論文　電気化学的脱塩工法における脱塩効果の簡易予測

栖原　健太郎[*1]・徳光　卓[*2]・芦田　公伸[*3]・辻　幸和[*4]

要旨：電気化学的脱塩工法における脱塩効果の予測は，コンクリート構造物の維持・管理におけるライフサイクルマネジメントを行う上で重要である。脱塩効果の簡易予測を目的として，電場解析による電位分布から電流密度の分布を算出し，積算電流量と脱塩率との関係から脱塩効果を予測する簡易手法を提案した。実構造物を模擬したＰＣＴ桁の脱塩実験と比較した結果，提案した簡易予測手法の整合性が確認された。また，提案した簡易予測手法を用いて，鉄筋間隔が脱塩効果に及ぼす影響について解析的に検討した。その結果，鉄筋のあきが 200mm 程度まででは均等に脱塩できることが明らかとなった。

キーワード：脱塩工法，電場解析，積算電流量，脱塩率，予測，鉄筋間隔

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の維持・管理における補修技術の効果の予測は，ライフサイクルマネジメントを行う上で極めて重要である。

脱塩工法における通電は，一般にコンクリート表面積当たり１A/m^2 の電流を８週間通電することを標準としているが，条件によっては，より短期間で十分な脱塩効果を得ることができる場合や，逆に，想定以上の通電期間を要する場合がある。したがって，施工前に脱塩の効果を予測することは，脱塩工法を効率的に行うために重要と考えられる。

脱塩工法における脱塩効率は，対象となるコンクリートの塩化物イオン量，コンクリート硬化体の組織，内在塩分あるいは外来塩分の違いなどの影響を受ける。また，通電により，コンクリート中の塩化物イオンを電気泳動の原理で陽極側へ移動させるため，構造物の形状や環境条件などによっては，電流が容易に流れる部位と流れにくい部位が生じ，効果の予測がより煩雑となる。

本文では，Laplace 方程式による電場解析から得られた電位分布を，オームの法則に基づいて電流密度の分布に変換し，積算電流量と脱塩率との関係から，脱塩の効果を予測する簡易手法を提案する。また，提案した予測手法の検証を目的として，実構造物を模擬したＰＣＴ桁の脱塩実験の結果を報告する。

2. 脱塩工法における脱塩効果の簡易予測手法

2.1 概念

電気化学的防食工法の効果の予測は，電場解析や電流分布のシミュレーション技術が，第１ステップとなる。これらの解析技術は，有限要素法や境界要素法などの数値計算法が既に確立[1)]されており，脱塩工法についても，それに適応した境界条件を設定することで容易に算定することができる。

第２ステップとして，第１ステップで算定された電位分布を基に，多孔質媒体であるコンクリート中の物質移動やこれに伴う収支を解く必要がある。その場合，塩化物イオン量や，塩分形態，コンクリートの見かけの拡散係数などの影響因子が複雑に関与し，解明されていない部分も多い。

一方，脱塩工法における脱塩率は，コンクリート中を流れた積算電流量との相関が知られており[2),3)]，簡易には，コンクリート中の電位あるいは電流分布から積算電流量を求め，それを脱塩率に換算することで評価ができる。

2.2 脱塩工法の効果の簡易予測方法

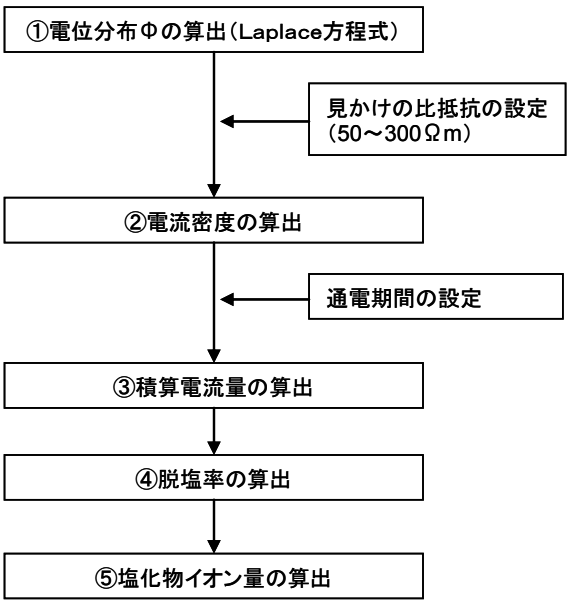
脱塩工法における脱塩量は，ファラデーの法則から，電流密度と通電時間との積で表される積算電流量に支配される。したがって，対象となるコンクリート中の電流密度の分布を知ることができれば，通電期間を乗ずることで，積算電流量を推定することが可能である。

脱塩効果の簡易予測方法のフローチャートを，**図－1** に示す。

(1) 電位分布の算出

通電時のコンクリートの電位分布は，式(1)の Laplace 方程式に基づいて算出することが出来る[2)]。境界条件として，コンクリート表面の仮設陽極の部分を零，陰極となる鉄筋を１として，単位電位分布を算出する。**図－2** に柱の断面における電位分布の算定例を示す。

*1 電気化学工業（株）　無機材料研究センター　博士（工学）　（正会員）
*2 （株）富士ピー・エス 技術製造本部 メンテナンスグループ　博士（工学）　（正会員）
*3 電気化学工業（株）　無機材料研究センター　博士（工学）　（正会員）
*4 群馬大学大学院 工学研究科 社会環境デザイン工学専攻 教授　工学博士　（正会員）



図－1　簡易予測のフローチャート

Laplace 方程式は，対象となるコンクリートを微小要素に分割し，差分法などを用いて簡便に解くことができる。

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (1)$$

ここに，ϕ：電位（V），x，y，z は座標である。

(2) 電流密度の算出

電流密度は，オームの法則により，式(2)で算出される。

$$I = \frac{(\Delta\phi/l)}{R} \qquad (2)$$

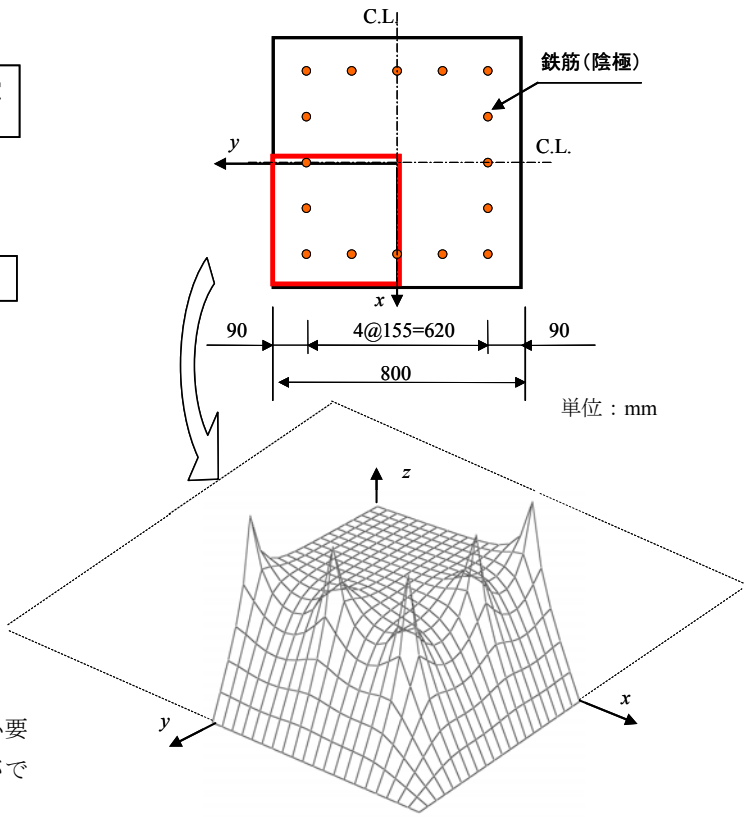
ここに，I：電流密度（A/m^2），$\Delta\phi$：電位差（V），l：微小要素の距離（m），R：コンクリートの見かけの比抵抗（Ωm）である。

式(2)において，電位差$\Delta\phi$は，Laplace 方程式から算出された電位から求め，微小要素間の距離で除して電位勾配とする。また，コンクリートの見かけの比抵抗Rは，コンクリートの含水状態により変化する。一般に，含水状態が高い場合には 50Ωm 程度，乾燥を受けている場合には 300Ωm 程度である [3]。

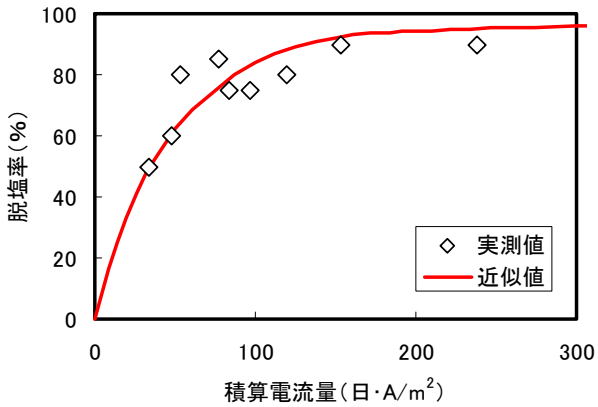
(3) 積算電流量の算出

各要素の電流密度が算定できれば，これに通電期間を乗じることで，各要素の積算電流量を算出することができる。

(4) 脱塩率の算出



図－2　Laplace 方程式による電位分布



図－3　積算電流量と脱塩率との関係例

表－1　K値およびα値

	K（%）	α（1/日･A/m^2）
外来塩分	80～90	0.04～0.05
内在塩分	80～90	0.06～0.07

脱塩工法における脱塩率は，処理前の塩分量に対する処理により除かれた塩分量の百分率で表される。積算電流量と脱塩率の関係は，これまでの報告や研究結果 [4),5)] を基に筆者らが整理した結果，**図－3** に示すような関係が得られた。簡易予測手法では，**図－3** の関係を式(3)で

近似して，脱塩率を算出した。

$$\eta = K\left(1 - e^{-\alpha \sum A}\right) \qquad (3)$$

ここに，η：脱塩率，ΣA：積算電流量（日・A/m^2），K：最終的な脱塩率（%）で，理想上の K 値は 100%である，α：脱塩速度に関する係数（1/日・A/m^2）である。

係数 K および α は，塩分形態により異なり，筆者らの既往の研究成果 [5)]から逆解析により同定すると，**表－1** に示す値となる。**表－1** より，内在塩分に比べて外来塩分の脱塩速度が速いことがわかる。

(5) 塩化物イオン量の算出

脱塩後に残存した塩化物イオン量は，脱塩率から式(4)で算出することができる。

$$C = C_0(100 - \eta)/100 \qquad (4)$$

ここに，C：脱塩後の残存した塩化物イオン量（kg/m^3），C_0：脱塩前の塩化物イオン量（kg/m^3）である。

3. 鉄筋間隔が脱塩工法へ及ぼす影響

(1) 検討条件

提案した簡易予測方法を用いて，「鉄筋間隔」をパラメータとした脱塩効果に関して解析的に検討した。

対象部材は，600×600mm のＲＣ柱を想定して，かぶりは 82mm とした。また，検討項目である鉄筋間隔は，140mm，210mm および 420mm の**表－2** に示す３水準とした。また，脱塩面となる陽極側のコンクリートの表面積当たりの電流密度は 1A/m^2 として，８週間通電を条件とした。**図－4** の上段 a)に検討部材の断面および脱塩処理前の塩化物イオンの分布を示す。

(2) 印加電圧への影響

表－3 に印加電圧の解析結果を，**図－4** の中段 b)に電流密度の分布を示す。

通電条件として，コンクリートの表面の電流密度の平均値を１A/m^2 としているが，鉄筋本数が多ければ陽極面の電流密度は 1.18～0.42A/m^2 の範囲であるが，逆に鉄筋本数が少ないときには 1.54～0.47A/m^2 の範囲をなる。すなわち，一本の鉄筋からの電流の有効範囲が存在することを意味するとともに，鉄筋の背面にも電流が流れていることを示している。したがって，鉄筋間隔が大きく，鉄筋本数が少ない場合には，コンクリートの表面において電流密度の平均値を１A/m^2 として維持するためには，必要な印加電圧は高くなる。逆に，鉄筋間隔が小さく密に配筋されている場合には，小さな印加電圧で所定の電流密度を一様にすることができる。

表－2　検討水準

	断面	かぶり（mm）	鉄筋間隔（mm）	鉄筋本数
Case1	600×600mm	90	140	12
Case2			210	8
Case3			420	4

表－3　印加電圧の解析結果

	陽極面の電流密度（A/m^2）			印加電圧（V）
	平均	最大	最小	
Case1	1.00	1.18	0.42	15.9
Case2	1.00	1.26	0.47	19.2
Case3	1.00	1.54	0.47	29.5

(3) 脱塩効果への影響

通電８週における塩化物イオンの分布を，**図－4** の下段 c)に示す。図より，鉄筋間隔が 200mm 程度までにおいては，比較的均一に脱塩できるが，鉄筋間隔が 400mm 程度の場合には，不均一な脱塩となり，鉄筋の間に塩分が残る可能性を示唆している。また，いずれの Case においても鉄筋の背面についても脱塩できていることがわかる。

以上より，コンクリート構造物から一様に脱塩するためには，鉄筋の間隔が重要な要素となり，また，印加電圧にも影響を及ぼすことが確認できた。

脱塩工法の効果を簡易に予測する手法を提案した今回の方法では，予測の精度と適用範囲に限界があるが，簡便な手法であり，施工管理や施工計画の一助となり得る。予測の精度向上を目的として，実施工におけるデータの蓄積を重ねることなどが，今後の課題である。

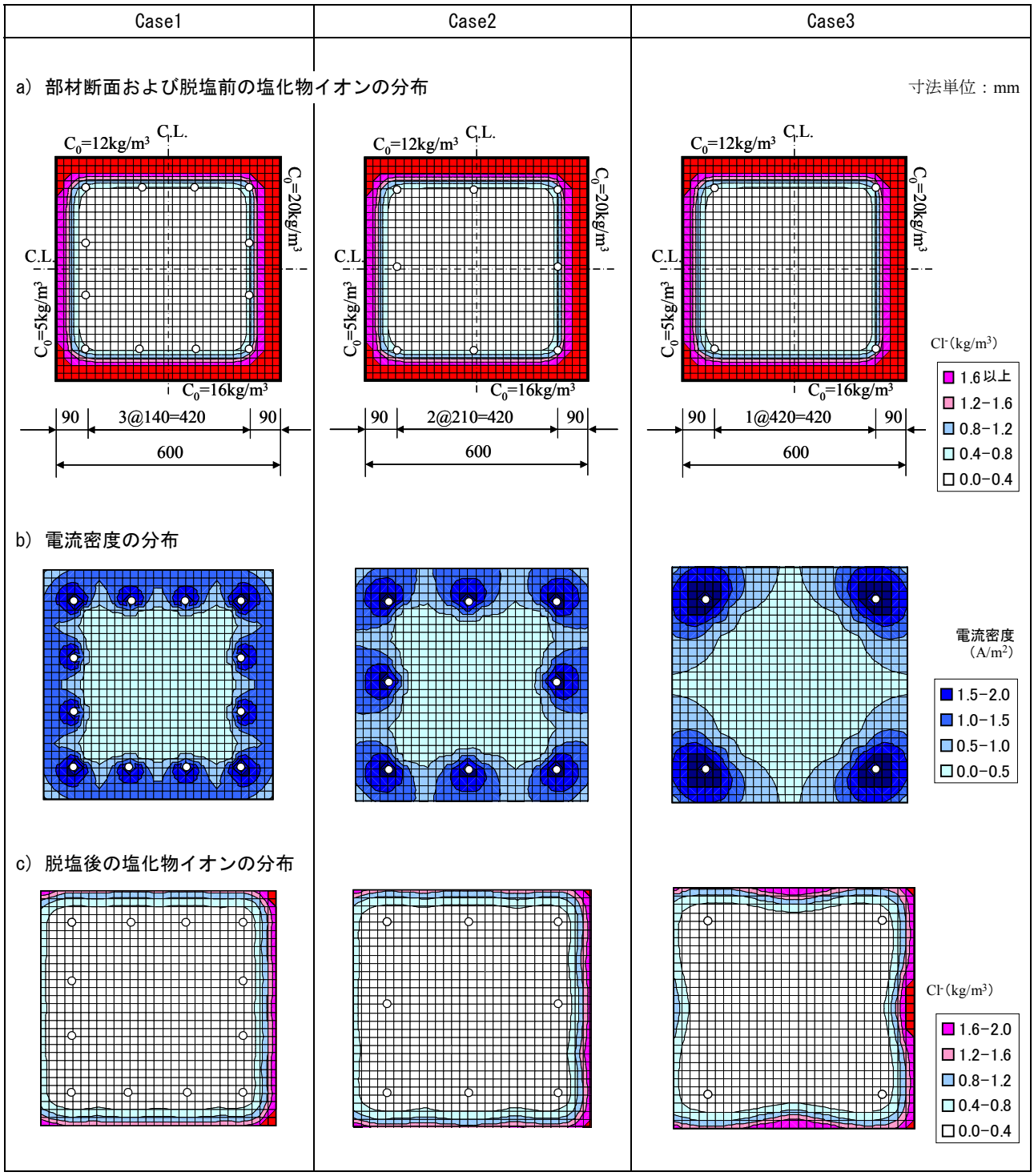
4. 脱塩の効果の簡易予測手法の評価

(1) 実験概要

図－5 に示すような，実在のポストテンション方式のＰＣＴ桁のウェブおよび下フランジを模擬した供試体について脱塩工法を適用し，提案した簡易予測手法の妥当性を検証した。

供試体のコンクリートに内在する塩分は，コンクリートの練混ぜ水に塩化ナトリウム水溶液を用いることにより再現した。塩化物イオン濃度は，比較的厳しい塩害環境下に長期間暴露した状態を想定して Cl^- 換算で 10kg/m^3 とした。コンクリートの配合を**表－4** に示す。なお，セメントには普通ポルトランドセメントを，減水剤には市販の AE 減水剤を用いた。また，コンクリートの設計基準強度は 40N/mm^2 である。

電解質溶液には，過去の実績を考慮して，ホウ酸リチ



図－4　電流密度および脱塩後の塩分の分布の解析結果

ウム水溶液を使用した。

供試体中の鉄筋およびシースの接点はそれぞれ絶縁して，並列回路を形成し，電圧が 50V 一定となるように印加した。通電は，８週間実施し，５日間の通電，２日間の停止を繰り返す，断続通電とした。

脱塩時の各鉄筋およびシースに流れた電流は，オームの法則により，抵抗を介して測定した電圧から求めた。**図－6** に鋼材およびシースの表面積に対する電流密度の経時変化を示す。

(2) 簡易予測モデル

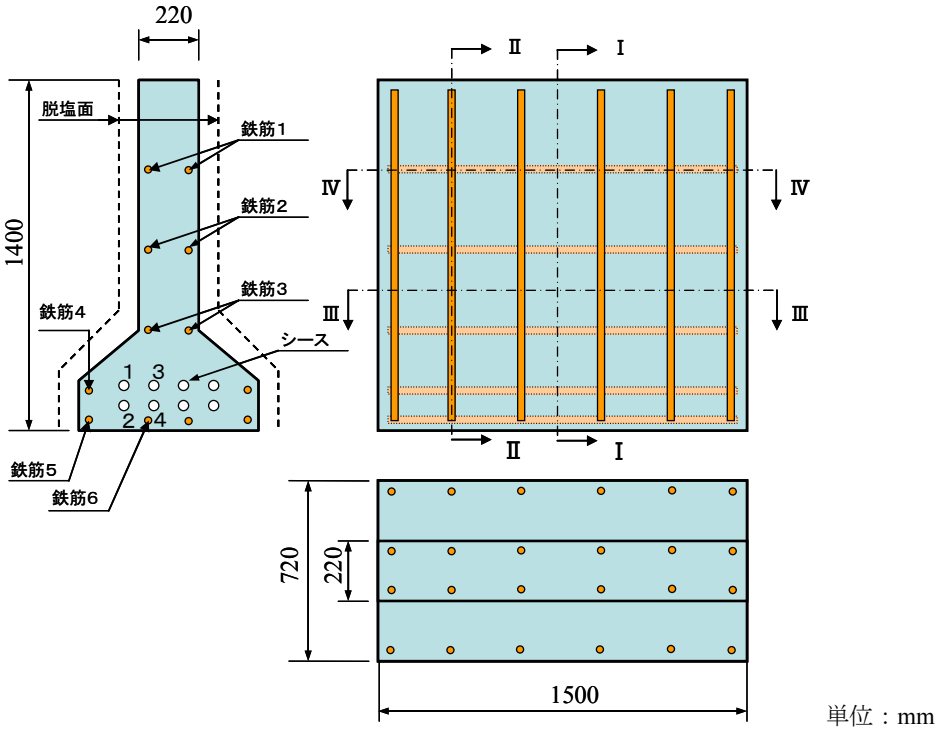
簡易予測モデルは，供試体を 1cm 角の要素に分割したモデルとした。境界条件は，陽極となる脱塩面を零，陰極となる鉄筋およびシースを１として，Laplace 方程式による電場解析を行った。電流密度の算出に際して，対象とするコンクリートの見かけの比抵抗には 50Ωm を用いた。単位電位分布比を，**図－7** に示す。

(3) 電流密度の比較

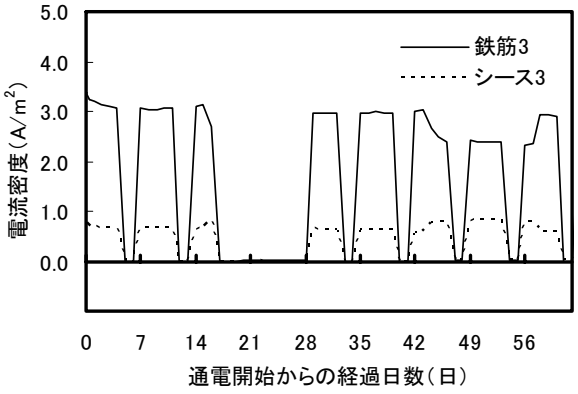
図－8 に，**図－5** に示した I-I 断面における鉄筋および

表－4　コンクリートの配合（40-12-20N）

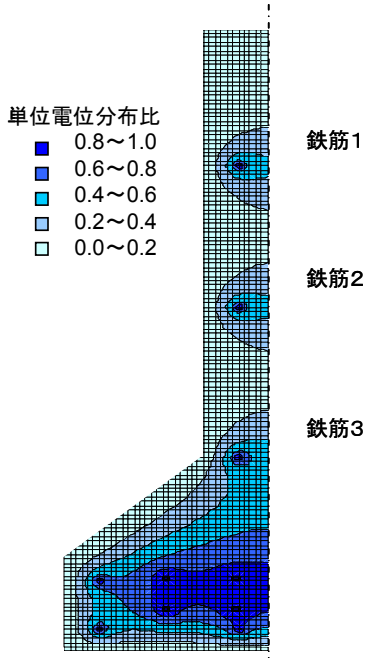
Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量（kg/m^3）					
				W	C	S1	S2	G	Ad.
20	44.0	45.4	4.5	161	366	411	415	1016	1.10



図－5　供試体の形状寸法



図－6　電流密度の経時変化



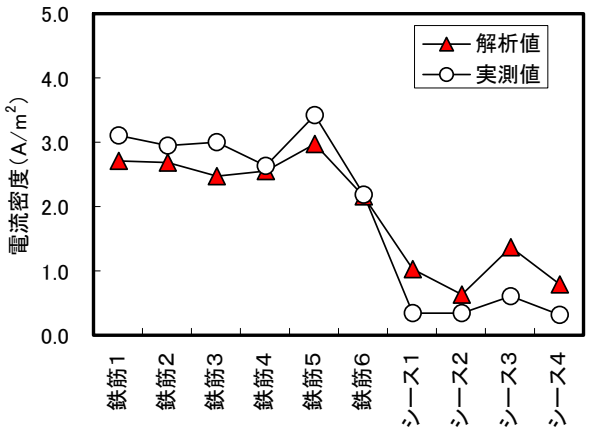
図－7　単位電位分布比

シースに流れた電流密度について，実測値と解析値の比較を示す。なお，実測値は，全通電期間における平均値である。**図－8** より，解析値は，実測値とほぼ一致しており，簡易予測における電場解析の妥当性を示唆している。

(4) 脱塩効果の比較

図－9 に，脱塩後に EPMA で測定した鉄筋１近傍の塩化物イオンの分布を示す。また,簡易予測による塩化物イオン分布を併記する。**図－9** より，簡易予測による結果は，EPMA の測定結果を概ね再現していることが確認できる。

なお，**図－9** には鉄筋間に高濃度の塩化物イオンの残



図－8　Ｉ－Ｉ断面における電流密度の比較

存が認められる。これは解析をコンクリート中に塩分を練り混んだ供試体を対象に行ったため，鉄筋間の塩化物イオンの排出に相当する塩化物イオンが鉄筋背面から補充され，見かけ上塩化物イオンが移動していないように見えるためである。３章で示した柱部材を対象とした鉄筋間隔が脱塩工法へ及ぼす影響において説明したとおり，外部から拡散浸透した塩化物イオンの場合には，鉄筋間の脱塩効率は主として鉄筋間隔に依存する。

5. まとめ

脱塩工法における効果の予測を目的として，電場解析による電位分布から電流密度の分布を算出し，積算電流量と脱塩率との関係から脱塩効果を予測する簡易手法を提案した。その結果，以下の知見を得た。

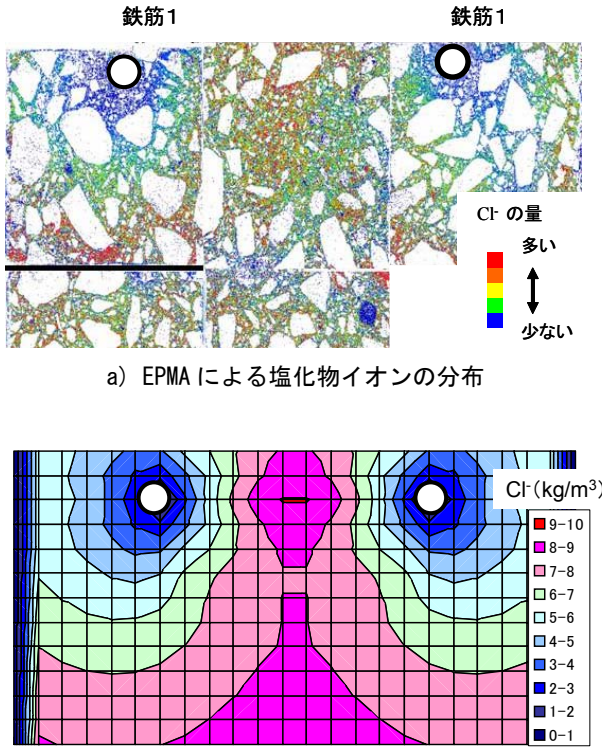
(1) 提案した簡易予測手法により，鉄筋およびシースに流れた電流密度が解析結果とほぼ一致していることから，電場解析の妥当性が示唆された。

(2) 提案した簡易予測手法による脱塩後の塩化物イオンの分布は，EPMA による実験結果を十分に再現できることが確認された。

(3) 提案した簡易予測手法を用いて，鉄筋間隔が脱塩効果に及ぼす影響を検討した結果，鉄筋間隔が大きい場合には，通電の経路が鉄筋近傍に集中し，脱塩面における電流密度の分布にバラツキがあることが確認された。また，所定の電流密度を保持するためには，印加電圧が大きくなる。逆に，鉄筋間隔が小さい場合には，電流密度の分布は一様となり，小さな印加電圧で所定の電流密度を保持できることが明らかとなった。

(4) 鉄筋間隔が 200mm 程度まででは，ほぼ均等に脱塩できるが，鉄筋間隔が 400mm 程度の場合には，局所的に塩分が残存する可能性が示唆された。

(5) 鉄筋間隔の大きさに関わらず，鉄筋の背面にも電流が流れ，脱塩できることが確認された。



a）EPMA による塩化物イオンの分布

b）提案した簡易予測手法

図－9　塩化物イオンの分布（上段鉄筋近傍）

脱塩工法を適用する場合，対象となるコンクリートの塩化物イオン量，コンクリート硬化体の組織，内在塩分あるいは外来塩分の違いなどのほかに，陰極となる鉄筋の配置により，脱塩効果に大きな差が生じる。そのため，より効果的で経済的に脱塩を実施するにあたって，事前の予測は重要であり，また，より精度の高い脱塩工法の効果の予測手法が望まれる。

参考文献：

1）日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会報告書，1994

2）椎名貴快，渡辺博志，久田真，古賀裕久：脱塩工法におけるコンクリート中の電場特性と塩化物イオンの挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1519-1524，2005

3）笠井芳夫：コンクリート総覧，技術書院，1998

4）久田真：通電によるコンクリート中のイオンの移動に関する研究，東京工業大学博士学位論文，1997

5）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