

既設トンネル不可視覆工の劣化推定・評価技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：寒地構造チーム、寒地技術推進室

研究担当者：西 弘明、今野久志、岡田慎哉、佐藤 京、澤松俊寿、
横山博之、中村直久、高玉波夫、宮本修司

【要旨】

積雪寒冷環境下でのトンネル構造物の劣化傾向を的確に予測し、それらの維持修繕・補強を予防保全の観点から戦略的に行い、ライフサイクルコストを低減する技術が必要不可欠である。そのためには、定期点検を実施し、現状を把握することが重要であるが、既設トンネルの漏水発生箇所ではトンネル内への漏水の滴下防止のため、トンネル内壁に漏水防止板が設置され、現況評価が実施不可能な箇所がある。特に、寒冷地においては、コンクリートの凍害や漏水の凍結による車両交通への障害を防止するため、断熱効果のある面導水工が多くの区間に設置され、漏水防止板が設置されたトンネル覆工コンクリートは不可視になることから、定期点検等においても劣化損傷の評価を行うことができない状況にある。特に在来工法のトンネルにおいては、覆工が構造部材となることから、損傷が評価されないままでは耐荷力上も問題になる。今後、既設トンネルを適切に維持管理していくため、不可視箇所も含めて劣化損傷を評価可能な技術が求められている。

本研究では、トンネル定期点検の覆工損傷評価を補うものとして、既設トンネル覆工コンクリートの不可視（漏水防止版の設置）箇所も含めて劣化損傷を評価可能な技術を開発する。具体的には、振動センサーを用いた簡易な現地計測により覆工の健全度を推定し、既往のトンネル点検結果より整理を進めている覆工コンクリートの劣化推移と合せて、覆工の劣化予測技術を提案する。これにより、トンネル構造物の適切な補修補強対策の実施が可能になり、社会資本ストックの長寿命化、LCCの縮減に貢献する。

キーワード：トンネルマネジメント、漏水防止板、劣化予測、トンネル維持管理システム（TMS）、予防保全型補修、事業計画

1. はじめに

厳しい経済状況の下で公共事業の一層のコスト縮減と品質を確保するには、その地域の条件にあった技術を用い、規格を適切に設定することが必要である。供用中の橋梁をはじめとする道路構造物の多くは高度経済成長期に建設され、建設後数十年を経過していることから、今後維持管理費が急増することは明らかであり、これまで以上に効率的な維持管理が求められる。また北海道の気象は、積雪寒冷という全国的にみて極めて特殊な特性をもつため、土木施設の維持管理を行う場合、特有の技術が求められる。たとえばトンネル覆工に発生した湧水を伴うクラックに対して、氷柱やつららの発生を防御し、通行者への安全を確保する対策がとられる。

今後、より効率的に道路施設を保全するためには、積雪寒冷環境下での劣化傾向を的確に予測する手法と、それらの維持修繕・補強を予防保全の観点から戦略的

に行い、LCCを低減する技術が必要不可欠である。本研究では、直接的に状態を把握することが困難な現況を想定して、常時微動記録による劣化診断の可能性について検討した。さらに、覆工コンクリートの定期点検より健全度を数量化し、統計的手法を用いた劣化進行予測技術について検討を行った。

2. 覆工コンクリート劣化損傷度の評価技術の開発

漏水の滴下防止対策として実施される漏水防止板は、アルミ含有鋼板により断熱材を挟み込んだ構造が一般的で、電磁波や超音波、赤外線といった非破壊調査では、覆工を調査することが出来ない。一方、橋梁を対象とした損傷評価に全体系や部材毎に有する固有振動数の変化より損傷を検知する間接的手法に関する検討^{1)~5)}が行われており、蔣ら⁶⁾は、トンネル覆工への適用について検討している。

そこで、不可視覆工の劣化度を把握するための技術

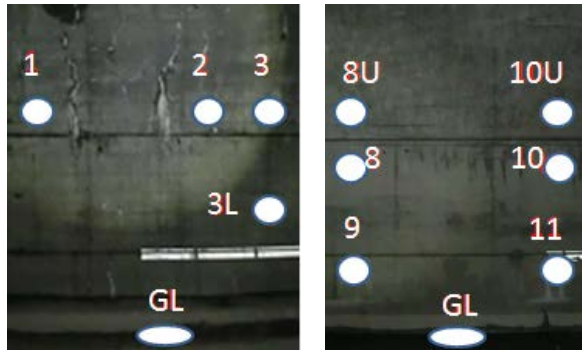
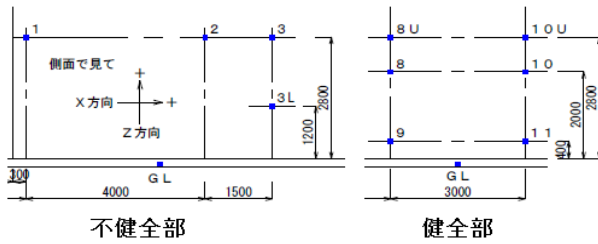


図-1 対象とした覆工コンクリート

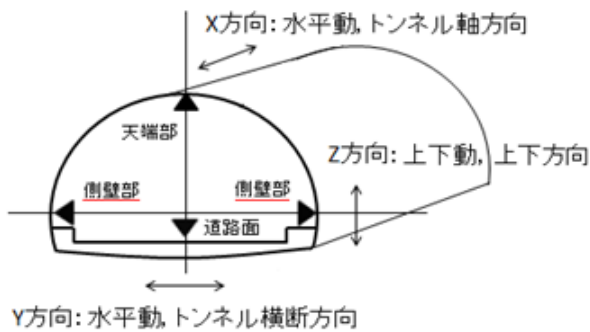


図-2 3成分の方向関係

開発として常時微動に着目し、供用されていないトンネルを活用して測定した常時微動データの分析を行いその適用性について検討を実施した。

2.1 常時微動測定概要

本計測では目視点検により、明らかにひび割れのある不健全な断面とひび割れの無い健全な断面の2つを用いた。図-1に常時微動測定時の計測器配置図と比較を行う断面の様子を示す。

計測には、サーボ型加速度計・測定器を使用した。加速度計は地面に対し、垂直を保つよう覆工コンクリート面にボルトで打ち込み設置し、トンネル軸方向(X)、トンネル横断方向(Y)、トンネル上下方向(Z)の3成分(図-2)に対し、図-3の様に各1台を1セットとして配置した。また、計測の際に外部電源(発電機)の振動による影響を考慮する為、無停電用の電源を用意し、計測中はトンネル内を無人にした。使用した機器の仕

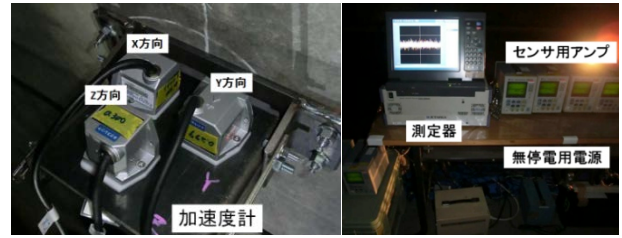


図-3 測定機器

表-1 機器の仕様

使用機器	メーカー	機種	測定レンジ
測定器	共和電業	EDX-200A	2V
加速度計	リオン	LS-10C(サーボ型)	10mm/s ²
アンプ	リオン	VM-83	10mm/s ²

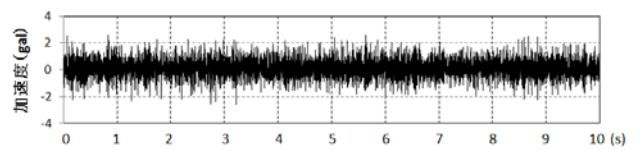


図-4 測定した加速度の一例

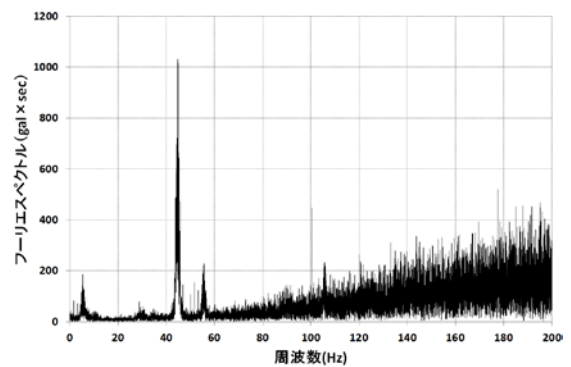


図-5 振動成分に含まれる高周波ノイズ

様については表-1に示す。

2.2 覆工コンクリートの振動特性

常時微動測定より得られた加速度波形の一例を図-4に示す。本測定では時間刻み $\Delta=0.002$ 秒として、振幅最大上下2gal程度の加速度を検出した。波形の周波数成分を把握するため、本研究では測定した加速度波形に中立軸補正を行い、フーリエスペクトルの算出を行った。計測された常時微動より算出したフーリエスペクトルの一例を図-5に示す。図-5のフーリエスペクトルでは、周波数が高くなるに従い、ノイズの振幅が増幅していることが確認できる。既存の研究ではカルマフィルタを用いて観測時系列データから高周波ノイズを除去する手法⁷⁾が報告されている。本研究では北川⁸⁾の季節調整モデル(seasonal adjustment model)を参考にカルマンフィルタ手法を用いて、常時微動波形から高周波側で増加する記録(ノイズ)の除去を試

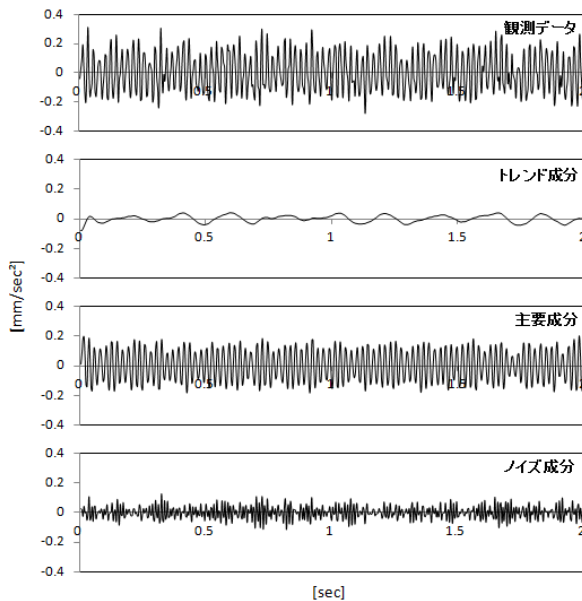


図-6 カルマン手法による振動成分の分解例

みた。図-6に観測データ波形を分解した結果例を示す。トレンド成分は0に近い振幅ではあるが、周期性を持つ波形となった。主成分では観測データに比べ、ほぼ一樣な波形を示している。

次に、観測データより3成分に分解した各微振動波形からフーリエスペクトルを算出した結果を図-7に示す。

各成分の分布は周波数の低い範囲にトレンド成分が占め、主成分は45～55Hzの範囲で卓越部分が読み取れる。図-5に示された周波数が高くなるに従い振幅が増加している現象と一致した。また、主成分の卓越部分にノイズ成分が重なっているため、振動特性を比較する際にはノイズの影響を考慮する必要がある。基礎的な手法ではあるが、カルマンフィルタを用いることで波形の成分分解は可能であることが確認できた。

健全部と不健全部の観測データに対して、カルマンフィルタを用いてトレンド成分とノイズ成分を除去し、主成分のみを抽出したフーリエスペクトルの結果を図-8に示す。図-8から健全部では特に45Hz付近の卓越周波数が多いのに対し、不健全部では18Hzあたりに卓越周波数がみられる。全体的には、不健全部では卓越振動数が低下する傾向にあった。

2.3 時系列モデルによる特徴の抽出

前節では、常時微動波形による振動特性成分と覆工コンクリートにおける劣化の関係性を明らかにしてきた。ここでは、波形の振動成分の特徴を自己回帰モデ

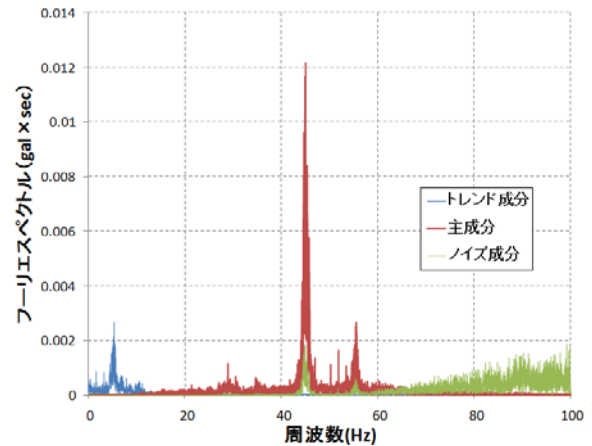


図-7 観測データの成分別振動特性

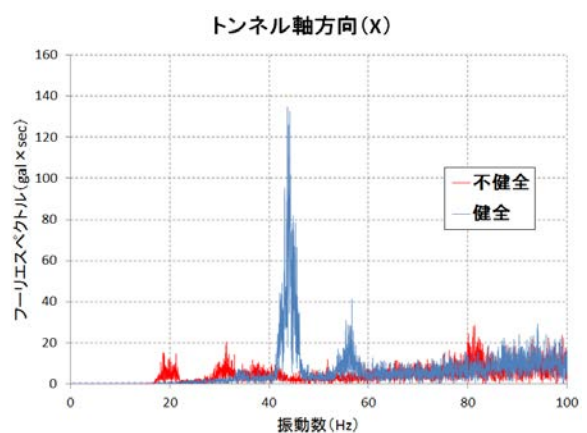


図-8 カルマンフィルタにより主成分を抽出したフーリエスペクトル

ル (Autoregressive Model、ARモデル) の係数で表すこととし、これによる覆工コンクリートの劣化推定を試みた。そこで、時系列データの過去の値を説明変数とするARモデルの性質を利用し、覆工コンクリートの劣化を検知する値として、AR係数に着目して劣化推定を試みる。すなわち、式(1)に示すARモデルの自己相関係数を、それぞれ健全部および不健全部の観測記録から求め、係数比較を行う。基本的にはスペクトル解析と同様に周波数特性の解析を行っているが、直接的に推定された係数比較により劣化状態の識別が可能であるかどうかを検討してみる。

$$y_n = \sum_{i=1}^m a_i y_{n-i} + v_n \quad (1)$$

ここで、 m はモデル次数、 a_i は自己回帰係数、 v_n は平均0、分散 σ^2 の正規分布に従うホワイトノイズ(白色雑音)を示す。

本研究では仮に、次数を30として計算した。常時微動データより1変量のAR手法を用いて再現した波形と原波形を図-9に示す。

11個のモデル波形と原波形を比較すると、いずれの波形とも振幅の最大上下は $2\text{mm}/\text{sec}^2$ 程度であり、特異

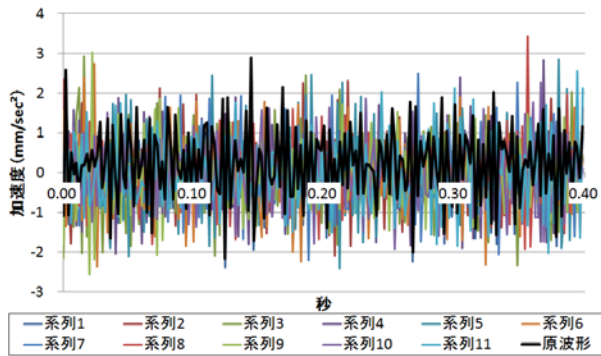


図-9 モデル化した常時微動波形と原波形

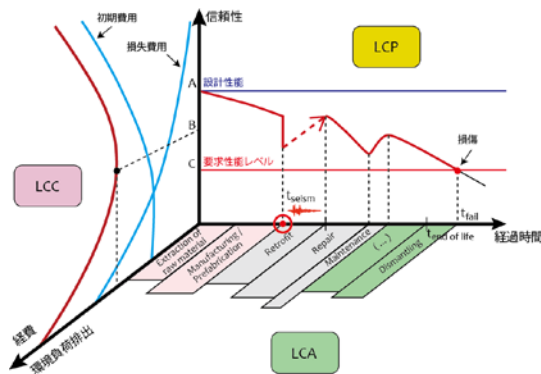


図-11 ライフサイクルマネジメント概要図

なモデル波形も存在しないことから適切な再現ができたと言える。次に、カルマンフィルタを用いて高周波成分のノイズを除去し、AR係数を算定した結果を図-10に整理した。図-10には、健全部と不健全部を併記している。

図-10から、トンネル軸方向において、不健全な断面における測点2-2、測点2-3はAR次数5からAR次数25にかけて、AR係数値-0.5から-1の間と高い位置で直線に近い分布をしていることがわかる。一方、健全な断面の測点8-8、測点8-8U、測点8-10U、はAR次数5からAR次数27にかけて、AR係数値-1から-3の間と低い位置に曲線を描いて分布しており、不健全な断面における測点2-3Lは、上部が不健全な断面ではあるが、測定点付近はおおむね健全であり、健全な断面としている係数と同様の傾向をしている。

3. 覆工コンクリートの劣化予測技術の提案

一般的なライフサイクルマネジメント（Life Cycle Management：LCM）では構造物の劣化遷移と補修・補強との関係を図-11のように示すことができ、経年劣化などで保有性能・機能がある水準以下（限界状態）になる時期を予測して、補修・補強により性能・機能を回復させ、構造物の長寿命化とライフサイクルコストの軽減を図っていくものである。しかし、最も重要な信頼性低下予測のモデルは、経過時間とともに

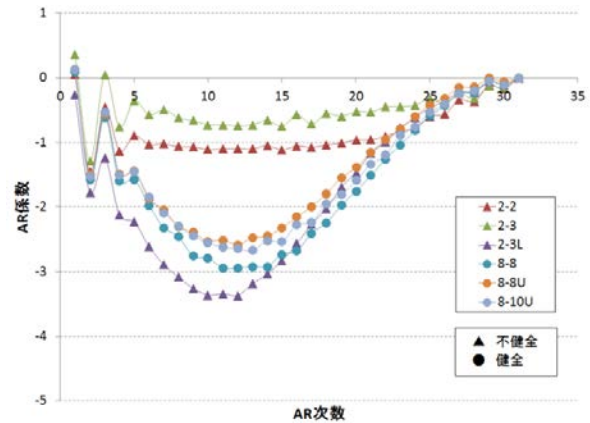


図-10 X軸におけるAR係数比較

表-2 要求性能・性能指標・照査手法との関係 9)に加筆

要求性能	性能指標 [性能代替指標]	性能照査手法	
		数値評価	レーティング
利用者の安全性能	内空形状寸法、内空変位、ひび割れ、線形視距、漏水など	b	5段階など
利用者の使用性能	内空変位、ひび割れ、線形視距、漏水など	b	5段階など
構造安定性能	部材耐力、継手耐力、継手変形性能	a or b	5段階など
耐久性能	部材品質、ひび割れ、漏水	a or b	5段階など
管理者の使用性能	内空形状寸法、ひび割れ、線形視距、防災設備規模、漏水	b	5段階など
維持管理性能	内空形状寸法	b	5段階など
周辺への影響度	騒音振動、地盤変動、水質、地下水変動	b	5段階など

数値評価 a：計測、数値解析等により積極的に数値化する
数値評価 b：計測可能な項目以外は、判定基準に照合しレーティング

連続的に表現される場合が一般的であり、離散化された現行の点検・評価結果との関連性が明確ではない。

本研究では、性能照査型の維持管理を目標として、要求性能に照らし合わせて現況性能をトンネル点検結果より適切に評価する手法について検討を行った。ここでは、矢板工法のトンネル定期点検または一般調査の判定区分（性能照査区分）の数量化と覆工の劣化進展を予測するマルコフ遷移確率を求めた。

3.1 性能照査区分（評価区分）におけるマルコフ連鎖モデル

社会資本の維持管理における劣化予測モデルとしては、1) 過去の点検結果に基づいた統計的な劣化予測モデル、2) 力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルが用いられている。

本研究では、統計的予測モデルに着目し、性能照査区分とその分布の時間的な推移をマルコフ遷移確率行列により同定する方法を提案し、同時に点検結果で提案手法の有用性を示す。

3.2 性能照査区分のレーティング

現行のトンネル維持管理における劣化度の評価は、構造物や部材の状態（性能代替指標）に対する離散値となっている判定区分（レーティング）が用いられている。性能照査型の維持管理を行うためには、表-2に示すような要求性能の照査区分（数値評価もしくはレーティング）を合理的に決定するとともに、点検結果による性能指標と要求性能との関係性を明確にする必要がある。そこで、技術者に対するアンケート調査とAHPを用いて、その関係性を整理した。具体的には、覆工コンクリートのCADと状況写真から、擬似点検により判定区分を求め、平成22年度にまとめている覆工コンクリートの数値化手法¹⁰⁾による数値（数値評価指標）と比較して、レーティングを性能照査区分に変換した。各性能照査区分のレーティング値における性能代替指標値の範囲を定量的に求めた結果を表-3に示す。なお、実際の運用に配慮し、0.5単位とした。

表-3 性能照査区分

レーティング	数値評価指標
S	< 0.5
B	0.5 - 2.5
A	2.5 - 4.0
2A	4.0 - 8.0
3A	8.0 ≤

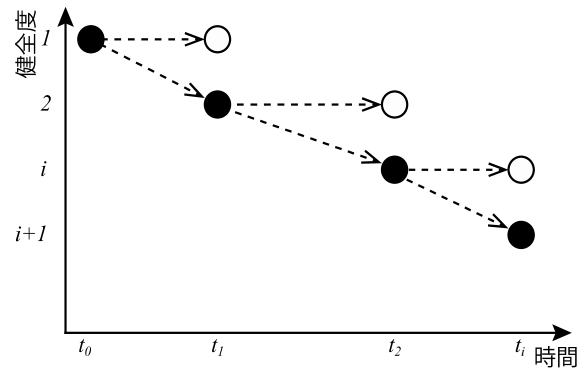


図-12 照査指標の時間的推移と点検間隔

3.3 マルコフ連鎖モデル¹¹⁾

構造物における統計的劣化予測モデルとしてのマルコフ連鎖モデルを用いる場合、図-12に示すように構造物の供用に伴う性能照査区分値（健全度）は点検間隔に応じた離散データになる。ここでは性能照査区分において、ある状態から次の状態への遷移は、一つ前の性能照査区分にのみ依存する一様マルコフ連鎖モデルと考える^{12)~16)}。

一般的にトンネル覆工の性能照査区分値は、良好な状態のランクSから終局的破損状態のランク3Aまでの5段階のレーティングで評価しており、性能照査区分値の時間的遷移は図-12に示すように、離散的な時間 t_1 、 $t_2(t_1+t_A)$ の現象としている。

ここで、時刻 t において性能照査区分値のランク i の覆工状態が、時間 $t+\Delta t$ でランク j に移行する遷移確率 P_{ij} は式(3)となる。

$$P_{ij} = \text{prob} [X_{t+\Delta t} = j | X_t = i] \dots \dots \dots (3)$$

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 にのみに依存する。

ここで、覆工における性能照査区分値のランクに対する遷移確率のマトリックスを表示すると式(4)となる。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

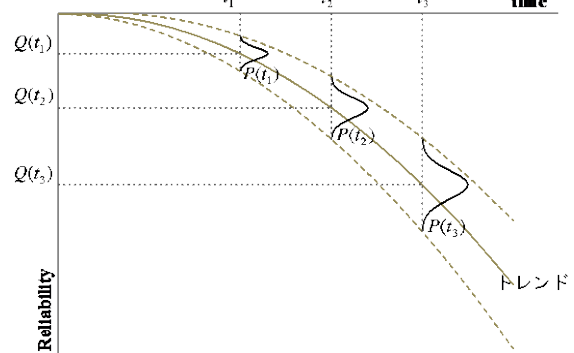


図-13 トンネル覆工の性能劣化モデル

ここで、 $0 \leq p_{ij} \leq 1$

また、個々の遷移状態は互いに排反かつ、すべての状態を表わすことから、各行の要素の和は1となる。

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \dots \dots \dots (5)$$

n 個のマルコフ連鎖の状態確率は、式(6)で表わされる。

$$X(0) = [x_1(0) \ x_2(0) \ \dots \ x_n(0)] \dots \dots \dots (6)$$

$x_i(0)$ ；覆工が初期状態においてランク i である確率
同様に 1、2、……、 n ステップ後における覆工における状態確率 $X(1)$ 、 $X(2)$ 、……、 $X(n)$ は以下となる。

$$\begin{aligned} X(1) &= X(0)P \\ X(2) &= X(1)P = X(0)PP = X(0)P^2 \quad \dots \dots (7) \\ &\vdots \end{aligned}$$

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

これらのマルコフ遷移確率行列が求められれば、ト

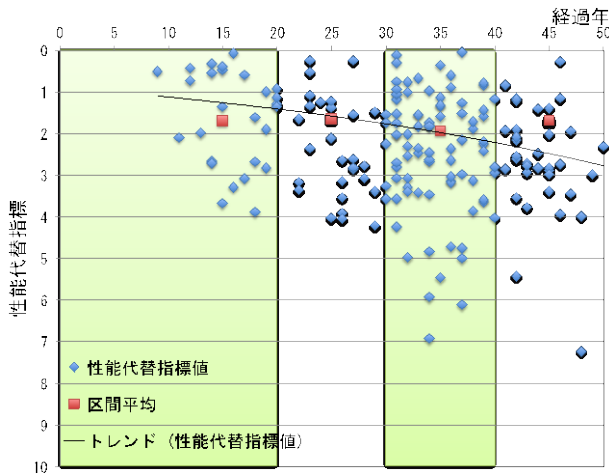


図-14 トンネル覆工における性能代替指標値と分布の中心

トンネル覆工において性能照査区分値の変動が表されることとなり、保有性能が限界状態以下になる時期を予測して補修・補強をすることにより性能を回復させる予防保全が図られる。

3.4 点検結果によるマルコフ遷移確率の同定

本研究では、トンネル覆工の性能代替指標として、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遊離石灰のモニタリング項目を採用しており、これらより性能照査区分におけるレイティング値のマルコフ遷移確率行列を求める方法を以下に記述する。

(1) 性能代替指標の平均値とその分布¹⁰⁾

一般にトンネル覆工の劣化による性能照査区分の遷移は、経過年数と性能代替指標（劣化度・性能関数） $Q(t)$ で表され、図-13のように示される。

一方、トンネル構造物の性能代替指標において全体の劣化傾向の不確実性を考慮すると、経過年数 t_i に対して $Q \geq 0$ であるため、幾何ブラウン運動式(8)で表される。

$$dQ(t) = \beta Q(t)dt + \sigma Q(t)dW(t) \dots \dots \dots (8)$$

β : トレンド(平均劣化率)

σ : ボラティリティ (分散)

また $W(t)$ はウィナー過程であり、① $W(t)$ は連続で $W(0)=0$ 、② $W(t)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従う。

一方、トンネル覆工において補修・補強が時刻 t_i^* に実施され、覆工の性能代替指標が Q_1^* に改善された場合に直前の性能代替指標(臨界値)を Q_2^* とすると、ブラック・ショールズの幾何ブラウン運動(伊藤型確率微分方

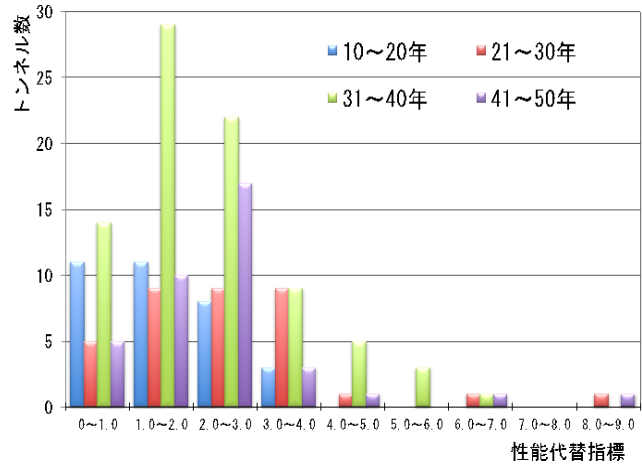


図-15 トンネル覆工における性能代替指標の期間ごとの分布

程式) は式(9)となる。

$$dQ(t) = \beta Q(t)dt + \sigma Q(t)dW(t) + \sum_{i=1} \{Q_1^* - Q_2^*\} l(t - t_i^*) \dots (9)$$

ここで、 l はディラック測度であり $t = t_i^*$ のときのみ確率測度 1 を与え、それ以外のときは確率測度 0 を与える。

ここで、トンネル覆工における性能代替指標の分布 $P(t_i)$ は対数正規分布で表され、式(10)、(11)の一般解が得られる。

$$Q(0) = Q_0 \dots \dots \dots (10a)$$

$$Q_2^* = Q_1^*(t = t_i^*) \dots \dots \dots (10b)$$

$$Q(t) = Q(t_i^*) e^{(-\beta - \sigma^2/2)(t-t_i^*) - \sigma(W(t) - W(t_i^*))} \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 $t_i^* < t < t_{i-1}^*$

ここで、北海道開発局が保有するトンネル管理台帳の補修・補強履歴より、覆工が補修・補強が施されなかった場合の性能代替指標値(補修技術者のアンケートより)を推定して、以降の同定解析に用いている。

北海道で実施された 255 箇所(重複点検記録を含む)のトンネル覆工の点検結果に基づいて、幾何ブラウン運動(伊藤型確率微分)方程式(11)の係数 $Q(t_i^*)$ を最尤法により同定する。

255 箇所のトンネル覆工の点検結果より求められたトンネル覆工における連続的な性能代替指標値の平均曲線とその分布の中心を図-14 に示す。

ここで、◆は点検結果より算出した各トンネル覆工の性能代替指標値、□は解析期間(10~20年、21~30年、31~40年、41~50年)における性能代替指標値の区間平均値である。性能代替指標値のトレンド曲線と各解析期間の区間平均がほぼ一致していることより、次節では期間毎の性能代替指標の統計的な推移傾向を考え

る。

また、図-15 に示すように実際のトンネル覆工の性能代替指標の分布は理論通りに対数正規分布を示しており、加えて経年に伴いその分布は広がる傾向を示している。

(2) マルコフ遷移確率行列の点検結果による同定

トンネル覆工の性能代替指標値は、順次進行（悪化）する特性を示すものと仮定し、本来ならば性能代替指標の遷移過程の統計的なモデル化が必要であるが、まだ点検結果が十分でなく、遷移過程モデルの精度や安定性に疑問が生じる。そのため本研究では、図-14 に示したトンネル覆工 255 箇所における性能代替指標値の分布（数）から式(12)に示す数上げ法¹⁷⁾により、トンネル覆工における性能照査区分におけるマルコフ遷移確率行列を同定する。

$$P_{ij} = \frac{\text{count} \{ X(t_A) = i \wedge X(t_B) = j \}}{\text{count} \{ X(t_A) = i \}} \dots\dots\dots(12)$$

count{ } ; { }内の条件が成立するトンネル数

$X(t_A) = i$; 時刻 t_A で点検データより求めた評価値

ここで、本研究では各期間の分布（数）および性能代替指標値の平均よりマルコフ遷移確率行列の同定（同ランクもしくは1ランクの推移のみ）を10年（1単位）で試み、表-4 に示す結果が得られた。

ここで表-4 より、矢板工法のトンネル覆工において性能照査区分 S の状態が10年後に性能照査区分 B に遷移する確率は0.3、性能照査区分 S のままでいる確率は0.7である。また性能照査区分 B の状態が10年後に性能照査区分 A に遷移する確率は0.2、性能照査区分 2A に遷移する確率は0.05、性能照査区分 B のままでいる確率は0.75である。

この結果は、トンネル覆工の点検結果に基づいた性能照査区分（数値評価値）におけるマルコフ遷移確率行列が、任意の時間間隔に対して同定可能であることを示している。

5. まとめ

5.1 覆工コンクリート劣化損傷度の評価技術の開発

本研究では常時微動に着目し、トンネル覆工コンクリートにおける振動特性成分と劣化の関係性を明らかにするため、廃トンネルを対象とし常時微動を測定し、そのデータ解析を行った。

その結果、不健全な断面では卓越振動数が低く、健全な断面では高い特性が確認され、両断面の差異より常時微動の振動特性と覆工コンクリートの劣化には、

表-4 覆工における性能照査区分の
マルコフ遷移確率行列

判定区分	S	B	A	2A	3A
S	0.7	0.3	0	0	0
B	-	0.75	0.2	0.05	0
A	-	-	0.7	0.2	0
2A	-	-	-	0.65	0.35
3A	-	-	-	-	1.0

なんらかの関係性があると評価できた。また、測定記録に含まれた高周波ノイズは、カルマンフィルタを用いて振動特性の成分を分解し、主要な成分を抽出することで、明瞭な差異を確認することが可能となる。

さらに、ARモデルを用いた劣化判定の試みでは、時系列構造から健全部と不健全部におけるAR係数を求めた。不健全な断面はAR係数値の高い位置で直線に近い分布を示し、健全な断面ではAR係数値の低い位置で曲線の分布特性を示したことから、不健全な断面と健全な断面の区別が分布特性及び分布域から明確に区別することができ、劣化指標の活用に期待ができるものと推察する。

本研究で得られた結果からは、常時微動による損傷検出の可能性が示唆されたが、測点2-3Lのように一部分に損傷があったとしても、概ね健全な状態として分析されるケースがある。さらに不可視部分が連続した場合には、同様な結果となることが否定できない。

しかしながら、分析法等の結果が得られていることから、長期的展望として、正確な常時測定手法の考案、及びノイズ処理における拘束条件の特化について考慮した後、劣化指標としたAR係数の自動判別システムの構築を行い、トンネル覆工コンクリートのモニタリング技術等に活用されることを期待する。

5.2 覆工コンクリートの劣化予測技術の提案

矢板工法で施工された寒冷地のトンネル覆工における性能照査型の維持管理を目指して、各性能照査区分を性能代替指標の評価値から定量的に求める手法、および覆工の劣化進展を予測する手法の提案を行うために、北海道内のトンネル覆工より得られている定期点検結果を用いて検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 技術者に対するアンケート調査と AHP 解析を用いて、レイティングされた各性能照査区分に対する疑似点検での判定区分との比較より、性能代替指標値の範囲を定量的に示すことは可能である。
- 2) トンネル覆工における性能代替指標値の分布の時間的な遷移より、マルコフ遷移確率行列を同定で

きる方法を提案し、疑似点検対象覆工のデータでその有用性を示した。

- 3) 点検結果の活用や現時点からの劣化進行、任意間隔での劣化進行の予測を遷移確率で表現することより現実的な予防保全に基づいた維持管理が可能となる。

参考文献

- 1) 中島 章典, 中野 代美, 中村 晋: 常時微動に基づく独立橋脚および橋梁完成系の振動特性の把握, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp.305-314, 2010, 3.
- 2) 池田 芳樹, 鈴木 芳隆, 鈴木 康嗣, 安達直人, 野澤 貴: 常時微動応答のパワースペクトル密度関数行列の特異値分解を用いた実建物の損傷検知, 日本建築学会技術報告集 第16巻 第32号, 69-74
- 3) 向坊 恭介, 林 康裕, 森井 雄史, 飯場 正紀: 常時微動計による中層鉄筋コンクリート造建物の振動特性の分析, 建築学会技術報告集, 第13巻, 第25号, pp.43-48, 2007
- 4) 秦 吉弥, 一井 康二, 加納 誠二他: 常時微動計測に基づく高速盛土の入力地震動推定法の検討, 土木学会論文集F, Vol.65, No. 4, pp. 529-541, 2009
- 5) 八木 茂治, 飛田 潤ほか: 常時微動計測による低層RC構造物の伝達関数に地盤・建物動的相互作用が及ぼす影響, 構造工学論文集 46B, pp.435-444, 2000
- 6) 蔣 宇静, 谷川 征嗣ほか: 常時微動測定に基づくトンネル覆工の健全度評価手法の提案, トンネル工学報告集20号, pp.205-209, 2010-11
- 7) 神田 径, 藤井 郁子: カルマンフィルターによる火山性磁場変動の検出, 京都大学防災研究所年報第46号 B. 2003
- 8) 北側 源四郎: 2007年2月24日, 時系列解析入門, 岩波書店, pp.163-172
- 9) 土木学会: 性能規定に基づくトンネルの設計とマネジメント, トンネルライブラリー第21号, 2009.
- 10) 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. 66, pp. 61-68, 2010.
- 11) Ang, A. H-S. and Tang, W. H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II - Decision, Risk, and Reliability, John & Sons, Inc., pp. 112-140, 1984.
- 12) Lemer, A.C. and Moavenzadeh, M.: Reliability of Highway Pavements, Highway Research Record 362, pp.1-8, 1971.
- 13) McCullough, B.F.: State of the Art in predicting the Probabilistic Re-sponse of Pavement structures, Transportation Research Record 757, pp.17-26, 1976.
- 14) Feighan, K.J., Shahin, M.Y. and Sinha, K.C.: A Dynamic Programming Approach to Optimization for Pavement Management Systems, Pro-ceedings of Second North American Conference on Managing Pavements, Vol.2, pp.195-206, 1987.
- 15) Cook, W.D. and Kazako, A.: Pavement Performance Prediction & Risk Modeling in Rehabilitation Budget Planning: A Markov Approach, Pro-ceedings of Second North American Conference on Managing Pavements, Vol.2, pp.63-75, 1987.
- 16) 武山泰, 嶋田洋一, 福田正: マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム, 土木学会論文集, 第420号, V-13, pp.135-141, 1990.8.
- 17) 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.

DEVELOPMENT OF DETERIORATION PREDICTION TECHNOLOGY AND INSPECTION TECHNOLOGY OF TUNNEL LINING COVERED WITH WATER LEAKAGE PREVENTION PLATE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2013

Research Team : Structure Research Team,
Cold Region Technology Promotion Division

Author : NISHI Hiroaki, KONNO Hisashi
OKADA Shin-ya, SATO Takashi
SAWAMATSU Toshikazu
YOKOYAMA Hiroyuki, NAKAMURA Naohisa,
TAKADAMA Namio
MIYAMOTO Syuji

Abstract: In order to maintain the performance of the tunnel structure, knowing the current state to perform periodic inspection is important. However, in locations where leakage preventing plate is installed in the concrete lining, current state cannot be grasped. The future, in order to maintain proper tunnel structure, techniques for assessing the degradation of damaged concrete lining which can not be visually inspected directly is required.

In this study, to develop a technology capable of evaluating the degradation damage, including the invisible part of the existing tunnel lining concrete. For technology development to estimate the health of the concrete lining, I will analyze the microtremor transmitted to the lining surface. We propose a deterioration prediction technology of lining that is based on a tunnel inspection results of the numerical values. By the research results, and contributes to the long life of the tunnel structure and the reduction of the LCC of the tunnel structure is expected.

Key words: tunnel management, leakage prevention plate, deterioration prediction, tunnel maintenance system (TMS), repair of preventive maintenance , business plan