

電気化学的脱塩工法による塩化物イオン除去の有効性に関する研究

コンクリート研究室 北岡 勇介

指導教官 丸山 久一

1. はじめに

電気化学的脱塩工法(以下、脱塩)は、コンクリート内に直流電流を与え、塩化物イオンを除去することで、コンクリートの鋼材保護性能の回復を図る塩害対策工法である。PC 構造物に脱塩工法を適用した場合、PC 鋼材付近で発生する水素ガスの影響により PC 鋼材が水素脆化するという問題も懸念されてきた。この点に関しては、さまざまな報告がなされており、実 PC 構造物に脱塩工法を使用した例も見られる。しかし PC 鋼材が腐食している PC 構造物に脱塩工法を行った場合、水素脆化による鋼材破断が生じるのかは明らかになっていない。

一方、脱塩による塩化物イオンの移動メカニズムについて、十分に解明されていない現状にある。

そこで、本研究では電食により断面欠損させた PC 部材に脱塩工法を適用した際の水素脆化の影響について検討を行った。また、脱塩による各イオンの移動と積算電流密度の関係について実験的検討を行い、可溶性塩分の移動メカニズムに基づくモデルの構築を通して、可溶性塩分と積算電流密度の関係に帰着するモデルの提案を行った。さらに、脱塩実験終了後、暴露実験を実施し、コンクリート性状を確認することにより脱塩によって起こる、鋼材位置へのアルカリ集積の影響について検討した。

2. PC 鋼材の水素脆化の影響

2.1 実験概要

あらかじめ塩分を混入したプレストレストコンクリート部材に電食を行い腐食を生じさせ、その後、一面から脱塩実験を行った。

さらに、脱塩実験終了後、鋼材をはつりだし鋼材

表-1 示方配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(Kg/m ³)				SP (C × %) 0.85%	
				W	C	S			G
						砕砂	川砂		
20	2.0	42	45.4	161	383	408	411	1008	3.25

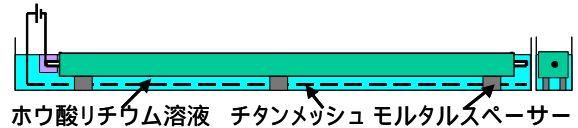


図-1 脱塩実験方法

表-2 積算電流密度(A・h/m²)

	鋼材表面積あたりの電流密度		
	1A/m ²	3A/m ²	5A/m ²
通電停止直後	4504	6013	5573
通電停止3日後	5856	10812	9214
通電停止7日後	5856	10649	10776

の引張試験および PC 鋼材破断面の SEM 観察を行った。

2.2 供試体および通電方法

表-1 に実験に使用したコンクリートの示方配合を示す。本実験では、初期塩分として塩化物イオンを 10kg/m³(NaCl 量では 16.5kg/m³) だけ、単位水量に重量比で内割添加した。

供試体はプレストレストコンクリートとし、PC 鋼材にはΦ10.8mm の PC 鋼より線(SWPR7)を 1 本配置した。供試体寸法は 100 × 100 × 2000mm とした。緊張力の導入はプレテンション方式とし、初期緊張力として、鋼材引張強度(120kN)の 71.25% (85.5kN)を導入した。

また、電食試験により素線 1 本に対して約 50% 程度の欠損を目標とし、積算電流密度 720A・h/m² から断面欠損率約 7.6% 程度の腐食欠損を導入した。

図-1 に脱塩実験の概略図を示す。脱塩面(下面)と非脱塩面(上面)以外の側面 4 面を絶縁のためすべて塗装し、一面脱塩とした。

2.3 脱塩実験水準

表-2 に各供試体の積算電流密度と通電期間を

示す。電流密度は、鋼材表面積(0.0905m²)あたり 1.0A/m²、3.0 A/m²および 5.0 A/m²の3水準とし、各電流密度に対し3体づつ計9体に脱塩実験を行った。脱塩期間は、約8ヶ月程度の長期間行った。なお、通電方法は連続通電を基本としたが、電流密度 5.0 A/m²の8週および12週については、間欠通電(4.4日間通電, 2.6日間休止)を行った。

通電終了直後、通電終了から3日間静置後、通電終了から7日間静置後のそれぞれでプレストレスコンクリート部材からPC鋼材をはつりだし、引張試験を実施した。

2.4 引張試験結果

図-2にPC鋼材の7本より線の引張試験結果(荷重-伸び関係)を示す。各電流密度において、通電停止直後に引張試験を実施(0日)、通電停止から3日後に引張試験を実施(3日)、通電停止から7日後に引張試験を実施(7日)、脱塩なしで電食試験を実施したPC鋼材を欠損あり、さらに、電食試験を実施していないPC鋼材を欠損なしとした。なお、引張試験は、鋼材が1本破断するまでとした。図より、脱塩による影響は小さいが、断面欠損による影響が大きいことが考えられる。

図-3に7本より線から取り出した芯線の引張試験結果を示す。ここで、引張試験開始後、PC鋼材がカップラーに噛むまでのすべりがひずみに入っているため、各試験結果について、PC鋼材がカップラーに定着したと考えられる荷重5.6kNで伸びが2.7mmとなるように各試験値を調整した。いずれの供試体においても、降伏荷重はほぼ20kNとなり、変化しないことがわかる。また、脱塩をしたどの芯線も最終的に伸びが発生し、延性的な挙動を示した。しかし、脱塩をした鋼材は、脱塩をしていないものに比べ、伸び率が低下している。また、休止期間の増加により破断までの伸びが増加する傾向を示した。

2.5 PC鋼材破断面のSEM観察結果

写真-1にPC引張試験後、破断面を倍率1000倍で電子顕微鏡によりSEM観察した結果を示す。

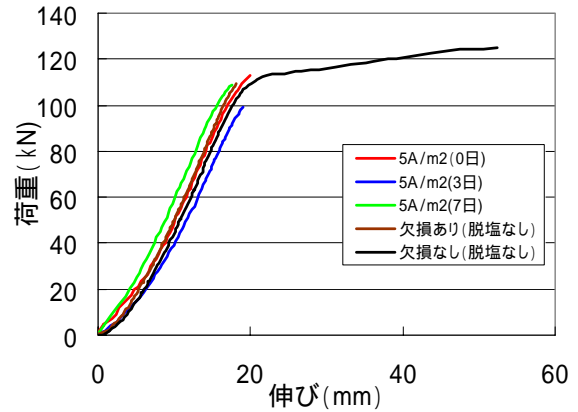


図-2 引張試験結果(電流密度 5A/m², 7本より)

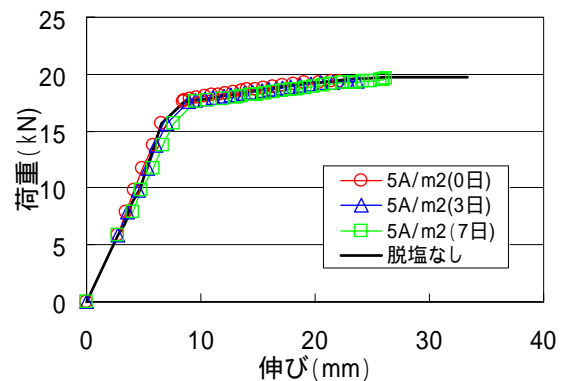


図-3 引張試験結果(電流密度 5A/m², 芯線)

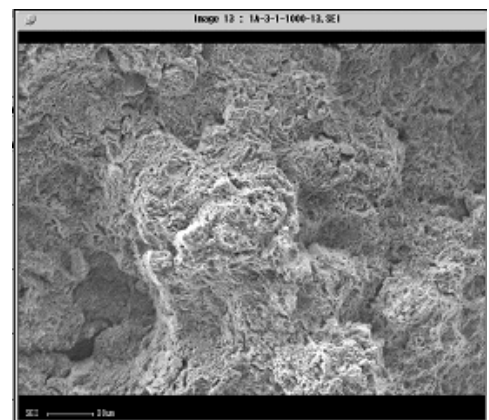


写真-1 通電停止直後(1A/m²)

写真-1より、すべての破断面において水素脆化を示す擬へき開はみられなかった。さらに、全体的に延性破壊を示すディンプル形状が見られた。SEM観察では、水素脆化の影響は確認されなかった。

3. 各イオンの移動メカニズム

3.1 実験概要

脱塩工法における、断面内の各イオンの移動と

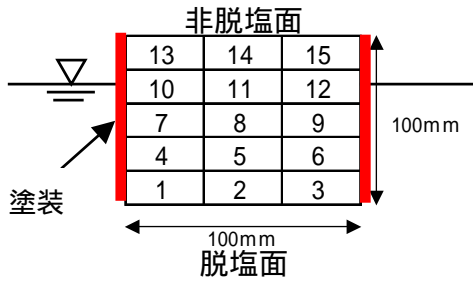


図-4 イオン濃度分析の分析箇所

電流量の関係を検討することを目的として、あらかじめ塩分を混入したプレレストコンクリート部材を用いて、一面から脱塩を行い、断面内の各イオンの濃度分布および積算電流密度の測定を行った。供試体およびコンクリート配合については、「2.PC 鋼材の水素脆化の影響」と同様であり、電食試験を行っていない供試体を使用した。ここで、表-3 に積算電流密度と脱塩日数の関係、図-4 にイオン濃度分析の分析箇所を示す。

3.2 アルカリ金属の集積

図-5 に脱塩面からの距離とNa⁺量の関係(切断面 14, 11, 8, 5, 2)、図-6 に脱塩面からの距離とK⁺量の関係を示す。Na⁺、K⁺共に通電量の増加に伴い鋼材位置(8)では増加し、脱塩面表層(2)では若干減少する傾向を示した。

3.3 塩化物イオンの移動

3.3.1 固定塩分の実験結果

図-7 に固定塩分量と積算電流密度との関係を示す。鋼材位置(8)では、固定塩分量が若干減少する傾向を示したが、脱塩面表層(2)などその他の部位では減少量が比較的小さい。

3.3.2 可溶性塩分の実験結果

図-8 に鋼材位置(8)、鋼材裏側(11)、脱塩面表層(1)での積算電流密度と可溶性塩分量の関係を示す。可溶性塩分の変化は電流密度によらず積算電流密度により一様な傾向が確認された。鋼材付近など電位の大きな場所ほど可溶性塩分は減少し、鋼材裏(11)の部位においても減少した。

図-9 に積算電流密度と可溶性塩分の濃度分布の経時変化を示し、脱塩前の可溶性塩分量からの減

表-3 積算電流密度(A・h/m²)

脱塩日数	1A/m ²	3A/m ²	5A/m ²
4週	617	1897	2563
8週	1252	3005	3378
12週	1940	3862	4051

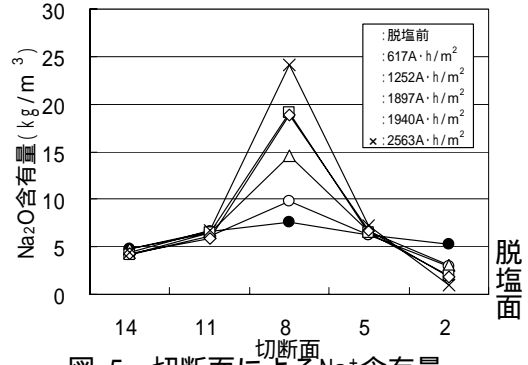


図-5 切断面によるNa⁺含有量

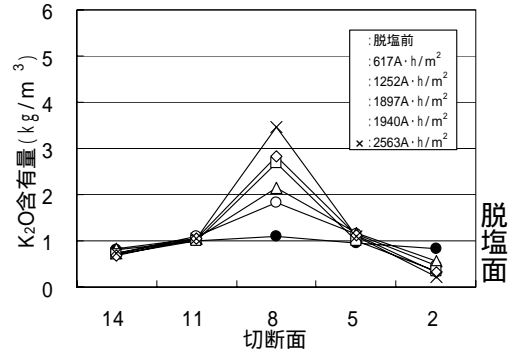


図-6 切断面によるK⁺含有量

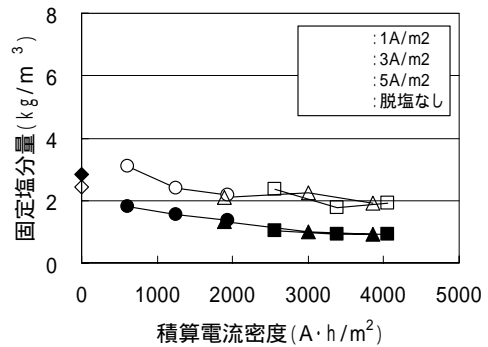


図-7 固定塩分量と積算電流密度

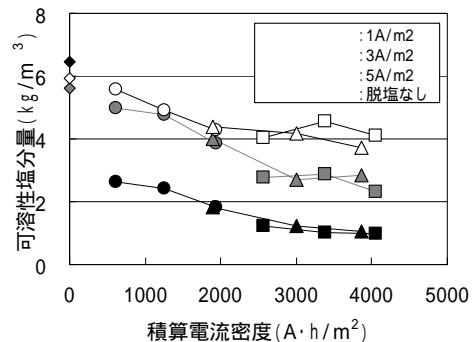
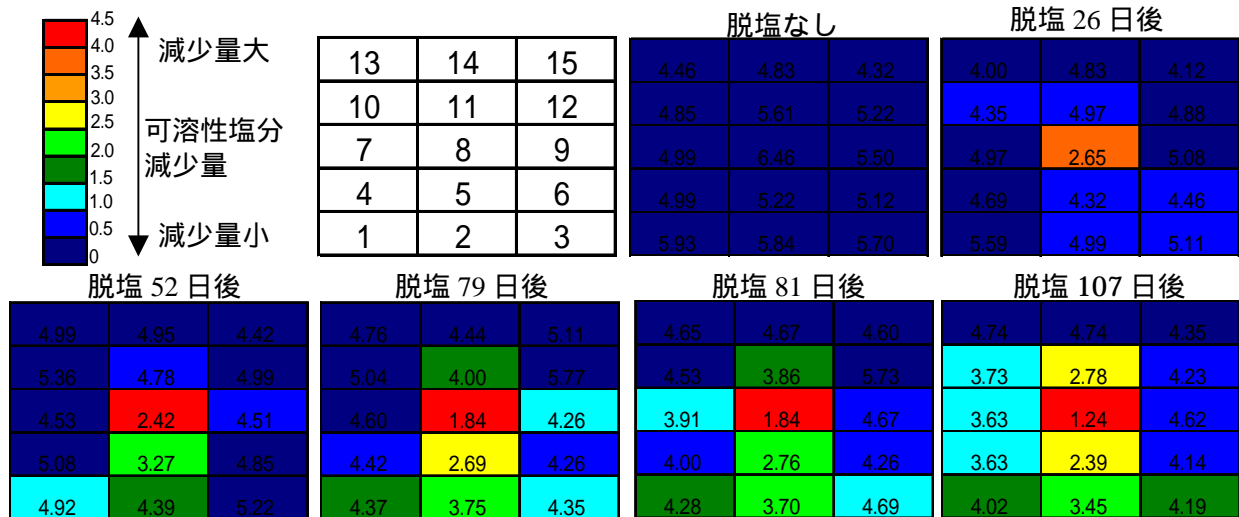


図-8 可溶性塩分量と積算電流密度



色分け：脱塩前の可溶性塩分からの減少量 図中の数値：残存する可溶性塩分量(kg/m³)

図-9 積算電流密度と可溶性塩分の濃度分布の経時変化

少量を階級ごとに色分けしている。また、図に脱塩処理後の経過日数を示した。これは、積算電流密度で評価できることから、電流密度をすべて 1A/m² と考え、積算電流密度から脱塩日数を換算して求めたものである。可溶性塩分の減少量は、鋼材位置に近い箇所、鋼材と脱塩面を短絡する経路上(2列目)にある箇所および脱塩面に近い箇所ほど減少量が多い傾向にあるといえる。

3.3.3 可溶性塩分の移動モデル

モデル化を行うにあたっては以下の仮定を行った。(1)非脱塩面付近では、可溶性塩分量は変化しない。(2)塩化物イオンの移動は電気的な力に支配され、濃度勾配による拡散の影響は無視できる。(3)コンクリート中の電気的な流れは有限個の抵抗を有する回路によって表される。本モデルでは、電流量(A)に脱塩時間(h)を乗じた積算電流量(A・h)で評価を行った。図-10 に本モデルで仮定した電気回路を示す。図-11 に本解析のフローを示す。

コンクリートの抵抗密度は、塩化物イオン量の減少とともに増加する。コンクリートの抵抗密度として式(1)の関数形を仮定し、感度解析により係数を定めることとした。

$$\rho = \frac{1}{\alpha + \beta [Cl^-]} \quad (1)$$

ここに、 ρ ：各要素の抵抗密度[Ω・m]、 α 、 β ：定

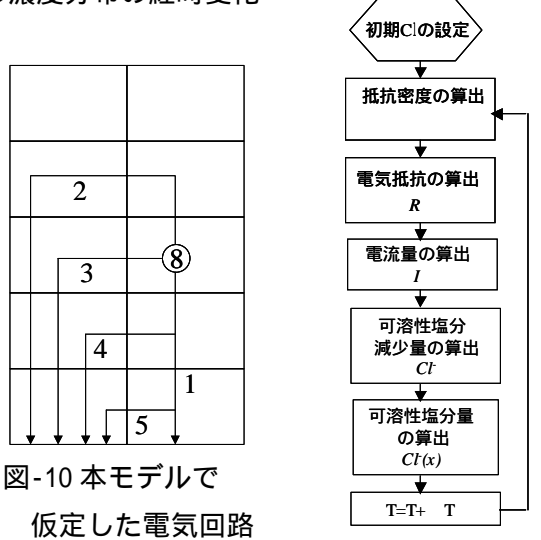


図-10 本モデルで仮定した電気回路

図-11 解析のフロー

数($\alpha=550$, $\beta=1.0$)である。さらに、抵抗値 R を式(2)により定めた。

$$R = \frac{1}{S} \quad (2)$$

ここに、 R ：各要素の電気抵抗(Ω)、 I ：各要素の電流の流れる方向の長さ(m)、 S ：各要素の断面積(m²)である。電流量は電圧を一定とし、オームの法則により算出した。

図-12 に鋼材位置(8)での積算電流量と可溶性塩分量の関係を示す。実験値から最小二乗法により近似式を求めた。この近似式を微分したものを式(3)に示す。

$$(Cl^-) = 21.785 \times It^{-0.503} \quad (3)$$

ここに、 $[Cl^-]$: 鋼材位置での可溶性塩分量(kg/m^3)、 It : 積算電流量($A \cdot h$)である。ここで、式(3)を微分し、各可溶性塩分量での可溶性塩分の減少量を式(4)のように定めた。

$$Cl^- = 0.001 [Cl^-]^{2.988} \times I \times t \quad (4)$$

ここに、 ΔCl^- : 脱塩時間 T 時の各要素の可溶性塩分減少量(kg/m^3)、 $[Cl^-]$: 脱塩時間 $T-\Delta T$ 時の各要素の可溶性塩分量(kg/m^3)、 I : 各要素での電流量(A)、 t : 単位時間(h)である。次に、可溶性塩分量を式(5)により表される連続式を用いて求めた。

$$Cl^-(x) = Cl^-(y) + [Cl^-](x) - Cl^-(x) \quad (5)$$

ここに、 $Cl^-(x)$: 各要素の可溶性塩分量(kg/m^3)、 $\Delta Cl^-(y)$: 隣接要素からの可溶性塩分量の流出量の総和(kg/m^3)、 $[Cl^-](x)$: 脱塩時間 $T-\Delta T$ 時の各要素の可溶性塩分量(kg/m^3)、 $\Delta Cl^-(x)$: 各要素の可溶性塩分減少量(kg/m^3)である。一つの要素から流出する経路が複数本ある場合には、求めた電流量に対応した可溶性塩分量を振り分けた。

3.3.4 解析結果

図-13 に可溶性塩分量と積算電流密度の解析結果と実験結果を示す。初期可溶性塩分量は $6.0kg/m^3$ とした。実験値と解析値により相関性が見られ、可溶性塩分の移動が簡易なモデルによって再現できた。

3.3.5 配合の異なる供試体への本モデルの適用

表-4 にコンクリート配合を示す。初期塩化物イオン量を $6kg/m^3$ (NaCl量では $9.9kg/m^3$) とし、単位水量に重量比で内割添加した。図-14 に脱塩実験方法を示す。

供試体寸法は $100 \times 100 \times 100mm$ とし、コンクリート内部に網状の内部電極を設置した。電流密度はコンクリート表面積あたり $2.0A/m^2$ とした。イオン濃度分析には、断面を5分割し、可溶性塩分量の測定を行った。また、3.3 と同様に、最小二乗法により電極部での各可溶性塩分量での可溶性塩分の減少量を式(7)のように定めた。

$$Cl^- = 0.118 [Cl^-]^{6.140} \times I \times t \quad (7)$$

ここに、 ΔCl^- : 脱塩時間 T 時の各要素の可溶性

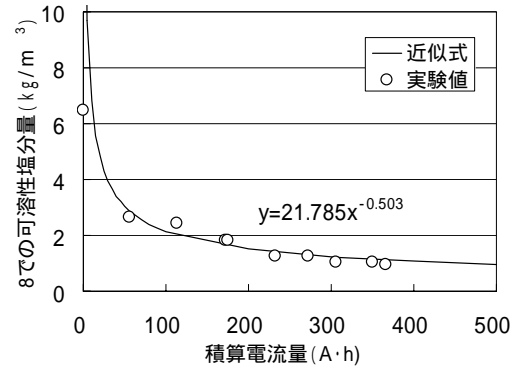


図-12 鋼材位置(8)での可溶性塩分量

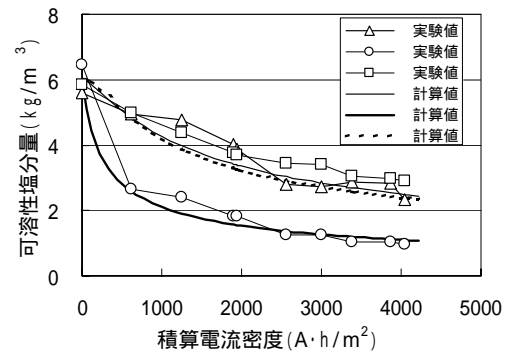


図-13 可溶性塩分量の解析結果

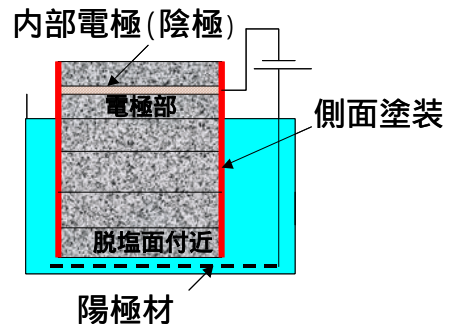


図-14 脱塩実験方法

表-4 コンクリート配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(Kg/m^3)					
				W	C	S	G	湿和剤	助剤
13	4.5	60	45	184	307	801	988	0.74	1.6

塩分減少量(kg/m^3)、 $[Cl^-]$: 脱塩時間 $T-\Delta T$ 時の各要素の可溶性塩分量(kg/m^3)、 I : 各要素での電流量(A)、 t : 単位時間(h)とする。

図-15 に本モデルに式(7)を使用した時のコンクリート表面積あたりの積算電流密度における可溶性塩分減少量の計算値と実験値を示す。すべての面でよい相関性が得られ、配合および初期塩分量の異なる供試体にも脱塩時間 T 時の各要素の

可溶性塩分減少量を変化させることにより，本モデルを適用することができると考えられる．

4. 脱塩工法適用後のコンクリート性状

暴露試験後，ひび割れの発生した供試体を確認した．供試体を切断したところ切断面には，白色析出物が見られた．また，鋼材の腐食は見られなかった．写真-2 に分析箇所(白色物)におけるSEM観察を示し，図-16 にSEM観察における観察部位1，2での化成分，図-17 に観察部位5での化学成分の比較を示す．観察部位1では，SiO₂が不足しており，CaO量が多量に存在している．このことから，セメント水和物であるC-S-Hゲルであると考えられる．また，観察部位では，CaOが80%以上を満たしており，SEM観察からもCaCO₃だと考えられる．また，写真1および図3よりエトリライトと思われる膨張生成物の結晶が多量に検出され，ひび割れに起因していることが予想される．

結論

本研究において以下の知見が得られた．

- (1)断面欠損した PC 部材に脱塩実験を行ったところ水素脆化の影響は見られなかった．
- (2)可溶性塩分の電気化学的な移動が塩分濃度と抵抗密度に基づく簡易なモデルによって再現できた．また，配合の異なる供試体においても本モデルを適用可能であることが分かった．
- (3)脱塩実験終了後，暴露試験を実施したところ，積算電流密度の大きな供試体にひび割れが発生した．また，エトリライトがひび割れに起因していると予想される．

表-5 ひび割れ状況

脱塩水準	0W 0A/m ²	4W 1A/m ²	8W 1A/m ²	4W 3A/m ²	12W 1A/m ²	4W 5A/m ²	8W 3A/m ²	8W 5A/m ²	12W 3A/m ²	12W 5A/m ²
通電日数(1A/m ² 換算)	0	26	52	79	81	107	125	141	161	169
積算電流密度A・h/m ²	0	617	1252	1897	1940	2563	3005	3378	3862	4051
塗装あり	脱塩面									
	非脱塩面								×	×
塗装なし	脱塩面									
	非脱塩面			×	×	×	×	×	×	×

○：ひび割れなし
△：ひび割れ発生し始め
×：ひび割れあり

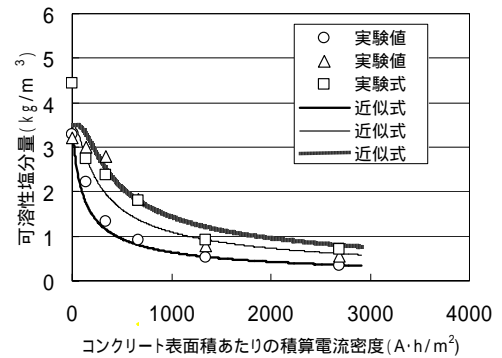


図-15 本モデルに式(7)を使用した時の可溶性塩分量の解析結果

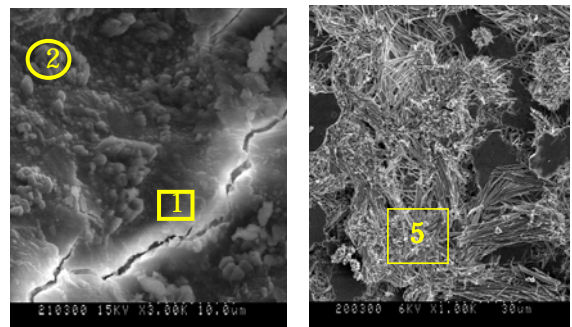


写真-2 分析箇所における SEM 観察

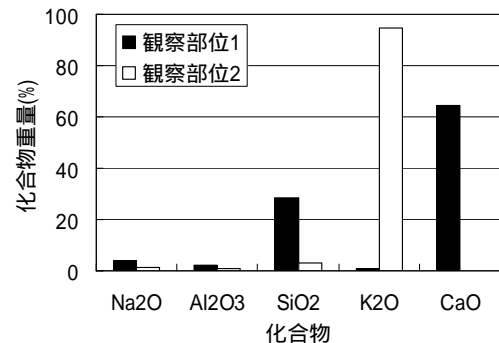


図-16 観察部位1，2での化成分

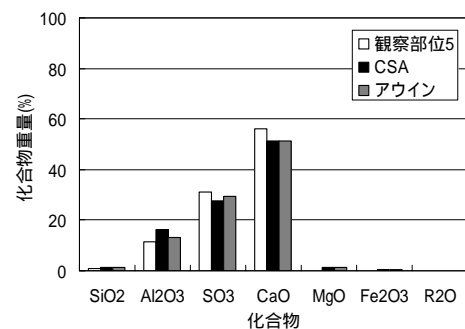


図-17 観察部位5での化学成分の比較