

# 論文 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

椎名 貴快<sup>\*1</sup>・渡辺 博志<sup>\*2</sup>・久田 真<sup>\*3</sup>・古賀 裕久<sup>\*4</sup>

**要旨**：脱塩工法において、コンクリート内部に形成される電場を把握することは、イオンの電気的な移動を捉え、脱塩効果を定量的に予測する上で重要であると思われるが、明確にはなっていない。本研究では、鉄筋量、かぶり、電流密度の違いによる電位分布、脱塩率、自然電位への影響に関して検討した。その結果、鉄筋量やかぶりの条件によって作用する電場領域に違いがあり、脱塩効果にも差を生じることが判った。この他、通電期間中に電解質溶液中のCl<sup>-</sup>濃度を適宜測定することで、比較的高い精度で脱塩率を推定できることも判った。

**キーワード**：脱塩工法、塩化物イオン、電位分布、鉄筋量、かぶり、電解質溶液

## 1. はじめに

脱塩工法は、鉄筋と外部電極との間に電気を流し、塩化物イオン（以下、Cl<sup>-</sup>）を電気泳動によってコンクリート外へ移動・抽出することを目的としている。但し、通電によってコンクリート内部に形成される電場やイオン濃度分布が、細孔溶液中のイオン挙動に影響を与え、所定の電流量を流したにも拘らず、想定した脱塩量に達しない場合がある<sup>1)</sup>との指摘もある。

例えば、鉄筋の背面部分や鉄筋で囲まれたコンクリートコア部では、通電しても電位勾配を形成しにくい場合があり、この結果、電位勾配を駆動力とするイオンの電気泳動が鈍化して、Cl<sup>-</sup>の移動量が電極付近の領域やかぶり部分よりも小さくなることもあると言われている。

このように、通電時におけるコンクリート内部の電場を把握することは、各部におけるイオンの移動を捉え、脱塩効果を定量的に予測する上で重要であると思われる。しかし、この点に関する議論は、十分には行われていない。この他、通電処理中における脱塩量のモニタリングは、通電期間の設定や計画した脱塩効果の確認をする上で重要であるが、必要な精度で実施可能かどうか不明確になっていない。

以上の点を踏まえ、本研究では、通電によって形成されるコンクリート内部の電場に着目し、鉄筋量、かぶり、電流密度による影響について、解析と実験の両面から調査した。また、脱塩率、自然電位の変化についても調べた。さらに、電解質溶液中に溶出したCl<sup>-</sup>濃度の経時測定による脱塩率の推定精度についても検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験変数

実験変数は、鉄筋量、かぶり、電流密度の3変数とした。供試体は、鉄筋 D10 を軸方向に4本ないし8本配置した150×150×530mmの角柱である（図-1参照）。各変数の設定は以下のとおりであり、各供試体の概略を表-1に示す。

#### (1) 軸方向鉄筋量

軸方向鉄筋量は、対比率1:2 (1.27% : 2.54%)とした。なお、鉄筋は全てD10 (SD345)である。

#### (2) かぶり

かぶりは、脱塩面から主筋までの距離（主筋かぶり）が30mm及び50mmの2ケースとした。

#### (3) 電流密度

脱塩効率及び負荷電圧による躯体への影響を考慮して、最大値をコンクリート表面積1m<sup>2</sup>あ

\*1 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 工修 (正会員)

\*2 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)

\*3 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工博 (正会員)

\*4 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 工修 (正会員)

たり 5A とし、無通電時 (0A) を含めて 4 ケース (0, 1, 2, 5A/m<sup>2</sup>) とした。

## 2.2 使用材料及び供試体の作製

### (1) 使用材料

配合表を表-2 に示す。 $f'_{ck}$  は 24N/mm<sup>2</sup>、普通ポルトランドセメントを使用した。

### (2) 供試体の作製方法

コンクリート打設後、室内(20℃)で 24 時間湿空養生後、脱型し、さらに 6 日間水中養生(20℃)を実施した。養生後、脱塩面以外の 5 面全てをエポキシ樹脂でシールし、その後、塩分浸漬 (NaCl : 10%, 浸漬期間 : 3 ヶ月、室温 20℃) を実施した。

## 2.3 通電方法

脱塩面から 20mm 上方にチタン製陽極材を設置し、外周を塩化ビニル製パネルで覆い、電解質溶液 (Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> : 0.2mol/L) を充填した。実験では、直流電流を断続的に通電(4.4 日通電, 2.6 日休止を 1 サイクル)し、8 サイクル継続した。なお、期間中の溶液交換は実施しなかった。

## 2.4 測定項目

### (1) 電位分布

電位分布は、図-2 に示すように、被覆付き銅線を供試体端面に縦横 20mm 間隔で 64 箇所(深さ 15mm 程度埋め込んで測定した。なお、銅線は先端部のみ数ミリ程度被覆を剥がして使用し、帯鉄筋のない断面付近の電位を測定した。

### (2) 塩分分析

コンクリート中の Cl<sup>-</sup> 量の分析域は、図-1 中の網掛部 (50mm 厚) とし、電位差滴定法 (JCI-SC4) により Cl<sup>-</sup> 量を測定した。

電解質溶液中の Cl<sup>-</sup> 量は、1 週間に 1 度の頻度で溶液を約 10ml 採取し、イオンクロマトグラフを用いて測定した。

### (3) 自然電位

通電処理直後から 1 週間毎に 5 週目まで計 6 回実施した。測定は、土木学会規準 (JSCE-E 601-2000) に準拠した。

### (4) 電解質溶液の pH 値

電解質溶液の pH 値が酸性領域に入った場合、

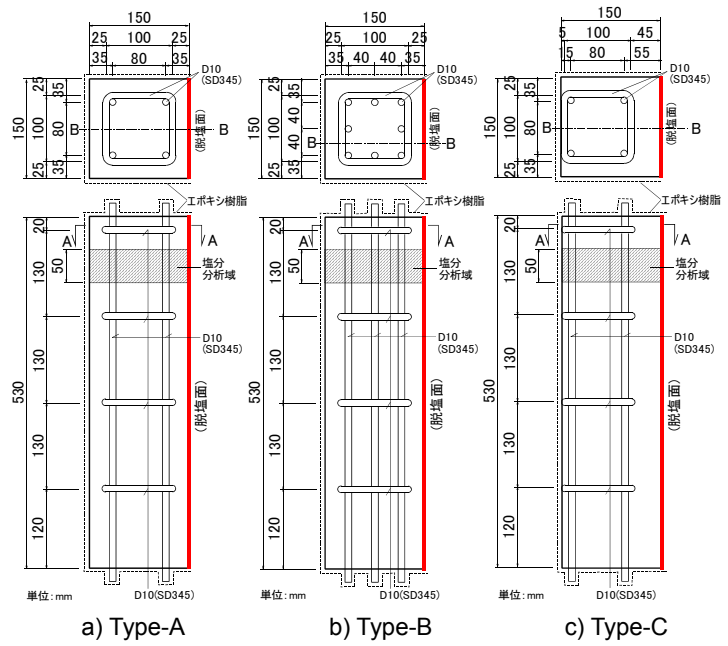


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体の概略

供試体名	形状	鉄筋量 (%)	主筋かぶり (mm)	電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	実験目的
No.1	Type-A	1.27	30	1	(基準体)
No.2	Type-B	2.54	30	1	鉄筋量
No.3	Type-C	1.27	50	1	かぶり
No.4	Type-A	1.27	30	0	電流密度
No.5				2	
No.6				5	

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
55	45	8	4.5	170	309	806	1008

細骨材 (静岡県大井川産川砂, 密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.71), 粗骨材混合比率 50:50, 粗骨材 1 (茨城県笠間産 5 号砕石, 密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 6.90), 粗骨材 2 (茨城県笠間産 6 号砕石, 密度 2.66g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 6.37)

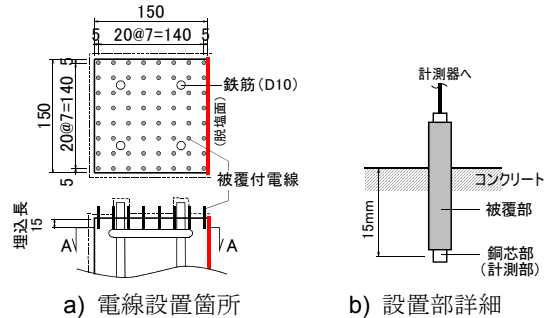


図-2 電位測定

溶液中の Cl<sup>-</sup> は陽極材付近から塩素ガスとして大気中に放出され、損失してしまう。この場合、溶液中の Cl<sup>-</sup> 量を正確に測定することが困難となるため、塩素ガスの発生目安を知る目的で、電解質溶液の pH 値を各週で測定した。

### 3. 差分法を用いた静電場シミュレーション

#### 3.1 Laplace 方程式

配合が均一で、細孔溶液中のイオン組成も同濃度(定常状態)と仮定した場合、コンクリート中に生じる静電場分布(電位分布)は Laplace 方程式により導かれる。同方程式を二次元 xy 座標系において変換すると、下式のように表わせる。

$$\nabla^2 \phi(x, y) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

上式を差分原理によって離散化し、差分方程式として表すと(但し、i, j は x, y 座標を示す)、

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{4}(\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1}) \quad (i, j = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

上式から、1つの格子点上の値は隣接する4つの格子点の平均として求まる。本式は、反復法により計算可能であり、下式のように表せる。

$$\phi_{i,j}^{k+1} = \phi_{i,j}^k + \beta \left( \frac{\phi_{i+1,j}^k + \phi_{i-1,j}^k + \phi_{i,j+1}^k + \phi_{i,j-1}^k}{4} - \phi_{i,j}^k \right) \quad (3)$$

ここで、 $\beta$  は収束パラメータである。

#### 3.2 解析条件

対象モデルは、実験供試体と同じ No.1, No.2, No.3 の3種類とし、鉄筋量及びかぶりが異なる場合の電場をシミュレートした。着目位置は、図-1中のA-A断面とした。

解析条件は、簡易的に鉄筋電位を0V、陽極材電位を7Vとし、鉄筋界面、外部電極及び電解質溶液での電極反応による電位 loss は考慮していない。収束誤差が0.0001以下(式(3)の $\beta \leq 0.0001$ )に収束するまで反復計算を行った。なお、コンクリートの電気抵抗は塩化物イオン量に応じて変化する可能性もあるが、明確ではなく、ここでは解析上コンクリート抵抗を一定と考えた。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 静電場のシミュレーション結果

静電場のシミュレーション結果を図-3に示す。また、得られた知見を以下にまとめた。

- 鉄筋量によって作用する電場領域に違いが現れた。具体的には、鉄筋量が多くなると、コア部の電位勾配は小さくなり、一方でかぶ

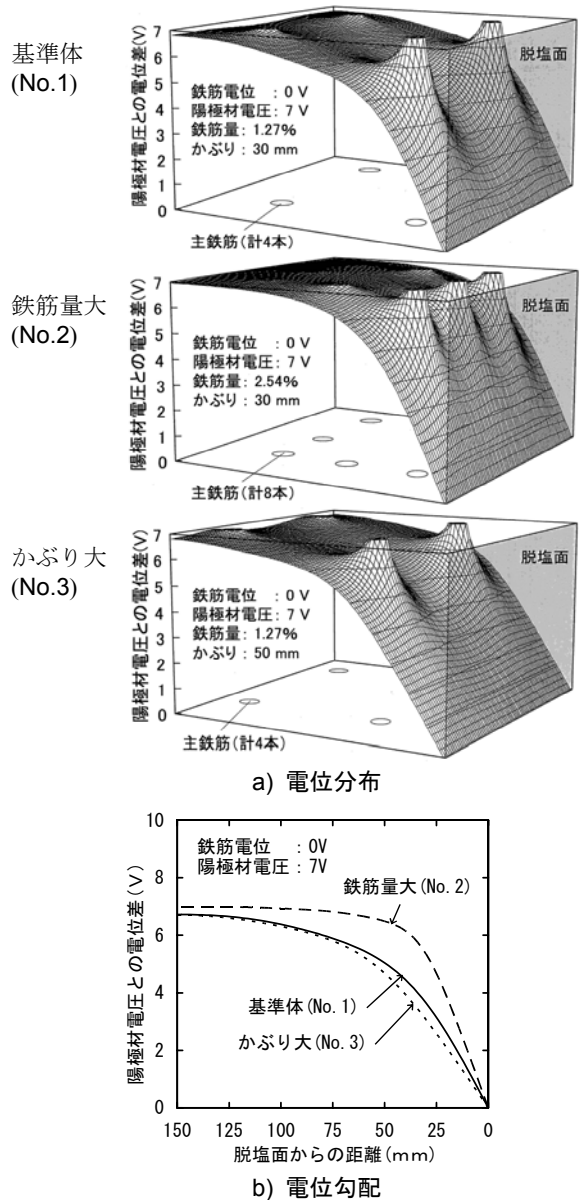


図-3 静電場解析シミュレーション結果

り部の電位勾配は大きくなった。

- かぶりが大きくなると電位勾配が僅かながら緩やかになる結果を得た。なお、コア部での電位分布は同程度であった。

#### 4.2 鉄筋量とかぶりによる影響

##### (1) 印加電圧と電流密度

印加電圧と電流密度のデータを図-4に示す。

印加電圧は、3供試体とも通電開始1週目までは低下傾向であり、2週目から徐々に上昇し、5週目以降はほぼ通電直後と同程度まで回復した。電流密度は概ね  $1A/m^2$  を保持した。但し、No.3に関して、直流安定化電源の制御不具合により、電流量が設定値を若干下回る結果となった。

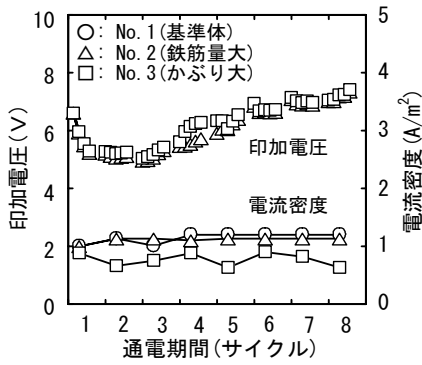


図-4 印加電圧と電流密度

(2) 電位分布

軸方向直角断面(図-1のA-A断面)におけるB-B間での電位分布を図-5に示す。

No.2はコア部の電位が平衡状態にあり、電流は殆ど流れていないと推察される。しかし、No.1は僅かながら電位勾配を確認できたため、鉄筋量が電場形成に影響していると思われる。なお、かぶり部のCl<sup>-</sup>は、鉄筋量に拘らず電氣的に移動し易い状態にあった。

No.3は、No.1よりかぶりが大きく電極間距離が長いため、電位勾配が緩やかであった。つまり、かぶりが大きい程イオンの移動速度は低下すると思われる。

以上示した実験結果と前節の解析結果は、比較的類似した傾向(図-6)となった。但し、実際の電場を正確に予測するには、骨材や空隙構造、各種イオンの濃度分布による影響等を勘案し定式化する必要があり、本解析は簡易モデルを用いて異条件での静電場をシミュレート比較したものである。

(3) 脱塩率

通電終了後(8週間後)での脱塩面から深さ方向(20mm間隔)の脱塩率を図-7に示す。

鉄筋量の違いにより、コア部での脱塩率に差

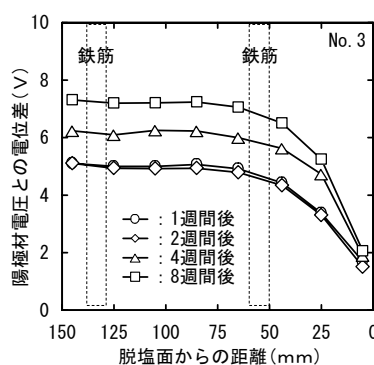
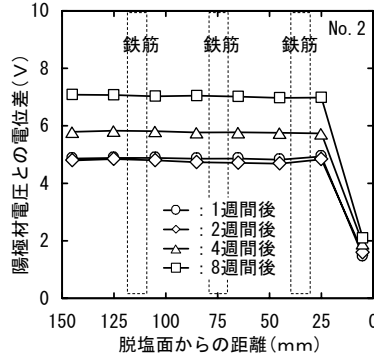
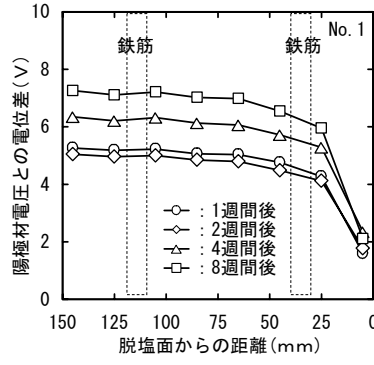


図-5 電位分布

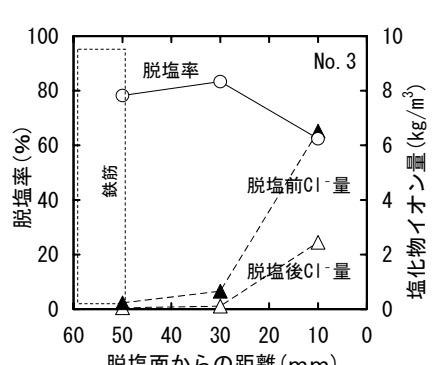
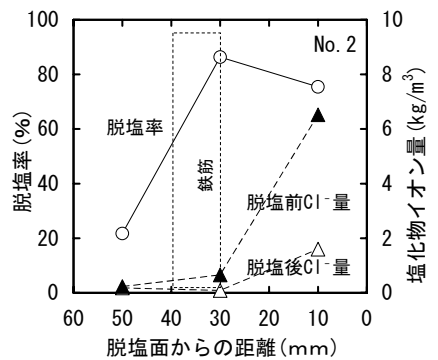
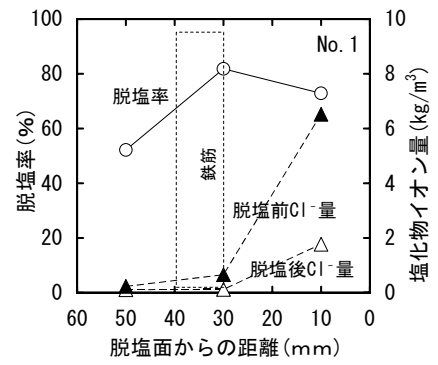


図-7 脱塩率

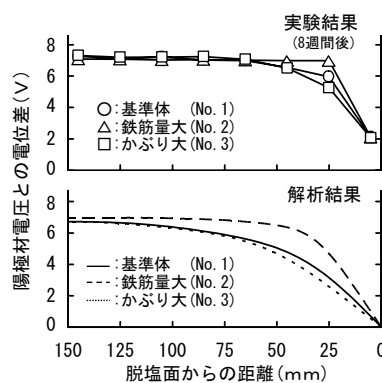


図-6 電位比較(解析と実験)

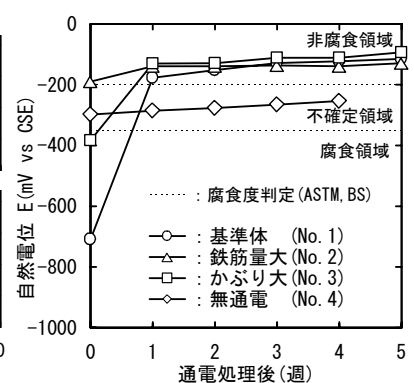


図-8 自然電位

がみられた。この理由として、鉄筋量によってはコア部にも僅かながら電位勾配が作用するため、これを駆動力としてCl<sup>-</sup>がかぶり方向に移動したと考えられる。なお、脱塩前のCl<sup>-</sup>浸透量が少なかったため、コア部でのデータ評価に関し

ては、誤差も含まれると考えられ、今後検討を追加する必要がある。

かぶりの大小による影響について、鉄筋近傍での脱塩率は No.1 と No.3 とともに同程度であるが、脱塩面付近では No.1 の方が高かった。これは、No.1 は電極間距離が短いことで電位勾配が急となり、 $Cl^-$  が効率良くコンクリート外へ移動したためと考えられる。

#### (4) 自然電位

脱塩終了後に実施した自然電位の測定結果を図-8 に示す。

通電終了直後、各試験体の測定値に明らかな違いがみられたものの、1週間後には概ね同程度に落ち着き、それ以降の値に変化はみられなかった。なお、図中には通電処理を行わなかった No.4 の測定結果も併記した。通電処理後1週間までの間に認められた自然電位の変化の理由は明確ではないが、それ以降の自然電位が落ち着いた時点での比較を行うと、通電を行った供試体の方が貴な電位を示しており、腐食環境に改善がみられた可能性があると考えられる。

### 4.3 電流密度による影響

#### (1) 印加電圧と電流密度

印加電圧と電流密度のデータを図-9 に示す。同図から、印加電圧は電流密度の設定比率 1 : 2 : 5 とほぼ同比率の値で推移した。

#### (2) 電位分布

図-1 の A-A 断面における B-B 間の電位分布を図-10 に示す。なお、 $5A/m^2$  の供試体が溶液漏れを起こし、7 週目以降データを欠損したため、6 週目のデータで整理した。

測定の結果、電流密度が高いほど、脱塩面に向かって大きな電位勾配が作用し、イオンが移動し易くなると考えられる。

#### (3) 脱塩率

通電終了後での脱塩率を図-11 に示す。また、無通電時 (No.4) の場合も併せて図示した。

電流密度が高いほど、脱塩効果も全体的に高くなった。また、無通電の状態 ( $0A/m^2$ ) でも、イオン濃度勾配を駆動力とする自然拡散によっ

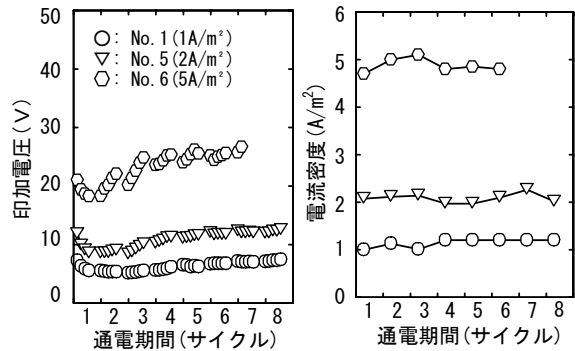


図-9 印加電圧と電流密度

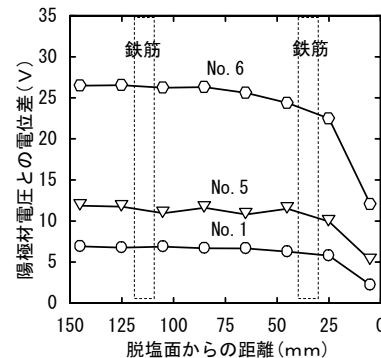


図-10 電位分布

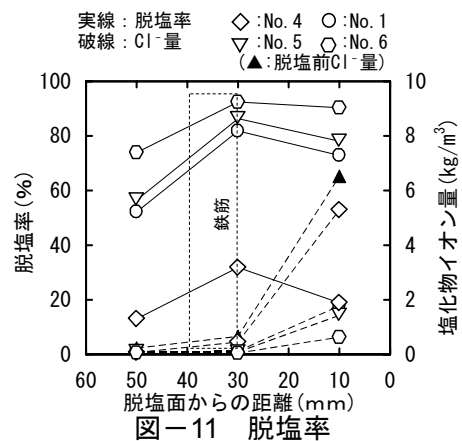


図-11 脱塩率

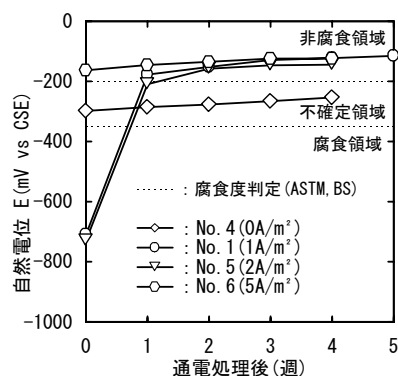


図-12 自然電位

て、 $Cl^-$  が約 20%外部へ溶出する結果を得た。

#### (4) 自然電位

脱塩終了後の自然電位の測定結果を図-12 に示す。測定結果は、前記と同様の傾向を示した。

#### 4.4 電解質溶液の Cl<sup>-</sup>濃度による脱塩率の推定

##### (1) pH 値

電解質溶液の pH 値の測定結果を図-13 に示す。同図から、溶液に Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液を使用した場合、pH 値は通電期間中アルカリ領域にあった。このため、塩素ガスの発生による Cl<sup>-</sup>の損失は極めて小さく、脱塩によって抽出された Cl<sup>-</sup>は溶液中に概ね 100%溶解した状態にあると言える。

##### (2) 脱塩率の推定結果

通電前後に採取したコアサンプルの塩分分析結果(脱塩面から深さ 60mm までの Cl<sup>-</sup>量)から求めた脱塩率と、電解質溶液に溶出した Cl<sup>-</sup>量を測定して得られた脱塩率との関係を図-14 に示す。結果として、相関係数 0.958 と高い相関性が確認され、通電中に電解質溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度を測定することで、脱塩率を適宜把握することが可能であると思われる。但し、塩素ガスの発生による Cl<sup>-</sup>の損失誤差を最小限に抑えるため、pH 値のモニタリングも必要である。

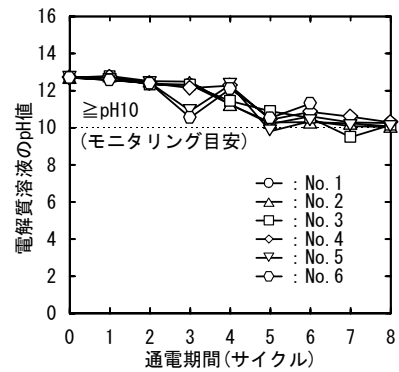


図-13 電解質溶液の pH 値

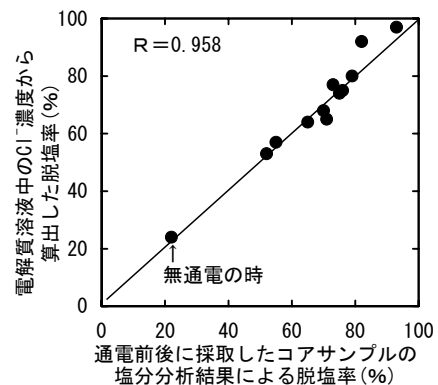


図-14 脱塩率の相関性

#### 5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

##### (1) シミュレーション結果

- 鉄筋量が多くなると、コア部の電位勾配は小さくなり、一方でかぶり部の電位勾配は大きくなる結果となった。
- かぶりの大小による電位勾配への影響が僅かであるが確認できた。
- 簡易モデルを用いてシミュレートした静電場の結果と実験結果は、躯体条件の違いによる傾向を概ね捉えていた。但し、実際の電場を正確に定量予測するには、骨材や空隙構造、各種イオンの濃度分布による影響等を考慮したモデルの定式化が必要であると考えられる。

##### (2) 実験結果

- 鉄筋量によっては、コア部でも若干の電流が流れることを確認した。また、コア部の Cl<sup>-</sup>が僅かであるが除去されていた。
- かぶりが厚くなると、かぶり部の電位勾配は緩やかになり、脱塩率も小さくなった。

- 電流密度が高いほど、脱塩面からの電位勾配は大きく作用し、脱塩率も上昇した。
- 本実験結果から、電場への影響要因及び電場と脱塩効果との関係に関する基礎的な情報を得ることができたと思われる。
- 無通電状態 (0A/m<sup>2</sup>) でも、濃度勾配を駆動力とする自然拡散によって、Cl<sup>-</sup>が全体で約 20%外部へ溶出する結果を得たが、通電によって脱塩率は大きく上昇した。
- 電解質溶液中の Cl<sup>-</sup>の濃度変化を適宜測定することで、比較的高い精度 (R=0.958) で脱塩率を推定することが可能であると思われる。但し、溶液の pH 測定が必要である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、元交流研究員の田中秀治殿((株)ウエスコ)の御協力に謝意を表す。

#### 参考文献

- 久田 真: 通電によるコンクリート中のイオンの移動に関する研究, 東工大学位論文, 1997.