

論文

[1136] 電気化学的補修法によるコンクリート中鉄筋の状態変化

芦田 公伸*1・石橋 孝一*1

1. はじめに

多量の飛来塩分を受ける海岸地域のコンクリート構造物や冬期の凍結防止のために道路に融雪剤を散布する寒冷地域のコンクリート構造物では、コンクリート内部に浸透した塩分の影響で鉄筋の腐食等によって生じる劣化が社会問題化して以来その補修法に関する多くの研究が行われている。このような塩害を受けたコンクリート構造物の補修では、コンクリートにひびわれや欠落が発生した後にそれらの部分のみの補修を行う事が一般的であり、劣化の根本原因であるコンクリート中の塩分の除去については、何ら処置がなされていない。

最近、新しい補修方法として、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時間流すことにより、コンクリート中の塩分を鉄筋周辺からコンクリートの表面外へ移動させる電気化学的脱塩技術が開発されている[1]。また、この方法において、現実的にコンクリート中の塩分が移動することの確認や実構造物への応用が報告されている[2][3]。しかし、コンクリート中に直流電流を流す際に陰極となるコンクリート内部の鉄筋の状態変化については、必ずしも明らかになっていないといえない。

本研究では、直流電流を鉄筋コンクリート中へ流す電気化学的脱塩法の脱塩効果の確認と処理中に陰極として用いたコンクリート内部の鉄筋の処理後の状態変化について分極曲線の測定を行った結果について報告する。

2. 実験

2.1 コンクリート配合と使用材料

試験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。また、セメントは表-2に示す化学組成を有する普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、姫川産川砂(比重2.62、F.M.=2.75)と姫川産碎石(Gmax=20mm、比重2.65、F.M.=6.61)を使用した。

なお含有塩分は、食塩(NaClの純度99.0%)を塩分量として6kg/m³となるように混練り水に完全に溶解して添加し、コンクリート中に均一に分散させた。また、養生方法は、打設翌日脱型後、直ちにビニール袋で密封し、材令28日まで20°Cの湿空養生とした。コンクリートの供試体は、直径が10cm、高さ10cmの円柱体とし、その中心部、高さ方向に公称径13mmのみがき丸鋼を有するものとした。

表-1 コンクリート配合

G _{max} (mm)	S1 (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					C	W	S	G	AEA
20	18	4	60	46.5	280	168	860	1002	0.7

*1 電気化学工業(株)青海工場特殊混和材部研究室 (正会員)

表-2 セメントの化学組成

化 学 成 分 (wt%)									
Ig. loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
1.8	0.2	21.5	5.3	3.1	64.6	0.8	2.1	0.32	0.40

2.2 試験方法

コンクリート試験体中の鉄筋を陰極に、コンクリート外部の電解質溶液に陽極を設置した。概略を図-1に示す。なお、コンクリート試験体の上下面はエポキシ系塗料で絶縁した。電解質溶液に浸漬されているコンクリートの表面積1m²当たり、1Aの電流を2週、4週、6週、8週間流し、

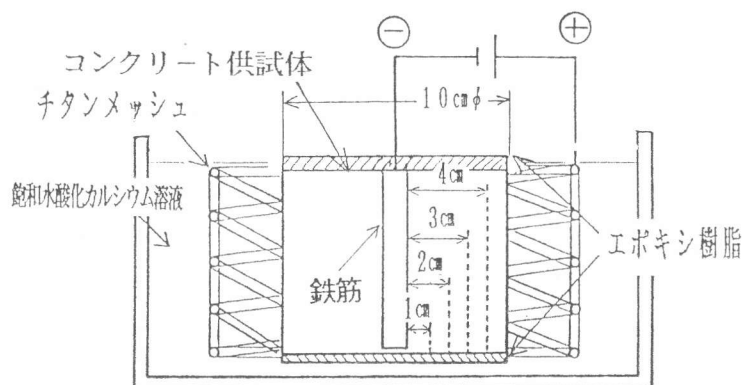


図-1 通電方法

コンクリート試験体中の鉄筋表面から1cm、2cm、3cm、4cmの各位置における塩分濃度の変化と、脱塩処理後24時間、1週間、5週間大気中に放置した後の分極曲線の測定を行った。

また、分極曲線測定供試体については脱塩処理前にコンクリート試験体中の鉄筋を陽極とし、コンクリート外部の電解質溶液中の電極を陰極としコンクリートの表面積1m²当たり1Aの電流で2日間処理し、鉄筋を腐食させた後にコンクリート表面積当たり1A/m²の電流密度で脱塩処理を行った。

2.3 塩分分析法

コンクリート供試体中の鉄筋表面から1cm、2cm、3cm、4cmの各位置において幅2.5cm、長さ10mmの直方体を鉄筋を中心に十字の位置の4カ所から切り出し同一距離の試料を粉碎混合した後、塩分分析用試料とした。

コンクリート中の含有塩分量は、コンクリートサンプルを0.15mm以下に粉碎した後、硝酸溶液によりコンクリート試料の分解と塩素抽出を行った後、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により全塩分量として分析した。

2.4 EPMA分析

コンクリート供試体の高さ方向の中心部から1cmの厚さで円盤状に切断しその一部をコンクリート供試体中の塩分の分布測定用試料とした。コンクリート供試体中に存在する塩分の分布測定には、電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) を用いた。

2.5 分極曲線測定法

分極曲線測定は、全自動分極曲線測定装置を用いた。装置の概要を図-2に示す。

装置は、ポテンショ／ガルバノスタット、関数発生器、照合電極（銀・塩化銀電極）、対極（貴金属酸化被覆チタン）、パーソナルコンピュータ、XYプロッタより構成されている。測定は、掃引速度1mV/秒において電位を自然電位から1000mVまで変化させその間の電位と電流の関係を測定した。

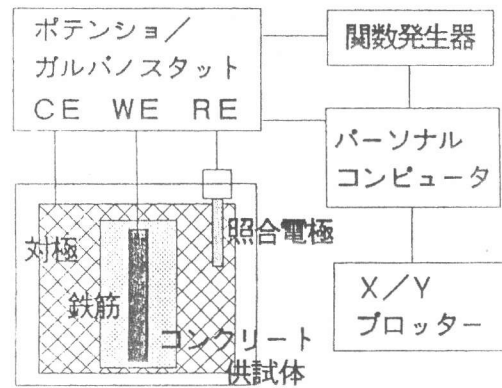


図-2 装置概要

2.6 pH測定

コンクリート供試体中の鉄筋表面のpH測定は、コンクリート供試体を割裂し鉄筋を取り出した後すぐに蒸留水をしみこませたpH試験紙（アルカリブルー試験紙、pH=11.0～13.6）を鉄筋表面に触れさせ測定した。

3. 結果及び考察

3.1 塩分濃度の変化

円柱体コンクリート供試体中の鉄筋表面から1cm、2cm、3cm、4cmの各位置、および全体の平均における脱塩処理前と脱塩処理2週、4週、6週、8週間後の塩分濃度の変化を図-3に示す。通電開始前の塩分濃度はコンクリート供試体中で均一に6kg/m³であるが直流

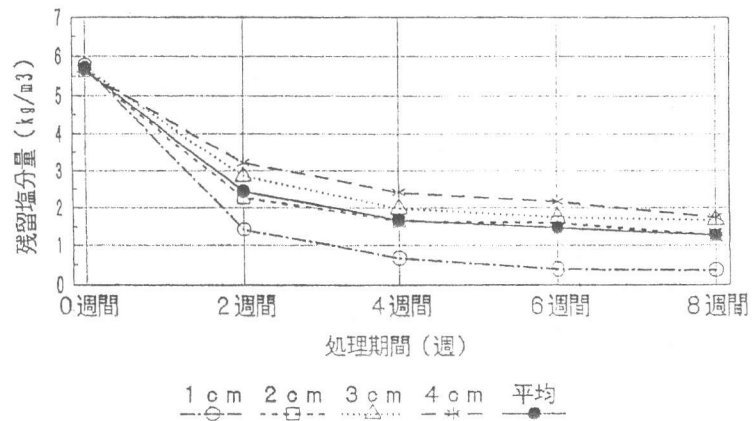


図-3 処理期間と残留塩分量

電流を流し脱塩処理を行うと処理後2週間で塩分濃度は鉄筋から1cm部で1.5kg/m³、鉄筋から4cm部で3.2kg/m³まで減少した。処理2週間で以降も塩分濃度は徐々に減少し8週間の処理で1cm部で0.5kg/m³、4cm部で1.8kg/m³まで減少し、鉄筋に近い方のほど塩分濃度の低下は著しかった。これは、脱塩処理中に鉄筋近傍では塩素の供給源がなくなること、および鉄筋からの各位置における単位面積当たりの電流密度が鉄筋に近いほど高くなっているためと考えられる。

3.2 塩分の分布

脱塩処理前と脱塩処理8週間後のコンクリート供試体中における塩分の分布状態の測定結果を写真-1に示す。写真中赤色は塩分の存在を示している。脱塩処理前にはコンクリート供試体中に均一に塩分が存在しているが、脱塩処理後には鉄筋を中心として半径方向に均一に塩分が除去されており、図-3に示した塩分濃度の変化と同一の結果が得られた。

3.3 分極曲線の測定

未処理（脱塩処理なし8週間放置）、および脱塩処理を2週、4週、8週間行った後に大気中に24時間、1週間、5週間放置した後のコンクリート供試体中の鉄筋の分極曲線の測定結果を図-4、5、6、7に示す。また、コンクリート供試体中の鉄筋の自然電位（分極曲線測定開始

時の電位) の測定結果を表-3に示し、鉄筋表面のpH測定結果と水素電極に換算した自然電位をpH-電位図にプロットした結果を図-8に示す。

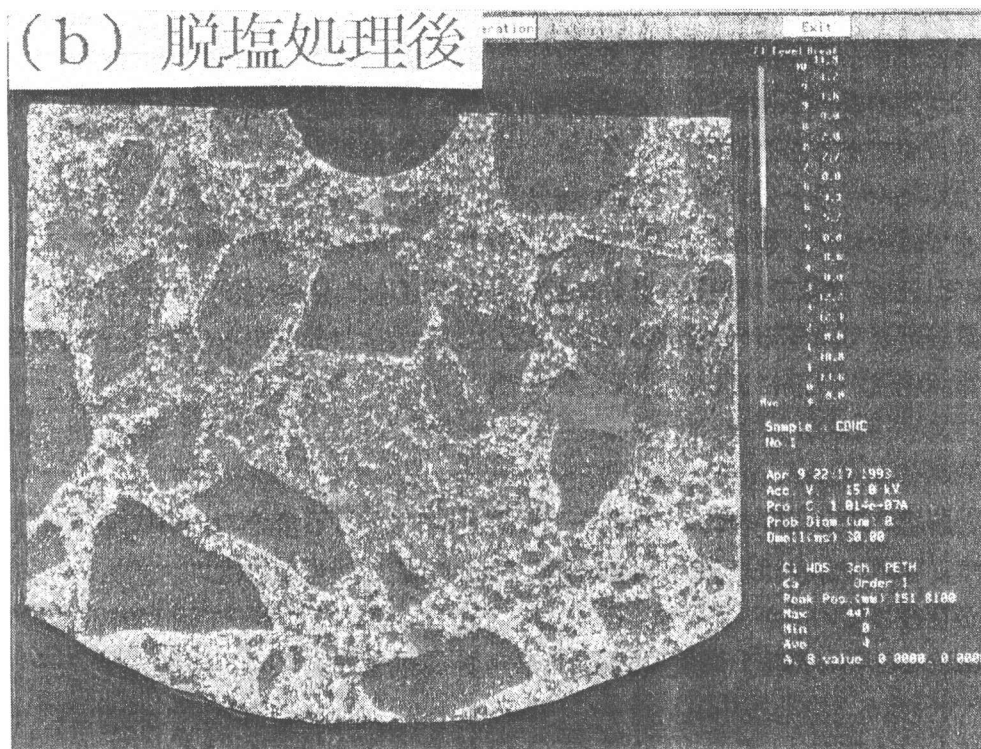
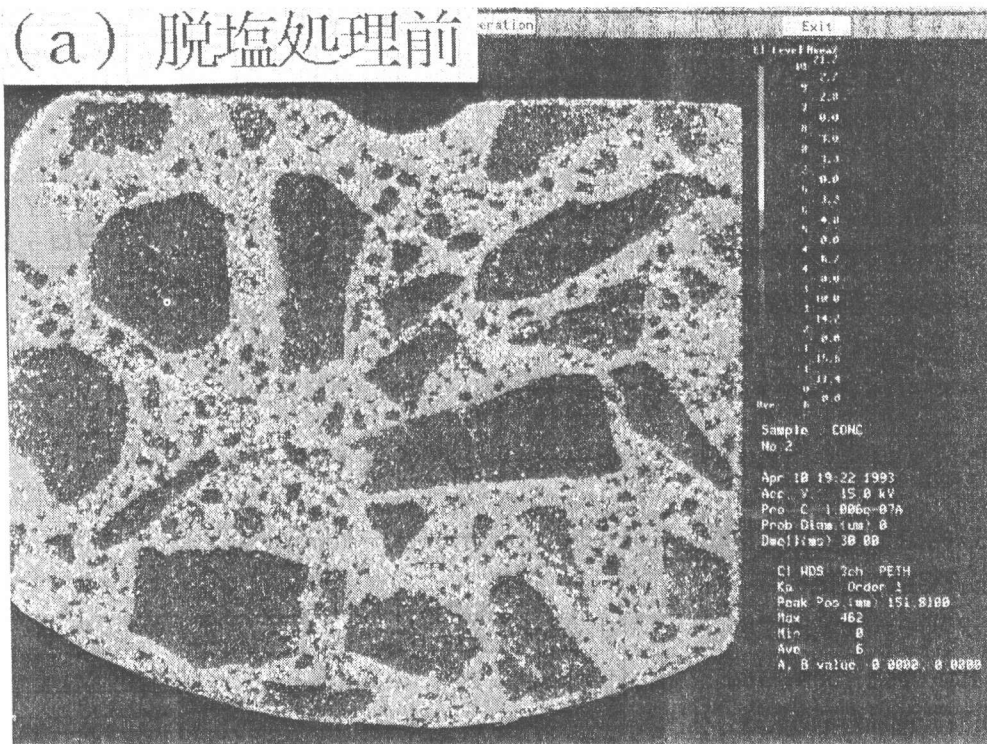


写真-1 コンクリート供試体中の塩素分布

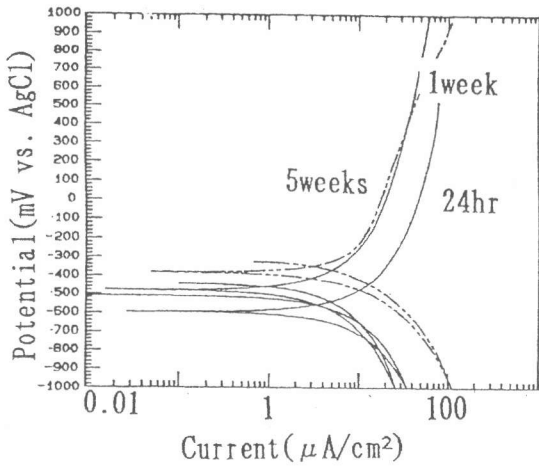


図-4 未処理

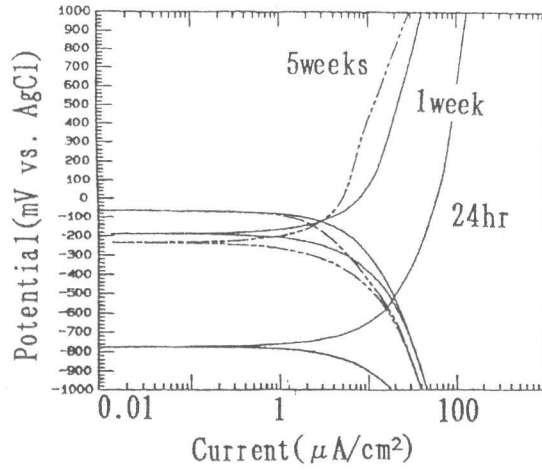


図-5 処理2週間

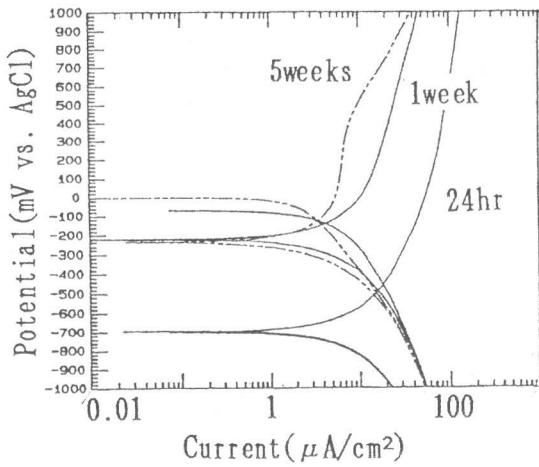


図-6 処理4週間

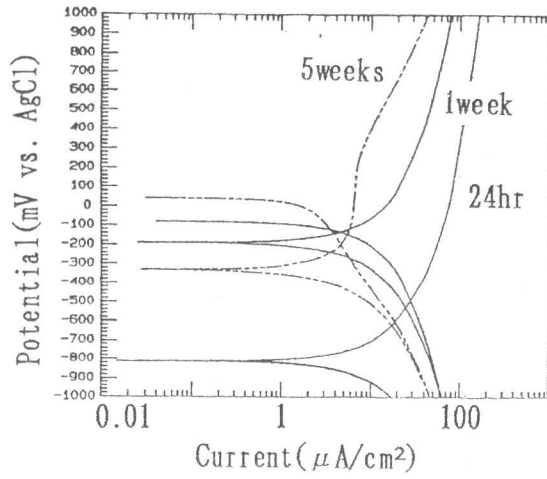


図-7 処理8週間

未処理の場合は、電流密度が大きく自然電位の値も卑の状態を維持しており、図-4に示すように分極曲線の形状に大きな変化は認められない。脱塩処理を行った場合には図-5、6、7に示すように、脱塩処理後24時間では通電処理期間にほとんど関係なく大きな電流密度を示し、自然電位は未処理に較べより卑な値となった。脱塩処理停止後1週間では脱塩処理した鉄筋のアノード側の分極曲線において同一電位での電流密度は24時間放置後に較べ何れも小さくなっており、自然電位の値は貴の方向へと変化している。脱塩処理停止後5週間では分極曲線に急峻な立ち上がり認められ電流密度はさらに小さくなっており、自然電位の値もさらに貴の方向へと変化している。以上のように、

印加した同一電位での電流密度が小さくなったり自然電位が貴な方向へと変化するのはコンクリート中にある鉄筋表面へ不動態皮膜が形成されていることを示しているものと考えられる。なお、本測定においては測定機器の内部抵抗が

表-3 自然電位測定結果

放置時間	測定項目	脱塩処理時間 (電流密度: 1A/m ²)			
		未処理	2週間	4週間	8週間
24時間	自然電位(mV) (Ag/AgCl)	-511	-755	-705	-809
	自然電位(mV) (Ag/AgCl)	-442	-65	-72	-80
5週間	自然電位(mV) (Ag/AgCl)	-335	-69	-3	42

十分に大きいのでIRドロップの影響はないものと考えた。コンクリート供試体中の鉄筋表面のpHは未処理（脱塩処理前）では約pH=11であったが脱塩処理を行った直後では約pH=13.6であり5週間放置後もほとんど変化はなかった。

pHと自然電位（水素電極換算）の変化をpH-電位図にプロットした図-8よりコンクリート供試体中の鉄筋の状態は、未処理（脱塩処理前）では腐食領域に存在するが脱塩処理を行い、直流電流を流すと脱塩

処理直後（24時間後）では不変領域に存在し、5週間後では不動態領域に存在し安定な状態を保ち腐食の発生しない状態を保つものと考えられる。

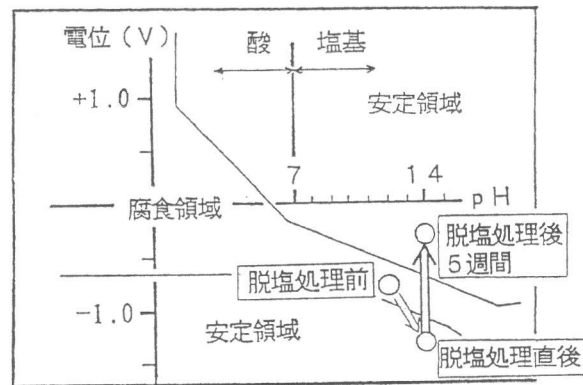


図-8 pH-電位図

4. まとめ

コンクリート供試体を用いた今回の実験結果から、以下のことが言える。

- (1) 脱塩処理による塩分濃度の減少は鉄筋に近いほど大きい事が確認できた。
- (2) 脱塩処理での塩素濃度分布の変化は、鉄筋から外部電極を結ぶ線上で等距離にある部分では塩分の分布状態は等しく処理効果が均一である事が確認できた。
- (3) コンクリートの内部鉄筋のアノード側の分極曲線に急峻な立ち上がりが認められ鉄筋表面への不動態膜の状態が改善されている事が確認できた。
同様の事は自然電位の測定結果からも確認できた。

[謝辞]

本研究を行うに当たり東京工業大学工学部土木工学科、大即信明助教授、久田 真助手より実験指導および助言をいただき深く感謝いたします。

[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] 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
- [3] 宇田川秀行・芦田公伸・石橋孝一・半田 実: 直流電流による鉄筋近傍へのNaイオンの集中とその後の再分散、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.1 pp.829-834、1993