論文　犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果に関する実験的研究

平石　剛紀*1・新井　淳一*2・坂田　昇*3・須田　久美子*4

要旨：断面修復工法で問題とされるマクロセル腐食を抑制することを目的とし，亜鉛を主材料とした犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果について実験的に検討を行った。実験の結果，断面修復時に犠牲陽極材を鉄筋に設置することで，犠牲陽極材をアノード，鉄筋をカソードとする防食回路が形成され，マクロセル腐食を防止できることを確認した。また，犠牲陽極材の防食効果は，外的環境により異なり，構造物が腐食環境下にある場合に高い防食効果を発揮し，非腐食環境下にある場合にはその防食効果が抑制されることを確認した。

キーワード：マクロセル腐食，断面修復，補修材料，犠牲陽極材，電気防食

１．はじめに

塩害などにより劣化したコンクリート構造物を補修する場合，劣化部を除去し断面を修復することにより補修を行うことが多い。しかし，断面修復により補修された構造物は，比較的早期に再劣化を発生することがある[1)]。この再劣化のメカニズムについては，これまでに多くの研究がなされており，マクロセル腐食回路が形成されることによるものと報告されている[2) 3) 4)]。マクロセル腐食は，連続する鉄筋において劣化因子の供給が部分的に異なる場合に生じ，アノード部（腐食部）とカソード部（非腐食部）が明らかに区別できる腐食形態を指す。断面修復後の構造物では，既設コンクリートと断面修復部における塩化物イオン濃度などの各種条件の違いにより電位差が生じ，既設コンクリート部分をアノード部，断面修復部分をカソード部とする腐食電池回路が形成されることになる。したがって，断面修復工法を適用する際には，このマクロセル腐食を抑制あるいは防止する材料の選定が必要となる。

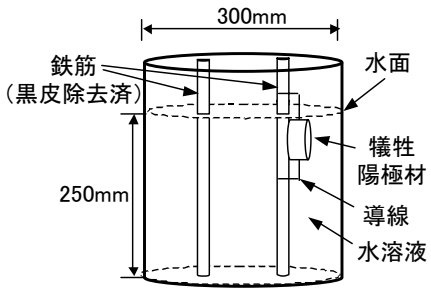
最近，断面修復工法を適用した際に生じるマクロセル腐食を抑制あるいは防止する材料として，流電陽極方式の電気防食工法[5)]の原理を用いた犠牲陽極材が開発された。しかしながら，その防食効果については明確にされていない部分が多い。そこで，本研究では，この犠牲陽極材のマクロセル腐食抑制効果について実験的に検討を行ったので，その結果について報告する。

２．犠牲陽極材の概要

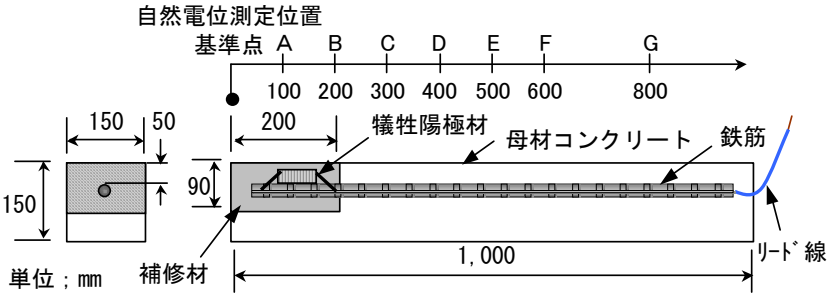
本研究で使用した犠牲陽極材を**写真－１**に示す。使用した犠牲陽極材は，Φ60×35㎜の形状であり，中心部に配置された亜鉛をバックフィル材で包み込んだ構造となっている。バックフィル材とは，犠牲陽極材としての亜鉛の性能を保持し，溶解を容易にするためのものである[5)]。亜鉛に導通された導線を鉄筋に結束することで，亜鉛と鉄のイオン化傾向の違いにより，亜鉛をアノード部，鉄筋をカソード部とする防食回路を形成するとさ

写真－１　犠牲陽極材

*1　鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・ＬＣＥグループ 研究員（正会員）
*2　リテックエンジニアリング㈱　技術第一部（正会員）
*3　鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・ＬＣＥグループ グループ長 工博（正会員）
*4　鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・ＬＣＥグループ 主管研究員 工博（正会員）



図－１　試験方法



図－２　試験体形状および自然電位測定位置

表―１　検討ケース

検討ケース	水溶液	犠牲陽極材の設置
1	イオン交換水	無し
2		有り
3	塩水 (塩化物イオン濃度3%)	無し
4		有り
5	高アルカリ塩水 (pH>12, 塩化物イオン濃度3%)	無し
6		有り

表－２　使用材料

使用部位	使用材料	記号	摘要	
母材コンクリート	セメント	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度:3.16g/cm^3
	細骨材	S	新潟産山砂	表乾密度:2.63g/cm^3 吸水率:1.59%
	粗骨材	G	奥多摩産砕石2005	表乾密度:2.65g/cm^3 吸水率:0.55%
	混和剤	AD	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	塩化ナトリウム	NaCl	―	
補修材	セメントモルタル	ECC	高靭性セメントモルタルプレミックス材	

れる材料である。

使用した犠牲陽極材は，イオン化傾向の違いを利用して防食回路を形成するため，外部電源を必要としない。さらに，小型で取付けが容易なため，小規模の範囲でも設置が可能であり，断面修復工法を適用する際の，マクロセル腐食の抑制に効果的な材料であると考えられる。

３．試験概要

３．１　浸漬試験による検討

（１）目的および試験方法

本試験では，犠牲陽極材の防食効果を簡易的に確認することを目的とした。

試験方法を**図－１**に示す。鉄筋の一部を水溶液に浸漬し，鉄筋の腐食状況を，犠牲陽極材の設置の有無について相対的に比較した。試験期間中は１回/週の頻度で浸漬を中断し目視によりその腐食状況を確認した。また，浸漬開始後８週（56 日）にて，腐食面積率の測定を行った。

（２）使用材料および検討ケース

試験に供した鉄筋はD16 であり，試験開始前に予め濃度 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液を用いて黒皮を除去した。

検討ケースを**表－１**に示す。本試験では，水溶液の種類をイオン交換水・塩水（塩化物イオン濃度３%)・高アルカリ塩水(塩化物イオン濃度３%)の３水準とし，それぞれ犠牲陽極材の有無の計６ケースについて検討を行った。ここで，高アルカリ塩水とは，コンクリート中の環境を模擬して，塩水中にコンクリートを粉砕したものを混入し撹拌した，pH を 12 以上に保持した水溶液である。

３．２　自然電位による検討

（１）目的および試験方法

本試験では，鉄筋を埋設したコンクリート試験体を用いて，断面修復の有無，犠牲陽極材の設置の有無が鉄筋の自然電位に及ぼす影響を確認することを目的とした。

試験体形状および自然電位測定位置を**図－２**に示す。試験体は，150×150×1,000mm の形状とした。母材コンクリート部分を打設し，７日間温度 20℃湿潤状態にて養生を行った後，補修部分を打設した。補修部を打設後，７日間 20℃湿潤状態にて養生を行い，型枠を脱型し，第１回目の自然電位測定を行った。その後，試験体を温度 40℃，湿度 90%の環境にて曝露し，１回/月の頻度で自然電位を測定した。なお，自然電位の測定は，銀塩化銀の照合電極を用いて行った。

（２）使用材料および検討ケース

使用材料を**表－２**に，母材コンクリートの配合を**表－３**に，補修材の配合を**表－４**に示す。母材コンクリートには，練混ぜ時に 16.6kg/m^3 の NaCl を混入した。使用した鉄筋はD19 であり，黒皮の

表－３　母材コンクリート配合

検討シリーズ	W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ (cm)	単位量(kg/m³) W	C	S	G	AD	NaCl
自然電位による検討	55	45.0	12±2.5	167	303	811	1002	0.76	16.6
電流量測定による検討	60	42.0		155	258	793	1108	0.81	3.0

表－４　補修材料配合

単位水量 (kg/m³)	水結合材比 (%)	砂結合材比 (%)	繊維体積 (%)
382	32	41	2.1

処理は行わなかった。補修材には，今後補修材料への適用が期待される，有機系繊維で補強された高靭性セメントモルタル[6)]（以下，ＥＣＣと記す）を使用した。なお，材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度は，母材コンクリートで 39.0N/mm²，補修材料で 48.6N/mm² であった。

検討ケースを**表－５**に示す。検討ケースは補修の有無および補修方法の異なる計４ケースとした。ケース４で使用した防錆剤は，変性ポリウレタン系樹脂であり，鉄筋に塗布することで，鉄筋表面に被膜を形成する材料である。

３．３　電流量測定による検討

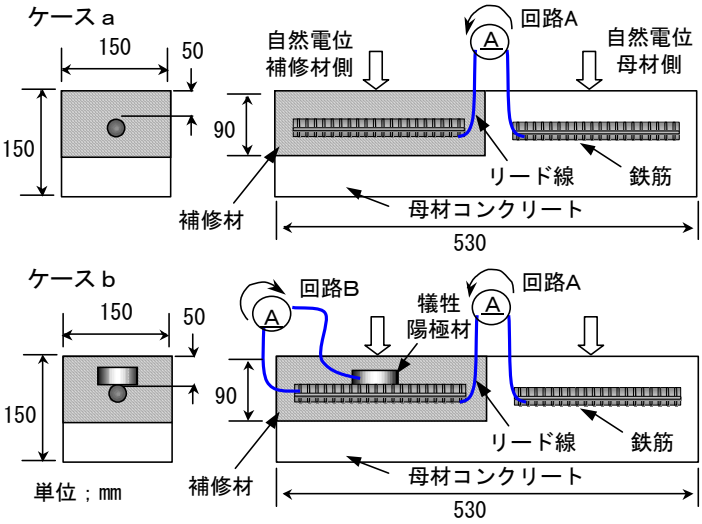
（１）目的および試験方法

本試験では，断面修復部を有するコンクリート供試体に分割した鉄筋を埋設させ，犠牲陽極材の設置の有無について，鉄筋間および犠牲陽極材と鉄筋間に流れる電流量を測定し，防食回路の形成および犠牲陽極材の消耗量を確認することを目的とした。

試験体形状および自然電位・電流量測定位置を**図－３**に示す。試験体は，150×150×530mm の形状とした。母材コンクリート部分を打設した後，材齢２日にて補修部を打設し，温度 20℃，湿度 100%の環境で養生を行った。50 日間養生を行った後，腐食電流量および自然電位の第１回目の測定を行った。その後，試験体を温度 40℃の乾燥炉に 75 日間曝露し，さらに環境条件を変化させるため，打設後 125 日以降は，温度 20℃，湿度 100%の環境下にて１回/２日程度の散水を行った。なお，自然

表－５　検討ケース

検討シリーズ	検討ケース	断面修復	修復方法
自然電位による検討	1	無し	－
	2	有り	ECC
	3	有り	犠牲陽極材＋ECC
	4	有り	防錆剤塗布＋ECC
電流量測定による検討	a	有り	ECC
	b	有り	犠牲陽極材＋ECC



図－３　試験体形状および自然電位・電流量測定位置

電位は，銀塩化銀の照合電極を用いて測定を行い，電流量は，無抵抗直流電流計を用いて図中の矢印の方向に流れる電流を正として測定を行った。

（２）使用材料および検討ケース

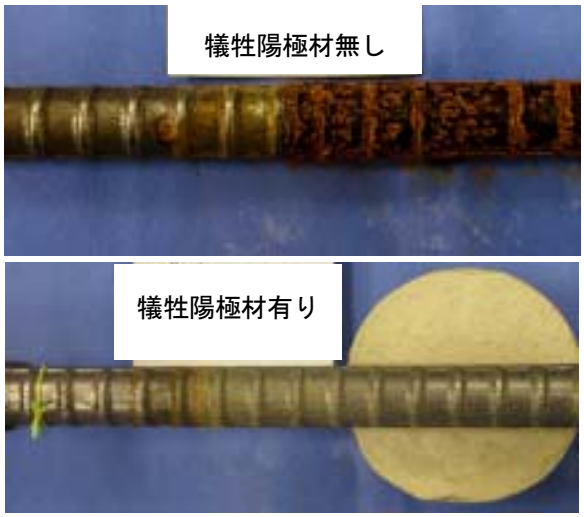
使用材料を**表－２**に，母材コンクリートの配合を**表－３**に示す。母材コンクリートには，練混ぜ時に３kg/m³ の NaCl を混入した。使用した鉄筋は D19 であり，試験体作製前に予め濃度 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液を用いて黒皮を除去した。補修材料には，前述したＥＣＣを使用した。なお，材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度は，母材コンクリートで 35.2N/mm²，補修材料で 49.7N/mm² であった。

検討ケースを**表－５**に示す。検討ケースは，犠牲陽極材設置の有無の２水準である。

４．結果および考察

４．１　浸漬試験による検討

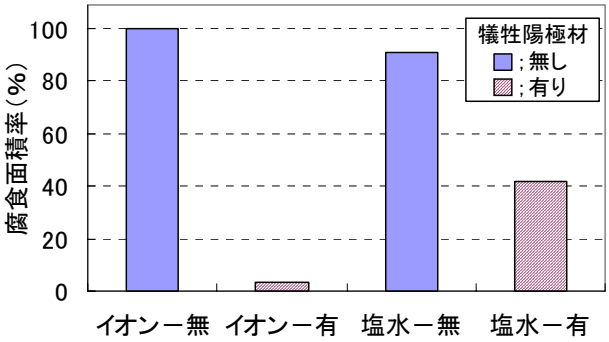
浸漬開始後８週におけるイオン交換水および塩水に浸漬した鉄筋の，水面近傍の腐食状況を**写真－２**および**３**に示す。目視による観察では，両



写真－２　腐食状況（イオン交換水 浸漬８週）

写真－３　腐食状況（塩水 浸漬８週）

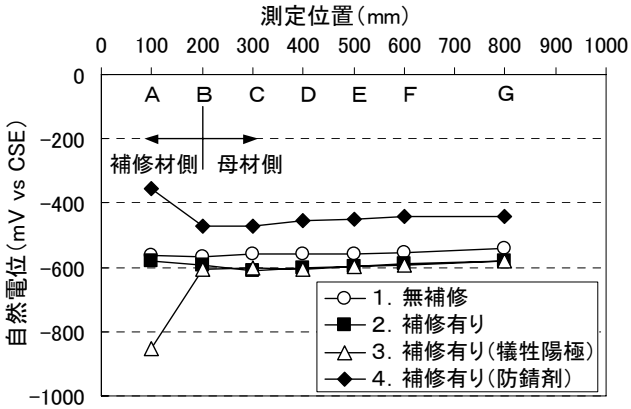
者とも犠牲陽極材の設置により，腐食が抑制されていることが確認された。また，同じく浸漬開始後８週における水溶液に浸漬していた部分の腐食面積率を**図－４**に示す。腐食面積率においても，犠牲陽極材を設置したケースで，腐食面積率が極端に小さい値となっており，犠牲陽極材の防食効果が確認された。高アルカリ塩水に浸漬したケースについては，犠牲陽極材の有無によらず，両者ともほとんど腐食が認められない結果であった。



図－４　腐食面積率（浸漬８週）

４．２　自然電位による検討

試験開始後６ヵ月における各試験体の自然電位測定結果を**図－５**に示す。無補修の試験体については，測定位置によらず約-580mV 程度の一定の自然電位を示した。補修有りの試験体のうち，防錆剤を使用したケース４については，補修部分の自然電位が母材部分の自然電位よりも 100mV 程度貴な電位を示した。また，補修材のみのケース２についても，わずかではあるが同様に補修部分が他の部分より貴な値を示した。一方，犠牲陽極材を設置したケース３については，補修部分の自然電位が極端に卑な値を示した。



図－５　自然電位測定結果（材齢６ヶ月）

図－６に測定位置Ａにおける自然電位の経時変化を示す。なお，図中のプロットは，その他の測定位置での自然電位が，全ての試験結果においてほぼ一定であったことから，測定位置Ｂとの差で示している。測定位置Ａにおける自然電位は，データにばらつきはあるものの，材齢１ヵ月以降で**図－５**に示した結果と同じ傾向を示した。

これらの結果より，ケース２およびケース４では，補修部をカソード部，母材部をアノード部とするマクロセル腐食回路が生じている可能性があると考えられた。一方，ケース３においては，犠牲陽極材がアノード部，鉄筋がカソード部となるマクロセル回路とは逆の，防食回路が形成されている可能性があると考えられた。ただし，本実験では，自然電位のみを測定していたことから，これらの回路が実際に形成されているかを確認する

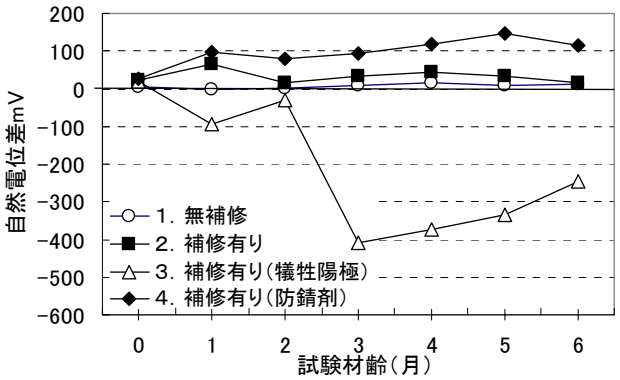
ことはできなかった。これについては，**４．３**で詳しく考察する。また，防錆剤を使用したケース４で，補修材のみのケース２に比べ，測定点ＡとＢの電位差が常に大きい値を示した。これについて既往の研究[2)]では，母材と補修材間の自然電位の差が大きい場合であっても，比抵抗の大きい補修材料を用いた場合，マクロセル腐食速度は低く抑えられるとされており，両者のマクロセル腐食速度の評価については，材料の比抵抗，自然電位および腐食電流量を併せて，今後検討を行っていく必要があると思われた。

４．３　電流量測定による検討

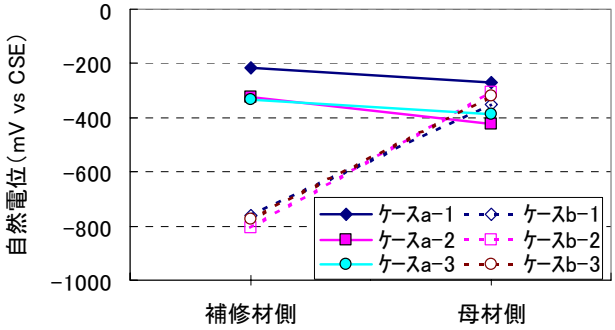
材齢 202 日における自然電位の測定結果を**図－７**に示す。本検討では各ケースで，３体の試験体を作製し，実験を行った。なお，自然電位は各回路を接続したまま測定している。**図－７**より，**４．２**で示した結果同様，犠牲陽極材を設置したケースｂでは，補修部が極端に卑な電位を，犠牲陽極材を設置していないケースａでは，補修材側が母材側に比べ貴な値を示した。なお，本検討における自然電位の測定値が，**４．２**で示した自然電位の測定値と異なる理由としては，塩分濃度や供試体の含水率の違いなどが考えられる。

それぞれの回路に流れる電流量の測定結果を，**図－８，９，10** に示す。なお，それぞれの図の縦軸のオーダーは異なる。**図－８，９**より，回路Ａに流れる電流は，ケースａとケースｂで異なる方向を示した。また，**図-９，10** より，ケースｂにおいて，回路Ａと回路Ｂで同じ向きに電流が流れ，その電流量は犠牲陽極材に接続した回路Ｂの方が大きな値を示した。これらの結果より，ケースａでは母材側を，ケースｂでは犠牲陽極材をアノード部とする，それぞれ逆向きの電気回路が生じていることが確認された。すなわち，ケースａではマクロセル腐食回路が形成され，ケースｂでは犠牲陽極材の設置により鉄筋を防食する回路が形成されていることが明らかとなった。

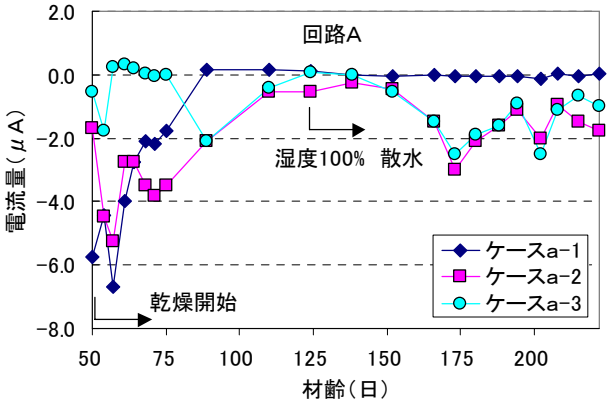
また，全ての電流量は，乾燥開始直後から低下する傾向を示した。これは，乾燥によりコンクリート抵抗が大きくなり，腐食が抑制されたことに



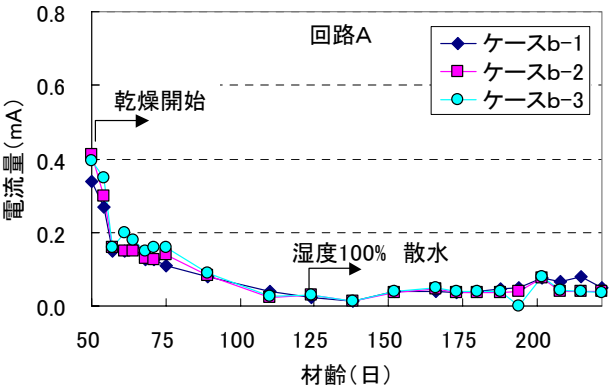
図－６　自然電位経時変化（測点Ｂに対するＡの値）



図－７　自然電位測定結果（材齢 202 日）



図－８　電流量測定結果（回路Ａ；ケースａ）



図－９　電流量測定結果（回路Ａ；ケースｂ）

よるものと考えられる。このことは，水分を供給する環境とした材齢 125 日以降，回路Ａを流れる

電流量が若干増加する傾向を示していることからも確認できる。ここで，犠牲陽極材の亜鉛の消耗量を，式（1）に示すファラデーの法則に従うと仮定して，ケースｂの回路Ｂを流れる電流量から算出する。

$$\frac{i \times t}{9.65 \times 10^4} = \frac{W}{(M/n)} \qquad (1)$$

ここに，ｉ：電流量，ｔ：時間，Ｗ：析出量，Ｍ：原子量，ｎ：原子価

本研究の範囲で，最も電流量の大きい材齢 50 日の２mA を基に，使用期間を 10 年とすると，式（1）より，亜鉛の消耗量は 214g と算出される。一方，乾燥などにより腐食がそれほど生じない環境下における電流量は 0.15mA（材齢 138 日）であり，同じく使用期間を 10 年とすると，亜鉛の消耗量は 16g と算出される。これは，断面修復部付近が，鉄筋の腐食に十分な酸素と水が存在する環境下においては，多量の防食電流を流し鉄筋を防食するが，乾燥状態などの鉄筋が腐食し難い環境下では，防食電流は小さくなり，犠牲陽極材自体の腐食減量も抑制されることになることを示す。つまり，犠牲陽極材を用いた防食工法は，外的環境に合わせ，必要に応じて防食効果を発揮する効率的な補修工法であると言える。また，今後これらの実験データを蓄積し，外的環境と犠牲陽極材の消耗量の関係を把握することで，最適な寸法設計が可能になると考えられた。

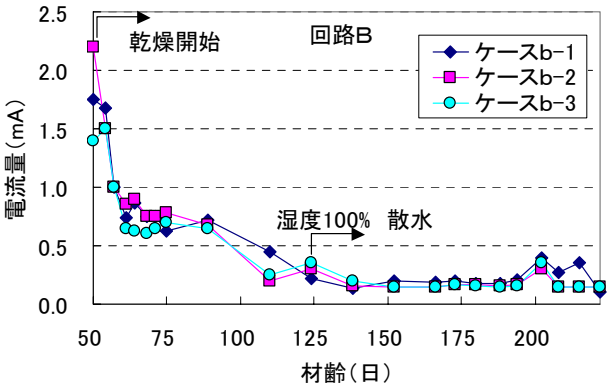
５．まとめ

本研究の範囲にて得られた知見を以下に記す。

(1) 塩化物イオンを含む鉄筋コンクリートの断面修復を行う場合，母材側をアノード，補修材側をカソードとするマクロセル腐食を生じる場合がある。

(2) 断面修復時に犠牲陽極材を用いることで，犠牲陽極材をアノード，鉄筋をカソードとする防食回路が形成され，マクロセル腐食を防止することが可能である。

(3) 犠牲陽極材は，外的環境に応じて防食効果を発揮する効率的な補修材料である。



図－10　電流量測定結果（回路Ｂ；ケースｂ）

犠牲陽極材は，構造物の長寿命化を可能とする補修材料であると考えられる。今後は，形状や設置方法が防食効果に及ぼす影響および長期的耐久性などについて継続して検討を行う予定である。

参考文献

1）出村克宣，大濱嘉彦，伊部博：補修後５年経過した鉄筋コンクリート建造物の鉄筋腐食，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.29-32，1994.10

2）長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一：鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究，土木学会論文集，No.544，V-32，pp.109-119，1996.8

3）長滝重義，大即信明，守分敦郎，鎌田敏郎，宮里心一：断面修復部における打継目の物質通過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響，土木学会論文集，No.578，V-37，pp.31-42，1997.11

4）宮里心一，大即信明：既存鉄筋コンクリート中のマクロセル腐食速度の推定，コンクリート工学論文集，vol.12，No.2，pp.93-103，2001.05

5）土木学会：電気防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107，2001.11

6）閑田徹志，斉藤忠，坂田昇，平石剛紀：PVA 繊維を用いた高靭性 FRC による吹付け補修材料の基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.1，pp.475-480，2001.6