

論文

地下鉄トンネルを対象とした塩害対策工の検討

武藤 義彦^{*1}, 大泉 政彦^{*2}, 諸橋 由治^{*3}, 葛目 和宏^{*4}, 大即 信明^{*5}

Study on the Effective Protection Method Against Chloride Attack in the Subway Tunnel

Yoshihiko MUTOU^{*1}, Masahiko OIZUMI^{*2}, Yuji MOROHASHI^{*3},
Kazuhiro KUZUME^{*4} and Nobuaki OTSUKI^{*5}

要旨：東京メトロの河川下のトンネルでは、特に感潮河川下において漏水中の塩化物イオン濃度が高く、塩害劣化の兆候が見られる区間が幾つか存在する。そのような区間では、過去に断面修復した個所の一部で、著しいマクロセル腐食が認められた。そこで塩害劣化に対して抜本的な対策工法を検討すべく、現地試験施工および室内試験を行った。その結果、地下鉄トンネルでの環境・施工条件を考慮した場合、表面含浸材が塩化物イオンのさらなる浸透抑制の効果を有すること、および犠牲陽極材と低電気抵抗率と超速硬性を有するPCMの組合せが効果を示すことを確認した。また、地下鉄トンネルにおける犠牲陽極材の防食効果の持続性は概ね10年程度と推測される。

キーワード：地下鉄トンネル、塩害対策、犠牲陽極材、表面含浸材、断面修復材

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、「東京メトロ」）は現在9路線、約195kmの構造物を維持管理しており、そのうちの約80%がトンネルである。トンネルのコンクリートにおいては、特に感潮域河川下において漏水中の塩化物イオン濃度が高いため、塩害による劣化を生じている箇所が存在する。現状では変状が認められない箇所も含めて適切な維持管理を行っていくため、東京メトロでは、中長期的な予防保全対策を検討することとし、現地調査及び各種測定結果に基づいて東京メトロにおける塩害発生メカニズムをとりまとめ報告した¹⁾。劣化を生じた箇所は、逐次補修対策を実施しているが、漏水に起因する塩化物イオン量が多いこと

から、表面被覆材の膨れや割れが生じ、一部の断面修復箇所では著しいマクロセル腐食が認められる。今回、抜本的な効果が期待できる工法として、電気防食工法と断面修復工法を組合せた工法に着目し検討を行った。電気防食工法として実績の多い外部電源方式は、迷走電流が生じ信号系統に悪影響を及ぼすことが懸念されるため、電気施設の多い地下鉄トンネル内への適用は難しいと判断し、犠牲陽極方式を検討対象とした。

2. 地下鉄環境下における電気防食工の効果確認

地下鉄トンネルにおいては、漏水付近のみが湿潤状態である。そこで漏水箇所の近傍と、漏水箇所から離れた位置に犠牲陽極材を埋設し、防食電

*1 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 部長

*2 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 構造物担当課長

*3 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 土木課技術基準担当

*4 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長

*5 東京工業大学大学院 理工学研究科 国際開発工学専攻 教授

流の影響を比較検討した。犠牲陽極材を用いた実証試験の施工範囲の大きさは $500 \times 500\text{mm}$ 程度で、犠牲陽極材を各箇所で 2 個設置した。断面修復箇所および周囲の電位を追跡測定するために、コンクリート内部に埋込み型照合電極をセットした。

犠牲陽極材の防食電流量の測定結果を図-1 に示す。防食電流は一部で高い値を示したが、それ以外ではそれほど変化せず、 $1 \sim 12 \text{ mA/m}^2$ 程度の値を示している。電気化学的防食工法設計施工指針(案)には、「犠牲陽極方式の必要防食電流は環境や鋼材の腐食程度によって変わり、通常 $1 \sim 30 \text{ mA/m}^2$ (コンクリート面積あたり) 程度である」と述べられていることから、犠牲陽極材による防食は効果的に作用していると考えられる。

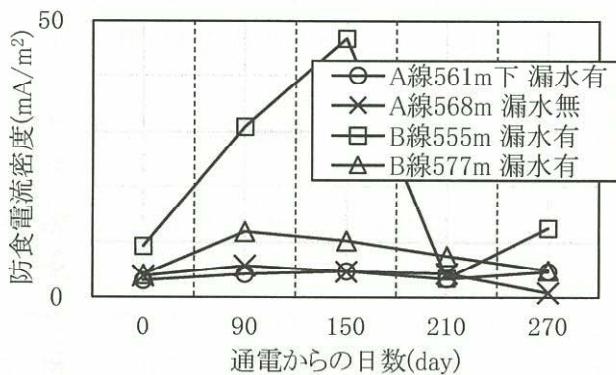


図-1 防食電流密度の推移

照合電極の復極量を図-2 に示す。9 ヶ月間における測定値は、測定時期によりばらつきが見られ、外部電源方式の復極量の目安の基準値とされている 100mV 以上を示す箇所もあるが、現時点では一定の傾向は認められない。既往の報告²⁾によると、橋脚に犠牲陽極材を埋設して 10 年間モニターした場合の復極量は、犠牲陽極設置直後は低かったが 9 年後には 100mV に近づくかまたは超えたこと、その間における劣化が無かつたことが報告され、 100mV の復極基準を初期の頃に適用することは実用的でなく、これに代わる基準の設定の必要性も述べている。この点を踏まえ、長期的な復極量のモニタリングが必要と考える。

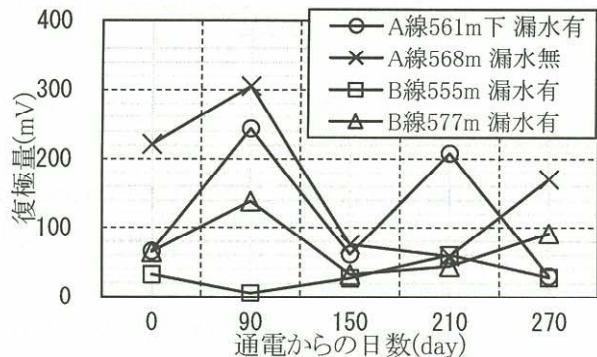


図-2 復極量の推移

分極抵抗から求めた腐食電流密度測定結果を図-3 に示す。初期値とその後の測定値を比較すると、腐食電流密度は一部高い値を示す箇所も見られるが、全体としてほぼ同程度の値を示している。わずかに認められる変化は、コンクリートの含水率、酸素の供給状況、温度等の影響と考えられ、鉄筋腐食が進行している状態ではないと考えられる。

以上から、メトロ環境下において、埋設型犠牲陽極材の防食効果は期待できるものと判断した。

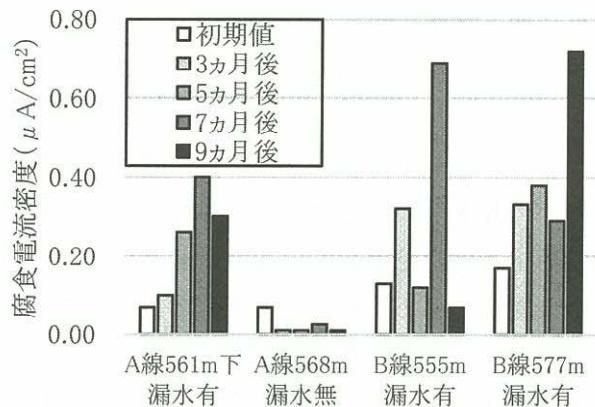


図-3 腐食電流密度測定結果

3. 塩害対策用補修工法

地下鉄トンネルにおいても犠牲陽極材による防食効果が期待できることが確認できたので、地下鉄トンネル特有の環境条件(作業時間、施工性等)下で、十分な効果が期待できる可能性の高い塩害対策工として、表面含浸工法、断面修復工法、電気防食工法(犠牲陽極方式)の 3 工法を選定した。

これらの3工法の使用材料の性能や効果、および組合せによる相互効果を検討するために室内試験を実施した。

3.1 表面含浸工法の材料選定および評価

表面含浸工法に用いるシラン系材料は、撥水効果を持ち塩化物イオンの浸透を防ぐ反面、水蒸気の透過逸散性も良好であり、表面被覆材に比べ施工性・作業性が優れている。今回の試験では、代表的な表-1に示す2種類を選定した。

表-1 試験に用いた表面含浸材

種類	主成分	主成分濃度
液状	アルキルトリアルコキシラン	95%以上
クリーム状	アルキルトリアルコキシラン 反応性ポリシロキサン	80%

含浸材の含浸深さおよび塩化物イオン浸透深さの測定は、土木学会規準JSCE-K571に準拠して行い、試験体の形状は100×100×100mmとした。

塗布対象とする試験体は、表-2に示す箱型トンネルに使用されている普通コンクリート(W/C=53%)、現在断面修復に使用されているポリマーセメントモルタル(以下「現行PCM」)および、電気防食工法への適合を目的に開発された速硬性でかつ低電気抵抗率のポリマーセメントモルタル(以下「低抵抗PCM」)の3種類とした。

表-2 表面含浸材の評価に用いた試験体

種類	組成等	備考
普通コンクリート	箱型トンネル用 標準配合コンクリート	W/C53%
現行PCM	軽量PCM	アクリル樹脂エマルジョン 使用
低抵抗PCM	粉末樹脂、短纖維 [®] レミックスPCM	低電気抵抗率 超速硬性

(1) 含浸深さ試験結果

JSCE-K571による試験の結果を図-4に示した。液状とクリーム状の2種類の含浸材を比較すると、前者の方が母材への浸透が深い傾向が認められた。含浸材を一定として母材コンクリートの種類に着目して比較すると、「普通コンクリート」と「現行PCM」の含浸深さは、それぞれ同程度であるのに対し、「低抵抗PCM」では、その半分程度の含浸深さであり、「低抵抗PCM」が最も緻密性が高いと考えられる結果である。

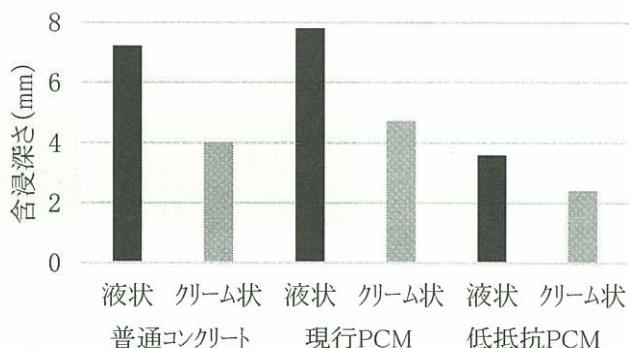


図-4 含浸材試験結果

(2) 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験結果

含浸材を塗布した場合の塩化物イオン浸透状況を、EPMAにより測定した結果を図-5に示す。普通コンクリートおよび「現行PCM」に含浸材(液状、クリーム状)を使用すれば、表面から5mmから10mmの範囲で塩化物イオンの浸透が抑制されている。この結果から、従来、「現行PCM」を用いた補修対応を行ってきた箇所に関しては、含浸材を塗布することで新たな塩化物イオンの浸透を抑制する効果が得られると考える。「低抵抗PCM」に塗布した場合は、含浸材塗布の有無・種類に係わらず塩化物イオンの浸透は同程度という結果であるが、いずれも深さ10mm程度まで抑制されている。含浸材を塗布しない場合でも塩化物イオンの浸透抑制効果を得られることから経済的な効果が大きい。

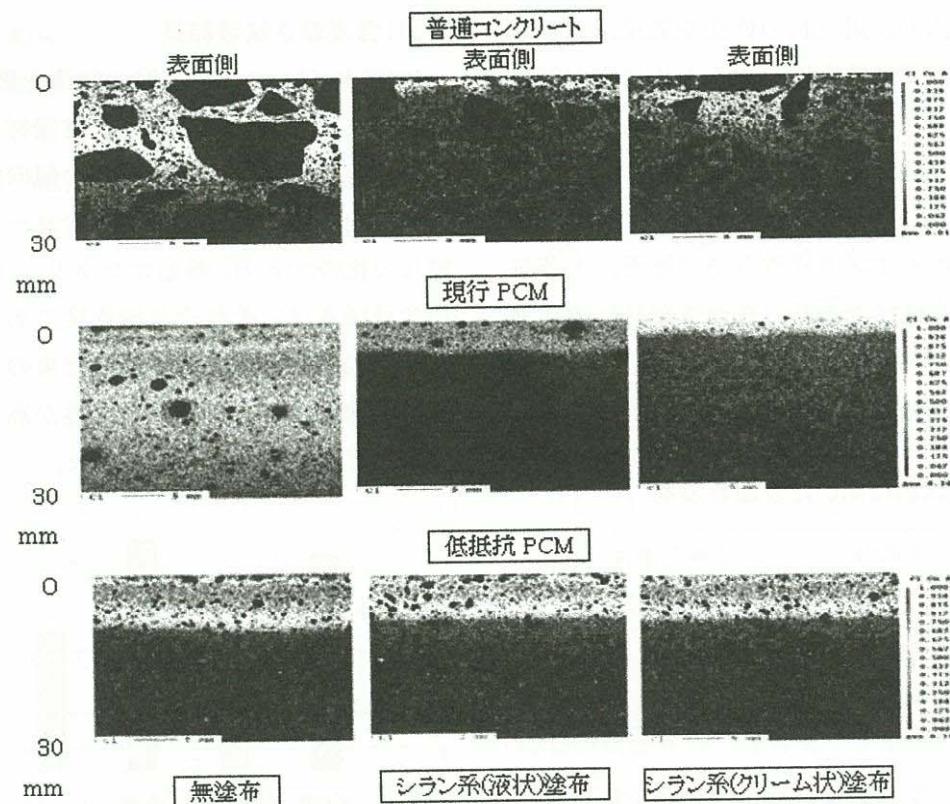


図-5 EPMA測定による含浸材塗布時の塩化物イオン浸透状況

表-3 犠牲陽極材、鉄筋防鏽材および断面修復材の組成

	種類	組成等	備考
犠牲陽極材	犠大	亜鉛 160g、パックフィル材(水酸化リチウム)	
	犠中	亜鉛 85g、パックフィル材(水酸化リチウム)	
	犠小	亜鉛 38g、パックフィル材(臭化リチウム、硝酸リチウム)	
鉄筋防鏽材	鉄筋防鏽ペースト	亜硝酸型ハイドロカルマット含有	添加率 20%以上
	鉄筋防鏽モルタル	亜硝酸型ハイドロカルマット含有	添加率 15%以上
断面修復材	現行 PCM	アクリル樹脂エマルジョン含有軽量PCM	
	低抵抗 PCM	粉末樹脂、短纖維プレミックスPCM	低電気抵抗率、超速硬性
	塩分吸着 PCM	亜硝酸型ハイドロカルマット含有PCM	添加率1%以上

3.2 断面修復工法、電気防食工法(犠牲陽極材)の

材料選定および試験

(1) 試験方法

塩害対策用として断面修復工法および電気防食工法の各材料に関し、効果的な補修材の組み合わせを確認するため、表-3に示す犠牲陽極材、鉄筋防鏽材および断面修復材を使用し、表-4に示す試

験条件の組合せを設定した。犠牲陽極材は亜鉛量およびパックフィル材組成の異なる3種類、鉄筋防鏽材として塩分吸着剤を含有するペーストおよびモルタル、断面修復材は表-2に示した「現行PCM」、「低抵抗PCM」および塩分吸着型ポリマーセメントモルタル(以下「塩分吸着PCM」)の3種類を用い、試験体は各水準で2体作成した。

表-4 試験条件の設定

	犠牲陽極材	鉄筋防錆材	断面修復材
①			現行 PCM
②		防錆ペースト	現行 PCM
③	犠中		現行 PCM
④	犠小		低抵抗 PCM
⑤	犠中		低抵抗 PCM
⑥	犠大		低抵抗 PCM
⑦	犠小	防錆ペースト	低抵抗 PCM
⑧	犠大	防錆ペースト	低抵抗 PCM
⑨		防錆モルタル	塩分吸着型 PCM

試験体の概要を図-6に示す。鉄筋は $\phi 16$ と $\phi 19$ の磨き丸鋼を用い、実構造物中における鉄筋量に近似させるように配筋状況を設定した。

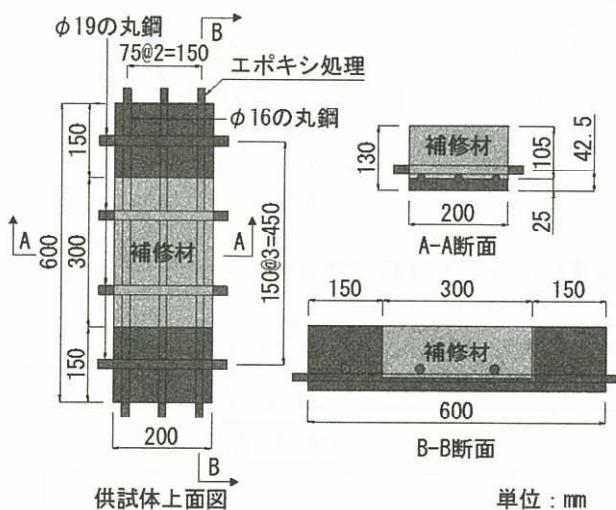


図-6 試験体の概要

図-6で「補修材」と示した部分が補修材を施工する箇所である。最初にそれ以外の箇所に塩化物イオンを $10\text{kg}/\text{m}^3$ 混入した水セメント比53%の普通セメントコンクリートを打設し、約1ヶ月気中養生して鉄筋を発錆させた後、各種補修方法を適用した。錆の除去は行っていない。補修材硬化後、外

部からの腐食要因の影響を排除するため試験体側面をエポキシ樹脂で被覆した。試験体は、温湿度調整を行わない屋内にて塩水噴霧（濃度 $30\text{gNaCl}/\ell$, 35°C ）4時間・自然乾燥8時間サイクルの促進条件に置き、この環境を81日間繰り返した。以降、屋内静置とした。

(2) 測定結果

犠牲陽極材および断面修復材を組み合わせた場合の鉄筋腐食抑制効果を発生電流と鉄筋の発錆状況（発錆面積率、質量減少率）に着目して行った。発生電流量の測定位置を図-7に示す。電流量の測定は、鉄筋と犠牲陽極材をコンクリートの外部でリード線を用いて接続し、リード線の間に 10Ω のシャント抵抗を固定し、抵抗間の電圧を電圧計により測定することにより行った。

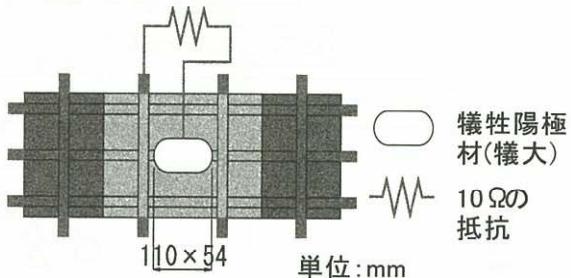


図-7 通電電流量の測定位置

鉄筋の発錆状況は、通電材齢12ヶ月において、日本コンクリート工学会基準（案）「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」（JCI-SC1）にしたがって試験を行い、下式により発錆面積率と質量減少率を求めた。

$$\text{発錆面積率} (\%) = (\text{鉄筋の腐食面積}) / (\text{鉄筋表面積}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{質量減少率} (\%) = \{(\text{腐食前鉄筋質量} - \text{除錆後鉄筋質量}) / (\text{腐食前鉄筋質量})\} \times 100 \quad (2)$$

補修施工を実施する前の鉄筋の腐食状態は、図-8および図-9で初期値として示したものであり、発錆面積率43~59%，腐食による質量減少率0.18~0.44%であった。

断面修復材として「現行PCM」を用いた場合の結果を図-8に示す。既存コンクリート部では、適

用した3種類の補修方法いずれの場合も鉄筋の腐食が進行しており、発錆面積率80～100%、質量減少率では1.0～1.6%である。一方、補修部では、「現行PCM」単独および犠牲陽極材「犠中」を用いた場合に腐食が進行しているのに対し、防錆ペーストによる防食効果が高く、良好な結果を示した。

図-9は断面修復材として「低抵抗PCM」を用いた場合の結果である。既存コンクリート部では鉄筋腐食の進行が抑制されておらず、発錆面積率70～100%、質量減少率0.6～2.0%に達している。犠牲陽極材に着目すると、「犠中」と「犠大」の質量減少率が1.5～2.0%であり、「犠小」の場合よりも1%程度大きな値である。「犠中」と「犠大」はマクロセル腐食による鉄筋腐食が「犠小」の場

合よりも著しいと考えられる。犠牲陽極材として「犠小」を用いた場合の鉄筋腐食抑制効果が、「犠中」・「犠大」よりも優れたのは、構成材である亜鉛の量とバックフィル材組成が相互に影響しているものと推察される。

犠牲陽極材と防錆ペーストを組み合わせた場合、犠牲陽極材単独の場合と比較すると発錆面積率もしくは質量減少率が小さな値となっており防錆ペーストの効果が認められる。防錆ペースト・モルタルを使用した3条件の結果(⑦,⑧,⑨)から塩分吸着PCMと犠牲陽極材の効果を検討すると、塩分吸着PCMは発錆面積率がやや大きいものの、質量減少率は半分程度(1.0%→0.5%)の値である。

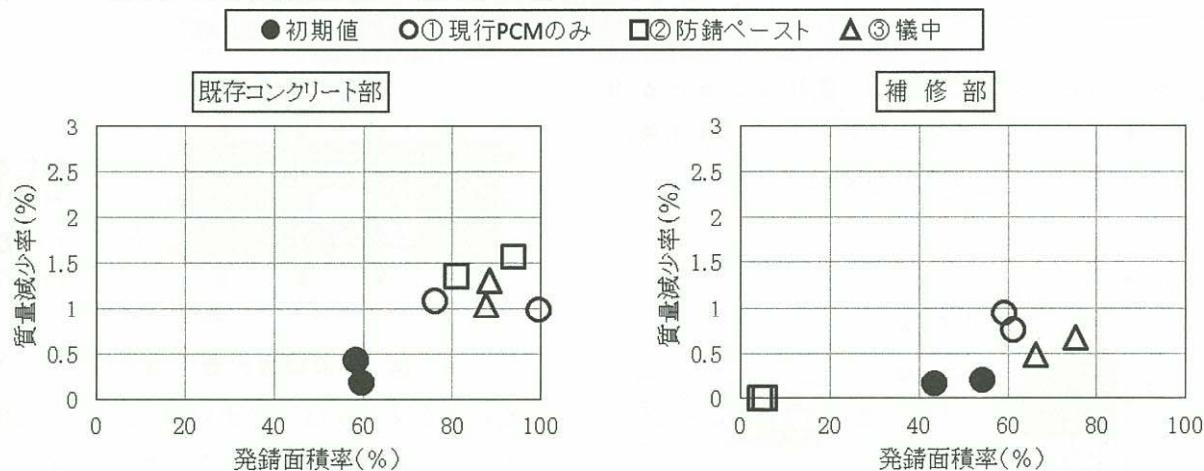


図-8 「現行PCM」で断面修復した場合の鉄筋腐食量

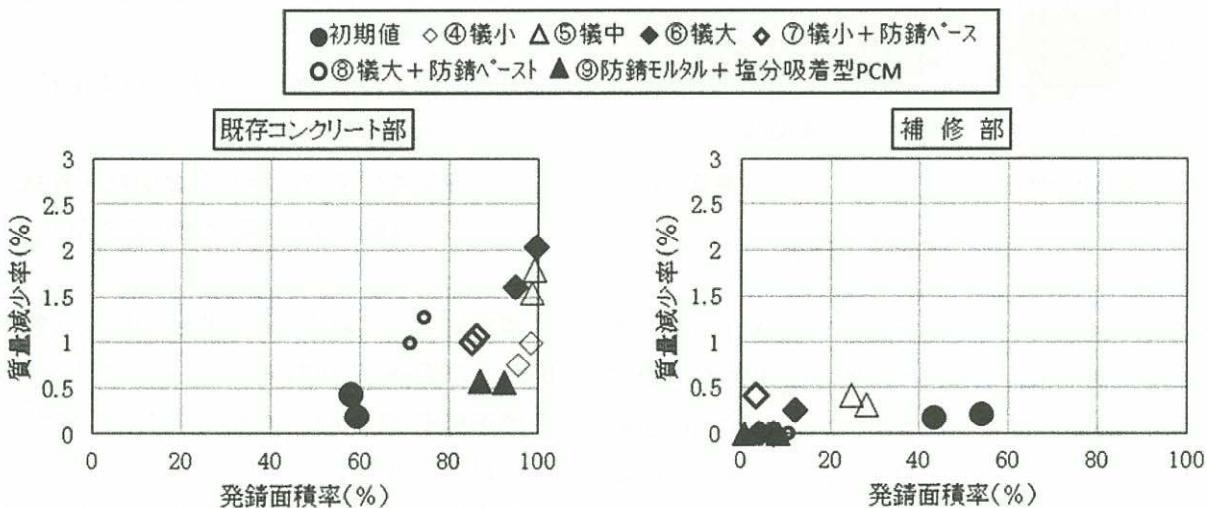


図-9 「低抵抗PCM」で断面修復した場合の鉄筋腐食量

一方、補修部での結果を見ると、今回実施したいずれの補修条件とも鉄筋の腐食率は低減されている。犠牲陽極材の比較では「犠中」の抑制効果が「犠小」と「犠大」に比べてやや低く、亜鉛量との相関は認められない。断面修復材の種類に着目すると、図-8と図-9における「犠中」の結果の比較から、「現行PCM」よりも「低抵抗PCM」の方がよ

り防食効果が大きいと判断される。

「低抵抗PCM」で断面修復した場合の発生電流量の経時変化を図-10に示す。犠牲陽極材の種類で比較すると、亜鉛量が多くなると発生電流量が多くなる傾向が認められる。また防錆ペーストと組み合わせた場合も、犠牲陽極材を単独で用いた場合と同程度の発生電流量が認められる。

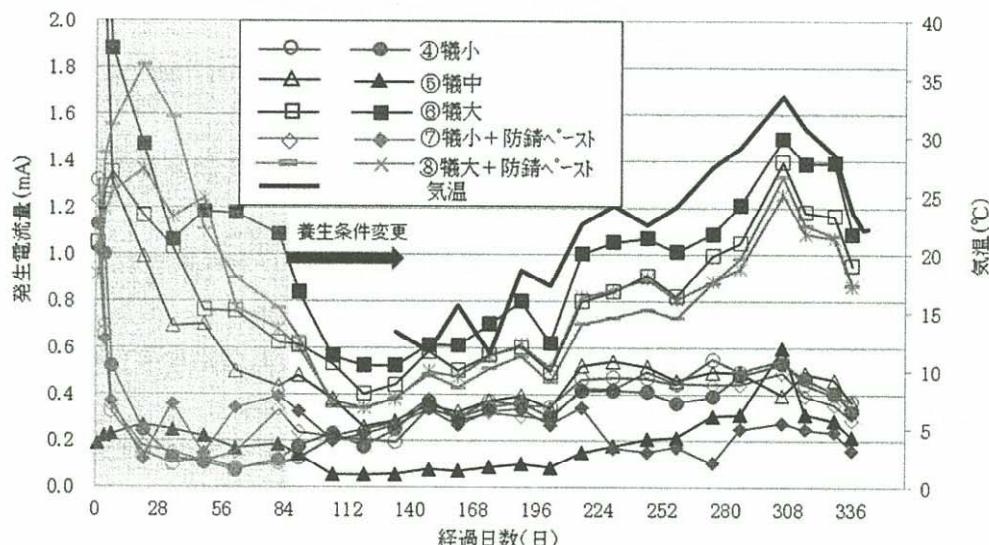


図-10 「低抵抗PCM」で断面修復した場合の発生電流量

表-5 解体試験とフーラデーの法則から求めた犠牲陽極材中の亜鉛の質量減少量・率の比較

	解体試験		フーラデーの法則		
	質量減少量 (g)	質量減少率 (%)	積算電流量 (A/h)	質量減少量 (g)	質量減少率 (%)
③犠中・現行PCM	14.71	15.48	3.40	4.18	4.40
④犠小・低抵抗PCM	7.87	20.66	2.63	3.24	8.50
⑤犠中・低抵抗PCM	16.09	16.94	4.08	5.02	5.28
⑥犠大・低抵抗PCM	20.35	11.83	8.19	10.08	5.86
⑦犠小・防錆ペースト・低抵抗PCM	11.52	30.24	2.67	3.28	8.62
⑧犠大・防錆ペースト・低抵抗PCM	15.03	8.74	6.67	8.20	4.77

犠牲陽極材の効果持続に関する検討結果を表-5と図-11に示す。表-5は、各犠牲陽極材を解体し亜鉛の質量測定した結果と、フーラデーの法則に基づく亜鉛の理論質量減少量を算出した結果を比較したものであり、図-11は各犠牲陽極材から発生した積算電流の経時変化を示したものである。

表-5に示したように、積算電流量が大きい犠牲陽極材ほど、解体により得られた亜鉛の質量減少量が大きくなる相関関係が認められ、質量減少率に換算すると8~30%と比較的大きな値であった。犠牲陽極は通電初期において発生電流量が大きくなることが知られており、このことが試験期間1

年での質量減少率が大きくなつた原因と考えられる。また、解体試験による犠牲陽極材の実測質量減少量と積算電流量を基にファラデーの法則から求めた理論的な質量減少量は一致せず、実測値は理論値の概ね2~3倍の値になった。ファラデーの法則が理論値であること、発生電流量の測定が2週間に1度であることにより乖離したものと考えられる。

犠牲陽極材の効果持続期間を亜鉛の質量減少率をもとに検討した。試験期間1年での解体試験による質量減少率が12~21%、ファラデー則では5~9%であるので、これらの値から亜鉛が100%減量する期間を求めるとき、解体試験結果では5~8年、積算電流値結果では11~20年となる。したがって、犠牲陽極材の効果は10年程度持続するものと推測される。ただし、これに関してはさらなる検証が必要である。

4.まとめ

地下鉄トンネルにおける塩害再劣化箇所の抜本的な対策工法として、電気防食工法と断面修復工法を組合せた工法に着目し、現地試験施工および室内試験を実施した結果、以下の成果が得られた。

- (1) 地下鉄トンネルにおいて犠牲陽極材の試験施工を実施し、防食効果が得られることを確認した。既存コンクリート部におけるマクロセル腐食対策としては、室内試験の結果から、犠牲陽極材として「犠小」を使用すれば、防食効果はより高まる結果であった。
- (2) 地下鉄トンネルの環境条件、施工条件を考慮した場合、表面含浸材は塩化物イオンのさらなる浸透を抑制する効果を有することを確認した。

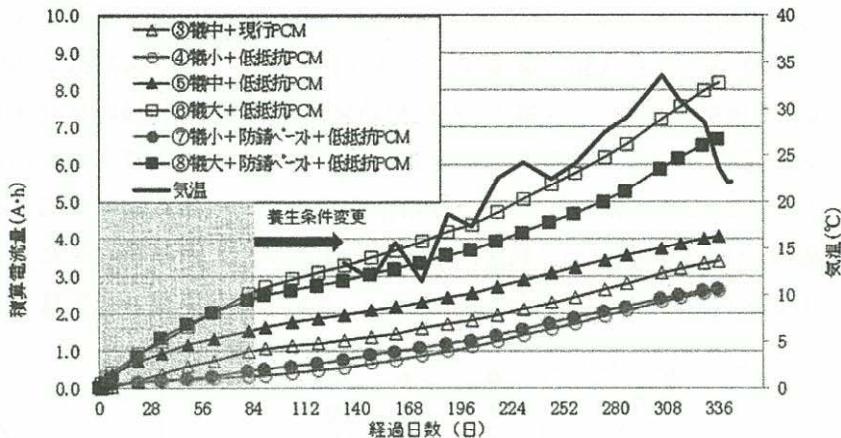


図-11 犠牲陽極材から発生した積算電流量

(3) 犠牲陽極材および断面修復材の組合せに関しては、小型犠牲陽極材と、低電気抵抗率と超速硬性を有するPCMの組合せが鉄筋腐食の進行抑制に効果的である。

(4) 犠牲陽極材の防食効果の持続性は、室内試験の結果からは、概ね10年程度と推測される。今後、モニタリング調査を実施し、効果持続期間を検証する。

謝辞

本調査・検討にあたっては東京大学岸利治教授、石田哲也教授はじめ、多くの関係者の方々に多大なるご指導ご協力を賜りました。心より感謝申し上げます。

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、pp. 147-154、2011. 10
- 2) George Sergu, : Ten year results of galvanic sacrificial anodes in steel reinforced concrete, EURCORR 2009, September