

塩害を受けるコンクリート構造物の脱塩による補修方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：構造物マネジメント技術チーム

研究担当者：渡辺 博志、古賀 裕久、
中村 英佑

【要旨】

塩害に対する補修方法の一つである電気化学的脱塩に着目し、通電によって除去できる塩化物イオンの量や補修効果が得られる範囲について実験を行って検討した。また、これらを解析によって予測する手法について検討した。さらに、民間企業・大学との共同研究により、最新の研究成果を収集すると共に、脱塩による補修の計画・設計・施工面について総合的に検討した。検討結果は、電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）としてとりまとめた。

キーワード：コンクリート構造物、塩害、補修、電気化学的脱塩

1. はじめに

海から飛来する塩分や路面に散布する凍結防止剤の影響を受ける構造物等では、塩化物イオンの影響でコンクリート中の鋼材が腐食する「塩害」が生じるおそれがある。塩害は、劣化の進行が比較的早く、構造物の耐荷性能に大きな影響を与えかねないので、コンクリート構造物の劣化要因の中でも特に注意を要するものである。そこで、塩害を受けるおそれがあるコンクリート構造物では、定期的に点検を行うなどして、鋼材が腐食し部材の耐荷性能が低下する前に補修を行うことが効果的と考えられている。しかし、点検方法や補修方法には、技術的に十分には明確でない点も残っており、これを合理的に行うためのマニュアル類の整備が求められている。

本研究課題では、塩害に対する補修方法の一つである電気化学的脱塩（以下、脱塩）に着目し、通電によって除去できる塩化物イオンの量や補修効果が得られる範囲について実験を行って検討した。

また、研究をより効率的に進めるため、平成 18 年度から、土木研究所と電気化学工業株式会社、株式会社富士ピー・エス、東北大学、長岡技術科学大学、徳島大学、九州工業大学の 7 者で共同研究の協定を結び、定期的に打合せを行って、脱塩による補修の計画・設計・施工面での留意点について総合的に検討した。

検討結果は、電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）¹⁾としてとりまとめた。

2. 脱塩工法について

脱塩とは、コンクリート構造物の表面に電解質溶液と陽極材からなる仮設電極を設置し、コンクリート中に埋設されている鋼材との間に直流電流を一定期間のみ流し、電気泳動の原理でコンクリート中の塩化物イオンをコンクリート外に抽出する方法である（図-1）。

脱塩は、コンクリート構造物の主要な劣化原因である塩害（塩化物イオンの影響でコンクリート中の鋼材が腐食すること）に対する補修方法の一つである。塩害を受けたコンクリート構造物の補修方法には種々のものがあるが、脱塩は、コンクリートをはつり取る必要がないこと、補修後の維持管理が比較的容易であることなどの点ですぐれており、今後、

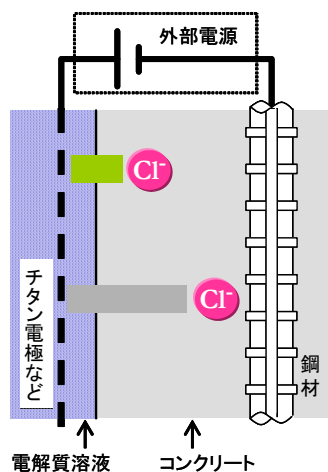


図-1 脱塩の模式図

補修方法としての適用が増えることが期待される。

一方、脱塩には、補修効果を得るために必要な電流密度や通電期間を事前に予想することが困難なことなどの課題もある。そこで、実験や文献調査によって検討し、現状で妥当と考えられる補修方法を取りまとめて「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）」¹⁾を作成した。

3. 脱塩量の予測手法に関する検討

3.1 検討の目的

脱塩は、電気泳動の原理で塩化物イオンを移動させるので、通電によって移動する電荷量や電荷の移動が塩化物イオンの移動によってなされる割合（以下、塩化物イオンの輸率とする）がわかれば、式(1)から、除去できる塩化物イオン量を推定することが可能である。

$$W_{cl} = a \cdot Q \cdot E_{cl} \quad (1)$$

ここに、 W_{cl} ：脱塩量 (g)

a ：1 クーロンの電荷が 100%の効率で塩化物イオンの移動に用いられた際に移動する塩化物イオン量で、 3.67×10^{-4} (g)

Q ：通過電荷量 (C)

E_{cl} ：塩化物イオンの輸率 (%)

しかし、塩化物イオンの輸率は、コンクリートの配合や含まれている塩化物イオンの由来とその量など様々な要因によって異なると考えられている。また、輸率は通電中も変化し、通電期間が長くなるほど低下すると考えられている。また、コンクリート中を通過する電荷の流れも、十分には明確になっているとは言えない状況である。

脱塩による補修について、計画から施工までをまとめた資料として、我が国では、土木学会による「脱塩工法設計施工マニュアル」（以下、JSCE 脱塩マニュアル）²⁾がある。しかし、この JSCE 脱塩マニュアルでも、必要な電流量や、通電中のコンクリート中での電流密度分布については明確には記述されていない。このため、脱塩による補修の現場では、JSCE マニュアルの中で標準的として紹介されている電流密度（コンクリート表面で $1A/m^2$ ）、通電期間（8 週間）を採用している場合が多い。しかし、これらの条件を採用することで必ずしも全ての場合において十分な補修効果が得られるとはいえず、より合理的

な補修設計法の確立が求められている。

そこで、本課題では、コンクリート中の塩分量や配筋状態などを考慮して、脱塩工法による補修を計画する際に参考にできる脱塩量の予測手法を検討した。

3.2 脱塩量の予測に関する基礎的な実験³⁾⁴⁾

3.2.1 実験概要

脱塩による補修効果に影響を与える種々の要因について検討するため、内部に丸鋼を有する円柱供試体（ $\phi 100 \times 100mm$ ）を作製し脱塩を行った。供試体の形状を図-2 に示す。円柱供試体の中心に 1 本の丸鋼を設置したものを標準としたが、鋼材間に位置する部位から脱塩することが困難となることをふまえて、複数の鉄筋を用いた供試体も一部作製した。

また、コンクリートの配合や通電条件を表-1、表-2 に示す。検討は、水セメント比 60%の配合、60a を中心に行った。これは、外部から塩化物イオンを侵入させた供試体を作製することの容易さなどを考慮したためである。

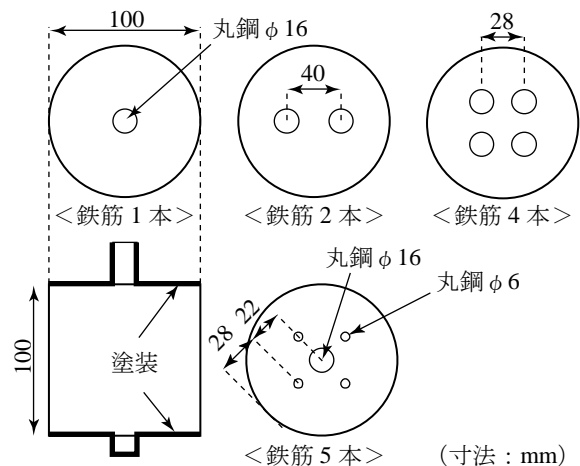


図-2 供試体の形状

表-1 コンクリートの基本配合

配合種類	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)
	W	C	スラグ	S	G	
60a	165	275	—	828	1036	4.5
60b	198	329	—	770	962	
40	141	353	—	827	1042	
60BB	163	136	136	827	1042	

※細骨材には大井川産の川砂を、粗骨材には笠間産の砕石（砂岩、最大粗骨材寸法 13mm）を使用した。
 ※打設時期によって使用骨材の密度がわずかに異なるため、材料の単位量が表の値と若干相違している場合もある。
 ※セメントは普通ポルトランドセメント、スラグは、高炉セメントに含まれるものと同様な粉末度の高炉スラグを用いた。

表-2 実験ケース

記号	配合	配筋	塩分導入方法	塩化物イオン量 (wt% vs C)	電流密度 (A/m ²)	通電期間 (週)	
S1-A	60a	1本	初期	0.38	1.0	8	
S1-B				0.72			
S1-C				1.23			
S1-D				2.36			
S1-E				60b			0.43
S1-F							0.71
S1-G							1.44
S1-H							2.50
S1-I	60a	2本	外来	0.5	1.0	4	
S1-J				1.23			
S1-C2				4本			8
S1-C4				8			
S2-A	60a	1本	外来	1.64	1.0	8	
S2-B				2.44			
S2-C				3.87			
S2-D				4.84			
S2-C4				4本			3.87
S3-A	60a	1本	初期	0.0	2.02	6	
S3-B				0.08			
S3-C				0.16			
S3-D				0.32			
S3-E				1.0			
S3-F				3.73	0.16	16	
S3-G				2.02			
S3-H				0.08			
S3-I				40			2.33
S3-J				0.16			
S3-K	60BB	5本	初期	0.08	1.98	6	
S3-L				0.16			
S3-M				0.32			
S3-N	60a	40	5本	2.02	2.33	1.0	
S3-O	2.33						
S3-P	60BB			1.98			

※配合については、表-1 参照。

※配筋については、図-2 参照。

※通電前の塩化物イオン量は、供試体単位で平均した値を示した。

※高炉スラグを混入した配合 (60BB) では、セメント量と高炉スラグをあわせた量をセメント量 (高炉セメント B 種に相当) として上記の表を整理した。

※S2-A~C4 の通電前の塩化物イオン量は、塩水への浸漬を終了した時点のものであり、屋外暴露期間中に変化している可能性もある。しかし、試料として利用できる供試体が不足し、通電直前の値を確認することはできなかった。

※電流密度は、コンクリート表面での値を示した。

H17 年度は、コンクリート中にあらかじめ含まれる塩化物イオン量の大小が脱塩に与える影響などに着目して行った (表-2 の S1-A~C4)。H18 年度は、

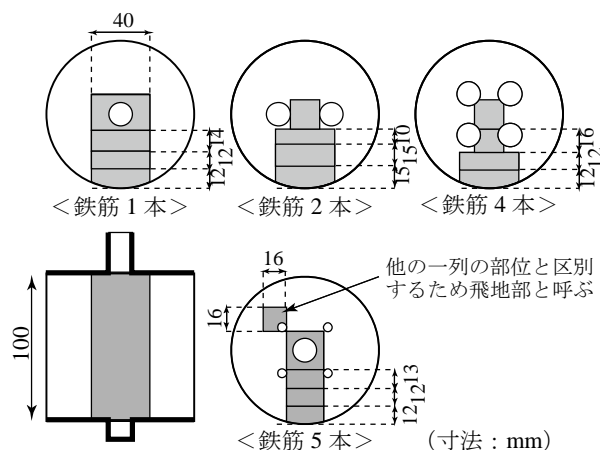


図-3 塩化物イオン量の測定位置

硬化後に外部から塩化物イオンを侵入させた供試体を用いて行った (表-2 で S2-A~C4)。H19 年度は、通電時の電流密度を変化させた場合や配合が異なる場合などに着目して行った (表-2 で S3-A~P)。

3. 2. 2 塩分の導入と供試体の保管

塩化物イオンの由来の違いによる影響を把握するため、練混ぜ水に NaCl を混入する方法と、コンクリートの硬化後に外部から塩化物イオンを侵入させる方法の二通りの手法で塩分を導入した。ここでは、前者の方法によるものを初期塩、後者の方法によるものを外来塩と呼ぶ。

なお、供試体は、初期塩の場合、製作から 3~6 箇月間屋内で保管したものをを用いた。また、外来塩の場合は、NaCl 水溶液 (濃度 3%~飽和) への浸漬と気中での乾燥を 1 週間ごとに約 6 箇月間繰返して塩分を導入し、その後、約 6 箇月間、屋外 (つくば市) に暴露したものをを用いた。

3. 2. 3 通電方法

供試体に直流安定化電源を接続し、通電中は電流量が一定となるように制御した。陽極材として供試体の側面にチタンメッシュを配置し、電解質溶液は、ホウ酸リチウム水溶液 (Li₃BO₃: 濃度 0.2mol/l) をを用いた。

3. 2. 4 脱塩効果の検証方法

通電による脱塩量を検証するため、脱塩の前後に JIS A 1154 に従って、全塩化物イオン量を測定した。試料を採取した位置を図-3 に示す。なお、以降の検討では、塩化物イオン量を測定した部位を指す際に、供試体中央からの距離で整理した。この距離は、電流密度との関係を念頭におき、各部位の平均的な距離を算出している。例えば、鉄筋 1 本の供試体において、鉄筋の近傍で採取した試料は、その図心位

置は中心から0mmであるが、中心から8~23mmの範囲に位置する試料と言え、平均的な距離として中心から14mmの部位と表現した。

なお、一時部の実験ケースにおいては、定期的に電解質溶液の一部を採取して、電位差滴定により溶液中の塩化物イオン濃度を測定することにより、通電期間中の脱塩状況の推移をモニタリングした。

3. 2. 5 実験結果

1) 通電前の塩化物イオン量と脱塩効果

練混ぜ時に混入した塩分量が異なるS1-A~Hについて、脱塩後の供試体に含まれる塩化物イオン量(以下、残留塩化物イオン量)を図-4に示す。また、外来塩について検討したS2-A~Dについて、脱塩前後の塩化物イオン量を図-5に示す。

これらの実験ケースでは、通電前の塩化物イオン量に関わらず、中央に配した鉄筋近傍の塩化物イオン量を0.4wt% vs C以下まで低下させることができた。また、残留塩化物イオン量は、鉄筋から離れるほど大きくなったが、その量は、通電前から塩化物イオン量が少なかった場合を除き、概ね近い値となった。

2) 電流密度と脱塩効果

通電中の電流密度が異なるS3-A~Eの残留塩化物イオン量を図-6に示す。通電期間は6週間とやや短くしたが、供試体表面での電流密度を1A/m²としたS3-Eにおいては、中央に配した鉄筋近傍の塩化物イオン量が0.4wt% vs C以下まで低下するなど、残留塩化物イオン量の分布は、8週間通電した場合(図-4)と類似していた。

一方、電流密度を低下させたケースでは、電流密度が小さいほど鉄筋近傍の残留塩化物イオン量が大きくなった。また、通電期間を長くしたケース(S3-

G、図-7)でも、残留塩化物イオンの量は大きくは改善されなかった。電流密度を低下させた場合は、鉄筋近傍の残留塩化物イオン量が0.4wt% vs Cより大きくなったことから、脱塩による腐食抑制効果が十分に得られないおそれもある。

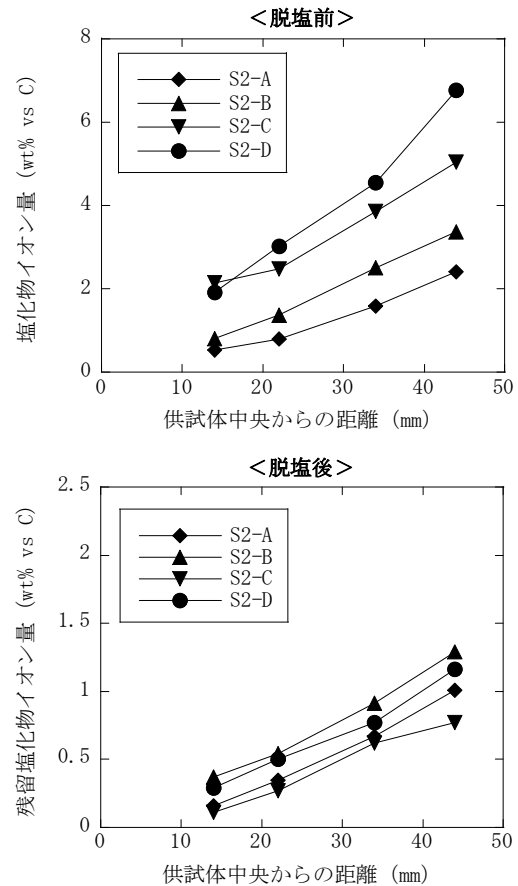


図-5 脱塩前後の塩化物イオン量の分布 (S2-A~D)

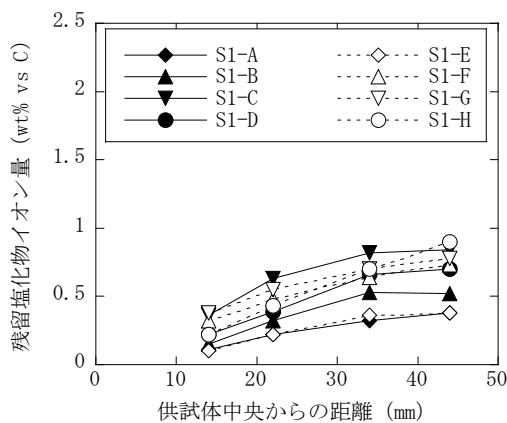


図-4 残留塩化物イオン量の分布 (S1-A~H)

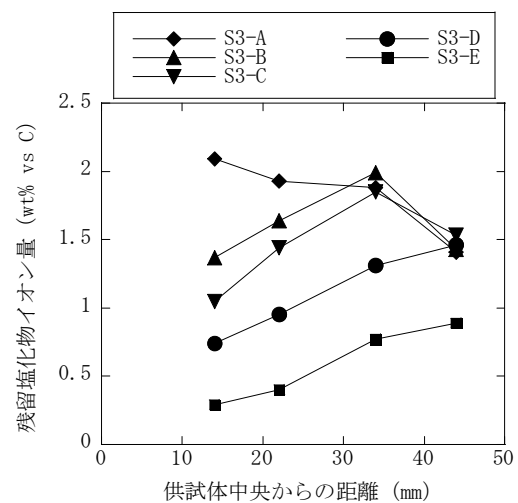


図-6 残留塩化物イオン量の分布 (S3-A~E)

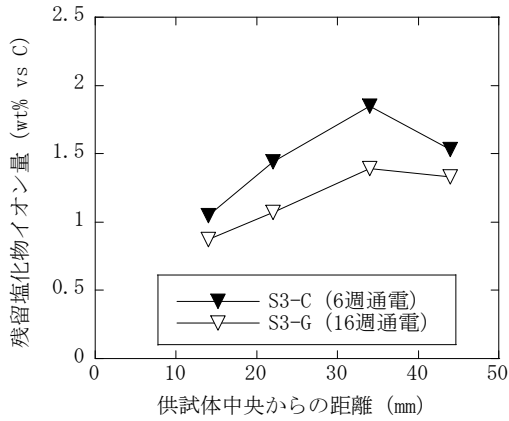


図-7 通電期間の異なる供試体の比較

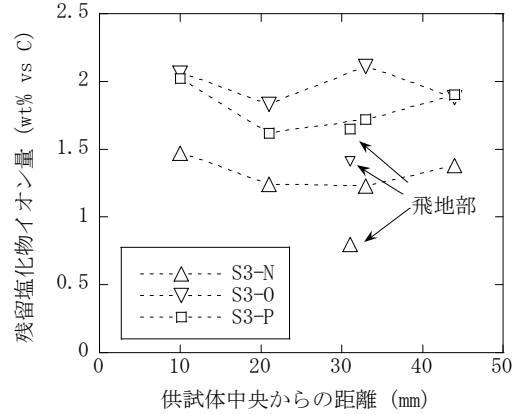


図-10 残留塩化物イオン量の分布 (複数鉄筋)

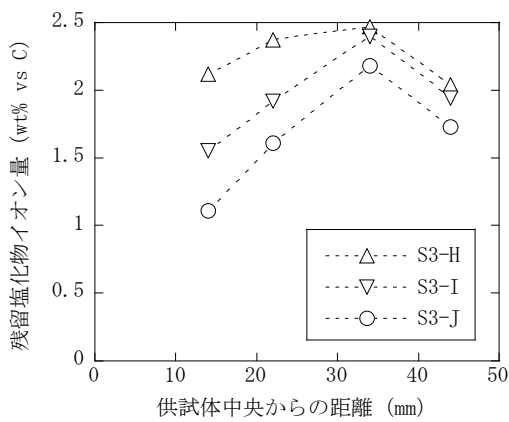
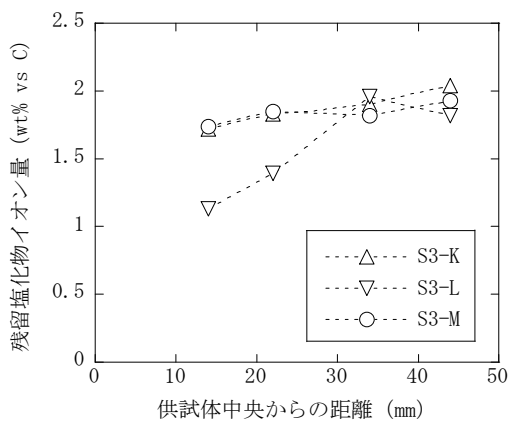


図-8 残留塩化物イオン量の分布 (配合 40)



※S3-M は通電が適切でなかったおそれがある。

図-9 残留塩化物イオン量の分布 (配合 60BB)

なお、供試体中央からの距離が 44mm の部位に着目すると、通電を行わなかった S3-A と通電を行った S3-B~D の残留塩化物イオン量が同程度になった。この部位の塩化物イオンの低下には、塩化物イ

オンが電解質溶液に溶け出したことの影響が大きいものと見られ、必ずしも脱塩の効果とはいえない。

3) コンクリートの配合と脱塩効果

配合 40 のコンクリートを用いた S3-H~J の残留塩化物イオン量を図-8 に、配合 60BB を用いた S3-K~M の残留塩化物イオン量を図-9 に示す。残留塩化物イオン量の分布には、配合 60a の場合と同様な傾向が認められた。ただし、水セメント比 40% の場合は、水セメント比 60% の場合に対して残留塩化物イオン量が大きくなった。高炉スラグを混入した場合の影響については、十分には明確でなかった。

4) 配筋と脱塩効果

S3-N~P の残留塩化物イオン量を図-10 に示す。鉄筋と鉄筋の間に位置する部位では電位差が生じにくくなり、脱塩が困難になった。本報では詳細を略すが、複数の鉄筋を配置した他のケースでも同様の傾向が見られた。

3. 2. 6 脱塩量の予測に関する基礎的な実験結果のまとめ

円柱供試体を用いた実験により、コンクリートの配合や含まれている塩化物イオン量、通電時の電流密度などによって脱塩量が大きく異なることが確認された。これらを考慮して脱塩量を予測する方法については、次節で検討する。

3. 3 脱塩量予測手法の検討

3. 3. 1 塩化物イオンの輸率に基づく脱塩量予測

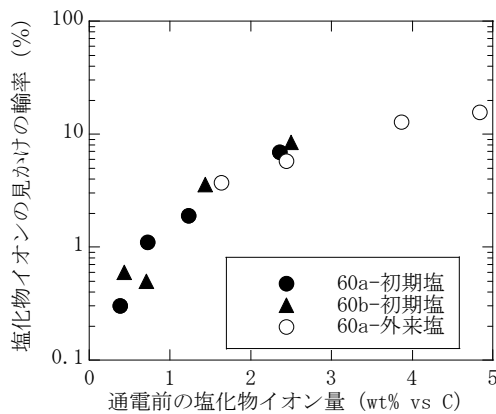
1) 種々の条件と塩化物イオンの見かけの輸率

脱塩量は、通過電荷量と塩化物イオンの輸率の積として表すことができるので、脱塩量の予測や、脱塩量の大小を評価する場合には、指標として塩化物イオンの輸率が用いられることが多い。そこで、今回の実験結果から、塩化物イオンの見かけの輸率を

算出した (式(2))。なお、ここで「見かけの」輸率としたのは、式(2)では通電期間中の輸率の変化について考慮しておらず、実験ケースによっては、除去できる塩化物イオンが通電中になくなり、結果として輸率が小さく評価される場合もあると考えられるためである。

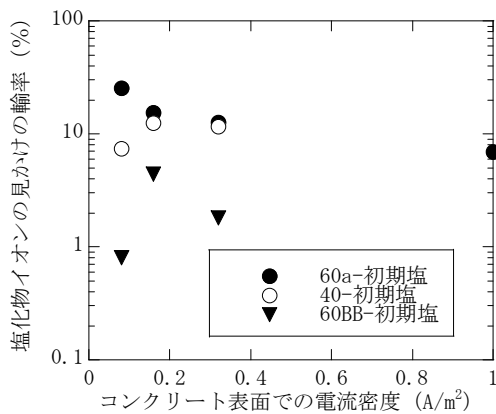
$$E_{cl} = \frac{W_{cl}}{a \cdot Q} \quad (2)$$

ここで、 E_{cl} : 塩化物イオンの見かけの輸率
 W_{cl} : 脱塩前後の供試体に含まれる塩化物イオンの総量の差 (g)
 a : 1 クーロンの電荷の移動により理論的に取り除ける塩分量で、 3.67×10^{-4} (g/C)
 Q : 通電期間中に供給した電荷量 (C)



※S1-A~H, S2-A~D の結果を示した。

図-11 通電前塩化物イオン量と見かけの輸率



※S3-B~E, S3-G~I の結果を示した。

図-12 電流密度と見かけの輸率

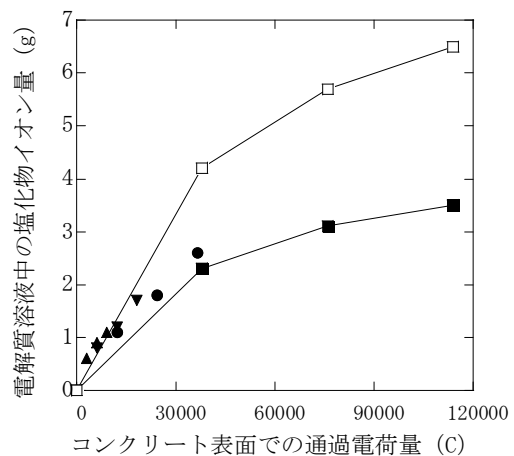
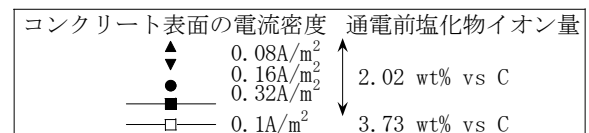
通電前の塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの輸率の関係を図-11 に示す。通電前の塩化物イオンが大きいケースほど、見かけの輸率が大きくなっていた。これは、多量の塩化物イオンが含まれる供試体ではセメント硬化体などに固定化される塩化物イオンの割合が比較的小さくなり、脱塩しやすい状態にある塩化物イオンの割合が大きいためと考えられる。

なお、セメントペーストの割合を増やした配合 60b や、塩分を外来塩として導入した場合も、通電前の塩化物イオン量がほぼ同等であれば、塩化物イオンの輸率は同程度となった。

次に、コンクリート表面での電流密度と塩化物イオンの見かけの輸率の関係を図-12 に示す。配合 60a では、電流密度が小さい場合ほど見かけの輸率が大きくなる傾向があった。この理由については、通電期間中の脱塩状況の推移をモニタリングした結果からこの後検討する。配合 40 を用いた場合の見かけの輸率は、配合 60a の場合と同程度か、やや小さくなった。配合 BB の場合は見かけの輸率が著しく小さくなった。図-9 に示したように、電流密度と脱塩効果の関係が明確に見られないので、配合 BB の供試体の一部は何らかの理由で通電が適切でなかったおそれもあるが、今後の検討課題と考えられる。

2) 通電中の脱塩量の推移

塩化物イオンの見かけの輸率について検討した結



※S3-B~F の結果を示した。

図-13 塩化物イオン量のモニタリング結果

果、これに与える影響が特に大きい要因として、通電前の塩化物イオン量とコンクリート表面での電流密度があった。そこで、電解質溶液に除去できた塩化物イオン量のモニタリング結果を図-13に示す。

図-13 から、通電前の塩化物イオン量が同じケースを比較すると、除去できた塩化物イオン量の伸びは通過電荷量に比例しておらず、通過電荷量が多くなるほど脱塩の効率は落ちることが確認された。図-12 に整理した見かけの輸率は、電流密度が小さいケースほど通過電荷量が小さい時点における評価となっており、これが数値の傾向に現れているものと考えられる。

一方、通電前の塩化物イオン量が異なるケースを比較すると、当初の塩化物イオン量が 3.73wt% vs C と大きい場合は、その約半分の 2.02wt% の場合と比較して、同じ通電条件で除去できた塩化物イオンの量が約 2 倍となった。脱塩に必要な塩化物イオン量が比較的多い場合でも、これを除去するために必要な通電期間は、大きくは増加しない可能性がある。

3) 輸率に関する検討のまとめ

実験結果から塩化物イオンの見かけの輸率を算定したところ、見かけの輸率は、通電前のコンクリートに含まれていた塩化物イオンの量と強い関係があり、当初から含まれる塩化物イオン量が大きいケースほど、輸率も大きくなった。このことは、電解質溶液の塩化物イオン濃度をモニタリングした結果からも裏付けられた。

コンクリートの配合や塩分の導入方法の違いについては、今回の実験の範囲では、顕著ではなかった。なお、筆者らが過去に実施した実験では、表-2 中の S2-A~D に対し塩分の導入後から期間をおかず脱塩した場合は、2 週間程度と極めて短い通電期間で大部分の塩化物イオンを脱塩できた⁴⁾。しかし、屋外暴露の期間をとった今回の実験結果から、長期にわたって塩化物イオンが侵入した実構造物では、上記のように速やかに脱塩できるとは限らないものと考えられる。

3. 3. 2 供試体各部の電流密度に基づく残留塩分量予測

1) 電流密度分布の推定

前項までに検討したように、塩化物イオンの輸率は種々の条件による違いが大きく、これを用いて脱塩量を予測するのは必ずしも容易ではない。一方、実験結果を見ると、供試体各部の残留塩化物イオン量は電流密度と密接な関係があり、一つの供試体中

でも、鉄筋近傍など電流密度が大きい部位ほど残留塩化物イオン量が少なくなる傾向が見られた（例えば、図-6）。

そこで、供試体各部の電流密度を推定し、その結果から残留塩分量が予測できないか検討することにした。このため、まず、供試体中の電流密度分布を推定することにした。

推定では、供試体中のコンクリートの品質は均一で、かつ、通電中に変化しないと仮定した。このとき通電中のコンクリートの電位分布は式(3) (ラプラス方程式) を満たす。

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

ここに、V : 任意の箇所における電位

そこで、供試体の断面を 2mm 間隔の格子で近似し、式(3)を満たすような各格子点の電位を差分法で求めた⁵⁾。このとき、コンクリートの比抵抗は配合にかかわらず 100Ω・m と仮定し、供試体と電解質溶液の境界を通過する電流密度が通電条件と合致するようにした。このように求めた電位分布から、電流密度分布を算出した。

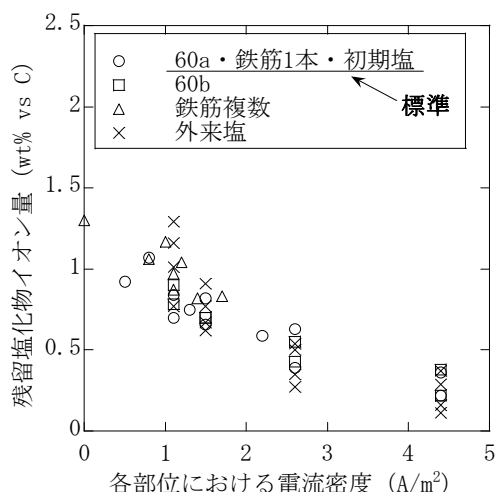
2) 各部位の電流密度分布と残留塩化物イオン量

通電期間 8 週間、6 週間のケースについて電流密度と残留塩化物イオン量の関係を図-14、図-15 に示す。

図-14 から、電流密度が小さい部位ほど、残留塩化物イオン量が大きくなる傾向が認められた。図から、残留塩化物イオン量を 0.4wt% vs C 程度まで脱塩するためには、その部位の電流密度を 2~3A/m² 程度以上とする必要があると考えられる。図-15 でも、図-14 と同様に、電流密度と残留塩化物イオン量の間に関係が認められ、水セメント比 60% の配合 60a を用いた場合は、8 週間の通電を行った場合と同程度の残留塩化物イオン量であった。

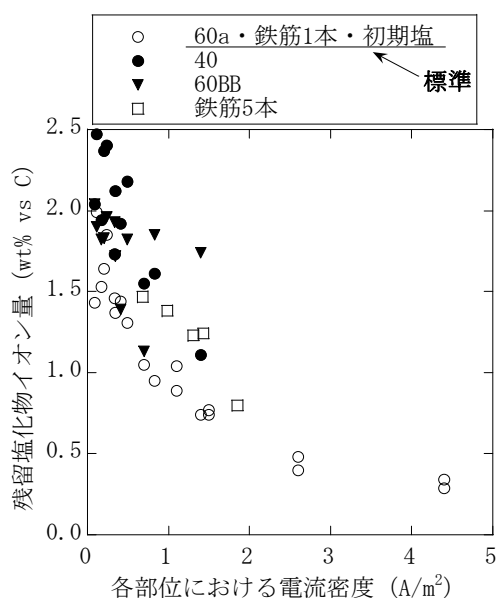
一方、配合 40 を用いた場合は、配合 60a と比較すると残留塩分量が大きくなった。配合 40 の単位セメント量が大きいことに加え、塩化物イオンの見かけの輸率が配合 60a と比較して若干小さいことから、通電期間が十分でなかった可能性がある。配合 60BB を用いた場合、ばらつきが大きかったが、配合 60a と比較すると残留塩分量が大きい傾向があった。

また、鉄筋を 5 本配置した供試体では、鉄筋が 1



※S1-C、D、G、H、I、C2、C4 および S2-A~D の結果を示し、脱塩を行う前から塩化物イオンが1.0wt% vs C未満であった供試体は省略した。

図-14 各部位の電流密度と残留塩化物イオン量の関係 (8週間通電)



※S3-B~Nの結果を示した。

図-15 各部位の電流密度と残留塩化物イオン量の関係 (6週間通電)

本の場合より、残留塩化物イオン量が大きくなった。供試体中の電位分布が複雑になり、塩化物イオンが移動する経路が長くなったことなどの影響が考えられる。

これらの検討から、今回の実験の範囲では、6週間以上の通電を行う場合、各部位の電流密度から通電後の残留塩化物イオン量を予想する手法が、補修効果の得られる範囲を検討する上で有効と考えられる。

3. 4 複雑な配筋を有する供試体を用いた実験⁶⁾

3. 4. 1 実験概要

脱塩工法では、コンクリート表面に設置した陽極材とコンクリート内部の鋼材との間に電気を流して塩化物イオンを移動させるが、実際の構造物では、配筋状況が複雑であり、かぶりよりも奥に位置する部位や、鋼材と鋼材の間に位置する部位に電流を流すことは難しい。このため、これらの位置では十分な補修効果を得られない可能性がある。

この問題点に対しては、脱塩工法の適用前に通電時の電流の流れを解析するなどして、補修効果が得られる範囲を明確にすることが考えられるが、現状では、その解析手法の信頼性は確認されていない。そこで、鋼材間隔やかぶり、ひび割れの有無など種々の条件が異なる供試体を作製し、これらの条件が脱塩効果に及ぼす影響について検証した。

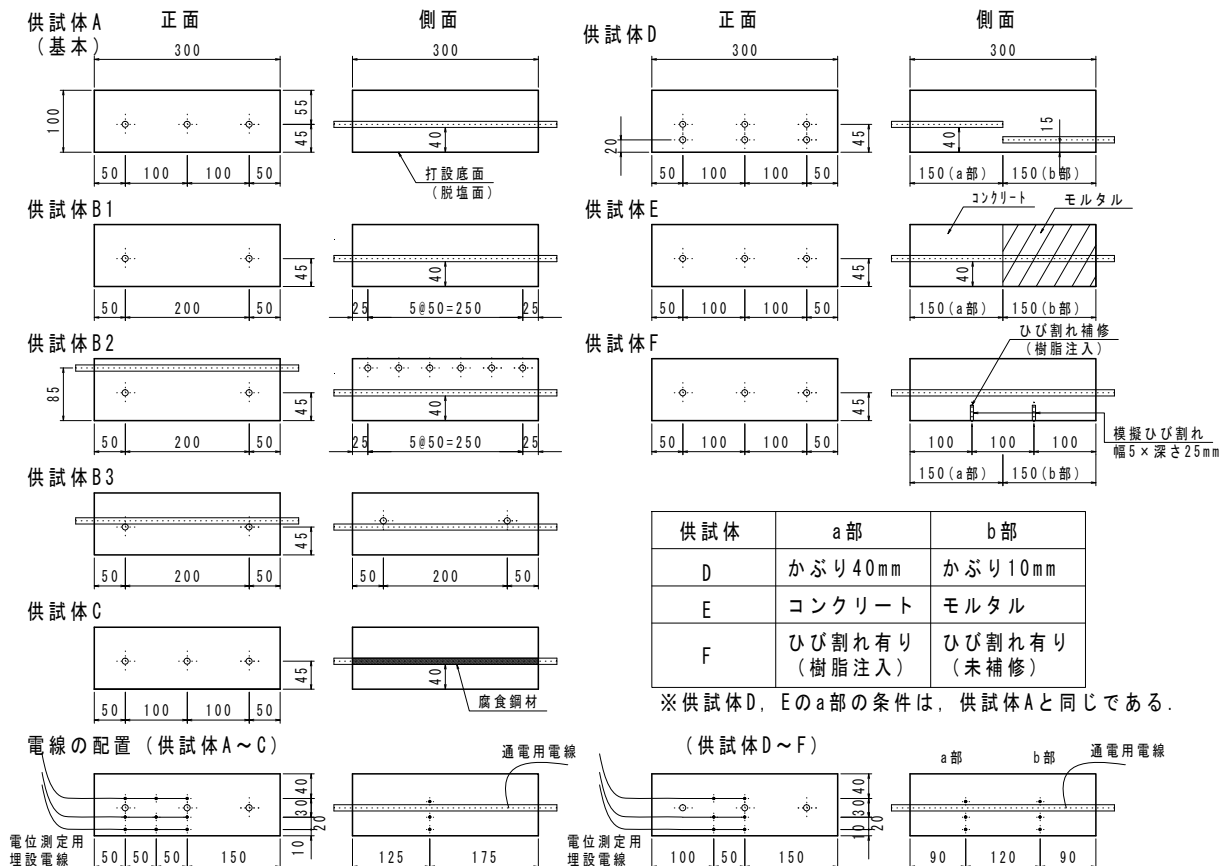
3. 4. 2 実験概要

供試体の形状を図-16に示す。供試体は幅300×高さ100×奥行き300mmの版状とした。かぶり40mm、鋼材間隔100mmの供試体Aを基本とし、鋼材の配置を変えた供試体B1~3や腐食鋼材を用いた供試体C、かぶりコンクリートの厚さや品質(ここでは粗骨材が充填されていない場合を想定)、ひび割れ補修の有無が一つの供試体中で異なる供試体D~Fを各1体作成した。また、供試体には通電や電位測定用の電線(断面積2mm²の被覆付き銅線)を配線した。

コンクリートは表-1の配合60aとし、練混ぜ水にNaClを混入して塩化物イオンを導入した(脱塩前の塩化物イオン量は、硬化後に試験を行って確認した値、2.73kg/m³としてこの後の整理を行った)。供試体Eのモルタルは、このコンクリートをウェットスクリーニングしたものを用いた。また、鋼材はみがき丸鋼φ9mmとし、供試体Cでは濃度10%の塩水への浸せきと気乾を繰り返して全面腐食させた丸鋼を用いた。

供試体はコンクリート打設後1ヶ月の湿空養生を行い、その後、鋼材の突出部の切断、脱塩面以外の塗装、脱塩面への水槽の設置を行った。水槽は通電中の電流分布を確認するため、幅方向に5分割した(図-17)。供試体D~Fではさらにa、b部(図-16参照)に分け10分割した。

脱塩は、この水槽に電解質溶液(0.2mol/LのLi₃BO₃)を深さ50mmまで入れて1日間浸せきした後、コンクリート表面における電流密度1A/m²、通



※各供試体とも、図中で底面に位置する面を脱塩面とした。

図-16 供試体の形状

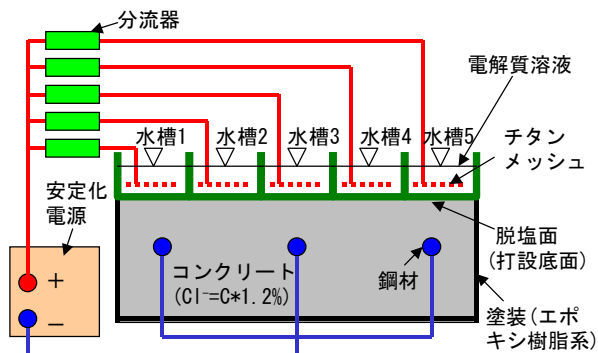


図-17 脱塩状況 (正面から)

電期間 8 週間の条件で行った。

通電中には、安定化電源の電圧と電流、供試体中に埋設した電線等と電源の電位差、分流器を流れる電流を 1 週間ごとに測定した。なお、電解質溶液の pH は 12.1~12.7 を維持しており、陽極付近での塩素ガスの発生は極めて小さかったものと考えられる⁵⁾。通電終了後、電解質溶液を 40ml 採取し、電位差滴定法で塩化物イオン濃度を測定して、外部に抽出された塩化物イオンの量を求めた。さらに、埋設電線

の位置に合わせて幅 40×奥行 40×高さ 10mm の試料を採取し、JIS A 1154 に準じて各部位の塩化物イオン量を測定した。

3. 4. 3 脱塩中の電流の分布に関する検討

1) 電場の解析結果

通電中の供試体内部の電位分布をラプラス方程式の数値解を差分法により求めることにより推定した (3. 3. 2 参照)。

解析モデルは要素を 2.5mm の格子状とし (ただし、ひび割れ箇所は要素を削除した)、脱塩面以外は外界と絶縁されているものとした。また、解析は、コンクリートが均質で通電中に電位が変化しないことを前提に脱塩面の電位を 0V とし、脱塩面における平均電流密度が 1A/m² となるような鋼材の電位を求めた。その結果を表-3 に示す。なお、供試体 D~F は、a 部の条件は供試体 A と同様なので、b 部を単独で解析し (E)、a 部 b 部を並列回路とした際の電位 E_{comb} を求めた。解析結果の例を図-18 に示す。

表-3 陽極・陰極間の電位差の解析結果

供試体	電位差 (V)		電流量 (mA)	
	E	E _{comb}	a 部	b 部
A	5.02		90	
B1	6.76			
B2	5.08			
B3	5.92			
C	5.02			
D	2.76	3.55	32	58
E	3.17	3.89	35	55
F	6.27	5.58	50	40

表-4 陽極・陰極間の電位差の測定結果

供試体	電位差 (V)
A	4.79
B1	6.02
B2	5.39
B3	5.13
C	5.64
D	3.77
E	4.06
F	5.08

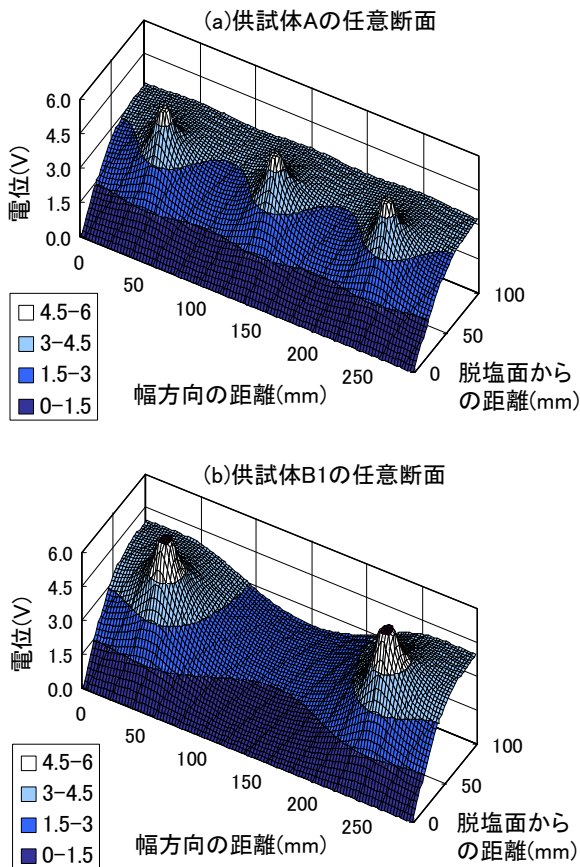


図-18 解析による電位分布の算定例

2) 実験結果と考察

通電中に測定した陽極-陰極間の電位差を表-4に示す。この実験値と解析値(表-3)を比較すると、供試体 A~C は電位 E と、供試体 D~F は電位 E_{comb} と概ね合致していた。

電線を埋設した位置で電位を実測した結果を図-19に示す。供試体 A、B1 の実験値は、鋼材が含まれる断面でも、鋼材と鋼材の間に位置する断面でも、解析値とその傾向がよく一致していた。また、他の供試体でも同様であった。

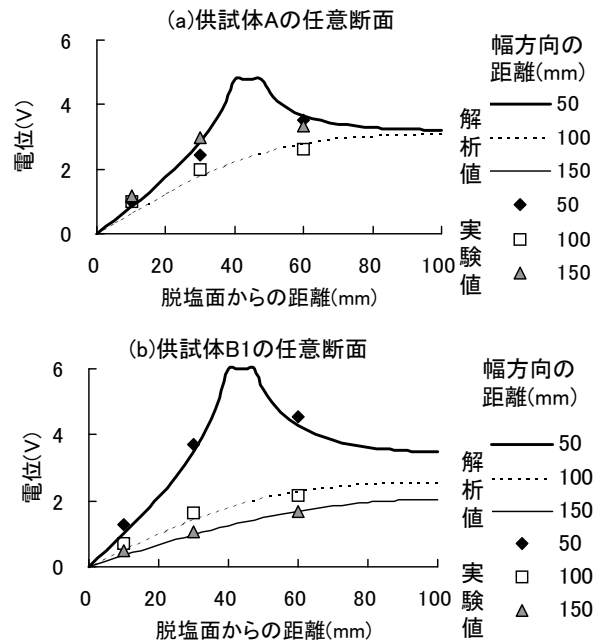


図-19 供試体内部の電位分布の測定例

3. 4. 4 脱塩量に関する検討

1) 供試体全体としての脱塩量と輪率

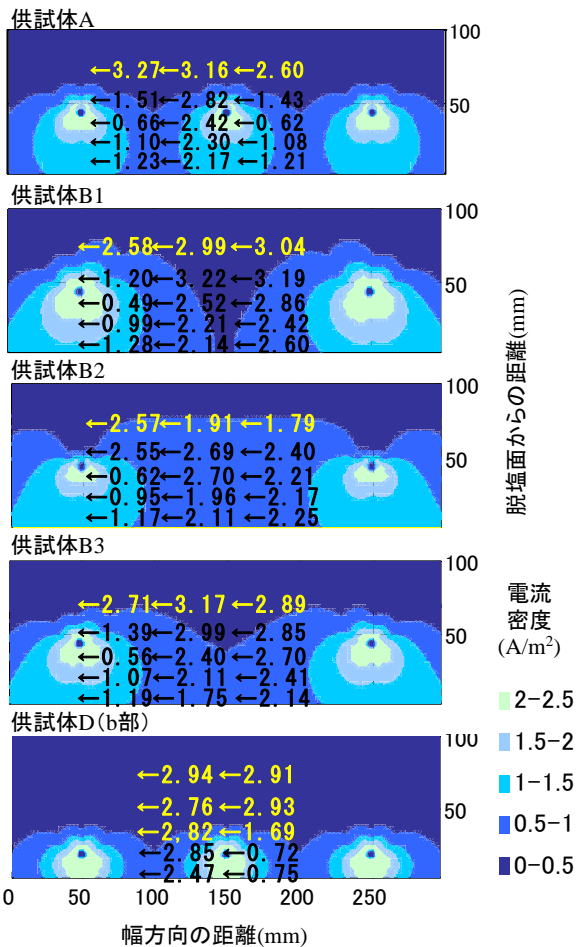
供試体外部の電解質溶液中の塩化物イオン濃度を測定し、各供試体から脱塩できた塩化物イオン量を推定した。また、供試体ごとに(供試体 D~F については、a、b に分けて)式(4)で求められる塩化物イオンの輪率 t を算定した。その結果を表-5 に示す。

$$t = \frac{Q}{T} \times 100 = \frac{\text{脱塩量}(g)}{1780 \times \text{電流}(A)} \times 100 (\%) \quad (4)$$

ここに、Q：定常時の塩化物イオン抽出量 (g)
 T：通過電荷量によって理論的に抽出可能な塩化物イオン量 (g) で、1A の電流を 8 週間通電した際に、その電荷の移動が全て塩化物イオンによってなされるとすると、1780g

表-5 塩化物イオンの輸率の算定結果

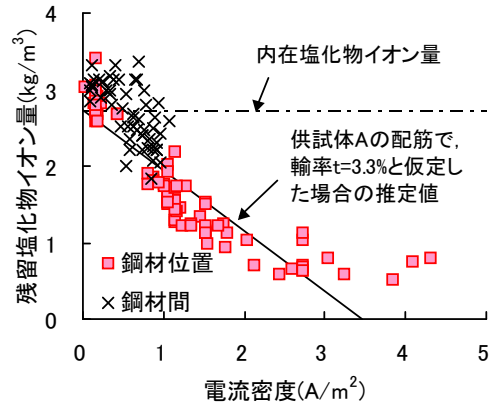
供試体	脱塩量 (g)		電流 (mA)		輸率 (%)	
	a 部	b 部	a 部	b 部	a 部	b 部
A	5.28		90		3.30	
B1	5.26		88		3.36	
B2	6.17		91		3.81	
B3	5.57		91		3.44	
C	5.39		91		3.33	
D	1.78	1.69	31	59	3.23	1.61
E	2.47	2.93	37	50	3.75	3.29
F	2.50	3.39	40	51	3.51	3.73



*図中の数値は残留塩化物イオン量 (単位:kg/m³)

図-20 残留塩化物イオン量の測定結果と供試体内部の電流密度の解析結果例

塩化物イオンの輸率は、供試体 D の b 部を除くと供試体や部位による違いはわずかであり、供試体単位で比較すると、脱塩量の違いは大きくなかった。ただし、供試体 F では解析結果 (表-3) と異なり、a 部より b 部の電流量が大きくなった。これは、ひび割れ面からも脱塩されているためと考えられ、コ



※鋼材位置/鋼材間：供試体を脱塩面から見た際に、最外縁の鋼材と重なる/重ならないような部位

図-21 残留塩化物イオン量と電流密度の関係

ンクリート表面積が増加して、電流が流れやすい状態になっていたためと考えられる。

2) 供試体内部の部位による脱塩量の違い

脱塩後の供試体の各部位に残留していた塩化物イオン量の測定結果と、電場の解析結果より供試体内部の各要素における電流密度を求めた結果を図-20に示す。

鋼材近傍では電流密度が 2A/m² 以上となり、残留塩化物イオン量は 1.0kg/m³ を下回った。また、鋼材に近い位置のかぶり部でも電流密度が 1A/m² を超え、残留塩化物イオン量も 1.2kg/m³ 程度まで減少していた。一方、鋼材よりも奥の部位や鋼材間では電流密度が 1A/m² を下回り、残留塩化物イオン量は概ね 2kg/m³ を超え、脱塩の効果が明確でなかった。

今回実施したモルタル部を除く全供試体について各部位の残留塩化物イオン量 (実験値) と電流密度 (解析値) の関係を図-21 に示す。図中には塩化物イオンの輸率を 3.3% (表-5 に示した供試体 A の輸率を参考にした) と仮定した場合の残留塩化物イオン量(CI_r)を併せて示した。

図から、電流密度が大きいと推定された部位ほど残留塩化物イオン量が小さくなる関係が認められ、特に鋼材位置の測定結果では、この関係が明確であった。ただし、電流密度が 2A/m² を超えると、残留塩化物イオン量は 0.5~0.8 kg/m³ となり、それ以下には脱塩できなかった。一方、鋼材間では、電流密度が解析上 1A/m² 程度以下であり、電流密度と残留塩化物イオン量の関係も鋼材位置ほどは明確でなかった。

なお、鋼材位置の残留塩化物イオン量は、輸率 3.3% と仮定した場合に推定される量よりも多くの

場合若干小さくなった。逆に、鋼材間の残留塩化物イオン量は、若干大きくなった。

3. 4. 5 各種条件が脱塩効果に与える影響

1) 鋼材配置の影響

a) 鋼材より奥の部位

供試体 A の場合、脱塩面から見て鋼材より奥の部位でも、鋼材から約 10mm の範囲までは電位勾配が生じており、それに見合った脱塩効果が得られていた (図-20)。一方、鋼材から約 10mm を超えた奥の部位では、電位の勾配がほとんどなく、脱塩効果がほとんどないか、あるいはかえって脱塩により塩化物イオン量が増加した。これは、当初、鋼材付近にあった塩化物イオンが電位勾配によってさらに奥へと移動したためと考えられる。

b) 鋼材間の部位

鋼材と鋼材の間でも、脱塩面に向かう電位勾配があるが (図-18、19)、この部位の脱塩効果は鋼材を含む部位にくらべ、小さくなった (図-21)。これは、当初、鋼材の近くにあった塩化物イオンが、電位勾配に沿って流入してくるためと考えられる。このように、鋼材位置では十分な脱塩効果が得られている場合でも、鋼材から離れた位置では塩化物イオン量の低下がほとんど認められない場合もあることには注意を要する。

c) 内部にある鋼材の影響

例えば、プレストレストコンクリート部材のように最外縁鉄筋よりも内部に多くの鋼材が配置されている場合、その影響で電位の勾配が変化し、上記(1)、(2)項で検討した部位の脱塩効果が改善されることが期待される。実際に図-20 で供試体 B2、B3 の電流密度分布を見ると、鋼材間の部位などで供試体 B1 より電流密度が大きくなっている。しかし、今回の実験では、供試体 B2 や B3 の残留塩化物イオン量は、供試体 A や B1 と比較して、顕著には改善されなかった。これは、通電条件をコンクリート表面当り $1A/m^2$ としたことで、鋼材量の多い供試体ほど、鋼材表面付近における電流密度が小さくなったためと考えられる。このように内部に鋼材が多く存在する場合は、鋼材表面の電流密度を適正な範囲で増大させることで脱塩効果を向上できると考えられる。

2) 鋼材腐食の影響

鋼材を全面腐食させた供試体 C では、同一配筋の供試体 A より 18%ほど陽極-陰極間の電位差が大きくなった (表-4)。この原因は明確でないが、腐食生成物により、鋼材とコンクリート間の接触抵抗が

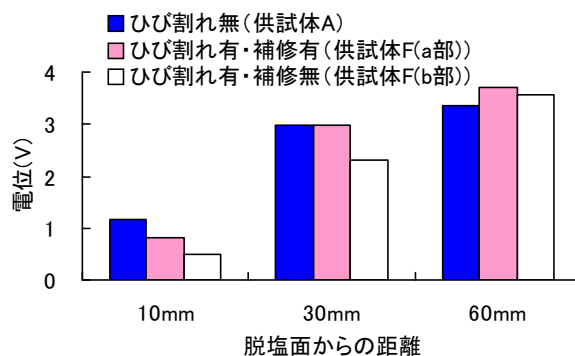


図-22 ひび割れ近傍の電位測定結果

増大した可能性がある。ただし、本実験では、脱塩量や輸率は供試体 A と同程度であり、脱塩効果への影響は小さかった (表-5)。

3) かぶり部の影響

a) かぶりコンクリートの厚さが異なる場合

供試体 D では、かぶりの薄い部位 (b 部) が設けてあり、電流は、かぶりが薄い部位をより多く流れた (表-5)。その結果、供試体 A と同じ形状である a 部では、電流密度が低下し、脱塩できた塩化物イオン量も減少した。ただし、塩化物イオンの輸率には大きな影響はなかった。

したがって、かぶりが部位によって異なる場合には、かぶりが厚い部位で脱塩効果を得られにくいことに留意する必要がある。なお、表-5 より供試体 D の b 部で輸率が低下していた。この理由としては、かぶりが小さく通電中に電流が流れる範囲が限定されたことが考えられる。

b) かぶりコンクリートの品質が異なる場合

供試体 E では、粗骨材量が変化する場合を想定し、b 部をモルタルに置換した。その結果、モルタルの方が比抵抗が小さいため、b 部を流れる電流量が大きく、a 部を流れる電流量は小さくなった (表-5)。実測値は、この解析値とよく合致しており、かぶりコンクリートの品質が異なる場合は、その比抵抗の違いを考慮することで適切に解析できるものと考えられる。

c) ひび割れの影響

図-22 にひび割れ近傍の電位 (比較として供試体 A の同位置の電位) 測定結果を示す。供試体 F の b 部では、ひび割れ部に電解質溶液が入り込んだため、ひび割れのない場合と比較して、ひび割れ近傍の電位が低下した。一方、ひび割れ補修を行った a 部では、電位の低下は僅かであった。

3. 4. 6 複雑な配筋を有する供試体を用いた実験結果のまとめ

上記の検討を通じて、以下の知見が得られた。

- 1) 通電中の陽極－陰極間の電位差、ならびに供試体中の電場は、解析によって概ね明らかにすることができた。
- 2) 供試体内部の脱塩量は、解析によって求めた各部位の電流密度と良好な関係があった。ただし、鋼材間に挟まれ、電流密度が小さい部位では、その部位に含まれる塩化物イオン量が脱塩によってかえって上昇する場合もあった。
- 3) 脱塩効果を得るのが難しいと考えられる鋼材より奥の部位や鋼材間あるいはかぶりコンクリートが均質でない場合等について検討し、その影響を定量的に把握した。

3. 5 脱塩量の予測手法に関する検討のまとめ

脱塩量の予測手法に関して種々の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 通電中の供試体を流れる電気の流れや、必要な電圧については、コンクリートの比抵抗が明らかであれば、おおよそ予測可能である。
- 2) 種々の要因によって塩化物イオンの輸率を予測することが難しいため、通電によって移動する塩化物イオンの量(脱塩量)を予測することは必ずしも容易ではない。例えば、通電条件が同一でも、通電前の塩化物イオンの量にほぼ比例して塩化物イオンの輸率が異なった場合があった。
- 3) 通電条件を定める際には、コンクリート表面積あたり、または鉄筋表面積あたりとして電流密度を定める場合が多いが、一定の脱塩結果を得るためには、塩分を除去する部位の電流密度に着目する必要がある。今回の実験の範囲では、残留塩化物イオン量を0.4wt% vs C程度まで脱塩するためには、2~3 A/m²程度の電流密度が必要と考えられる。

補修設計における脱塩量の予測手法には、例えば、表-6のような方法が考えられる。しかし、現状では、上記2)に示したように塩化物イオンの輸率を予測することが困難であり、複雑な解析を行ってもそのコストに見合った予測精度の向上が得られるかどうかは明確ではない。そこで、概略検討や補修設計の段階では、既往の適用事例も参考にして、手法2や手法3のように、ある程度簡略化したモデルを用いて通電期間や電流密度を検討するのが合理的と考えられる。

表-6 脱塩量予測手法の例

種類	詳細
手法1 供試体を要素に分割し、通電期間を複数のステップに分割して、塩化物イオンの移動を推定する手法	<ul style="list-style-type: none"> ・供試体を要素に分割し、各部について、通電時の電流密度を推定(図-20参照)する。 ・分割した部位ごとに、単位時間に隣接した部位へ流出(から流入)する塩化物イオン量を算出する(式(1)参照)。 ・全ての部位について、通電期間中の塩化物イオンの移動を集計し、通電期間中の脱塩状況をシミュレートする。 ※この方法では、手法2、手法3と比較すると複雑な計算を要する。
手法2 供試体全体の脱塩量を輸率から推定する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・通電する供試体全体を一つの部位と考え、通電する電流量から脱塩される塩化物イオン量を算出する(式(1)参照)。 ※この方法では部位による脱塩量の違いを考慮しないので、通電後の塩化物イオンの分布やその再拡散の影響については、検討できない。
手法3 供試体を要素に分割し、各部の電流密度から残留塩化物イオン量を推定する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・供試体を要素に分割し、各部について、通電時の電流密度を推定する(図-20参照)。 ・各部の電流密度から、一定期間通電した際に残留する塩化物イオン量を推定する(図-21参照)。 ※この方法では通電期間については、検討できない。

通電中や通電後に、事前の検討で予測した補修効果が得られていない場合には、手法1のように、通電期間中の塩化物イオン分布を推定できる手法を用いて検討することが有効と考えられる。

4. 電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン(案)について

本研究課題で行った実験や共同研究参加者の意見交換により収集・整理された知見を活用するため、これらを取りまとめた「電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン(案)」⁹⁾を作成した。

補修方法として脱塩工法を検討・実施する際、その検討は、概ね図-23のように進められると考えられる。そこで、検討の各段階で特に留意すべき点を整理した。

例えば、事前調査としては、脱塩工法の適用性を検討するために、硬化コンクリート中の塩化物イオンの分布、鋼材位置、鋼材の腐食状況、かぶりコンクリートの状態、構造物の位置・寸法等、コンクリートのアルカリシリカ反応性について調査しなければならないことを示し、また、その方法を提案した。

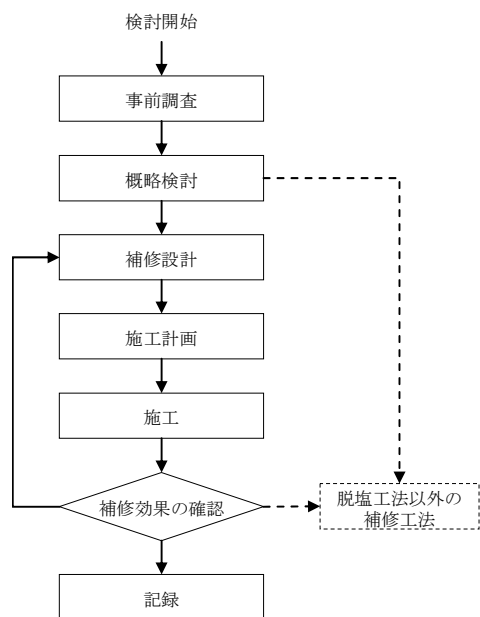


図-23 脱塩工法のフロー

概略設計の段階では、事前調査の結果に基づき、脱塩工法を適用する範囲を明確にし、必要な箇所に通電を行うことの可否、通電による材料・構造への影響について検討しなければならないことを示した。

補修設計では、目標とする脱塩量を定めた上で、必要な補修効果が得られるように電流密度、通電期間を定める方法を提案した。また、その具体的な計算例をガイドライン（案）の付属資料として例示した。

施工計画では、通電方法や安全確保策、品質管理手法について定めておかなければならないことを示し、特に留意すべき点を示した。

施工では、施工時の状況に応じて計画を変更する必要がある場合や、その際の考え方を示した。

記録では、各段階での検討結果を記録しておくことの重要性を示した。また、ガイドライン（案）の付属資料として8橋の施工事例を示し、記録の例とした。

5. まとめ

コンクリート構造物の塩害に対する補修方法の一つである電気化学的脱塩について、民間企業・大学との共同研究を行うなどして検討し、これまで十分には整理されていなかった補修設計の方法を提案した。また、補修として電気化学的脱塩を行う際に特に留意すべき点を整理した。これらの研究成果は、電気化学的脱塩工法による補修ガイドライン（案）

としてとりまとめた。ガイドライン（案）は、付属資料として脱塩量の計算例や施工事例を添付し、実用的なものとなるように配慮した。

参考文献

- 1) 土木研究所ほか：「塩害を受けたコンクリート構造物の脱塩工法に関する共同研究報告書」、共同研究報告書、第382号、2008.3
- 2) 土木学会：脱塩工法設計施工マニュアル、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、pp.117-147、2001.11
- 3) 古賀裕久、渡辺博志、椎名貴快、北野勇一：脱塩工法適用時の配筋の影響に関する基礎的な研究、土木学会第61回年次学術講演会講演概要集、V-273、2006.9
- 4) 北野勇一、渡辺博志、古賀裕久、椎名貴快：NaCl水溶液中に浸漬したRC円柱供試体の脱塩実験、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集、V-254、2007.9
- 5) 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、2005.7
- 6) 北野勇一、渡辺博志、古賀裕久：補修条件を変えたRC版状供試体の脱塩実験、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.7、pp.253-258、2007.11

【英文要旨】

In this project, the desalination method is discussed as a repairing technique for concrete structures deteriorated by salt attack. Some experiments were carried out to discuss the relationship between the removed chloride ions and electric current in concrete during desalination. In addition, advantage and disadvantage of some calculation methods were discussed. As a result, after a sufficient repairing period, usually eight weeks, residual chloride ions in concrete can be roughly estimated by electric current in concrete, while it is difficult to predict the required time to achieve such conditions. These results are assembled as the draft of the guideline on desalination method for concrete structures.