

# 論文 脱塩処理/未処理間の腐食電流に関する検討

吉岡光洋\*<sup>1</sup>・福手勤\*<sup>2</sup>・阿部正美\*<sup>3</sup>・原与司人\*<sup>4</sup>

**要旨**：塩分を含有したコンクリート供試体中に分割した鉄筋を埋設させ、供試体の半分につき脱塩を実施し、脱塩のマクロセルに与える影響について検討した。脱塩効果は、脱塩実施部のみ得られたが、自然電位は、脱塩実施部および未実施部との境界においても貴へ変化した。分極抵抗およびコンクリート抵抗は、脱塩実施部のみ大きくなり、未実施部との境界では変化しなかった。また、各鉄筋間の電流は、脱塩未実施部が最も大きく、実施部と未実施部間および実施部は、ほとんど確認されず、脱塩のマクロセルに与える影響は認められなかった。

**キーワード**：電気化学的補修、マクロセル、分極抵抗、

## 1. はじめに

塩害を受けたコンクリート構造物の補修工法として、従来の断面修復工法に加え、電氣的に防食を行う電気防食工法、また、劣化の根本原因である塩分を除去する技術として、コンクリート内部鉄筋を陰極に、コンクリート表面に陽極を設置して電解質溶液を介してその間に直流電流を一定期間流す電気化学的脱塩工法がある。電気化学的脱塩工法において、現実コンクリート中の塩分が移動することや、実構造物への応用が報告されている [1]。また、従来の断面修復工法においては、マクロセル腐食の影響により補修部周辺の鉄筋腐食が進行し、比較的早い時期に再劣化することが指摘され [2]、種々の検討が行われている [3]。しかし、脱塩処理後のマクロセル腐食に与える影響については検討されていない。

本稿では、分割した鉄筋を埋設した含有塩分量の異なる各コンクリート供試体を用い、供試体の一部につき脱塩を実施し、脱塩後の塩分分布、脱塩前後の鉄筋の自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗および各鉄筋間のマクロセル電流を測定することにより、脱塩処理後のマクロセルに与える影響を供試体レベルにおいて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリート配合と供試体

試験に用いたコンクリート配合を表-1に示す。セメントは、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( $G_{max}=20\text{mm}$ 、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Cl濃度として $10\text{kg/m}^3$ (NaCl=16.6 $\text{kg/m}^3$ )、 $5\text{kg/m}^3$ (NaCl=8.2 $\text{kg/m}^3$ )、 $3\text{kg/m}^3$ (NaCl=4.9 $\text{kg/m}^3$ )、 $1\text{kg/m}^3$ (NaCl=1.6 $\text{kg/m}^3$ )、 $0\text{kg/m}^3$ (NaCl=0 $\text{kg/m}^3$ )の5水準とし、それぞれ混練水に完全に溶解して添加し、練り混ぜ時にコンク

\*1電気化学工業(株)青海工場 セメント特混研究所(正会員)

\*2運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室長、工博(正会員)

\*3運輸省港湾技術研究所 構造部防食担当主任研究官(正会員)

\*4電気化学工業(株)特殊混和材部 施工開発課(正会員)

表-1 コンクリート配合

G <sub>max</sub> (mm)	SL. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	混和剤	NaCl
25	13 ~17	2 ~4	60	42.5	170	283	779	1066	0.71	※

※試験条件により含有塩分量異なる。

リート中に均一に分散させた。供試体は、それぞれ3体ずつ作製し、1体は塩分分析用とした。以後、検討結果については、最も塩分濃度が高く、結果の最もはっきりあらわれる10kg/m<sup>3</sup> (NaCl=16.6kg/m<sup>3</sup>)の供試体について報告する。

供試体のサイズ及び配筋状態の概略図を図-1に示す。コンクリート中の鉄筋にはφ13mm×80mmの磨き丸鋼(SS400)を用い、かぶり厚は5cmとした。各鉄筋の両端にはリード線を接続し外部において短絡できるようにした。なお鉄筋端部はエポキシ樹脂で完全に絶縁した。作製供試体は、材例1日で脱型し、各リード線を短絡後、28日間湿空養生とした。養生終了後、供試体は上面(脱塩処理面)を除きエポキシ系塗料にてシールし、リード線を短絡させたまま約2ヶ月間放置(20℃×60%)した。

## 2.2 試験方法

養生終了後、約2ヶ月間鉄筋電位、分極抵抗、コンクリート抵抗及びマクロ電流を測定した。その後、二体のうち一体を、コンクリート供試体の鉄筋を陰極に、電解質溶液に飽和Ca(OH)<sub>2</sub>を使用し、陽極を供試体の中心位置から約2cm内側まで設置し脱塩を実施した。概略を図-2に示す。通電量は、コンクリート供試体の表面積1m<sup>2</sup>当たり1Aで8週間通電であり、通電時に各鉄筋への流入電流量を測定した。

通電終了後は、約180日(30、60、90、120、150、180日)後まで、脱塩処理および未処理品とも脱塩前と同様の測定を行った。

## 2.3 塩分分析

供試体は、脱塩終了後、幅方向に2分割、長さ方向に8分割、厚さ方向に5分割し、それぞれについて各塩分濃度測定用試料とした。なお、中心部分の2ヶ所については、さらに長さ方向に2分割し測定試料とした。塩分の分析は、「JCI-SC4」に準拠して行った。

## 2.4 自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗およびマクロ電流の測定

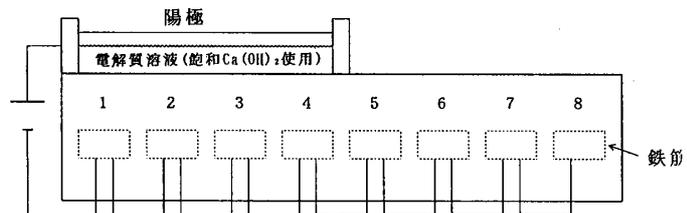
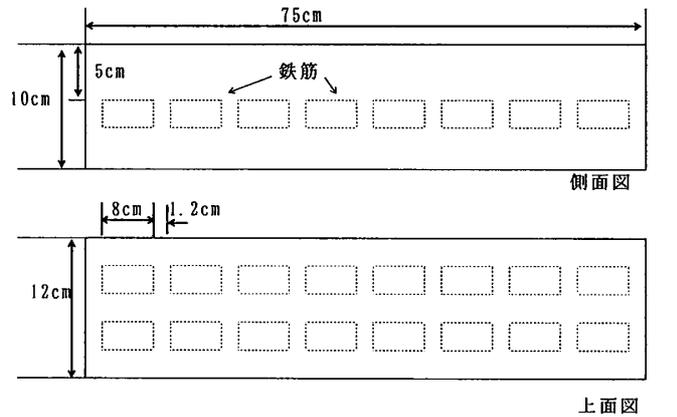


図-2 供試体脱塩処理方法

コンクリート表面を十分に湿潤させた後、鉄筋腐食診断センサーを使用し、全ての鉄筋を短絡させた場合と短絡を解除させた一日後の自然電位、分極抵抗、およびコンクリート抵抗を測定した。自然電位は、銅・飽和硫酸銅基準(CSE)に換算した。また、分極抵抗、コンクリート抵抗は交流インピーダンス法を用い、測定条件としては高周波に200Hz、低周波に0.25Hzを用いて行った。マクロセル電流については、脱塩180日後までの経時変化について、短絡を解除させた状態で、隣り合う鉄筋間に無抵抗電流計を挿入し測定した。さらに、550日後に全ての鉄筋を短絡させた状態で各鉄筋のマクロセル電流を測定した。測定値は、鉄筋表面積当りに換算した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 コンクリート中の含有塩分量の変化

塩分の練り混み量が $10\text{kg/m}^3$ の供試体について、8週通電後の塩分量を図-3に示す。また、脱塩時の各鉄筋へ流入した電流量を図-4に示す。塩分量は、脱塩処理面である鉄筋1から4において、鉄筋近傍で $1\text{kg/m}^3$ 程度まで減少しており、脱塩の効果が十分得られた。陽極に近い表面付近では、 $2\sim 4\text{kg/m}^3$ に減少した。陽極を設置しなかった未処理面においては、どの深さの塩分の減少も今回は確認されなかった。

図-4を見ると、脱塩処理部分の鉄筋へは $1\sim 5\text{mA}$ の電流が流入しているのに対し、未処理部分へは $0.1\sim 0.2\text{mA}$ の電流しか流入しておらず、陽極から鉄筋へ流入する電流は、ほとんどが陽極の真下に位置する鉄筋へ流入している。陽極から離れた鉄筋にも電流は流入しているものの、わずかな電流のため、十分な脱塩効果が確認されなかった。

#### 3.2 自然電位の変化

図-5(a)、(b)に、それぞれ打設28日後から脱塩180日後までの、未脱塩の供試体と脱塩処理した供試体との自然電位の変化を示した。各鉄筋は短絡させたまま測定を行った。

図-5(a)からわかるとおり、脱塩未処理の供試体については、材齢の進行と共に鉄筋の自然電位は、卑の方向へ変化していった。これに対し、脱塩処理した供試体(図-5(b))において、自然電位は、脱塩処理部で脱塩直後に大きく卑となっているが、脱塩処理後の時間が経過するに従い、貴の方向へ回復している。未処理部分も供試体の中央よりの部分では、自然電位が脱塩処理直後に大きく卑の方向へ変化しており、処理後の経過時間の進行と共に貴の方向へ変化している。塩分分析では、脱塩部のみ塩分の減少が見られたが、自然電位で見ると脱塩部以外でも陽極に近い部分では、電位が貴の方向へ変化しており、鉄筋近傍の雰囲気改善が改善されたと思われる結果と

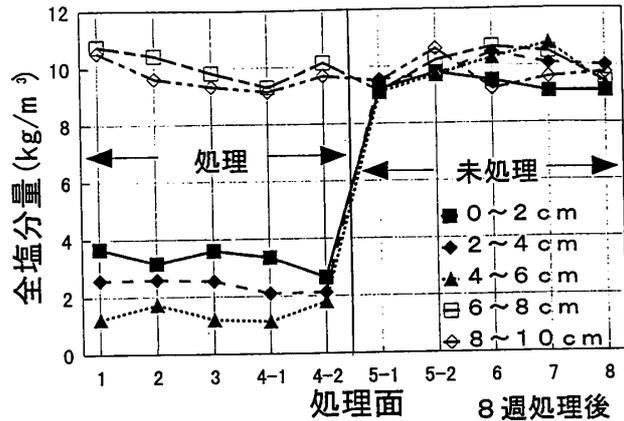


図-3 8週脱塩処理後の全塩分量

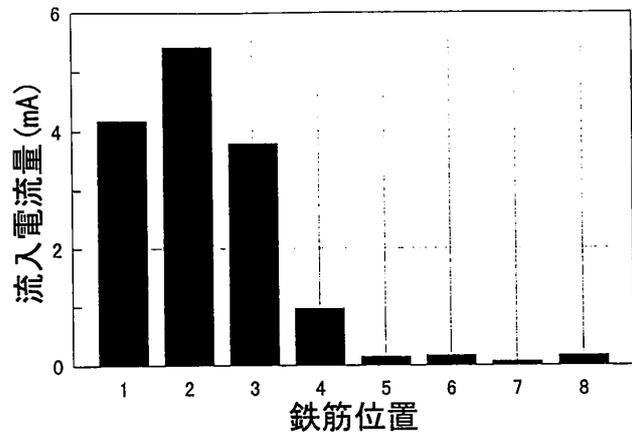
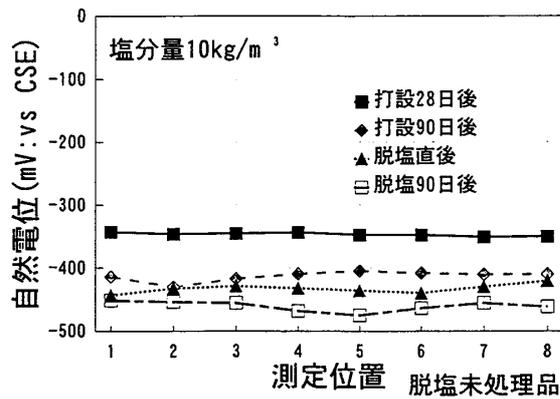
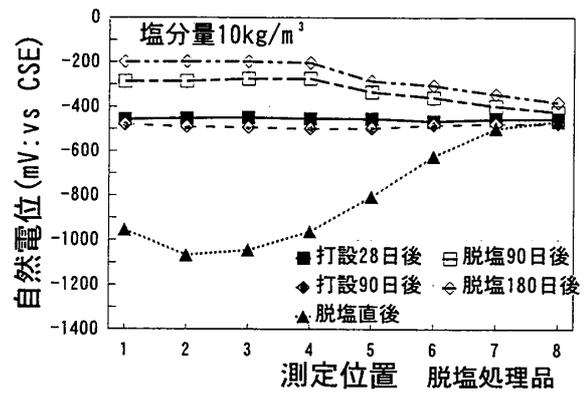


図-4 脱塩時の各鉄筋への流入電流量



(a) 未処理品



(b) 処理品

図-5 各鉄筋の自然電位

なった。

図-6には、脱塩処理した供試体の、短絡を解除した1日放置後の各鉄筋の自然電位を示した。短絡時の鉄筋の電位に比べると、各鉄筋間においてばらつきはあるが、脱塩処理部においておおまかな傾向は等しく、脱塩後に電位は貴の方向へ変化している。また、未処理部も、陽極に近い部分は電位が貴の方へ変化しており、短絡した場合に、単に脱塩処理部の鉄筋電位の影響を受け変化しただけでないことが分かる。

### 3.3 分極抵抗およびコンクリート抵抗の変化

図-7には、それぞれ打設28日後から脱塩180日後までの、未脱塩の供試体と脱塩処理した供試体との分極抵抗の変化を示した。また、図-8には、コンクリート抵抗の変化を示した。

まず、分極抵抗についてみると、脱塩処理部分および未処理部分は、打設28日後から脱塩直後までほぼ同程度の値を示している。脱塩処理後は、脱塩処理部分のみ材齢とともに大きく増加しており、鉄筋の周囲の塩分が減少したことにより

鉄筋周囲の雰囲気改善され、鉄筋の不動態が再形成されたと考えられる。未処理の部分については脱塩後に増加しているが、材齢での変化は見られず、処理部ほど顕著ではない。自然電位の測定結果からは、脱塩処理の影響が処理部以外にも影響を与えていたが、分極抵抗には、その影響が認められなかった。

コンクリート抵抗についてみると、打設28日後から脱塩直後まで、処理未処理にかかわらず徐々に増加している。その後、脱塩処理部は大きく増加し、未処理部ではわずかに増加した。脱塩直後までのコンクリート抵抗の増加は、材齢の進行に伴う、供試体中の水分の減少によるものと考えられる。その後の脱塩処理部の急激な抵抗の増加は、脱塩による塩素イオンの減少による

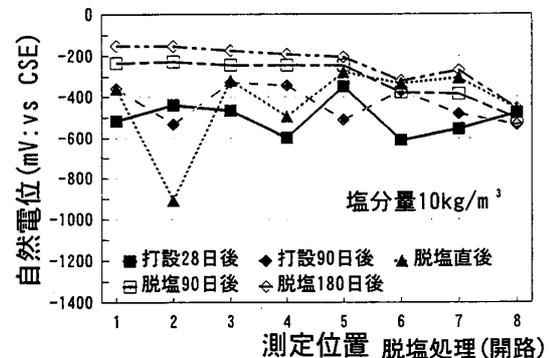


図-6 開路時の自然電位

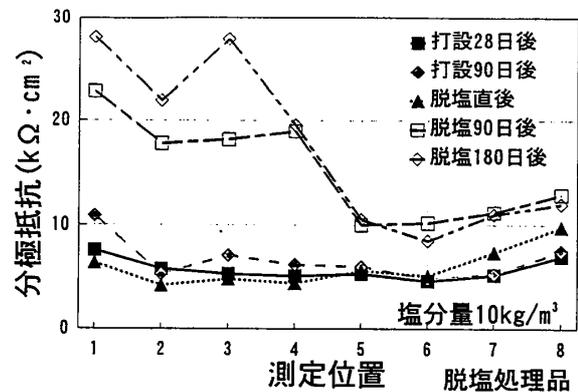


図-7 分極抵抗の変化

ものと考えられる。コンクリート抵抗の増加は、腐食電流を流れにくくするため、鉄筋防錆の点から見ると好ましい状態といえる。脱塩未処理部への影響は、分極抵抗同様確認されなかった。

### 3. 4 マクロセル電流の変化

図-9 (a)~(c)に、打設28日後から脱塩180日後までの脱塩処理した供試体のマクロセル電流の経時変化を示した。これらの図から分かるとおり、脱塩前までは、材齢の経時変化と共にマクロセル電流は増加していった。その後、脱塩直後には、脱塩処理部分で大きいマクロセル電流が確認されたが、脱塩終了後、時間と共に脱塩処理部分のマクロセル電流はほとんど確認されなくなり、未処理部分のみに確認された。また、脱塩により塩分濃度が大きく変化し、マクロセルを構成しやすいと考えられる箇所である鉄筋5から鉄筋4への電流量は、脱塩未処理部分と比較して小さく、脱塩による塩分濃度差がマクロセルに与える影響は小さいことを示す結果となった。

図-10には、全ての鉄筋を短絡し、各鉄筋のマクロセル電流を測定した550日後のデータを示した。脱塩処理部分ではマクロセル電流はほとんど確認されず、未処理部分でわずかに確認された。脱塩未処理の供試体では、供試体中央部分でマクロセル電流が確認された。

これらの結果から、脱塩処理のマクロセルに与える影響は、本試験において明確には確認されなかった。

なお、今後も継続して各種測定を行を行う予定である。

### 4. まとめ

コンクリート供試体を用いた、今回の一連の試験結果から、以下のことがいえる。

(1) 塩分分析結果から、脱塩処理部においては、十分な脱塩効果が見られた。未処理部については、鉄筋へ電流が流入しているものの、塩分の減少は今回確認されなかった。

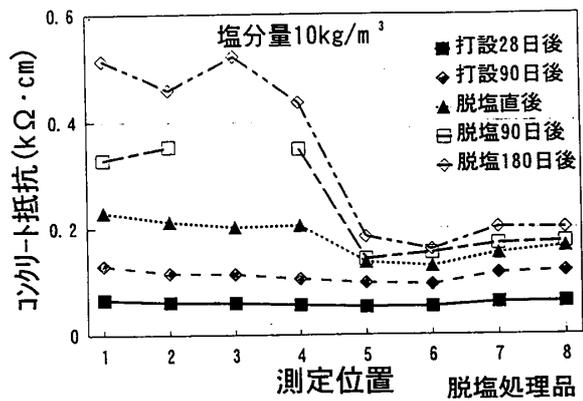
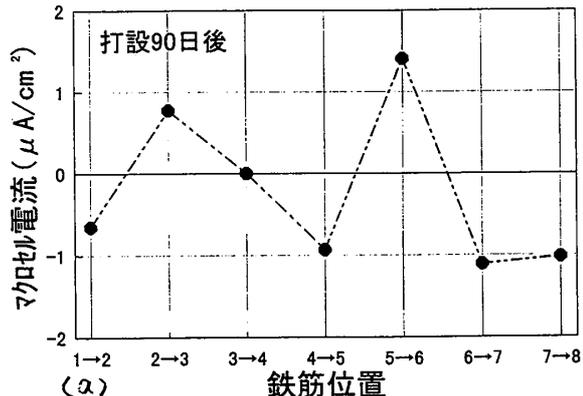
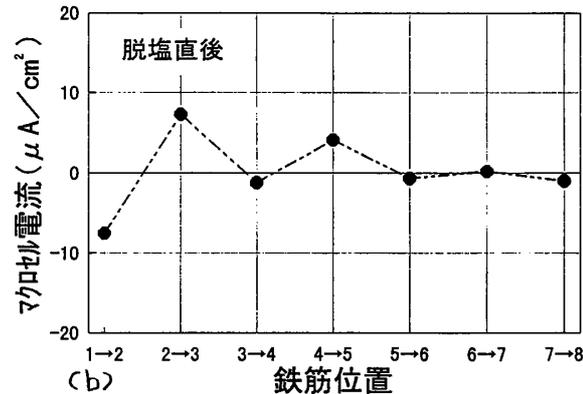


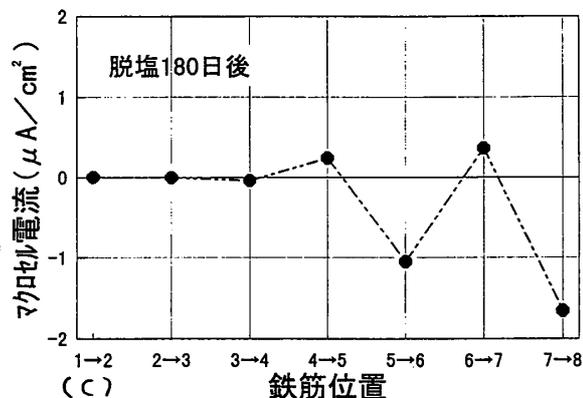
図-8 コンクリート抵抗の変化



(a)

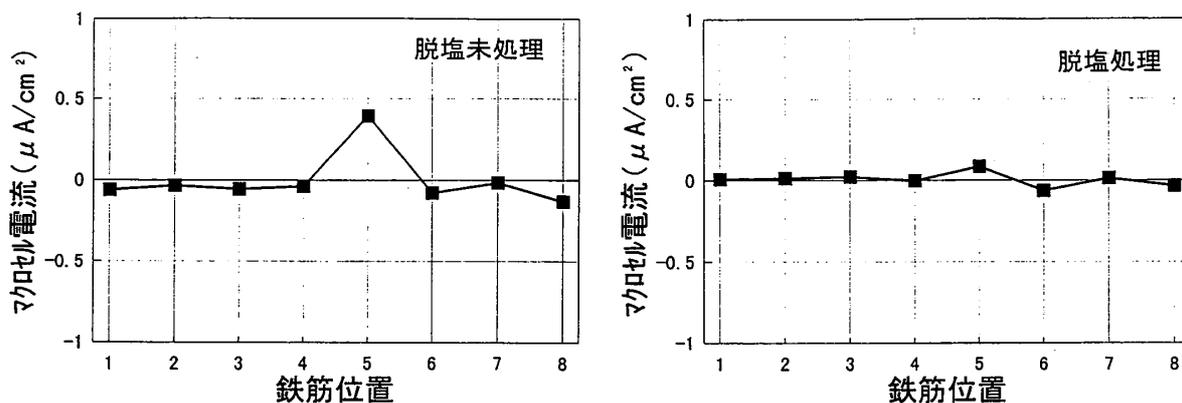


(b)



(c)

図-9 マクロセル電流の経時変化



(a) 脱塩未処理品のマクロセル電流

(b) 脱塩処理品のマクロセル電流

図-10 550日経過後のマクロセル電流

- (2) 脱塩前後の鉄筋の自然電位の測定結果から、脱塩処理部では材齢の経過と共に大きく貴の方向へ変化した。脱塩処理部と未処理部の境界でも電位は貴へ変化した。脱塩未処理部では陽極から離れるにしたがい貴方向への変化は少なくなった。
- (3) 脱塩前後の鉄筋の分極抵抗の測定結果から、脱塩処理部の分極抵抗の著しい増加が確認された。しかし、自然電位で見られたような、脱塩処理部と未処理部の境界および未処理部では鉄筋の分極抵抗の変化は見られなかった。
- (4) 脱塩前後のコンクリート抵抗の測定結果から、脱塩処理部の著しいコンクリート抵抗の増加が確認された。しかし、分極抵抗と同様にそのほかの部位では変化しなかった。
- (5) 各鉄筋間のマクロセル電流の測定結果より、脱塩未処理部と脱塩処理部との境界で発生するマクロセル電流はほとんど認められず、実用上影響のないことが確認された。

## [参考文献]

- [1] 例えば、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
- [2] 中村和彦・佐伯竜彦：補修した構造物の塩害再劣化メカニズムに関する一実験、土木学会第46回年次学術講演会概要集第5部門、pp. 272-273、1993. 9
- [3] 守分敦郎・長滝重義・大即信明・宮里心一：断面修復が鉄筋のマクロセル腐食におよぼす影響、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、pp. 7-14、1994. 10

本稿は、電気化学工業（株）と運輸省港湾技術研究所にて行っている共同研究の一部につき、とりまとめたものである。

(謝辞) 本検討の遂行に当たり、種々の貴重な御指導、御協力を頂きました運輸省港湾技術研究所 構造部 濱田秀則主任研究官に深く感謝いたします。