

報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策の効果確認と塩分吸着工法の検討

武藤 義彦*1・野本 一美*2・小椋 紀彦*3

要旨：地下鉄トンネルの塩害に対して通常の断面修復材による補修では再劣化することを確認し、塩害の原因となる漏水箇所への決定および犠牲陽極材と表面含浸材の補修方法による塩害対策工事を実施してきた。塩害補修箇所における外観目視、自然電位測定等に加えてはつり調査を行い、犠牲陽極材による塩害対策は効果があることを確認できたが、犠牲陽極材の効果時間については想定より短いことが分かった。さらに劣化部分における鉄筋背面のはつりを行わないことで施工性の向上を図れることから、塩分吸着工法について室内試験と現場試験施工を行っている。

キーワード：地下鉄トンネル, 再劣化率, 犠牲陽極材, モニタリング, 塩分吸着工法

1. はじめに

東京地下鉄(株)(以下、東京メトロという)は首都圏に9路線、195.1kmの営業線を運行し、首都東京の重要な交通機関である。トンネル等の土木構造物は重要な資産であり、維持管理については定期的な検査結果から補修に至るプロセスを確実に実施することによって安全を確保している。トンネルに発生する漏水および剥りコンクリート等のはく離・はく落に関しては補修を確実に実施してきた。

だが、隅田川のような感潮域河川の下を横断するトンネル等で発生しているコンクリートのはく離・はく落箇所では、通常の補修方法で施工した箇所において再劣化が発生していることが検査結果から判明した。漏水部分の調査を行い、漏水に含まれる塩分が原因となってトンネル内の表面から塩分がコンクリート内に浸透し、塩害が発生していることを解明した¹⁾²⁾。地下鉄トンネルの塩害に対する補修範囲および補修の施工方法を決定し、東京メトロのトンネルにおいて計画的に塩害対策工事を実施してきた³⁾。

本報告では、東京メトロにおいて通常の補修方法で行った箇所の再劣化状況、計画的に行った塩害対策工事の実績および補修箇所の効果を確認するモニタリングの結果、そして施工性を向上させるための課題に対する塩分吸着工法の検討結果について報告する。

2. 通常補修後の再劣化状況

2.1 補修箇所3区間の再劣化率

塩害対策工事を実施した中で補修箇所が多い3区間(表-1)を選定し、工事前における検査および補修等との相関関係について調査を行った。2009年に撮影したトンネル壁面の可視画像(写真-1)から通常による断面修

復等の補修箇所を抽出した。その補修箇所が今回の塩害対策工事で再び塩害補修を行ってれば再劣化したこととなる。

通常の補修方法(断面修復、止水工のみ)で施工した箇所のうち一部を除いて5割以上の割合で再劣化が発生し、塩害対策による断面補修を行っていることがわかった。箇所ごとにコンクリート中の塩分量の違いや補修後の漏水発生状況が異なることが影響していると考えられるが、塩分を含む漏水により鉄筋が腐食し、さらにコンクリート表面が劣化した箇所は通常の補修を行っても再劣化を繰り返す可能性が高いことがわかった。

表-1 通常の補修での再劣化率

路線名	駅間	河川名称	延長	通常による補修		塩害による断面修復(再劣化)	
				工法	箇所数	箇所数	再劣化率(%)
東西線	茅場町駅～門前仲町駅	亀島川	160	断面修復	85	60	71
				止水工のみ	30	17	57
	隅田川	320	断面修復	17	11	64	
			止水工のみ	4	1	25	
	大島川	130	断面修復	3	1	33	
			止水工のみ	7	4	57	

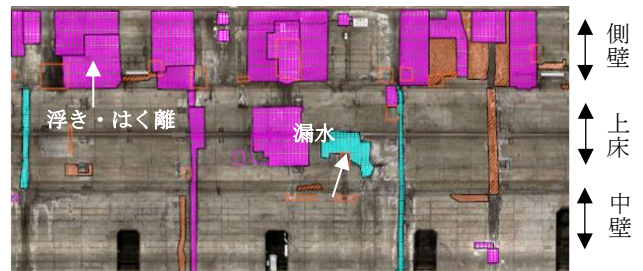


写真-1 可視画像データの一部

*1 (株)メトロレールファシリティーズ 工博 (正会員)
 *2 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部
 *3 (株)CORE技術研究所 技術部 工修 (正会員)

凡例：
 塩害補修の棒グラフ中に記載されている箇所
 (断面修復、止水工)は、2009年以前に補修してい
 る箇所を示している。
 新規は2009年可視画像にはなかったものである。

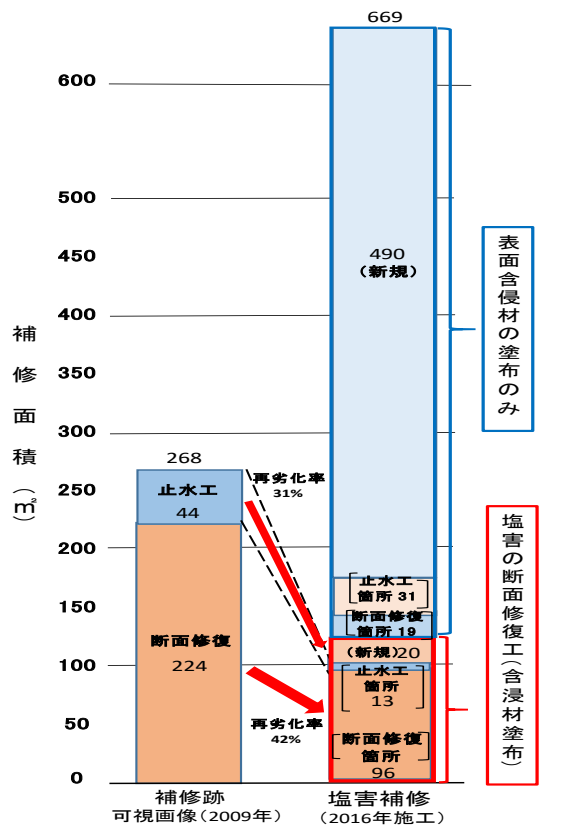
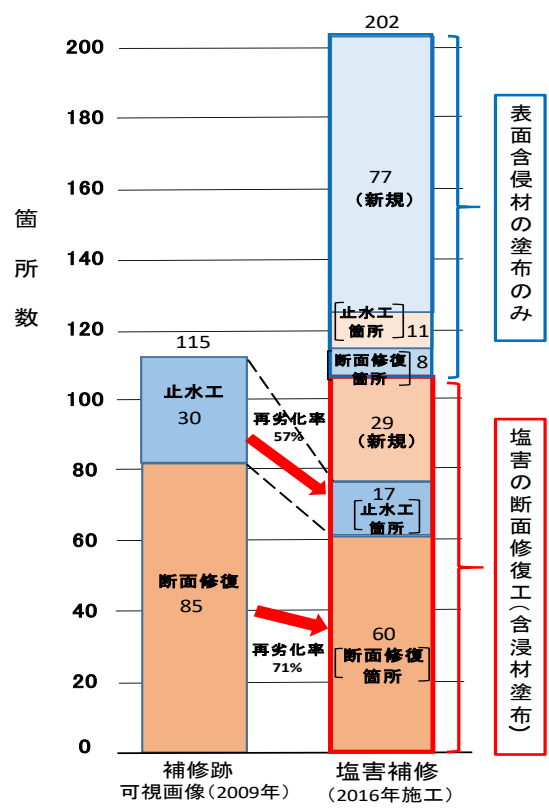


図-1 亀島川区間の補修再劣化率

2.2 亀島川区間の変状ごとの再劣化率

最も補修箇所が多い亀島川区間における劣化の状況をさらに詳細に見ることとした(図-1)。可視画像の調査および塩害対策における補修の箇所数に加え、補修を行った面積による比較を行った。補修跡における断面修復箇所は71%の割合で塩害対策の断面修復工を行っており、止水工箇所は57%しか塩害対策の断面修復工を行っていない。通常の断面修復箇所は塩害対策の断面修復を行う確率が高いことがわかるが、断面修復を行った面積を見ると再劣化率は42%であり、通常の断面修復で行ったすべての範囲は行っておらず、塩害対策の補修面積は抑えられていることがわかる。

また、塩害補修として新規に行う表面含浸材の塗布は多いが、補修後に新たに発生した漏水および漏水跡によって塩分がコンクリート表面に付着しており、これ以上の浸透を防ぐために予防保全として実施していることとなる。これらのことから、漏水が発生した時点で早めに止水工を行ってコンクリートの劣化を予防することと、トンネル築造時に漏水自体の発生をできる限り抑制することが構築の延命化につながると考えられる。

3. 塩害対策工事の実績

地下鉄トンネルでは塩分が含まれている漏水によって塩害が発生することから、感潮域河川下や沿岸部に位置するトンネル内の漏水箇所を塩害の補修範囲と考えた。硝酸銀溶液の噴霧(硝酸銀溶液噴霧法)で、白色に変色する箇所について塩害対策の補修を実施することとし、白色に変色したコンクリート面の劣化状況を確認するために打音検査を行う⁴⁾。濁音がある範囲は鉄筋腐食による被りコンクリートのはく離があることから、劣化部分の撤去、鉄筋のケレン、犠牲陽極材の設置(写真-2)、断面修復材による補修を行うこととした。打音検査で清音であるコンクリートの浮きがない箇所も含めて、最後にコンクリート表面に塩分の浸透を防ぐために表面含浸材の塗布を行う。

東京メトロでは予防保全の観点から2014~2019年に塩害対策工事を実施している。塩害対策工事を優先的に行う区間として感潮域河川下など漏水の塩分濃度が高い

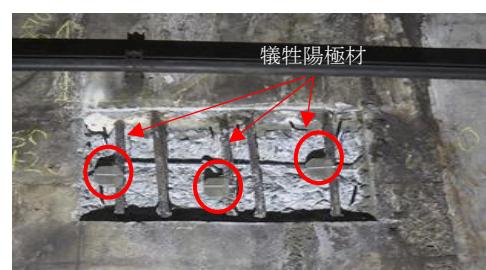


写真-2 犠牲陽極材の設置状況

トンネルを最優先とし、トンネルに防水工がない建設工法の区間を優先度 A とし、塩分濃度が高く、防水工が施されている建設工法の区間を優先度 B とした。

塩害対策工事の実績からトンネル側壁および上床部の犠牲陽極材と断面修復材による補修面積を 1m あたりで比較すると優先度 A の区間は 0.294m²、優先度 B は 0.127 m² となっており、表面含侵材の塗布を行った面積を 1m あたりで比較すると優先度 A の区間は 1.828 m²、優先度 B は 0.986 m² となっている (表-2)。この結果からも漏水の塩分濃度と防水工の有無を用いて行う塩害対策区間を決定する方法は、一般的にも使用することが可能であると考えられる。

表-2 優先度における補修面積

優先度	延長 (m)	断面補修面積 (m ² /m)	表面含侵材面積 (m ² /m)
A(6区間)	1412	0.294	1.828
B(4区間)	3428	0.127	0.986

4. モニタリングの結果

試験施工の箇所を含む塩害補修 14 箇所 (表-3) について、外観目視、自然電位、防食電流量、復極量の測定を年 1~2 回行っている。前回の報告³⁾でもモニタリング結果について報告を行い、外観目視では大きな劣化はなかったが、自然電位による鉄筋腐食の評価では -350mV より卑な値が多かった。防食電流量は 0.054~0.957mA の範囲、復極量は 24~100mV の範囲を推移した。

試験施工である隅田川の調査区間 4 箇所 (No.5~8) のはつり調査では犠牲陽極材の周囲では鉄筋腐食の進行は認められなかった。また、犠牲陽極材の質量減少量は解体試験で 3 箇所とも 27.8~29.8g であり、亜鉛量が異なる犠牲陽極材や塩分吸着材を用いた場合でもほぼ変わらない結果であった。亜鉛量が小さい犠牲陽極材 (38g) はあと 2 年程度の効果しか残らない結果となった。犠牲陽極材から発生する電流から算出する亜鉛の質量減少量は実測の質量減少量の 3 割程度であった。

今回、現在の塩害対策工事で使用している材料と同じ大島川の調査区間 4 箇所 (No.11~14) について、はつり調査を行った。

4.1 外観目視・自然電位

外観目視では、近接からコンクリート表面の状態を確認するとはく落等の大きな劣化には至っていないが、一部断面修復材にひび割れおよび浮きが確認された。

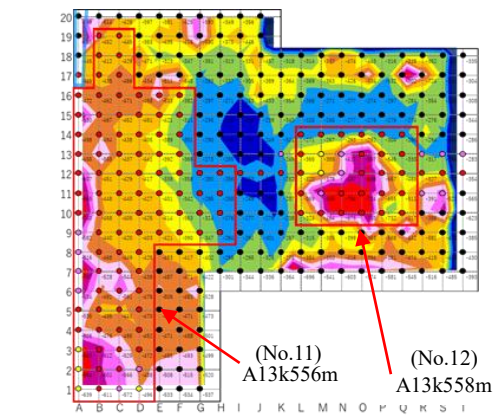
自然電位の測定結果は前回と大きくは変わらず、-350mV より卑な値が多かった。今回ののはつり調査の結果からも、外部からの自然電位による計測では鉄筋の腐食状態を把握し評価することは困難であることがわかった。

この要因として、鉄筋に防食電流が流れている状態 (内部電源方式) で自然電位測定を実施していること、表面含侵材を塗布し撥水効果があるにも関わらず躯体表面に外部から電極を当て、コンクリート中の含水率が安定しない状態で計測していることが起因していると考えられる (図-2)。

表-3 塩害対策工事のモニタリング箇所

No.	調査区間		施工年月	断面修復材	犠牲陽極材	塩分吸着材有無
1	亀島川	A 線 12k587m	2016年7月	低抵抗PCM (密度: 1.3~2.0g/cm ³)	亜鉛38g・臭化 + 硝酸リチウム	無
2		側壁 12k595m				
3		一般部 12k583m				
4	B 線 12k585m					
5	隅田川	A 線 13k164m	2012年10月	低抵抗PCM (密度: 2.6~3.0g/cm ³)	亜鉛160g・水酸化リチウム	有
6		側壁 13k165m				
7		一般部 13k163m				
8		側壁 13k164m				
9	A 線 13k133m	隅田川	2017年1月	低抵抗PCM (密度: 1.3~2.0g/cm ³)	亜鉛38g・臭化 + 硝酸リチウム	無
10	B 線 13k195m					
11	大島川	A 線 13k556m	2014年8月	低抵抗PCM (密度: 1.3~2.0g/cm ³)	亜鉛38g・臭化 + 硝酸リチウム	無
12		側壁 13k558m				
13		一般部 13k523m				
14		B 線 13k525m				

* PCM: ポリマーセメントモルタル (施工性から材料変更)
* 青: 2018年8月はつり, 赤: 2019年8月はつり



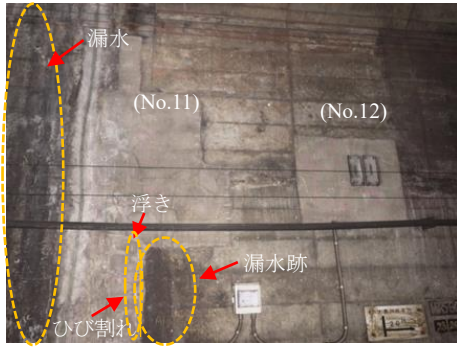
<凡例>

■: 断面修復施工箇所

■ -200~0 ■ -500~-450 単位: mV
■ -250~-200 ■ -550~-500
■ -300~-250 ■ -600~-550
■ -350~-300 ■ -650~-600
■ -400~-350 ■ -700~-650
■ -450~-400

測定電位	評価
-200mV < E	90%以上の確率で腐食が生じていない
-350mV < E ≤ -200mV	不確定
E ≤ -350mV	90%以上の確率で腐食が生じている

図-2a 大島川 A 線 No. 11, 12 の状況



(2019年8月・外観目視)

図-2b 大島川A線 No. 11, 12 の状況

4.2 防食電流量・復極量

経過日数1,800日でみると、防食電流量は0.004~0.182 mA の範囲で推移しており、はつり調査の結果からも鉄筋腐食の進行は見られなかった。また、復極量は62~310 mV の間であったが、外部電源方式による防食基準値100 mV を満たしていない箇所でもはつり調査の結果から犠牲陽極材の効果が確認できた(図-3, 4)。

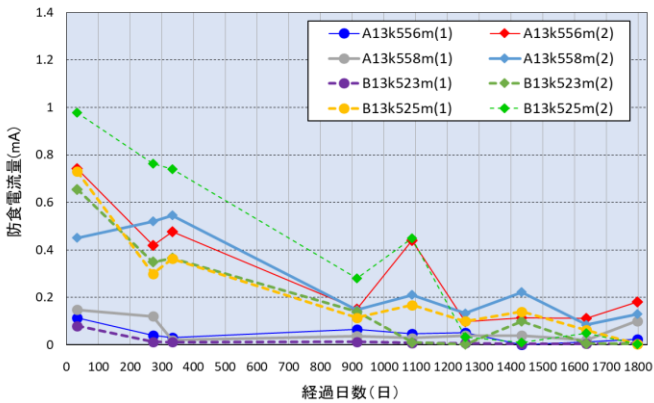


図-3 防食電流量の経時変化(大島川)

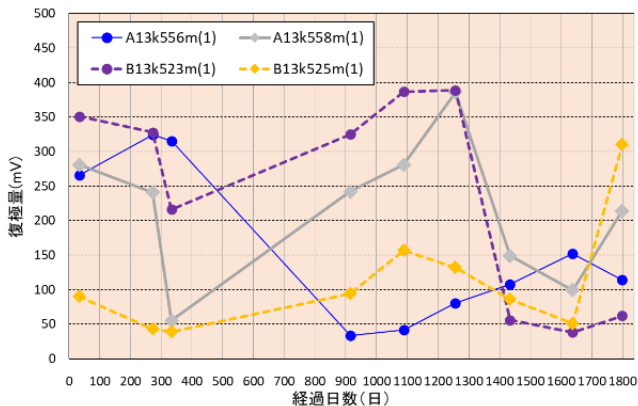


図-4 復極量の経時変化(大島川)

4.3 はつり調査

大島川の調査区間4箇所で1箇所あたり700mm×700mmの範囲をハンマードリル等によって被り部分を

はつり取り、鉄筋を露出させた。目視で鉄筋の腐食状況を確認するとともに、埋設型の犠牲陽極材を取り出して質量の計測を行った。

(1) 鉄筋の腐食状況

はつり調査の結果、犠牲陽極材を設置した鉄筋および周辺の鉄筋に腐食の進行は見られず、既存の鉄筋に対して十分な防錆効果があることが確認された。だが、一部断面修復部の端部に鉄筋腐食や水平鉄筋に表面錆が確認された(写真-3, 4)。

(2) 犠牲陽極材の質量減少量

今回ののはつり箇所は施工後5年を経過しており、犠牲陽極材は合計6個採取した。解体試験の結果から亜鉛減少量は1個を除き質量減少量は18.8~26.6gの範囲であり、約60~70%以上の減少が確認され、残存年数は最大

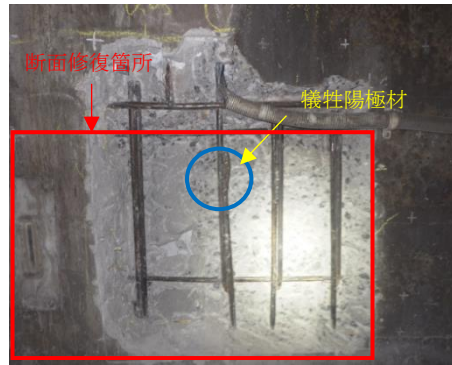


写真-3 鉄筋腐食の状況 No. 11 (大島川A線 13k556m)

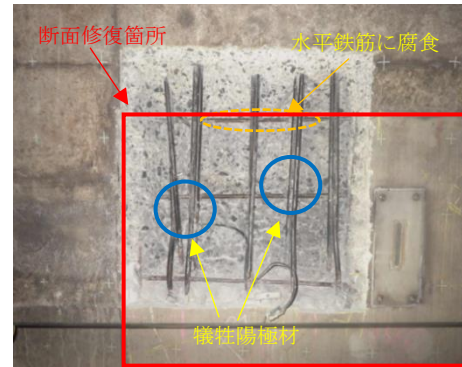


写真-4 鉄筋腐食状況 No. 12 (大島川A線 13k558m)

表-4 埋設型犠牲陽極材の質量減少量

犠牲陽極材 設置位置	解体試験		実測発生電流量		
	質量減少量 (g)	質量減少率 (%)	積算電流量 (A·hr)	質量減少量 (g)	
A 線	13k556m	23.80	62.63	5.12	6.30
	13k558m	22.80	60.00	5.68	6.98
	13k558m右	25.00	65.79	—	—
B 線	13k523m	3.60	9.47	0.31	0.31
	13k525m	18.80	49.47	6.83	6.83
	13k525m左	26.60	70.00	—	—

*犠牲陽極材の初期質量は38g
理論値(積算電流量9.10A·hr, 質量減少率11.19g)

でも 5 年程度しか残っていないと推測される。B 線 13k523m では亜鉛減少量が非常に少なかったものの、複極量は 40mV 程度の電流量であり、鉄筋腐食はなく防錆効果があったと考えられる（表-4）。

これらの結果から、犠牲陽極材は防錆効果があった。犠牲陽極材の効果持続時間は実績等から 10~20 年と言われており、それより短い期間で効果がなくなることが判明するとともに、設置間隔や設置方法について、今後更なる検証を行う必要があると考えられる。

(3) 積算電流量からの亜鉛質量減少量

犠牲陽極材から発生する電流量 A と経過時間 hr による積算電流量 $A \cdot hr$ から、ファラデーの法則より求められる質量減少量を算出した（表-4）。埋設型犠牲陽極材（亜鉛量 38g）では実測の質量減少量よりも小さな値であった。実測発生電流量は年に 1~2 回の間隔で測定したデータを用いており、詳細な発生電流量の経時変化を把握できていないために質量減少量が小さくなったと考えられる。

以上から、東京メトロが実施している塩害対策の工法は、現時点では十分な防錆効果があることが確認された。

5. 塩分吸着工法の検討

5.1 対策工法の比較

犠牲陽極材を用いた電気防食工法ではコンクリート中の塩化物イオン濃度に関係なく、劣化部分のコンクリートをはつった時に鉄筋背面 20mm までのはつり出す作業が必要であった（写真-5）。そこで、鉄筋が部分的な表面錆（点錆、面錆）以下で、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が $10\text{kg}/\text{m}^3$ 未満⁵⁾であれば、はつり深さを鉄筋中心位置までに軽減できる塩分吸着材を配合したポリマーセメントモルタルによる補修方法（以下、塩分吸着工法という）について検討を行った（図-5）。鉄筋背面 20mm のはつりを行わないことで施工手間が軽減でき、施工日数を短縮することができる。



写真-5 鉄筋背面までのはつり状況

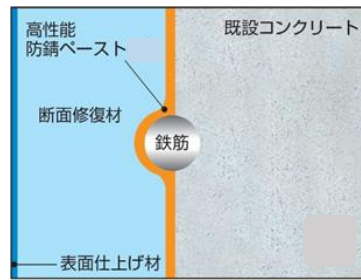


図-5 塩分吸着材の施工断面図

東京メトロの塩害対策を要する区間の中で、塩化物イオン濃度が高く劣化が進行している区間はほぼ完了し、今後は塩化物イオン濃度が低い区間が主な対象となる。感潮域河川下で調査した 103 箇所におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度のうち、塩害対策工事によって犠牲陽極材を用いた箇所以外の 71 箇所に対する鉄筋位置（75mm 付近）での塩化物イオン濃度比率を表すと、塩化物イオン濃度が $10\text{kg}/\text{m}^3$ 未満の箇所が 98.6%であることがわかる（図-6）。

したがって、今後塩害対策を行う箇所鉄筋腐食が軽微であれば、塩分吸着工法の適用が有効であると考えられる。

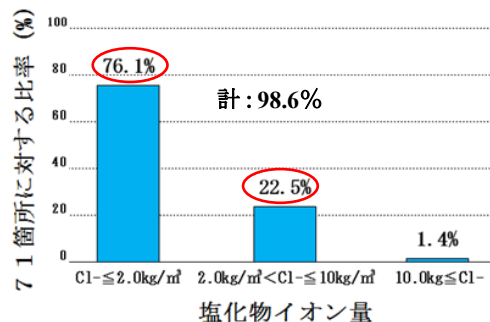


図-6 鉄筋位置(75 mm)塩化物イオン量の分布

5.2 室内試験による施工性の確認

以前の調査²⁾では塩分吸着工法の防錆性は良好であったが、硬化時間が長いために夜間作業時間の短い地下鉄トンネルの施工条件に適さないことから採用を見送ることとなった。今回、塩分吸着工法に用いるポリマーセメントモルタルの原料や配合を調整し、東京メトロが定める物性上の基準値を満たすと同時に地下鉄トンネルの施工条件に適用可能な断面修復材を開発した。

塩分吸着工法に用いる断面修復材の性能を確認するため、圧縮強度試験、曲げ強度試験、付着強度試験（写真-6）の各供試体を材齢ごとに製作し、JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準拠し、断面修復材の強度試験を実施した。今までの経験値から決定した通常の構築補修材料、塩分吸着工法における従来材料および開発した材料の強度試験結果を示す（表-5）。

また、施工性については短時間の施工条件を想定して欠損部を模擬した供試体に断面修復材を塗布し、1回の塗布可能厚さおよび1時間後の硬化状況を確認した(写真-7)。これらの試験結果から、塩分吸着工法のポリマーセメントモルタルは東京メトロの物性上の基準値を満たし、かつ施工性においても地下鉄トンネル環境下に適用可能であることが確認できた。

5.3 現場試験施工の実施

室内試験により各強度の基準値および施工性の確認ができたため、実際の現場で塩分吸着工法の試験施工を実施し、その性能を確認することとした。対象箇所は塩化物イオン濃度を調査した71箇所から6箇所を選定した。鉄筋位置での塩化物イオン濃度および鉄筋腐食度に応じた防錆ペーストを塗布し、継続的にモニタリング調査を実施する。モニタリング期間は2年間とし、年に2回の頻度で外観目視、打音検査、自然電位測定、腐食度センサーによって効果を確認する。

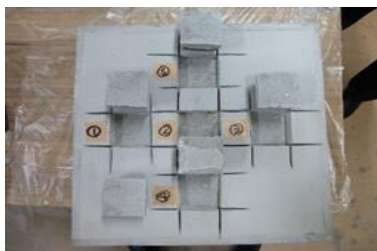


写真-6 付着強度試験の状況

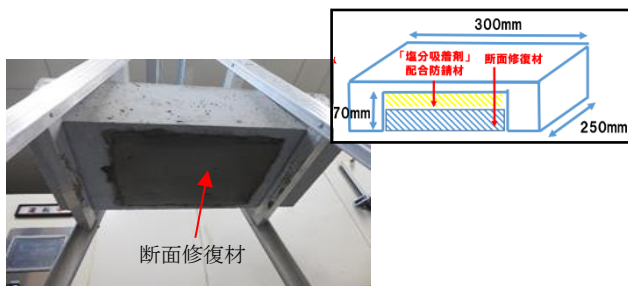


写真-7 施工性確認の供試体

表-5 断面修復材の物性値

項目	条件	基準値	通常断面修復		塩分吸着工法	
			補修材	犠牲陽極材工法補修材	従来・補修材	開発・補修材
可使用時間	室内	—	約20分	約25分	約50分	約20分
硬化時間	20℃	—	約40分	約40分	約120分	約40分
圧縮強度 (N/mm ²)	短時間	—	12.0(3h)	5.0(1h)	2.0(3h)	17.4(3h)
	28日	20.0	28.0	34.6	39.2	35.8
曲げ強度 (N/mm ²)	28日	5.0	5.5	6.2	8.6	7.0
接着強度 (N/mm ²)	28日	2.0	2.0	2.3	2.1	2.8

6. まとめ

地下鉄トンネルの塩害に対して原因の究明、補修箇所および補修範囲の決定、そして犠牲陽極材による補修方法による塩害対策を実施している。現在、劣化が進行した塩害箇所については補修を完了し、今後劣化が進行する可能性がある箇所について定期的な検査結果等を基に予防保全として塩害補修を行っている。さらに塩害劣化の進行が微小な箇所についてはははつり深さを低減できる新たな補修方法として塩分吸着工法の検討を行っている。

土木構造物の維持管理に関しては、建設から90年以上経過した銀座線の事例からも定期的な検査結果に基づき漏水への止水工およびコンクリートのはく落箇所への断面修復を確実に実施していれば、長期的に問題がないことが示されている。また、これまで施工法が確立されていなかった塩害に対して塩害対策工事を実施することで、定期検査の結果から再劣化が発生していないことを確認している。地下鉄トンネルの塩害に対して標準的な補修工法を実施することにより、さらにトンネルの安全性の向上がさらに図られたと考えている。

今後、継続的なモニタリングによって効果の確認を行うとともに、犠牲陽極材や断面修復材等の使用材料については材料の開発状況を見ながら、そして劣化状況に応じた施工法の改善に努めていきたい。

最後に、東京メトロは予防保全を進めながら土木構造物の保守を着実に実施し、たゆみなき安全の追求のもと、列車の安全・安定運行を引き続き確保していく。

参考文献

- 1) 武藤義彦・新田裕樹・小椋紀彦：報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策の優先順位と補修方法の決定，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp759-764，2018
- 2) 武藤義彦・小西真治・河畑充弘・大即信明・岸利治・石田哲也：地下鉄箱型トンネルにおける塩害対策システムの構築，土木学会論文集 E2 部門，2018年，74巻4号 pp275-292
- 3) 武藤義彦・新田裕樹・小椋紀彦：報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策工事の実施とモニタリング結果，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp779-784，2019
- 4) 武藤義彦・大即信明・岸利治：硝酸銀噴霧法を用いた地下鉄トンネルの塩害影響範囲の特定手法の開発，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp915-920，2016
- 5) 立松英信・佐々木孝彦・高田潤：塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究，コンクリート工学論文集，第11巻第2号，pp11-20，2000年5月