

# 寒冷地の道路構造物（橋梁・トンネル）における劣化状況

Deterioration for Cold Region Bridge and Tunnel Lining

東京都市大学工学部都市工学科 ○正会員 須藤敦史(Atsushi Sutoh)  
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Sato)

## 1. はじめに

橋梁や山岳トンネルなどの道路構造物は、長い耐用年数を必要とするインフラストラクチャーであり、昨今の社会情勢などから北海道では、これらの長寿命化を早急に図らなければならない。

しかし、北海道では道路構造物などへの劣化環境は厳しく、かつその特性はそれぞれ異なるため、劣化の状態に大きなばらつきが生じている。

このような状況の下、平成25年度に国土交通省は道路構造物（橋梁・トンネル・舗装など）に対して、本格的なメンテナンスサイクルを回すための取組みに着手し、平成26年度にはこれらの具体的な取組みとして道路構造物を国の定める監視および統一的な尺度で健全度の判定区分による診断を実施<sup>1)</sup>している。

そこで本研究では、北海道の道路構造物（橋梁・トンネル）においてそれぞれの劣化特性を実際の点検データから把握・評価する目的で、経過年数に対する劣化特性の動向、および分布のばらつきなどを検証している。

## 2. 構造物における劣化過程<sup>2)</sup>など

橋梁・トンネルにおける劣化推移（予測）は、1)構造

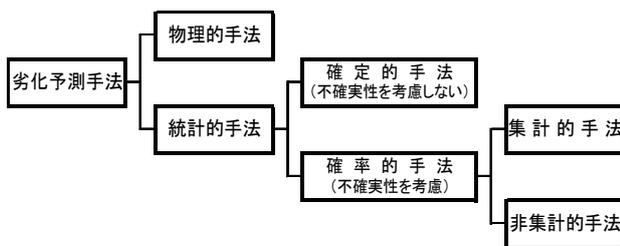


図.1 構造物の劣化予測手法

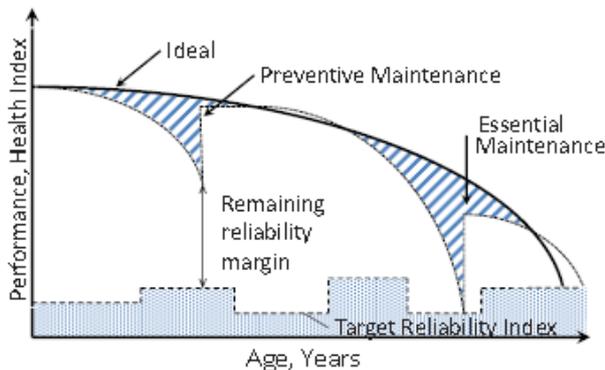


図.2 構造物の劣化（概念）

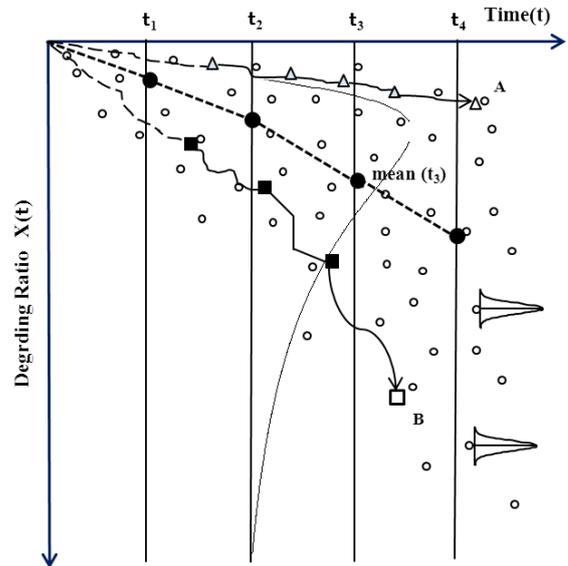


図.3 点検データと劣化サンプルパスの概念

物群の平均的な劣化を対象とする確率・統計的手法、2) 個別の構造物における具体的な損傷劣化を対象とする物理的方法に大別される。

1)では、膨大な点検・観測データから劣化過程を確率・統計的にモデル化する手法であり、2)では劣化メカニズムを解明してモデル化する手法である。さらに観測や点検データや劣化モデルにおける誤差などの不確実性を考慮するか否かで分類される（図.1参照）。

また、確率・統計的手法において、集計的手法では観測や点検データを集計するマクロ的な劣化予測であるのに対して、非集計的手法ではミクロ的な劣化予測である。

本研究では確率・統計的手法の集計的方法を採用し、点検・観測値データに対してはマクロ（集合）的な検討を行い、劣化過程のモデル化を実施している。

## 3. 橋梁・トンネルにおける劣化過程<sup>3)</sup>など

構造物における劣化度の確率・統計モデルは、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いて劣化過程は、良好な状態ランク 1 から破損状態ランク n までレーティング評価されるが、本来、構造物などの劣化過程は図.2 に示すように連続的に推移するため、本研究では橋梁・トンネルともに劣化過程を連続的に推移する値として取り扱う。

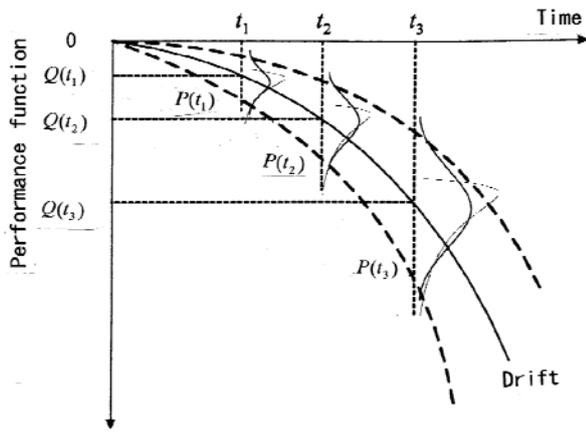


図. 4 トンネル覆工の劣化過程 (概念)

道路構造物において観察や点検は、一般的にその劣化の程度により 2~5 年間隔で実施され、図. 3 に示すように点検値 (o) は点検間隔に応じた離散値の形で得られる。

橋梁やトンネルなど個々の構造物における劣化過程は、その環境などにより異なる劣化過程 (サンプルパス△: 構造物 A, ■: 構造物 B) を示し、加えてそれぞれの観察や点検値において観測・点検誤差 (一般的には正規分布) は有しているもの、観測値若しくは点検データの広がり誤差を有する値とは考えず、何等かの状況により拡がって分布する実現値として扱うのが現在のところ現実的である。

なお本研究では、劣化モデル導入の初期検討であるため、構造形式などで分割せず、橋梁・トンネル覆工それぞれの劣化評価値の平均に対してパラメータ同定やその予測を行っている。

#### 4. 橋梁・トンネル覆工の劣化モデル

##### (1)Kachanov (橋梁) モデル<sup>4)</sup>

点検時刻における橋梁の健全度指数 (BHI)<sup>5)</sup> が取り得る連続値は区間 [0,1] であるため、式(1)に示す経験論的なKachanovモデルを用いて劣化評価値の平均的時間変動を記述する。

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

$\beta_0$  は劣化に関する平均進展抵抗値、

$\gamma$  は劣化に関する形状パラメータ

また、不規則な時間劣化として複合 Poisson 過程を駆動雑音とすると以下の確率微分方程式は以下となる。

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (2)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (3)$$

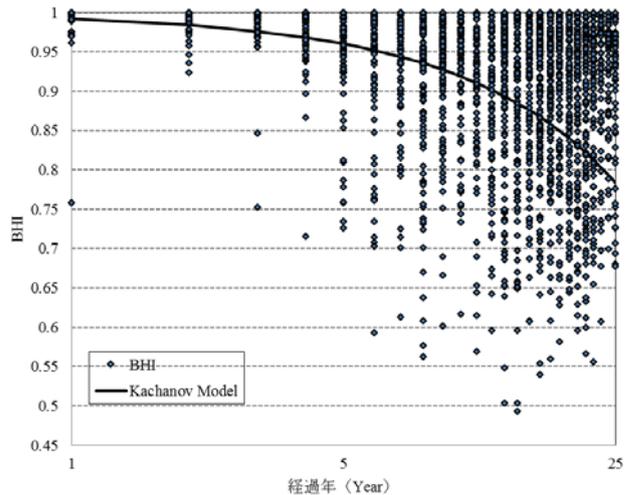


図. 5 Kachanov モデルによる橋梁の BHI (同定)

ここでパラメータを  $\beta = \beta_0 - \lambda_{q1} \lambda q_1$  として点検データより最尤法で同定し、同定したパラメータより健全度指数(BHI)の推移を推定する。

##### (2)幾何ブラウン運動 (トンネル覆工) モデル<sup>6)</sup>

同様に点検時刻におけるトンネル覆工の劣化度のモデル式(4)は、駆動雑音に独立増分な Winner 過程で表される。

$$dX(t) = \mu_0(t)X(t)dt + \sigma_0 X(t)dB(t) \quad (4)$$

$$X(t) = X(0) \exp\{(\mu_0 - 0.5\sigma_0^2)t + \sigma_0 B(t)\} \quad (5)$$

ここで式(4)は幾何ブラウン運動(Black-Scholes)モデルとなり、ここで  $\mu_0$  とすると一般解は式(5)となる。

この幾何ブラウン運動モデルにおける劣化過程は対数正規分布  $P(t)$  に従い、その平均と分散値は式(6), (7)となる (図. 4 参照)。

$$E[X(t)] = X(0) \exp\{\mu_0 t\} \quad (6)$$

$$\text{Var}[X(t)] = X(0)^2 \exp\{2\mu_0 t\}(\exp\{\sigma_0^2 t\} - 1) \quad (7)$$

この幾何ブラウン運動における平均・分散の式(6),(7)を同様にトンネル覆工の点検データ (劣化評価値) より最尤法で同定する。

#### 5. 劣化過程の同定

##### (1) 点検データから同定された橋梁劣化

北海道開発局が保有する橋梁の点検データ (3945橋)<sup>7)</sup> から求めた橋梁の健全度指数 (BHI) と同定された Kachanov モデルによる平均値 (実線) を図. 5 に示す。

##### (2) 点検データから同定されたトンネル覆工劣化

トンネル覆工の点検は、①ひび割れ、②浮き・はく離、③漏水、④目地ずれ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰の6項目を実施しており、得られた6項目の点検データを

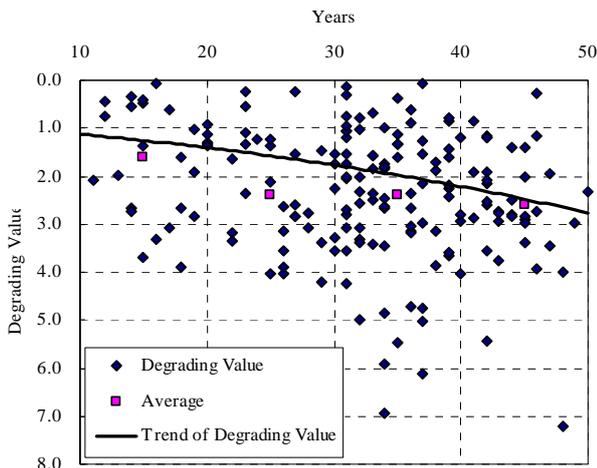


図.6 トンネル覆工の平均劣化評価値 (同定)

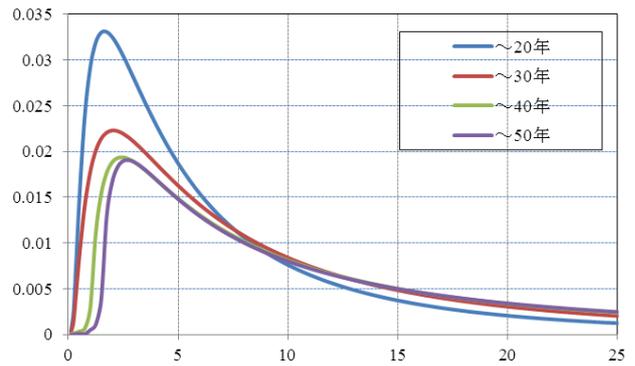


図.9 正規化したトンネル覆工の劣化分布 (経過年数31~50年)

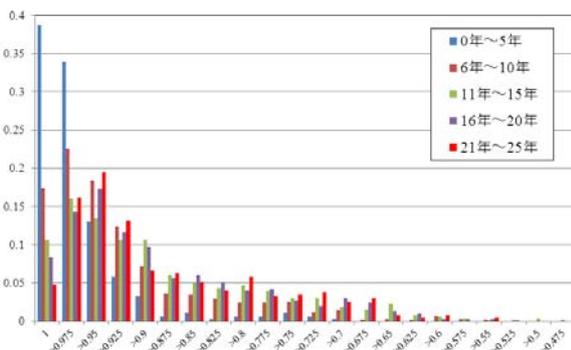


図.7 経年ごとの橋梁における劣化 (BHI) 分布

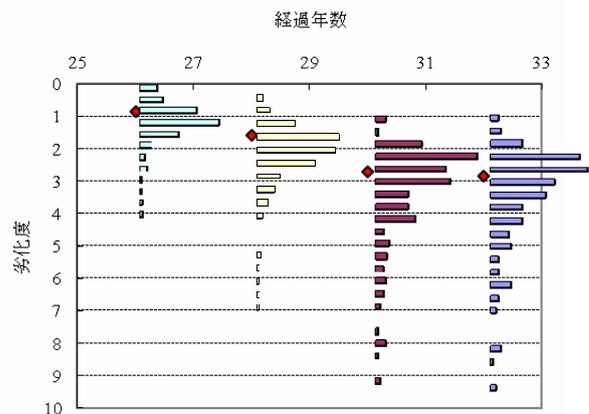


図.10 Gトンネルにおける経年の平均劣化と分布

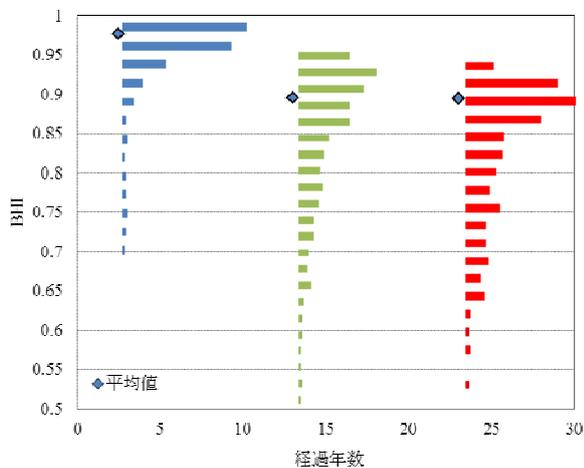


図.8 橋梁の経過年数における平均BHIと分布

トンネルの不具合に対する関連性を考慮して劣化評価として点数化(連続値)<sup>7)</sup>、これより北海道におけるトンネル覆工の平均劣化(過程)を同定している。

北海道開発局が保有する255箇所トンネル覆工の点検データから各経過年数における平均劣化値および劣化曲線を示したものを図.6に示す。

## 6. 劣化分布のロングテール

### (1) 橋梁における劣化(ロングテール)分布

北海道内における3945橋(鋼橋・コンクリート橋)の点検データから、橋梁の供用期間ごとの健全度指数(BHI)の分布推移(①0~5年, ②6~10年, ③11~15年, ④16~20年, ⑤21~25年)を図.7に示す。

図.7より、北海道内の橋梁における健全度指数(BHI)は対数正規分布を示しており、BHIの対数正規分布における平均値は供用期間に応じて劣化進行を示し、分散値は広がる傾向を示している。

次に、供用時間ごとの健全度指数の平均値とその期間の分布を図.8に示す。

図.8より、北海道内の橋梁における健全度指数(BHI)の分布は供用期間にともない裾野は健全度の大きい方向に広がり、かつ度数も増加するロングテールもしくはヘビータールも見られる。

### (2) トンネル覆工における劣化(ロングテール)分布

北海道内において矢板工法で施工されたトンネル(162箇所)で得られた覆工の点検データから得られた、劣化過程(経年劣化)の分布(ポラリティ)の期間ごとの推移を図.9に示す。

経過年別の劣化分布状態は図.9に示すように幾何ブラウン運動の理論どおりに経過年数とともに広がる対数正規分布を示し、裾野部分は橋梁BHIと同様に経過年数に伴ってロングテールもし

くはヘビィテール化<sup>8)</sup>も見られる。

### (3)各トンネル覆工における劣化分布

トンネル覆工における点検データより得られたGトンネルにおける個々の覆工劣化の経年平均とその分布状を図.10に示す。

図.10より、Gトンネルのトンネル覆工個々においても、同様に経過年数とともに平均劣化評価値は進行し、その分布も橋梁やトンネル(矢板工法)全体の分布傾向と同様に対数正規分布を示し、経過時間に伴いロング・ファットテール化の傾向も示している。

## 5. おわりに

本研究は、北海道の道路構造物(橋梁・山岳トンネル)において劣化の特性を点検データから把握・評価する目的で、橋梁・トンネル覆工(矢板工法)それぞれの経過年数に対する確率・統計を基本とした劣化推移モデルを提案し、同時に橋梁では健全度指数:BHI, 山岳トンネルでは覆工コンクリートにおける点検評価値から劣化推移モデルのパラメータ同定を実施して、その傾向の把握を試みた。

また、それぞれの劣化におけるばらつき状態の傾向・変化も点検データより確認した結果、提案モデルは橋梁・山岳トンネル(矢板工法)の劣化過程(推移)を表すことが可能であり、その分布も橋梁やトンネル覆工いずれも経過時間とともにロングテールもしくはファットテール化傾向を示しているがその解明は維持管理を行う上で非常に重要であるが、今後の課題と考える。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 須藤敦史,近野正彦,丸山収,佐藤京,西弘明:寒冷地トンネルの覆工における劣化過程の同定と長期予測,土木学会論文集 F1(トンネル工学),Vol.20,pp.61-68,2010.
- 3) 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.
- 4) Kachanov, R. Rupture time under creep conditions,Int. J. of Fracture, 97, xi-xviii.
- 5) 大島俊之,三上修一,丹波郁恵,佐々木聡,池田憲二:橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解析,土木学会論文集 No.703/I-59,pp.53-65,2002.4.
- 6) 須藤敦史,丸山収,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.
- 7) CERI (2009). "BHI data in Hokkaido area." Database in Civil Engineering Research Institute for Cold Region Japan.
- 8) Anderson, C. (2006), The Long Tail: Why the Future of Business Is Selling Less of More, Hyperion, 2006. (篠森ゆりこ訳『ロングテール—売れない商品』を宝の山に変える新戦略) 早川書房,2006.