

論文 電気化学的脱塩工法における配筋状態と塩化物イオンの移動

正木 守^{*1}・徳光 卓^{*2}・芦田 公伸^{*3}・丸山 久一^{*4}

要旨：実構造物に電気化学的脱塩工法を適用する際には、配筋状態を考慮した脱塩設計が望まれるが、鉄筋相互の存在が補修効果に与える影響は十分に解明されてはいない。そこで本研究では鉄筋が2本配筋された供試体に電気化学的脱塩工法を適用し、塩分測定および電位分布測定を行い、配筋状態が塩化物イオン移動に及ぼす影響を検討した。その結果、並列配筋された鉄筋間の中央部は、塩分移動の主要経路となるために、塩分濃度が低下しにくいことが明らかとなった。また、コンクリート中の電位分布を測定することで、脱塩有効範囲の予測が概ね可能であることが示唆された。

キーワード：電気化学的脱塩工法、鉄筋の配置、電位分布、有効脱塩範囲、可溶性塩分

1. はじめに

電気化学的脱塩工法（以下、脱塩）は、コンクリート内に直流電流を流し、コンクリート中に存在する塩化物イオンを除去、低減することにより構造物の耐久性を向上させる工法である。

脱塩における塩化物イオンの移動に関しては、固定塩分、可溶性塩分共に積算電流密度により評価できることが報告されている。また、可溶性塩分の電気化学的な移動を再現できる簡易なモデルが提案されており、脱塩による塩化物イオンの移動予測が概ね可能である¹⁾。これらの多くは、試験条件の明確化のため、単鉄筋配置の試験体により検討が行われている。実構造物では、鉄筋は多段・縦横方向に配置されており、鉄筋相互の存在が塩化物イオンの移動に与える影響は、十分に解明されてはいない。

そこで、本研究では鉄筋を2本配置した供試体に脱塩を適用し、塩分分布測定を行うことで、鉄筋間の塩化物イオン移動について検討を行った。また、通電時に鉄筋周囲に形成される電場特性を把握し、脱塩有効範囲を予測することを目的としてコンクリート中の電流・電位分布測定を行った。

2. 実験概要

2.1 配合

示方配合を表-1に示す。PC桁を想定し、セメントには早強セメントを使用した。本実験では、比較的厳しい塩害環境を模擬し、初期塩分量として塩化物イオンを 10kg/m^3 （NaCl量で 16.5kg/m^3 ）だけ、外割添加した。

2.2 供試体

供試体寸法は $100 \times 300 \times 200\text{mm}$ であり、SD345の異形鉄筋D13を横方向または縦方向に配置した。コンクリートから突出する鉄筋部分はあらかじめ熱収縮チューブで被覆しておき、通電中の鉄筋からの電流の短絡を防止した。

コンクリート硬化後28日間の湿布養生を行った。28日圧縮強度の平均値は 48.7N/mm^2 であった。図-1の供試体断面図に示すように、養生後にエポキシ樹脂を用いて脱塩面以外の電解質溶液に浸漬するすべての側面を被覆した。

表-2に供試体一覧を、図-2に供試体の形状寸法を示す。表-2において、鉄筋深さは脱塩面から鉄筋中心までの距離を表している。本実験では配筋のみが異なる5種類の供試体を作製した。配筋方向は脱塩面に対して、横方向と縦方

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 (株)富士ピー・エス 技術本部 技術開発グループ 博士(工学) (正会員)

*3 電気化学工業 (株) 青海工場 無機材料研究センター 博士(工学) (正会員)

*4 長岡技術科学大学 環境・建設系教授 Ph.D. (正会員)

表-1 示方配合

配合強度 f_c N/mm ²	粗骨材の 最大寸法 mm	スランブ の範囲 cm	空気量 の範囲 %	水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位量[kg/m ³]						
						水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤	塩
						W	C	S	G _大	G _小	SP	NaCl
40	20	8	4	44	45.6	161	366	815	258	773	1.83	16.5

表-2 供試体一覧

供試体名	通電期間	鉄筋深さ	配筋方向	陽極材	通電方法
No.1	4週	35	横方向	チタンメッシュ	鉄筋を並列回路として通電
	8週				
No.2	4週	70			鉄筋を並列回路として通電
	8週				
No.3	4週	35,70	縦方向	チタンメッシュ	鉄筋を並列回路として通電
	8週				
No.4	8週	35	チタンロッド	チタンロッドを並列回路として通電	
No.5	8週	70			



図-1 供試体断面図

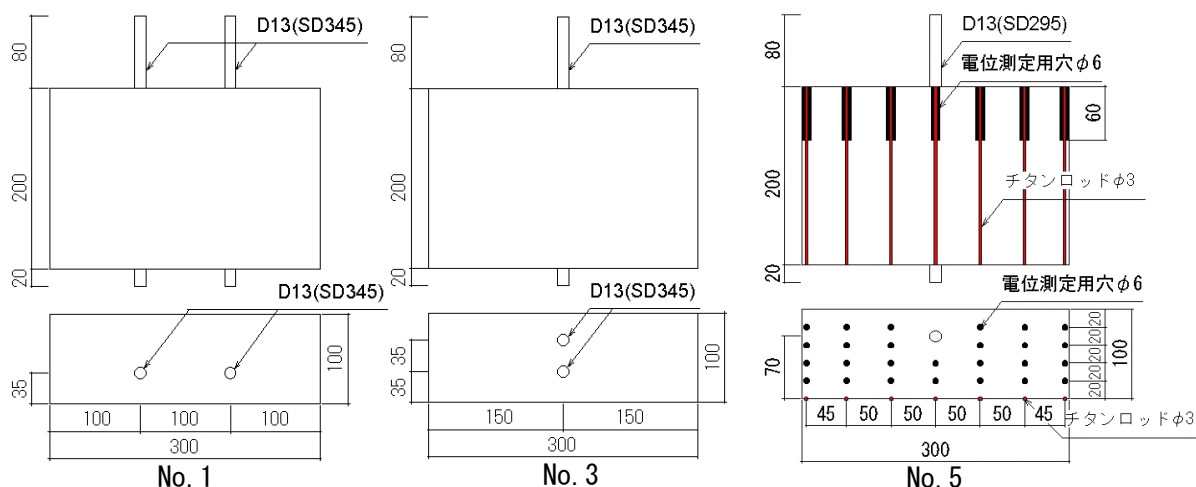


図-2 供試体の形状寸法

向の 2 方向とした。横方向配筋時の鉄筋間隔は 100mm とした。また、鉄筋深さは、脱塩面から 35mm, 70mm の 2 水準とした。

電位分布測定供試体は鉄筋を 1 本のみ配置した。電位分布測定を行う供試体においては、鉄筋深さが脱塩面から 35mm, または 70mm のものの 2 種類を作製した。

2.3 実験方法

電源陰極へは鉄筋が並列回路となるように接続した。

陽極材はチタンメッシュを用いることを基本とした。ただし、電位分布測定供試体(No.4, No.5)においては、電流分布を測定することを目的として、 ϕ 3mm のチタンロッドを 7 本使用し、電源陽極に並列回路となるように接続した。ロッドは打設時にコンクリート表面(脱塩面)にロッドの表面が半分だけ埋め込まれるように設置した。

コンクリート中の電流分布は、各チタンロッドに流れる電流をテスターで測定した。また、コンクリートの電位分布は、所定の位置に深さ 60mm の穴を設けて、銀-塩化銀照合電極を挿入し測定した。なお、電解質溶液には 1.24mol/l のホウ酸リチウム水溶液を用い、鉄筋が完全に浸漬する位置まで水溶液を充填した。

2.4 実験条件

電流密度はコンクリート表面積 (0.06m²) あたり 1A/m² として、直流電流を定電流で与えることを基本とした。

通電期間は連続通電で 8 週間とし、No.1~3 では、脱塩 4 週目の塩分分布を測定する目的で、通電期間を 4 週とした供試体も作製した。

2.5 塩分分析

脱塩後のコンクリート中の塩分分析は JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて行った。

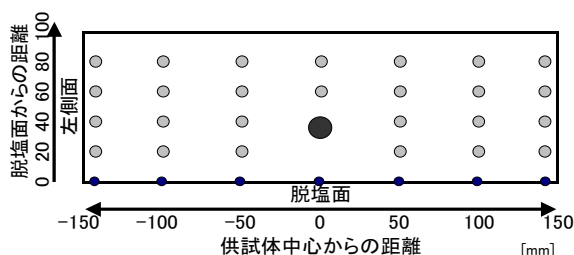


図-3 電流・電位分布測定位置

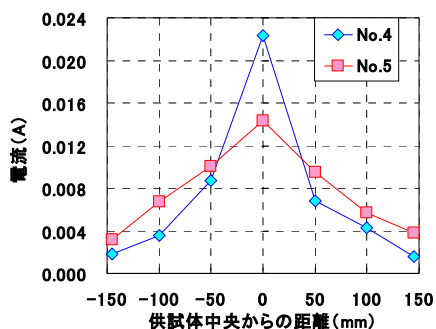


図-4 チタンロッドの電流分布

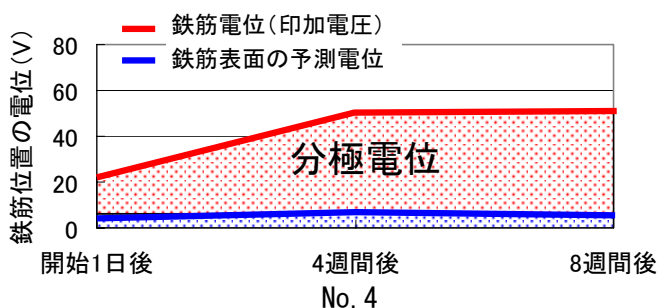
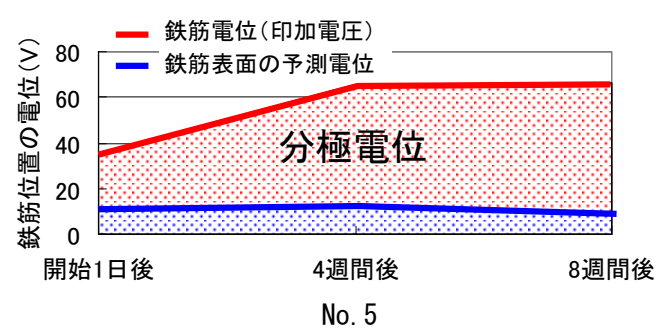


図-5 鉄筋位置の電位の経時変化



可溶性塩分量は全塩分量に相関があることが報告されており、可溶性塩分量を測定することで全塩分量の予測が可能である²⁾。そこで、本実験では可溶性塩分量の測定を行った。図-1に示すように、供試体の中心部では20mm×20mm、それ以外は20mm×50mmとなるように試験体を45分割して測定を行った。

3. 電位・電流分布測定

3.1 チタンロッドに流れる電流分布

図-3に電流と電位分布の測定位置を示す。図-4にNo.4、No.5供試体における、8週間後のチタンロッドの電流分布を示す。No.4、No.5ともに、鉄筋に最も近い0mmの位置で最大となり、距離が離れるほど電流が小さくなる結果となった。また、0mmの位置を軸としてほぼ左右対称な分布が確認された。

電流の最大値は、鉄筋深さが70mmのNo.5に比べ、鉄筋深さが35mmのNo.4のほうが大きい。これは、電位勾配の違いによるためと考えられる。本試験では、コンクリート表面積あたりの電流密度を一定としたため、鉄筋から離れた箇所では、かぶりが大きいが、電流が大きくなる結果となった。各部位の脱塩量は、電流密度と深く関係しているのでかぶりが小さい場合

には脱塩の効果が得られる範囲が比較的狭い範囲に限定されると推測される。

3.2 時間経過に伴う電位分布の変化

図-5に鉄筋位置の電位の経時変化を示す。ここで、鉄筋の分極電位は、コンクリートの電位分布から予測される鉄筋表面位置の電位と、鉄筋電位(印加電圧)との差を取ることで求めた。分極電位は脱塩開始1日後から4週間後までの間に大きく上昇し、4週間後から8週間後にかけては上昇速度が緩和する結果となった。また、No.4、No.5供試体の分極電位に大きな差は見られず、鉄筋深さが分極電位の変化に及ぼす影響は小さいことが確認された。印加電圧に対する分極電位の割合と上昇率は、比較的大きく、特に4週間以降では、電位の大半が鉄筋表層で消費されてしまう。この理由で、同一電力量に対する脱塩効率も脱塩時間とともに低下していくと考えられる。このような分極電位の上昇は、通電により発生した水素ガスが鉄筋表面に付着し、そのガスが抵抗となり生じた可能性がある。陰極で生じる分極上昇の機構と評価については今後の課題としたい。

図-6にNo.4、図-7にNo.5の時間経過に伴う電位分布の変化を示す。測定電位は外気温の影響を強く受けることが確認された。そこで、

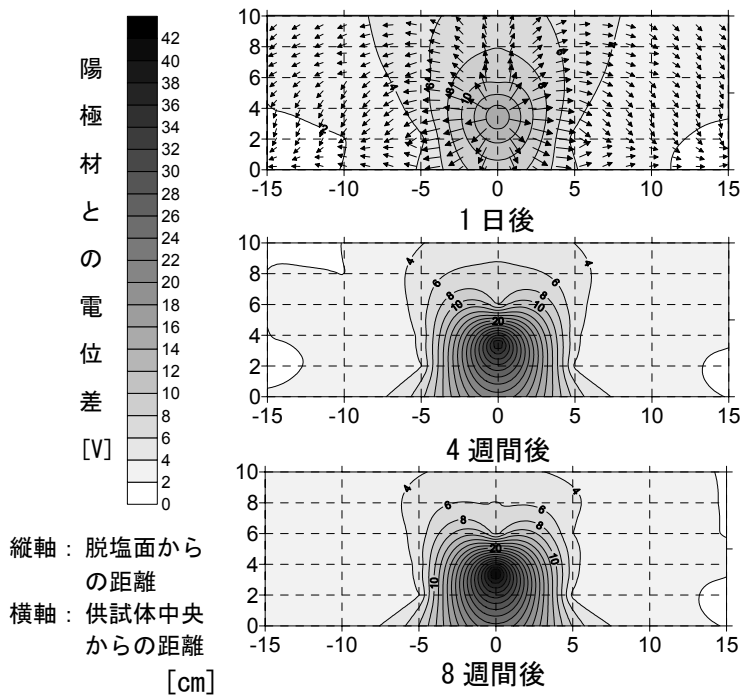


図-6 No. 4 供試体の電位分布変化

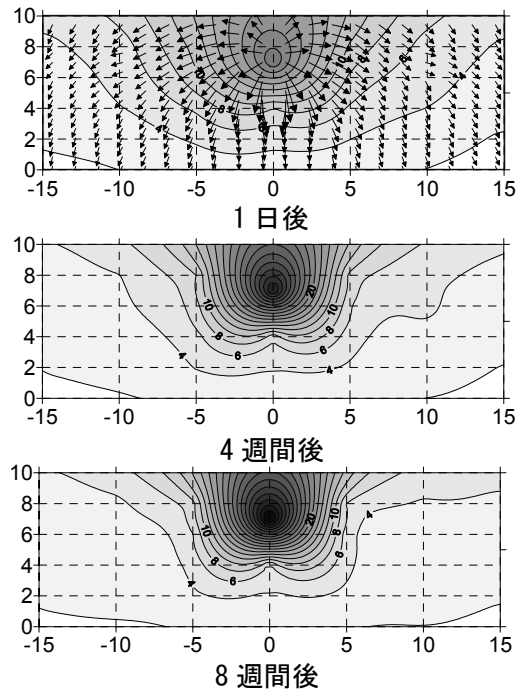


図-7 No. 5 供試体の電位分布変化

コンクリート細孔溶液中の温度依存性は水溶液中のイオン導電率と同様であると仮定し、以下の式により温度補正を行い、比較を行った。ここで、補正時の基準温度は 12.2℃（通電期間中の平均水温）とした。例えば、水温 T_1 が 5℃であった場合、補正係数 C は 0.807 となる。

$$C = \frac{1 + 0.02(T_1 - 25)}{1 + 0.02(T_2 - 25)} \quad (1)$$

ここに、 C ：補正係数、 T_1 ：水温（℃）、 T_2 ：補正後の水温（℃）である。

No.4, No.5 のどちらの供試体においても、鉄筋近傍の電位上昇が顕著となり、周辺コンクリート中の電位勾配は比較的小さいことが確認された。また、鉄筋から数センチ以上離れた箇所のコンクリート中の電位はほとんど変化していない。このことから、通電によってイオン移動が生じて、コンクリートの比抵抗分布の変化は割合小さく、鉄筋側の分極のみが経時的に大きくなるのが分かる。

等高線間隔は電位勾配を示すことから、等高線間隔により、電流密度を推測することができる。また、電流の向きは等高線の垂直方向を辿ることで推測される。鉄筋深さの小さな No.4 では、No.5 に比べ同じ電位の範囲が小さいことが

確認できる。そのため、鉄筋位置から 5 cm 以上離れた部分では電流勾配が小さく、この範囲に対する脱塩効果は小さいものと推測される。一方、No.5 では、No.4 に比べ電位分布が広い範囲まで及んでいることから、脱塩効果は比較的大い範囲まで期待できるものと予想される。

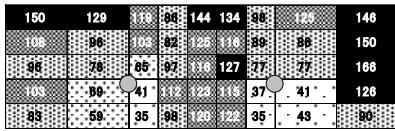
4. 塩化物イオンの移動

4.1 可溶性塩分の塩分分析

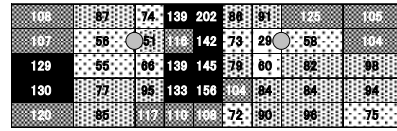
脱塩を行っていない供試体の可溶性塩分量の平均値は 7.5kg/m³ であった。そこで、各供試体において初期可溶性塩分量を 7.5kg/m³ と仮定し、脱塩効果の検討を行った。

(1) 2本配筋供試体の可溶性塩分測定結果

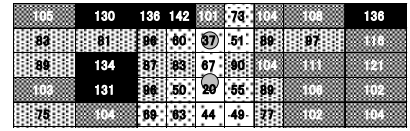
図-8に2本配筋供試体の可溶性塩分測定結果を示す(図-10 塩分分析位置参照)。図中には、初期塩分量に対する各点の可溶性塩分量を 100 分率で示した(数値が 100 以下であれば可溶性塩分が減少していることを表している)。No.1-4 週においては、鉄筋位置から脱塩面に向かう範囲で、塩分の減少が顕著であることが確認できる(位置：4, 5, 24, 25)。しかし、鉄筋裏側、特に最遠(26, 41)では、可溶性塩分が約 50%増加している。これは、鉄筋が及ぼす同心円状の電場



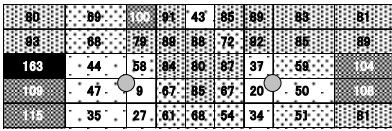
No. 1-4 週



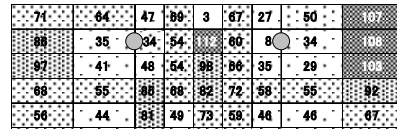
No. 2-4 週



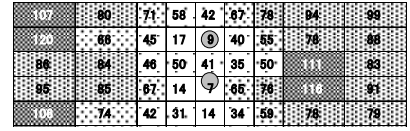
No. 3-4 週



No. 1-8 週

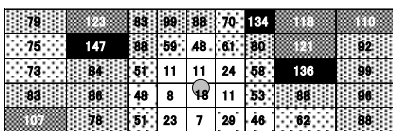


No. 2-8 週

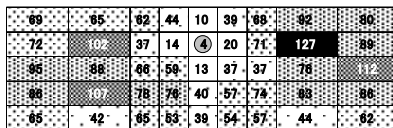


No. 3-8 週

図-8 2本配筋供試体の可溶性塩分測定結果



No. 4



No. 5

図-9 電位分布測定供試体の可溶性塩分測定結果

※図中の数値は初期可溶性塩分量を100とした場合の塩分量

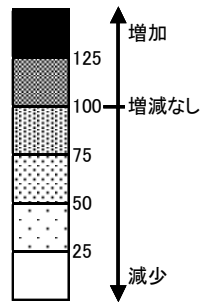
によって、放射状に塩分移動が生じたためと考えられる。また、鉄筋間(11~20)においても、20%~40%の塩分量の増加が確認できる。両鉄筋が生成する電位は、対称性のために、鉄筋間の中央付近で一致する。このため、この範囲には、左右の両方から塩分が流入するので、塩分集積を生じたと考えられる。

No.2-4 週においても、同様の傾向が確認できる。この供試体は配筋位置が脱塩面から70mmであるので、No.1-4 週のように、鉄筋裏側(26, 41)に塩分が集積することはなかった。しかし、No.1-4 週以上に鉄筋間に塩分が集積する結果となった。(14)の位置では約1.5倍、(11)の位置においては2倍まで増加している。

8 週測定結果では、鉄筋間中央部に生じる集積度は緩和されていることが確認できる。このことから、塩分移動経路はおおむね2 経路に整理される。

1 つ目の経路は鉄筋から脱塩面に直接向かう経路であり、この経路での電位勾配は比較的大きいために、通電後早期に塩分移動が完了する。

2 つ目は、鉄筋から横方向に移動し、鉄筋間の



26	31	1	6	11	16	21	36	41
27	32	2	7	12	17	22	37	42
28	33	3	8	13	18	23	38	43
29	34	4	9	14	19	24	39	44
30	35	5	10	15	20	25	40	45

300mm

脱塩面

側面
100mm

図-10 塩分分析位置

中央位置で脱塩面側に移動方向を転換する経路である。この経路では、幅方向の電位勾配に比して、奥行き方向の電位勾配が小さいために、脱塩過程で一旦、塩分集積が生じるものの、時間の経過とともに、外部への移動が進み、塩分量は徐々に低下していく。

No.1 と No.2 の結果より、鉄筋と脱塩面を短絡する経路においては可溶性塩分が減少するが、鉄筋間においては非常に減少しにくい部分が存在することを確認した。このような抜け残りがあると、塩分の再拡散による再劣化が懸念される。この部位で塩分量が低下しない原因は、この部分が、鉄筋背面および側面にある塩分の移動経路となっているためであると考えられる。そのため、塩分量の減少のしにくさは、鉄筋の背面および側面に存在する塩分量に支配されると思われる。

本実験の塩分は練りこまれたものであり、初期状態での塩分濃度は一様である。通常の外部から拡散浸透した塩分の分布の場合には、鉄筋背面の円分量は本試験条件に比して小さいため、本実験で見られたような鉄筋間での塩分集積や、

抜け残りの影響は大きくないと考えられる。ただし、塩分の浸透が極度に深部にまで及んでいる場合は、この部位の塩分が十分に低下するように、脱塩適用期間および電流密度を適切に管理・設定する必要がある。また、脱塩は塩分が鉄筋の奥深く浸透し、劣化が進行する前に行うのが好ましいと言える。

No.3-4 週間においては、下側の鉄筋と脱塩面との短絡する部分が最も減少した。また、鉄筋間においては、横方向配筋の場合のような塩分の集積は見られなかった。しかし、鉄筋の電場が及びにくい側面付近の位置では、あまり塩分の移動が確認されなかった。

(2)電位分布測定供試体の可溶性塩分測定結果

No.4 と No.5 の可溶性塩分測定結果を図-9 に示す。No.4 においては、鉄筋周辺 (8~9, 13~15, 19) で顕著に減少していることが確認され、鉄筋から脱塩面に短絡する (15) の塩分量が最も小さくなった。鉄筋の裏側においても塩分は減少しているが、(21, 31~32, 36~38) で増加していることから、電位勾配により中央付近から側面方向へ移動したものと考えられる。

No.5 においては、No.4 と同様に鉄筋周辺 (7, 11~13, 17) での減少が顕著であった。また、鉄筋から脱塩面に短絡する位置 (13~15) においてもその周辺に比べ塩分が減少しており、No.4 と同様の傾向が確認された。

5. 脱塩有効範囲の予測

今回行った電位分布測定の結果より、No.4, No.5 の供試体どちらにおいても、電位勾配が変化した部分 (図-6, 7 における等高線の間隔が狭い部分) は鉄筋位置から直径 40mm~60mm の範囲である。その範囲における可溶性塩分の測定結果に注目すると、概ね初期塩分量の 50%以下まで減少していることが確認された。これらより、コンクリート中の電位分布を測定することで、脱塩有効範囲を予測することが可能であると考えられる。有効範囲に関しては、コンクリートの物性や配筋状態の影響など、今後更な

る検討が必要である。

6. 結論

今回の実験より以下の知見が得られた。

- (1) 脱塩中のコンクリートに設置された陽極材の電流分布において、鉄筋から近い、電位勾配の大きい位置にあるチタンロッドほど電流は大きくなる。
- (2) 分極電位の変化は鉄筋深さにあまり影響されない。
- (3) 脱塩時におけるコンクリート中の電位分布はほとんど変化せず、分極によって鉄筋電位が変化する。
- (4) 横方向配筋の鉄筋間においては、塩分の減少しにくい部分が存在する。塩分の浸透が深部にまで及んでいる場合、この部分において抜け残りがあると、再拡散による再劣化が懸念されるため、脱塩設計・管理を的確に行う必要がある。
- (5) コンクリート中の電位分布から得られる電位勾配より、有効脱塩範囲の予測が概ね可能であることが示唆された。

謝辞

本実験を行うにあたり、九州工業大学日比野誠助教授、長岡技術科学大学田中泰司助手に多大な御指導を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北岡勇介ほか: 電気化学的脱塩工法によるイオンの移動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp871-876, 2005
- 2) 丸屋剛ほか: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp81-90, 1992.2
- 3) 椎名貴快ほか: 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, vol.27, No.1, pp1519-1524, 2005