

検査データに基づく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 ○酒井 亮太 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 小西 真治 早稲田大学大学院 学生会員 原 大介

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。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それに基づいた様々な補修計画の検討を実施してきた。今回、ある路線内における駅間毎の補修計画の策定案を、より実務に即した方法で検討した。

2. 劣化予測手法

本研究の劣化予測は、以下3段階により実施される。

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)に着目し「最悪値法(図-1)」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。

表-1 構造物の健全度判定区分¹⁾

判定区分	構造物の状態
A	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはそのおそれのある変状等があるもの
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

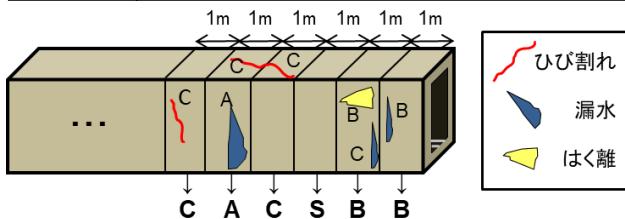


図-1 集計法概要(最悪値法)

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))毎に整理する。経年毎に各変状ランクの存在確率を集約し、該当データが存在しない部分には線形近似を施しながら経年による連続データを作成する。その際、以下の2つの前提条件を設定する。

- 変状ランクが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。

こ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確率過程のことである。

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。図-2に作成例を示す。

		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
	C	0.100	0	0.860	0.140
	B	0.075	0	0	0.973
	A	0.025	0	0	0

図-2 劣化推移行列作成例

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))。以降を予測する際はこれを繰り返す。

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

3. トンネル健全度の定量化

本研究では、劣化の推移を定量的に評価するため、「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))。

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

これまで重み付け係数は、協力鉄道事業者の技術者への簡単なヒアリング調査により設定したものであり、その妥当性については疑問が残るところであった(表-2)。そこで今回は、複数年検査経験のある被験者12名を対象としたアンケート調査およびBradley-Terryモデル(以下、BTM)による解析を実施し、新たな重み付け係数を算出した。

BTMとは、スポーツ統計学の分野で用いられる手法で、リーグ戦の勝敗表から計算されたオッズをプレイヤーの強さの比で記述できると仮定したモデルをいう²⁾。アンケート調査では、各変状ランクの写真グループをプレイヤーとして、グループ間の対比較により危険性についての勝敗表(図-3)を作成し、BTMにより強さの比を算出した(表-2)。

ランク	「悪い方」として選択した人数		ランク
A1	17	7	A2
A1	17	7	B
A1	19	5	C
A2	18	6	B
A2	20	4	C
B	18	6	C
A1	24	0	S
A2	24	0	S
B	24	0	S
C	24	0	S

(注)グレー部分は前提条件

図-3 勝敗表

表-2 健全度判定区分重み付け係数

	A	B	C	S
旧重み付け係数	1	6	8	10
新重み付け係数	1	2.3	5.3	10

4. 駅間毎の検討・補修シミュレーション概要

4.1. 駅間別年間補修量決定法

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。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(X, Y)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、ここでは簡単のために、路線全体の年間補修量を100スパンとする。

X : 劣化予測における年平均健全度低下量 (平均勾配)

→各区間年間補修スパン数を、当該区間の平均勾配の比により決定する。

Y : 劣化予測前のAランクスパン数

→各区間年間補修スパン数を、当該区間のAランクスパン数の比により決定する。

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(=補修量配分)が、路線全体の年間補修スパン数の100になるという条件の下で、ウェイト比(X:Y)を調整しながら劣化・補修シミュレーションを実施する。そして、補修効率(=補修による年平均健全度上昇量;高いほど望ましい)・安全性の確保(=シミュレーション前後の残留Aランクスパン数;少ないほど望ましい)という2つの観点から最適なウェイト比を決定する。

4.2. 結果と考察

既往の報告³⁾においては、旧重み付け係数を用いて、上記のウェイト比について、(X:Y=0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0)の5通りで10年間の補修シミュレーションを実施し、補修効率・安全性の双方の観点において、(X:Y=75:25)が最適であると結論付けた。一方で実務においては、10年間継続して同一の補修計画を実施することは現実的ではないと考えられる。そこで今回は、中期経営計画が更新される3年毎に補修量配分を更新することを想定し、6年分のシミュレーションを実施した。ここでは初めの3年間のシミュレーションをSim I, その後の3年間のシミュレーションをSim IIとする。また今回、新重み付け係数を用い、ウェイト比は(X:Y=0:100, 1:99, …, 100:0)の101通りで行った。

Sim I: ~3年後

検査時点から3年後までのシミュレーション結果を図-4に示す。Xの割合が増えるにつれて補修効率は減少すること、安全性は(X:Y=22:78)で最も確保されることが確認できる。鉄道事業者にとって安全性の確保が最重要課題であること、効率が大幅には減少しないことから、(X:Y=22:78)が最も効果的であると判断される。

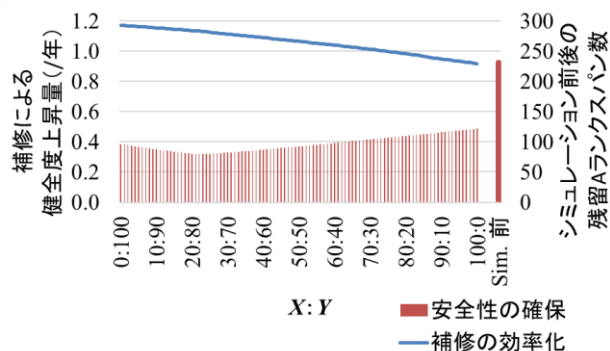


図-4 Sim I 結果

Sim II: 3年後~6年後

続いて、(X:Y=22:78)での3年後までのシミュレーション結果に基づいて、その後の3年間のシミュレーションを実施した。図-5より、Sim Iと同様に考えれば、(X:Y=55:45)が最も効果的であると判断される。

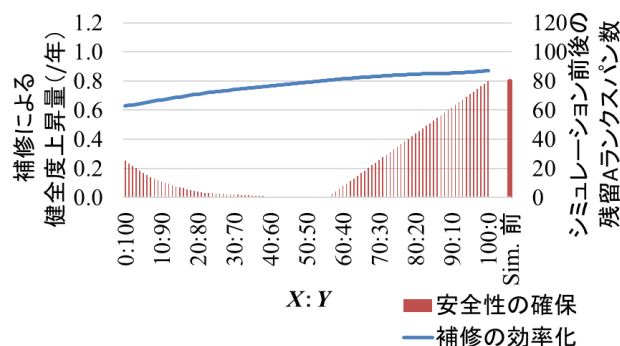


図-5 Sim II 結果

今回の検討より、初めの3年間は(X:Y=22:78), 続く3年間は(X:Y=55:45)のウェイト比で決定される補修量配分で補修を実施する場合、6年間でAランクスパン数を0に抑えられることが分かった(図-5)。

5. まとめ

本検討で得られた知見は以下のとおりである。

- 検査員へのアンケート調査およびBTMという統計学的手法による解析を実施し、実際の検査員の感覚に近い重み付け係数を得ることができた。
- 劣化傾向を健全度により定量化することで、劣化傾向を1指標とした補修案を策定することができた。
- 新たな重み付け係数を用い、劣化・補修シミュレーションを実施する期間を3年間と実務に近いものに設定することで、数年間でAランクスパン数を0に抑えることができる補修計画が存在することが分かった。

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) 竹内啓, 藤野和健: スポーツの数理科学, pp.27-54, 共立出版社, 1988.
- 3) 酒井亮太, 赤木寛一, 小西真治, 今泉直也, 根本早季, 原大介: 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, 土木学会全国大会第73回年次学術講演会, 2019.