

論文 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

田上 孝樹^{*1}・皆川 浩^{*2}・片野 啓三郎^{*3}・久田 真^{*4}

要旨：実構造物に脱塩工法を適用する際の最適設計では、適切な通電条件を設定することが重要である。しかしながら、W/C や初期内在塩分量が最適通電条件に及ぼす影響については必ずしも明確にはなっていない。そこで本研究では、コンクリートコア試料から作製した模擬脱塩試験供試体を用い、W/C および初期内在塩分量が脱塩性状に及ぼす影響を脱塩量、輸率および目標脱塩達成率により評価した。その結果、通電条件の選定には、W/C および初期内在塩分量の把握が重要であることを示すことができた。

キーワード：脱塩工法, 模擬脱塩試験, 通電条件, 輸率, 脱塩量, 目標脱塩達成率

1. はじめに

電気化学的脱塩工法(以下, 脱塩工法)は, 鉄筋と外部電極との間に直流電流を流し, 塩化物イオンを電気泳動によってコンクリート外へ除去, 低減することにより, コンクリートの鋼材保護性能の回復, つまりは構造物の耐久性を向上させる工法である。

脱塩工法では, 一般的に電流密度 1A/m^2 , 通電時間 8 週間の条件で通電を実施する¹⁾が, コンクリート中の塩分量を目標値まで低減できない場合がある。これは, 先に示した通電条件が経験的なものであり, コンクリート内部の諸条件に応じた最適な通電条件の選定法がなく, 設計体系が十分に設備されていないためである。

そこで, 本研究ではチタンメッシュを用いた模擬脱塩試験をコンクリートコア試料に適用し, さまざまな通電条件で通電を行い, W/C と初期内在塩分量が脱塩性状に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 模擬脱塩試験の概要

模擬脱塩試験とは, 実構造物からコア抜きした円柱コンクリートに対して, 任意の通電条件

で通電を行い, 脱塩効果の確認と, 最適な通電条件の設定が検討できるように考えられた試験である。図-1 に本研究で用いた模擬脱塩試験の概要図を示す。

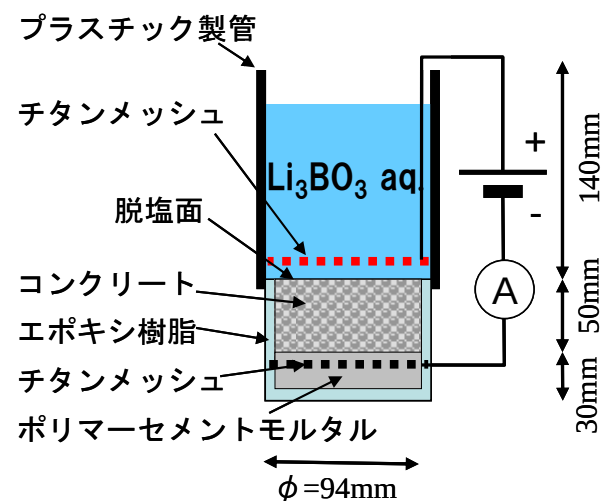


図-1 模擬脱塩試験の概要（断面図）

2.2 配合

本研究で使用したコンクリートの示方配合を表-1 に示す。混和剤は, AE 剤としてアニオン系界面活性剤を使用した。

本実験では, さまざまな塩害環境を模擬する

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (非会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

表 - 1 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
20	40	4.5	38	167	422	658	1140	1.054
20	50	4.5	40	175	353	693	1140	0.882
20	60	4.5	42	179	300	728	1140	0.750

ために、初期内在塩分量を 3 水準とし、コンクリート単位体積あたり NaCl 量で 2 kg/m³, 8 kg/m³, 16.5 kg/m³ を混入した。これは塩化物イオン量で 1.2 kg/m³, 4.8 kg/m³, 10 kg/m³ に相当する。なお既往の研究²⁾を参考にして、混入した NaCl 量と同重量の細骨材を減じた。

2.3 模擬脱塩試験供試体の作製方法

本実験で用いたコンクリート供試体は、150×150×530mm の角柱型枠にコンクリートを打設後、材齢 28 日で角柱からコア抜きをして得られる φ94mm×50mm の円柱供試体とした。なお、養生は 20℃の湿空養生とした。

この円柱供試体の上面に電解質溶液保持のために塩ビ管を取り付け、そこに 800ml の外部溶液を封入した。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 20mm 離れた位置に固定した。陰極にもチタンメッシュを使用した。鉄筋 D13 とほぼ同表面積に加工したチタンメッシュを円柱供試体の底面にポリマーセメントモルタルによって接着した。その後円柱供試体の上面（脱塩面）以外をエポキシ樹脂でコーティングした。

2.4 通電方法

電流密度は脱塩面の面積に対して 1A/m², 4A/m² の 2 水準、通電期間は 1A/m² では 4 週, 8 週, 12 週および 40 週, 4A/m² では 1 週, 2 週, 3 週および 10 週として、直流電流を定電流制御で与えた。なお、外部溶液には 0.2mol/L のホウ酸リチウム水溶液を用い、材齢 52 日で通電を開始した。

2.5 測定項目

(1) 単位通電体積あたりの脱塩量

外部溶液中の Cl⁻濃度は、1～7 日に 1 度の頻度

で外部溶液を 10ml 採取し、電位差滴定法により測定した。測定した Cl⁻濃度に外部溶液量である 800ml を掛け合わせ、脱塩面の面積で除した値を単位通電面積あたりの脱塩量として算出した。

(2) 電流・電圧

電流は、回路に対して直列接続したシャント抵抗の電圧を測定し、オームの法則より電流を算出した。電圧は、供試体の陰極に接続されているリード線および脱塩面近傍に測定端子を設置して測定した。

3. 実験結果

3.1 水セメント比が脱塩性状に及ぼす影響

(1) 脱塩量への影響

図-2 および図-3 に、初期内在 NaCl 量を 8.0kg/m³ とした供試体の単位通電面積あたりの脱塩量（以下、脱塩量）と通電時間および積算電流密度の関係を示す。ここで積算電流密度とは、電流密度を通電時間で積分した値であり、電流密度が一定であれば、電流密度と通電時間の積で表される。

図-2 によれば、同一通電時間において、高 W/C ほど、また電流密度が大きいほど脱塩量は多くなった。一方、図-3 より、同一積算電流密度においては、脱塩量は高 W/C ほど多くなるものの、電流密度が同一であれば脱塩量は同程度の値を示した。

(2) 輸率への影響

図-4 および図-5 に、塩化物イオンの輸率（以下、輸率）と、通電時間および積算電流密度の関係を示す。ここで、塩化物イオンの輸率とは、電気の流れに占める塩化物イオンの分担比率を

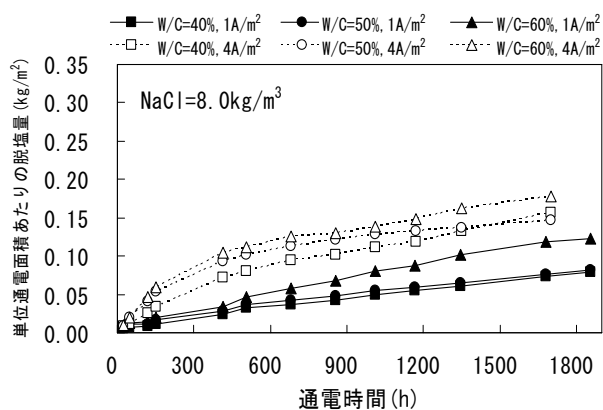


図-2 単位通電面積あたりの脱塩量と
通电期間の関係（初期内在塩分量一定）

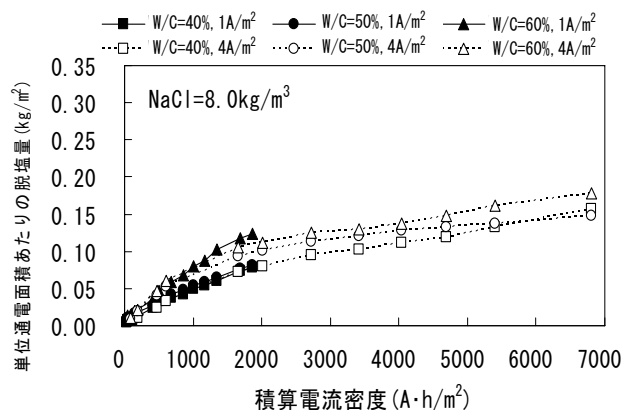


図-3 単位通電面積あたりの脱塩量と
積算電流密度の関係（初期内在塩分量一定）

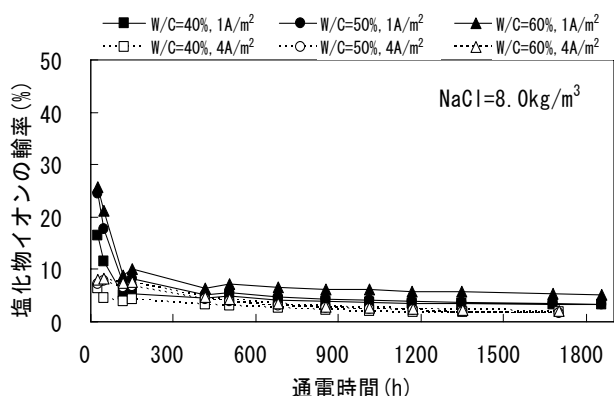


図-4 塩化物イオンの輸率と通电期間の
関係（初期内在塩分量一定）

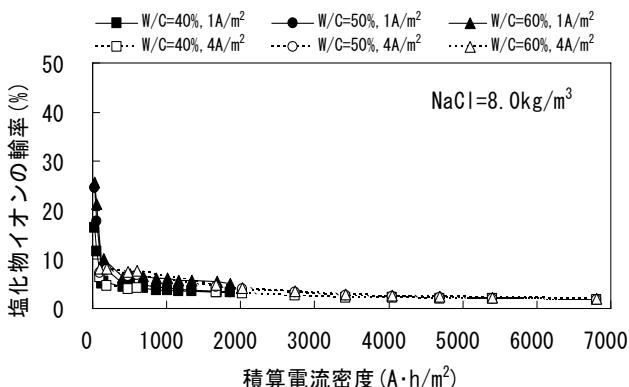


図-5 塩化物イオンの輸率と積算電流密度の
関係（初期内在塩分量一定）

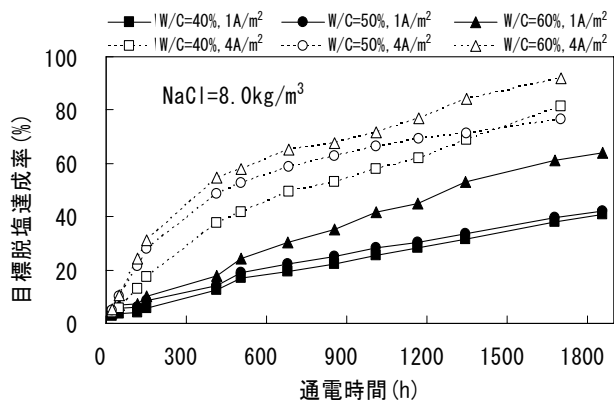


図-6 目標脱塩達成率と通电期間の関係
（初期内在塩分量一定）

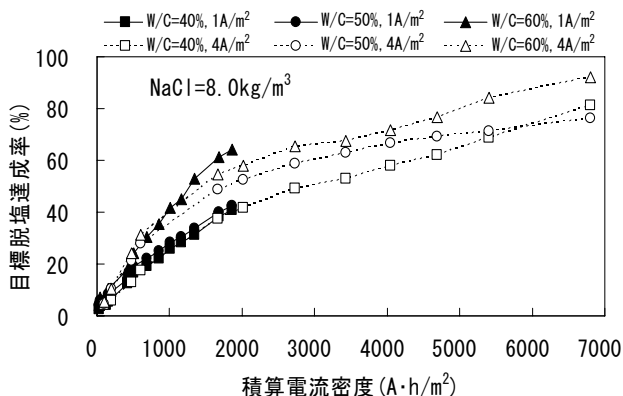


図-7 目標脱塩達成率と積算電流密度の関係
（初期内在塩分量一定）

示す。輸率を積算電流密度で整理すると、同一積算電流密度における輸率は電流密度に依存せず同等の値になり、W/C に依存するが、その程度は小さいことがわかる。このことより、W/C や内在塩分量などのコンクリートの内的条件が同一であれば、輸率は電流密度に関わらず積算電流密度で整理できるものと考えられる。

(3) 目標脱塩達成率への影響

本研究では、式(1)に示すように目標脱塩達成率を定義した。

$$N = \frac{Q_{Cl^-}}{Q_A} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、 Q_{Cl^-} ：脱塩量(kg/m²)、 Q_A ：目標脱塩量

(kg/m^3)であり、脱塩量は初期塩分量と脱塩後の塩分量の差から求められる。本研究での目標脱塩量は、脱塩後のコンクリート中塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 よりも安全側の値になることを目標に、 1.0kg/m^3 と決定した。

図-6および図-7に目標脱塩達成率と通電時間および積算電流密度の関係を示す。同一通電時間での目標脱塩達成率をみると、高 W/C ほど、および大きな電流密度ほど目標脱塩達成率は大きくなった。一方で、同一積算電流密度での目標脱塩達成率は W/C 毎に電流密度の影響を受けないことがわかる。

ところで、図-6によれば、電流密度 4A/m^2 において、目標脱塩達成率が 60%になるまでの通電時間を比較すると、W/C=40, 50, 60%でそれぞれ 1093, 709, 516 時間となった。これは、W/C=50%を基準にすると、W/C=40%では 1.54 倍、W/C=60%では 0.73 倍の通電時間が必要ということであり、W/C=40%は W/C=60%のほぼ 2 倍の通電時間を要すると考えられる。よって、同等の初期内在塩分量であっても、W/C を把握した上で通電時間を決定する必要があると考えられる。

3.2 内在塩分量が脱塩性状に及ぼす影響

(1) 脱塩量への影響

図-8および図-9に W/C=50%一定で初期内在塩分量を変化させた供試体の脱塩量と通電時間および積算電流密度の関係を示す。

図-8によれば、同一通電時間において、初期内在塩分が多いほど、また電流密度が大きいほど脱塩量は多くなった。一方、図-9より、同一積算電流密度で整理すると、初期内在塩分が多いほど脱塩量も多くなるが、電流密度による変化はないことは明らかである。

(2) 輸率への影響

図-10および図-11に輸率と通電時間および積算電流密度の関係を示す。輸率を積算電流密度で整理すると、同一積算電流密度における輸率は電流密度に依存せず同等の値になり、初期内

在塩分量に依存することがわかる。この結果と、3.1(2)の結果より、W/C や内在塩分量の条件が同じであれば、輸率と積算電流密度の関係は電流密度に関わらず一定であると考えることができる。このことは、実構造物に脱塩工法を適用するに当たって通電条件（電流密度と通電時間）を選定する際、模擬脱塩試験から得られる輸率と積算電流密度の関係を参考にすることが有用であることを示唆している。

なお、本研究の範囲において、輸率への影響は、W/C よりも内在塩分量の方が大きかった。

(3) 目標脱塩達成率への影響

図-12 および図-13 に目標脱塩達成率と通電時間および積算電流密度の関係を示す。同一通電時間での目標脱塩達成率をみると、通電初期では初期内在塩分量が多いほど、および高電流密度ほど目標脱塩達成率は大きくなった。なお、電流密度 4A/m^2 において、目標脱塩達成率が 60%になるまでの通電時間を比較すると、初期内在塩分量 $\text{NaCl}=2.0, 8.0, 16.5\text{kg/m}^3$ でそれぞれ 778, 730, 489 時間となった。これは、初期内在塩分量 $\text{NaCl}=2.0\text{kg/m}^3$ を基準にすると、8.0 および 16.5kg/m^3 それぞれで 0.94 および 0.63 倍の通電時間が必要ということである。

しかしながら、通電時間の継続により、上記の関係は逆転する場合がある。例えば、電流密度 4A/m^2 、初期内在塩分量 $\text{NaCl}=2.0\text{kg/m}^3$ の供試体は線形的に目標脱塩達成率が増加し、通電時間 900 時間付近で他の供試体よりも目標脱塩達成率が大きくなり、通電時間 1296 時間（おおよそ 8 週間に相当）においては目標脱塩達成率が 100%に達した。これは、初期内在塩分量が少ないと脱塩量は少ないが、通電の継続により目標脱塩量には到達しやすいことを示している。

以上より、同 W/C であっても、初期内在塩分量を把握して通電時間を決定する必要があると考えられる。また、初期内在塩分量 $\text{NaCl}=2.0\text{kg/m}^3$ のように初期内在塩分量が少ない場合には、脱塩量が少なくても、通電を継続することにより目標とする脱塩量を確保できるこ

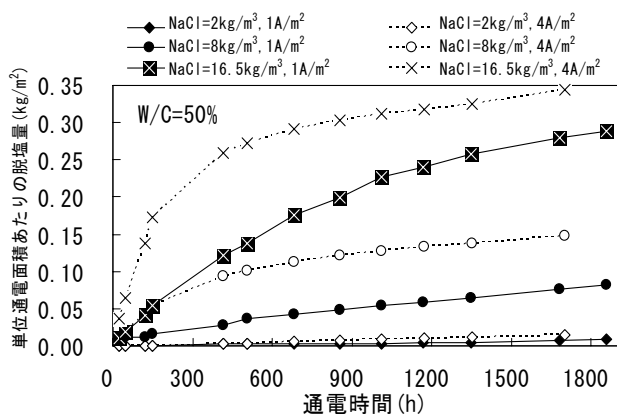


図-8 単位通電面積あたりの脱塩量と
通电期間の関係 (W/C 一定)

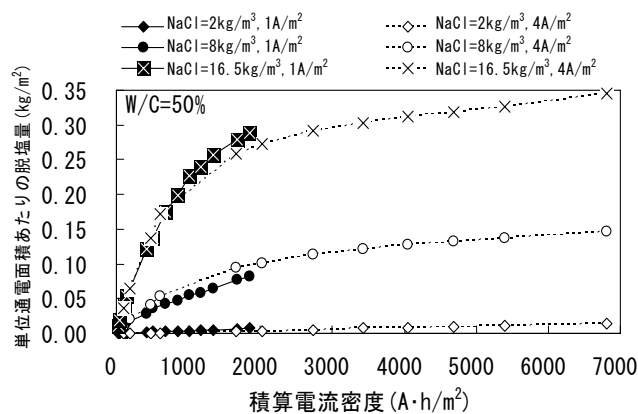


図-9 単位通電面積あたりの脱塩量と
積算電流密度の関係 (W/C 一定)

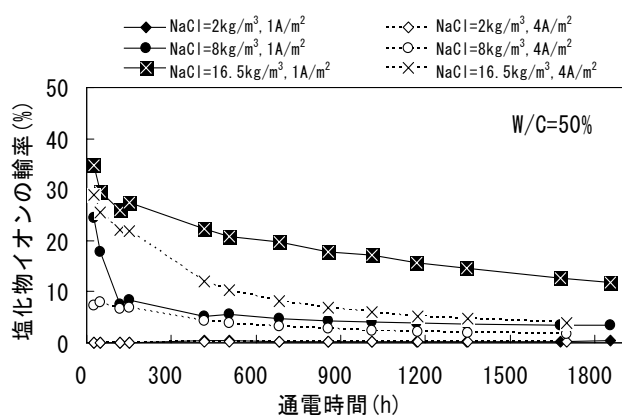


図-10 塩化物イオンの輸率と通电期間
の関係 (W/C 一定)

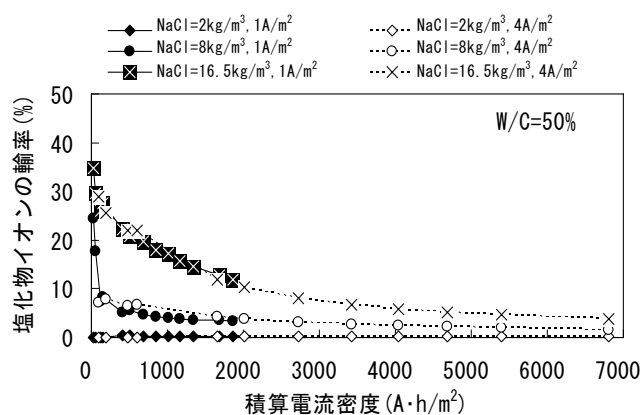


図-11 塩化物イオンの輸率と積算電流
密度の関係 (W/C 一定)

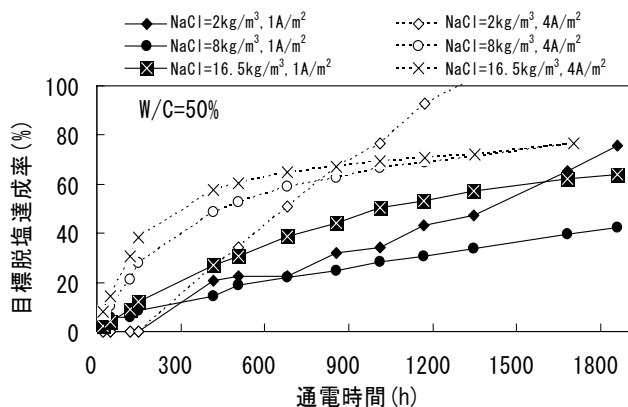


図-12 目標脱塩達成率と通电期間の関係
(W/C 一定)

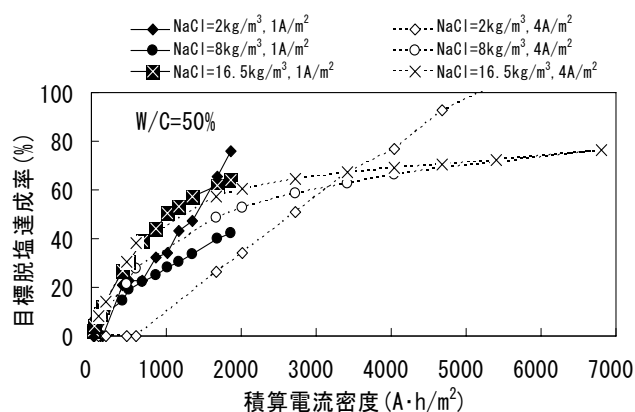


図-13 目標脱塩達成率と積算電流密度の関係
(W/C 一定)

とが示唆された。

3.3 残存 Cl^- 量が塩化物イオンの輸率に及ぼす影響

図-14 に、塩化物イオンの輸率とコンクリート単位体積あたりの残存 Cl^- 量との関係を示す。図-14 には本研究で実施した全ての模擬脱塩試験結果

がプロットされている。図-14 より、塩化物イオンの輸率は電流密度に関わらず残存 Cl^- 量と相関性があることがわかる。また、高 W/C ほど同一残存 Cl^- 量での塩化物イオンの輸率が大きく、塩化物イオンの輸率と残存 Cl^- 量の相関の程度は W/C によって異なることがわかる。一般に、着

目イオンの輸率は全電解質に占める着目イオンの電氣的な割合と密接に関係している。本研究では、高 W/C ほど単位セメント量が少なく、よって Ca^{2+} , Na^+ , K^+ 等のセメント起源の電解質も少ない。このため、コンクリート中の全電解質に占める塩化物イオンの電氣的な割合は高 W/C ほど大きくなり、同一残存 Cl^- 量での塩化物イオンの輸率が高 W/C ほど大きくなったと考えられる。

4. 結論

本研究では、コア試料として採取したコンクリート供試体に模擬脱塩試験を適用し、W/C および初期内在塩分量が脱塩性状に及ぼす影響について検討を行った。その結果、通電条件を選定する際、W/C および初期内在塩分量を把握して通電条件を決定する必要があることがわかった。以下に本研究で得られた主な知見を示す。

- (1) 脱塩量および輸率は同一通電時間において、高 W/C ほど、初期内在塩分量が多いほど、また電流密度が大きいほど大きくなる。しかし、同一の積算電流密度における脱塩量および輸率には電流密度による差異は生じない。
- (2) 目標脱塩達成率は同一通電時間において、高 W/C ほど、および電流密度が大きいほど大きくなる。しかし、通電初期において初期内在塩分量が少ないほど目標脱塩達成率は小さいが、通電を継続すると、この関係は逆転する。
- (3) 配合や内在塩分量の条件が同じであれば、輸率と積算電流密度の関係は電流密度に関わらず一定である。このことは、実施工で通電条件（電流密度と通電時間）を選定する際、模擬脱塩試験から得られる輸率と積算電流密度の関係を参考にすることが有用であることを示唆している。
- (4) 塩化物イオンの輸率は電流密度に関わらず残存 Cl^- 量と相関性がある。また、この相関の程度は W/C によって異なる。

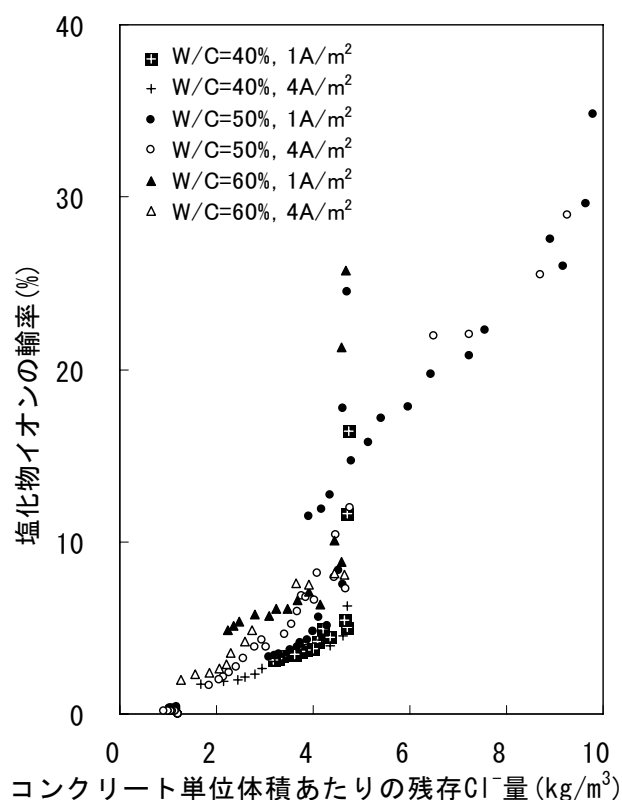


図-14 塩化物イオンの輸率とコンクリート単位体積あたりの残存 Cl^- 量の関係

謝辞: 本研究は、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し致しました。ここに関係各位に対し謝意を表します。

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) 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
- 3) 久田 真: 通電によるコンクリート中のイオン移動に関する研究, 東京工業大学, 学位論文, 1998