

山岳トンネルにおける健全度評価と劣化予測に関する一考察

A Study on health evaluation and deteriorated prediction for 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-reinforced lining 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 soundness evaluation of a model tunnel based on a real site is tried, and subdivision of the index representing deterioration grade and the new soundness evaluation table quantified of tunnel linings are proposed. In addition we perform the soundness evaluation of the model tunnel with this table and examine life cycle cost (LCC) by the deterioration prediction using stochastic process.

Key Words : mountain tunnel, maintenance and repair, soundness evaluation, evaluation index, deterioration prediction, 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。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。

一方、トンネルの劣化予測に関しては、①時間依存性を考慮した数値解析による方法²⁾、②確率過程（マルコフ理論）を用いた手法³⁾、③点検履歴から確率過程を用いた劣化予測手法^{4)~6)}等が提案されている。

本研究では、劣化度判定の基本となる判定指標に関する検討を行い、トンネルの劣化度（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（案）を提案するとともに、③の劣化予測手法を用いて試算を実施した。論文では、新しい健全度判定表（案）に基づくモデルトンネルにおける健全度評価結果の分析および確率過程を用いた劣化予測によるLCCの検討により得られた知見をまとめたものである。

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、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

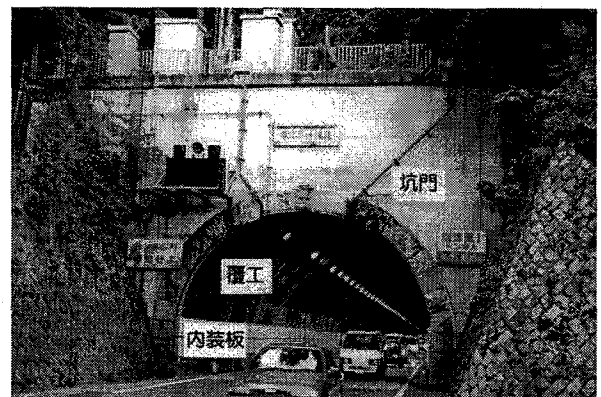


写真-1 既存トンネル本体工の現況¹⁾

2. 山岳トンネルの維持管理の現状

2. 1 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、維持管理面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。

トンネルの劣化原因は多岐にわたり、劣化原因の一因となる周辺地山の評価は複雑であるため、構造物の損傷の原因を特定することが困難となるばかりか、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確認できない。

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いない場合も多く、とりわけ、施工時や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無筋構造である事が多く、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、無筋構造であることから、鉄筋腐食による耐久性評価は不要であるが、施工条件や地山などの影響を強く受ける無筋コンクリートの劣化予測と評価は極めて難しい。

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。

トンネルで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もなうこととなる。

2. 2 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

これまでの山岳トンネルにおける維持管理の現状をふまえた上で、今後の維持管理を合理的に実施するための課題を挙げると以下のとおりである。

①点検結果の評価（健全度評価）においては、健全度を幾つかにグレーディングし、段階評価を実施しているため、連続的かつ定量的な評価が困難であること。

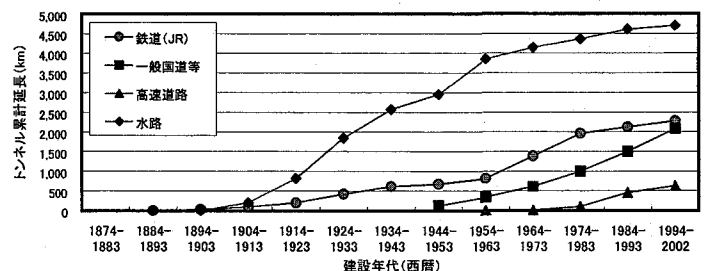
②覆工コンクリートの健全度の判定においては、はく離・はく落といった利用者被害に関する判定と、ひび割れに代表される構造的な判定に分類されるが、利用者被害に関する変状の原因は多岐にわたるため、明確な原因分析が困難である。

また、構造的な変状に関する発生原因は点検結果だけでは特定できないこと。

③現存する山岳トンネルの施工法が異なり、覆工材料や設計の思想、施工法に起因する構造的な欠陥といった問題を内在するため、維持管理においては様々な支保や覆工構造のトンネルを対象とする必要があること。

以上述べたとおり、トンネル構造物の合理的な維持管理を実施するにあたっては、これら多くの課題を解決する必要がある。また、図-1に示すとおり、1950年頃からトンネル施工が急激に増加しており、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、維持管理を効率的に進めるには、少ない点検結果をもとに、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が重要となる。

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、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、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)				新掘式		底設通坑		底設通坑先進		NATM	
	木製支柱式支保工				鋼製支保工		吹付けコンクリート+BB					
支保方式	レンガ・石積み				コンクリートブロック		場所打ちコンクリート		機械(ポンプ、ブレーサ)		(ポンプ)	
	人力				人力		機械(ポンプ、ブレーサ)		引抜き管		吹上げ	

図-1 山岳トンネル建設の歴史と資産推移⁷⁾

3. 点検結果に基づく健全度評価の試行

3. 1 トンネル健全度評価表（案）の提案

山岳トンネルの健全度評価に関しては、「道路トンネル定期点検要領（案）平成14年4月（社）国土交通省道路局国道課」では、点検結果をS、A、Bのグレードに分けて評価している。

しかしながら、点検結果をもとに劣化予測を行う場合、これまでの点検結果のS、A、Bの判定のみでは劣化予測モデルの構築や劣化予測の評価が困難であるため、点検結果を定量的な判定指標としてとらえる必要がある。本研究では、表-1に示すとおり、点検結果で得られるデータを考慮し、劣化予測のための判定項目を抽出し、判定項目毎に劣化度（健全度）を表す指標を細分化、かつ定量化した健全度判定表（案）を提案した。なお、S、A、Bを評価点で分類し、評価の境界において評価の連続性を確保するものとした。

提案した健全度判定表に基づき評価を実施するにあたり、判定表の評価にあたっては、変状の影響度合いに配慮して、判定区分Ⅰについては各項目を5点刻みで評点し、各項目の最大値を判定区分Ⅰの最終評点とした。

ここで、5点刻みにしたのは、1点刻みでは評価が困難であること、また10点刻みでは劣化度の変化を追っていく場合あまりにも評点が粗すぎると考えたためである。また最大値としたのは利用者の安全度は最大値で評価されるべきものと考えたためである。

判定区分Ⅱについては各項目を1点刻みで評点し、各項目の平均点を判定区分Ⅱの最終評点とした。

判定区分Ⅱでは、1点刻みでも比較的容易に評価が可能であると考えたためである。

なお、判定区分Ⅱに関しては、詳細調査の結果も参考にすべきと考えるが、点検データにおける指標を設定した。

表-1 健全度判定表（案）⁸⁾

		A				B				S				着目点
		30	20	20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
判定区分Ⅰ 利用者被害を誘発する変状	浮き、割離（掘工）	ひび割れ性状	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								○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） ・変位ひび割れ ・ひび割れ発生部位（天端、側壁部）
		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 $t \times (1.0以上)$	ひび割れ幅 $t \times (0.5 \sim 1.0)$	ひび割れ幅 $t \times (0.5未満)$	ひび割れ幅なし								○閉合型ひび割れの長さ（長辺方向） ・ひび割れ幅の基準値（ t ） （設計掘工巻厚（ t_d ）30cmの場合） $t \times t_d \times 0.39 \times (300mm) \times 0.003 \geq 1.0mm$
		20cm程度	ひび割れ幅 $t \times (0.75以上)$	ひび割れ幅 $t \times (0.75未満)$	—	ひび割れ幅なし								○閉合型ひび割れの長さ（長辺方向） ・ひび割れ幅の基準値（ t ） （設計掘工巻厚（ t_d ）30cmの場合） $t \times t_d \times 0.39 \times (300mm) \times 0.003 \geq 1.0mm$
		20cm以上	ひび割れ幅 $t \times (0.5以上)$	ひび割れ幅 $t \times (0.5未満)$	—	ひび割れ幅なし								○閉合型ひび割れの長さ（長辺方向） ・ひび割れ幅の基準値（ t ） （設計掘工巻厚（ t_d ）30cmの場合） $t \times t_d \times 0.39 \times (300mm) \times 0.003 \geq 1.0mm$
		変状分散	10箇所以上	5～9箇所	1～4箇所	健全								○ひび割れの変状分散箇所
	浮き、割離（補修材料）	放射状	ひび割れ幅 $t \times 0.75$	ひび割れ幅 $t \times (0.5 \sim 0.75)$	ひび割れ幅 $t \times 0.5未満$	健全								○放射状のひび割れ幅 ・ひび割れ幅の基準値（ t ）は閉合型と同じ
		浮き、割離（補修材料）	材質劣化、車輛接触により浮き、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。	経年劣化はあるが、材質劣化、車輛接触による落下の可能性が小さい。	健全								○補修材の工種毎に個別に判断 ・シーリングの浮き ・アウターの腐み ・モルタルのクラック など
	突発性崩落	掘工巻厚（掘工巻厚） Hm=1m	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	健全							○掘工巻厚と掘工巻厚空間の有無 ・Hm:掘工巻厚空間高さ ・t:掘工巻厚（掘工巻厚） ・d:掘工巻厚空間 ○掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無
		Hm=0.5m	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33$ 以下	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	健全							○掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無
		Hm=0.2m	—	—	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	掘工巻厚 $t \times d \times 0.33 \sim 0.5$	健全							○掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無
	漏水	アーチ	噴出	流下	滴水	にじみ								○漏水の量とその位置 ・天端はラングアップ
		側壁	—	噴出	流下	滴水 ～にじみ								○漏水の量とその位置 ・天端はラングアップ
判定区分Ⅱ 健全な変状	ひび割れ（進行性あり）	ひび割れ長さ1m/5年	—	—	ひび割れ幅1mm/1～2年	健全								○ひび割れの進行性（幅と長さ） ・天端はラングアップ
		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） ・天端はラングアップ
		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								○ひび割れの進行性（幅と長さ） ・天端はラングアップ
	変形、沈下	変形、沈下	10mm/年以上	10mm/2年	10mm/5年	健全								○変形、沈下と掘工巻厚（掘工巻厚） ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無
		外力による変状	せん断ひび割れがあり、圧力が認められる。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								○変形、沈下と掘工巻厚（掘工巻厚） ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無 ・掘工巻厚空間の有無
		ひび割れ（進行性なし）	ひび割れ密度45cm/m ² 以下	30cm/m ² 以下	15cm/m ² 以下	0（健全）								○ひび割れの発生状況 ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向）
	ひび割れ（進行性なし）	最大ひび割れ幅	2.0～3.0mm未満	1.0～2.0mm未満	0.2～1.0mm未満	0.2mm未満（健全）								○ひび割れの発生状況 ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向）
		ひび割れ密度	45cm/m ² 以下	30cm/m ² 以下	15cm/m ² 以下	0（健全）								○ひび割れの発生状況 ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向）
		最大ひび割れ幅	2.0～3.0mm未満	1.0～2.0mm未満	0.2～1.0mm未満	0.2mm未満（健全）								○ひび割れの発生状況 ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向） ・ひび割れ発生（軸方向、掘工巻厚方向）

3. 2 モデルトンネルの概要

モデルトンネル（以下、Aトンネル）は、実際に変状を生じ、調査結果の判明しているトンネルをもとに設定した。点検調査は、平成12年、平成16年に実施しており、トンネルの変状状況は変状の著しいスパンと比較的変状の少ないスパンに分けて設定した。図-2にモデルトンネルの変状展開図の一部（20～30スパン）を示す。なお、実際のトンネルに関しては、トンネルの施工時には、小崩落（天端・鏡面）、吹付けコンクリート剥落、ロックボルトの座金の変形といった変状現象が発生しており、各種補助工法により対処している。特に、本トンネルでは湧水の発生が多く、トンネルの施工においては、水抜きボーリングを併用して掘進を進めていた。発生した変状の主なものは、ひび割れ、漏水である。

ここで、平成12年に定期点検を実施し、その結果に基づき補修工事（ひび割れ注入、排水工、導水工）を施工した箇所については、トンネル施工時に変状が発生し、補助工法を多用した箇所の1つにあたる。

平成16年の2回目の点検では、部分的にはひび割れの増加が見られている状況である。

なお、ひび割れの進行性に関しては、追跡調査の結果、平成16年以降に関しては、坑内温度変化伴うものが主であり、特に進行性は認められないことが分かっている。

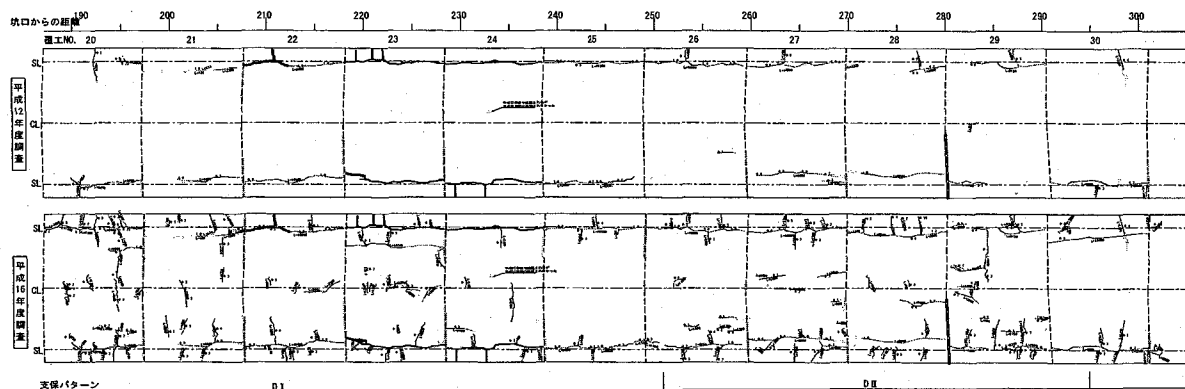


図-2 Aトンネル変状展開図（変状大スパン：20～30）⁸⁾

3. 3 健全度評価表（案）による評価結果

検討ケースとしては、変状が大きい21スパン（20-40）を抽出し、前述の健全度評価表（案）に基づき、トンネル業務に係わる技術者により評価した。

（1）評価に関する判定条件

点検結果に関する評価にあたっては、以下の評価に関する判定条件の統一を図った。

- ・判定区分Ⅰは最大値評価（5点刻み）、判定区分Ⅱは該当項目の平均値評価（1点刻み）とする。（判定区分Ⅱの評価項目は4項目のため合計を4で割った平均値を劣化度とする。）
- ・判定区分Ⅰの突発性崩落、判定区分Ⅱの変形、沈下は評価しないこととし、判定区分Ⅱの外圧は評価する。
- ・進行性有りのひび割れ経過年数はトンネル構築をH8年とし以下の通りとする。

H12：第1回点検（トンネル構築から4年間経過）

H16：第2回点検（第1回点検から4年間経過）

- ・その他、外圧の影響、ひび割れ進行性等の評価にあたっては、トンネル条件（NATM、H12漏水対策工実施済み、対象区間はインバート未設置区間など）に留意して評価を行う。

（2）変状の大きいスパン（No. 29）における点検結果の評価

図-3に（一例として）No29スパンの健全度評価結果を示し、以下に健全度評価の分析結果を示す。

①スパン全体での評価では、どの評価者も判定区分Ⅱより、判定区分Ⅰの劣化度の方が大きくなっており、評価点の最大値をスパンの評価とした判定区分Ⅰ（利用者被害）に関する評価が優先する結果となった。

②H12年度の評価において、発生箇所により異なり、アーチ部に閉合ひび割れのあるスパンでは、判定区分Ⅰの劣化度は高く評価されているが、それらを除いては、判定区分Ⅰ、Ⅱの評価はほとんど同程度である。

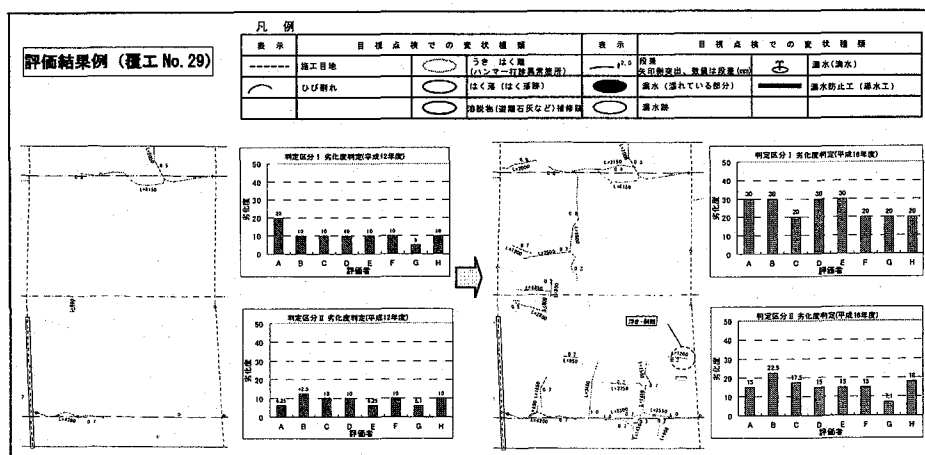


図-3 Aトンネル健全度評価結果（No29スパン）⁸⁾

判定区分Ⅱの劣化度を大きく評価している箇所も多く見受けられるが、これらは側壁部の水平ひび割れを外圧によるものとして評価しているためであると考えられる。

③H16年度の評価において、判定区分Ⅱでは一部のスパンを除いて劣化度の増分は5程度未満であるが、判定区分Ⅰでは10～20程度となっている。

④個々の評価においては、評価のバラツキに関しては、ひび割れ性状（発生位置、幅、長さ）や閉合ひび割れのはく落評価において評価者によるバラツキが大きくなっていた。

⑤判定区分Ⅱの劣化度の増分が小さい理由としては、H12年度時点ですでにS L付近のひび割れはスパン間に発生しており、H16年度に進行しているひび割れは横断方向に延びる比較的ひび割れ幅、長さの小さいものであること、判定区分Ⅱの評価が平均値評価となっていることなどが考えられる。

⑥客観的にみて構造的な変状が特に進行性しているとは考えられない。

（3）健全度判定表（案）による評価結果（20～40スパン）の分析

変状の大きい21スパンに関して、新判定表に基づく点検結果の評価をまとめると以下のとおりとなる。

①判定区分Ⅰ（利用者被害を誘発する変状）、判定区分Ⅱ（構造的な変状）に関してトンネル業務に係わる技術者により試行的に評価した結果、いずれの項目に関しても判定区分Ⅰの劣化度の方が大きくなった。

これは、トンネルの維持管理において今回の新評価表策定にあたっては、判定条件として判定区分Ⅰの変状はあってはならない事態として、各項目の最大値を各スパンの評価点とし、判定区分Ⅱに関しては、各該当項目の平均点を取ったことが評価結果に影響していると考えられる。

②各スパンにおける評価のバラツキの要因に関しては、ひび割れの性状（発生位置、幅、長さ）や閉合型ひびわれ・交差分岐（はく落の可能性）の評価、漏水の評価による影響が大きいと考えられる。

③劣化度の進行に関しては、ひび割れの増加（数、幅、長さ）による評価に関しては物理的に判断できるが、閉合型ひび割れや構造的なひび割れ（軸方向連続ひび割れ）に関しては、施工時の状況や変状要因にも左右されることから、評価者の経験や判断基準により評価にバラツキを生じる原因となる。

④変状の程度による評価のバラツキに関しては、別途実施した変状の少ないスパンにおける評価結果でも全般的な劣化度（評価点）は小さいものの、変状の大きいスパン（20-40）の評価結果同様、閉合ひび割れや構造的なひび割れ（軸方向連続ひび割れ）の判断基準によりバラツキが大きくなるスパンがあった。

⑤劣化予測を行う上で、現状の変状状況を的確にかつ評価者によるバラツキを少なく評価することは重要であるが、今回提案した新判定表においては、判定区分の評価指標や具体的な評価基準（数値）を示すとともに、事前に判定条件を統一することで全般的には評価のバラツキを少なくすることができたと考えられる。

⑥トンネルの維持管理において定期的に実施される点検調査の結果のうち、今回の評価結果の分析では、判定に大きく影響する調査結果（浮き・はく離、漏水、外力による変状の有無、ひびわれの進行性）に関しては、評価できる意味あるデータとして保存していく必要があると考える。

表－2、劣化段階とレベル⁴⁾

4. 健全度評価結果に基づく劣化予測の検討

3.1で提案した健全度判定表によるAトンネルの健全度評価結果（評価点）を用いて、安田らの手法⁴⁾を用いて点検間隔とLCCといった観点からAトンネルにおける劣化予測の試行を実施した。

なお、今回の試行に関しては、利用者被害を誘発する変状のみに着目してLCCを評価するとともに、トンネルを単一化し、トンネル一本としての劣化度の平均値と分散から劣化度の変化を検討したものである。

4. 1 検討条件

本研究で試行した点検結果に基づく健全度劣化予測モデルの劣化段階とレベル（5段階）を表－2に示す。表－2に関して、前述の現状の道路トンネル維持管理で用いられている管理基準（A、B、S）をふまえた上で、

劣化段階	劣化段階の状態	対策方針	劣化度 De	健全度 Sf	レベル
V	劣化が著しく進行している	補強	5	0	使用限界
			4	1	
IV	劣化や変状が広範囲に確認でき、劣化、変状がさらに進行すると予想される。	補修	3	2	
			2	3	
III	劣化や変状が一部見られ、このまま進行すると予想される。	予防保全	1	4	許容限界
II	軽微な劣化や変状が見られる。	継続監視	0	5	
I	健全で機能的にも問題がない。	対策なし			

注意：劣化段階は、その状態であるという区間を意味し、劣化度、健全度は定量化のためポイント値を意味する。

本研究で提案する健全度判定表に置き換えて劣化度を割り振ると表-3に示すとおりとなる。

ここで、表-3に示すとおり、劣化度に関しては、本来0～50点の範囲でⅠ～Ⅴ段階に分類されるが、提案した健全度判定表は点検調査に対する指標であり、劣化度30以上の評価に関しては、点検結果だけでは判断が困難であり、詳細調査をふまえて判断すべきであると考え、劣化度0点(S)～30点(A)の範囲で評価した。

なお、今回の劣化予測では、緊急性を要する利用者被害を誘発する変状に着目し、各技術者による各スパンの評価結果の平均値を評価値として、臨界健全度と点検間隔の関係、点検間隔の違いとLCCについて評価した。

さらに、劣化度に応じた対策工(補修・補強)により健全度を回復させる上限として回復健全度を45と設定し、点検時毎に臨界健全度に至り劣化する健全度を対策工により回復健全度まで引き上げることとし、劣化予測では、回復した後は当初の劣化速度と同じと仮定した。

表-3 劣化段階とレベル(判定基準)⁸⁾

点検要領による判定	劣化段階	劣化段階の状態	対策方針	劣化度	健全度
A	V	劣化が著しく進行しており、もし2年以内に対策がなされないと、必要な機能が確保できなくなるか、利用者等に危険が及ぶ可能性がある。	補強	50	0
	IV	劣化や変状が広範囲に確認でき、劣化、変状がさらに進行すると予想され、もし5年以内に対策が行われないと、必要な機能が確保できなくなるか、利用者等に危険が及ぶ可能性がある。	補修	40	10
	III	劣化や変状が一部見られ、このまま進行すると予想される。もし適切な時期に対策がなされないと、必要な機能が確保できなくなるか、利用者等に危険が及ぶ可能性がある。	予防保全	30	20
	II	軽微な劣化や変状が見られる。現状では利用者等に影響はなく機能低下も見られないが、断続的な監視を必要とする。	継続監視	20	30
	I	健全で機能的にも問題ない。	対策なし	10	40
	S			0	50

4. 2 健全度低下モデルの検討

一般的に、点検は2年から5年程度の間隔で行われることが多い。すなわち、点検データそのものは点検間隔に応じた離散データになる。しかし、LCCを検討する上で、健全度低下モデルは、時間に関する連続モデルとして扱うことが望ましい。

これを図に示すと図-4のA～Fの経路となる。しかしながら、健全度の低下は点検時毎に判明するため、どの時点で変状による健全度低下が発生したかを点検結果のみから判定することは困難である。ここで、ひび割れ等の変状や補修・補強といった対策工による健全度回復という健全度の不連続性を平均的にとらえれば、健全度低下を図中の波線(全体的な傾向を示す曲線)のようにモデル化できる。

以上の点を考慮して、安田ら^{4)～6)}は健全度低下を全体的な傾向でとらえ、幾何学的ブラウン運動モデルを導入した確率過程によって健全度低下をモデル化している。

なお、対策工による健全度回復に関しては、その時点が明確であるため、モデルに組み込み、一方、点検そのものが数点しか存在しないという現実をふまえて、各スパンでの不確実性としてとらえ、全スパンでの全体的な傾向で健全度低下モデルを構築している。

トンネルの劣化予測を検討する上で、ひび割れなどの変状が発生することによって、トンネルの性能や機能水準は低下し、結果としてトンネルの健全度が低下する。この時期を点検のみによって確認することは困難で、安田らはひび割れの発生に着目しポアソン過程を用いてモデルの拡張を行っている^{5) 6)}。

本研究においては、安田ら⁴⁾の提案する幾何学的ブラウン運動による健全度低下モデルを3章で述べたモデルトンネルに適用し、4.1の検討条件に示すとおり、点検間隔の違いによる劣化の進行度合いや管理レベルの関係を検討するとともに、点検間隔と対策費用といった観点からLCCの試算を実施した。

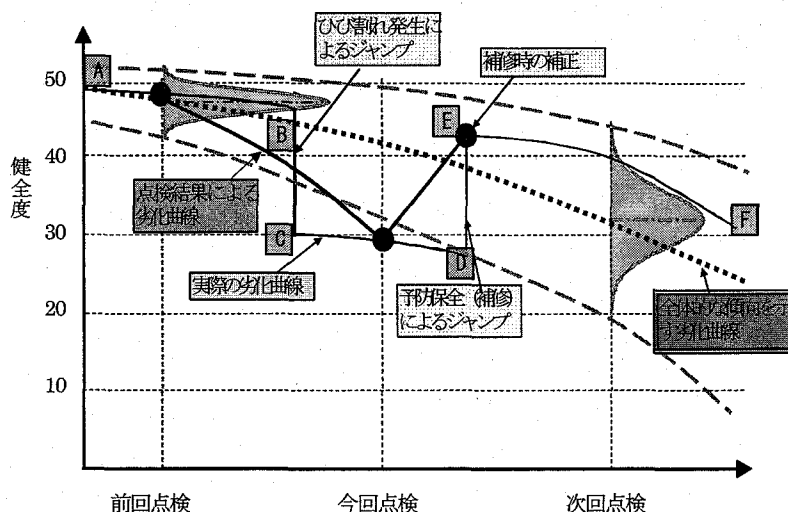


図-4 トンネル覆工の劣化過程に関するモデル図⁴⁾

4. 3 LCC の検討

点検間隔の違いによる劣化の進行および対策費用といった観点から LCC を算定することにより、適切な点検時期を決定するために、管理レベルとしての「臨界健全度（対策工により健全度を回復させる目安）」を 3 段階（35、25、15）に設定し、試算を行った。本来、LCC 算出としては、「トンネル建設費（初期投資額）」「点検費用」「対策費用（補修・補強費用）」「対策工事における社会的損失費」等を考慮して算出する必要があるが、今回は、1 トンネルにおける約 20 スパン毎の区間における劣化度の比較を実施していることから、費用比較の項目を単純化し、「点検費用」「対策費用」のみの比較として検討した。

なお、今回の検討では、トンネルの耐用年数を 50 年と想定し、50 年間維持管理するものとして LCC の検討を実施した。さらに、臨界健全度を 25 及び 15 とした場合には、点検間隔を大きくすると劣化度が 15 を下回るパスが発生し、現実には管理が困難となるため、LCC の比較では 1 例として臨界健全度が 35 の場合について検討を行った。

4. 4 劣化予測モデルの点検間隔

点検間隔としては、比較的速い劣化速度と想定できることから、最短間隔として「1 年」を設定した。

また、点検間隔をパラメータとして試算することから、2 年～5 年を 1 年ピッチとして計算した。

4. 5 対策費用

点検により、設定した臨界健全度を下回ったパスに関しては、対策により回復健全度（45）まで健全度を引き上げる必要がある。ここで劣化した健全度を回復健全度まで引き上げるために必要な対策費用を以下の通り設定した。工事費算出としては、直接工事費とした。

- ・臨界健全度 35（35→45）：50 万/スパン

想定劣化状況：0.1m/m² 程度のひび割れが 1 スパンに発生していると想定。

想定補修工：ひび割れ注入工：22,000 円/m

表－4（1） 補修費用（直接工事費）^{a)}

	算出根拠	備考
工事数量	19m×10.5m×0.1m/m ² =19.95m/スパン	
工事費	22,000 円/m×19.95m/スパン = 438,900 円/スパン：改め：50 万/スパン	

- ・臨界健全度 25（25→45）150 万/スパン

想定劣化状況：天端 120° 範囲に小ブロック化を含むひび割れが延長方向 3 m 程度と想定。

想定補修工：炭素繊維内貼り工：38,500 円/m²

表－4（2） 補修費用（直接工事費）^{a)}

	算出根拠	備考
工事数量	(120/180)×14m×4m =37.3 m ² /スパン	補修長：4 m
工事費	38,500 円/m ² ×37.3 m ² /スパン= 1,436,050 円/スパン：改め：150 万/スパン	

- ・臨界健全度 15（15→45）：390 万/スパン

想定劣化状況：天端 120° 範囲に小ブロック化を含むひび割れが延長方向 10m 程度と想定。

想定補修工：炭素繊維内貼り工：38,500 円/m²

表－4（3） 補修費用（直接工事費）^{a)}

	算出根拠	備考
工事数量	(120/180)×14m×10.5m =98.9 m ² /スパン	
工事費	38,500 円/m ² ×98.9 m ² /スパン = 3,808,035 円/スパン：改め：390 万/スパン	

4. 6 対策費用の補正

図－5 及び図－6 に示すとおり、臨界健全度 35 と設定した場合、点検間隔が長くなると点検時には臨界健全度を下回るパスが発生し、管理上のリスクとなる。なお、図の縦軸は健全度（対数目盛）で、横軸は経過年数である。

すなわち、点検間隔を 1 年とした場合は、健全度は設定した臨界健全度を若干超える程度であるが、点検

間隔を3年とした場合には、点検時の健全度は臨界健全度を大きく下回っている。

臨界健全度 35 の場合、図-5 及び図-6 の結果からも分かるように、点検間隔が1年の場合であれば、設定した臨界健全度でほぼ管理できるが、点検間隔3年となれば、臨界健全度25付近まで健全度が低下する。

したがって、LCC の計算過程では、想定していない実際の健全度から設定した臨界健全度に健全度を引き上げるための対策費用を考慮する必要がある。

たとえば、臨界健全度35と想定し、25まで低下した場合試算したスパンは21スパンであるため、

臨界健全度35 (35→45) では

$50 \text{ 万} / \text{スパン} \times 21 = 1,050 \text{ 万} \div 0.11 \text{ 億円}$

臨界健全度25 (25→45) では

$150 \text{ 万} / \text{スパン} \times 21 = 3,150 \text{ 万} \div 0.32 \text{ 億円}$

臨界健全度15 (15→45) では

$390 \text{ 万} / \text{スパン} \times 21 = 8,190 \text{ 万} \div 0.82 \text{ 億円}$ となる。

ここで、点検間隔5年～1年における点検費用と補修費用の合計(1次算出)はプログラムのアウトプットから得られ、5年間隔から1年間隔の順に「1億」「1.1億」「1.3億」「1.4億」「1.9億」である。

この値は、臨界健全度「35以下」の補修費用を加味していないことから、臨界健全度「35」より下っている劣化線の割合をグラフから読み取り、その比率と点検回数から補正値を算出した。したがって、臨界健全度「25」を「35」に上げる補修費用は、 $0.32 \text{ 億} - 0.11 \text{ 億} = 0.21 \text{ 億}$ であり、点検間隔5年の場合、臨界健全度「35」を下っている割合は、約50%程度であり、点検回数は「10回」であることから、補正費用は、 $0.21 \text{ 億} \times 0.5$ (比率) $\times 10$ 回 (50年間の点検回数) $= 1.1 \text{ 億}$ となる。

点検間隔ごとに同様の補正をプログラムのアウトプットをもとに実施すると臨界健全度が25まで低下した場合の対策費用は以下の通りとなる。

5年間隔: $1.0 + 1.1 \text{ 億} = 2.1 \text{ 億円}$ (1.1億 $= 0.21 \times 0.5 \times 10$ 回)

4年間隔: $1.1 + 0.7 \text{ 億} = 1.8 \text{ 億円}$ (0.7億 $= 0.21 \times 0.3 \times 11$ 回)

3年間隔: $1.3 + 0.3 \text{ 億} = 1.6 \text{ 億円}$ (0.3億 $= 0.21 \times 0.1 \times 15$ 回)

2年間隔: $1.4 + 0.1 \text{ 億} = 1.5 \text{ 億円}$ (0.1億 $= 0.21 \times 0.01 \times 23$ 回)

1年間隔: $1.9 + 0.1 \text{ 億} = 2.0 \text{ 億円}$ (0.1億 $= 0.21 \times 0.01 \times 50$ 回)

4.7 点検間隔とLCCの検討結果

トンネル変状が大きい場合において、健全度評価およびLCCを考慮した上で、適切な点検間隔を検討するものである。

今回のAトンネルにおいては、図-7～9に示すとおり、点検間隔を1年とすれば、設定した臨界健全度に関わらず維持管理が可能であり、初期値として既に変状程度が著しい場合においても目標とする臨界健全度において管理することができると考えられる。しかしながら、1年ごとに管理することは現実的には点検費用や社会的損失(渋滞、迂回等)の問題があり、臨界健全度をどのレベルで設定するかという問題も含めて検討する必要がある。

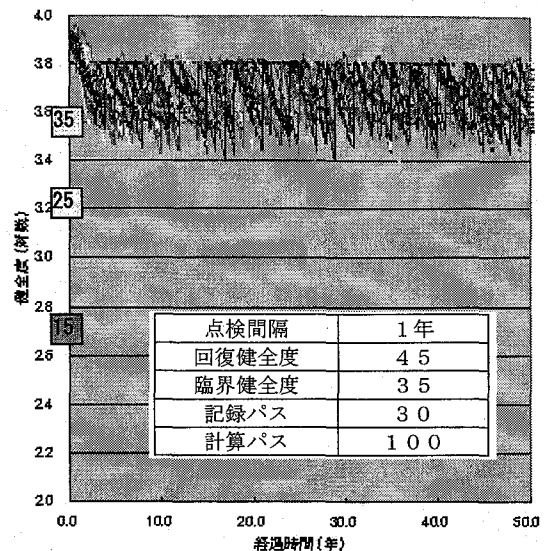


図-5 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(1年間隔)

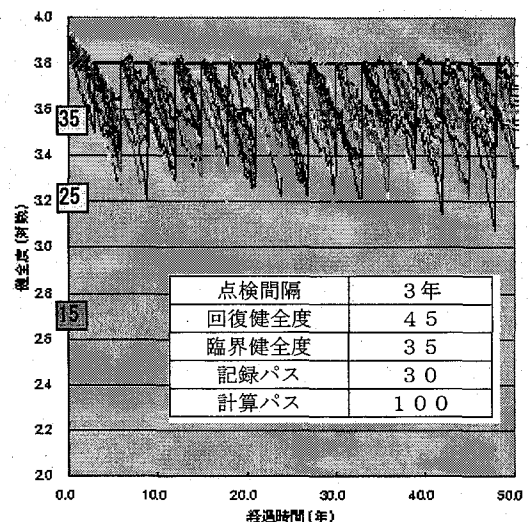


図-6 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(3年間隔)

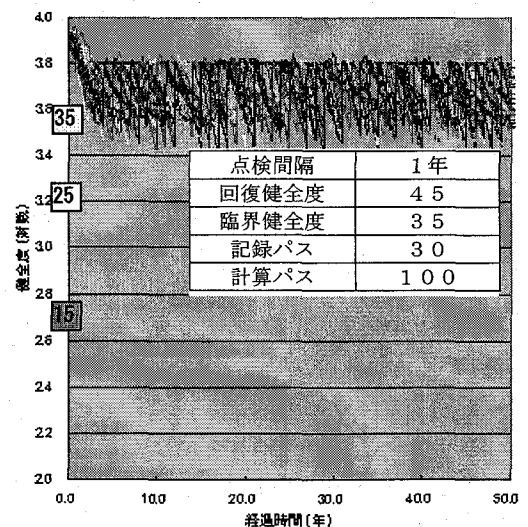


図-7 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(臨界健全度35)

そこで、臨界健全度を 35, 25, 15 の3段階に設定したうえで、点検間隔を1年～5年とした場合の健全度劣化予測を行い、適切な点検間隔の検討を行った。

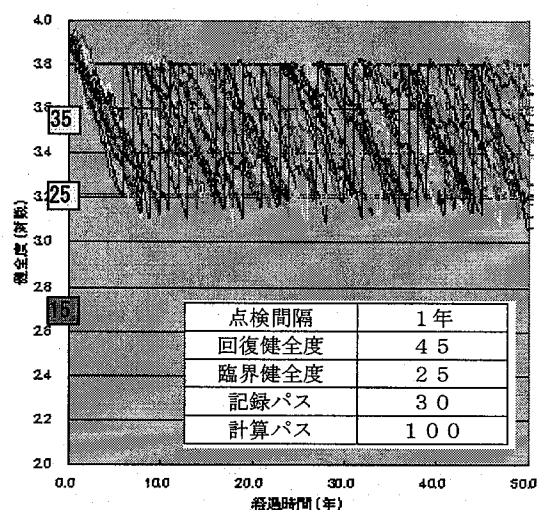


図-8 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(臨界健全度 25)

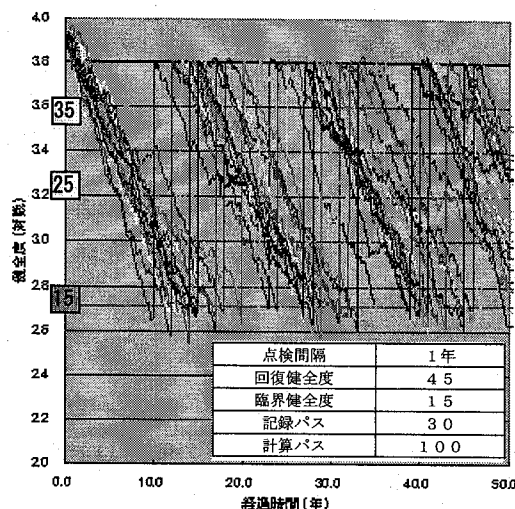


図-9 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(臨界健全度 15)

点検間隔を2年以上とすると、設定した臨界健全度を下回るパスが発生し、例えば図-10に示す点検結果3年の臨界健全度15の例では、点検時に健全度11程度のパスが発生しており、点検毎に回復健全度までの対策を実施したとしても、次の点検までに劣化が進みはく落等の事故につながる可能性が高くなる(リスク増大)。なお、この傾向は、点検間隔2年から5年まで同様の傾向が伺えた。

以上の検討結果から、定期点検のなかで維持管理の可能な健全度を15程度(補修で対応)と考えれば、臨界健全度は25程度に設定することが望ましいと考える。

4. 8 点検間隔とLCC費用の試算結果

適切な点検間隔の設定にあたっては、初期の劣化程度にもよるが、劣化が進まない内に軽微な対策(補修程度)による維持管理が望ましいと考えられる。

点検間隔が長くなり劣化が進めば、事故発生リスクとともに回復健全度まで健全度を高める対策が大規模(補強対策)となり、費用も増大する。

ここでは、一例として、図-11に示す臨界健全度35と設定した場合の劣化予測モデルによる試算結果について検討した。

図中の青線は劣化予測解析に基づくLCC費用の推移であり、赤線は点検時の劣化程度をふまえて回復健全度まで健全度を高めるために臨界健全度を大幅に下回ったパスも含めて健全度を高めるよう補正したものである。今回のLCC費用の試算結果に関して得られた結果を以下にまとめた。

①前述の通り、点検間隔が1年、2年の

場合は、設定した臨界健全度35を超えるパスは健全度30程度で収まり、今回のような劣化速度の速い変状トンネルであっても点検間隔を短くすれば、高い健全度を確保することは可能となる。

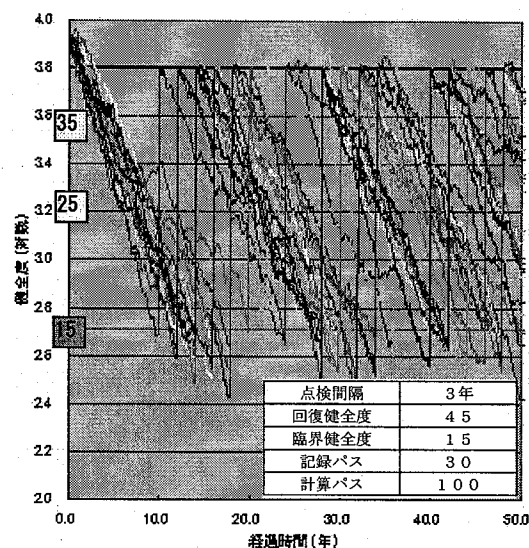


図-10 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(臨界健全度 15)

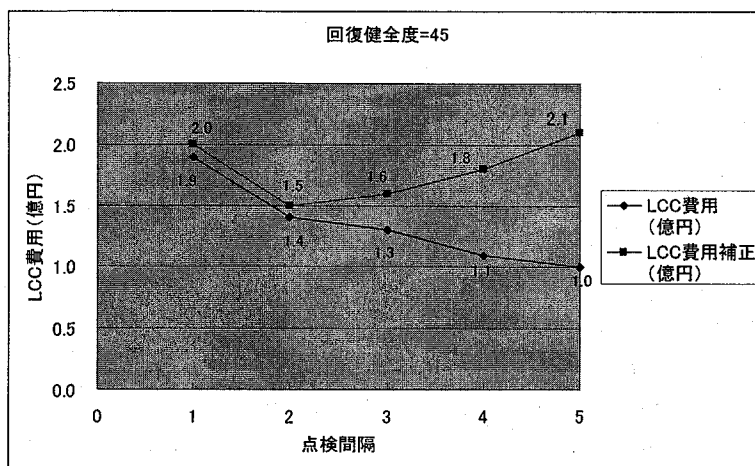


図-11 点検間隔とLCC費用の試算結果⁸⁾

②図-12 に示すとおり、点検間隔が3年を超えるケースでは設定した臨界健全度35に対して、点検時には健全度が25以下になり臨界健全度35での効果的な維持管理は困難である。

③LCC費用の試算結果からは、図-12 に示すとおり点検間隔を3年以上とすると、健全度の回復に必要な対策費用が大規模となることから、LCC費用も増大することが分かる。

④管理レベルを踏まえて考えると、補修が必要となる臨界健全度は予防保全を含めると25程度と考えられることから、今回のモデルトンネルのように劣化速度の速いトンネルにおける維持管理に関しては、点検間隔を短くして軽微な補修を繰り返すことにより維持管理を図る事が望ましい。

ただ、今回の試算においては、利用者損失（渋滞、通行止め、迂回等により発生する費用）は環境条件、使用条件によりことなるため考慮しておらず、実際のトンネルの維持管理においては計上すべきである。

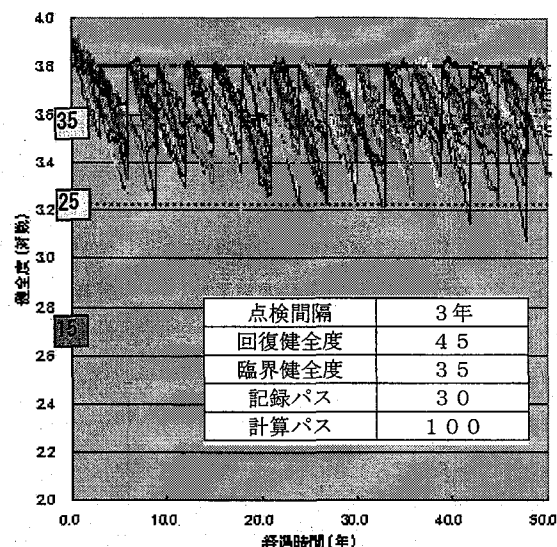


図-12 点検結果と健全度低下結果⁸⁾
(臨界健全度35)

5. まとめ

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。

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、劣化予測手法の検討を進め、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。

これまで蓄積してきたトンネルの多くが老朽化し、かつ同時期に多くのトンネルにおいて、限られた予算のなかで効率よく、その延命化を考えていくことが今後強く求められている。本研究で取り扱ったような予測手法は今後のトンネルの合理的な維持管理計画の立案に際して強力なツールとなると考えられる。

一方、今回実施したトンネル全体での管理手法のほかに、個々の変状スパンでの最適な点検間隔において管理する部分管理手法も考えられる。構造的な変状に関しては、部分管理の中でもその特徴ある変状に対して、連続的に計測を行い、集中的に管理するようなケースも想定され、維持管理のレベルに応じた手法を適用する必要がある。これらの劣化予測モデルの確立と維持管理手法の立案にあたっては、トンネルの初期データの取得等、効果的なデータの取得が切に望まれる。データとしては点検データ、補修履歴、建設時の施工記録等が考えられるが、意図されたフォームに基づき有効活用できるデータベースを構築すべきと考える。

今後は、劣化予測解析を念頭においた点検のあり方、データ取得フォーム、補修履歴フォーム等を作成し、戦略的な維持管理計画を実施すべく、官民一体となって効果的なデータ取得へ向けて一日も早く進み始めることが望まれる。今後も、さらに研究を進め、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) 熊坂, 朝倉, 小島, 松長, 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.
- 3) (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.
- 4) 安田, 大津, 大西, アセットエンジニアリング, 土と基礎 講座「リスク工学と地盤工学」, pp35-42, 2004.
- 5) 安田, 境, 大津, 大西, ポアソン過程によるトンネル構造物の健全度低下モデルの研究, 建設技術シンポジウム, 2004.
- 6) 安田, 亨, トンネル構造物の維持管理補修最適化に関する研究, 京都大学学位論文, 2004.3.
- 7) (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.
- 8) (財) 道路保全技術センター, 山岳トンネルの劣化予測に関する検討報告書, 2007.