

地下鉄トンネルの塩害対策補修工法で用いる犠牲陽極材について

(株)メトロレールファシリティーズ 正会員 ○篠原秀明 非会員 中嶋朝斐
 非会員 篠原大補 非会員 谷田剛史
 東京地下鉄(株) 正会員 諸橋由治
 (株)CORE技術研究所 正会員 小椋紀彦
 住友大阪セメント(株) 正会員 鹿島篤志

1. はじめに

東京地下鉄(株)(以下、東京メトロという)では、現在塩害対策の補修方法として、犠牲陽極材と表面含浸材を組み合わせた対策を実施しており、それと同時にその防食効果および耐久性の持続効果について継続的にモニタリング調査を実施している¹⁾。

当初、塩害対策の補修方法で使用する犠牲陽極材の耐用年数は概ね10年と考えていたが、塩害が厳しい環境下では想定以上に亜鉛が消耗することが判明した(図-1)。そのため、今後の維持管理を考慮し、従来通りの施工効率を確保しつつ、より長期に渡り防食効果を保持することが可能な犠牲陽極材を検討することとした。

本稿では、現行品と新たに改良された犠牲陽極材(以下、改良品という)との比較検討結果を報告する。

2. モニタリング結果からの課題

塩害補修を行っているトンネル内の塩分を含んだ漏水が著しい区間は、亜鉛の減少量から犠牲陽極材の耐用年数は概ね8年程度であることがモニタリングによるはつり調査の結果から判明した²⁾。現行品の亜鉛量は38gであるが、持続性を長くする一つの解決方法として亜鉛量を大きくすることが考えられる。これにより、犠牲陽極材の効果持続時間が保持され、列車の安全・安定運行の根幹となるトンネル構造物の延命を図ることができる。そこでバックフィル材は同じもので亜鉛量が200gである新たな犠牲陽極材に着眼し、検討することとした(図-2・表-1)。

検討内容としては、犠牲陽極材の単位面積当たりの設置間隔および設置個数について実施した。

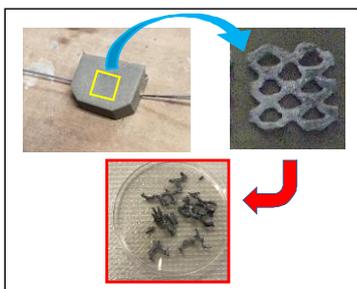


図-1 取り出した犠牲陽極材の亜鉛



図-2 犠牲陽極材

(左：現行品 38g, 右：改良品 200g)

表-1 犠牲陽極材の比較

種類	亜鉛量 (g)	寸法 (mm:厚×横×縦)	費用 (現行品を1とする)	バックフィル材
現行品	38	33×56×75以上	1	臭化リチウム、硝酸リチウムが添加されたモルタル
改良品	200	36×50×120以上	1.8	

3. 現行品の設置間隔と個数

現行品の設置間隔は下記の式を用いて決定し、1㎡当りに必要な設置個数は $1/S^2$ (個/㎡)で表すことができる。

$$\text{防食半径 } r(\text{m}) = \sqrt{1/(10 \times (\text{SSA}/\text{CSA}))}$$

$$\text{設置間隔 } S = r \times \sqrt{2}$$

※SSA(㎡)=コンクリート1㎡内の鉄筋表面積=主筋・配筋円周長×延長

CSA(㎡)=コンクリート面積(1㎡と想定)

計算から算出した補修範囲1㎡当りの鉄筋本数と鉄筋径による現行品の設置個数を示す(表-2)。なお、1㎡当りの設置個数が4個未満または5~8個の場合、補修範囲内に防食効果の範囲外となる箇所ができるため、各々4個または9個配置することとしている(図-3, 表-3)。これにより、既存の構築と補修部の界面で生じるマクロセル腐食に対する防食効果も期待できる。

キーワード 地下鉄トンネル, 塩害, 犠牲陽極材, モニタリング, 亜鉛量, バックフィル材

連絡先 〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町1-36-5 3F (株)メトロレールファシリティーズ TEL. 03-5643-9300

表-2 現行品の設置個数

本数(本) 径D(mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D6	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
D10	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
D13	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
D16	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
D19	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5
D22	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6
D25	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	6	6
D29	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
D32	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8

※赤字は1㎡当りの設置数が4個未満のもの、または5～8個のものを示す。

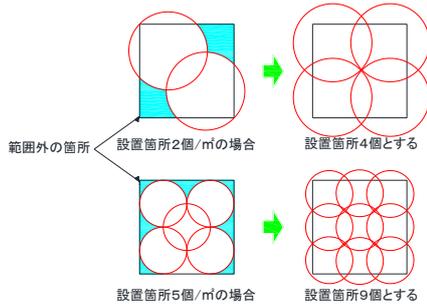


図-3 範囲外の箇所を考慮した配置図

表-3 範囲外の箇所を考慮した個数

本数(本) 径D(mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9
D22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9
D25	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9
D29	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9
D32	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9	9

※1㎡当りの設置数が4個未満のものは4個、5～8個のものは9個と示す。

4. 改良品の設置間隔と個数の検討

現行品の犠牲陽極材（亜鉛量 38g）の設置間隔については、コンクリート内の塩化物含有量に関係なく、鉄筋の諸条件から設置間隔と設置個数を決定する一般式しかなかった。現行品は実験結果等により、塩化物イオン濃度を考慮した新たな計算式が示されている(表-4)。これにより本来の目的である塩害による劣化度合いに見合った塩害対策補修が可能となる。

同じ条件で現行品に新たな計算式を適用した場合の設置個数を表-5 に示す。これは表-3 に示す一般式から算出された設置個数とほぼ同様であることが分かる。同様に、改良品に対して新たな計算式を適用した場合の設置個数を表-6 に示す。その結果、表-5 に示す新しい計算式から算出された現行品とほぼ同様の設置間隔と設置個数であることが分かった。さらに、現行品は塩化物含有量が 2.4～4.8kg/m³ の腐食を抑制するが、改良品は 4.8kg/m³ 以上の腐食を抑制することも分かった。

以上より、同じ設置間隔と設置個数でも改良品は高い塩化物イオン濃度の腐食を抑制することができ、高い防食効果が得られることから安全側をとり、改良品の犠牲陽極材を使用することとした。

表-4 塩化物イオン濃度を考慮した計算式

(コンクリート表面積：100cm×100cm)

種類	塩化物含有量	計算式
現行品	<2.4kg/m³	$X = -30.48 \times (a/A + b/B) + 91.44$
	2.4～4.8kg/m³	$X = -30.48 \times (a/A + b/B) + 76.20$
	>4.8kg/m³	$X = -30.48 \times (a/A + b/B) + 60.96$
改良品	<2.4kg/m³	$X = -38.1 \times (a/A + b/B) + 114.30$
	2.4～4.8kg/m³	$X = -38.1 \times (a/A + b/B) + 99.06$
	>4.8kg/m³	$X = -38.1 \times (a/A + b/B) + 83.82$

X：犠牲陽極の設置間隔(cm) A：縦筋の間隔(cm) B：横筋の間隔(cm)
 a：縦筋の公称周長(cm) b：横筋の公称周長(cm)
 ※最大設置間隔 $X_{max} \leq 75$ cm

表-5 新たな式による現行品の設置個数

本数(本) 径D(mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9
D22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9
D25	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9
D29	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9
D32	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9	9

(Cl⁻=2.4～4.8kg/m³) (個/㎡)

表-6 新たな式による改良品の設置個数

本数(本) 径D(mm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D13	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D16	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
D19	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9
D22	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9
D25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9
D29	4	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9
D32	4	4	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9	9

(Cl⁻>4.8kg/m³) (個/㎡)

5. まとめ

犠牲陽極材を亜鉛量 38g の現行品から亜鉛量 200g の改良品へ変更した場合でも、従来と同様の設置間隔と設置個数で、塩分濃度の多い箇所に対しても防食効果が得られることが分かった。

また、亜鉛量を大きくしたことで防食効果の持続性も期待できることから、今後は改良品への変更を行い防食効果の持続性や施工性についてトンネル内での検証を進めていきたい。

参考文献：

- 1) 武藤義彦, 新田裕樹, 小椋紀彦：地下鉄トンネルにおける塩害対策塩害対策工事の実施とモニタリング結果, コンクリート工学年次論文集 Vol.41, No.1, pp.779-784, 2019
- 2) 田口真澄, 諸橋由治, 瀬戸岳史, 篠原秀明, 米丸陸海, 小椋紀彦：地下鉄開削トンネルにおける塩害補修工法の防食効果持続性の検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-330, 令和元年