

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

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 ○原 大介
東京地下鉄(株) 国際会員 小西 真治

早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
東京地下鉄(株) 非会員 宮本 光基
早稲田大学 学生会員 岡田 真聡

1. はじめに

わが国の鉄道構造物の維持管理に関して、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ている。これらの点検結果より鉄道事業者は補修計画等を実施する。一つの路線内でも、構造種別や地盤条件は様々であり、この差異による劣化への影響が想定される。そこで本研究では、トンネル検査結果をこれらの条件ごとに整理し、健全度評価により劣化の推移を比較検討した。また、マルコフ過程の理論を用いて劣化推移行列を作成し、実際に劣化予測を行い劣化推移行列の精度を検証した。以上により、構造種別や地盤条件等に着眼した維持管理計画策定のための参考となる資料作りを行った。

2. 地下鉄トンネルの検査概要

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つがあり、今回は通常全般検査の結果データを用いた。図-1はトンネル横断面に対して実施される検査の概要を示す。2年に1回行われる通常全般検査では、トンネル側壁下部については入念な近接目視、打音検査、トンネル上床及び側壁上部については目視を主体とした検査を行い、構造物のはく離、ひび割れなどの変状を検出している。

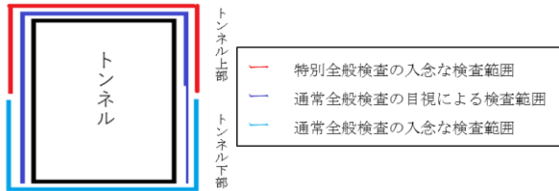


図-1 通常・特別全般検査概要

次に、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。

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 運転保安、列車の正常運行の確保及び旅客、公衆等の安全の確保を脅かす変状等があり、急に措置を必要とするもの
	A2 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A1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

3. 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、地盤条件をより安定なA地盤及びより軟弱なB地盤の2種類に分類した。これらをそれぞれ考慮し、開削A、開削B、シールドA、シールドBの4種類に区分けして集計を行った。

B) 最悪値法による集計

上記の検査結果データに対し、「最悪値法」という手法により整理を行った。具体的には、以下の手順のとおりである。

- 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した。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した。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った。

表-2 最悪値法集計結果

開削A	S	C	B	A2	A1	合計値
1968年	2162	132	40	18	0	2352
1969年	3023	227	103	22	3	3378
1970年	2171	68	10	3	0	2252
1971年	6065	268	56	9	2	6400
1972年	1630	45	15	4	0	1694
合計	15051	740	224	56	5	16076

最悪値法による集計の一部を表-2に示す。これは開削A地盤のスパンの集計結果をまとめたものである。

4. マルコフ過程を適用した劣化推移行列の作成

A) 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、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、劣化推移行列の $\{K_{ij}\}$ を用いて以下の式(a)で与えられる。

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

B) 劣化推移行列の作成

本研究では、構造種別・地盤条件の差異による劣化の進行への影響を検討するため、以下6種類の劣化推移行列を作成する。

- ① 全路線（平均：構造地盤区別なし）
- ② 当該路線（路線平均：構造地盤区別なし）
- ③ 当該路線（開削A地盤：当該路線延長の43.0%区間）
- ④ 当該路線（開削B地盤：同39.4%区間）
- ⑤ 当該路線（シールドA地盤：同7.0%区間）
- ⑥ 当該路線（シールドB地盤：同10.5%区間）

具体的には、それぞれの集計結果に対し、以下の前提条件から図-2に示すような集計結果の蓄積データを作成し、これより劣化推移行列を作成した。

- 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年ごとの変化は、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。

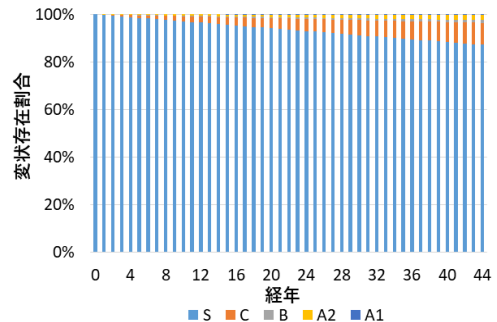


図-2 集計結果蓄積データ

ここで1年ごとの推移に着目することで作成した劣化推移行列の例を表-3に示す。この行列は、建設後40年経過したトンネルの1年後の変状ランク存在割合を予測するものである。

表-3 劣化推移行列の例

	経年41年	S	C	B	A2	A1
経年40年		0.1762	0.0173	0.0020	0.0043	0.0002
S	0.1767	0.9967	0.0033	0	0	0
C	0.0168	0	0.9905	0.0095	0	0
B	0.0020	0	0	0.9438	0.0562	0
A2	0.0042	0	0	0	0.9986	0.0014
A1	0.0002	0	0	0	0	1

5. 構造種別・地盤条件に応じた劣化推移の比較

A) 比較方法

開削A、開削B、シールドA、シールドB地盤における劣化推移を比較するにあたって、「健全度(Health Index: h)」による評価を導入する。健全度(h)とは、以下の式(b)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に重みづけ係数(k)を乗じて、総スパン数で除した値である。

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

重みづけ係数(k)は、以下の表-4のとおりに設定した。

表-4 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

B) 健全度評価による劣化推移比較

集計結果の蓄積データに対し、上記の健全度による評価を導入して①全路線(平均)、②当該路線(平均)、③当該路線(開削A)、④当該路線(開削B)、⑤当該路線(シールドA)、⑥当該路線(シールドB)それぞれのスパンにおける劣化推移を比較した結果を図-3に示す。

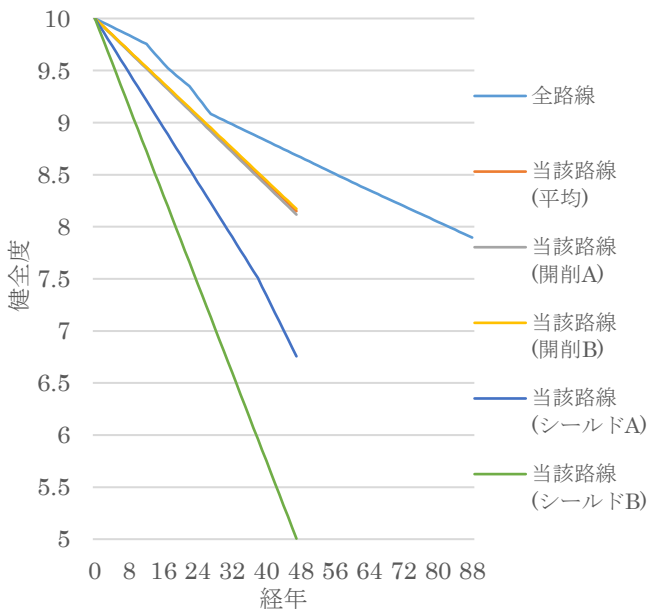


図-3 劣化推移比較

C) 比較結果の考察

図-3より、当該路線は全路線の平均と比較して、健全度が下回っていることが分かる。このことは、軟弱地盤を多く通過する当該路線では、全路線の平均と比べて劣化の進行が速いことを示している。また、構造種別・地盤条件の差異による影響について、当該路線においては開削トンネルよりもシールドトンネルの方が劣化の進行が速いことが分かった。これは、この路線がシールド工法導入初期に建設されたことに起因すると考えられる。

6. 劣化予測の実施と考察

ここでは、第4章で作成した劣化推移行列の妥当性を検証するために、それらを用いて劣化予測を行った。具体的には、当該路線2013年度の集計結果に対し式(a)を用いて2015年度の劣化状態を予測し、2015年度の集計結果との比較を健全度により行った。全6種類の行列のうち、図-4には①全路線(平均)、②当該路線(平均)の2通りの行列による予測結果を抜粋して掲載する。

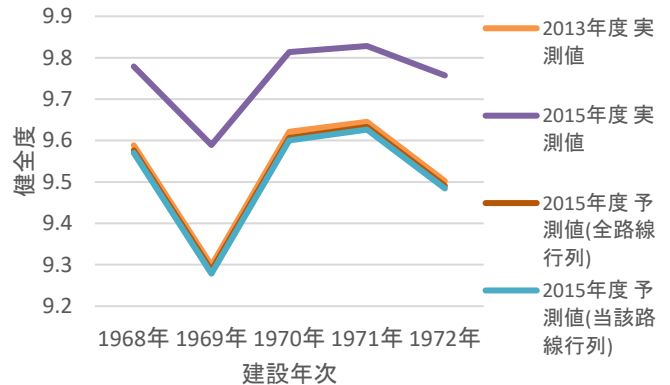


図-4 劣化予測結果の比較

図-4から、2種類の行列による2015年度の予測値はほぼ同値をとったが、これらはいずれも実測値とかけ離れていることが分かる。この原因については、2014年度に行われた変状ランク判定の見直しによる影響が大きいと考えられる。表-5に変状ランク判定見直しの対象となった変状数を示す。この見直しによって、2015年度実測値の健全度が予測値よりも大幅に高くなる結果になったと考えられる。今後は、このような変状ランクの見直しを考慮した劣化予測手法を検討していきたい。

表-5 変状ランク判定の見直し

	A1 ↓ A2	A1 ↓ B	A1 ↓ C	A2 ↓ B	A2 ↓ C	B ↓ C	総変状数
A線	9	6	15	94	760	197	6309
B線	10	5	19	175	1010	406	8604

一方で、2015年度の2種類の予測値と実測値のグラフの形状自体は酷似していることから、劣化推移行列の精度としては大きな問題はなかったものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、地下鉄トンネル検査結果を構造種別・地盤条件に応じて集計し、劣化推移行列を作り分けてその有効性を検討した。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。
- 構造種別・地盤条件で場合分けを施して劣化推移を比較することで、これらの条件に応じて劣化予測を行うことの実効性を確認できた。
- 作成した各種劣化推移行列により劣化予測を行うことができ、これにより各種劣化推移行列の妥当性を確認できた。

なお、毎年度の継続的な補修により、図-3に示したような急激な健全度低下は防止されている。

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・道開削(構造物編 トンネル)，pp.16, 丸善出版，2007。
- 2) 岡田真聡，赤木寛一，小西真治，五十嵐翔太，三浦文典：軟弱地盤上の地下鉄トンネルの検査データに基づく効率的な維持管理手法の検討，第13回地盤工学会関東支部研究発表会，2016。