

全般・個別検査に対応した トンネル健全度診断システムの開発

小島 芳之* 岡野 法之* 津野 究*
中西 祐介* 蒲地 秀矢**

Development on Tunnel Soundness Diagnosis System

Yoshiyuki KOJIMA Noriyuki OKANO Kiwamu TSUNO
Yusuke NAKANISHI Hideya KAMACHI

Generally, railway tunnels are maintained based on overall inspections and individual one. In this study, we developed the diagnostic system of tunnel soundness using the result of the inspection data, such as crack information, progress of tunnel deformation and topographical and geological conditions. This system automatically diagnoses the tunnel soundness, presumes the cause of tunnel deformation, and selects the appropriate countermeasures. Thus, it enables us to minimize the differences of inspection results among individuals.

キーワード：鉄道トンネル，メンテナンス，検査，健全度，診断システム

1. はじめに

一般に、供用中の鉄道トンネルの検査は、初回検査、全般検査、個別検査、随時検査の4つに区分される。そのうち、全般検査は2年ごとに定期的実施され、目視調査と打音調査を基本に、変状の有無や進行性等を把握することが目的である。個別検査は全般検査等の結果、変状の程度等により詳細な検査が必要とされた場合に実施され、目視調査や打音調査に加え、専用の機器を用いた調査による変状原因の推定や進行性の予測等、精度の高い調査を実施することを目的としている。また、それぞれの検査段階において、トンネルに求められる要求性能を満足しているかどうかを確認するため、健全度判定を実施することとしている。

トンネル検査における課題としては、目視調査や打音調査といった人手による調査が主体であるため、検査員の知識や経験といった個人能力の差により、検査結果にばらつきや、変状箇所の見落としが生じやすいことがあげられる。また、今後、熟練検査員の大量退職や、人口構成上、労働力不足になることが予想され、より効率的な維持管理が望まれている。

このような課題を解決する手法として、過去に鉄道総研では、「トンネルエキスパートシステム」の開発²⁾や、連続撮影による覆工表面撮影技術の開発（トンネラス

等)³⁾を実施し、維持管理の手順の一部において、個人能力に依存しない方法を提案しているが、最も重要な、健全度判定や変状原因の推定の多くは、検査員の能力に頼っているのが現状である。

そこで本研究では、この課題解決方法の一環として、全般検査、個別検査において、筆者らが持つ既往の知見をもとに、検査で得られるひび割れ情報やトンネル内空変位速度、地形、地質データ等から、維持管理の一般的な手順である健全度判定、変状原因の推定、および対策工選定の大部分を自動的に行うことのできるシステムを開発した。

これにより、トンネル検査の課題とされている個人能力差による検査結果のばらつきを低減でき、維持管理における検査精度、および効率性の向上が可能となる。

本稿では、開発したトンネル健全度診断システムの概要と、自動判定アルゴリズムおよび判定結果の例を紹介する。

2. システムの概要

2.1 維持管理の手順と健全度

供用中の鉄道トンネルにおける標準的な維持管理の手順および変状程度に対応する健全度例を図1および表1に示す。

* 構造物技術研究部（トンネル）

** (株)ジェイアール総研情報システム

特集：構造物技術

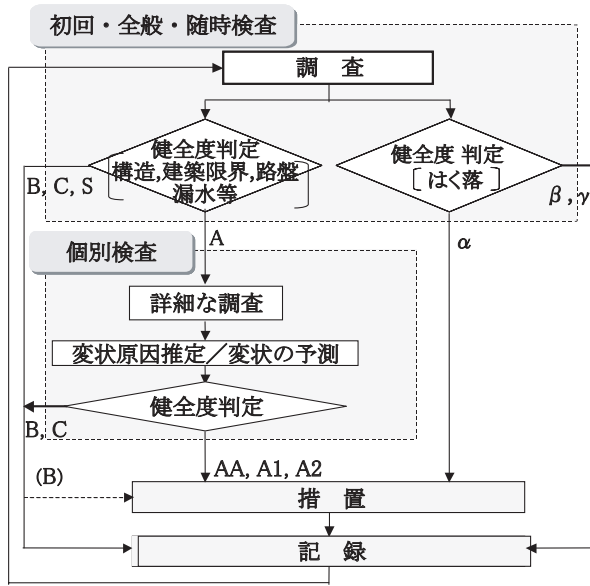


図1 標準的な維持管理手順¹⁾加筆修正

2.2 システムの適用範囲

今回開発したトンネル健全度診断システムは、鉄道山岳トンネルの覆工材質として多い無筋コンクリート覆工を対象としており、健全度判定や変状原因の推定、対策工選定の項目について、その大部分を自動的に提案するシステムである。

なお、健全度判定については、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル」¹⁾（以下、「維持管理標準（トンネル）」と呼ぶ）に記載された安全性の要求性能について、性能項目（①トンネル構造の安定性、②建築限界と覆工との離隔、③路盤部の安定性、④はく落に対する安全性、⑤漏水・凍結に対する安全性）ごとに実施することとし、性能項目ごとの照査が可能である。なお、使用性、復旧性についての健全度判定は、今回のシステムからは除外している。

2.3 システムの構成

システムの全体構成を図2に示す。トンネル諸元等の基本情報を入力後、全般検査の目視調査等で得られたひび割れ情報が入力された電子変状展開図をもとに、打音調査が必要な箇所を提示し、その後実施される打音調査結果等をもとに、はく落に対する健全度判定(α, β, γ)を行う。安全性等に対する健全度判定(A, B, C, S)は、電子変状展開図により判定できるものは自動で行い、それ以外のものについては判定結果を手動で入力する。

その後、健全度Aと判定されたものについては、個別検査で得られるトンネル内空変位速度等の詳細な調査データをもとに、変状原因の推定、詳細な健全度判定、対策工の提案をする流れとなっている。

その他の機能として、検査結果や措置情報の履歴管理

表1 標準的な変状程度に対応する健全度例¹⁾加筆修正

健全度		変状の程度	
はく落以外	A	AA	重大
		A1	進行中の変状等があり、性能低下も進行している
		A2	性能低下の恐れのある変状等がある
	B	進行すれば健全度Aになる	
	C	軽微	
はく落	S	なし	
	α	近い将来、安全を脅かすはく落が生じる恐れ	
	β	当面、安全を脅かすはく落が生じる恐れはないが、将来、健全度αになる恐れ	
	γ	安全を脅かすはく落が生じる恐れがない	

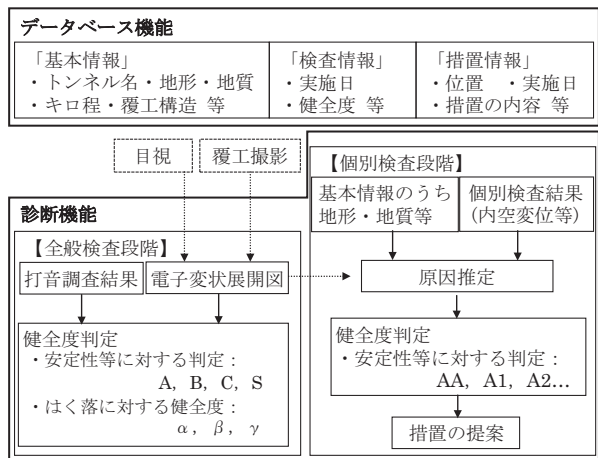


図2 トンネル健全度診断システム全体構成



図3 トンネル健全度診断システム標準画面(イメージ)

や統計管理、変状写真、管理図面等をシステムに取り込むことも可能となっているため、健全度診断システムとしてだけでなく、台帳管理システムとしての活用も可能なシステムである。

2.4 ソフトウェアの特徴

システムの動作環境としては、今後の汎用性を考え、

業務上多用される Windows 上で作動することを条件として作成した。また、実用性を考え、電子変状展開図上のひび割れ情報については、CAD システムとの互換性を持たせることや、タブレットによるタッチペンでの入力が可能であり、既存の電子変状展開図の有効活用や、ひび割れ情報入力時の効率化を図っている。そのほか、入力画面上の補助機能としてツールチップウィンドウの表示によるヘルプ機能を充実させ、システムの入力補助だけではなく、トンネル特有の用語解説等も表示することとした。また、検査の引継ぎ簿として活用可能な自由記載欄を設けており、検査員が変わっても構造物の状態等を引継げるようなシステムとしている。

トンネル健全度診断システムの標準画面を図3に示す。電子変状展開図の下に判定区間に対応させた健全度が要求性能項目ごとに表示される。なお、電子変状展開図上のひび割れについては、幅の違い等により色分けして表示され、左側のツリー表示された検査日を選択すると、それに対応したひび割れが表示される。

3. 自動判定アルゴリズム

3.1 健全度の判定

健全度判定については、全般検査、個別検査の両者において、大部分を自動判定できるシステムとしている。その方法は、「維持管理標準（トンネル）¹⁾」に記載されている判定例を基本とし、2.2で示した5つの性能項目ごとの健全度判定の実施や、構造条件・構造欠陥（巻厚不足等）により健全度の補正も行い、より現実的な判

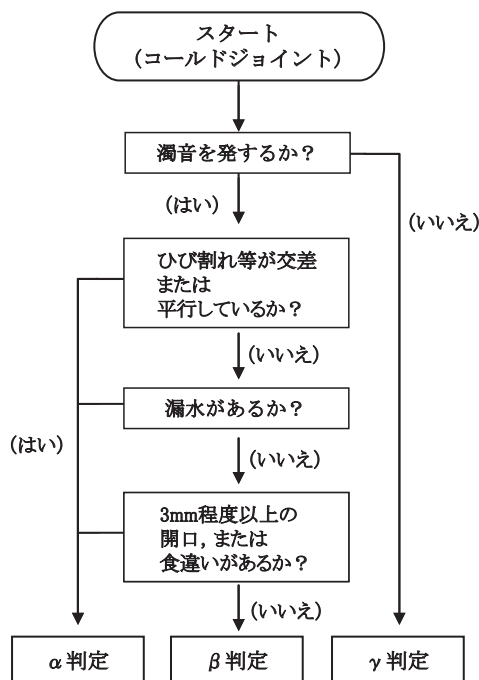


図4 はく落に対する安全性の自動判定アルゴリズム例
(コールドジョイントの場合)

定が示せるようにしている。また、自動判定が可能なよう「維持管理標準（トンネル）¹⁾」の判定例で抽象的に記載されている条件についても、筆者らが持つ既往の知見⁴⁾などを参考に具体的な閾値を決定した。

3.1.1 はく落に対する安全性の健全度の判定⁵⁾

全般検査段階で実施されるはく落に対する安全性の健全度判定は、電子変状展開図に表示されたひび割れの形状（閉合、交差、放射状等）や打音調査の結果（清音、濁音）等を自動抽出し、自動的にはく落に関する健全度判定を実施する。判定はトンネル周方向をある一定の角度ごとに32に分割、軸方向に1mごとに分割したメッシュで実施する。また、健全度判定が α となった箇所には、電子変状展開図上に塗色され、一見して箇所が把握できるものとしている。はく落に対する安全性の自動判定アルゴリズム例を図4に示す。

なお、覆工の変形や、ボルトの腐食箇所等についてははく落に関する健全度判定は、自動的に判定することが不可能なため、これらについては、健全度判定結果を手入力する方式としている。

3.1.2 トンネル構造の安定性の健全度の判定

トンネル構造の安定性の健全度判定は、全般検査段階で得られた電子変状展開図に表示されたひび割れ種別（圧ざや開口ひび割れ等）やひび割れ幅等により、自動的にトンネル構造の安定性に対する健全度判定（A、B等）を実施する。健全度Aと判定された箇所については、その後実施する個別検査で得られるトンネル内空変位速度や覆工材料の劣化範囲等をもとに詳細な健全度判定（AA、A1等）を実施する。自動判定のためにはこのようなデータが必要であるため、検査での確実なデータの取得と蓄積が重要となる。トンネル構造の安定性の自動判定アルゴリズム例を表2に示す。

なお、判定スパンは、覆工打設継目を基本とした一定区間ごととし、覆工種別等の変更箇所によって判定スパンを分割するものとしている。

表2 トンネル構造の安定性の自動判定アルゴリズム例

変状の 程度 進行性 内空変位	ひび割れ ・L < 5m かつ W ≥ 5mm ・5m ≤ L < 10m かつ W ≥ 3mm ・L ≥ 10m かつ 3mm ≤ W < 5mm 圧ざ ・L < 3m	ひび割れ ・L < 5m かつ 3mm ≤ W < 5mm
10mm/年以上 2mm/月以上	AA	AA
3mm/年以上 10mm/年未満	A 1	A 1
1mm/年以上 3mm/年未満	A 1	A 2
進行性なし	A 1	A 2

※ L：ひび割れ長さ，W：ひび割れ幅

特集：構造物技術

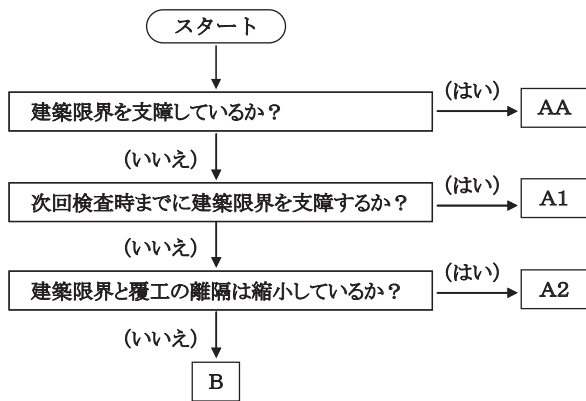


図5 建築限界離隔の自動判定アルゴリズム例

3.1.3 その他の性能項目に関する健全度の判定

上記2つ以外の性能項目に関する健全度判定は、建築限界離隔、路盤部安定性とも、個別検査で得られるトンネル断面変形量や路盤部水準測量等をもとに、自動判定を実施する。判定スパンは、3.1.2で示したトンネル構造の安定性の健全度判定と同様、構造を考慮した一定区間ごととしている。建築限界離隔についての自動判定アルゴリズム例について図5に示す。なお、漏水・凍結に対する安全性については、進行速度の予測や影響度合いの把握が難しいため、自動による健全度判定を実施しないものとした。

3.2 変状原因の推定⁵⁾

変状原因の推定については、トンネルは地山に囲まれた地中構造物であり、原因を推定するにあたり地形や地質データ等、詳細で様々なデータが必要となるため、全般検査段階ではなく、個別検査段階実施時についてのみ提示することとした。原因種別は主なトンネル変状原因である、①「偏圧・斜面クリープ」(斜め方向の地圧が卓越)、②「塑性圧」(横方向の地圧が卓越)、③「鉛直圧」(鉛直方向の地圧が卓越)、④「凍上圧」の4ケースについて分類することとした。

分類方法としては、これまで鉄道総研で実施した荷重実験結果等の研究成果等^{4)、6)}を参考に、変状原因ごとに「ひび割れパターン」を定めておき、この「ひび割れパターン」と、電子変状展開図上の覆工表面のひび割れ情報との同定作業を実施する。その際、ひび割れごとに長さや幅、発生位置等により点数付けを同時に実施し、合計点数が最も高くなった「ひび割れパターン」を変状展開図から得られた変状原因とする。

次に、過去に変状の原因となった地形や岩種等のデータをもとに、上記で得られた原因について更なる原因推定の精度を高め、この結果をもって最終的な変状原因とする。なお、一連の作業は全て自動で実施されるが、自動判定のためには、一定のデータ入力が必要なため、検

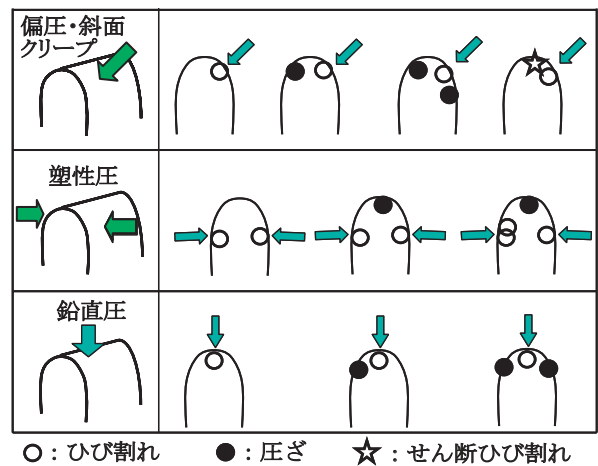


図6 偏圧・斜面クリープ、塑性圧、鉛直圧の「ひび割れパターン」例

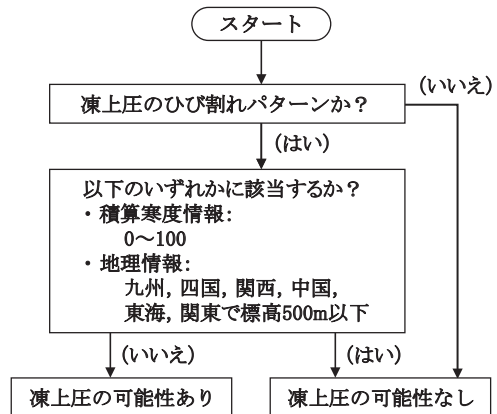


図7 凍上圧に関する原因推定例

査での確実なデータの取得と蓄積が重要となる。偏圧・斜面クリープ、塑性圧、鉛直圧の「ひび割れパターン」例を図6に、凍上圧に関する原因推定例を図7に示す。

3.3 対策工提案

対策工提案については、変状原因によって対策工が異なるため、3.2に示した手順により推定した変状原因ごとに標準設計の提案をすることとした。工法については「変状トンネル対策工設計マニュアル」⁷⁾に記載されている標準設計での対策を基本とし、現在の変状程度や変状の進行性から補強ランクを決定し、それに対応した標準的な補修・補強案の提案をすることとしている。表3に偏圧・斜面クリープによる変状に対する補強ランクと対策工例を示す。

なお、変状原因が凍上圧の場合、変状程度や変状の進行性の把握が難しいため、補強ランクという考え方ではなく、一律で対策工の提案をすることとした。

具体的な対策工の決定方法は、補強ランクを自動判定が可能なら、変状程度を電子変状展開図上のひび割れ

表3 偏圧・斜面クリープによる変状に対する補強ランクと対策工例

補強ランク	I	II	III	IV
変状程度	山側肩部に軸方向の引張ひび割れ	山側肩部以外にも軸方向の引張ひび割れ	圧ざまたはせん断ひび割れ	アーチの変形、断面軸の回転・移動
変状の進行性*	3mm/年未満		3mm/年以上 10mm/年未満	10mm/年以上
対策工	裏込注入	裏込注入 + 山側ロックボルト	裏込注入 + 全断面ロックボルト + 内面補強	

* 内空変位速度の目安

情報等で、変状の進行性をトンネル内空変位速度で決定し、それに対応する対策工を提案する。この時、補強ランクIVに該当する場合には、変状の程度が大きく、現象や構造に応じて対策工の選定も慎重に行う必要があるため、対策工の提案は実施しない。

また、はく落に対する対策工については、健全度 α と判定されたものについてのみ工法の提案をすることとした。なお、工法については「トンネル補修・補強マニュアル」⁸⁾を参考とし、全般検査で得られた電子変状展開図の判定メッシュから、落下が予想される面積を自動算出し、その落下予想面積により対策工を提案することとしている。

4. 判定結果の出力

判定結果の出力については、検査結果の詳細について判定スパンごとに出力される機能や、判定した全スパンについて一括して出力する機能などを設けた。前者については、変状箇所の詳細なカルテとして、後者については、トンネル全体の健全度を一括して管理するような台帳的なものとして活用できると考えている。

検査結果の詳細出力機能では、判定したスパンごとに、これまでに述べた方法で判定、提示した「健全度」「変状原因推定」「対策工提案」が出力され、出力後の保存方法を考慮し、判定スパン1箇所がA4サイズ1枚に記載されるようにしている。また、変状原因に対しては、補助機能として、どのような考え方に基づいてその内容となったかをコメントすることとしている。これによりシステム化による判断、判定技術力の低下に対する懸念を低減できるものとする。判定スパンの出力例を図8に示す。

全箇所一括の出力機能では、トンネル全箇所の健全度

TUNOS診断
詳細判定

トンネル名称 A TUNNEL
 線名 B 本線
 判定位置 $\bigcirc K \times \times \times m \sim \bigcirc K \Delta \Delta \Delta m$
 個別検査

健全度

トンネル構造の安定性 健全度：A1 進行中の変状等が有り、性能低下も進行。早急に措置が必要	建築限界と覆工との隔離 健全度：A2 性能低下の恐れがある変状があり。必要な時期に措置が必要
---	--

変状原因推定

偏圧・斜面クリープの判定 「偏圧・斜面クリープによる変状」の可能性高い	塑性圧の判定 「塑性圧による変状」の可能性あり
地山の緩みの判定 「地山の緩みによる変状」の可能性無し	凍上圧の判定 「凍上圧による変状」の可能性無し

※変状原因に対するコメント
 「偏圧・斜面クリープによる変状」
 山側肩部にトンネル軸方向の引張ひび割れがあるため、「偏圧・斜面クリープによる変状」の可能性が高い。

偏圧に対する対策工案

補強ランク	I
アーチ部の変状状況	山側肩部の引張ひび割れ
内空変位速度	3mm/年未満
対策工案	裏込注入

図8 詳細結果出力例

と、個別検査の実施、変状原因などを確認することができ、トンネル全体の変状割合をグラフ化により視認することができる。また、直近の検査結果の履歴も記載されるため、前回検査との比較により、判定箇所ごとの変状の進行性や、変状割合の変化なども確認することができる。全箇所一括の出力例を図9に示す。

5. まとめ

今回、鉄道トンネルの維持管理における課題である、検査精度の客観化、定量化、個人差の解消を目的として、「健全度判定」「変状原因推定」「対策工選定」の大部分を自動的に実施できるトンネル健全度診断システムを開発した。

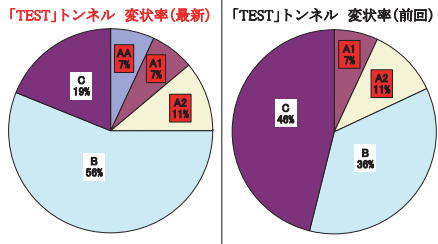
このシステムを開発するにあたり、パソコン上の電子変状展開図から、ひび割れ長さ、幅等のひび割れ情報を自動抽出する手法を開発し、これを基本に、健全度判定、変状原因推定、対策工提案が自動で実施できる判定アルゴリズムを作成した。このアルゴリズムは自動判定が可能なよう、これまで定性的、抽象的であった判定基準を、既往の研究成果等を整理することにより、定量的、客観的なものとした。また、健全度判定については、性能規定の流れに沿って、性能項目ごとの健全度判定ができるものとした。

特集：構造物技術

「TEST」トンネル 検査結果一覧

○トンネル基本データ ・線名:実験線 ・構造:複線新幹線断面 ・駅間:国立～研究所 ・始点:40,000 ・延長:2,195m ・竣工:2009年1月 ・主たるアーチ覆工:コンクリート, 30cm

トンネル名	線名	駅間	診断スパン (キロ程)	検査区分	調査日	トンネル構造 の安定性	建築限界と 覆工との離隔	路盤部の 安定性	漏水・結氷に 対する安全性	はく落に対する 安全性(箇所)			総合判定		個別検査 による 変状原因
										α	β	γ	今回結果	(参考) 前回結果	
										α	β	γ			
TEST	実験線	国立～研究所	40,000～40,010	通常全般	2008/3/31	B	C	C	C	0	1	2	B	B	
TEST	実験線	国立～研究所	40,010～40,020	通常全般	2008/3/31	C	C	C	C	1	2	3	C	C	
TEST	実験線	国立～研究所	40,020～40,030	通常全般	2008/3/31	B	C	B	C	2	2	2	B	B	
TEST	実験線	国立～研究所	40,030～40,040	通常全般	2008/3/31	C	C	C	C	3	3	5	C	C	
...
TEST	実験線	国立～研究所	42,110～42,120	通常全般	2008/3/31	B	C	C	C	0	0	4	B	B	
TEST	実験線	国立～研究所	42,120～42,130	個別	2008/5/1	A1	C	A1	C	2	7	3	A1	A2	偏圧
TEST	実験線	国立～研究所	42,130～42,140	個別	2008/5/1	AA	B	A1	B	3	8	2	AA	A1	偏圧
TEST	実験線	国立～研究所	42,140～42,150	個別	2008/5/1	A2	C	B	C	3	6	4	A2	B	偏圧
TEST	実験線	国立～研究所	42,150～42,160	通常全般	2008/3/31	B	B	C	C	1	2	5	B	C	
TEST	実験線	国立～研究所	42,160～42,170	通常全般	2008/3/31	C	C	B	C	3	0	3	B	C	
TEST	実験線	国立～研究所	42,170～42,180	通常全般	2008/3/31	C	B	B	B	0	2	4	B	B	
TEST	実験線	国立～研究所	42,180～42,195	通常全般	2008/3/31	C	C	C	C	1	1	2	C	C	



合計数	トンネル構造	建築限界	路盤部	漏水・結氷	はく落	今回総合判定	前回総合判定
AA	1	0	0	0	α	β	γ
A1	1	0	2	0	19	34	39
A2	1	0	0	0			
B	4	3	4	2			
C	5	9	6	10			
S	0	0	0	0			

図9 全体結果出力例

今後の課題としては、都市トンネルへの対応を考えた自動アルゴリズム開発等による機能向上や、既存の変状データのシステム入力の数を増加させ、実際の判定結果とシステムでの判定結果との相違点の抽出を行い、システムの改良を図ること等が考えられる。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル, 丸善, 2007.1
- 2) 河田博之, 松本吉雄: トンネル検査・診断エキスパートシステムの開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.27, No.4, pp.16-18, 1989.4
- 3) 小島芳之, 鶴飼正人: トンネルの健全度診断, RRR, Vol.63,

- No.5, pp.14-19, 2006.5
- 4) 野城一栄, 小島芳之, 藤井大三 ほか: 欠陥を考慮したトンネル覆工押し抜き模型実験, トンネル工学論文集, Vol.14, No.5, pp.123-130, 2004.11
- 5) 津野究, 小島芳之: トンネル健全度を自動判定できる診断システムの開発, 日本鉄道施設協会誌, Vol.43, No.8, pp.37-39, 2005.8
- 6) 朝倉俊弘, 小島芳之, 安藤豊弘 ほか: トンネル覆工の力学挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.193/III-27, pp.79-88, 1994.6
- 7) (財) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, 1998.2
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所: トンネル補修・補強マニュアル, 2007.1