

鉄筋コンクリート部材の脱塩・再アルカリ化工法 に関する基礎的研究

大即信明¹・長滝重義²・久田 真³・網野貴彦⁴

¹正会員 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴学生員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

近年において、コンクリート中におけるイオンの移動を電氣的にコントロールすることにより、コンクリート内部の構造物の劣化因子となる有害イオンを除去し、長期間の共用により低下したコンクリートのpHを再び上昇させる試みがなされ始めている。しかし、通電によるイオンの移動メカニズムや、電氣的な手法の有用性等に関しては、曖昧な点が多いのが現状である。本文は、塩化物イオンを含んだ鉄筋コンクリート部材から、電氣的な手法によりこれを除去し、内部鉄筋の電氣化学的性質を把握することにより、電氣的な脱塩・再アルカリ化工法の有用性についての実験的な検討を行ったものである。

Key Words : desalination, re-alkalization, electric migration, passivation

1. 序論

周知のごとく、従来より、塩害、中性化による鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食による劣化が問題となっている。今後、劣化した鉄筋コンクリート構造物に対し、的確に維持・補修を行い、鉄筋コンクリート構造物の健全性を回復させることが重要である。

元来、コンクリート中の鉄筋には、高アルカリ環境により不動態と呼ばれる化学的に安定な保護皮膜が存在するため、腐食を起しにくい状態になっているとされてきた。しかし、海洋環境でのコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散、さらには、中性化によるコンクリート中のpHの低下によって、不動態が破壊され、鉄筋腐食が発生する可能性がある。この鉄筋腐食の抑制策として種々の方法がとられており、実構造物に採用している例もあるが、残念なことにその効果が現れず、逆に悪化した事例も報告されている¹⁾。

近年になって、電氣化学的手法を用いて鉄筋の腐食を抑制する試みがなされている。その中には鉄筋腐食を起させないために、鉄筋に直に微小電流を流すことで常に鉄筋を卑な状態とし腐食を防ぐ電氣防食法²⁾、水中におけるナトリウムやカルシウムなどの無機物でコンクリート表面を覆う電着工法³⁾な

どがある。さらに、塩害や中性化により劣化した既設コンクリート構造物に対しては、電氣防食法や電着工法に比して大きな電流を短期間流すことにより、コンクリート中の塩化物イオンの除去、並びにコンクリート中の再アルカリ化を目的とした脱塩・再アルカリ化工法が注目されている⁴⁾。この工法は、コンクリート中にある塩化物イオンをコンクリート外部へ強制移動させ、さらにコンクリート内部を再びアルカリ雰囲気とすることで鉄筋の状態を健全にするものである。定性的にはこの工法は効果があるとされているが、コンクリート中の各種イオンの移動メカニズム、その解析手法についても十分に明らかにされていないのが現状である。

本研究は、以上の点を踏まえて鉄筋コンクリートの塩化物イオンによる鉄筋腐食を対象とした脱塩・再アルカリ化工法の基礎的な事項を明らかにすることを目的とするものである。特に、脱塩・再アルカリ化工法において考えられる2つの通電方式、内部電極方式(鉄筋を陰極、コンクリート表面に陽極を設置)、外部電極方式(コンクリート表面に陽・陰極を設置)の2つの方式について、それぞれの特徴を比較・検討し、この工法の実用化に向け、基礎的な情報を得ることを目的とした。

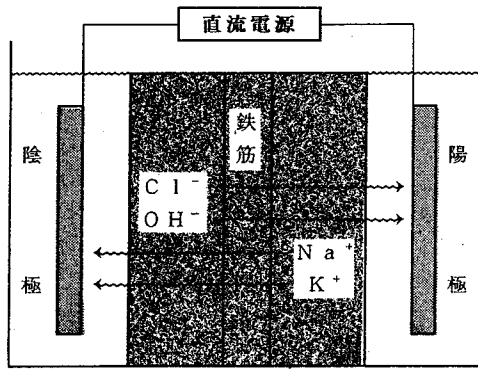


図-1 外部電極方式の概略図

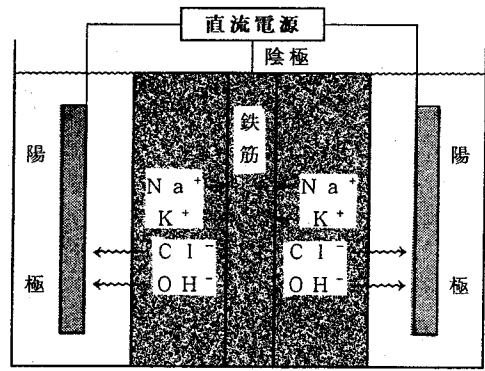


図-2 内部電極方式の概略図

2. 脱塩・再アルカリ化工法の概要

(1) 脱塩・再アルカリ化工法の原理

電気化学的手法を用いた脱塩・再アルカリ化工法には、図-1、図-2に示すような2つの通電方式が考えられる。いずれの図においても鉄筋は不動態皮膜を破壊された腐食しやすい状態となったものを対象としている。

図-1は、鉄筋を電極とせずに、鉄筋コンクリート部材を挟んで、コンクリート表面に陽極、陰極を設置し、脱塩・再アルカリ化を図るものである。ここでは、この通電方式を外部電極方式と称する。この方式では、コンクリート内の塩化物イオン(陰イオン)は陽極側へ移動し、陽イオンは陰極側へ移動する。さらに、外部からコンクリートの細孔組織へ適切なイオンを満たすことでコンクリートの再アルカリ化を達成でき、鉄筋を再不動態化することができると考えられる。

図-2は、鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に陽極を設置することで、コンクリート中の脱塩・再アルカリ化を図るものである。ここではこの通電方式を内部電極方式と称する。この方式では、コンクリート内の塩化物イオンは陰イオンであるので、鉄筋表面の陰極からコンクリート表面の陽極へ移動し、その逆の現象として陽イオンは鉄筋周囲に移動し、鉄筋周辺での水の電気分解による水酸化物イオンの生成もあるので、鉄筋近傍では再びアルカリ雰囲気をつくることができ、鉄筋を再不動態化することができると考えられる。なお、内部電極方式は実構造物に適用された事例がある⁵⁾。

(2) 脱塩・再アルカリ化工法の位置付け

塩害によるコンクリート構造物の補修工法として従来より用いられているものは、①表面塗装工法、

②断面修復工法がある。また近年になって、電気化学的手法を用いた③電気防食法、④電着工法も用いられるようになり、さらに先ほど述べた⑤脱塩・再アルカリ化工法も開発されてきた。

前述したように本研究では、これらの補修工法のなかで⑤脱塩・再アルカリ化工法についての検討を行うものである。この工法においては、従来より、内部電極方式の研究が進められており、実構造物への適用例もあるが、いまだにイオンの移動あるいは不動態の回復等に関する基本的な検討が不十分である。さらに、内部電極方式では鉄筋周囲にアルカリ濃縮が生じるなどの問題も報告されている⁶⁾。また、外部電極方式は内部電極方式におけるアルカリ濃縮の解消を目的として、著者らが新たに提案するものであって、ほとんど研究は進められていない。したがって、本研究では、内部電極方式の未解明の点の解明および外部電極方式の基本的な特性の把握を行い、両方式の特徴を明らかにすることを目的としている。

3. 実験方法

(1) 概要

本研究では、塩化物イオンによる鉄筋腐食を内在塩化物イオンによるものと外来塩化物イオンによるものとに分け、その各々に対して内部電極方式および外部電極方式の大きくわけて4種のモデル実験をモルタル中に設置した鉄筋を対象として行うこととした。これらのモデル実験において、モルタル供試体中の塩化物イオンの移動、鉄筋表面の不動態形成状況、アルカリ金属イオン(Na^+ 、 K^+)の移動に着目して、それぞれの方式の特徴を明確にすることとした。

表-1 セメントの物理的・化学的性質

物理的性質		
比重		3.17
ブレン比表面積	cm ² /g	3270
88μmふるい残分	%	0.7
凝結：水量	%	27.0
始発	時一分	2-05
終結	時一分	2-55
安定性（煮沸方法）		良
フロー値	mm	248
圧縮強さ：3日	kgf/cm ²	157
7日	kgf/cm ²	267
28日	kgf/cm ²	425
曲げ強さ：3日	kgf/cm ²	36
7日	kgf/cm ²	55
28日	kgf/cm ²	74
化学的性質		
強熱減量	%	0.6
不溶残分	%	0.1
SiO ₂	%	21.3
Al ₂ O ₃	%	5.3
Fe ₂ O ₃	%	2.6
CaO	%	64.4
MgO	%	2.2
SO ₃	%	1.9
Na ₂ O	%	0.28
K ₂ O	%	0.60
TiO ₂	%	0.37
P ₂ O ₅	%	0.20
MnO	%	0.10

表-2 鉄筋の化学成分

C (%)	0.013
Si (%)	0.012
Mn (%)	0.049
P (%)	0.0026
S (%)	0.0021

(2) 使用材料および供試体作製

本研究では、研究用普通ポルトランドセメント、細骨材（千葉県小櫃産）、鉄筋（SR235D10、JIS G 3112）を使用し、鉄筋入りモルタル供試体を作製した。セメント、鉄筋の化学的・物理的性質を表-1、表-2に示す。鉄筋はφ1×10cmとし、打設前に10%クエン酸二アンモニウム水溶液に24時間浸漬し、錆および汚れを十分に除去して使用した。内在塩化物イオンを対象とした供試体のモルタルの配合は、内部電極方式を適用するものはW/C=0.5、S/C=3.0とし、外部電極方式はW/C=0.5、S/C=3.0およびW/C=1.0、S/C=3.0の2配合を用いた。なお、練混ぜ水中に市販の食塩を10kg/m³となるように添加した。外来塩化物イオンを対象とした供試体の配

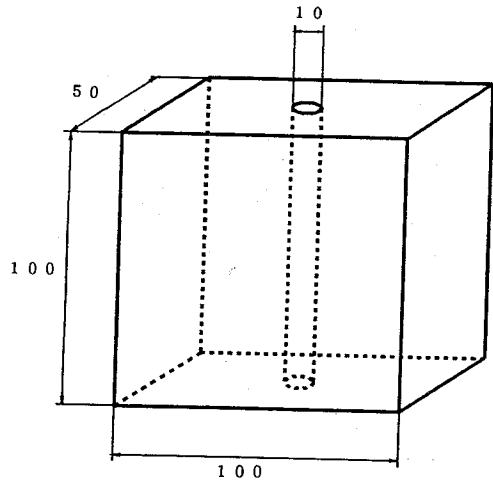


図-3 角柱供試体の形状および寸法

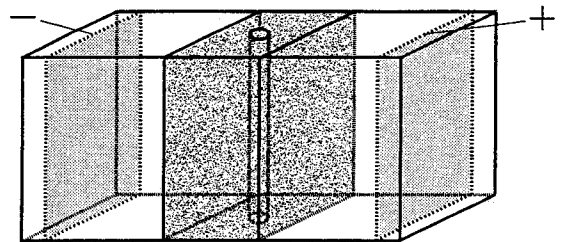


図-4 外部電極方式の設置状況

合は、内部電極方式、外部電極方式ともにW/C=1.0、S/C=3.0とした。なお、W/C=1.0の配合のものは材料分離を避けるため、メチルセルローズ系水中不分散性混和剤を水重量に対して1.2%添加した（フロー値：W/C=0.5→170mm、W/C=1.0→230mm）。練混ぜ水は水道水を使用し、練混ぜ方法はJIS A 5201に従った。打設後、20℃の室内で24時間湿空養生後、脱型し、曝露面以外の面は全てエポキシ系樹脂によりシールし、さらに28日間湿空養生を行った。外来塩化物イオン供試体については、養生後、5% NaCl水溶液に60日間曝露した。

外部電極方式を適用した内在塩化物イオン、外来塩化物イオン供試体ともに、10×10×5cmの角柱供試体とし、曝露面以外の面をすべてエポキシ系樹脂によりシールした。分極曲線により不動態の破壊を確認した後、供試体をシーリング材で隙間なく塩化ビニル製の容器に接着し、その両側に水酸化カルシウム飽和水溶液を550cm³づつ入れ、両溶液中にチタン電極を設置し通電を行った。電流密度は曝露面積あたり1A/m²とした。この実験に用いた角柱供試体を図-3、通電における設置状況を図-4に示す。

内部電極方式を適用した内在塩化物イオン供試体

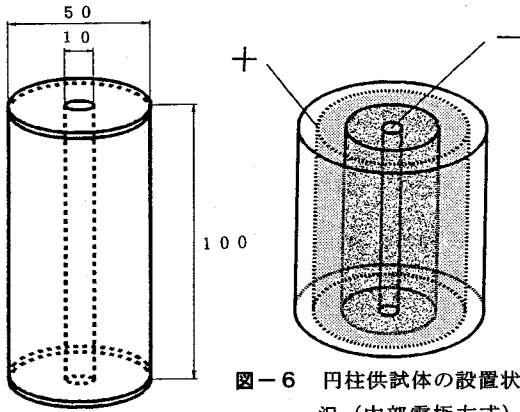


図-5 円柱供試体の形状および寸法

図-6 円柱供試体の設置状況 (内部電極方式)

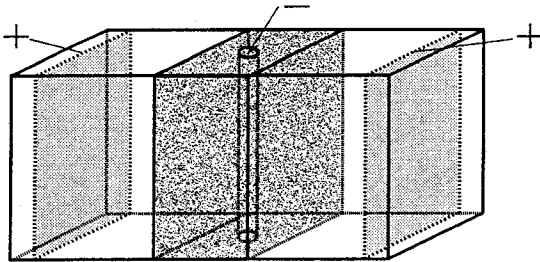


図-7 角柱供試体の設置状況 (内部電極方式)

は、打型後に鉄筋にリード線を接続した $\phi 5 \times 10$ cm の円柱モルタル供試体とした。外来塩化物イオン供試体は $10 \times 10 \times 5$ cm の角柱モルタル供試体とし、その中心部に鉄筋を配置した。分極曲線により不動態の破壊を確認した後、供試体とチタン電極の入った塩化ビニル製の容器に水酸化カルシウム飽和水溶液を $700 \sim 1000 \text{ cm}^3$ 入れ、通電を行った。電流密度は、鉄筋表面積あたり 5 A/m^2 とした。この実験に用いた円柱供試体、角柱供試体をそれぞれ図-5、図-3に示し、通電における設置状況をそれぞれ図-6、図-7に示す。

(3) 測定項目

- 電位差：テスターにより、陰極-陽極間の電位差を測定した。
- 供試体から抜け出した塩化物イオン量：外部溶液から溶液を 1 cc 採取し、それを補充せずに塩分濃度計により経時変化を測定した。
- 可溶性塩化物イオン量：通電前、通電1週間後、1カ月後、2カ月後における供試体の測定部分を乾式ダイヤモンドカッターで切り取り、 105°C の乾燥炉に24時間入れ、その前後の重量差により各部分の含水率を測定した。さらに、その試料を $105 \mu \text{ m}$

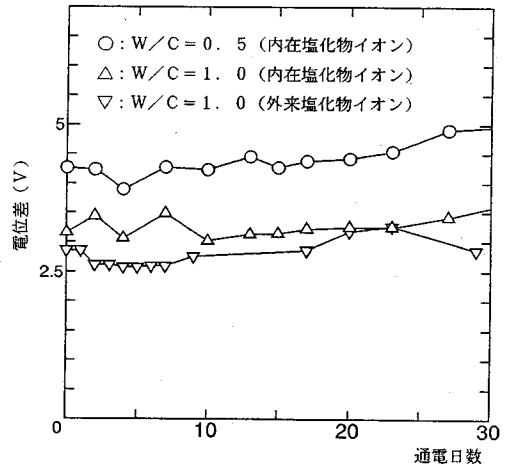


図-8 電位差の経時変化 (外部電極方式)

標準網篩で篩ったものを 10 g 採取し、 100 g の蒸留水に24時間浸漬したものを試料溶液とし、塩分濃度計により塩化物イオン量を測定した。

d) 分極曲線：ポテンシヨスタット (出力電圧 $\text{Max} \pm 50 \text{ V}$, 出力電流 $\text{Max} \pm 1 \text{ A}$), 関数発生装置 (電圧範囲 $-9999 \text{ mV} \sim +9999 \text{ mV}$, 最小設定 1 mV) を組み合わせた全自動分極装置を使用し、参照電極は飽和塩化銀電極を用いた。

e) アルカリ金属イオン量：通電前、通電1週間後、1カ月後、2カ月後における供試体の測定部分を乾式ダイヤモンドカッターで切り取り、その試料を 105°C の乾燥炉に24時間入れ、 $105 \mu \text{ m}$ 標準網篩で篩った。その試料のうち、 10 g を 100 g の蒸留水溶かし、10分間煮沸し、放冷後濾過しその濾液を試料溶液とした。これをイオンクロマトグラフにて分析した。

4. 実験結果および考察

(1) 外部電極方式の検討

a) 脱塩効果

電位差の測定結果を図-8に示す。この結果における電位差は、電極間での溶液抵抗、供試体にかかる電位差、電極での電極反応による電位 loss 等すべて含まれている。当研究室での実験において、電極反応における電位 loss は約 2 V であった⁷⁾ ことから、実際に供試体にかかっている電位差は、電極間の溶液抵抗と電極反応による loss に比べてさほど大きくないといえる。この結果からは、W/C が小さいほど大きい電位差を要していることがわかる。W/C=1.0の内在・外来塩化物イオンを含む供試体の電位差を比較すると、ほとんど差が見られないことが読みとれる。次に、供試体から抜け出した塩化物イ

表-3 全脱塩量と通電による供試体からの塩分除去率

	全脱塩量		通電による塩分除去率	
	内在	外来	内在	外来
通電・浸漬前	約3g 混入	約11g 浸透	—	—
1週間後	0.13g (4.3%)	1.05g (9.6%)	2.0 %	5.5 %
1カ月後	0.48g (15.8%)	3.13g (28.5%)	9.6 %	19.5 %

※ () 内は脱塩率 = $\frac{\text{全脱塩量}}{\text{通電前に含まれている全塩化物イオン量}}$ を表す

全脱塩量 = 通電のみによる脱塩量 + 自然拡散のみによる脱塩量

通電による塩分除去率 = $\frac{(\text{全脱塩量}) - (\text{自然拡散による脱塩量})}{(\text{通電前に含まれている全塩化物イオン量})}$

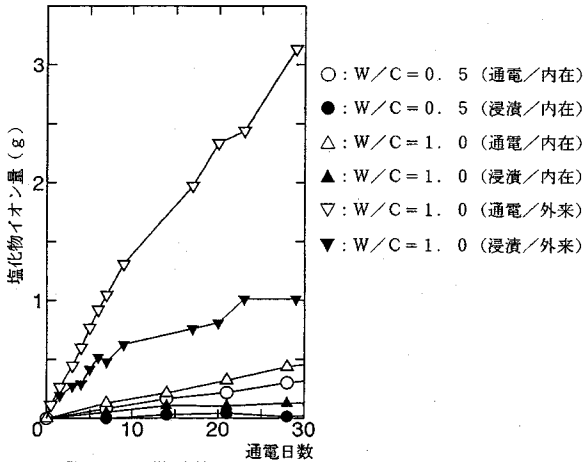


図-9 供試体から抜け出した塩化物イオン量 (外部電極方式)

オン量の測定結果を図-9に示す。外部電極方式では、内在、外来塩化物イオンともに通電期間とともに供試体からほぼ直線的に塩化物イオンが抜け出ているのがわかる。表-3は、通電を施した W/C=1.0 の供試体において、内在塩化物イオン、外来塩化物イオンの通電と拡散の効果を合わせた全脱塩量、また通電の効果のみを表した供試体からの塩分除去率を比較したものである。ここで、この表の塩分除去率とは通電による脱塩のしやすさを表す指標であり、各材齢において外部溶液中に抜け出した塩化物イオン量のうち、全脱塩量から自然拡散による脱塩量を引いて、それを通電、浸漬前に供試体に含まれていた全塩化物イオン量で除したものである。つまり、値の大きなものほど通電により脱塩しやすいということになる。この表からは、通電前の内在塩化物イオン供試体には約3gの塩化物イオンが含まれており、通電を1カ月行った供試体において15%程度の塩化物イオンしか除去できていないのに対し、外来塩化物イオン供試体においては、通電前に一つの供試体中に約11gの塩化物イオンが浸透

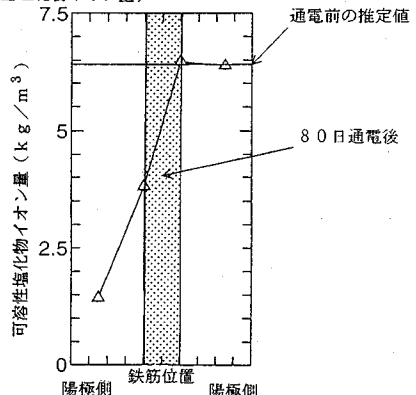


図-10 可溶性塩化物イオン分布 (w/c=1.0, 内在)

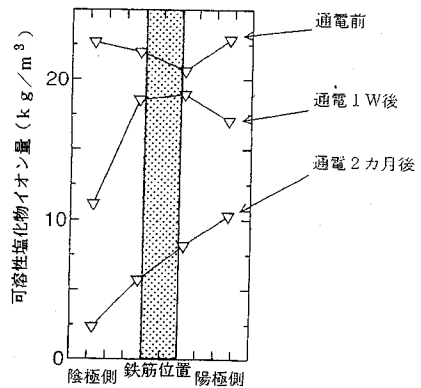


図-11 可溶性塩化物イオン量分布 (w/c=1.0, 外来)

しており、通電1カ月後においては30%程度除去されているのがわかる。通電による効果は各材齢において内在塩化物イオンに比べ外来塩化物イオンのほうがやや移動しやすいことが読みとれる。

供試体中の可溶性塩化物イオン量分布の変化を図-10、図-11に示す。図-10で示した結果は、内在塩化物イオン供試体 (W/C=1.0) による通電80日後の可溶性塩化物イオン量分布を測定した結果である。図-11では外来塩化物イオン供試体 (W/C=1.0) による可溶性塩化物イオン量分布を示した。

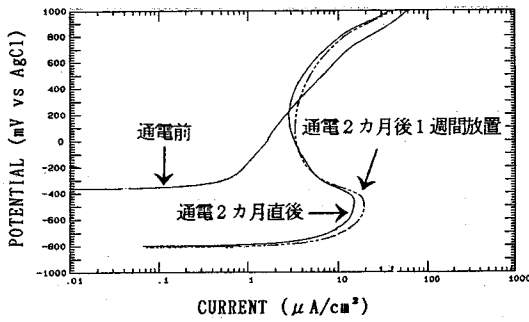


図-12 内部鉄筋の分極曲線 (w/c=0.5, 内在)

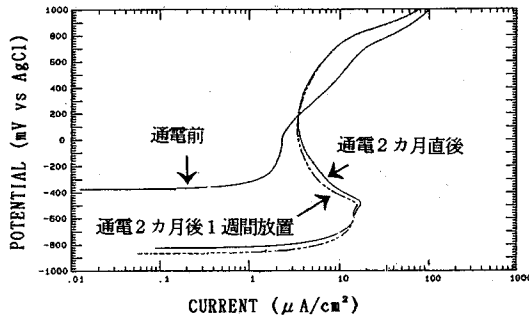


図-13 内部鉄筋の分極曲線 (w/c=1.0, 内在)

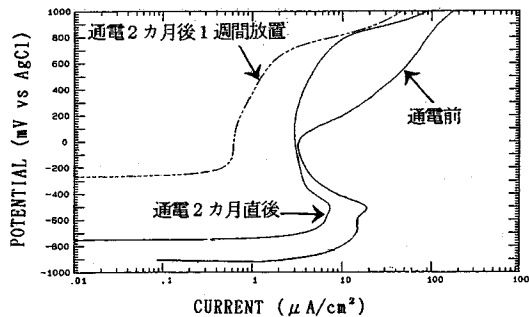


図-14 内部鉄筋の分極曲線 (w/c=1.0, 外来)

塩化物イオンの移動の傾向として、全体的に陰極側から陽極側へ移動し脱塩は図られているが、内在塩化物イオン供試体では依然として鉄筋周囲での塩化物イオン量の変化は少ないと思われる。一方、外来塩化物イオン供試体は通電2カ月で鉄筋周囲においても、当初の60%~70%の可溶性塩化物イオンが除去され、脱塩は図られているが、鉄筋には7.5 kg/m³という高い濃度の塩化物イオンが存在しており、鉄筋周囲の塩化物イオンの除去にはさらなる通電が必要となると思われる。

以上のことから、外部電極方式ではモルタル内のあらゆる部分からの脱塩が可能であることが考えられるが、供試体中、特に鉄筋周囲での塩化物イオンの除去には、微小電流のもとでは相当の時間がかかることがわかった。この脱塩効率の低さは、外部溶

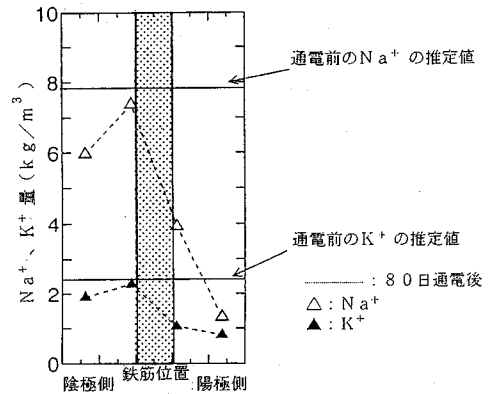


図-15 Na⁺, K⁺量分布 (w/c=1.0, 内在)

液として水酸化カルシウム飽和水溶液を用いたことにより、外部溶液に多量に含まれる水酸化イオンがイオンの移動のほとんどを受け持ち、塩化物イオンの移動を妨げている⁷⁾のではないかと考えられる。このことから、①通電期間をさらに設ける②塩化物イオンの輸率を高くするために適切な外部溶液を選択する、など今後の検討課題は多く残されている。

b) 鉄筋の不動態

分極曲線の経時変化を図-12、図-13、図-14に示す。図-12は内在塩化物イオン供試体(W/C=0.5)、図-13は内在塩化物イオン供試体(W/C=1.0)、図-14は外来塩化物イオン供試体(W/C=1.0)における経時変化である。いずれも通電前、通電2カ月直後、通電2カ月後1週間放置の結果を示したものである。図-12、図-13の内在塩化物イオンのものでは、鉄筋表面の状態にはほとんど変化がなくあまり回復している様子がみられないことが読みとれる。これはおそらく、図-10からわかるように鉄筋周囲での塩化物イオン量が減少せず、鉄筋周囲の環境がほとんど改善されていないことによるものと思われる。図-14は外来塩化物イオン供試体であるが、脱塩のところでも述べたように鉄筋周囲での塩化物イオンがかなり減少したためか鉄筋表面の状態はかなり回復している。しかし、通電2カ月後では図-11から、鉄筋周囲に塩化物イオンが依然として多量に存在しており、鉄筋の状態をさらに良くするためには、さらに通電を施し、塩化物イオンを十分に除去させることが大切である。

c) アルカリ金属イオン量

アルカリ金属イオン(Na⁺, K⁺)量分布を図-15、図-16に示す。図-15は内在塩化物イオン供試体(W/C=1.0)の通電80日後の測定結果、図-16は外来塩化物イオン供試体(W/C=1.0)の経時変

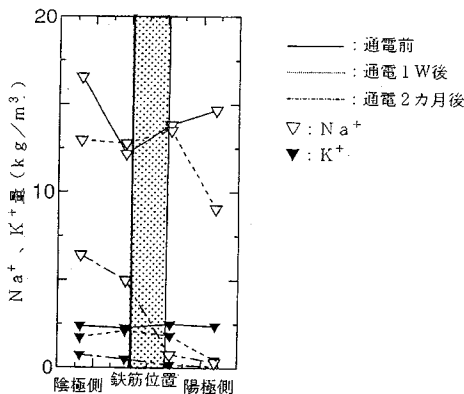


図-16 Na^+ , K^+ 量分布 (w/c=1.0, 外来)

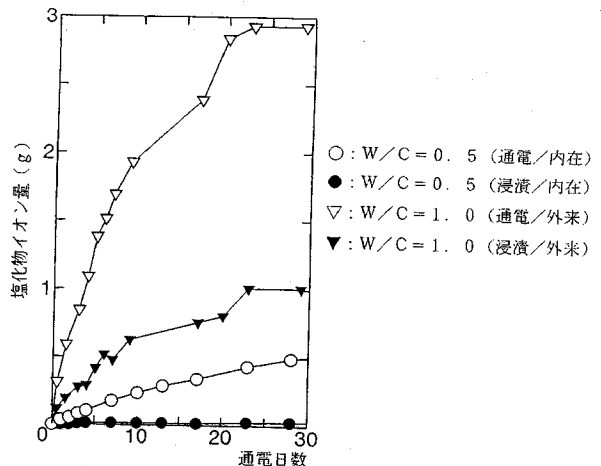


図-18 供試体から抜け出した塩化物イオン量 (内部電極方式)

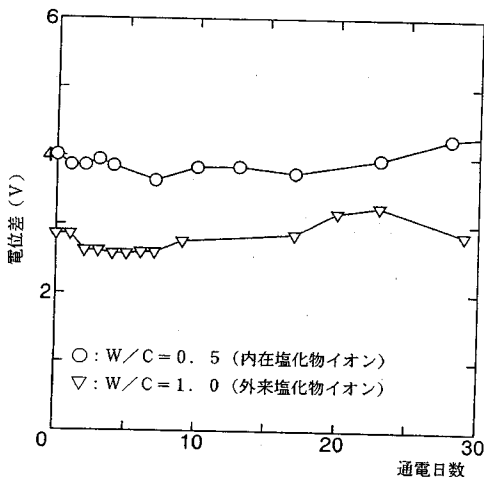


図-17 電位差の経時変化 (内部電極方式)

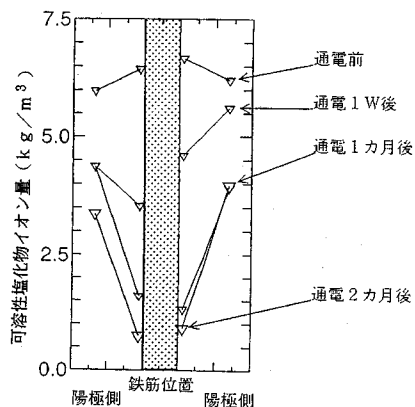


図-19 可溶性塩化物イオン量分布 (w/c=1.0, 内在)

化である。これらの結果から、塩化物イオンとは逆に、アルカリ金属イオンも陽極側から陰極側へ移動していることが読みとれる。さらに、図-15、図-16を比較すると、外部から浸透してきた Na^+ のほうが移動しやすい状態になっていることがわかる。この結果から、供試体内部のあらゆる部分での過剰なアルカリイオンは減少し、アルカリ骨材反応等のアルカリ濃縮による問題点は解消されるのではないかと考えられる。その意味でも、外部電極方式は脱塩工法としてだけでなく、アルカリ骨材反応の危険性がある構造物に対しても有効な手段であると考えられる。

以上のことから、外部電極方式においては、コンクリート内のあらゆる部分での脱塩が可能であり、アルカリ濃縮という問題も生じない反面、鉄筋周囲の環境の改善には時間を要することが明らかになった。また、同一配合の供試体においては、外来塩化物イオンの方が内在塩化物イオンより、脱塩に関しては

容易であることがいえると思われる。

(2) 内部電極方式の検討

a) 脱塩効果

電位差に関する測定結果を図-17に示す。電位差は通电期間によらずほぼ安定していると思われる。次に、供試体から抜け出した塩化物イオン量の測定結果を図-18に示す。この結果から、塩化物イオンは通电期間とともに抜け出すが、その勾配は徐々に小さくなっていき、ある期間まで通电を施すと、ほとんど供試体から抜け出さなくなっていく傾向が読みとれる。通电初期においては、固定化されていない塩化物イオンが比較的容易に脱塩されたのに対し、通电期間が経つに従ってその塩化物イオンは減少し、骨材やセメントに吸着していた塩化物イオンが強制的に移動し始めたことによるのではないかと考えられる。また、別の見方をすれば鉄筋での水酸化物イオンの増加に伴い、塩化物イオンの移動が抑制され

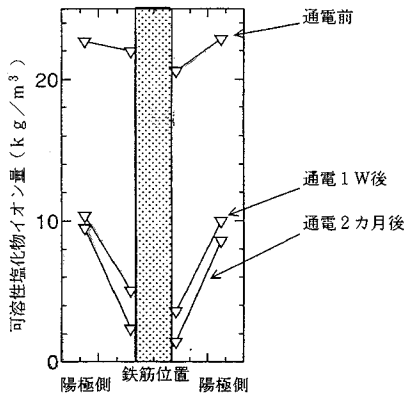


図-20 可溶性塩化物イオン量分布 (w/c=1.0, 外来)

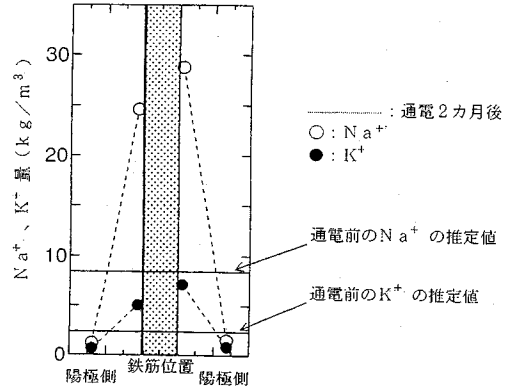


図-23 Na⁺, K⁺量分布 (w/c=1.0, 内在)

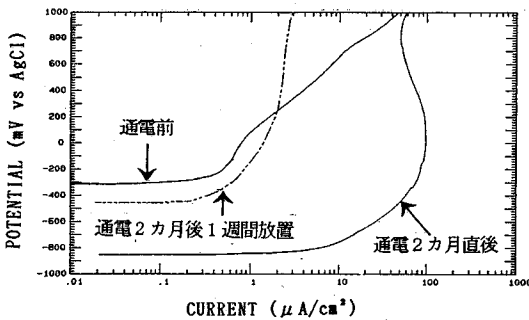


図-21 内部鉄筋の分極曲線 (w/c=0.5, 内在)

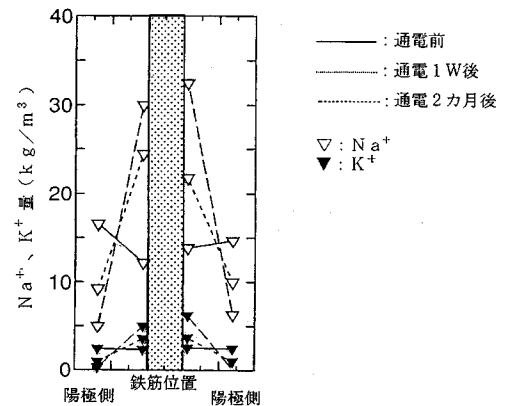


図-24 Na⁺, K⁺量分布 (w/c=1.0, 外来)

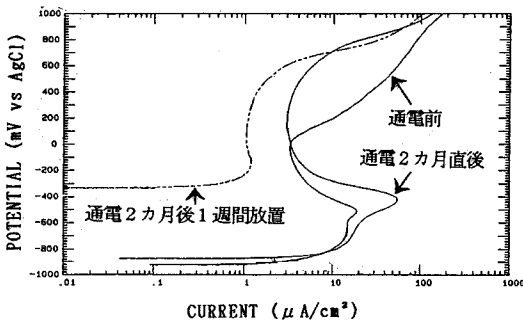


図-22 内部鉄筋の分極曲線 (w/c=1.0, 外来)

できているとも考えられる。

次に、通電による塩化物イオン分布の経時変化を図-19、図-20に示す。図-19は内在塩化物イオン供試体 (W/C=0.5)、図-20は外来塩化物イオン供試体 (W/C=1.0)の結果である。両方の図から、鉄筋周囲から塩化物イオンは除去され、徐々に塩化物イオンは減少している。内在塩化物イオンによる供試体では、鉄筋周囲で通電2カ月後で約9割の可溶性塩化物イオン量が除去されている。しかし、鉄筋周囲では急激に可溶性塩化物イオン量は減少しているものの、モルタル表面では依然として高い可溶

性塩化物イオン量を示している。このことから、内部電極方式では、モルタル表面の除去しきれない塩化物イオンが、通電後、モルタル内で自然拡散を起こすことにより、鉄筋周囲に蓄積する可能性があり、今後それに関する検討を行う必要がある。

b) 鉄筋の不動態

分極曲線の経時変化を図-21、図-22に示す。図-21は内在塩化物イオン供試体 (W/C=0.5)、図-22は外来塩化物イオン供試体 (W/C=1.0)における測定結果である。測定結果は通電前、通電2カ月直後、通電2カ月後1週間放置したものである。これらの結果から、明らかに通電による効果は現れており、外部電極方式に比べ、鉄筋表面には安定した不動態が再形成したことがわかる。鉄筋周囲での塩化物イオンの除去、さらにはモルタル内部の再アルカリ化が行われたことが大きな要因となっていると思われる。

c) アルカリ金属イオン量

アルカリ金属イオン分布の測定結果を図-23、

表-4 通電方式の違いによる特徴の比較

	内 在 塩 化 物 イ オ ン		外 来 塩 化 物 イ オ ン	
	外 部 電 極 方 式	内 部 電 極 方 式	外 部 電 極 方 式	内 部 電 極 方 式
脱 塩	<ul style="list-style-type: none"> ・Cl⁻は陰極側から陽極側へ一定速度で移動する ・あらゆる部分からの脱塩は可能であるが、微小電流による長期通電が必要である 	<ul style="list-style-type: none"> ・Cl⁻は鉄筋周囲で速やかに、コンクリート表面では緩やかに移動する 	<ul style="list-style-type: none"> ・Cl⁻は陰極側から陽極側へ移動し、あらゆる部分から脱塩可能であるが、微小電流により長期的な通電が必要である 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋周囲からCl⁻は除去され、通電期間とともに脱塩効率は低下する
鉄筋の不動態	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の再不動態化には微小電流による長期的な通電が必要である ・迷走電流による鉄筋腐食により電流密度が制約される 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の再不動態化は一時的な通電で完了する 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の不動態は内在塩化物イオンに比べ早期に再形成する ・迷走電流による鉄筋腐食により電流密度が制約される 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋の再不動態化は一時的な通電により完了する
アルカリ濃縮	<ul style="list-style-type: none"> ・Na⁺、K⁺によるアルカリ濃縮は起こらない ・コンクリート内でのアルカリ骨材反応の危険性を低減できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋周囲にNa⁺、K⁺に濃縮する ・鉄筋周囲において、アルカリ骨材反応の危険性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・Na⁺、K⁺によるアルカリ濃縮は起こらない ・外部から浸入した(外来)Na⁺は内在のNa⁺より移動しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ・Na⁺、K⁺は鉄筋周囲に濃縮する ・鉄筋周囲でのアルカリ骨材反応の危険性は高い

図-24に示す。図-23は内在塩化物イオン供試体(W/C=0.5)、図-24は外来塩化物イオン供試体(W/C=1.0)におけるNa⁺、K⁺のイオン分布の経時変化である。これらの結果から、通電によりNa⁺、K⁺ともに鉄筋周囲に急激に集中していることが読みとれる。図-23においては、通電2カ月後において、アルカリイオンが鉄筋周囲では通電前の約3倍まで集中し、モルタル表面では5分の1程度まで減少している。アルカリ骨材反応の抑制対策の規定として3.0kg/m³とある⁹⁾ことから、内部電極方式ではモルタル表面付近でのアルカリ骨材反応の危険性は低減可能であるが、鉄筋周囲でのアルカリ骨材反応のおこる危険性は十分にありうるということがわかる。

以上のことから、内部電極方式においては、鉄筋周囲の脱塩、再アルカリ化が一時的かつ短期的に行われることが可能であるが、鉄筋周囲のアルカリ濃縮による問題点も生じてくることが明らかになった。

5. 内部電極方式と外部電極方式の比較・整理

以上の結果からそれぞれの方式の特徴を整理すると表-4のようになる。ここでは、内部電極方式、外部電極方式ともに長所、短所があることを整理した。ここで、内部電極方式と外部電極方式ではそのイオンの移動状況は当然違ってくる。内部電極方式では、電位勾配が鉄筋近傍であるほど急であるため、

イオンの移動(イオン交換)は鉄筋近傍で速やかに行われる。一方、外部電極方式は、電位勾配があらゆる部分で一定であり、イオンの移動(イオン交換)は一定速度で行われることになる。つまり、従来より行われている内部電極方式は、一時的に通電を施すことにより鉄筋での脱塩・再アルカリ化を行うことが可能であるが、逆現象としてアルカリ濃縮が急激に起こることが明らかになった。外部電極方式では、微小な電流を長期的に通電を施すことにより脱塩・再アルカリ化が可能であり、アルカリ濃縮という問題も解消できることがわかった。また、脱塩に関しては、鉄筋腐食に関与する塩化物イオンの存在形態が内在塩化物イオンより外来塩化物イオンの方が有利であることも確認できた。なお、一般に、電位勾配がある電解質水溶液内に金属がおかれると、金属内に高電位端から電流が流れ込み、低電位端から電流が流れ出ることにより、金属の腐食が起こることが知られている⁹⁾。本試験では、モルタル供試体曝露面積あたり1A/m²の電流密度を設定し、この迷走電流による内部鉄筋の腐食はみられなかった。ちなみに、当研究室では1A/m²では電食は起こらず、10A/m²で電食が起きたという実験結果を得ている。今後、外部電極方式の適用にあたっての迷走電流については、適切な電流密度、供試体にかかる電位差さらには外部溶液の選定等について詳細に検討する必要があるものと考えられる。

どちらの方式においても、利点、欠点が明確にな

った反面、実用化にいたるまでにはさらに研究が必要であることがわかった。

6. 結論

本実験から得られた結論を以下に述べる。

(1) 外部電極方式

- ① 通電により供試体全体からの塩化物イオンの除去が可能であり、微小電流の通電を長期間行えば、不動態再形成の可能性があることがわかった。
- ② 通電によりアルカリ金属イオンを減少させることができ、アルカリ濃縮による問題点も解消できることがわかった。

(2) 内部電極方式

- ① 通電により鉄筋周囲から塩化物イオンの除去は行われ、健全な不動態を再形成することが可能であることがわかった。
- ② 通電によりアルカリ金属イオンは鉄筋周囲に過剰に蓄積するため、アルカリ濃縮による様々な問題が生じる危険性があることがわかった。

(3) 通電による内在塩化物イオンと外来塩化物イオンの移動状況を比較すると、外来塩化物イオンのほうがやや移動しやすい。

今後実用化へ向け、内部電極方式、外部電極方式の利点を生かすことが大切である。特にアルカリ濃縮が深刻な問題となる構造物に対しては、内部電極方式ではなく外部電極方式により、長期間かけて通電を行う必要がある。実構造物の状態に合わせて、

この両工法を単独あるいは組み合わせて合理的に適用できるように、更なる研究が必要であると思われる。

謝辞：研究を実施するにあたり、東京工業大学工学部無機材料工学科の坂井 悦郎助教授の貴重な御助言ならびに電気化学工業の芦田 公伸氏に多大の御協力を頂いたことに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 工藤文広, 広谷亮, 守分敏郎, 安田正樹: 補修された棧橋の耐久性について, 第13回コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp. 899-904.
- 2) 峰松敏和, 堺孝司, 福手勤, 武若耕司: コンクリート中の鋼材の電気防食に及ぼす各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第15巻, 第1号, pp. 761-766, 1993.
- 3) 横田優, 佐々木晴敏, 福手勤: 電着工法による港湾コンクリート構造物の補修と防食について, コンクリート工学年次論文報告集, 第14巻, 第1号, pp. 849-854, 19921.
- 4) A.J.von den Hondel and R.B.Polder: Electrochemical Realkalisation and chloride removal of concrete, *Construction Repair*, pp. 19-24, Sep. / Oct. 1992.
- 5) D.G. manning and F. Pianca: Electrochemical Removal of chloride Ions from Reinforced Concrete, *Initial Evaluation of the Pier S19 Field The Research and Development Branch*, Ontario Ministry of transportation, pp. 1-22, Dec.1990.
- 6) Carl E.Locke, CHangiz Dehghanian and Lane Gibbs: Effect of Impressed Current on bond strength between Steel Rebar and Concrete, *Corrosion '83*, Paper Number 178, April, 1983.
- 7) 遠藤平: コンクリート中のイオンの通電泳動に関する研究, 東京工業大学修士論文, 1994.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 (平成3年版)
- 9) H. H. ユーリック著: 腐食反応とその制御 (第2版), 産業図書, pp. 192-197.

(1994. 5. 31 受付)

FUNDAMENTAL STUDY OF DESALINATION AND RE-ALKALIZATION OF REINFORCED CONCRETE

Nobuaki OTSUKI, Shigeyosi NAGATAKI,
Makoto HISADA and Takahiko AMINO

For the purposes of desalination and re-alkalization, electric controlling of migration of ions in concrete is considered. However, the mechanisms of migration of ions and the effects of this method are still unclear. So, in this paper, effects and serviceability of electric controlling method were experimentally investigated. Two controlling systems, inter-electrode system (reinforcement was used as cathode) and outer-electrode system (both electrodes were placed out of specimen), were prepared in this test. To evaluate these systems, contents of chloride ion and alkali ion were measured. Through these investigations, some useful informations of the effects of these two systems were found out.