

# 寒冷地の山岳トンネルにおける 覆工コンクリートの劣化評価に関する研究

(Study on deterioration evaluation of lining concrete in mountain tunnel in cold region)

禿 和英 (Kazuhide Kamuro)

In Japan, the infrastructure constructed during the high economic growth period proceed aging and various cases of damage have been reported in mountain tunnels. Nowadays, social and economic situations have demanded a shift to preventive maintenance based on the concept of life cycle cost. However, at present, knowledge, theory and technology related to maintenance and management have not been completely established.

In this study, the observation and measurement data on the basic properties of the lining concrete of the tunnel in a cold region and the characteristics peculiar to the cold region were studied for the mountain tunnel. In addition, an index (simplified THI) indicating the state of continuous deterioration was proposed and verified for mountain tunnels in cold regions. As a result, the effectiveness of the proposed model was confirmed. Proposal and method of deterioration prediction method for efficient maintenance and management (preventive maintenance) of mountain tunnels in cold regions (Hokkaido) using survival time analysis based on periodic inspection data and maintenance history information The effectiveness of was confirmed. Finally, it was shown that the results of this research contributed to the improvement of accuracy in formulating a maintenance strategy.

## 1. はじめに

高度成長期に整備された社会基盤施設は、今後急速に老朽化し、維持管理費の増大が見込まれる。このような状況の中、山岳トンネルの維持管理においては、予防保全への転換を求められているが、維持管理に関する知識・理論や技術は完全に構築・確立されていないのが現状である。

山岳トンネルの維持管理は、日常・定期点検結果をもとに異常が見つければ、その時点で補修・補強を行うなどの事後保全が一般的である。これは、山岳トンネルの健全度が劣化状況に応じて5段階の判定区分で評価されており、図-1 に示すような連続的な劣化評価・予測を前提とする予防保全の適用がしにくいためである。

本研究は、山岳トンネルの維持管理の現状を踏まえ、寒冷地の山岳トンネルを対象として、定期点検から得られた結果や観測・計測された寒冷地における山岳トンネル覆工コンクリートの基本性状について観測・計測データの整理を行うとともに寒冷地特有の特性について考察した。

また、寒冷地（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の簡便化を図るため、連続的な劣化状態を表す指標（簡易 THI）の提案とその検証を行った。さらに、定期点検データと保守履歴の情報をもとに、生存時間解析を用いて、寒冷地における山岳トンネルの効率的な維持管理（予防保全）のための劣化予測手法の提案とその手法の有効性を検証した。

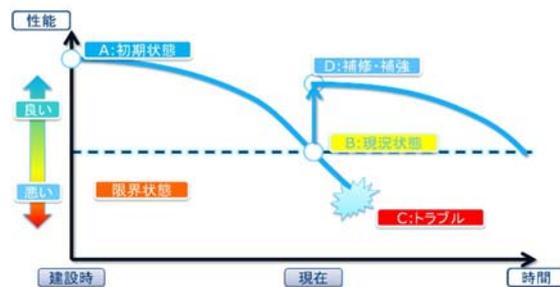


図-1 構造物における劣化進行の概念図<sup>1)</sup>

## 2. 山岳トンネルの維持管理における現状と課題

本研究では、道路トンネルを対象としていることから、道路トンネル（国土交通省）の維持管理方法について整理を行った。トンネル定期点検は、2～5年間隔で実施され、近接目視、打音検査が実施される。点検結果に基づき、表-1を用いて劣化状態に応じた5段階の判定区分<sup>2)</sup>で評価される。

表-1 トンネル覆工の健全度判定区分

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	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、監視を必要とする状態
	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計画的に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、緊急的に対策を講じる必要がある状態

本研究では寒冷地（北海道）のトンネルを対象にしており、寒冷地における山岳トンネルの環境劣化は、本州の他地域より厳しく、加えてその劣化形態が複雑（周辺地山の凍害等の影響）でかつばらつきが大きいなどの理由により、山岳トンネルに対する劣化状態の把握やそれらの予測には、多様な点検・管理・保守データの情報による検討が重要であるにもかかわらず有効に活用されていない状況である。

### 3. 寒冷地における山岳トンネルの劣化過程

#### 3.1 寒冷地における覆工コンクリート性状の劣化<sup>4)</sup>

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの圧縮強度・中性化深度・塩分濃度などの基本性状は、経過（供用）年数にともなって減少もしくは増加すると考えられる。しかし、これらの基本性状を調査・観測値に基づいて定量的に評価した事例は少ない。そこで本研究では、図-2 に示す北海道の気候区及び既往の研究<sup>3)</sup>における凍害危険度の分布図などを参考にして北海道を5つの地域（①日本海北側、②日本海南側、③太平洋西側、④太平洋東側、⑤オホーツク海側、⑥内陸）に分割して、主に矢板（在来）工法で建設された山岳トンネルにおける覆工コンクリートを対象として各種の調査・試験から得られた値を整理し、そのデータの分析・考察を行った。なお、太平洋西側（③）、太平洋東側（④）においては、太平洋西側、太平洋東側と区分するとデータ数が少ないため、③、④をまとめて太平洋側とした。

##### (1) 覆工コンクリートにおける圧縮強度の経年変化

図-3 は、太平洋側における覆工コンクリートの圧縮強度と坑口からの距離の関係を示したものである。同図より、坑口からの距離にともない圧縮強度は増加する傾向を示している。覆工コンクリートの標準的な圧縮強度は $18\text{N/mm}^2$ であるが、標準的な圧縮強度より小さい試験結果が得られている。これは、コンクリートが流水に接している場合に、コンクリート中のセメント水和物が周囲の水に溶解して組織が疎となり、強度が低下する現象が生じていると考えられる。そこで、調査した全トンネルにおいて、式(1)に示した坑口部と坑内（調査最深部）における覆工コンクリート強度の強度比率と経過（トンネル供用）年数との関係を整理したものを図-4に示す。

$$\text{強度比} = \frac{\text{坑内(調査最深部)の覆工コンクリート強度}}{\text{坑口部の覆工コンクリート強度}} \quad (1)$$

同図より、経過（供用）年数に伴い坑口部と坑内調査最深部における覆工コンクリート強度比が小さくなる傾向が見られる。この要因はデータ数が少なく明確なことは言えないが、低下した位置



図-2 北海道の気候区

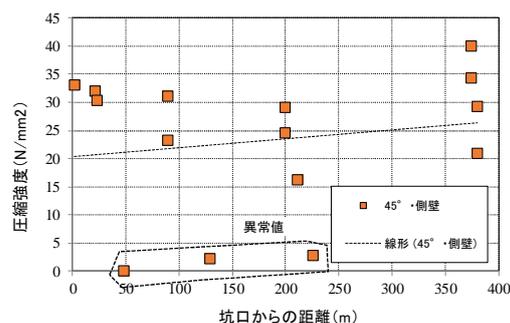


図-3 圧縮強度と坑口からの距離（太平洋側）

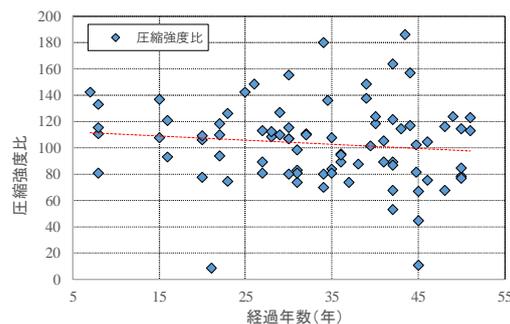


図-4 覆工コンクリートの経過年数による強度比

付近には漏水が確認されていることを踏まえると、変状が生じやすい坑口部において雨水の引き込みや漏水の影響によりコンクリート水和物が溶解し、坑口部の覆工コンクリートの強度低下が生じた可能性がある。

##### (2) 覆工コンクリートにおける中性化深さの経年変化

覆工コンクリートの中性化は、鉄筋等の鋼材の腐食だけではなくコンクリートの強度変化を引き起こす可能性があることが知られている。図-5 は、太平洋側における中性化深さと坑口距離の関係を示したものであり、中性化深さは坑口からの距離に伴いセンター部は浅くなり、側壁 $45^\circ$ 方向および側壁部は深くなる傾向がみられる。

##### (3) 覆工コンクリートにおける塩分濃度の経年変化

覆工コンクリートに含まれる塩分濃度は、前述した中性化深さの現象と同様な影響を及ぼすため、覆工コンクリートの塩分濃度の調査を実施した。覆工コンクリート表面部（ $0\sim 20\text{mm}$ ）における塩分濃度とトンネルの経過（供用）年数の関係

を図-6 に示す。経過年数にともない覆工コンクリート表面部（0～20mm）における塩分濃度は増加する傾向を示している。これは長期間凍結防止剤の浸食に晒されていた結果と考えられる。

### 3.2 寒冷地における山岳トンネル覆工コンクリートの挙動

寒冷地（北海道）の山岳トンネルでは、冬期の坑内の気温低下に伴い凍害の影響を受ける危険性が高い。そこで、1999年9月23日～2002年3月31日で観測した坑内気温とひび割れや覆工継目幅の変化を整理した。図-7 に坑内気温とひび割れ幅の関係、図-8 に坑内気温と覆工スパンの継目幅の関係を示す。図-8 には、コンクリート線

（熱）膨張係数：7～13 $\mu$ / $^{\circ}$ C、覆工スパン長：10.5m とした理論値を示している。図-7、8 より、ひび割れ幅、継目幅の変動は坑内気温変動に伴い収縮（冬期）・膨張（夏期）を繰り返していることが分かる。これより、北海道のような寒冷地では、ひび割れを定量的かつ正確に把握するために、点検季節の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション（例えば坑内気温 15 $^{\circ}$ C に統一したひび割れ幅を記録）が必要である。

### 3.3 統計データを用いた山岳トンネルの劣化度

平成 26 年～平成 29 年の点検結果が整理された道路メンテナンス年報を元に全国のトンネルにおける劣化状況について整理・分析した。

トンネルの基本諸元である、延長、経過年数等で整理・分析したが、延長、経年年数が長くなれば健全度は悪くなる傾向を示しているものの、ばらつきが大きく劣化度を適切に予測することは困難であることが確認された。そこで、トンネル安定に直接影響を及ぼす地質的要因を新たな指標として、北海道のトンネルを例にトンネル覆工コンクリートの劣化状況を分析した。

図-9 は、II 判定におけるトンネルの経過年数とトンネルが位置する地質を整理したものである。堆積岩では経過年数 10 年までに全トンネルの 40%程度が II 判定となり、堆積岩中に構築されたトンネルは、他の岩石に比べて劣化の進行が早いことが考えられ、維持管理計画を立案する上で地質情報は重要な指標であることが分かった。

## 4. 山岳トンネルにおける確率論に基づいた劣化モデルの提案

### 4.1 点検データのデータベース化と数量化

劣化予測モデルを構築するためには、覆工コンクリートの劣化評価値を連続量として取り扱う必要がある。そこで、点検データを数量化し劣化進行を連続的に評価することを試みた。点検データには種々のものがあるが、本研究では、劣化評価の代表的な指標である「ひび割れ」とした。ひ

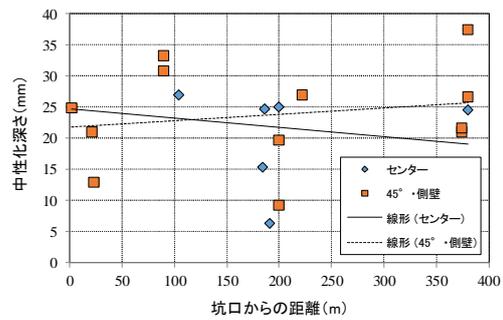


図-5 中性化深度と坑口からの距離（太平洋側）

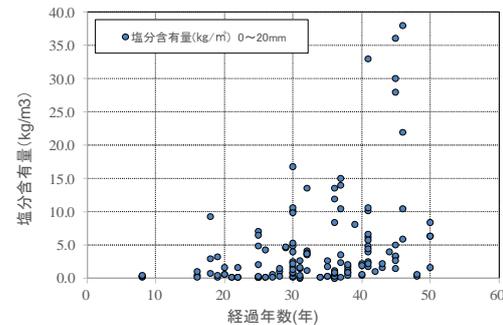


図-6 表面部（0～20mm）の塩分濃度と経過年数

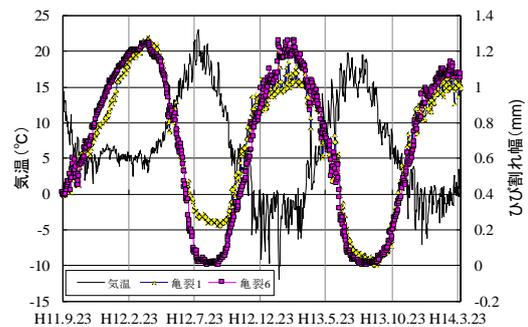


図-7 覆工コンクリート表面のひび割れ幅と気温変動

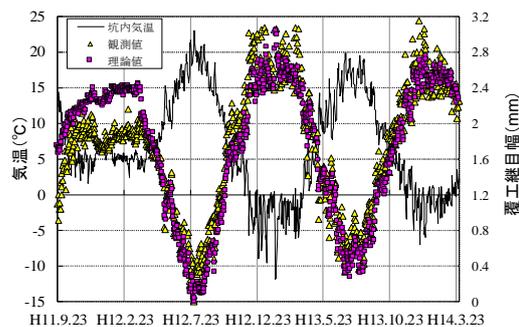


図-8 覆工スパンの継ぎ目幅と気温変動

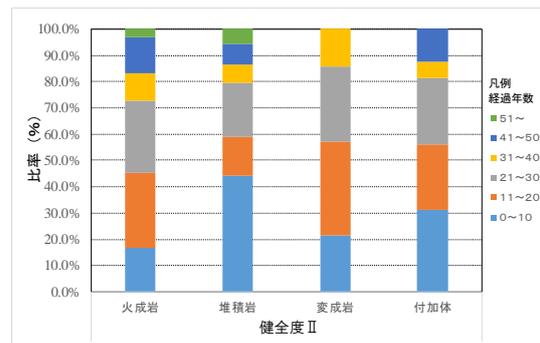


図-9 健全度 II と地質との関係

び割れの数量化は、ひび割れ幅 0.3mm 以上と 0.3mm 未満、それぞれのひび割れの延長等に対して、それぞれに重み付けを行い定量化した。

#### 4.2 確率論を基礎とした覆工コンクリートの劣化遷移<sup>5)</sup>

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幾何ブラウン運動モデルが挙げられる。本研究では、劣化過程を連続的に表現でき、損傷や経年劣化などで保有性能がある要求性能レベル(閾値の通過)となる時期を予測することが可能な幾何ブラウン運動モデルを用いた。

ここで、インフラストラクチャーにおける不規則で連続的な劣化は、図-10 に示すように、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))を示し、複数のトンネルにおいて時刻:  $t_2$  における分布状態は対数正規分布を示す。

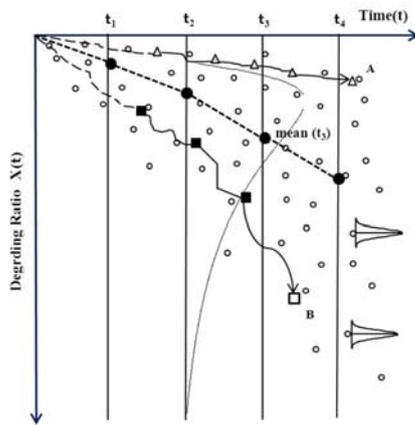


図-10 山岳トンネルの点検値と劣化サンプルパスの概念

#### 4.3 点検値の指数化(同化)

##### (1) Kachanov 劣化モデル

山岳トンネル覆工コンクリートの点検値(判定区分)は、 $X(t)$  を時刻  $t$  における山岳トンネルの劣化度とし、その不規則な時間変動を確率過程でモデル化する。劣化度は、厳密な物理量ではないが、ここでは式(2)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

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 X(t)^{-\gamma} \quad (2)$$

$\beta_0$ : 劣化に関する平均進展抵抗値

$\gamma$ : 劣化に関する形状パラメータ

ここで土木構造物は橋梁・トンネルなど種々の構造物があり、それらの劣化度の遷移を表すには指数化した値(0.0~1.0)が都合がよい。そこで式(2)が構造物の劣化度が 0.0~1.0 に理論上厳密に収まるようにゼロ近傍が安定するための係

数  $\varepsilon$  を用いた式(3)、(4)の補正関数  $g(x)$  を導入する。

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\beta_0 g(X(t)), \quad g(x) \equiv x^{-\gamma} F_c(x) \quad (3)$$

$$F_c(x) = \begin{cases} 1 & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ (x/\varepsilon)^{\gamma+1} & (0 < x < \varepsilon) \end{cases} \quad (4)$$

$\varepsilon$ : 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(2)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なになる

$$dX(t) = -\beta g(X(t))dt - g(X(t-))dC(t) \quad (5)$$

$$C(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} Y_k \quad (6)$$

$N(t)$ : Poisson 過程(強度パラメーター)

$Y_k$ : 同一の分布に従う独立な確率変数の集まり

式(5)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。

##### (2) 山岳トンネルにおける点検値の指数化(簡易 THI)

トンネル劣化指数は、Caltrans や AASHTO で採用されている健全度指数(Bridge Health Index: BHI)の基本式(7)を用いて以下のように定義される。

$$BHI = \frac{\text{現在の資産価値}}{\text{初期資産価値}} \quad (7)$$

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

式(7)に示す 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求めることを目的としている。このため、トンネルの健全性は、覆工スパン毎の健全性の影響係数の総和を覆工総数で除した式(8)と定義して簡易 THI (Tunnel Health Index) を指数として求めている。

$$\text{簡易 THI} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^V (\text{覆工}_i \text{健全性の } wf_i^j) \quad (8)$$

$V$ : 一つのトンネルにおける覆工総数

$wf_i^j$ : 影響係数

ここで、損傷評価値に対する影響係数( $wf_i^j$ )は、専門技術者へのアンケート調査結果をもとに AHP (階層分析法) 解析により、

$$I: wf_i^I = 0.00, \quad II: wf_i^{II} = 0.25, \quad III: wf_i^{III} = 0.50,$$

IV:  $wf_i^{IV} = 0.75$ , OK(V):  $wf_i^V = 1.0$   
と定めた。

簡易 THI は、0.0~1.0 の連続値をとり、健全状態 1.0 から劣化の進行に従って 0.0 に向かっていく連続値となる。

図-11 は、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における簡易 THI の経時変化と式(8)におけるトレンド値を示したものである。矢板工法、NATM 工法のトレンド値は、点検データの指数関数での図中に示す回帰式で表現される。ここで、指数関数の定数が劣化に関する平均的な進展(トレンド)を示す値となっており、式(2)の Kachanov 劣化モデルにおける  $\beta_0$  に相当するものである。

次にトンネル覆工における従来の評価基準値を変換したものを図-12 に示す。従来のトンネル覆工の判定区分(評価点)が簡易 THI に変換され、簡易 THI を用いて判定区分を連続的に評価できることが検証された。健全度指数の考え方をを用いることにより、橋梁やトンネルなど異なる構造物の劣化評価が可能になることが分かる。

### 4.3 生存時間解析を用いた劣化モデルの提案<sup>6)</sup>

#### (1) 生存率(解析)の定義

予防保全の考え方を導入した維持管理計画を立案するためには、補修・補強を考慮して劣化予測を行う必要がある。このためには、トンネルの寿命を定義しておく必要がある。トンネル寿命は、維持管理者およびトンネル点検技術者などにおけるヒアリングより、以下のように定義する。  
定義 1: 更新(寿命)とは山岳トンネルの再建設もしくはごく近くに新設することであり、山岳トンネルの構造部材や車両の通行量が要求性能を満足しなくなったときと考える。

定義 2: 山岳トンネルでは周辺地山・坑口斜面崩壊等もしくは経年劣化等によって覆工に物理的な損傷が生じた場合には疾病、その後の修復(補修・補強)は手術や治療と考える。

定義 1 に示したような山岳トンネルの更新(寿命)事例は最近では非常に少ないため、本研究では、定義 2 の補修・補強などの修繕・補修の履歴を人間に置き換え、疾病の手術や治療など健康状態に関する履歴として、生存時間解析を適用して、劣化遷移過程の同定を検討する。

#### (2) 生存時間解析

生存時間解析は、医学の分野でイベントを患者の死亡と定義し、投薬群と非投薬群の生存関数を比較し、試験薬の有効性を検証することに用いられている。生存時間解析では、患者 id について開始時刻  $time1$  から終了時刻  $time2$  まで観測が行われ、終了時刻においてイベントが生ずる(0)または、

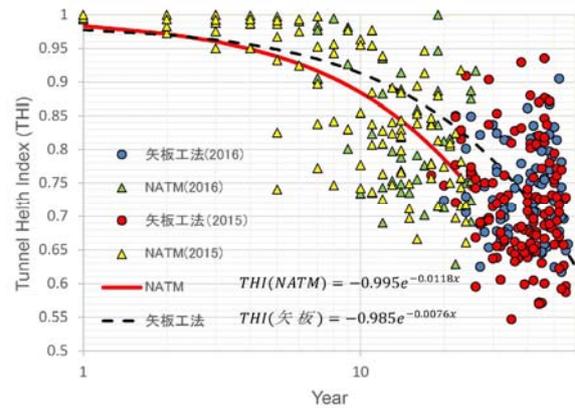


図-11 簡易 THI を用いた Kachanov モデルの同定

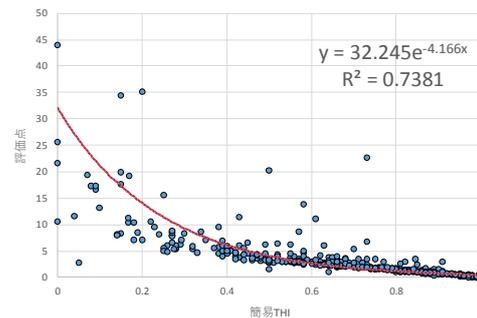


図-12 トンネル覆工の劣化評価値

死亡(1)とする。観測期間  $time3$  を式(10)で求めると、患者のデータは  $id$ 、イベントは  $time3$  で示せる。

$$time3 = time2 - time1 \quad (10)$$

全患者数  $j$  をとし、全患者の観測期間  $time3$  のデータ  $time3_1, \dots, time3_m$  が集められ、並べ替えると式(11)で示される。

$$0 < time3_1 < \dots < time3_m \quad (11)$$

このとき  $time3_m$  は最大値である。  $time3_m$  を除いた半开区間  $[0, time3_m]$  は、式(12)の半开区間  $p_i$  に分割できる。

$$p_i = (time3_{i-1}, time3_i) \quad i = 1, \dots, m \quad (12)$$

ノンパラメトリックな生存時間解析手法としては Kaplan-Meier 法が良く用いられる。この手法は丹後によれば、  $time3_i$  を  $t_i$  とおき、時間  $t_j$  の生存関数  $\hat{S}$  の最尤推定値として次(13)を与える。

$$\hat{S}(t_j) = \prod_{i|t_i < t_j} \left( \frac{n_i - d_i}{n_i} \right) \quad (13)$$

式(13)の右辺  $(n_i - d_i)/n_i$  は、期間  $p_i$  の生存確率である。  $n_i$  はサブ期間の患者数、  $d_i$  は期間  $p_i$  におけるイベント数(死亡者数)である。

#### (3) 生存率解析による山岳トンネルの劣化評価値

寒冷地(北海道)における国道の山岳トンネル覆工(矢板工法: 176 本)の維持管理(補修履歴)データを基に生存時間解析の Kaplan-Meier 法を適用し、求められた山岳トンネル覆工における生存曲線を図-13 に示す。同図より、供用(経過)年数に伴い生存率曲線は低下しており、供用 30

年頃を境に曲線の勾配がなだらかに遷移している。また、供用開始から約 50 年で全山岳トンネルが補修されていると分かる。

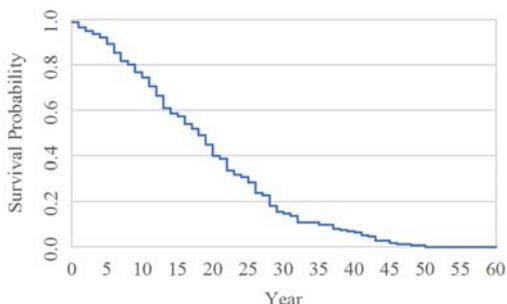


図-13 生存率曲線

## 5. 道路構造物の維持管理戦略

道路構造物の維持管理は、図-14 に示すように設計、施工、点検、健全度評価、劣化予測、維持管理計画のサイクルが基本モデルである。

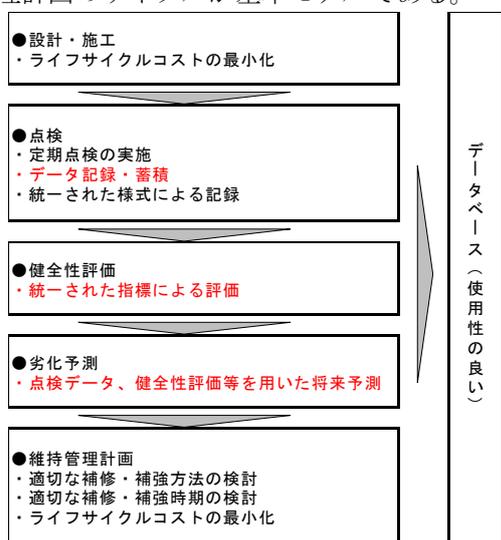


図-14 維持管理サイクルの基本モデル

本研究では、図-14 の①データの記録・蓄積、②統一された指標による評価、③点検データ、健全性評価等を用いた将来予測による精度向上を図る有効な手法であることを 3.、4. で示した。

## 6. まとめ

本研究は、山岳トンネルの定期点検データと補修・補強などが主な記録であるトンネル保守履歴の 2 つの管理データに基づき、寒冷地（北海道）における山岳トンネルの予防保全に資する総合的な劣化特性の把握やそれらの予測に関する検討を行った。本研究では、以下の結論が得られた。

(1) 北海道のような寒冷地では点検時期で覆工コンクリート表面におけるひび割れ幅は変動することが確認された。トンネル点検において、トンネル覆工のひび割れを定量的かつ正確な点検を実施するには、点検季節の統一もしくは点検時の坑内気温によるひび割れ幅のキャリブレーション

（例えば坑内気温 15℃に統一したひび割れ幅を記録）が必要である。

(2) 北海道における山岳トンネルの覆工コンクリートの性状には、寒冷地特有の長期間にわたり凍結防止剤の浸食や湧水にともなうセメント水和物の溶解による強度低下が確認され、維持管理においてはそれらの基本性状にも配慮する必要がある。

(3) 山岳トンネルにおける定期点検データおよびトンネル保守履歴の 2 つのデータから、寒冷地（北海道）の山岳トンネルの劣化特性を評価するために簡易な健全度指数（簡易 THI）を提案し、加えて確率・統計的な損傷度成長モデルと定期点検データにより、簡易 THI における平均値と分散値の時間的な遷移過程を推定することで、山岳トンネルの長期的な劣化状況の予測が可能である。

(4) 寒冷地（北海道）における山岳トンネルの保守履歴に生存時間解析を適用し、求められた生存率曲線は基本的に山岳トンネル覆工における劣化特性を表し、提案したモデルが予防保全の考えた方に基づく維持管理計画に適用できることが可能である。

今後、寒冷地を含め他地域における山岳トンネル覆工の劣化の時間的遷移やその分布傾向の詳細な把握は、予防保全を前提としたトンネルマネジメントシステム(TMS)には不可欠な情報となる。他地域を含めた多く山岳トンネルの覆工における観察・点検データの蓄積および山岳トンネル管理台帳などの保守履歴の活用が不可欠である。

## 参考文献

- 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.
- 道路トンネル定期点検要領, 国土交通省 道路局, H31.02
- 浜幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富坂崇, 鎌田栄治: 気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp.9-16,1999.
- 禿和英, 須藤敦史, 佐藤京: 寒冷地(北海道)トンネルにおける維持管理を目的とした覆工コンクリート性状の観測・調査結果に基づく一考察, (公社)日本コンクリート工学会「コンクリート工学年次論文集」, Vol.41, No.2, pp.1381-1386, 2019.7.
- 禿和英, 須藤敦史, 兼清泰明, 佐藤京, 丸山収, 檀寛成: 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, (公社)土木学会第 36 回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, pp.41-44, 2018.12.
- 禿和英, 須藤敦史, 佐藤京: 北海道のトンネルにおける維持管理データによる劣化モデルの考察, (一社)北海道開発技術センター, 寒地開発研究会第 35 回寒地技術論文・報告集, Vol.35, pp.69-74, 2019.11.