

地下構造物の現状と保生技術 The Present State of Underground Structure and "HOSEI" Technology

藤原康政* ・ 粕谷太郎** ・ 山村明義*** ・ 山田和男****
Yasumasa FUJIWARA, Taro KASUYA, Akiyosi YAMAMURA, Kazuo YAMADA

A time, when the infrastructure development is needed, is going to end. It is now demanded to prolong the life of existing structures by repairing and reinforcing and improve their functions.

We call it "HOSEI" here to conserve existing structures properly by using the past knowledge and the latest technology and add new functions to them.

This paper introduces the "HOSEI" technology of underground structures, pigeonholing the present state of maintenance and problems for them.

Key words; underground structure, management and maintenance, improvement of function, remodel, reuse, life cycle cost

1. はじめに

積極的な投資による社会資本整備が必要とされる時代が終わろうとしている。今後は既設構造物をうまく補修・補強しながらその寿命を延ばしていくことが必然的に求められてくる。社会資本にかかるコストをできるだけ小さくしたいというニーズは当然今後も重要な視点であるが、その対象はこれまでのような初期投資に限定したものではなく、維持補修、補強、さらには更新、改修までを視野に入れたライフサイクルコストを最小限にしたいという方向に変化してきている。

代表的地下構造物であるトンネルを例にとると、既存トンネルの老朽化がかなり進み、それに要するメンテナンス量の増大が予想されること等から、今後は極力メンテナンスに手のかからないトンネルの建設が望まれている。そのためには、これまでに多くの事業体で蓄積されてきたトンネルの維持管理、補修補強等に関する知識と経験を、計画、設計から建設、維持管理の各段階に生かしていくこと、ならびに各段階で必要な技術開発を推進していくことが大切である。

このような現在すでに存在する構造物を適切に保全しながら、必要に応じて過去の知見、それに基づいた新技術を駆使して、更新・再生していくことを総称してここでは保生と呼ぶこととする。

本報告は、土木学会維持管理小委員会の研究で得られた、地下構造物の維持管理の現状と課題を再整理した上、上記のようなニーズに対応して研究、開発が進められている保生の技術を紹介する。

キーワード：地下構造物、維持管理、機能向上、改築、再生、ライフサイクルコスト

* 正会員 清水建設 土木本部 技術第二部

** 正会員 鉄建建設 エンジニアリング本部 技術企画部

*** 正会員 帝都高速度交通営団 工務部

**** 正会員 竹中土木 技術本部 技術部

2. 地下構造物の現状

表－1 用途別地下構造物の経過年数

分野	調査時点	経過年数と割合
道路トンネル	1995年4月現在	・1950年以前に供用されたトンネルが約20％存在 ・1970年以前は約50％
鉄道トンネル	1994年現在	・約半数が戦前に建設されたもの
地下鉄道	1997年7月現在	・50年以上経たトンネルは約7％
水路トンネル	1997年3月現在	・建設後50年を経過したものが約55％
通信用トンネル	1996年現在	・開削とう道の約半数が建設後20年以上経過

日本トンネル技術協会「保守管理委員会」の調査¹⁾によると、用途別に見た地下構造物の建設からの経過年数は表－1の通りである。また東京都下水道局の集計によると、都内下水道管渠のうち、23区内平均で13%、2000

kmに及ぶ管渠がすでに50年を超えている。さらに都心部に限ると8割以上が50年を超過している。

老朽化が進む一方、トンネル等の多くに変状も見られる。昭和54年の国鉄による鉄道トンネルの実態調査によれば、トンネルの6割に漏水がみられ、3割に凍結がみられ、地形・地質に依存した地圧による変状は比較的新しいトンネルにも発生することが特徴的である。平成2年の建設省による道路トンネルの実態調査²⁾でも漏水のあるトンネルが全体の6割を占める。道路トンネルの変状項目では覆工のひび割れ、剥離、施工継ぎ目の開きなどが多い。地下鉄では特に覆工の剥落、漏水が重要な問題となっている。特に、漏水は電食や腐食の原因として軌道、電気設備に悪影響を与えるばかりでなく、コンクリートの中性化も進行させるなどの問題を引き起こす。また、施設内への漏水は下水道に放流するため下水道料金のコスト負担の問題も抱えている。東京都下水道局では³⁾これまで100年をかけて下水道の普及に努めてきたが、老朽化対策は手付かずで緊急を要する状態であること、基幹施設的能力が都市開発のスピードに追いつけずやはりその解消が急務であることが報告されている。古い下水道管ほど損傷が増加する傾向にあり、50年以上経過した戦前の管渠では30m（1スパン）当たり6箇所損傷が発生していることがわかっている。

3. 地下構造物維持管理の現況

3・1 設計・施工・維持管理の基準類

表－2 設計・施工・維持管理の基準類

表－2に示すように、基

準類については1964年に初めて体系だったマニュアルとして「トンネル標準示方書」が土木学会から発行された。その後、土木学会、建設省、道路公団が示方書、基準類の発行改訂を重ねてきている。維持・補修面では、1956年に国鉄で「土木構造物保守心得（案）」が制定されたが、まだこの頃は戦後の復興時期であり、関心はもっぱら新規建設に

対象	分野	基準類名	発行期間	発行年
設置基準等	一般	トンネル標準示方書	土木学会	1964
	道路	設計要領第三集トンネル本体工	日本道路公団	1969
		道路トンネル便覧	日本道路協会	1975
維持管理基準等	道路	維持管理要領（点検編）	日本道路公団	1985
		道路トンネル維持管理便覧	日本道路協会	1993
		設計要領第三集トンネル本体工保全編	日本道路公団	1998
	鉄道	土木構造物保守心得（案）	国鉄	1956
		トンネル補強・補修マニュアル	鉄道総研	1990
		変状トンネル対策工設計マニュアル	鉄道総研	1998
	下水	下水管渠維持管理（WPCFマニュアル3）	日本下水道協会	1974
		下水道維持管理指針 1979年版	日本下水道協会	1979
		下水道維持管理指針 管路施設編	建設省都市局	1991
		再構築設計マニュアル（管渠編）	東京都下水道局	1995
		下水道施設改築・修繕マニュアル（案）	日本下水道協会	1998
	一般	コンクリートのひびわれ調査・補修・補強指針	日本コンクリート工学会	1989

向いていた。近年になってようやく、各事業体で維持管理の基準類やマニュアル類をそろえ始めている。

3・2 維持管理の現状と今後について

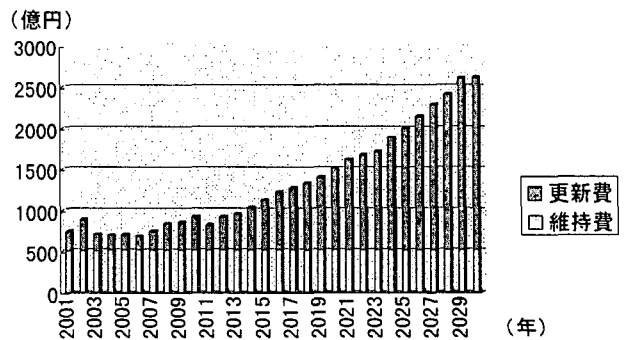
トンネル構造本体の維持管理に関わる手順は、各事業体独自のマニュアル類や基準類に従い実施している。例えば「道路トンネル維持管理便覧」によると、維持管理の手順は大きく、点検、調査、対策に分けられる。点検は、実施内容や実施時期、頻度等により日常点検、定期点検、異常時点検および臨時点検に分類される。点検により変状が発見された場合、標準調査や詳細調査が実施され、対策のための判定を行う。判定はその程度において3 AからBまで4段階のランクに分類され、最も変状の程度が重大な3 Aは、直ちに対策を施すこととし、Bランクは監視をすることとしている。

地下構造物は構築後その背面が見えないことや、一般に暗く作業環境が悪いことから、点検・調査が難しく、時により変状を見逃すことがある。また変状に対する対策時の作業環境においても、道路トンネルでは車線制限が必要であり、鉄道トンネルや地下鉄では夜間のわずかな間合い時のみの作業時間となり、さらに下水道や導水路等では狭隘で水路内での作業となる。このように、用途別にも維持管理の状況が異なり困難な作業環境を抱えている。

今後経年変化による老朽化が進み、維持・管理費は急速に増大していく。例えば東京都は社会資本の維持更新需要額の将来推計⁴⁾をしているが、東京都が管理する下水道をみると、75年で計画的に更新を実施するとした場合で、図－1に示すとおり年々更新費は増加し、2030年には維持費の実に4倍となる。なお「維持」は対象となる機器の一部の取替等を行う故障や破損への対応とし、「更新」は対象となる設備の全ての再建設あるいは取り替えを行う対応

としている。また建設省⁵⁾では、1,200mの道路トンネルによるLCCコスト試算をし、建設後約40～45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予測している。

今後は、維持管理を計画的かつ効率的に進めていくとともに、計画段階からライフサイクルコストを考慮した建設が求められる。



図－1 東京都下水道の維持・更新費の将来推計

3・3 維持管理の課題

今後の維持・管理に関する主な課題を列挙すると以下のような事項が挙げられる。

- ① 構造物の目的別に統一した維持・管理マニュアルの作成
- ② 従来維持・補修は故障や破損への対応が中心であったが、維持管理までも含めたLCCを推計したり、データベースを活用し補修箇所・時期を予測するなどし、計画的な維持管理を実施する
- ③ 非破壊検査技術を含めた検査方法の開発と、高度な専門知識や経験を必要とする診断技術を支援するシステムの開発
- ④ 将来の需要増や維持・管理を見越した計画時からの配慮
- ⑤ 活線しながらの改築技術の開発

4. 地下構造物の保生技術

4・1 メンテナンス技術

(1) 最新の検査技術

トンネル等の地下構造物で各事業体が導入している最新の検査技術⁶⁾⁷⁾としては、覆工表面の変状を対象としたものと覆工内部を対象としたものがある。前者の技術には、ひび割れ（クラック）を対象とした自動化、機械化技術が見られ、手法としてはレーザが多く採用されているほか、CCDカメラ、赤外線カメラ、スリットカメラ、ラインセンサカメラが用いられ、表層剥離には赤外線カメラによる検査が実用化されている。後者の技術としては、地中レーダによる覆工厚や背面空洞の検査技術があり、最近では車載による効率化も図られている。また、材料劣化（コンクリート強度、鉄筋腐食、中性化等）や欠陥等の変状については、非破壊的検査が採用されている。

下水道のように中小規模の管路等の検査技術としては、テレビカメラを管路内に挿入し、管内を撮影しVTR等に記録する技術が開発されている。挿入の方法としては、本管調査（200mm～700mm）の場合自走式の走行機器がワイヤによる牽引式で行われている。また大口径管では、人間が潜行できない場合フロート式のカメラ調査機を使用し調査している。

(2) 診断（解析）技術

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・解析・補修の一連作業を実施する必要がある、解析技術の効率化を図ることが重要なポイントにな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、経験を主とした診断法から、客観的、合理的な診断法へ移行しつつある。表-3にトンネル等の地下構造物において各事業体が導入している新しい診断技術を示す。

表-3 新しい診断技術⁶⁾

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サブシステムで構成		○	
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 ○:実用化されている手法 無記入:適用できない手法

また、下水道の中小規模の管路等では、調査した技術者の視覚判断による誤差をなくすため、(社)日本下水道管路維持管理業協会の異常箇所別判断基準に添った模範写真集（内容とその症状－ランクーに分類）を視覚判断の参考にしている。

(3) 補修・補強技術

ここでは、比較的古い施設（30～40年）を有する主な分野のトンネル等の補修・補強の事例⁸⁾を取り上げる。鉄道トンネルは経年劣化等が進み、補修・補強が必要になってきているが、作業条件としては公共性が高く、迂回路線が少ないことから活線補修・補強となることが多く、短時間での作業工程となる。

対策別の事例としては、

①塑性圧対策－只見線田子倉トンネル

アーチ肩部および側壁の水平クラック、盤膨れ、クラウン部の圧さ等の対策として、長尺のロックボルトを塑性領域外に定着させ、さらにプレストレスを導入した補強工を実施。

②地滑り対策－中央線新横吹第二トンネル

急峻な山腹斜面に建設され、トンネル上部の地山の動きに起因する輪切り状クラック対策として、コンクリート製補強隔壁を施工し、トンネル内空変位・地中変位などの測定・監視により対応していたが、地質上問題のない山側へ新設トンネルを設け、路線付け替えを行った。

③漏水対策－篠ノ井線冠着トンネルなど

漏水対策として1970年代始めに施工したアーチ部の漏水防止用モルタルが剥落した。この事故を契機として、金網の入ったモルタルがアーチ部のみに施工されている箇所には、全体をアンカー補強する対策を講じている。また、都心の地下トンネル（シールドトンネル）においては、地下水の復水に伴う漏水および覆工劣化を防止するため、プレキャストコンクリート板やポリマー含浸コンクリート板を用いた二次覆工を行っている。

④路盤対策－武蔵野線生田トンネルなど

トンネル内で軌道変状および側壁クラックが発生。調査の結果インバートの下にも空洞があり、原因は地質が未固結、または低固結の砂層が地下水位の変化による地下水流によって砂分が流失したものである。このため、空洞への注入・排水溝の整備等で対応した。

⑤地下鉄トンネルの沈下対策－銀座線

東京の地下鉄路線の中でも重要な交通手段として利用されており、トンネルの延命化対策として大規模補修を実施している。この路線は日本で最初の地下鉄であり、ドイツから技術導入し建設された。沈下の原因は、軟弱地盤上に建設されており、高度成長期における近隣ビル建設に伴う地下水の汲み上げ、近年の道路交通車両の重量化などの影響によるものである。対策工事は、側部を連続地中壁により施工、上部を路面覆工し、開削工法により場所打ち鉄筋コンクリート床版を施工するものである。

⑥地下鉄の漏水・電蝕対策－東西線

当該路線のシールドトンネルについては、経済性の理由から原則として二次覆工を施工していない。しかしながら、漏水のため、電蝕を誘発し、セグメントの鉄筋の発錆、コンクリートの剥離、レールの電蝕などの障害を発生しており、対策工として、営業運転を阻害することなく施工可能な二次覆工の施工技術確立し、長期間にわたる工事により対応した。

⑦その他

下水道管路の場合は基本的に開削をして新しい管渠を埋設するとしているが、近年は開削工事に対する理解を得ることが難しいため、非開削工法を用いることが多くなってきている。主な補修工法としては、止水工法（注入工法、リング工法、コーキング）、部分補修工法（開削工法、非開削工法－形成工法、反転工法）、ライニング工法があり、状況に応じて工法選定して施工している。

4・2 改築・再生の動向と技術

(1) 改築・再生の目的

これまで地下構造物を含む土木構造物は、都市の骨格をなす基盤整備として構築されてきたために、できるだけ贅肉を削いだ形で量的な整備がなされてきた。今後はさらに、構造物を効率的に維持更新するとともに、既設構造物を土台として基盤整備の進展を図る必要もある。すなわち、すでに構築されている構造物の維持管理あるいは更新するための効率的かつ合理的なシステムづくりとともに、これら構造物を活用した機能向上や新しい機能の付加を図る技術の構築が要望されている。また、地下構造物の構造管理にあたっては、イニシャルコストだけでなく、ランニングコストをも考慮した費用効率の最適化を行うために、構造物ごとのライフサイクルを明らかにし、トータルコストを踏まえて維持管理や更新、さらに機能向上を図る技術を開発することも目的の一つである。

(2) 改築・再生の動向と最新の技術

鉄道トンネルでは今後経年劣化による再生とともに電化や高速化に対応するための改築が、道路トンネルでもやはり経年劣化による再生とともに交通量の増大に伴う拡幅、増設が増す⁹⁾と考えられるが、公共性が高いこれらの施設は、活線改築、通常交通量を確保した上での改築が重要な要件となる。表－4と表－5に鉄道トンネルおよび道路トンネルの主な改築事例を挙げる。

表－４ 鉄道トンネルの主な改築事例

トンネル名	動機	改築範囲
函館本線 神居T	変状対策	
信越本線 塚山T	変状対策	
只見線 六十里越T	変状対策	
飯山線 内ヶ巻T	変状対策	
伊豆急行 稲取T	震災復旧	
神戸電鉄 東山T	震災復旧	
山陰線 白鹿T他	電化	アーチ部拡幅
箱根登山鉄道塔の峰T	複線化	全断面拡幅
江差線 別当T	電化	全断面拡幅
筑肥線 白石・姉子T	電化	アーチ部拡幅
総武本線 蛇園T	電化、劣化	全断面拡幅
羽越本線 折渡T	電化、高速化	全断面拡幅
福知山線 日出坂T	電化	全断面拡幅
田沢湖線 仙岩T	電化	アーチ部拡幅

表－５ 道路トンネルの主な改築事例

トンネル名	動機	改築範囲
国道８号線郷津T	廃線トンネル拡幅	拡幅
国道25号線・関T	変状対策	補修、補強
東名高速道路日本坂T	劣化（火災）	補修
一般国道３８７号・引治T	交通量増大・劣化	拡幅
一般国道45号線 松島T	交通量増大・劣化	拡幅
国道168号 磐船T	交通量増大	拡幅
神戸市第２布引T	交通量増大	拡幅、増設
瀬田アートT	交通量増大・美観	拡幅
横浜新道（拡幅）保土ヶ谷T	交通量増大	拡幅、増設
新門司港大里線 鹿喰T	交通量増大	拡幅、増設
スエズの塩害T	劣化	補修、補強
都市計画道路北方線 見晴T	交通量増大	拡幅、増設
一般県道宮古港線 小山田T	変状対策	補修、補強
東名改築 都夫良野T	交通量増大・劣化	補修・拡幅
天王山・梶原T	交通量増大・劣化	拡幅

水路トンネルは、多くのトンネルで洗掘による覆工の摩耗や表面コンクリートの経年劣化とそれに伴うひび割れの発生が進行しており、各種の対策工が行われている。対策工の実施にあたっては、発電所の休止期間を極力短縮するため高速施工法の開発が進められ、一部実用化されている。最近の事例¹⁰⁾としては、中部電力の戸発電所（約800m）や上麻生発電所（約5,000m）の水路トンネルのインバート改修工事が挙げられる。ここでは、自動化されたインバート切削ロボットにより切削後、直ちにコンクリートを打設して仕上げることで大幅な工期の短縮がなされている。

下水道管路の改築・再生技術としては、布設替工法（各種管材利用した開削工法、改築推進工法）や更生工法（さや管工法、反転工法、製管工法、形成工法、ライニング工法）が挙げられ、最近では下水を流しながら1～3m程度の管路を更新する管路改築システムも実用化されつつある。

5. おわりに

土木学会地下空間研究委員会維持管理小委員会での検討内容をもとに、地下構造物の経過年数と維持管理の現況および今後の課題について述べた上、地下構造物のメンテナンス技術と改築・再生の動向と技術等について整理・分析した。今後の研究活動においては、これらの現状認識から、各地下構造物の外的条件や構築時の社会条件等を中心とした構造物の履歴を明らかにし、コストの低減と保生技術の向上に向けて、さらなる検討を進めていきたいと考えている。

最後に、本論文は当小委員会メンバーである、平井光之氏（（株）間組）、竹林亜夫氏（清水建設（株））、関根一郎氏（戸田建設（株））の各氏との共同研究成果である。ここに記して謝意を表する。

（参考文献）

- 1) J T A 保守管理委員会：建設・保守管理へのフィードバック（１），トンネルと地下，1998.5
- 2) （社）日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，平成5年11月
- 3) 東京都下水道局：下水道施設の再構築－老朽化施設のリニューアル－
- 4) 東京都：東京都が管理する社会資本の維持更新需要額の将来推計，平成10年7月
- 5) 建設省：社会資本の維持更新・機能向上技術の開発 報告書，平成8年10月
- 6) 小島他：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第4巻
- 7) メンテナンスの時代：R R R，（財）鉄道総合技術研究所，1997.1
- 8) J T A 保守管理委員会：トンネルの保守・維持管理（1～8），トンネルと地下，1994.1～8
- 9) 平井光之他：地下構造物の維持管理上の要件とライフサイクル設計，地下空間シンポジウム論文・報告集，第4巻
- 10) 野池悦雄他：水路インバート切削ロボットを用いた急速補修工法の本格実証、電力土木、No.275，1998.5
- 11) （財）日本下水道管路維持管理業協会：下水道管路施設の補修・改築方法に関する調査報告書，平成9年3月
- 12) 阿部忠行・長根忠男他：土木構造物の維持更新と機能向上，平成6年東京都土木研究所年報