

電気化学的脱塩工法による鉄筋の配置と塩化物イオンの移動に関する検討

コンクリート研究室 正木 守

指導教員 下村 匠

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、もしくは、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。

脱塩工法を適用した場合のコンクリート中に生じる電場特性を把握することは、効率的な脱塩効果を得るために重要である。また、塩分の浸透が構造物の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。そこで本研究では、鉄筋1本が及ぼす電場特性を把握することでの脱塩有効範囲の推定と、鉄筋を2本配置した供試体に脱塩工法を適用した場合の、脱塩効果についての実験的検討を目的とした。また、2003年12月から行っている、脱塩を適用したPC供試体の長期暴露実験の結果についても考察した。

2. 鉄筋1本あたりの脱塩有効範囲の検討

2.1. 実験概要

2.1.1. 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。

2.1.2. 供試体

図-1に供試体詳細を示す。供試体寸法は $100 \times 300 \times 200\text{mm}$ であり、SD345の異形鉄筋D13を1本配置した。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漏れを防止した。電流分布を測定することを目的として、 $\phi 3\text{mm}$ のチタンロッドを7本使用し、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。配筋位置は、供試体の中央に脱塩面から 35mm の深さに配置した供試体 (No.1)、 70mm の深さに配置した供試体 (No.2) の2種類を作製した。

表-1 示方配合

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 %
20	8	4	44	45.6

単用量 $[\text{kg/m}^3]$					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	塩 NaCl
161	366	815	1031	1.83	16.5

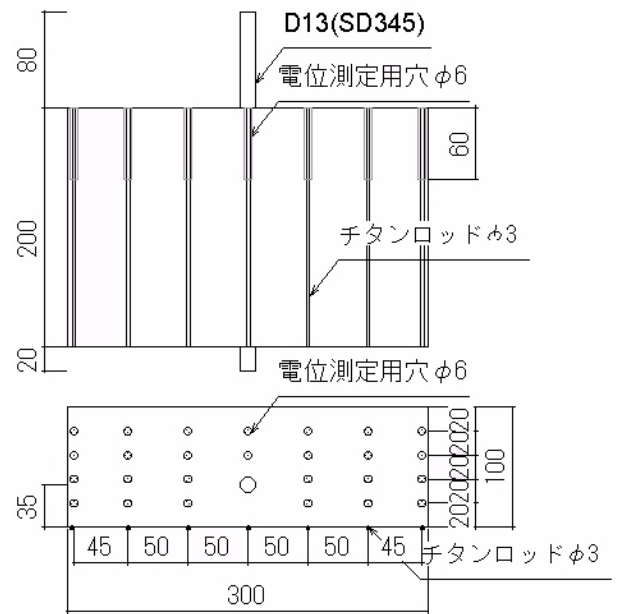


図-1 供試体詳細 (No. 1)

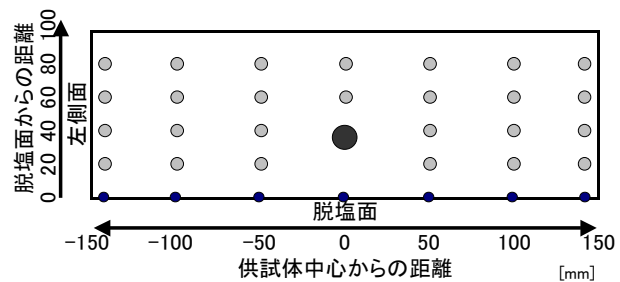


図-2 電流・電位分布測定位置



図-3 切断面図

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 48.7 N/mm²であった。養生後に脱塩面以外の電解質溶液に浸漬するすべての面を被覆した。その後、コンクリート用ドリルを用いて電位測定用の深さ 60 mm の穴を設けた。

2.1.3. 実験方法

図-2 に電流と電位分布の測定位置を示す。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、電解質溶液にはホウ酸リチウム水溶液を用いた。

2.1.4. 脱塩水準

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 週間とした。

2.1.5. 塩分分析

脱塩後のコンクリート中の塩分分析は JCI-SC4 「効果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 に示すように、試験体を 45 分割して、各位置の可溶性塩分量を測定した。分割時の寸法は供試体の中心部では 20mm×20mm、それ以外は 20mm×50mm とした。

2.2. 実験結果

2.2.1. チタンロッドに流れる電流分布

図-4 に No.1, No.2 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.1, No.2 とともに、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.2 に比べ、鉄筋深さが 35mm の No.1 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、かぶりが大きいほう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ため、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。

2.2.2. 時間経過に伴う電位分布の変化

本実験において、測定電位 (電源装置の印加電圧) は外気温の影響を強く受けることが確認された。そこで、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、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°C (通電期間中の平均水温) とした。

図-5 に鉄筋の分極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外挿された鉄筋位置の電位と、鉄筋電位の測定値の差を取ることによって求めた。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 週間以降では電力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は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の影響などが考えられる。また、陰極では、アルカリ金属イオンの集積に伴って、

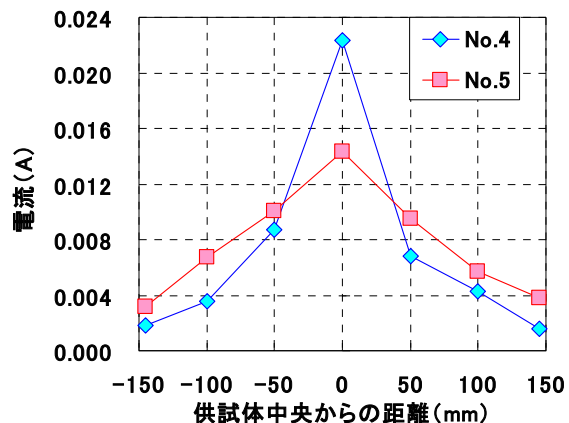


図-4 チタンロッドの電流分布

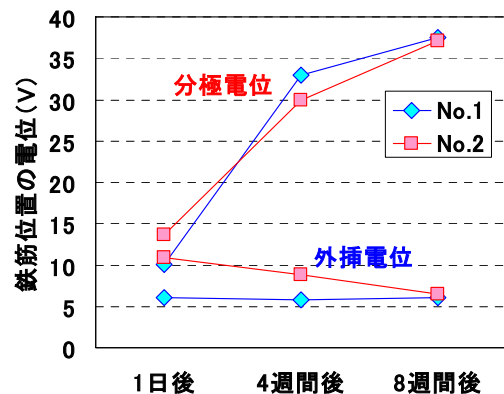


図-5 時間経過と鉄筋位置の電位変化

水素イオン濃度が減少する結果、濃度分極を生じる可能性も考えられる。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.1, 図-7にNo.2の電位分布の変化を示す。No.1, No.2のどちらの供試体においても、鉄筋電位の上昇が顕著となり、鉄筋周辺で電位勾配が小さくなることが確認された。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おらず、通电によって生じたイオンの移動が影響を及ぼしていると推測される。

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.1では、No.2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5cm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.2では、No.1に比べ電位分布が広い範囲まで及んでいることから、脱塩効果は比較的広い範囲まで期待できるものと予想される。

2.2.3. 可溶性塩分量測定結果と脱塩有効範囲

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/m^3 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/m^3 と仮定し、脱塩効果の検討を行った。

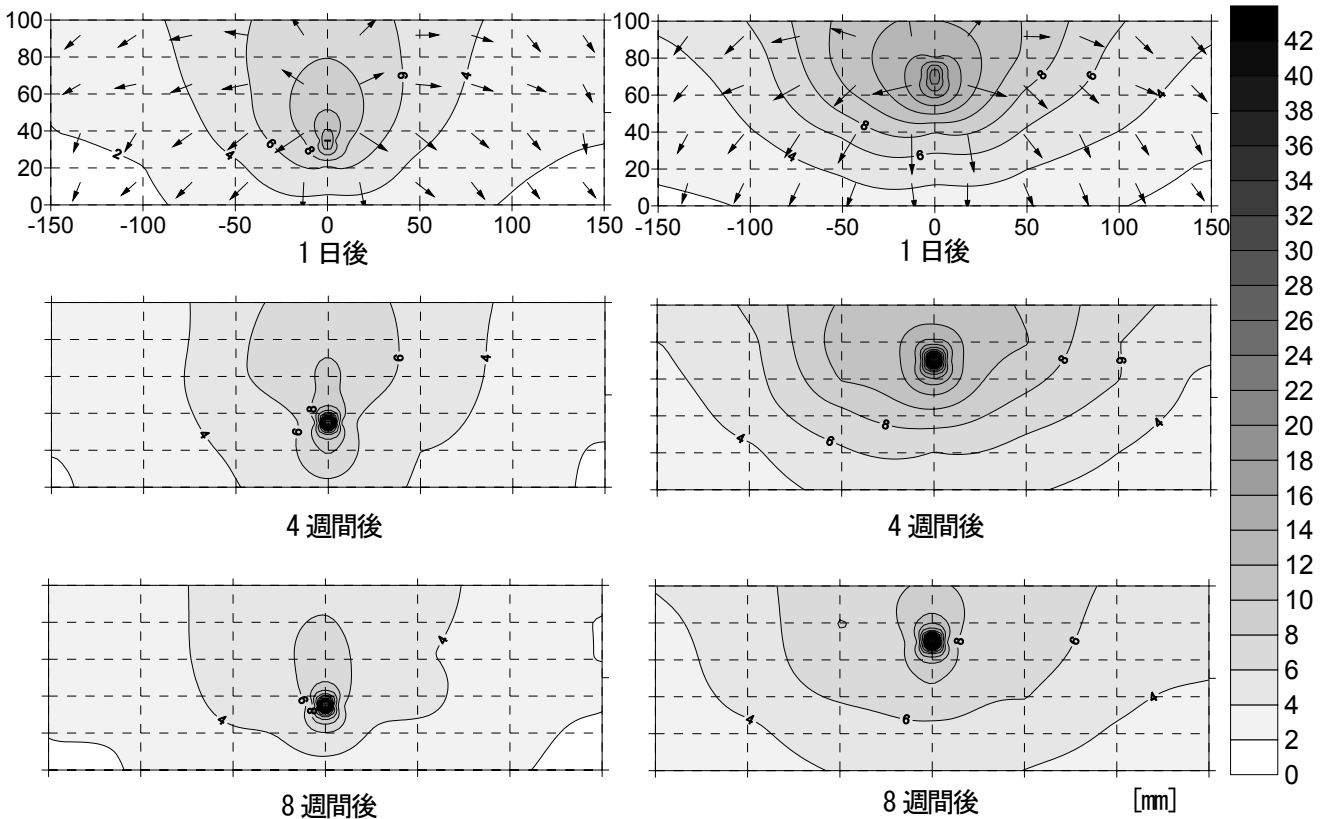


図-6 No. 1 供試体の電位分布変化

図-7 No. 2 供試体の電位分布変化

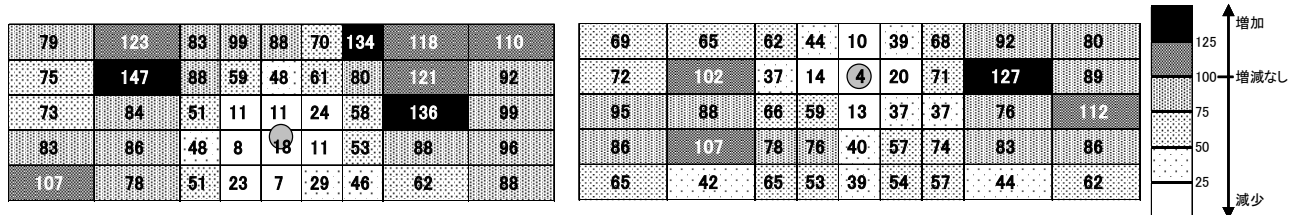


図-8 電位分布測定供試体の可溶性塩分量測定結果

※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

No.1 と No.2 の可溶性塩分測定結果を図-8 に示す。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 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.2 においても No.1 とほぼ同様の傾向が確認された。

以上の可溶性塩分量と電位分布の結果より、電位勾配の大きな部分では、可溶性塩分量は概ね初期塩分量の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。

3. 鉄筋2本配置した供試体への脱塩工法の適用

3.1 実験概要

配合と、脱塩水準、塩分分析については前章と同様である。ただし、脱塩水準において、脱塩期間が塩化物イオンの移動に及ぼす影響について検討を行うため、4週間脱塩用の供試体も作製した。

3.1.1 供試体

表-2 に供試体一覧を、図-9 に供試体 No.3, No.5 の配筋位置を示す。供試体の寸法は No.1, No.2 と同様とし、配筋のみが異なる3種類の供試体を作製した。配筋方向は脱塩面に対して、並列配筋と縦列配筋の2方向とした。並列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。

3.1.2 実験方法

図-10 に実験装置の模式図を示す。陰極側は、鉄筋を電源陰極に並列に接続した。電源装置は定電圧・定電流直流電源を用いた。本実験では陽極材にチタンメッシュを用い、電解質溶液はホウ酸リチウム水溶液を使用した。縦列配筋された No.5 供試体において、通

電方法の影響を確認するために、上下ともに通電するケース(No.5A)、上側の鉄筋にのみ通電するケース(No.5B)、4週間上側の鉄筋に通電した後、下側の鉄筋に4週間通電するケース(No.5C)の3種類の通電方法を実施した。

3.2 実験結果

3.2.1 鉄筋に作用する電流密度の変化

脱塩中の鉄筋に作用する電流密度の測定結果より、

表-2 供試体一覧

供試体名	通電期間	鉄筋深さ	配筋状態	通電方法	
No.3	4週	35	並列	2本ともに通電	
	8週				
No.4	4週	70			
	8週				
No.5A	4週	35,70	縦列	上側の鉄筋のみ通電	
No.5B	4週			No.5C	上側4週間通電後、下側4週間通電
8週					

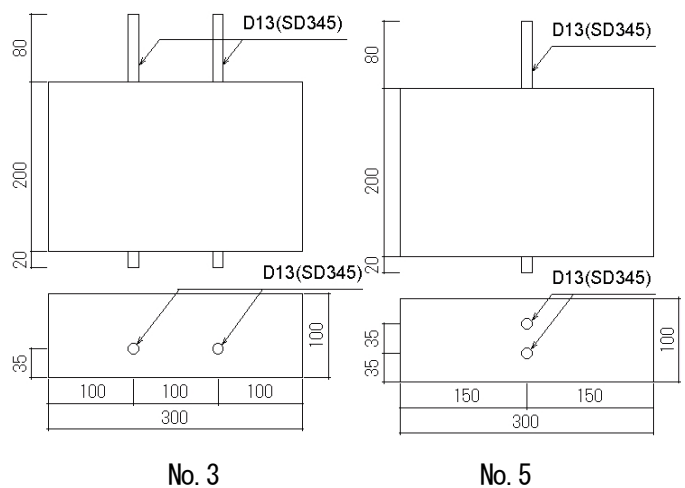


図-9 配筋位置

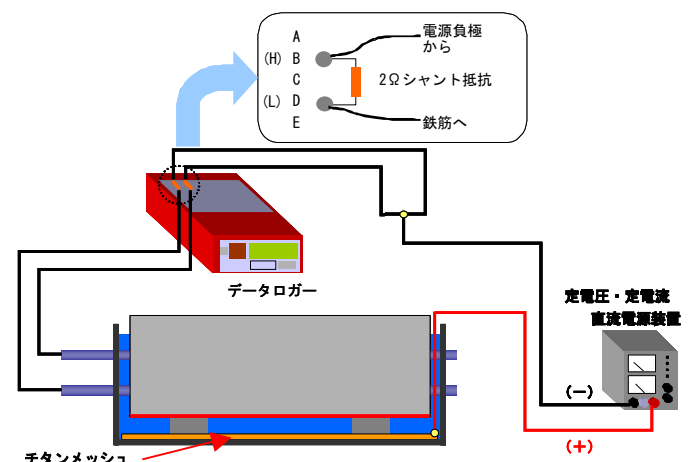


図-10 実験装置の模式図

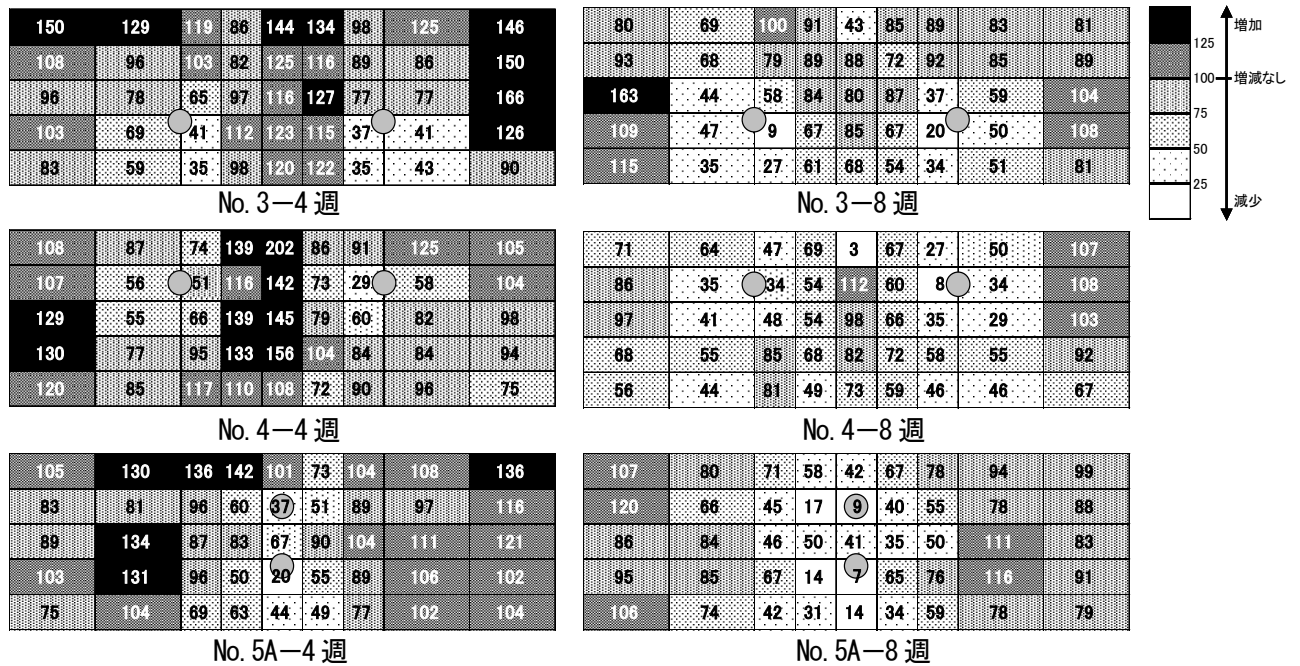


図-11 2本配筋供試体の可溶性塩分測定結果

電流密度の変化は分極作用によるコンクリート抵抗の変化に左右され、また、それは積算電流密度で評価できる可能性があることが示唆された。

3.2.2. 通電方法が脱塩効果に及ぼす影響

上側の鉄筋にのみ通電した No.5B, No.5C 供試体において、脱塩面にひび割れが発生した。これは迷走電流腐食による下側鉄筋の腐食が原因と考えられ、この結果より、多段配筋された供試体において、脱塩面からより深い位置にある鉄筋にのみ通電する通電方法は、実施してはならないことが確認された。

3.2.3. 配筋状態が脱塩効果に及ぼす影響

図-11 に No.3, No.4, No.5A 供試体の可溶性塩分測定結果を示す。No.3-4 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。

No.4-4 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.3-4 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。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、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、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.5A-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。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。8 週測定結果では、鉄筋位置 (12, 14) で 10% 以下にまで減少した。4 週測定結果では側面付近での塩分の移動は確認されなかったが、8 週測定結果では側面付近も減少していることが確認された。鉄筋から離れた側面付近では電位勾配が小さいため、塩分の移動に時間がかかるものと思われる。

以上の結果より、鉄筋間においては塩分が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。しかし、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、鉄筋背面の塩分量は本実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。

3. 脱塩工法適用後のPC鋼材腐食性状とコンクリート性状の経時変化に関する検討

本実験は荃澤（2004）が行った研究に用いられた、脱塩処理後のPC供試体について長期暴露実験を行い、コンクリート性状と鋼材の腐食性状の変化について検討を行ったものである。

3.1. 供試体概要

長期暴露実験は、電流密度を 1A/m^2 、 3A/m^2 、 5A/m^2 とし、それぞれ通電期間を4週、8週、12週とする9通りの通電方法で実施された脱塩処理後のPC供試体について行った。また、比較用として脱塩処理を行っていない供試体も同様に暴露を行った。

3.2. 供試体採取と暴露条件

暴露供試体は、脱塩処理を行った1本の供試体（ $100\times 100\times 2000\text{mm}$ ）から2本（ $100\times 100\times 400\text{mm}$ ）採取し、全面塗装を模擬してビニールテープを上下面に貼った供試体と、上下面を開放面とする供試体の2種類の供試体とした。暴露は脱塩処理終了後順次開始され、2005年2月の時点で、750日～800日経過している。

3.3. コンクリート性状の変化に関する検討

コンクリート性状の変化に関する検討については、供試体の外観観察により実施した。

暴露開始から220日～280日で供試体の非脱塩面にひび割れが確認された。骨材のアルカリシリカ反応性試験、脱塩供試体のアルカリ骨材反応促進試験により、このひび割れはアルカリ骨材反応による膨張反応が原因であることを確認した。

3.4. 鋼材の腐食性状の変化に関する検討

鋼材の腐食性状の変化については、自然電位、腐食速度による腐食診断を行うことで検討した。

自然電位による腐食診断の結果、脱塩処理を行った供試体において、脱塩による積算電流密度の大きい供試体ほど鋼材は腐食発生の可能性が低い状態にあった。腐食速度による腐食診断の結果、すべての供試体において不動態状態（90%以上の確率で腐食なし）であることが確認された。

以上の結果より、アルカリ骨材反応によりひび割れが発生し、鋼材が腐食し易い状況であったにも関わらず、暴露開始から約800日経過した時点でも、腐食領域にある供試体は少なく、脱塩によって高い防食効果が得られていたことを確認した。

4. 結論

本研究に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) 脱塩時におけるコンクリート中の電位分布はイオンの移動によって変化し、分極によって鉄筋電位が変化する。
- (3) 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。
- (4) 鉄筋間においては、塩分の減少しにくい部分が存在するため、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。
- (5) 脱塩を施したPC供試体の長期暴露試験の結果より、脱塩による高い防食効果が得られていることを確認した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，pp113～148，1997.12