

山岳トンネルにおける判定区分を用いた 不規則な遷移を考慮した劣化指標

禿 和英¹・須藤 敦史²・兼清 泰明³・佐藤 京⁴・丸山 収⁵・檀 寛成³

¹正会員 ㈱建設技術研究所 東北支社 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)

E-mail: kamuro@ctie.co.jp

²正会員 東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

E-mail: atsu-sutoh@tohtech.ac.jp

³関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-0073 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

E-mail: hiro.t.k@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail: taka4@ceri.go.jp

⁵正会員 東京都市大学 工学部 都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: omaruya@tcu.ac.jp

高度経済成長期に整備されたインフラストラクチャーの老朽化が進行し、山岳トンネルにおいても様々な損傷事例が報告されている。昨今の社会・経済情勢などから、ライフサイクルコストの考え方に基づいた予防保全による長寿命化を早急に図らなければならない。

そこで本研究では、北海道における山岳トンネルの点検データに基づいた劣化評価と将来予測を行う目的で、得られている判定区分を用いた確率過程による連続的な劣化指数を提案するとともに実際の点検データから同定している。さらに、それらの経過年数に対する劣化特性を求め、トンネル覆工における劣化把握や予測精度の検証を行っている。

Key Words : deterioration model, stochastic process, life cycle management, cold region tunnels

1. はじめに

高度経済成長期に整備されてきたインフラストラクチャーの老朽化が進んできており、特に地域・都市間交通の多くを道路に依存している広域分散型の北海道において、山岳トンネルは、厳しい自然環境の中で長い期間の耐用年数を必要とするものである。さらに、昨今の社会情勢などから、予防保全を前提とした長寿命化を早急に図らなければならない。

しかし、インフラストラクチャーの維持管理や更新に関する知識・理論や技術などインフラメンテナンス工学は完全に構築・確立されていないのが現状であり¹⁾、点検やモニタリングに基づく健全度の評価や劣化予測手法など様々な項目の研究・開発が必要となっている²⁾。

このような状況下、平成 25 年度には国土交通省は橋梁や山岳トンネルなどの道路構造物に対して、本格的なメンテナンスサイクルに着手³⁾し、平成 26 年度におい

ては具体的な取組みとして国の定める監視および統一的な健全度判定・診断を実施している⁴⁾。

一般的に山岳トンネルに対する健全度判定は、表-1に示すようにその劣化状況に対して5段階の判定区分で評価されるため、図-1に示すような連続的な劣化評価・予測を前提とした予防保全(ライフサイクルマネジメント: LCM)の概念⁵⁾が適用しにくい。さらに、北海道における山岳トンネルなどの道路構造物では、寒さによる環境劣化が本州より厳しく、加えてその劣化形態が複雑で、かつばらつきが大きいなどの理由により、供用中の劣化状態の把握やそれらの自然災害リスクを考慮した将来予測は非常に難しいのが現状である⁶⁾。

ここで著者らは、北海道のトンネル覆工を対象として、定期点検を CAD 図や連続的な劣化評価値のデータベースを整備し(データ同化)⁷⁾など、同時に、複合 poisson 過程を導入した確率論による連続劣化モデル(Black Scholes Model)の構築⁸⁾とともに実際の点検値により検

表-1 損傷ランク（判定区分）表

区分	定義
I	利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態
II	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態
II b	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から対策を必要とする状態
II a	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から対策を必要とする状態
III	早晩利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に対策を講じる必要がある状態
IV	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態

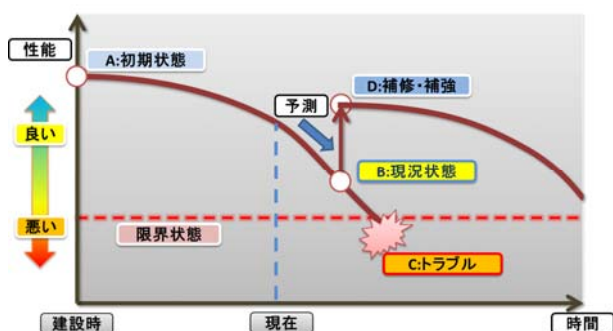


図-1 ライフサイクルマネジメント（概念）

証⁹⁾するとともに確率制御理論による保守方策の最適化などについて理論的な考察を進めている¹⁰⁾。

本研究では、北海道の山岳トンネルを対象として判定区分値から劣化の把握と予測を簡便化を図るため、連続的な確率的劣化モデルの提案とその検証を行っている。

2. 山岳トンネルの劣化過程

(1) 確率論を基礎とした劣化過程

一般的にインフラストラクチャーの劣化過程は、①構造物群の平均的な劣化特性を対象とする確率・統計的手法、②個別の構造物における具体的な損傷や劣化現象を対象とする物理的方法に大別される。

②は物理的な劣化メカニズムを解明してモデル化する確定論的な手法であり、①は膨大な点検・観測値から劣化現象や過程を確率・統計的なモデル化を行う手法である。さらに観測・点検値やモデル化の誤差などの不確定性を考慮するかでさらに詳細に分類されている。

(2) 山岳トンネルの劣化遷移

一般的に確率・統計論を用いた劣化モデルは、1)マルコフ過程（マルコフ連鎖モデル）、2)ポアソン過程、3)幾何学的ブラウン運動モデルが挙げられる。

マルコフ連鎖モデルにおける劣化過程は、観察・点検

表-2 トンネル点検の頻度

区分	国土交通省	NEXCO	鉄道系
日常点検	1回/1日 [原則]	7日/1週～7日/2週	-
定期点検	2年または5年に1回程度	年に1回[原則]	2年を超えない期毎

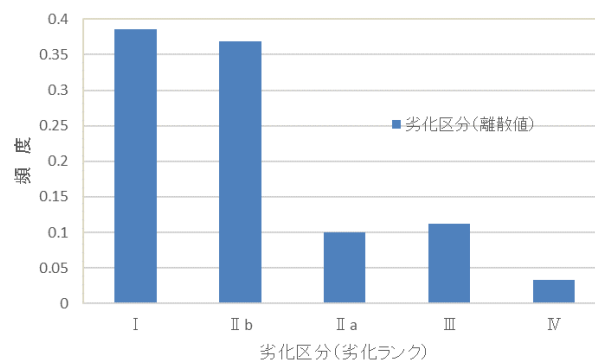


図-2 Sトンネルの定期点検における劣化区分（例）

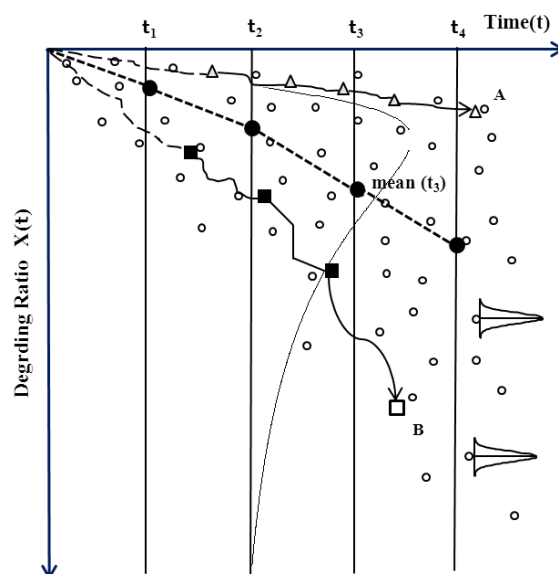


図-3 山岳トンネルの点検値と劣化サンプルパスの概念

により、良好ランク I から破損状態のランク IV までのレーティング（離散値による判定区分）値が、どのように推移してゆくのか（遷移確率）¹¹⁾を予測するもので求めがあるが、一般的に LCM では、構造物の保有性能と補修・補強の関係を、図-1 のように定義するため、本研究では離散的なマルコフ連鎖モデルではなく、連続的な幾何学的ブラウン運動モデルを用いる。

加えて、損傷や経年劣化などで保有性能がある要求性能レベル以下（閾値の通過）となる時期を予測し、それらを補修・補強により回復させて長寿命化を図って行く予防保全¹²⁾などによる維持管理が国土交通省の基本方針であるため、本研究ではレーティング

値で得られる覆工の判定区分より、図-1に示す連続的に遷移する簡易的な劣化指数への変換を試みている。

一般的に山岳トンネルの劣化と点検の概念は、その劣化程度により2～5年間隔で実施され(表-2 参照)¹³⁾など、覆工の劣化状態は図-2に示す劣化区分の集計となる。一方、インフラストラクチャーの不規則で連続的な劣化は図-3に示すように、その様々な環境や要因により確率的な過程：サンプルパス(例えば△:トンネルA, ■:トンネルB)を示すと考える。本研究では、北海道の国道トンネルにおける約16年間にわたる定期点検値(矢板工法：167か所、NATM：101か所)を用いて実施している。

3. 山岳トンネルの確率論に基づいた劣化モデル

(1) Kachanov劣化モデル

$X(t)$ を時刻 t における山岳トンネルの健全度指数(簡易THI)とし、その不規則な時間変動を確率過程でモデル化する。簡易THIは厳密な物理量ではないが、ここでは式(1)に示す材料力学の分野において経験論的な劣化モデルであるKachanovモデルを用いて劣化現象における平均的な時間推移(変動)を記述する¹⁴⁾。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (1)$$

β_0 ：劣化に関する平均進展抵抗値、 γ ：劣化に関する形状パラメータである。

また、式(1)が簡易THIの区間0.0～1.0に理論上厳密におさまるように次式の補正関数 $g(x)$ を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)) \quad , \quad g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (2)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

ε は任意に小さくできる正の定数

これにより、構造物の破壊に至るまでの時間変化は式(1)と同じになる。また、時間的に不規則な劣化推移として複合Poisson過程を駆動雑音に導入すると地震などの突発的な自然災害による大きな損傷を考慮した確率微分方程式として次式のようになる¹⁵⁾。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (4)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (5)$$

$N(t)$ ：Poisson過程(強度パラメータ λ)、 $\{Y_k\}$ ：同

一の分布に従う独立な確率変数の集まりである。

複合Poisson過程 $C(t)$ を不規則な劣化度成長の駆動雑音として用いるモデル式(4)は、サンプルパスが増減を繰り返して成長することはないため、劣化過程(挙動)モデルに適している。

4. 山岳トンネルの点検値の指数化(同化)

(1) 山岳トンネルにおける点検値

日常点検は、通常の巡回点検の時に車上からの目視が一般的であり、定期点検は近視(目視)点検で、①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰などの有無や打音点検が実施され、各覆ごとに表-1に示すようなI、IIb、IIa、III、IVの5段階の損傷ランク(判定区分)の判断がなされる。

(2) 山岳トンネルにおける点検値の指数化(簡易THI)

得られた判定区分による簡易のトンネル劣化指数は、Caltrans¹⁶⁾などやAASHTOの「PONTIS」¹⁷⁾などで採用されている健全度指数(Bridge Health Index：BHI)の基本式(6)¹⁸⁾を用いて以下のように定義する。

$$BHI = \frac{\text{現在資産価値}}{\text{初期資産価値}} \quad (6)$$

初期資産価値：当初の構造物の価格(一般的に当初建設費)であり、現在資産価値：現在の構造物の価格である。

BHIでは資産価値が導入されているが、本研究ではトンネル覆工の劣化に着目した平均的な値を目的としているため、覆工総数で割った簡易THI(Tunnel Health Index)を指数として定義する。具体的には、定期点検において各覆工の損傷ランク(5段階の劣化区分)を求め、次にそれぞれのランクに応じた影響度(W_{fi})を乗じて式(2)より簡易THIを求めている²⁰⁾。

$$\text{簡易THI} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (\text{覆工損傷ランク} \times W_{fi}) \quad (7)$$

V ：一つのトンネルにおける覆工総数、影響度(W_{fi})：各覆工の判定区分よりI=1.0、IIb=0.75、IIa=0.50、III=0.75、IV=0.01としている。また簡易THIは0.0～1.0の連続値を取り、健全状態1.0から劣化の進行に従って0.0に向かっていく値となる。ここで図-4に、2015年と2016年に実施したトンネルの定期点検より求めたトンネル覆工(矢板工法・NATM)における簡易THIの経時変化と式(4)におけるトレンド値を示す。図-4より、提案した簡易THIはトンネルにおける劣化の経時変化(遷移)を良く表している。

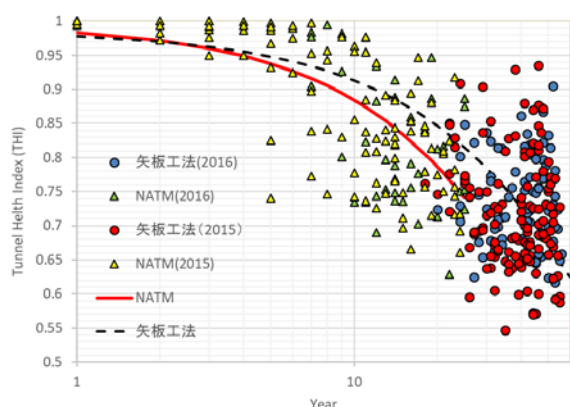


図-4 簡易 THI を用いた Kachanov モデルの同定

7. 結 論

本研究は、確率・統計的な簡易THIモデルを提案し、実際の観測データよりその有用性を検証した。今後はさらなる点検データの蓄積と確率・統計分析が必要である。

参考文献

- 社会インフラ維持管理・更新の課題についての対処戦略(案), (公社)土木学会, 社会インフラ維持管理・更新検討タスクフォース, 平成 25 年, 3 月.
- 特集, インフラの状態評価と将来予測の最前線, 土木学会誌, Vol.98, No.11, 2013.
- 国土交通省(社会資本整備審議会道路分科会): 道路の老朽化対策の本格的実施に関する提言, 平成 26 年 4 月 14 日.
- 建設省土木研究所: 橋梁点検要領(案), 土木研究所資料, 第 2651 号, 1988.
- 岡田正之, 三上隆, 川村浩, 須藤敦史, 角谷俊次: 寒冷地トンネルにおけるライフサイクルマネジメントの基礎考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会 IV-397, pp.791-792, 2004.
- 須藤敦史, 三上隆, 岡田正之, 河村巧, 角谷俊次: 寒冷地トンネルにおける二次覆工コンクリートの長寿命化に関する一考察, 土木学会第 21 回建設マネジメント問題に関する研究発表会, pp.191-194, 2003.
- 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明: 積雪寒冷地トンネルにおける TMS 構築に関する研究, 土木学会 第 21 回トンネル工学研究発表会論文集, pp.203-208, 2011.
- Hiroaki Kanekiyo, Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh, Takashi Sato: A mixed Poisson model for random damage growth of tunnel concrete linings, 62nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.149-157, 2013.
- 須藤敦史, 佐藤京, 西弘明: 性能規定に基づく寒冷地トンネル覆工の劣化予測のためのマルコフ遷移確率行列の同定, 土木学会 論文集 F1 (トンネル工学), Vol.22, pp.61-68, 2012.
- 斎藤慎一, 兼清泰明, 丸山収, 須藤敦史, 佐藤京: 寒冷地トンネル覆工コンクリートの劣化進行に対する保守方策-点検スケジュールの最適化に関する理論的考察-, 第 29 回信頼性シンポジウム講演論文集, pp.26-31, 2016.
- 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/ I -73, pp.69-82, 2005.10.
- 日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, 1993.11.
- 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検要領(案), 国土交通省道路局国道課, 平成 14 年 4 月.
- Kachanov, R.: Rupture time under creep conditions, Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii.
- Hiroaki Kanekiyo, Osamu Maruyama, Atsushi Sutoh, Takashi Sato: A mixed Poisson model for random damage growth of tunnel concrete linings, 62nd Japan National Congress for Theoretical and Applied Mechanics, pp.149-157, 2013.
- Shepard, R. W. and Johnson, M. B.: California Bridge Health Index -IBMC-005, Technical Report, Caltrans, 1999.
- AASHTO: PONTIS User's Manual, Release 3.2, 1997.
- 渡邊一悟, 石川博之, 佐藤京, 加藤静雄, 佐藤誠, 大島俊之: 北海道 BMS の開発と本格運用に向けた課題, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 61 号, 2005.

(2018. 10. 26 受付)

The Proposal of the degradation transfer index for Tunnel Linings in Cold Region

Hidekazu KAMURO, Atsushi SUTOH, Hiroaki KANEKIYO, Taksshi SATO,
Osamu MARUYAMA and Hiroshige DAN

In this paper consist is proposed the degradation transfer index based upon actual inspection data in order to carry out strategic maintenance for tunnel linings structures in cold region. The transfer index of deteriorating tunnel linings is non-stationary stochastic processes, and reliability problems of such structures are essentially different of time-independent reliability problems.

Finally, numerical examples are worked out to demonstrate the usefulness of this estimation method for Tunnel Management. And long tails of the duration distributions for the tunnel linings in cold region are analyzed.