電気化学的防食工法適用後の表面保護の 併用を考慮した鉄筋コンクリートの 補修効果持続性評価に関する研究

2019年3月

中山 一秀

目次	
ロワい	

第1章 緒論	3
1.1 本研究の背景	3
1.2 鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化	4
1.2.1 中性化または塩害による鉄筋腐食	4
1.2.2 コンクリート中の塩分量および pH と鉄筋腐食の関係	5
1.3 電気化学的補修	5
1.3.1 再アルカリ化工法の原理と期待される効果	5
1.3.2 脱塩工法の原理と期待される効果	6
1.3.3 通電後コンクリートへの劣化因子の再侵入	7
1.4 本研究の目的	9
1.5 本論文の構成	9
参考文献	10
2章 既往の研究	12
2.1 再アルカリ化工法の補修効果に関する研究及び調査報告	12
2.2 脱塩工法の補修効果に関する研究及び調査報告	12
2.3 電解化学的補修適用後に施工した表面保護工法の耐久性	13
参考文献	15
第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16
第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16
第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに 3.2 実験概要	16 16 17
第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに 3.2 実験概要 3.2.1 コンクリート配合および使用材料	16 16 17 17
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに	16 16 17 17 18
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに 3.2 実験概要 3.2.1 コンクリート配合および使用材料 3.2.2 供試体の作製 3.2.3 供試体へのアルカリ供給 	16 16 17 17 18 18
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに 3.2 実験概要 3.2.1 コンクリート配合および使用材料 3.2.2 供試体の作製 3.2.3 供試体へのアルカリ供給 3.2.4 通電終了後コンクリートの化学分析 	16 16 17 17 18 18 19
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに 3.2 実験概要 3.2.1 コンクリート配合および使用材料 3.2.2 供試体の作製 3.2.3 供試体へのアルカリ供給 3.2.4 通電終了後コンクリートの化学分析 3.2.5 表面保護材の施工 	16 16 17 17 18 18 19 20
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21 24
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 20 21 21 24 25
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性 3.1 はじめに	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21 21 24 25 28
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21 21 24 25 28 32
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21 21 24 25 28 32 33
 第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性	16 16 17 17 18 18 19 20 21 21 21 24 25 28 32 33 34

4.2 実験概要	35
4.2.1 コンクリートの配合と供試体概要	35
4.2.2 通電処理と表面保護材の施工	35
4.2.3 表面保護施工後の促進劣化試験および試験期間中の電気化学的モニタリン	グ.36
4.2.4 促進劣化試験後の表面保護材の耐久性評価	36
4.2.5 コンクリート中の各種イオン分析	37
4.2.6 中性化深さの測定	37
4.2.7 鉄筋腐食面積率および腐食減量の測定	37
4.3 通電直後のコンクリート中の各種イオン濃度分布	38
4.4 促進劣化試験後におけるコンクリート中のアルカリ金属イオン分布と保護材の	耐久
性	40
4.5 通電直後のコンクリート中の鉄筋防食効果	46
4.6 促進劣化環境下における表面保護供試体中の鉄筋防食効果	47
4.6.1 24 ヶ月間の促進中性化を受けた再アルカリ化供試体の鉄筋防食効果	47
4.6.2 48 ヶ月間の塩水噴霧を受けた脱塩供試体の鉄筋防食効果	53
4.7 本章のまとめ	63
参考文献	64
第5章 通電後の表面保護の併用を考慮した補修効果持続期間の推定方法の提案	65
5.1 はじめに	65
5.2 通電後の限界状態の定義	65
5.3 通電後の補修効果持続期間の推定	66
5.3.1 再アルカリ化後の補修効果持続期間の推定	66
5.3.2 脱塩後の補修効果持続期間	68
5.4 まとめ	70
参考文献	71
第6章 結論	72
6.1 結論	72
6.2 電気化学的補修工法適用後の表面保護工法の考え方と今後の課題	75
謝辞	76

第1章 緒論

1.1 本研究の背景

1955年から1973年の約20年に渡る高度経済成長期を経て、現在まで我が国に整備されて きたコンクリート構造物をはじめとするインフラストラクチャー(以下、インフラ)により 我々は安全かつ快適な社会基盤を築いてきた。しかし、経済・社会の成熟を迎えつつある昨 今、インフラ整備に対する社会の目は厳しく、経済性や環境との共生などを考慮したインフ ラ整備が必要とされている。また一方で、高度経済成長期に集中して整備されたインフラの 劣化が問題となっている。特に、2012年12月に山梨県で発生した笹子トンネル天板落下事 件が様々なメディアで取り上げられたことにより、我が国におけるインフラに対する維持管 理の重要性が再認識され始め、構造物を適切に診断・評価・判定し要求性能を満足するよう に補修・補強対策を実施することが求められている。

インフラを構成する主たる構造物としてコンクリート構造物が挙げられるが、これらコン クリート構造物の早期劣化として、特にコンクリート中の鉄筋腐食が問題となっている。コ ンクリート中の鉄筋腐食はコンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる劣化現象であり、 鉄筋腐食の主たる原因としては、コンクリートの中性化と塩害が挙げられる。我が国におい ては、1999 年頃山陽新幹線の高架橋からのコンクリート片の剥落が問題となり、社会的な注 目を集めた。コンクリート片剥落の主たる要因は中性化による鉄筋腐食であり、特にかぶり が不足していた場合や除塩不足の海砂を使用していた場合に劣化が加速的に進行したことが 報告されている¹⁾。これを契機に補修設計の考え方が提案され、赤外線カメラ等の非破壊検査 手法の利用・開発や再アルカリ化工法や脱塩工法といった電気化学的補修工法などの補修工 法改良の必要性が高まった。また、1970 年代後半、北陸から東北にかけての日本海沿いの道 路橋において塩害が問題視され始めた³⁾。コンクリートの鉄筋腐食問題が顕在化し約 40 年が 経過したが、補修や補強方法についてコストや環境調和、長期的な補修効果といった面から もさらなる発展が望まれている³⁾。

中性化や塩害に対する補修工法や予防保全対策は様々な種類があるが、一般的に、イニシャルコストや工法の簡便性、適用実績から断面修復工法や表面処理工法が用いられることが多い。しかし、断面修復工法では、はつりとっていない部分のコンクリートに多量の劣化因子が残存しており、補修部分をカソード、補修周辺部をアノードとしてマクロセル腐食が生じ、補修したにも関わらず劣化が進行してしまう可能性が指摘されている⁴⁾。また、表面処理工法は、外部からの劣化因子の侵入を抑制し劣化速度を低減することは可能であるが、劣化因子がある程度侵入している場合、コンクリート中の鉄筋腐食を完全に防止することは困難⁵⁾である。

これに対して、中性化や塩害によってある程度劣化因子が侵入したコンクリート構造物に 対する補修工法として、電気化学的防食工法である再アルカリ化工法および脱塩工法が注目 され、徐々に施工実績も増加している[®]。再アルカリ化工法および脱塩工法は、コンクリート 表面に設置した陽極システムとコンクリート中の鉄筋との間に一定期間、直流電流を流すこ とで補修効果を得る方法であり,適切に通電がなされていれば劣化部を特定することなく, 劣化部の改善または劣化因子の除去が可能である。しかし,これらの電気化学的防食工法は 新しい手法であるために,長期的な補修・防食効果の持続性に関するデータの蓄積が必要と されているのが現状である。

1.2 鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化

1.2.1 中性化または塩害による鉄筋腐食

一般に、健全なコンクリートの細孔溶液は水酸化カルシウムで飽和しており、pH=13 程度 の高いアルカリ環境にある。このような環境のもとでは、鉄筋表面に不働態皮膜と呼ばれる 厚さ 30 Å程度の非常に薄い酸化被膜が形成されており、鉄筋は腐食から保護されていると言 われている。

しかし、大気中の炭酸ガスがコンクリート中に浸透することで、式1.1、式1.2に示すよう な炭酸化反応がコンクリートの液相と固相で進行する⁷⁸。

これにより, コンクリート内部が炭酸化し pH が低下することで, 鉄筋の不働態皮膜が失われ, 鉄筋腐食が発生する。このような劣化を中性化という。

また,海水等に含まれる塩化物イオン(以下,CI-とする)がコンクリート中に浸入し,鉄 筋周辺に存在すると,CI-の作用により不働態皮膜が容易に破壊され腐食反応が生じることが 知られている。このような劣化を塩害といい,CI-による不働態皮膜の破壊機構については不 明な点が多いが,ごく少量のCI-であっても不働態皮膜を容易に破壊する作用があることが 知られている。鉄筋腐食は,鉄筋が鉄イオンとなり,最終的にFe(OH)2やFe2O3,Fe3O4など の錆を形成する反応である。腐食反応は,鉄筋がイオン化されるアノード反応(酸化反応)と酸 素が還元されるカソード反応(還元反応)の両式で成り立つ。式1.3 および式1.4 にアノード 反応およびカソード反応を示す。

このアノード反応とカソード反応は同時に進行し、腐食電池を形成し腐食反応が活性化される。その結果、溶出した鉄イオンは複雑な反応を経て水和イオンや錆になる。鉄の錆層(水酸化第二鉄)は多孔質であるため、発錆後も腐食を抑制する効果が小さく腐食は進行する。また、一般的に腐食生成物は鉄より約2.5倍の体積を有するため、その膨張圧がコンクリートのひび割れおよび剥離を引き起こし、ひび割れがさらなる腐食の進行を促す結果となる。

1.2.2 コンクリート中の塩分量および pH と鉄筋腐食の関係

コンクリート中に浸透した塩分の一部はセメント中の成分と化学的に結合し、腐食に影響を 与えないフリーデル氏塩を形成しており、コンクリート中の鉄筋の腐食発生に関しては限界 値があるとされている。また、普通ポルトランドセメントにおいては 0.4%までの Cl⁻が固定 化されると報告されている⁹。コンクリート標準示方書[設計編]¹⁰では、腐食発生限界塩化 物イオン濃度(以下、Clim とする)の限界値を、類似の構造物の実験結果や試験結果に基づ いて定めるか、セメント種類および水セメント比から成る式より算出するものとしている。 例として、普通ポルトランドセメントを用いた場合の算定式を**式 1.5** に示す。

Clim=
$$-3.0(W/C)$$
+3.4 (0.30≦W/C≦0.55) 式 1.5

また、CI-に起因する鉄筋腐食において、不働態皮膜の破壊に付与する CI-濃度と不働態膜の形成に付与する OH-濃度のバランスによって腐食発生条件が決定されると考えられる。そのため、そのバランスの指標として CI-と OH-のモル比である[CI-]/[OH-]が広く用いられている。腐食発生の閾値となる[CI-]/[OH-]の値は、既往の検討¹¹⁾¹¹⁾¹³⁾¹⁴⁾により様々な値が提示されているが、実験条件によって 0.3~5の範囲と大きな違いがある。鉄筋腐食発生メカニズムからすれば、[CI-]/[OH-]を用いて腐食発生限界値を議論すべきだが、示方書ではその簡便性の観点から CI-濃度で閾値を決定している⁹。Alonso et al.による[CI-]/[OH-]の比較¹⁴⁾を図 1.1 に示す。



図 1.1 各種条件における[Cl⁻]/[OH⁻]の比較¹⁴⁾

1.3 電気化学的補修

1.3.1 再アルカリ化工法の原理と期待される効果

(1) 再アルカリ化工法の概要と求められる性能

再アルカリ化工法の概念図1.2に示す。コンクリート構造物の表面に陽極材,高アルカリ



図1.2 再アルカリ化工法の概要

性電解質溶液および保持材で構成される陽極システムを仮設し、電源装置を用いて陽極材か らコンクリート中の鋼材へ一定期間直流電流を流す。これにより、コンクリートの液相にア ルカリ性溶液を電気浸透させ、中性化したコンクリートのpHの回復を図る工法である⁷⁰。一 般に、塩化物イオン等の劣化因子が鋼材周辺に存在しなければ、鋼材の腐食はpH10以上の水 溶液中ではほとんど進行しないと言われている。したがって、再アルカリ化工法の要求性能 は、pHの計測方法や安全率を考慮して、中性化したコンクリート中の鋼材周辺のpHを10.5 以上に回復させることである。

再アルカリ化工法に用いられるアルカリ性電解質溶液には、Na₂CO₃ や K₂CO₃,Li₂CO₃ といったアルカリ金属の炭酸水溶液が用いられる。これは、アルカリ性水溶液と炭酸ガスの平衡 作用によりもたらされる長期のアルカリ保持性能を期待してのことである⁷⁾。すなわち、再 アルカリ化後のコンクリート中に生成された NaOH や KOH が浸入してきた炭酸ガスと反応 し Na₂CO₃ や K₂CO₃ に変化する。このようなコンクリート中の細孔中に存在するアルカリ金 属の炭酸水溶液と大気中の炭酸ガスは**式 1.7** に示される可逆反応平衡となる^{7) 15) 16)。}

$R_2CO_3+CO_2+H_2O$ ⇔2RHCO₃ (R=Na, Li, K) $\ddagger 1.7$

そのため、細孔中にアルカリ金属の炭酸水溶液が 1moL/L 以上の濃度で存在すれば、通電 後に炭酸ガスが侵入した場合でも細孔溶液は pH10.7~10.8 となり、0.4~0.5mol/L 以上の濃度 であれば pH10.4~10.5 以上で安定化する¹⁵⁾¹⁶⁾とされている。したがって、塩化物イオンなど の腐食因子が存在しない環境下であれば、鋼材腐食が発生しない pH10.0 以上を満足し、長期 間にわたって鋼材の腐食が抑制されると考えられる。また、電流密度はコンクリート面積当 たり 1A/m²、通電期間は 1~2 週間程度が標準とされている⁷⁾。

1.3.2 脱塩工法の原理と期待される効果

脱塩工法の概要を図1.3 に示す。脱塩工法は、再アルカリ化工法と同様に直流電流を流す ことで、コンクリート中に含まれる塩化物イオンを電気泳動により除去、あるいは、低減す る工法である。また,鉄筋近傍ではカソード反応により OH⁻が生成されるとともに,コンク リート中のアルカリ金属イオンの集積によって,鋼材周辺の pH が上昇することで[Cl⁻]/[OH ⁻]が増加し,腐食発生限界塩化物イオン濃度の増加や腐食速度の低減効果が期待される⁷⁾¹⁵⁾。 脱塩工法の目的は,鉄筋近傍の塩化物イオン濃度を腐食発生限界塩化物イオン濃度以下にす ることであり,標準的な脱塩工法はアルカリ性の電解液を用い,コンクリート表面当たり 1A/m²の電流密度で8週間,直流電流を流すのが一般的である⁷⁾。

1.3.3 通電後コンクリートへの劣化因子の再侵入

内在塩による塩害と中性化の作用を受けた高架橋に脱塩・再アルカリ化処理を適用した事 例¹⁷⁾では、処理前から処理後17年間のpH分布の経時変化を追っている。(図1.4参照)こ れより、経年によってpHの低下が確認されたものの、処理後17年経過後もpH11以上で安 定した値を示している。しかし、炭酸ガスや降雨等の影響を受ける構造物においてはアルカ リ溶液が溶出し、pHが低下することによる中性化の再発が起こりうることが指摘されている。



図1.3 脱塩工法の概要



図 1.4 再アルカリ化後 17 年間のコンクリート pH の推移¹⁷⁾

また,図1.5 に示すように、日本海沿岸に架設された RC 橋梁に脱塩工法を適用した事例 ¹⁸ では、脱塩後10年経過した時点において、外部からの飛来 Cl⁻の再浸透によって鉄筋近傍 の Cl⁻濃度が西面で0.7kg/m³、南面で1.9kg/m³程度まで増加しており、将来的に再劣化が生じ る危険性があることが分かる。ただし、写真1.1 に示す外観や自然電位の結果から鉄筋防食 効果は持続していることが分かる。



図 1.5 脱塩後 10 年間におけるコンクリート中の Cl⁻量の経時変化¹⁸⁾



脱塩橋脚 写真 1.1 脱塩後 10 年経過した時点の橋脚外観¹⁸⁾

1.4 本研究の目的

1.3 節までで述べたように,再アルカリ化工法または脱塩工法適用後に外部から劣化因子が 侵入することで再劣化する危険性があり,補修効果の持続期間が短くなる可能性が考えられ る。そこで,外部からの劣化因子の侵入を抑制する表面保護工法との併用が可能になれば, より長期的な補修効果持続期間が得られ,様々なシチュエーションに対応可能な補修工法と して認識されるものと考えられる。しかし,通電後のコンクリート内部は,高アルカリ性電 解液の電気化学的浸透や鉄筋近傍のカソード反応による OH⁻の生成などの影響で通常のコン クリートと比較して高アルカリ性,高含水状態となっていることから,通電後に一般的な表 面保護工法を適用しても比較的早期に劣化してしまう場合があることが指摘されている¹⁹²⁰。

そこで本論文は、再アルカリ化工法または脱塩工法適用後のコンクリートに施工された表 面保護材の耐久性評価、および通電後に表面保護材を併用した場合のコンクリート中の鉄筋 防食効果を評価することを主目的とした。通電後に施工した表面保護材の耐久性に関しては、 アルカリ供給方法や水分量が異なるコンクリートに対して表面保護材を施工し、保護材の膨 れを促進させるような環境で保管することで、保護材施工時のコンクリート含水率、アルカ リ環境が保護材の耐久性に与える影響について検討する。また、通電後コンクリート中の各 種イオン濃度分布と鉄筋防食効果の関係性を明らかにするととも、電気化学的補修と表面保 護工法を併用した場合の補修効果持続性を電気化学的モニタリング結果またはイオン分布予 測によって定量的に評価が可能か検討することとした。

1.5 本論文の構成

本論文は、以下のように全6章で構成される。本研究の構成を図1.6に示す。

第1章では、本研究の背景として、鉄筋コンクリートの早期劣化原因である中性化および 塩害による鉄筋腐食メカニズムを述べ、その補修工法である電気化学的防食工法のメカニズ ムを概説した。さらに、本研究の目的と論文構成を示す。

第2章においては、電気化学的防食工法適用後のコンクリート中の鉄筋防食効果持続性に 関する既往の知見を整理する。また、通電後に塗布した表面保護材の耐久性に関する既往の 知見についても取りまとめる。

第3章では、通電後に施工した表面保護材の耐久性について、表面保護材施工時のコンク リート表面含水率および pH,総アルカリ量をパラメータとし検討する。

第4章では、通電処理を行った鉄筋コンクリート供試体を長期間促進劣化させることで、 表面保護を併用した場合のコンクリート中の鉄筋防食効果を評価することを目的とする。

第5章では、数値解析によって求めた各種イオン分布の再分布状況から、通電後の表面保 護を考慮しコンクリート中の鉄筋防食効果持続性について検討する。

第6章においては、通電後に適用する表面保護工法の考え方と今後の課題を述べる。



図 1.7 本論文の構成

参考文献

- 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会:山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書,2000.7
- 2) コンクリート中の鋼材の腐食性能評価と防食技術研究委員会(338 委員会)委員会報告書, pp1~3
- 3) 片脇清士:コンクリート橋の塩害対策 我が国における 30 年の歴史と検証,材料と環境, 59, 195-204, 2010.
- 長滝重義,大即信明,守分敦郎,官里心一:鉄筋コンクリート部材の断面修復部における 腐食形成に関する実験的研究,土木学会論文集,No.54,V-32,109-119,1996.8
- 5) 加藤絵万,岩波光保,横田弘,堤知明:表面被覆を施した RC 部材の長期耐久性に関する 検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 1759-1764, 2004.6
- 6) 宮川豊章,上田隆雄:コンクリート構造物へのデサリネーションおよび再アルカリ化工
 法の適用,コンクリート工学, Vol. 38, No. 3, pp. 9-16, 2000.3
- 7) 土木学会:電気化学的防食工法設計施工指針(案),コンクリートライブラリー107,2001.11
- 8) 佐伯竜彦,大賀宏行,長瀧重義:コンクリートの中性化の機構解明と進行予測,土木学会 論文集 第414 号, V-12, 1992.2
- 9) コンクリート中の鋼材の腐食性能評価と防食技術研究委員会(338 委員会)委員会報告書
- 10) 土木学会【2007 年制定】コンクリート標準示方書[設計編], 2007.
- 11) Diamond, S: Chloride Concentration in Concrete Pore Solution Resulting from Calcium and Sodium Chloride Admixtures, Cement Concrete and Aggregate, Vol.8, No.2, pp.97-102, 1986
- 12) 石田健太,武若耕司,山口明伸,前田聡:鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に 関する実験検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.8, No.1, pp.1065-1070, 2007.

- 13) 米澤敏男, Ashworth, V., Poroceter, R., P., M.: コンクリート中の鋼材腐食における塩素イオンの限界量について、コンクリート工学年次論文集, Vol.8, No.1, pp.141-144, 1986
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P.: Chloride Threshold Values to Deppasivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1047-1055, 2000.
- 15) コンクリート中の鋼材の腐食性能評価と防食技術研究委員会(338 委員会)成果報告書
 (その2)およびシンポジウム論文集, pp281~290
- 16) 芦田公伸:電気化学的防食工法の現状と施工実績-脱塩,再アルカリ化工法-,コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp15-21, 2006.11
- 17) 野村倫一,石橋昌史,七澤 章:17 年経過した脱塩・再アルカリ化工法の効果,コンク リート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1672-1677, 2012.7
- 18) 芦田公伸,石橋孝一,七澤 章,松久保博敬:電気化学的脱塩工法を適用した橋脚の10
 年間の追跡調査,コンクリート工学年次論文集,Vol. 26, No. 1, pp. 831-836, 2004.7
- 19) 野村倫一,山田卓司,石橋孝一:再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の 適応性に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1553-1558, 2004.7
- 20) 野村倫一: 再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果, 土木学会第66回年 次学術講演会(平成23年度), V-267

2章 既往の研究

2.1 再アルカリ化工法の補修効果に関する研究及び調査報告

実構造物に炭酸カリウムを電解液として再アルカリ化処理を行った例¹⁾²では,再アルカ リ化処理1年後及び11年後のpH分布と処理11年後のアルカリ濃度分布を測定している。 この結果,処理11年後においてコンクリート表面付近のカリウム濃度が高く,鉄筋近傍にお いても8kg/m³以上を示しており,二酸化炭素の再浸透が生じてもpH10程度以上で安定する 0.5mol/L以上のカリウムを含んでいると考えられる。また,処理11年後におけるコンクリー ト表面付近のカリウム濃度が高い値を示しているにも関わらずpH値が処理1年後に比べて やや小さくなっているおり,浸入してきた炭酸ガスと炭酸カリウムが可逆反応による平衡状 態となったためだと考えられる。このことから,処理11年後においても再アルカリ化の効果 が持続しており,長期的にも高いpHが保持されるとしている。

建築構造物に再アルカリ化工法を適用した事例³⁾では,処理後7ヶ月まで,自然電位およ び分極抵抗の経時変化を計測している。(図2.1参照)その結果,処理直後通電に伴うカソー ド分極の影響で自然電位は卑側へシフトし,分極抵抗は非常に小さな値を示していたが,処 理7か月後には,自然電位,分極抵抗共に処理前まで回復しており,鉄筋の再不働態化が進 んでおり鉄筋防食効果が得られているものと考えられる。しかし,再アルカリ化後の長期的 な鉄筋防食効果についてはデータが少なく,データの集積が望まれる。

2.2 脱塩工法の補修効果に関する研究及び調査報告

脱塩工法適用後には、鋼材近傍の CI⁻濃度は原則として発錆限界塩化物イオン濃度以下に なっているものの、完全に塩分を除去することはできない⁴⁾⁵⁾。特に内在塩分の場合、電気泳 動により CI⁻を移動させた際、コンクリート中のフリーデル氏塩のような固定塩分は荷電粒 子でないため直接的には移動せず、先に自由塩分が電気泳動により移動した後に、固定塩分 が溶解し自由塩分となって脱塩されることから、残留塩分が生じやすいことが推測される⁶⁾。 さらに、適用構造物の周辺環境等によっては、脱塩処理後においても外部から CI⁻がコンクリ ート中に供給され続け、鋼材近傍の CI⁻濃度が増加することが懸念される。また、鋼材表面で 生成された OH⁻や集積したアルカリ金属イオンが、経年と共に拡散することが考えられ、鋼



図 2.1 再アルカリ化後7ヶ月までの自然電位(左図)および分極抵抗(右図)の推移³⁾

材周辺のアルカリ性がどの程度長期的に保持されるか、現状では明らかにされていない。

海岸に近い実構造物に脱塩工法を適用した例⁷⁾では,脱塩処理により,コンクリート表面 部で 1kg/m³~3kg/m³,鉄筋近傍で 0.8kg/m³~1kg/m³まで塩化物イオンを低減した。ただし, 飛来塩分の影響により,脱塩後約 10 年経過した時点の鉄筋近傍で Cl⁻量は 0.7kg/m³~1.9kg/m³ であった。

2.3 電解化学的補修適用後に施工した表面保護工法の耐久性

再アルカリ化工法または脱塩工法は、適切な通電処理が行われた場合、少なくとも 20 年程 度は補修効果が期待できるものと思われる。しかし、前述したように通電後に炭酸ガスや塩 化物イオンが侵入する場合もあることから、補修効果を長期間保持するためにも、表面保護 工法を併用することでコンクリート表面を被覆し、劣化因子の浸入やアルカリ溶液の溶出を 積極的に防ぐ必要がある。

一方,通電後のコンクリート表面は通常とは異なり,高い含水率やアルカリ性を示しており,一般的な表面保護工法を適用しても、十分な性能が得られない場合があることが指摘されている⁸。特に,再アルカリ化工法に使用する電解液である炭酸カリウムは潮解性が大きく,空気中の水分を取り込むことで,常に含水率が高い状態にあることが想定される。

これに対し,野村らは再アルカリ化工法を想定したアルカリを供給したコンクリートに対して種々の表面保護工法を適用し,保護材の適応性について検討している。⁸⁾ 表 2.1 に検討した表面保護工法の仕様を示す。また,図2.2 に付着試験の測定結果を,表2.2 に保護材の外観状況を示す。これより,高含水・高アルカリ環境に強いと考えられたポリマーセメントモルタルのような無機系材料で耐水試験後の膨れや付着強度の低下が見られ,エポキシ樹脂やウレタン樹脂を主材とする有機系材料のいくつかで良好な性能を発揮したことを報告している。

また,実構造物に再アルカリ化後,各種表面保護材を施工し6年間の経年調査を行った事 例⁹⁾では,下地に水中塗布系エポキシ樹脂を用いたものや下地のエポキシ樹脂にセメントを 混合したもので,付着強度が2.0N/mm²以上を示したとされている。また,主材にウレタン樹 脂を用いた場合,**写真2.1**のように鉄筋位置に沿って黒く変色しており,変色部は塗膜が付 着していないことが確認された。しかし,変色部をEPMA分析した結果,カリウムイオンの 塗膜への拡散は確認されず,変色原因の特定には至らなかったことが報告されている。また, 付着試験後の試験片にフェノールフタレイン溶液を噴霧したところ,どの保護材においても 赤色を呈しており,保護材下のコンクリートは高いアルカリ性が保持されていることが分か った。

このように実際に脱塩,再アルカリ化工法を適用した鉄筋コンクリートに対して施工した 表面保護の早期劣化原因の解明および保護材の耐久性に関しては不明な点が多く,通電後に 適用可能な表面保護材の耐久性,劣化原因を明らかにするとともに,通電後に適用可能な表 面保護材を選定することが望まれている。

			1	
材料名	プライマー	不陸調整材	主材(中塗)	仕上げ材(上塗)
A 工法	水中塗布形	水中塗布形	厚膜形	柔軟形フッ素樹脂系
	エポキシ系	エポキシ系	エポキシ <mark>樹</mark> 脂系	
B 工法	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	フッ素樹脂系
	(普通セメント混合)			
C 工法	エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	柔軟形エポキシ樹脂	柔軟形
				ポリウレタン系
D 工法	常温硬化型	ポリマーセメント系	ポリマーセメント系	アクリル
	変性アクリル樹脂系			エマルション系
E 工法	水性エポキシ樹脂系	エポキシ樹脂系	柔軟型エポキシ樹脂系	柔軟型
	ポリマーセメント			ポリウレタン樹脂系
F 工法	水性エポキシ樹脂	クロロプレン系	クロロプレン系	クロルスルフォン化
	混和型セメント系	合成ゴム	合成ゴム	ポリエチレン
G 工法	エポキシ樹脂系	ウレタン樹脂系	ウレタン樹脂系	HALS 系
				アクリルウレタン樹脂
H 工法	水性エポキシ系	水性エポキシ系	アクリル	水性アクリル系
			ポリマーセメント系	

表 2.1 検討した表面保護材の仕様⁸⁾

表 2.2 保護材の外観調査結果 8)

材料名	塗膜の外観調査の主な結果	判定
A 工法	施工直後の気砲は少なく,耐水試験後の膨れも少なく概ね良好である。	\bigcirc
B 工法	非没水部,没水部ともに膨れが発生したが、少量であった。	\triangle
(工法	耐水試験中,非没水部に比較的大きい膨れが発生した。	×
D 工法	非没水部に比較的大きい膨れがあり,没水部には,艶引け・白化が見られた。	×
E 工法	没水部は概ね良好であるが,非没水部には比較的大きい膨れが発生した。	×
F 工法	非没水部,没水部ともに膨れが発生した。	×
G 工法	吹付塗装時の小さなミストは見られるが,耐水試験後も変化がなく概ね良好である。	0
Hエ法	没水部の塗膜に軟化・膨潤が見られる。非没水部にも膨れが発生した。	×



図 2.2 付着試験結果 8)



写真 2.1 通電後に塗布した表面保護材の鉄筋に沿った変色⁹⁾

参考文献

- 上田隆雄,芦田公伸,宮川豊章:デサリネーション適用後の鉄筋防食効果に関する研究, 材料, Vol. 48, No. 8, pp. 907-912, 1999.8
- 野村倫一,柏原茂,松久保博敬,宮口克一:再アルカリ化処理されたコンクリート中のア ルカリ濃度分布,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.13, 2013.11.
- 3) 野村倫一,石橋昌史,七澤 章:17 年経過した脱塩・再アルカリ化工法の効果,コンク リート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1672-1677, 2012.7
- 4) 小川一郎,内藤仁,玉村光平,二見健二,佐々木崇,宮口克一:東京中央郵便局のコンク リートの再アルカリ化補修,日本建築学会学術講演概要集(東海),pp1123-1124, 2012.09.
- 5) 宮川豊章,上田隆雄:コンクリート構造物へのデサリネーションおよび再アルカリ化工 法の適用,コンクリート工学, Vol. 38, No. 3, pp. 9-16, 2000.3
- 6) Rob B. Polder : Electrochemical chloride removal from concrete prisms containing chloride penetrated from sea water, Construction and Building Materials, Vol.10, No.I , pp.83-88, 1996
- 7) 北後征雄,芦田公伸,菊田憲弘,宮川豊章:電気化学的手法によるコンクリートの改質と 補修効果に関する実証的研究,土木学会論文集,No.641,V-46,pp.101-115,2000.2
- 8) 野村倫一,山田卓司,石橋孝一:再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の 適応性に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1553-1558, 2004.71
- 9) 野村倫一:再アルカリ化後に施工した表面被覆工法の経年調査結果,土木学会第66回年 次学術講演会(平成23年度), V-267

第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性

3.1 はじめに

2章で前述したように、中性化や塩害によって劣化したコンクリート構造物に対して、再ア ルカリ化工法または脱塩工法を適用した場合、少なくとも20年程度は補修効果の持続が期待 できる¹⁾。一方で、通電後に表面保護工法を併用することで、通電後のコンクリート表面から の劣化因子の浸入を抑制し、補修効果持続性を向上させることが考えられる。しかし、通電 後のコンクリート内部は、通電に伴う高アルカリ性電解液の供給と鉄筋近傍でのカソード反 応によって、一般的なコンクリートと比較し高アルカリ・高湿潤状態となり、一般的な表面 保護材を塗布しても充分な性能を得られないことが報告されている²⁾。

そこで本章では、通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性を評価することを目的に、表 面保護材塗布時のコンクリート表面含水率をパラメータとし、種々の環境下で保管した保護 材の耐久性について評価する。さらに、再アルカリ化前の中性化の有無が再アルカリ化後に 塗布した表面保護材の耐久性に与える影響についても検討を行う。また、通電処理は一般的 に再アルカリ化処理で2週間、脱塩処理に8週間を要するため、実際に通電を行った供試体 を用いて保護材の耐久性を評価する場合、多くの時間と労力を要する。そこで簡易的に通電 後のコンクリートを模擬した供試体を用いて表面保護材の耐久性評価が可能かも併せて検討 する。試験の流れを図3.1に示す。



図 3.1 表面保護材の耐久性試験フロー

3.2 実験概要

3.2.1 コンクリート配合および使用材料

本実験で用いたコンクリートの配合を表 3.1 に示す。ここに示したように、全ての供試体でコンクリートの水セメント比は 60%とした。また、供試体にはコンクリートの練り混ぜ水に溶解した形で NaCl を混入した。コンクリート中の Cl⁻量としては、再アルカリ化工法の 適用を想定したコンクリート中に発錆限界濃度程度の 2.0 kg/m³、脱塩工法の適用を想定した コンクリートには厳しい鉄筋腐食環境を想定し 8.0 kg/m³とした。

使用した材料を表 3.2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント,細骨材は板野町大 坂産,粗骨材は阿波市市場町産を用いた。また,それぞれの配合にAE減水剤(ポゾリスNo.70) をセメント量の0.3%, AE剤(ポゾリス303A)をセメント量の約0.006%を混入した。

表3.1に示した配合のコンクリートについて、フレッシュ性状と28日圧縮強度を表3.3に示す。表中の圧縮強度は3体の平均値とした。コンクリートのフレッシュ性状に大きな差はないが、塩分混入量が多い脱塩配合の方が再アルカリ化配合に比べて、圧縮強度は若干高くなる結果が得られた。

表3.1 コンクリートの配合

適用工法	水セメン トドW/C	細骨材率	粗骨材の 最大寸注		単位量(kg/m ³)					
	(%)	s/a(%)	(mm)	セメント	水	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤	NaCl
再アルカリ化	60	10	15	200	190	825	807	0.0	0.010	3.3
脱塩	60	48	15	300	180	815	897	0.9	0.019	13.2

表3.2 供試体使用材料の概要

材料名	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16kg/m ³ , R ₂ O量=0.56%
細骨材	阿波市市場町産砕砂	表乾密度2.57kg/m ³ , 絶乾密度2.57kg/m, 吸水率1.06%, 粗粒率2.31F.M.
粗骨材	板野町大坂産砕石	Gmax=15mm, 表乾密度2.57kg/m ³ , 絶乾密度2.57kg/m, 吸水率1.62%, 粗粒率 6.73F.M.

表 3.3 コンクリートのフレッシュ性状と 28 日圧縮強度

適用工法	スランプ (cm)	空気量(%)	28日圧縮強度 (N/mm ²)
再アルカリ化	16.0	4.0	29.6
脱塩	13.0	5.0	37.6

3.2.2 供試体の作製

本実験で使用した供試体の概要を図 3.2 に示す。作製した供試体のコンクリート部分の寸法は 50×100×200mm の立方体とし, 50×100mm 断面に図 3.2 に示すように鉄筋 D10 SD295A を1本配した。

これらの供試体は、コンクリート打設日翌日に脱型し、20℃の恒温室中で28日間の封緘 養生を行った。その後、真空下でアルカリ溶液に浸漬するものについては、アルカリ供給面 となる100×200mmの2面を除く他の4面にエポキシ樹脂を塗布し絶縁処理を行った。浸漬 後、アルカリ裏水促進試験を実施しない供試体については、表面保護材塗布面(暴露面)の 対面1面を絶縁処理した。一方、通電処理を行うものは通電面となる100×200mmの側面1 面を除いて、他の5面にエポキシ樹脂を塗布し絶縁処理を行った。

再アルカリ工法を適用する前のコンクリートの中性化程度は、構造物内で必ずしも一応で はなく、雨がかり部など部分的に中性化の進行程度が異なり、中性化部と未中性化部で再ア ルカリ化後のアルカリ金属イオンの分布状況やpH値が異なると推測される。そこで、再アル カリ化前の中性化の有無が再アルカリ化後に塗布した表面保護材の耐久性に与える影響につ いて検討するため、再アルカリ化処理を行う供試体については、促進中性化を行わない供試 体と、促進中性化環境(20℃,60%R.H.,CO2濃度5%)で9ヶ月間保管する供試体を作製し た。促進中性化9ヶ月後に中性化深さ測定用の供試体を割裂し、JISA1152(コンクリートの中 性化深さの測定方法)に準じて中性化深さを測定した結果、中性化深さは31mmであった。

3.2.3 供試体へのアルカリ供給

(1) 通電処理

絶縁処理後に実施した通電処理は陽極材にチタンメッシュ,陰極をコンクリート中の鉄筋 として直流電流を供給し行った。通電処理を行う際の電解液,電流密度および通電期間は, 一般的に使用されているものを採用した。再アルカリ化工法を想定した通電では,電流密度 はコンクリート表面に対して 1.0 A/m²,通電期間は 2 週間とし,供試体を電解液である 1.5N の K₂CO₃溶液中に浸漬して行った。脱塩工法を想定した通電では,電流密度は 1.0 A/m²,通 電期間は 8 週間とし,電解液は 0.1N の Li₃BO₃溶液を用いた。なお,通電期間中,電解液中の pHおよび Cl⁻濃度ならびに陽極鉄筋間電位差を定期的に測定した。通電状況を図 3.3 に示す。



図 3.2 供試体概要





写真3.1 電解液への浸漬

(2) 真空下でのアルカリ溶液への浸漬

表面保護材の耐久性検討シリーズにおいて、100×200mmの側面2面以外を絶縁塗装した後、写真3.1に示す容器を用い、0.04MPaの真空下で重量変化が無くなるまで電解液に浸漬した。用いた電解液は、再アルカリ化処理を想定した浸漬では1.5Mの K_2CO_3 溶液とし、脱塩処理を想定した浸漬では0.1Mの Li_3BO_3 溶液とした。また、アルカリ溶液の代わりとして、20℃の水道水に浸漬した供試体も作製した。

3.2.4 通電終了後コンクリートの化学分析

通電処理終了後に, 化学分析用の供試体 1 体 を用いてコンクリート中のアルカリ金属イオン (Na⁺, K⁺, Li⁺) 濃度分布および pH 分布を測定し た。化学分析時のコンクリート供試体の切断方法 を図 3.4 に示す。また, 以下に各種イオンの測定 方法を示す。



図3.4 化学分析供試体の切断方法

Na⁺濃度, K⁺濃度およびLi⁺濃度の測定

Na+濃度, K+濃度および Li+濃度の測定については, 既往の研究 ³⁾を参考に行った。切出し た厚さ 10mm のコンクリートプレートをそれぞれ微粉砕し, 0.15 mm のふるいを全通させ, 一昼夜風乾した後よく混合し, 乾燥させたものを分析試料とした。試料 10g を入れたビーカ ーに時計皿でふたをして, 2 mol/l の硝酸 70 ml をビーカーの縁から静かに入れて反応が終わ るのを待つ。次に, 過酸化水素水 1 mm を加えてからビーカーを加熱し, 黄緑色から薄茶色に 変化するまで 5 分間静かに煮沸した後に, 常温まで冷却した。その後, 漏斗を用いて溶液を 吸引濾過した。ろ液と洗液を 200 ml のフラスコに移し, 水で定容した後, 試料溶液から所定 量を全量ピペットを用いて分取し 100 ml のメスフラスコに移し希釈した。その後, 検量線法



写真3.2 原子吸光分析装置



写真3.3 pH測定装置および測定状況

種類	材料構成	施工仕様
右 继玄	アクリル樹脂系	プライマー(200g/m ²)
竹饭术	ポリマーセメントモルタル	中塗り(1600g/m ²)
毎歩る	計泊調性ナポナシ、排形	一層目(500g/m ²)
邢陂术	耐湿润住エルイン樹脂	二層目(300g/m ²)
含浸系	シランシロキサン系 高性能浸透性吸水防止材	$200 g/m^2$

表 3.4	使用し	た表面保護材の	内訳
10.7			1 3 6/

により原子吸光分析方法により分析を行った⁴⁾。装置は**写真 3.2** に示す㈱島津製作所製 AA-6200 を使用した。

(2) pH 値の測定

pH 値は 50 mL ガラスビーカーに分析試料 12.5 g と純水 25 ml を入れ,スターラーで 3 分間 撹拌後 5 分間静置し,上澄み液を pH 電極で測定した。 pH ガラス電極は,写真 3.3 に示す㈱ 堀場製作所 9618S-10D を使用した。

3.2.5 表面保護材の施工

電解液への浸漬または所定の通電処理を終えた供試体は、温度 20℃、湿度 60%R.H.の室内 で所定の表面含水率になるまで保管した。表面含水率は、高周波容量式水分計で測定した表 面含水率の値で、約 8%と約 14%の 2 水準とした。また、測定モードは、水分量と相関する 高周波容量で測定が可能な D.MODE を使用した。コンクリートに表面保護材や防水層を塗布 する際の水分管理において、コンクリート表面含水率で約 10%以下となった時点で施工する としている場合が多く⁵⁾⁶、表面含水率約 8%は通電後のコンクリート表面の乾燥が十分に行 われ比較的安全側で表面保護材が施工された状況を想定している。一方で、表面含水率約 14% は、通電終了直後あるいはアルカリ溶液への浸漬後、供試体表面を乾いたウエスでふき取る ことで供試体暴露面のごく表面のみが乾燥し供試体内部は湿潤となる状態とした。これは、 通電後のコンクリート表面含水率の管理が十分でなかった場合を想定している。

所定の含水率に到達した後,供試体のアルカリ供給面1面(通電処理を行った供試体は通 電面)に対して各種表面保護材をそれぞれの施工仕様にしたがって施工した。使用した表面 保護材の概要を表3.4に示す。表面保護材は、中性化・塩害環境下で使用実績が高く、かつ 耐湿潤性の高いと考えられる表面保護材の中から、有機系としてエポキシ樹脂、無機系とし てアクリル樹脂系ポリマーセメントモルタル(以下,PCMとする)を1種類ずつ使用した。た だし、PCMは中塗り材とプライマーのみを塗布することとした。また、表面被覆材と比べて 比較的新しい材料である表面含浸材として、近年塩害環境下での使用実績が増加しているシ ラン・シロキサン系含浸材についても1種類使用した。

表面保護材の塗布後,電解液に浸漬した供試体については,表面保護塗布面以外の5面を エポキシ樹脂により再度絶縁塗装した。ただし,背面からのアルカリ供給促進試験を行う供 試体は,表面保護塗布面とその裏面以外の4面を再度絶縁処理した。

3.2.6 表面保護施工後の保管環境および促進劣化試験

表面保護工の施工が終了した供試体は、20℃、湿度 60%R.H.の環境で 28 日間保管した。ま た真空下で浸漬した供試体の一部は、図 3.5 に示すアルカリ裏水促進試験を 28 日間実施し た。この促進試験は、表面保護材塗布後、通電に伴いコンクリート中に浸透したアルカリ溶 液が裏水等によって表面保護材とコンクリートの界面部へ移動することを想定した。28 日間 の間定期的に、シラン・シロキサン系含浸材を塗布した供試体の接触角および保護面からコ ンクリート抵抗を測定した。本検討で作成した供試体の一覧と凡例を表 3.5 に示す。

3.2.7 表面保護材の各種試験

(1) 水滴接触角

シラン系含浸材を塗布した供試体について、含浸面に落とした水滴(直径約2mm)の接触 角の測定し、その撥水効果を定量的に評価した。図3.6に、接触角の概念図を示す。接触角 の定義は、液滴の輪郭曲線と固体表面との交点である端点において、液滴輪郭曲線の接線と 固体表面のなす角である。一般に、撥水性は表面に置かれた水滴の接触角 θ で評価され、 θ が90°を越えると撥水性、120°< θ <150°は高撥水性、 θ が150°を越えると超撥水 性であると定義される。



図 3.5 アルカリ裏水促進試験

	アルカリ	コンクリートの		マルカ川東水		アルカリ	コンクリートの		マルカ川寅水
供試体名	ノルカリ 供給方法	表面含水率 (%)	表面保護種	レカリ表示 促進試験	供試体名	インカリ 供給方法	志可含水率 (%)	表面保護種	レカリ表示 促進試験
R14-S			シラン	-	D14-S			シラン	-
R14-P	再アルカリ化		PCM	-	D14-P	脱塩	14	PCM	-
R14-E		14	エポキシ樹脂	-	D14-E			エポキシ樹脂	-
RC14-S	TT1 1 1 1 1	14	シラン	-	L8-S	_		シラン	-
RC14-P	円/ルカリ化 (促進由性化後)		PCM	-	L8-P		8	PCM	-
RC14-E			エポキシ樹脂	-	L8-E			エポキシ樹脂	-
K8-S			シラン	-	L14-S	Li ₃ BO ₃ 溶液 への浸漬		シラン	-
K8-P		8	PCM	-	L14-P			PCM	-
K8-E			エポキシ樹脂	-	L14-E		14	エポキシ樹脂	-
K14-S	11 00 XXX 0		シラン	-	L14A-S		14	シラン	0
K14-P	K ₂ CO ₃ 溶液への 温速		PCM	-	L14A-P			PCM	0
K14-E	使俱	14	エポキシ樹脂	-	L14-E			エポキシ樹脂	0
K14A-S		14	シラン	0	S			シラン	-
K14A-P			PCM	0	Р	無通電	8	PCM	-
K14A-E			エポキシ樹脂	0	Е			エポキシ樹脂	-

供試体一覧と凡例 表 3.5



図 3.6 接触角の概念図



(2) 透水試験

表面保護施工後の所定の保管期間または促進期間が経過した後,透水試験により表面保護 材の透水抑制効果を評価した。測定概念図を図3.7に示す。試験方法は,表面含浸材の試験 方法(案)(JSCE-K-571)で示される透水量試験に準拠し,口径75mmの漏斗を保護材塗布面に設 置し,水頭高さを300mmとした。試験開始時から5日後の水頭の高さ(Wpi)を読み取り,試 験開始時の水頭高さ(Wpo)との差から,式3.1より透水量(Wp)を算出した。

1

(3) 建研式接着強度試験

表面保護施工後の所定の保管期間または促進期間が経過した後,建研式接着強度試験機を 用いて,PCM およびエポキシ樹脂塗布供試体の付着強度を測定した。供試体の表面保護塗布 面に対して、図 3.8 に示すように、コンクリートカッターで母材コンクリートまで切込みを 入れた後、40×40×10mmの鋼製プレートをエポキシ系樹脂で接着した。約1日の静置後、鋼 製プレートに引張用治具を取り付け、接着強度試験を行った。

接着強度の算出は**式** 3.2 を用い, 6 点以上の平均値を平均接着強度とした。また, 付着試験 後に保護材とコンクリート母材との剥離状況を観察した。

接着強度
$$(N/mm^2) = \frac{\frac{1}{B} \times j \cdot j \cdot k}{\frac{1}{B} \times j \cdot k}$$
式 3.2



図3.8 建研式接着強度試験の概要

(4) SEM による表面保護材の微細構造観察

走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いて, PCM およびエポキシ樹脂 の微細構造を観察した。付着試験後,付着試験の影響がない部分から試験片を採取し,測定 を行った。測定は,表面保護材と母材コンクリートが一つの断面内に含まれるようなパター ンと,表面保護材を母材コンクリートから剥がし,剥がした表面保護材を母材コンクリート 面側から測定する2パターンで観察を行った。観察試料の例を**写真3.4**に示す。



写真3.4 観察試料の例(左:断面方向に観察,右:母材コンクリート側から観察)

3.3 通電後コンクリート中のアルカリ分布および pH 分布

通電後コンクリート中の R₂O (=Na₂O+0.658K₂O) 量および pH 分布を図 3.9 に示す。 再アルカリ化処理によって、中性化の有無にかかわらずコンクリート表面付近に多量の R₂O が集積していることが分かる。これは、電解液中に含まれる K⁺がコンクリート表面から 電気浸透したことによるものと考えられる。また、再アルカリ化前に中性化した供試体は、 未中性化供試体に比べて、コンクリート表面の R₂O 量が少なく、約 30mmより内部の R₂O 量 が多いことが分かる。これは、表面付近においては中性化によってコンクリートが緻密化し たことでアルカリイオンの電気浸透が抑制され、未中性化部にあたる約 30mm より内部では 通電前の中性化環境下でコンクリート内部が乾燥し電解液の内部方向への移動を促進したこ とが原因と考えられる。一方で、pH 値に関しては、再アルカリ化前に中性化した場合、中性 化部(コンクリート表面から約 30mm) の pH 値は 11 程度であるのに対し、中性化を行って いない供試体では供試体全体にわたって 12.8 程度の pH 値を示している。未中性化供試体で は、通電によって多量のアルカリイオンが供給されただけでなく、セメント硬化体中に水酸 化カルシウムが存在するため高い pH 値を示したものと考えられる。

一方で、脱塩後のコンクリートに関しては、再アルカリ化後のようなコンクリート表面へのアルカリの集積は確認できないが、pH 値は供試体全体にわたって 12.5 程度の高い値を示している。このように、再アルカリ化後のコンクリート表面付近の R₂O 量および pH 値は、脱塩後に比べて高い値を示しており、表面保護材の耐久性に与える影響も大きいものと推測される。また、再アルカリ化前の中性化の有無でコンクリート表面付近の pH 分布が異なることが、表面保護材の耐久性にどのような影響を与えるかついて次節以降で述べる。



3.4 通電後に塗布したシラン系含浸材の耐久性

28 日間保管後のシラン含浸供試体における水滴接触角の経時変化を図 3.10 に示す。アルカリを供給していない標準供試体(S)の接触角は、130°程度と高い撥水性を有しており、シラン系含浸材の表面撥水効果が表れていることが分かる。

一方で、電解液の種類・アルカリ供給方法に関わらず、アルカリを供給した供試体(K・R・ L・Dシリーズ)は、アルカリを供給していない供試体(S)に比べ接触角が小さく、シラン系 含浸材による表面の撥水効果が小さくなっていることが分かる。また、再アルカリ化供試体

(K・Rシリーズ)の接触角は、脱塩供試体(L・Dシリーズ)の値より小さくなっている。 特に塗布時の表面含水率が14%と高含水率で施工した場合、保管期間中、一般的に撥水性を 有していると判断される90°を下回る値を示した。塗布7日後では20°程度であったのに対 し、28日経過後の接触角は70°程度まで回復しているが、これは保管期間中にシラン系含浸 材による撥水層の形成および供試体表面の乾燥が進んだことが原因と推測される。また、再 アルカリ化前に中性化した供試体(RC14-S)と中性化していない供試体(R14-S)の接触角は 同程度の値を示した。脱塩供試体に関しては、含水率に関わらず約120°の接触角を示してお り、高い撥水性を保持しているものと考えられる。28日経過後の各供試体の水滴接触角の例 を写真3.5に示す。



写真3.5 28日間保管した供試体表面に置いた水滴の一例





図3.11 シラン系含浸材の透水比と含侵深さ

通電後コンクリートに塗布したシラン系含侵材の透水比および含浸深さを図 3.11 に示す。 透水比は表面含水率 8%で含侵材を塗布した無通電供試体の透水量に対する各供試体の値の 比率を表している。含浸深さの測定は,表面含浸材の試験方法(案)(JSCE-K571-2005)に準 拠して行った。

図3.11より、再アルカリ化供試体および脱塩供試体のどちらにおいても、表面含水率8% で塗布した場合に比べて14%で塗布した場合の方が透水比は大きく、含浸深さは小さくなる 傾向にある。これは、表面含水率14%で塗布した場合、コンクリート表面付近は飽水状態に 近く、含浸材のコンクリート内部への浸透が抑制されたことが原因と考えられる。また、図 3.10に示した水滴接触角の測定結果と概ね良好な相関関係が見られ、水滴接触角が大きく高 い表面撥水性を表した供試体は、透水比が小さく含浸深さが大きくなる傾向にある。一方で、 通電処理または電解液への浸漬といった供試体へのアルカリ供給方法の違いが、透水比およ び含浸深さに与える影響は小さいと考えられる。また、すべての供試体において、外観上の 変状は見られなかった(写真3.6参照)。

再アルカリ化供試体に関しては、表面含水率8%で塗布した場合(K-8S)でも、透水比は約2を示しており、無通電供試体に比べて透水抑制効果が半減していることが分かる。また、含浸深さに関しては、無通電供試体の含浸深さが約4mmであったことから、表面含水率8%で塗布した場合(K-8S)においても含浸深さは約1/4まで低減されている。一方で、R-14SとRC14-Sの間に有意な差はなく、再アルカリ化前の中性化の有無が透水量および含浸深さに及ぼす影響は小さいと言える。再アルカリ化前に中性化を行った場合、図3.9で示したように中性化を行っていない場合に比べてpHは低いものの、表面付近のR₂O量は差がない。したがって、通電後のシラン系含侵材の耐久性低下に関する支配的な要因は、コンクリート表面付近のR₂O量と含水率であると考えられる。

脱塩供試体に関しては、アルカリ供給方法・表面含水率に関わらず、再アルカリ化供試体

26







図3.12 通電後コンクリート中における シラン結合の加水分解

に比べて透水比, 含浸深さともに低下程度が小さいことが分かる。これは, 図 3.9 で示した ように脱塩後の表面付近の R₂O 量は再アルカリ化後に比べて小さいことが原因と考えられる。 特に,表面含水率 8%で塗布した場合 (L8-S),透水比・含浸深さともに無通電供試体と同程度 を保持している。

このような通電後に塗布したシラン系含侵材の塗布直後からの表面撥水性,透水抑制効果, 含浸深さの低下の一因として,通電に伴いコンクリート表面付近に通常のコンクリートと比 べ高濃度のアルカリイオンが集積したことで,図3.12に示すような撥水層を形成するシロ キサン結合が加水分解^のされ,シラン結合の網目構造が脆弱化した可能性が考えられる。

3.5 通電後に塗布した PCM およびエポキシ樹脂の耐久性

通電後コンクリートに塗布した PCM およびエポキシ樹脂の付着強度を図 3.13 および図 3.14 に示す。再アルカリ化供試体に関して、表面含水率 14%で施工した場合、無通電供試体 と比較して PCM の付着強度は 40%程度低下し、エポキシ樹脂の付着強度は 25%程度低下した。一方で、脱塩後に関しては、背面からのアルカリ裏水の供給を受けた場合に付着強度の 大きな低下が確認され、PCM にいたっては無通電供試体に比べて 50%程度付着強度が低下し ていることが分かる。ただし、本研究で使用した表面保護材においては、すべての条件で一般的な付着強度の基準値である 1.0N/mm²を満たした。また、写真 3.7 に示す例のように、す べての供試体で膨れや剥がれといった外観上の変化は見られなかった。



図3.13 PCMの付着強度



図3.14 エポキシ樹脂の付着強度



写真 3.7 PCM およびエポキシ樹脂塗布供試体の外観の例

また,付着試験後の界面状態を観察した結果を**写真 3.8**に示す。PCM に関しては,無通 電の場合,界面破壊と母材破壊が混在していたのに対し,再アルカリ化後においては界面破 壊を示した。脱塩後に関しては,無通電の場合と同様に界面破壊と母材破壊が混在していた ものの,界面破壊の割合が大きくなる傾向にあった。一方で,エポキシ樹脂に関しては,す べての供試体で母材破壊を示し,良好な付着強度が保持されていると考えられる。



写真3.8 付着試験後の破壊界面の例

このような通電後に塗布した表面保護材の付着強度が低下する原因を明らかにするため, SEM-EDS を用いて表面保護材とコンクリート母材界面の微細構造の観察と組成分析を行っ た。PCM またはエポキシ樹脂とコンクリートとの接着界面の SEM 画像の例を図 3.15 に示 す。図中に示す様に、図の上部は表面保護材である PCM を、下部は母材コンクリートを表し ている。PCM とコンクリートの接着界面の状態 (図中の黄色点線枠内)に着目すると、通電 処理後に塗布した場合、無通電の場合に比べて界面付近の PCM およびコンクリート部分が粗



図3.15 PCMおよびエポキシ樹脂のSEM画像(断面方向)



図3.16 PCMおよびエポキシ樹脂のSEM画像(保護材裏面)

になっていることが分かる。特に,再アルカリ化後の方が脱塩後に比べて劣化度合いが高い。 一方で,エポキシ樹脂に関しては再アルカリ化後および脱塩後のどちらにおいても,PCMの ような接着界面の変化は比較的小さいことが分かる。

同様の供試体に対して、付着強度試験に使用していない部分から試験片を採取し、表面保 護材の裏面側から撮影した SEM 画像を図 3.16 に示す。これより、再アルカリ化後に塗布し た PCM は、無通電のものに比べて白色部の割合が増加しており、部分的に粒子状に変化して いることが分かる。BEC 画像の輝度は、原子番号が大きいほど明るくなると言われており⁷⁾、 Ca 元素(原子番号 20)を含むセメント硬化体および石灰石部が白く,C(原子番号 6)元素 を主成分とするポリマー部が黒く見えると考えられる。すなわち,PCM 中のポリマーが高ア ルカリ環境で加水分解し、未水和のセメント部が露出したものと考えられる。また、このよ うな高アルカリ環境かでのポリマーの加水分解によって接着界面が脆弱化し、PCM と母材コ ンクリートとの一体性が低下したことが、通電後に塗布した PCM の付着強度の低下原因であ ると考えられる。

一方で、エポキシ樹脂に関しては、PCM のように顕著な界面の劣化は見られなかったが、 PCM と同様通電後の高アルカリ・高含水の影響を受け付着性が低下したものと考えられる。

3.6 本章のまとめ

本章における通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性に関する検討により得られた結果 をまとめると以下のようになる。

- (1) 再アルカリ化後と脱塩後では,通電後のコンクリート内部のアルカリ金属イオン分布が 異なり,特に再アルカリ化後のコンクリート表面で高濃度のアルカリ金属イオンの集積 が確認された。このことが,再アルカリ化後に塗布した含浸材の遮水性,表面撥水性の低 下および PCM やエポキシ樹脂の付着強度低下の原因と考えられる。
- (2) 中性化後に再アルカリ化処理を行った場合, 再アルカリ化直後の pH 値は中性化していな い場合に比べて小さくなった。再アルカリ化前のコンクリートの中性化の有無が, 再ア ルカリ化後に塗布した表面保護材の耐久性に与える影響は小さいことが分かった。すな わち, 再アルカリ化語の表面保護材の耐久性劣化要因としては, pH よりも R₂O 量が支配 的な可能性がある。
- (3) 再アルカリ化後にシラン系含浸材を塗布した場合、塗布時の表面含水率に関わらず遮水 性が低下し、含侵深さが小さくなる傾向にあった。一方で、脱塩後に関しては、表面含水 率8%で塗布した場合、透水比、含侵深さともに無通電と同程度の値を示した。
- (4) PCM に関して、再アルカリ化後に高含水率で塗布した場合、無通電供試体に対して付着 強度が 40%程度低下した。一方、脱塩後に関しては裏水によってアルカリ溶液が保護材 界面に供給された場合に、付着強度が 50%程度低下した。ただし、すべての供試体で付 着強度の基準値である 1.0N/mm²を満足した。
- (5) 通電後に塗布した PCM の付着強度低下の原因は,通電後コンクリート表面の高アルカリ 環境下でコンクリートと PCM の界面付近でポリマーの加水分解が生じ,接着界面部が脆 弱化したことが考えられる。
- (6) エポキシ樹脂に関しては,再アルカリ化後,脱塩後ともに,裏水によってアルカリ溶液が 保護材界面に供給された場合,25%程度付着強度が低下した。ただし,すべてのケースで 付着強度の基準値である 1.0N/mm²を満足しておりかつ母材破壊であったことから,良好 な付着性能を示した。

参考文献

- 1) 野村倫一,石橋昌史,七澤 章:17 年経過した脱塩・再アルカリ化工法の効果,コンク リート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1672-1677, 2012.7
- 2) 野村倫一,山田卓司,石橋孝一:再アルカリ化工法適用後のコンクリートに対する塗膜の 適応性に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1553-1558, 2004.7
- 3) 七澤章: 塩害と ASR の複合劣化を受けたコンクリート構造物の劣化機構と電気化学的補 修工法の適用性に関する研究,徳島大学学位論文,2016.
- 4) (社)日本道路協会:道路橋床版防水便覧, 2007.
- 5) (社)日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説(JASS23)吹付工事, P.96, 2006.
- 6) McGettigan, E. (1992). Silicon-based weatherproofing materials. Concrete International, 14.
- 7) 胡桃澤清文,名和豊春:反射電子像及びエネルギー分散型 X 線分析により測定した元素 分布による硬化セメントペーストの観察,日本建築学会構造系論文集,第 595 号,9-15, 2005.09

第4章 通電後コンクリート中の鉄筋防食効果持続性

4.1 はじめに

本章では、第3章で耐久性を評価した表面保護材を使用して、再アルカリ化後または脱塩 後に表面保護材を併用した場合のコンクリート中の鉄筋防食効果について評価した。表面保 護材塗布時のコンクリート表面含水率は高周波式水分測定計の値で約8%とした。表面含水 率8%で施工した理由は、一般的に表面保護材を施工する表面含水率であること、第3章に おいて比較的良好な結果が確認されたことが挙げられる。供試体は通電後に各種表面保護材 を塗布後、促進劣化環境下で長期間保管した。促進劣化環境として、再アルカリ化供試体は 促進中性化環境で約24ヶ月間、脱塩供試体は塩水噴霧環境で約48ヶ月間保管した。通電後 コンクリート中の鉄筋防食効果は、各種電気化学的モニタリングおよびコンクリート中の各 種イオン濃度分布より評価した。試験の流れを図4.1に示す。



図 4.1 鉄筋防食効果試験フロー

4.2 実験概要

4.2.1 コンクリートの配合と供試体概要

本実験で用いたコンクリート配合を表4.1に示す。配合は第3章と同様に、W/Cは60%で 一定とし、コンクリート中のCl⁻量は、再アルカリ化工法の適用を想定したコンクリート中に 発錆限界濃度程度の2.0 kg/m³、脱塩工法の適用を想定したコンクリートには厳しい鉄筋腐食 環境を想定し8.0 kg/m³とした。作製した鉄筋コンクリート供試体のコンクリート部分は100 ×100×250 mmとし、正方形断面の中央部分に鉄筋D13 SD295Aを1本配した。これらの供 試体は、コンクリート打設日翌日に脱型し、20℃の恒温室中で28日間の封緘養生を行った後 に、通電面1面を除いて、他の5面についてはエポキシ樹脂を塗布して絶縁処理を行った。 供試体の概要を図4.1に示す。

4.2.2 通電処理と表面保護材の施工

絶縁処理後の再アルカリ化及び脱塩処理は,第3章と同様の方法で行った。なお,それぞ れの場合について無通電供試体も作製し,通電期間中は20℃恒温室中で湿空状態として保管 した。通電処理を終えた供試体は,温度20℃,湿度60%R.H.の室内でコンクリート表面含水 率が高周波式水分計で8%程度になるまで保管した後に,供試体の通電面(無通電供試体の場 合は暴露面)1面に対して各種表面保護工をそれぞれの施工仕様にしたがって施工した。表面 保護工は表3.4に示す3種類とし,保護を行わない供試体も別途設けた。

表 4.1 コンクリートの配合

	水セメン トドW/C	細骨材率	粗骨材の 最大寸法		単位量(kg/m ³)					
迴用工伍	(%)	s/a(%)	成八寸五 (mm)	セメント	水	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤	NaCl
再アルカリ化	60	10	15	200	190	829	002	0.6	0.005	3.3
脱塩	00	48	15	500	180	819	902	0.0	0.002	13.2



図 4.1 供試体の概要
4.2.3 表面保護施工後の促進劣化試験および試験期間中の電気化学的モニタリング

表面保護材の施工終了後,供試体を促進劣化環境で保管した。再アルカリ化供試体は促進 中性化環境(20℃,60%R.H., CO2濃度5%),脱塩供試体は塩水噴霧環境(35℃,5%NaCl溶 液を噴霧21hrと乾燥3hrの繰返し)で保管しながら,電気化学的鉄筋腐食指標(自然電位, 分極抵抗,コンクリート抵抗)の経時変化および鉄筋のアノード分極曲線およびカソード分 極曲線を定期的に測定した。表面保護施工後の電気化学的測定を行うため,保護(暴露)面 と相対するエポキシ樹脂塗布面の中央部分に1辺2cm正方形の測定窓を開け,ここに露出し たコンクリート表面部分に照合電極と対極を含水状態の脱脂綿を介して密着させて測定を実 施した。図4.2に測定方法の概要を示す。測定終了後の測定窓部分は劣化因子の浸入路とな らないようにアルミテープで塞いだ後に促進劣化を継続することとした。また表面保護なし の供試体と含浸材塗布供試体については,保護面全面を湿潤させて全面を覆う対極を用いて 見かけのコンクリート抵抗を測定した。

電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は、飽和銀塩化銀電極(Ag/AgCl)、対極にはチタンメッシュを用いて供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 10 µ A,周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値の差から求め、コンクリート抵抗は高周波数側(800 Hz)のインピーダンス値として求めた。アノード分極曲線およびカソード分極曲線は掃引速度 20mV/min で電位を自然電位から±1000 mV または±300 mV 変化させ、その間の電位と電流の関係を測定した。

4.2.4 促進劣化試験後の表面保護材の耐久性評価

表面保護材塗布供試体に対して,各促進劣化試験後,3章と同様の方法で建研式接着強度試験および JSCE-K-571 に準拠し透水試験を実施した。



チタンメッシュ

図 4.2 電気化学的モニタリングの測定状況(a:保護材裏面から,b:保護面から測定)

4.2.5 コンクリート中の各種イオン分析

通電処理直後および各促進劣化試験後,化学 分析用の供試体を用いて,コンクリート中の

(Cl⁻, Na⁺, K⁺, Li⁺) 濃度分布および pH 分布 を測定した。これより,通電処理効果の確認お よび長期的な各種イオンの再分布状況を評価 することで,各種イオン分布が表面保護材の耐 久性およびコンクリート中の鉄筋防食効果に 与える影響を検討した。コンクリート中の各種 イオン濃度測定は,3.2.4 節と同様の方法で行 った。化学分析時のコンクリート供試体の切断 方法を図4.3 に示す。

また,表面保護材の Cl⁻浸透抑制効果を評 価するため, EPMA 面分析によって Cl⁻濃度 を分析した。分析は,土木学会規準 JSCE− G574−2013「EPMA 法によるコンクリート中 の元素の面分析方法(案)」に準拠して行った。 EPMA を行うために切り出した試験片外観を 写真 4.1 に示す。

4.2.6 中性化深さの測定

再アルカリ化供試体に関して,表面保護材の耐久性評価試験終了後の供試体を用いて, 中性化深さをJISA1152(コンクリートの中性 化深さの測定方法)に準拠し,測定した。供試



図 4.3 化学分析用供試体の切断方法



体を割裂後,フェノールフタレイン溶液を噴霧し,コンクリート表面から赤紫色に呈色した 部分までの距離を 0.5mm 単位でノギスを用いて測定し,中性化深さとした。

4.2.7 鉄筋腐食面積率および腐食減量の測定

促進劣化試験後の供試体からはつり出した鉄筋の腐食状態を評価するために,腐食減量を 測定した。腐食減量の測定は,JCI-SC1「コンクリート中の鋼材腐食評価方法」に準拠し,は つり出した鉄筋に付着したペーストを落としたの後,60℃のクエン酸二アンモニウム水溶液 に約24時間浸漬させた。その後,水道水で洗浄し,十分に乾燥した後に鉄筋の重量を測定し た。

また,再アルカリ化供試体に関しては,腐食の程度が小さく,正確な腐食減量が測定でき なかったため,腐食面積率で評価することとした。腐食面積率は,透明なシートに錆の状況 を黒色で複写し,画像解析ソフトを用いて黒色部分の面積割合を計算することで算出した。

4.3 通電直後のコンクリート中の各種イオン濃度分布

(1) アルカリ金属イオン分布

通電処理直後のコンクリート中における総アルカリ量である R_2O 量分布と pH 分布を図 4.4 に示す。また,通電処理直後のコンクリート中におけるカリウムイオン(以下 K⁺)およびナトリウムイオン(以下 Na⁺)分布を図 4.5 に示す。なお R_2O 量は,図 4.5 に示すコンクリート中の Na⁺ 濃度および K⁺濃度の測定値を用いて,次式により求めた。

$R_2O=Na_2O+0.658K_2O$ (kg/m³)

式 4.1

R₂O 量に関して,脱塩供試体は Na⁺が電気泳動したことにより R₂O 量のピークが鉄筋近傍 に形成されている。また,再アルカリ化供試体はコンクリート表面から内部に向かって多量 の K⁺が電気浸透したことにより,コンクリート表面付近で高い値を示していることがわか る。pH 分布に関して,Na⁺と K⁺の集積を勘案したコンクリート中の R₂O 量との間に相関関 係が認められ,脱塩供試体では,全体的に高い pH 分布を示し,特に鉄筋近傍の pH 値が最も 大きいことが分かる。一方,再アルカリ化供試体では,コンクリート表面付近の pH 値が最も 大きくなっている。また,3章で使用した供試体とは供試体の寸法が異なるものの,通電直後 におけるアルカリ金属イオン分布および pH 分布の分布傾向に大きな差はない。

(2) Cl⁻の分布

通電処理直後のコンクリート中におけるセメント量に対する全 Cl⁻量分布を図 4.6 に示す。 横軸は供試体コンクリート表面からの距離で、0 mm が通電表面を表している。また、図中に は鉄筋の配置場所を示している。本検討で使用したセメント量は 300kg/m³であり、練り混ぜ 水に混入した Cl⁻量は再アルカリ化配合で 2.0 kg/m³、脱塩配合で 8.0 kg/m³であることから、 通電前のセメント量に対する全 Cl⁻量は再アルカリ化供試体で約 0.7%、脱塩供試体で約 2.7%



である。通電後コンクリート中では通電時のカソード分極の影響により鉄筋近傍での OH⁻ 濃 度が一般的なコンクリートに比べ高く,一般的なコンクリートとは鉄筋の腐食発生限界が異 なると考えられる。上田の試算結果^Dによると、このような通電に伴う OH⁻ 濃度の増加を考 慮した通電後の鉄筋腐食発生限界全 Cl⁻量に関して, セメント量に対する値は約 0.43%であ ると報告している。脱塩供試体に関しては、初期混入 Cl⁻量が 8.0 kg/m³と非常に厳しい腐食 環境であったことから、コンクリート全体にわたって 0.43%を超える値を示している。ただ し、陰極であるコンクリート中の鉄筋付近から電流の流れるかぶり部分にかけて特に脱塩効 果が得られており,鉄筋近傍の Cl⁻量は通電前の約2.7から約0.5 まで低減され,通電前に比 べると著しく腐食環境が改善されていることが分かる。

再アルカリ供試体に関しては、通電前の値である約0.7からほとんど変化がみられないが、 コンクリート表面から 10mm 程度の表面付近においては若干の脱塩効果が確認できる。この ように脱塩工法に比べて脱塩効果が小さかった理由として、再アルカリ化の通電期間が脱塩 の 1/4 と短時間であること,再アルカリ化供試体に混入した Cl⁻濃度は除塩不足の海砂使用程 度を想定した比較的低い濃度であるために、その大部分がフリーデル氏塩のような固定塩分 であることが原因と考えられる。

通電処理直後のコンクリート中における全塩分量に対する可溶性塩分量の割合分布を図 4.7 に示す。可溶性塩分は、コンクリート中でイオンの形で遊離した Cl-であり、鉄筋腐食に 影響を及ぼし、一般にセメント硬化体中に固定化される塩分の割合は、セメント重量の0.4% 程度と言われている。図4.7より、脱塩処理によって 20~40mm 付近の可溶性塩分の割合が 小さく 0~20mm 付近の割合が大きくなっており, コンクリート内部の遊離塩分が通電に伴っ て表面から抽出されたことが分かる。本検討では、練り混ぜ水に混入する形で多量の NaCl を 混入したため,脱塩後も鉄筋近傍および鉄筋背面付近に,全塩分に対して 60%程度の可溶性 塩分が存在している。一方で、再アルカリ処理後も若干ではあるが、表面付近の割合が高く



80

なっており,通電に伴って自由塩分が遊離したものと考えられる。また,再アルカリ化供試体中においても細孔溶液中にある程度の自由 Cl⁻は残存しており腐食が生じる可能性がある。

また,経時的に Cl⁻およびアルカリイオンが濃度拡散によって再分布すること,および促進 劣化環境で外部から劣化因子が侵入してくることにより,コンクリート中の腐食環境は変化 するものと考えられる。イオンの再分布が鉄筋防食効果持続性に与える影響については,後 節で述べる。

4.4 促進劣化試験後におけるコンクリート中のアルカリ金属イオン分布と保護材の耐久性

(1) 表面保護材の外観

促進劣化試験後の保護材の外観を写真4.1に示す。写真上段は24ヶ月間の促進中性化を行った再アルカリ化供試体と無通電供試体であり、写真下段は48ヶ月間の塩水噴霧を行った脱 塩供試体と無通電供試体を示している。24ヶ月間の促進中性化を行った供試体について、外





写真 4.2 促進劣化試験後の供試体外観 (再アル:24 ヶ月の促進中性化後,脱塩:48 ヶ月間の塩水噴霧後)

観観察を行った結果,表面保護種類および再アルカリ化適用の有無に関わらず,すべての供 試体について,促進中性化前から大きな変化は見られなかった。これに対して,48ヶ月間の 塩水噴霧を行った供試体については,表面保護材の浮き,膨れ,剥離といった大きな変化は 見られないものの,PCMが若干白っぽく変色し,エポキシ樹脂表面の光沢が失われているこ とが分かる。ただし,このような変化は脱塩処理の有無に関わらず見られたことから,通電 に伴う劣化ではなく,表面から塩水噴霧されたことで保護材の表層が物理的に劣化したもの と考えられる。

(2) 促進劣化試験後におけるコンクリート中のアルカリ金属イオンの再分布

促進劣化試験後におけるコンクリート中のアルカリ金属イオン分布を図 4.8, 図 4.9 に示 す。図 4.8 は 24 ヶ月間の促進中性化を行った再アルカリ化供試体,図 4.9 は 48 ヶ月間の塩 水噴霧を行った脱塩供試体に関する結果である。

再アルカリ化通電供試体に関して,促進中性化 24 ヶ月後においてもコンクリート表面付近 で高い R₂O 量が確認できることから,表面保護材はコンクリート側からこのようなアルカリ の影響を,塗布直後から長期間受けているものと考えられる。シラン含侵供試体においては, 含侵層中にカリウムイオンが取り込まれ固定化したことで,表層に高濃度 R₂O 量が存在して いるものと推測される。また, PCM 塗布供試体およびエポキシ樹脂塗布供試体に関して,表



面保護材の塗布により促進中性化期間中の供試体の乾燥が抑制されたことでコンクリート内部が高い含水率で保持され、その他の供試体に比べアルカリイオンの再拡散が促進されたものと考えられる。これにより、かぶり部分にわたって 8kg/m³程度の R₂O 量が確認できる。

一方で脱塩通電供試体に関しては、表面保護材の有無・種類に関わらず R₂O が再拡散して いることが分かる。また、表面保護なしおよびシラン系含浸供試体は表面から NaCl が浸透し たことにより、表面付近の R₂O 量が大きくなっているものと考えられる。

(3) 促進劣化試験後における表面保護材の付着強度および遮水率

促進劣化試験後の表面保護材の付着強度を図 4.10 に,遮水率を図 4.11 に示す。図の凡例 は,頭の NR が再アルカリ化配合の無通電供試体,ND が脱塩配合の無通電供試体,R が再ア ルカリ化通電供試体,D が脱塩通電供試体を表す。また,-の後ろの英文字は保護材種を表 し,Pが PCM,E がエポキシ樹脂,S がシラン系含浸材を示している。

図 4.10 より,24 ヶ月間の促進中性化期間を行った再アルカリ化供試体に関しては,PCM とエポキシ樹脂ともに遮水率はおおむね 100%であるのに対し,付着強度は通電供試体のほうが無通電供試体に比べて小さな値を示しており,PCM で約 50%,エポキシ樹脂で 37%程度付着強度が低下している。また,付着試験時における PCM の界面の破壊形態は,無通電の場合は界面破壊または凝集破壊であったのに対して,再アルカリ化供試体では界面破壊であった(写真 4.3 参照)。すなわち,3章で示したように再アルカリ化によってコンクリート中に供給されたアルカリ金属イオンによって,保護材界面が早期に劣化し,界面破壊したと思われる。エポキシ樹脂に関しては,通電,無通電供試体共に母材破壊であった。一方で,シラン系含侵材の遮水率も再アルカリ化によって 20%程度低下している。透水比(R-S/NR-S (ml/ml))で表すと約 1.8 であった。第3章で述べた 28 日間のアルカリ裏水促進試験を行っ





た結果では, PCM で約40%, エポキシ樹脂で約32%付着強度が低下し,シラン系含浸材の 透水比は2.8 程度であり,本章の結果と同程度の付着強度の低下程度,透水性を示した。すな わち,再アルカリ化後に塗布した表面保護材の耐久性は,表面保護材塗布後から比較的早期 に低下し,その後の劣化速度は緩やかになるものと考えられる。

一方で48ヶ月間の塩水噴霧を行った脱塩供試体に関しては、PCMとエポキシ樹脂ともに 付着強度は無通電供試体に比べて通電供試体のほうが小さな値を示しており、PCMで約5%、 エポキシ樹脂で18%程度付着強度が低下している。また、保護材接着面の破壊形態は、PCM で界面破壊、エポキシ樹脂では母材破壊であった(写真4.4参照)。脱塩後に塗布したシラン 系含侵材の遮水率は約13%程度低下し、透水比(D-S/ND-S(ml/ml))は約1.3であった。第 3章で述べた28日間のアルカリ裏水促進試験の結果では、無通電供試体に対する付着強度の 低下割合はPCMで約53%、エポキシ樹脂で約32%であり、シラン系含浸材の透水比は2.8 程度と、本検討に比べて厳しい評価に見える。しかし、本検討では、塩水噴霧環境で保管し たことで、乾湿繰り返し作用を受けながら、表面から塩水が供給されたことにより、無通電 供試体の劣化も進んだことで、見かけ上、付着強度の低下割合および透水比が小さくなって いると考えられる。付着強度の値で比較すると、ほぼ同程度の値を示しており、3章の方法を 用いることで脱塩後に塗布した表面保護材の長期耐久性も評価可能なことが示唆された。

これらのことから,第3章の検討方法を用いることで初期のアルカリイオンや水分の影響 が表面保護材の付着性,遮水性に及ぼす影響について評価することができ,特に初期のアル カリの影響が大きい再アルカリ化後に塗布した表面保護材の耐久性については,比較的良好 な結果が得られる可能性が高いと考えられる。今後は評価精度を向上するために、通電後の 温度履歴や乾湿繰り返し、紫外線、ムーブメントが表面保護材の耐久性に及ぼす影響につい て検討を進めていく必要がある。



(4) 促進劣化試験後におけるシラン系含浸材の耐久性

シラン系含浸材を塗布した供試体について、含浸材塗布面に落とした水滴接触角の経時変 化を図4.12に示す。3章の結果と同様に、無通電供試体に比べて通電供試体は接触角が小さ く、シラン系含浸材による撥水効果が弱いことがわかる。特に再アルカリ化後に塗布した場 合、塗布直後の接触角が小さくなっている。ただし、促進中性化2ヶ月程度で無通電供試体 に近づくように接触角が回復し、その後24ヶ月間の促進中性化経過後には110°程度の接触 角を保持していることから、中性化環境において表面撥水性は持続しているものと考えられ る。 これに対して、脱塩供試体に関しては、通電の有無による差は小さいものの、塩水噴 霧開始後1ヶ月程度で接触角が大きく低下している。前述したように、塩水噴霧供試体は、 PCM 保護供試体およびエポキシ樹脂塗布供試体ともに、表面の変色や光沢消失が見られたこ とから、塩水噴霧の影響によって、コンクリート表面における表面の撥水性が急速に低下し たものと考えられる。

表面保護なし供試体とシラン含浸供試体について保護面から測定したコンクリート抵抗の 経時変化を図4.13に示す。左図は促進中性化を行った供試体,右図は塩水噴霧を行った供試 体の結果を示している。コンクリート抵抗はかぶり部分の電気抵抗の値を示しており,通電



抵抗の経時変化(保護面から測定)

の有無に関わらず,含浸材塗布供試体のコンクリート抵抗が保護なし供試体の抵抗値より大 きくなっていることが分かる。すなわち,このコンクリート抵抗の差がシラン系含浸材の保 護効果を表しているものと考えられる。

これより,促進中性化供試体については,再アルカリ化通電を行った場合にシラン含浸に よる保護効果(ここでは保護なし供試体とシラン含浸供試体のコンクリート抵抗の差と定義) が低下している。図4.11に示した遮水率も低下していたことから,3章で述べたように再ア ルカリ化後のコンクリート表面付近における高アルカリ状態によって含浸材の撥水層の形成 が阻害されたことが考えられる。また,この促進中性化供試体に関しては,図4.12に示した 水滴接触角の経時変化の傾向ともよく整合した結果が得られていると言える。 これに対して、塩水噴霧供試体に関しては、脱塩通電供試体のシラン含浸による保護効果 が無通電の場合よりも大きな値で推移しており、接触角の結果のように塩水噴霧に伴うコン クリート抵抗の大幅な低下も見られない。すなわち、塩水の噴霧による物理的作用を受ける ことで、水滴接触角で測定されるようなコンクリート表面の撥水効果は比較的早期に失われ るが、コンクリート内部の含浸層による表面保護効果は持続し、そのような効果は脱塩処理 を行っても短期間で低下することはないものと考えられる。また、3章の検討結果を踏まえる と、脱塩後表面含水率8%で施工すれば、無通電の場合と同程度の表面撥水性、遮水性が得ら れる可能性が示された。

4.5 通電直後のコンクリート中の鉄筋防食効果

通電処理前後における供試体中の鉄筋自然電位,分極抵抗およびコンクリート抵抗の測定 値を表4.2に示す。また,自然電位による腐食判定基準として ASTM C876-91 の腐食領域判 定基準を表4.3に示す。これによると,再アルカリ化供試体の通電前自然電位は非腐食領域, 脱塩供試体の通電前自然電位は腐食領域を示している。これは、コンクリートへの初期混入 Cl⁻濃度の違いに起因している。これに対して通電後の電位は大きく卑な値をとっている。こ れは、通電時に鉄筋を大きくカソード分極したことによる現象であり、脱塩工法の方が通電 期間が長いために電場の影響が強く残る結果となっている。

分極抵抗値は一般にこの値が小さいほど腐食速度が大きいことを示しているが,既往の検 討²⁾でも確認されているように,通電を行った直後にはカソード分極の影響を受け極端に小 さな値を示し,通電後の酸素の供給による鉄筋不動態被膜の再生とともに,徐々に大きくな るものと考えられる。**表 4.2**より,通電前の分極抵抗値は,**Cl**⁻濃度の違いにより,脱塩供試 体の方が再アルカリ化供試体よりも小さい値を示しているが,通電後はともに顕著に値が低 下している。コンクリート抵抗値も通電により減少しているが,再アルカリ化供試体の方が 大きく減少している。これは,電気浸透により電解液がコンクリート中に浸透したことが原 因と考えられる。

		自然電位	分極抵抗	コンクリート抵抗
		(V vs Ag/AgCl)	$(k\Omega)$	$(k\Omega)$
通電前	再邓州北	-0.071	0.994	0.252
	脱塩	-0.260	0.201	0.399
通電後	再邓州化	-0.666	0.003	0.130
	脱塩	-1.099	0.030	0.32

表 4.2 通電前および通電直後の電気化学的腐食指標測定値

電位 E (mV vs Ag/AgCl)	腐食判定		
E > -0.09	90%以上の確立で腐食は生じていない		
$-0.24 \leq \mathrm{E} \leq -0.09$	不確定		
E < -0.24	90%以上の確立で腐食が生じている		







写真4.4 中性化深さの測定状況

4.6 促進劣化環境下における表面保護供試体中の鉄筋防食効果

4.6.1 24ヶ月間の促進中性化を受けた再アルカリ化供試体の鉄筋防食効果

(1) 中性化深さ

24ヶ月の促進中性化試験を行った再アルカリ化供試体について、中性化深さを測定した結果を図4.14に示す。また、フェノールフタレインを散布した供試体割裂面の写真を写真4.4に示す。図4.14より、通電保護なし供試体は37.3mmと最も大きな中性化深さを示している。本検討において再アルカリ化処理を行った供試体においても中性化が進行した理由として、促進中性化環境で供試体内部の乾燥が進んだこと、および促進中性化試験の炭酸ガス濃度が5%と大気中の二酸化炭素濃度と比較して高かったことで、K₂CO₃と炭酸ガスの可逆反応が生じず中性化が進行した可能性が考えられる。したがって、雨がかりなどが無く、厳しい乾燥環境下にある構造物に対して再アルカリ化工法を適用する場合は、再アルカリ化によるpH保

持効果が十分に発揮されない場合があることに留意する必要があると考えられる。また、シ ラン含浸供試体は、通電の有無に関わらず、通電保護なし供試体と同程度の中性化深さを示 している。したがって、シラン系含浸材の塗布によって炭酸ガスの浸入を抑制することは期 待できないものと考えられる。一方、PCM 塗布供試体においては、無通電供試体に比べて通 電供試体の方が大きな中性化深さを示した。これは、4.4 (3) 節の付着試験の結果にも表れて いるように再アルカリ化によって接着性が低下した部位が生じ、炭酸ガス浸入抑制効果が低 下したことが原因と考えられる。エポキシ樹脂に関しては、再アルカリ化後 24 ヶ月間の促進 中性化期間を経ても良好な炭酸ガス侵入抑制効果を示した。

(2) 塩化物イオン分布および[Cl⁻]/[OH⁻]分布

促進中性24ヶ月後の再アルカリ化供試体中におけるセメント重量に対する全 CI-濃度分布 を図4.15に示す。また、全 CI-濃度に対する可溶性 CI-濃度の割合分布を図4.16に示す。こ れより、図4.14において顕著に中性化が確認された通電保護なし供試体、通電シラン含浸供 試体および無通電シラン含浸供試体は、中性化の進行に伴う塩化物イオンの濃縮によって中 性化領域に相当する35mm 程度までの全 CI-濃度が通電直後より減少しており、40~55mm 程 度までの CI-濃度が増加している。4.3 (2)節で述べたように、通電後の鉄筋腐食発生限界全 CI-量に関して、セメント量に対する値は約0.43%とされている¹⁾。中性化が進行した供試体 においては鉄筋近傍で1.2~1.3%程度の値を示しており、発錆限界値を大幅に超えているこ とが分かる。また、図4.16よりコンクリート表面付近では中性化ともなって自由 CI-が遊離 し、可溶性 CI-の割合が1.0程度まで増加しており、さらに時間が経過すると、これらの自由 CI-が濃度勾配に従って鉄筋方向へと拡散し、鉄筋腐食の進行が速まると考えられる。

一方で、PCM 塗布供試体に関しては、再アルカリ化後に塗布した場合に無通電の場合と 比較して若干の中性化進行が確認されており(図4.14)、0~10mm 付近の可溶性塩分が増加 していることが分かる。エポキシ樹脂塗布供試体は、再アルカリ化後に塗布した場合でも中 性化の進行が抑制されたため、表面近傍の全 Cl⁻濃度および可溶性 Cl⁻濃度は通電直後からほ とんど変化していない。また、PCM およびエポキシ樹脂塗布供試体において、通電直後に比 べて鉄筋近傍の可溶性 Cl⁻割合が小さくなっており、通電に伴って遊離した自由塩分が経時 的に濃度拡散したものと考えられる。

ここで,促進中性化 24 ヶ月後の再アルカリ化供試体中の[Cl⁻]/[OH⁻]を図 4.17 に示す。左 図が保護なしおよびシラン含侵供試体の結果を表しており,右図は PCM およびエポキシ樹脂 塗布供試体の結果を示している。[Cl⁻]/[OH⁻]を算出するにあたり,自由 Cl⁻のモル濃度は石 田らの検討結果³⁾を参考に,測定した可溶性 Cl⁻濃度から**式** 4.2 を用いて算出した。

$$C_{sol} = 2.07 \cdot C_{free}^{0.55}$$
式 4.2
ここで, $C_{sol} =$ 可溶性 Cl⁻ (% by mass of binder), $C_{free} =$ 自由 Cl⁻ (% by mass of binder)

OH⁻ は, pH を OH⁻ に換算し, コンクリート 1m³ 当たりの水の量を細孔溶液量と仮定して モル濃度を算出した。コンクリート 1m³ 当たりの水の量は, 単位容積質量 2300kg/m³ と絶乾





単位容積質量 2169kg/m³ の差と仮定した。通電後コンクリート中における鉄筋発錆限界に対 する [Cl⁻]/[OH⁻]閾値に関しては、議論の余地が残っているが、既往の研究結果^{4) 5) 6) 7) 8) よ りポルトランドセメントを用いた普通コンクリート中において、pH=12.4 であれば[Cl⁻]/[OH ⁻]閾値は少なくとも 1.7 程度以上になると考えられている。再アルカリ化処理後に再劣化が起 こっていない場合、コンクリート中の pH 値は 12.5 以上あると考えられるため(図4.4参照)、 本検討において[Cl⁻]/[OH⁻]=1.7 を閾値として仮定する。}

図4.17より、中性化が進行した保護なし供試体およびシラン含侵供試体において、鉄筋近

傍の[Cl⁻]/[OH⁻]は5~7程度を示しており,[Cl⁻]/[OH⁻]の値からも腐食環境下にあることが分かる。一方で,PCMおよびエポキシ樹脂塗布供試体に関しては,鉄筋近傍で1.0を下回っており,鉄筋防食効果が持続しているものと考えられる。

(3) 電気化学的モニタリングによる鉄筋防食効果の検討

促進中性 24 ヶ月間の電気化学的腐食指標の経時変化を図 4.18 に示す。なお、これらのデ ータは測定窓から測定したものである。

再アルカリ化供試体は無通電でも初期混入 Cl⁻濃度が低いこともあり,促進中性化開始直 後において腐食傾向は認められず,通電の有無,表面保護種類によらず,ASTM C876の判定 基準における非腐食領域に相当する-0.09V vs Ag/AgCl よりも貴な自然電位を示している。一 方,促進中性化 24 ヶ月時点における自然電位に関して,通電の有無に関わらず保護なし供試 体およびシラン含浸供試体においては,中性化の進行に伴い腐食領域に相当する-0.24 V よ



図4.18 再アルカリ化供試体における 促進中性化24ヶ月間の電気化学的腐食指標の経時変化

りも卑な電位を示している。また、保護なし供試体で比較すると、通電供試体は無通電供試体に比べ電位の卑化が遅いことが分かる。これは、再アルカリ化によって浸透した炭酸カリウムと炭酸ガスが可逆平衡反応し、コンクリートの pH 値が 10.7 程度で保持され、腐食開始までの時間が伸びたものと考えられる。PCM 塗布供試体及びエポキシ樹脂塗布供試体は、通電の有無に関わらず、促進 24 ヶ月時点においても非腐食領域に相当する-0.09 V よりも貴な電位を保持しており、防食効果が持続していることが分かる。これらの結果は前述した中性化深さの結果や Cl-分布状況の結果と整合する。

通電供試体の分極抵抗は,通電の影響が大きく,24ヶ月間の促進中性化期間中に徐々に大 きくなっているものの,通電直後の小さな値を保持した状態が続いている。特に,中性化が 確認された保護なし供試体とシラン含侵供試体の分極抵抗が,PCM およびエポキシ樹脂塗布 供試体の値より大きくなっており,再アルカリ化後の腐食環境を正確に評価できていない可 能性がある。一般的に,脱塩や再アルカリ化を行った供試体中の鉄筋は通電時に大きくカソ ード分極されるために-1V程度の卑な電位を取り,分極抵抗は非常に小さな値となり,その 後の酸素の供給に伴って不動態被膜が再生し,自然電位と分極抵抗が大きくなると考えられ る。本検討結果では自然電位は十分に貴変しているにも関わらず,無通電供試体に比べて分 極抵抗が非常に小さな値を保持している。この原因として,通電前の鉄筋腐食状態の影響が 考えられる。すなわち,今回の再アルカリ化供試体は,初期混入 Cl⁻量が 2.0 kg/m³と小さい 上に,中性化もしていない比較的健全なコンクリートであったため,再アルカリ化処理が過 防食状態を形成し,鉄筋に与える電場の影響が増幅されカソード分極の影響が長期間持続し たものと思われる。

無通電供試体の分極抵抗に関して,保護なし及びシラン含浸供試体の分極抵抗は自然電位 の卑化が開始されるまで増加しているが,卑化と同時期に分極抵抗が低下していることが分 かる。これは,促進初期においては中性化環境下でコンクリート内部の乾燥に伴い分極抵抗 が増加し,中性化が進行し塩分が内部方向へ移動したことで鉄筋不働態皮膜が破壊されると 分極抵抗が低下したと考えられる。一方で,PCM およびエポキシ樹脂を塗布した場合,コン クリート内部の乾燥が抑制され,分極抵抗値はほとんど変化していないものと考えられる。 コンクリート抵抗については,コンクリートの含水状態に影響を強く受け,特に保護なし供 試体とシラン含浸供試体は乾燥が進んでいることが分かる。

これらの供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を腐食面積率と合わせて**写真 4.6**に示す。 自然電位の測定結果と整合しており,通電の有無に関わらず保護なし及びシラン含侵供試体 で塩害と中性化の複合劣化とみられる腐食が確認できる。シラン系含浸材を塗布した場合, 通電供試体の腐食面積率が無通電と比較して大きい理由としては,再アルカリ化処理により コンクリート中の含水率が高い状態で促進中性化を開始したため,表面から乾燥が進むこと で中性化の進行および塩分の濃縮が生じ,鉄筋付近では含水率が高い状態が保持され腐食が 進行しやすい環境が形成されたことが考えられる。

一方で,分極抵抗から算出した通電供試体の推定腐食量を図4.19に示す。推定腐食量は以下の式4.3を用いて算出した。





図 4.20 アノード分極曲線 から算出した推定腐食量



写真4.6 24ヶ月間の促進中性化を行った再アルカリ化供試体中の鉄筋腐食状況 [()内の数字は鉄筋腐食面積率を表す]

V_corr: 推定腐食量(mg/cm²), m: 鉄の原子量(=55.8g), R_ct: 分極抵抗(Ω・cm²),
 K: 定数(=0.026V), z: 鉄のイオンの価数(=2), F: ファラデー定数(=96500)

図 4.19 に示す推定腐食量と、写真 4.6 に示す腐食面積率との相関は小さいことが分かる。 この理由として、分極抵抗はアノード反応とカソード反応の生じにくさが合わさって測定さ れており、通電後のように鉄筋全体を大きくカソード分極した場合、カソード反応抵抗が極 端に小さくなることで分極抵抗も小さな値として評価されてしまったことが考えられる。また表面保護材を施工した場合,保護材の性能によって鉄筋近傍への酸素や水分の供給量が異なり,通電後の不働態被膜の形成状態が異なっているものと考えられる。

そこで、通電後のカソード分極の影響を考慮するために、アノード分極曲線から推定腐食 量を算出した。アノード分極曲線は1ヶ月毎に測定を行った。アノード分極曲線において、 自然電位より+30mV および+60mV 印加した2 点を結ぶ直線と自然電位の交点にあたる電流 密度が腐食電流密度 Icorr に相当すると考えられ、アノード分極曲線より求めた Icorr を式4.3 に代入し推定腐食量を求めた。算出した推定腐食量を図4.20 に示す。これより、PCM およ びエポキシ樹脂の推定腐食量が保護なしおよびシラン含侵供試体より小さく評価されており、 分極抵抗より算出した推定腐食量に比べて、PCM やエポキシ樹脂による中性化抑制効果を反 映することが可能となった。通電後に再劣化が生じ腐食が発生した後の劣化速度をより正確 かつ定量的に評価するためには、非破壊手法を用いたより精度の高い腐食速度の評価方法に ついて今後検討を進める必要がある。

3章の検討結果も踏まえると、再アルカリ化後に適する表面保護材は、表面被覆材であり、 特に良好な劣化因子侵入抑制効果および付着強度を有するエポキシ樹脂系が望ましいと考え られる。シラン系含浸材は、中性化が促進される可能性があり、除塩不足の海砂を使用され ている場合、鉄筋腐食も促進され補修効果持続性が低下する可能性があると言える。

4.6.2 48 ヶ月間の塩水噴霧を受けた脱塩供試体の鉄筋防食効果

(1) Cl⁻の分布と[Cl⁻]/[OH⁻]分布

48 ヶ月間の塩水噴霧を受けた脱塩供試体に関して,塩水噴霧 48 ヶ月後のコンクリート中 全塩化物イオン濃度分布を図 4.19 に示す。左図は通電供試体の結果を,右図は無通電供試体 の結果を表している。通電供試体に関しては,無通電同様に表面保護をしないケースで多量 の Cl⁻の浸透が確認でき,鉄筋近傍では初期塩分量である 8.0kg/m³に相当する 2.7%程度まで Cl⁻量が増加しており,鉄筋腐食環境が形成されている。また,塩水噴霧環境下での中性化の 進行に伴う塩分の濃縮,塩水の洗い流し効果による表面 Cl⁻量の減少によって 20mm 付近に ピークが表れているものと思われる。

一方で,脱塩後に表面保護を行った場合,表面保護種によらず0~20mmにおけるCl⁻量が 若干増加しているものの,表面保護をしない場合と比べると顕著にCl⁻の浸透が抑制されて いる。シラン系含浸供試体については,保護なし供試体同様に中性化および洗い流し効果に よって表層のCl⁻量が減少しているものの,内部へのCl⁻浸透量は保護なしよりも小さくなっ ている。また,無通電供試体においても初期塩分から2%程度Cl⁻が浸透しており,脱塩後に 塗布した場合においても無通電と同程度のシラン系含浸材によるCl⁻抑制効果が期待できる。 PCMとエポキシ樹脂に関しては,脱塩後に塗布した場合,表面付近では通電直後から1.5% 程度Cl⁻量が増加しているものの,表面保護なしと比較すると塩分の浸透は抑制されている。 無通電の場合は,初期塩分の2.7%程度からほとんど変化していないことから,脱塩後に塗布 したPCMおよびエポキシ樹脂の塩分浸透抑制効果は,無通電に比べて若干低下するものと考



えられる。

塩水噴霧 48 ヶ月後の通電供試体中の可溶性 Cl⁻/全 Cl⁻ 比の分布を図 4.20 に示す。左図は 通電供試体の結果を,右図は無通電供試体の結果を表している。

保護なし供試体は外来 Cl⁻が供給されたことで表面付近の可溶性 Cl⁻の割合が 0.7~0.8 程度 まで増加し,鉄筋近傍においても 0.7 程度を示しており,腐食に起因する可溶性 Cl⁻の割合が 非常に高くなっている。また,シラン含侵供試体についても,外来 Cl⁻の供給および中性化の 進行によって表面付近で急激な Cl⁻の濃度勾配が生じており,経時的に内部方向に拡散し鉄 筋近傍の可溶性 Cl⁻濃度が増加する可能性がある。

一方で、PCM およびエポキシ樹脂塗布供試体に関しては、表面付近で若干の増加が確認で きるものの、20~80mm にかけて通電直後とほぼ同じ割合を示している。したがって、PCM やエポキシ樹脂を塗布し外部からの CI⁻ の供給を抑制した場合、脱塩直後に可溶性 CI⁻ と固 定 CI⁻ の平衡状態が形成され、その平衡状態が経時的に変化する可能性は小さいものと考え られる。この理由としては、通電直後の可溶性 CI⁻の濃度勾配が小さいこと、脱塩に伴うカソ ード分極により OH⁻が生成され、細孔溶液中の pH が上昇し細孔内が負に帯電することで電 気二重層の電気的反発力が大きくなったこと¹⁾ が考えられる。

EPMA 面分析によって測定した脱塩供試体中の Cl⁻濃度分布画像を図4.21 に示す。また, EPMA 面分析結果より算出した Cl⁻濃度分布を図4.22 に示す。図4.19 に示した Cl⁻濃度分布 より脱塩直後の 0~10mm 位置の Cl⁻濃度は約 3kg/m³程度であった。したがって, EPMA 面分 析の結果からは,保護材種で若干のばらつきがあるものの,表面保護材を併用した場合,塩 水噴霧 48 ヶ月後において保護材は高い遮塩性を有しており通電直後の Cl⁻濃度=3kg/m³から ほとんど Cl⁻濃度は変化していないと考えられる。これは,図4.19 等に示した 4.2.5 節の方法 で分析した Cl⁻濃度の傾向とは異なる。この理由として,脱塩直後の Cl⁻濃度の分布が各供試 体でばらつきがあったこと,分析時の研磨や抽出方法等によって検出される Cl⁻濃度が異な ったこと等が考えられる。4.2.5 節の方法で分析した結果は,表面保護材に対して比較的厳し い評価を行った場合として,EPMA の結果は表面保護材の遮塩性が低下しなかった場合とし て考えることが出来る。

塩水噴霧48ヶ月後のコンクリート中のpH分布を図4.23に示す。脱塩後48ヶ月経過した コンクリート中鉄筋近傍における pH は表面保護の有無に関わらず、無通電と同程度の値で ある12.5程度で保持され平衡状態に達したものと考えられる。

塩水噴霧 48 ヶ月後の脱塩後コンクリート中の鉄筋位置における[Cl⁻]/[OH⁻]を図 4.24 に示 す。鉄筋位置は[Cl⁻]/[OH⁻]を算出方法は 4.6.1 節と同様の方法を用いた。4.6.1 節でも述べた ように既往の研究結果 ^{4) 5) 6) 7) 8)}より 腐食発生限界としての[Cl⁻]/[OH⁻]閾値は 1.7 程度と考 えられる。これより,脱塩後に表面保護材を塗布した場合においても,[Cl⁻]/[OH⁻]は 1.7 以上 を示している。これは、本検討においては劣化を促進させるため初期 Cl⁻ 量を多量に混入し ていること,図 4.20,図 4.23 に示したように可溶性 Cl⁻は再分布せず OH⁻は再分布したこと により、結果として[Cl⁻]/[OH⁻]の値が大きくなったものと考えられる。したがって、本検討 においては脱塩後に表面保護材を塗布した場合においても、鉄筋腐食が生じる危険性がある といえる。



図 4.21 EPMA 面分析によって測定した脱塩供試体中の Cl⁻濃度分布画像



図 4.22 EPMA 面分析結果より算出した脱塩通電供試体の Cl⁻濃度分布



図4.23 脱塩供試体中におけるpH分布



(2) Cl⁻のみかけの拡散係数

ここでは、脱塩工法の適用や表面保護材の塗布がコンクリート中の塩分の浸透性にどのよう な影響を与えるか評価するため、CI・のみかけの拡散係数を用いて議論する。CI・のみかけの拡 散係数の算出にあたり、守分ら⁹⁰の検討を参考に1次元の差分法を用いて塩水噴霧期間中の CI・の再分布を予測した。予測した塩水噴霧48ヶ月後のCI・分布と実験より得られたCI・分布が 近似するよう最小二乗法を用いて、表面塩化物イオン C₀およびCI・のみかけの拡散係数Dを 求めた。用いた塩化物イオン浸透モデルの概念図を図4.25に示す。この解析は以下の2つの 条件の下に行った。

①初期値は,通電供試体に関しては通電直後の Cl⁻ 分布を,無通電の場合は初期混入 Cl⁻ 量を用いる。

② 内部の Cl⁻ は各要素間の濃度勾配に従って拡散する。

算出した予測値と実験値の一例を通電保護なし供試体を例に挙げて、図4.26に示す。これ より、予測値と実験値は若干の誤差があるものの、全ての試算結果において相関係数は0.85 以上を示しており、比較的良好に予測できているものと考えれる。また、得られた CI・のみか けの拡散係数を図4.27に示す。本検討では、表面保護材を塗布した場合、見かけの拡散は表 面保護材とコンクリートの平均的な見かけの拡散として算出した。保護なし供試体に関して は、脱塩処理によって無通電の場合と比較して拡散係数が大きくなっている。脱塩後に表面 保護材を塗布した供試体の拡散係数について、表面保護材種の違いはほとんど見られないが、 表面保護を行わない場合と比較して1/4 程度拡散係数が低減されている。また、表面保護材 を塗布した供試体の拡散係数に関しては、通電供試体の方が大きな値を示しており、通電の 影響を受け塩化物イオンの浸透抑制効果が無通電の場合に比べ低下したものと考えられる。



図 4.25 差分法による Cl⁻の拡散予測の概念図



(3) 電気化学的モニタリングによる鉄筋防食効果の検討

48 ヶ月間の塩水噴霧を受けた脱塩供試体に関して,塩水噴霧期間中における電気化学的腐 食指標経時変化を図4.28 に示す。左図が通電供試体,右図が無通電供試体の結果を表してい る。

(i)通電供試体

脱塩通電供試体に関しては、通電期間が8週間と再アルカリ化処理より長いこともあり、 通電の影響が強く表れている。すなわち、塩水噴霧開始時においては、表面保護種類に関わ らず、-1 V 程度の自然電位を示している。ただし、塩水噴霧開始後、保護なし供試体とシラ ン含浸供試体については、速やかに電位が貴変し、無通電供試体よりも貴な電位で安定して いる。これらの2種類の供試体は、通電後の供試体表面からの酸素供給が容易であることか ら、通電後の鉄筋不動態被膜の再生が速やかに進行したものと考えられる。これらの供試体 に遅れて、PCM 保護供試体の電位上昇が始まり、約270日の塩水噴霧期間を経て無通電供試 体より貴な電位に到達している。さらに遅れてエポキシ樹脂塗布供試体の電位がゆっくり貴 変し、約660日の塩水噴霧期間を経て無通電供試体より貴な電位に到達している。このよう な鉄筋再不動態化の速度は、表面保護材料の酸素透過性能の影響を強く受けているものと考 えられ、エポキシ樹脂のような酸素透過性の小さい材料を塗布した場合には、酸化被膜であ る鉄筋不動態被膜の再生に長い時間がかかることがわかる。その後、塩水噴霧約800日目か ら保護なし供試体の電位が腐食領域を示した。エポキシ樹脂供試体およびPCM 供試体は-0.2V 程度の不確定領域を推移し、シラン含侵供試体はそれより若干貴な値を保持している。

ここで,脱塩後1ヶ月の時点で測定したカソード分極曲線を図4.29に示す。一般にカソード分極曲線は,鉄筋近傍の酸素供給状況に依存し,酸素供給量が大きくなると,曲線は電流値の大きい右側にシフトし,曲線の変曲点より右側の直線部分の傾きがカソード分極抵抗に相当する。図4.29より,エポキシ樹脂やPCMを塗布した場合,保護なしやシラン含侵供試



図4.28 48ヶ月間の塩水噴霧期間中における電気化学的腐食指標の経時変化



図 4.29 脱塩1ヶ月後に測定したカソード分極曲線

体に比べて、鉄筋近傍の溶存酸素量が小さくなっていると推測される。

これに対して、促進期間初期の分極抵抗やコンクリート抵抗は、促進中性化の場合と同様 に通電の影響によって小さい値を持続的に示している。分極抵抗に関しては、促進期間の増 加と共にシラン含浸供試体の値が比較的大きくなっており、前述したような鉄筋不働態皮膜 の再形成に加え、含浸材の保護効果により水分及び Cl⁻浸透が抑制されたものと考えられる。

また,48ヶ月時点の分極抵抗に着目すると、シラン系含侵材、PCM、エポキシ樹脂、保護なしの順で大きくなっており、脱塩後に表面保護を施工することで、腐食を完全に停止することは難しいが、表面保護を併用しない場合より腐食速度を低減することができることが分かる。

(ii) 無通電供試体

一方,無通電供試体は、初期混入 Cl⁻量が 8.0 kg/m³と大きいため塩水噴霧開始時から鉄筋 腐食状態であり、自然電位は ASTM 判定基準の腐食領域である-0.24V vs Ag/AgCl よりも卑な 値となっている。また、塩水噴霧期間中の自然電位については、表面保護種類による影響は 見られないが、分極抵抗に関しては、シラン含浸供試体やエポキシ樹脂塗布供試体の値が保 護なし供試体の値よりも大きい傾向を示している。一般に多量の Cl⁻を内在する状態で表面 保護を行っても大きな鉄筋防食効果は期待できないが、この 2 種類の表面保護供試体に関し ては、保護なし供試体よりもコンクリート抵抗が増大しており、このことが鉄筋腐食速度の 逆数に比例する分極抵抗の増大に寄与したものと考えられる。シラン含浸供試体については コンクリートの乾燥を促進したこと、エポキシ樹脂塗布供試体については塩水の浸入を遮断 したことが、コンクリート抵抗の増大につながったものと推定される。これに対して、PCM 保護供試体については、シラン含浸供試体のようなコンクリートの乾燥促進は期待できず、 エポキシ樹脂塗布供試体ほどの遮水性も無いことから、保護なし供試体と同程度の分極抵抗 やコンクリート抵抗値を示したものと考えられる。

(iii) 実測した腐食減量と分極抵抗より算出した推定腐食量

塩水噴霧48ヶ月後のコンクリート中鉄筋の腐食状況を写真4.7に示す。通電の有無・表面 保護材種に関わらず全ての供試体で鉄筋腐食が確認された。これは、図4.19~図4.24 で示 した CI 濃度や OH 濃度の結果と整合する。通電供試体 (D シリーズ)は、暴露面側で主に腐 食が進行しているのに対し、無通電供試体は鉄筋両面で同程度の割合で腐食が進行している。 また、通電表面保護なし供試体では、表面保護を塗布した場合に比べて局部的に腐食が進行 していることが分かる。これらの鉄筋の腐食減量と48ヶ月間の分極抵抗から式4.3を用いて 算出した推定腐食量を図4.30 に示す。図4.30 より、推定腐食量と実測した腐食減量の傾向 には良好な相関性があることが分かる。また、腐食減量から、本検討のように脱塩後も残留 塩分が多量に存在する場合、表面保護を併用した場合でも腐食の進行を抑制することは出来 ないことが分かる。ただし、遮塩性と乾燥促進効果を持つシラン系含浸材を塗布した場合は 若干腐食速度を抑制出来るものと考えらえれる。



写真 4.7 塩水噴霧 48 ヶ月後のコンクリート中鉄筋の腐食状況



図 4.30 48 ヶ月間の塩水噴霧を受けた供試体中の鉄筋腐食減量および推定腐食量

4.7 本章のまとめ

本章における再アルカリ化後または脱塩後に表面保護材を併用した場合のコンクリート中の鉄筋防食効果に関する検討より得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 24 ヶ月間の促進中性化を行った供試体について、外観観察を行った結果、表面保護種類 および再アルカリ化適用の有無に関わらず、すべての供試体について、促進中性化前か ら大きな変化は見られなかった。
- (2) 48 ヶ月間の塩水噴霧を行った供試体の外観については、表面保護材の浮き、膨れ、剥離 といった大きな変化は見られないものの、PCM が若干白っぽく変色し、エポキシ樹脂表 面の光沢が失われていた。
- (3) 再アルカリ化後 24 ヶ月間の促進中性化を行った供試体中において,表面付近では高濃度の K⁺が持続的に存在していた。またこのようなアルカリの影響を受け, PCM の付着強度は約 50%,エポキシ樹脂の付着強度は 37%程度,シラン系含侵材の遮水率は 20%程度低下した。
- (4) 48 ヶ月間の塩水噴霧を行った脱塩供試体に関しては, PCM で約 5%, エポキシ樹脂で 18%程度付着強度が低下したものの,良好な付着強度を示した。シラン系含侵材の遮水 率についても無通電と同程度の値を示した。
- (5) シラン系含侵材の保護効果についてコンクリート抵抗から推定できる可能性があり、シ ラン系含侵材の保護効果は表面の撥水性が消失しても持続するものと考えられる。
- (6) 3 章で検討したアルカリ裏水促進試験を行った後の表面保護材の劣化度合いと,24 ヶ月 間の促進中性化または48ヶ月間の塩水噴霧試験後の劣化度合いは同程度であり、アルカ リ裏水促進試験によって通電後に適用可能な表面保護材を選定可能になるものと考えら れる。
- (7) 再アルカリ化の有無に関わらず、シラン系含浸材を塗布した供試体は24ヶ月間の促進中 性化後、保護なし供試体と同程度の中性化深さを示しており、シラン系含浸材の塗布に よる炭酸ガス浸入抑制効果は期待できないことが分かった。一方で、再アルカリ化後に PCM またはエポキシ樹脂を塗布した場合、中性化の進行を抑制できることが分かった。
- (8) 48 ヶ月間の塩水噴霧を行った脱塩供試体に関して、表面保護を塗布することで塩分の再 浸透を抑制することができ、見かけの拡散係数は保護なしに比べて 1/4 程度まで低減さ れた。
- (9) 48 ヶ月間の塩水噴霧試験後,脱塩後コンクリート中の pH は表面保護材の併用にかかわ らず 12.5 程度を示した。また,表面保護材によって表面からの塩分の供給を抑制した場 合,全塩分に対する可溶性塩分の割合は通電直後からほとんど変化しなかった。
- (10)分極抵抗より算出した推定腐食量に関して、実測した腐食減量と傾向は比較的一致した が、カソード分極の影響により実測値より小さな値を示した。アノード分極曲線から腐 食量を推定することで、カソード分極の影響を考慮できる可能性がある。

参考文献

- 1) 上田隆雄:塩害により劣化したコンクリート構造物へのデサリネーションの適用に関する研究,京都大学学位論文,1999年
- 2) 2) 宮川豊章,上田隆雄:コンクリート構造物へのデサリネーションおよび再アルカリ化 工法の適用,コンクリート工学, Vol. 38, No. 3, pp. 9-16, 2000.3
- 3) 石田 哲也, 宮原 茂禎, 丸屋 剛: ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタル の塩素固定化特性, 土木学会論文集E, 2007, 63 巻, 1 号, p. 14-26
- 4) 米澤敏男, Ashworth, V. and Procter, R., P., M.: コンクリート中の鋼材腐食における塩素イオンの限界量について, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.141-144, 1986 年
- 5) Page, C.L. and Havdahl, J.: Electrochemical Monitoring of Corroson of Steel In Microsilica Cement Pastes, Materiaux et Constructions, Reunion Internatioale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, Vol.18, No.103, pp.41-47, 1985
- 6) Syed Ehtesham Hussain, Ahmad S. Al-Gahtani, and Rasheeduzzafar : Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete. ACI Materials Journal. November-December. 1996
- 7) 北後征雄, 芦田公伸, 菊田憲弘, 宮川豊章: 電気化学的手法によるコンクリートの改質と 補修効果に関する実証的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.101-115, 2000 年 2 月
- 8) 芦田 公伸:セメント硬化体やグラウトの塩分量と鋼材発錆,コンクリート工学,2005,43 巻,6 号, p. 11-13
- 9) 守分敦郎,長滝重義,大即信明,三浦成夫:既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡 散過程より評価される表面処理工法,土木学会論文集,No.520/V-28,pp.111~122,1995.8
- 10) 物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会:委員会報告書, 2015.09

第5章 通電後の表面保護の併用を考慮した補修効果持続期間の推定方法の提案

5.1 はじめに

第4章において、中性化環境にあり、かつ除塩不足の海砂を使用したコンクリートであっても再アルカリ化処理と被覆系の表面保護工法を併用することで十分な防食効果が得られることが分かった。また、コンクリートの含有 Cl⁻が 8.0kg/m³と非常に厳しい腐食環境にあっても、表面保護工法を併用することで脱塩処理後の塩分の再浸透を抑制できることが分かった。したがって、外部からの劣化因子の侵入が想定される環境下では、通電後の表面保護工法併用により、再アルカリ化後の炭酸ガスの侵入抑制や脱塩後の Cl⁻浸透抑制効果によって補修効果持続期間が増加するものと考えられる。

第4章の結果から,通電後の分極抵抗と鉄筋防食効果の間には相関性があるものの,通電 に伴うカソード分極の影響により正確かつ定量的に評価することは現時点では難しいことが 示された。そこで、本章では再アルカリ化工法および脱塩工法適用後の補修効果持続性を数 値解析による各種イオン濃度の再分布予測によって推定する方法を提案する。

5.2 通電後の限界状態の定義

通電後の補修効果持続期間を推定するにあたり,通電後の RC 構造物の限界状態を図 5.1 の様に定義する。一般に,再アルカリ化工法および脱塩工法の適用範囲は,予防的補修も含 めると,潜伏期から加速期前半までとされている。この範囲内で通電による補修を行った場 合,鉄筋近傍の OH 濃度の増加または脱塩効果により補修後の RC 構造物の状態は潜伏期程 度まで回復することが期待されている。その後,外部から劣化因子が再侵入し限界値を超え た場合,再び鉄筋腐食が生じると考えられる。第4章の結果を踏まえると,分極抵抗等の電 気化学的モニタリング結果から通電後の腐食速度を正確に評価することは現時点では困難で あり,腐食開始後の再劣化速度を定量的に評価することは難しいと言える。そこで,本検討 では補修後の限界状態を,通電後に鉄筋腐食が開始した時点として定義することとした。



5.3 通電後の補修効果持続期間の推定

5.3.1 再アルカリ化後の補修効果持続期間の推定

本検討においては、再アルカリ化後の補修効果持続期間は以下のように定める。2013 年制 定コンクリート標準示方書[維持管理編]を参考にすると、中性化による鉄筋腐食は中性化が 鉄筋位置に達する前に生じることが多く、腐食開始時期はかぶりと中性化深さの残り部分で ある中性化残りによって整理されており、塩分無混入の場合中性化残り 10mm で腐食が開始 するとされている。また、一般に Cl⁻が存在しない場合、pH=10.5 程度でコンクリート中の鉄 筋に不働態被膜が形成され防食されると考えられている。これらのことを踏まえ、本検討で は、再アルカリ化工法適用後の限界状態すなわち鉄筋腐食開始時点は、鉄筋位置より 10mm コンクリート表面側の pH が 10.5 程度を下回った時点と定義した。

再アルカリ化後のコンクリート中では、表面から侵入してきた炭酸ガスと再アルカリ化に よって供給された K⁺イオンが反応し、K₂CO₃+CO₂+H₂O \leftrightarrow 2KHCO₃の平衡状態を形成すること で pH が 10.7 程度で保持されることが知られている。この平衡状態を形成するために必要な K⁺量は、コンクリートの細孔空隙量を 150L/m³と仮定すると約 5.9kg/m³と考えられる²⁾。

これらのことを踏まえ,再アルカリ化後の補修効果持続期間の推定方法の概念図を図 5.2 に示す。再アルカリ化後の補修効果持続期間は,鉄筋位置より10mm 表面側(図中緑線)の K⁺量が約 5.9kg/m³(図中赤線)を下回るまでの期間 t と定義した。解析に使用する K⁺の拡散 係数は,実験で得た再アルカリ化直後の K⁺分布を初期値として,4章で用いた1次元の差分 法を用いて予測した K⁺分布が実験で得た促進中性化 24 ヶ月後の K⁺分布と近似するように最 小二乗法によって求めた。算出した K⁺の拡散係数および実験で得た再アルカリ化直後の K⁺ 分布を用いて,同様に1次元の差分法により再アルカリ化後の補修効果持続期間 t を予測す る。





図 5.2 再アルカリ化後の補修効果持続期間の推定方法の概念図

図 5.3 100 年間にわたる中性化進行予測

ここで、4章の結果より再アルカリ化後に PCM またはエポキシ樹脂を塗布した場合、長期 にわたって中性化の進行を抑制することができると考えられる。4章の結果をもとに、√t則 を用いて中性化の進行予測行った結果を図 5.3 に示す。

 $y = b\sqrt{t}$ 式 5.1 ここに、y:中性化深さ (mm)、t:中性化期間 (day)、b:中性化速度係数 (mm / \sqrt{day})

中性化速度係数については、促進中性化 24 ヶ月後の中性化深さから求めた。ただし、促進 中性化試験の炭酸ガス濃度は 5%であるのに対し、空気中の炭酸ガス濃度は 0.03%と異なる。 そこで、魚本らの検討³⁾を参考に、炭酸ガス濃度の影響を考慮し中性化速度係数を算出した。 本検討結果において、エポキシ樹脂塗布供試体の中性化深さが約 0mm であり中性化速度係数 を算出することが不可能であったことから、再アルカリ化後にエポキシ樹脂を塗布するケー スは除外して考えることとした。図 5.3 より、PCM を塗布した場合、PCM の耐久性が保持さ れる限り 100 年後も中性化深さを 3mm 程度に抑制できると推定された。すなわち、PCM や エポキシ樹脂を塗布することで再アルカリ化後の中性化による鉄筋腐食を防止することが可 能であると考えられる。一方で、表面保護を併用しない場合およびシラン系含浸材を塗布す る場合については、30 年程度で中性化深さが 10mm 程度まで進行しており、中性化に伴う鉄 筋腐食が再発生する可能性が示唆された。そこで、保護なしおよびシラン系含浸材を併用し た場合について、K⁺分布の拡散予測から再アルカリ化後の補修効果持続期間を推定すること とした。

K⁺分布の拡散予測結果の例として,表面保護材を施工していない場合の100年間にわたる K⁺分布の拡散予測を図5.4に示す。対象とする構造物は,中性化による劣化が確認された山 陽新幹線の高架橋コンクリートスラブを想定し,かぶり25mmのRC構造物とした。図5.4 より,再アルカリ化後に表面保護材を施工しない場合,約40年で10mm位置付近のK⁺量が 5.9kg/m³を下回る結果となった。同様に,シラン系含浸材を併用した場合,約40年程度補修 効果が持続すると推定された。したがって,本検討と同程度のコンクリートを使用したかぶ り 25mmの RC 構造物において,再アルカリ化後約 40 年は補修効果が持続するものと考えら





れる。一方で、約 40 年以上使用することを想定した場合、PCM やエポキシ樹脂といった表面被覆材の中から耐湿潤・耐アルカリ性の高いものを選定し併用することが望ましいと考えられる。

5.3.2 脱塩後の補修効果持続期間

本検討においては、脱塩後の補修効果持続期間は以下のように定める。脱塩後の鉄筋腐食 発生限界 Cl⁻濃度は、脱塩に伴うカソード分極によって鉄筋近傍で高アルカリ環境が形成さ れることで、一般的な普通コンクリートの値よりも高くなると言われている。芦田の検討⁴⁾ を参考にすると、pH=12.4 のコンクリート中の鉄筋腐食発生限界地としての[Cl]/[OH]の閾値 は 1.7 程度としている。4 章の結果より、脱塩後コンクリート中の pH 値は 12.4 程度で平衡状 態を形成したことから、脱塩後の閾値も[Cl]/[OH]=1.7 と仮定した。pH=12.4 のとき、OH⁻濃度 は 0.025mol/L となり、鉄筋腐食発生限界全 Cl⁻濃度は約 2.5kg/m³ と算出される。したがって、 脱塩後の補修効果持続期間は鉄筋位置での Cl⁻濃度が 2.5kg/m³ を超えるまでの期間として推 定する。

脱塩後にコンクリート中に浸透した全 CI-濃度は、第4章で得た見かけの CI-拡散係数を用 いてフィックの拡散則より算出した。通電に伴う表面保護材の経時的な耐久性低下の影響に ついては、見かけの拡散係数を通電直後から48ヶ月間の塩水噴霧期間中にわたる平均的な拡 散係数を用いることで考慮することとした。表面 CI-濃度は、2013 年制定コンクリート標準 示方書[維持管理編]を参考に、飛来 CI-量の多い汀線部として 9.0kg/m³を用いた。また、脱塩 直後の CI-分布は、一般的に脱塩によってコンクリート中の CI-を完全に除去することはでき ず、ある程度の CI-が未抽出となること、およびこれまでの報告結果⁴⁾を参考に表面で 2.0kg/m³、 鉄筋位置で1.0 kg/m³となる直線分布として仮定した。表面保護材の耐久性に関しては、近年の報告をもとに約30年は保護効果が持続すると仮定した。30年経過後は、表面保護を施工しない場合と同じ拡散係数になると仮定した。

30年間で脱塩後にコンクリート中に浸透した全 Cl-濃度を図 5.5 に示す。既往の検討⁵⁾を 参考にかぶりが 100mm の鉄筋コンクリート構造物を想定した場合,表面保護を施工しなけれ ば約 20年程度で発錆限界を迎えると推定された。実環境にて脱塩後 24 年経過した RC 構造 物に対して自然電位を測定した結果,ASTM C 867 の判定基準で腐食・不確定領域と判定され る個所が見受けられたことから,ある程度の妥当性があるものと考えられる。一方,表面保 護を併用した場合,表面保護種の違いによる大きな差はなく,約 50 年程度補修効果が持続す ると試算された。

100年間で脱塩後にコンクリート中に浸透した全 CI-濃度を図 5.6 に示す。表面保護を併用 したケースは、30年ごとに表面保護材を塗り替えるものとし、拡散係数は一定として計算し た。これより、保護材の耐用年数と仮定した 30年ごとに表面保護材を塗り替えることで、約 90年程度の間、腐食の発生を抑制することができるものと考えられる。脱塩後に塗布した表 面保護材が高い遮塩性を保持し外部からの劣化因子の進入を完全に抑制することが出来れば、 1度の塗布で約 60年補修効果が持続するものと試算され、30年ごとの塗り替えを行った場 合、腐食の再発生を防止することが出来ると考えられる。したがって、厳しい塩害環境に置 かれた構造物に対して脱塩工法を適用する場合、鉄筋防食効果持続性の観点から、表面保護 を併用することを標準とすることが望ましいと考える。



図 5.5 30 年間で再浸透する予測 Cl⁻量



図 5.6 100 年間で再浸透する予測 Cl⁻量 (30 年毎に表面保護塗り替え)

5.4 まとめ

本章において,再アルカリ化工法および脱塩工法の補修効果持続性について,数値解析に よる各種イオン濃度の再分布予測によって推定する方法を提案した。以下に結果をまとめる。

- (1) 1 次元の差分法を用いて予測した K⁺の再分布予測結果から,再アルカリ化後の補修効果 持続期間を推定した。その結果,かぶり 20mm 程度のコンクリートを対象とした場合, 表面保護をしない場合およびシラン系含浸材を塗布する場合,約 50 年間補修効果が持続 すると予測された。PCM またはエポキシ樹脂の併用した場合,中性化の進行予測から 100 年程度は補修効果の持続が期待できることが分かった。
- (2) 1 次元の差分法を用いて予測した Cl⁻の浸透・再拡散から,脱塩後の補修効果持続期間を 推定した。鉄筋腐食発生限界全 Cl⁻ 濃度である約 2.5kg/m³に達するまでの期間を補修効 果持続期間とすると,かぶりが 100mm のコンクリート構造物の場合,表面保護を併用す ることで,少なくとも 50 年程度は腐食の発生を抑制することができ,30 年ごとに塗り替 えることで約 90 年は補修効果が持続するものと考えられる。
- (3) 鉄筋防食効果持続性の観点から,脱塩工法適用後は表面保護工法を適用することが望ましいと考えられる。

参考文献

- 守分敦郎,長滝重義,大即信明,三浦成夫:既設コンクリート構造物の塩化物イオンの 拡散過程より評価される表面処理工法,土木学会論文集,No.520/V-28, pp.111~ 122,1995.8
- コンクリート中の鋼材の腐食性能評価と防食技術研究委員会(338 委員会)委員会報告 書,pp341~372
- 3) 魚本健人,高田良章:コンクリートの中性化速度に及ぼす要因,土木学会論文集, No.451, V-17, 119-128, 1992.8.
- 4) 芦田公伸:セメント効果体やグラウトの塩分量と鋼材発錆、コンクリート工学、
 Vol.43, No.6, pp10-13, 2005.6
- 5) 芦田公伸,石橋孝一,七澤 章,松久保博敬:電気化学的脱塩工法を適用した橋脚の10 年間の追跡調査,コンクリート工学年次論文集,Vol.26,No.1, pp.831-836, 2004.7
第6章 結論

6.1 結論

本研究では,再アルカリ化工法または脱塩工法適用後のコンクリートに施工された表面保 護材の耐久性評価,および通電後に表面保護材を併用した場合のコンクリート中の鉄筋防食 効果を評価し,補修効果持続期間を推定した。第3章から第5章の各章で得られた結果を, 以下にまとめる。

第3章 通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性

第3章では通電後に塗布した各種表面保護材の耐久性を評価することを目的に,表面保護 材塗布時のコンクリート表面含水率をパラメータとし,種々の環境下で保管した保護材の耐 久性について検討した。

得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 再アルカリ化後と脱塩後では、通電後のコンクリート内部のアルカリ金属イオン分布が異なり、特に再アルカリ化後のコンクリート表面で高濃度のアルカリ金属イオンの集積が確認された。このことが、再アルカリ化後に塗布した含浸材の遮水性、表面撥水性の低下および PCM やエポキシ樹脂の付着強度低下の原因と考えられる。
- 2) 中性化後に再アルカリ化処理を行った場合,再アルカリ化直後のpH値は中性化していない場合に比べて小さくなった。再アルカリ化前のコンクリートの中性化の有無が,再アルカリ化後に塗布した表面保護材の耐久性に与える影響は小さいことが分かった。すなわち,再アルカリ化語の表面保護材の耐久性劣化要因としては,pHよりもR₂O量が支配的な可能性がある。
- 再アルカリ化後にシラン系含浸材を塗布した場合,塗布時の表面含水率に関わらず遮水性が低下し、含侵深さが小さくなる傾向にあった。一方で、脱塩後に関しては、表面含水率 8%で塗布した場合、透水比、含侵深さともに無通電と同程度の値を示した。
- 4) PCM に関して、再アルカリ化後に高含水率で塗布した場合、無通電供試体に対して付着 強度が 40%程度低下した。一方、脱塩後に関しては裏水によってアルカリ溶液が保護材 界面に供給された場合に、付着強度が 50%程度低下した。ただし、すべての供試体で付着 強度の基準値である 1.0N/mm²を満足した。
- 5) 通電後に塗布した PCM の付着強度低下の原因は,通電後コンクリート表面の高アルカリ 環境下でコンクリートと PCM の界面付近でポリマーの加水分解が生じ,接着界面部が脆 弱化したことが考えられる。
- 6) エポキシ樹脂に関しては、再アルカリ化後、脱塩後ともに、裏水によってアルカリ溶液が 保護材界面に供給された場合、25%程度付着強度が低下した。ただし、すべてのケースで 付着強度の基準値である 1.0N/mm²を満足しておりかつ母材破壊であったことから、良好 な付着性能を示した。

第4章 通電後コンクリート中の鉄筋防食効果持続性

第4章では,第3章で耐久性を評価した表面保護材を使用して,再アルカリ化後または脱 塩後に表面保護材を併用した場合のコンクリート中の各種イオンと電気化学的モニタリング の結果から鉄筋防食効果を評価した。

得られた結果を以下にまとめる。

- 24ヶ月間の促進中性化を行った供試体について、外観観察を行った結果、表面保護種類 および再アルカリ化適用の有無に関わらず、すべての供試体について、促進中性化前か ら大きな変化は見られなかった。
- 2) 48 ヶ月間の塩水噴霧を行った供試体の外観については、表面保護材の浮き、膨れ、剥離 といった大きな変化は見られないものの、PCM が若干白っぽく変色し、エポキシ樹脂表 面の光沢が失われていた。
- 3) 再アルカリ化後 24 ヶ月間の促進中性化を行った供試体中において、表面付近では高濃度の K⁺が持続的に存在していた。またこのようなアルカリの影響を受け、PCM の付着強度は約 50%、エポキシ樹脂の付着強度は 37%程度、シラン系含侵材の遮水率は 20%程度低下した。
- 4) 48 ヶ月間の塩水噴霧を行った脱塩供試体に関しては、 PCM で約 5%、エポキシ樹脂で 18%程度付着強度が低下したものの、良好な付着強度を示した。シラン系含侵材の遮水 率についても無通電と同程度の値を示した。
- 5) シラン系含侵材の保護効果についてコンクリート抵抗から推定できる可能性があり、シ ラン系含侵材の保護効果は表面の撥水性が消失しても持続するものと考えられる。
- 6) 3 章で検討したアルカリ裏水促進試験を行った後の表面保護材の劣化度合いと、24 ヶ月間の促進中性化または48ヶ月間の塩水噴霧試験後の劣化度合いは同程度であり、アルカリ裏水促進試験によって通電後に適用可能な表面保護材を選定可能になるものと考えられる。
- 7) 再アルカリ化の有無に関わらず、シラン系含浸材を塗布した供試体は24ヶ月間の促進中 性化後、保護なし供試体と同程度の中性化深さを示しており、シラン系含浸材の塗布に よる炭酸ガス浸入抑制効果は期待できないことが分かった。一方で、再アルカリ化後に PCM またはエポキシ樹脂を塗布した場合、中性化の進行を抑制できることが分かった。
- 8) 48ヶ月間の塩水噴霧を行った脱塩供試体に関して、表面保護を塗布することで塩分の再 浸透を抑制することができ、見かけの拡散係数は保護なしに比べて 1/4 程度まで低減さ れた。
- 9) 48 ヶ月間の塩水噴霧試験後,脱塩後コンクリート中の pH は表面保護材の併用にかかわらず 12.5 程度を示した。また,表面保護材によって表面からの塩分の供給を抑制した場合,全塩分に対する可溶性塩分の割合は通電直後からほとんど変化しなかった。
- 10) 分極抵抗より算出した推定腐食量に関して、実測した腐食減量と傾向は比較的一致した が、カソード分極の影響により実測値より小さな値を示した。アノード分極曲線から腐 食量を推定することで、カソード分極の影響を考慮できる可能性がある。

第5章 通電後の表面保護の併用を考慮した補修効果持続期間の推定方法の提案

第5章において,再アルカリ化工法および脱塩工法の補修効果持続性について,数値解析 による各種イオン濃度の再分布予測によって推定する方法を提案した。

以下に得られた結果をまとめる。

- 1次元の差分法を用いて予測した K⁺の再分布予測結果から,再アルカリ化後の補修効果 持続期間を推定した。その結果,かぶり 20mm 程度のコンクリートを対象とした場合, 表面保護をしない場合およびシラン系含浸材を塗布する場合,約 50 年間補修効果が持続 すると予測された。PCM またはエポキシ樹脂の併用した場合,中性化の進行予測から 100 年程度は補修効果の持続が期待できることが分かった。
- 2) 1次元の差分法を用いて予測した Cl⁻の浸透・再拡散から,脱塩後の補修効果持続期間を 推定した。鉄筋腐食発生限界全 Cl⁻ 濃度である約 2.5kg/m³に達するまでの期間を補修効 果持続期間とすると、かぶりが 100mm のコンクリート構造物の場合,表面保護を併用す ることで、少なくとも 50 年程度は腐食の発生を抑制することができ、30 年ごとに塗り替 えることで約 90 年は補修効果が持続するものと考えられる。
- 3) 鉄筋防食効果持続性の観点から,脱塩工法適用後は表面保護工法を適用することが望ましいと考えられる。

以上,第3章から第5章までの結果より,通電後に適用した表面保護材の耐久性を評価し, 劣化原因を明らかにするとともに,アルカリ裏水促進試験による通電後に適用可能な表面保 護材の選定の可能性を示した。また,通電後コンクリート中の各種イオン濃度と鉄筋防食効 果の関係性について明らかにし,K⁺イオン分布および Cl⁻イオン分布の再拡散を予測するこ とで補修効果持続期間を推定する方法を提案した。

6.2 電気化学的補修工法適用後の表面保護工法の考え方と今後の課題

通電後に適用した表面保護材の耐久性は,通電によってコンクリート表面に供給されたア ルカリイオン量に大きく影響を受けることが分かった。再アルカリ化工法と脱塩工法では使 用する電解液や通電期間が異なるため,通電後のコンクリート表面のアルカリ環境も異なる。 したがって,脱塩工法後に適用可能な保護材が必ずしも再アルカリ化工法後にも適用可能で はないことに留意する必要があろう。

また,鉄筋防食効果持続性を考慮すると,再アルカリ化後においてはシラン系含浸材のような透気性の大きな保護材の使用は控え,多量のカリウムイオンが存在する状態でも十分な 付着性の得られる被覆系の保護材を選定する必要がある。脱塩後においては,本検討で使用 した PCM,エポキシ樹脂,シラン系含浸材のどの種類においても,表面含水率8%程度で施 工すれば無通電の場合と同程度の保護効果が得られ,補修効果持続性が向上するため,標準 仕様として表面保護工法の併用を考えるのが良いと考えられる。ただし,施工時の含水率の 調整や背面から雨水が浸透する場合は,保護材の早期劣化に注意する必要がある。また,シ ラン系含浸材のような透気性の大きな保護材を施工すれば,脱塩後数ヶ月で鉄筋の不働態皮 膜が再形成される。しかし,PCMやエポキシ樹脂といった透気性の小さい被覆系の保護材を 施工すると酸素の供給が抑制されると共に,コンクリート中の水分の逸散が阻害され,鋼材 表面で貧酸素状態が長期間持続することで不働態被膜の再形成が遅延する場合があることに 注意する必要がある。ただし現時点では,その貧酸素状態の持続が腐食抑制効果として働く のか,腐食を促進させるのか明確ではなく,今後の検討が必要である。ただし,保護材を施 工しない場合に比べると腐食抑制効果は持続するものと考えられる。

このように表面保護材を適切に施工すれば,通電後の劣化因子の浸入を抑制することが可 能であり,表面保護材の耐用年数である 30 年程度を目途に保護材の塗り直しを実施すること で,長期的に防食効果を持続することが可能であると考えられる。したがって,ある程度劣 化が進んだ RC 構造物における従来の補修工法である断面修復工法に比べ,電気化学的補修 工法はイニシャルコストが高いものの,構造物の予定供用期間が長く厳しい劣化環境に曝さ れる場合,表面保護と併用することでライフサイクルコストとしては小さくできる可能性が ある。5 章で提案したように,通電後のイオンの再拡散・再浸透を予測することで補修効果持 続性を定量的に評価することができ,ひいては中性化や塩害によって劣化した RC 構造物の 効果的かつ効率的な補修設計に役立てることが可能と考える。現状では,温度履歴やコンク リート中の含水率変化,表面保護後の拡散係数の経時変化等様々なパラメータについて不明 な点が多く,より正確な補修効果持続期間の推定には今後のさらなる検討が必要である。

また,数週間の通電期間で数十年は確実に補修効果が得られるといった観点からも,鉄筋 腐食を抑制し,より長期的に構造物を共用するための補修工法として,再アルカリ化工法と 脱塩工法およびコンビネーションメニューとしての表面保護工法の併用の重要性は高まって くるものと確信する。

謝辞

本論文は,徳島大学大学院上田隆雄教授のご指導の下,徳島大学大学院先端科学技術教 育部知的力学システム工学コース博士後期課程までの在学期間中に実施した研究成果を取 りまとめたものであります。ここに至るまで,多くの方々からのご助言とご協力を賜りました。

指導教員である徳島大学教授上田隆雄先生には,維持再工学研究室に所属してから長きに わたり,実験計画を始め,試験方法,データ整理,スライド作り,プレゼンテーション方法, 論文執筆に至るまで,非常に丁寧かつ親身にご指導をいただきました。また研究面だけでな く,私生活や就職活動に関しても様々なご助言を賜りました。心から深く感謝致します。先 生の研究に対する真摯な姿勢を参考に,今後も精進してまいる所存です。今後もご指導をい ただけますと幸いです。

徳島大学教授 橋本親典先生には、本研究を遂行するにあたり様々なご助言をいただきました。また学位主査の労をお取りいただきましたこと、重ねて御礼申し上げます。

徳島大学助教 塚越雅幸先生には,建築と土木分野の両方の視点からご助言を頂きました。 また,研究面だけでなく日頃の生活面においても気にかけていただき,厚く御礼申し上げま す。

徳島大学准教授 渡邉 健先生には、本研究に対してあたたかく親身なご意見やご指摘をい ただき、心から謝意を表します。また、就職活動や実験についても気にかけていただき、感 謝いたします。

徳島大学技官 石丸 啓輔氏には、本研究における材料の手配や試験装置の操作方法や実験 器具の使用方法などをご指導いただき、研究を進めるにあたって大変お世話になりました。 厚く御礼申し上げます。

デンカ(株)七澤 章氏をはじめデンカ(株)の皆様には、本研究における試料の分析にてご協 カいただくとともに、貴重なご意見やご指摘、データの見方、解析方法、試験装置の使用方 法等様々教えていただきました。心から御礼申し上げます。

立命館大学助教 山田悠二先生には,筆者が博士課程在籍時の材料研究室の先輩として, 研究への取り組み方や就職活動など,研究面から私生活に至るまで多くのご助言をいただき ました。深く感謝申し上げます。 東京工業大学教授 岩波光保先生,ならびに東京工業大学准教授 千々和伸浩先生には, 筆者が論文執筆に注力できるよう格別のご配慮をいただきました。また,研究課題に対する 様々なご助言をいただき,心より御礼申し上げます。また,先生方の同僚として働かせてい ただけること,心より嬉しく存じます。今後ともご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上 げます。

日亜化学工業の皆様には、学部時代から長きにわたって奨学金をいただきました。生活面 での不安を払拭でき、研究に専念することが出来ました。厚く御礼申し上げます

豊田啓生氏,谷口沙耶佳氏,大谷一将氏,福本信吾氏,船坂健介氏,冨永雄悟氏,渡辺真織 氏,竹内彩菜氏,高橋博司氏をはじめとする維持再生工学研究室ならびコンクリート工学研 究室の皆様には本研究における材料準備,供試体作製,測定準備等,多くのご協力をいただ きました。ここに謝意を表します。

最後に,著者が研究に打ち込むことが出来たのは,父 一憲,母 ナナがいつも応援し支え てくれたお陰であることを記して,本論文の謝辞といたします。