

論文

取替えを考慮した犠牲陽極材料の設置方法の検討

松久保 博敬^{*1}, 宮口 克一^{*2}, 小椋 紀彦^{*3}, 山本 努^{*4}, 大即 信明^{*5}

Study in Consideration of Exchange of Sacrificial Anode Material

Hironori MATSUKUBO^{*1}, Katsuichi MIYAGUCHI^{*2}, Norihiko OGURA^{*3},
Tsutomu YAMAMOTO^{*4} and Nobuaki OTSUKI^{*5}

要旨: 河川下の地下鉄トンネルの一部では, 塩化物イオンを含む漏水によって塩害劣化が顕在化している. 躯体背面からの漏水は施工制約を受ける条件下では完全な止水処理が困難なため, 断面修復による補修だけでは再び塩化物イオンを含む漏水によって再劣化が懸念される. そこでマクロセル腐食や漏水による防食対策として有効な犠牲陽極材について, 将来の消耗による犠牲陽極材の性能低下を考慮して取替え可能な設置方法を検討した. その結果取替え容易な躯体表面や外付けの配置でも十分な腐食抑制効果を発揮することを確認した.

キーワード: 電気化学的防食工法, 犠牲陽極材, 取替え, 塩害, マクロセル腐食

1. はじめに

海水の影響を受ける河川下の箱型トンネル構造物では, 塩化物イオン濃度を含んだ漏水によって限定した範囲で塩害劣化が顕在化している. また特殊なケースとして狭隘部などの建設時の施工が困難な場所では, トンネル背面の防水層が完全に機能せず, 広範囲に鉄筋が腐食するケースがあると報告¹⁾されている.

これら顕在化した塩害劣化の対策や劣化要因の塩化物イオンを含んだ漏水対策として部分断面修復工法や止水工法・導水工法を単独若しくは併用して実施される場合が多い. しかしながら躯体背面からの漏水の場合, 表面側からの止水対策では新たな場所からの漏水や一時的な対策になる場合が多く, 完全な対策は技術的に非常に困難である. 導水工法は漏水量が多い場合に選定される対策で劣化範囲を限定することが可能となる

ため効果的な方法ではあるが, 導水部から塩化物イオンの再浸透が想定される. これら漏水対策の良否はマクロセル腐食など断面修復後の再劣化速度に大きく影響すると考えられる. そこで塩害劣化対策として有効で, 維持管理が比較的容易な流電陽極方式の犠牲陽極材料について²⁾ 将来の犠牲陽極材料の消耗による性能低下を考慮した取替え可能な犠牲陽極材の設置方法について検討を実施した.

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリート配合と供試体形状を表-1, 図-1に示す. 供試体はNaClを15kg/m³ 予め練り込んだコンクリートを打設し, 材齢28日後に部分断面修復を模擬した補修材を打設した. 供試体寸法は100×100×600mmとし, 補修部と母材部にはそれぞれ磨き棒鋼φ16をかぶり50mmの位置に配

*1 電気化学工業(株) インフラ・無機材料部門 特殊混和材部

*2 電気化学工業(株) 青海工場 セメント特混研究部 グループリーダー

*3 (株) 国際建設技術研究所 技術部 課長補佐

*4 東京地下鉄(株) 経営企画本部 国際業務推進室 課長

*5 東京工業大学大学院理工学工学研究科国際開発工学専攻 教授

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE剤 (%)
					W	C(N)	S	G	NaCl	
60	25	12±2.5	4.5±1.5	51.0	168	280	920	905	15	C× 0.001

置, 上面以外は全てエポキシ樹脂で塗装した。

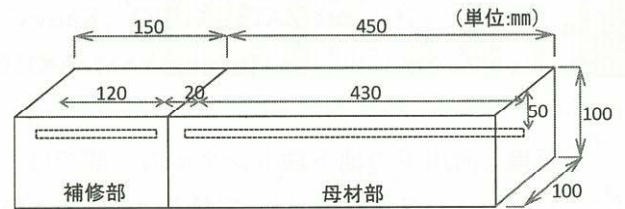
2.2 犠牲陽極材

犠牲陽極材は従来の亜鉛+バックフィル材と亜鉛単体およびアルミニウム合金単体の3種類とした。犠牲陽極材の配置は, 断面修復材の表面に埋込んだ供試体 A (以下, 「表面埋め込み」と称す), 断面修復後の表面に配置した供試体 B (以下, 「外付け」と称す) および従来どおりの断面修復内部に配置した供試体 C (以下, 「内部埋め込み」と称す) の3種類とした。犠牲陽極材の配置概要と犠牲陽極材の種類を図-2, 表-2 に示す。供試体 A の「表面埋め込み」は, 補修モルタルの仕上げ時に犠牲陽極材が可視化できるようにモルタル表面に配置し, 硬化後に犠牲陽極の乾燥防止のため透明塩ビ性パネルで覆った。供試体 B の「外付け」は, 補修材硬化後に BOX 状に加工した透明性塩ビパネル内 (以下, 「プラ BOX」と称す) に犠牲陽極材とアルカリ水溶液を吸水させた高吸水ポリマーを充填し, 補修材表面に固定した。供試体 C の「内部埋め込み」は従来どおり補修鉄筋に犠牲陽極を配置し, 犠牲陽極材は完全にモルタルで覆われる状態となる。

バックフィル材は高アルカリと高い吸水性能を保持した材料で構成されており, 犠牲陽極材の陽極性能が低下しないように考慮された材料である。亜鉛とアルミニウム合金はバックフィル材を用いず金属面が露出した状態で使用した。

2.3 補修モルタル

補修モルタルは体積抵抗率が異なる市販の4種類の材料を使用した。補修材 I は充填用として II~IV は左官用として使用されている。各材料の緒元と体積抵抗率の測定結果の推移を表-3, 図-3 に示す。体積抵抗率は JSCE-K562 の4電極



上面以外は全て塗装

図-1 供試体形状

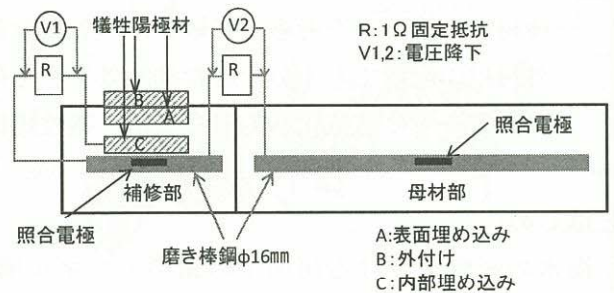


図-2 犠牲陽極材の配置概要

表-2 犠牲陽極材の種類

犠牲陽極材の種類	含有量 (wt%)
亜鉛+バックフィル材	Zn: 99.5~99.9
亜鉛	Zn: 99.5~99.9
アルミニウム合金	Zn: 2.0~5.0, Mg: 0.5~3.0, Al: 97.5~92.0

法によって測定した。体積抵抗率測定用の供試体は, 20°C, RH60%の恒温室内で養生した。表-3より圧縮強度は 26~52N/mm²を示す。図-3よりいずれの材料も経時的に体積抵抗率は増加傾向を示す。材齢約 300 日後の補修材の体積抵抗率は, コンクリートの約 36kΩ・cm に対して体積抵抗 (低), (中-1), (中-2), (大) で約 201, 1234, 446 および 2419 kΩ・cm を示しコンクリートに比べて 5.6~67.2 倍程度高い。ポリマーが含まれず単位水量が多い充填用材料の体積抵抗率が最も

低い。

2.4 試験水準

試験水準を表-4に示す。No.1~18は表面埋め込み供試体とし、犠牲陽極材3種類、補修材料3種類について実施した。No.19~24は外付け供試体とし、犠牲陽極材は従来の亜鉛+バックフィル材の1種類、補修材料3種類とした。No.25,26はBLANKとして犠牲陽極材を配置せず、補修材は体積抵抗率(高)の1種類とした。No.27~30は内部埋め込み供試体とし、犠牲陽極材は亜鉛+バックフィル材の1種類、補修材料は体積抵抗率(高)と(中-2)の2種類とした。いずれも各水準2体ずつ作製した。

2.5 測定内容

供試体は35°C, RH90%一定とした腐食促進環境に約1年間設置し、犠牲陽極材からの防食電流量、復極量、陽極材電位を経時的に測定した。

犠牲陽極材からの防食電流は図-2に示す回路上に配置した1Ω固定抵抗間の電圧降下を1日/回程度の頻度で測定し防食電流量を求めた。V1から全防食電流量、V2から母材側鉄筋に流れる防食電流量、V1-V2から補修部鉄筋に流れる防食電流量を算出する。

復極量は補修部鉄筋と母材部鉄筋近傍に埋め込んだ二酸化マンガ電極を使用して回路接続中の電位 E_{on} 、回路開放直後の電位 E_{io} および回路開放24時間後の電位 E_{of24h} を測定して E_{io} と E_{of24h} の電位差から算出した。母材側の照合電極の設置位置は母材コンクリートの中央部である。同様に陽極材電位も埋め込んだ二酸化マンガ電極を使用した。

約1年後に供試体を割裂切断し、JCI-SC1に準じて鉄筋の腐食状態、腐食面積率および腐食減量を測定した。練り込み塩化物イオンのコンクリート打設後から促進環境下に設置するまで約56日間の供試体作製期間が生じた、この期間の母材部鉄筋の腐食率と腐食減量をNo.31~33の3体で確認した。

3. 実験結果

3.1 防食電流量

表-3 補修材料の緒元

材 料	圧縮強度 σ_{28d}	単位粉体量 (kg/m^3)	単位水量 (kg/m^3)	体積抵抗率	ポリマーの有無	用途
	(N/mm^2)					
コンクリート	30.2	—	—	—	—	—
I	51.8	1875	293	低	無	充填用
II	43.8	1750	255	中-1	有	左官用
III	26.3	1043	242	高		
IV	42.5	1260	244	中-2		

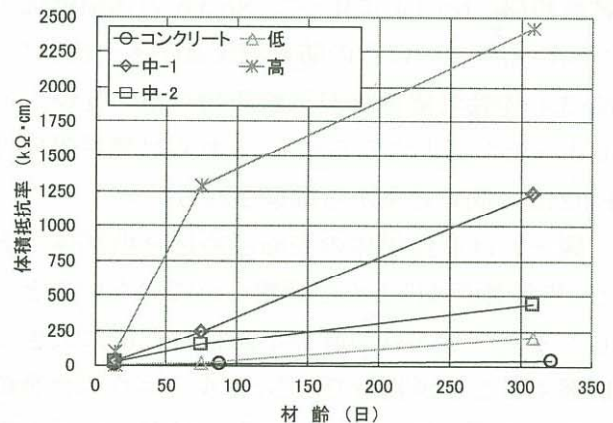


図-3 体積抵抗率の推移

表-4 試験水準

供試体番号	犠牲陽極材配置	犠牲陽極材種類	補修材の体積抵抗率
No.1,2	A: 表面埋込み	亜鉛+バックフィル材	低
No.3,4			(中-1)
No.5,6			高
No.7,8		亜鉛	低
No.9,10			(中-1)
No.11,12			高
No.13,14		アルミニウム合金	低
No.15,16			(中-1)
No.17,18			高
No.19,20	B: 外付け	亜鉛+バックフィル材	低
No.21,22			(中-1)
No.23,24			高
No.25,26	BLANK	—	高
No.27,28	C: 内部埋込み	亜鉛+バックフィル材	高
No.29,30			(中-2)
No.31~34	促進環境に設置するまでの鉄筋腐食量確認試験体(No.34はNo.31~33の3体の平均)		

図-4~7 に各水準の犠牲陽極材から母材部鉄筋に流れた防食電流量の推移を示す。プラス値は犠牲陽極材から鉄筋に向かって防食電流が流れていることを意味している。図-4 の表面埋め込み供試体では補修材の体積抵抗率が最も小さい No.1,2 の防食電流量が最も高い電流量を示しており約 0.3~0.4mA 程度に推移している。一方で試験初期, No.3,4 に比べて No.5,6 の体積抵抗率が高い補修材のほうの防食電流量が多く流れた。No.3,4 の犠牲陽極材が試験開始初期に乾燥してしまったためと考えられる。これらは犠牲陽極材 Eof24h の測定結果から推察される。

図-5 は亜鉛単体の表面埋め込み供試体である。防食電流はほとんど通電されていないことからバックフィル材の有無が陽極材性能に大きく影響することが判断できる。アルミニウム合金の結果もほぼ同様でバックフィル材が無いことから防食電流はほとんど供給されなかった。

図-6 は外付けの亜鉛+バックフィル材の防食電流量の推移である。試験初期はプラ BOX 内が湿潤状態であったため、他の水準に比べて高い防食電流が供給されていた。しかしながら約 2000h 程度になると吸水樹脂からの水分の蒸発や供試体への吸水のために吸水樹脂の空隙が発生し防食電流量が大幅に低下した。

図-7 は従来どおりの内部埋め込み供試体である。No.27,28 と No.29,30 では体積抵抗率が異なるものの母材コンクリート鉄筋に流れる防食電流量に大きな差異は見られない。

いずれの供試体も約 6000h を超えたところで防食電流量が一旦大きく低下しているが、これは恒温室の温度・湿度の制御が出来なくなり恒温室内の温度が 5~7℃まで低下したためである。

塩化物イオンを含む母材の鉄筋に防食電流量を多く通電させるためには、亜鉛+バックフィル材の従来の犠牲陽極材を使用し乾燥しない対策を施す必要がある。

3.2 電位測定

図-8,9 に No.1~6, No.7~12 の母材側鉄筋の E_{io} の推移を示す。いずれも E_{on} と同様に経時的

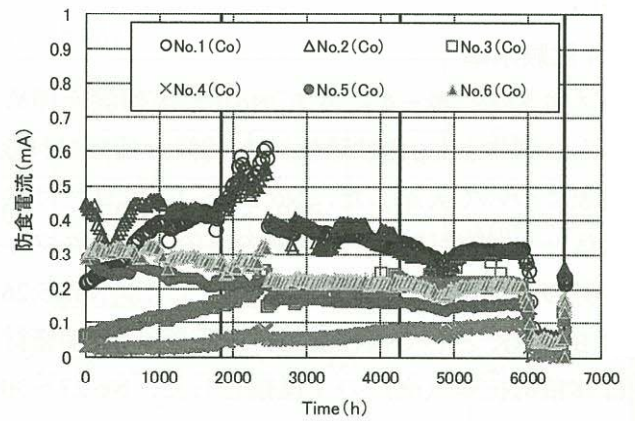


図-4 No. 1~6 の防食電流量

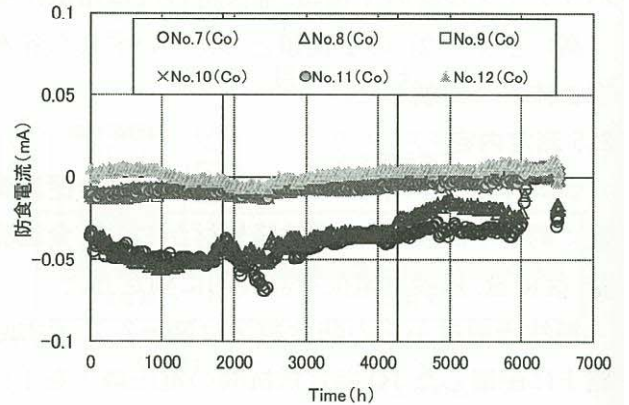


図-5 No. 7~12 の防食電流量

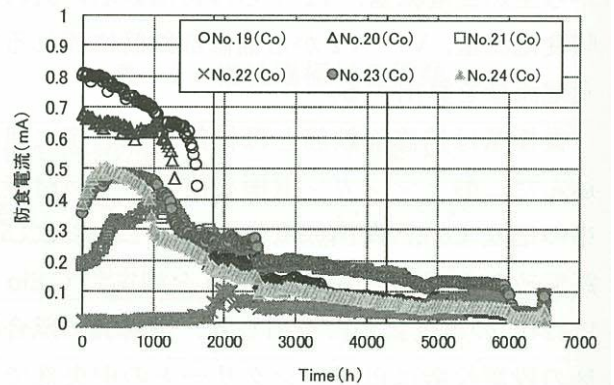


図-6 No. 19~24 の防食電流量

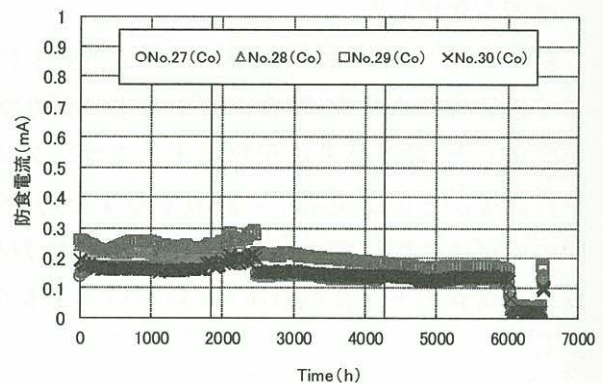


図-7 No. 27~30 の防食電流量

に少しずつ Eio が貴側に推移している。防食電流がほとんど流れていない No.7 ~12 の供試体でも Eio の貴化が進んでいることから、本試験での Eon , Eio の貴化は塩化物イオンの電気泳動や電気分解による pH の上昇などによる腐食環境改善効果ではなく補修材やコンクリートの乾燥による影響が大きいと考えられる。図-10 に No.1~6 の犠牲陽極材の Eof24h 後の推移を示す。図-10 より No.3,4 の犠牲陽極材の電位は -600mV vs CSE と試験開始から貴な電位を示した。これは供試体作製中に犠牲陽極材内部が乾燥したためと考えられる。その結果、防食電流量が試験当初から低下した。犠牲陽極材（亜鉛+バックフィル材）の初期電位は -1100~-1200mV (CSE) を示す。高いアルカリと湿潤環境によって亜鉛の酸化反応の活性度を保持している。そのため電位が貴側に変化しなければ犠牲陽極材としての性能は保持していると推察する。

図-11 に No.1~6 の母材鉄筋中心部の復極量の推移を示す。No.1,2 は試験全般的に安定して防食電流量が多いため補修部、母材部とも復極量が最も大きい値で推移した。母材鉄筋の中央部でも 75mV の復極量があり、電気防食基準の 100mV に近い値を示しており腐食速度の抑制効果があると考えられる。なお補修部鉄筋は塩化物イオンを含まないモルタルで覆われており鉄筋の分極抵抗が高いため低い電流量でも復極量は高くなる。

3.3 母材鉄筋の腐食面積率と腐食減量

図-12, 13 に母材部鉄筋の腐食面積率と腐食減量を図-14, 15 に No.2,26 の割裂直後の腐食写真を示す。No.31~33 は腐食試験開始前の腐食面積率と腐食減少量, No.34 は No.31~34 の平均値を示す。

図-12, 13 より表面埋め込み供試体で犠牲陽極材が亜鉛+バックフィル材の補修材体積抵抗が低の No.2 の鉄筋の防食状態が最も良好である。これは No.31~34 の腐食促進試験開始前の状態からほとんど進行していない状態と考えられる。防食電流量や復極量の防食効果の結果と概ね一

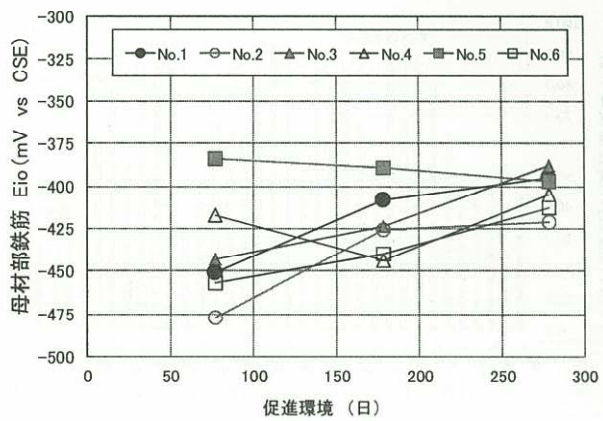


図-8 No. 1~6 の Eio の推移

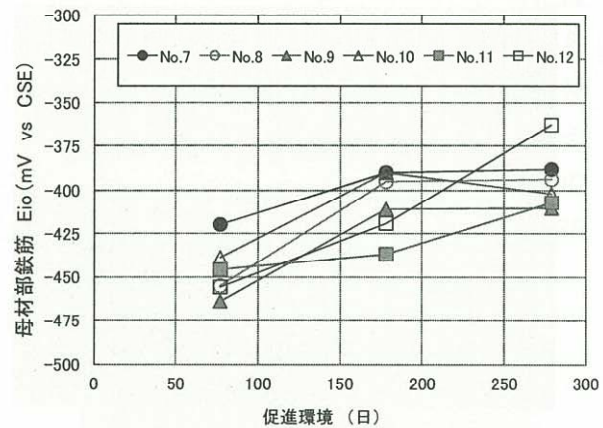


図-9 No. 7~12 の Eio の推移

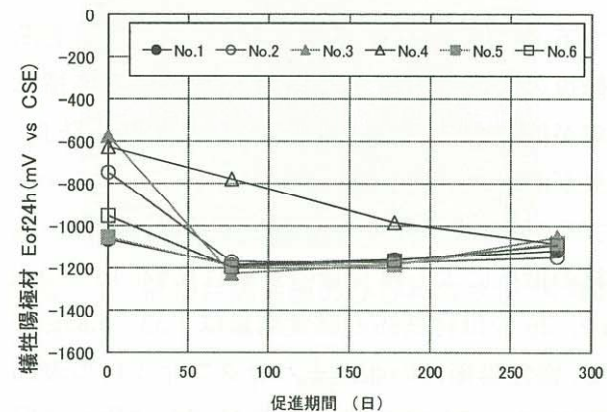


図-10 No. 1~6 の犠牲陽極材の Eof24h の推移

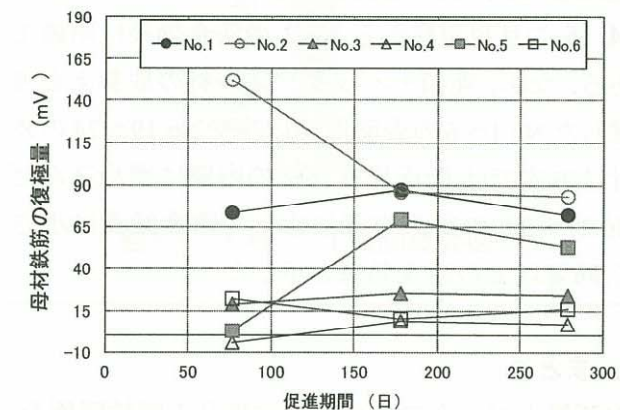


図-11 No. 1~6 の復極量の推移

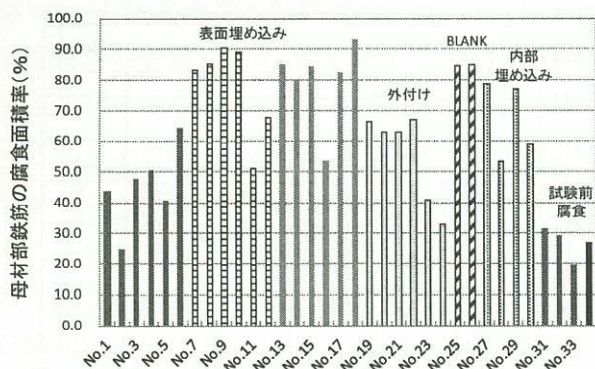


図-12 母材部鉄筋の腐食面積率

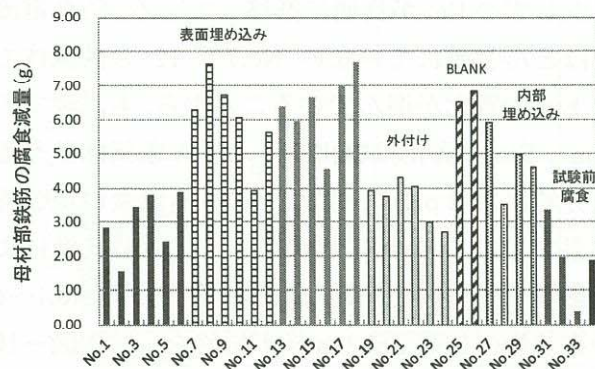


図-13 母材部鉄筋の腐食減量

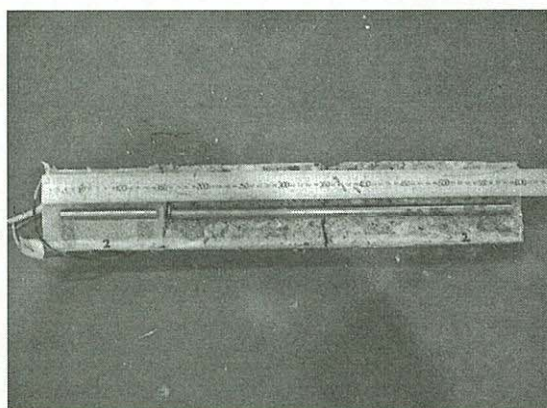


図-14 No. 2 供試体の腐食状態

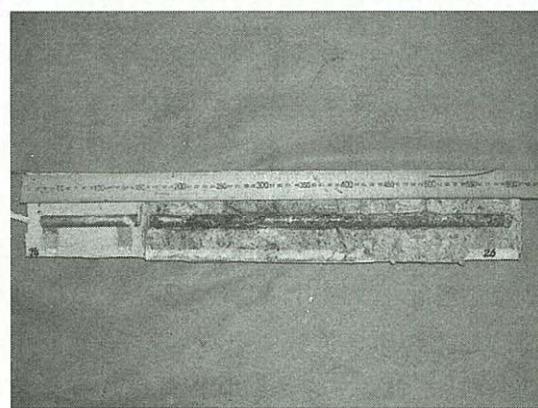


図-15 No. 26 供試体の腐食状態

致する。犠牲陽極材の亜鉛+バックフィル材を断面修復の表面に設置する場合は、補修材の体積抵抗率が低いものが母材側鉄筋に対して最も防食効果が高い。犠牲陽極材の亜鉛+バックフィル材をプラBOXを使用して配置した外付けでは、補修材の抵抗による腐食量の差異は比較的小さい。No.2, 26の母材鉄筋の腐食減量は1.53, 6.85gである。犠牲陽極材の亜鉛+バックフィル材の表面埋設No.2はBLANK供試体のNo.26に比べて腐食減量は約1/5程度まで低下している。図-14, 15の目視観察からNo.2の防食効果は明確である。なお、亜鉛+バックフィル材の取替えを考慮したNo.1~6の表面埋め込みやNo.19~24の外付け方式では、断面修復部材の内部に埋め込んだNo.27~30の従来方式に比べて腐食減量は小さく、同等以上の防食効果を示した。

4. まとめ

(1)亜鉛+バックフィル材の従来品の犠牲陽極を

使用し且つ取替えを考慮した表面埋め込み方式が最も高い腐食抑制効果を示した。

(2)犠牲陽極材を断面修復材表面に設置する場合、母材鉄筋に防食電流を多く供給させるためには体積抵抗率の低い補修材を使用し、犠牲陽極材の乾燥し難い対策が必要である。

(3)取替性を考慮した外付けの犠牲陽極は、乾燥を防ぐことが出来れば安定した防食電流量を供給する。

参考文献

- 1) 山本努, 武藤義彦, 小椋紀彦, 葛目和宏, 大即信明: 地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第11巻, 2011.10
- 2) 松久保博敬, 真下昌章, 芦田公伸, 審良善和, 濱田秀則: 海洋環境下における犠牲陽極材料の腐食抑制効果, コンクリート構造物の長期性能支援モデルに関するシンポジウム, 2004.10