

不確実性を考慮したトンネル構造物の補修ルールに関する一考察

パシフィックコンサルタンツ 正会員 ○安田 亨
 京都大学 フェロー会員 大西 有三
 京都大学 正会員 大津 宏康
 大阪市 正会員 中井亮太郎

1. はじめに

劣化を伴うトンネル構造物において、性能や機能低下をモニタリングしながら、適切なタイミングで補修することが重要であるが、劣化過程は複雑で不確実性が伴うために、補修の最適化手法は未だ確立されていない。この不確実性の表現は、確率微分方程式によりモデル化する手法が注目されている。同モデルの適用のもとに、点検・補修費用を考慮したライフサイクルコストを算出し、最適な点検間隔および補修を行う指標を求め、補修のタイミングを意志決定する手法を提案することによって、戦略的な維持管理計画の立案を目指すものである。

2. 健全度低下予測

2.1 トンネルの性能規定

トンネルの点検結果を定量的に評価するための指標を規定する。一般的な点検結果を定量化するために用いられているグレーディング法を基本として、構造的な変状と利用者被害を誘発する変状の各項目毎に、5段階の劣化段階を設定した。点検は連続データではなく、2年から5年程度の間隔で行われることが多いから、ひび割れによる性能のジャンプが吸収される可能性が高い。これを図に表すと、図1のようになる。すなわち、点検データによる劣化傾向は、ひび割れや補修による健全度の不連続性を、平均的にとらえたデータといえる。この点を考慮して、健全度低下を全体的な傾向でモデル化する。

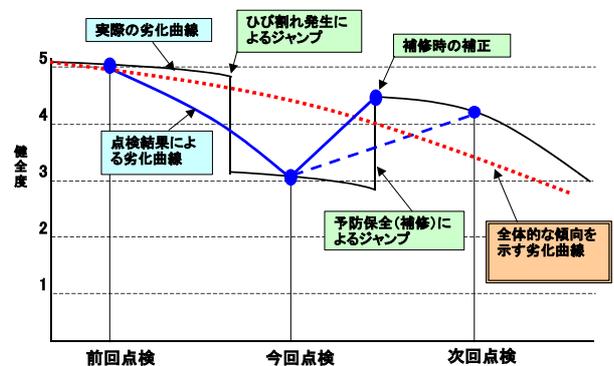


図1 健全度低下と点検ポイントの関係

2.2 経年劣化過程のモデル化

健全度低下過程 $X(t)$ は、小林・田村¹⁾によれば幾何学的ブラウン運動に従うと仮定する手法が提案されている。

$$dX(t) = \beta X(t)dt + \sigma X(t)dW_1(t) \quad (1) \quad X(t) = X_0 \quad (2)$$

ここに、 β は平均劣化率（トレンド）、 σ は自然的劣化の分散の程度を表すパラメータ（ボラティリティ）である。 $W_1(t)$ はウィナー過程であり、① $W_1(t)$ は連続であり $W_1(0)=0$ である。② $W_1(t)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従う。③増分 $W_1(s+t)-W_1(s)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従い、時刻 s までの $W_1(t)$ の履歴とは独立である。（マルコフ過程）という3つの性質を満足すると仮定する。次に、トンネルの覆工の修繕過程をモデル化する。これは、劣化の度合いにより予防保全、補修、補強を行い健全度を回復させる過程を意味している。修繕が時刻 $0 < t_{i1}^* < \dots < t_{i2}^* < \dots$ において実施され、時刻 t_i^* に覆工の健全度が所与の値 Z_i^* に改善される。修繕後の健全度はある値 Z_i^* に固定されているとする。修繕直前の健全度を Z_i^* とすると、トンネル覆工健全度の確率過程は次式のように仮定できる。

$$dZ(t) = \beta Z(t)dt + \sigma Z(t)dW_1(t) + \sum_{i=1}^n \{Z_i^* - Z_i^*\} \delta(t - t_i^*) \quad (3) \quad Z(0) = Z_0 \quad (4)$$

ここに、 δ はディラックの測度であり、 $t=t_i^*$ の時のみ確率測度1を与え、それ以外の時は確率測度0を与える。以上のような補修過程では、インパルス時刻 $0 < t_{i1}^* < t_{i2}^* < \dots < t_i^* < \dots$ において健全度がジャンプするようなインパルス制御問題となっている。確率微分方程式(式3)を伊藤積分すれば、トンネル覆工健全度の確率分布の時間的な推移過程を求めることができる。

3. 解析事例と結果

3.1 対象トンネルの現状とデータ整理

全63スパンの既設トンネルを対象とする。本トンネルは10年前に竣工しており、 $t=5$ 年、10年において点検を行っている。また、 $t=0$ における竣工直後に点検を行っていないため正確性に欠けるが、竣工時には変状が全くなかったと仮定すると

キーワード トンネル維持管理, 劣化評価, 不確実性, 補修ルール

連絡先 〒532-0011 大阪市淀川区西中島4-3-24 パシフィックコンサルタンツ(株)大阪本社 TEL06-6886-8436 FAX06-6886-8492

健全度 5 (t=0) として表現できることから、全体では3時点のデータがあると考えて以下の検討を行った。当時の坑内展開図を元にしてグレーディング法を用いて各スパンごとのスコアを求め、幾何学的ブラウン運動を適用するために各スコアに対して対数を取り以下の検討を行った。

3.2 実データを用いたモデルの検証

実データを用いて、50年間のライフサイクルコスト計算を行った。式(3)におけるパラメータは、上記実データスコアから求め、トレンドは0.0322, ボラティリティは0.0241とし、3000回のサンプルパスを発生させた。点検, 補修, 補強に関する各種費用に関するパラメータは、本解析対象トンネルのデータを参考にして設定した。また通行止めに伴う利用者損失を考慮するものとし、迂回, 待ち時間による時間損失を加えて評価した。これらの条件のもとで、点検費用・修繕費用・利用者損失がLCCに与える影響について検討を行う。

修繕各種パラメータは、次のように設定した。

- ・点検に要する費用:0.1億円
- ・修繕費用・・・臨界健全度別に設定
 - 健全度 3→5 :0.7億円
 - 健全度 2→5 :1億円
 - 健全度 1→5 :2億円
- ・利用者損失
 - 片側通行の場合:0.5億円
 - 通行止めの場合:3.7億円

臨界健全度を30, 25, 20 (5段階の3,2,1に相当)と設定し、点検間隔を2年, 5年で計算を行った結果、表1の結果を得た。用いた実データは劣化速度が大きく、またスパン毎の健全度のばらつきが大きいトンネルである。このようなトンネルの場合、現在経験的に行われている維持管理の上では、点検間隔を短くし劣化の進行を抑制するタイミングで修繕を行うことが望ましいとされている。検討結果においても、LCCが最小になったのは、2年間隔・臨界健全度30・LCC=5.6億円であり、経験則を裏付ける結論となった。このケースにおけるLCCの分布および各費用の内訳は、図2のとおりであり、LCCは確率分布を示すことから、それを構成する各費用も同様にそれぞれがばらつきを持つことがわかる。すなわち費用構成の割合と各費用が持つ分散に着目する必要がある。全検討ケースについてLCCを構成する各費用の内訳を示すと、図3のとおりとなる。同図から分かるように、すべてのケースにおいて点検費用・修繕費用は臨界健全度の変化にかかわらずほとんど変化しないが、利用者損失は臨界健全度が小さくなると共に、著しく増加している。この結果から、トンネルの維持管理計画策定において補修をルール化するには、補修費という事業損失費のみに着目するのではなく、利用者損失を足し併せ、社会損失という概念から補修を最適化する必要があることが分かる。

4. まとめ

本検討において結果として得られた費用構成割合は設定パラメータに依存するため、さらに詳細な検証を行う必要がある。しかしながら、この課題は今後のデータの蓄積と研究によって克服できるものであり、基本的な枠組みは変化しない。重要な点は、補修のルール化において利用者損失を含めて意志決定すべきであるという点であり、さらには各費用構成要素が不確実性を内在していることに着目し、期待値に対するはずれ量すなわちリスクの概念を導入して議論する必要がある。

参考文献

1) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.18(1), pp.97-107, 2001

表1 サンプルパスによるLCC (億円)

点検間隔	臨界健全度		
	30	25	20
2年間隔	5.64	7.15	12.40
5年間隔	6.66	8.51	9.73

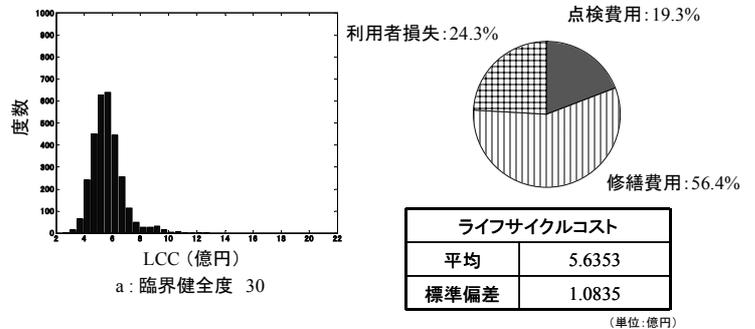


図2 点検間隔2年の場合のLCC分布

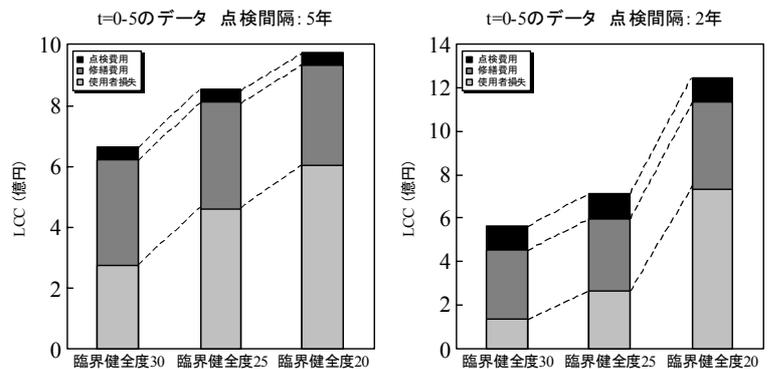


図3 LCCに占める各種費用割合の比較