地下鉄トンネル検査データに基づく維持管理計画の策定について

早稲田大学　学生会員　○原　大介
東京地下鉄株式会社　正会員　小西　真治
早稲田大学　フェロー会員　赤木　寛一
東京地下鉄株式会社　正会員　宮本　光基
早稲田大学　学生会員　岡田　真聡

1. はじめに

高度経済成長期以降に急速に整備され，これまでに相当量蓄積されてきた社会資本ストックの老朽化が進む中で，維持管理の効率化が求められている．鉄道構造物の維持管理に関しては，鉄道事業者は定期的な検査を行い構造物の劣化状況や変状種類等を整理し，これらの結果より補修計画を実施している．本研究では，蓄積された検査データをトンネルの構造種別・地盤条件毎に整理し，健全度評価により 20 年間の劣化予測を行った．そのうえで，毎年の補修量を決定する補修計画を検討した．

2. トンネル検査データの集計

1) 構造種別・地盤条件による区分け

本研究で対象とした地下鉄トンネル（以下，当該路線）の構造種別には，開削トンネル構造及びシールドトンネル構造の 2 種類が存在する．また，地盤条件は硬質地盤と軟質地盤に大別した．これらをそれぞれ考慮し，開削硬質地盤，開削軟質地盤，シールド硬質地盤，シールド軟質地盤の 4 種類に区分けして集計を行った．

2) 変状ランク [1)]

地下鉄トンネル検査時に利用されている健全度判定区分（以下，変状ランク）は，鉄道構造物維持管理標準 [1)]に示される A1, A2, B, C, S の 5 段階である．これらの変状ランクを以下の最悪値法により集計した．

3) データ集計法：最悪値法

本研究では，トンネル検査データを集計するにあたり，「最悪値法」という手法を用いた．最悪値法とは，トンネルを 1m 毎に区切ったスパンに対し，そのスパン内に含まれる変状のうち最も重度なものを代表値として集計する方法である．この最悪値法集計結果により，開削硬質地盤からシールド軟質地盤のそれぞれで，建設年次から検査年度までの経過年数（以下，経年）1 年毎の各変状ランク存在割合を算出した．

3. 集計結果に基づく劣化予測 [2)]

1) マルコフ過程理論

集計結果を用いて劣化予測を行うにあたり，本研究ではマルコフ過程の理論を採用した．ここでマルコフ過程とは，未来の挙動が現在の状態のみに依存し，過去の履歴には無関係に展開する過程のことである．マルコフ過程を適用すると次のとおりである．

トンネル完成から n 年経過した時点での変状ランク X の存在確率を{*P*x}とすると，(n+1)年経過した時点での変状ランク X の存在確率{*P*x'}は，行列[*K*ij]を用いて以下の式(1)で与えられる．

$$\begin{pmatrix} P_S' \\ P_C' \\ P_B' \\ P_{A2}' \\ P_{A1}' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_S \\ P_C \\ P_B \\ P_{A2} \\ P_{A1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) 劣化推移行列の作成

マルコフ過程より，各経年間の変状ランク存在割合の推移を表す行列[*K*ij]（以下，劣化推移行列）を作成した．ここでは前提条件を以下のように設定した．

- 変状ランクが自然に改善されることはない．
- 変状ランクの 1 年ごとの変化は，同じランクを維持するか，1 段階悪化するかの 2 通りである．
- 経年 0 年での変状ランクは，すべて S である．

3) 健全度の導入

劣化の推移を数値により評価するため，「健全度(Health Index: *h*)」を導入する．健全度(*h*)とは，以下の式(2)に示されるように，各変状ランクに分類されたトンネルのスパン数(n_i)に表-2 に示す各重みづけ係数(k_i)を乗じて，総スパン数で除した値である．

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (i = \mathrm{A1, A2, B, C, S}) \quad (2)$$

表-2　重みづけ係数(*k*)

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ係数 *k*	10	8	6	3	1

4) 20 年間劣化予測結果

作成した劣化推移行列を用いて 20 年間劣化予測を行った結果の一部を図-1 に示す．

キーワード　地下鉄トンネル，マルコフ過程，劣化予測，補修計画
連絡先　〒169-8555　東京都新宿区大久保 3-4-1　58 号館 205 号室

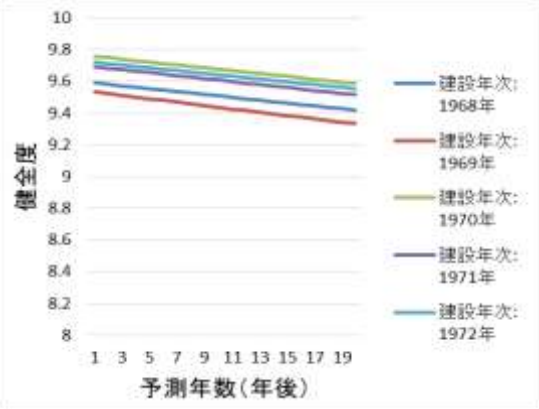

図-1　開削硬質地盤 20 年間劣化予測結果

4. 補修計画の提案

1) 補修計画概要

以上の劣化予測結果を用いて補修計画を検討する．本研究では開削硬質地盤からシールド軟質地盤の各条件における年間の補修量を決定することを目的とし，具体的には，各条件における 20 年間劣化予測結果の勾配（以下，劣化速度）の比で，当該路線の年間補修スパン総数をこれらに分配する（式(3)参照）．なお，当該路線の年間補修スパン総数は，ここでは 100 と設定した．100 スパンを分配した結果を表-3 に示す．

$$\frac{a_{oh}}{n_{oh}}:\frac{a_{os}}{n_{os}}:\frac{a_{sh}}{n_{sh}}:\frac{a_{ss}}{n_{ss}}=v_{oh}:v_{os}:v_{sh}:v_{ss} \quad (3)$$

表-3　年間補修スパン数

	劣化速度 v（健全度低下量）(/年)	スパン数 n	年間補修スパン数 a
開削硬質 oh	0.00939	16076	36
開削軟質 os	0.00994	14890	36
シールド硬質 sh	0.01684	2670	11
シールド軟質 ss	0.01808	4006	17
		合計	100

本研究結果において，表-3 から分かるように，劣化速度は構造種別ではシールドトンネルの方が開削トンネルよりも大きく，地盤種別では，軟質地盤の方が硬質地盤よりも大きい．前者について，このような結果が得られたのは，当該路線においてはシールド工法が導入の初期段階であったことが大きく起因していると考えられる．

2) 補修計画の考察

決定した各年間補修スパン数で，開削硬質地盤からシールド軟質地盤の各条件で 20 年間補修を施した場合の健全度推移を整理した．ここではこのうち開削硬質地盤について，図-2 には毎年の補修スパンの内訳を，図-3 には健全度の推移を示す．

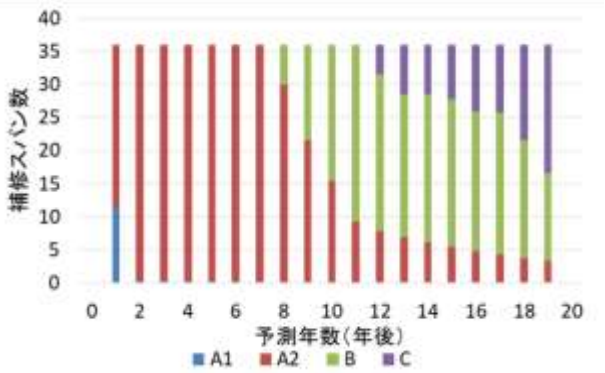

図-2　開削硬質地盤 補修スパン内訳

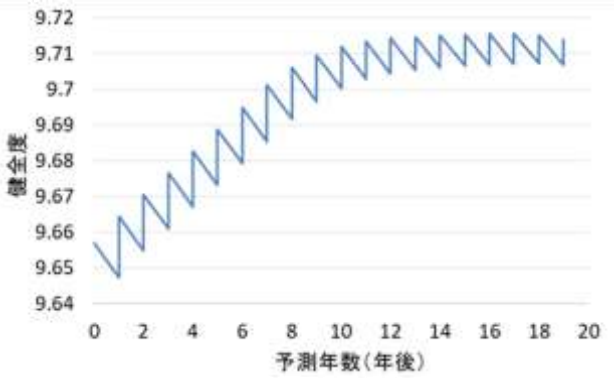

図-3　開削硬質地盤 健全度推移

以上から，単に劣化速度の比に基づく今回の配分では，開削硬質地盤において，軽微な C ランク変状まで補修が及んでいる点で，想定した補修スパン数がやや過剰であったことが分かった．今後は，当該路線の特徴を再度検討し，分配時の係数補正等の更なる検討を行っていきたい．

5. まとめ

本研究では，地下鉄トンネルの構造種別・地盤条件に着目して劣化予測を実施し，補修計画を検討した．本研究で得られた成果は以下のとおりである．

- 最悪値法によるデータ集計，健全度評価を用いることで，トンネルの検査データから劣化状態を定量的に把握することができた．
- 作成した劣化推移行列により劣化予測を行い，それに基づいて補修計画を検討した．
- 補修計画を実行した場合の健全度推移をグラフ化し，更なる検討の必要性を確認できた．

6. 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），丸善出版，2007.
2) 岡田真聡，赤木寛一，小西真治，宮本光基 : 軟弱地盤における地下鉄トンネルの検査データに基づく維持管理手法の検討，第 23 回地下空間シンポジウム，2018.