

塩害により劣化したRC部材の補修 —塩化物ネストが生成した鉄筋について—

REPAIR OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS DETERIORATED BY SALT ATTACK
— on the re-bar generated chloride nest —

佐々木孝彦*・飯島 亨**・工藤輝大***・山田 優****

by Takahiko SASAKI, Tohru IJIMA, Teruhiro KUDO and Masaru YAMADA

1. はじめに

塩害により鉄筋が腐食したコンクリート構造物を断面修復工法により補修する場合、劣化因子が浸透している領域を、鉄筋がすべて露出するまでを上限にはつり取り、鉄筋に付着している錆を除去する前処理が行われる。この際の錆の断面を観察すると、図1に示すとおり錆の上部の層状にひび割れが存在するいわゆる「浮き錆」部分とさらに内部の鉄自体に強固に密着している錆が認められる。「浮き錆」の除去は人力でも容易に行うが、浮き錆の下層の鉄筋自体に強固に付着している錆の除去は、ブラスト処理等によらなければ除去できない場合が多い。剥離・剥落対策として鉄筋を包み込むように補修材を施工する場合、この錆、

特に鉄筋背面の錆の除去が問題となる。実際にはブラスト処理自体が実施できないなどの理由により、浮き錆だけを除去する程度で強固に付着した錆は残存する場合がほとんどであると考えられる。

従来、錆は酸化度は低いものの酸化物であるので、強固に付着していれば、黒皮と同じように腐食因子が直接鉄筋の金属部分と接しないよう保護する役目を果たしており、腐食反応を抑制する方向に作用するものと考えられてきた。しかし、鋼構造物においては鋼材に強固に付着した錆中の地金と錆の界面近傍に塩化物イオンが濃集した領域「塩化物ネスト」の存在が確認されていて、これが存在する場合は腐食反応は抑制されないことが判っている。このため、塩化物ネスト除去対策として入念なブラスト処理が実施される。

現在まで、塩害により劣化した鉄道コンクリート構造物において、コンクリート中に埋設された鉄筋にも塩化物ネストが存在することを明らかにした調査例は報告されていない。しかし、鋼構造物における場合と同じように塩化物ネストを含む錆が存在すれば、補修したにもかかわらず腐食反応は進行して、短時間でひび割れや浮きが発生して再劣化に至り、期待した補修効果が得られないことになると想定される。

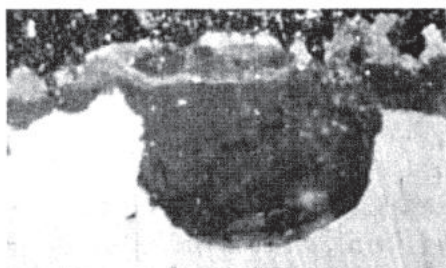
筆者らが、塩化物ネストの存在の有無について調査を実鉄道コンクリート構造物においても、その存在を確認することができた。また、塩化物ネストが存在する錆を残存させた状況で、通常の防錆材を用いる断面修復工法を適用し、防錆材の腐食抑制効果を検証した。以下、それらの結果を報告する。

2. 塩害により劣化した実構造物の調査

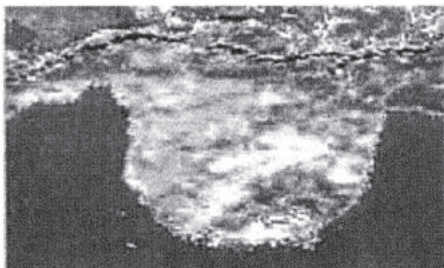
2.1 調査方法の概要

調査構造物は、線路下を中小の河川が横切るためのボックス型のRC造コンクリート構造物(図2)であり、側壁の背面は土である。構造物の内空は中壁で仕切られている。本構造物は海岸からおよそ30mの位置に設置されており、コンクリート中に蓄積された塩化物イオンは、飛来塩分のほか、満潮時に海水と直接接することも大きな要因と考えられる。

鉄筋の腐食状態調査においては、まず、目視により



(a)偏光顕微鏡像



(b)酸素の二次元分布

図1 錆断面の偏光顕微鏡像と酸素の二次元分布

* (財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料研究室長(〒184-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)、**同 コンクリート材料研究室副主任研究員、***大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻

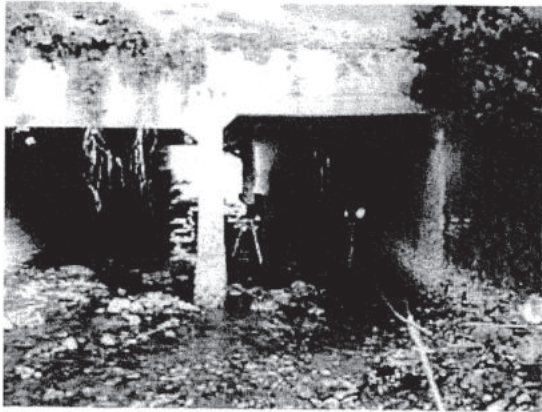


図2 調査構造物の外観

ひび割れを、打音検査により濁音箇所を把握した。その後、自然電位を求めて鉄筋腐食度を類推した。次に、調査範囲の一部のかぶりをはつり取り、目視により鉄筋腐食度を調べ、類推結果を確認した。自然電位は、銅/硫酸銅照合電極と高入力抵抗インピーダンス電位差計を用いて測定した。ただし、かぶりを介して測定を行うので、実測される自然電位は鉄筋の自然電位とかぶりの性状により生ずる電位変動分の和として求められる。コンクリートの含水率等の性状に起因して変動する実測値を用いる評価は、目視による鉄筋腐食度の判定結果との整合性が取れない場合が多く、腐食の有無を示すにとどまっている。電位変動分を取り除いて鉄筋自体が示す自然電位のみで評価できれば、この問題は解消されることになる。

かぶり部分で生ずる電位変動分は含水率や中性化深さ、塩化物イオン量が大きく影響するので、本調査では、自然電位を含水率、中性化深さ、塩化物イオン量をパラメータとして補正した自然電位を用いて鉄筋腐食状況を調べた。すでに、かぶりをはつって「目視により判定する鉄筋腐食度」と補正自然電位の関係が調

表1 補正自然電位と鉄筋腐食度の関係

補正自然電位 (E)	腐食度	評価基準
$-250\text{mV} < E$	I	腐食がない状態
$-350\text{mV} < E$ $\leq -250\text{mV}$	II	表面に僅かな点錆が生じている状態
$-450\text{mV} < E$ $\leq -350\text{mV}$	III	薄い浮き錆が広がって生じている状態
$E \leq -450\text{mV}$	IV以上	膨張性の錆が生じて断面欠損がある状態

(銅/硫酸銅照合電極基準)

べられた結果から、表1の評価基準が示されている。これを用いて、鉄筋腐食度を類推した。補正に用いる含水率は、コンクリート構造物表面に高周波容量式の含水率計を当てて測定した。中性化深さは、採取コアを用いフェノールフタレインによる発色の有無から判定した。

コンクリート中の鉄筋の腐食に関連する因子である中性化残りや全塩化物イオン量については、構造物から採取したコアを使用して調査した。なお、中性化残り (CN) は、

$$\text{CN} = (\text{かぶり}) - (\text{中性化深さ}) \quad (1)$$

で与えられる。かぶりは、レーダを用いる非破壊法を適用して現地にて測定した。全塩化物イオン量は、採取したコアを用いて蛍光 X 線分析法により求めた。

2. 2 調査結果

図3に調査対象箇所の外観を示す。また、図4にひび割れと打音検査により確認された濁音箇所を示す。0.5mm 幅のひび割れが1本だけ認められた。また、中壁は厚さが30cm程度である。このことに起因して打音検査では全面軽音であったが、明らかに浮きに起因する濁音箇所が、図中の左上部のみ認められた。しかし、後述するように、鉄筋腐食度を目視により確認する目的でかぶりをはつったところ、調査範囲のほぼ全面が浮いていた。このように、はつり調査から著しい変状は認められるものの、構造物全体として外観上からは緊急に補修が必要とは判断されない。

調査対象範囲のいずれの鉄筋も含水率、中性化深さ、塩化物イオン量を考慮した補正自然電位は、 -450mV 以上を示して鉄筋腐食度はIVすなわち膨張性の錆が生じて断面欠損のある状態と推定される。

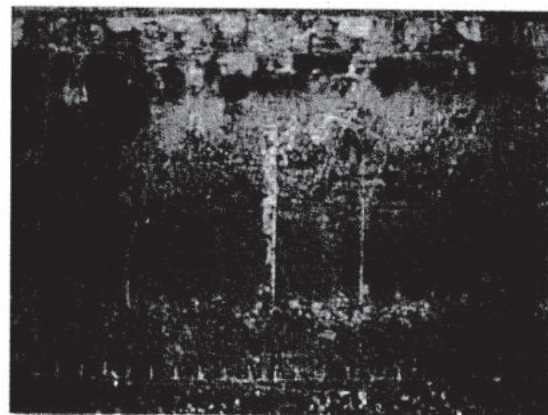


図3 調査対象箇所の外観

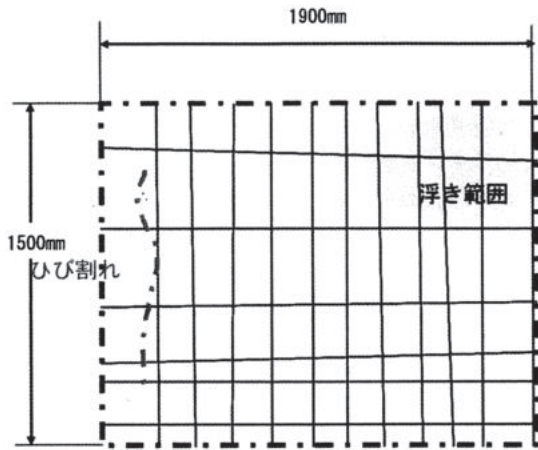


図4 ひび割れと浮き

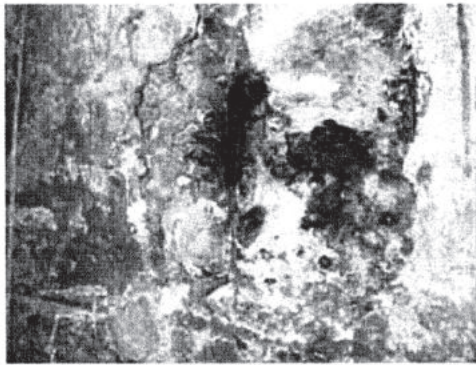


図5 はつり調査結果

図6にはかぶりの一部をはつて露出させた鉄筋の外観を示す。鉄筋のふしが欠落しており、補正自然電位による推定とはつり調査による結果はよく符合している。

図7には、塩化物イオン量の深さ方向分布を示す。鉄筋は50~70mmの位置にあるので、塩化物イオン濃度は1.0~1.5%である。単位セメント量はおよそ300kg/m³であることが判っているので、鉄筋位置の塩化物イオン濃度は3~4.5kg/m³となり、発錆限界塩化物イオン量より高い。

腐食状況を調査した範囲において、かぶりの小さい横方向の鉄筋を切断して採取し、浮き錆を除去して断面方向の塩化物イオンの分布を調べた結果を図8に示す。この図には鉄の二次元分布も併せて示した。強固に付着した錆の金属と錆の界面近傍に塩化物イオンが高濃度に濃集している箇所が認められる。これは、従来から言われている、鉄系材料の塩化物イオンの錆中における濃集は、コンクリート構造物中に埋設された鉄筋においても例外でないことを示している。

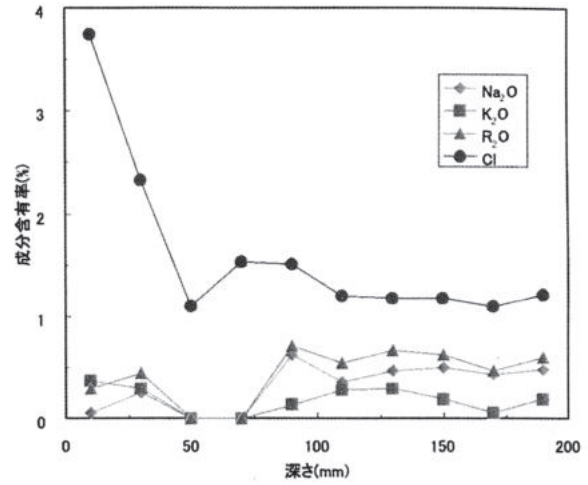
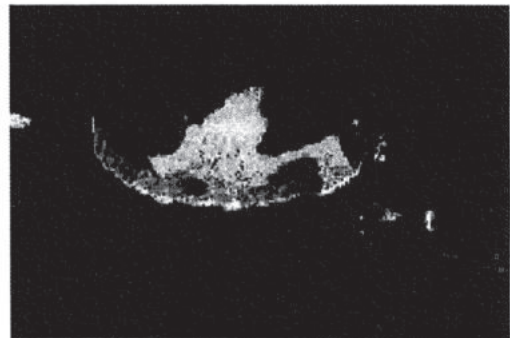


図6 各元素の深さ方向分布



(a)塩化物



(b)鉄

図7 塩化物と鉄の断面方向の二次元分布

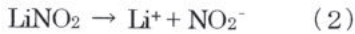
3. 塩化物ネストが生成している鉄筋の補修方法の検討

3. 1 防錆材の腐食抑制効果

(1) 亜硝酸リチウムの場合

塩害抑制対策として断面修復工法が広く用いられる。この場合、防錆材として亜硝酸リチウムが活用される。

亜硝酸リチウムによる防錆のメカニズムとして「不働態皮膜の生成」が知られている。さらに詳細には、以下のようなものである。すなわち、亜硝酸リチウムは、これを含む水溶液にあっては電離してイオン化している。



この亜硝酸イオンは、イオン化した鉄イオンと反応して、



Fe_2O_3 被覆が生成する。この酸化皮膜がアノード部(鉄が溶解する箇所)を閉鎖してイオン化を防ぐ⁵⁾。

ここで、塩化物イオンによる不働態皮膜の破壊の様相を確認しておく以下のようなものである。塩化物イオンが存在すると、酸素より鉄と親和性の高い塩化物イオンが酸素に置き換わって鉄表面に吸着する。このとき塩化物イオンが吸着したサイトでは、



極めて可溶性の塩化第一鉄が生成し、これが鉄表面から離脱する。塩化物イオンによる不働態皮膜の破壊に対しては、このようなメカニズムが想定される。一方、塩化第一鉄が離脱した鉄表面には、塩化物イオンあるいは亜硝酸イオンが吸着できるサイトが生成する。 $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-]$ が0.6~1.0以上では、亜硝酸イオンが吸着する確率が高くなり不働態皮膜の補修がなされる。このために、防錆に必要な亜硝酸イオン量は塩化物イオン量とともに大きくなる。

以上から、亜硝酸リチウムの活用により塩化物ネストによる腐食反応の進行を抑制するためには、亜硝酸イオンが鏽中へ拡散・浸透して、鉄筋地金と鏽の界面近傍の $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-]$ が0.6~1.0以上になることが必要である。

次に、鉄筋表面に残存した鏽中の塩化物ネストに及ぼす亜硝酸イオンの影響を考える。鉄筋と鏽の界面で十分な防錆効果を発現させるためには、鏽中を亜硝酸イオンが移動・拡散する必要がある。この経路として鏽中の微細なひび割れが想定される。このようなメカニズムにより界面に供給される亜硝酸イオン量は、亜硝酸イオンを含む細孔溶液が直接接触するケースに比べて少ないと考えられ、塩化物イオン量によっては十分な防錆効果が発現する亜硝酸イオン量が確保されない可能性がある。

(2) 塩化物イオン吸着剤の場合

一方、塩化物イオン吸着剤は、塩化物ネスト中の塩化物イオンを濃度差と塩化物イオンを含む化合物の安定性の差を駆動力とする拡散により移動させて塩化物イオン吸着剤中に吸着・固定することが考えられる。塩化物イオン吸着剤のもうひとつの機能として、亜硝酸イオンの放出がある。この亜硝酸イオンが鏽中に拡散し、鉄筋地金と鏽の界面近傍の $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-]$ が0.6~1.0以上になれば、塩化物ネストの腐食性が改善されることは、亜硝酸リチウムによる腐食性改善と同様であるが、塩化物イオン量の低減が図られるとするならば、亜硝酸リチウムを用いた場合よりも少ない亜硝酸イオン量で腐食性改善が図られる可能性がある。

3. 2 暴露試験の概要

既往の研究例^{4, 3)}から得られる以上の知見を考慮しつつ、塩化物ネストが生成している劣化構造物を、防錆材を併用した断面修復工法で補修した場合、どの程度の防錆効果が得られるかを調べるために、防錆成分として亜硝酸リチウムを用いる工法と塩化物イオン吸着剤を用いる工法で補修した供試体を海塩環境下に暴露した。

補修対象としたコンクリート供試体の概要と塩化物ネストの有無の確認結果を以下に示す。

(1) 補修供試体の概要

暴露した供試体は、コンクリート床版を模擬し、図8に示す寸法と配筋でかぶり厚は25mmである。また、コンクリートの配合は表2に示すとおりで、水セメント比は63.5%である。塩化物イオン量は、海砂を使用したコンクリートの平均的な塩化物イオン量1~3kg/m³よりやや多い4kg/m³に調整した。この供試体を沖縄県中頭郡中城村の防波堤の上に暴露した。日本ウェザリングセンターによって平成4年~11年に行われた環境調査によれば、西原(琉球大学工学部構内)では、年平均気温は23.2℃、降水量は2032mm、飛来塩分量は0.35mg/dm²/dayである。暴露箇所は、この観測点から数km程度離れてはいるが、海岸に位置しており、高温多湿のきびしい海塩環境と推察される。

図9(a)に、10年間暴露後の浮き鏽を除去した後の断面を示す。ケレンにより、浮き鏽は除去したものの鉄筋に強固に付着した鏽は未だ残存し、鏽中の特に鏽と鉄筋地金の界面近傍に高濃度に塩化物イオンが濃集(図9(b))している。なお、交流インピーダンス法により求めた分極抵抗は85kΩ・cm²であった。

(2) 補修工法の概要

塩化物ネストが確認された鉄筋を防錆材を用いる断面修復工法により補修した。補修の手順を以下に示す。まず、縦方向および横方向のいずれの鉄筋も完全に露

出させるようにかぶりをはつき取った。露出させた鉄筋のケレンには電動のワイヤーブラシを用いた。浮き錆を除去した後に防錆材を施工した後、ポリマーセメントモルタルを所定断面まで施工した。用いた補修工法は2種類で、一つは防錆成分として亜硝酸リチウムを用いるものであり、もう一方は塩化物イオン吸着剤

を用いるものである。

亜硝酸リチウムを用いる場合の施工は、以下のようなものである。まず、ケレンした鉄筋に亜硝酸リチウム40%水溶液を刷毛を用いて3回塗布する。次いで、亜硝酸リチウムを高濃度に添加したポリマーセメントペーストを2回塗布した後、やはり亜硝酸リチウムを混和し

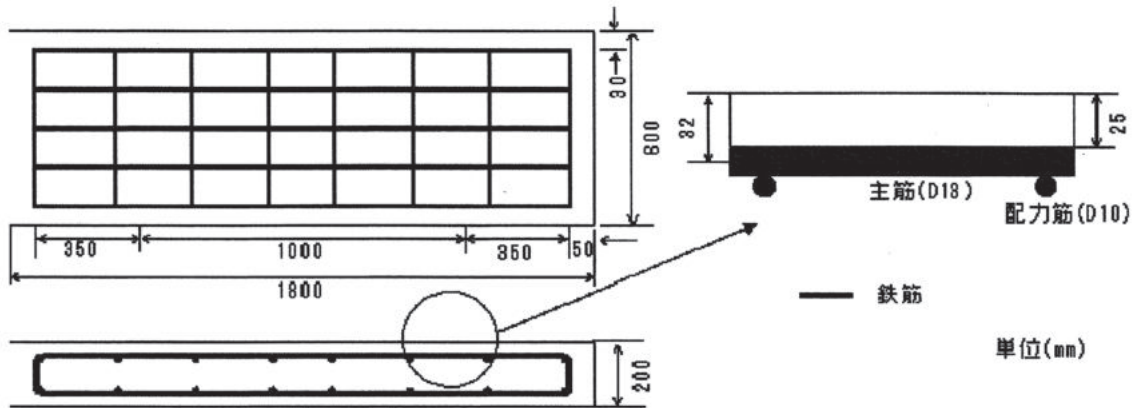


図8 暴露供試体の寸法および配筋

表2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単用量 (kg/m ³)			
				セメント	水	細骨材	粗骨材
25	21.0	4.0	63.5	271	172	876	961

セメント: 普通ポルトランドセメント 細骨材: 川砂 粗骨材: 陸砂 混和剤: AE 減水剤

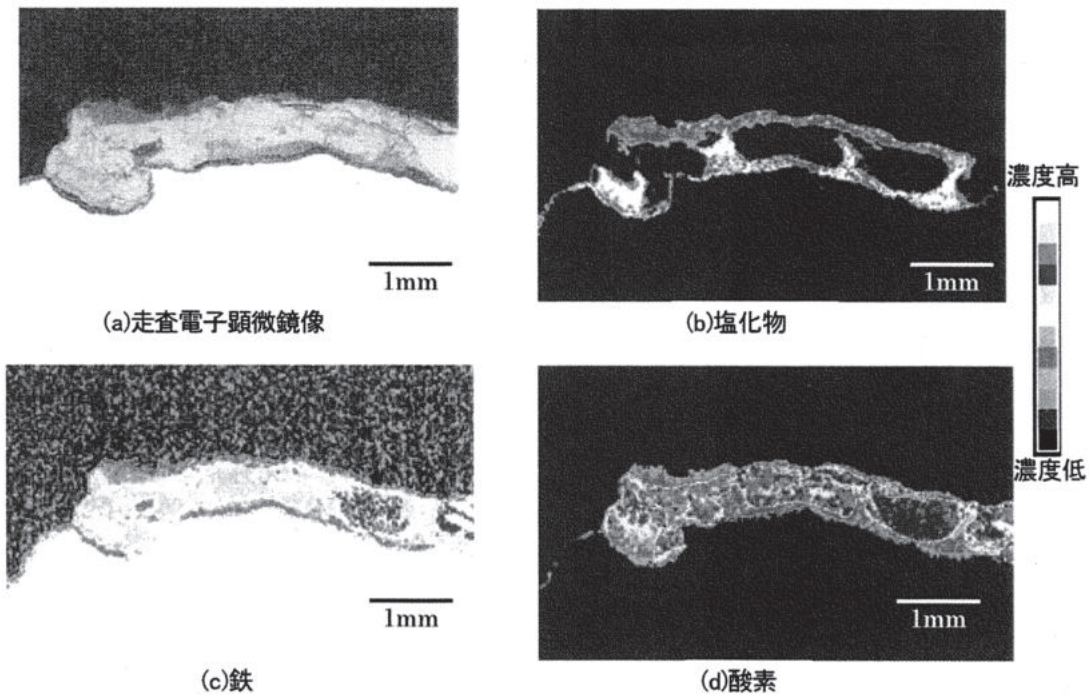


図9 強固に付着した錆の走査電子顕微鏡像と各元素の断面方向の2次元分布

たポリマーセメントモルタルをコテを用いて施工した。

塩化物イオン吸着剤を用いる場合は、塩化物イオン吸着剤を添加したペーストタイプの防錆型補修材を刷毛で2回施工した後、市販のポリマーセメントモルタルをコテを用いて施工した。ここで用いたポリマーセメントモルタルには防錆成分は配合されていない。

(3) 暴露試験による防錆効果の検証

補修工法による防錆効果の違いを確認することを目的に、補修後3年経過時点で鉄筋の腐食状況を調べた。この調査における腐食状況調査は補正自然電位により評価した。なお、かぶりの一部をはつり取って目視により鉄筋腐食状況を確認した。また、コンクリートコアを採取し、これを用いて塩化物イオン濃度および亜硝酸イオン濃度の深さ方向分布を求めた。

図10には、亜硝酸リチウムを用いる工法により補



図10 亜硝酸リチウムを用いる工法で補修した供試体の補正自然電位



図11 はつり調査結果



図12 亜硝酸リチウムを用いる工法で補修した供試体の外観

修した供試体の、補正自然電位の二次元分布を示す。縦横それぞれの各数値の測定間隔は10cmである。補正自然電位は表1に従って区分し、鉄筋腐食度Ⅰ：青色、鉄筋腐食度Ⅱ：緑、鉄筋腐食度Ⅲ：黄色、鉄筋腐食度Ⅳ：赤で色分けして表示した。補修部分の鉄筋の補正自然電位は、いずれも-350mV以下であり、補修していない箇所の補正自然電位と類似の値を示している。腐食反応は抑制されていないと考えなければならない。なお、交流インピーダンス法により求めた分極抵抗は $150\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、補修していない箇所 ($84\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) に比べれば大きい値を示しているが、実用上腐食反応がほとんど進行しないと考えるとよい $300\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ よりは大きいと言える。そこで、かぶりの一部をはつり取って目視により鉄筋腐食状況を確認した。この結果は図11に示すとおりであり、鉄筋腐食が進行して錆が生成していた。この錆は、ケレン作業の不足により残存した錆ではなく補修後に新たに生成した錆である。また、亜硝酸リチウムを高濃度に添加したポリマーセメントペーストおよびモルタルは良く鉄筋に付着していることが観察された。

補修供試体の外観は図12に示すとおりで、0.2mm程度の乾燥収縮によるひび割れが認められるものの、目視により鉄筋の腐食状況を確認した箇所には鉄筋腐食に関連するひび割れは認められない。

図13に、この部分の亜硝酸イオンと塩化物イオンの深さ方向分布の測定結果を示す。鉄筋を包み込むように亜硝酸リチウムを高濃度に添加したポリマーセメントモルタルを施工しているので、亜硝酸イオンの濃度は補修材側で高く、躯体側で小さい傾向が見られる。ただし、補修材の表層で塩化物イオン濃度が高いのは、飛来塩分によるものと考えられる。他方の塩化物イオン濃度は、逆の深さ方向分布を示している。また、亜硝酸イオンは補修材側から躯体側へ、塩化物イオンは躯体側から補修材側へ濃度差により拡散している。ここで、亜硝酸イオンについて詳細に検討する。躯体の塩化物イオンが拡散により補修材へ移動して、塩化物イオン濃度が躯体の塩化物イオン濃度(分析値は

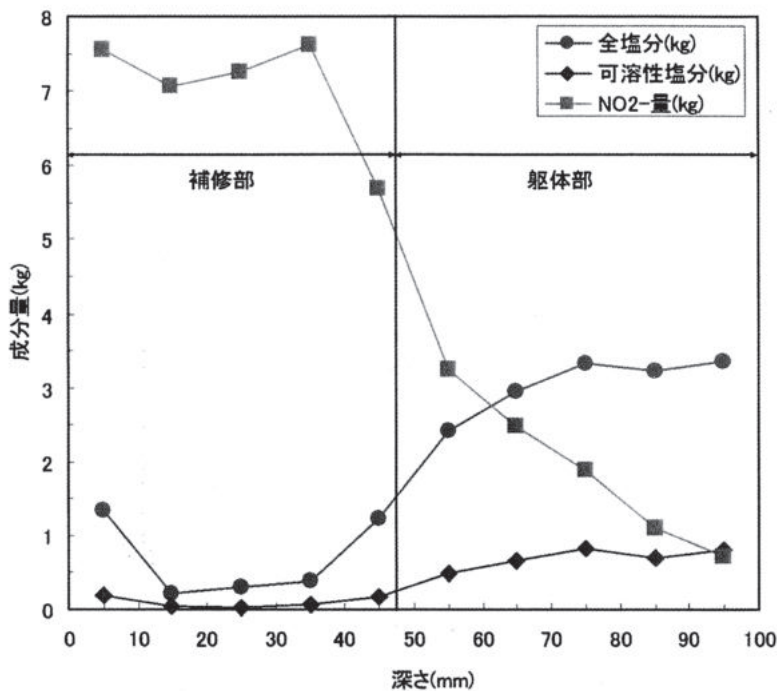


図 13 各成分の深さ方向分布

3kg/m³)と同じになったと仮定した時、腐食抑制のために必要な亜硝酸イオン濃度は、以下のように計算される。

単位体積重量を 2000kg/m³とし塩化物イオン濃度を当初配合どおり 4kg/m³とすると塩化物イオン濃度は 0.2%と計算される。この時、必要な亜硝酸リチウム量 (L) は、

$$L = (2300 \times 0.2 \times 53) \div (35.5 \times 100) \quad (6)$$

で与えられ、6.9kg/m³と計算される。従って、亜硝酸イオン量は、6kg/m³となり、防錆に必要な量は十分確保されている。また、補修材中の塩化物イオン濃度は、躯体側からの拡散により高くなっているものの、発錆限界塩化物イオン濃度を超えている事実は認められなかった。

以上から、暴露開始後 3 年経過時点で亜硝酸イオンを高濃度に添加したポリマーセメントモルタルに囲まれている鉄筋が腐食した理由は深部の塩化物イオンの拡散によるものではないと考えられる。

ここで、亜硝酸リチウム添加のポリマーセメントペーストおよびモルタルを施工する意味について検討しておく。

通常、セメントモルタルあるいはコンクリート中の

鉄筋は強アルカリ性のために形成された不動態皮膜の存在により、腐食しない。補修モルタルにおいても同じことが言えるので強アルカリ性に起因して十分防錆能力を有する不動態皮膜が形成される。従って、亜硝酸イオンの導入が、不動態皮膜の形成に影響を及ぼすことは考えにくい。敢えてその意味があるとするれば、既に形成された不動態皮膜のさらなる安定化に寄与する可能性が考えられる。ここで、例えば深部から補修モルタルへ塩化物イオンが拡散する場合は、これにより不動態皮膜が破壊される。予め、不動態皮膜の修復機能性の高い亜硝酸イオンの導入することは、塩化物イオンの拡散浸透により破壊された不動態皮膜の修復のための予防措置と考えるのが妥当であろう。図 14 には、かぶりをはり取った箇所において腐食して錆が付着していた鉄筋の塩化物イオン、鉄、酸素

の二次元元素分布を示す。分析に当たっては浮き錆は除去しており、鉄筋に強固に付着している錆を分析の対象とした。錆中には高濃度に塩化物イオンが濃集している「塩化物ネスト」が残存していることが判った。

亜硝酸リチウムを活用して補修しても、塩化物ネストが残存していることが、補修部の鉄筋が腐食していたことの一因と考えられる。錆中へ亜硝酸イオンが拡散して、錆と鉄筋地金の界面近傍において防錆効果の指標である亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比、 $[NO_2^-] / [Cl^-]$ が 0.6~1.0 以上になれば、防錆効果は十分に発現する。亜硝酸イオンの拡散による錆中の移動は起こりえないことではないが、しかし、3 年経過時点においても腐食反応が進行している事実は、亜硝酸イオンのコンクリート中での拡散とは異なっておりかなり遅いと考えねばならない。さらには、錆中の塩化物イオンは、補修に用いたモルタルには含まれていないので、この周囲との濃度差を駆動力として拡散により表層に移動していることも考えられる。しかし、それだけでは錆中の塩化物イオンを除去することはできないと考えねばならない。

図 15 は、塩化物イオン吸着剤添加の防錆型補修材を施工した供試体の外観を示す。ひび割れ先行型の鉄筋腐食に関連する 0.2mm 程度のひび割れは認められない。

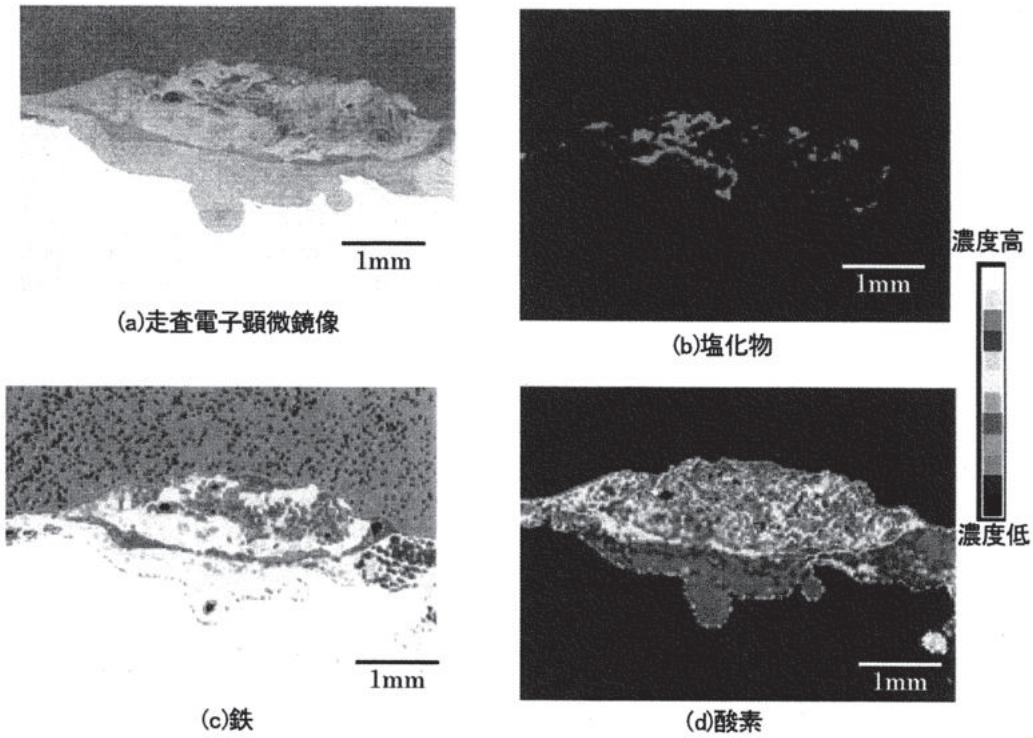


図 14 亜硝酸リチウムを用いる工法で補修した鉄筋断面の走査電子顕微鏡像と各元素の断面方向の 2 次元分布

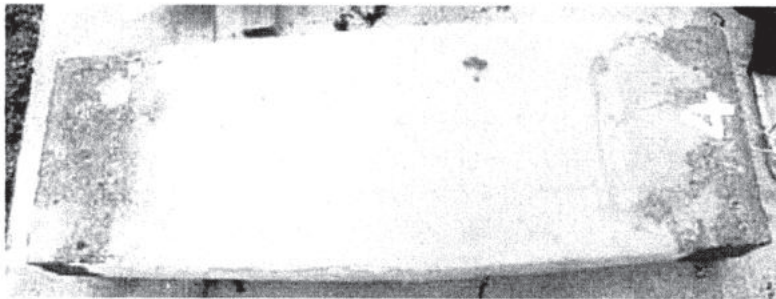


図 15 塩化物イオン吸着剤を用いる工法で補修した供試体の外観

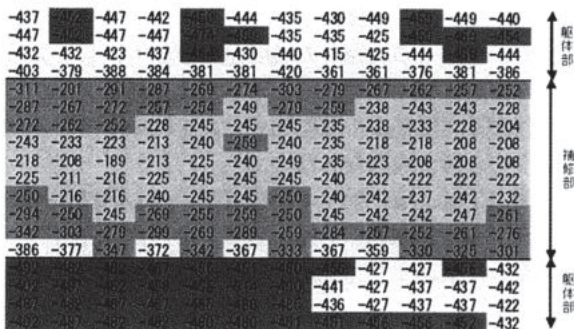


図 16 塩化物イオン吸着剤を用いる工法で補修した供試体の補正自然電位

図 16 には、補正自然電位の二次元分布を示す。この図の縦横それぞれの各数値の測定間隔は、図 10 と同様 10cm である。補正自然電位は表 1 に従って区分し、鉄筋腐食度 I : 青色、鉄筋腐食度 II : 緑、鉄筋腐食度 III : 黄色、鉄筋腐食度 IV : 赤で色分けして表示した。補修部分の鉄筋に腐食はほとんど認められない。因みに交流インピーダンス法により

求めた分極抵抗値は $595\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、実用上腐食反応は確実に抑制されている。このことを確認するためにかぶりの一部をはつり目視によって鉄筋の腐食状況を観察した。この結果は図 17 に示すとおりであり、補修後新たに錆は発生していない。この供試体の塩化物イオンと亜硝酸イオンの深さ方向分布を調べた結果を図 18 に示す。

亜硝酸リチウムを活用した防錆工法に比べれば、亜硝酸イオン量は極端に少ない。しかし、塩化物イオン濃度も発錆限界塩化物イオン量を超えていない。図 19 には、かぶりをはつり取った箇所にあつて腐食して錆が付着していた鉄筋の塩化物イオン、鉄、酸素の二次元元素分布を示す。分析対象は、鉄筋に強固に付着し

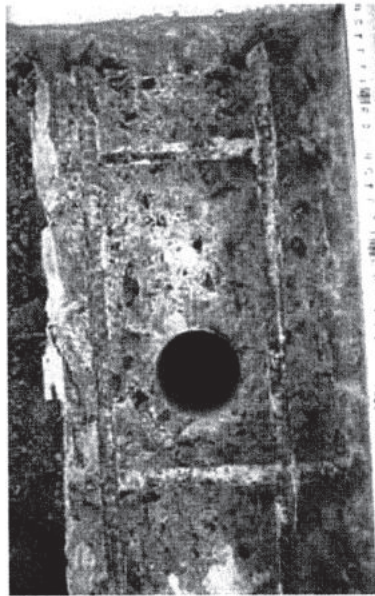


図 17 はつり調査結果

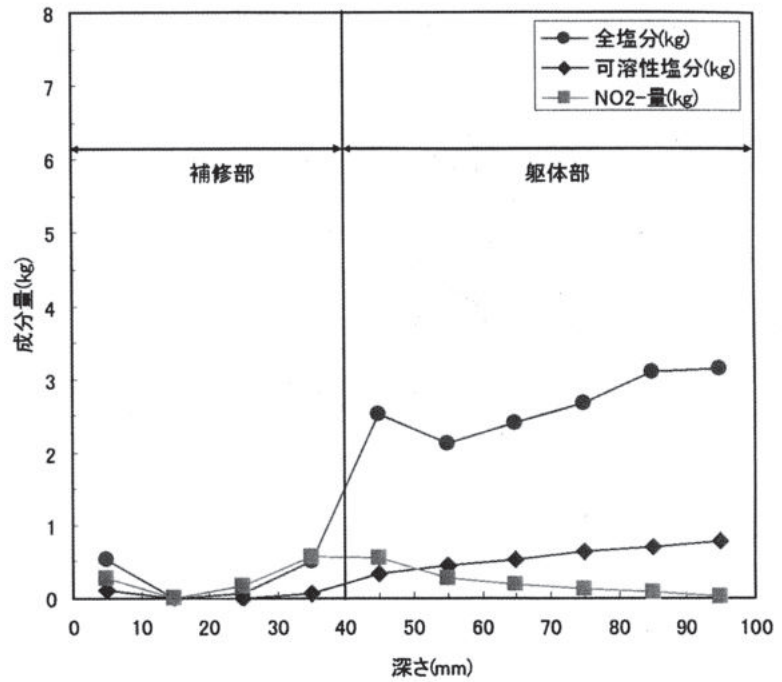
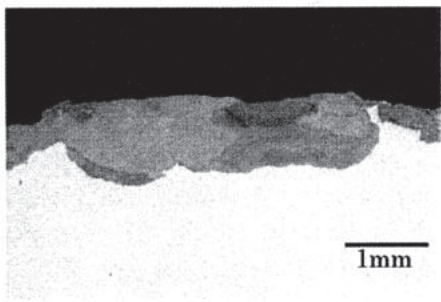
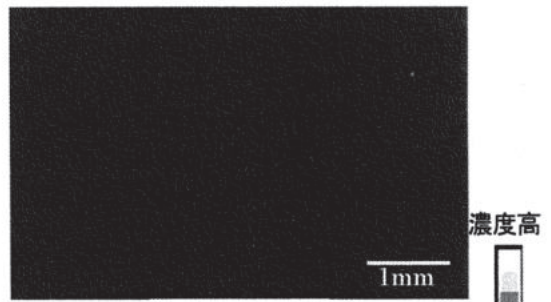


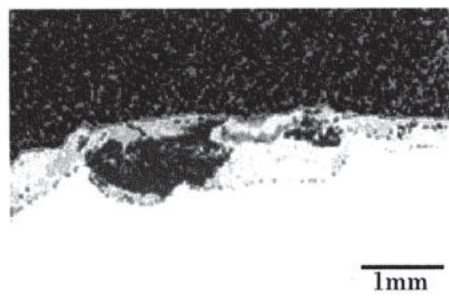
図 18 各成分の深さ方向分布



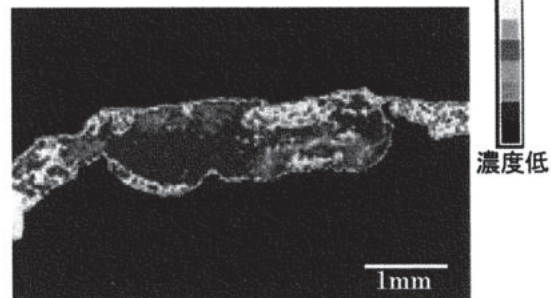
(a)走査電子顕微鏡像



(b)塩化物



(c)鉄



(d)酸素

図 19 塩化物イオン吸着剤を用いる工法で補修した鉄筋断面の走査電子顕微鏡像と各元素の断面方向の2次元分布

ている錆とした。錆中には極めてわずかの塩化物イオンしか検出されない。

図 20 には、躯体の塩化物イオン量が 3kg/m^3 の構造物の補修結果を示す。鉄筋の周囲の一部に塩化物イオ

ン吸着剤を添加した防錆型補修材が施工されている。この部分の塩化物の2次元分布は (b) のようであり防錆型補修材と躯体の間に狭いが塩化物イオンが全く検出されない、すなわち 3kg/m^3 の塩化物イオンが防錆

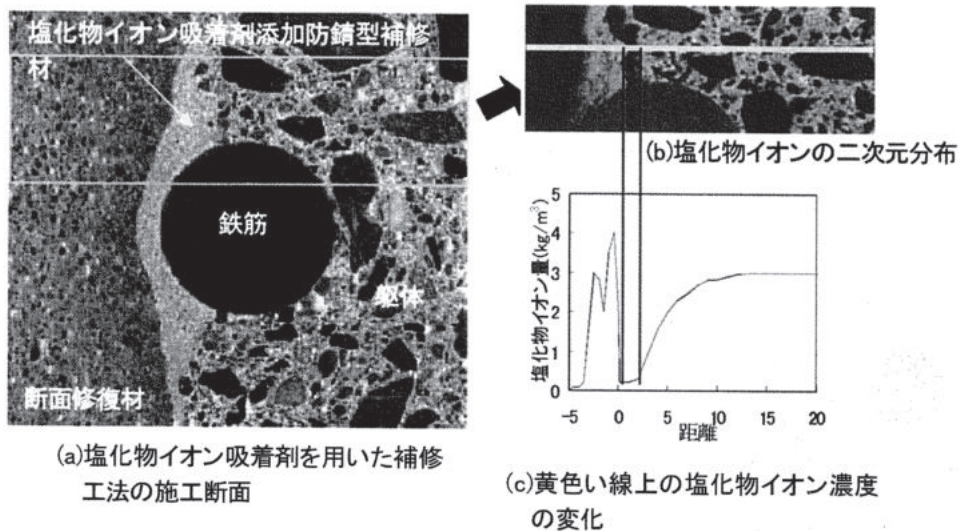


図20 塩化物イオン吸着剤の吸着性状

型補修材にほぼ完全に吸着されたゾーンが存在することがわかる。塩化物イオン吸着剤は塩化物イオンを吸着することで、フリーデル氏塩と極めて類似な構造をとる。フリーデル氏塩はセメント中で安定な化合物であるので、塩化物イオンはセメント硬化体中にフリーな形で存在するよりも化合物として存在する方が化学的に安定であることと濃度差に起因して生ずる駆動力により、強固に付着している錆中の塩化物イオンが移動して、塩化物イオン量が減少したものと推定される。

4. まとめ

塩害により劣化した鉄道コンクリート構造物について、鉄筋の腐食状況調査を実施するとともに、浮き錆を除去した後に残存する錆中の鉄筋地金と錆の界面近傍に高濃度に塩化物イオンが濃集する「塩化物ネスト」が存在するケースに防錆材を併用する断面修復工法を適用して補修し、その防錆効果を検証した。その結果、以下を見出した。

(1) 塩害による劣化が懸念される実構造物の調査から、コンクリート中に埋設された鉄筋についても、塩化物イオンが関与して鉄筋腐食した場合は、塩化物ネストが生じている可能性がある。

(2) 亜硝酸リチウムを活用した補修工法では、亜硝酸イオンの錆中への拡散はコンクリート中に比べれば遅く、防錆効果をモル比以上になるためには少なくとも3年以上の期間を要し、短期あるいは中期的なスパンでの塩化物ネストの腐食性の改善は期待できない。

(3) 塩化物イオン吸着剤を活用した防錆型補修材を施工した場合、鉄筋に強固に付着している錆中の鉄筋地金と錆の界面近傍に高濃度に濃集している塩化物イ

オンは濃度差と化学的により安定な化合物の生成に起因する駆動力を基にする拡散により錆外へ移動する。

参考文献

- 1)立松英信・佐々木孝彦・高田潤：塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究，コンクリート工学論文集，11巻2号，pp. 11～20，2000年5月
- 2)A.M. Rosenberg, et al : The Inhibition of Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete by Calcium Nitrite, American Society for Testing and Materials, 1980
- 3)堀孝廣・山崎聡・榊田佳寛：防錆モルタルに関する研究，コンクリート工学論文集，5巻1号，pp. 89～98，1994年1月
- 4)A.M.Rosenberg et al:A corrosion inhibitor formulated with calcium nitrite for use in reinforced concrete,ASTM,STP629,pp.89-99,1977
- 5)友澤ほか:最新・コンクリート混和剤の技術と応用，シーエムシー，pp.119-134，2001. 化学大辞典編集委員会編：化学大辞典 1，p.76，共立出版，昭和35年7月
- 6)立松英信，高田潤：蛍光X線法によるアルカリ量・塩素量の推定，土木学会代45回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.450-451，1990.

(2005年7月15日受付 2005年8月2日受理)