

性能評価に基づく道路トンネルの補修費算定手法の検討 CALCULATION OF MAINTAINANCE COSTS FOR ROAD TUNNELS BASED ON THE PERFORMANCE EVALUATION

蒋 宇静¹・棚橋 由彦²・杉本 知史³・上田 静⁴

Yujing JIANG・Yoshihiko TANABASHI・Satoshi SUGIMOTO・Shizuka UEDA

A great number of tunnels exist in the mountain areas, which occupy more than 60% of the total area in Japan. Most of them were constructed during the high economic growth period, and the repair works are frequently required in nowadays. The maintenance of these tunnels becomes very important due to cutting the public budget and decreasing the new construction projects. From the background, the determination of repair works and repairing period is an important issue for the rational maintenance. In this study, the “deterioration curve” is defined based on the observed data and stochastic model based on road tunnel evaluations. It is suggested that the proposed degradation curve is useful for the performance evaluation and the calculation of costs for the effective maintenance.

Key Words: road tunnel, asset management, deterioration curve

1. はじめに

日本は山地が6割を占める地形的制約から、都市間を結ぶ鉄道・道路はトンネルの割合が高く、また、高度経済成長期に整備された多くの構造物は供用されて40年近く経過しており、補修・改修時期が迫っている。一般に、トンネルは完成後の改築が困難であるため、長期間にわたり供用する必要があるため、維持管理による延命化が重要である。今後、道路トンネルの維持管理にあたっては、適切な点検・評価によって将来の状態を的確に予測し、対策工の時期と対象・規模を把握することで、費用を最小化する維持管理手法が求められている。このような背景から、著者らは、道路トンネルの合理的維持管理手法を支援するための維持管理データベースの構築ならびに変状シミュレーションの結果に基づいたトンネル性能評価と最終補修費用を試算するアセットマネジメント手法の導入^{1),2)}を提案してきた。これらの研究では、トンネル維持管理費の縮減と、最適な予算配分を行うための計画を提案したが、実用に供する上で、数少ない計測データに基づくトンネルの劣化状態あるいは性能の客観的評価に課題を残していた。

そこで本研究では、算定結果に大きく影響をもたらすと考えられる劣化予測手法について提案するとともに、これに基づいたトンネル補修費の算定手法について検討を重ねた成果を示す。

キーワード：道路トンネル、アセットマネジメント、劣化曲線

1 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科 准教授

2 フェロー会員 長崎大学工学部社会開発工学科 教授

3 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科 助教

4 正会員 西部電気工業株式会社

2. 道路トンネルに関する劣化予測手法の提案

(1) 道路トンネルの「性能」の定義と劣化との関係

適切なタイミングを以って、劣化が進行したトンネルを補修することは、長期的なタイムスパンの中で、費用対効果を大きく左右すると言える。そのため、劣化の進行状態を定量的に表すことは、費用算定の上で必要不可欠なことである。これを定量的に表す指標として、「性能」という値を定義し、時間変化を推定することで、劣化状態に応じた補修費算定を可能にする。

しかしながらトンネルの性能は、様々な劣化要因の下で変化するものであり、また既設トンネルのこれら要因に関する経時的な観測データは、極めて限られたものしか存在しないため、現状では厳密に定義することは困難である。ただし、国あるいは自治体の公共事業への投資額が年々減少する中で、効率的な補修への取り組みを進めるためには、何らかの形で性能を表現する必要がある。

そこで本研究では、一つの試みとして、在来工法で建設された経年 10～40 年ほどのトンネル覆工の一軸圧縮強度に着目し、一面的ながら性能を定量的に表現する。

なおここでは、トンネルが施工された直後で完全に健全であるものの性能を 1、完全に劣化したときの性能を 0 と考えている。

(2) 覆工の一軸圧縮強度による性能の定量的評価

長崎県庁管轄トンネルの詳細調査資料、補修資料²⁾に基づいて 26 本のトンネルの経過年数(t)と覆工コンクリートの平均一軸圧縮強度(R_c)の関係を図-1 に表す。この強度値を用いて、トンネルの性能(P_t)を定量的に表現するため、次の多項式により圧縮強度を正規化した。

$$P_t = 1 + 5 \times 10^{-6} t^3 - 3 \times 10^{-4} t^2 - 8 \times 10^{-3} t \quad (1)$$

これは、土木工事設計要領において覆工コンクリートが満たすべきとされている一軸圧縮強度 18 N/mm^2 を補修実施基準の下限値とした性能は、 45 N/mm^2 の性能が 1、 0 N/mm^2 の性能が 0 として、0.4 と定義した。各トンネルの性能の分布を、図-2 に示す。

これらのデータに基づいて、同じ工法で建設されたトンネルの性能に関する経時変化について、そのばらつきを考察する。ここでは、性能の減少量を経年数で割った性能変化率より、26 のデータを大小 2 つのグループに分け、それぞれの近似曲線を劣化曲線 A、C とする。また、両者の平均として作成したモデルを劣化曲線 B とした。以上の 3 本の劣化曲線と実際のトンネルの調査結果を図-2 に併せて示す。

これらの劣化曲線より、トンネルは早ければ 30 年前後で性能 0.4 を下回り、平均的に見ても 45 年前後で 0.4 以下になる可能性が大と推測できる。また、劣化の進み方の遅い劣化曲線 A と早い劣化曲線 C では 50 年で約 0.35 も性能の大きさに差が生じている。よってトンネルは施工した後において早い段階で調査し、劣化を予測する際に

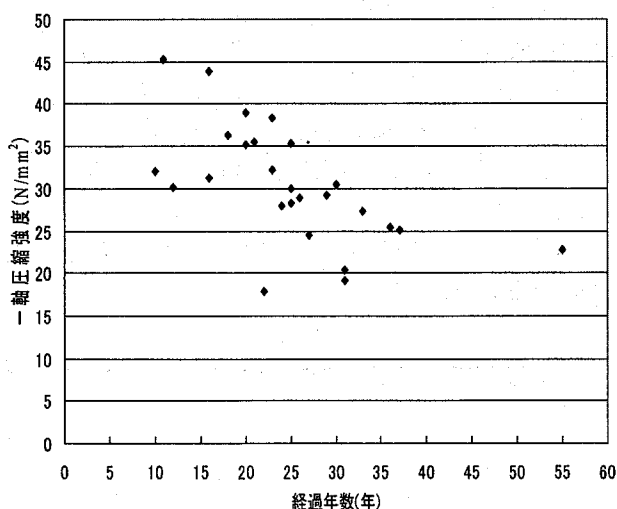


図-1 覆工コンクリートの一軸圧縮強度の経年変化

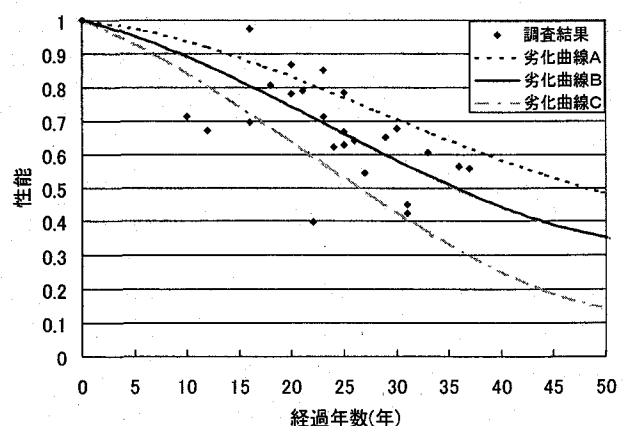


図-2 劣化曲線と実測値との比較

表-1 調査結果に基づく劣化曲線の設定

判定区分	性能	判定の内容 ⁴⁾
S	1.0-0.9	健全で機能的にも問題がない
B	0.9-0.8	変状がないか、あっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して影響はないが、監視を必要とするもの
A	0.8-0.65	変状があり、将来通行者・通行車両に対して危険を与えるため、重点的に監視をし、計画的に対策を必要とするもの
2A	0.65-0.5	変状があり、それらが進行して、早急通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの
3A	0.5-0.35	変状が大きく、歩行者・通行車両に対して危険があるため、直ちに何らかの対策を必要とするもの

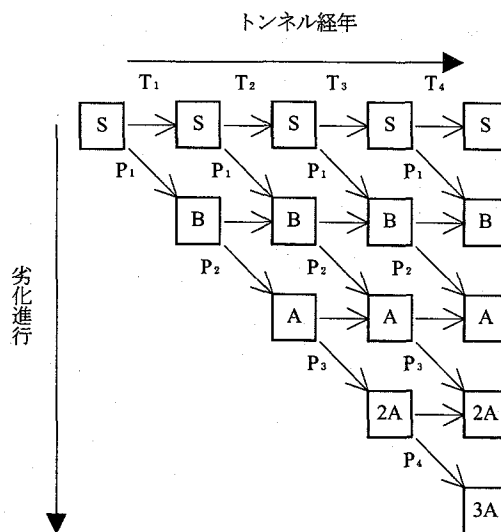


図-3 確率論に基づく劣化モデル

はある程度の幅があることを考慮する必要があると考えられる³⁾。

(3) 判定区分に対する性能の設定

判定区分とは標準調査、詳細調査の結果を対策の緊急度や安全性に与える影響等を基に決定したもので⁴⁾、変状、材料劣化、漏水などをトンネルのスパンごとに評価する指標としている。今回、道路トンネルの現状の性能を推定するために図-2における平均曲線である劣化曲線Bを参考にして判定区分に対する性能を決定する。経過年数50年で性能は0.35となっていることから判定区分3Aに対する性能の下限を0.35と設定する。ここから図-2に示した劣化曲線の形状を考慮して、決定した判定区分に対する性能の値を表-1に示す。

ここでは、判定区分と性能との関係を定義する一方法として、トンネルから直接的に得られる情報の一つである一軸圧縮強度に注目した手法を提案したが、データが限られたものであるため、普遍性に乏しい。また先述の通り、トンネルの劣化は様々な要素に起因するものであることから、建設年次や工法、トンネルの周辺環境など、様々な要因を踏まえる必要があるものと考えられる。

そこで、劣化に関するデータが不足する現状を踏まえた確率論に基づく性能の経時的変化の予測を次章で提案する。

3. 確率論に基づく劣化予測手法の提案

(1) 確率論を導入する目的

本来、トンネルの供用年数と覆工コンクリートの圧縮強度との関係に着目して、定量的かつ直接的に劣化の進行を把握することが、劣化を予測する上で最も重要であると考えられるが、この有効性を検証するためには、個々のトンネルの点検結果と照合する必要となる。しかしながら、点検履歴が数えるほどしかない現状においては、計測データが過少であることから、将来予測をするためには、別の方法で劣化の進行状態をシミュレーションする必要がある。そこで、本研究ではトンネルの劣化が確率事象としてモデル化されると仮定し、マルコフ過程による劣化予測手法を提案する。

(2) マルコフ過程とこれに基づいた劣化予測モデル

マルコフ過程⁵⁾とは、過去の状態の経緯にはとらわれず、現在の状態のみによって次の状態を決定していく確率過程である。マルコフ過程による劣化進行のモデル図を図-3に示す。ここで P_i は次の判定区分に劣化が進行する確率であり、 T_i はそれを判定する経年を表している。すなわち、判定区分Sに相当するトンネルが T_1 年後に確率 P_1 で判定区分Aに劣化が進行し、 $(1-P_1)$ の確率で劣化は進行せず、判定区分Sにとどまることを表している。

(3) 劣化に関するパラメータの設定

劣化予測モデルに従って、劣化推移確率 P_i を推定する。点検結果より推定された長崎県内のトンネルの性能値

と経過年を基に、トンネルの性能が*i*から*j*に推移する確率を P_{ij} として整理する。点検項目(浮き、空洞等)別に整理を行い、 P_i を求めた結果、 $P_1=0.3$ 、 $P_2=0.5$ 、 $P_3=0.3$ 、 $P_4=0.3$ という値を得た。

(4) マルコフ過程による劣化曲線の設定

パラメータの設定で得られた P_i の値を用い、 T_i を1~10年に変化させて作成した劣化曲線の一部を図-4に示す。これらの劣化曲線と、現状のトンネルの性能を照合することにより、個々のトンネルの性能を推定することができる。つまり、経過年24年で性能0.56である沖平トンネル³⁾は、グラフ上では丁度 $T=3$ の劣化曲線上にプロットされるため、この曲線により表現することができると考えられる。この劣化曲線による各判定区分の割合の変化を図-5に示す。早急に対策が必要とされる判定区分2Aと3Aの割合の経年変化を見ると、2Aの割合は24年後にピークを迎えその後減少するものの3Aは増加を続け、50年後には80%を超えることがわかる。今回は、一つの点検データにより劣化曲線を推定したが、予測精度の向上のためにはデータの蓄積が必要であると言える。しかしながら、この手法はトンネル毎に劣化曲線を推定でき、点検結果と照合しながら将来予測を行うことができるため、点検データの少ないトンネルの劣化予測手法として有効であると考えられる。

4. 路線重要度の評価方法の提案

(1) 路線重要度の評価方法

トンネルは所管の複数路線に位置するために、どのトンネルから補修に着手するかは、単に個々のトンネルの劣化度だけでなく、トンネルが位置する路線の重要度を考慮しなければならない。本研究では表-2に示した指標に着目したトンネル路線の重要度の評価を考えた。具体的内容に対して評価点を設定し、加重平均法により100点満点で算定した。重み係数 β_i ($i=1\sim4$)は周辺環境等によって柔軟に補正していく必要があるが、今回は $\beta_1=0.5$ 、 $\beta_2=0.1$ 、 $\beta_3=0.3$ 、 $\beta_4=0.1$ とした。

表-2 路線の重要度の決定

重要度指標		具体的項目	評価点	重み
総交通量	台/日	1~5000	25	β_1
		5001~10000	50	
		10001~15000	75	
		15000~	100	
交通容量 (車道幅員)	m	~4	25	β_2
		4~6	50	
		6~12	75	
		12~	100	
迂回路 (所要時間)	分	~20	20	β_3
		20~60	60	
		60~	100	
バス路線	有/無	有	100	β_4
		無	0	

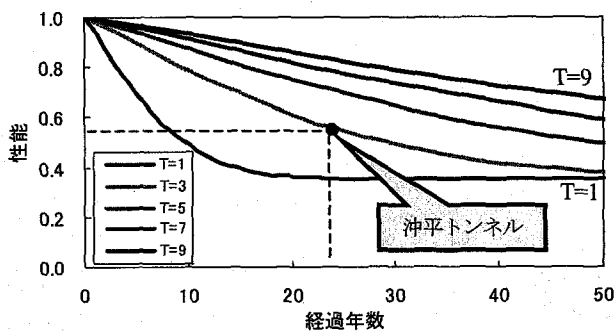


図-4 マルコフ過程による劣化曲線の設定

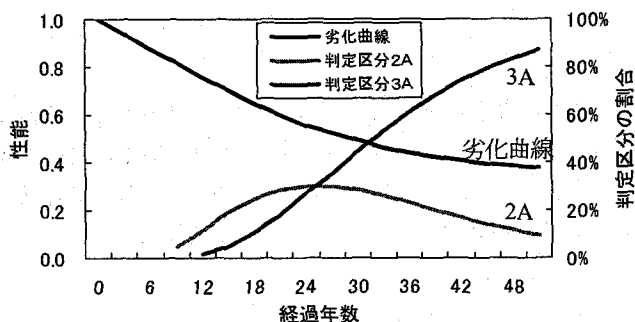


図-5 沖平トンネルの劣化曲線と判定区分割合の推移

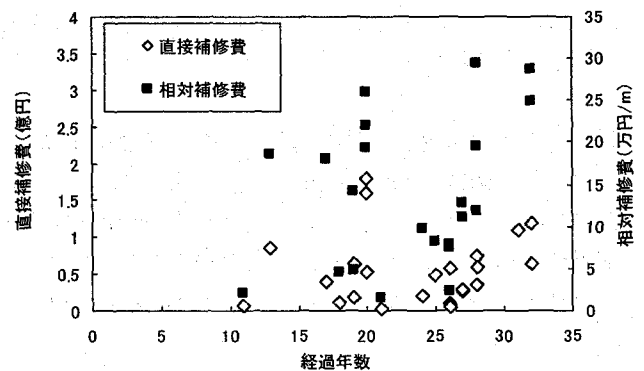


図-6 直接補修費と相対補修費の分布

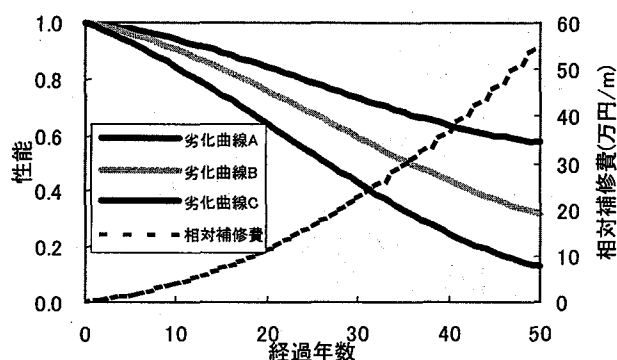


図-7 経過年に対する性能と補修費の推移

表-3 性能回復のための1m当たりの直接補修費

性能	性能回復のための直接補修費(万円/m)
0.8 → 1.0	8.72
0.65 → 1.0	18.72
0.50 → 1.0	29.30
0.35 → 1.0	49.50

トンネルの保全更新の優先度を総合的に評価する算定式を、以下のように定義した¹⁾。

$$P = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 \quad (2)$$

ここで、 P_1 はトンネルの劣化度を、 P_2 は路線の重要度を表す。係数 α_i ($i=1,2$)については長崎県の維持管理の現状を踏まえ、 $\alpha_1=0.6$ 、 $\alpha_2=0.4$ とした。

5. 性能評価に基づく補修費の試算

(1) 直接補修費の分析

補修検討を行ったトンネルのうち、図-6に示す補修費のデータが存在する長崎県内のトンネル27本に関する直接補修費に着目し回帰分析を行った。図-7に経過年数と相対補修費(直接補修費をその対象トンネルの延長で除した値)および性能の関係を示す³⁾。この直接補修費の分析結果と劣化曲線を基に、性能ごとの補修費を設定する。すなわち、性能毎の直接補修費は表-3のようになる。

(2) 試算結果と考察

試算条件を以下のように設定し、それぞれのケースにおいて劣化曲線 A と C を用いた補修費の試算を試みた。

- ・詳細点検が行われたトンネルの内、長崎県内 31 本のトンネルを対象とする。
- ・性能をアップする費用は、劣化曲線 B の性能値と直接補修費の回帰分析結果に基づく。
- ・1年に補修できる本数は3本までとする。
- ・それぞれ性能が0.8～0.35に落ちた時点でも劣化レベルに係わらず必ず性能1.0までアップする。

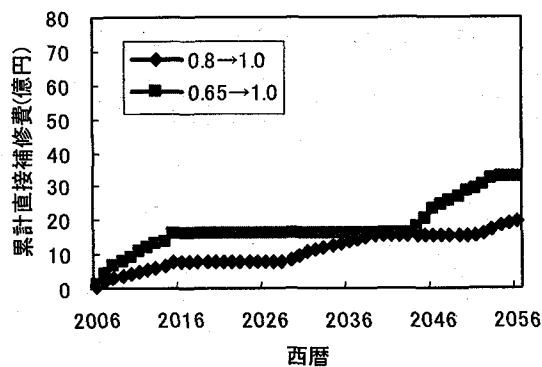
劣化曲線 A を用いて予測した性能の経年変化と補修費の経年変化を図-8に、同じように劣化曲線 C を用いて予測したものを図-9に示す。これらの図は、補修を行うことで補修費が増加する一方で、性能も増加することを表している。性能の経年変化を見ると、早めに補修することで高い性能を維持できることがわかる。また、A と C どちらの劣化曲線を用いた場合でも、性能が0.8に落ちた段階で補修を行えば、初期の補修費用は高くなるものの、最終的な補修費用は低くなることがわかる。その50年後の累計補修費は、19.4億円(劣化曲線 A)～30.3億円(劣化曲線 C)となった。

6. 結論

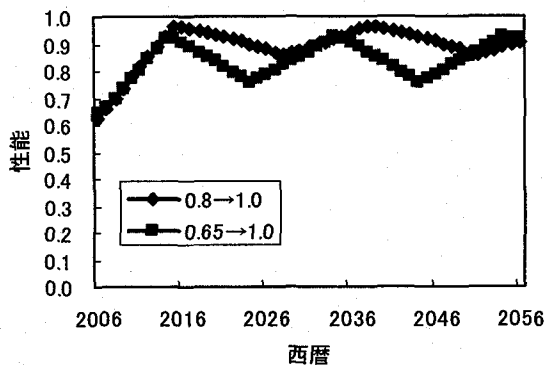
本研究では、道路トンネルの劣化予測に関する手法を提案し、この結果に基づいたトンネル補修費の試算結果から、合理的な推計が可能となることを示した。

以下に、具体的な成果を記す。

- (1) 道路トンネルの性能と劣化の関係を定義した上で、点検結果に基づいた劣化曲線の設定に関する考え方を提案した。これにより、トンネル性能の定量的評価と将来的な劣化状態の経時的変化の予測を可能であることを示した。
- (2) トンネルごとの劣化曲線を設定するため、数少ない点検結果とマルコフ過程の考え方に基づいた、確率論的劣化予測手法を提案した。トンネルの性能に関する判定結果が個々に推定できることから、補修を講ずる上で、対策の緊急度を個別に明らかにすることが可能となる。
- (3) 補修費用の観点から、トンネルを補修すべき時期を明らかにするため、劣化曲線によるトンネル性能の判定結

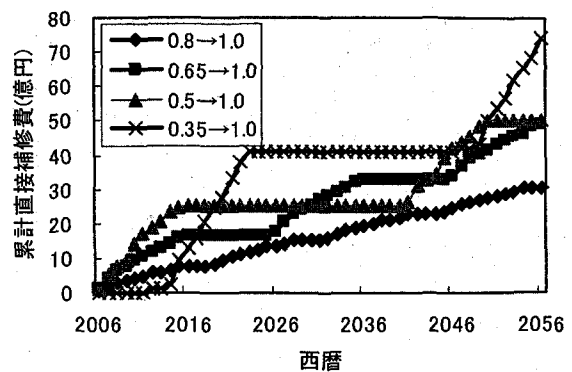


(a) 補修費の推移

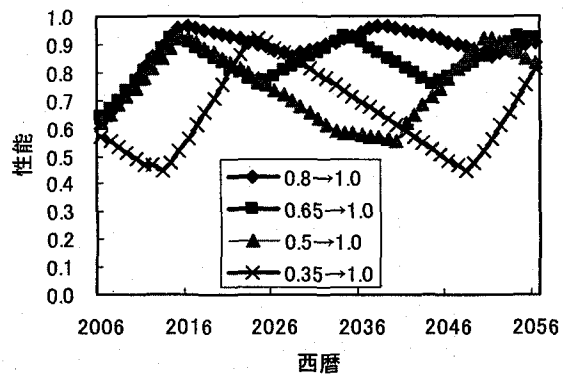


(b) 性能の経年変化

図-8 劣化曲線 A による試算結果



(a) 補修費の推移



(b) 性能の経年変化

図-9 劣化曲線 C による試算結果

果と路線重要度の評価結果に基づいた補修費用の試算を行った。その結果、早い段階で補修を行うことが、性能とコストの両側面から効果的であるとの結論が得られた。

参考文献

- 1) 蔣 宇静, 亀崎隆太, 平川昌寛, 棚橋由彦: 道路トンネル維持管理におけるアセットマネジメント手法の適用, トンネル工学 論文集, 第16巻, pp.1-10, 2006.
- 2) 蔣 宇静, 棚橋由彦, 藤井崇博他: GISを用いた道路トンネル維持管理データベースの構築と活用, 土と基礎, 第52巻, 第6号, pp.25-27, 2004.
- 3) 安田 亨: トンネル構造物の維持管理最適化に関する研究, 京都大学学位論文, 2004.
- 4) 日本道路協会: 道路トンネルの維持管理便覧, 1993.
- 5) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連出版社, pp.3-13, 2000.