

# 地下鉄トンネルの点検データを用いた劣化予測 と修繕予算配分に対する検討

赤木 寛一<sup>1</sup>・山本 努<sup>2</sup>・前田 啓太<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 早稲田大学教授 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: akagi@waseda.jp

<sup>2</sup>東京地下鉄株式会社 (〒160-0004 東京都台東区東上野4-19-6)  
E-mail: t.yamamoto@tokyometro.jp

<sup>3</sup>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: kei.maeda@akane.waseda.jp

近年、社会資本のマネジメント手法としてアセットマネジメントを適用する動きが増えている。アセットマネジメントは従来、個人や企業の金融資産管理に用いられてきたが、近年は社会資本に対する適用もなされている。この動きは社会資本を公共の資産であると考えられるものであり、欧米などではその実践およびISO化を目指した基準策定などが進められている。アセットマネジメントの導入により、最適な投資の選定およびその効果と成長の判断や、最適な中長期計画の立案などが可能となる。

本研究は、地下鉄トンネルの劣化とその修繕に着目し、劣化調査データをもとに経年に伴う劣化推移特性を求めた。それをもとに個別路線に対する修繕予算配分の検討を行った。

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

## 1. はじめに

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。そのような状況の中、近年アセットマネジメントという管理手法が注目されている。アセットマネジメントとは、従来は不動産や金融資産などの投資用資産が対象であったが、社会インフラの効率的な維持管理を実施するため、土木構造物に対しても適用され始めている。

そこで本研究では、社会インフラに対してアセットマネジメントの適用を試みるために、地下鉄トンネルを対象として、トンネルの劣化予測と修繕策を検討する。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。ここで得られた推移確率行列をもとに、将来におけるトンネルの健全度評価を行う。次に、いくつかの修繕策を設定し、これらによるトンネルの健全度推移や補修費用などを求める。そのうえで、費用便益分析を用いて補修の費用対効果を評価し、最適な修繕案を評価する。最終的には得られた成果を、地下鉄トンネルの効率的な維持管理計画・中長期予算計画策定に役立てることを目的とする。

## 2. トンネル点検データとその整理方法について

### (1) トンネル点検データの概要

本研究では、東京地下鉄株式会社の保有する地下鉄トンネルの点検調査データを用いて、トンネルの経年劣化予測を行った。調査は2年毎に行われており、本研究では2010年に実施された点検データを使用している。実際の判定に利用されている変状ランクを表-1に示す。

表-1 変状ランクの概要

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 進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

(2) トンネル点検データの集計方法について

点検データは以下のようにして集計している。

- ・各線のトンネルを 5m スパンに区切り、そのスパンの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)
- ・建設年代別(10年ごと)に各変状ランクの総数を全線において求める。
- ・年代別(10年ごと)に建設されたトンネルの総延長を求める。この結果より、年代別の総スパン数を求め、変状が見られない部分(変状ランクS)の総数を求める。
- ・上の集計結果をもとに、10年単位で各変状ランクの総数を求め、各変状ランクの占める割合を10年単位で集計する。

3. 経年による劣化予測と健全度評価

(1) 劣化予測の考え方

土木構造物の劣化予測は大きく分けて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、点検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、予算配分を評価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。

(2) トンネル点検データの集計結果

変状ランクの存在割合を10年単位の建設年次で表した例を図-1に示す。図-1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、変状が軽い傾向があることが確認できる。

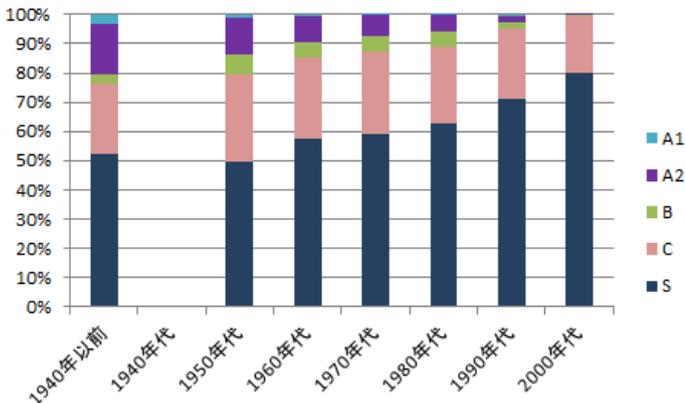


図-1 変状ランクの割合 (10年単位で集計)

推移確率行列の作成は上記の集計結果を用いて以下の考え方を採用し行った。建設完成から $t_n$ 年経過したトンネルの変状の存在確率を  $\{P_X\}$  とすると、 $t_{n+1}$ 年経過したトンネルの変状ランクの存在確率  $\{P_X\}$  は以下の式で与えられる。

$$\{P'_C P'_B P'_{A2} P'_{A1}\} = \{P_C P_B P_{A2} P_{A1}\} \begin{bmatrix} K_{CC} & K_{CB} & K_{CA2} & K_{CA1} \\ 0 & K_{BB} & K_{BA2} & K_{BA1} \\ 0 & 0 & K_{A2A2} & K_{A2A1} \\ 0 & 0 & 0 & K_{A1A1} \end{bmatrix} \quad \text{式(1)}$$

$K_{CC}$ 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わす。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。

- ・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。
- ・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。
- ・2010年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、作成した推移確率行列の例は表-2の通りである。表-2は、建設後49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る。上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) トンネル健全度について

上記で求めた推移確率行列を用いた劣化予測計算を用い、20年間の個別路線の劣化予測と健全度評価を行った。ここで健全度とは、トンネルの健全性を表す数値を表しており、表-1の変状ランクに対して数値による重みづけをした値のことである。重みづけ係数は、表-3の通りである。なお上記の重みづけ点数は現在具体的な基準は存在しない。そのためメンテナンス担当者数名の経験によるもので、列車の走行安全性を要求性能として定められている。

表-2 推移確率行列の例

	経年50年	S	C	B	A2	A1
経年49年		52.76%	33.31%	5.23%	8.20%	0.49%
S	53.78%	0.981	0.019	0	0	0
C	32.48%	0	0.994	0.006	0	0
B	5.26%	0	0	0.96	0.04	0
A2	7.99%	0	0	0	0.999	0.001
A1	0.49%	0	0	0	0	1

次に各年度において、変状総数を点数化し、その平均値をとることで、その年度におけるトンネル健全度を算出した。健全度の算出例を以下に示す。表-4は、2010年における路線別のトンネル全体の健全度を表したものである。表-4より路線ごとに健全度の値が異なっていることがわかる。

#### 4. 個別路線への修繕予算配分戦略

##### (1) 修繕費用と予算の設定

次に、トンネルの修繕についての検討を行った。ここで、点検データを用いて各変状ランクを修繕するのに要する費用の設定を行った。設定した費用の値は表-5の通りである。費用の設定は、トンネル点検データを元にA2ランクを1箇所補修するのに要する費用を算定した。その後、A1ランクをA2ランクの3倍、Bランクを0.5倍、Cランクを0.2倍として設定することで、補修費用を決定した。

この条件のもと、年間上限予算を考慮したうえで、個別路線に対してどのように予算配分を行えば、費用対効果が高くなるのかを検討した。検討にあたって、年間上限予算は10億円とし、修繕は変状ランクが重い順から行うものとした。

表-3 重みづけ係数

S	C	B	A2	A1
10	8	6	3	1

表-4 路線別の健全度

	S	C	B	A2	A1	健全度
路線A	2994	1346	177	960	115	8.01
路線B	3540	2847	478	702	27	8.32
路線C	4691	1666	294	596	53	8.75

表-5 設定した補修費用

変状ランク	補修費用(円)
A1	2313000
A2	771000
B	385000
C	154000

##### (2) トンネルの修繕を考慮した劣化予測

上記で作成した推移確率行列を利用して、年間上限予算内で補修を行い、将来20年にわたり劣化予測と健全度評価を行った。予測方法の流れの例を図-3に示す。図-3は、ある路線における補修と劣化の流れを示しており、補修は年間上限予算10億円を全9路線に分配し、変状ランクの重い順に補修をしていくものとしている。予測を20年にわたって行い、各年度における健全度を算出している。

図-4は全路線に均等に予算配分を行った際の健全度の推移を表した例である。補修を考慮しているため、路線A,B共に20年にわたって健全度が上昇していることがわかる。

現在

	S	C	B	A2	A1
1940以前	0	0	0	0	0
1940年代	0	0	0	0	0
1950年代	0	0	0	0	0
1960年代	0	0	0	0	0
1970年代	370	106	16	43	0
1980年代	622	311	59	108	0
1990年代	33	12	1	1	0
2000年代	1872	451	25	12	1



補修費用 6638 万円

現在(補修直後)

	S	C	B	A2	A1
1940以前	0	0	0	0	0
1940年代	0	0	0	0	0
1950年代	0	0	0	0	0
1960年代	0	0	0	0	0
1970年代	370	106	16	34	0
1980年代	622	311	59	85	0
1990年代	33	12	1	1	0
2000年代	1872	451	25	10	0



1年後

	S	C	B	A2	A1
1940以前	0	0	0	0	0
1940年代	0	0	0	0	0
1950年代	0	0	0	0	0
1960年代	0	0	0	0	0
1970年代	369	107	16	34	0
1980年代	619	309	61	86	0
1990年代	33	12	1	1	0
2000年代	1838	478	27	14	1

図-3 修繕を考慮した劣化予測の流れ

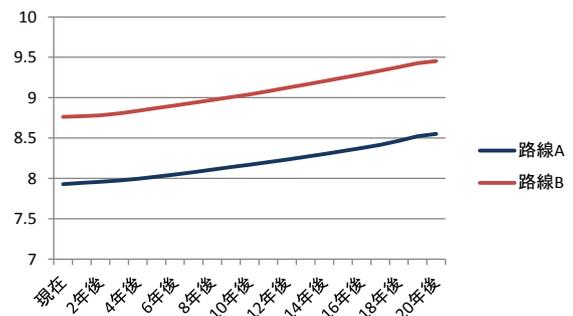


図-4 路線別の健全度推移例

### (3) 予算配分とその評価について

年間補修予算を10億円とし、これらを東京地下鉄株式会社が保有する全9路線に配分した。各路線への配分方法を変化させることで、費用対効果がどのように変化していくのかを確認、評価した。

予算配分の評価は費用便益分析(B/C)を用いて評価した。費用便益の評価式はそれぞれ以下のように設定した。

$$B \text{ (便益)} = \{ \Sigma(\text{健全度上昇量} \times \text{営業収入}) \} \\ \times (\text{トンネル補修費用} / \text{全事業営業費})$$

$$C \text{ (費用)} = t \text{ 年次の補修に使われる費用}$$

上の式によって得られる1年ごとの費用便益量をそれぞれ20年間において合計し、その比を20年における投資の費用対効果とした。ここでは、各路線の健全度上昇量を便益とみなし計算を行っている。修繕予算を各路線に均等に配分したB/C値を1として、個別路線の特徴（路線長、初年度健全度、営業収入）に応じて予算配分を変更した場合のB/C値を比較した結果が表-6である。表-6より、個別路線の特徴に応じて予算配分を行うことで費用対効果を向上させることが可能であることが分かった。

表-6 予算配分方法とB/Cの比

配分方法	B/Cの比
均等配分	1
路線長を考慮	1.09
初年度健全度、営業収入を考慮	1.28

### 5. まとめ

ここでは、地下鉄トンネルを対象として既存の点検調査データをもとに、経年に伴う劣化推移特性を求め、その結果を用いることで個別路線への修繕予算配分戦略について検討した。その結果以下の成果が得られた。

- ・点検調査データから劣化レベルに対応するトンネルスパン(5m)の存在確率を求めることにより、推移確率行列を用いて将来の経年劣化パターンを連続的に算出することができた。

- ・各路線の健全度上昇量を便益とみなすことで費用便益分析を行い、各路線への予算配分の投資効果を評価した。その結果、各路線の収入比や初年度健全度など各路線固有の情報を考慮して予算配分を行うことで費用対効果を高めることが可能であることがわかった。

今後は費用便益分析の式にリスクマネジメントの考え方を取り入れ、リスクをコスト化することによって費用対効果の評価を行う予定である。

#### 参考文献

- 1)赤木寛一, 志賀正幸, 橋本暁典, 林秀三:電気通信ネットワーク地下構造物の維持管理の一提案, 土木学会第 62 回年次学術講演会, No.6-193, pp.385-386, 2007.9
- 2)小西真治, 佐藤豊, 仲山貴司:リスクマネジメント手法を用いた鉄道トンネル維持管理計画法の検討, 信頼性シンポジウム発表報文集2006秋季(19), pp.45-48, 2006.10
- 3)赤木寛一, 川上勇, 前田啓太, 山本努:地下鉄トンネルにおけるアセットマネジメントの試み, 第9 回地盤工学会関東支部発表会, 2012.10

(2013. 9. 2受付)

## A TRIAL OF INFRASTRUCTURE ASSET MANAGEMENT FOR SUBWAY TUNNELS

Hirokazu AKAGI Tsutomu YAMAMOTO and Keita MAEDA

In Japan, the construction of social infrastructure has been increasing since the high economic growth in the 1960s. Right now it is a problem in Japan that these infrastructures are deteriorating. It is expected that further deterioration will occur in the future so the maintenance and operation for these infrastructures is now a significant subject.

Under these circumstances, a managing method named as an infrastructure asset management is beginning to be employed recently. Asset management is a strategic management of physical assets during their life in the organization, which enables us to manage physical assets effectively and efficiently. Our goal is to conduct a mid and long term efficient maintenance and operation plan for the tunnel and to decide the proper budget for rehabilitation.