

報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策補修の効果検証と今後の課題

武藤 義彦*1・中村 幸江*2・小椋 紀彦*3

要旨:地下鉄トンネルにおいて、犠牲陽極材を設置した断面修復と表面含浸材の塗布による塩害対策を2014年度から実施している。塩害補修箇所は2年に1回のトンネル検査及び抽出した14箇所のモニタリングを行っており、大きな変状は発生していない。施工開始から約8年を経過したことから、塩害補修を実施した3区間について詳細な全数調査を実施した。犠牲陽極材を設置した断面修復箇所には再劣化はなかったが、その周辺及び表面含浸材のみの補修箇所でははく離や大きなひび割れが確認された。さらに2022年度に塩害補修を行う箇所では漏水履歴を考慮した施工における優先順位の検討を行った。

キーワード:地下鉄トンネル, 塩害, 犠牲陽極材, 表面含浸材, 再劣化

1. はじめに

東京地下鉄（以下、東京メトロという）は首都東京の重要な交通機関として9路線、195kmの営業線を運営し、コロナ禍でも1日平均輸送人員522万人（2021年度）のお客様にご利用を頂いている。トンネル等の土木構造物は定期的に検査を実施し、その結果を基に補修を実施することで構造物の健全度を維持している。営業線の約85%がトンネルであり、特に東京湾の近傍や感潮域河川下を横断する区間ではトンネル内への漏水及びコンクリートのはく離・はく落が多く発生している。

詳細な調査の結果、漏水に含まれている塩分によって鉄筋が腐食する塩害であることが判明した^{1) 2)}。東京メトロでは塩害劣化に対して補修範囲の決定及び補修工法の標準化を行い、2014年度から計画的に塩害対策工事を実施してきた。今回、当初補修した東西線3区間について側壁・中壁部の詳細な全数調査による効果確認の結果と、今後補修すべき箇所の新たな優先順位の付け方を検討したことを報告する。

2. 塩害対策の補修工法と実績

補修範囲の決定方法は硝酸銀溶液噴霧法を用いた。トンネル内の漏水・漏水跡箇所に硝酸銀溶液を噴霧して白色に変化する部分は漏水中の塩分がコンクリート内に浸透している可能性が高いことから補修範囲とした。白色に変化したコンクリート面に対して打音検査を行い、濁音の範囲ははく離があることから、劣化部分のはつり・鉄筋のケレン（錆の除去）・犠牲陽極材の設置・断面修復材の施工・液状のシラン系表面含浸材の塗布を実施した。清音の範囲はコンクリートが健全であり、これ以上塩分が浸透しないように表面含浸材の塗布のみを実施した³⁾（写真-1, 2, 3）。

塩害対策工事を2014年度から開始し、2022年度までに約5,500mの区間を完了している（表-1）。塩害補修を

実施した中の14箇所を選定し、外観目視、自然電位・防食電流量・復極量の計測を年1~2回モニタリングを行っている。外観目視では補修面に乾燥収縮と考えられる小さなひび割れが一部見られたが、大きな劣化はなかった。亜鉛照合電極を用いた自然電位の計測では鉄筋が90%の確率で腐食していると評価される-350mVより卑な値が多く見られたが、その範囲のはつり調査では鉄筋の腐食は見られなかった。

防食電流量の計測では全てのモニタリング箇所で継続的に電流が流れていたが、犠牲陽極材の亜鉛の消耗に伴って防食電流量は減少傾向にあった。復極量では外部電源方式による防食基準値100mV以上を目安とした。計測結果はすべての箇所で減少傾向にあり100mV以下であったが、はつり調査では鉄筋の腐食はほとんど見られなかった^{4) 5)}。

表-1 塩害対策補修の実績

優先度	路線名	横断・近接する河川名称	延長	補修完成時期	塩害対策(m ²)		
					断面補修面積		表面含浸材
					側壁	上床	
A	東西線	日本橋川	170	2017年10月	15	3	207
		亀島川	160	2017年7月	104	26	652
		隅田川	320		49	56	271
		大島川	62	2014年4月	32	4	221
			380	2015年10月	37	2	301
	千代田線	日本橋川	180	2017年10月	62	20	772
	半蔵門線	日本橋川	140		2	3	157
		計	1412		301	114	2581
B	日比谷線	小さい川	140	2019年3月	5	1	63
		築地川	140		22	11	238
	東西線	埋立地	335	2020年1月	5	1	65
			775		129	15	668
			708		69	5	455
	有楽町線	埋立地	261	2020年2月	5	2	33
			508		100	28	1199
			263		13	6	109
			298		19	1	550
	東西線	埋立地	1198	2022年3月	(未施工箇所あり)		
		計	4626		367	70	3872

*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) 鉄道本部工務部土木課

*3 (株)CORE 技術研究所 技術部 工修 (正会員)



写真-1 劣化部分コンクリートはつり



写真-2 犠牲陽極材設置 写真-3 断面修復工

3. 塩害対策後の劣化状況

塩害補修箇所の状態は選定されたモニタリング箇所では良好であり、2年に1回のトンネルの通常全般検査でも再劣化は発見されなかった。だが、通常全般検査は徒歩による外観目視で、必要によって近接目視と打音点検を行うものである。営業線に影響する大きな漏水、ひび割れ、はく落がない場合は記録に残されない可能性が高い。今回、当初補修を実施した東西線の区間について詳細な検査を実施した。

3.1 調査方法

東西線茅場町駅・門前仲町駅間の3区間610mについて、犠牲陽極材を設置した断面修復及び表面含浸材のみの補修を行った側壁・中壁部の箇所全数を近接からの外観目視、打音点検及び硝酸銀溶液の噴霧を実施した(写真-4, 5)。コンクリートのはく離やひび割れ、硝酸銀溶液の噴霧で塩分が確認された範囲について現地にマーキングを行った。

塩害補修箇所以外でも新たな漏水・漏水跡が確認された箇所及び補修箇所の近傍ではく離等がある部分は、硝酸銀溶液噴霧と打音点検を実施した。なお、上床部については数量が少ないことと作業時間が限られていることから調査は行わなかった。



写真-4 硝酸銀溶液の噴霧



写真-5 打音点検

3.2 調査結果

(1) 断面修復箇所のはく離(表-2)

犠牲陽極材を設置した断面修復310箇所中、はく離が確認されたのは19箇所(6%)であった。また、漏水は310箇所中25箇所(8%)で見られ、このうち2箇所ではく離も発生していた。区間別では大島川区間ではく離が70箇所中12箇所(17%)と発生割合が高かった。

はく離のある部分には錆汁等もなく、モニタリングではつり調査を行っても鉄筋腐食は見られないことから、塩害による再劣化ではないと考えられる。健全度の判定ランクはトンネルの安定性で問題がない健全度C及びはく落に対する安全性でも問題がない健全度 γ であり、再補修は必要ではなかった⁶⁾(表3, 4)。はく離の原因は断面修復の施工時における修復材の付着不良の可能性が高い。特に大島川区間にはく離が多かったのは、当初比重が大きく付着力が劣る断面修復材を採用したことが影響したと考えられる⁴⁾。

表-2 断面修復箇所のはく離・ひび割れ・漏水

横断河川名称	延長	線別	調査箇所	はく離	ひび割れ	漏水*
亀島川	160	A線	53	1	34 (5)	5
		B線	54	2	36 (1)	1
隅田川	320	A線	38	0	15 (1)	1
			[17]	0	9 (2)	4
		B線	52	3	39 (2)	3
			[26]	1	18 (4)	4
大島川	130	A線	36	6 (1)	29 (1)	1
		B線	34	6 (1)	32 (6)	6
		計	310	19 (2)	212 (22)	25

*漏水跡は含まない。[]は潜函継手部導水工による補修箇所()は漏水箇所を示す。

表-3 トンネルの安定性の評価表⁶⁾

判定区分	構造物の状態
A	運転保安、列車の正常運行及び旅客、公衆等の安全の確保を脅かし、又はそのおそれのある変状等があるもの(A2:計画補修)
B	将来、健全度Aになるおそれのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

表-4 トンネルのはく落に対する安全性の評価⁶⁾

判定区分	変状の状態
α	近い将来、安全性を脅かすはく落が生じるおそれがあるもの
β	当面、安全を脅かすはく落が生じるおそれはないが、将来、健全度 α になるおそれがあるもの
γ	安全を脅かすはく落が生じるおそれがないもの

(2) 断面修復箇所のひび割れ (表-2)

断面修復箇所のひび割れについても調査を行い、断面修復 310 箇所中、ひび割れは 212 箇所 (68%) で確認された。幅 0.3mm 以上の顕著なひび割れは 45 箇所 (15%) であり、大部分は軽微なひび割れであった (写真-6)。漏水は断面修復 310 箇所中 25 箇所中、22 箇所ひび割れが発生しており、ひび割れ部から漏水が浸入して鉄筋腐食等の悪影響が懸念された。

区間別にみると顕著なひび割れは隅田川区間の潜函継手部では 43 箇所中 2 箇所 (28%)、大島川区間では 61 箇所中 22 箇所 (31%) で確認された。隅田川区間は潜函工法で築造されたトンネルであり、潜函継手部の断面修復による補修箇所では完全に止水にできず、導水工を用いて補修を行ったこと、継手部という構造上の弱点であることからひび割れも発生しやすいと考えられる。また、大島川区間でははく離と同様に断面修復材が異なったことも原因と考えられる。

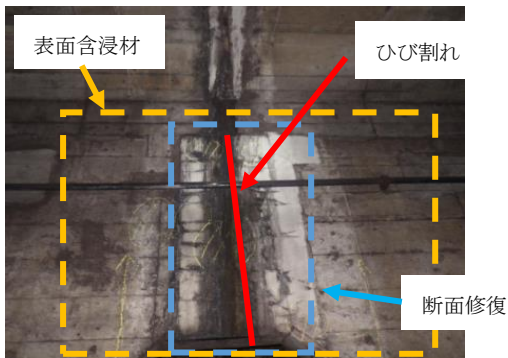


写真-6 断面修復箇所の顕著なひび割れ (B線 13k583m)

(3) 表面含浸材塗布箇所のはく離等 (表-5)

表面含浸材のみを塗布した 133 箇所中、はく離が確認されたのは 33 箇所 (25%) であった。健全度の判定ランクはトンネルの安定性で問題がないが進行性のある健全度 B 及びはく落に対する安全性でも経過観察をする必要がある健全度 β であるものが 3 箇所、列車運行に支障する可能性がある健全度 A2 及びはく落に対する安全性でもはく落の恐れがある健全度 α であるものが 3 箇所確認された (写真-7, 8)。

区間別では亀島川区間で 55 箇所中 15 箇所 (27%)、大島川区間で 41 箇所中 11 箇所 (27%) のはく離が確認された。また漏水も補修 133 箇所中 27 箇所で見られ、このうち 9 箇所ではく離が発生していた。

断面修復箇所と比較してはく離の発生割合が高く、漏水が発生していない 24 箇所でもはく離が発生していることから、表面含浸材の塗布前にコンクリート内に浸透した残留塩分によって塩害が進行したと考えられる。また断面修復箇所に隣接する部分においてははく離が確認されている箇所もあり、構築コンクリートと断面修復材に

よるマクロセル腐食が発生していると考えられる。

その他の変状として、表面含浸材塗布の箇所鉄筋露出 2 箇所や貫通ひび割れ 1 箇所も確認された (写真-9)。

表-5 表面含浸材塗布箇所のはく離・漏水

横断河川名称	延長	線別	調査箇所	はく離	その他の変状	漏水*
亀島川	160	A線	24	8 (5)	2	8
		B線	31	7 (2)	0	6
隅田川	320	A線	12	3	0	2
		B線	25	4	0	5
大島川	130	A線	17	4 (1)	0	1
		B線	24	7 (1)	1	5
計			133	33 (9)	3	27

* 漏水跡は含まない。()は漏水箇所を示す。

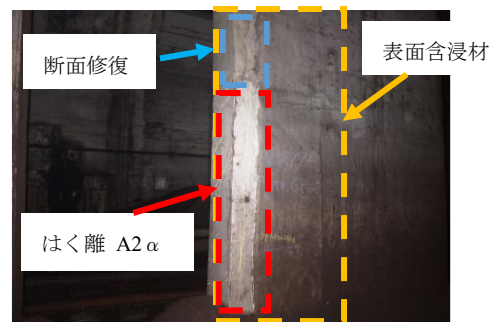


写真-7 表面含浸材塗布箇所の中壁部はく離 (A線 13k195m)



写真-8 表面含浸材塗布箇所の中壁部はく離 (B線 13k556m)

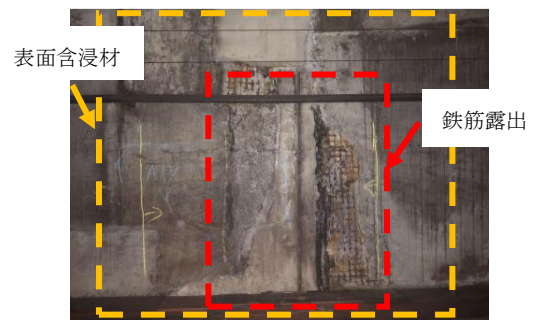


写真-9 表面含浸材塗布箇所の鉄筋露出部 (A線 12k535m)

(4) 塩害補修箇所以外のはく離・その他の変状（表-6）

塩害補修箇所以外に新しい漏水・漏水跡及び補修箇所の近傍で大きな変状が発生していた箇所は 39 箇所であった。そのうちのはく離は 21 箇所（54%）確認され、断面修復箇所に隣接したものが 9 箇所あった。それらの判定ランクは、大島川区間で 1 箇所の B と β であったが、それ以外は問題のないものであった。区間別では、隅田川区間は 30 箇所中 15 箇所、大島川区間は 6 箇所中 5 箇所で判定ランクは C と γ のはく離が確認された。

断面修復箇所と比較するとはく離の箇所数が多く、新しい漏水・漏水跡からの塩分浸透による塩害ではく離が発生した可能性が高い。表面含浸材の塗布範囲と同様に断面修復箇所の近くで新しいはく離が確認された箇所もあり、マクロセル腐食で発生した可能性も考えられる（写真-10）。

区間別では、隅田川区間と大島川区間のはく離が多かった。隅田川区間は塩害補修を行った箇所の隣接が多いことから以前から漏水が多く、塩分の浸透がコンクリート内に進行していたことが原因である。大島川区間は継手部付近の表面含浸材の塗布付近にはく離が数箇所見られたが、はく離での硝酸銀溶液の反応はなく、塩害によるはく離の可能性は低いと考えられる。

表-6 塩害補修箇所外のはく離・漏水等

横断河川名称	延長	線別	調査箇所	はく離	その他変状	漏水*
亀島川	160	A線	1	0	0	1
		B線	2	1	0	0
隅田川	320	A線	16	8 (2)	1	3
		B線	14	7 (1)	0	2
大島川	130	A線	4	3	1	0
		B線	2	2	0	0
		計	39	21 (3)	2	6

* 漏水跡は含まない。()は漏水箇所を示す。

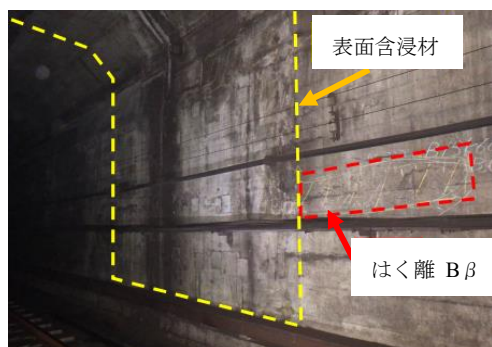


写真-10 塩害補修箇所外のはく離

3.3 調査結果からの考察

(1) 断面修復箇所

犠牲陽極材を設置した断面修復の箇所は、劣化部分を撤去して塩分をできる限り取り除いて補修を行っており、施工からの経過年数も 5~8 年ということもあって再補修の必要がないはく離や軽微なひび割れ程度であった。今後経過観察は必要であるが、地下鉄トンネルにおいて塩害劣化が進行して鉄筋腐食及びコンクリートのはく離が発生した段階での塩害の補修方法としては十分に効果があると考えられる。

断面修復材の材料については上床部の施工を考慮して付着性の良い材料に改善を図っているが、今後も高い付着性や軽微なひび割れを起こしにくい乾燥収縮の少ない材料に改善していく必要がある。

(2) 表面含浸材塗布のみの箇所

表面含浸材のみを塗布した箇所については調査時点で漏水による塩分の浸透は認められるが、鉄筋腐食及びコンクリートのはく離までの劣化は進行していない。これ以上の塩分の浸透を抑制するために表面含浸材の塗布だけを予防保全として実施している。

再劣化は表面含浸材の塗布を行う前に浸透している塩分によって、補修後に鉄筋腐食及びはく離等の塩害が発生していると考えられる。また隣接した劣化部分を断面修復材で補修した箇所との境目でマクロセル腐食が発生したことも考えられる。予防保全として鉄筋腐食を抑制するために表面含浸材の塗布を行っているが、ある程度塩分が浸透した箇所では表面含浸材の塗布は効果は薄かったと言える。表面含浸材の塗布を行った後の漏水による塩分の浸透には抑制効果があることは表面吸水試験で確認されているが、今後の塩害対策の補修方法としては課題が残った。

(3) 塩害補修以外の箇所

今回調査した区間については打音点検を全面的に実施していないが、目視によって新たに発生したと考えられる漏水・漏水跡についても塩害によるはく離等が発生していた。事前の塩害補修時点では漏水・漏水跡がなかったために補修対象とならなかったと考えられるが、漏水跡は場所によっては確認されない場合もある。

塩害が発生しやすい区間、すなわち漏水中に塩分が多く含まれる東京湾近傍や感潮域河川下の区間は常日頃から漏水の有無を定期的に検査し、漏水・漏水跡がある場合は硝酸銀溶液噴霧法によって塩害補修の範囲を定めて必要な補修を実施することが重要であることがこの結果からも言える。

4. 塩害対策の優先順位の考え方

今までは塩害対策を実施する区間内にある漏水・漏水跡に硝酸銀溶液の噴霧と打音点検を行い、塩害補修の箇所を決定し、全てを片側から順番に施工を行っていた。だが、保守予算が限られている中、劣化が進行して緊急度の高い箇所から補修箇所の優先順位を付け、塩害対策を実施することとした。

4.1 2022年度施工箇所の再調査

2022年度に塩害対策を実施する東西線南砂駅付近（17k000m～17k571m）の区間は、事前に全ての漏水・漏水跡箇所に硝酸銀溶液の噴霧及び白色に変色した箇所の打音点検を行い、補修箇所の範囲を決定していた。その200mの区間でコンクリートがはく離して断面修復の補修が必要な箇所を抽出し、過去の通常全般検査から漏水・漏水跡の履歴を調査した。

漏水の履歴として経過年数が8年、6年、4年以下、漏水経緯がない箇所に分類し、ビデ足場を用いず打音点検・近接目視・はつり作業等ができる箇所を漏水年数ごとに計4か所選定して再調査を実施した（表-7）。

表-7 塩害補修の再調査箇所

キロ程	漏水経歴	漏水経過	漏水有無	硝酸銀噴霧
A線17k046m	2009～2017年	8年	漏水跡	白色変色
B線17k048m	2011～2017年	6年	漏水	白色変色
A線17k098m	2022年	1年	漏水	白色変色
B線17k058m	なし	なし	漏水	白色変色

再調査の手順としては以下のとおりである。（図-1）

- ① 劣化部補修範囲の境目にカッターを入れる。
- ② その一部をはつり、鉄筋の被り厚を確認する。
- ③ 他の補修範囲にホールソーでコア削孔（直径50mm）を鉄筋位置まで行う。
- ④ 残りの補修範囲を全てはつり出して鉄筋の腐食状況を確認し、はつり面全体に硝酸銀溶液を噴霧して塩分の浸透を確認する。

4.2 施工箇所の優先順位

選定した箇所について、はつり調査後目視による鉄筋の腐食状況から腐食グレードを判定した⁸⁾。漏水経過8年及び6年の箇所は腐食が激しく大部分に鉄筋の断面欠損（錆）が認められる鉄筋腐食度C～Dであった（写真-11, 12）。4年以下と漏水経過がない箇所は部分的に腐食が認められるB～Cであった（写真-13, 14）。漏水が継続的に発生し続けるとは限らないが、漏水している期間が長いほど塩分がコンクリート内に浸透する確率が高いことから、鉄筋腐食が進行すると考えられる。漏水経

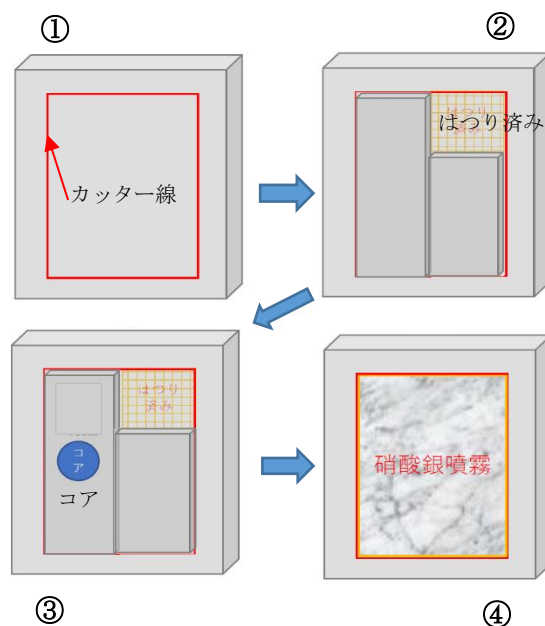


図-1 塩害補修の再調査手順

過8年及び6年の箇所を施工優先度の高いAとし、早期に補修を行うこととし、漏水経緯1年の箇所を施工優先度B、漏水経歴がない箇所を施工優先度Cとした。なお、各箇所でコアを採取して乾燥させた後にコアの切断面に硝酸銀溶液を噴霧し、塩分の浸透深さを確認したが、浸透深さの違いは分からなかった。

今後は塩害対策工事において、補修の優先度を付けるために過去の通常全般検査等から補修箇所の漏水・漏水跡の経過年数を調査し、経過年数の長い箇所を優先的に行うこととした。

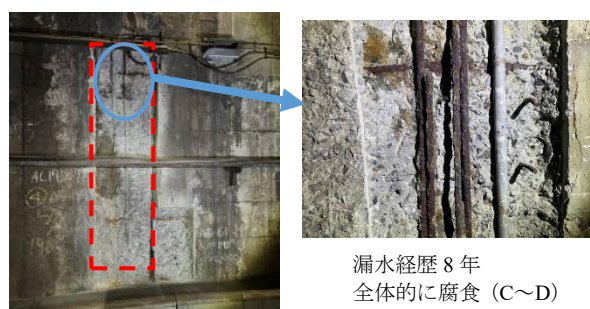


写真-11 はつり調査による鉄筋腐食（A線17k046m）

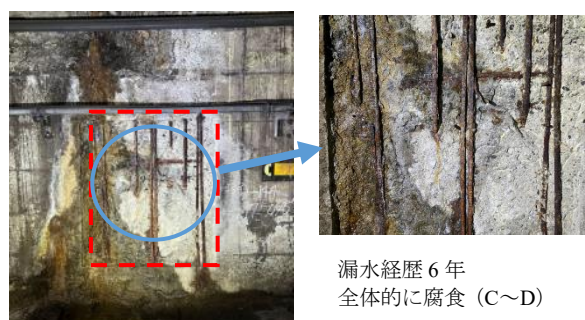


写真-12 はつり調査による鉄筋腐食（B線17k048m）

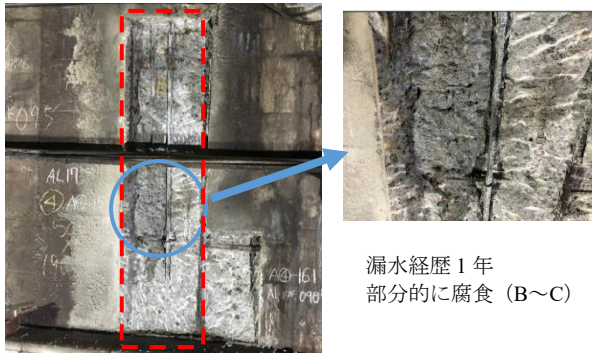


写真-13 はつり調査による鉄筋腐食(A線 17k098m)



写真-14 はつり調査による鉄筋腐食(B線 17k058m)

5. 今後の課題

今回の再調査結果から、表面含浸材の塗布箇所や新たな漏水・漏水跡、そして断面修復箇所付近に近接した部分では再劣化が発生しやすいことが判明した。

鉄道のトンネルは、通常全般検査を2年に1回実施することが定められている。通常全般検査は遠めからの目視、必要により近接目視及び打音点検を実施することになっているが、塩害対策が必要な区間、すなわち東京湾近郊や感潮域河川下の区間については漏水・漏水跡が塩害の原因となることから、この区間については硝酸銀溶液の噴霧と打音点検を行うことが必要である。そのことによって塩害劣化を早期に発見し、効果的な対策を実施できる。トンネルの漏水は塩害以外にも構築物を劣化させ、トンネル内の施設物にも悪影響を及ぼすので、できる限り止水工を施すように努めるべきである。

また、表面含浸材の塗布によってコンクリート内への塩分の浸透は抑えられているが、塗布後に塩害劣化が進行した箇所は多く発見された。今回の硝酸銀溶液の噴霧は漏水中の塩分濃度から塩害が発生すると考えられる箇所を抽出しているに過ぎない。表面含浸材を塗布しても塩害劣化は発生するということを踏まえ、通常全般検査等において漏水・漏水跡の箇所についての継続的な検査を実施しなければならない。

6. まとめ

東京メトロは地下鉄トンネルにおける塩害対策に対して、狭い空間と限られた夜間作業時間という制約条件の中、補修方法の標準化を図り確実に施工を実施してトンネルの健全度を保持している。塩害対策の補修が必要とされる区間を定め、その区間内の漏水・漏水跡に硝酸銀溶液を噴霧して塩分の有無を確認、コンクリートの劣化状況を打音点検で判定して補修箇所の範囲を決定している。

今後、限られた保守費の中でトンネル等の土木構造物の保守を行うことが要求されている。塩害対策以外にもトンネル等の点検方法として状態監視、可視画像、赤外線等の研究・開発を進めており、予防保全という考え方をより進め効率的な保守管理を目指し、より安全・安心な地下鉄輸送を確保していきたい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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
- 4) 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
- 5) 武藤義彦・野本一美・小椋紀彦：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，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol. 42，No. 1，pp629-634，2020
- 6) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編 平成 19 年 1 月 鉄道構造物等 維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル
- 7) 武藤義彦・野本一美・小椋紀彦：報告 地下鉄トンネルにおける塩害対策補修の実績と今後の課題，JCI コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp562-567，2021
- 8) JCI 日本コンクリート工学会，コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2022