

一般 26 積雪寒冷地における既設トンネルの劣化特性と対策に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 20～平 22

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、佐藤京、澤松俊寿、横山博之、高玉波夫

【要旨】

社会資本を取り巻く環境は、ストックの増加、老朽化、厳しい財政状況など近年急激な変化が見られる。限られた財源と管理体制の下で、効率的・効果的な社会資本の維持管理を行い、既存ストックを長期にわたり安全で快適な状態で利用者に提供することが要求されている。特に、道路トンネルは一般的に地形の急峻な所にある場合が多く、通行が困難となった場合に適切な迂回路がなく、交通に与える影響が非常に大きい。このため、道路トンネル維持管理はきめ細かい配慮が必要である。さらに、北海道における構造物には凍害・塩害等の劣化因子及び複合的劣化の影響と考えられる劣化損傷が顕在化してきており、地域気象環境を考慮した配慮も必要である。

今後、既存ストックを有効に活用し、構造物の長寿命化に向けた取り組みをするためには、これらの影響を考慮した効率的かつ計画的な維持管理を行わなければならない。そこで、積雪寒冷地における既設トンネルの劣化損傷因子の影響度の検証や劣化度評価手法、対策工法の開発等が緊急の課題であると考え、北海道におけるトンネル構造物の定期点検結果等に基づく雪寒地特有の劣化因子の分析や劣化度評価手法、現場状況を考慮した補修補強工法の提案を行う検討を実施してきた。

その結果として、トンネルライフサイクルマネジメントシステム構築の基本となる、北海道の国道トンネル定期点検結果を用いた健全度の数量化をはかり、健全度評価を実施するとともに実点検結果を用いて評価した劣化予測式を同定した。

キーワード：トンネル維持管理、ライフサイクルマネジメント、健全度評価、劣化予測

1. はじめに

北海道における構造物には凍害・塩害等の劣化因子及び複合的劣化の影響と考えられる劣化損傷が顕在化してきている。厳しい財政状況の下、既存ストックを有効に活用していくためには、構造物の長寿命化に向け、これらの影響を考慮した効率的かつ計画的な維持管理を行わなければならない。

道路トンネル構造物に関しても例外ではなく、上記劣化因子の影響度の検証や劣化度評価手法、対策工法の開発等が緊急の課題である。

本研究課題では、北海道におけるトンネル構造物の定期点検結果等に基づく雪寒地特有の劣化因子の分析や劣化度評価手法、現場状況を考慮した補修補強工法の提案を行う。

2. 調査研究の手法

2.1 定期点検結果等に基づく雪寒地特有の劣化因子の抽出及び調査

現在の道路トンネルの維持管理は、道路トンネル維持管理便覧（日本道路協会 平成 5 年 11 月）を基本とし、特にトンネル本体工の変状による利用者被害を防止する

ための定期点検の実施体制や点検および記録方法を示した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）により実施されている。利用者被害を防止するための点検着目点は、覆工や坑門等の表面での確認が出来る箇所についてである。

本研究では、この箇所に対して変状種類ごとに、1; ひび割れ、2; 浮き・剥離、3; 漏水、4; 目地ズレ、5; 豆板・空洞、6; 遊離石灰の 6 種類を基本とし、覆工のスパンを 1 単位として整理するとともに、変状展開図などの図面の CAD 化も実施した。

これらのデータを基に、北海道にある国道トンネルの現況を明確化した。また、劣化損傷から想定される主要因に関する考察を実施した。

2.2 雪寒地における劣化度評価手法の検討

北海道では、図-1 に示すように昭和 30 年代後半から、道路網の拡充に伴う山岳トンネル等の整備が進められているが、建設から 30 年以上を経過したトンネルでは凍害や塩害など北海道特有の環境劣化の影響を受けてトンネル覆工などの老朽化が進行している。今後は、積雪や寒冷地特有の劣化要因を考慮した性能水準の低下防止やそ

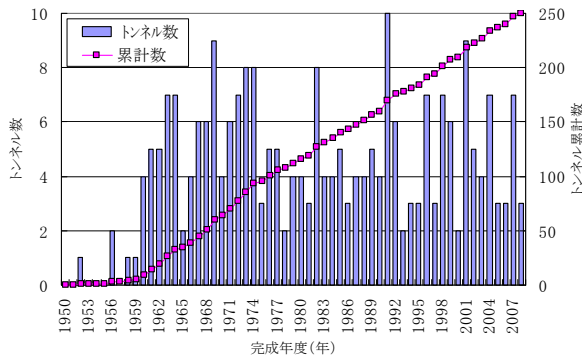


図-1 竣工年別トンネル数

の保持が急務となっている。

そこで公共構造物に対する予防保全の考え方により、トンネルの計画的な維持管理と延命対策を行う、ライフサイクルマネジメント (LCM: Life Cycle Management) 等の検討が行われている。

LCMにおけるトンネル構造物の劣化と補修、補強の関係は、その保有性能、機能が経年劣化などである水準以下になると予測された場合には補修、補強を実施して性能・機能を回復させて、トンネル構造物の長寿命化を計る。

したがって、寒冷地のトンネル構造物において LCM を合理的、効率的に実施していくためには、覆工における現状の劣化度を把握し、加えてその将来予測を正確に行うことがきわめて重要である。

しかし、トンネル覆工における性能水準の劣化推移の把握もしくは推定は非常に難しく、加えてその将来予測の研究が少ないのが現状である。

本調査研究では、トンネル定期点検結果を基に、トンネル覆工の劣化度評価手法を提案する。

2.2.1 点検結果の数量化に関する検討

二次覆工の点検データは、様々な要因が複合した劣化現象と考えられるため、その定量的評価は非常に難しく、点検技術者の主観的判断に委ねられている。

そこで、2.1で整理・蓄積した、1;ひび割れ、2;浮き・剥離、3;漏水、4;目地ズレ、5;豆板・空洞、6;遊離石灰の劣化現象を点検技術者に対して実施した重みに関するアンケート調査により数量化を試みた。

2.2.2 劣化予測式の同定

トンネル構造物における劣化度の評価・予測を行うには、1)トンネル群全体の平均的な劣化を対象とする場合、2)個別のトンネルにおける具体的な劣化を対象とする場合がある。

1)は膨大な点検データなどの情報から劣化過程の背後に存在する規則性をモデル化する統計的な手法であり、加えて劣化過程の不確実性を考慮するかしないかで確定的と確率的アプローチに分けられる。

2)は劣化過程やメカニズムを直接モデル化する物理的な手法が用いられる場合が多い。

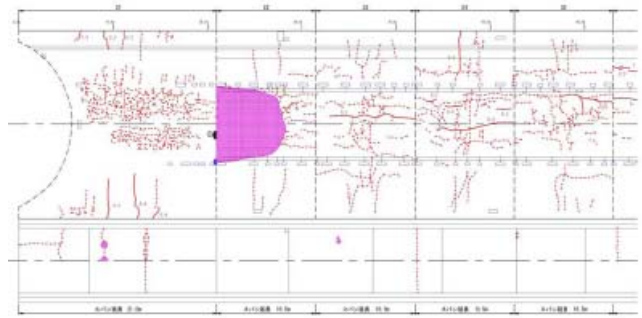


図-2 トンネル点検データの CAD 化の例

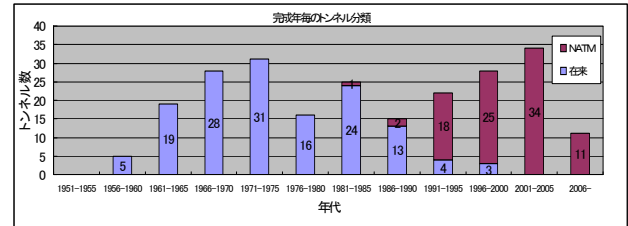


図-3 トンネル建設工法による完成年代とトンネル数

また、不確実性を考慮した確率的手法において、①点検データを平均化してマクロ的な劣化現象を対象とする集計的手法と②点検データから個別 (ミクロ的) の劣化現象を対象とする非集計的手法が挙げられる¹⁾。

本研究では、北海道開発局が平成 15 年度より実施しているトンネル点検のデータベース化を図り、それらを基に寒冷地トンネルの維持管理を目的とした劣化過程の同定とその長期予測を試みた。

2.3 雪寒地における現場状況を考慮した補修補強法、対策工選定法の検討

トンネル覆工に対する適切な補修時期および最適な補修工法の選定等の意志決定のためのアンケート調査を実施した。また、補修・補強後のトンネル覆工における機能・性能との関係を明確にするためにアンケート調査による評価を試みた。

3. 調査研究の成果

3.1 定期点検結果等に基づく雪寒地特有の劣化因子の抽出及び調査

対象とする 6 種類の変状種類について、変状展開図など図-2 に示すように CAD 化を実施し、スパン毎に変状を整理した。

図-3 には、現況調査対象とした平成 20 年度点検までの記録 209 トンネル (矢板工法; 135、NATM; 74) の各工法による建設年代別トンネル数を示す。これらのデータを基に地域や工法などの条件区分を設定しながら、二次覆工の点検データの展開図に記された、ひび割れ、浮き・剥離、漏水、目地ズレ・開き、豆板・空洞、遊離石灰などの劣化損傷に関する整理を行い、積雪寒冷地にあるトンネルの現状を明確にした。また、劣化損傷から想

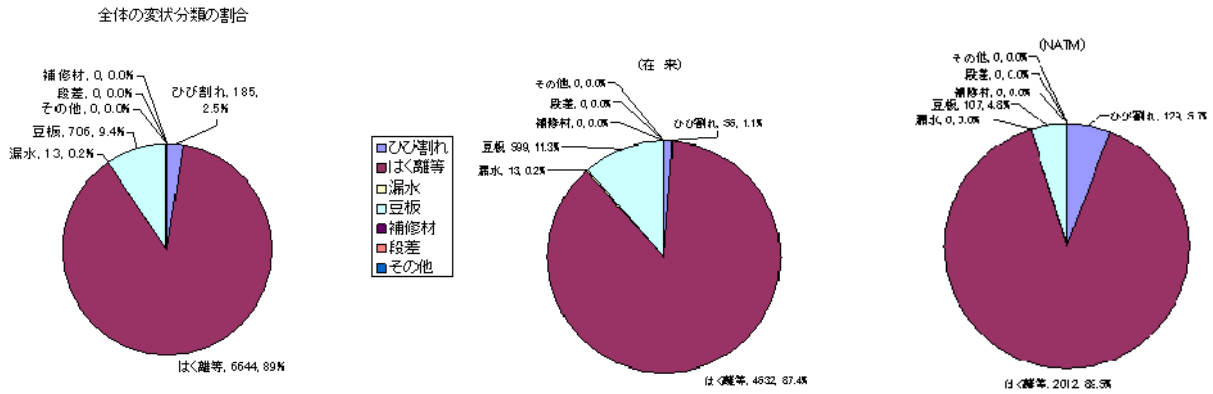


図-4 変状分類の割合 (左; 全体、中; 在来工法、右; NATM)

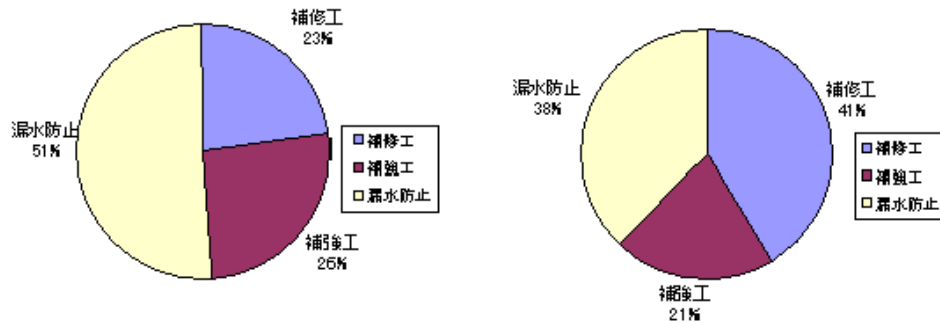


図-5 補修、補強工法別割合 (左; 在来工法、右; NATM)

定される主要因に関する考察を実施した。

その結果、図-4 に示すように覆工の損傷は、はく離等（コールドジョイント、圧ぎ、浮き・剥離、剥落、鉄筋露出）が最も多く見られた。また、積雪寒冷地での第三者被害に関わる漏水については、比較的少ないことが示された。これは、図-5 に示すように漏水防止対策が多く実施されていることに起因すると考えられる。

3.2 雪寒地における劣化度評価手法の検討

3.2.1 点検結果の数量化に関する検討

アンケート調査結果より、各点検項目の数量化を試みた。ここでは代表として、1; ひび割れ、2; 剥離・剥落に関する評価結果を示す。

(1) 1: ひび割れの定量化

トンネル覆工におけるひび割れの評価は、ひび割れを幅 0.3mm 以上と 0.3mm 未満、それぞれのひび割れ延長、ひび割れの交点の数（0.3mm 以上が関連するものと 0.3mm 未満同士の場合とを区別）として、また、ひび割れのパターンを表-1 のように場合分けして重み付けを行って定量化を試みた。また、交差する相互 0.3mm 未満同士に関しては、第三者被害の危険はそれほど高くないことからウエイトは低く、0.3mm 以上が関連する交点ではウエイトは高く、表-2 のように設定した。

なお、ウエイトはトンネル点検技術者、管理技術者などのアンケート調査結果より設定している。

表-1 ひび割れパターンの分類

種別	ひび割れの条件	ひび割れパターン
A	0.3mm 以上	短いひび割れ散布
B		長いひび割れ (クロス有り)
C		大きな三角、四角形
D		特定部分が密 (クロス有り)
E	すべてのひび割れ	その他 (平凡)
F	0.3mm 未満	短いひび割れ散布
G		長いひび割れ (クロス有り)
H		大きな三角、四角形
I		特定部分が密 (クロス有り)

表-2 ひび割れのウエイト (交点ウエイト)

交点の種類	ウエイト
0.3mm 未満同士	0.003
0.3mm 以上が関連	0.1

劣化評価値 = 区間比 × 補正係数 + 交点数 × 交点ウエイト
 区間比; 観察面積 / 覆工スパン面積
 補正係数; ウエイト I × ウエイト II × 打音ウエイト
 ウエイト I; 変状種類別の係数 (重み)、ひび割れ長さ × ひび割れパターンウエイト
 ウエイト II; 発生原因、位置、状態による係数 (材料劣化; 1.5)
 打音ウエイト; 打音検査による係数 (1.0)

表-3 浮き・剥離のウエイト

項目	大きさ	発生箇所	ウエイト
剥離	小	アーチ	42
		側壁	21
	大	アーチ	63
		側壁	31.5
剥落	小	アーチ	14.7
		側壁	7.35
	大	アーチ	21
		側壁	10.5

(2) 2:剥離・剥落の定量化

トンネル覆工における剥離・剥落は、一般にその面積が劣化度の指標となるが、単純な面積和のみではなく、表-3 に示す浮き・剥離箇所によるウエイトを付加した式(1)により設定する。

$$V_{FC} = R_F \times W_F + R_C \times W_C \dots (1)$$

V_{FC} :剥離・剥落評価値

R_F :剥落区間比 (剥落面積/覆工スパン面積)

W_F :剥落ウエイト

R_C :剥離区間比 (剥離面積/覆工スパン面積)

W_C :剥離ウエイト

3.2.2 劣化予測式の同定

(1) トンネルの経過年数による劣化評価値

在来工法で施工されたトンネル (180 箇所) 覆工における時間的な劣化曲線の平均的なトレンドを把握する目的で、用いた点検データの経過年数 (10~20 年、10~30 年、10~40 年) を変えて同定した結果を図-6(a)~図-6(c)および表-4 に示す。

図-6(a)~図-6(c)および表-4 より、トンネルの経過年数にともない幾何ブラウン運動方程式の平均的なトレンド (覆工の劣化度) の低下は大きくなる傾向を示しており、加えて用いる点検データの経過年数とともに式(2)における係数部は大きく、また指数部は小さく、規則的に変化していることが確認出来た。

$$Q(t) = Q(t_i^*) \exp \left\{ -\beta - \frac{1}{2}\sigma^2 \right\} \{t - t_i^*\} - \sigma(W(t) - W(t_i^*)) \dots$$

$$\dots t_i^* < t < t_{i-1}^* \quad (2)$$

ここで、

$Q(t)$:劣化度

$Q(t_i^*)$:補修・補強実施後の健全度

β :覆工の平均劣化率 (トレンドもしくはドリフト)

σ :分布

t, t_i^* :経過年、補修・補強間隔年

$W(t)$:経過年に対するウイナー過程

$W(t_i^*)$:補修・補強間隔年に対するウイナー過程

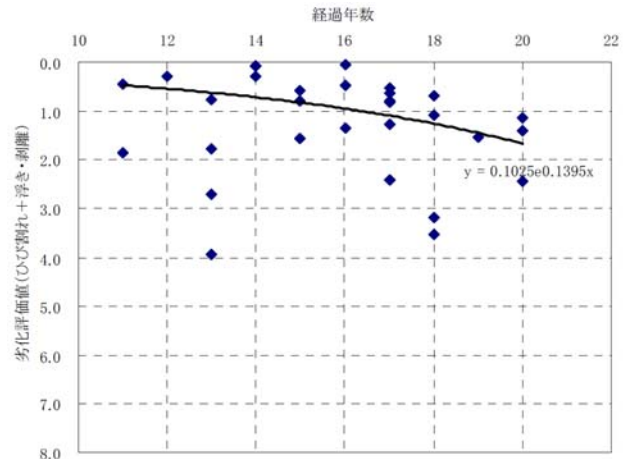


図-6(a) トンネル覆工の劣化評価値 (~20 年)

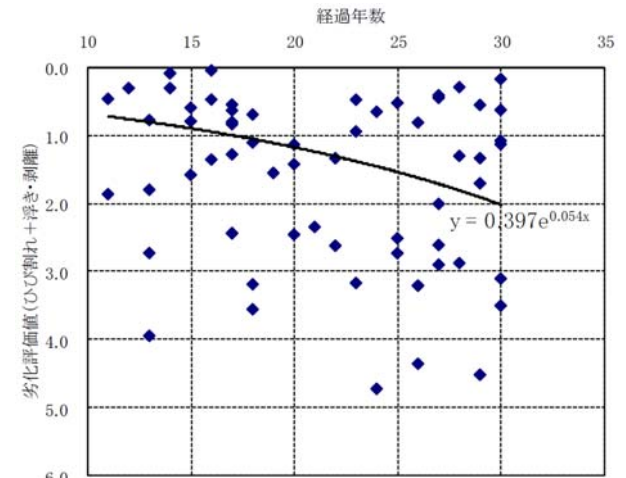


図-6(b) トンネル覆工の劣化評価値 (~30 年)

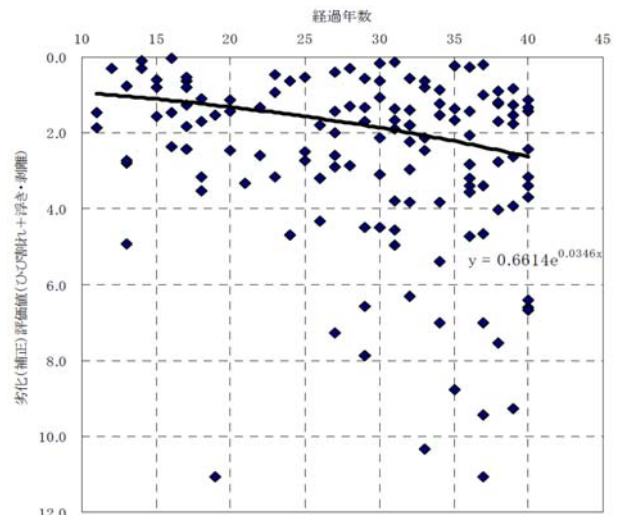


図-6(c) トンネル覆工の劣化評価値 (~40 年)

表-4 劣化予測式(2)の係数部、指数部の同定

データ年数	係数部	指数部
10~20 年	0.1025	0.1395
20~30 年	0.397	0.054
30~40 年	0.6614	0.0346

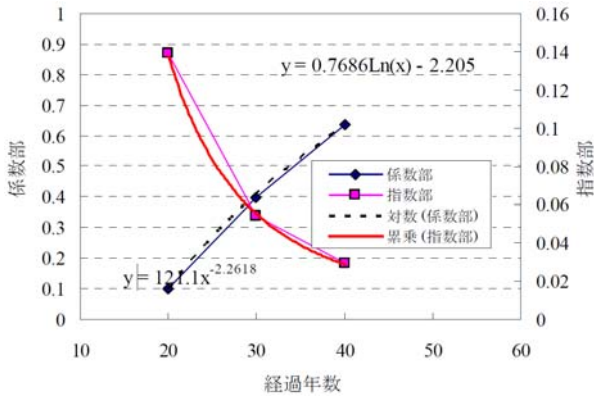


図-7 覆工の劣化予測式の定数 (係数部、指数部)

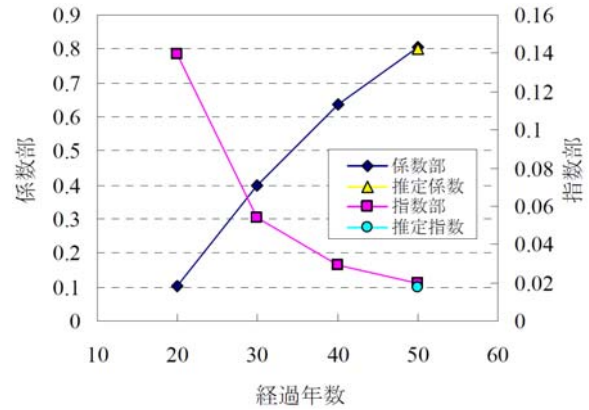


図-8 覆工の劣化予測式の定数予測値 (係数部、指数部)

(2) トンネル覆工における長期劣化過程の予測

トンネル覆工における点検データの経過年数ごとの幾何ブラウン運動方程式の平均的なトレンド (劣化曲線) の係数部と指数部を示すと表-4, 図-7 に示すように規則的に変動しており, この係数部と指数部の時間推移を回帰することにより, 劣化曲線の推移予測を行なう。

ここで予測回帰式は, ベイズの情報量基準に基づいて最適な累乗式を選定した。

次に, 回帰式より 10 年後 (10~50 年) の係数部と指数部を推定したものと実際の点検データより同定したものを図-8 に示している。

ここで, 図-8 は, 点検データの経過年数 (10~20 年, 10~30 年, 10~40 年) による劣化曲線の係数部 (◇) と指数部 (□), これより 10 年後 (10~50 年) の係数部と指数部を回帰した曲線 (点線), および実際の点検データより求めた劣化曲線の係数部 (△) と指数部 (○) を示している。次に, 得られた回帰式から 10 年後の係数部と指数部を求めて幾何ブラウン運動方程式の平均的なトレンド (10~50 年) を予測したもの (■), 現在の同定値 (10~40 年) より推定したもの (▲), および実際の点検データ (◆) と求めた幾何ブラウン運動方程式の平均的なトレンド (劣化曲線) を図-9 に示す。

図-9 より, 幾何ブラウン運動 (確率微分) 方程式の解の係数 (係数部, 指数部) の経年変化を点検データより回帰し, その変化を予測することにより, トンネル覆工における劣化曲線 (トレンド) の将来予測を精度良く行うことが可能であることが分かった。

3.3 雪寒地における現場状況を考慮した補修補強法、対策工選定法の検討

トンネル覆工に対する適切な補修時期および最適な補修工法の選定 (交通確保や通行止めなどの間接的影響も考慮) のため, 加えて補修・補強後のトンネル覆工における機能・性能との関係を明確にするために, アンケート調査による評価を試みている。

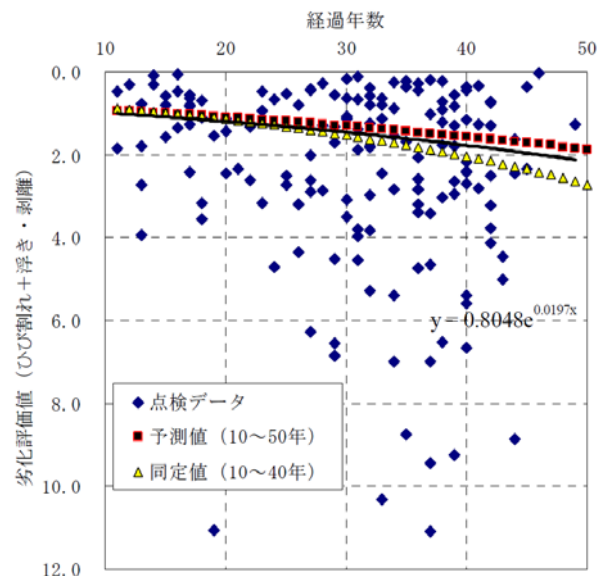


図-9 覆工の劣化における予測値

(1) 補修・補強の基準

変状などトンネルの劣化現象に対する補修・補強対策として, 覆工のコンクリート片などによる利用者被害を未然に防ぐための円滑な対応が求められるようになり「道路トンネル維持管理便覧:平成5年 日本道路協会」の定期点検の内容を補完する目的で「道路トンネル定期点検要領 (案):平成14年4月 国土交通省道路局国道課」では近視目視を主体とした定期点検の方法・内容が規定されている。

さらに上記要領の内容を受けて, 独立行政法人土木研究所から「対策マニュアル (案)」が発刊されている。

トンネル覆工における劣化対策の種類としては, 変状等が生じたトンネルの各部分を正常な機能を発揮するよう補修を目的に行う工法, 変状などが進行し続けた場合やトンネル構造物に悪影響を及ぼす規模や範囲が著しく大きな場合などに用いられる大規模な対策に大別でき, これらの資料から抽出した道路トンネルにおいて一般に実施される対策工法を表-5に示す。

(2) アンケート調査による補修・補強の選定^{2),3)}

道路トンネルの覆工コンクリートに対する適切な補修時期および最適な補修工法の選定（交通確保や通行止めなどの間接的影響も考慮）を目的とし、加えて補修後のトンネル覆工における機能・性能との関係を明確にするために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; 遊離石灰の6項目に対する補修・補強工法の選定やその後の評価についてトンネル点検技術者および一般の土木技術者へのアンケートより求めた結果を表-6に示す。

表-6に示すように1;ひび割れ:保護工法, 2;浮き・剥離:吹付け工法, 3; 漏水:面導水, 4; 目地ずれ・開き:目地補修, 5; 豆板・空洞:注入工法, 6; 遊離石灰:除去などの対策工法が選定されており、また補修後の二次覆工における劣化評価値の定量的なランクアップ量も得られているが、漏水防止工などを施した個所において二次覆工の点検が継続できなくなるとの指摘も得られており、点検手法や劣化状況の評価方法が今後の課題となる。

4. まとめ

4.1 定期点検結果等に基づく雪寒地特有の劣化因子の抽出及び調査

北海道における国道トンネルの点検データを用いて、積寒地特有の劣化因子に関して調査を行った。その結果として、トンネル点検の着目損傷区分では、その特定が出来なかったものの、補修・補強対策として、漏水防止工が多く施工されていることが明確となり、第三者被害に影響の高い損傷対策については、地域特有の傾向があるものと思われる。

ただし、非常に多くのトンネルで漏水対策を実施しているため、点検時に覆工の目視評価が不完全となり、点検対象のトンネル健全度が特定出来ないなどの課題解決が必要である。

4.2 雪寒地における劣化度評価手法の検討

4.2.1 点検結果の数量化に関する検討

二次覆工の点検項目に対して、アンケート調査等により、劣化損傷について重要性等を加味した数量化を実施した。

その結果として、損傷や変状状態などの数値化が可能となった。また、二次覆工の点検データのデータベース化が図られ、北海道のトンネルにおける性能水準の評価が可能となった。

4.2.2 劣化予測式の同定

本研究では、北海道内で得られた国道トンネルの点検結果が多く得られたことにより、確率論的手法における集計的方法を劣化過程の同定に採用し、長期予測を試みた。

その結果、建設年代（経過年数）に伴い劣化していく

表-5 トンネルの劣化現象に対する主な対策工法

要求性能	安全性能	第三者影響度に関する性能
ひび割れ	裏込め注入工	はつり落とし工
	吹付けコンクリート	ひび割れ注入工
	ロックボルト	当て板工
	内巻きコンクリート	
	断熱工	
	インバート工	
	部分改築工	
浮き・剥離	裏込め注入工	はつり落とし工
	吹付けコンクリート	断面修復工
	内巻きコンクリート	ひび割れ注入工
漏水	導水樋工	導水樋工
	溝切り工	溝切り工
	止水注入工	止水注入工
	防水パネル工	防水パネル工
	水抜きボーリング工	水抜きボーリング工
	水抜き孔	水抜き孔
	排水工	排水工
目地ズレ・開き	断熱工	
変形・沈下	ロックボルト	
	断熱工	
	グラウンドアンカー	
	インバート工	
	部分改築工	
	地山注入工	

表-6 トンネル覆工の劣化と選択される主な対策工法

劣化現象	補修・補強		損傷 (多)		損傷 (少)	
	1	2	1	2	1	2
①ひび割れ	1保護工法	2注入工法	1充填工法	2注入工法		
②浮き・剥離	1吹付け工法	2繊維シート	1浮き剥離処理	2繊維シート		
③漏水	1面導水	2線導水	1線導水	2面導水		
④目地ズレ・開き	1目地補修	2充填工法	1劣化部処理	2目地補修		
⑤豆板・空洞	1注入工法	2劣化部処理	1充填工法	2その他		
⑥遊離石灰	1除去	2無処理	1無処理	2除去		

傾向を示した。また、構造物の健全度低下モデルに伊藤型確率微分方程式を適用し、時間的劣化推移を求めることが出来るとともに、採用した確率微分方程式の係数部、指数部も経過年数に伴った変化をすることが示され、劣化モデルの一般解における係数の時間変化を推定して、その傾向を予測することにより、劣化評価値の長期予測を精度良く行うことが可能となった。

4.3 雪寒地における現場状況を考慮した補修補強法、対策工選定法の検討

本研究において、以下のことが分かった。

- ・二次覆工において、損傷や変状に対する補修・補強工法が選定される。
- ・補修・補強後の二次覆工における評価値も定量的に得られた。
- ・漏水防止工などを施した箇所において二次覆工の点検が継続できなくなり、劣化評価を行うために点検手法を開発することが重要である。

参考文献

1) 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.
 2) 山田隆昭, 佐野信夫, 馬場弘二, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫:トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準, 土

木学会論文集F, Vol. 63, No. 1, pp. 86-96, 2007.

3) 土木学会: トンネルの維持管理トンネル・ライブラリー第14
号, 丸善, pp. 27-31, 2005.