

論文 凍結防止剤により塩害を受けた道路床版への脱塩工法の適用と効果

山本 賢司^{*1}・松久保 博敬^{*2}・野島 昭二^{*3}・大即 信明^{*4}

要旨：凍結防止剤の散布により塩害を受けた道路橋床版への脱塩工法の適用を想定し、交通遮断が可能な期間を考慮した通電条件を検討した。塩分を強制浸透させた外来塩分供試体では、予め塩分を練込んだ内在塩分供試体の場合よりも早く脱塩され、鉄筋近傍の初期塩化物イオン量が 3kg/m^3 以下の場合、 3A/m^2 で通電 14 ~ 21 日 で対応可能と考えられる。また、所定の通電終了後、時間が経過したコアの鉄筋の表面状態を調べ、分極抵抗の経時変化と関連付けた。脱塩工法は塩化物イオンの除去に加えて、鉄筋の不動態を再形成させる効果もあり、塩害を受けたコンクリート構造物に対して効果的な補修工法といえる。

キーワード：道路橋床版，脱塩，電流密度，通電期間，塩化物イオン量，分極抵抗，鉄筋表面，不動態

1. はじめに

近年、高速道路では交通量や大型車両の増加に伴い、疲労による鋼橋 RC 床版の劣化が顕在化しており、主として増厚工法による補修・補強が行われている。一方、寒冷地では、冬期における車両の走行の安全確保と通行止めの回避のため、積雪量や路面状態に応じて NaCl や CaCl_2 等の凍結防止剤が散布されている¹⁾が、塩害を引起す要因となっている。

そのような床版に対して上面増厚工法を実施した場合、既設アスファルトと床版上層の一部は撤去されるが、鉄筋近傍のコンクリートは撤去されずにそのまま残る。鉄筋近傍まで塩化物イオンが浸透し、その濃度が高い状態では、早期に塩害が再発する恐れがある。

本研究では、塩害を受けたコンクリート構造物の電気化学的補修工法のひとつである脱塩工法に着目し、上面増厚を行うときに、脱塩工法を適用することを想定した。交通遮断の期間に限られることを考慮し、通電期間の短縮を含めて通電条件を検討した。また、脱塩後における鉄筋の不動態の再形成についても検討した。

2. 実験

2.1 試験方法

(1) 内在塩分供試体を用いた脱塩試験

単位セメント量が 300kg/m^3 ， $W/C=48.5\%$ ， $s/a=39.4\%$ ，初期塩化物イオン量が 3, 6, 9kg/m^3 となるように NaCl を添加したコンクリートを用いて、道路床版を模擬した $1.4\text{m} \times 90\text{cm} \times 24\text{cm}$ の内在塩分供試体を作製した。供試体の内部には上端鉄筋と下端鉄筋が配筋されており、鉄筋の間隔はそれぞれ 25, 12.5cm となっている。

写真 - 1 に脱塩の状況を示す。供試体の上面に塩化ビ

ニル製枠を設置し、周囲をシールした。枠内にチタンメッシュを設置して、深さ約 5cm となるように電解質溶液を入れた。電解質溶液は K_2CO_3 とホウ酸をそれぞれ 0.6, 0.2mol/L となるように混合して溶解した。上端鉄筋と下端鉄筋をリード線でつないで陰極とし、チタンメッシュを陽極として、供試体上面の面積あたり $1, 3 \text{ A/m}^2$ の電流密度で、試験開始時からの累積の通電期間が 3, 7, 14, 21 日となるように直流電流を流した。所定の通電後、写真 - 2 のようにコアを採取して一部を切断し、残りをを用いて試験を継続した。

図 - 1 にコアを採取した位置を示す。列(A)~(D)の 4 箇所からコアリングした。列(A)~(C)は上端鉄筋と下端鉄筋の両方を含む、鉄筋が交差した部分 (10cm) であり、列(D)は上端鉄筋を含まない、下端鉄筋のみを含む部分 (7.5cm) である。このうち、列(A), (D)から採取したコアの塩化物イオン量を分析し、列(B), (C)のコアを脱塩後の鉄筋腐食促進試験に用いた。

(2) 外来塩分供試体を用いた脱塩試験

内在塩分供試体と同じ大きさで NaCl を含まない供試体を用いて、20wt.% NaCl 水溶液への浸漬と乾燥を繰り返し、塩化物イオンを強制的に内部へ浸透させて外来塩分供試体とした。側面をエポキシ樹脂で塗布した $10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体とともに、浸漬 2 日、乾燥 3 日のサイクルで約 1 年間繰返した。適宜、円柱供試体の塩化物イオン量を調べ、外来塩分供試体の塩化物イオン量の目安とした。円柱供試体の上面から深さ 4cm の位置 (鉄筋の位置に相当) で約 3kg/m^3 の塩化物イオン量に達したことを確認し、外来塩分供試体からコアを採取して、塩化物イオン量を確認した。内在塩分供試体と同様の方法で、 3 A/m^2 の電流密度で 7 ~ 21 日間脱塩した。

*1 電気化学工業 (株) 青海工場 無機材料研究部 前任研究員 工修 (正会員)

*2 電気化学工業 (株) 青海工場 無機材料研究部 研究員 (正会員)

*3 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授 工博 (正会員)

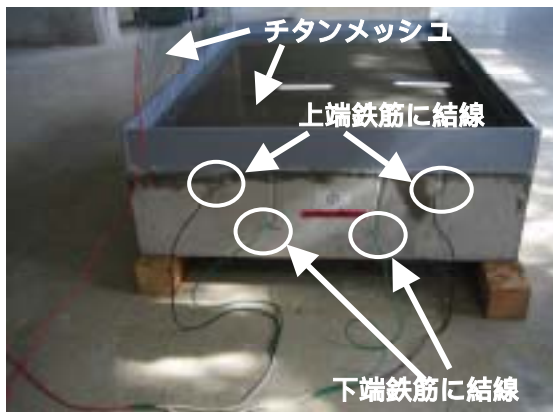


写真 - 1 脱塩の状況



写真 - 2 コアリング、切断後の状況

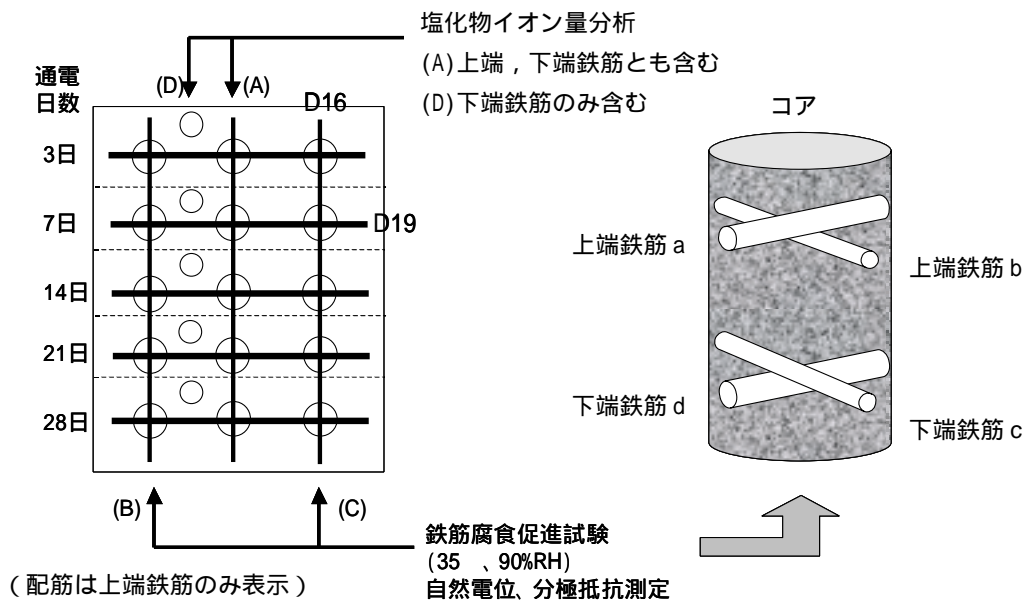


図 - 1 コアの採取位置と試験項目

(3) 試験項目

1) 塩化物イオン量

コアの上面から 2cm ずつスライスし, JIS A 1154:2003 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に基づき, 全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を測定した。なお, 内在塩分供試体の初期塩化物イオン量は, 同時に作製した 10×20cm 円柱供試体により確認した。

2) 脱塩後の鉄筋腐食促進試験

コア側面の鉄筋の断面 4 箇所 (図 - 1 右図参照) にリード線を接続し, エポキシ樹脂で側面を被覆した後, 35%、90%RH で保管した。携帯型鉄筋腐食診断器を用いた交流インピーダンス測定により, 通电終了後から 17 ヶ月経過後までの鉄筋の分極抵抗と自然電位を測定した。

3) 鉄筋の表面の状態

初期塩化物イオン量が 3kg/m³ で, 電流密度 3 A/m² で 14 日間通电後に採取したコアを 35%、90%RH で保管し, 通电後から 1 ヶ月, 17 ヶ月経過後に鉄筋の一部を取出し

た。X 線回折測定 (XRD) により, 鉄筋の表面の生成物を調べた。

3. 結果と考察

3.1 内在塩分供試体を用いた脱塩試験

(1) 塩化物イオン量

電流密度が高く, 通电期間が長いほど, 初期塩化物イオン量が大きいほど, 上端鉄筋近傍の塩化物イオン量が低減した。図 - 2 に 3A/m² で 14, 21 日脱塩したときの, 上端鉄筋と下端鉄筋の両方を含むコアの塩化物イオン量を示す。全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を示し, 脱塩前後の値を比較した。電流密度が 3A/m² の場合には, 通电 21 日まで全塩化物イオン量が低減され, 脱塩がかなり進んだ。可溶性塩化物イオン量でも同様の傾向が見られ, 全塩化物イオン量に占める可溶性塩化物イオン量の割合はほぼ一定であった。

一方, 1A/m² の場合には 28 日まで脱塩してもあまり脱塩が進まなかった。短い通电期間で脱塩するには電流密

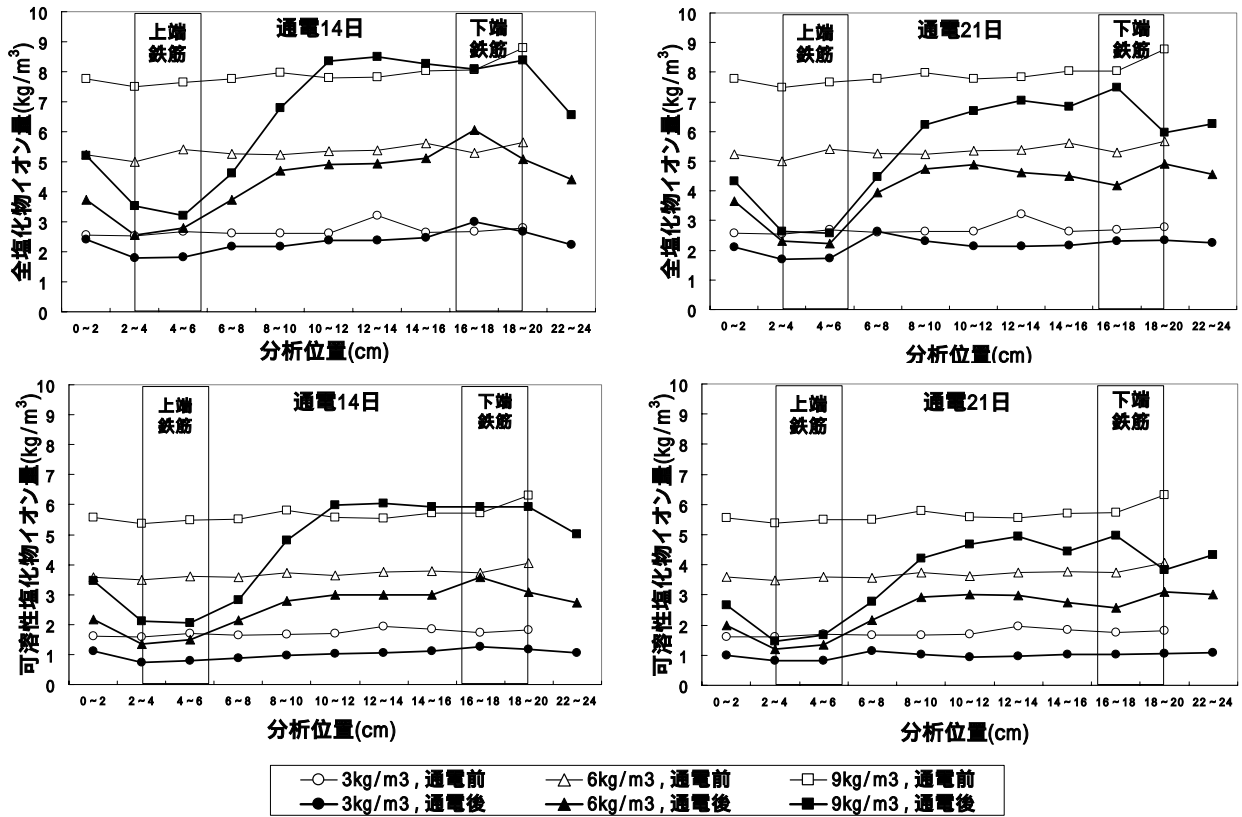


図 - 2 上端鉄筋と下端鉄筋の両方を含むコアの塩化物イオン量

表 - 1 内在塩分供試体における通电 14、21 日後の塩化物イオン量と脱塩率

電流密度 (A/m ²)	分析位置	初期塩化物 イオン量 (kg/m ³)	通电14日		通电21日	
			残存塩化物 イオン量 (kg/m ³)	脱塩率 (%)	残存塩化物 イオン量 (kg/m ³)	脱塩率 (%)
3	鉄筋近傍 (上から 2~4cm)	3	1.8	40	1.8	40
		6	2.6	57	2.2	63
		9	3.4	62	2.4	73

度が足りないことが分かった。以下では電流密度が 3A/m² の場合の結果のみを示す。また、下端鉄筋のみを含むコアでは、下端鉄筋近傍の塩化物イオン量があまり低減されなかった。これは供試体の上面から脱塩しており、下端鉄筋のかぶりが大きいために抵抗が高くなり、下端鉄筋に流れる電流が少なくなったためである。

表 - 1 に通电 14、21 日後の塩化物イオン量 (脱塩されずに残った塩化物イオンの量) と脱塩率を示す。脱塩率は通电 14 日で 40~60% 程度、通电 21 日で 40~70% 程度となり、初期塩化物イオン量によっては通电期間の短縮が可能と考えられる。また、初期塩化物イオン量が多いほど脱塩率が高くなった。

(2) 分極抵抗

図 - 3 に初期塩化物イオン量 3kg/m³ で、3、14 日通电後からの上端鉄筋の分極抵抗の経時変化を示す。図中に分極抵抗の判定基準²⁾を併記した。通电期間が長くなる

と通电終了直後の分極抵抗が小さくなり、通电後からの時間の経過とともに値が増加した。

(3) 鉄筋の表面の状態

図 - 4 に 14 日通电した後、1 ヶ月、17 ヶ月経過した後の鉄筋表面の XRD 測定結果を示す。上端鉄筋の場合、通电から 1 ヶ月後では Fe のピークのみが検出された。17 ヶ月後では Fe のピーク強度がやや小さくなり、マグネタイト (Fe₃O₄) のピークが認められ、不動態の再形成が進んでいることが分かった。一方、下端鉄筋の場合、通电から 1 ヶ月後では Fe とマグネタイトが検出された。17 ヶ月後では赤さびであるヘマタイト (Fe₂O₃) が認められ、鉄筋の腐食が進んでいることが分かった。

(4) 鉄筋の表面状態と分極抵抗の関係

以上より、鉄筋の表面状態と分極抵抗の経時変化を次のように関連付けて考察した。図 - 5 に初期塩分量 3kg/m³ で 3 日通电後からの分極抵抗の経時変化と鉄筋表

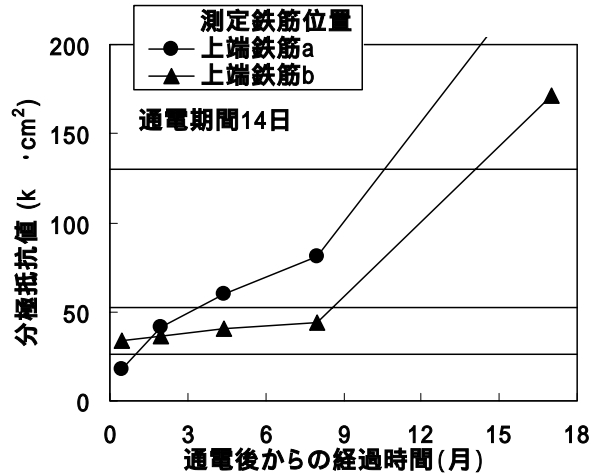
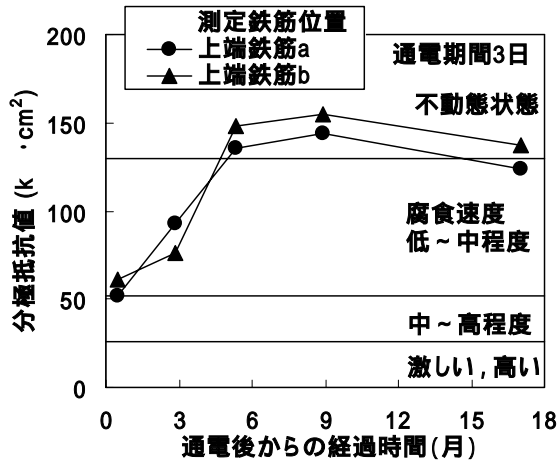


図 - 3 初期塩化物イオン量 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 、電流密度 $3\text{A}/\text{m}^2$ で所定の通电後からの分極抵抗の経時変化

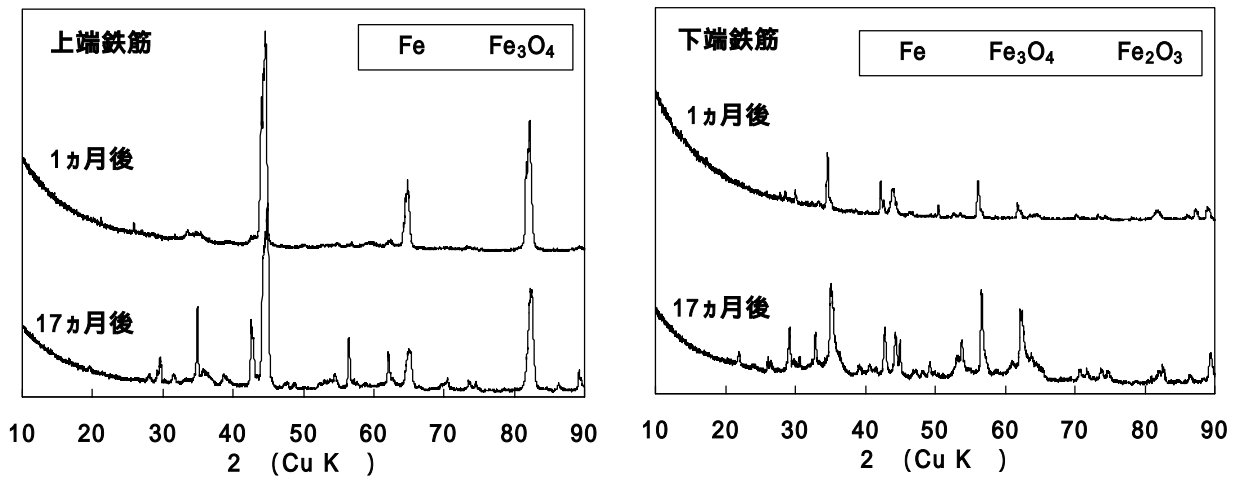


図 - 4 鉄筋の表面の XRD 測定結果

面の関係を示す。通电期間が 3 日と短い場合、通电期間が長い場合と比べて、上端鉄筋の通电直後の分極抵抗が大きく、その後、増加している。これは、脱塩前から存在する鉄筋表面の黒さび (Fe_3O_4 、マグネタイト) の一部が Fe に還元され、その後、酸素と水の供給により、Fe から Fe_3O_4 への酸化が進行していると考えられる。しかし、17 ヶ月経過したときには分極抵抗がやや低下している。これは、通电期間が 3 日と短く、鉄筋近傍の塩化物イオンが脱塩されなかったために、鉄筋の腐食が進んでいることが考えられる。

一方、下端鉄筋では、流れる電流量が上端鉄筋より小さく、上端鉄筋の場合よりも Fe に還元される部分がさらに少ない。脱塩されずに鉄筋近傍に多量に残った塩化物イオンにより鉄筋の腐食が進み、赤さび (Fe_2O_3 、ヘマタイト) が生成したと考えられる。脱塩しない場合と比べて、通电期間が 3 日間という短い脱塩でも鉄筋の腐食状態は改善される方向に向かうが、脱塩が十分に進まず、不動態の再形成も不十分であるため、鉄筋の腐食を完全には防止できないと考えられる。脱塩の効果を高めるに

は、さらに長い通电が必要である。

図 - 6 に通电期間を 14 日としたときの分極抵抗の経時変化と鉄筋の表面の関係を示す。通电期間を長くした場合、上端鉄筋の通电直後の分極抵抗が小さく、鉄筋表面の黒さびがほぼ完全に Fe に還元される。その後、酸素と水の供給により、脱塩による高アルカリ環境下で、全面に不動態が再形成されると考えられる。下端鉄筋では流れる電流が少ないため、通电期間が長くなってもあまり変わらない。

図 - 7 に実際の道路床版に脱塩を適用するとき予想される鉄筋の状態を示す。外来塩分供試体の場合も同様に不動態の再形成が進むと考えられ、以下に道路床版に脱塩を適用するとき予想される鉄筋表面の状態変化の推移を示す。

- 塩害劣化を受けた道路床版では、鉄筋の表面に黒さび (Fe_3O_4 、マグネタイト) と赤さび (Fe_2O_3 、ヘマタイト) が混在する。
- 通电により、これらが一旦全て Fe に還元される。
- 通电終了後、酸素と水の供給と高アルカリ環境によ

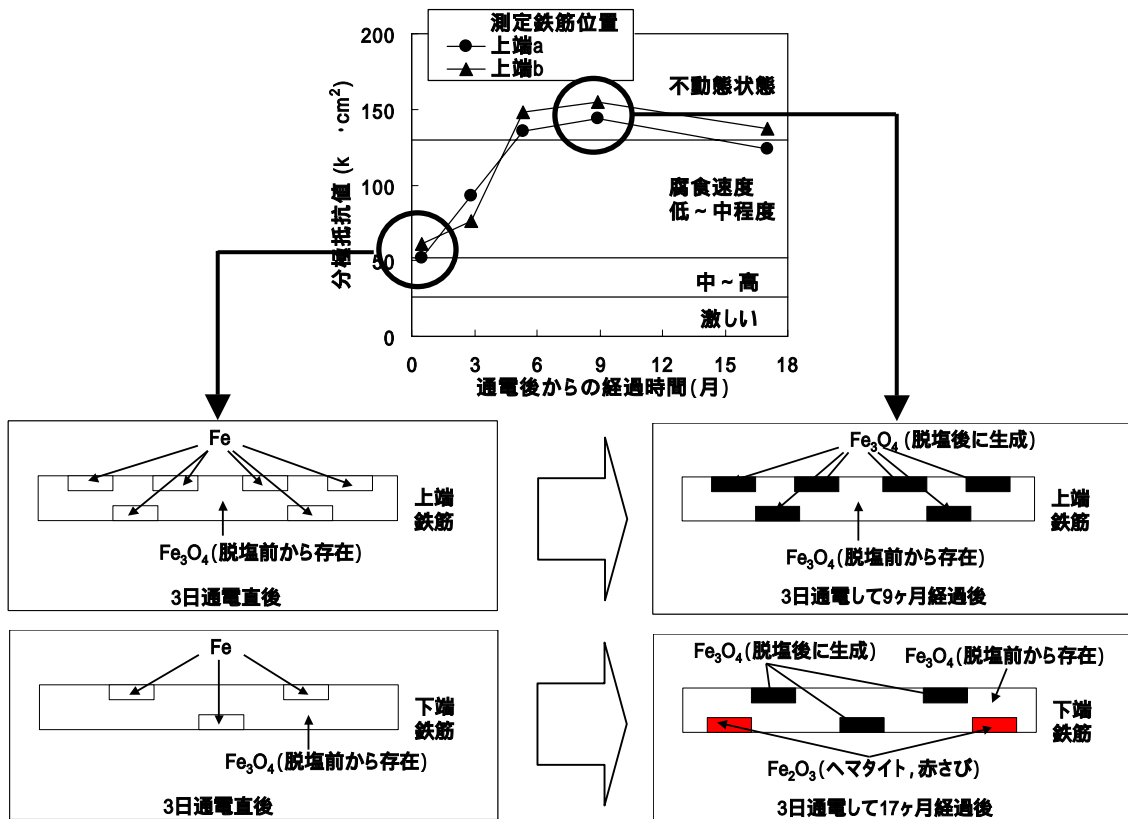


図 - 5 3日通電後からの分極抵抗の経時変化と鉄筋表面の状態

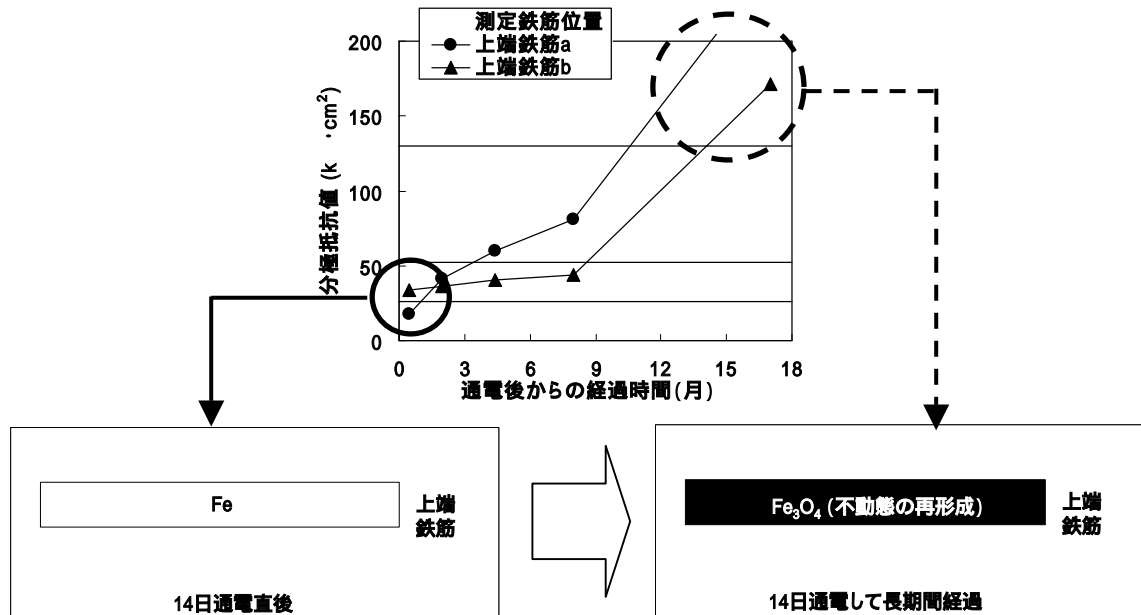


図 - 6 14日通電後からの分極抵抗の経時変化と鉄筋表面の状態

り、全面に不動態が再形成される。

3.2 外来塩分供試体を用いた脱塩試験

図 - 8 に脱塩前後の全塩化物イオン量を示す。通電前の全塩化物イオン量は、上端鉄筋の近傍で約 3kg/m^3 であった。通電 14, 21 日後でそれぞれ 1.4kg/m^3 , 0.6kg/m^3 に低減され、内在塩分供試体の場合よりも早く脱塩され

ることが確認できた。外来塩分は練込み塩分よりも脱塩されやすいことが知られており³⁾、本試験でも一致した結果が得られた。

表 - 2 に電流密度 3A/m^2 で通電 14, 21 日後の塩化物イオン量と脱塩率を示す。通電 14, 21 日後の脱塩率はそれぞれ 53, 80% に達した。鉄筋近傍の初期塩化物イオン量

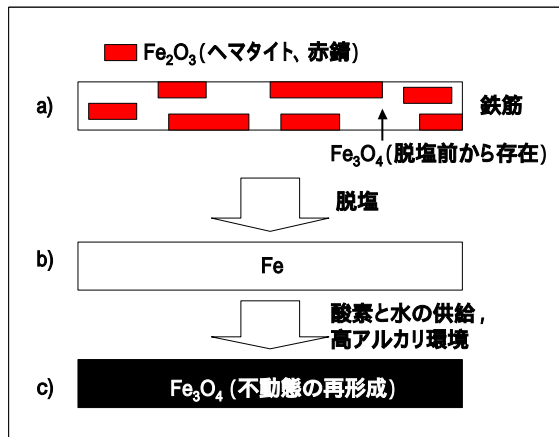


図 - 7 道路床版に脱塩を適用するとき予想される鉄筋表面の状態変化

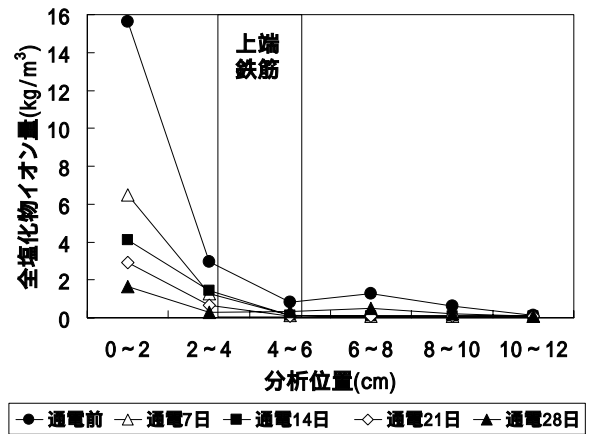


図 - 8 外来塩分供試体における脱塩前後の全塩化物イオン量

表 - 2 外来塩分供試体における通电 14、21 日後の塩化物イオン量と脱塩率

電流密度 (A/m ²)	分析位置	初期塩化物 イオン量 (kg/m ³)	通电14日		通电21日	
			残存塩化物 イオン量 (kg/m ³)	脱塩率 (%)	残存塩化物 イオン量 (kg/m ³)	脱塩率 (%)
3	鉄筋近傍 (上から 2~4cm)	3	1.4	53	0.6	80

が 3kg/m³ 以下の場合には、通电 14~21 日に対応可能と考えられる。

4. まとめ

- 1) 塩分を練込んだ内在塩分供試体を用いて、脱塩の効果を検証した。電流密度 3 A/m² の場合、脱塩率は通电 14 日で 40~60% 程度、通电 21 日で 40~70% 程度となり、初期塩化物イオン量によっては通电期間を 14~21 日に短縮できると考えられる。また、初期塩化物イオン量が多いほど脱塩率が高くなった。
- 2) 所定の通电終了後から時間が経過したコアの鉄筋の表面状態を調べ、分極抵抗の経時変化と関連付けた。電流密度 3 A/m² で 14 日通电すると、上端鉄筋の表面の黒さび (Fe₃O₄, マグネタイト) がほぼ全て Fe に還元され、その後、酸素と水の供給と高アルカリ環境により、不動態が再形成されると考えられる。脱塩工法は塩化物イオンの除去に加えて、鉄筋の不動態を再形成させる効果もあり、塩害に対して効果的な補修工法といえる。
- 3) 塩分を強制浸透させた外来塩分供試体を用いて、脱塩の効果を検証した。初期塩化物イオン量が 3kg/m³、電流密度 3A/m² の場合、通电 14、21 日後で、塩化物イオン量はそれぞれ 1.4、0.6kg/m³ に低減され、内在塩分

供試体の場合よりも早く脱塩された。鉄筋近傍の初期塩化物イオン量が 3kg/m³ 以下の場合、通电 14~21 日に対応可能と考えられる。

謝辞

本研究は、東京工業大学大学院、(株)高速道路総合技術研究所、電気化学工業(株)の共同研究として行った。東京工業大学大学院の斎藤豪先生、(株)高速道路総合技術研究所の本間淳史氏(現東日本高速道路(株))、竈本武弘氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 村国誠, 林康啓, 鈴木幹雄: 路面凍結防止剤の諸特性試験と効率的な散布方法, 日本道路公団試験所報告, Vol.15, pp.141-151, Nov. 1987
- 2) Comite Euro-International du Beton(CEB-FIP): Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin d' Information No.243, p.53, May 1998
- 3) 芦田公伸, 友澤史紀, 石橋孝一, 宇田川秀行: 塩害を受けたコンクリート構造物への電気化学的補修技術の基礎検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp.877-882, 1997