

◆特集：橋梁の耐久性を向上させる技術◆

脱塩工法におけるコンクリート中の電位分布と塩分除去効果

椎名貴快* 久田 真** 松塚忠政*** 渡辺博志****

1. はじめに

近年、塩害や中性化により劣化したコンクリート構造物に対する補修技術の一つとして、電気化学的防食工法が注目されている。電気化学的防食工法は、コンクリート内部の鋼材に外部より陽極を通じて直流電流を流すことで、鋼材腐食によるコンクリート構造物の劣化を防止する技術¹⁾であり、①電気防食、②脱塩、③再アルカリ化、④電着の4工法に大別される。この内、電気防食工法は、コンクリート中の鋼材に電流を継続的に流し、鋼材の腐食反応を電気化学的に抑制する工法であり、既に多くの採用実績がある。これに対して、脱塩工法は、鋼材に電流を一定期間のみ流し、コンクリート中から腐食因子である塩化物イオン(以下、Cl⁻)を電気泳動によって短期間に除去もしくは低減することを目的としており、実用化できれば、補修効率の向上に資するものとして期待されている。

脱塩工法は、既往の研究により、単鉄筋断面部材の場合、通電によって躯体全域に渡って電場を作用させることができるため、鋼材近傍のCl⁻濃度を腐食が発生しないレベル以下にまで確実に除去できることが判っている。これに対して、橋梁床版のような複鉄筋断面部材や橋脚などの帯鉄筋柱では、鉄筋の背面や鉄筋で囲まれたコア部でのCl⁻の除去率(以下、脱塩率)はかぶり部と比較して低いことが予想できるが、定量的に推定するには至っていない。この理由として、実構造物のように鉄筋が輻輳して配置された場合では、通電によって生じる断面内の電位分布が明確でないことが挙げられる。また、通電中における脱塩量のモニタリングは、必要となる通電期間の設定や脱塩が予想通り行えているかどうかを確認する上で重要であるが、実際に必要な精度でこれを行えるかどうか不明確にはなっていない。

以上の点を踏まえ、本研究では、通電時における部材断面内での電位分布の把握及び塩分除去効果に与える各条件の影響を捉えることを主目的とした実験を行った。すなわち、橋脚を模擬した供

試体を作製し、軸方向鉄筋量やかぶり、電流密度を変化させた場合、部材断面内の電位分布や脱塩率、自然電位に及ぼす影響を調査した。この他、電解質溶液中のCl⁻濃度の経時変化を測定して得た脱塩率の推定精度に関しても検討した。

2. 脱塩工法の概要

脱塩工法はまだ適用例も少なく、一般的な工法として広く認知されていないと思われるので、その概要を以下に簡単に紹介する。

脱塩工法は、コンクリート表面に特殊なチタン製の仮設陽極材を設置し、塩化ビニル製パネルで覆った後、電解質処理溶液を充填する。次に、陽極と鉄筋(陰極)に直流電流を流す(図-1参照)。この結果、電気泳動によりコンクリート中のCl⁻が陽極側に移動し、電解質溶液中に抽出される。電解質溶液には、ホウ酸リチウム溶液や飽和硫酸カルシウム水溶液等を使用する。

3. 実験概要

3.1 目的

本実験では、塩分浸漬面と同一側面から脱塩処理した場合、通電時における部材内部の電位分布状況の把握及び加える電流密度や配筋の方法などの条件がCl⁻除去の効果に及ぼす影響を捉えることを主目的とした。この他、通電期間中の脱塩量を逐次確認する方法として、コアサンプルを採取し、Cl⁻の含有量を化学分析により求め、処理前のデータと比較することが最も確実であると考えられる。しかし、この方法では測定に要する労力が多大であり、実用的ではない。そのため、電解質溶液に溶出したCl⁻量を測定し、脱塩率を推定

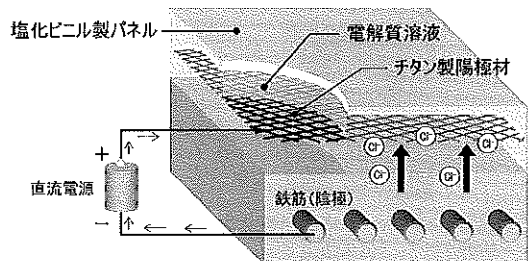


図-1 工法の概要

Potential Distribution Profile and Effect of Chloride Removal on Desalination in Concrete

した方が効率的であると考えられる。そこで、コンクリート躯体から採取したサンプル中の塩分分析の結果から算出した脱塩率と、電解質溶液中のCl⁻量を測定して得られた脱塩率とを比較し、電解質溶液中のCl⁻濃度変化の測定による塩分除去の推定精度に関しても検討した。

3.2 実験変数

本実験では、実験変数を構造条件（軸方向鉄筋量、かぶり）及び施工条件（電流密度）の2条件3変数とした。供試体は、150×150×530mmの角柱であり、鉄筋D10（SD345）を4本ないし8本軸方向に配置した小型帯鉄筋柱である（図-2参照）。具体的な各変数の設定値は以下のとおりであり、各供試体の概略を表-1にまとめた。

(1) 軸方向鉄筋量

軸方向鉄筋量の値は、対比率1：2となるように、1.27%及び2.54%とした。なお、使用した鉄筋は全てD10（SD345）である。

(2) かぶり

かぶりは、シールしていないコンクリート表面から帯筋を模擬した鉄筋までの距離が20mm及び40mmとなる対比率1：2の2ケースとした。

(3) 電流密度

通常、脱塩効率率は電流密度に比例すると言われている。本実験では、脱塩の効率化や電流密度を増大させた場合の負荷電圧及び躯体への影響を考慮して、最大値をコンクリート表面積1m²当たり5Aとし、無通電時（0A）の場合も含めて4ケース（0, 1, 2, 5A/m²）とした。

3.3 使用材料および供試体の作製

(1) 使用材料

配合表を表-2に示す。設計基準強度24N/mm²とし、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、20℃の室内で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。本実験では、養生後に図中の供試体上面以外の面（3側面、2端面）を全てエポキシ系樹脂でシールし、その後、塩分浸漬（NaCl：10%、浸漬期間：3ヵ月、室温20℃）を実施した。

3.4 通電方法

コンクリート表面から20mm離れた位置にチタン製陽極材を設置し、塩化ビニル製パネルで覆い、電解質溶液としてホウ酸リチウム溶液（Li₃BO₃：0.2mol/l）を約4l（50×150×530mm）充填した。

通電方法は、コンクリート表面積1m²当たり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、これを8サイクル（8週間）継続

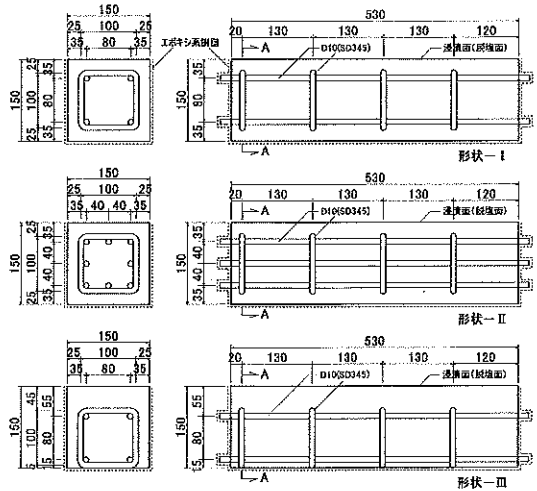


図-2 供試体の寸法

表-1 供試体の概略

No.	形状	軸方向鉄筋量 (%)	かぶり (mm)	電流密度 (A/m ²)	実験目的
1	I	1.27	20	1	(基準体)
2	II	2.54	20	1	鉄筋量
3	III	1.27	40		
4	I	1.27	20	0	電流密度
5				2	
6				5	

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	
							5号	6号
55	45	8	4.5	170	309	806	504	504

細骨材（大井川産川砂、密度2.60g/cm³、粗粒率2.71）、粗骨材1（笠間産5号砕石、密度2.67g/cm³、粗粒率6.90）、粗骨材2（笠間産6号砕石、密度2.66g/cm³、粗粒率6.37）

した。なお、期間中の溶液交換は行わなかった。

3.5 測定項目

(1) 電位分布

電位分布は、図-3に示すように、供試体の端面に縦横20mm間隔で64箇所銅線を約20mmの深さまで埋め込み、これをデータロガーのマイナス端子に接続して、陽極材電圧との差により測定した。なお、銅線は被覆付きのものを使用し、先端部のみ数ミリ程度被覆を剥がして埋設することで、深さ20mm位置での電位を測定した。

(2) 塩分分析

1) コンクリート供試体中のCl⁻量

塩分の分析域は、図-4に示すように、脱塩前後で供試体端部から軸方向と直角に150×150×

150mmのブロックを乾式カッターで切り出し、この中央部50mm厚(図中の網掛部)とした。分析では、さらに軸方向と平行に20mmメッシュに切断し、各々を粉碎した後、JCI規準(JCI-SC4)の電位差滴定法に準拠してCl⁻量を測定した。

2) 電解質溶液中のCl⁻量

電解質溶液を1週間に1度の頻度で約10ml採取し、電解質溶液中のCl⁻量をイオンクロマトグラフで測定した。

(3) 自然電位

一般的に、鉄筋が腐食すると腐食電池作用によって腐食部(アノード部)と非腐食部(カソード部)の間に電位勾配が生じて、腐食電流が流れる。自然電位法は、コンクリート表面から電位勾配(自然電位)を測定して、調査時点での鉄筋腐食の可能性を調査するものである。測定は、土木学会規準(JSCE-E 601-2000)に準拠し、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。照合電極には飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を使用した。測定結果はASTMやBS規格の評価指標に対応させるため、25℃の飽和硫酸銅電極(CSE)に対する値(vs CSE)に換算して整理した。

(4) 電解質溶液のpH値

電解質溶液のpH値が酸性領域(約5.5以下)になった場合、陽極材付近からCl⁻が約20%塩素ガスとして大気中に放出される。この場合、電解質溶液中のCl⁻の一部がガスとして損失するため、電解質溶液に溶出したCl⁻量を正確に把握することが困難となる。また、塩素ガスは強腐食性ガスのため、酸荒れ等の躯体変質の原因となる。このため、本実験では塩素ガスの発生目安を知る上で有効な電解質溶液のpH値を逐次測定した。

4. 実験結果

(1) 軸方向鉄筋量の違いによる影響

1) 電位分布

軸方向鉄筋量の対比率が1:2となる供試体No.1とNo.2に関して、各々の印加電圧と電流密度及び軸方向直角断面(図-2中のA-A断面)における電位分布(陽極からの電位差分布)を、それぞれ図-5及び図-6に示す。なお、図-5中で極端に電圧が低下しているのは、断続的な通電時における休止期間を示している。

印加電圧は、両供試体とも通電開始1週目までは低下傾向となったが、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にまで回復した。電流密度は1A/m²を保持した。

電位分布に関して、No.2はコア部で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

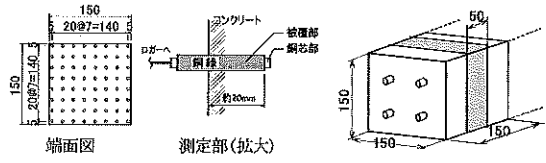


図-3 電位測定

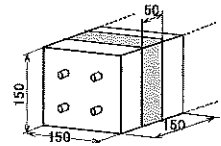


図-4 塩分測定位置

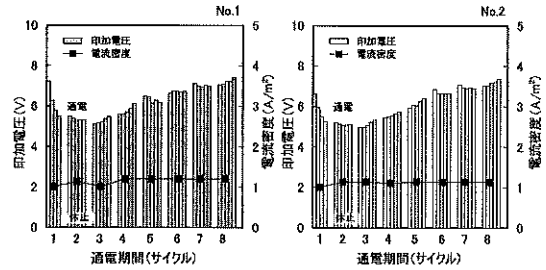


図-5 印加電圧と電流密度 (No.1, No.2)

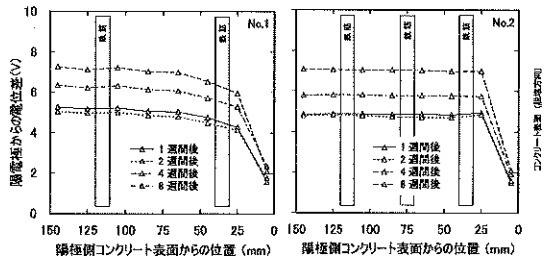


図-6 電位分布 (No.1, No.2)

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。なお、かぶり部では鉄筋量に関わらず電位勾配が確認でき、Cl⁻が電気的に移動し易い状態にあった。

2) 脱塩率

コンクリート表面から深さ方向(20mm間隔)の脱塩率を図-7に示す。

同図から、かぶり部の脱塩率は鉄筋量によらず同程度であり、特に鉄筋近傍での脱塩率が最も高かった。また、通電時に電位が平衡状態になり、電気的にCl⁻を除去することが難しいと思われたコア部においても、僅かながらCl⁻の除去効果を確認できた。この理由の一つとして、鉄筋量の値によっては、コア部にも僅かながら電位勾配を生じるため、これを駆動力としてCl⁻がかぶり部へ電気的に移動し、かぶり部に作用している電場により電解質溶液中へ抽出されたものと考えられる。

なお、脱塩前のCl⁻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。

3) 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。No.1は、通電終了直後は-350mV vs

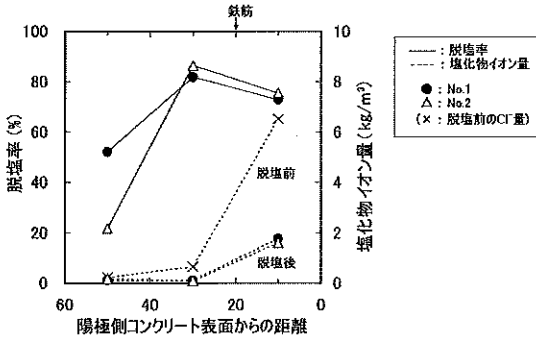


図-7 脱塩率 (No.1, No.2)

CSE以下で卑な方向にあるが、時間の経過とともに貴な方向に回復した。No.2は、通電終了直後から-200mV vs CSE以上と貴な方向にあり、その後も値は殆ど変化しなかった。結果として、ASTM C876規格やBS7361の評価基準から、両供試体とも鉄筋環境が腐食しにくい非腐食性領域に移行したと判断できる。特に、鉄筋量が多い場合、通電終了直後から、鉄筋の腐食環境に対する改善効果を確認できた。

(2) かぶりの違いによる影響

1) 電位分布

かぶりの異なる供試体No.1とNo.3に関して、印加電圧と電流密度及び電位分布 (図-2中のA-A断面) を、それぞれ図-9及び図-10に示す。

印加電圧の値に関して、かぶりの違いによるコンクリート抵抗の差の影響は殆ど認められなかった。この原因として、電流密度を1A/m²に設定して通電を開始したが、No.3はその後、電流量を一定に保つことができず、電流密度の設定値を若干下回っていることが判った。このため、通電時には電流量をモニタリングして設定値を維持するように注意が必要であると考えられる。

電位分布に関して、No.3はNo.1よりもかぶり厚く電極間距離が長いので、かぶり部での電位勾配が緩やかになっている。このため、かぶりが大きくなると、イオンの電気的な移動速度が小さくなり、Cl⁻を除去し難くなることが考えられる。

2) 脱塩率

脱塩率の結果を図-11に示す。同図から、鉄筋近傍での脱塩率は同程度であるが、コンクリート表面付近ではNo.1の方が高かった。これは、No.1はNo.3よりも電極間距離が短いためコンクリート抵抗も小さく、電位勾配が急なため、Cl⁻が電気的に効率良く移動したためと思われる。

3) 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。脱塩処理終了直後、No.1及びNo.3とも

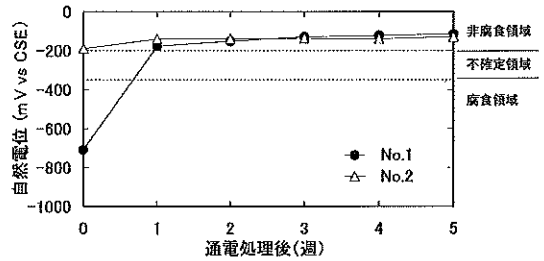


図-8 自然電位 (No.1, No.2)

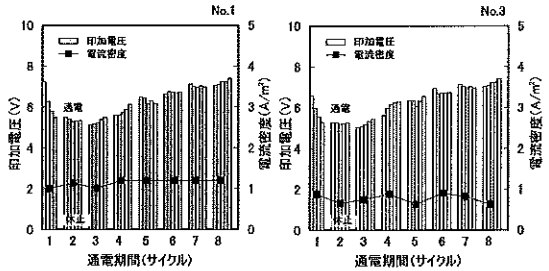


図-9 印加電圧と電流密度 (No.1, No.3)

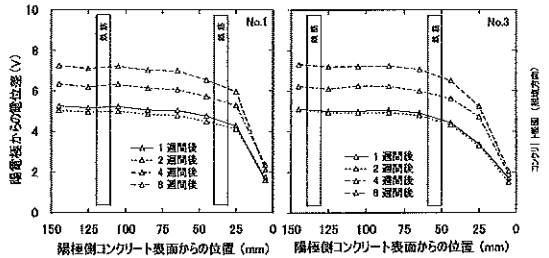


図-10 電位分布 (No.1, No.3)

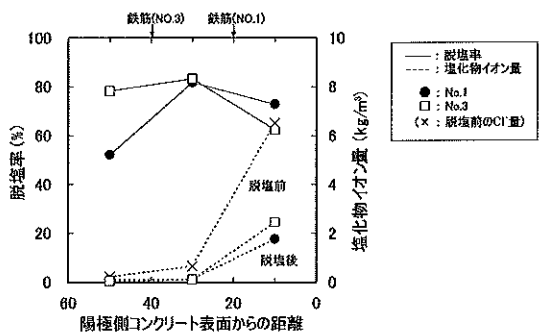


図-11 脱塩率 (No.1, No.3)

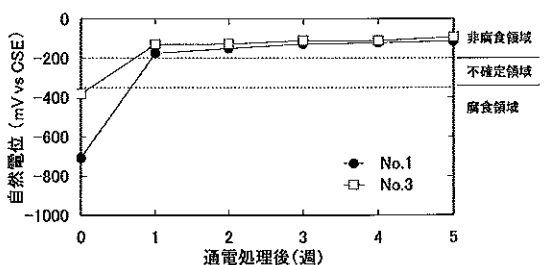


図-12 自然電位 (No.1, No.3)

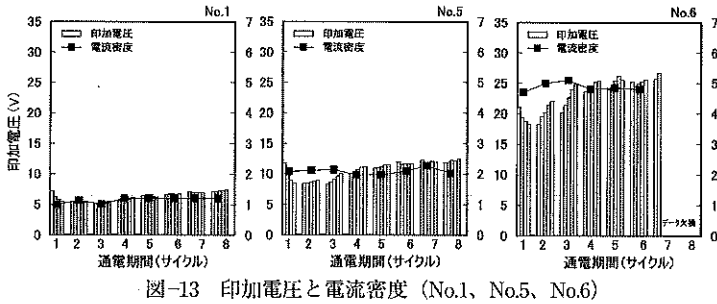


図-13 印加電圧と電流密度 (No.1, No.5, No.6)

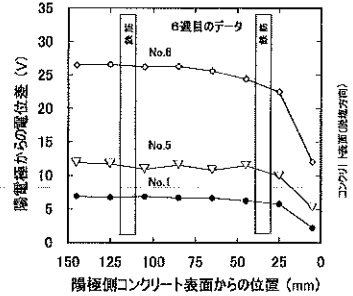


図-14 電位分布 (No.1, No.5, No.6)

に、 -350mV vs CSE 以下で卑な方向にあった。しかし、時間の経過とともに貴な方向に回復し、1週後には -200mV vs CSE 以上になり、鉄筋が腐食しにくい状態にあると言える。

(3) 電流密度の違いによる影響

1) 電位分布

電流密度の異なる供試体No.1, No.5及びNo.6各々の印加電圧と電流密度及び電位分布 (図-2中のA-A断面)を、それぞれ図-13及び図-14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ているため、電位分布に関しては、6週目のデータで整理比較した。

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。

電位分布に関して、電流密度が高くなると、かぶり部には大きな電位勾配が生じることを確認した。従って、かぶり部の Cl^- は、電流密度が高いほど電気的に移動し易くなり、除去効果が高くなると考えられる。

2) 脱塩率

脱塩率の結果を図-15に示す。また、無通電時 (No.4) の場合も併せて図示した。同図から、高い電流密度では脱塩効果も上がることを確認した。また、無通電状態 (0A/m^2)でも、濃度勾配を駆動力とする自然拡散により、 Cl^- が約20%外部へ溶出する結果を得た。

3) 自然電位

脱塩終了後の自然電位の測定結果を図-16に示す。電流密度を最大の 5A/m^2 としたNo.6は、鉄筋の腐食環境を最も改善する効果があった。

(4) 電解質溶液中の Cl^- 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-17に示す。同図から、電解質溶液に Li_3BO_3 溶液を使用した場合 (溶液交換なし)、pH値は通電期間中アルカリ性領域にあった。このため、脱塩によってコンクリートから溶出してきた Cl^- は電解質溶液中に概ね100%溶解した状態にあり、塩素ガスの発生による Cl^- の損失は極めて小さいと言える。

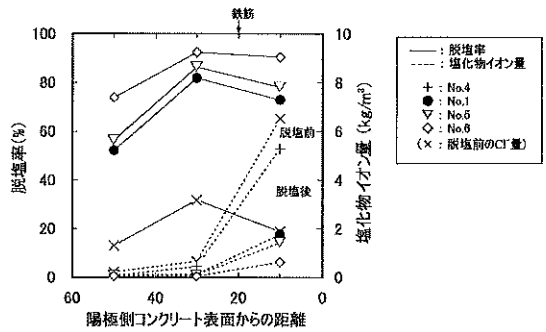


図-15 脱塩率 (No.4, No.1, No.5, No.6)

2) 脱塩率の推定結果

コンクリート躯体から採取したサンプルの深さ60mmまでの塩分の分析結果から算出した脱塩率と、電解質溶液に溶出した Cl^- 量を測定して得られた脱塩率との関係を図-18に示す。同図から、相関係数0.958と高い相関性が確認された。この結果、電解質溶液中の Cl^- の濃度変化を適宜測定することで、脱塩率を推定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^- の損失誤差を最小限に抑えるため、電解質溶液のpH値をモニタリングする必要がある。

5. まとめ

本研究では、外来塩分を含有するRC構造物 (表面近傍に Cl^- が濃縮し、内部に向かって濃度勾配がある場合)を脱塩対象とした。当該構造物の通電時における躯体内部の電位分布と塩分除去効果、及び電解質溶液の Cl^- 濃度測定に基づく脱塩率の推定精度を実験によって確認した。以下に得られた知見を示す。

- ①電流密度が高くなるとかぶり部には大きな電位勾配を生じ、脱塩率も上昇した。
- ②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^- が僅かであるが除去されていたが、その理由の一つとして、上記の電流による影響が考えられる。

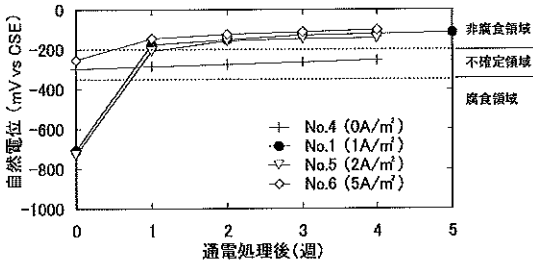


図-16 自然電位 (No.4, No.1, No.5, No.6)

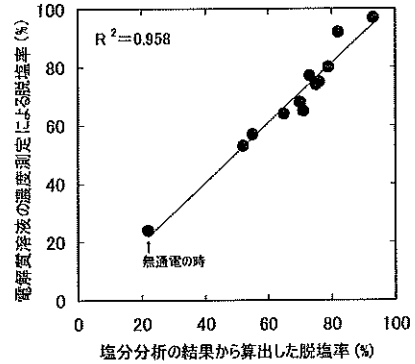


図-18 脱塩率の相関性

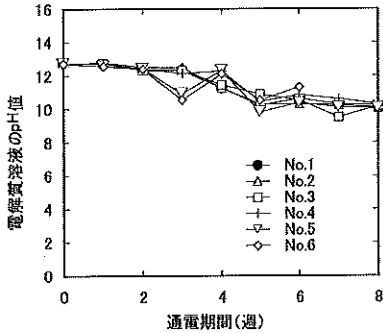


図-17 電解質溶液のpH値

- ③かぶりが厚くなると、かぶり部の電位勾配は緩やかになる。このため、イオンの電気的な移動速度が小さくなり、Cl⁻を除去し難くなることが考えられる。
- ④無通电状態 (0A/m²) でも、濃度勾配を駆動力とする自然拡散によって、Cl⁻が全体で約20%外部へ溶出する結果を得たが、通电によって脱塩率は大きく上昇した。
- ⑤電解質溶液中のCl⁻の濃度変化を適宜測定することで、比較的高い精度 (R²=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、塩素ガスの発生によるCl⁻の損失誤差を最小限に抑えるため、電解質溶液のpH値をモニタリングし、アルカリ性領域 (pH10以上) に保持する必要がある。

謝辞

本実験の実施及び取りまとめにおいて、交流研究員の田中秀治氏 (現(株)ウエスコ) ならびに電気化学工業(株)殿には多大なご協力を戴いた。ここに関係各位への謝意を表する。

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)、コンクリートライブラリー107, 2001.11.

椎名貴快*



独立行政法人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
Takayoshi SHIINA

久田 真**



独立行政法人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
Dr. Makoto HISADA

松塚忠政***



独立行政法人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
Tadamasu MATSUZUKA

渡辺博志****



独立行政法人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
Hiroshi WATANABE