

検査データに基づく地下鉄トンネル 劣化予測手法に関する検討

西村 高明¹・鈴木 彰吾²・小西 真治³・村上 哲哉⁴
赤木 寛一⁵

¹正会員 メトロ開発株式会社 (〒160-0004 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

E-mail: t.nishimura@metro-dev.co.jp

²学生会員 早稲田大学大学院創造理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: rainbow1123@fuji.waseda.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail: s.konishi.r4ri@tokyometro.jp

⁴正会員 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail: te.murakami@tokyometro.jp

⁵フェロー会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: akagi@waseda.jp

現在，高度経済成長期以降に集中的に整備された社会資本ストックの多くが老朽化し，維持管理の重要性が認識されている．また，鉄道では，2007年に鉄道構造物等維持管理標準が制定され，構造物の性能を満足するため，検査によって構造物の現状を把握し，維持管理情報に必要なデータについては記録して保存することが定められた．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．本研究では東京地下鉄株式会社が所有する地下鉄トンネルを対象として，検査結果に基づく健全度評価と劣化予測を試みた．東京地下鉄株式会社では長年にわたるトンネル検査データが蓄積されており，それらを活用することで，トンネルの状態を定量的に評価すると同時に，将来のトンネル劣化推移を予測する手法に関する検討を行った．

Key Words : *asset management, underground railway tunnel, health index, deterioration prediction*

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは高度経済成長期以降に集中的に整備され，今日に至る約60年間に相当量のストックが蓄積された．現在，社会資本ストックの多くが老朽化したことから，社会資本の維持管理が重要な課題となっている．そうした背景から，鉄道分野では2007年1月に，国土交通省監修で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「鉄道構造物等維持管理標準（構造物編）」が制定された．この維持管理標準では，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で構造物の性能が満足されるものとしている．さらに，「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，地下鉄トンネルを対象として検査結果に基づく健全度評価と劣化予測を試みた．東京地下鉄株式会社では長年にわたるトンネル検査データが蓄積されており，それらを活用することで，トンネルの状態を定量的に評価すると同時に，将来のトンネル劣化推移を予測する手法を検討することが求められている．

そこで，トンネル検査の集計結果を数理統計学的手法を利用して整理し，その結果に基づく将来の劣化推移予測手法について検討した．具体的には，二種類（最悪値法，累積値法）のデータ集計方法に基づく劣化推移手法とその劣化予測結果を利用してトンネルの健全度評価を行うとともに，トンネルの劣化状態・劣化原因を定量的に評価し，その劣化推移特性に基づいて東京地下鉄の個別路線に対する維持修繕計画の検討を行うことを目的とした．

2. 地下鉄トンネルの検査概要

本研究では，東京地下鉄株式会社の地下鉄トンネルの変状ランクなどを記録した検査結果データを用

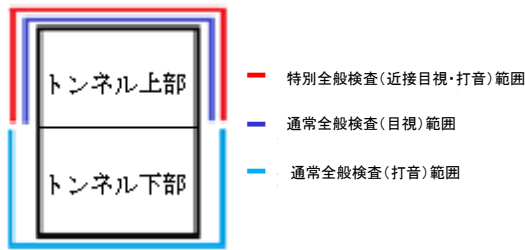


図-1 特別・通常全般検査概要

表-1 構造物の変状ランク判定区分¹⁾

判定区分	構造物の状態
A	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
	AA 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
	A1 侵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
	A2 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
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

いてトンネルの健全度評価と劣化予測を行った。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、それぞれについて集計を行った。図-1に、トンネル横断面に対して実施される特別、および通常全般検査での検査概要を示す。通常全般検査は2年に一回行われ、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、構造物の変状を抽出している。また、特別全般検査は、20年に一回行われ、専用の高所作業車を使用して、トンネル上床及び側壁上部についても入念な近接目視、打音検査を行い、健全度の判定精度を高めている。本研究では、東京地下鉄株式会社が実施した通常全般検査データを活用しており、変状例には、はく離、剥落、漏水、漏水跡などを挙げた。また、トンネル検査時に利用されている健全度判定区分¹⁾を、表-1に示す。

3. トンネル検査結果を利用した劣化予測手法について

(1) 検査結果の集計・整理について

本論文では、以上のようなトンネル検査結果について2種類の検査データ集計手法（最悪値法・累積

値法）を利用して、トンネル検査の集計、整理を行った。

最悪値法では、検査データを集計する過程でトンネル延長方向を5mスパンに区切り、そのスパン内の劣化変状の最悪値をそのスパンの変状代表値とする集計法である。一方、累積値法では、トンネル延長方向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個数に各変状の劣化度を乗じた和を、そのスパンの変状代表値として点数化する集計手法である。

最悪値法は、従来より品質管理・信頼性工学において広く適用されており、システム全体が機能不具合となる最悪値を管理指標として取り入れることで、事故の許されないシステムや多くの判定条件を伴う回路などの評価をすることができる。しかしながら、地下鉄トンネルなどの大規模かつ複雑なシステムの実際の検査結果では、劣化個数や劣化原因など個々の状態によって大きなばらつきが存在している。そこで、このようなばらつきを考慮することができるデータ集計手法として累積値法を考案し、最悪値法による集計結果に基づく劣化予測と健全度評価について検討することとした。

(2) 劣化予測手法

土木構造物の劣化予測の方法は、大きく分けて2つに分類できる。1つは、力学的特性を把握し劣化予測を行う方法、もう1つは、検査による判定区分の低下を統計的に予測する方法である。前者は、特定の土木構造物や部材を対象にしているのに対し、後者は、土木構造物全体を対象に使用されることが多い。本研究は、トンネル構造物全体の劣化進行を予測し、修繕計画を検討することを目標としているため、統計的手法の中でも代表的なマルコフ確率過程を使用した。マルコフ確率過程は、橋梁や舗装などの劣化推移を対象に多く使用されているが、トンネルやトンネル部材にも適用がみられる手法である。

(3) マルコフ確率過程による劣化予測

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²⁾。

$$\{P'_S P'_C P'_B P'_{A2} P'_{A1}\}$$

$$= \begin{Bmatrix} P_S & P_C & P_B & P_{A2} & P_{A1} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SC} & K_{SB} & K_{SA2} & K_{SA1} \\ 0 & K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

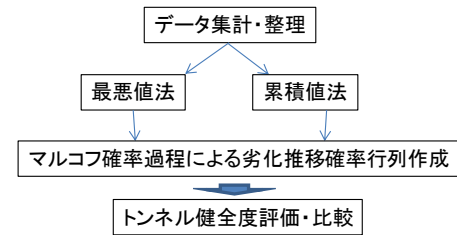


図-2 研究手順の流れ

ここに、 $[K_{ij}]$ は劣化推移確率行列であり、 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、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(2010年度)における変状の存在確率は、Sランクが100%である。

上記の仮定を用いて算出した劣化推移確率行列の作成例を以下に示す。トンネルの経年に応じた変状分布割合と作成した劣化推移確率行列の例は、表-2、表-3の通りである。表-2は、経年74年と経年75年における地下鉄トンネルの変状分布割合を表した結果を示しており、表の分布の推移を比較することで行列を作成した。表-3は、建設後74年経ったトンネル構造物の1年後の状態を予測する行列であり、表-2の変状割合の推移に基づいた行列を示している。この行列を利用して建設後74年における変状ランクの分布から、建設後75年の変状ランクの分布を算出することができる。

以上のように、ここでは品質・信頼性工学に基づく最悪値法と累積値法によるデータ集計結果に基づいて、マルコフ確率過程による劣化推移確率行列を作成し、両手法による劣化推移と健全度評価の違いを評価している。本研究における研究手順を、要約した流れ図を図-2に示す。

表-2 変状分布割合の比較

変状ランク	S	C	B	A2	A1
経年75年	0.530	0.240	0.038	0.163	0.028
経年74年	0.532	0.240	0.401	0.161	0.027

表-3 劣化推移確率行列の例

経年74年 →		経年75年				
		S	C	B	A2	A1
経年74年	経年75年	53.02%	24.03%	3.84%	16.35%	2.76%
	S	0.997	0.003	0.000	0.000	0.000
	C	0.000	0.994	0.006	0.000	0.000
	B	0.000	0.000	0.923	0.077	0.000
	A2	0.000	0.000	0.000	0.994	0.006
	A1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

4. 最悪値法による劣化推移確率行列

(1) 最悪値法の概要

最悪値法は、前述のように検査データを集計する過程でトンネル延長方向を5mスパンに区切り、そのスパン内の劣化変状の最悪値をそのスパンの変状代表値とする集計法である。トンネルの1スパンの変状を最悪値という代表値とすることで、トンネル全体の状態を最悪状態を考慮した品質管理の考え方に基づいて定量的に評価することができる手法である。

(2) トンネル検査結果の集計手順

地下鉄トンネルの検査データは、最悪値法に基づき以下の手順で集計した。なお、実際の検査結果のばらつきを平準化する目的で、空間的にはトンネル延長5mスパンを変状ランク評価単位とするとともに、時間的には経年10年間の変状ランク分布を単位として以下の手順でデータ整理を行った。

- ① 地下鉄各路線のトンネルを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(10年ごと)に、各変状ランクの総数を全路線において集計する。
- ③ 年代別(10年ごと)に建設されたトンネルの総延長より、年代別の総スパン数を求める。
- ④ 10年単位で各変状ランクのスパン数の総数を算出した結果を利用して、10年間に建設された総延長スパン数で除すことで10年単位での各変状の存在確率を求める。
- ⑤ 集計した10年単位での存在確率に対して、線形補間を行い1年単位のデータを算出する。

これらの手順に基づいて、構造条件3通り(開削、シールド、構造区別なし)と、地盤条件3通り(地盤条件A、地盤条件B、地盤区別なし、表-4参照)の合計9通りについて同様の集計を行った。なお、表-1の判定区分AAについては、ただちに措置が講じられているので検査データには存在しない。

表-4 地盤条件 (A・B) の概要

Aブロック	Bブロック
本ブロックは本郷台、豊島台、淀橋台等の台地地帯で地質構成は代表的に表土(沖積層)、関東ローム層・東京礫層・江戸川層、上総層(第3紀層)の順に構成されている。表土の沖積層は数メートルボーダーで薄い	本ブロックは、地表面より軟弱な有楽町層(沖積層)、の層厚が大きい(B1ブロック20-30m、B2ブロック30-40m、B3ブロック40m以上)地層構成は有楽町層、東京砂層、東京礫層、江戸川層(B1、B2ブロック)あるいは地域によって有楽町層、7号地層、東京砂層、江戸川層(C3ブロック)の順に構成されている。

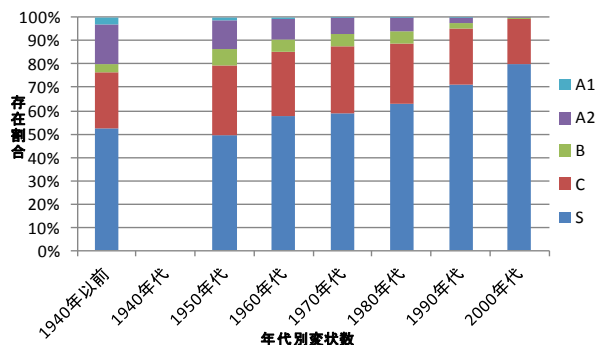


図-3 変状ランクの分布(地盤条件 A・構造種別なし)

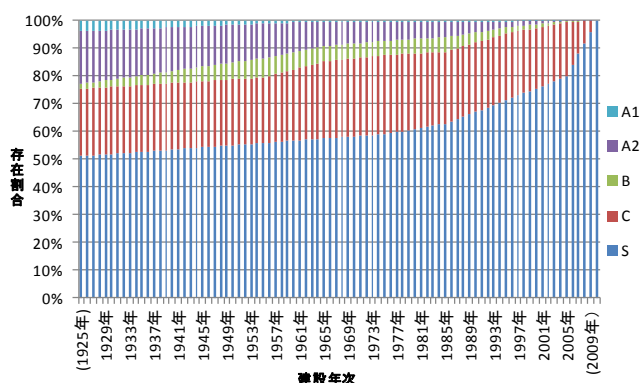


図-4 線形補間後の経年ごとの変状ランクの分布

図-3に、(地盤条件A、構造区別なし)の条件で抽出した変状ランクの存在分布を10年単位の建設年次で表した例を示す。図-3より、建設年次が新しい構造物ほど変状がないスパンの割合が大きく、変状が小さい傾向があることが確認できる。なお、1940年代には、地下鉄トンネルは第二次世界大戦のため建設されていない。また、図-4に、線形補間により求めた経年一年毎の変状ランク分布を示す。図-4より、変状ランクSにおいては、トンネル建設年次が新しくなるほど、変状ランクSの割合が大きくなり、変状ランクA2、A1においては、トンネル建設年次が新しくなるほど、その割合が少なくなる傾向を確認することができる。

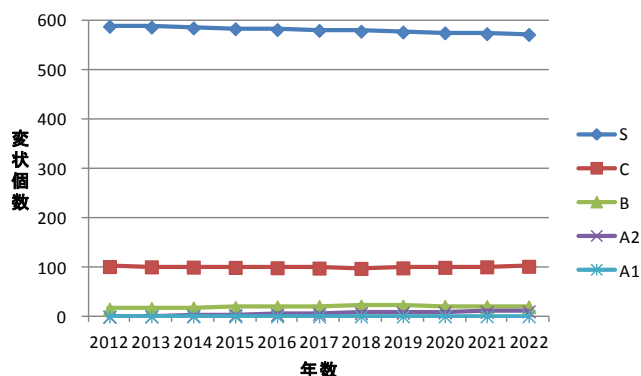


図-5 最悪値法における劣化変状推移

表-5 累積値法における各変状重みづけ点数

変状ランク	S	C	B	A2	A1
重みづけ係数	0	2	4	7	9

(3) 劣化推移確率行列作成と劣化推移状況

前節で算出した一年毎の変状ランクの存在割合を利用して、最悪値法による劣化推移確率行列を作成した。図-5は、建設年次1962年のトンネルに対して作成した劣化推移確率行列を適用し、2010年を原点とした時の将来10年に対して、劣化予測をした結果である。この図を利用して、劣化推移確率行列適用時の各変状ランクの劣化個数の推移を把握することができ、最悪値法による変状ランクの低下は10年後においても小さいことがわかる。

5. 累積値法による劣化推移確率行列

(1) 累積値法の概要

累積値法は、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全変状個数に各変状の劣化度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。トンネルの全変状状態を点数化し、その累積値を算出することにより、実際の検査結果の各種の要因によるばらつきを包括的に考慮して、トンネルの劣化度合いを定量的に評価することが可能になると考えられる。

(2) トンネル検査結果の集計手順

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、変状ランクを求める。
- ② 1 スパンに含まれる各変状ランクに表-5 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。

以上の手順に基づいて、一例として建設年次1961年のトンネルにおける検査データより求めた変状累積値に対応するトンネルスパン存在確率分布を図-6に示す。

図-6より、変状累積値が0～10点の変状存在割合が高いことがわかる。この結果より、1スパンに含まれる変状がBやCが2～3個、もしくは変状がA1、A2が1つ存在する割合が高いということがわかる。

(3) 確率分布の考え方

以上のような、累積値法により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、トンネル変状について実施され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分布を連続的に推定することができる。

しかしながら、図-6に示した集計結果は、変状累積値が不連続でばらつきが大きく、確率密度関数への近似が困難である。そこで、表-6に示すように変状累積値をグループ化することにより、確率密度関数で近似する際の誤差を最小化することとした。一例として、建設年次1961年のトンネルの変状累積値をグループ化した結果を図-7に示す。図-7より、図-6のような累積値のばらつきが解消され、連続な関数とみなすことができ、確率密度関数で近似することが可能となる。

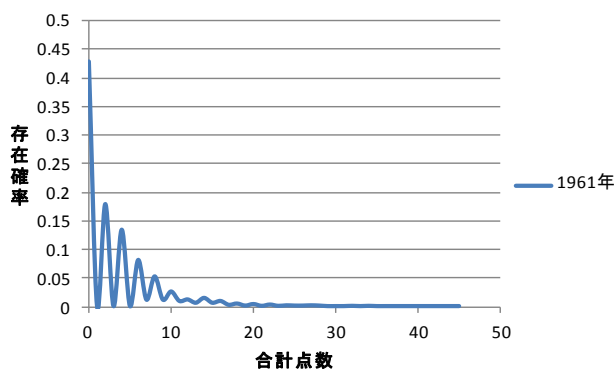


図-6 変状累積値の存在確率分布

表-6 グループ化の定義

グループ	0	1	2	3	4	5
累積値	0～3	4～7	8～11	12～15	16～19	20～23
グループ	6	7	8	9	10	
累積値	24～27	28～31	32～35	36～39	40～43	

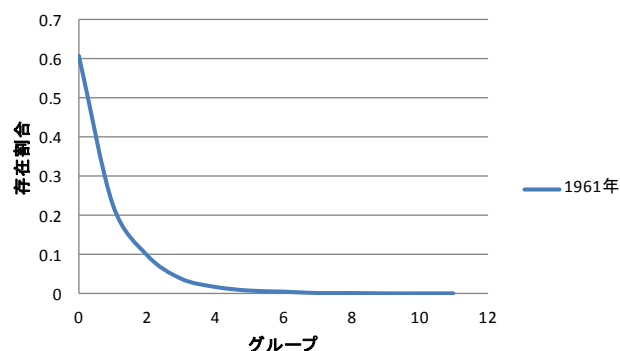


図-7 グループ化した存在割合分布

(4) ガンマ分布を用いた変状割合分布推定手法

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。その性質は形状パラメータ α (>0)、尺度パラメータ β (>0) の2つのパラメータで特徴づけられる。指数分布をある事象 x が起きるまでの待ち時間分布として考えることにより、確率密度関数 $P=f(x)$ は式(2)で与えられる。

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

ガンマ分布の応用範囲は広く、さまざまな研究分野で汎用的に用いられている。経済学においては、保険金の支払額のモデル化に、生物学においては、ウイルスの潜伏期間のモデル化やタンパク質の特定の残基位置における置換頻度のモデル化等に用いられる。また、工学においては電子部品の寿命のモデル化にガンマ分布を用いることがある。

本研究においては、トンネルの劣化事象に対して特定の変状累積値 x のトンネルスパンが発生するまでの時間分布をガンマ分布で近似すると考えることができ、上記の図-7に対してガンマ分布を適用することにより、検査結果に対するばらつきやデータ欠損を考慮した変状存在割合 P を推定することができる。

(5) ガンマ分布による近似

前章までで述べた図-7のようなトンネル検査結果の累積値法による集計結果を、ガンマ分布により近似する。ガンマ分布により近似する場合には、ガンマ分布の式(2)に含まれるパラメータ (α , β) を決定する必要がある。ここでは、集計結果における変状累積値を有するトンネルスパンの存在確率と、仮定するガンマ分布による変状存在確率を適合させるために、図-8に示すように特定の変状累積値区間におけるトンネルスパンの存在確率に相当する面積比が1に近くなるように、試行錯誤法によりガンマ分布のパラメータを決定した。図-8は面積比を算出する例を示しており、両曲線における特定の変状累積値点数区間の面積比 ($S1/S2$) ($S1$:実測値分布面

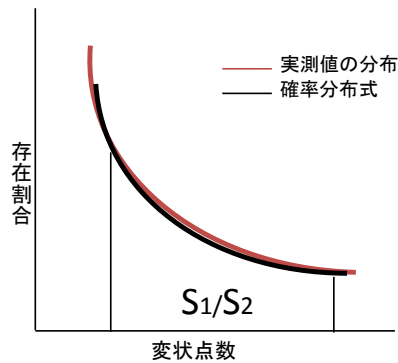


図-8 確率分布の近似例

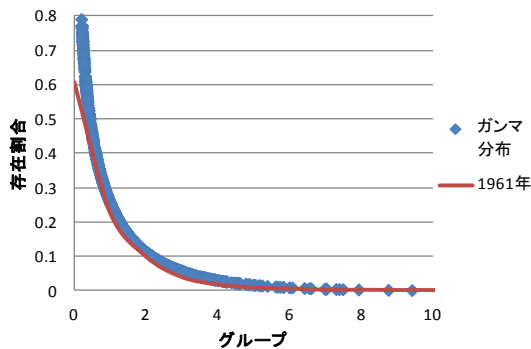


図-9 ガンマ分布による集計結果の近似例

表-7 建設年次ごとの決定パラメータと面積比

建設年次	1952年	1953年	1954年	1955年	1956年	1957年
α	0.26	0.15	0.45	0.4	0.28	0.28
β	7	35	6.8	6.8	8.5	8
面積比	88%	80%	92%	92%	92%	91%
建設年次	1958年	1959年	1960年	1961年	1962年	
α	0.3	0.45	0.35	0.55	0.72	
β	7.1	4.5	2.5	2	1.5	
面積比	87%	94%	95%	95%	99%	

積, S2:ガンマ分布面積)が1に最も近いパラメータを決定する手順を示している。図-9には、建設年次1961年のトンネルにおける集計結果をガンマ分布で近似した例を示している。

また、表-7は、検査結果に対して累積値データ集計を行った対象路線におけるトンネル建設年次ごとに決定したガンマ分布パラメータ(α , β)と対応する確率分布面積比を示している。表-7の建設年次1955年に対応するトンネル区間のパラメータに関しては、1955年に建設されたトンネルが存在しないことから1954年と1956年のパラメータ推定結果に基づいて決定している。

(6) ガンマ分布を考慮した変状判定区分

ここでは、ガンマ分布を用いて変状割合推定を行った結果に基づいて、改めて表-1に示した変状ランク判定区分(A1,A2,B,C,S)を決定した。具体的には、図-8に示すようなガンマ分布に対して、累積変状値に対応する集計グループの対象範囲の面積を算出することで、変状ランク判定区分ごとの存在確率を考慮して決定した。

表-8 各変状に対するグループ範囲

変状	S	C	B	A2	A1
グループ	0,1	2,3	4,5,6	7,8	9,10

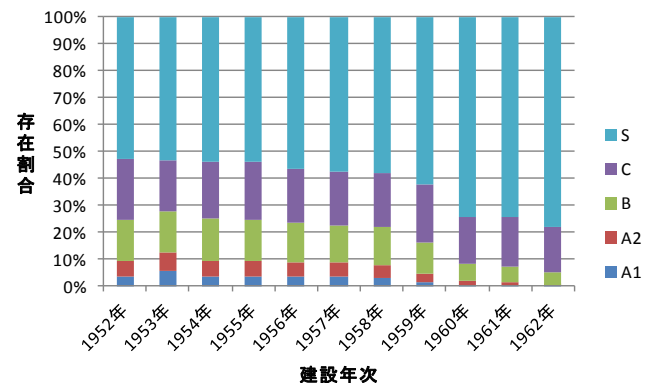


図-10 各建設年次の変状割合

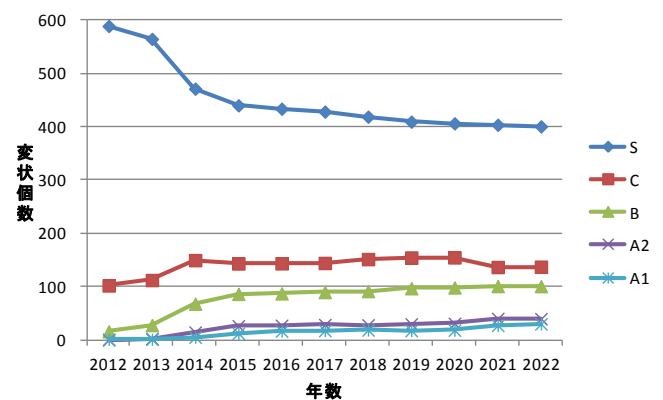


図-11 累積値法における将来10年の劣化推移

ここでは、表-8に示すような集計グループ範囲に対応する変状ランク判定区分を決定した。

以上のようにして決定した変状ランク判定区分に基づき、対象トンネル建設年次ごとの各変状ランクの存在確率を算出した結果を図-10に示す。

図-4と同様に、経年年数が多いトンネルでは変状Sランクの割合が少なく、劣化が進行しているA2ランクやBランクの割合が多いことが確認できる。図-4では、検査データの欠損箇所を線形補間により推定せざるを得なかったが、集計結果をガンマ分布に近似することによって合理的な根拠をもって経年年数に対応したトンネル変状の劣化を推定することができた。

(7) 劣化推移確率行列作成と劣化推移

図-10を利用して、累積値法による検査データ集積に基づいたマルコフ確率過程による劣化推移確率行列を作成した。劣化推移確率行列を作成する手順は最悪値法の場合と同じであり、図-10で示した各経年年数における変状割合に基づきマルコフ確率過程を適用した。一例として、1962年に建設されたト

ンネルに対して作成した劣化推移確率行列を利用して、2012年を原点とした場合の向こう10年間の劣化推移予測をした結果を図-11に示す。この場合には、トンネルは2014年以降は緩やかに劣化するのに対して、当初の2013年から2014年にかけて大きく劣化することがわかる。

6. トンネル健全度評価

(1) トンネル健全度評価の概要

以上のようにして、最悪値法と累積値法で集積した検査データを利用して求めた劣化推移確率行列により劣化予測計算を用い、地下鉄の個別路線の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、表-9 に示す重みづけ係数を用いて対象としたトンネル路線の健全度を算出した。

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表-9 に示した健全度重みづけ係数を乗じて、変状総スパン数 n で割った値のことである。なお、重みづけ係数は、東京地下鉄株式会社のトンネル検査担当者へのアンケート調査結果により設定した値である。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^6 k_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^6 n_i} \quad (i = AA, A1, A2, B, C, S) \quad (3)$$

(2) 最悪値法と累積値法における健全度評価比較

地下鉄トンネルを対象として、最悪値法と累積値法による集計データに基づく健全度評価を比較した結果を、比較したものを図-12 に示す。累積値法により得られた健全度は、当然のことながら最悪値法と比較して高い結果となることがわかる。

この健全度評価手法を利用して、同等の健全度を有するトンネル区間について、図-11 と同じ最悪値法と累積値法による劣化推移確率行列を利用して劣化推移を予測した結果を図-13 に示す。図-11 と同様に累積値法と最悪値法では健全度の劣化推移に大きな差が生じていることがわかる。累積値法では健全な個所の劣化プロセスが該当トンネルスパンの健全度の低下に顕著に反映されるのに対して、最悪値法では健全な個所の劣化は該当スパンの健全度に影響しないためにこのような劣化プロセスの違いが生じるものと考えられる。したがってトンネルスパンの健全度評価の上では、累積値法により検査結果を集計した方が劣化プロセスを適切に評価できるものと思われる。

表-9 健全度重みづけ係数

変状ランク(i)	S	C	B	A2	A1	AA
重みづけ係数(ki)	10	8	6	3	1	0

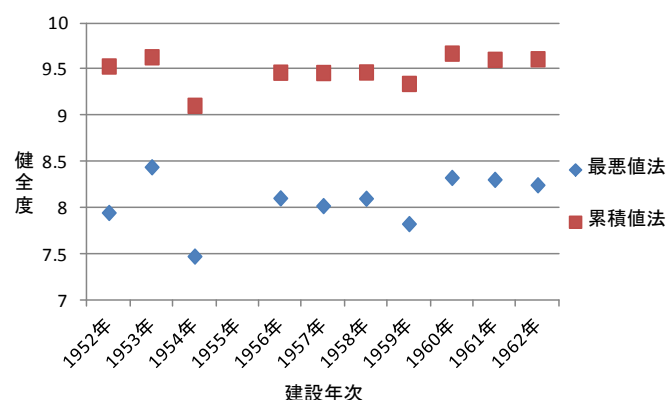


図-12 最悪値法と累積値法による健全度比較

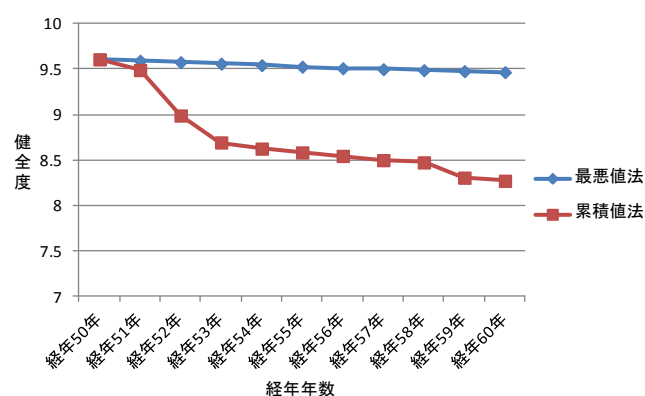


図-13 最悪値法と累積値法による劣化推移の比較

(3) 河川下トンネル区間の健全度評価

地下鉄トンネルの感潮河川下区間では、塩害の影響により劣化進行が著しいことが報告されている。ここでは、累積値法と最悪値法によるトンネル健全度評価がトンネル劣化原因である塩害をどの程度考慮できているのかを検証する。具体的には、2つの方法により河川下トンネル区間の健全度を算出し、非河川区間の健全度との比較を行うことで劣化原因の塩害の影響を調査した。

通常、河川下のトンネル区間は非河川区間(以下、一般区間)と比べ、漏水などの変状が著しく多く、それにより一般区間の健全度と比較した場合には、河川下区間の健全度の低下が想定される。そこで、以下に示すような手順で、河川下トンネル区間と一般区間における健全度評価を行った。

- ①河川下区間(河川直下±50m)において、2つの方法により健全度評価を行う。
- ②河川下区間の地下鉄トンネルと同建設年次、同地盤条件、同トンネルスパン数のトンネル区間を選定し、これを一般区間とする。
- ③河川下区間と一般区間の健全度の比較・検討を行う。

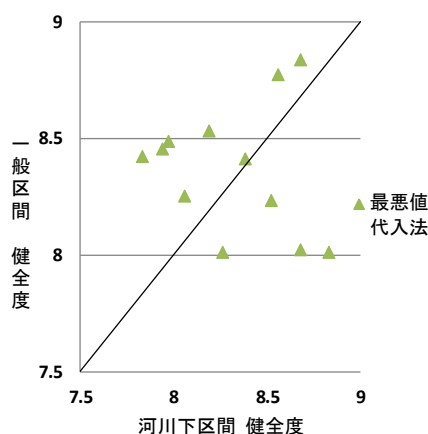


図-14 最悪値法による健全度評価の比較

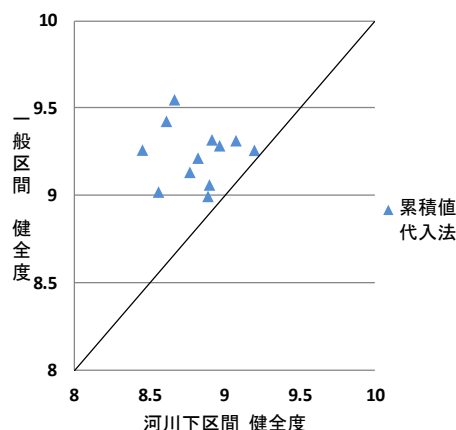


図-15 累積値法による健全度評価の比較

図-14 は、最悪値法を用いて求めた河川下区間での健全度と一般区間の健全度を比較したものである。図からわかるように、健全度を最悪値法で求めた場合、河川下区間の健全度と一般区間の健全度の間には上記で述べたような傾向が認められない。最悪値法では、河川下トンネル区間に存在している塩害による劣化箇所を考慮することができず、他の要因による劣化箇所を含めた最悪値という指標でのみで評価する結果となっている。一方、図-15 は累積値法を用いて、図-14 と同様の健全度評価を行った結果を示している。累積値法では、対象とした全区間において河川下区間の健全度が一般区間の健全度より小さくなる結果が得られた。対象トンネルスパン内にある変状をすべて考慮する累積値法を用いることで、河川下区間の塩害による変状を健全度に的確に反映させることができたためと考えられる。すなわち、塩害などの劣化要因を健全度低下として定量的に評価する際には、すべての劣化個数と劣化状態を適切に把握することができる累積値法が有効な手段であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地下鉄トンネルの検査結果を用いた健全度評価と劣化予測手法を検討するにあたり、最悪値法と累積値法の2種類のデータ集計方法に

よる検討を行った。本研究で得られた成果は、以下の通りである。

- ①地下鉄トンネルの検査データを集計する手法として品質管理・信頼性工学に基づく最悪値法と、トンネル検査の劣化個数や劣化要因を考慮することができる累積値法によるデータ集計を行い集計結果を比較・検討することができた。
- ②最悪値法に基づくデータ集計によって劣化推移確率行列を作成し、トンネルの将来における劣化推移を確認することができた。
- ③累積値法に基づくデータ集計により、トンネルの劣化度を定量的に評価し、確率分布（ガンマ分布）を用いた劣化推移確率行列を作成した。また、作成した劣化推移確率行列を用いてトンネルの将来における劣化推移を確認することができた。
- ④トンネル健全度評価手法を用いて最悪値法と累積値法における健全度評価の比較、作成した劣化推移確率行列に基づく健全度の劣化予測を行った。最悪値法と累積値法による健全度比較を行う場合、累積値法はトンネルの劣化プロセスを適切に評価できると考えられ、トンネルの劣化予測を考える過程で有効な手段を示すことができた。
- ⑤最悪値法と累積値法を用いて、河川下トンネル区間における健全度の比較を行った。河川下などの比較的変状が多い区間では、累積値法を用いて健全度評価を行うにあたり、すべての劣化個数と劣化状態を適切に把握することができる累積値法が河川下での健全度を的確に反映させることができると確認することができた。

謝辞：本研究実施にあたり、東京地下鉄株式会社の武藤義彦氏、河畑充弘氏、山本努氏、早稲田大学の三浦丈典氏には、多くのご支援とご指導を頂いたことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会論文集：土木技術者のためのアセットマネジメント（コンクリート構造物を中心として）、土木学会、Vol.64、P24-43、2008
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(維持管理編)、2012
- 5) 日本規格協会、新版信頼性工学入門、2010 P15-19
- 6) 朝倉書店、統計的品質工学の基礎、2010 P8-30

(2015.8.07 受付)

INSPECTION RESULTS FOR SUBWAY TUNNELS AND THEIR APPLICATION TO TUNNEL MAINTENANCE MANAGEMENT

Takaaki NISHIMURA, Shogo SUZUKI, Shinji KONISHI, Tetsuya MURAKAMI and
Hirokazu AKAGI

In Japan, the construction of social infrastructure has been increasing since the high economic growth in the 1960s. It is expected that further deterioration will occur in the future, so the maintenance and operation for these infrastructures is now a significant subject. Asset management is a strategic management of physical assets during their life in the organization, which enables the owners to manage their physical assets effectively and efficiently. In this research, a social infrastructure is considered as an asset. Infrastructure asset management has been applied to subway tunnel. The aim is to conduct a mid and long term efficient maintenance and operation plan for the subway tunnel and to decide the proper budget for the rehabilitation.