

論文 塩害を受けたコンクリート構造物への電気化学的補修技術の基礎検討

芦田 公伸*1・友澤 史紀*2・石橋 孝一*1・宇田川 秀行*3

要旨：コンクリート構造物の電気化学的補修技術において、陰極の内部鉄筋と陽極のコンクリート表面間に直流電流を流すことにより、コンクリート中の塩分量を低減することができる。練り混み塩分と外来塩分の試験体に脱塩処理を行った結果、塩分量の低下は鉄筋近傍から始まり、コンクリート表面部へ移行すること、さらに、可溶性塩分の低下とともに、固定塩分も低下することが判明した。

キーワード：電気化学的補修、脱塩工法、塩分、浸透、輸率、自然電位、塩害

1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物に対する補修方法として、コンクリートの内部鉄筋を陰極に、コンクリート表面に陽極を設置して、その間に直流電流を一定期間流す電気化学的脱塩技術が開発され[1、2、3]、実構造物への適用や実験結果が報告されている[4、5]。

本研究では、電気化学的補修技術である脱塩工法の基礎検討として、練り混み塩分と外来塩分を想定した試験体において脱塩処理を行った場合の脱塩処理の効果とその輸率、脱塩処理に伴う可溶性塩分と固定塩分の定性的な把握、および、処理終了後の鉄筋の状態変化について検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 コンクリート調合と試験体

試験に用いたコンクリートは、コンクリートの全体積に占めるペースト部分の体積が30vol%一定とした。その調合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は姫川産川砂(比重2.62、F.M.=2.75)と姫川産碎石(Gmax=13mm、比重2.64、F.M.=5.68)を使用した。また、試験体の大きさは、直径15cm、高さ10cmの円柱体とし、その中心部に高さ方向に公称径18mmのみがき丸鋼を挿入した。

塩分練り混みの試験体については、W/C=60%の試験体において塩化物イオン量で2.0、4.0、6.0kg/m³となるよう

に、セメント量に対して0.65、1.30、1.95wt%と設定し、W/C=40%、80%の試験体にも0.65、1.30、1.95wt%とし、精製塩(NaCl=99%)を細骨材に置換して使用した。材令1日で脱型し、直ちにビニール袋に包み、20℃の恒温室内での湿空養生を28日間行った。

表-1 コンクリート調合

W/C (%)	S/a (%)	S1 (cm)	単 位 量 (kg/m ³)							σ _{28d} (N/mm ²)
			W	C	S	G	AEA	Ad.		
40	40	5.0	157	392	712	1075	0.93	2.0	48	
60	45	10.0	184	307	801	988	0.74	1.6	25	
80	55	8.5	201	252	978	807	0.54	0.0	16	

*1 電気化学工業(株)青海工場セメント特殊混和材研究所、副主任研究員(正会員)

*2 東京大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

*3 電気化学工業(株)本社特殊混和材事業部施工開発課、課長(正会員)

外来塩分を想定した試験体は、練り混み塩分量を 0kg/m^3 とし、同様の湿空養生を28日間行った後、10%濃度の食塩水に200日間浸漬して、塩分を浸透させた。

2. 2 脱塩処理方法

電解質溶液に飽和水酸化カルシウム水溶液を用い、直流電源の陰極にコンクリート試験体内部のみがき丸鋼を、陽極に電解質溶液中に試験体を取り巻くよ

うに設置した外部電極を接続し、コンクリート表面積当たり 1A/m^2 の直流電流を最大28日間通電した。また、試験体の側面のみから脱塩処理が行えるように試験体の上下面をエポキシ樹脂で絶縁した。脱塩処理の概略を図-1に示す。

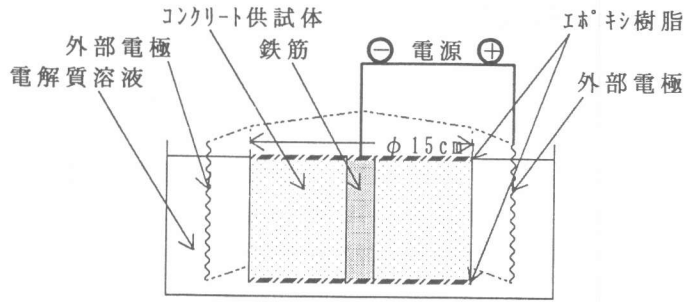


図-1 脱塩処理方法

2. 3 塩分の分析方法

みがき丸鋼を中心として幅5cm、高さ10cmの短冊状に試験体を切断し、さらに、コンクリートの表面から0~1.5、1.5~3.5、3.5~5.5、5.5~7.5cmの各位置で切断した後、全量粉碎したものを塩分分析用試料とした。

塩分分析はJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」の全塩分定量方法、および、可溶性塩分定量方法に従った。なお、固定塩分量は全塩分量より可溶性塩分量を差し引いた量とした。

2. 4 自然電位、分極抵抗の測定方法

円柱試験体の円周の一部をかぶり厚さ15mmになるように切断した試験体を用いて、その切断面の中心を測定した。自然電位と分極抵抗の測定は、銀-塩化銀電極を参照電極とした交流インピーダンス法により行い、3個の試験体の平均値を求めた。

3. 結果及び考察

3. 1 脱塩処理

塩分練り混みと塩分浸透の試験体について、脱塩未処理と脱塩期間=3、7、14、28日におけるコンクリートの表面から0~1.5、1.5~3.5、3.5~5.5、5.5~7.5cmの各位置における全塩分量の変化を図-2に示す。コンクリート内部の塩分は試験体の中心にあるみがき丸鋼よりコンクリート表面に向かい移動していくため、みがき丸鋼近傍より塩分の減少が始まり、処理期間と共にコンクリート表面部分も減少していく傾向を示している。

塩分練り混みの試験体の各位置毎の平均塩分量を用いて全塩分量、可溶性塩分量、固定塩分量の処理日数に伴う塩分量の変化を図-3に示す。脱塩処理の初期においては、固定塩分量よりも可溶性塩分量の方が多く、従って、処理による減少量も可溶性の方が多し。また、脱塩処理が進むと可溶性塩分量が少なくなり、固定塩分も減少している。これは、脱塩処理で移動する塩分は可溶性塩分と考えられるため、溶液中の可溶性塩分の大幅な減少により、塩化合物である固定塩分の電気分解により、固定塩分が溶出していくためと考えられる。

また、食塩水に200日間浸漬した外来塩分の試験体の処理日数に伴う塩分量の変化を図-3に

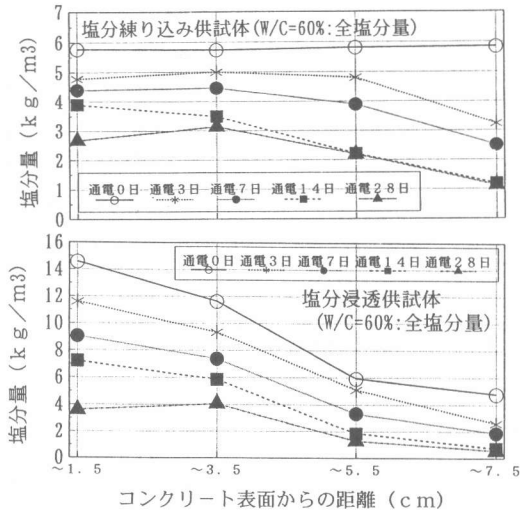


図-2 処理期間に伴う各位置の全塩分量の変化

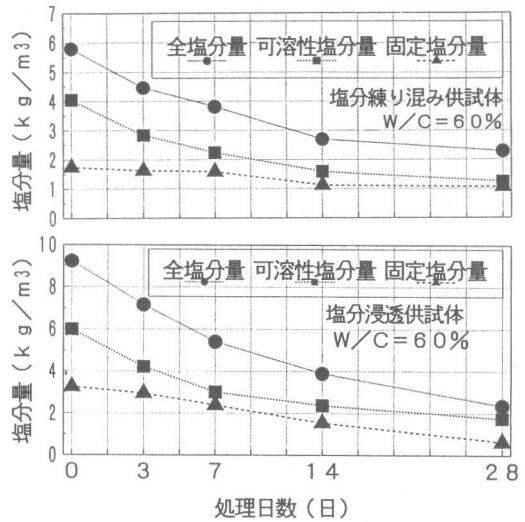


図-3 処理期間と塩分量の関係

併記するが、塩分練り混み試験体と比較すると、固定塩分の減少量が大きく、その結果として、全塩分の減少量も大きい。

3. 2 脱塩率

脱塩処理前の初期塩分量に対する脱塩された塩分量の比率を脱塩率(%) (=脱塩された塩分量÷脱塩処理前の塩分量)とする。

練り混み塩分の試験体(塩分量=0.65、1.30、

表-2 練り混み塩分の脱塩率

W/C (%)	初期塩分量 (wt%vs.セメント)	脱 塩 率 (%)		
		全塩分	可溶性	固 定
40	0.65	31.4	26.1	35.1
	1.30	42.4	50.5	30.1
	1.95	49.2	61.3	28.8
60	0.65	36.4	25.4	45.0
	1.30	49.4	52.0	46.5
	1.95	60.7	69.5	40.1
80	0.65	36.6	27.8	44.4
	1.30	46.5	52.9	38.9
	1.95	65.8	70.6	57.4

表-3 外来塩分の脱塩率

W/C (%)	初期塩分量 (wt%vs.セメント)	脱 塩 率 (%)		
		全塩分	可溶性	固 定
40	1.34	73.0	66.6	84.9
60	3.00	74.4	70.8	81.1
80	3.56	75.1	72.0	82.0

1.95wt%(vsセメント)について、脱塩処理28日後の全塩分量、可溶性塩分量、固定塩分量の脱塩率を表-2に示す。各W/Cともに可溶性塩分の脱塩率は初期塩分量の増加に伴って大きくなったが、固定塩分の脱塩率は初期塩分量への依存は認められない。また、初期塩分量が同じ場合、W/Cが大きくなるほど脱塩率も大きくなる傾向にあるが、その変化量は小さく、W/Cの脱塩処理効果への影響は初期塩分量の影響に比較すると小さい。

外来塩分の試験体における脱塩処理28日後の各脱塩率を表-3に示す。外来塩分の脱塩率は、いずれのW/Cにおいても練り混み塩分の脱塩率より大きい。これは、外来塩分の初期塩分量が大きいためと可溶性塩分の比率が高いためと思われる。

3. 3 輸率

全通過電流量のうち特定のイオンを運ぶ割合を表す指標として輸率が用いられ、脱塩処理による塩分の輸率(%) (=塩化物イオンを運ぶ電荷量÷コンクリートを通ずる総電荷量)とする。

練り混み塩分(塩分量=0.65、1.30、1.95wt%)、および、外来塩分(塩分量=2.66、2.67、3.00wt%)の試験体(W/C=60%)における処理日数と塩分の輸率の関係を図-4に示す。いずれの初期塩分量においても、脱塩処理の初期の輸率が最も高く、処理の経過と共に輸率が低下している。これは、脱塩処理の進行と共に、コンクリート中の塩分の絶対量が減少していることと、塩素イオンと同種の陰イオンである水酸イオンが通電による水の電気分解で多量に発生しているためと考えられる。

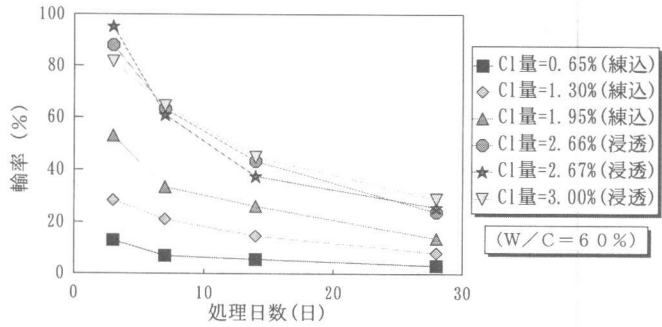


図-4 処理日数と塩分の輸率

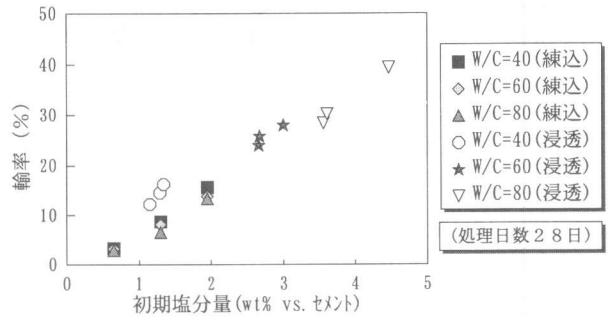


図-5 初期塩分量と塩分の輸率

練り混み塩分、外来塩分の試験体における、初期塩分量と28日間の脱塩処理による塩分の輸率の関係を図-5に示す。図-5は、練り混みや外来という塩分の形態やW/Cに関係なく、塩分の輸率は初期塩分量に比例していることを示している。すなわち、脱塩処理における塩分の輸率は溶液中の塩素イオンの絶対量によって決まり、コンクリートに左右されないことを示している。

3. 4 自然電位と分極抵抗

練り混み塩分(塩分量=1.95wt%(vsセメント)、W/C=60%)の試験体における脱塩処理日数と処理後の自然電位(vs CSE)の変化を図-6に、同じく、分極抵抗の変化を図-7に示す。なお、凡例の最初の数値は処理日数を、最後の数値は処理後のみがき丸鋼近傍の塩分量(vsセメント)を表し、例として、「3日/1.04」は処理日数=3日、処理後の塩分量=1.04wt%(vsセメント)を表す。

また、練り混み塩分(塩分量=0.65、1.30、1.95wt%(vsセメント))、W/C=60%、処理日数=28日の試験体における処理後の自然電位を図-8に、分極抵抗を図-9に示す。凡例の最初の数値は処理前の塩分量(vsセメント)を、中間の文字は処理の有無を、最後の数値は処理後の塩分量(vsセメント)を表し、例として、「1.30/処理/0.33」は処理前の塩分量=1.30wt%(vsセメント)、28日間の脱塩処理あり、処理後の塩分量=0.33wt%(vsセメント)を表す。

図-6と図-8の自然電位では、未処理の塩分量=0.65wt%(vsセメント)の試験体は経過時間12ヶ月でも、自然電位が貴な位置にあり、十分に防食されている。一方、未処理の塩分量=1.30と1.95wt%(vsセメント)の試験体はいずれも、3ヶ月以降は卑の方向に転じ、12ヶ月では-500mV(vs CSE)程度となり、明らかに腐食が進行している状態である。また、同様の現象が図-7と図-

9の分極抵抗においても見られる。これは、セメント硬化体の間隙水のpH値が12程度であることを考えると、塩分量=0.65wt%(vsセメント)ではセメントのアルカリ分で防食できるが、それ以上の領域ではセメントのアルカリ分から得られる水酸イオンの量より、塩素イオンの量が過大になるためであると考えられる。

一方、脱塩処理を行った場合の自然電位は、いずれも処理直後(経過時間=0)は通電による影響のために鉄の不活性領域である-1100mV(vs CSE)程度となるが、時間の経過と共に、貴の方向に変化し、1ヶ月程度で-200mV(vs CSE)程度にまで回復し、防食領域になっている。また、分極抵抗は、自然電位より回復速度が遅れているが、12ヶ月経過した時点では、いずれも未処理で腐食が進行している試験体よりも、分極抵抗値が上回っている。なお、分極抵抗の回復速度が自然電位より遅れる理由として、自然電位は化学反応である腐食反応により放出される電

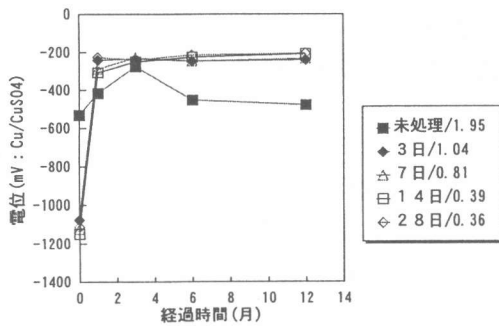


図-6 練混み塩分(Cl⁻=1.95%)の自然電位

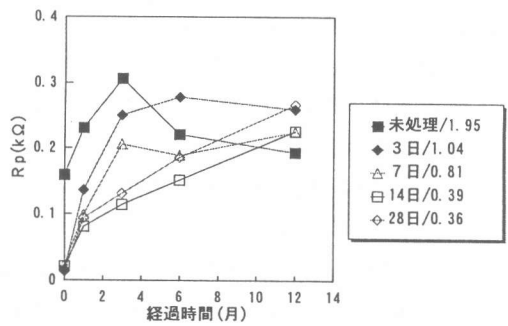


図-7 練混み塩分(Cl⁻=1.95%)の分極抵抗

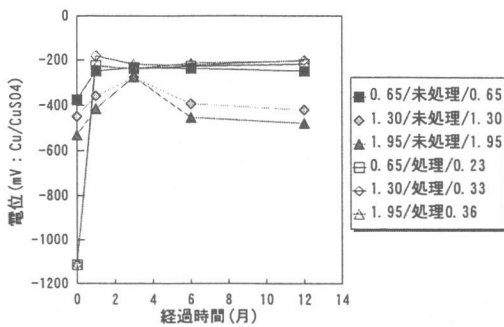


図-8 練混み塩分(処理=28日)の自然電位

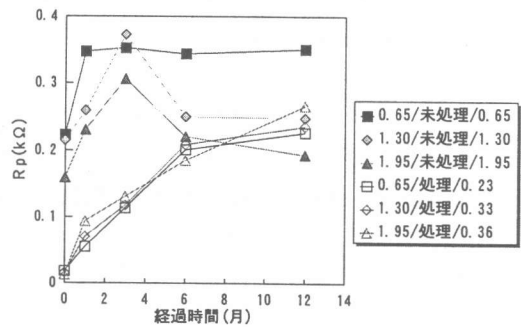


図-9 練混み塩分(処理=28日)の分極抵抗

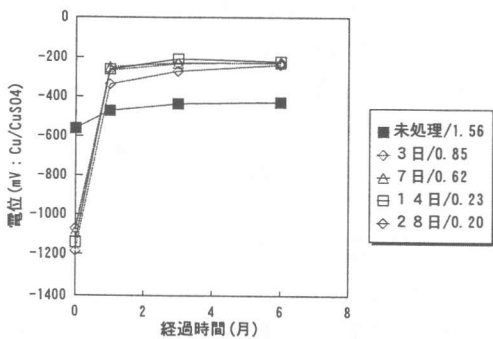


図-10 外来塩分の自然電位

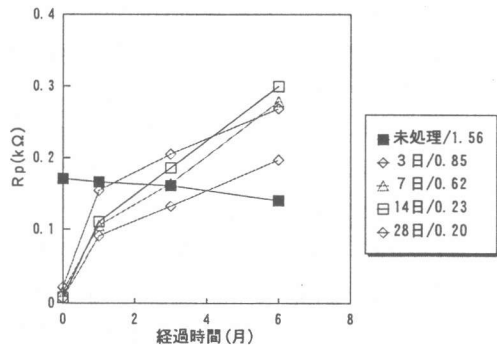


図-11 外来塩分の分極抵抗

子の有無を測定しているのに対し、分極抵抗は鉄表面に形成される酸化膜層である不動態の生成量と高電流の印可による複極を測定しているためと考えられる。

外来塩分の試験体(W/C=60%)における脱塩処理日数と自然電位(vs CSE)の変化を図-10に、分極抵抗の変化を図-11に示す。なお、凡例の数値の意味は練り混み塩分試験体と同じである。200日間の食塩水浸漬後であるので、未処理の試験体(塩分量=1.56wt%(vsセメント))の自然電位は-400~-600mV(vs CSE)と腐食領域であり、また、分極抵抗も小さい値であり、鉄の腐食が進行していると判断される。一方、脱塩処理を行った試験体については、塩分量が最大0.85wt%(vsセメント)であるので、自然電位はいずれも貴化し、分極抵抗も増加傾向を示し、処理後6ヶ月経過の時点でも防食状態であることが認められる。

4. まとめ

- (1)脱塩工法における塩分の減少はコンクリート内部のみがき丸鋼近傍から始まり、続いてコンクリート表面部に移行すること、および、脱塩の初期の段階では、可溶性塩分量の減少とともに、固定塩分量も減少することが明らかになった。
- (2)可溶性塩分の脱塩率は初期塩分量の影響を受けやすく、その結果、脱塩率、塩分の輸率とともに、初期塩分量に左右されるが、コンクリートの品質による影響は小さい。
- (3)塩分量=0.65wt%(vsセメント)では、セメントのアルカリ分で防食可能なため、自然電位、分極抵抗ともに、腐食状態を示さず、良好な状態を示している。一方、塩分量=1.30wt%(vsセメント)を越えると、自然電位、分極抵抗ともに、腐食状態を示す。
- (4)脱塩処理により、塩分量が0.85wt%(vsセメント)以下と大幅に低下し、また、通電による水酸イオンが生成したことから、コンクリートの防食状態が大幅に改善し、処理終了後も良好な防食状態に維持されていることが判明した。

「謝辞」 本研究は、(財)建築研究振興協会における電気化学的補修技術検討委員会において行ったものであり、御指導および御助言を頂いた東京理科大学 清水昭之講師、宇都宮大学 榊田佳寛教授、建設省建築研究所 阿部道彦室長、鹿毛忠継主任研究員に深く感謝致します。

「参考文献」

- [1]Miller, J. B. :Chloride Removal and Corrosion Protection of Re-inforced Concrete, Proc. of Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents in Gothenburg, Swedish Road and Traffic Research Institute, Sept. 1989
- [2]Tritthath, J., Pettersson, K. and Sorenson, B. :Electrochemical Removal of Chloride from Hardened Cement Paste, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 23, pp. 1095-1104, 1993
- [3]Hansson, I. L. H. and Hansson, C. M. :Electrochemical Extraction of Chloride from Concrete, Part I - A Qualitative Model of the Process, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 23, pp. 1141-1152, 1993
- [4]芦田公伸・石橋孝一：直流電流によるコンクリート中の塩分の移動、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集、pp. 29-34、1992. 10
- [5]宇田川秀行、ほか：塩害を受けたコンクリート構造物の電気化学的補修技術に関する基礎検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp. 361-362、1996. 9