

トンネルマネジメントシステムの構築

応用地質株式会社 中村 一樹^{*1}
 京浜急行電鉄株式会社 竹内 明男^{*2}
 京浜急行電鉄株式会社 山田 正^{*3}

By Kazuki NAKAMURA, Akio TAKEUCHI, Tadashi YAMADA

短い期間に急速に発展を遂げた鉄道網に存在するトンネル群が、一斉に補修を必要とする時期が近づいている。限りある財源の下に効果的な維持管理を行うために、管理者はさまざまな方法を模索している。

京浜急行電鉄株式会社（京急電鉄）においても同様に、多くのトンネルを所有しているため、特に効果的かつ経済的な維持管理方法の策定が必要とされている。

そこで、トンネルマネジメントシステム（TMS）の導入を決定し、構築を開始した。

TMSは、現在のトンネルの変状状態を「健全度」という定量指標で評価し、将来の劣化を予測すると共に、変状原因を推定し、適切な対策工を適切な時期に適用することができるように管理者の意思決定を支援するシステムで、健全度評価システム、変状原因推定システム、劣化予測システム、対策工選定システムおよび維持管理最適化システムの5つのサブシステムから構成される。

今回は、管理者が予算配置の意思決定に必要な情報を提供することのみを目的としたバージョン1として、健全度評価システムに点検を組み入れた「点検および健全度評価システム」と維持管理最適化システムのうちライフサイクルコスト（LCC）を計算する「LCC積算システム」を構築し、TMSの暫定運用を開始した。

【キーワード】トンネルマネジメントシステム（TMS）、LCC、健全度評価、AHP

1. はじめに

京浜急行電鉄株式会社（京急電鉄）は、東京都港区から川崎市、横浜市、横須賀市を経て、三浦市までをエリアとする全5路線で、営業キロは87.0kmにおよぶ。沿線図を図-1に示す。

図中に示すように、横浜、横須賀を中心にトンネルが多く存在し、総数は39を数える。それらトンネルの完成年は、路線の開通に合わせて建設されたこともあり、短い期間にまとまっている。今後それらのトンネルは同時期に一斉に補修の時期を迎えることとなる。そのため、できるだけ少ない予算で効果的な維持管理をすることが強いられるようになってくることは必至である。

最近、ライフサイクルコスト（LCC）の考え方（例えば、変状が進展し対策が必要となってから対策するより、事前に予防保全的に対策を実施するほうが長い期間のトータルコストは、安価な場合もあ

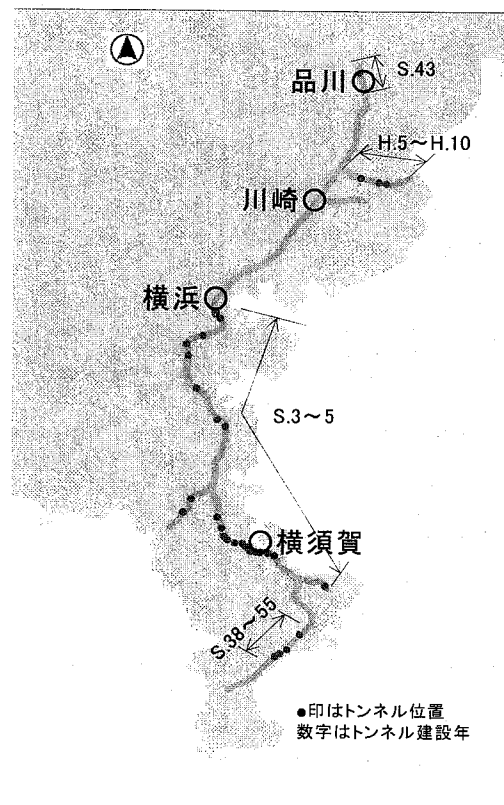


図-1 京急電鉄沿線図

*1 東京支社構造物マネジメントグループ グループリーダー 03-3946-3111

*2 施設部保線課 課長補佐 03-3280-9157

*3 施設部保線課 主任技術員 03-3280-9157

るという考え方)から、最小のコストで最大の効果を得るためには、対策方法の選択と対策工実施のタイミングが重要であることが明確となってきた。この対策工実施の最適なタイミングを知るためには、現在のトンネルの状況を正確に把握し、劣化予測を行う必要がある。

その一方で、用いる対策工が変状原因にマッチしており効果的かつ経済的であるかのチェックも必要である。

しかしながら、必ずしも専門技術者ではないトンネル管理者が、これらの作業を正確に行うことは困難である。このような状況に対し、トンネル管理者を支援するエキスパートシステム、データベースシステムおよび意思決定支援システムからなるマネジメントシステムが望まれるようになってきた。

その状況は、京急電鉄においても同様である。

トンネルマネジメントシステム(TMS)は、2002年に世界で初めて米国交通省(DOT)から開発され発表されたが、橋梁マネジメントシステム(例えば PONTIS)のように劣化予測を行い、維持管理最適化を提案するシステムに至るまでのものではなかった。それはトンネルの変状を力学的に整理し、定量的に劣化を予測することが難しいからなど、解決すべき問題が山積されているからだと考えられる。

以上の問題点を可能な限り解決しつつ、京急電鉄に最も適した TMS の構築を目指した。

2. トンネルマネジメントシステム (TMS)

現在国内外で構築されているシステムの調査結果をもとに様々な検討を行い、橋梁マネジメントシステム(BMS)¹⁾²⁾³⁾を参考にして5つのサブシステムを組合せた図-2に示すような TMS の骨子を構築した。

BMS と大きく異なるところは、同じ変状状況でも変状原因によって対策工が大きく異なることもあるというトンネルの特殊性を鑑み、サブシステムのひとつに変状原因推定システムを組み入れ、その変状原因推定システムの出力結果をもとに対策工を選定することとした点である。

以下に各サブシステムの概要を記す。

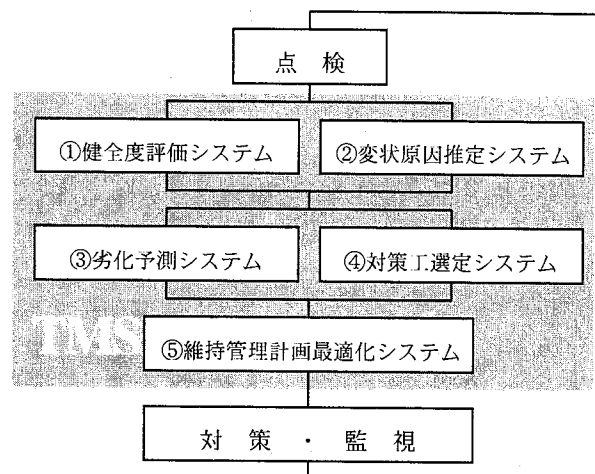


図-2 TMSの基本構成

(1) 健全度評価システム

点検結果をもとに、トンネルの変状状況を「健全度」という定量化された指標で表すシステムである。健全度は後述の劣化予測に必要な不可欠なデータであり、正確な劣化予測、維持管理計画作成には、精度が要求される。専門的な知識や経験を有しないトンネル管理者でも専門技術者と同じ判断が可能にすることを目標とするため、この健全度評価システムはエキスパートシステムである必要がある。

(2) 変状原因推定システム

トンネルに発生した変状の原因を推定するシステムである。このシステムでは、発生形態や周辺状況から変状原因の推定が行われる。また、発生形態や周辺状況だけで判断が困難なものは、このシステム内で変状原因を特定するための調査が提案される。

このシステムを用いることにより、専門家でなくても正確な変状原因推定が可能となる。また、変状原因は前述のように対策工を計画する上で最も重要な情報である。

(3) 劣化予測システム

現在のトンネルの状況すなわち健全度(劣化度)からトンネルの余寿命(措置なしに安全な通行が不可能となるまでの年数)を推定するシステムである。外力による変状に対するトンネルの構造的安定性(耐荷力)を指標とした構造劣化曲線と、漏水や材料劣化に対する機能性維持を指標とした機能劣化曲線を設定し、これらにより余寿命を推定する。

余寿命の推定は、LCC を求める上で必要不可欠である。

しかし、この劣化曲線の設定は、TMS 構築の中で最も困難である。

(4) 対策工選定システム

変状原因に対して適切な対策工を選定するシステムである。ここでは、数種類の変状原因に対して適当と思われる工法が、施工単価とその工法の寿命と共に与えられる。数種類の工法は、次の維持管理計画最適化システムでひとつの工法に絞られる。

(5) 維持管理計画最適化システム

劣化予測および対策工選定結果に基づき、「いつ、どこを、どのように」対策を実施することが最も効率的かつ経済的であるかを検討し、最適な維持管理計画を策定するシステムである。従来、付け焼刃的に行われてきた対策が計画的に実施可能となる。

そして、維持管理計画最適化システムで求められた計画に従い対策や監視等を行った上で、次の点検を待つこととなる。

点検は、国交省（旧運輸省）の通達により、鉄道トンネルは2年毎に通常全般検査を行い、通常全般検査10回に1回（20年に1回）は特別全般検査を行わなければならないこととなっている。

3. 京急電鉄版トンネルマネジメントシステム (K-TMS)

京急電鉄版トンネルマネジメントシステム (K-TMS) は、前述の TMS の基本構成を基に、以下の点を考慮して図-3 に示すようなシステムフローを構築した。

・TMSにおける最小単位はスパンとする

現在の点検および健全度評価はスパン単位で行われるため、TMS もスパンを基本単位とする。

施工時にはスパン単位でなく、ある程度まとまった範囲で優先順位等を設定するほうが効率的なこともあるが、この検討は今後の課題とする。

・点検および健全度評価システムとして構築する

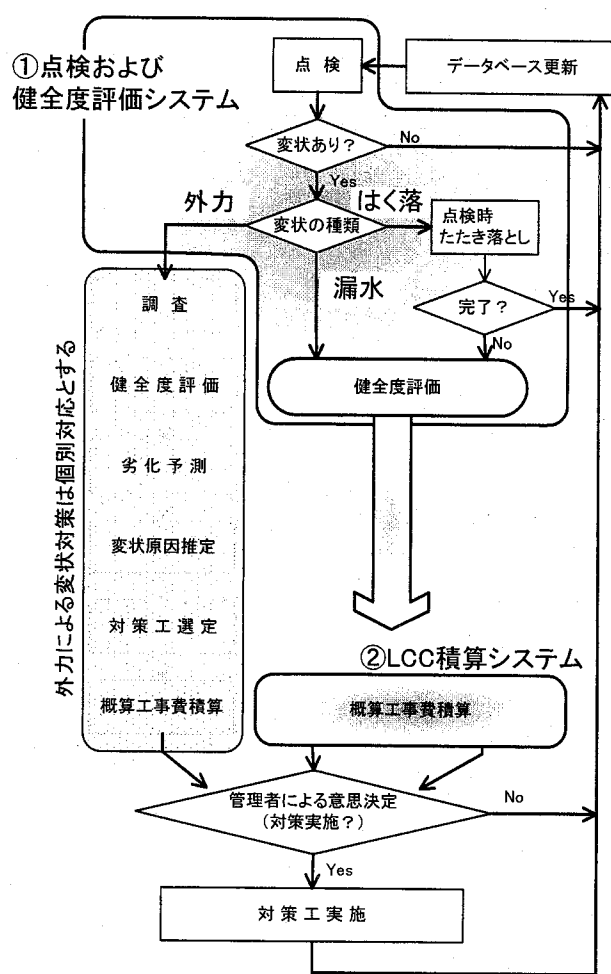


図-3 K-TMS システムフロー

健全度評価システムで必要なデータを精度良く得るためには、点検方法と密接な関係が必要と考え、両者をひとつにしたシステムを検討した。

・外力による変状の対策は個別対応とする

外力による変状は、京急トンネル群において今日までに数例のみと極めて特殊な事例である。そのため、変状発生を確認したら、調査、対策工を個別に検討する方針とする。

・劣化予測は今後の課題とする

現段階で覆工コンクリートの劣化予測曲線設定のための十分なデータがない。

特に、本線の主なトンネルは施工から80年程度を経ており、途中様々な対策がなされているが、個々の対策がいつ施工されたかがわかる詳細な記録が残っていないため、予測曲線の設定が困難である。

今後、点検データを蓄積することにより構築を目指したい。

・今後30年間の措置（対策）費用を求める

前述の TMS 基本構成中の維持管理計画最適化システムのように維持管理計画を自動的に決定するのではなく、管理者が意思決定を行う上で必要な情報を提供する LCC 積算システムとして構築を行った。

K-TMS システムフローに示すとおり、今回は点検および健全度評価システムと LCC 積算システムの2つのサブシステムを構築して、暫定運用を開始した。

4. 点検および健全度評価システムの構築

（1）各機関の健全度評価手法および問題点

健全度評価手法は、各機関によって個別に定められているが、以下の項目に着目し健全度を評価している点は同様である。

- 「利用者に対する安全性」
- 「変状の程度、現象」
- 「維持管理作業量に及ぼす影響」
- 「緊急性の度合い」

以下に、日本国内の代表的な機関の健全度評価手法について概説する。

a) 国土交通省・地方自治体 ～ 道路トンネル

国土交通省及び地方自治体の道路トンネルでは、「道路トンネル維持管理便覧」⁴⁾に従って健全度評価を行っている。同便覧では対策の緊急度と変状の程度により表-1 に示すとおり 3A から B までの4つの判定区分を設定しており、判定の基準として「外力による変状」「材質劣化による変状」「漏水などによる変状」といった3つのカテゴリーを設けている。維持管理計画は、主に 2A 以上のランクに対して対策を行っているのが現状である。

b) 日本道路公団 ～ 高速道路トンネル

日本道路公団（JH）における健全度評価は、外力作用に対する「補強ランク」と、ひび割れ密度、漏水、材料劣化に対する「補修ランク」に分類される。⁵⁾各ランクは表-2 のように対策工の緊急性と関連づけて区分されており、この補修・補強ランクと

表-1 判定区分の要素⁴⁾

判定区分	判定の要素				対策の緊急度
	通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	構造物としての安全性に及ぼす影響	維持管理作業量に及ぼす影響	変状の程度	
3A	危険	重大	著しい	重大	直ちに対策を施す
2A	早晚脅かす異常時に危険となる	早晚重大となる	大きい	進行中、機能低下も進行する	早急に対策を施す
A	将来危険となる	将来重大となる	中程度	進行中、機能低下のおそれがある	重点的に監視をし、計画的に対策を施す
B	現状では影響がない	同左	ほとんどない	軽微	監視をする

表-2 補修・補強ランクと対策工の緊急性の目安⁵⁾

種別と目的	補修補強ランク	対策工の緊急性の目安
トンネル構造の耐力向上	A	変状の規模が特に大きくかつ進行し、通行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。
	B	変状が大きくかつ進行し、通行車両に対して危険であるため、早急に何らかの補強が必要なもの。
	C	変状があり、それらが進行して、近い将来車両通行に対して危険を与えるため速やかな補強が必要なもの。
	D	変状があり、将来、通行車両に対して危険を与える可能性があるため重点的に監視し、計画的に補強が必要なもの。
通行車両の安全確保・美観と保守の軽減	I	通行車両の安全に対して危険な状態であり、早急に何らかの補修が必要なもの。
	II	通行車両の安全に対して、近い将来危険な状態になることが予想されたり、美観上の問題がある場合、計画的に補修が必要なもの。
	III	早急な補修が必要では無いが材料劣化などが認められ監視および場合によって軽微な補修が必要なもの。

変状原因により標準設計が設定されており、特殊な場合を除いてそれらの適用が可能である。

c) 旧運輸省 ～ 鉄道トンネル

旧運輸省では、鉄道トンネルを対象に健全度評価手法を「トンネル保守管理マニュアル」⁶⁾にまとめている。鉄道においては「運転保安等に対する影響」「変状の程度」という観点から対策の緊急度を

表-3 に示すように、AA から S の 6 段階の判定区分を設定しており、「外力による変状」「材料劣化による変状」「軌道の保守周期の短縮に関するもの」の 3 つの判定基準で判定される。

表-3 判定区分の要素⁶⁾

判定区分	運転保安等に対する影響	変状の程度	措置
AA	危険	重大	直ちに措置
A ₁	早晚脅かす 異常外力の作用時危険	変状が進行し、機能低下も進行	早急に措置
A ₂	将来脅かす	変状が進行し、機能低下の恐れ	必要な時期に措置
B	進行すれば A ランクになる	進行すれば A ランクになる	監視 (必要に応じて措置)
C	現状では影響なし	軽微	重点的に検査
S	影響なし	なし	—

d) 健全度評価手法の問題点

前述の各機関の健全度評価手法では、健全度を決定する目安として、外力による変状に対して内空変位速度やひび割れの長さ・幅・密度などの定量的指標が示されているものもあるが、多くは定性的である。また、材料劣化によるはく落や漏水に関しては、定性的な表現がほとんどで、点検者によって判定が異なる要因となっている。トンネルの変状は、トンネルまたはスパンにより発生状況が様々であり、それらの健全度評価を行う際にはトンネルの変状や補修・補強対策に関する豊富な知識と経験が求められる。

このことから、従来の健全度評価手法は判定者の主観が大きく寄与するシステムであり、だれが判定しても同じ判定とはならないといった問題があると言える。

また、従来の健全度は対策の緊急度との関連性を有するが、具体的にいつまでに措置が必要であるか、すなわち安全な供用が可能な残された期間（＝余寿命）があと何年であるかといった記述はどの機関のランク表にも見られない。そのため、劣化予測や、LCC を考慮した維持管理計画の策定をする上で、最も重要な情報を得ることができないといった問題がある。

(2) 健全度ランクの設定

前述の問題のひとつでもある、健全度と対策等の措置が必要とされるまでの期間との関連が具体的にないことに対して、それらが明確となった健全度ランクを設定した。

検討の結果、K-TMS で用いる健全度は鉄道トンネル用をベースとして、京急電鉄におけるこれまでの対応方法や点検結果等を踏まえ設定した。表-4 に K-TMS で用いる健全度ランク表を示す。

なお措置実施までの年数は、2 年という点検間隔を考慮に入れて決定した。

表-4 K-TMS で用いる健全度ランク

健全度ランク	定義	措置の方法と措置実施までの年数
AA	変状・損傷が極めて著しく、緊急的に可能な限り直ちに何らかの対策を行う必要があるもの。	対策Ⅰ 即時 (可能な限り)
A ₁	変状・損傷が著しく、緊急的ではないが、次回の点検を待たず何らかの対策を行う必要があるもの。	対策Ⅰ 1 年以内
A ₂	変状・損傷があり、何らかの対策を行う必要があるもの。次回の点検時には、A ₁ ランクとなる可能性が高いもの。	対策Ⅰ 3 年以内
B	変状・損傷があり、進行性の可能性があるか、計画的に何らかの対策を行う必要があるもの。	対策Ⅰ 10 年以内 または詳細検査
C	変状・損傷があるが、現状では継続的に監視程度の対応で問題ないもの。	通常全般検査 で対応
S	変状が全くないもの。	措置なし

(3) 新しい健全度評価手法の検討

前述のもうひとつの問題に、現状の各機関の健全度評価手法は定性的な表現がほとんどで、点検者によって判定が異なる要因となっているといったことがある。これを解決するために、定量的に判定を行う方法を検討した。

さまざまな検討を重ねるうちに、個々の劣化面積や劣化の度合いを点数化する方法で定量化しても、プロフェッショナルエンジニア（対象のトンネル群を熟知した専門技術者）の判定と異なることがあることがわかった。

そこでなんらかの別の方法で、誰が点検しても同じ健全度評価結果が得られるような精度の高い定

量化方法を構築することを検討した。

そして、だれでも判断可能なチェック項目のみを用いた点検シートを用い、通常の点検作業のほかに、点検時に点検員があてはまる項目をチェックすることで、トンネルの状況の定量化が可能な健全度評価システムを構築した。

点検シート中のチェック項目（表-5 参照）は、京急電鉄トンネル群に顕著な劣化状況で、プロフェッショナルエンジニアが着目するポイントが網羅されている。その項目に対する適正な配点を決めることで、健全度評価の精度を増すことができると考え、配点の決定方法を検討した。配点が適切であれば、この点検シートを用いると、点検時に点検員があてはまる項目をチェックするだけで、トンネルの状況の定量化が可能となる。

配点のウエイト（重み付け）を数学的に行う方法のひとつに AHP（Analytic Hierarchy Process）⁷⁾⁸⁾ という方法がある。

この方法は、下記のような特徴を有している。

- ① 評価基準が多くあり、しかも互いに共通の尺度がないような場合でも判断が可能である
- ② 通常は定量分析できない不明瞭な要因を持つ問題も判断できる
- ③ 首尾一貫性のないデータを扱うことができ、首尾一貫性の度合いがわかるので修正が容易に行える

これらの特徴を利用して、通常は定量分析できない様々な要因から、ひとつの健全度を求める際の各項目のウエイトを求めることとした。

AHP では、問題を評価基準と代替案にレベル分けを行い階層構造とする。そして、評価基準間で求められるペア比較マトリックスからウエイトを求め、代替案を決定する。今回の評価基準は、鉄筋・H 鋼露出、補修材再はく離等の単純な 2 階層とした。またここでは代替案を決定することが目的ではなく、評価基準間のウエイトを求めることを目的とした。

ペア比較マトリックスおよび各評価基準のウエイトは以下のような数学的根拠に従って求めた。

階層のあるレベルの要素 $A_1, A_2, \dots, A_n$ のすぐ上位階層のウエイト $w_1, w_2, \dots, w_n$ を求める場合、2 つの項目 a_i, a_j の項目間の重要度（今回は、プロフェッショナルエンジニアにより設定し、既知

とする）を a_{ij} とすれば、要素のペア比較マトリックスは $A = [a_{ij}]$ となる。もしウエイトが既知である場合、ペア比較マトリックスは、式-1 のようになる。

$$A = [a_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \text{式-1}$$

ただし、

$$a_{ij} = w_i / w_j, \quad a_{ji} = 1 / a_{ij}, \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad \text{式-2}$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{式-3}$$

である。

このとき、意思決定者（プロフェッショナルエンジニア）の判断が完全に首尾一貫していれば、すべての i, j, k について $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ が成り立つ。

このペア比較マトリックスに重み列ベクトル W をかけると、

$$A \cdot W = n \cdot W \quad \text{式-4}$$

となる。また、この式は固有値問題として、式-5 に変形できる。

$$(A - n \cdot I) \cdot W = 0 \quad (I \text{ は単位行列}) \quad \text{式-5}$$

ここで、 W がゼロでないためには、 n が A の固有値でなくてはならない。このとき、 W は A の固有ベクトルとなる。また、固有値 λ_i ($i=1, 2, \dots, n$) はひとつだけ非ゼロで他はゼロとなり、 A の主対角要素の和は n であることから、非ゼロの λ_i を $\lambda_{\max}$ とすると、

$$\lambda_i = 0, \quad \lambda_{\max} = n \quad (\lambda_i \neq \lambda_{\max}) \quad \text{式-6}$$

となる。したがって、 $A_1, A_2, \dots, A_n$ に対する重みベクトル W は、 A の最大固有値 $\lambda_{\max}$ に対する正規化した固有ベクトルとなる。そして、式-4、式-6 から、

$$A'W' = \lambda'_{\max} W' \quad (\lambda'_{\max} \text{ は } A' \text{ の最大固有値}) \quad \text{式-7}$$

がいえることから、ペア比較マトリックス A' から、未知の重みベクトル W' を求めた。

ここでいうペア比較マトリックス A' は、京急電鉄トンネル群の特徴を技術的に良く知る 3 人のプロフェッショナルエンジニアで構成されたチームが意

思決定者となり作成した。

こうして実際に AHP により計算した未知の重みベクトル W が、プロフェッショナルエンジニアが判断する際のウエイトを再現している。このウエイトを配点として用いた点検・健全度評価シート（点検シート）を表-5 に示す。

この点検シートの当てはまる項目にチェックするだけで、判定が可能である。

点検シート下部の材料劣化チェックの部分では、チェックした項目の配点を合計するだけで、健全度判定が可能である。

表-5 京急電鉄トンネル点検・健全度評価シート

漏水チェック		
☐	軌道に直接連続滴水している	
☐	電気設備、架線に直接滴水している	
ひとつでもあてはまったら、すぐに漏水対策を行う。		
外力による変状チェック		
☐	圧さひび割れ	
☐	せん断ひび割れ	
☐	押し抜きせん断ひび割れ	
☐	放射状ひび割れ	
☐	段差3mm以上のひび割れ	
☐	開口幅3mm以上のひび割れ	
ひとつでもあてはまったら、別途調査を行う。		
材料劣化チェック		
	配点	得点
☐	鉄筋・H鋼露出(防錆処理なし)	6
☐	補修材再はく離	1
☐	角欠け(目地、追め、ひび割れ、コールドジョイント沿い)	2
☐	ジャンカ	10
☐	穴	5
☐	漏水による侵食	9
☐	網目状、亀甲状ひび割れ	4
☐	閉曲線ひび割れ	4
☐	少々強く叩くとはく落、骨材落下、セメント分削れる	23
☐	濁音A(パコパコ、薄くはがれそうな濁音)	25
☐	濁音B(鈍音、周辺より明らかに 鈍い音、原因は様々)	11
合計		
合計得点0(S)、1~4(C)、5(B)、6~19(A2)、20以上(A1)		

(4) 健全度評価手法の実証

前述のトンネル点検・健全度評価シート（点検シート）で求まる得点合計を DI (Deterioration Index, 劣化度数) 値と定義する。点数が高いほど、劣化度が高いことを示す。

実際にプロフェッショナルエンジニアによりそのスパンの健全度が判定されているスパンで、点検員が点検シートを用いて判定した。結果を図-4 に示す。

この図から、プロフェッショナルエンジニアによる判定を健全度ランクの「真値（正解）」とすると、点検シートによる DI 値と健全度ランクの真値の間には強い関連性があることがわかる。

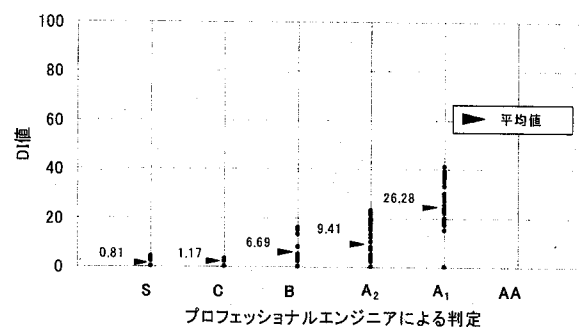


図-4 点検員により求められた DI 値とプロフェッショナルエンジニアによる判定結果の比較

しかしながら、各ランクのデータにはばらつきがあり、しきい値の設定の方法によっては、ひとつの DI 値が複数のランクに当てはまることがある。

各ランクの平均値から土標準偏差 σ の範囲を各ランクの値と設定した場合、複数のランクが重なる値が多く存在したため、平均値から土標準偏差 σ の $1/2$ の範囲とした。この場合、複数ランクへのラップが概ねなくなったため、表-6 に示すように、平均値から土標準偏差 σ の $1/2$ を減じた値をそのランクの暫定下限値と定義した。なおここで、AA ランクは、京急電鉄のトンネルに存在しなかったため、定義できていない。

表-6 健全度ランクと DI 値の関連表

ランク	S	C	B	A2	A1	AA
平均値	0.81	1.17	6.69	9.41	26.28	-
平均値-0.5 σ	0.28	0.45	4.32	5.67	19.22	-
暫定下限値	0	0.5	4.5	6	20	-
DI 値	0	1~4	5	6~19	20~	-

この関連表と点検シートにより、だれでも同様な健全度評価を行うことができるシステムが完成した。

しかし、精度的には不十分な暫定案であるため、点検シートや配点に関して、これからも更なる検討を重ねたい。

5. LCC 積算システムの構築

前章の方法でスパン毎に健全度が決定され、措置が必要となるまでの年数が示された。

措置が必要となるまでの年数毎に 1 年ずつ、措置対象面積と措置の単価の積で求まる措置費用を積み

上げると、LCCを計算することができる。

しかし、ここでいう措置が必要となるまでの年数は AA および A₁ ランク以外は幅を持っており（表-4 参照）、具体的に何年後かはわからず、そのままでは1年毎の予測される措置費用を積み上げることはできない。

そこで、各ランクの中で優先順位を付け、措置までの年数を具体的に決定することとした。

優先順位は、はく落の危険性がある面積割合が多いほうが、確率的に危険性が高いため早く措置が必要であると仮定して、現在から将来にかけてはく落が起こる可能性のある面積をベースとした、はく落が起こる可能性を表す「はく落ポテンシャル」を求め、その値を基に優先順位付けを行うこととした。

すなわち、図-5 に示すように、DI 値とはく落ポテンシャル値をクロスさせることによって措置が必要となるまでの年数を決定することとした。

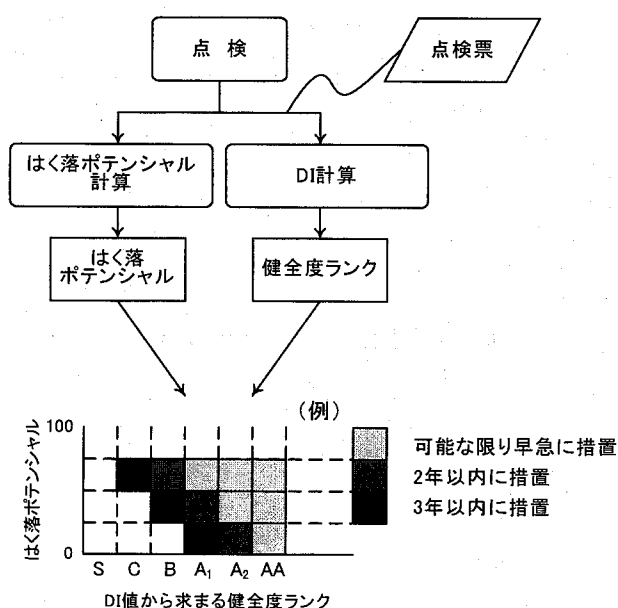


図-5 措置が必要となるまでの年数決定法

「はく落ポテンシャル」の算出方法は、以下のよう
に定める。

$$P_u = \{ (\alpha \times F_u + D_u) / A_u \} \times 100 \quad \text{式-8}$$

ただし、 P_u ：はく落ポテンシャル

F_u ：顕著な劣化面積（ m^2 ）

D_u ：劣化面積（ m^2 ）

A_u ：スパン面積（ m^2 ）

α ：係数

なお、「顕著な劣化」とは、トンネル保守管理マニュアル⁶⁾における「剥落に対する健全度判定区分」が「 α 判定（要対策）」となった箇所を示し、「劣化」とは、同マニュアルにおける「外力・劣化・漏水等による機能障害に対する健全度判定区分」が「A（AA,A1,A2）判定（要措置）」となった箇所を示す。

表-7 に示すように、全トンネルにおける「劣化」面積は、「顕著な劣化」面積の 10.65 倍であるが、実際に平成 14 年点検時のハンマーによる打診ではく離する箇所数は、 α 判定の範囲内と A 判定の範囲内で同程度であったため、この 10.65 を暫定的に「劣化」面積に対する「顕著な劣化」面積の重み、すなわち係数 α とした。

表-7 全トンネルにおける顕著な劣化面積と劣化面積の割合

顕著な劣化面積 (m^2)	劣化面積 (m^2)	劣化面積／顕著な劣化面積
522.10	5559.36	10.65

また、 $\alpha=10.65$ とし、この式を用いた場合、 P_u が 100 を超える可能性があるが、100 以上は最もはく落する危険性が高く優劣付け難いものとして 100 とした。

上述のように現段階では問題点を含む式であるため、今後は「顕著な劣化」面積の増加を通常全般検査ごとに記録し、「劣化」が「顕著な劣化」に変化するスピードを考慮するなどして、理論的かつ実用的な式を検討する考えである。

式-8 により求めたはく落ポテンシャルを用いて、措置が必要となるまでの年数を次のように決定した。

- 例えば、ランク A₂ は、表-4 より、措置を必要とするまでの年数は 3 年以内とあり、A₁ が 1 年以内とあるので、2 または 3 年となる。
- ランク A₂ の中で、はく落ポテンシャルの値が 50 以上を 2 年、50 未満を 3 年とした。
- 同様に、ランク B は、措置が必要となるまでの年数は 4～10 年となるので、はく落ポテンシャルの値が 100～86 の場合 4 年、85～71 の場合 5 年といったように、約 14 ポイント増えるごと

に1年短くなるものとした。

こうして、劣化曲線の設定なしに、個々のスパンの措置が必要となるまでの年数を求め、LCCを積算するための情報を得ることができた。

6. LCC 積算結果および維持管理方針の決定

前章の方法で求めた各スパンの措置が必要となるまでの年数をもとに、今後30年間のLCCを積算した。今後このトンネル群を半永久的に使用し続ける予定であるため、可能な限り長期間のLCCを計算するべきであったが、あまりに長期間のLCC算出には不確実性が多く、正確な判断を行う情報に欠けると考え、暫定的に30年間とした。

今回求めるLCCは、管理者が今後30年間の覆工コンクリートの劣化によるはく落対策に関する維持管理方針を決定するための情報とすることが目的であるため、劣化対策のみを対象として積算した。

用いる対策工は、京急電鉄における実績を参考に、表-8に示す2通りを用い、それぞれLCCを計算した。

表-8 劣化対策工法

工法名	断面修復工	ネット工
工法詳細	強化モルタル工	金網工
単価(円/㎡)	393,500	144,500
対策工寿命 (再対策が必要となる までの年数)	50	10

なお、施工単価は、夜間間合い作業における諸経費込みの参考価格で、ネット工は劣化部を包括し、端部のアンカーボルトはコンクリートの健全な位置に設置しなければならないことから、劣化部の周辺50cmの幅を対策面積に加えた上で、劣化部の1㎡当りの単価となるように割り戻しているため、通常より割高となっている。

断面修復工を用いた場合の30年間LCCを図-6に、ネット工を用いた場合の30年間LCCを図-7に示す。

以上の2つの計算結果から、今後30年間の総額では概ね同額となることがわかった。しかし、1～3年の費用が大きく異なる結果となった。当面の3ヵ年に8億円にもおよぶ費用を補修費に充当する

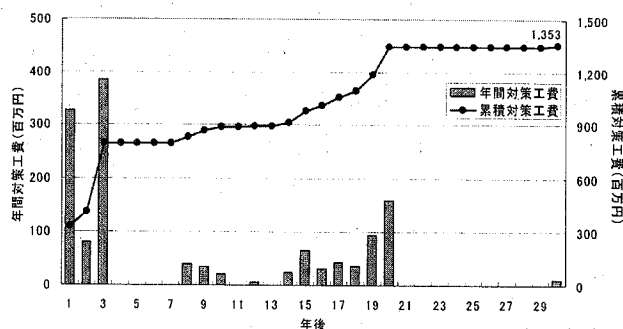


図-6 30年間LCC（断面修復工）

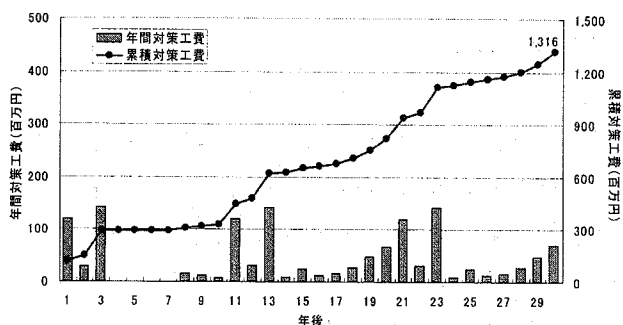


図-7 30年間LCC（ネット工）

ことは予算制約上難しいとの経営判断から、ネット工を用いる方針とした。

ただし、今後通常全般検査を行う度に新しい点検結果を用い、LCC再積算して、維持管理方針の再検討を行う予定である。

7. おわりに

以上のように多くの課題を残してはいる暫定版ではあるが、点検結果から健全度判定を行い、劣化曲線の設定なしにLCCを積算して、管理者の維持管理方針決定に対して情報提供するトンネルマネジメントシステムを構築した。

今後点検データが蓄積され、精度の良い劣化曲線が設定されるまでは、この方法有効に利用されることを望み、精度向上に努めたい。

特に課題のうち、モデル構築過程における課題、すなわち、はく落ポテンシャルを計算する式-8および係数 α の設定や、AHPにより求まるDI値にばらつきがあるなどの課題に対しては、算出結果のLCCにどの程度影響を与えているかを検証し、影響の大きさに応じ、しかるべき対応策を検討して行く所存である。

また、現在このシステムの健全度判定はスパン単位で行われているが、対策工の施工性を考慮するとトンネル単位やある程度まとまった範囲での判定、措置の計画も可能となると非常に有益であると思われる。

さらには、最も管理者に求められている LCC 積算結果により、予算制約下で適切な工法と対策実施時期が選定されるようなシステムへ発展するように検討を重ねたい。

【参考文献】

- 1) 宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人 : Bridge Management System(BMS)の開発, 土木学会論文集, No.560/VI-34, pp91-106, 1997.3
- 2) US. Department of Transportation : PONTIS Technical Manual, 1993.12
- 3) Hawk, H. and Small, E. : The BRIDGIT Bridge Management System, Structural Engineering International, Journal of IABSE, Vol.8, pp.309-314, 1998
- 4) (社)日本道路協会 : 道路トンネル維持管理便覧, 1993.11
- 5) 日本道路公団 : 設計要領第三集 [トンネル本体工保全編], 1998.10
- 6) (旧)運輸省 : トンネル保守管理マニュアル, 2000.2
- 7) 加藤豊, 小沢正典 : OR の基礎 AHP から最適化まで, 実教出版, 1998
- 8) 木下栄蔵 : 入門 AHP 決断と合意形成のテクニック, 日科技連, 2000

Building of a Tunnel Management System

By Kazuki NAKAMURA, Akio TAKEUCHI, Tadashi YAMADA

Railway network have been spread rapidly by popular request. In recent years, many railway structures are coming to its rehabilitation stage. Tunnel Management System (TMS), which manages maintenance works effectively and economically, has been developed in accordance with basic philosophy of economic Life Cycle Cost (LCC).

In this study, algorisms of two sub-systems for Keikyu-TMS have been developed. One of the sub-systems is Inspection and Evaluation system for lining condition. The other one is Calculation system of LCC.

Keikyu-TMS made it possible to calculate LCC of each tunnel and each span and to support decision-making of tunnel management administrator.