

Keyword: 地下鉄トンネル・健全度評価・劣化推移行列

早稲田大学 国際会員 ○郷原惇史 早稲田大学 国際会員 赤木寛一  
 東京地下鉄(株) 小西真治 メトロ開発(株) 西村高明  
 東京地下鉄(株) 村上哲哉 早稲田大学 鈴木彰吾

1. 研究背景・概要

我が国では、高度経済成長期以降、社会インフラの整備が急速に進められてきた。そのため、近年ではその時代から建設されてきた社会インフラの老朽化が問題視されており、それらの維持管理が大きな課題となっている。2007 年 1 月に、鉄道構造物の維持管理に関する考え方や標準的な方法をまとめた「鉄道構造物維持管理標準・同解説（構造物編）」が制定された。維持管理標準では、構造物建設時に適切な設計・施工が行われたことが確認され、その状態を保つことが構造物の性能を満足するとしている。「検査」は構造物の現状を把握し、構造物の性能を確認する行為とされ、検査・措置、その他維持管理に必要な情報については記録して保存することが定められている。以上のように、近年、蓄積された検査データを活用し、鉄道構造物に対して長期的な維持管理を行っていくことが求められている。

本研究では、ある路線の地下鉄トンネルを対象として検査結果に基づく劣化予測手法と健全度評価によるその精度について検証を試みた。トンネルの劣化予測には劣化を確率過程として捉えるマルコフ過程を使用する。通常全般検査（2004 年・2006 年・2008 年・2010 年・2012 年）の各年次における検査データを累積値法によって集計し、求められた存在確率分布に対して、ガンマ分布で近似することにより、トンネル変状の確率分布を連続的に推定することができる。近似したガンマ分布を基に、劣化推移行列を作成し、健全度評価によって劣化推移行列の精度について検証する。図-1 に本研究フローを示す。

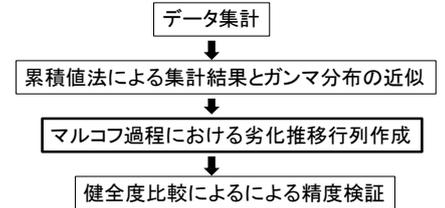


図-1 研究手順

2. データ集計

累積値法によりトンネルの検査データを集計した。累積値法とは、トンネルの路線を5mに区切ったスパンに対して、そのスパン内に含まれる変状の個数に各変状の重みづけ点数（表-1）を乗じた値の和を該当スパンの劣化代表値として点数化する集計手法である。トンネルの検査データは、累積値法に基づき以下の手順で集計した。

- ①地下鉄対象路線のトンネルを5mスパンに区切り、そのスパン内で変状総数を求め、変状ランク（表-2）を調べる。
- ②1 スパンに含まれる各変状ランクに表-1 に示す変状重みづけ点数を割り振り、変状個数を乗じた値の和を、該当スパンにおける変状累積値とする。
- ③対象路線沿いの各建設年次のトンネル全スパンに対して、変状累積値を算出する。
- ④各建設年次のトンネル全スパンについて、各変状累積値に対応するスパン数の存在確率を求める。

表-1 累積値法における重みづけ点数

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ点数	10	8	6	3	1

3. 集計結果とガンマ分布の近似

検査結果を集計した変状累積値の存在確率分布に対して、確率密度関数で近似することにより、トンネル変状の確率分布を連続的に推定することができる。確率論および統計学において、ガンマ分布は連続確率分布の一種で指数分布を一般化した分布とされている。本研究では、集計結果をガンマ分布に近似することにより劣化推移行列の作成を行う。図-2 は、変状点数の存在割合を確率分布（ガンマ分布）に近似した一例である。ガンマ分布の性質は形状パラメータ  $\alpha (>0)$ 、尺度パラメータ  $\beta (>0)$  の 2 つで特徴づけられる。確率密度関数  $P=f(x)$  は以下の式で与えられる。

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

本研究での集計結果と近似方法として、残差平方和（RSS）を用いて行った。残差平方和は、残差の平方の和であり、データと推定モデルとの間の不一致を評価する尺度である。RSS が小さい値を示すほど、近似の精度が高いことを示している。単一の説明変数を持つモデルでは、RSS は以下の式で与えられる。

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x)_i)^2 \dots \dots \dots (2)$$

研究ではガンマ分布における関数と累積値法における集計結果を残差平方和により近似させることを目的とする。ガンマ分布における  $(\alpha, \beta)$  の値を変化させ面積を算出し、累積値法における集計結果の面積と差の二乗が最小値を取った時、ガンマ分布における関数と集計結果が近似の精度が最も高いことが分かる。通常全般検査（2004 年・2006 年・2008 年・2010 年・2012 年）の各年次における検査データを基に残差平方和によるガンマ分布の近似を行った。図-3 に近似の概略図を示す。また、表-3 に例として 2004 年の検査データに基づいて得られたパラメータと残差平方和を示す。

表-2 変状ランクの概要

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、急な措置を必要とするもの
	A2 検出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
B	変状等があり、将来それが構造物の性能を失うおそれのあるもの
C	将来、健全度Aになるおそれのある変状等があるもの
S	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

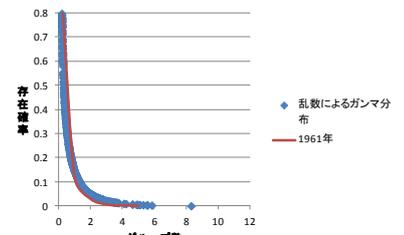


図-2 確率分布への近似図

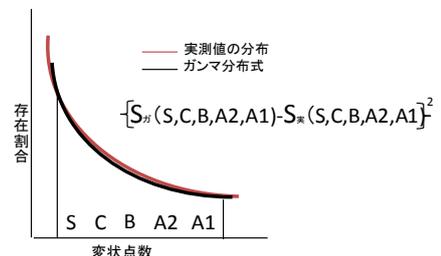


図-3 残差平方和による面積近似概略図

表-3 近似パラメータ

	1958年	1959年	1960年	1961年
$\alpha$	0.4	0.35	0.3	0.25
$\beta$	2	2	2	2
残差平方和	0.005671	0.006189	0.010815	0.019002

#### 4. マルコフ過程における劣化推移行列作成

近似したガンマ分布を基に劣化推移行列の作成を行う。なお、ここでは次の条件を仮定して、劣化推移シミュレーションを行った。

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 初年度における変状の存在確率は、Sランクが100%である。

表-4 2004年のデータによる劣化推移確率行列

	経年52年	S	C	B	A2	A1
経年51年	0.673232	0.187592	0.099444	0.026179	0.013552	
S	0.692318	0.985237	0.014763	0	0	0
C	0.20288	0	0.966945	0.033055	0	0
B	0.083719	0	0	0.979109	0.020891	0
A2	0.015248	0	0	0	0.959105	0.040895
A1	0.005835	0	0	0	0	1

上記の仮定の上、トンネルの劣化推移をマルコフ過程として扱うことで、過去の劣化推移の結果から統計的な考え方で、将来の劣化予測が可能になる。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。これを本研究に適用した例として表-4に2004年度のものを示す。経年52年から51年に至る推移確率行列である。

$$\{P'_S P'_C P'_B P'_{A2} P'_{A1}\} = \{P_S P_C P_B P_{A2} P_{A1}\} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & K_{SB} & K_{SA2} & K_{SA1} \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

#### 5. 健全度比較による精度検証

次に各年次における健全度評価を行う。健全度評価は以下の式、健全度重み付け点数 (S:10, C:8, B:6, A2:3, A1:1) で示される。ここでいう健全度 (health index)  $h$  とは、各変状ランク区分に分類されたトンネルスパン数に上記の健全度重み付け係数を乗じて、変状総スパン数  $n$  で割った値のことである。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^6 k_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \quad (i = AA, A1, A2, B, C, S) \quad \dots \dots \dots (4)$$

各年次のデータをまとめたものを図-4に示す。

この健全度について精度計算を行った。本検証では現在を2012年とし通常全般検査(2012年)における劣化推移行列と通常全般検査(2004年・2006年・2008年・2010年)における劣化推移行列の健全度推移を比較した。また劣化推移を定量的に比較するために通常全般検査(2012年)における健全度の劣化推移と通常全般検査(2004年・2006年・2008年・2010年)における健全度劣化推移の差を算出し劣化推移誤差を算出した。経年54年から経年51年を本研究では対象としているため、この間の健全度の差を求める事で劣化推移誤差を求める事が出来る。式(5)に劣化推移誤差を示す。

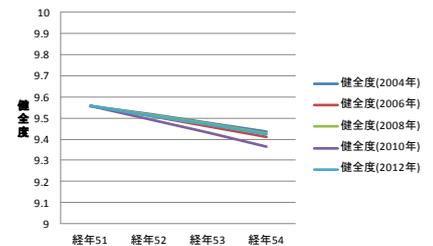


図-4 健全度比較

$$\text{劣化推移誤差} = \text{健全度}_{(2012年)}(\text{経年54年} - \text{経年51年}) - \text{健全度}_{(2004,2006,2008,2010年)}(\text{経年54年} - \text{経年51年}) \dots \dots \dots (5)$$

以上の手順に基づき健全度及び劣化推移精度検証を行った結果を図-5に示す。図-5は劣化推移誤差と健全度の関係を示しており、これは通常全般検査2012年と通常全般検査(2004・2006・2008・2010)のデータを基にした健全度を比較した場合の精度を示している。また図では通常全般検査2012年と通常全般検査(2004・2006・2008・2010)での健全度の誤差を取って、通常全般検査2012年での劣化推移の精度計算を行った結果を示しており、その平均誤差は0.022となっている。健全度比較の結果、通常全般検査(2010年)の検査データによる健全度については通常全般検査(2012年)の結果との違いが見られるが、通常全般検査(2012年)と通常全般検査(2004・2006・2008年)の健全度には大きな違いは見られないため、ある程度の精度のある劣化推移行列を作成することができたと考えられる。

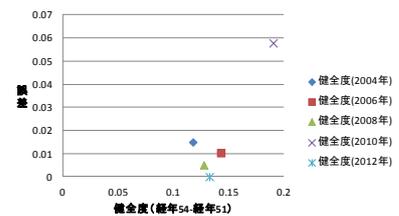


図-5 劣化推移精度検証

#### 6. まとめ

- ・ 累積値法に基づくデータ集計によって、地下鉄トンネルの劣化推移について定量的な評価を行うことが出来た。
  - ・ 近似したガンマ分布を用いてマルコフ過程における劣化推移行列を作成した。
  - ・ 健全度評価を行う事で、作成した劣化推移行列の精度を検証することが出来た。
- 今後は、全路線においても同様の検証を行い、個別路線における劣化推移を検証すると同時に劣化の特性を可視化し定量的に評価する予定である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会報告、地下鉄トンネルの検査データに基づく健全度評価と修繕投資効果について、2014
- 2) 朝倉書店、統計的品質工学の基礎、2010 P8-30