

地下構造物を対象とした検査・診断技術に関する現状分析

Analysis on Inspection and Diagnosis of Underground Structure

小島芳之*・青木俊朗**・内川栄蔵***・松村卓郎****

Yoshiyuki KOJIMA, Toshirou AOKI, Eizo UCHIKAWA, Takuro MATSUMURA

It is expected that proper inspection and diagnosis methods to evaluate the integrity of existing underground structures, and techniques to elongate the life term of these structures, will be established. In this study, the state of the art of the inspection and diagnosis methods for tunnels, including sealed tunnels and mountain tunnels as representatives of underground structures, was presented. The results of the analysis were shown focussing on the systems of inspections, the standards for deciding the integrity, the indicators for deciding and the newest inspection and diagnosis methods.

Key words : Underground structure, Tunnel, Maintenance, Inspection, Diagnosis, Soundness

1. はじめに

近年、トンネルなどの地下構造物の保守に関わる問題が顕在化している。また、建設当時には想定不可能だった巨大地震や、地下水環境の変化（水位変動）、近接施工などによる影響が地下構造物に作用し、大規模な対策を余儀なくされるケースも見られる。これらの事象は、地下構造物を「建設する段階」から、「保守する段階」に移行しつつあることの表れであると考えられる。

一般に地下構造物の耐用年数は、他の構造物に比較して長いものと考えられる。一方、地下構造物は、建設後の大規模な補修や再構築が難しい構造物である。しかし、NATMや密閉型シールド工法が適用される以前の覆工には、施工中やむを得ず生じた構造欠陥が存在することも多い。また、地形・地質が複雑なわが国では、地下構造物は複雑で多様な環境条件下に置かれている。このような実情から、老朽化や漏水に伴う劣化、地圧の増大などにより変状が問題となり、何らかの対策を要する地下構造物は少なくない。ちなみに、国鉄¹⁾や建設省²⁾の実態調査によれば、半数以上のトンネルに漏水が生じていることなどが明らかになっている。

以上のような状況から、近年、老朽化を重ねる地下構造物の維持管理のあり方に目が向けられるようになり、各機関において種々の技術開発が進められている。特に、地下構造物の健全な状態を長く保つためには、正確な検査・診断が不可欠であり、適切な検査・診断技術の確立が急務である。

そこで、土木学会地下空間委員会維持管理小委員会「検査・評価WG」では、代表的な地下構造物である「トンネル」（シールドトンネル、山岳トンネルなど）を取り上げ、用途（道路、鉄道、通信、電力（導水路）、下水道）ごとに検査・診断技術の現状を、各企業体の指針類の調査や文献調査（例えば文献³⁾・⁴⁾）、聞き取り調査などにより広く調査している。本稿では、トンネルの検査体系や健全度判定基準、判定のための指標、さらに、新しい検査・診断技術の現況などを整理・分析した結果について報告する。

キーワード：地下構造物、トンネル、維持管理、検査、診断、健全度

* 正会員 （財）鉄道総合技術研究所 ** 正会員 東急建設（株）

*** 正会員 帝都高速度交通営団 **** 正会員 （財）電力中央研究所

2. 地下構造物（トンネル）における検査・診断

まず、トンネルの検査・診断に関わる基本的な用語について整理する⁵⁾。次に、トンネルの維持管理における検査・診断の位置づけを明確にし、トンネル特有の課題・問題点などについて考察する。

2.1 検査と診断の関係

図1は、検査・診断の関係を模式的に示したものである。図1に示されるように、「検査」は、調査・観察・計測を行い、その結果を基準（健全度判定基準）と照合して判定（健全度判定）することである。なお、「点検」は、ほぼ検査と同義であると考えられる。

一方、「診断」は、調査・観察・計測の結果について過去の経験や知識をもとに考察を行い、検査による判定結果を勘案して総合的に判断（構造物全体の機能評価、措置の提案）することで、診断には高度な専門知識や経験が要求される。

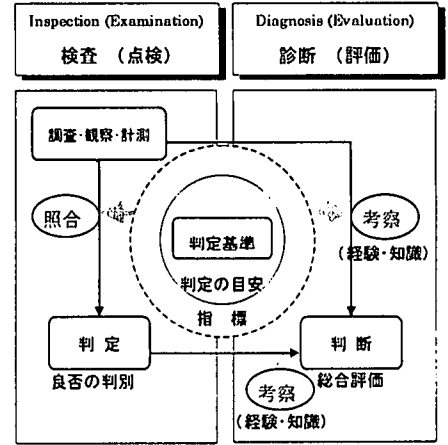


図1 構造物の検査と診断の関係

2.2 トンネルにおける検査・診断の特徴

一般に、トンネルは完成後の改築が困難なので、長期間にわたり供用されねばならない。したがって、長寿命化のための維持管理が重要である。しかし、トンネルには構造欠陥が存在することに加え、地圧の作用の他、近接工事や水位変動、地震などの環境変化など、寿命を縮める要因も多く存在する。このような要因を、検査によつて的確に見出す必要がある。ところが、トンネルの検査は、①狭く暗い空間内で、②供用中の限られた検査時間内で、③長大で連続した壁面を、④背面が見えない状態で行う、という極めて過酷な条件下において人力で行うのが現状であった。そのため、最近では、例えば連続的に覆工表面を撮影しひび割れなどを抽出する技術など、非破壊の自動検査技術の確立が求められている。

一方、変状トンネルでは、変状原因とともに、作用する外力の程度を推定することが健全度判定と対策工の設計において必須である。一般に、①地形地質等の環境条件、②ひび割れパターンや内空変位等の変状現象・進行性、③覆工構造を総合的に勘案し、外力を推定することになるが、これを適切に行うためには十分な経験と技術に基づいた診断が必要となる。また、対策後に検査を継続し、対策効果を十分に評価することも重要である。このような状況から、近年、トンネルの健全度判定をより定量化するための基準の作成や、検査から診断までの一連の作業をシステム化することが要求されている。

3. 検査・診断の現状

3.1 検査体系

ここでは、トンネルの覆工、路盤といったトンネル構造物本体の検査を対象として取り扱うこととし、用途別、構造（工法）による違いを比較するために、道路トンネルとして建設省と道路公団、鉄道トンネルとしてJRと営団地下鉄、通信トンネルとしてNTT、導水路トンネルとして東北電力、下水道トンネルとして東京都下水道局の各企業体について、検査体系を調査分析し、その概要を表1に整理した。また、図2にトンネルの保守業務の一般的な流れを示した。

一般に、トンネルの検査は、一次検査と二次検査に分けられる。

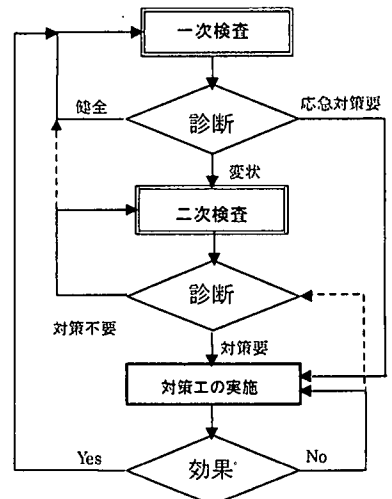


図2 トンネル保守の流れ

表1 検査体系の概要

用途・ 管理者 項目	道 路		鉄 道		通 信	導水路	下 水
	建設省	日本道路公団	J R	営団地下鉄	N T T	東北電力	東京都下水道局
構造	山岳トンネル	山岳トンネル	山岳トンネル	シールドトンネル 開削トンネル	シールドトンネル	山岳トンネル	管路(φ1500以下)
基準等	道路トンネル維持 補修便覧(1993)	維持管理要領(点 検編) 設計要領 第三集 トンネル本体工 保 全編(1998)	トンネル補強・補 修マニュアル (1990)	建造物検査基準 (社内基準)	社内基準	東北電力・水力 発電所導水路調 査要領	トンネルと地下 より抜粋
検査 体系 項目	一 次 検 査	名称 点検	名称 点検	名称 全般検査	名称 全般検査	名称 点検	名称 第一次調査
	二 次 検 査	目的 変状などの早期発 見および応急対 策・調査の必要性 の判定	目的 同左	目的 同左	目的 同左	目的 同左	目的 第二次調査の必 要性、改修工事 の可否を判定す る。
	三 次 検 査	種別 日常点検:車中か らの目視による 通常巡回 定期点検:徒歩に よる目視を主体 とし、5年に1 回程度、重要性 の高い道路は1 年程度で実施 異常時点検:日常 点検で異常が発 見された場合 臨時点検:地震、 集中豪雨が発生 したとき	種別 日常点検:車から視 認できる範囲の 点検 定期点検A:1年に 1回、管理区間 全体の構造物の 状況を全般的に 点検 定期点検B:個々 の構造物の状況 を細部にわたっ て点検 臨時点検:異常気象 時や、日常点検、 定期点検を補充 するもの	種別 定期検査:2年以 内に1回、全 トンネルを対象 に、目視と 打音を主体と して実施 不定期検査:地 震、豪雨、近 接施工時など、 必要に応じて 実施	種別 定期検査:2年以 内に1回、全ト ンネルを対象に、 直営で目視と打 音を主体として 実施 臨時検査:地震、 豪雨、近接施工 時など、必要に 応じて実施	種別 日常点検:日常作 業でとう道に入 構した際、目視 により行うなが ら点検 定期点検:点検周 期(2~4年) を定め、機能低 下の度合いを評 価するための点 検 特別点検:通報、 災害の発生およ び社内外の要請 により実施する 点検	種別 巡視:徒歩で地表 面沈下、臭気の 有無を点検 定期点検:定期的 に人孔、伏越し、 管渠などの状況 を確認
	四 次 検 査	手段 目視	手段 目視、簡易調査機 器	手段 目視、打音	手段 目視、打音	手段 目視、簡易調査 機器	手段 目視
検査 体系 項目	一 次 検 査	名称 調査	名称 調査	名称 個別検査(特別 検査)	名称 特別検査	名称 調査	名称 第二次調査
	二 次 検 査	目的 変状原因の推定、対策の要否・時期の判定および対策工設計の資料収集	目的 同左	目的 同左	目的 同左	目的 補修方法を選定 する	目的 改修工事の要否 および改修工法 選定の資料収集
	三 次 検 査	種別 標準調査A:要調 査時に、必ず実 施する外観観察 を主体とした調 査 標準調査B:状 況により望まれ る覆工厚・背面 空洞の観察調査 詳細調査:標準調 査では以後の対 処を判定できな い場合に実施す る計測機器を用 いた調査	種別 既存資料調査:建 設時の資料、点 検・過去の変状 調査時の調査 周辺地山・環境調 査:トンネル周 辺の地山状態・ 環境条件及びそ の変化を調査 変状詳細調査:変 状原因の推定と 対策工設計のた めの情報を得る ことを目的とし て行う調査	種別 個別検査:全般検 査の内容を高精 度化するととも に、変状現象、 原因に応じた計 測器機を用い て、変状の進行 性規模を測定、 監視する。	種別 特別検査:補強計 画などに必要な 項目を調査	種別 鉄筋腐食調査:非 破壊検査法によ り鉄筋の腐食の 度合いを調査 各種劣化調査:中 性化、表面劣 化、アルカリ骨 材反応などの調 査	種別 第二次調査:変状 が発見され、安 全性の評価およ び改修工事のた めに、さらに調 査が必要な場合 に実施
	四 次 検 査	手段 詳細調査、各種計 測試験	手段 詳細調査、各種計 測試験	手段 詳細調査、各種計 測試験	手段 詳細調査、各種計 測試験 構造計算	手段 劣化調査試験	手段 詳細調査、各種 計測試験

一次検査において必要なことは、まず、全長にわたりバラツキの少ない良質な検査データをできるだけ短時間に得ることである。この段階の検査は一般に全長を対象として、用途に応じて数年おきに定期的に行うもので、比較的簡易に実施できる検査手段(例えば壁面の目視観察、打音検査、撮影など)を用いて、問題となる区間を確実に抽出することに主眼が置かれる。

一次検査により抽出された問題区間においては、次の段階で、補修時期の判定や対策設計に必要な詳細な情報を得るための二次検査が実施される。これには、出来る限り定量的なデータを得るための検査手段(例えば変位計測、覆工背面の調査など)が用いられる。しかし、トンネルの構造的な安定は、周辺地山の状態や土被り、気象条件、経年、建設方法等により異なるので、対策工の要否の判断やその設計を定量的に行うことは難しいのが現状である。また、措置を講じた後も効果判定のための検査診断を一定期間密に継続する必要がある。このような状況から、この段階における診断は、他の構造物に比較して専門家に頼る比率が高い。

なお、一次検査および二次検査の目的は、通信トンネルにおいては二次検査が補修工法の選定を目的に行われ、また導水路トンネルにおいては一次調査で改修の要否の判定まで行うように、用途や構造（工法）により若干異なる。これは、用途や工法により、検査を行う上での制約条件や着目点などが異なるためと思われる。また、一次検査の頻度は、企業体により若干異なるが、概ね2～5年に1回である。これを他のコンクリート構造物と比較すると、たとえば土木学会コンクリートの構造物維持管理指針(案)、(1995)によれば、港湾構造物では3～10年、道路橋では5～7年に1回程度であり、トンネルの一次検査の頻度は若干多いと判断される。これは、他のコンクリート構造物の変状・機能低下が主として経時変化の小さい材料劣化に起因するのに対し、トンネルのそれは材料劣化の他に、外力の変化や漏水などが大きな要因となっているためと考えられる。

3.2 健全度判定基準

一次および二次検査実施時の各企業体の健全度判定基準をまとめると表2のとおりであり、以下のことが読み取れる。

(1)判定区分について

一次検査の判定区分は、導水路トンネルを除き、3～4段階に区分される。具体的には、①改修の必要がある、②要調査・要監視、③健全程度にまとめられる。また、二次検査では、先の①および②に判定されたものについて、改修の要否と時期を判定している。なお、導水路トンネルにおいては、一次検査で改修の時期まで判定を行っているが、これは断水時以外、検査を行うことができないという制約からきたものと思われる。

(2)判定方法について

判定基準は、通信トンネルを除き、一般に定性的表現となっている。ただし、二次検査の段階では、各企業体とも、個々の評価指標に対して判定の目安を設定し、定量的表現に努めている。各企業体の評価指標に対する判定の目安は表3および表4に例示するとおりであり、これらの判定の目安をもとに、個々の機能に関する個別判定がなされる。

トンネル構造物全体の機能判定の方法は、トンネルの用途により異なる。交通トンネルでは、定性的ではあるが、安全への影響の大きい剥離・剥落や漏水を重要視するなど判定の指標に重み付けをした総合判定がなされている。このような総合判定では、より多くの専門知識、経験が必要となり、よりの確な健全度評価を行うには、今後エキスパートシステムの導入が必要と思われる。下水道トンネルでは、点数法により定量的総合判定を行い、補修のプライオリティ付けを行っている。土木学会コンクリート構造物維持管理指針(案)においても、グレーディングによる評価法などが推奨されており、他の用途のトンネルにおいても、この方向での健全度評価法を検討する価値があると考えられる。一方、通信および導水路トンネルでは、判定の指標ごとに個別判定が行われており、上述の総合判定に比べ比較的、判定は容易と考えられる。とくに、通信トンネルは、用途上、指標を1ないし2指標に絞っており、効率的な検査・診断が可能と思われる。

(3)判定の指標について

評価指標は、基本的には用途、構造により異なる。二次検査に着目すれば、シールドトンネルや開削トンネルなどの都市トンネルでは、材料劣化や鉄筋腐食など材料的検査の比重が高く、山岳トンネルでは変形やクラックの状況など外力に関連した検査の比重が高い。これは、両者の設計思想の違いに関連していると考えられる。また、評価指標の判定の目安に関して、以下のことが読み取れる。

ひび割れに対する判定の目安において、構造形式により若干異なるが、概ね開口幅1～2mm以上のクラックが確認された場合に、対策の要否が問題となる。一次検査では、開口幅1mm程度を認識できる精度が必要と判断される。

・変形に対する判定の目安において、山岳トンネルでは変形状態のみならず、変形速度も重要視している。一方、シールドトンネル・管路では現状の変形状態で主に判定を行っている。また、山岳トンネルでは、ひび割れが進行性かどうかを重要視している。これらは、山岳トンネルとシールドトンネルとの設計思想の違いに関連しているものと考えられる。

表2 健全度判定基準の比較

用途・管理者		道 路		鉄 道		通 信	導水路	下 水
項 目		建設省	日本道路公団	J R	営団地下鉄	N T T	東北電力	東京都下水道局
一次検査	判定方法	定性的総合判定	定性的総合判定	定性的総合判定	定性的総合判定	定量的個別判定	個別判定	不明
	レベルⅠ	A: 応急処置や対策が必要	AA: 緊急補修が必要	A: 何らかの処置が必要	特A: 何らかの措置が必要	C: 専門技術者の判断により対策	5: 保安上直ちに改修が必要	不明
	レベルⅡ	B: 標準調査が必要	A: 損傷が大きく、補修の要不要の検討が必要	B: 監視が必要なもの(必要に応じ措置)	A: 一部分の取替・補強等が必要	B: 鉄筋腐食診断を行う	4: 早期(1~2年)に改修を要する	
	レベルⅢ	S: 健全なもの(変状が無いか、あっても軽微)	B: 損傷が小さいが、補修の要否の検討が必要	C: 重点的に検査が必要	B: 密な監視が必要	A: 診断・補修を行わない	3: 計画的(3~6年)に改修を要する	
	レベルⅣ		OK: 補修する必要が無い	S: 変状なし	C: 重点的な検査が必要		2: 継続監視を要する	
	レベルⅤ						1: 通常点検とするもの	
	変形・変位	○	○	○	○		○	
	沈下・隆起	○	○	○	○			
	ひび割れ	○	○	○	○	○	○	○
	目地	○		○			○	
	剥離・剥落	○	○	○	○		○(欠損)	
	洗堀						○	
	摩耗						○	
	鉄筋腐食				○			○
	漏水・湧水	○	○	○	○		○	
	つらら・側氷	○	○	○				
	流下状況							○
二次検査	判定(判断)方法	定性的総合判定	定性的総合判定	定性的総合判定	定性的総合判定	定量的個別判定	個別判定	詳点法による総合判定
	レベルⅠ	3A: 直ちに何らかの対策が必要	補強工A: 変状の規模が特に大きくかつ進行し、早急に何らかの補強が必要 補修工Ⅰ: 早急に何らかの補修が必要	AA: 直ちに措置が必要	AA: 緊急に措置が必要	Ⅳ: 鉄筋の補強や交換	5: 直ちに改修を要する	要緊急グループ: 緊急に補修を行う。 詳点30点以上
	レベルⅡ	2A: 早急に対策が必要	補強工B: 変状が大きくかつ進行し、早急に何らかの補強が必要 補修工Ⅱ: 計画的に補修が必要	A1: 早急に措置が必要	A: 早期に措置が必要	Ⅲ: 錆の除去と防食塗装	4: 早期(1~2年)に改修を要する	要計画グループ: 計画的に補修を行う。 鉄筋コンクリート管 8点以上 陶管・その他 12点以上
	レベルⅢ	A: 重点的に監視をし、計画的な対策が必要	補強工C: 変状がありかつ進行し、速やかな補強が必要 補修工Ⅲ: 監視及び場合によっては軽微な補修が必要	A2: 必要な時期に措置が必要	B: 重点的監視が必要	Ⅱ: ひび割れ閉塞	3: 計画的(3~6年)に改修を要する	その他のグループ:
	レベルⅣ	B: 監視が必要	補強工D: 重点的に監視し計画的に補強が必要	B: 監視が必要	C: 表面補修程度が必要	Ⅰ: ひび割れ閉塞	2: 継続監視を要する	
	レベルⅤ			C: 重点的に検査が必要	S: 当面補修不要		1: 通常点検とするもの	
	レベルⅥ			S: 変状なし				
	変形速度	○	○	○			○	
	変形状態	△	△	△	○			○
	ひび割れ寸法	○	○	○	○		○	○
	ひび割れ密度	△	○	○	○		○	
	目地切れ深さ	△		○				
	圧ぎ長さ	△	○	○				
	浮き・剥落	○	○	○	○		○	
	有効巻厚	○	○	○	○			
	鋼材腐食				○	○		○
	漏水	○	○	○	○			○
	側氷・凍結	○	○	○				
	地山状態	△	△	△			○	
	背面空隙	△	△	△			○	
	付着物							○
	コンクリートの劣化	○	○	○	○	○	○	○

表3 判定の指標の一覧（ひび割れ）：2次

管理番号 判定区分	道 路		鉄 道		通 信	導水路	下 水
	建設省	日本道路公団	J R	営団地下鉄	N T T	東北電力	東京地下 水道局
レベル Ⅰ	3A ・進行性があり、幅3mm 以上、長さ5m以上 ・進行性不明で、幅5mm 以上、長さ10m以上	Ⅰ（補修工に 適用） ・密度 50cm/ ㎡以上	AA ・幅5mm以上、長さ10m以上 ・輪切り方向の場合ラッパ ツ ・進行性ある場合は注意	AA ・主筋方向2mm以上多数 ・配筋方向1mm以上進 行性 ・著しい進行、増加 ・密度かなり密・多数	C ・ひび割れ長さ全体 比率20%以上	ひび割れ 形状（パ ターン） と地山状 況から判 定。	A 5mm以 上
レベル Ⅱ	2A ・進行性があり、幅3mm 以上、長さ5m未満 ・進行性不明で、幅3～ 5mm、長さ10m以上	Ⅱ（補修工に 適用） ・密度 20～ 50cm/㎡	A1 ・AAのラッパツ ・A2のラッパツ	A ・主筋方向1～2mm多数 ・配筋方向0.5～1mm ・進行増加あり ・密度高い	B ・ひび割れ長さ全 体比率5～20% ・全体比率2～5% かつ単位幅比率 50%以上		B 2mm以 上
レベル Ⅲ	A ・進行性があり、幅3mm 未満、長さ5m以上 ・進行性不明で、幅3～ 5mm、長さ5m未満	Ⅲ（補修工に 適用） ・密度 20cm/ ㎡以下	A2 ・幅3～5mm、長さ5m以下 ・密集する場合ラッパツ ・輪切り方向ではラッパツ ・進行性ある場合は注意	B ・主筋方向1mm以下 ・配筋方向0.5mm以下 ・進行性なし ・密度低い	A ・ひび割れ長さ全 体比率5%未満 ・全体比率2～5% かつ単位幅比率 50%未満		C 2mm未 満
レベル Ⅳ	B ・進行性が認められな い ・幅3mm未満、長さ5m未満		B ・A2のラッパツ	C ・主筋方向0.3mm以下 ・配筋方向0.5mm以下			
レベル Ⅴ				S ・主筋方向0.2mm以下 ・配筋方向ラッパツ			

表4 判定の指標の一覧（変形速度、変形状態）

管理番号 判定区分	道 路		鉄 道		通 信	導水路	下 水
	建設省	日本道路公団	J R	営団地下鉄	N T T	東北電力	東京地下 水道局
レベル Ⅰ	3A ・変位速度10mm/ 年以上	塑性圧に起因A ・変位速度2mm/月以上 偏圧・鉛直荷重に起因A ・変位速度10mm/年以上	AA ・変位速度10mm /年or 2mm/月 以上	AA ・延長10m以内の縦 断方向変位差9 mm	・たわみについては、 筋力物やコンクリートに大 きな変形がある場合 に補修	5 ・変位の発生位 置、大きさに拘 らず5と評価	A ・たるみ、蛇 行が管径 以上
レベル Ⅱ	2A ・変位速度3～10 mm/年	塑性圧に起因B ・変位速度10mm/年以 上 偏圧・鉛直荷重に起因B ・変位速度3～10mm/年	A1 ・変位速度3～ 10mm/年以上	A ・延長10m以内の縦 断方向変位差6 mm			B ・たるみ・蛇 行が管 径の1/2 以上
レベル Ⅲ	A ・変位速度1～3 mm/年（状況に より1mm/年 未満も含む）	塑性圧に起因C ・変位速度3～10mm/年 偏圧・鉛直荷重に起因C ・変位速度3mm/年未 満	A2 ・変位速度1～ 3mm/年	B ・延長10m以内の縦 断方向変位差3 mm			C ・たるみ・蛇 行が管 径の1/2 未満
レベル Ⅳ	B ・変位速度1mm/ 年未満（状況 によりA1ラッパツ）	塑性圧に起因D ・変位速度3mm/年未満 偏圧・鉛直荷重に起因D ・変位速度3mm/年未満	B ・変形の進行が 極めて緩慢				

・変形速度に関する判定の目安は、既往の実績に基づいて設定されているようである。これらは一般的な断面のトンネルに適用されるものであり、大断面トンネルなど特殊なトンネルについては別途検討が必要と思われる。

なお、評価指標およびその調査方法の選定に関し、土木学会コンクリート構造物維持管理指針(案)などでは劣化機構ごとに詳細なフローが示されているのに対して、トンネルとくに山岳トンネルではそのようなものが見当たらない。これは、トンネルの変状の要因・原因が外力・材料劣化・漏水と幅広く、簡単に特定することが一般に困難なためと考えられる。判定の指標および調査法の選定に関しても、エキスパートシステムの適用が望まれる。

4. 新しい検査・診断技術

4.1 技術開発の方向

各企業体では鋭意トンネルの検査・診断技術の開発の取り組みが進められているが、その目的、内容はおおよそ表5の

表5 トンネルの検査・診断技術開発の目的と内容

項 目	目 的	内 容
検査技術	検査の効率化・省力化、高精度化、作業の安全性向上、作業環境の改善、可視化	地中レーダー・赤外線・レーザ等の非破壊検査技術、車載式システム、等
診断技術	診断法の合理化・省力化、客観的な診断、診断技術の継承	エキスパートシステム、数値解析技術、データベース、等

ようにまとめることができる。一般に、トンネルの検査は人力によることが多く、このため多大な労力と時間が必要であるとともに、作業環境も良いとは言えないのが現状である。検査の効率化と作業の安全性を改善することを目的として、機械化、自動化の方向で、非破壊的な検査技術（システム）の開発が進められている。診断技術についても、検査結果をデータベース化し、熟練技術者に代わるエキスパートシステムを構築する取り組みが行われている。また、数値解析技術による、より合理的な判断を支援するシステムの開発も行われている。

4.2 検査（点検）技術

各企業体で開発・導入されている検査技術の概要を表6～表7に示す。覆工表面の変状を対象とした検査技術では、ひび割れ（クラック）を対象とした自動化、機械化技術が多く見られ、手法としてはレーザーが多く採用されている他 CCD カメラ、赤外線カメラ、スリットカメラ、ライセンスカメラが実用化されている。測定精度も比較的良好であり実用化段階にあると考えられる。また、表層剥落に關しての検査技術では赤外線カメラによる検査が実用化されている。一方、覆工内部を対象とした検査技術では、地中レーダーによる覆工厚、背面空洞の検査技術が多く、車載による効率化も図られている。一方、材料劣化（コンクリート強度、鉄筋腐食、中性化）や欠陥等の変状については、非破壊的な検査技術の開発が進められているようである。

4.3 診断技術

各企業体で開発・導入されている診断技術をまとめて表に示す。鉄道トンネルでエキスパートシステムが開発されて以来、主に導水路トンネルを対象としたエキスパートシステムの開発が多く行われ

表6 覆工表面の変状を検査対象とした新技術

手法	概要	対象	主な仕様	適用性
ライセンスカメラ	走行しながら壁面を走査して画像を得、連続走査画像から展開図を作成	鉄道	30km/h で幅 1mm 程度のクラック検出可	○
スリットカメラ	走行速度とフィルムの送り感度を同調したカメラにより連続壁面写真を得、展開図を作成	鉄道	30-40km/h で幅 1mm 以下の解像度	○
レーザー	レーザービームで全周をスキャンし画像処理を施して連続壁面画像を得、展開図を作成	鉄道 道路	4～7km/h 以下 幅 0.5mm のクラック検出可 70°コンベックス使用	◎
	レーザー光の反射量を撮影し連続画像を得、画像処理を施して展開図を作成	導水路	2km/h で走行 幅 1.0mm のクラック検出可 半導体レーザー使用	
赤外線カメラ、CCD カメラ	走行時レーザーで強制加熱し、赤外線放射量を赤外線カメラで撮影する。画像処理後、剥離を検出する。可視カメラ(CCD)によりクラック、漏水等を同様に検出し、健全度判定を含む変状展開図を自動作成	鉄道	検査変状：剥離、剥落、クラック、漏水、析出物、 精度 幅 1mm 程度のクラック 測定速度：2km/h	○
CCD カメラ、圧力センサ	CCD カメラによりクラック幅、長さを測定。圧力センサと位置情報から勾配・蛇行を測定	下水道	適用箇所：管路(230-800mm) 精度：幅 1mm のクラック 勾配・蛇行 1% 走行速度：3m/min	○

適用性の分類 ◎：実用化され広く利用されている手法

○：実用化されている手法

△：実用レベルに達している手法

無記入：適用できない手法

表7 覆工内部を検査対象とした新技術

手法	概要	対象	主な仕様	適用性	
				内部	背面
熱赤外線	赤外線ビデオにより壁面温度分布を撮影し画像処理を施し、欠陥を検出	鉄道	表層内部欠陥、背面漏水の抽出	○	(△)
地中レーダー	地中レーダーにより覆工厚、背面空洞を検出 車載した地中レーダーにより覆工厚、背面空洞を検出	鉄道		◎	◎
		道路	2km/h で走行		
		導水路	覆工厚は 50cm、空洞深さは 1m まで探査が可能。 測定精度は、5cm を確保		
衝撃弾性波法	ばね式インパクトハンマーで発生する弾性波の反射波を測定し、周波数分析を行い、覆工厚等を検出	鉄道	覆工厚、背面空洞の有無、覆工強度の検出可	△	△
打撃法	背面空洞を有する時、特定の周波数帯域の音響エネルギーが特徴的な増加をする性質を利用する方法、ウェーブレット変換を用いる方法がある	鉄道	欠陥の抽出が可能	△	
超音波法	発振子と受振子を用いて、超音波の伝播速度および波形の形状からコンクリート強度、クラック深さ、剥離などを検知	鉄道	表示方法：超音波波形図、エコーグラム図、 剥離分布図	△	
自然電位法	コンクリート表面と鉄筋間の電位差を測定する自然電位法を利用する。壁面に電極を走査し、得られた電位から鉄筋の腐食程度を判定	鉄道・通信	対象：鉄筋の腐食程度 表示方法：電位分布図	○	
反発度法、超音波法、フェーズドレイソン法	測定器、コンタクトを搭載した台車をリモートコントロールし、コンクリート強度、中性化深さを測定	下水道	対象：管路(内径 230-800mm) 速度：最大 6m/min	○	

適用性の分類 表6と同じ

ている。導水路トンネルでは、比較的短い断水期間内に、検査・診断・補修の一連の作業を実施することが多く、診断技術の効率化を図る必要があるためと考えられる。また、構造解析手法の診断法への適用検討も多く行われており、従来の経験を主とした診断法から、客観的、合理的な診断法への取り組みも行われている。

5. まとめと今後の課題

トンネルの保守に関する指針などの既往文献調査や聞き取り調査を行い、各用途別の検査体系や健全度判定基準、判定のための指標について、現況における考え方を把握した。次に、検査・診断技術の文献調査を行い、現況と開発動向について整理した。

これらの結果を踏まえ、今後、地下構造物の長寿命化を達成させるために期待される検査・診断技術を列挙すれば、以下に示すとおりである。

- (1)機能・構造毎に統一された保守マニュアルの作成
- (2)共有し得る保守データベースの構築
- (3)自動検査システムの開発
- (4)検査・診断・対策工設計を支援するエキスパートシステムの開発
- (5)上記(1)～(4)を統合した維持管理支援システムの構築

6. おわりに

土木学会地下空間委員会維持管理小委員会の「検査・評価WG」で検討を重ねてきた内容を基に、トンネルの検査体系と検査・診断技術の開発動向などの現状を整理・分析した。今後は、これらの現状認識をもとに、統一的な技術指針化、検査・診断技術の自動化・システム化などによる保守コストの低減と保守技術の向上に向けて、更なる検討を加えて行きたいと考えている。

この論文を作成するにあたっては、維持管理小委員会の竹林重夫委員長をはじめ、「検査・評価WG」のメンバーである戸井田克氏（鹿島建設（株））、中野清人氏（日本道路公団）（前任）、海瀬忍氏（日本道路公団）の各氏に全面的な協力を頂いた。記して謝意を表する次第である。

7. 参考文献

- 1)野沢太三他：トンネル漏水防止工の実態調査、鉄道土木、Vol. 22、No. 9、1980. 9
- 2)稲野茂、猪熊明：道路トンネルの変状実態と対策、トンネル工学研究発表会論文報告集、Vol. 2、1992. 10
- 3)J T A 保守管理委員会：トンネルの保守・維持管理、トンネルと地下、1994. 1～8
- 4)J T A 保守管理委員会：トンネルの新しい検査手法、トンネルと地下、1996. 8～11
- 5)岡田清他：鉄道事例に見る土木構造物の診断、山海堂、1990. 10

表 8 新しい診断技術

手 法	概 要	対 象	適 用 性	
			診 断	対 策 工 設 計
エキスパートシステム (1988 開発)	各社の端末を回線で結びデータベースを構築。検査結果から変状原因を推定	鉄道	(○)	
ひび割れ進展解析法 (1998 開発)	無筋コンクリートのひび割れ挙動をモデル化した骨組解析法	鉄道路路		○
エキスパートシステム (1991 開発)	既存調査・改修要領の自動化。改修が必要か否かの判定、改修工法の選択	導水路	(○)	○
エキスパートシステム (1995 開発)	既存調査マニュアルの自動化。変状入力・自動診断・出力の3つのシステムで構成		○	
エキスパートシステム、構造解析法 (1993 開発)	構造安定性評価のための構造解析手法、ひび割れ原因診断エキスパートシステム等で構成	導水路	○	
エキスパートシステム (1995 開発)	変状原因推定、補修要否判定、補修工法選択までのエキスパートシステム化。非線形解析結果に基づいた作用外力推定法も提案	導水路	○	○

適用性の分類 表6と同じ