

地下鉄トンネル検査データに基づく劣化予測手法の統計学的検証

地下鉄トンネル マルコフ過程 劣化予測

早稲田大学 学生会員 ○酒井 亮太 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
 東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治 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 岡田 真聡

1 はじめに

高度経済成長期以降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重要な課題となっている。鉄道構造物の維持管理においては、鉄道事業者は定期的に検査を行い、劣化状況や変状種類等を整理している。これまで、地下鉄トンネル維持管理の効率化に寄与することを目的に、鉄道事業者より提供される検査データを用いた将来の劣化予測、及びそれに基づく様々な補修計画の検討を行ってきた。このうち、劣化予測は、トンネルの劣化進行にマルコフ過程の理論を適用して行うものであるが、予測手法の評価に関してはいまだ確立できていないという現状がある。そこで本研究においては、ある地下鉄一路線に着目して実施された劣化予測結果を用いて、統計学的観点から劣化予測手法の検証を試みた。

2 劣化予測手法の概要¹⁾

2.1 検査データの概要

鉄道事業者が実施する地下鉄トンネルの検査には通常全般検査と特別全般検査の2つがあるが、本研究においては、検査頻度の関係で通常全般検査の結果データを用いている。このデータのうち、キロ程と変状ランクに着目して集計を行うが、各変状ランクについて以下の表-1に示す。これは、鉄道構造物維持管理標準²⁾に示されているものである。

表-1 構造物の健全度判定区分

判定区分	構造物の状態
A	AA 運転保安、列車の正常運行及び旅客、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
	A1 進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの 大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2 変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B	将来、健全度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

2.2 最悪値法による集計

A) トンネル構造種別・地盤条件による区分け

本研究で扱ったトンネル（以下、当該路線）には、開削トンネル及びシールドトンネルの2種類が存在する。また、本研究では、地盤条件を硬質地盤及び軟弱地盤の2種類に分類した。これらをそれぞれ考慮し、開削硬質地盤、開削軟弱地盤、シールド硬質地盤、シールド軟弱地盤の4種類に区分けしている。

B) 最悪値法による集計

上記の検査結果データに対し、品質管理に用いられる「最悪値法」を用いて集計を行う。具体的な手順は以下のとおりである。

- ① トンネルを1mスパンに区切り、スパン内におけるもっとも重度な変状ランクをそのスパンの代表値とする。スパン内に変状が見られないときの変状ランクは、Sである。
- ② 建設年次別に、各変状ランクのスパン数を対象路線全体において集計する。同時に、構造種別・地盤条件別に場合分けを施した集計も行う。

2.3 経年毎の整理とマルコフ過程の適用

集計結果を用いて劣化予測を行うにあたり、以下の前提条件から図-1に示すような集計結果の蓄積データを作成する。

- 変状ランクが補修なしに自然に改善されることはない。
- 変状ランクの1年毎の変化は、同じランクを維持するか、または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。

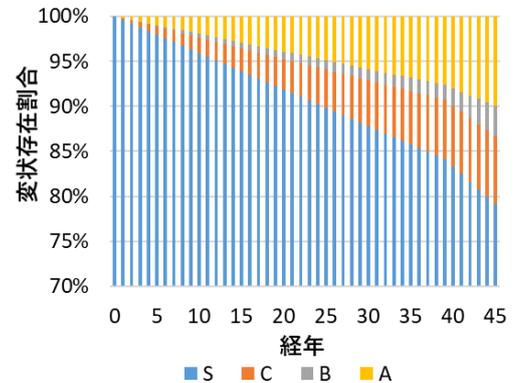


図-1 集計結果蓄積データ

図-1は、当該路線シールド硬質地盤における変状の存在割合の推移を示すものであり、この1年毎の推移にマルコフ過程の理論を適用する。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、過去の履歴には無関係に展開する過程のことで、この理論を適用すると次のとおりである。

変状ランク X の1m 当たり変状数 P'_X は、前年の1m 当たり変状数 P_X 及び劣化推移行列の K_{ij} を用いて以下の式(a)で与えられる。ここに K_{CC} は変状ランク C が翌年にランク C を維持していること、 K_{CB} はランク C が翌年ランク B に悪化する事象の割合を表して $K_{AA}=1$ である。

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

ここで、作成した劣化推移行列の例を表-2に示す。この行列は、シールド硬質地盤における建設後40年経過したトンネルの1年後の1m あたり各ランク変状数を予測するものである。

表-2 劣化推移行列の例

	経年1年	S	C	B	A
経年40年		0.8247	0.0691	0.0220	0.0842
S	0.8332	0.9899	0.0101	0	0
C	0.0675	0	0.9002	0.0998	0
B	0.0191	0	0	0.7964	0.2036
A	0.0803	0	0	0	1

2.4 劣化予測

劣化推移行列を用いて算出した2013年度の予測値を、同年の実測値と合わせて以下の表-3に示す。ここでは一例として当該路線シールド硬質地盤の予測値と実測値を比較する。

表-3 劣化予測結果の比較

変状ランク	S	C	B	A
2013年度予測値	13831	1498	416	330
2013年度実測値	14083	1531	228	234

3 劣化予測手法の検証

3.1 信頼区間の適用

これまで、第2章に示したような劣化予測を行ってきたが、その手法に対して踏み込んだ検証をすることはなかった。そこで本研究では、軌道検査結果から剥離・浮きを推定するモデルの検証に交差検証の考え方を適用した岩本らの研究³⁾を参考に、信頼区間の考え方を適用し、統計学的観点から劣化予測手法の検証を試みた。ここで交差検証とは、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、一致率を見るというものである。また、信頼区間とは、ある確率で母平均を含む範囲のことをいい、今回は実測値及び予測値それぞれの95%信頼区間を求め、比較する。

具体的な手順は以下の通りである。また、検証に必要なデータセット作成手順の概要図を図-2に示す。

- ① 2011年度及び2013年度の検査データをランダムに学習用・検証用データに2分割する。このデータセットを1000通り用意する。
- ② ①で用意した1000通りの学習用データより、2011年度→2013年度の劣化推移行列を1000個作成する。
- ③ 2011年度の検証用データに対応する劣化推移行列を掛け合わせ、2013年度の予測値を求める。これを1000回繰り返すことで、予測値の95%信頼区間を算出する。
- ④ 2013年度の検証用データ1000個より実測値の95%信頼区間を求める。
- ⑤ 予測値と実測値それぞれの95%信頼区間を比較する。

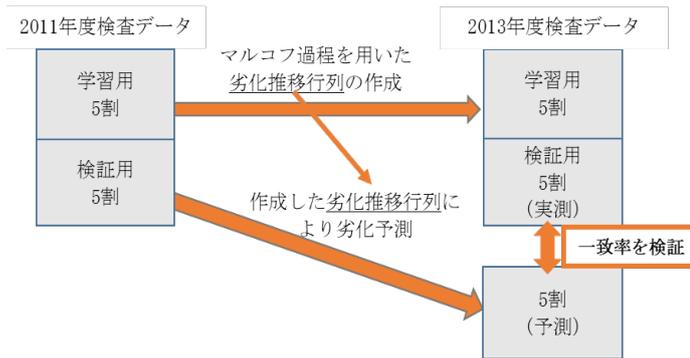


図-2 データセット作成の手順

3.2 区間範囲比較結果及び考察

構造種別・地盤条件別における、実測値及び予測値それぞれに対して求めた95%信頼区間の分布を比較した結果を図-3に示す。図-3中の各グラフの左側には、縦軸としてスパン数を示すが、ここでは構造種別・地盤条件別における予測値と実測値の95%信頼区間の分布を変状ランク毎に比較するため、いずれのグラフにおいても各変状ランクの縦軸の幅を統一した。具体的には、Cランクはスパン数300、Bランクは140、Aランクは200、C-A合算は300のように設定した。また、各グラフ及び各表の下部には、合わせて予測結果の判定区分を示した。ここでは、予測値が実測値を下回れば危険側、大きく上回れば安全側の予測であると表現することとする。図-3から、以下の事項が確認できる。

- 危険側の予測は見られなかった。
 - 予測手法が、より悪いものを重視する最悪値法ベースの方法であるためだといえる。
- いずれの試行結果においても、C-A合算とSランクにおいては相対誤差が比較的小さい。
 - 対象とする各変状ランクのデータ量（スパン数）に起因する。
 - このことから、マルコフ過程の理論に基づく本予測手法は、変状の有無の判定に関しては特に高い精度であるといえる。

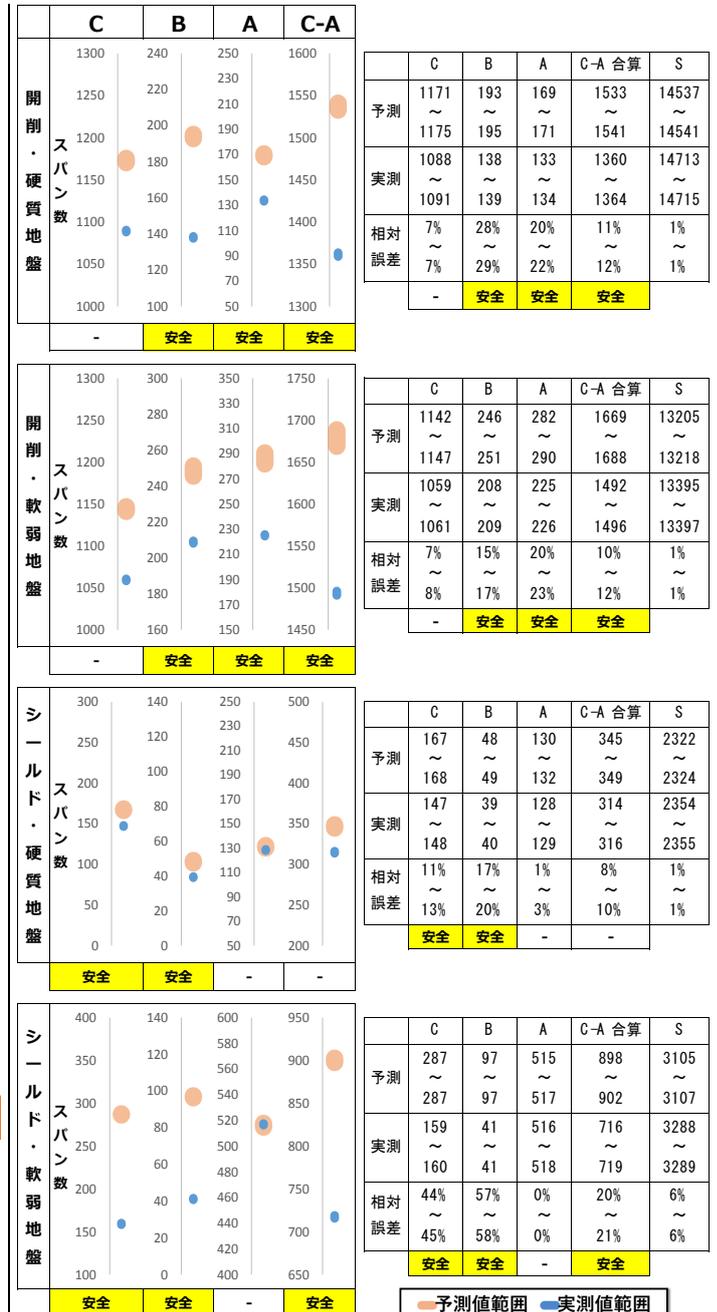


図-3 信頼区間の比較

4 まとめ

本研究では、これまで実施してきた地下鉄トンネル検査データに基づく劣化予測の手法の検証を目的に、95%信頼区間という統計学的な手法を導入した。その結果、従来のマルコフ過程理論に基づく劣化予測手法の精度を定量的に把握できたとともに、最悪値法ベースの従来の手法ではやはり全体的に安全側の予測となることを確認した。劣化予測の精度を向上させていくうえで、今後、予測の過程に新たなアプローチを採用することも想定されるが、その検証に対しても今回の手法は応用できると考えている。

参考文献

- 1) 原大介, 赤木寛一, 小西真治, 宮本光基, 岡田真聡: 地下鉄トンネルの構造種別や地盤条件に応じた劣化予測手法の検討, 第14回地盤工学会関東支部研究発表会, 2017.
- 2) 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), pp.16, 丸善出版, 2007.
- 3) 岩本佑太, 亀井啓太, 剣持尚樹, 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.