

# 軟弱地盤上の地下鉄トンネルの検査結果に基づく効率的な維持管理手法の検討

アセットマネジメント 地下鉄トンネル 健全度

早稲田大学 学生会員 ○岡田真聡

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) 正会員 五十嵐翔太

早稲田大学 学生会員 三浦丈典

## 1. はじめに

鉄道構造物の維持管理で、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。これら点検データの結果より鉄道事業者は補修計画を立て、補修を実施している。一つの鉄道事業者内でも、路線によって建設された時代や沿線環境により点検データの結果にバラツキが生じることが想定される。そこで本研究では、路線ごとの環境特性がマルコフ過程を用いた劣化予測結果に与える影響を検討した。具体的にはまず、沿線環境が異なる路線について、トンネルの検査結果に基づく健全度評価及びマルコフ過程を用いた劣化予測を実施した。次に、予測値と実測値を比較し、軟弱地盤上の地下鉄トンネルの効率的な維持管理計画を検討した。

## 2. 地下鉄トンネルの検査概要及び検査データ集計手順

本研究では、地下鉄トンネルの変状ランクを記録した検査結果データを用いてトンネルの健全度評価及び劣化予測を行った。トンネル検査データについては、通常全般検査と特別全般検査の2種類によるデータがあり、今回は通常全般検査について集計を行った。図-1はトンネル横断面に対して実施される通常全般検査での検査概要を示す。通常全般検査は2年に1回行われ、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、剥落などの変状を抽出している。トンネル検査時に利用されている健全度判定は、鉄道構造物等維持管理標準トンネル構造物の健全度判定区分<sup>1)</sup>に基づいた。



図-1 特別・通常全般検査概要

## 3. 最悪値代入法・累積値代入法による健全度評価

上記で求めた各変状の検査結果を用いて、i)最悪値代入法 ii)累積値代入法の2つの手法を用いて、健全度評価を行った。対象トンネルの健全度の定量的評価を行うため、重みづけ係数を用いて対象トンネルの建設年次に対応した健全度を算出した。健全度(health index)  $h$  とは、変状の発生したトンネル区間(以下、変状スパン)の数に、健全度重みづけ係数  $k_i$  を乗じて、変状スパン数で割った値のことである。なお、重みづけ係数は、点検を実施する技術者へのアンケート調査により設定した。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^6 k_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \quad \dots \text{式(1)} \quad (i = A1, A2, B, C, S)$$

各変状スパンの健全度評価にあたって、以下2つの手法を用いた。

### i) 最悪値代入法

- ① 地下鉄1路線のトンネルを5mスパンに区切り、そのスパン内で変状の最悪値をそのスパンの変状ランクとした。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 建設年代別に、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。
- ③ 建設年代別に集計したトンネルの総スパン数を  $n_i$  とし、式(1)に代入して、健全度  $h$  を算出する。なお表-1は各変状ランクの健全度重み付け係数である。

表-1 劣化度重み付け係数

変状ランク(i)	S	C	B	A2	A1
重み付け係数(k <sub>i</sub> )	0	2	4	7	9

### ii) 累積値代入法

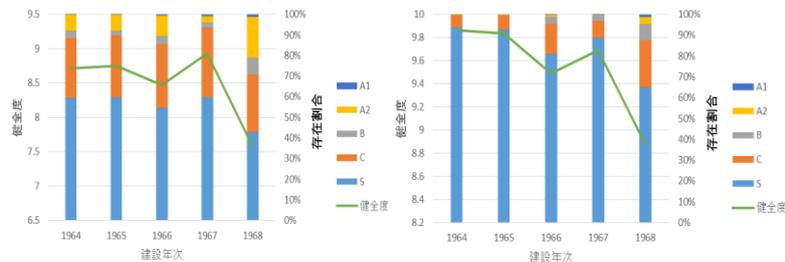
- ① 地下鉄1路線のトンネルを5mスパンに区切り、そのスパン内の全変状を集計した。全変状を集計する際に、劣化度に対応する重み付け点数を表-1の値を参考に、上記の最悪値法と同様に定義した。
- ② 5mスパン内に存在する変状箇所の変状ランクごとに、表-2の重み付け係数を掛けた。例えば1スパン内にA2、B、Cの3箇所の変状があった場合、このスパンの点数は、13点である。スパン内に変状が見られないときは、0点である。
- ③ 1スパンにおける合計点数に応じて、変状ランクの分布をもとに表-2に示すように再定義した。例えば、合計点数が13点の場合、そのスパンの変状ランクはBとなる。

表-2 合計点数範囲と変状ランクの関係

合計点数範囲	0~5	6~10	11~20	21~30	31~
変状ランク	S	C	B	A2	A1

- ④ 建設年代別に集計したトンネルの総スパン数を  $n_i$  とし、再度表-1の健全度重み付け係数を利用して、式(1)に代入し、健全度  $h$  を算出する

以下に健全度評価の結果を示す。



(a) : 最悪値代入法

(b) : 累積値代入法

図-2 建設年次と変状ランクの存在割合の関係

図-2は2013年に路線全体で行われた通常全般検査結果に基づき、上記の最悪値代入法と累積値代入法を用いて得られた各変状ランクの存在割合と、健全度を対象箇所の建設年次別に比較したものである。変状存在割合に関して、最悪値代入法(図-2(a))では、5mを1スパンとして、変状の最悪値をスパンの代表値として健全度評価を行い、各スパンの最悪値を反映させているため、C,B,A2の割合が多くなっている。一方で累積値代入法(図-2(b))では変状ランクSの割合が大きいことが分かる。

## 4. 経年による劣化予測と健全度評価

### 4-1 ガンマ分布を用いた累積値法集計結果の整理

上記累積値にてトンネルの全体的な変状状態を定量的に評価したことで、変状点数の存在割合の分布に対して確率密度分布を適用することが可能となる。検査データを集計した結果をガンマ関数で近似した。ガンマ関数を用いた理由としては、以下に示すパラメーターを変化させることで、トンネルに対して行った点検結果自体に対するばらつきやデータの欠損を考慮することが可能となり、トンネル変状の確率を連続的に推定することができるからである。ガンマ関数は式(2)で与えられ、パラメーター $\alpha$ 、 $\beta$ でグラフの形が決定される<sup>2)</sup>。以下にガンマ関数を応用し健全度の劣化予測を行う手順を示す。

$$P(X = x) = f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \exp(-\frac{x}{\beta})}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \dots \text{式(2)}$$

- ① 図-3は建設年次1964年の検査データをもとに変状点数の累計点数を横軸に合計点数の存在確率を縦軸にしたものを

示している。図-4は表-2をもとにグループ化を行ったあとの結果と、変状点数の存在割合を確率分布(ガンマ分布)に近似したものを示している。近似させる際にグループ 2-8とグループ 2-6における存在割合を、実測値、ガンマ分布からそれぞれ積分で算出し、ガンマ関数におけるパラメータ $\alpha$ と $\beta$ の値を変化させることで、面積比が1に近い値をとるものを選定した。

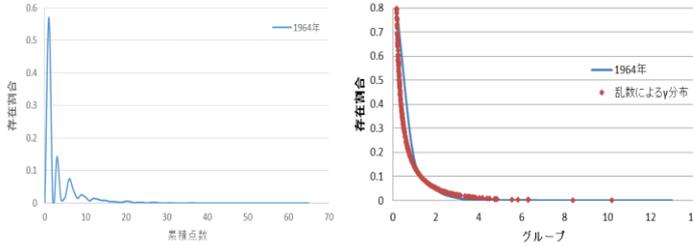


図-3 累積点数と存在割合の関係 図-4 グループ別の存在割合とガンマ分布近似したガンマ分布に関して、分布の面積を求めることで各建設年次における各変状の存在確率を求める。図-5に各建設年次における各変状の存在割合を示した。

②

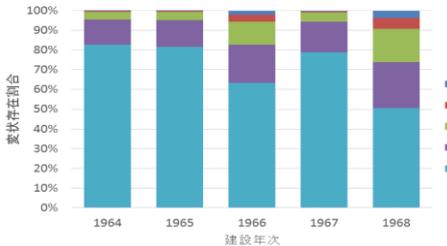


図-5 各建設年次における各変状の存在割合

4-2 マルコフ過程の本研究への適用

検査結果を用いて劣化予測を行うにあたり、トンネル構造物全体の劣化進行を予測することを目標としているため、代表的な統計手法であるマルコフ過程を使用した。手順を以下に示す。

- ① 図-5のガンマ分布で得られた各建設年次の変状存在割合を用いて、検査年2013年から建設年次の差を求める。例えば、建設年次1964年の検査データは、検査年2013年との差、すなわち経過年49年とする。
- ② 同様に経過年45年~48年の変状存在割合を求める。
- ③ 各経過年における変状存在割合の集計結果を用いて、マルコフ確率過程を適用する。

マルコフ確率過程では建設完成から $t_n$ 年経過したトンネルの変状Xの存在確率を $\{P_x\}$ とすると、 $t_{n+1}$ 年経過したトンネルの変状ランクXの存在確率 $\{P'_x\}$ は以下の式で与えられる。

$$\{P'_S P'_C P'_B P'_{A2} P'_{A1}\} = \{P_S P_C P_B P_{A2} P_{A1}\} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & K_{SB} & K_{SA2} & K_{SA1} \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix}$$

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いる、 $K_{A1A1}=1$ である。なお、ここでは次の条件を仮定してシミュレーションを行った。

- a) トンネルの劣化変状ランクが、維持補修することなく自然に改善することはない。
- b) 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段階悪化する事象の2通りである。

表-3 劣化推移確率行列作成の例

経年49年	経年50年	S	C	B	A2	A1
		0.5139	0.06405	0.01785	0.003045	0.001155
S	0.51554	0.996819	0.003181	0	0	0
C	0.06283	0	0.993315	0.006685	0	0
B	0.01751	0	0	0.995431	0.004569	0
A2	0.002987	0	0	0	0.992635	0.007365
A1	0.001133	0	0	0	0	1

上記の仮定を用いて作成した推移確率行列の例は、表-3の通りである。表-3は建設後49年経過したトンネル構造物の1年後の状態を予測する行列である。この行列を利用して建設後49

年における変状ランクの割合から、建設後50年の変状ランクの割合を算出可能である。

4-3 軟弱地盤上の地下鉄トンネルでの劣化予測検討

一般的に軟弱地盤上に建設されたトンネル構造物は、トンネル躯体の継ぎ目等から漏水が発生し変状が多く見受けられる。実際に軟弱地盤上の変状数は、図-7に示すように通常の良質な地盤と比較し多い結果が得られた。図-7より、地盤条件によって、検査データのバラツキが生じることが考えられる。ここでは、劣化推移行列作成に用いる検査データを、地盤条件で場合分けした。具体的には、全路線の点検データを用いて作成した劣化推移行列と、軟弱地盤上に建設されたある一路線の点検データを用いて精度をより高めた劣化推移行列の作成を試みた。以下、図-6に従い、劣化推移行列を作成した。

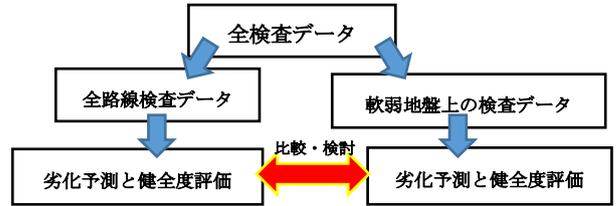


図-6 劣化予測検討フロー

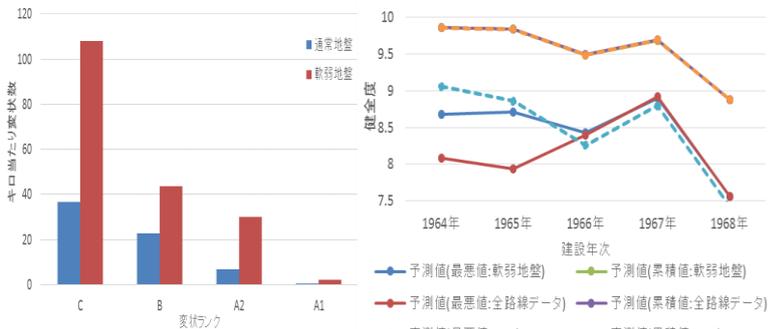


図-7 地盤条件と変状数

(ここ10年間の通常全般検査の結果より算出)

図-8 劣化予測結果の比較

表-4 累積値法による予測結果

データソース	1964年	1965年	1966年	1967年	1968年
予測値 軟弱地盤路線	9.861	9.837	9.487	9.688	8.873
予測値 全路線	9.863	9.840	9.495	9.696	8.875
実測値 2015年検査結果	9.861	9.837	9.488	9.689	8.878

図-8より、累積値法にて求めた劣化予測値が実測値と良く一致した。これは累積値法によって求めた変状ランクが、各検査年においても常に、Sランクで多数を占めていることに起因する。劣化推移行列作成の際、累積値代入法の算出では変状ランクS以外の変状の割合が少ないため、劣化進行が比較的遅い劣化推移行列が作成できた。対象とした軟弱地盤上の地下鉄トンネルでは、集中的に補修を行っている。このため、変状ランクSの割合が例年と大差なく、実測値、予測値共に近い変状ランクの割合を形成し、図-8のような結果になったと考察した。表4は、累積値法における予測値と実測値の数値の詳細を示したものである。

5. まとめ

本研究では地下鉄トンネル検査結果に基づく健全度評価を、最悪値代入法と累積値代入法の2つの手法を用いて実施した。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 最悪値代入法は、図-2より、全体区間において変状の最悪を健全度に反映させることが確認できる。累積値代入法で得られる健全度は、最悪値代入法で得られる値よりも大きくなる。
- 2) 軟弱地盤上の地下鉄路線に対して、該当路線のみの検査データを用いて最悪値法および累積値法による健全度評価を行った結果、精度の高い劣化予測を行うことができた。

<参考文献>

- 1) 鉄道総研：鉄道構造物等維持管理標準，同解説（トンネル），丸善，2007
- 2) 郷原 惇史ら「地下鉄トンネルの検査データを用いた劣化予測手法について」，第12回地盤工学会関東支部発表会，2015