トンネルの変状診断支援ソフトの開発

DEVELOPMENT OF INSPECTION SOFTWARE FOR DAMAGED TUNNELS

松山公年*・吉田典明*・尾崎裕司*
Kimitoshi MATSUYAMA, Noriaki YOSHIDA and Yuji OZAKI

Diagnostic results of damaged tunnels can be influenced by the engineer's skill because the inspection requires technical knowledge and experience. In the future, there will be fewer engineers with sufficient experience for reliable inspection of existing tunnels. To improve this situation, software to aid the inspection of damaged tunnels has been developed. This software can replace the role of expert engineers in diagnosing the cause and degree of tunnel damage and deterioration from the results of visual inspection.

***Key Words*：** *expert system software, visual inspection, diagnosis, damage, deterioration, tunnel*

1. はじめに

我が国の社会資本整備において、既存構造物をいかに効率良く維持管理していくかは重要な課題である。今後、人口減少期に入り、建設技術者も減少すると予見される中、建設後数十年が経過し、補修・補強を必要とする構造物の増加に対して、専門的な知識・経験を有する技術者による点検を行うことは限界がある。そのため、専門的な知識を持ち合わせない一般技術者や施設管理者でも、構造物に発生している劣化の原因や程度を推定し、詳細調査の要否を判定できるシステムが望まれる。

一方、トンネルは、道路、鉄道トンネルなどの交通利用に供するものから、発電用、下水道などの水路トンネル、通信や送電用などの都市施設に供するトンネルなど、その用途はさまざまである。我が国のトンネル延長は20,000km以上といわれており、将来にわたって活用していくためには、適切な維持管理を行うことが必要である。

そこで、主に道路トンネルを対象として、トンネルの諸元や目視による変状を入力することにより、変状原因と程度を推定するための変状診断支援ソフトを開発したので報告する。なお、橋梁版についてはすでに開発し、利用されている[1),2),3)]。

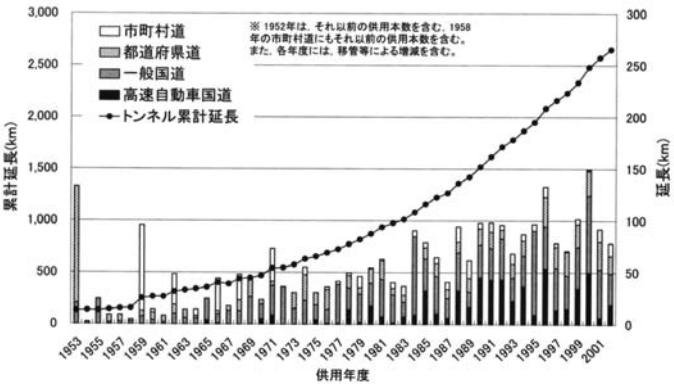
2. 道路トンネル建設の推移と維持管理の重要性

(1) 道路トンネル建設の推移[4)]

我が国初の自動車用道路トンネルは、オランダ人技術者の指導によって建設された栗子トンネル（1876年着工）である。近代トンネル技術の歴史としては鉄道トンネルと比較して建設年代の歴史は浅いが、その供用延長は2001年現在で約2,600kmに達している。

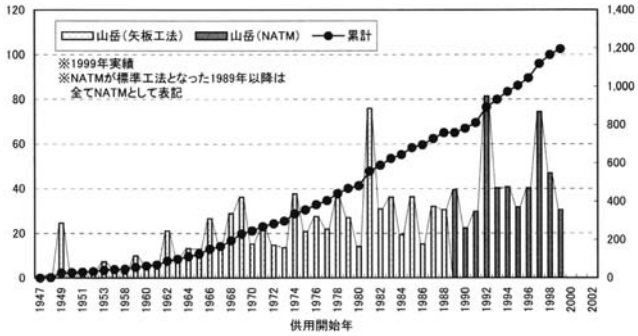
*　首都圏事業部　インフラマネジメント部

図ー1に道路トンネルの供用延長の推移を示す。



図ー1　道路トンネル延長の推移

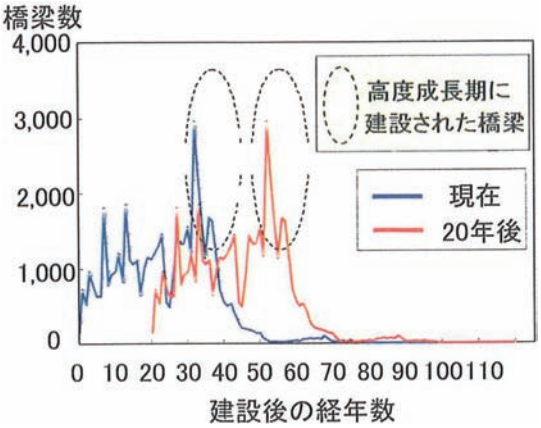
図ー2に一般国道におけるトンネル構造別および供用開始ごとの延長推移を示す。一般国道トンネルは1950年に総延長20.3kmであったが、1963年以降には年間20～40kmのトンネルが供用されて現在の延長となっている。構造種別の推移をみると、1988年までは矢板工法により施工されたトンネルが多く、1989年以降はNATMによるものが多い。



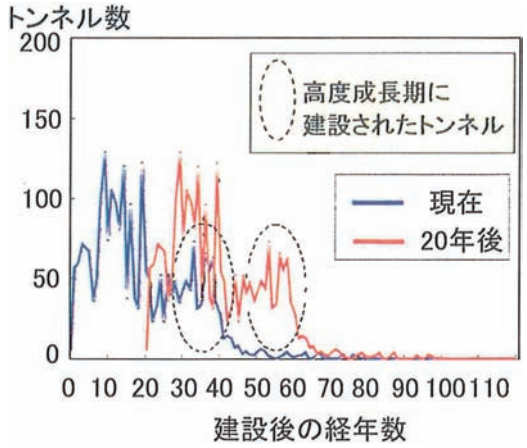
図ー2　一般国道におけるトンネル構造別および供用開始年ごとの延長推移

(2) 維持管理の重要性

図―3（a）に橋梁の経年別分布状況を示す。図―3（a）の橋梁数は直轄国道と4公団（日本道路公団、道路首都高速道路公団、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団）をあわせたものである。また、図―3（b）にトンネルの経年別分布状況を示す。図中の青色は現在（2003年時点）の分布状況を示しており、赤線は20年後の分布状況を示している。橋梁の場合、30数年の供用年数を経ているものが非常に多く、明瞭なピークが見られる。トンネルの場合、橋梁ほど建設年代が集中した傾向は見られないが、断続的なピークが見られ、10～20年経過しているグループと30～40年を経過しているグループの2グループに大別できる。

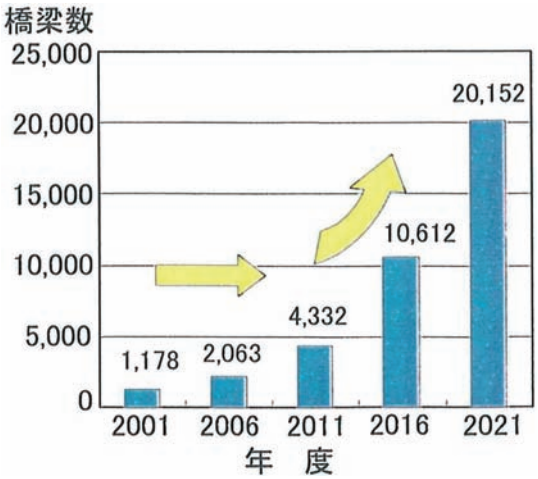


図―3（a）　橋梁の経年別分布状況

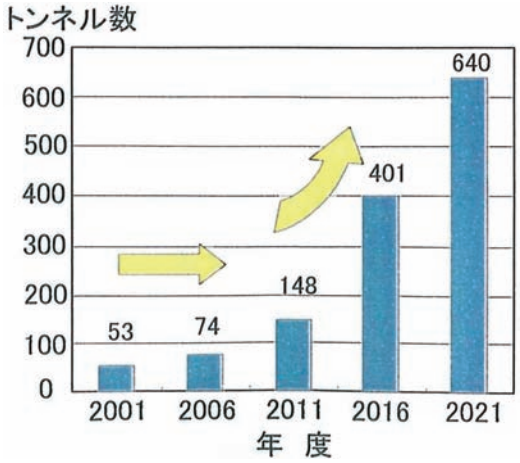


図―3（b）　トンネルの経年別分布状況

図―4（a）は建設後50年以上経過した橋梁の推移を示す。図に示した数値は図―3と同様に直轄国道と4公団の合計である。図―4（b）は建設後50年以上経過したトンネルの推移を示している。橋梁とトンネルを比較した場合、推移している構造物数は、トンネルが少ないものの、傾向は同様で、橋梁、トンネルともに2016年から急増し、2021年にさらに増加すると予想されている。



図―4（a）　建設後50年以上の橋梁の推移



図―4（b）　建設後50年以上のトンネルの推移

3. トンネルの変状と原因[5)]

(1) 現状現象の分類

トンネルの変状現象はさまざまなかたちで現れる。トンネルで覆工、路盤・路面、坑門の3つに分類した場合の、それぞれに関する変状現象を整理したものを表―1に示す。ただし、表―1でトンネルの付帯設備（例えば、照明や換気設備など）の劣化・破損現象を除外してある。

表―1　変状現象の分類

対象	変状現象	
覆工	ひび割れ	ひび割れ
		目地切れ
		食い違い
		コールドジョイントの開口
	変形、移動、沈下、側壁の転倒	
	覆工並びに補修材料の劣化、浮き、剥落	
	漏水、つらら、側氷、土砂流入、石灰分等の溶出	
路盤、路面	軌道狂い（鉄道）	
	排水溝のひび割れ、変形	
	中央通路のひび割れ、変形（鉄道）	
	路面・路肩・監査廊等の隆起または沈下、ひび割れ、縁石の転倒（道路）	
	噴泥、沈砂、帯水、氷盤	
坑門	ひび割れ	
	食い違い	
	前傾、沈下、移動	

表ー1に示す変状現象が同じであっても、その発生原因はさまざまであり、原因が複合している場合も珍しくない。このため、変状を未然に防ぐ、あるいは対策を講じる場合には、変状の発生原因、もしくは発生機構をある程度明確にする必要がある。

(2) 変状原因の区分

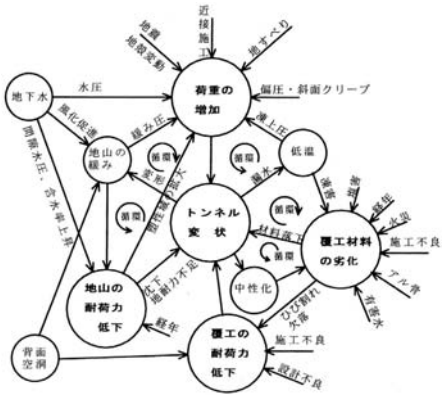
トンネルの変状原因は外因（外力や環境などの外的な要因）と内因（材料や設計、施工などに起因する構造的な要因）に大別される。トンネルに発生する変状の多くは複数の原因によって生じるため、外因と内因の組合せによって変状原因を推定する必要がある。

わが国のトンネルは、中央構造線などの構造線に沿った大規模な構造帯や破砕帯、グリーンタフ地域に見られるような軟質な新第三紀層で構成される地山、新規の火山砕屑の地形など、様々な問題を有する地形・地質条件下に建設されているので、地圧による変状が発生することが少なくない。一般に地圧による変状は、地形・地質条件などの外因に加え、設計・施工上の要因（内因）が介在することにより発生するといわれている。表ー2に変状原因の区分を整理する。

表ー2　変状原因の区分

		自然的要因	人為的要因
外因	外力	地形；偏圧、斜面クリープ、地すべり 地質；塑性圧、緩み圧、地盤沈下、地耐力不足 地下水；水圧、凍上圧 その他；地震、地殻変動	近接施工 列車振動・空気圧変動
	環境	経年；地山風化、中性化、材料劣化 地下水；湧水、凍害（冬期の低温） その他；塩害、有害水	煙害、火災
内因	材料		覆工材料の不良
	施工	覆工コンクリート打込み時の気温、湿度	所定の品質が確保されない施工
	設計		外因を考慮しない設計

トンネルの変状原因を考える場合、単独の原因で変状が顕著化することは稀であり、各種の原因が複合して変状が発生する場合が多いことに留意する必要がある。また、一旦変状が発生すると、それが波及して別の原因を誘発し、さらに変状が進行するといった悪循環に陥ることがある。このようなトンネルの変状原因の複合的な関係が図ー5に示されている。

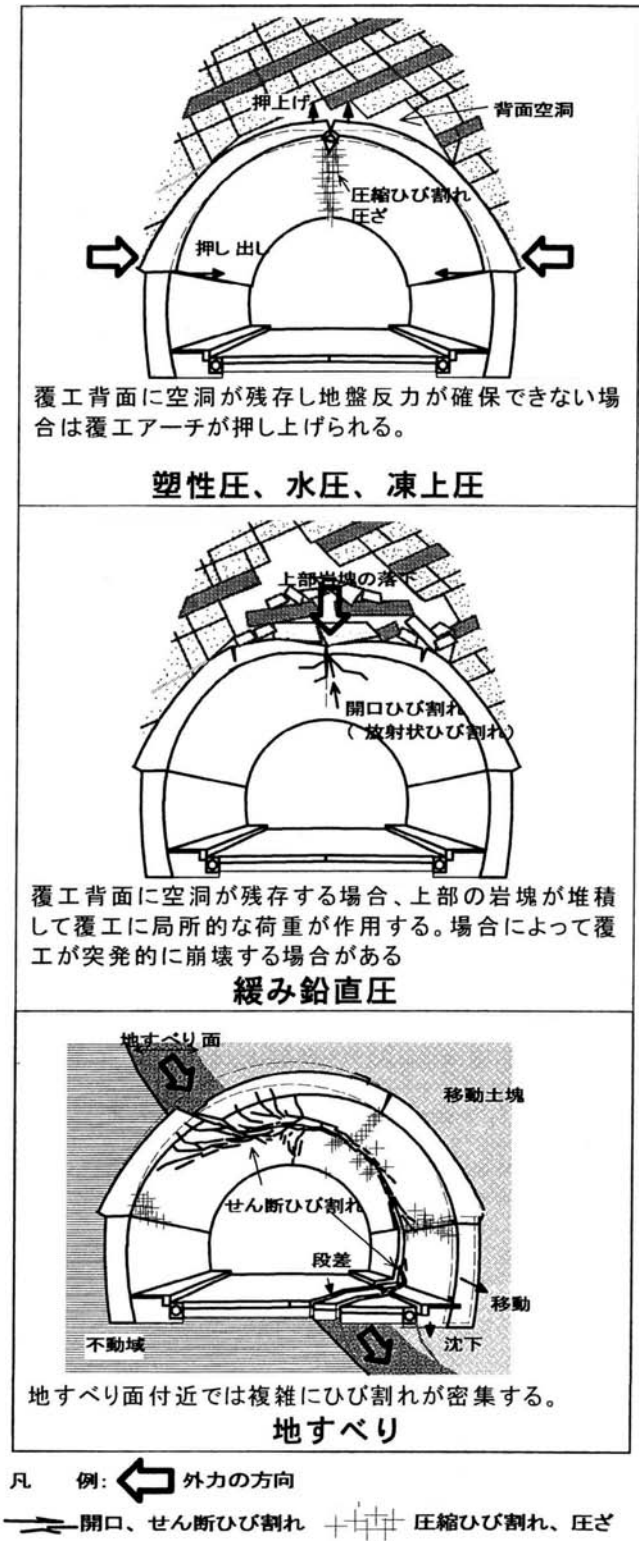


図ー5　トンネル変状原因の関係

(3) 変状の発生形態

1) 外力

トンネル覆工が外力を受けて変状する場合、外力の作用方向によって、覆工の変形やひび割れが多種多様の形態をとる。図ー6に外力が作用する場合の代表的な覆工の変状形態を整理する。

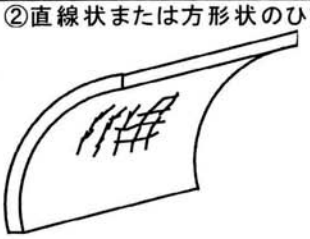
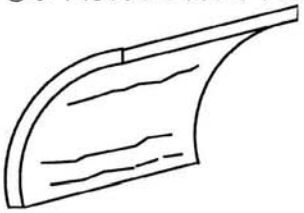
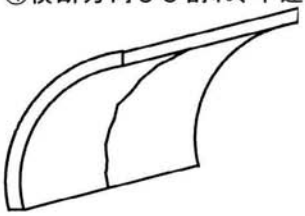
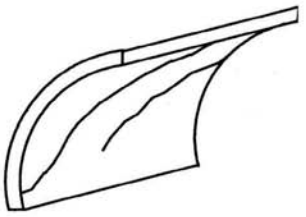
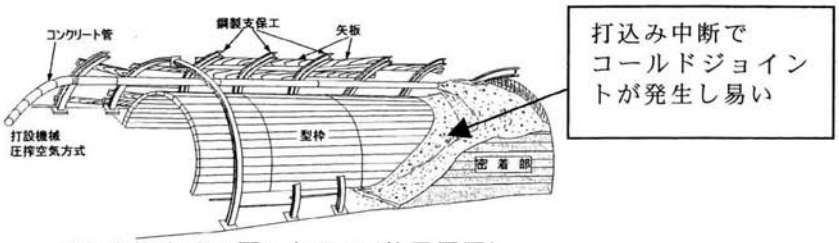


図ー6　外力に伴う覆工・路面の代表的な変状模式図

2）材料、施工

覆工コンクリート表面に見られる変状現象から、主に材料や施工に起因すると考えられる主な変状原因を表ー3に示す。

表ー3　材料、施工による覆工の主な変状と原因

覆工の変状	考えられる変状原因	記事
①不規則なひび割れ	・骨材の泥分	コンクリート固化時に微細な編目状ひび割れが発生。
	・セメントの異常凝縮	比較的短めの微細ひび割れが打込み後早期に確認される。
	・アルカリ骨材反応 ・硫酸塩鉱物の生長	乾燥ひび割れより比較的大きめの編目状のひび割れが発生。ひび割れ発生中心より 120°の角度に3本のひび割れが発生し易い。逆巻き工法の側壁ではほぼ水平に数条発生し易い。
	・初期養生中の急激な乾燥	網状の微細なひび割れが発生。
	・凍害（凍結融解の繰り返し）	亀甲状にひび割れが発生し易い。
	・火災	微細な編目状ひび割れや剥落が発生。
②直線状または方形状のひび割れ 	・中性化による鉄筋腐食	鉄筋部分で、鉄筋方向に直線状または方形状のひび割れが発生し易い。
③水平方向ひび割れ、不連続面 	・コンクリートの急激な打込み ・温度応力	コンクリートの沈降により発生。温度応力の場合はアーチ肩部、天端部で発生し易い。
	・型枠の早期脱型、型枠沈下	局所的な開口ひび割れが発生し易い。
	・コールドジョイント	木製支柱式支保工での覆工打込みに見られる。アーチ肩部の同一位置に連続して発生する。
④横断方向ひび割れ、不連続面 	・コンクリート硬化時の収縮に伴う背面地山との拘束、温度応力の発生	スパン中央に規則的に発生し易い。水平打継ぎ目（側壁境界；矢板工法）で消失。NATMではインバートコンクリートで拘束され発生する場合がある。
	・不等沈下	覆工打込み時の支持力不足により発生。水平打継ぎ目（側壁等）で消失。
	・（沈下等の外力に起因する可能性あり）	アーチから、施工時期が異なる側壁（逆巻工法の場合）や舗装等にひび割れが連続する場合。
⑤斜め方向ひび割れ、不連続面 	・コールドジョイント	引抜き管方式の覆工打込み方法の場合に発生し易い。不測の原因でコンクリート打込みが中断した場合、不連続面が発生する（下図参照）。
	 引抜き管方式の覆工打込み（笹尾原図）	
	・その他	上記③④の現象で、方向が斜めになるもの

4. 変状診断支援ソフト

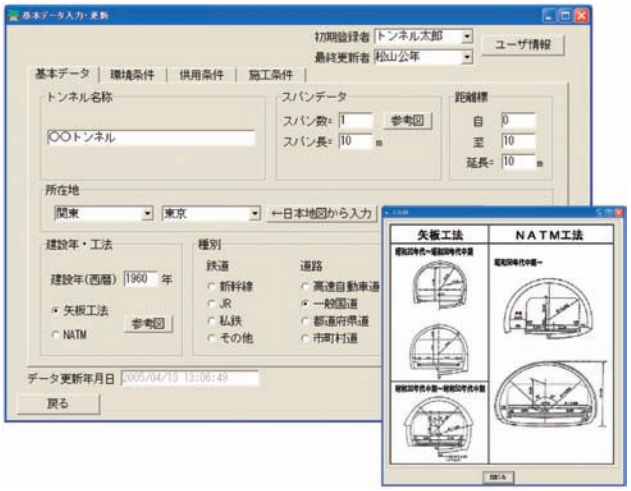
(1) 変状診断支援ソフトの特徴

変状診断支援ソフトは、対象トンネルの諸元を事前に入力し、現地目視点検によりひび割れ状況（ひび割れ幅・長さ、方向性、錆汁・遊離石灰の有無など）やその他の変状について入力することにより、対象トンネルの各部位における変状原因と変状程度を判定するものである。

変状診断支援ソフトの特徴は、専門家でなくとも、簡易に診断ができるように構造図や変状事例などのサンプルを表示し、点検者が入力しやすいユーザーインターフェースを提供している点である。

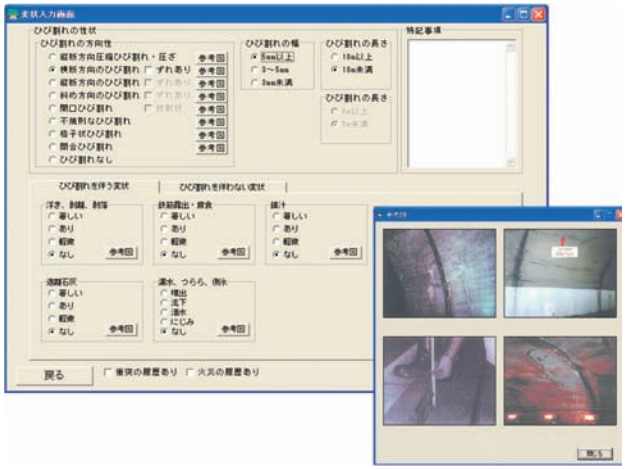
(2) 入力画面

図ー7に基本データの入力画面を示す。基本データとして建設年や構造形式、スパン数などの情報を入力する。



図ー7　基本データ入力画面

図ー8に変状入力画面を示す。変状はサンプル写真を参照しながら入力することが可能で、ひび割れの方向性、幅、長さ、ひび割れ以外の変状を入力する。



図ー8　変状入力画面

(3) 変状入力部位

変状部位の入力画面を図ー9に示す。変状入力する部位は、クラウン、アーチ、側壁の3部位に分けて、スパンごとに覆工コンクリートと目地部に対して変状を入力することとした。また、スパンごとに路肩・側溝や路面の変状を入力できるようにした。なお、スパン数は任意に変更可能である。

部位によっては、照明が暗くて変状が見えない場合や汚れや化粧版などの設置で見えない場合を想定してこれらの状況を選択できるものとした。

図ー9　変状入力部位画面

5. 変状原因と変状程度の評価

表ー4に変状原因診断シートの1部を示す。入力したデータは、表ー4の横軸に示す変状原因と縦軸に示すトンネルの諸条件および変状状況（環境条件、供用条件、内的条件、ひび割れの状況、ひび割れ以外の状況など）のマトリックスにより重み係数を決め、それぞれ該当する係数の演算結果として算出する。この値が大きいものが、変状原因（各種劣化および初期欠陥、外力による損傷など）として可能性が大きいとして表示される。

また、入力部位ごとに変状の程度、例えばひび割れ幅、長さ、その他変状の程度を入力することにより、変状の程度と第三者影響度を評価し表示することが可能である。変状の程度は道路トンネル維持管理便覧などに示されている判定の目安である、ひび割れ幅3mmおよび5mmを、ひび割れ長さ5m、10mを採用した[6),7),8)]。

図ー10に変状原因判定例を示す。図ー10に示すように入力部位ごとに判定された変状原因が表示され、特定の部位に対して該当する変状原因の可能性の大きさをヒストグラムで表示することが可能である。

図ー11に変状程度判定例のうち、第三者影響度を評価した結果を示す。図ー11に示すように第三者影響度を4段階で示すことが可能である。

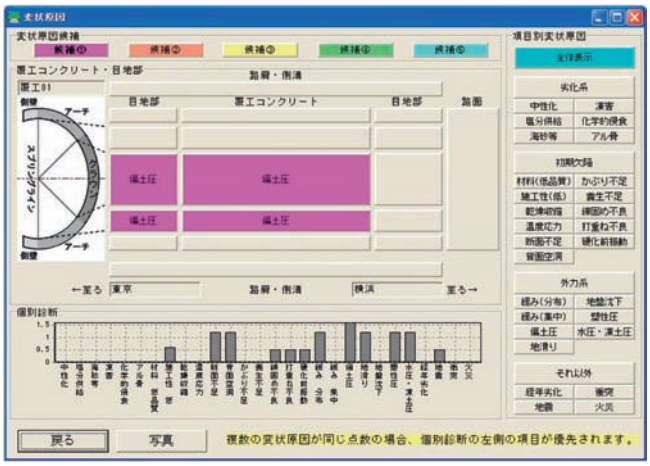
表ー4　変状原因診断シートの例

トンネル版変状原因推定表				初期欠陥								外力					
				材料	施工	乾燥収縮	温度応力	断面不足	背面空洞	かぶり不足	打重ね不良	緩み鉛直圧	偏土圧	地すべり	地盤沈下	塑性圧	水圧・凍上圧
覆工コンクリート	ひび割れ	クラウン	縦断方向圧縮ひび割れ・圧ざ					0.5	0.5			1	1	1		1.2	1.2
			横断方向のずれ			0.5	0.5							1	1.2		
			縦断方向のずれ		0.5			0.5	0.5		0.5	1.2	1.2	1		1	1
			斜め方向のずれ										1	1.2	1		
			開口ひび割れ									1.2	1	1		1	1
			開口ひび割れ（放射状）					0.5	0.5								
			不規則なひび割れ	0.5		0.5							1	1.2			
			格子状ひび割れ							0.5							
			縦断方向ひび割れ		0.5			0.5	0.5		0.5	1.2	1.2	1		1	1
			横断方向ひび割れ			0.5	0.5							1	1.2		
			斜め方向ひび割れ		0.5							1		1	1		
			閉合ひび割れ										1	1			
			なし														
	ひび割れを伴う変状		浮き、剥離、剥落	1	1	1	1	1	1	1.2	1	1	1	1	1	1	1
			鉄筋露出、腐食	1	1	1	1	1	1	1.2	1	1	1	1	1	1	1
			錆汁	1	1	1	1	1	1	1.2	1	1	1	1	1	1	1
			遊離石灰	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
			漏水、つらら、側氷	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2

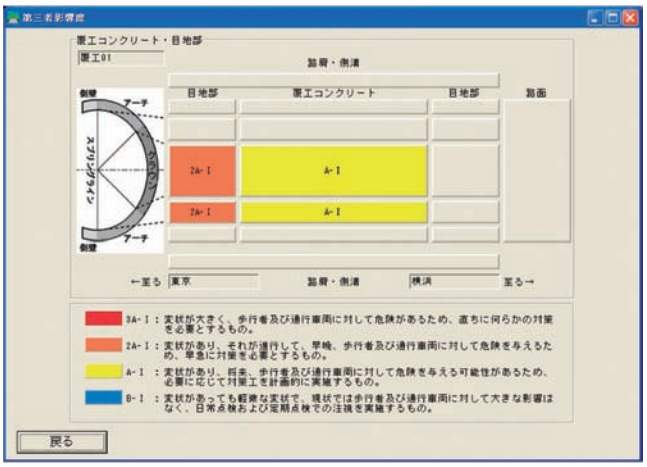
6. 今後の課題

現在、トンネル変状診断支援ソフトを実トンネルに適用しつつあるが、今後さらに多くのトンネルで適用し、診断結果と実態を照合し、ソフトにフィードバックすることにより、変状原因および変状程度の判定精度を向上させたい。

謝辞：劣化診断ソフトは、東京大学生産技術研究所魚本研究室と民間10社（建設技術研究所、五洋建設、コンステック、佐藤工業、銭高組、千代田コンサルタント、東亜建設工業、飛島建設、間組、日本工営）の共同研究「コンクリート構造物の劣化診断ソフトの開発」の成果である。ご協力いただいた方々に謝意を表します。



図ー10　変状原因判定例



図ー11　第三者被害判定例

参考文献

1）金田他：コンクリート構造物の劣化診断プログラムの開発、生産研究、第55巻、第4号、2003
2）佐藤他：既存橋梁の劣化診断ソフト開発、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部門、pp.165-166、2003.9
3）松山他：劣化診断ソフトの既設橋梁への適用性に関する研究、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部門、pp.277-278、2004.9
4）土木学会：トンネルの維持管理、2005.7
5）土木学会：トンネルの変状メカニズム、2003.9
6）日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、1993.11
7）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」、2001.7
8）土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策、2002.9