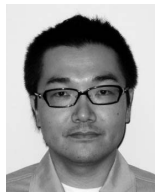
参考文献

- 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.



長谷川 諒
HASEGAWA Ryo

寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム
研究員
博士（工学）



村中 智幸
MURANAKA Tomoyuki

寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム
研究員



安中 新太郎
YASUNAKA Shintaro

寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム
上席研究員