

維持・管理小委員会報告

維持・管理小委員会
小委員長 竹林亜夫

1. はじめに

地下構造物の耐用年数は、一般に他の構造物と比較して長い。これは地下構造物の解体撤去に多大の手間と費用がかかるためであり、100 年以上経てなお供用されている施設も随所に見られる。地下構造物の維持管理に関しては、事業者が独自に取り組んでおり、補修・補強を加えながら長期に渡り使用しているのが現状である。また戦後の復興期以降急激に建設された地下構造物は、その初期の施設が 40～50 年を経て老朽化が目立ち始めており、さらに今後のメンテナンス量の増加にも関わらず、高齢化や少子化が進み、維持管理対策に関しては各事業者が共通の問題を抱えている。

地下施設を効率的に維持していくためには、総合的な情報収集や対策等への取り組みが欠かせない。また今後建設される地下構造物には、設計や施工段階から維持管理の最新情報を反映させる必要もある。このような社会情勢の中、維持管理小委員会は土木学会地下空間研究委員会の下に平成 8 年度に発足した。本小委員会は、研究テーマを「地下構造物の維持管理技術に関する調査研究」とし、対象とする地下構造物を、地下街、地下駐車場、各種都市地下トンネル、各種山岳トンネル等として、3 カ年を目標に研究活動を開始した。また途中小委員会の研究範囲が多岐に渡るにより、メンバーを増員し、検査・評価WG、設計WG、補修・再生WGの3つのWGに分かれ、より専門的で学際的な調査研究を行ってきた。

本小委員会の主な研究内容を列記してみると、

- ①地下構造物の検査・診断技術の現状を調査分析し、検査・診断のシステム化や技術指針類の統一化による保守技術の向上や保守コストの低減に向けた研究。
- ②地下構造物の維持管理に関する補修・補強・更新時に生じる技術的課題を調査・分析し、計画、設計から施工段階で考慮すべき事項の提言。
- ③地下構造物のライフサイクルコスト試算を試み、維持管理、更新そして廃棄までを含めたトータルコストをミニマムにするための分析および今後の課題について。
- ④設計、施工から点検、補修にまでわたるデータの分析と蓄積。

などである。

本調査研究において、地下構造物の維持管理に関する研究体制を整えた段階であり、今後とも研究を継続する必要性を痛感している。研究成果は、地下空間研究委員会の主催で開催される地下空間シンポジウム他での発表を行ってきたが、来年度の土木学会学術講演会や本シンポジウムなどで発表を行う予定である。

維持・管理小委員会名簿

1998年10月現在

	氏 名	勤 務 先	W G
委員長	竹林 亜夫	清水建設(株) 土木本部 技術第二部	補修・再生WG
幹事長	加茂富士男	パシフィックコンサルタンツ(株) 総合技術本部 CM部	設計 WG
幹 事	粕谷 太郎	鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術企画部	補修・再生 WG
幹 事	小島 芳之	(財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 構造物技術開発事業部	検査・評価 WG
幹 事	関根 一郎	戸田建設(株) 土木工事技術部	補修・再生 WG
幹 事	戸井田 克	鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部	検査・評価 WG
幹 事	平井 光之	(株)間組 土木本部 技術設計部	補修・再生 WG
幹 事	水野 敏実	応用地質(株) 技術本部 道路部	設計 WG
委 員	青木 俊朗	東急建設(株) 土木本部 土木技術設計部	検査・評価 WG
委 員	石村 利明	建設省 土木研究所 道路部	設計 WG
委 員	内川 栄蔵	帝都高速度交通営団 工務部	検査・評価 WG
委 員	海瀬 忍	日本道路公団 試験研究所	検査・評価 WG
委 員	加納 竜夫	パシフィックコンサルタンツ(株) 施設部	設計 WG
元委員	中野 清人	日本道路公団 技術部	検査・評価 WG
委 員	梨本 裕	前田建設工業(株)土木本部 土木設計部	設計 WG
委 員	廣瀬 末雄	(株)建設企画コンサルタント 設計本部 トンネル室	設計 WG
委 員	藤原 康政	清水建設(株) 土木本部 技術第二部	補修・再生 WG
委 員	松村 卓郎	(財)電力中央研究所 我孫子研究所 構造部	検査・評価 WG
委 員	山田 和男	(株)竹中土木 技術本部 技術部	補修・再生 WG
委 員	山村 明義	帝都高速度交通営団 工務部	補修・再生 WG
元委員	山本 努	帝都高速度交通営団 工務部	補修・再生 WG

2. 検査・評価WG

(1) 調査内容

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、「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、用途ごとに検査・診断技術の現状を、各企業体における指針類の調査や文献調査、聞き取り調査などにより把握し、今後の検査・評価のあり方について検討してきた。

主な調査項目は、以下に示すとおりである。

① トンネル検査・診断の現状分析

検査の体系、健全度判定基準、判定指標

② 新しい検査・診断技術の開発動向の現状分析

非破壊検査技術、自動診断技術

(2) 調査方法

1) 調査対象

a) 用途

- ・ 道路トンネル (建設省、日本道路公団)
- ・ 鉄道トンネル (JR各社、帝都高速度交通営団)
- ・ 通信用トンネル (NTT)
- ・ 電力用導水路トンネル (電力各社)
- ・ 下水道トンネル (東京都下水道局)

b) 構造 (工法)

山岳工法、シールド工法、開削工法、推進工法により施工されたトンネル構造本体 (覆工、路盤)

2) 調査手段

- ・ 各企業体の指針・マニュアル類の調査
- ・ 文献調査 など

なお、調査対象と各対象毎に参照した指針や文献を、表-1に示す。未公表のものについては、一部聞き取りによる調査も実施している。

表-1 検査・診断の現状調査対象と関連文献

用途	管理者	構造	基準等
道路	建設省	山岳トンネル	道路トンネル維持補修便覧(1993)
	日本道路公団	山岳トンネル	維持管理要領(点検編) 設計要領 第3集トンネル本土工保全編(1998)
鉄道	JR	山岳トンネル	トンネル補強・補修マニュアル(1990)
	営団地下鉄	シールドトンネル 開削トンネル	建造物検査基準(社内基準)
通信	NTT	シールドトンネル	(社内基準)
導水路	東北電力	山岳トンネル	東北電力・水力発電所導水路調査要領
下水	東京都下水道局	管路 (φ1500以下)	トンネルと地下 ³⁾ より抜粋

(3) 研究成果概要

1) 検査と診断の関係

まず、トンネルの検査・診断に係わる用語の関係を考察し、図-1のように整理した。

2) 検査・診断の現状

a) 検査体系

一般に、トンネルの検査は、図-2に示すように、一次検査と二次検査に分けられる。
一次検査は、用途に応じて2～5年の周期で全長を対象とし、定期的に行われる。検査は、比較的簡易な手段 (例えば目視観察、打音検査、撮影など) により行われ、問題区間の確実な抽出に主眼が置かれる。

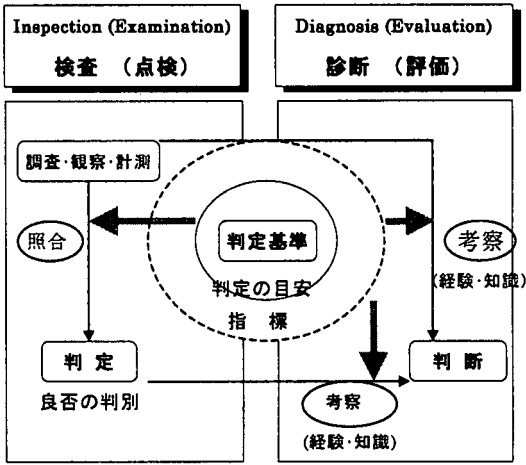


図-1 トンネルの検査と診断の関係

検査周期は、トンネルの特性から他の構造物に比較すると短い傾向にある。

二次検査は、問題区間に対して詳細情報を得るために行うもので、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、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、措置後も効果判定のための検査診断を一定期間継続する必要がある。このような状況から、この段階での診断は、他の構造物に比較して専門家に頼る比率が高くなっている。

b) 健全度判定基準と指標

健全度の判定の方法は、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、経験が必要となる。ひび割れや変形速度、材料劣化などの評価指標値が示され、診断実務に利用されているものの、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。

また、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が、このような手法を他のトンネルにおいても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) 新しい検査・診断技術

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-2のようにまとめることができる。

表-2 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・レーザー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

検査技術に関しては、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) 今後の課題

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・診断技術は、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

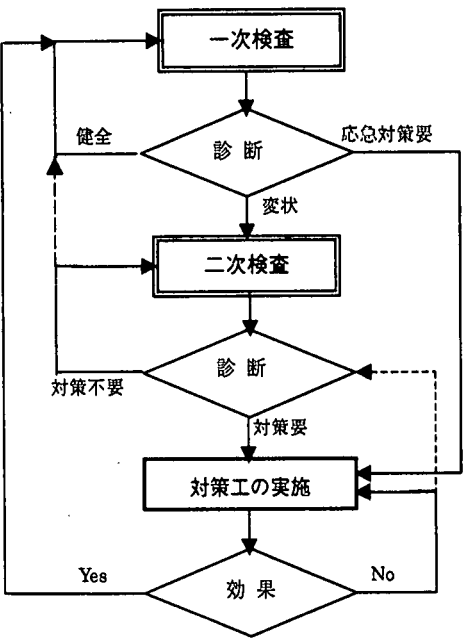


図-2 トンネルの検査・診断の一般的な流れ

3. 補修・再生WG

(1) 調査内容

地下構造物の維持管理のあり方を考える上で、経験から得られた貴重な知見を抽出、分析して広く活かしていくことが有用である。「補修・再生WG」では補修・補強、改築・増設、再構築等の事例から地下構造物の寿命に影響を及ぼす要因を抽出し、計画段階、設計段階、施工段階それぞれで留意すべき事項として整理し、今後の地下構造物の計画、設計、施工のあり方を検討してきた。

また、代表的地下構造物であるトンネルについて建設工法の変遷と施工・維持管理に関するマニュアル類の整備の歴史についても整理した。

事例の収集、分析にあたっての主な着眼点は以下の通りである。

- ①補修、再生の動機（目的）
- ②工事実施上の特徴
- ③計画・設計・施工段階へのフィードバック事項
- ④周辺環境との相互作用への配慮事項等

表－3 調査概要

調査内容	期待される主な知見
トンネル施工法の発達とマニュアル類整備の変遷調査	施工法に起因する維持管理上の課題と、それに対応した対策工法の進歩
地下構造物ごとの補修・再生事例調査	前工程へのフィードバック事項
事業主体のライフサイクルコストに関する考え方の調査	今後の維持管理の方向性

(2) 調査方法

調査対象とした地下構造物は以下の通りである。

- ①鉄道トンネル（山岳部）
- ②道路トンネル（山岳部、都市部）
- ③都市地下鉄道（シールド、開削）
- ④電力施設（主に水路トンネル）
- ⑤下水道施設
- ⑥共同溝、地下街、地下駐車場

調査は文献調査を主体としたが、不足情報については関連事業者を招いての講演、現地視察により有用な知見を得ることができた。例えば、横浜駅西口地下駐車場増設工事視察、東京都下水道局より専門家を招いての講演会などである。

調査の概要を表－3に示す。

(3) 研究成果概要

1) 供用年数

対象施設の分野ごとに建設が開始された時期、および老朽化した施設の割合を簡単にまとめたのが表－4である。コンクリート構造物の耐用年数とされている50年を経過した構造物の割合は水路トンネルが55%と極

表－4 分野別老朽化度

分野	初期の建設	老朽化施設割合
道路トンネル	(1963 に初めて高速道路開通)	・ 1950 年以前のトンネル約 20% ・ 1970 年以前約 50%
鉄道トンネル	・ 石屋川トンネル開通(1874)	・ 50 年以上経たトンネル約 30% ・ 100 年以上経たトンネルもある
地下鉄道	・ 銀座線浅草～上野間開業(1927)	・ 50 年以上経たトンネル約 7% ・ 25～50 年約 40%
下水道	・ 明治時代に初めて建設	・ 50 年以上経た管路約 13%
地下街・共同溝	・ 須田町ストア地下街開設(1932)	
電力施設	・ 明治中期に建設	・ 50 年以上経た水路トンネル約 55% ・ 100 年以上経たトンネルもある

めて多く、次いで鉄道トンネルの30%、道路トンネルの20%の順となっている。鉄道トンネルや電力施設の水路トンネルには100年を越えてなお供用され続けているものもある。

また、トンネルについて建設工法の変遷と施工・維持管理に関するマニュアル類の整備の歴史からは、施工法に依存する維持管理上の課題が克服されてきた経緯、ならびに老朽化構造物の増大に伴い維持管理に関する取り組みの重大性の高まりがよくわかる。

2) 補修・再生事例からの知見

表-5 に示すように、鉄道トンネル、道路トンネルではトンネルの変状、劣化に伴う補修、補強に加えて輸送量、交通量の増大に対応するための断面の拡大（拡幅）が工事实施の動機になっているケースが多い。下水道では、耐用年数を越えた管路を更新する際に、やはり需要増に対応した能力増、多機能化等を図るとともに維持管理しやすくすることも狙っていることがわかる。

都市地下鉄道では地下水の漏水への対応が維持管理の主眼のひとつであり、他の都市地下施設である地下街、地下駐車場、共同溝においても同様の状況と推定される。

補修・再生事例から設計・施工段階へフィードバックされる事項としては、山岳部トンネルにおいては地盤状況に応じた設計の重要性が、都市地下施設においては地下水位変動等の周辺状況の変化に対応できるような空間の余裕等の必要性が指摘できる。

表-5 補修再生の動機とフィードバック事項の例

	補修・再生の動機	前工程へのフィードバック事項の例
道路トンネル	・劣化・変状対策 ・交通量増大対応	・供用後の変状対策としてのインバート設置例がいくつかあるが、当初計画時における永続的な地圧に対する設計について検討するべきである。
鉄道トンネル (山岳)	・劣化、変状対策 ・震災復旧 ・電化、高速化 ・複線化（輸送力増強）	・活動性地すべりの恐れがある地帯では後々、変状が発生することが多く、結局ルート変更せざるを得なくなったケースあり。 ・塑性地圧、繰返し荷重等による変状の予測と、インバートの必要性を設計、施工時に充分検討する必要がある。
都市地下鉄道	・漏水防止 ・コンクリートのひび割れ、剥離、剥落、中性化対応 ・地下水压上昇対応	・地下水位変動の将来予測等の実施と設計への反映 ・不測の事態を考慮してトンネル内宮断面に将来の補修・補強用の余裕を確保しておく。
電力施設 (水路トンネル等)	・流水による摩耗対策 ・コンクリートの劣化、背面空洞対策	・供用後のゆるみ荷重の増加等に関する検討の必要性がある。
下水道	・管路の老朽化対策 ・能力不足解消 ・維持管理しやすく ・機能の高水準化 ・施設、資源の多目的利用	・維持管理、更新経費の急増を回避し、今後の再構築費用を平準化するためにライフサイクルコストを考慮する。
共同溝	・昭和38年の共同溝法制定以降、都市部幹線道路での急速な整備進行中。 ・補修、再生事例は見あたらないが、都市部共通の漏水処理問題は存在すると推定される。	・地域開発マスタープランに共同溝を利用したライフライン整備、地下鉄道・地下駐車場等と共同溝の一体整備などを盛り込んでおき、道路面の掘削回数の低減をよりいっそう推進していく。
地下街 ・地下駐車場	・需要増に対応した増設事例いくつかあり	

3) 今後の課題

今後、これらの知見をもとに、構造物のライフサイクルコストを見通したコスト配分、また更新時期を平準化するための計画的な補修・再生についての検討がますます重要になるものと思われる。

4. 設計WG

(1) 調査内容

設計 WG では、維持管理段階におけるトンネルの問題点（トンネルの変状、維持管理費の増大等）を整理し、それぞれの問題点の発生の要因について検討し、設計・施工に反映させるべき項目を抽出した。

(2) 調査方法

既往の論文を中心に、トンネルの変状や維持管理費のかかる清掃・付帯設備の交換について調査するとともに、ライフサイクルコストに関する文献や施設整備にライフサイクルコストの概念を導入した事例（東京湾アクアラインにおける防水シートによる止水等）を収集した。

(3) 成果の概要

1) 提案事項

近年、ストックの増大とその管理費の膨張は、投資額に大きなウェイトを占め、新規投資を圧迫するに至っている。図-3 には、1,200m のトンネルを建設した場合の建設費と維持管理費の経年の累計を示した。建設後 40 年程度で維持管理費は建設費と同程度の金額に達するとの試算であり、社会資本整備における維持管理費の増大は顕著である。また、今日の社会・経済情勢を考慮すると建設コストの縮減や環境・安全に配慮した施設整備のあり方が問われており、合理的で効果的な公共投資や将来の維持管理をも視野に入れた施設整備が要求されている。

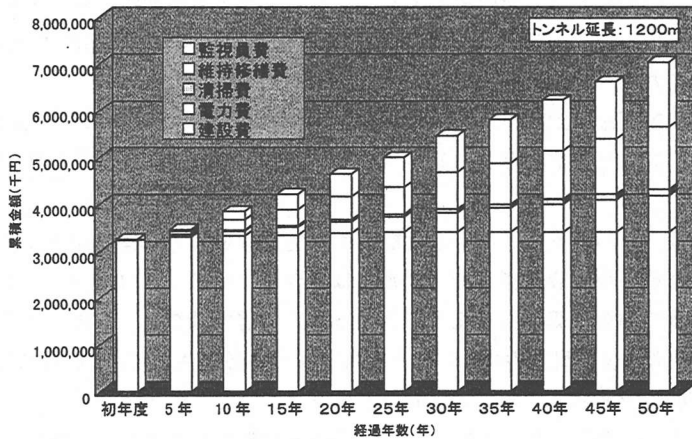


図-3 道路トンネルの建設費および維持管理費の類計

地下構造物、中でも道路や鉄道の重要な施設であるトンネルは、その立地条件の特殊性や維持管理の困難さ、あるいは施設の更新に膨大な費用が必要であることから、ライフサイクルコストを考慮した施設整備が必要である。特に、施設の重要性や長期に使用される構造物の性格に配慮すると、メンテナンスフリーの考え方をどこまで導入するかが重要である。これらを考慮したトンネルに関する項目としては、防水、劣化、立地条件あるいは地山条件に対する評価、付帯設備の耐久性等があり、これらを分析し、メンテナンスと設計の連携を図り、維持管理の現状を設計にフィードバックさせることが重要である。

研究では、地下構造物（主にトンネル）のライフサイクルコストをいかに考えるか、即ち防水、劣化、地山評価等の維持管理上の問題をどの程度まで設計に反映させるかについて既往資料の基礎的な調査を行い、

維持管理の現状を的確に反映した設計について提案し、今後、ライフサイクルコストを考慮した設計を行うことにより、合理的なトンネルの施設整備が行われることを目指した。

具体的に提案した事項は下記の通り。

a) 地下水位等地山条件、立地条件の変化への対応

設計当初の地山条件や立地条件の変化により、構造物に変状を来す事例について整理した。主には、地下水位の上昇と周辺の開発等による荷重条件の変化が変状の原因と考えられる。都市域での開発行為によって、構造物への載荷、除荷が繰り返されることから、構造部材厚や配筋を将来の荷重変化に対応できるよう十分な検討を行う必要がある。特に都市域のトンネルでは、地形改変や近接構造物の影響を受けるなどの荷重変化が予想される場合が多い。

b) 構造物の劣化への対応

構造物の劣化の要因は、主に漏水や荷重の変化であり、漏水による構造部材（セグメント等）の劣化や施設の腐食が生じている。これらを抜本的に解決するためには、非排水型トンネル（ウォータータイト）の計画を行うことが必要であるが、構造部材が水圧に耐えうる設計が必要なことや防水シート等の止水材料が必要となるため、初期投資が大きくなる。このため、工法の検討や設計に関する注意事項は、前述の通りであるが、ウォータータイトトンネルに関しては、漏水が無くなることによる維持管理費用の縮減や環境保全といった貴重な利点があることに配慮しなければならない。

c) 地山条件（地山分類）評価への対応

地山条件の評価については、適切な地山分類を行うことが重要である。しかし、トンネルは線状構造物であり、全延長にわたって詳細な調査を実施することは困難であり、弾性波探査等を中心とする物理探査手法に頼らざるをえないのが現状である。粘性土質の地山では、岩石の強度ではなく、トンネル掘削時の挙動を左右する地山強度を適切に把握することが必要であり、こうした点を地山分類に適用することにより、トンネルの適切な支保パターンの決定やインバートの必要性を設計・施工時に的確に判断することが重要である。

d) 点検・清掃作業の省力化

点検・清掃作業の省力化の方法としてロボットによる自動化があげられる。これらの設備は設置スペース、移動用のレール、メンテナンスヤードなど、トンネルの本体設計当初から考慮する必要がある項目である。

2) 今後の課題

ライフサイクルコストは、いわゆる施設の企画・計画から施設の運営・解体に至るまでの全プロセスに要する費用のことであり、合理的な施設整備を行うためには、ライフサイクルコストによる維持管理等の費用を考慮することなしに今後の施設整備はありえないといっても過言ではない。今後、こうした問題点を整理し、初期投資で整備すべき構造物の耐久性（メンテナンスフリーの必要性など）や設計に考慮すべき条件（環境・安全、社会・経済情勢）を明確にすることが重要である。

具体的には、LLC の概念を設計に導入する。即ち、維持管理費や解体費をも視野に入れた設計、設備の検討である。また、トンネルの耐久性について、本體工、附属施設それぞれの耐用年数の調査等を実施し、設計の目安とするなど、資料の整備を行う。