

地下鉄トンネル検査データに基づく維持管理計画の具体化の試み

早稲田大学 学生会員 ○酒井 亮太
東京地下鉄株式会社 正会員 小西 真治
東京地下鉄株式会社 非会員 今泉 直也

早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一
東京地下鉄株式会社 非会員 根本 早季
早稲田大学 学生会員 原 大介

1. はじめに

近年我が国では、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及び補修計画の検討を、各路線全体について実施してきた。一方、実務においては各駅間等での補修計画も組まれている。そこで本研究では、これまでの手法を応用し、ある一路線内の駅間毎の補修量の最適化を目指した検討を実施した。

2. 劣化予測手法

2.1. 検査データの集計

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A、B、C、Sの4段階である。本研究では、対象とした地下鉄トンネル(以下、当該路線)における、2年に1度行われる通常全般検査の検査台帳に記載された変状ランクを、「最悪値法」で集計する。以下に、その詳細な手順を示す。

- (i) トンネルを1mごとに区切り、そのスパン内において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無い場合はSランクとする。
- (ii) 建設年次毎に各スパンの代表値を集計する。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。

2.2. 集計データの連続化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)毎に各ランクの存在確率を集約し、連続データを作成する。図-1は、作成した連続データの一例である。また作成の際には、以下2つの前提条件を設定し、該当データが存在しない経年は線形補間・補外を施す。

- 変状ランクが補修なしに自然と改善しない
- 経年0年においては、すべてSランクである。

さらに、図-1の連続データに対し、「マルコフ過程」の理論を適用し、「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であり、この理論を作成した連続データに適用し、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(経年33年→経年34年の場合)を示す。

2.3. 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(1))。以降を予測する際はこれを繰り返す。

2.4. 劣化予測手法の妥当性の評価

本研究で用いる予測手法の妥当性を、95%信頼区間と交差検

証の考え方を応用した方法で検証した。ここで、交差検証²⁾とは全データを学習用データと検証用データに分割し、学習用データで作成したルールを検証用のデータに適用し、一致率を見るといものである。以下は、検証結果の一例であり、95%信頼区間が予測値>実測値の場合を「安全側」、予測値<実測値の場合を「危険側」の判定としている。

図-2より、「危険側」の予測は見られなかった。これは、劣化予測手法が、より悪い状態を見積もる最悪値法ベースの方法であるためだといえる。

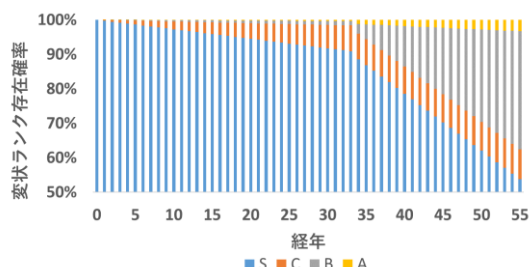


図-1 経年毎の各変状ランク存在確率

(当該路線全体、構造：シールド、地盤：硬質)

表-1 劣化推移行列作成例(黄色部分)

		経年34年変状ランク割合			
		S	C	B	A
		0.9444	0.0437	0.0072	0.0046
経年33年 変状ランク 割合	S	0.9500	0.9941	0.0059	0
	C	0.0382	0	0.9966	0.0034
	B	0.0071	0	0	0.9954
	A	0.0046	0	0	0

$$(P'_S \ P'_C \ P'_B \ P'_A) = (P_S \ P_C \ P_B \ P_A) \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & 0 & 0 \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & 0 \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA} \\ 0 & 0 & 0 & K_{AA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

	A	B	C	A-C合算
シールド・硬質地盤	100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0	200 180 160 140 120 100 80 60 40 20 0	1000 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0	1000 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0
	安全側	安全側	安全側	安全側

	A	B	C	A-C合算	S
予測	81 ~ 83	157 ~ 165	469 ~ 472	707 ~ 720	7602 ~ 7611
実測	41 ~ 41	104 ~ 105	398 ~ 399	542 ~ 545	7776 ~ 7777
相対誤差	49% ~ 51%	33% ~ 37%	15% ~ 16%	23% ~ 25%	2% ~ 2%



図-2 信頼区間の比較

(当該路線全体、構造：シールド、地盤：硬質)

3. 駅間毎の補修計画の策定

3.1. 駅間毎の劣化予測と健全度について

検査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毎に検査データの集計・劣化推移行列作成を行うこと

で、駅間・構造種別・地盤条件別に劣化予測を行う。当該路線においては32駅間毎の劣化予測となる。

また、劣化の推移を数値で評価するため、“健全度(Health Index:h)³⁾”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(2)、表-2 参照)。値の大きい方がより健全という評価になる。なお、重み付け係数は対象鉄道事業者の実務者へのアンケート調査により設定した。

$$h = \frac{\sum k_i n_i}{\sum n_i} \quad (i = (\text{変状ランク}) A, B, C, S) \quad (2)$$

表-2 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. 駅間毎の年間補修量配分

補修計画を策定するにあたり、安全性の確保を目指すことは大前提であり、その上で補修の効率化も追求したい。そこで、上記の32駅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(X, Y)を用意し、実施可能な路線全体の年間補修スパン数を駅間別に配分する。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。

X: 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。(補修の効率化の観点)

Y: 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。(安全性確保の観点)

本検討では、 X による各区間年間補修スパン数と Y 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、 $X:Y$ の補修量配分比を、($X:Y=100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100$)の5通り用意する。その上で、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。

図-3は補修シミュレーションのイメージ図であり、劣化予測による健全度低下と、駅間毎に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繰り返されている。

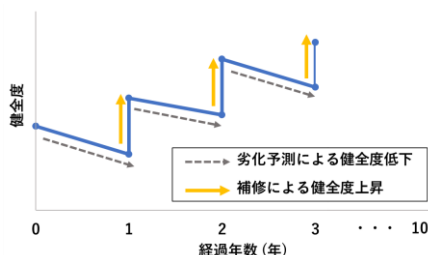


図-3 補修シミュレーション時の健全度推移イメージ図

3.3. シミュレーション結果と考察

各区間・各補修量配分比のシミュレーション結果を、補修効率(図-4)と安全性(図-5)の2つの観点よりまとめ、結果に対する考察は以下の通りである。

図-4より、 Y を考慮しない場合($X:Y=100:0$)、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、これより、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-5より、 X を考慮しない場合($X:Y=0:100$)、今後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すると考えられる。

以上のことから、当該路線において、($X:Y=75:25$)が補修効率・安全性の双方の観点にて最も優位であるという結論が得られた。

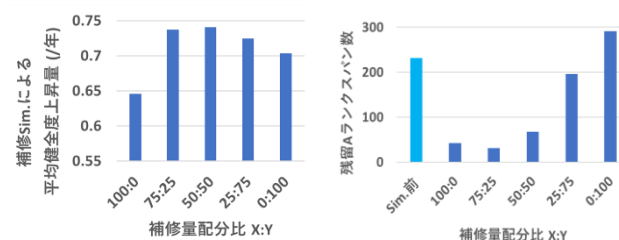


図-4 シミュレーション結果 I 図-5 シミュレーション結果 II

3.4. 補修計画の選択肢の想定

前項で結論付けた補修量配分($X:Y=75:25$)はそのままに、暫定的に年間100スパンとした年間総補修量を5通り想定し、それぞれ10年間のシミュレーションを行った。図-6はシミュレーション前後の当該路線全体の健全度を比較し、年間補修量毎に健全度増減量を示したものである。なお、想定する年間補修量は60, 80, 100, 120, 140(スパン)とする。結果に対する考察は以下の通りである。

図-6より、年間補修量が140スパンを超えると、最終的に健全度が増加した値になる。またこれより、許容できる健全度低下量に応じて年間補修量を逆算するという活用方法も考えられる。

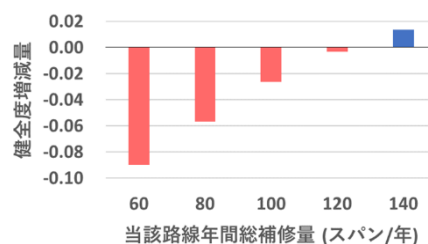


図-6 シミュレーション前後を比較した際の健全度増減量

4. まとめ

本検討で得られた知見は以下の通りである。

- 健全度低下分を指標とした補修量配分(X)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(Y)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($X:Y=75:25$)を策定することができた。
- 策定した補修量配分はそのままに、全5通りの年間補修量をそれぞれシミュレーションし、その10年間の健全度増減量を確認した。
- 現段階では重み付け係数は鉄道事業者へのアンケート調査のみに基づいたものであり、より実状に即した係数に設定することで本検討の有効性はさらに向上すると考えている。

<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），丸善出版，2007。
- 2) 岩本佑太，亀井啓太，劔持尚樹，小川大貴，畠山恭輔，福中公輔：サポートベクトルマシンを用いた軌道検査・土木検査の相関性検証，第73回土木学会全国大会，2018。
- 3) 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。