

論文 コンクリート構造物の諸条件が脱塩工法の補修効果に及ぼす影響

片野 啓三郎^{*1}・田上 孝樹^{*1}・皆川 浩^{*2}・久田 真^{*3}

要旨: 本研究では、塩害によって劣化した実構造物に脱塩工法を適用する際、海砂の使用、海水環境や融雪剤環境などの場合によって、初期に含まれる Cl^- 量やその分布状況が異なることに着目した。コンクリート外部から Cl^- を浸透させた外来塩分供試体に通電を施し、さらに、練混ぜ時にコンクリートに Cl^- を内在させた供試体についての実験結果と比較することで、コンクリートの配合、含有 Cl^- 量および Cl^- 分布状況が脱塩工法の補修効果に及ぼす影響とその程度を実験的に検討した。

キーワード: 塩害, 脱塩工法, Cl^- 分布, 輸率, 脱塩量, 外来塩分, 内在塩分

1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物に対する補修工法のひとつである電気化学的脱塩工法（以下、脱塩工法）は、コンクリート構造物に直流電流を印加することによって塩害の原因物質である塩化物イオン（以下、 Cl^- ）をコンクリート中から除去、低減させる工法である。土木学会「電気化学的防食工法 設計施工指針（案）」¹⁾では、脱塩工法について、コンクリート表面積当たり 1 A/m^2 の電流密度、8 週間以内の通電期間を標準的な通電条件としている。しかしながら、同一の通電条件であっても対象とするコンクリートの状態や含有 Cl^- 量等によって脱塩効果に変化するため、上述の通電条件では十分な補修効果が得られない場合がある。したがって、脱塩工法の補修効果に影響を及ぼすコンクリート構造物の諸要因を抽出し、その影響を把握した上で、脱塩工法の具体的な設計体系を確立することが必要である。

本研究では、脱塩工法の補修効果に影響を及ぼす要因として、コンクリートの配合および含有 Cl^- 量、コンクリート中の Cl^- 分布状況に着目して検討を行った。まず、3 種類の配合のコンクリートに対して塩水浸せき試験を行うことで外部から Cl^- を浸透させた供試体（以下、外来塩分供試体）を作製し、これらの供試体に対して模擬脱塩試験を行うことで、コンクリートの水セメント比および含有 Cl^- 量が脱塩効果に及ぼす影響を検討した。さらに、練混ぜ時にコンクリートに Cl^- を混入することでコンクリート中の Cl^- 分布を一様とした供試体（以下、内在塩分供試体）に対して模擬脱塩試験を行った既往の研究²⁾と比較する事で、コンクリート深さ方向の Cl^- 分布が脱塩効果に及ぼす影響を検討した。

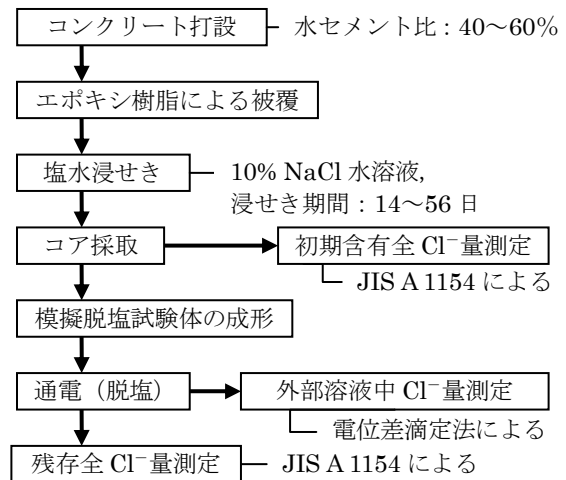


図-1 実験のフロー

2. 実験概要

本実験では、3 種類の配合のコンクリート供試体に対して、塩水浸せき試験を行うことで 5 水準の模擬脱塩試験体²⁾を作製し、所定の通電を施した。模擬脱塩試験とは、実構造物から採取したコンクリートコアに対して任意の通電条件で通電を行うことで脱塩工法の補修効果を予測し、最適な通電条件を検討するための試験である。図-1 に、本実験のフローを示す。

2.1 模擬脱塩試験体の作製

(1) コンクリートの配合

表-1 に、本実験で使用したコンクリートの示方配合を示す。普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材として砕石、細骨材として山砂を使用した。混和剤には、AE 剤としてアニオン系界面活性剤を使用した。水セメント比は 40, 50, 60% の 3 水準とした。

*1 東北大学大学院工学研究科 博士課程前期（正会員）

*2 東北大学大学院工学研究科 助教 博（工）（正会員）

*3 東北大学大学院工学研究科 准教授 博（工）（正会員）

(2) 塩水浸せき試験

練り混ぜたコンクリートを 150×150×530 mm の角柱型枠に打設し、28 日間、温度 20 °C の標準養生を行った。その後、供試体長軸方向の向い合う 2 面（打設方向に対する側面）を塩水浸せき面とし、塩水浸せき面以外の 4 面をエポキシ樹脂によって被覆した。Cl⁻浸透促進のため³⁾に温度 60 °C の 10 wt % NaCl 水溶液による塩水浸せき試験を行った。塩水浸せき試験における浸せき期間は 28 日間を基準とし、水セメント比 50 % の供試体に限り、含有 Cl⁻量による比較を行うために 14 日間、28 日間、56 日間の 3 水準を設けた。

(3) 模擬脱塩試験体の成形

以上の方法で水セメント比および塩水浸せき期間を変化させた 5 水準の供試体に対し、塩水浸せき面からコンクリートコアを採取し、φ94 mm×50 mm の円柱供試体を成形した。塩水浸せき面を脱塩面とし、円柱供試体の脱塩面側に電解質溶液保持のためにプラスチック円筒を取り付けた。通電時には、円筒内に電解質溶液として 0.2 mol/l のホウ酸リチウム水溶液を 500 ml 封入するものとした。陽極となるチタンメッシュは、脱塩面となるコンクリート表面より 20 mm 離れた位置に固定した。陰極としては、異形棒鋼 D13 とほぼ同等の表面積に加工したチタンメッシュを、ポリマーセメントモルタルによって円柱供試体の底面に接着した。その後、脱塩面以外をエポキシ樹脂によって被覆し、模擬脱塩試験体とした。図-2 に、模擬脱塩試験体の概要図を示す。

(4) 通電方法

模擬脱塩試験体をリード線によって直列に接続し、定電流直流電源装置を用いて、定電流、一定期間の通電を行った。通電条件は、脱塩面となるコンクリート表面に対して 1 A/m² の通電を 8 週間、および 4 A/m² の通電を 4 週間とした。

2.2 測定項目

(1) 脱塩量

電解質溶液中の Cl⁻濃度を、1~7 日に 1 度の頻度で電解質溶液から 5 ml 採取した試料を用い、電位差滴定法によって測定した。測定した Cl⁻濃度より、式(1)によって単位通電面積あたりの脱塩量（以下、脱塩量）を算出した。

$$Q_{Cl^-} = \frac{1}{1000} \times \frac{C \times X}{A} \quad (1)$$

ただし、 Q_{Cl^-} : 脱塩量(kg/m²)、 C : 試料溶液中の Cl⁻濃度(g/ml)、 X : 外部溶液量(500 ml)、 A : 通電面積(m²)

(2) Cl⁻の輸率

Cl⁻の輸率は、通電電流に対する脱塩効率の指標であり、通電によって移動した電荷のうち、Cl⁻が占める割合を百分率で表したものである。Cl⁻の輸率を式(2)によって算出した。

表-1 コンクリートの示方配合

空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
4.5	40	38	20	168	422	658	1140	0.105
	50	40		176	353	693		0.088
	60	42		180	300	728		0.075

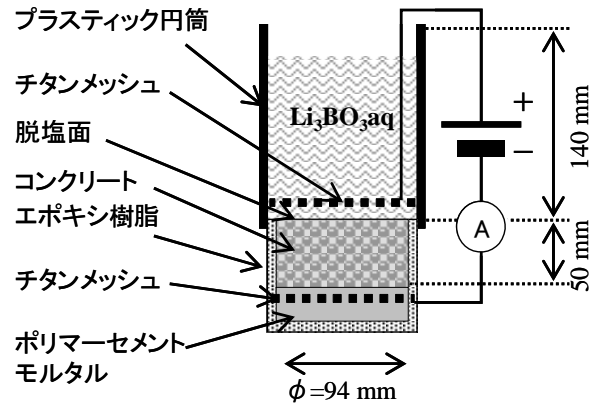


図-2 模擬脱塩試験の概要（断面図）

$$t_{Cl^-} = \frac{Q_{Cl^-} \times 1000}{(M_{Cl} \times I \times t \times 3600) / F} \times 100 \quad (2)$$

ただし、 t_{Cl^-} : Cl⁻の輸率(%), M_{Cl} : 塩素の原子量, I : 電流密度(A/m²), t : 通電期間(hour), F : ファラデー定数(96500 C/mol)

(3) 目標脱塩達成率

目標脱塩達成率は、脱塩工法が目標とする脱塩量に対する脱塩効果の達成度を示す指標で、式(3)のように定義した。

$$N = \frac{Q_{Cl^-}}{Q_A} \times 100 \quad (3)$$

ただし、 N : 目標脱塩達成率(%), Q_A : 目標脱塩量(kg/m²)
本研究における目標脱塩量は、脱塩後のコンクリート中に含まれる Cl⁻量が鉄筋の腐食発生限界濃度とされる 1.2 kg/m³ よりも安全側の値という位置づけで、1.0 kg/m³ なることを目標とし、式(4)に示す量とした。

$$Q_A = (C_I - 1.0) \times \frac{c}{1000} \quad (4)$$

ただし、 C_I : 初期含有 Cl⁻量(kg/m³)、 c : 供試体厚さ(mm)

(4) コンクリート中に含まれる Cl⁻分布

通電前および通電後の円柱コンクリート供試体を脱塩面から深さ方向に 4 等分し、JIS A 1154 によってコンクリート中の全 Cl⁻量（以下、Cl⁻量）を測定することで、脱塩前後のコンクリート中の Cl⁻分布を評価した。

3. 塩水浸せき試験結果

図-3 に、塩水浸せき試験後のコンクリートの各測点における Cl⁻量を示す。また、脱塩の対象となる、コンクリート表面から深さ 50 mm までの総 Cl⁻量を表-2 に示す。図-3 より、塩水浸せき試験後のコンクリート中の Cl⁻量

は、コンクリート表面に近いほど大きく、深さ方向にかけて小さくなっていることが分かる。また、表-2より、これらの供試体に対する模擬脱塩試験による脱塩効果について、同一水セメント比(50%)における初期含有Cl⁻量の多少による比較、および同等の初期含有Cl⁻量(4.7~5.3 kg/m³)における水セメント比の大小による比較が可能であることが分かる。さらに、コンクリート練混ぜ時にCl⁻を内在させた供試体に本実験と同条件で行った実験結果²⁾と比較することで、コンクリート中のCl⁻分布が一様な場合と深さ方向に分布を持つ場合の脱塩効果の相異を検討した。

4. 模擬脱塩試験結果

4.1 積算電流密度について

図-4に、通電によって脱塩され、外部溶液中に除去されたCl⁻量と積算電流密度の関係を示す。また、図-5に、このときのCl⁻の輸率と積算電流密度の関係を示す。ここで、積算電流密度は、コンクリート表面あたりの電流密度と通電期間の積分値であり、定電流密度の条件下では電流密度と通電期間の積で算出されるものである。図-4および図-5から、印加する電流密度が1 A/m²、4 A/m²のどちらの場合でも、その他の条件が同じであれば積算電流密度で脱塩効果をほぼ等しく評価できることが分かる。また、4 A/m²の通電は積算電流密度で2688 A hour/m²(4週間)まで通電を行ったが、1344 A hour/m²(2週間)以降はCl⁻の輸率が比較的小さく、脱塩量の変化率も小さくなっている。そこで、以下の考察では電流密度1 A/m²、通電期間8週間(積算電流密度1344 A hour/m²)までにおける実験結果について述べることにした。

4.2 初期含有Cl⁻量が脱塩効果に及ぼす影響

図-4より、コンクリートが同配合であれば、同等の積算電流密度に対して、初期含有Cl⁻量が多いほど脱塩量が大きくなり、電流密度1 A/m²を8週間、つまり積算電流密度1344 A hour/m²を通電した場合、初期含有Cl⁻量13.4 kg/m³の供試体は初期含有Cl⁻量2.0 kg/m³の場合の4.4倍

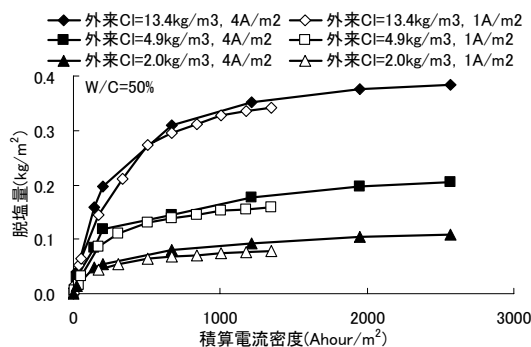


図-4 脱塩量と積算電流密度の関係 (初期含有Cl⁻量による比較)

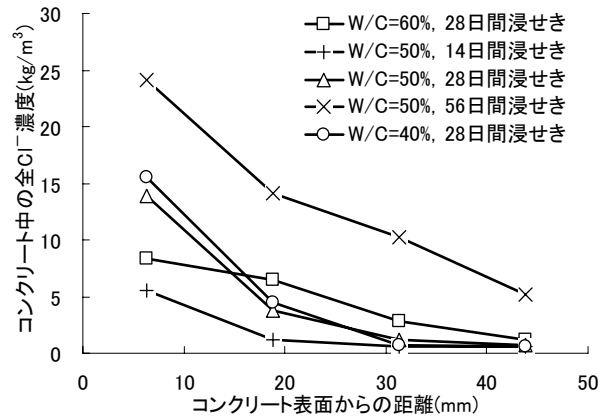


図-3 塩水浸せき試験結果

表-2 コンクリート中の総Cl⁻量 (kg/m³)

		水セメント比(%)		
		40	50	60
塩水浸せき期間 (日)	14	—	13.4	—
	28	5.3	4.9	4.7
	56	—	2.0	—

の脱塩量を示した。また、図-5より、初期含有Cl⁻量が多いほどCl⁻の輸率は大きくなった。つまり、初期Cl⁻量の多いコンクリートではコンクリート中に含まれるイオンのうちCl⁻の占める割合が大きいため、通電によるCl⁻の輸率が大きくなり、その結果、初期含有Cl⁻量が少ないものと比べて脱塩量が大きくなったものと考えられる。

4.3 水セメント比が脱塩性状に及ぼす影響

図-6および図-7に、同等初期含有Cl⁻量の供試体に通電を施した場合の脱塩量と積算電流密度の関係、Cl⁻の輸率と積算電流密度の関係を示す。図-6より、コンクリート中に含まれるCl⁻量が同等である場合、コンクリートの水セメント比の違いによる脱塩量の若干の変化がみられた。積算電流密度1344 A hour/m²を通電した場合、水セメント比60%と40%の供試体における脱塩量の差は12%程度であった。一方、図-4における初期含有Cl⁻量による比較は、前述のように4.4倍であったことから、水セメ

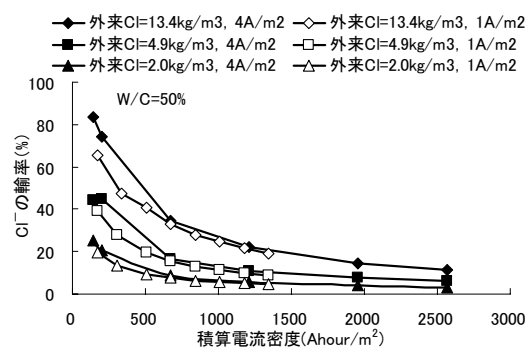


図-5 Cl⁻の輸率と積算電流密度の関係 (初期含有Cl⁻量による比較)

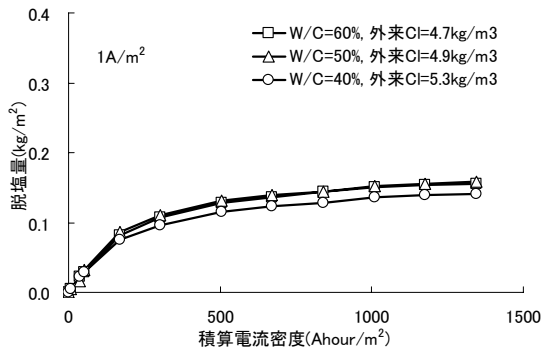


図-6 脱塩量と積算電流密度の関係
(水セメント比による比較)

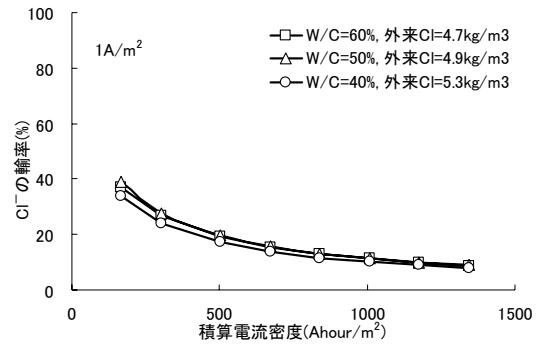


図-7 Cl⁻の輸率と積算電流密度の関係
(水セメント比による比較)

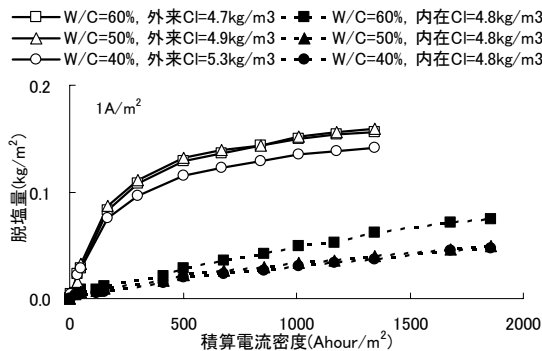


図-8 脱塩量と積算電流密度の関係
(内在, 外来 Cl⁻による比較)

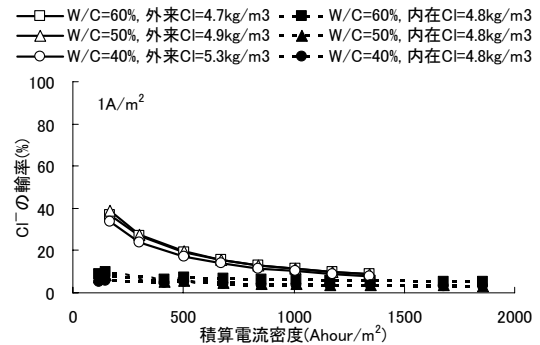


図-9 Cl⁻の輸率と積算電流密度の関係
(内在, 外来 Cl⁻による比較)

ント比による影響は初期含有 Cl⁻量による影響に比べて極めて小さいと言える。Cl⁻の輸率については、図-7より、同等の初期 Cl⁻量において水セメント比による相異は明確にはみられず、通電による脱塩効果はコンクリートの水セメント比よりもコンクリート中に含まれる Cl⁻量に大きく依存することが明らかになった。

4.4 コンクリート中の Cl⁻分布状況が脱塩効果に及ぼす影響

本項においては、内在塩分供試体に対して本実験と同条件で模擬脱塩試験を行った実験結果²⁾と本実験を比較し、内在、外来の Cl⁻の分布状況が脱塩効果に及ぼす影響を検討した。比較対象としたコンクリートは、表-1に示す配合に対して 8.0 kg/m³の NaCl を既往の文献⁴⁾を参考に細骨材と置換して練り混ぜることで作製した。この場合のコンクリート中に含まれる Cl⁻量は 4.8 kg/m³であり、本実験の表-2における塩水浸せき期間 28 日の外来塩分供試体とコンクリート中の総 Cl⁻量と同等とみなせることから、これらの供試体に通電を施した実験結果を比較した。

(1) 脱塩量および輸率について

図-8 および図-9 に、内在および外来塩分供試体に通電を施した場合の脱塩量と積算電流密度の関係、Cl⁻の輸率と積算電流密度の関係を示す。図-8より、外来塩分供試体は通電初期における脱塩量が著しく大きく、内在塩分

供試体に比べ早期に相当量の脱塩が達成された事がわかる。また、図-9より、外来塩分供試体における Cl⁻の輸率は、同等の積算電流密度であれば常に内在塩分供試体の場合よりも大きく、通電初期、特に 0~500 A hour/m²程度においてその差が顕著であった。これは、外来 Cl⁻供試体は表-2のように塩水浸せき面、つまり脱塩面に近いほど Cl⁻量が多く、深さ方向にかけて少なくなるような分布をもつため、脱塩面近くに集中した Cl⁻が通電初期に多く移動し、容易にコンクリート外に除去されることで脱塩量が大きくなったものと考えられる。

(2) コンクリート中の Cl⁻量について

図-10に、同一水セメント比における通電前および積算電流密度 1344 A hour/m²通電後の、内在および外来塩分供試体中に含まれる Cl⁻分布を示す。図-10より、外来塩分供試体は、通電によってコンクリート中の Cl⁻量は減少しているものの、通電後においても脱塩面付近に Cl⁻が集中している。このことが、通電を継続しても Cl⁻の輸率が内在塩分供試体の場合よりも大きい値で推移することの原因となっていると考えられる。一方、内在塩分供試体は、通電後においてもコンクリート中の Cl⁻が比較的一様であるため、外来塩分供試体のように多量に脱塩されることはなく、徐々に脱塩されるため、定電流の通電による脱塩量の経時変化は線形に近いものとなったと考えられる。

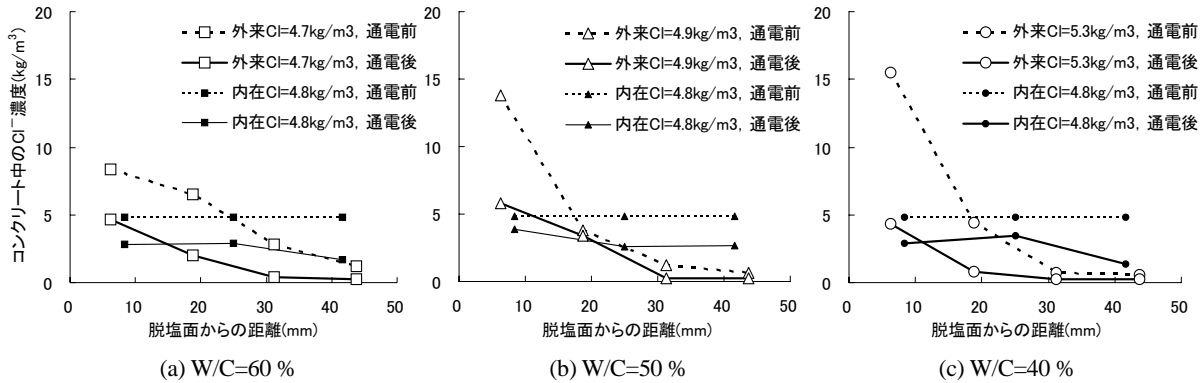


図-10 通電前後のコンクリート中に含まれるCl⁻濃度分布 (積算電流密度 1344 A hour/m²)

(3) 目標脱塩達成率について

図-11 に、内在および外来塩分供試体における目標脱塩達成率と積算電流密度の関係を示す。図-11 より、内在および外来塩分供試体それぞれについて、水セメント比が大きいほど目標脱塩達成率が大きくなる傾向にある。また、内在塩分供試体と外来塩分供試体を比較すると、目標脱塩達成率は外来塩分供試体の場合のほうが大きく、積算電流密度 1344 A hour/m² (1 A/m², 8 週間) の通電では、同一水セメント比の内在塩分供試体の場合に比べ 1.6 倍から 2.4 倍となった。しかし、外来塩分供試体における目標脱塩達成率は積算電流密度 1344 A hour/m² までの通電で頭打ち傾向にあるのに対し、内在塩分供試体の場合には積算電流密度 1858 A hour/m² の通電で依然として増加傾向にあることから、内在および外来塩分供試体における目標脱塩達成率は、さらに長期の通電を施すことによって、同等の値になることが予想される。

5. まとめ

本研究では、塩水浸せき試験によって外部から Cl⁻ を浸透させたコンクリート供試体に対して模擬脱塩試験を行うことで、飛まつ帯や融雪剤環境等の外来塩分環境に脱塩工法を実施した場合の脱塩効果を検討した。さらに、過去に同条件で行われた内在塩分供試体に対する模擬脱塩試験の結果²⁾と比較することで、コンクリート中の Cl⁻ の分布状況が脱塩効果に及ぼす影響を評価した。以下に、本研究によって得られた結論を示す。

- (1) 同配合で、含有 Cl⁻ 量の等しいコンクリートに対して通電を施した場合、印加する電流密度がコンクリート表面に対して 1~4 A/m² の範囲にある場合、電流密度にかかわらず、電流密度と通電期間を掛け合わせた積算電流密度で評価してよい。また、積算電流密度が大きいほど脱塩効果が大きくなった。
- (2) 塩水浸せき期間に水準を設け、含有 Cl⁻ 量を変化させたコンクリート供試体に対して模擬脱塩試験を

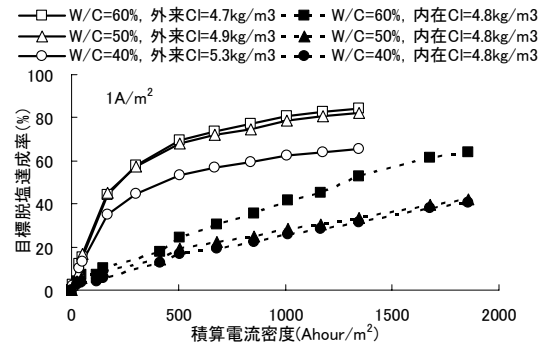


図-11 目標脱塩達成率と積算電流密度の関係 (内在、外来 Cl⁻ による比較)

行った結果、コンクリート中に含まれる Cl⁻ 量が多いほど、通電によって移動する Cl⁻ の輸率が大きくなり、その結果、通電によって除去される Cl⁻ が増加した。

- (3) 水セメント比を変化させ、同等の Cl⁻ を含有した外来塩分供試体に通電を行った結果、空隙量が多いと考えられる水セメント比の大きいコンクリートほど脱塩量が大きい傾向がみられたが、同等の水セメント比で含有 Cl⁻ 量を変化させた場合と比較してその影響は小さい。また、Cl⁻ の輸率についても、水セメント比による著しい変化は確認されなかった。
- (4) 同配合、および同等の Cl⁻ 含有量の外来塩分供試体と内在塩分供試体の模擬脱塩試験結果を比較すると、外来塩分供試体のように脱塩面付近のコンクリート中に Cl⁻ が集中している場合、一様に Cl⁻ が分布している内在塩分供試体に比べ、脱塩量、Cl⁻ の輸率はともに大きくなり、積算電流密度 500 A hour/m² 程度までの通電初期における脱塩効果が特に大きかった。外来塩分供試体の目標脱塩達成率は、積算電流密度 1344 A hour/m² (1 A/m², 8 週間) の通電では、同条件の内在塩分供試体の場合に比べ 1.6 倍から 2.4 倍となった。

謝辞

本研究は、(独) 土木研究所、電気化学工業(株)、(株) 富士ピー・エス、長岡技術科学大学、徳島大学、九州工業大学との共同研究の一環として実施されたものであります。ここに、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会: 電気化学的防食工法 設計施工指針(案), 2001
- 2) 田上孝樹ほか: 模擬脱塩試験に基づく脱塩工法の通電条件選定法に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No.1, pp.1359-pp.1364, 2007
- 3) 西田孝弘ほか: 温度がコンクリート中微小領域の塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響, 学術講演会講演論文集, Vol.52, pp.369-pp.370, 日本材料学会 2003
- 4) 上田 隆雄: 塩害により劣化したコンクリート構造物へのデサリネーションの適用に関する研究, 京都大学, 学位論文, 1999