

山岳トンネルにおける劣化予測手法の検討に関する一考察 A Study on prediction method for deterioration of Mountain Tunnels.

山田 浩幸¹・駒村 一弥²・山本 雅広³・田中 康弘⁴

Hiroyuki YAMADA, Kazuya KOMAMURA, Masahiro YAMAMOTO, Yasuhiro TANAKA

The number of tunnels constructed from mid-1950's to mid 1960's which 50 years or more passed after constructions will increase rapidly. These tunnels occupy 20 percent of whole and total length is 540 km.

Maintenance management to mountain tunnel has been carried out in deformed parts symptomatically so far, but the social concern about the maintenance management and reconstruction of a road is also increasing while public investment is controlled.

The mountain tunnel has the feature that plain concrete which is the main structure is non-line structure and the tunnel itself is unable to be updated easily because of various conditions. The rational and effective maintenance management of a tunnel structure which will increase rapidly has been the significant subject.

In this study, the present condition of the deterioration prediction method of the present mountain tunnel is investigated and analyzed. In addition, the health evaluation of a model tunnel based on a real site is tried, and the evaluation method and an evaluation index are proposed.

Key Words : mountain tunnel, maintenance and repair, health evaluation, evaluation index, deterioration prediction method, asset management

1. はじめに

道路におけるトンネル構造物に関しては、建設後、50年以上経過したものが、全体の20% (延長: 540km) を占め、今後急速に増えていくことが想定される。これまでの山岳トンネルに対する維持管理は、不具合箇所に対症療法的に対策を実施してきたが、公共投資が抑制される中で、道路の維持管理・更新に関する社会的な関心も高まっている。

山岳トンネルは、主たる構造物である覆工コンクリートが無筋構造であることや、種々の条件により、トンネルそのものを容易に更新できないといった特徴を持ち、今後急速に増加するであろうトンネル構造物の合理的かつ効果的な維持管理が重要な課題となっている。

本研究では、現状の山岳トンネルの劣化予測手法の現状を調査分析するとともに、実トンネルに基づいたモデルトンネルの健全度評価を試行し、既存の評価基準をふまえた上で、劣化度判定の基本となる指標に関する検討を行った。

本論文は、検討結果に基づき、新しい評価手法 (レーティング方法)、評価表、および評価指標に関して提案するものである。

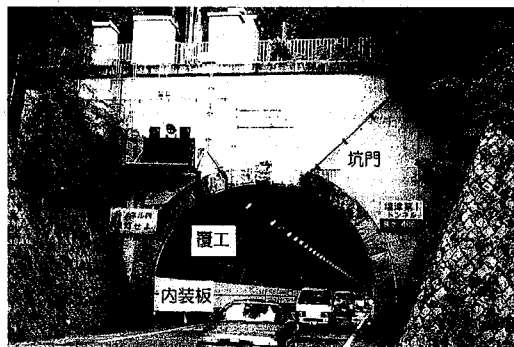


写真-1 既存トンネル本体工の現況¹⁾

キーワード: 山岳トンネル, 維持管理, 健全度評価, 判定指標, 劣化予測手法, アセットマネジメント

¹正会員 ㈱鴻池組 大阪本店 土木技術部

²正会員 パシフィックコンサルタンツ㈱ 交通事業本部 トンネル部

³正会員 中央復建コンサルタンツ㈱ 道路・トンネル系グループ

⁴正会員 ㈱ダイヤコンサルタント 関東支社設計グループ

2. 劣化予測に基づくトンネル維持管理

2. 1 維持管理の基本的な考え方

(1) 維持管理の定義

コンクリート標準示方書「維持管理編」においては、「維持管理はコンクリート構造物（以下、構造物という）の供用期間において、構造物の性能を要求された水準以上に保持するためのすべての技術行為」と定義されている。

(2) 維持管理の区分

維持管理計画の根本となる維持管理区分に関して、表－1に管理のレベルと対象となる劣化を示した。

(3) 維持管理の手順

現状で実施されている一般的な維持管理の手順を図－1に示した。

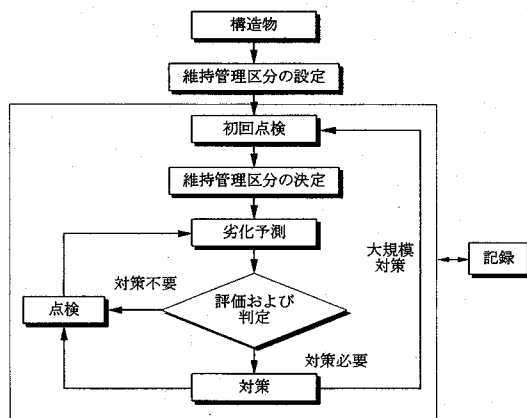
対象となる構造物に対して、維持管理区分を設定し、まず初回点検（構造物に関する情報収集）を実施する。さらに、初回点検の結果に基づき維持管理計画の策定と劣化予測、評価及び判定を行い、対策が必要と判断される場合には速やかに対策を実施する必要がある。

また、対策が不要と判断される場合には、維持管理計画に基づき、定期的な点検を行うことで構造物の延命化を図っていく。

ここで、維持管理対象として、大規模な対策を実施した場合には、図－1に示したとおり、維持管理区分の見直しと初回点検を行う必要がある。なお、点検および評価・判定において、劣化予測が困難となる場合には、点検回数を増やすことにより劣化原因の特定および、対策工の効果を判断する。

表－1 維持管理区分²⁾

管理のレベル	対象となる劣化
A：予防維持管理 予防保全を基にした維持管理	・劣化が顕在化した後では対策が困難なもの ・劣化が外へ表れては困る ・設計耐用期間が長いもの
B：事後維持管理 事後保全を基にした維持管理	・劣化が外に表れてからでも対応がとれるもの ・劣化が外に表れても、それほど困らないもの
C：観察維持管理 目視観察を主とした維持管理	・使用できるだけ使用すれば良いもの ・第三者影響に関する安全性を確保すれば良いもの
D：無点検維持管理 点検を行わない維持管理	・直接には点検を行うのが非常に困難なもの



図－1 一般的な維持管理の手順²⁾

2. 2 山岳（道路）トンネルの維持管理と課題

山岳トンネルに関しては、維持管理において他の道路構造物と比べて以下に示す特殊性と課題がある。

①構造物の劣化原因の特定が困難であること。

岩盤構造物の代表のひとつであるトンネル構造物では、岩盤材料が非常に複雑であり、構造物の損傷の原因を特定することが困難であるばかりか、劣化過程の推定には相当の不確実性が伴うことになる。

また、覆工コンクリートが内面を覆っていることから周辺地山の状態を直接点検できない。

②トンネル構造物は従来から管理コストをかけなくても安全性が確保されると考えられてきたこと。

土木構造物の中では管理コストをさほどかけなくても安全性が維持できる構造物とされており、これまでは定期的な点検さえ行われてこなかったため初期点検の情報が少ない。

③通常は劣化の進行が遅く、劣化部分での補修・補強を対症療法的に繰り返し、根本的な対応がなされない。崩落事故を受けた全国一斉点検において問題があれば対症療法的に補修するというレベルのトンネルであっても、その後すぐに進行が進むわけではなく、計画的に維持計画を立てる必要性が認められなかった。

④主たる構造物である覆工コンクリートが原則的に無筋構造であるため、劣化予測が困難であること。

橋梁構造物や舗装等の道路構造物に比較すると、構造が無筋であることから、鉄筋の腐食による耐久性評価ができない等、劣化の予測と評価が極めて困難である。

⑤トンネルとしての第一の必要機能は空間の確保であるが、これを規定する要求性能が明確でないこと。

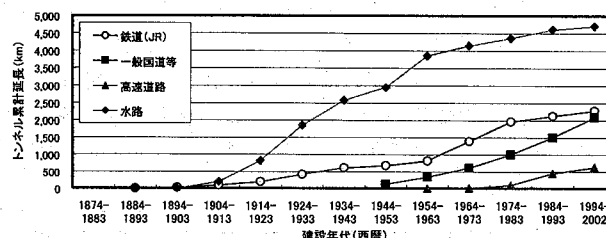
トンネルとは地中に空間を確保すること自体が、求められる機能であり、空間の確保を要求性能として、それを明確に規定することは相当の困難をとまうこととなる。

2. 3 山岳トンネルにおける要求される維持管理への取り組み

トンネル構造物は、他の構造物には見られない特殊性を有していることから効果的な維持管理を実施するにあたっては、多くの課題を有している。図-2に示すとおり、今後、維持管理が必要となる山岳トンネルの数は急増する事が予測され、維持管理にあたっては、少ないながらも存在する点検結果をもとに、将来の劣化状況をいかに予測し、適切な対策工を実施できるかにかかっている。

これまでの山岳トンネルに対する維持管理は、不具合箇所に対症療法的に対策を実施してきたが、公共投資が抑制される中で、道路の維持管理・更新に関する社会的な関心も高まっている。このような背景から、今後は、性能社会資本ストックをいかに長寿命化させるかという要求を具現化する手法として、建設・維持・補修・更新を含めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論である、アセットマネジメントという概念も組み込みながら検討を進めていく必要性が高まっております。

各機関において研究が進められている。



掘削		頂設通坑(日本式)	新奥式	底設通坑	底設通坑先進	NATM
支保方式		木製支柱式支保工		鋼製支保工		
覆工方式	材料	レンガ・石積み		コンクリートブロック		
	施工方法	人力		場所打ちコンクリート (機械(ポンプ・ブレーサ) (ポンプ) 引抜き管 吹上げ)		

図-2 山岳トンネル建設の歴史と資産推移³⁾

3. 劣化予測の現状

3. 1 概要

土木構造物の劣化予測方法としては、鋼構造物、鉄筋コンクリート構造物、アスファルト舗装等の構造物の劣化度を定量的に評価できる構造物において劣化予測方法の研究が進んでおり、道路構造物としては、特に橋梁、舗装等の劣化予測方法が実用レベルにある。

しかしながら、トンネル構造物は、他の道路構造物と比較して、以下のような理由から維持管理コストが比較的高い構造物として考えられてきた。

- ① トンネルの機能水準、性能水準は、空間の確保である（要求性能が明確でない）。
- ② 主要構造材料は、覆工コンクリートを含む周辺地山である（地山の劣化状況は確認できない）。
- ③ 更新が困難である（更新のための調査は実施しない）。
- ④ 点検数が極端に少ない。
- ⑤ 構造的変状が少なく、第3者への影響も比較的少ない。
- ⑥ 基本的に健全で強固な構造物である。

したがって、これまでのトンネル構造物の維持管理においては、変状等が発生した場合に対症療法的な対策を実施することで、トンネル機能に関する維持管理が可能であった。

一方、覆工コンクリートのはく落事故をうけて実施された全国一斉点検を契機に、事故の度に一斉点検・一斉補修を行うことは、点検・対策のために、一度に多額のコストが発生することとなるため、今後は、対症療法的な対応から計画的かつ戦略的な維持管理方法の確立が望まれている。

そのためには、トンネルの劣化予測を定量的に評価する方法の確立が必要であり、現況の研究レベルでは以下に示すような「力学的な解析手法」と「確率論を用いた手法」がある。

- 1) 周辺地山の地圧増大の時間依存性を考慮した変状解析手法
 - ・有限差分法を用いた地山劣化モデルによる解析的手法
 - ・梁ばねモデル（骨組構造解析）による解析的手法
- 2) 確率論を用いた劣化予測（マルコフ過程に基づく劣化予測）

以下にそれぞれの劣化予測の概要を述べる。

3. 2 周辺地山の地圧増大の時間依存性を考慮した変状解析手法⁴⁾

(1) 概要

トンネルの変状が生じる原因には、地質的な要因で長期的に変形を生じる場合や天端の覆工背面の空隙に

による影響など、様々な要因が複雑に関連している。覆工の耐力や補強による増加耐力を求めて対策工を検討する方法として、変状状況から塑性圧を推定し、骨組構造解析や有限要素解析による手法が用いられる。

これらの手法では、表-2に示すように①地山劣化モデルと②梁ばねモデルの2種類の解析モデルを用いることにより、最小限の地質情報と計測結果を利用した解析的な検討が可能となる。

また、この変状解析手法では、地質情報の制約を受けるトンネルの場合においても、基本的には地山の一次軸圧縮強度が推定でき、かつある期間の内空変位（変位速度）が得られれば解析的な評価が可能である。

表-2 解析手法の特徴

	梁ばねモデル (骨組構造解析)	地山劣化モデル (有限差分法など)
地山	地山反力をばね（圧縮、せん断）でモデル化 (地山はばね、地圧増加は荷重としてモデル化)	Mohr-Coulomb 降伏規準で地山劣化をモデル化 (地山は弾塑性、地圧増加は強度低下によるモデル化)
覆工	梁部材でモデル化（ばね切りで背面空洞を評価）	非線形材料でモデル化（インターフェイス要素で空洞を評価）
ひび割れ	コンクリートの引張強度で評価、塑性ヒンジでモデル化	引張強度で評価、開口をインターフェイス要素でモデル化
厚さ	コンクリートの圧縮限界で評価、解析を終了※	圧縮強度で評価、材料非線形を考慮
解析結果	変状箇所、作用地圧と変位	変状箇所、変位と経時時間、地山の応力状態

※圧さを断面剛性の低下でモデル化することも可能であるが、解析上構造が不安定となりやすい
そこで、圧縮限界を覆工構造の断面耐力と位置づけて解析を終了している。

(2) 解析モデルと解析ケース

地山劣化モデルの解析では、地山と覆工を平面ひずみ要素とし、さらに空洞もその部分に要素が欠損させてモデル化した。

検討では、以下の4つの解析ケースを実施している。

- ①無支保の場合 (case-A)
- ②覆工を弾性体とした場合 (case-B)
- ③覆工を非線形材料とし背面空洞を考慮しない場合 (case-C)
- ④覆工を非線形材料とし背面空洞を考慮した場合 (case-D)

図-3に内空変位と地山強度（せん断強度の低減率）との関係を示す。計測で得られている補強対策前の平均内空変位速度を6mm/年と仮定し、case-Dの低減率と内空変位量より経過年数を図-4のように求めている。その結果、本事例では変形が22年程度継続することやせん断強度の低減率は一定ではなく、建設初期に大きくその後収束してくることが示されている。

また、地山劣化モデルと梁-ばねモデルを用いた対策工の比較検討例を図-6に示す。なお、検討では図中に示される検討ケースが実施されている。地山劣化モデルは、図-5に示す内空変位速度の計測結果から周辺地山の劣化の進行を仮定して解析され、トンネルの変位-時間関係を得ることができる。

これらの地山劣化モデルを考慮した対策工の解析を行うことで、内空変位速度の抑制効果が直接評価できる。

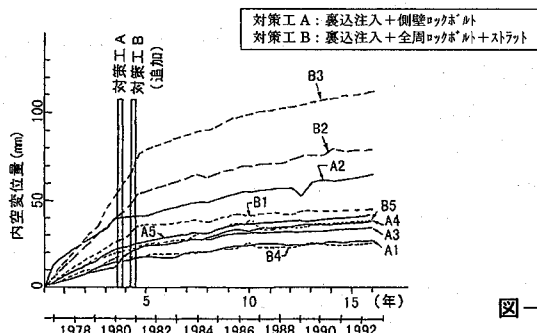


図-5 内空変位計測結果

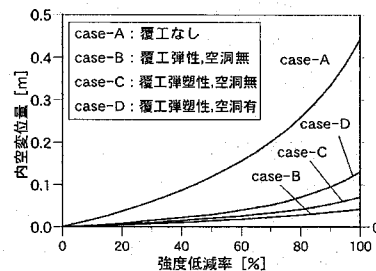


図-3 強度低減率と内空変位量の関係

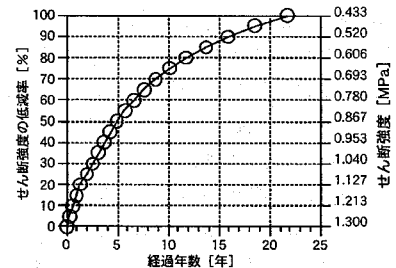


図-4 経過年数と低減率の関係

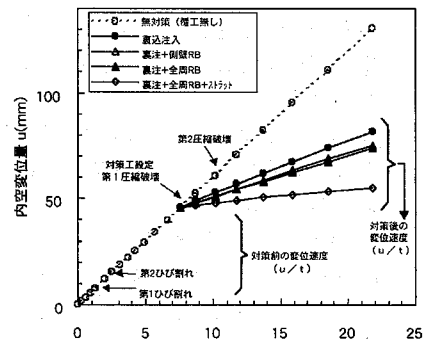


図-6 地山劣化モデルによる対策工の解析結果

3. 3 確率論を用いたトンネルの劣化予測手法⁵⁾

(1) 概要

トンネルの劣化予測手法として前述の力学的な解析手法に対して、確率論を用いた予測手法が試みられている。

劣化を予測するには、外力等の変状原因から推定する方法と、覆工等の健全度から推定する方法がある。いずれの方法も、点検結果と照合し、その妥当性や有効性を検証する必要があるが、トンネルの点検は、まだ始まったばかりであり、データが少ないことから、これを補完するために、何らかの手法を用いて時間的に連続化させる必要がある。本予測手法では、これらに、ごく単純な確率論を組み合わせることにより、劣化予測がより簡便に行う方法の検討が実施されている。図-7に、本予測手法における考え方のフローを示す。

(2) 確率モデル

図-8に示すような、最も単純なマルコフ過程に従う劣化進行のモデルを考える。ここで、S、B、A、2Aおよび3Aは、「道路トンネル維持管理便覧」による変状判定区分である。P_iは変状が次の判定区分に進行する移行確率であり、N_iはそれを判定する経年である。

すなわち、建設当初はS（変状が全くない）だった覆工が、N₁年後には確率P₁でB（変状がないか、あっても軽微）に進行し、残った確率（1-P₁）は現状維持することになる。同様の手法で、N₂、N₃、N₄年後に判定区分ごとの移行確率を用いて、劣化進行を確率的に予測する。P_i、N_iは、いわゆるパラメータであり、個々のトンネル・覆工スパンで異なるものとなるが、その設定方法は①劣化原因の組み合わせ、②点検結果の判定区分を用いての推定が考えられる。

(3) 劣化予測曲線の推定

a) 劣化原因組み合わせによる手法

劣化原因の組み合わせで場合分けし、それぞれの原因に重みをつけてケースごとに劣化曲線を推定する試みを行う。たとえば、劣化曲線を想定する条件に外力・環境・インバートを取り上げると、その組み合わせは表-3のとおり8ケースに分類される。ここで、確率移行経年は、劣化原因の重み付けを外力0.6・環境0.1・インバート0.3として順位付けを行い、変状実績を参考に技術者の経験に基づき想定したものである。

今、仮に劣化進行の移行確率を0.4、健全度は判定区分Sを1.0、Bを0.9、Aを0.8、2Aを0.4、3Aを0として、各ケースの劣化曲線を推定すれば図-9のようになる。

この方法は、変状原因から結果を予測する、いわゆる順解析的な手法であるが、移行確率等、想定したパラメータが多く、これらを決定するためには、数多くの点検データを用いた検証を行う必要がある。

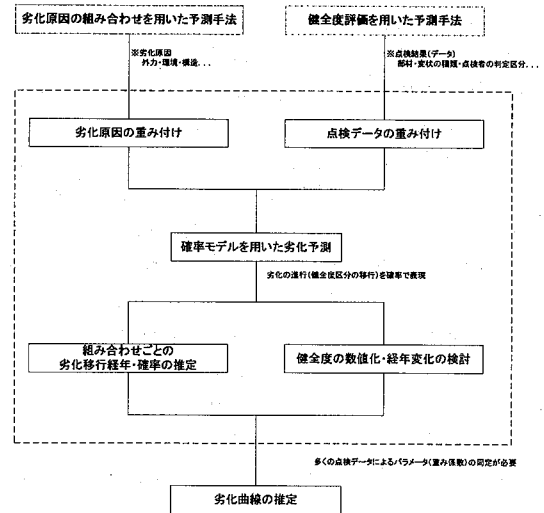


図-7 予測手法フロー

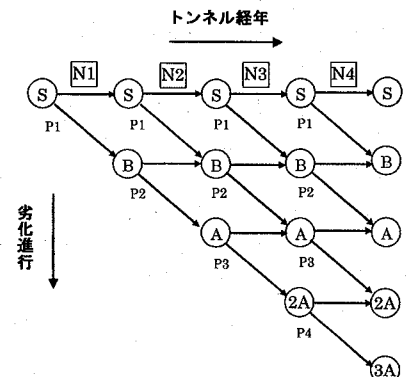


図-8 劣化進行の確率モデル

表-3 劣化原因の組み合わせ (例)

	外力		環境		インバート		確率移行 経年
	有	無	良	悪	有	無	
Case1	○		○		○		10.0
Case2	○		○			○	5.0
Case3	○			○	○		7.5
Case4	○			○		○	2.5
Case5		○	○		○		25.0
Case6		○	○			○	17.5
Case7		○		○	○		22.5
Case8		○		○		○	15.0

検討ケースごとの劣化曲線
移行確率 P=0.40

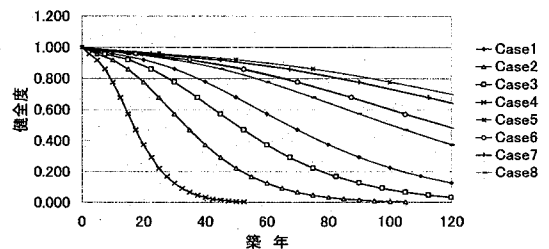


図-9 劣化原因で場合分けした劣化曲線 (例)

b) 健全度評価を用いた手法

点検結果を用いて、健全度を数値化し、劣化曲線を推定する方法を検討する。健全度を数値化するに当たり、点検より得られる情報としては、部材・変状の種類・点検者が判定した健全度区分がある。「道路トンネル維持管理便覧」等に従い、一般的な点検では、それらは、表－４～８のように細分化される。ここで、重み係数 α_1 は構造の安全性・第3者被害に対する影響等を考慮し決定する必要があるが、明確に定義されたものはなく、専門技術者の判断によらざるをえないのが現状である。

点検実施ごとに、これら重み係数を用いて健全度を数値化すれば、経時的な変化がわかり、前述の確率モデルにおける P_i および N_i を同定することにより、トンネルごとの劣化曲線の推定を行うことができる。例えば、建設後35年を経過し、健全度が表－８のようなトンネルを考える。健全度区分ごとの重みは、a)と同じとした。

単純に、健全度区分の重みと比率を掛け合わせ加算したものを、トンネル全体の健全度 H とすれば、

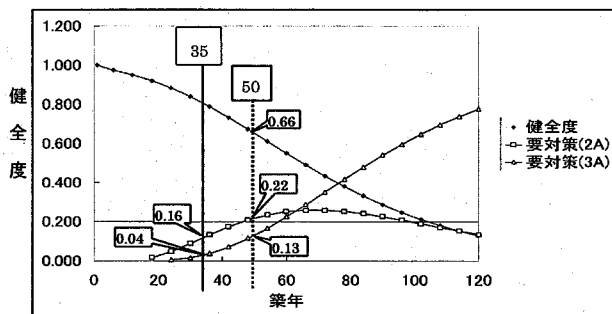
$$H=1.0 \times 0.25 + 0.9 \times 0.30 + 0.8 \times 0.30 + 0.4 \times 0.15 = 0.8$$

となる。建設後35年を考慮し解析モデルを用いて逆算すると、現状の健全度に近似する P_i と N_i の組み合わせは、 $P_i=0.75$ $N_i=6$ が得られ、これを用いて建設時からの劣化予測曲線（各ランクの割合の変化）を推定すれば図－10のようになる。

なお、点検データが1つしかないため、建設時の健全度を1.0として逆算している。

ここで要対策区間を2A以下と設定すれば、現在20%（2A：16%，3A：4%）程度の割合が、建設後50年（15年後）には35%（2A：22%，3A：13%）程度に増加し、トンネルの健全度も0.66まで低下することがわかる。この方法は、結果から現象を推定する、いわゆる逆問題的手法である。劣化曲線は点検時の健全度と一致するように推定するため、現状をよく表現できる方法である。

点検データが少ない場合には、はなれた時間での精度に問題があるが、点検回数が増えるにつれ修正が可能である（ただし、誤差の補正は必要となる）。劣化原因との関連づけはしづらいが、想定するパラメータの数も少なく、非常に簡便的な手法である。



図－10 点検結果を用いた劣化曲線（例）

4. モデルトンネルにおける健全度評価の試行

劣化予測を行うにあたり、モデルトンネルを想定し、既存の評価指標を用いた健全度評価を試行した。

検討の結果、評価・判定結果に関して得られた知見を述べる。

(1) モデルトンネル(Aトンネル)の変状状況

モデルトンネルとして、NATMで施工され、実際に変状を生じ、調査結果の判明しているトンネル（41ス）をもとにモデル的に設定した。（なお、本報告ではそのうち、No.30～40ス，計11スに関して示す。）

調査は、平成12年と平成16年の2回実施しており、トンネルの変状状況は図－11に示すとおり設定した。

表－４ 部材の重み付け

部材	重み係数 α_1
覆工	α_{1-1}
舗装	α_{1-2}

表－５ 変状の重み付け（覆工）

変状の種類	重み係数 α_{2-1}
ひび割れ・段差	α_{2-1-1}
うき・剥離・剥落	α_{2-1-2}
傾き・沈下・変形	α_{2-1-3}
打継目の目地切れ・段差	α_{2-1-4}
鉄筋の露出	α_{2-1-5}
漏水・つらら・遊離石灰・側水	α_{2-1-6}
豆板・コードジョイント部のうき・剥離・剥落	α_{2-1-7}
補修材のうき・剥離・剥落	α_{2-1-8}

表－６ 変状の重み付け（舗装）

変状の種類	重み係数 α_{2-2}
段差・ひび割れ、路面・路肩の変形	α_{2-2-1}
滞水・氷盤・沈砂	α_{2-2-2}

表－７ 健全区分の重み付け

健全度区分	重み係数 α_3
S	α_{3-1}
B	α_{3-2}
A	α_{3-3}
2A	α_{3-4}
3A	α_{3-5}

表－８ トンネル全体の健全度

健全度区分		全長に対する割合
ランク	α_3	
S	1.0	25%
B	0.9	30%
A	0.8	30%
2A	0.4	15%
3A	0.0	0%

Figure 1: Stratigraphic correlation chart showing layers (SL, CL, SI) across locations (DII, DI, CII-1, CII-2, DI, DII, DI). The chart is plotted against a horizontal scale from 300 to 400 meters. The top chart (Figure 1) shows a continuous sequence of layers. The bottom chart (Figure 2) shows a similar sequence but with annotations for '湧水跡' (water seepage trace), '湧水' (spring water), and '閉合ひび割れ' (closed crack). The charts are plotted against a horizontal scale from 300 to 400 meters.

(4) 判定結果の分析

a) ケース 1：担当業務、経験の異なる評価者による分析結果

担当業務、経験の異なる評価者による評価の分析として以下の知見が得られた。

- ① 全体的な傾向としては、経験や担当業務分野が異なっても概ね評価的には一致しており、全体的には劣化段階としてはⅡ（継続監視）～Ⅲ（予防保全）の範囲と評価している。
- ② 区分Ⅰ、区分Ⅱとも変状が進行することにより評価のばらつきが大きくなっている。
- ③ 全般的にひび割れに関する評価は、コンクリート関連業務の技術者の方が厳しい。
- ④ 重み付けの関係で、漏水の評価の相違が評価点に大きく影響する。

b) ケース 2：トンネル業務に係わる技術者による分析

また、図-12 にトンネル業務に係わる技術者による分析結果、すなわち判定区分Ⅰ（利用者被害を誘発する変状）および判定区分Ⅱ（構造的な変状）のまとめを示し、図-13 には評価のばらつきの一例を示した。

これらの結果から、トンネル技術に熟練した評価者による評価の分析として以下の知見が得られた。

- ① 妻部の漏水（濡れている・跡）の評価方法において、個人差が見られる。
- ② アーチ部のひび割れ（閉合しているもの）を浮き・はく離と見なすかによって評価点に影響が見られる。
- ③ 溶脱物を浮き・はく離と見なしている場合がある。
- ④ 漏水跡の評価方法において個人差が見られる。
- ⑤ どのようなひび割れを進行性ありとみなすかといった判断が各自異なる。
- ⑥ トンネル熟練度合い、業務経験等により使用するレーティング表の劣化段階の変状に対する解釈が異なる。

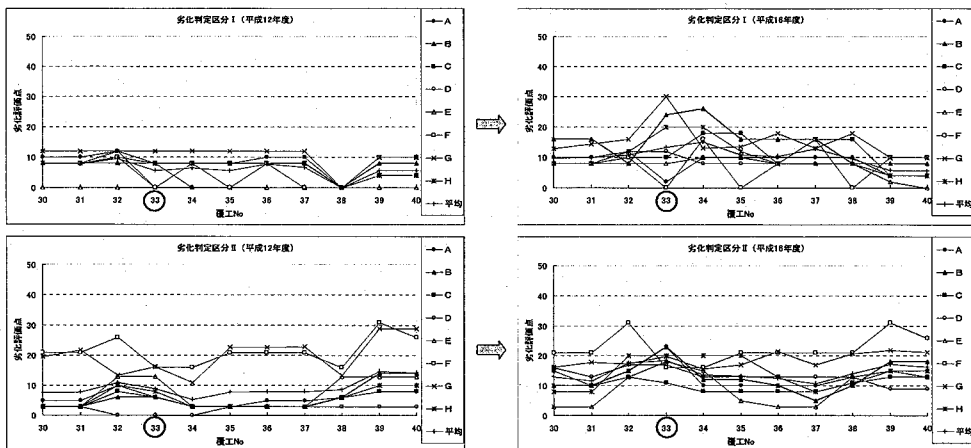


図-12 各評価者による評価結果の分析

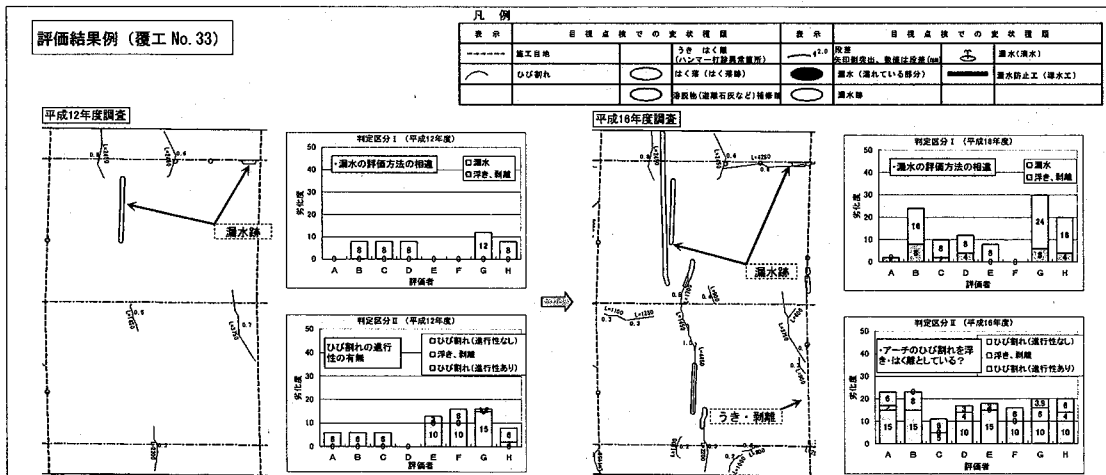


図-13 評価結果例

5. 新しい健全度判定表の提案

5. 1 概要

抽出した変状項目について、劣化度判定の基本となる指標について検討を行った。判定指標については、「道路トンネル定期点検要領（案）」の判定区分（A, B, S）とリンクさせ、0, 10, 20, 30の10点きざみでのランク付けを実施した。今回提案する健全度判定表（案）を表-10にまとめて示した。

なお、この評価表は、矢板工法、NATMともに適用可能と考えている。

5. 2 劣化予測のための判定項目の抽出

判定基準の観点としては、①利用者に関するもの（安全性、供用性）、②構造物に関するもの（耐荷性、耐久性）、③管理者に関するもの（維持管理性）、④変状の進行性と特徴（共通事項）に関するもの等が挙げられるが、主眼をおいていると考えられる「利用者の安全性に関する変状」と「構造物の安全性に関する変状」について、覆工コンクリートに着目し、判定要素となる主な変状項目を以下のとおり抽出した。

（1）利用者の安全性に関する変状

- ①浮き・はく離（ひび割れ含む）
- ②突発性崩落
- ③漏水
- ④つらら等
- ⑤土砂流出等

（2）構造物の安全性に関する変状

- ①ひびわれ（進行性あり、なし）
- ②変形・沈下
- ③浮き・はく離
- ④地すべり等による変状

表-10 健全度判定表（案）

		A		B		S		着目点
		30	20	10	10	0		
判定区分Ⅰ 利用者被害を誘発する変状	浮き、剥離（覆工）	早急な対策を要する著しいひび割れの恐れがある	連続した2方向ひび割れ	部分的～不連続な2方向ひび割れ	部分的にひび割れ～健全	健全	○打音検査時の異常とひび割れ状況 ・ひび割れ発生パターン（閉合他） ・貫通ひび割れか ・ひび割れ発生部位（天端、側壁部）	
	浮き、剥離（補修材料）	材質劣化、車輛接触により早晩、落下の恐れがある	材質劣化、車輛接触により、将来的に落下の恐れがある	軽微な変状はあるが、材質劣化、車輛接触による落下の可能性が小さい	健全	健全	○補修材の工種毎に個別に判断 ・シートへの浮き ・アンカーの腐み ・モルタルのクラック など	
	突発性崩落	覆工背面空洞高さ Hm=1m	覆工巻厚 t=td×0.33～0.5	覆工巻厚 t=td×0.5～0.67	覆工巻厚 t=td×0.67以上	健全	○覆工巻厚と覆工背面空洞の有無 ・Hm: 覆工背面空洞高さ ・t: 覆工巻厚（調査値） ・td: 設計覆工巻厚	
		Hm=0.5m	覆工巻厚 t=td×0.33以下	覆工巻厚 t=td×0.33～0.5	覆工巻厚 t=td×0.5～0.67	覆工巻厚 t=td×0.67以上	○施工方法の確認 ・矢板は力学的機能あり ・NATMは力学的機能なし	
		Hm=0.2m	—	—	覆工巻厚 t=td×0.33～0.5	覆工巻厚 t=td×0.5以上		
	漏水	アーチ	噴出	流下	滴水	にじみ	○漏水の量とその位置 ・天端はランクアップ	
		側壁	—	噴出	流下	流水～にじみ		
	つらら等	非常に多い	多い（面的に分布）	少ない～中程度（散在）	なし	○ツララの量とその位置 ・天端はランクアップ		
	土砂流出等	同上	同上	同上	なし	○土砂流出の量とその位置 ・天端はランクアップ		

		A		B		S		着目点
		30	20	10	10	0		
判定区分Ⅱ 構造的な変状	ひび割れ（進行性あり）	閉合型	亀甲状	ひび割れ面積 2.0㎡程度	ひび割れ面積 1.5㎡程度	ひび割れ面積 1.0㎡程度	ひび割れ面積 なし	○亀甲状のひび割れ面積
			ひび割れ長さ 10cm程度	ひび割れ幅 tc×(1.0以上)	ひび割れ幅 tc×(0.5～1.0)	ひび割れ幅 tc×(0.5未満)	ひび割れ幅 なし	○閉合型ひび割れの長さ（長辺方向）
			20cm程度	ひび割れ幅 tc×(0.75以上)	ひび割れ幅 tc×(0.75未満)	—	ひび割れ幅 なし	・ひび割れ幅の基準値(tc) (設計覆工巻厚(td)30cmの場合) tc=td×0.35%=(300mm)×0.0035=1.0mm
			20cm以上	ひび割れ幅 tc×(0.5以上)	ひび割れ幅 tc×(0.5未満)	—	ひび割れ幅 なし	
		交差分岐	10箇所以上	5～9箇所	1～4箇所	健全	○ひび割れの交差分岐箇所	
		放射状	ひび割れ幅 tc×0.75	ひび割れ幅 tc×(0.5～0.75)	ひび割れ幅 tc×0.5未満	健全	○放射状のひび割れ幅 ・ひび割れ幅の基準値(tc)は閉合型と同じ	
	進行性	段差	段差量 3mm程度	段差量 2mm程度	段差量 1mm程度	段差量 なし	○ひび割れの段差量 ・天端はランクアップ	
		ひび割れ長さ 1m/5年	—	—	ひび割れ幅 1mm/1～2年	健全		
		1m/2年	—	ひび割れ幅 1mm/1年	ひび割れ幅 1mm/2～5年	健全	○ひび割れの進行性(幅と長さ) ・天端はランクアップ	
		1m/1年	ひび割れ幅 1mm/1年	ひび割れ幅 1mm/2年	ひび割れ幅 1mm/5年	健全		
		変形、沈下	10mm/年以上	10mm/2年	10mm/5年	健全	○内空位置、絶対変位量 ・沈下量、不等沈下によるねじれ	
浮き、剥離（覆工）	早急な対策を要する著しいひび割れの恐れがある	連続した2方向ひび割れ	部分的～不連続な2方向ひび割れ	部分的にひび割れ～健全	健全	○打音検査時の異常とひび割れ状況 ・ひび割れ発生パターン（閉合他） ・貫通ひび割れか ・ひび割れ発生部位（天端、側壁部）		
浮き、剥離（補修材料）	材質劣化、車輛接触により早晩、落下の恐れがある	材質劣化、車輛接触により、将来的に落下の恐れがある	軽微な変状はあるが、材質劣化、車輛接触による落下の可能性が小さい	健全	健全	○補修材の工種毎に個別に判断 ・シートへの浮き ・アンカーの腐み ・モルタルのクラック など		
地すべり等による変状	せん断ひび割れがあり、圧ざが見られる。変形あり	山側肩部以外に軸方向引張りひび割れあり。変形なし	山側肩部に軸方向引張りひび割れあり	健全	健全	○変形、沈下と同様（トンネルの変形） ○地すべり、地割、断崖地山、偏圧地形等 特殊地山条件の有無		
ひび割れ（進行性なし）	主たるひび割れが軸方向に発生	主たるひび割れが円周方向に発生	部分的にひび割れ	健全	健全	○ひび割れの発生状態 ・ひび割れ発生パターン（軸方向、横断方向） ・発生部位（天端、側壁部） ・ひび割れ幅		

6. まとめ

今回、山岳トンネルの合理的な維持管理を進めて行く上で重要である劣化予測手法に関して、まず既往の研究に関して整理した。また、実際に調査結果が判明している変状トンネルをモデル化し、健全度評価を試行することにより、劣化予測の基本となる評価・判定のための健全度指標については、判定項目、判定のための閾値、トンネル毎の重み付けといったことが、実際の評価・判定結果に大きく影響することが分かった。

さらに、これらの問題を解決するために、劣化度判定指標について検討を行い、現状のトンネル点検において用いられている健全度判定指標及び判定基準をもとに、劣化度（健全度）を表す指標を細分化、かつ定量化した新しい健全度判定表を提案した。なお、今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。

（１）点検方法について

道路トンネルの点検に関しては、「道路トンネル定期点検要領（案）」が整備され、点検員の資格を規定しているものの、実際の点検業務においては、人力による近接目視点検が基本となっているため、点検者の主観が介入することは免れず、転記もれなども想定されることから、点検結果の判定に際しては変状の進行性などが十分に把握できていないと考えられる。

劣化予測にあたり、変状の進行性は基本となる指標であり、変状の進行性を表す指標を的確に把握することは、トンネルの維持管理を中長期的、戦略的に実施するために必要不可欠であると考えられる。

今後の点検にあたっては、覆工コンクリート表面の変状を記録する技術や、浮き・はく離等を検出する非破壊検査技術などを検討し、変状のデータを客観的・定量的に獲得していく必要があると考える。

また、現状の点検記録については、変状展開図として点検結果は得られるものの、今回提案した判定指標のような、ひび割れ密度、ひび割れパターン毎のデータなどは、直接的には得られない。

今後は、点検結果が有効活用できるように点検記録の整理方法についても検討する必要がある。

（２）健全度判定指標について

今回提案した健全度判定指標は、あくまで点検結果をもとに劣化予測を行うための健全度判定の一指標として作成したものであり、短期的（応急的）な維持管理レベルにおける指標と中長期的（計画的）な維持管理レベル（アセットマネジメント）における指標がいくらか混在していると考えられる。

例えば、覆工厚（覆工強度含む）、背面空洞高さ（地山強度含む）などについては、短期的な維持管理レベルにおいては必要不可欠な指標であり、データが存在しない場合は詳細調査を実施するなどの処置も必要となる。一方、長期的な維持管理レベルではこれらは概ね一律（重みが低い）のものとしてとらえ、ひび割れや浮き・はく離のみの指標に着目して判定する方が妥当な場合も想定される。

今後は、専門技術者による経験的判断、実際のトンネル劣化対策事例などをもとに、劣化予測解析の試行を進め、それぞれの維持管理レベルに応じた重要な判定項目の洗い出しや適切な健全度判定指標の設定および重み付けなどの検討を行う必要がある。また、重み付けについては、利用者の安全性に関する変状と構造の安全性に関する変状などの判定区分、在来工法と NATM などの施工方法の違いなどを考慮することも重要であると考えられる。

今後、急務であるトンネルの維持管理（延命化）の効率的な実施において、今回の研究が何らかの参考になれば幸いである。なお、本研究は、道路構造物保全研究会（設計・施工部会）トンネル委員会（劣化予測WG）の成果をとりまとめたものである。今後も、さらに検討を進め、道路構造物の一部であるトンネル構造物の保全技術の向上に貢献できるよう努める所存である。

参考文献

- 1) (財) 道路保全技術センター, 道路トンネル点検・補修の手引き, 近畿地方整備局版, p.3, 2001.
- 2) (社) 土木学会, コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, pp9-12, 2001.
- 3) (社) 土木学会 岩盤力学委員会 トンネルの変状メカニズム, p20, 2003.
- 4) 熊坂博夫, 朝倉俊弘, 小島芳之, 松長 剛: 地山の時間依存性を考慮したトンネル変状解析手法の適用性に関する検討, 第32回岩盤力学シンポジウム, 2003.1.
- 5) (財) 道路保全技術センター, 山岳トンネルのライフサイクルコスト調査研究報告書, pp115~121, 2004.
- 6) (財) 道路保全技術センター, 道路トンネル点検・補修の手引き, 近畿地方整備局版, pp58-62, 2001.