

点検データに基づいた地下鉄トンネル維持管理計画の策定について

早稲田大学大学院 学生会員 ○岡田 真聡 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 今泉 直也
 早稲田大学大学院 学生会員 原 大介 東京地下鉄株式会社 非会員 根本 早季
 早稲田大学 非会員 酒井 亮太

1. はじめに

我が国では、相当量蓄積されてきた社会資本ストックの老朽化が問題となっており、それらの効率的な維持管理が求められている。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、劣化状況を整理している。これまで、地下鉄トンネルにおける維持管理の効率化に寄与することを目的に、検査データを用いた将来の劣化予測とその信頼性の考察、及びこれに基づく様々な補修計画の検討を、各路線全体といったマクロな観点により実施してきた。一方、実務においてはさらにミクロな単位(各駅間等)での補修計画も組まれている。そこで、ある一路線内における駅間毎の補修量を、種々の制約条件の下において最適化することを目指し、これまでの検討手法を応用することとした。

2. これまでの検討手法 (劣化予測手法)

本研究で行われている劣化予測手法は、以下の3つのフェーズによって構成されている。

Phase1: 最悪値法によるデータ集計

2年に1度実施される“通常全般検査”の検査台帳に記載されている変状を、その変状ランク(表-1 参照)に着目し“最悪値法”により集計する。さらに、トンネルの構造種別(開削・シールド)と地盤条件(硬質・軟質)にも着目し、4通りに区分する。以下に詳細な手順を示す。

- ① トンネルを1m毎のスパンに区切り、各スパン内に存在する最も重度な変状ランクをそのスパンの代表値とする。該当スパン内に変状がない場合はSランク(健全)とする。
- ② 建設年次別に、各代表値のスパン数を集計する。この際に、上記の構造種別と地盤条件を区別する。

表-1 構造物の健全度判定区分

判定区分	構造物の状態
A	運転保安、列車の正常運転及び旅客、公衆等の安全の確保を脅かし、またはそのおそれのある変状等があるもの
B	将来、判定区分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

Phase2: 経年毎のデータ整理とマルコフ過程の適用

最悪値法による集計結果を、“経年”(=(検査年次)-(建設年次))毎に各変状ランクの存在確率を集約し、経年による連続データを作成する。その際、以下に示す2つの前提条件を設定するとともに、該当データが存在しない部分には線形近似を施す。図-1に線形

近似後の連続データの一例(当該路線全体、構造:シールド、地盤:硬質)を示す。

- ✓ 変状ランクが補修なしに自然と改善することはない
- ✓ 経年0年においては全てSランクである

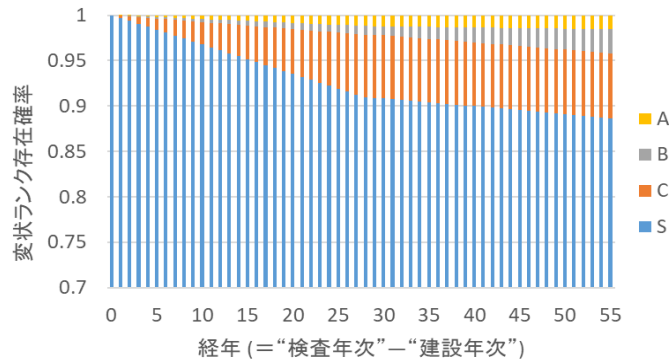


図-1 経年毎の各変状ランク存在確率 (当該路線全体、構造:シールド、地盤:硬質)

上記の連続データに対し、“マルコフ過程”を適用し“劣化推移行列”を作成する。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、過去の履歴とは無関係に展開する過程のことである。この理論より、上記の連続データ内の確率推移から1年毎に劣化の進行を表す“劣化推移行列”を作成する。この際、各変状ランクは1年毎に同ランクを維持するか1段階悪化するかの2通りであると仮定する。表-2に作成例を示す

表-2 劣化推移行列 $[K_{ij}]$ (黄色部)作成例

		経年(X+1)年 各ランク存在確率				
		S	C	B	A	
経年(X)年 各ランク 存在確率	S	0.800	0.944	0.056	0	0
	C	0.100	0	0.860	0.140	0
	B	0.075	0	0	0.973	0.027
	A	0.025	0	0	0	1

Phase3: 劣化推移行列を用いた劣化予測

上記のマルコフ過程と劣化推移行列を用い、ある経年の各変状スパン数 $\{P_X\}$ に、該当する経年間の劣化推移行列 $[K_{ij}]$ を掛け合わせることで、1年後の各変状スパン数 $\{P'_{X'}\}$ を予測する(式(a)参照)。以降を予測する際はこれを繰り返す。

$$\begin{pmatrix} P'_S \\ P'_C \\ P'_B \\ P'_A \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & K_{AA} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_S \\ P_C \\ P_B \\ P_A \end{pmatrix} \quad (a)$$

キーワード 地下鉄トンネル, マルコフ過程, 劣化予測, 健全度判定, 補修計画

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58-205 赤木研究室 TEL: 03-5286-3405 E-mail: okd.0706@moegi.waseda.jp

3. 今回の検討手法

3.1. 駅間毎の劣化予測と予測結果の定量化

検査台帳データを駅間毎に分けた上で、2章で述べた手法を用い駅間(区間)毎にデータ集計・劣化推移行列作成を行うことで、駅間・構造種別・地盤条件別劣化予測を行う。当該路線においては32区間別の劣化予測となる。

また、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。健全度とは、各変状ランクのスパン数(n_i)に各変状ランクの重み付け係数(k_i)を乗じ、総スパン数で除した値である(式(b)、表-3参照)。値の大きい方がより健全という評価になる。

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (i = (\text{変状ランク}) A, B, C, S) \quad (b)$$

表-3 構造物の健全度判定区分

変状ランク	A	B	C	S
重み付け係数 k_i	1	6	8	10

3.2. 駅間別年間補修量決定法

上記の32区間別データ集計結果及び劣化予測結果をもとに、以下に示す2つの指標(①②)を用意し、路線全体の年間補修スパン数を区間別に配分する。なお、ここでは路線全体の年間補修スパン数を100と設定する。

- ① 10年間劣化予測における健全度低下量(平均勾配)
→単位距離当たり各区間補修スパン数を、該当区間の平均勾配の比に振り分ける。
- ② 劣化予測前のAランクスパン数
→単位距離当たり各区間補修スパン数を、該当区間のAランクスパン数の比に振り分ける。

本検討では、①による各区間年間補修スパン数と②による各区間年間補修スパン数の和が、路線全体の年間補修スパン数の100になるよう設定するとともに、①・②のウエイト比を、(①:②=100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100)の5通り用意する。その上で、それぞれの補修量で10年間のシミュレーションを行い、健全度推移や残留変状スパン数を比較する。

4. シミュレーション結果と考察

3章で述べた手法で各区間の年間補修スパン数を決定し、10年間シミュレーションを行った結果の一例(健全度推移)を図-2に示す。図-2には、劣化推移行列による健全度低下と、設定した年間補修スパン数での補修による健全度上昇が交互に示されている。

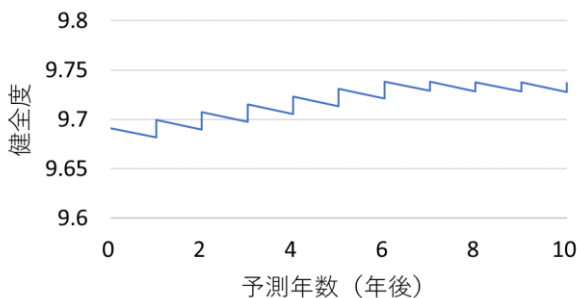


図-2 劣化推移行列と設定年間補修量による10年間健全度推移例 (XY駅間, 構造: シールド, 地盤: 硬質, ①:②=75:25)

また、各区間・各補修ウエイト比のシミュレーション結果を、補修効率(補修シミュレーションによる平均健全度上昇量:図-3)と構造物安全性(残留Aランクスパン数:図-4)の2つの観点よりまとめる。結果に対する考察は以下のとおりである。

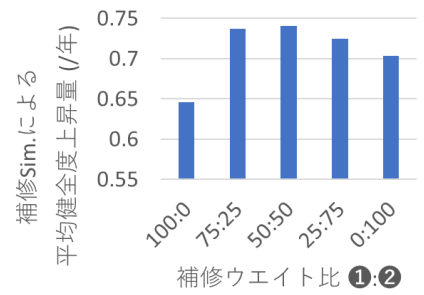


図-3 シミュレーション結果まとめ1

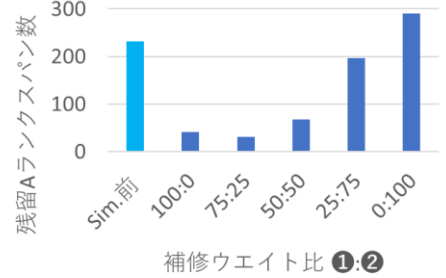


図-4 シミュレーション結果まとめ2

- 図-3より、②を考慮しない補修量配分(①:②=100:0)の場合、シミュレーション初期において、既にAランクが生じている区間よりもまだAランクが生じていない区間に多くの補修量が割かれてしまうケースが見受けられた。これにより、同一の補修量でも健全度上昇量に差が出たと考えられる。
- 図-4より、①を考慮しない補修量配分(①:②=0:100)の場合、今後新たに劣化が予想される区間と補修量配分にズレが生じ、新たに生じるAランク変状に対応できず、残留Aランクスパン数が蓄積してしまったと考えられる。

以上のことから、本検討の当該路線において、補修ウエイト比(①:②=75:25)が補修効率・安全性の双方の観点にて最も優位であると結論付けた。

5. まとめ

本検討で得られた知見は以下のとおりである。

- 区間・構造種別・地盤条件別にデータ集計(最悪値法)・劣化推移行列作成・劣化予測を行うことで、各区間の劣化傾向の違いを把握することができた。
- 劣化傾向の差異を健全度で定量化することで、健全度低下分を指標とした補修量配分案を策定することができた(①)。
- 健全度低下分を指標とした補修量配分(①)とシミュレーション前の変状スパン数を指標とした補修量配分(②)を組み合わせることで、補修効率・安全性の双方を考慮した補修量配分案(①:②=75:25)を策定することができた。

《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) 原大介, 赤木寛一, 小西真治, 宮本光基: 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, 土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2018.