

# 数種の防錆方法を施した鉄筋による腐食促進実験

寒地土木研究所 耐寒材料チーム

○ 清野 昌貴  
内藤 勲  
安中新太郎

海岸部の飛沫塩分や凍結防止剤の影響箇所における鉄筋コンクリートの補修を念頭に置き、数種の異なる鉄筋防錆方法を施した鉄筋について、室内における塩水の乾湿繰り返し条件による比較実験を行った。その結果、防錆処置による一定の防錆効果を確認し、塗布タイプの防錆方法では、塗布厚による腐食速度の違いを確認した。また、各防錆方法を施すことによりマクロセル腐食が発生する可能性があることを確認した。さらに、実環境の腐食形態を確認するため暴露実験を実施し、室内実験と同様に防錆効果を確認したが、一部の防錆方法では室内実験よりも防錆効果が低下した。

キーワード：断面補修、防錆、腐食

## 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。鉄筋の腐食が進行すると、構造物の耐荷力が低下する場合もある。このため、塩害による劣化の対策として、塩分を含んだコンクリートをはつり、鉄筋の錆部を除去、もしくは鉄筋を差し替えてから鉄筋防錆剤を塗布して断面修復を行う補修方法が古くから行われている。近年では犠牲陽極の設置や塩分吸着剤等を用いる新しい工法なども提案、施工されている。しかしながら、その防錆効果を評価する統一的な方法はない。本研究では、飛沫塩分や凍結防止剤の影響を念頭に置き、数種の異なる鉄筋防錆方法をそれぞれに指定された配合、塗布厚で施した鉄筋に対し、塩水による腐食を乾湿繰り返し条件下で進行させ、それぞれの鉄筋の防錆効果について比較検討する基礎実験を行った。

## 2. 実験方法

実験を行うための試験体は、長さ30cmの丸鋼R16 (SR235) とした。丸鋼表面の黒皮は濃度10%のクエン酸二アンモニウム水溶液を用いて除去し、その後、図-1のように両端5cmをブチルゴムとビニールテープで保護して、中間部20cmを試験区間とした。検討ケースは鉄筋の防錆処理、無処理の組み合わせを表-1のとおりとし、それぞれ9本作製した。

検討ケース1は防錆処理しない無処理の鉄筋、ケース2は一般的な防錆剤である亜硝酸リチウムを含むペーストを塗布したもの、ケース3は亜硝酸イオンを含む塩分吸

着剤入りの材料を塗布したもの、ケース4は鉄筋に犠牲陽極材を設置したものとした。なお、ケース3においては、ペーストのみの塗布とその上に断面修復を行うことをイメージした塩分吸着剤入りモルタルを被覆した2種類を作製した。

試験は、図-2に示すように、プラスチックケースの高さ25cmまで浸した塩水 (NaCl濃度約3%) の中に試験体を入れ<sup>1)</sup>、40°Cの室内に3日間保管、その後水中から取り出して室内温度20°C、湿度70%以下の室内で4日間保管<sup>2)</sup>、これを1サイクルとする方法で塩水による乾湿繰り返し試験を行った。なお、塩水の水分が蒸発しないようにケースには蓋をした。測定は、1サイクルごとに腐食状況を確認して写真を撮影し、試験開始後8サイクル、16サイクル、24サイクルで9本中3本ずつ腐食面積率 (試験区間における錆発生部面積÷試験区間全体面積) 計測と、錆を除去した鉄筋の質量を計測した。すなわち、各ケースにおいて8サイクル毎の測定で3本ずつ減り、24サイクルでの測定時は3本となる。

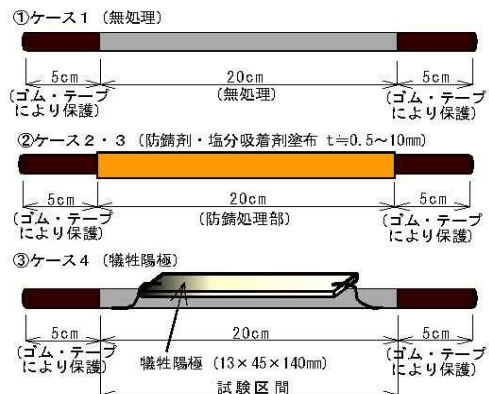


図-1 防錆処理略図

表-1 検討ケース（室内実験）

検討 ケース	防錆処理		塗布厚	備 考
	種類	主成分		
1	無処理	-	-	
2	防錆剤	亜硝酸リチウム	約 0.5mm	メーカー推奨ペーストに配合
3-1	塩分吸着剤	亜硝酸イオン	約 1mm	メーカー推奨ペーストに配合
3-2	塩分吸着剤	亜硝酸イオン	約 10mm	メーカー推奨モルタルに配合し被覆 (断面修復イメージ)
4	犠牲陽極	亜鉛	-	

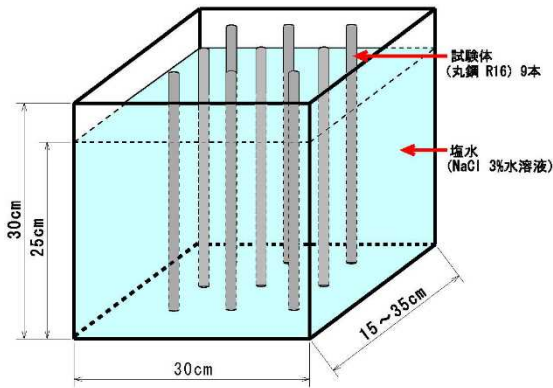


図-2 試験イメージ図（浸漬時）

### 3. 実験結果

#### (1) 外観観察

写真-1～5に、試験開始後3サイクルと24サイクルの各ケースにおける錆発生状況を示す。写真-1の無処理のケース1では、3サイクルですでに全面が錆に覆われており、24サイクルではほぼ全面が黒っぽく見える。写真-2、3のケース2とケース3-1は、3サイクルですべてが茶色に変色している。24サイクルでは全面が変色しているように見えるが、塩水に混じった錆がペースト塗布部に付着したことによる変色と思われる、鉄筋まで腐食に至っているかはこの時点では確認できない。写真-4のケース3-2では、モルタル部分に3サイクルと24サイクルで大きな変化は見られないが、3サイクルにおいて保護テープと試験区間の境目に若干の錆が確認できる。これは、この境目が塩水の水面部と同じ高さであり、水面の水分が乾燥により蒸発し、酸素が供給されて錆が発生したと推測する。24サイクルではその部分の腐食の進行が多少認められる。写真-5のケース4では3サイクルで錆はほとんど発生していないが、24サイクルでは犠牲陽極に接した鉄筋の側面部に錆が発生している状況が確認できた。この要因として、塩水浸漬から取り出した後の乾燥行程において、犠牲陽極の主成分である亜鉛を覆うモルタル材に浸漬された水分の影響で、犠牲陽極直下の鉄筋部が他部分よりも乾湿繰り返しの時間が長くなり、腐食が進行しやすい環境となっていたと考えられる。



(3 サイクル)

(24 サイクル)

写真-1 ケース1（無処理）



(3 サイクル)

(24 サイクル)

写真-2 ケース2（防錆剤 0.5mm）



(3 サイクル)

(24 サイクル)

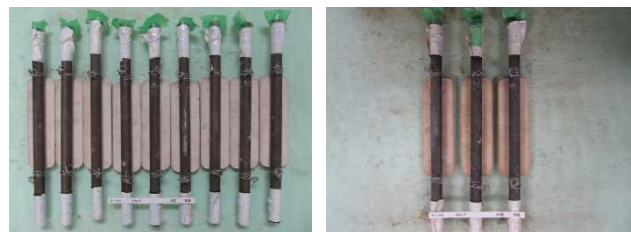
写真-3 ケース3-1（塩分吸着剤 1mm）



(3 サイクル)

(24 サイクル)

写真-4 ケース3-2（塩分吸着剤 10mm）



(3 サイクル)

(24 サイクル)

(24 サイクル後の  
側面部代表写真)



写真-5 ケース4（犠牲陽極）

## (2) 腐食面積率

図-3に8サイクル、16サイクル、24サイクルの腐食面積率を示す。ケース1は全て腐食面積率が100%となった。ケース2とケース3は、ペースト部を除去すると、鉄筋が腐食していない部分が多かった。このことから、防錆剤および塩分吸着剤塗布によって一定の防錆効果が得られたと考えられる。しかし、試験区間は、モルタルおよびペーストで鉄筋を覆っている状況であり、防錆効果がモルタルおよびペーストの被覆によるものか、主成分である亜硝酸やその量による影響か、被覆厚と亜硝酸による影響のどちらが支配的であったか等については検証が必要と考えている。また、サイクルの増加とともに腐食面積率は増加する傾向があり、ケース2とケース3では防錆剤の主成分は異なるものの、塗布厚が大きいほど、腐食面積率は小さくなる傾向がみられた。ケース3-1とケース3-2の比較では、断面修復をイメージしたケース3-2の値が小さくなった。ケース4でも腐食面積率が5%以下となっており防錆効果が認められた。なお、ケース4の腐食面積率は、8サイクルから16サイクルにかけて増加するが、16サイクルから24サイクルにかけてはほぼ横ばいであった。

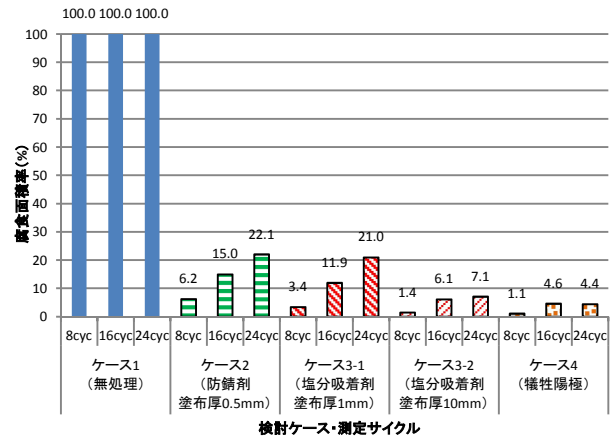


図-3 腐食面積率

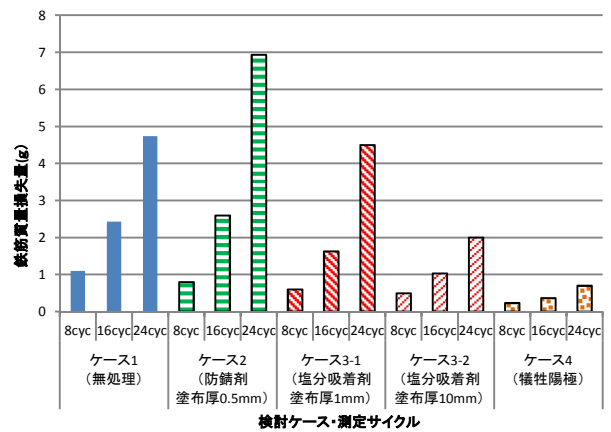


図-4 鉄筋質量損失量

## (3) 鉄筋質量損失量

図-4は実験開始前の鉄筋質量と実験後の鉄筋質量の差（以下、鉄筋質量損失量と称す）を示したものである。全てのケースでサイクルの増加とともに鉄筋質量損失量は大きくなった。また、ケース2とケース3の比較では、腐食面積率と同様にペーストの塗布が厚いほど鉄筋質量損失量は小さくなった。ケース3-1とケース3-2の比較においても、腐食面積率と同様の結果であった。今回の試験においては、ケース2の24サイクルが一番大きい値となり、ケース4が一番小さい値であった。また、鉄筋質量損失量は無処理のケース1とケース3-1ではほぼ同等の値であった。図-5は24サイクル時における鉄筋質量損失量を錆発生部の面積で除したものであるが、腐食面を平均してみると無処理のケースより鉄筋防錆を施したケースの方が深さ方向に大きく腐食が進んでいたことがわかる。腐食状態を観察すると、ケース1は全体的に一樣な腐食であるのに対し、ケース2、3、4の腐食は部分的に大きく断面欠損している状態であった（写真-6）。これらから、ケース1は一樣のマイクロセル腐食であり、ケース2、3、4は、マクロセル腐食（図-6参照）によって、局部的に鉄筋の腐食が進行した可能性があると思われる。

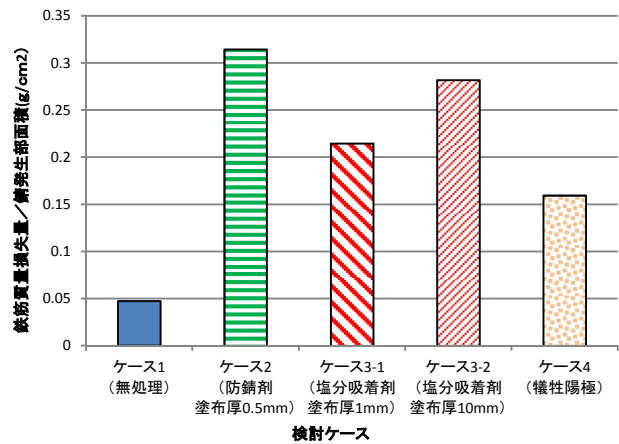


図-5 鉄筋質量損失量／錆発生部面積



写真-6 腐食状況例（ケース3-1、塩分吸着剤 塗布厚1mm）

これらの結果から、鉄筋防錆剤による防錆処理を行った場合、塗布厚によっては無処理とは腐食形態が異なり、無処理よりも腐食の進行が早くなる可能性があることが示唆された。

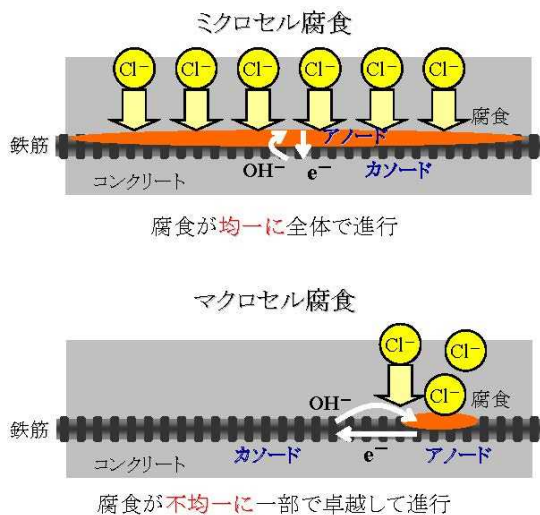


図-6 ミクロセル腐食とマクロセル腐食<sup>3)</sup>

#### 4. 暴露実験

実環境での腐食形態を確認するため、表-2に示す無処理および各鉄筋防食を施した鉄筋各1本を沖縄県海岸部の暴露試験場に1月から7月まで約半年間設置（写真-7参照）して鉄筋の腐食状況を確認し、室内実験結果との比較を試みた。用いた鉄筋の種類や防錆剤および塩分吸着剤の塗布、端部処理方法などは図-1の室内試験と同様としたが、鉄筋の長さは44cm、試験区間は34cmとして実施した。なお、ケース2'の防錆剤の塗布厚は、室内実験の0.5mm厚（メーカー推奨値）で部分的に大きく腐食が生じたため、推奨値よりも大幅に厚い5mm厚での塗布を試みた。

写真-8は各ケースの暴露後の状況である。ケース1'の無処理、ケース4'の犠牲陽極ではほぼ全面が錆びて茶色い状態であった。犠牲陽極のケースについて、室内試験の24サイクル（週）では部分的な錆であったにもかかわらず、暴露試験で錆が全面的に多く発生した。理由として、本来は犠牲陽極による鉄筋との防食回路はコンクリートや水中を介して形成されるものであるが、今回は鉄筋が気中に曝されており、防食電流が鉄筋全体に流れなかったためと考えられる。これを裏付ける結果として、写真-8の犠牲陽極と鉄筋との接合部（赤丸箇所）はあまり腐食しておらず、防食回路が部分的に機能していたと思われる。また、ケース2'の防錆剤とケース3'の塩分吸着剤では、一部が茶色くなっており部分的に錆が発生しているとみられる。

写真-9はケース2'の防錆剤塗布の状況写真である。上段に示すとおり、防錆剤の塗布厚が厚すぎたため、塗布後数日で乾燥収縮と思われるひび割れが発生し、そのまま暴露したことから、ひび割れ部から浸入した水分の影響によると考えられる腐食が発生していた。このひび割れ箇所の防錆剤塗布部を剥がすと腐食した部分としていない部分があり、腐食部分については乾燥収縮によって

ひび割れた際に鉄筋と防錆剤との接着不良が部分的に生じて防錆作用が十分に発揮できなかったことが腐食に至った原因の一つであると思われる。

図-7は、各ケースの鉄筋質量損失量である。室内実験の結果を基に防錆剤については塗布厚を大きくしたため損失量が少なくなったと推察される。一方、無処理の損失量は多くなり、室内実験で一番効果が認められた犠牲陽極も無処理の次に多くなった。この要因は、屋外暴露における乾湿状態が室内実験とは異なり、雨水や越波による乾湿繰り返し回数が多くなったこと、さらに犠牲陽極については、前述の通り防食回路が一部しか機能しなかったことによるものと考えられる。

表-2 検討ケース（暴露実験）

検討ケース	防錆処理		塗布厚	備考
	種類	主成分		
1'	無処理	—	—	
2'	防錆剤	亜硝酸リチウム	約 5mm	塗布厚増大
3'	塩分吸着剤	亜硝酸イオン	約 5mm	モルタル被覆（断面修復イメージ）
4'	犠牲陽極	亜鉛	—	



写真-7 各鉄筋暴露状況（暴露直後）  
（上から犠牲陽極、無処理、防錆剤、塩分吸着剤）



写真-8 暴露後の鉄筋外観  
（上から犠牲陽極、無処理、防錆剤、塩分吸着剤）

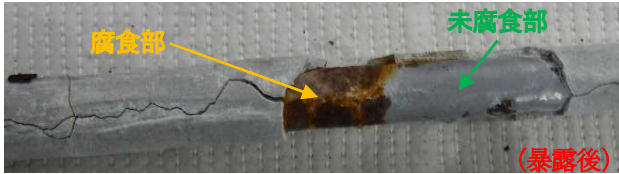


写真-9 防錆剤塗布ケース2' 状況

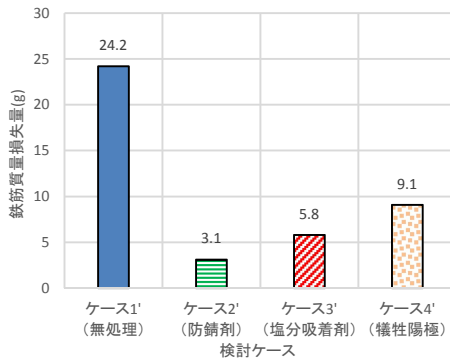


図-7 鉄筋質量損失量 (暴露実験)

## 5. まとめ

- (1) 無処理、鉄筋防錆剤、塩分吸着剤、犠牲陽極とも

サイクルの増加とともに鉄筋の腐食は進行するが、防錆処理により一定の防錆効果は確認できた。

(2) 鉄筋防錆剤、塩分吸着剤で防錆剤の主成分は異なるが、塗布を厚くした方が腐食の進行が遅くなった。

(3) 鉄筋防錆剤、塩分吸着剤、犠牲陽極による防錆処理により、マクロセル腐食が発生する可能性が示唆された。

(4) 暴露実験では、室内試験と同様に防錆処理による効果は確認できたが、乾湿環境が室内実験とは異なっており、おそらくこのことにより無処理の鉄筋質量損失量が多くなったり、犠牲陽極の防錆効果が低下する結果となったものと考えられる。

コンクリート内における鉄筋の腐食環境は、本実験とは異なるため、実験結果を実構造物における腐食メカニズムと関連づけるにはさらなる検証が必要と考えている。今後は、防錆処理を行った構造物での実環境下におけるデータ収集を行い、また、より実環境下に近いモデルによる試験によって、防錆効果の持続性について検討したい。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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－乾湿繰り返し法－、(社)日本コンクリート工学協会、pp.99-105、2004
- 3) 渡辺博志、木村嘉富、古賀裕久、中村英佑：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