

地下鉄トンネルに適した コンクリート補修工法の評価システムの運用

中村 幸江¹・小柴 康平²・小西 真治³・渡邊 貞之⁴

¹ 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.nakamura.e6b@tokyometro.jp

² 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: k.koshiba.m4y@tokyometro.jp

³ 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁴ 正会員 株式会社メトロレールファシリティーズ 土木部
(〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町 1-36-5)
E-mail: s.watanabe.k8c@metrorailfa.co.jp

開削トンネルは、検査により補修が必要と判定された漏水や浮き・はく離箇所を順次補修することによって健全性を維持している。しかし、東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）では、一度標準工法として定められた補修工法は長年更新されておらず、また、補修を行った箇所において再劣化が発生する事象が発生していた。そこで、止水工および断面修復工を対象として、新材料導入に向けた評価システムを構築した。今回は、構築した評価システムに基づき行った室内試験の結果等、運用状況を報告する。

Key Words: Box type tunnel, Water cutoff work, Cross-section repair work, Evaluation method

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）が保有する鉄道構造物のうち、営業路線の約 66%、117.5km を占める開削トンネルでは、漏水、浮きやはく離などの変状が生じている箇所も存在する。そのため、東京メトロでは、補修工事を確実かつ効率的に実施するために標準工法として定めた特定の材料を用いて順次補修を行い、トンネルの健全性を保っている。しかし、標準として定めた補修工法は長年更新されておらず、また、補修後も再劣化により同様の補修を繰り返すことが少なくない。そのため、補修工法の選定および評価について再考の余地があった。また近年、各メーカー等により様々な補修材料が研究・開発されているが、東京メトロにおける補修材料の要求性能を具体的に定義していないことから、補修材料の選定にいたる根拠が曖昧であった。さらに、材料試験などの補修材料単体での性能評価を行う試験方法は多くあるものの、経年劣化後の地下鉄トンネルコンクリートとの組み合わせによって性能評価をした事例は少ないといった問題があった。

そこで、持続的な補修効果を持つ補修工法を選定するため、経年劣化した母材コンクリートと補修材料の相互作用的な視点を持った、試験方法およびその評価方法を検討し、新材料導入に向けた評価システムを構築した。

昨年度、試験の手順や基準値を暫定的に設定し、実際に評価システムの運用を開始した。これに伴い、新しい補修材料を募集したところ、止水工 10 材料、断面修復工 8 材料の応募があった。これらの材料について、評価システムに基づき室内試験を行ったので、試験方法の改良点や試験結果等、運用状況を報告する。

2. 要求性能

(1) 共通

鉄道構造物等維持管理標準¹⁾でトンネルの要求性能として示されている項目のうち、地下鉄トンネルにおいて維持管理上特に重視したいものは安全性および使用性である。安全性は長期的にトンネルが想定した作用のもとで大きく変形せず、建築限界が確保されていることと、

コンクリート片などの落下により旅客および列車の運行に被害を及ぼさないこと、使用性は漏水によるレール腐食などの支障がないこと、外観が損なわれないことが求められる。

さらに、供用中の地下鉄構造物の保守作業は、終電後から始発までの間に行う必要があるため、これらを踏まえて、止水工および断面修復工の要求性能を決定した²⁾。

(2) 止水工

止水工の要求性能（表-1）は、必ず満たさなければならない「必須要件」と、必要に応じて満たすべき「特長要件」の2つに区分し、「特長要件」は現場の状況に応じて定めることとした。

(3) 断面修復工

断面修復工の要求性能を表-2 に示す。断面修復工は限られた時間内で施工ができ、補修後も劣化因子を侵入させず、長期的に断面修復部の浮き・はく離が生じない性能が要求される。

3. 試験方法および性能照査フロー

(1) 止水工

対象の止水材料が設定した要求性能を満たすことを確認するため、表-3 に示す試験項目を設定した。これらについては、数種類の止水材料を用いて確認試験を行い、適切かどうか検証済みである³⁴⁵⁾。通水型止水性確認試験については、性能照査の基準値を暫定的に止水割合の70%以上とした。追従性確認試験については、追従性に優れた材料の評価はできるものの、現時点では試験数量が少なく条件を定めるのが難しい。今後の試験の蓄積によって順次基準を定めることとし、それまではモニタリングの結果と合わせて総合的な判断を行うこととした。

止水工の性能照査フローを図-1 に示す。段階的に試験を行うことで、効率的な検討が可能となる。また、新たな補修材料の導入後も、実際のトンネルでモニタリングを継続することにより、長期的な目線での評価を行うことができる。また、いずれの試験においても、試験データを蓄積しながら基準値の妥当性を確認し、必要に応じて見直す予定である。

(2) 断面修復工

対象の断面修復材料が設定した要求性能を満たすことを確認するため、表-4 に示す試験項目を設定した。これらについては、止水材料同様、確認試験を行い、適切かどうか検証済みである⁶⁷⁾。室内透水試験については、性能照査の基準値を暫定的に透水係数 $10 \times 10^{-11} \text{m/sec}$ 未満

表-1 止水工の要求性能および照査内容

要件	要求性能	内容	照査内容
必須要件	施工性	き電停止中に所定の作業が完了でき、初電に影響を及ぼさない性能	施工により、初電通過に影響を与えないこと
	止水性	トンネル内への水の侵入を阻止する性能	施工箇所でも最大と考えられる漏水圧に対して止水が可能であること
特長要件	耐久性	ひび割れ追従性*1	季節変化によるひび割れ幅の変化に追従できること
		自己治癒性*2	施工後のひび割れ幅の拡大による再漏水を再び止水させること

*1 有機系材料を使用する場合

*2 無機系材料を使用する場合

表-2 断面修復工の要求性能および照査内容

要求性能	内容	照査内容
施工性	き電停止中に所定の作業が完了でき、初電に影響を及ぼさない性能	施工により初電通過に影響を与えないこと
界面の緻密性	トンネル内への水の侵入を阻止する性能	コンクリートと補修材との界面で劣化因子および水の侵入を許容しないこと
接着性	施工後に容易にはく離およびはく落が生じない性能	コンクリートと補修材との界面が所定の接着強度を有していること
耐久性	長期的にはく離およびはく落が生じない性能	長期的なモニタリングにより経過を観察すること

表-3 止水工における要求性能に対する試験項目

要求性能	試験項目
施工性	現地試験施工
止水性	通水型止水性確認試験
耐久性	追従性確認試験 現地試験施工後のモニタリング

表-4 断面修復工における要求性能に対する試験項目

要求性能	試験項目
施工性	現地試験施工
界面の緻密性	室内透水試験 現地簡易注水試験
接着性	室内建研式付着強度試験 現地建研式付着強度試験
耐久性	現地試験施工後のモニタリング

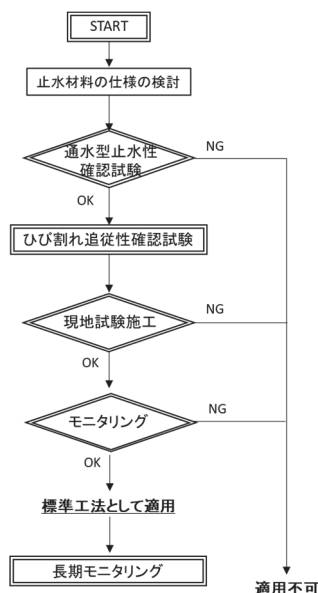


図-1 止水工の性能照査フロー

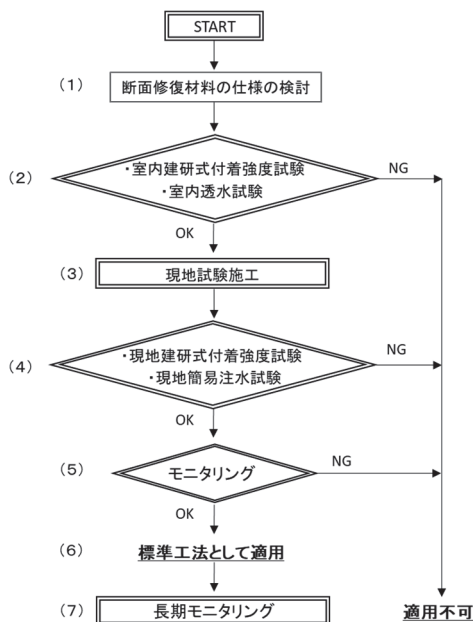


図-2 断面修復工の性能照査フロー

とした。室内建研式付着試験については、付着強度 1.00N/mm^2 以上とした。断面修復工の性能照査フローを図-2 に示す。

4. 新たな補修材料の募集

昨年度、構築した評価システムの運用を開始した。新たな補修材料の募集は、おもに東京メトロのグループ会社のホームページ上に掲載する方法で行った。しかし、どの位のユーザーに利用されているか不確かな点があるため、過去にヒアリングを行ったメーカー等へのアンケート調査も併せて行い、情報の拡散を図った。その結果、

止水工および断面修復工合わせて 21 社の応募があった。

その後、室内試験を効率よくかつ安全に実施させるため、設定した要求性能に適した材料であるか、また試験方法によって要求性能を確認できる材料であることを事前に審査した。最終的に、止水工は 10 材料、断面修復工は 8 材料について、室内試験を実施することとした。

5. 試験方法の改良

試験方法については、評価システムを構築する過程で検証済みではあるが、試験精度の確保および試験効率の改善のため、下記 4 点を改良することとした。改良するにあたっては、全て予備試験を行い、従前の試験方法と同様の精度を確保できることを確認した。改良内容の比較表を表-5 に示す。

(1) 止水材料

通水型止水性確認試験において、静水圧を容易にかつ精度よく作用させるために、「L 型塩ビ管」から「マリオットタンク」に変更した。通水型止水性確認試験の状況を図-3 に示す。

追従性確認試験において、試験の操作性を良くするために、ひび割れ幅を拡大させる引張力を「供試体側面」から「供試体端部」で作用させる構造に変更した。追従性確認試験の状況を図-4 に示す。

(2) 断面修復材料

室内建研式付着試験において、コンクリートカッターの据え付けや取り回し、コア抜き時の振動等による影響範囲を考慮し、横の寸法を 200mm から 400mm に変更した。室内建研式付着試験の状況を図-5 に示す。

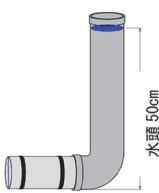
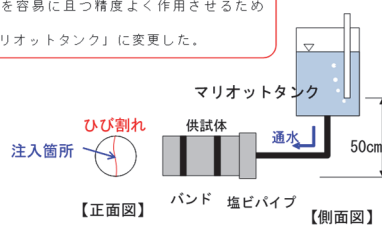
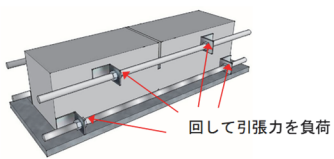
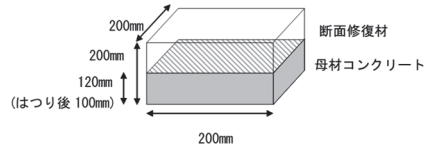
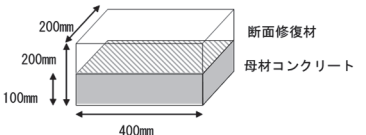
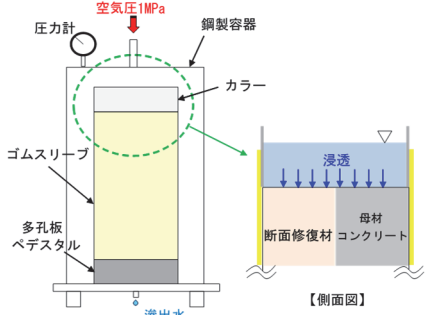
室内透水試験において、試験後の供試体の割裂作業を容易にするため、コンクリートコアの側面にシリコンボンドを塗布し、その後ゴムスリーブで覆う構造に変更した。室内透水試験の状況を図-6 に示す。

6. 試験結果

(1) 止水材料

止水材料の試験結果を表-6 に示す。通水型止水性確認試験においては、注入断面における止水材料の分散状況によって結果が分かれた。分散状況は、図-7 に示す 3 タイプに大別され、ウレタン系材料は注入後にひび割れ内で膨張し、水中でも不分離性を有するため、高い止水性を示した。一方、アクリル系材料は弾力性に優れてい

表-5 改良内容の比較

項 目	従 前	変更内容
通水型止水性確認試験	供試体に塩ビパイプを接続し、水頭 50cm を作用させる。 	静水圧を容易に且つ精度よく作用させるために「マリOTTタンク」に変更した。 
追従性確認試験	供試体側面に設置した全ネジボルトのナットにねじ込み軸力を導入し、ひび割れ幅を拡大する。 	操作性を良くするために、ひび割れ幅を拡大させる引張力を、「供試体端部」で作用させる構造に変更した。 
室内建研式付着試験	母材コンクリート：縦 200mm×横 200mm×高さ 120mm 	コンクリートカッターの据え付けや取り回し、コア抜き時の振動等による影響範囲を考慮し、横の寸法を変更した。 
室内透水試験	コアは円筒容器に入れて、容器とコンクリートコア側面の隙間をエポキシ樹脂でシールする。 	試験後の供試体の割製作業を容易にするため、コア側面にシリコンボンドを塗布し、その後ゴムスリーブで覆う構造に変更した。 

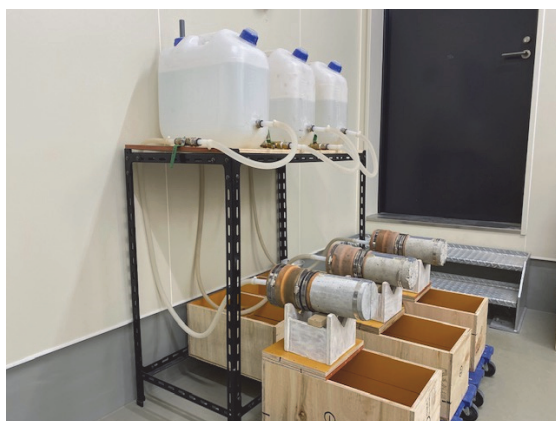


図-3 通水型止水性確認試験の状況



図-4 追従性確認試験の状況



図-5 室内建研式付着試験の状況



図-6 室内透水試験の状況

表-6 止水材料室内試験結果一覧

製品	材質	通水型止水性確認試験 止水割合(%)				性能照査 基準値	追従性確認試験 上段：追従幅(mm) 下段：変化率(%)				性能照査 基準値	性能照査 結果
		1本目	2本目	3本目	平均値		1本目	2本目	3本目	平均値		
s-1	アクリル系	25.4	37.9	34.1	32.5	平均止水割合 ≥70%					モニタリング の結果と合わ せて、総合的な 判断を行う	不適合
s-2	アクリル系	33.4	52.1	85.4	57.0							不適合
s-3	ウレタン系	100.0	52.4	100.0	84.1		—	—	—	—		適合
s-4	ウレタン系	99.8	100.0	100.0	99.9		—	—	—	—		適合
s-5	ウレタン系	100.0	100.0	99.8	99.9		—	—	—	—		適合
s-6	アクリル系	99.6	89.1	43.4	77.4		0.396 132.1	0.357 118.9	0.367 122.4	0.373 124.5		適合
s-7	セメント系	46.9	63.0	60.8	56.9							不適合
s-8	ウレタン系	100	100	100	100		0.220 73.3	0.078 26.1	0.122 40.8	0.140 46.7		適合
s-9	セメント系	64.4	74.9	47.3	62.2							不適合
s-10	セメント系	99.3	100	100	99.8		—	—	—	—		適合

るが、上部への分散性は低く、注入後に局所的な水みちが残った(図-8)。セメント系材料は、比重が大きいため沈殿しやすく、上部が水みちとなり止水性は低かった。

追従性確認試験は、通水型止水性確認試験の基準値を満足した材料を対象に実施した。通水型止水性確認試験においては、硬化後の材料の弾力性によって、傾向が大きく異なった。アクリル系材料 s-6 は、最も弾力性に優れ、高い追従性を示した。ウレタン系材料は、引張力を作用する過程で瞬時に破断したものもあれば、ウレタン系材料 s-8 は硬化時に発泡体が形成され、約 46%の追従性が得られた。セメント系材料は母材コンクリートと一体化するため、ほとんど追従性を示さなかった。

(2) 断面修復材料

断面修復材料の試験結果を表-7 に示す。室内建研式付着試験においては、d-7 を除き、全ての材料で性能照査基準を満足した。破断位置は、図-9 に示す 4 つに区分され、断面修復材と母材コンクリートの界面(③)で破断

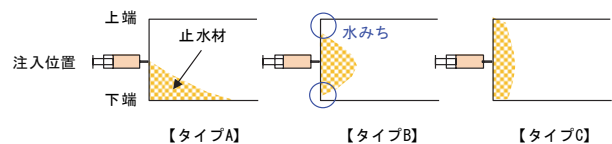


図-7 分散状況の概念図

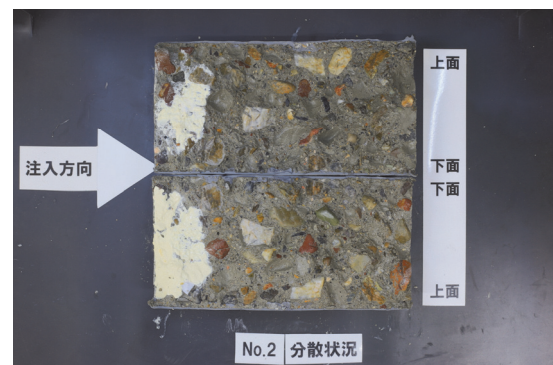


図-8 通水型止水性確認試験の様子

表-7 断面修復材料室内試験結果一覧

製品	材質	室内建研式付着試験 上段：付着強度(N/mm ²) 下段：破断位置				性能照査 基準値	室内透水試験 上段：透水係数(m/sec) 下段：アウトorイン				性能照査 基準値	性能照査 結果
		1本目	2本目	3本目	平均値		1本目	2本目	3本目	平均値		
d-1	エポキシ樹脂モルタル	1.97 ④	1.60 ④	2.09 ④	1.89	付着強度 ≥ 1.00N/mm ²	8.35×10 ⁻¹¹ アウトプット	7.92×10 ⁻¹¹ アウトプット	5.45×10 ⁻¹¹ アウトプット	7.24×10 ⁻¹¹	< 10×10 ⁻¹¹ m/s	適合
d-2	ポリマーセメント	1.34 ①	1.75 ①	1.40 ①	1.50		3.82×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.96×10 ⁻¹¹ アウトプット	2.83×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.54×10 ⁻¹¹		適合
d-3	ナイロン繊維入りポリマーセメント	1.99 ①	1.93 ①	1.93 ①	1.95		4.46×10 ⁻¹¹ アウトプット	4.95×10 ⁻¹¹ アウトプット	9.81×10 ⁻¹² インプット	3.46×10 ⁻¹¹		適合
d-4	ポリマーセメント	2.19 ③	1.85 ③	1.49 ③	1.84		9.81×10 ⁻¹² インプット	1.98×10 ⁻¹¹ アウトプット	8.39×10 ⁻¹² インプット	1.27×10 ⁻¹¹		適合
d-5	ポリマーセメント	2.00 ④	2.13 ④	2.00 ④	2.04		3.47×10 ⁻¹¹ アウトプット	4.17×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.75×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.80×10 ⁻¹¹		適合
d-6	ポリマーセメント	1.71 ④	2.10 ③	2.23 ①	2.01		9.41×10 ⁻¹¹ アウトプット	1.34×10 ⁻¹¹ アウトプット	4.15×10 ⁻¹² インプット	3.72×10 ⁻¹¹		適合
d-7	ポリオレフィン繊維入りモルタル	0.28 ③	1.06 ②	1.12 ②	0.82							不適合
d-8	ポリマーセメント	2.23 ①	2.05 ①	2.19 ③	2.16		8.12×10 ⁻¹² インプット	7.14×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.75×10 ⁻¹¹ アウトプット	3.90×10 ⁻¹¹		適合

するもの以外にも、治具界面①や母材コンクリート内④で破断するものも見られた。不適合となったd-7は、他の材料と比較して唯一、断面修復材内②での破断が確認された。

室内透水試験においては、実施した全ての材料で性能照査基準を満足した。試験後の供試体の割裂面では、主に母材コンクリートへの浸透が卓越し、断面修復材への浸透は僅かであった。また、断面修復材と母材コンクリートの界面を通る局所的な流れは、目視において確認されなかった。

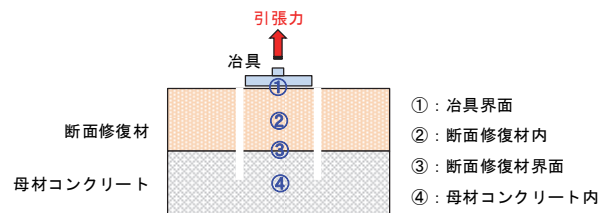


図-9 破断位置区分

謝辞：本論文の執筆にあたり、評価システムの運用にご協力いただいた株式会社メトロレールファシリティーズ関係各位および株式会社CORE技術研究所関係各位、室内試験を実施していただいた一般財団法人東海技術センター関係各位に深く感謝の意を表します。

7. 今後のステップ

止水工および断面修復工の性能照査フローに基づき、室内試験に合格した材料について、次のステップとして現地試験施工を実施する。しかし、室内試験に合格したものの、臭気強いものおよびプライマー塗布後の待機時間が長いもの、型枠設置が必要なものは、鉄道営業線内で施工し難いと判断し、事前に除外させていただいた。現地試験施工は今年度を予定していて、現在施工箇所の抽出等の準備を進めている。

現地試験施工に合格した材料については、その後2年間のモニタリングを行い、良好であれば標準工法として採用される。

最後に、新しい補修工法は常に開発されていることから、今後も定期的に評価システムを運用していく予定である。今年度の新規材料の募集も7月より開始した⁸⁾。

また、今回、実際に室内試験を実施したことで、試験方法の課題もみつかった。今後は、定期的に評価システムを運用していく中で、試験方法や性能照査基準値の見直しをかけ、より有効な評価システムになるよう更新していく予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，国土交通省鉄道局監修，丸善，2007.
- 2) 田口真澄，小椋紀彦，上田洋，岸利治：地下鉄トンネルに適したコンクリート補修材料の評価システムの構築，コンクリート工学，Vol.58 No.8，pp.589-596，2020.
- 3) 瀬筒新弥，大槻あや，保栖重夫，小椋紀彦，岸利治：開削トンネルに適した止水材料選定試験方法の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第17巻，pp.57-62，2017.10
- 4) 新田裕樹，大塚努，堀真大，小椋紀彦，小西真治，岸利治：開削トンネルの止水工に対する通水型止水試験による検討，土木学会第73回年次学術講演会，V-129，2018.8
- 5) 新田裕樹・伊藤聡・田口真澄・小椋紀彦・小西真治・岸利治：開削トンネルの止水工法選定の検討，土木学会第74回年次学術講演会，V-580，2019.9
- 6) 佐藤謙，小西真治，大塚努，瀬筒新弥，飯島亨，津野究，岸利治：箱型トンネル構築補修方法現地試験工事，第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム，S2-9-6，pp.94-97，2017.12

- 7) 三浦丈典, 小西真治, 伊藤聡, 田口真澄, 新田裕樹, 上田洋, 飯島亨, 津野究, 岸利治: 開削トンネルの断面修復工に対する性能照査試験の検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会, v-231, 2019.9
- 8) 株式会社メトロレールファシリティーズ : <http://www.metrorailfa.co.jp/>

(2021. 8. 6 受付)

OPPERATION OF EVALUATION SYSTEM FOR CONCRETE REPAIR METHODS SUITABLE FOR SUBWAY TUNNELS

Sachie NAKAMURA, Kohei KOSHIBA, Shinji KONISHI and Sadayuki WATANABE

The soundness of box type tunnels is maintained by ongoing repair of water leakage, flaking as such issues occur. However, the methods defined as standard methods by Tokyo Metro Co., Ltd. had not been updated in many years, and new materials that had become available in intervening years were not introduced. Further, instances of re-degradation of some repaired locations occurred. Therefore, to enable the selection of repair methods suitable for box type tunnels such as water cutoff work and cross-section repair work, and a method for the evaluation of repair methods considering the degradation level of the concrete base material was developed after the required performance and evaluation items were defined. This paper reports on results of laboratory experiment based on a method for the evaluation of repair methods.