

論文 維持管理を目的とした北海道における矢板工法のトンネル覆工劣化状況の検証と予測

須藤 敦史*1・佐藤 京*2・禿 和英*3・五十嵐 隆浩*4

要旨：北海道では昭和 63 年制定の「道路トンネル設計施工要領」に伴い、NATM が矢板工法に代わってトンネルの標準工法に採用されている。一方、トンネル覆工は、冬期の厳しい気象現象に長い間曝され、加えて沿岸部では飛来塩分や路面管理のための凍結防止剤散布などの影響を受けているが、昨今の社会経済状況により、矢板工法のトンネルに対しても予防保全に基づいた効率的な維持管理の構築と運用を図らなければならない。そこで本論文は、北海道における矢板工法のトンネル覆工に対する定期点検結果に基づいた劣化状況と中性化深さ・塩化物イオン濃度における複合劣化を調査結果により検証している。

キーワード：寒冷地トンネル、維持管理、覆工コンクリート、劣化特性

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に数多くのインフラストラクチャーが整備されてきた。このような状況下、橋梁や山岳トンネルなど多くのコンクリート構造物で構成される道路構造物は、今後一斉に高齢期を迎える¹⁾などことが予想されている。しかし、これらは市民の社会生活では欠かせないインフラストラクチャーであるため、公共事業費が減少するような社会情勢でも、市民の生活維持のためには効率的かつ適切な維持管理がなされなければならない。特に寒冷地の北海道では、その環境による劣化特性などを考慮したメンテナンスや維持管理システムの構築とその早急な運用が求められている^{2,3)}など。

北海道では本州に比較して都市間の移動や物流など社会生活の多くを道路交通に依存しており、加えて他の地域に比べて自然環境も厳しいため、長期間の耐久性を必要とする山岳トンネルの維持管理に対する重要度は高い。一方、北海道では昭和 63 年度に制定された「道路トンネル設計施工要領」に伴って NATM が矢板工法に代わって山岳トンネルの標準工法に採用されているが、昨今の社会・経済状況等により、今後も矢板工法の山岳トンネルをなるべく長い期間に供用していかなければならず、予防保全に基づいた効率的な維持管理システムの構築と運用を早急に図らなければならないのが現状である。

そこで、寒冷地（特に北海道）の矢板工法で建設された山岳トンネルに対して、構造物や部材・材料等の劣化性状の把握とともに、寒冷地の特性を考慮した予防保全を基本とするライフサイクルマネジメント(Life Cycle Management : LCM)システムの構築を目的とした種々の検討がなされているが、特に矢板工法のトンネルでは、

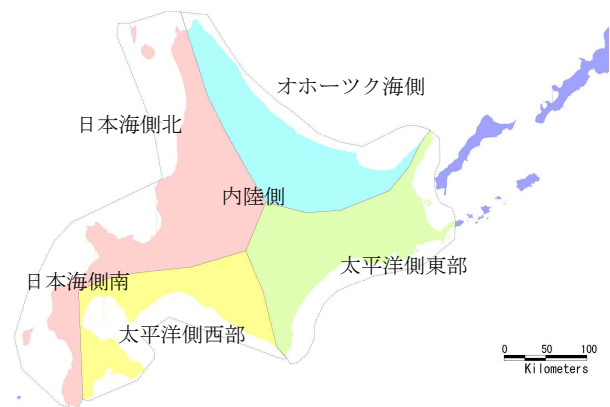


図-1 北海道の気象区分^{6), 7)}を修正

覆工コンクリートなどの部材等に対する長期劣化状況の把握とそれらの予測手法の開発が重要な要素となる⁴⁾。

しかし、北海道において矢板工法の山岳トンネルは、建設から約 25～30 年以上経過しているため、長い間厳しい自然環境に晒されていることに加えて、凍結防止剤の散布や沿岸部などは飛来塩分などによる劣化を受けており、加えてトンネル覆工に対する定期点検における健全度評価の判定は、5 段階のレーティング（離散）値が基本であるため、その解釈や利用等が難しく、さらには点検時期により判定基準が数回改定されているため⁵⁾、経過年等を検討軸とした長期にわたる一貫した劣化評価が非常に難しいのが現状である。

そこで本論文は、図-1 に示す北海道における環境・気候区分を文献^{6), 7)}を参考にして分割し、さらに北海道開発局が建設・管理する主に矢板工法の山岳トンネルにお

*1 東北工業大学 工学部 都市マネジメント学科(正会員)

*2 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造グループ

*3 (株)建設技術研究所(正会員)

*4 (株)構研エンジニアリング

ける劣化現象をマルコフ遷移過程⁸⁾と仮定し、さらに従来の研究では用いている観測期間は短い、本研究では長期の定期点検における個々のトンネル覆工の健全度判定区分値から劣化現象の遷移を求めて、その気象区分ごとにおける経過年数に伴う変動特性を検討している。加えて、矢板工法の山岳トンネルは供用から約25～30年以上経過しており、冬期環境による長期劣化の兆候が表れているため、トンネル覆工に対する材料劣化の基本性状の収集のための強度試験・中性化深さ調査や塩分濃度等の試験を実施して、それらを整理することで寒冷地のトンネル覆工材料の複合劣化等の検証を行っている。

2. 定期点検値に基づくトンネル覆工の劣化過程

山岳トンネルの覆工に対する定期点検（表面の近接目視点検）では、表-1に示す5段階の劣化判定区分値で得られ、劣化過程はこれらが離散値であるために、供用開始年や検査間隔に基づいたマルコフ連鎖モデルで表現されることが多い。

ここで、トンネル覆工における劣化区分値の遷移確率行列を同定するには、同一の点検間隔で少なくとも2回以上の点検値が取得され、加えて劣化区分のレベルが遷移したサンプルが出来うる限り数多くあることが精度向上の必要条件となる。本研究では、点検基準の改訂⁹⁾以降の定期点検値（平成26年～令和元年度）を用いている。

2.1 マルコフ連鎖モデル

山岳トンネルの覆工におけるマルコフ連鎖モデルは、図-2に示すように、ある状態からつぎの状態への遷移過程において、ひとつ前の劣化評価の区分値の状態に依存する条件付き確率と考える。ここで、トンネル覆工の劣化区分（ランク）値におけるマルコフ連鎖の遷移過程において、補修・補強などの人為的行為が施されない場合は、離散時間の経過に伴って、常にある確率 p_i で劣化が進行（1:I⇒2:IIb⇒2:IIa⇒3:III⇒4:IVに遷移）、または停留 $1-p_i$ する確率プロセスと考えられる。

一般的に山岳トンネルの覆工においても、良好な状態の劣化評価値Iから終局的破損状態の評価値IVまでの時間的な遷移は、離散的な時間 $t_1, t_2 (= t_1 + \Delta t)$ の現象としている。ここで時刻 t において評価区分値 i のトンネル覆工が、時間 $t + \Delta t$ で評価区分 j に移行する遷移確率 p_{ij} は式(1)となる。

$$p_{ij} = \text{prob}[X_{t+\Delta t} = j | X_t = i] \quad (1)$$

この遷移確率が、現在の状態のみに依存するならば p_{ij} は時間差 Δt のみに依存する。

2.2 時間依存型のマルコフ連鎖過程の同定

一般的に山岳トンネルの覆工における点検頻度

表-1 損傷ランク（劣化区分）

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
IIb	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
IIa	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	早晚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

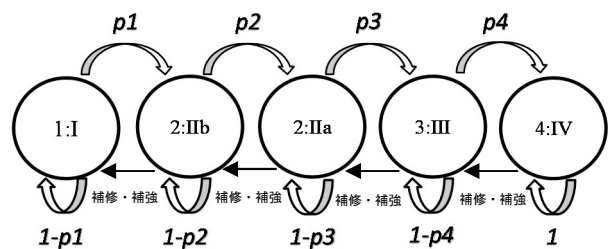


図-2 トンネルの劣化区分におけるマルコフ連鎖モデル

は、管理者により定期点検の基本は1回/5年間隔で実施され、判定区分II以上と判定された山岳トンネルでは以降、定期点検は1回/2年の間隔で実施される場合が多い。また、点検項目は、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遊離石灰などにおいて損傷の有無などにより、トンネル覆工における各スパンに対して表-1に示すI, IIb, IIa, III, IVの5段階の損傷ランク（劣化区分値）を判断している。

本研究では、このマルコフ連鎖モデルにおける遷移確率行列を時間経過に依存する値と定義して、北海道における矢板工法により建設された山岳トンネル（137箇所）の覆工に対する定期点検（平成26年～令和元年度）より得られた劣化区分値より、時間依存型のマルコフ遷移確率行列の要素をそれぞれ同定する。

ここで、時刻 t_A において定期点検より求められた劣化区分値の個数 i 、時刻 t_B において劣化区分 j に遷移した確率行列 p_{ij} の各要素は、基本的には2回以上の定期点検結果から得られる劣化区分値 i から区分値 j へ推移した個数となり、具体的に i, j は、トンネル覆工の定期点検から得られる5つの劣化区分I, IIb, IIa, III, IVをとる劣化区分値の個数より、式(2)のように求められる¹⁰⁾。

$$p_{ij} = \frac{X(t_A) = i \text{かつ} X(t_B) = j \text{の個数}}{X(t_A) = i \text{の個数}} \quad (2)$$

さらに、この $p_{ij} > 0$ とした行列 $P_{k+1} = P$ は遷移確率行列と呼ばれ、以下に示す式(3)に従う。

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad (3)$$

ここで、山岳トンネルの覆工に対する劣化区分値は健全な状態からI, IIb, IIa, III, IVで表され、その状態は時間的に遷移していくため、用いる定期点検値の期間ごとのマルコフ遷移確率行列の要素は、式(2)により求められ、点検期間ごとのマルコフ遷移確率行列は式(4)となる。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad 0 \leq p_{ij} \leq 1 \quad (4)$$

また n 個のマルコフ連鎖の状態確率は式(5)で表される。

$$X(0) = [x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)] \quad (5)$$

$x_i(0)$: 覆工が初期状態においてランク i である確率

ここで各時刻 $1, 2, \dots, m$ ステップ後における山岳トンネルのトンネル覆工に対する遷移した劣化区分の予測値 $X(0), X(1), \dots, X(m)$ は式(6)となる。

$$\begin{aligned} X(1) &= X(0)P \\ X(2) &= X(1)P = X(0)P^2 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (6)$$

$$X(m) = X(m-1)P = \dots = X(0)P^m$$

これら同定された期間ごとのマルコフ遷移確率行列により、トンネル覆工の劣化状態の進展過程を表すことができる。このようにトンネル覆工における経過年数別における実際の点検値からマルコフ遷移確率行列を同定すれば、経過年に伴って劣化状態が遷移していく過程が得られる。ここでマルコフ連鎖モデルにおける遷移確率の要素 p_{ij} を、長い期間における数多くの点検値から、精度よく同定することが重要となる。

3. トンネル覆工におけるマルコフ遷移確率行列

3.1 時間依存型のマルコフ連鎖過程の同定

矢板工法により建設された山岳トンネルの覆工において時間依存型のマルコフ遷移確率行列の要素を供用期間 (①20~39年, ②40~59年) の劣化区分値を用いて同定した結果を表-2(a)および表-2(b)に示す。

表-2(a)および表-2(b)より、トンネルの供用年数に伴って同一の劣化区分値の停留確率は少なくなり、またトンネル覆工の補修・補強による劣化区分の向上もみられる。ここで表-2(a)および表-2(b)において劣化区分IVは、供用中の山岳トンネルの覆工表面において、判定されない劣化区分であり (表-1の定義参照) 本研究で使用した点検値においても得られていない。

3.2 地域別におけるトンネル覆工のマルコフ遷移確率

次に同定した気象区分ごと (地域別: 小樽, 函館地区)

表-2(a) トンネル覆工のマルコフ遷移確率行列
(供用年数 20~39 年)

	I	II b	II a	III
I	0.591	0.324	0.085	0.000
II b	0.018	0.777	0.195	0.010
II a	0.008	0.040	0.929	0.024
III	0.005	0.080	0.053	0.862

表-2(b) トンネル覆工のマルコフ遷移確率行列
(供用年数 40~59 年)

	I	II b	II a	III
I	0.518	0.295	0.171	0.016
II b	0.014	0.768	0.195	0.023
II a	0.009	0.034	0.876	0.081
III	0.006	0.039	0.051	0.803

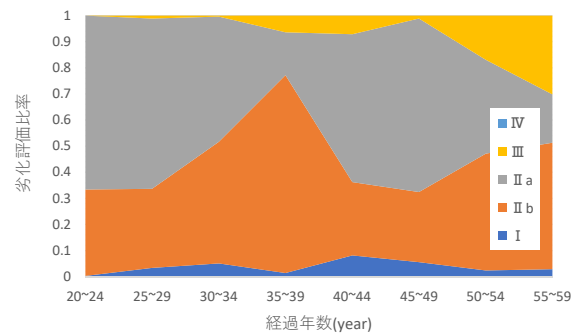


図-3(a) 小樽地区における覆工の劣化区分比率

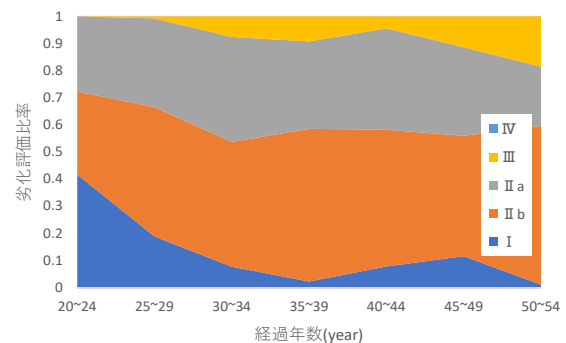


図-3(b) 函館地区における覆工の劣化区分比率

におけるトンネル覆工のマルコフ遷移確率 (劣化区分値の比率) を図-3(a)および図-3(b)に示す。

図-3(a)および図-3(b)より、小樽地区のトンネル覆工では経過年数 20~24 年において劣化評価値 I はほぼ無く、劣化評価値 II b が 60% を占めており、冬期や日中と夜間の気温差および飛来塩分などの環境が劣化状態の差に表れたものと考えられる。加えて、小樽地区においては経過年数 35~39 年と 50 年以降に対してトンネル覆工の大規模補修が実施されており、劣化区分の比率を向上させている。これら劣化区分図を参考にすることにより、

矢板工法のトンネル覆工の長寿命化に対する補修・補強計画や目標とする将来の管理指針等の策定が可能となる。

4. 覆工コンクリートの中性化深さと塩分濃度

4.1 覆工コンクリートの中性化深さ

コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。

中性化は水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、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もある¹¹⁾。また、中性化は炭酸ガスのコンクリート中への拡散によって生じており、式(7)に示すように中性化深さ $C(\text{mm})$ は中性化速度係数 A と経過時間 t の平方根に比例する。

$$C = A\sqrt{t} \quad (7)$$

ここで、矢板工法で建設された山岳トンネルにおけるトンネル覆工の中性化速度係数と山岳トンネルの経過(供用)年数との関係を図-4(点線は平均値)に示す。図-4より、北海道のトンネル覆工では、経過年数に伴って中性化深度は大きくなる傾向を示すが、そのばらつきも大きく、様々な環境等の影響を受けていると考えられる。

次に、中性化速度係数とトンネル覆工の圧縮強度の関係を図-5に示す。図-5より、中性化速度係数が小さいトンネル覆工では圧縮強度が大きい傾向が見られるが、ばらつきは大きく、データ収集・解析が今後の課題となる。

4.2 覆工コンクリートの塩分(塩化物イオン)濃度

塩分(塩化物イオン)濃度は、コンクリートの劣化を促進する塩化物イオンが、飛来塩分(主に冬の季節風など)や凍結防止剤散布など外部環境から供給される場合とコンクリート製造時に材料から供給される場合がある。

ここでは、コンクリートの塩化物イオン濃度は、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食において注目されるが、本研究では、前述したように、中性化とともにトンネル覆工の性状の変化等を引き起こす可能性があるため、無筋コンクリートであるトンネル覆工に対しても塩化物イオン濃度の調査を実施して、コンクリート材料における長期劣化傾向等の検討を行っている。一般的に、コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度の拡散予測値 $C(x,t)$ は、覆工表面の塩化物イオン濃度 C_0 および拡散係数 D_{ap} 、経過時間 t 、ばらつきの係数 γ_{cl} 、コンクリートに含まれる塩化物イオン濃度 C_i とした式(8)となる^{12),13)}。

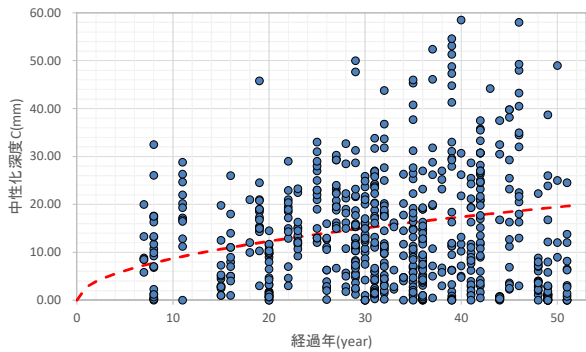


図-4 中性化深さとトンネルの経過年数

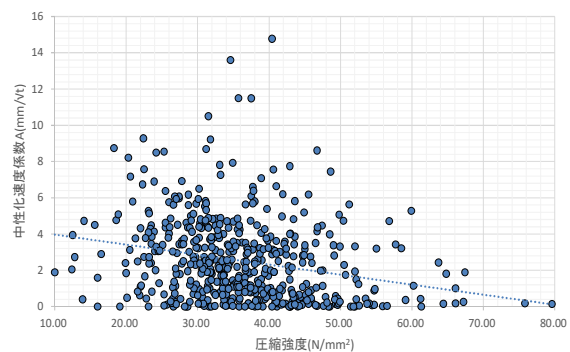


図-5 中性化速度係数と圧縮強度

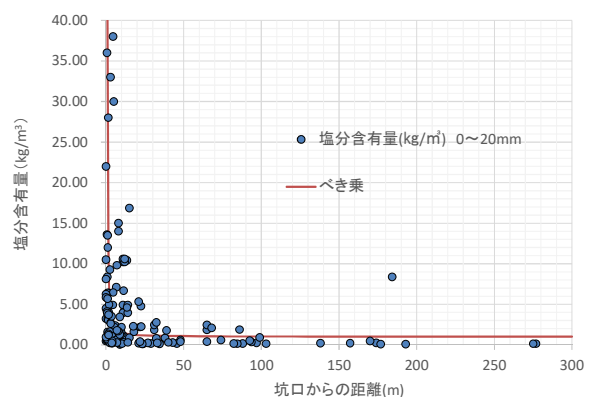


図-6 塩分含有量の坑口からの延長距離

(深度: 0~20mm)

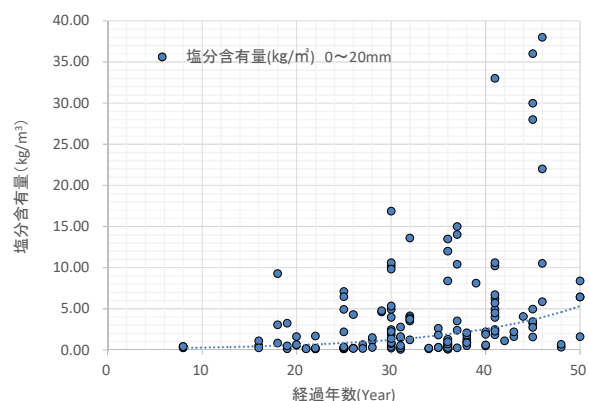


図-7 塩分含有量と経過年数(深度: 0~20mm)

$$C(x,t)=\gamma_{cl}\cdot\left[C_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}}\right)\right]+C_i \tag{8}$$

山岳トンネルのトンネル覆工における圧縮強度・中性化深度・塩化物イオン濃度などの基本性状は、経過（供用）年数にともなって変化すると考えられるが、これらを観測や調査・試験に基づいて定量的に評価した事例は少ない。そこで、トンネル覆工のコンクリート表面部(0~20mm)における塩化物イオン濃度と坑口からの距離との関係を図-6に示す。またトンネル覆工のコンクリートの表面部(0~20mm)における塩化物イオン濃度と経過年数との関係を図-7に示す。図-6より、トンネルの坑口からの距離に伴い覆工のコンクリート表面部の塩化物イオン濃度は急速（べき乗数的）に減少する傾向がみられ、また図-7より、ばらつきは大きいが経過年数に伴ってトンネル覆工のコンクリート表面部の塩化物イオン濃度は経過年に伴って多くなる劣化の進行傾向がみられている。

5. トンネル覆工における塩化物イオン濃度の実測値と予測値について

トンネル覆工における調査試験より得られたコンクリートにおける深度別の塩化物イオン濃度の全ての平均値と式(8)より求めた推定値との比較を行う。ここで、トンネル覆工におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 （飛来塩分と凍結防止剤）、拡散係数 D_{ap} 、コンクリート中の塩化物イオン濃度 C_i を未知数として摂動法により同定している。まず、塩化物イオン量を調査した全トンネルにおける平均の塩化物イオン濃度の式(8)による同定値と実測値を図-8に示す。ここで調査トンネルにおける平均中性化深さは約15mmである。

図-8より、平均値においても実測値では平均深度30mmおよび50mmにおいて塩化物イオンの濃縮現象が見られ、矢板工法のトンネル覆工における中性化と塩害の複合劣化現象が見られている。

次に、日本海北と日本海南および日本海南と太平洋西のトンネル覆工に対する塩化物イオン濃度の深度別の式(8)による同定値と実測値を図-9(a), 9(b)に示す。

図-9(a)より、日本海北ではトンネル覆工表面部（平均深度10mm）における塩化物イオン濃度が高く、凍結防止剤の散布量や冬期の季節風による飛来塩分量などによる塩害劣化を受けていると考えられる。またトンネル覆工表面より平均深さ50mm以深における塩化物イオンの濃縮は両地区とも同程度である。

次に図-9(b)より、トンネル覆工表面部（平均深度10mm）における塩化物イオン濃度は同程度であるが、

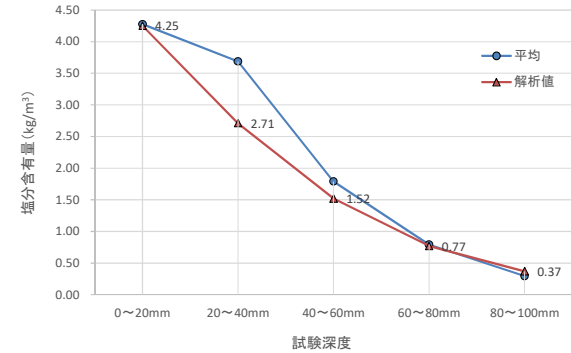


図-8 覆工コンクリート深度別の塩化物イオン濃度

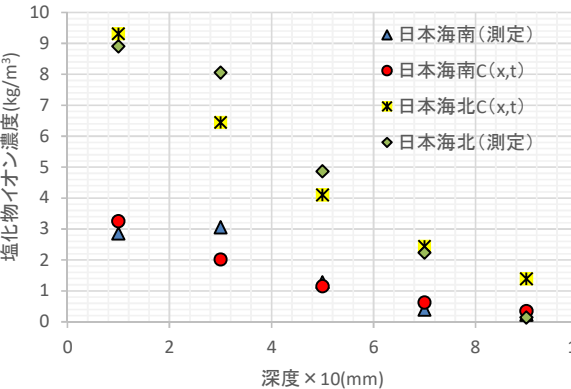


図-9(a) トンネル覆工の地域別塩化物イオン濃度
(日本海北・日本海南)

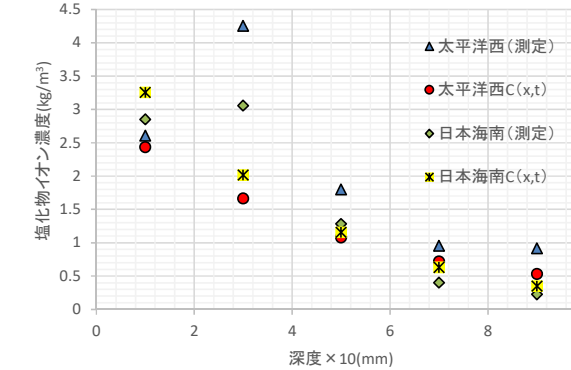


図-9(b) トンネル覆工の地域別塩化物イオン濃度
(日本海南・太平洋西)

表-3 凍結融解の危険度日数

気象区分	凍結日数	備 考
日本海(北)	26	最高気温1.0度以上、最低気温-3.0以下の日数 (気象庁気象統計十年平均より)
日本海(南)	28	
太平洋(西)	55	
内 陸	36	

太平洋西では平均深さ30mmにおいて塩化物イオン濃度が約1.5kg/m³と高くなる傾向がみられる。

ンの濃縮が高くなっている。ここで4地区における中性化の平均深さは全調査トンネルの平均値15mm程度とほぼ同じである。

そこで文献⁹⁾を参考にしてアメダス統計値より各地域の凍結融解危険度日数を求めた結果を表-3に示す。表-3より、太平洋西では、深度30mmにおける塩化物イオン濃縮現象は、覆工コンクリートが保有する総塩分量では説明できないため、凍結融解によりトンネル覆工の表面劣化が進展し、覆工表面部の飛来塩分や凍結防止剤等の浸透が原因と推測される。

6. 結 論

本論文では、寒冷地（北海道）における矢板工法で建設された山岳トンネルのトンネル覆工に対して、それぞれの定期点検値より得られる健全度の判定区分から、劣化の遷移動向を同定して、その地域性や気象区分に対する経過年数に伴う劣化現象の遷移特性を検討している。

さらに、トンネル覆工における長期性状や劣化に対する基本情報の蓄積のため、強度試験・中性化深さ調査と塩化物イオン濃度の調査試験値を整理し、コンクリート材料における複合劣化の検討より以下の結論が得られた。

- (1) 経過年数に伴って遷移するトンネル覆工の劣化の遷移過程（時間依存型マルコフ連鎖モデル）の提案を行い、実際に得られているトンネル覆工の定期点検値より遷移確率の要素を同定し、その時間依存の動向を確認し、同時に具体的にその有効性を示した。
- (2) 同定した遷移確率行列の要素の遷移傾向を基に、トンネル覆工における劣化区分の変動予測が可能であり、これらによりトンネル覆工に対する補修・補強等の維持管理の効率化に対する有力な支援情報と考えられる。
- (3) 寒冷地（北海道）におけるトンネル覆工（主に矢板工法）に対する中性化深さと塩化物イオン濃度では、坑口からの延長距離および経過年数との関連が見られ、トンネル覆工では中性化と塩害の複合劣化が進行している結果が得られた。これら覆工における複合劣化現象の進行は本州に比べて北海道では早いと考えられる。

今後、寒冷地（特に北海道）における矢板工法で建設した山岳トンネルの予防保全を前提とした維持管理には、劣化度の現状把握と予測は不可欠であり、加えて覆工材料の基本性能は重要な情報であるため、今後も、多くの矢板工法のトンネル覆工に対する調査・試験や点検データの蓄積を継続する予定である。最後に、貴重な矢板工法のトンネル覆工に対する各種調査・試験結果の提供を頂いた、北海道土木技術会、トンネル研

究委員会、TMS（トンネルマネジメントシステム）分科会に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路構造物保全協会：道路アセットマネジメントハンドブック，鹿島出版会，2008.
- 2) 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.203-208，2011.12.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 道路トンネル定期点検要領（案）・同参考資料：国土交通省道路局国道課，平成 14 年 4 月．
- 6) 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.
- 7) 菊池渉，村上泰啓，石谷隆始：北海道の豪雨傾向の地域・経年特性について，第 52 回（平成 20 年度）北海道開発技術研究発表会，2009.
- 8) 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.68-82，2005.
- 9) 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．
- 10) 武田俊明，大島俊之，佐藤誠，三上修一：橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討，土木学会構造工学論文集，Vol.51A，pp.1157-1167，2005.
- 11) 岸谷孝一，西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ(中性化)，技報堂出版，1986.
- 12) 酒井秀昭：凍結防止剤散布地域の橋梁高欄の塩化物イオン濃度の予測手法に関する研究，土木学会論文集 E Vol/66，No.3，pp.268-275，2010.7.
- 13) 小林竜太，井上雅弘，小田島大，田口史雄，嶋田久俊：塩分量調査に基づく道南渡島地方沿岸における塩害地域区分の評価，平成 18 年度，土木学会北海道支部論文報告集，第 63 号，E-16.