

[1094] 断面修復を施した塗装 RC 梁の塩水噴霧試験による 防食効果に関する研究

正会員○牛島 栄 (鉄道総合技術研究所)

正会員 鳥取誠一 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

近年、海洋環境に位置するコンクリート構造物において、コンクリート中へ飛来塩分が浸透しコンクリート中の鉄筋腐食が発生する塩害等の早期耐久性の低下が問題となっている。

一般に、これらの構造物の補修方法としてコンクリート表面塗装による補修〔1〕が行われている。これら塗装材料の塗膜自体の遮塩性効果等については把握されており、種々の市販の材料がある。

しかし、実際の構造物の補修においては断面修復を伴って実施される場合が一般に多く、補修後に断面修復部分の鉄筋が腐食するケースがあり、再補修を余儀なくされている場合も見受けられている。

これらの原因の一つとして、断面修復部分において電気的にマクロセル腐食が形成され鉄筋が腐食する〔2〕のではないかと考えられる。

筆者らはそこで、断面修復を施した補修RC梁を大型塩水噴霧試験機を用いて塩水噴霧による促進劣化試験を実施し、断面修復部分の鉄筋腐食に対する防食効果および腐食原因の確認を行った。

また、併せてコンクリート中の鉄筋の腐食状態を把握するため、自然電極電位法により腐食状況のモニタリングを行ったので報告する。

2. 試験概要

2.1 試験条件

(1) コンクリートの配合及び供試体の形状と種類

試験に用いたセメントは比重3.16の普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産川砂比重2.65 F.M 2.86、粗骨材は大井川産川砂利比重2.65 F.M 7.02を使用した。

コンクリートの配合は、W/C58%, s/a 40% スランプ8cmとした。また、一部供試体は煉り混ぜ水にNaCl水溶液を用いて、NaCl換算で3kg/m³混入した(以下、初期塩分混入と記す)。供試体の形状は図-1に示すような形状で、内部にD10の異形鉄筋をかぶり2cmで埋め込んでいる。なお、自然電位を測定するため鉄筋端部にリード線を接続させた。

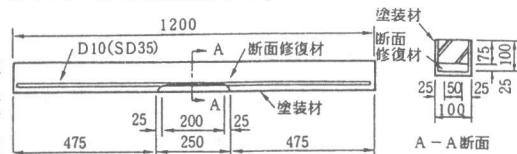


図-1 試験供試体の形状

表-1 ライニング工法による補修仕様

供試体番号	補修材料			
	防食材	下地処理材	断面修復材	塗装材
1	エポキシ樹脂	シリコン樹脂系	シリコン樹脂系モルタル	シリコン樹脂系
2	エポキシジンクリシチプライマー	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系モルタル	ポリエステル樹脂系(ガラスフレック)
3	MMA*樹脂系	MMA樹脂系	MMA	アクリル樹脂系
4	ポリマーセメント(アクリル系)	エポキシ樹脂系プライマー	ポリマーセメント(アクリル系)モルタル	ポリマーセメント(アクリル系)ウレタン
5	ポリマーセメント(SBR系)	ポリマーセメント(SBR系)	ポリマーセメント(SBR系)	ポリマーセメント(SBR系)
6	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系(ガラスクロス)

表-1に示す補修仕様(ライニング工法)により断面修復部分を充填した後、塗装を行った。

塗膜厚は樹脂系で0.5mm、ポリマーセメント系で5mmとし、塗装量等はメーカー仕様によった。

なお、補修方法は現場の補修工事と同様に上向き施工により行った。

(2) 塩水噴霧試験

大型塩水噴霧試験機を用いて、JIS Z 2371（塩水噴霧試験方法）に準拠して促進劣化を行った。噴霧条件は、試験装置内温度40℃、塩水濃度5%とした。平均して噴霧サイクルは3日間連続噴霧、1日自然乾燥を1サイクルとした。試験終了は、基準RC梁（無補修梁）供試体において鉄筋に沿ったひびわれ（以下、縦ひびわれ）が発生した時点を、構造物のひびわれに対する使用限界状態に達したと考えて、その時点での防食効果を評価確認した。なお、ひびわれは12ヶ月、90サイクルにおいて発生した。

2. 2 試験方法

(1) コンクリート中の塩分分析

ブルオフ試験により供試体の塗装塗膜の付着強度を測定した後、その部分をコンクリートドリルで表面より、1、2、3、4、5cmの深さまで順に削孔して、その粉末を分析試料とした。

分析は、JCI「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析方法（案）」に基づいて行った。すなわち、採取した粉末試料40gに50℃の温水を加え保温しながら30分間振とう抽出したる液に対して硝酸銀による電位差滴定をおこないNaClを定量した。

(2) コンクリート中の鉄筋腐食の評価

コンクリート中の鉄筋の腐食評価は、JCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法（案）」に準じて腐食面積率、腐食減量で評価し以下の式より求めた。

*腐食面積率（%）＝評価の対象部分の腐食面積（ cm^2 ）／全面積（ cm^2 ）

*腐食減量（%）＝（試験前の重量－腐食生成物除去後の重量）／試験前の重量（mg）

また、縦ひびわれ発生部分の腐食鉄筋については縦ひびわれの長さに切断し、15%クエン酸アンモニウム20℃水溶液中に2日間浸漬して腐食生成物を除去後、触針試験により鉄筋表面の荒さを測定した。

(3) 補修材料の耐久性

補修材料（断面修復材料、塗装材料）の塩水噴霧による促進試験による劣化度を調べる目安として、建研式付着試験を準用して付着強度を測定し初期の付着強度と比較した。

更に、補修材料の塗膜の外観観察を行い、塗膜のふくれについては日本塗料検査協会の判定方法により、また、はがれについてはASTM D 610の錆判定標準図を適用して評価した。

(4) 腐食生成物の評価

塩分混入および塩分無混入の供試体中の鉄筋を取り出して、それぞれの腐食生成物をワイヤーブラシで除去し、鉄筋に付着している腐食生成物を採取した。

ワイヤーブラシで除錆された腐食生成物を、メノウ乳鉢で粉碎し100メッシュふるいでふるいわけを行い分析試料した。分析試料の重量は共に1g程度であった。

分析試料をX線回折装置（Cu管球、40kV20mA、モノクロメーター使用、検出器シンチレーションカウンター）により繰り返し測定を行い、回折線を用いて腐食生成物の同定を行った。

(5) 自然電極電位による鉄筋腐食の評価

自然電極電位の測定は、ASTM C 876-77に従って実施した。この場合、照合電極として硫酸銅電極を用いた。測定にあたって、大型塩水噴霧試験機より供試体を取り出した後、供試体を水洗いして供試体表面の塩分を取り除き、供試体の含水率（モルタル水分計で8%以下）が一定になるよう一昼夜湿潤状態において測定した。

また、測定方法は、補修RC梁試験供試体では無塗装面側（かぶり厚7cm）より行い、基準梁ではかぶり2、および7cmで鉄筋真上10cm間隔にて測定した。

なお、測定サイクルは、塩水噴霧試験開始前を基準として1月毎に測定した。

3. 試験結果および考察

3. 1 コンクリート中への塩分浸透

図-2は塩分無混入、図-3は初期塩分混入の各試験供試体の塩分含有率を示したものである。図-2より無補修梁の場合、表面近くでかなり高い塩分含有率を示しているのに対して、補修梁はコンクリート表面からの深さに関わらずおおむね一定となっており、塗膜による遮塩性効果が明確に認められる。

また、初期塩分を混入した場合は、既に含まれていた塩分と外部からの浸透した塩分とが加算されコンクリート中の塩分含有率が高くなっていると考えられる。

補修梁の塩分含有率が供試体中心部に近づくに従って増加する傾向を示すのは、相対する打込

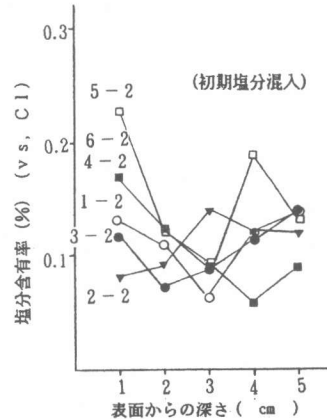
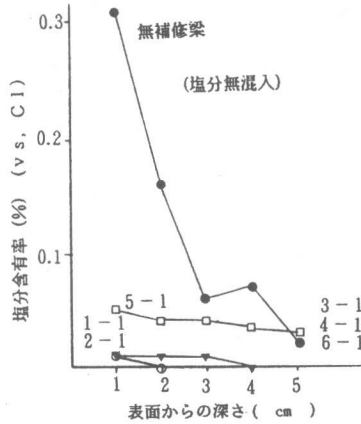


図-2, 3 コンクリート中への塩分の浸透

面（無塗装面）より塩分が浸透したためであると考えられる。

なお、これらの塗装材料の遮塩性に対する品質規格値として、フリーフィルムによる塗膜の塩素イオン透過量は $10\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$ 以下〔3〕であり、遮塩効果が塩分分析結果からも確認できた。

3. 2 コンクリート中の鉄筋腐食の評価

塗装による防食効果の評価を行うため、鉄筋腐食面積率の測定を行い試験供試体中の2本の鉄筋の腐食面積の平均を図-4に示した。

図より初期塩分混入および無混入の供試体の腐食面積率を比較すると、初期塩分混入の方が無混入のものより腐食面積率が大きく、塩分による鉄筋腐食の影響影響が大きいことが明らかである。

断面修復部分の鉄筋腐食面積（以下部分腐食面積と記す）の全体の鉄筋腐食面積（以下全腐食面積と記す）の総量に占める割合を%で図中の斜線部に示した。

図より、断面修復部分の腐食割合が大きく又、断面修復部分の腐食傾向=部分腐食面積/（全腐食面積-部分腐食面積）と仮定すると、断面修復部分の鉄筋腐食面積に占める割合が最も大きいものは96%となり、

それ以外の鉄筋腐食の2.1~3.6倍であること等から、断面修復部分の腐食傾向が顕著であることが示された。図中の、腐食面積率の大きい3-1,-2, 5-1は外観観察の結果断面修復部分にひびわれおよび断面修復材料との付着界面に錆汁が認められたことから、断面修復部とコンクリートの付着界面から塩分が浸透して鉄筋が腐食し、腐食の進行に伴いひびわれが発生し急激に進行し

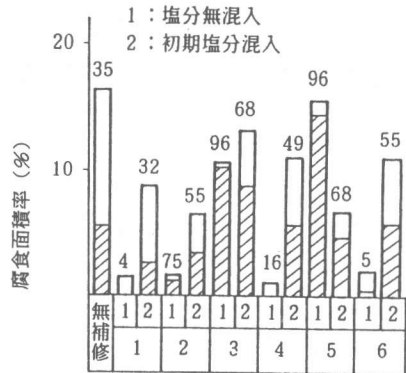


図-4 各種補修梁の腐食面積率

たものであると考えられる。

3. 3 補修材料の耐久性

塗装材料および断面修復材料の、塩水噴霧による促進劣化後の付着強度を初期強度と比較したものを図-5、図-6に示した。

塗装材料の付着強度の低下は認められなかったが、断面修復材料については、4、5において付着強度の低下が認められた。

塗装材料のふくれ、はがれは、1について一部ふくれが発生していたが、その他については問題は認められず十分な耐久性を示していた。

3. 4 腐食生成物の評価

(1) 縦ひびわれの発生と腐食評価

塩水噴霧6500時間で基準RC梁（無補修梁）においてかぶり側側面に、幅0.1 mmの縦ひびわれが発生し、錆汁が認められた。

供試体を割裂して、縦ひびわれ発生部分の鉄筋を取り出し腐食生成物の観察を行った結果、黒色ないし褐色を呈していた。

ひびわれ部分の腐食面積率および単位面積当たりの重量減少量はそれぞれ、86%、21mg/cm²であった。

既往の研究〔4〕と比較して、同様な結果が得られた。

腐食生成物を除去後、鉄筋表面のあらさの状態を触針試験により測定した結果を図-7に示す。

基準の鉄筋表面に対して、腐食鉄筋では表面が非常に荒れており、腐食による重量減少の影響が認められた。また、孔食は、縦ひびわれ発生周辺近傍のリブ周辺で多く認められ、最大孔食は0.3～1 mm程度であった。

(2) 腐食生成物の分析

ひびわれ発生直後の腐食生成物のX線回折の結果を図-8に示す。図より錆の主成分であるFe₂O₃（マグネタイト）の回折線のピークが明確に認められた。また、α-FeOOH（ゲータイト）も同様に認められた。更に、Cl⁻の存在下で生成されるβ-FeOOH（アカガナイト）が捕捉された。

なお、初期塩分混入の供試体中の鉄筋の腐食生成物が塩分無混入に比較してα-FeOOH、β-FeOOHが多く捕捉された。

すなわち、鉄筋腐食に対する塩分含有量の影響が非常に顕著であることが明らかである。

3. 5 自然電極電位による鉄筋腐食の評価

(1) 自然電極電位の経時変化

断面修復を施した補修梁（4）の塩水噴霧による自然電位の経時変化を例として図-9に示す。

図より、塩水噴霧の促進期間が長くなるに従って自然電位（

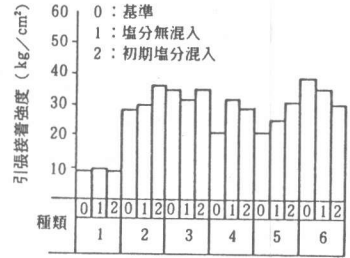


図-5 塗装材料の付着強度

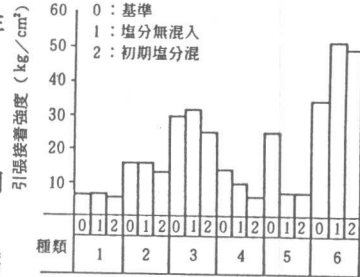


図-6 断面修復材料の付着強度

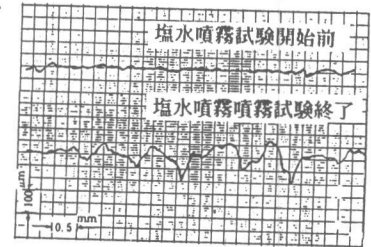


図-7 触針試験による表面の荒さ

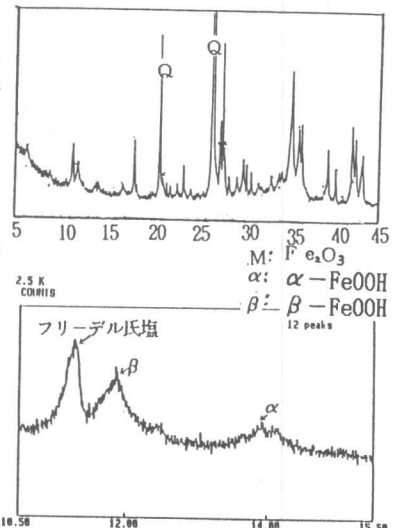


図-8 腐食生成物のX線回折結果

以下電位と記す) は卑の側にシフトして
いくが、特に断面修復部分の電位はこの
傾向が顕著である。

すなわち、外部からの腐食因子であ
る塩分の浸入に対して遮塩効果の不十
分なもの、断面修復部分の付着性状の
良好でないものは、断面修復部分にお
いて、ゆるやかな電位勾配が生じてお
り、マクロセルが形成されたことによ
り腐食が進行しているのではないかと
推測される。

図-10に供試体中の鉄筋の電位につ
いて平均電位、最高電位、最低電位の
関係の例を補修梁(1)および基準梁
について示した。

図より、供試体中の2本の鉄筋の平
均電位、最高電位、最低電位は塩水噴
霧による促進期間が長くなるに従って
卑の側にシフトしている。

すなわち、鉄筋が位置する環境条件
が同一ならば、鉄筋の腐食傾向は同様
であると考えられる。

(2) 測定電位と補修効果の関係

平均電位、最高電位と最低電位の差
の絶対値の関係および電位の経時変化
を矢印で示したものを図-11に示す。

図より無補修梁は、平均電位が-60
0mV、差の絶対値が200mVとなり促進
期間が長くなるに従って大きくなるが、
補修効果の良好な梁においておいては
平均電位は同様な傾向を示すが、差の
絶対値は50mV程度となり、鉄筋中の電
位差は生じにくくなっている。

これらのことから、図-12に示すよ
うな補修効果と電位との関係を概念で
想定することが可能と考えられる。

(3) 自然電極電位と鉄筋腐食状況の対応

電位と鉄筋腐食の状況との対応例を図-
13に示す。

図-より、電位と腐食状況との間は、

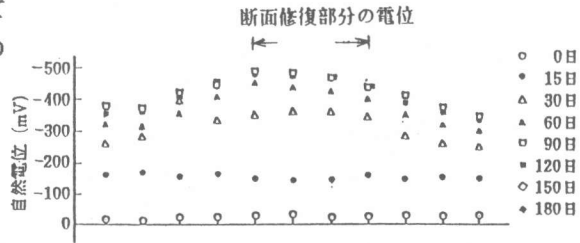


図-9 自然電位の経時変化 (補修仕様4)

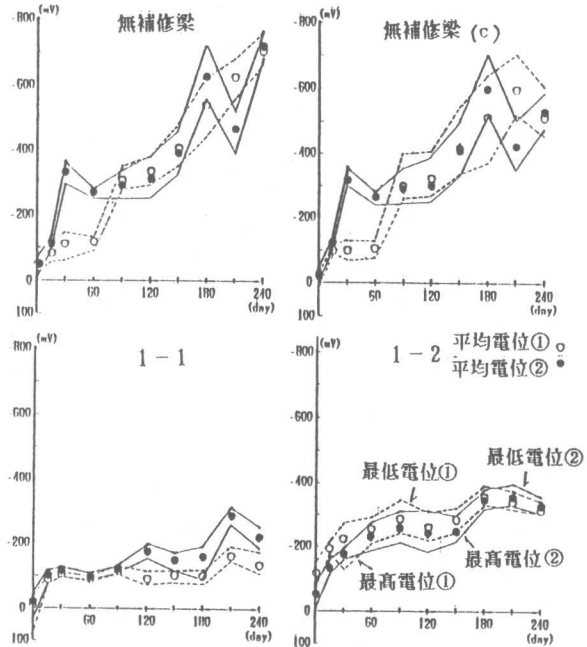


図-10 自然電位の各種経時変化

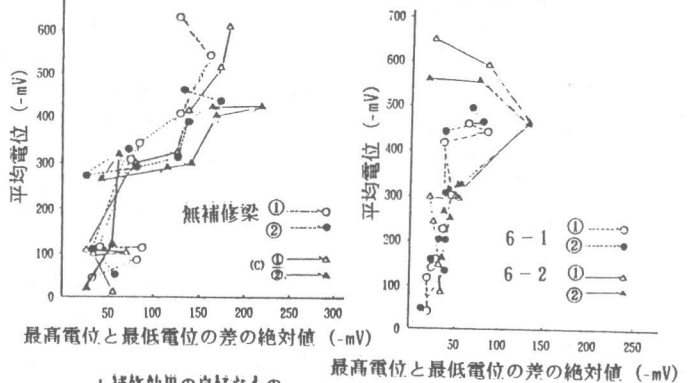


図-11 各種電位の経時変化

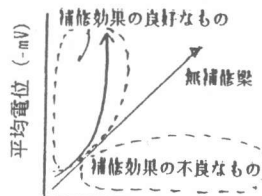


図-12 補修効果と電位の関係

ば対応する関係にあると考えられる。

すなわち、測定電位が平均的に卑の方に高くシフトしており、測定対象の鉄筋中の電位差（最高電位と最低電位の差）が大きなものは、特に、鉄筋腐食と電位が対応している。腐食部分としては、断面修復部分に対応する測定点（5，6，7）において腐食の傾向が顕著に認められる。

なお、初期に塩分を混入していた供試体は、塩分無混入のものに比較して全体的に卑の側にシフトしており、電位の測定結果からも初期塩分混入の影響が大きいことがわかる。

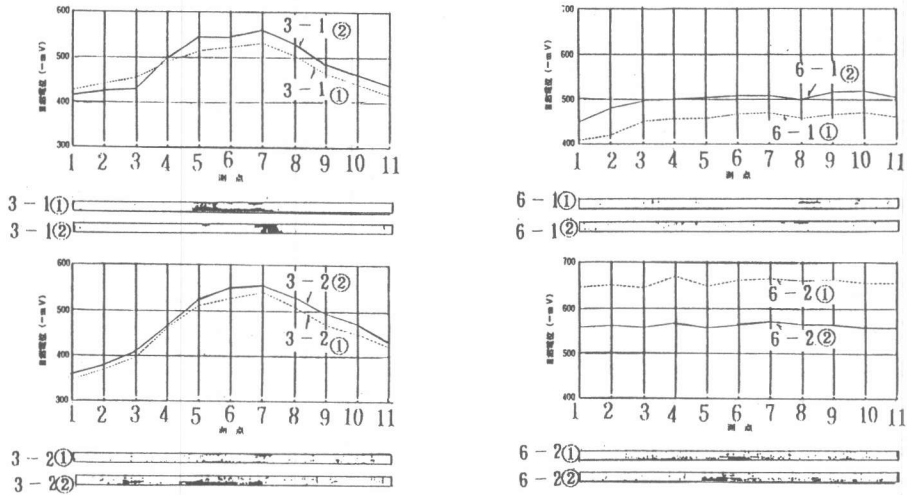


図-13 自然電極電位と鉄筋腐食状況の対応

4. まとめ

断面修復部に着目した塩水噴霧試験と自然電極電位による測定結果から、以下の点が明らかとなった。

(1) コンクリート中の塩分量を測定した結果、塗装することにより遮塩効果があることがわかった。また、同時に鉄筋の腐食状況を調査した結果、補修方法により防食効果に差があることがわかった。

(2) ライニング工法に用いる補修材の性能が十分でない場合、断面修復箇所を中心としてマクロセル腐食によると考えられる孔食を伴った鉄筋腐食が認められた。また、コンクリート中に初期塩分がある場合には、無い場合に比べて腐食の程度が著しかった。

(3) 鉄筋の腐食生成物を分析した結果、大気腐食鉄さびの主成分である Fe_2O_3 （マグネタイト）、 $\alpha-FeOOH$ （ゲータイト）およびClイオンの存在下で生成される $\beta-FeOOH$ （アカガナイト）が捕捉された。

(4) 断面修復材の接着強度が塩水噴霧試験前後で大きく低下するような場合は、鉄筋の腐食も著しくなり長期にわたる接着強度の確保は防食上重要な要件である。

(5) 非破壊試験の一種である自然電極電位法を用いて、電位の経時変化を測定して部材中の鉄筋の最高、最低および平均電位を総合的に評価することにより、補修材の防食効果の定性的な把握が可能であることが明らかとなった。

以上から、海洋環境下に位置するコンクリート構造物の補修の有効性については、単に材料の性能評価だけではなく電気化学的な見地から総合的に検討を加えていく必要があると考えられる。

- 参考文献 (1) 建造物保守管理の標準(案)同解説(コンクリート構造)日本国有鉄道 昭和62年3月
 (2) 小林 一輔 : 鋼材腐食によるコンクリート構造物の劣化とその対策 土木施工 1984
 (3) 牛島, 桐村, 宮田: 劣化・変状コンクリート構造物に用いる補修材料の品質評価 鉄道技術研究所連報 1986.11
 (4) 関 他: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれ発生機構に関する研究 土木学会論文集 1987. 12