

点検可能な漏水対策工に関する技術開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 29

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西 弘明、今野久志、白戸義孝、佐藤 京、
寺澤貴裕、角間 恒

【要旨】

北海道の国道トンネルの約6割には冬期の走行安全性等を確保するために面導水工（漏水防止板）を用いた漏水対策が実施されており、対策箇所では、覆工コンクリート（トンネル延長で約25%）の健全度評価がなされていない。点検時に漏水防止板を撤去することは現実的ではなく、現状では点検用小窓の開口面積も小さく、設置箇所も限定的なため、トンネル全区間に渡って覆工コンクリートを点検することが困難な状況である。また、遠赤外線等による非破壊検査手法も適用できないなど漏水防止板の施工区間には維持管理に関する課題が多い。

本研究では、既設トンネルの安全性の確保、長寿命化のための適切な維持管理の実現に向け、漏水防止板が設置された覆工コンクリートの性能低下予測技術と点検技術に関する検討を実施した。

まず、覆工コンクリートの性能低下予測技術に関しては、トンネル定期点検結果を用いた劣化進行のモデルとして、修正ブラック・ショールズ（伊藤型確率微分方程式）モデルの適用を試みた。さらに、最新のトンネル定期点検結果を用いて劣化予測の検証を行い、その妥当性を確認した。次に、既設漏水対策工に対する点検技術に関しては、比較的小規模の点検孔の後施工技術の開発、それを利用した CCD による点検技術の実用に向けた課題抽出、実施方法に関する取りまとめを行なった。

キーワード：覆工コンクリート、漏水防止板、劣化予測、点検技術

1. はじめに

北海道の国道トンネルの約6割には冬期の走行安全性等を確保するために写真-1 に示すような漏水防止板を用いた漏水対策が実施されており、対策箇所では、覆工コンクリート（トンネル延長で約25%）の健全度評価がなされていない。点検時に漏水防止板を撤去することは現実的ではなく、現状では点検用小窓の開口面積が小さく設置箇所も限定的、また遠赤外線等による非破壊検査手法も適用できないなど課題が多い。

本研究では、既設トンネルの安全性の確保、長寿命化のため、漏水防止板が設置された覆工コンクリートの性能低下予測技術と点検技術の検討を行う。具体的には、覆工コンクリートの劣化予測技術の開発と漏水対策工区間の損傷度推定に関する調査を行い、漏水対策区間の劣化予測を検討する。また、漏水対策工に要求される性能を把握した上で、既存対策工を有する区間の点検技術について検討する。

2. 性能低下予測技術の提案

覆工コンクリートの劣化の推移や進行の予測手法

を提案するために、トンネル定期点検記録を基に、劣化過程の規則性を評価する確率・統計的な手法について検討を実施した。また、漏水対策工を実施している区間の状態予測を行った。

本検討では、北海道開発局より借用した延べ数 547 トンネルのトンネル定期点検記録を対象とした。

2. 1 劣化評価と予測



写真-1 漏水防止板施工箇所の状況

覆工コンクリートの劣化過程（性能の推移）は経過年数 t_i と劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ との関係として表される。経験的に経過年数 t_i における劣化度の分布 $P(t_i)$ は図-1で表現することができ、これを算術ブラウン運動（伊藤型確率微分方程式）モデルで表すと式(1)のようになる。

$$dQ(t) = \beta dt + \sigma dW(t) \dots \dots \dots (1)$$

β : 平均劣化率(トレンドもしくはドリフト)

σ : 分散 (ボラティリティ)

ここで、 $W(t)$ はウィナー過程であり、時刻 t_i 以降の $W(t)$ の値は、過去の履歴に依存しない。また、連続で平均 0、分散 $\sigma^2 t$ の正規分布に従う。概念的には、図-1の実線で示したトレンド曲線に対して、ばらつきが正規分布となる。

一方、覆工コンクリートの劣化度（性能関数）のトレンドとばらつきとの関係には、偏った傾向がみられ、劣化度が大きい方に広く分布する。そこで、算術ブラウン運動モデルの式(1)より、経過年数 t_i に関する劣化度（性能関数） $Q(t_i)$ の変化率を考慮した式(2)のブラック・ショールズ(BS)モデルとすることが最適であると想定される。

$$dQ(t) = \beta Q(t)dt + \sigma Q(t)dW(t) \dots \dots \dots (2)$$

ここで劣化度の分布は対数正規分布で表現され、一般解が得られ、覆工コンクリートの点検データ等に基づいて幾何ブラウン運動（伊藤型確率微分）方程式の係数を最尤法により同定することができる。

図-2 にトンネル定期点検結果より覆工コンクリートの展開図に記録された①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ズレ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰に対して、劣化を加点式で数量化を行った在来工法167トンネル（516データ）、NATM101トンネル（250データ）の評価値を示す。なお、数量化は、点検技術者に対する一対比較法により整理¹⁾したものである。

図-2 より、NATM・矢板工法（以下、在来）とも経過年数とともに劣化度の評価値が低下傾向を示しており、それを基に回帰したトレンド曲線においても劣化傾向が把握できる。図中で示している凡例の在来（トレンド）、NATM（トレンド）は、2016点検（在来）と2016（NATM）の記録を含めずに回帰分析したトレンド曲線である。各工法のトレンドと2016点検（在来）と2016（NATM）の評価値を比較すると経過年が長いトンネルでは、トレンドより大きく外れている状況が確認できる。ここで、在来での点検データから得られた劣化過程（経年劣化）の正規化分布項を経過年10年毎でグループ化し、トレンドに対する分布を図-3に示

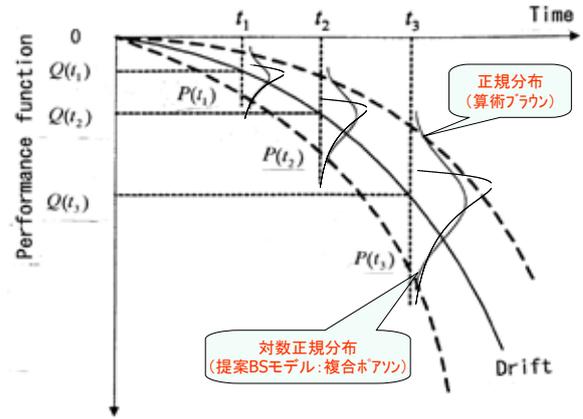


図-1 覆工コンクリートの劣化の進行想定

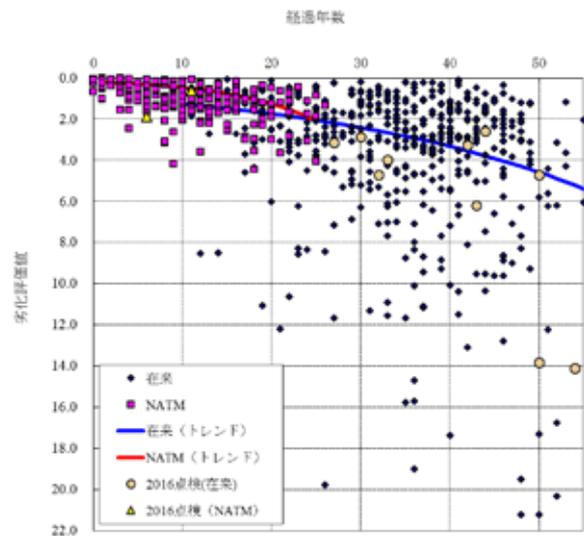


図-2 トンネル覆工の劣化評価値

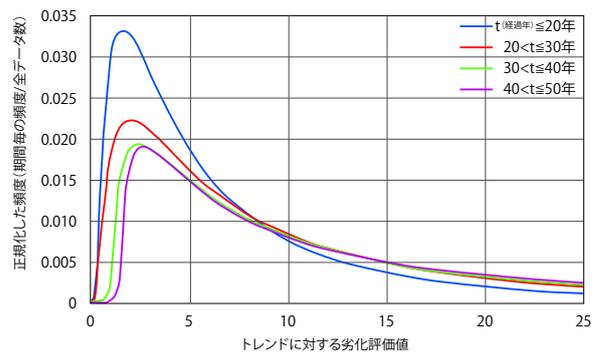


図-3 区分した経過年毎の劣化評価値の分布 $P(t_i)$

す。さらに回帰した幾何ブラウン運動の理論どおりに経過年数とともに、対数正規で広がっていることが示された。また、同時に経過年数とともに分布のピークは劣化度が高くなる

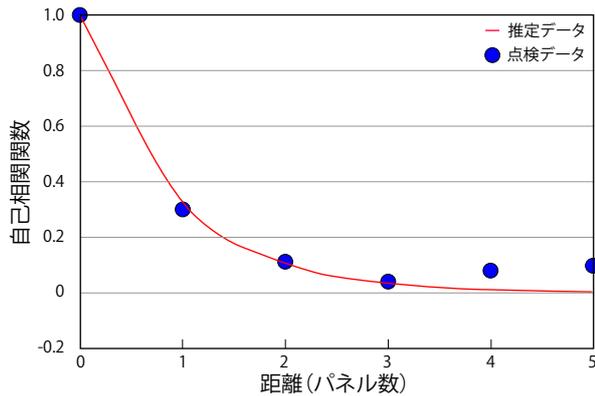


図-4 A トンネルにおける覆工評価値の相関

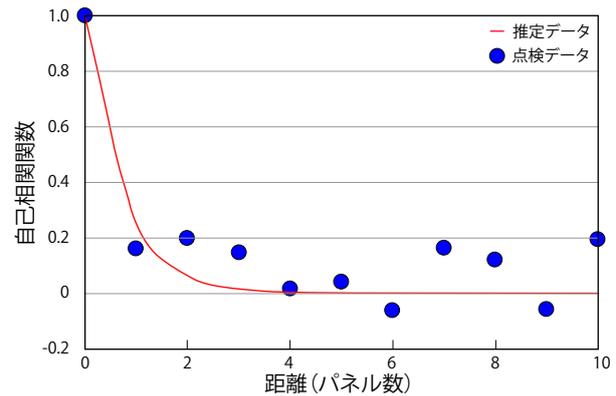


図-5 B トンネルにおける覆工評価値の相関

方へ推移しており、分布はロング・ファットテイルと呼ばれる傾向を示す。図-2 の 2016(在来)で示された経過年数 50 年を越えるトンネル覆工の劣化評価値がトレンド曲線から劣化度が大きく逸脱している状況が、この仮定で推測できることが示された。

2. 2 漏水対策工区間の状態予測

北海道開発局より協力を得て、海岸線のトンネルおよび山岳部のトンネルの 2 つのトンネルで漏水対策工（以下、面導水工）裏面の調査を実施した。その結果と面導水を施工していない区間との状態比較から、状態予測の可能性について検討した。まずは、覆工コンクリートの状況を以下に記す。

- ・面導水工を有する区間は、漏水を伴うクラックの対策箇所
- ・面導水工有無の区間で覆工コンクリートの劣化状況を比較すると、未施工区間の劣化が相対的に進行
- ・面導水工の撤去直後と 1 年後の状況から、面導水工は、微細クラックの進展抑止効果があると想定
面導水を施工した後の覆工コンクリートの劣化進行は、対策実施前に覆工コンクリートの劣化状態を評価しておくことで、対策区間前後の覆工コンクリートの劣化度より、想定することは可能であると考えられる。

そこで、面導水施工区間の前後の状態より、対策区間の劣化を精度良く推定する手法を検討するため、隣接する覆工コンクリートの劣化度との関係について分析を実施した。

2. 2. 1 隣接スパン間の劣化度の相関

トンネル点検結果から覆工コンクリート劣化評価値の隣接スパンの相関性を基に、トンネル延長方向の劣化に関する自己相関関数を算出し、その評価を実施

した。自己相関関数は、点検結果から算出された評価値の定常性を仮定して式(3)に近似し、評価する区間からのスパン数を相対的な距離とした。

$$\rho = \exp(-|\Delta|/a) \dots \dots (3)$$

Δ : 評価箇所からの距離 (覆工コンクリートのスパン数)

a : 相関距離

自己相関の評価結果を図-4、5 に示す。評価対象とする隣り合うスパンとの相関は、0.3~0.2 程度であった。

2. 2. 2 漏水対策工区間の劣化度進行予測について

覆工コンクリートの劣化の推移や進行の予測手法を提案するために、トンネル定期点検記録を基に、劣化過程の規則性を評価する確率・統計的な手法について検討を実施した。また、漏水対策工を実施している区間の状態予測を行った。

その結果、経過年数が長くなるに従って、劣化評価値がトレンド曲線から劣化度の大きな方に広く分布するような劣化進行予測に関しては、ブラック・ショールズ(BS)モデルを用いることで、評価することが可能であることが確認できた。また、その劣化進行モデルを基に漏水対策区間での劣化進行を実データを基に評価を行なったが、対策区間とその前後の隔たりが、2 スパン以上離れると関係性が非常に低く、連続的に面導水が施行されているようなトンネルでは、覆工コンクリートの劣化進行を想定することは非常に難しいと言える。

3. 漏水対策工箇所の点検技術の開発

前節までの検討結果より、連続的に面導水工を実施している区間では、何らかの方法により目視点検を実施する必要があることが明確となった。



写真-2 現場の点検口

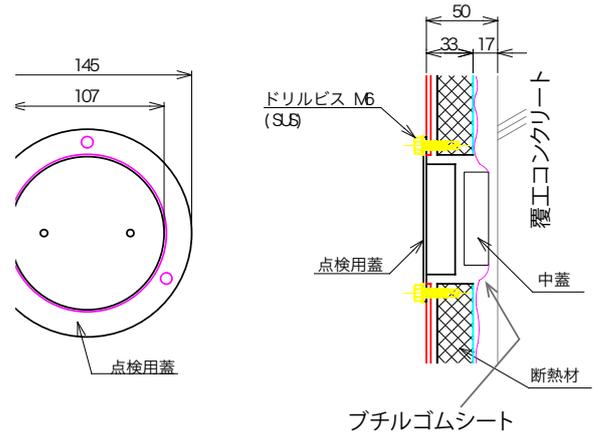


図-6 後付け点検口の表面図および配置断面



写真-3 後付け点検口設置状況



写真-4 中蓋とソケットおよびブチルゴムシート

ここでは、北海道でトンネル覆工の漏水対策工に求める性能と課題を整理し、既設覆工の点検手法として、後付け点検孔の検討とそれを利用した点検手法について整理を行なった。

3. 1 要求性能と対策工の課題

北海道におけるトンネルの漏水対策工には、遮水性、耐荷性、断熱性、耐火性と維持管理性が求められる。特に課題となるのは、断熱性を有しながら高い維持管理性能を保有しなければならないことである。高い維持管理性能とは、点検時に覆工コンクリートの状態確認が容易であることと考えられる。しかし現状では、点検口設置箇所については確認できるもののそれ以外の箇所に対しては、維持管理性が高いとは言い難い。

高い維持管理性能を実現する材料としては、透明な高分子材料やガラスなどのような光を透過するものが考えられるが、以下のような課題が挙げられる。

- ・トンネル内装板としての耐火性の確保
- ・高い透明性かつ断熱性の確保
- ・透明性の持続性

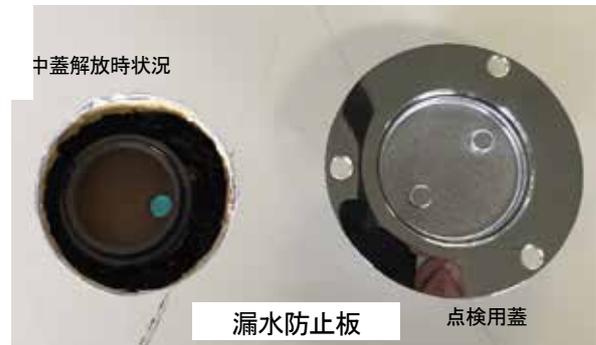


写真-5 点検口 (点検用蓋および中蓋解放時)



写真-6 断熱漏水防止板設置状況



写真-7 試験点検状況

・事故破損などの破壊断面の二次的影響の懸念

現在の材料では、高い維持管理性を有しながら、他の性能を満足させる漏水防止板の開発は非常に難しい。

3. 2 後付け点検口

北海道開発局が管理する国道では、2 箇所/1,000m²程度以上の設置が原則である。現状の点検口（写真-2 参照）は、トンネルの覆工面にクラック等があり漏水が多い箇所、及び特に必要な箇所を選定して設置している。しかし、対策工背面の覆工コンクリートを目視点検するには不十分な大きさであるとともに、箇所数が不足している既設トンネルもある。そこで、遮水性および断熱性に配慮した後付け点検口を考案し、模擬トンネル覆工コンクリートにおいて試施工を行った。

図-6 には、試施工した点検口とその断面図を示す。写真-3 は、後付け点検口を設置している箇所のみ白い漏水防止板を配置し、裏面に位置する半透明の遮水シートおよび断熱材が配置されている状態が分かるように撮影したものである。写真-4 は、中蓋および遮水対策のブチルゴムシートを拡大したものである。これは、既設面導水工の遮水シートに開けた穴からの漏水を防ぐために既設遮水シートとソケットでブチルゴムシートを挟み込み、中蓋で固定する構成となっており、写真-5 の左側にあるような状況で配置される。また、写真-5 の右側には、道路側よりアクセスできる蓋を拡大している。これは専用工具で回転しながら開閉する仕組みをとっている。開口部の直径は 107mm とした。

3. 3 CCD カメラによる点検手法

模擬覆工コンクリートに漏水防止板と後付け点検口を設置して、その点検口から CCD カメラを挿入して覆工コンクリート表面の点検を行った。写真-6 に模擬覆工コンクリートと漏水防止板の配置を示す。

表-4 試験点検結果の記録

	漏水防止板左側	漏水防止板中央
目的 (条件)	ひび割れ不明 (新規点検)	ひび割れ既知 (ひび割れ比較)
点検範囲	5.0m ² : 2.0m×2.5m (43測線)	4.0m ² : 2.0m×2.0m (40測線)
人員	2名 カメラ操作+記録者	2名 カメラ操作+記録者
墨出し時間	45分	45分
点検時間	5時間15分	3時間
1m ² (1測線) の作業時間	1時間12分/m ² 8.4分/測線	56分/m ² 5.6分/測線

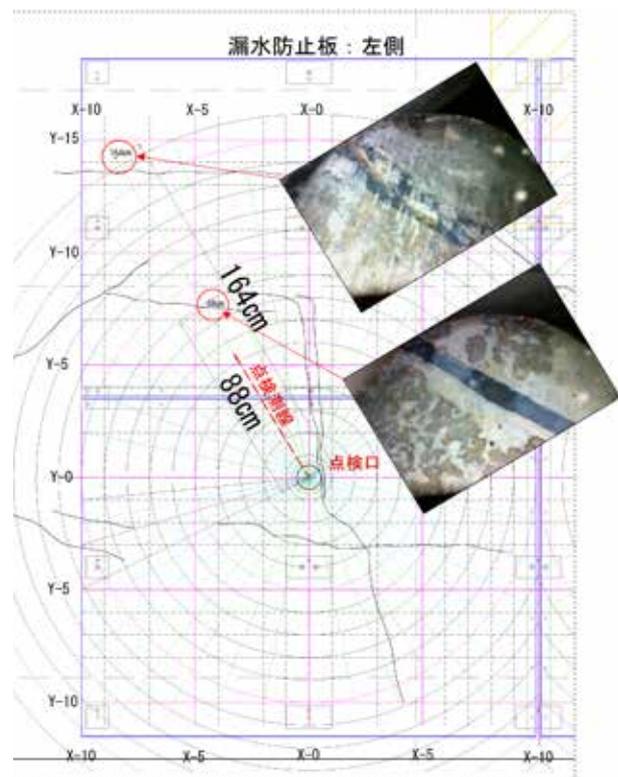


図-7 試験点検記録 (メッシュ図) と模擬ひび割れ画像

この点検口を利用した点検では、カメラを挿入する点検口を中心に放射状に点検を実施する。作業効率を向上させるために、点検対象の覆工コンクリート見下げ図にメッシュ図を作成し、現場で放射状に点検測線を定め、漏水防止板上に墨出しを行う。また、使用する CCD の 1 ピクセルあたりのクラックスケールのキャリブレーションが必要になる。本検討では、放射方向にフレキシブルケーブルの先端についている CCD カメラを適切に挿入するためにガイドを利用している。作業手順は、ガイドを挿入後、CCD カメラを挿入し、模

擬ひび割れの確認を行う。1 測線の点検終了後は、ガイドと CCD カメラを引き抜き、次の測線の点検を繰り返す作業を行った。写真-7 に試験点検状況、図-7 に点検記録と模擬ひび割れ画像を示す。

ひび割れ状況の不明な箇所の新規点検と既知な箇所の追跡点検を想定して実施し、作業時間の比較を実施した。その結果を表-4 に示す。新規点検の場合は、非常に多くの時間を要するため、実用化するには問題が多い。これに対して、追跡点検では、新規点検よりも点検時間が短く、以下の点をフォローすることで実用化が可能と考えられる。

- 1) 点検対象を限定的な範囲とし、劣化損傷の追跡点検に利用する。
- 2) CCD のガイド挿入に配慮した点検口の開口部の加工を行う。
- 3) 点検口から 1m 程度の範囲で点検を行うようにすることで、作業の効率化を図る。

7. まとめ

既設トンネルの安全性の確保、長寿命化のための適切な維持管理の実現に向け、漏水防止板が設置された覆工コンクリートの性能低下予測技術と点検技術に関する検討を実施した。覆工コンクリートの性能低下予測技術に関しては、トンネル定期点検結果を用いた劣化進行のモデルとして、修正ブラック・ショールズ (伊藤型確率微分方程式) モデルの適用を試みた。さらに、最新のトンネル定期点検結果を用いて劣化予測の検証を行い、その妥当性を確認した。次に、既設漏水対策工に対する点検技術に関しては、比較的小規模の点検

孔の後施工技術の開発、それを利用した CCD による点検技術の実用に向けた課題抽出、実施方法に関する取りまとめを行ない、以下の結論を得た。

覆工コンクリートの性能低下予測技術の開発に関しては、北海道の国道トンネルの劣化評価値の進行モデルとして、修正ブラック・ショールズ (伊藤型確率微分方程式) モデルの適用を試み、最新のトンネル定期点検結果を用いて妥当性を確認した。その結果、覆工コンクリートの劣化評価値の進行予測を行うモデルとして、修正ブラック・ショールズ (伊藤型確率微分方程式) モデルが有用であることを明確にした。さらに、修正ブラック・ショールズモデルを用いた漏水防止板が施行されている箇所の劣化進行予測に関して、隣接する覆工の状況との相関を検討した。その結果、直ぐ隣の覆工コンクリートとは、多少の関係性があることが確認されたが、漏水対策が連続的に施工されている区間では、覆工コンクリートを直接点検することが必要であることが明確となった。

既設漏水対策工に対する点検技術として、比較的小規模の点検口を利用した CCD による点検手法について試験点検を行なった。新規点検では非常に多くの時間が必要であり、実用化に向けては課題が多い。既知の劣化を対象とするなどの限定的な追跡点検ならば、抽出した課題をフォローすることで実務に活用できる。

参考文献

- 1) 須藤敦史、佐藤京、西弘明:積雪寒冷地トンネルにおけるTMS構築に関する研究、土木学会 第 21回トンネル工学研究発表会論文集、pp. 203- 208、2011.

EXAMINATION OF TECHNIQUE TO INSPECT TUNNEL LINING CONCRETE ON THE BACK SIDE OF WATER LEAKAGE PREVENTION PLATE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2014-2017

Research Team : Structure Research Team,

Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki, KONNO Hisashi

SHIROTO Yoshitaka, KAKUMA Ko

SATO Takashi, TERASAWA Takahiro,

Abstract: Approximately 60% of Hokkaido's national highway tunnels are equipped with water leakage prevention plates to ensure winter driving safety. As a result, about 25% of the tunnel extension has not been evaluated for soundness of tunnel lining concrete. It takes a lot of cost and time to inspect after removing the leakage prevention plate. The opening area of the small window installed for inspection is small. In addition, the location of small windows is limited, and it is difficult to inspect the entire length of the tunnel. Since non-destructive inspection is not applicable, there are many problems in maintaining and managing sections where leakage prevention plates are installed. In this study, a technical study was conducted to predict the deterioration of tunnel lining concrete with water leakage prevention plates. In addition, the inspection method of the tunnel lining concrete on the back of the water leakage prevention plate was examined.

As for the technology for predicting deterioration of lining concrete, we tried to apply the modified Black-Scholes model as a model of deterioration progress using the tunnel inspection results. As verification of the proposed model, the validity was confirmed using the latest tunnel inspection results. Next, we developed a comparatively small inspection port, and proposed the inspection technology by CCD using the inspection port and extracted issues for practical use. The implementation methods for practical use were summarized.

Key words: Tunnel Management, Water Leakage Prevention Plate, Predicting Deterioration