

地下構造物の延命化技術の現状と課題

Present condition and problem of life prolongment technology for underground structure

廣瀬末雄*・桜井達郎**・森康雄***・平井光之****

Sueo HIROSE, Tatsurou SAKURAI, Yasuo MORI, Mitsuyuki HIRAI

The problems on durability of underground structures are the change in the underground water environment that could not be assumed at the construction stage, the deterioration of the structure, the difficulties grasping the geological features conditions and of the construction environment.

This report, as one example of life prolongment technology for underground structure, clarifies the factors which influence the underground structure with the existing data and contains the study points from the long-life underground structures that are kept up to the present time and the subjects to be considered at the each stage of the planning, design, construction and maintenance through the analyses of the samples on the maintenances and restorations.

Key word: Underground structure, Maintenance, Durability, Life prolongment

1. はじめに

わが国の社会資本のストックは、戦後の国土基盤整備の進展に伴い着実に増加し、高度経済成長を支えてきた。特に、地下構造物、トンネル、下水道管路などの大部分は、戦後 50 年間に本格的に整備された。今後、ストックの増加により、維持管理費が増加するとともに、高度経済成長期に建設されてきた地下構造物の経年劣化による老朽化や周辺環境の変化、社会的ニーズ・利用形態の変化などもあり、急速にこれらの老朽化が進展することになる。一般に地下構造物は、供用下での改修や改築が困難な場合が多く、近い将来膨大な維持管理費用が発生するものと考えられる。

そこで、既設の地下構造物を計画的に維持管理・再生し、耐久性を向上させて寿命を延ばすことができれば、維持管理にかかる費用を大幅に抑制することができるものと考えられる。ここでは、既設構造物の維持管理・再生のなかで構造物の寿命を延ばすことを延命化と考えた。

本報告は、地下構造物の延命化をいかに考えるかについて、過去に建設され現在まで長く寿命を保っている地下構造物の延命化技術に学ぶ点や、維持管理・再生事例の分析を通して現段階で考慮すべき事項の抽出を行い課題としてまとめた。

キーワード：地下構造物，維持管理，耐久性，延命化

* 正会員 (株)建設企画コンサルタント トンネル設計部

** 正会員 日本工営(株) 社会環境エンジニアリング部ライフサイクルマネジメント部

*** 正会員 (株)熊谷組 土木本部土木技術部リニューアルグループ

**** 正会員 (株)間組 技術・環境本部環境部環境事業開発部

2. 歴史に学ぶ地下構造物の耐久性

わが国のトンネル建設のあけぼのとなったのは、1874年に開通した石屋川鉄道トンネルとされている。それ以降、鉄道トンネルや電力施設の水路トンネルが次々と造られてきた。そして、1927年にはわが国初めての地下鉄道が、1932年には須田町ストアの地下街が開設されるなど、各種の地下構造物が建設された。また戦後の成長期にはインフラ整備と相まって、トンネルや下水道、地下街等の地下構造物の建設は急速な伸びを示した。特に道路トンネル建設は、モータリゼーションの到来や高速道路の普及と共に、1960年代以降著しく増加した(図-2.1)。また、表-2.1には分野別にトンネルの供用延長と老朽化トンネルの割合等を示している。地下構造物の取り替えは、多大の費用と期間がかかることもあり、古くなった施設を維持・補修しながら利用し続けているのが現状である。これまで、コンクリート構造物の耐用年数が50年を経過した割合は、導水路トンネルが55%と極めて多く、次いで鉄道トンネルの50%、道路トンネルの20%などとなっている。また鉄道トンネルや電力施設の水路トンネルには、100年を越えてなお現在供用され続けているものもある。

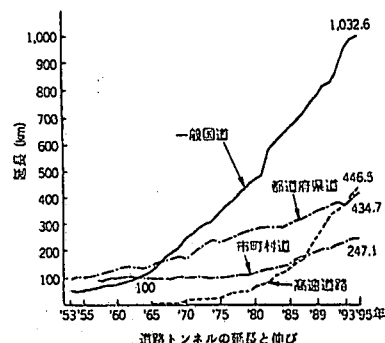


図-2.1 道路トンネルの延長と伸び

表-2.1 分野別トンネルの供用延長と老朽化トンネル

分野	供用延長	老 朽 化 ト ン ネル	調査時点
道路トンネル	約2,200Km	・1950年以前に供用されたトンネルが約20%存在 ・1970年以前に供用されたトンネルは約50%	1995年現在
鉄道トンネル (JR全体)	約2,100Km	・約50%が戦前に建設された ・100年以上経たトンネルが20本以上存在	1994年現在
地下鉄道	約 570Km	・50年以上経たトンネルは約7% ・25～50年が約40%	1997年現在
水路トンネル	約4,700Km	・建設後50年を経過したものが約55%	1997年現在
下水道トンネル (東京都区部)	約15,000Km	・建設後50年を経過したものが約13%	1997年現在
通信用トンネル	約 900Km	・開削とう道の約半数が建設後20年以上経過	1996年現在

3. 地下構造物の延命化技術の現状

地下構造物の維持管理上の問題点は、建設当時には想定不可能だった地下水環境の変化(水位変動)、構造物の劣化、地山条件の把握・評価の困難さによるものが多く、このため構造物の機能に影響を与え、交通等の安全確保に支障が生じ、機能確保のための維持・再生は厳しい条件下で難工事を強いられることが多くなっている。また、都市内においては、地下水の影響を事前に考慮した設計がなされている。

以下、既往資料の基礎的な調査を行い、地下構造物の延命化技術の現状について整理した。

3.1 供用後に対策された延命化技術

対策は、維持管理において、構造物の性能低下をもたらした劣化要因を把握し、評価したうえで適切な方法がとられている。以下、供用後に対策された延命化技術の事例を示す。

(1) 躯体の老朽化

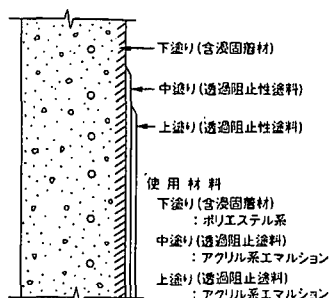


図-3.1 中性化抑制対策

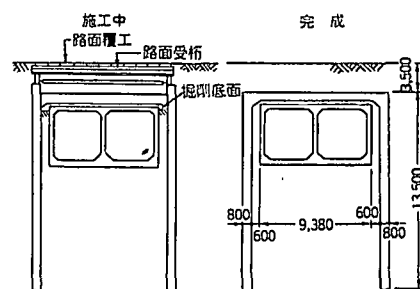


図-3.2 トンネルの沈下対策

帝都高速度交通営団銀座線は、建設後 70 年程を経過し、老朽化が著しいことに加え、地下水の変動、河川の埋め立てや路面荷重増加によるトンネル変状が生じ、更に構造物に近接したビルの新築や立体交差などの近接施工による変状がある。

特に銀座線を建設した時代は、現場練りコンクリートが主流であったため、水セメント比などコンクリートの品質管理が不十分であったことが要因と思われる。平成 6 年頃に行われた中性化抑制対策は、コンクリート表面のケレンを行い、コンクリート劣化部をはつり落とし、はく離防止用に溶接金網をボルトで固定して、図-3.1 に示すポリマーセメントモルタルを用いて修復された。その後、中性化抑制材を塗布する。赤坂見附駅～虎ノ門間は、周辺が沼地を埋め戻した軟弱地盤上に建設されていることと、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や近年の道路交通車両の重量化の影響により、トンネルの沈下が進行しているため、図-3.2 に示す連続地中壁と場所打ち RC 床板の門型構造によりトンネルを周辺応力から遮断する対策がとられている。¹⁾

(2) 変状トンネルに対する対策工の設計手法

供用後の鉄道や道路トンネルの変状は、これまでは過去の類似事例にならない、または、経験豊富な専門技術者の経験的判断に頼らざるを得ない場合が多かった。このような状況に鑑み、変状トンネル対策工の設計法を確立することを目的として、(財)鉄道総合技術研究所と日本道路公団試験研究所では、対策工の設計が容易かつ合理的にできるよう、変状事例分析と模型実験などにもとづいた「標準設計の適用」、既往の施工事例にもとづいた「類似設計の適用」、類

補強ランク	基本パターン	基本パターンを適用できない場合
補強ランクⅠ		
補強ランクⅡ		
補強ランクⅢ		

図-3.3 標準設計（塑性圧・複線断面の場合）

似事例がなく標準設計の適用が困難な場合にもとづいた「解析手法の適用」、3手法にあてはまらない「特殊な場合の設計」の手法を作成し、図-3.3 に示すような設計の体系化を図っている。²⁾

(3) 地下水の影響

首都圏では、地下水低下による広域的な地盤沈下を抑制するため、1965 年に江東地区で揚水規制を実施した。以後、対象範囲を拡大するなど規制を厳しくし、一時は東京湾平均海面から深さ 40～60m にまで低下した地下水位が、深さ 10～15m まで上昇した。その後、ここ数年の観測データを見ると地下水位の上昇は落ち着いている。図-3.4 に東京の地下水位変動の一例を示す。このことにより、予想外に回復した地下水が当初の構造物設計時に想定した地下水位を超

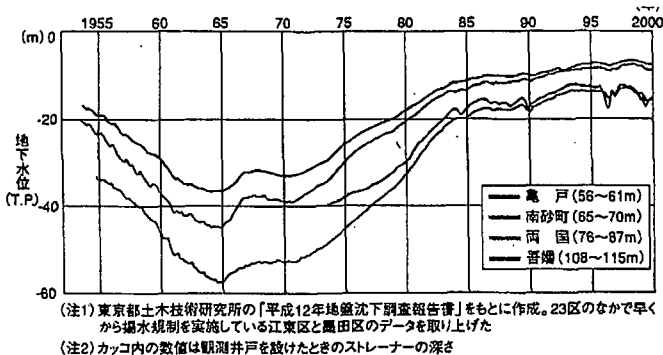


図-3.4 東京の地下水位変動の一例

図-3.4 に東京の地下水位変動の一例を示す。このことにより、予想外に回復した地下水が当初の構造物設計時に想定した地下水位を超

え、トンネル内への漏水とそれに伴う構造物の劣化はもとより、地下水圧により構造物の安全率の低下を引き起こすといった事例がある。

東京駅の総武・横須賀線地下ホームは、地下水上昇に伴う地下駅の安定を確保するために地下5階建てホームの下にグラウンドアンカー約130本を打ち込み、1本当たり最大100tfの力で水圧に抵抗させている。一方、上野地下駅では、水位の変動を見つつ対応が可能である等の理由からカウンターウェイト方式を採用し、地下4階のホームの下に合計3万tの鉄の重りを設置している。³⁾(図-3.5)

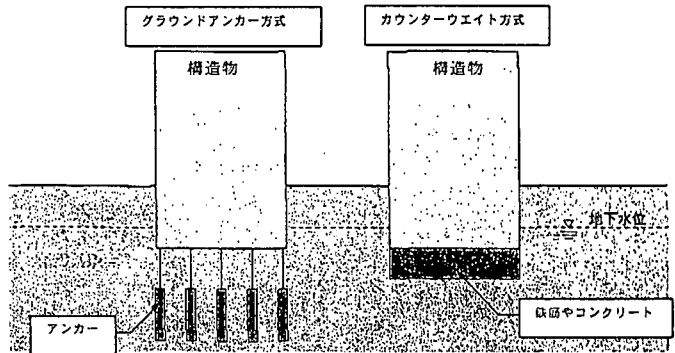


図-3.5 構造物の浮き上がり対

構造物を築いた後の浮き上がり対策は、コストや施工性を勘案して決める必要があり、カウンターウェイト方式は重りを置くスペースの確保が重要であるが、グラウンドアンカー方式は支持地盤が深くなるほどコストが増加する。

3.2 事前に考慮された延命化技術

構造物の劣化要因を明らかにし、事前に耐久性を確保するための方策をとることにより維持管理にかかる費用が低減でき、延命化を図ることができる。以下、事前に考慮された延命化技術を示す。

(1) 構造物の劣化対策

構造物の主な劣化要因の多くは漏水であり、その漏水による構造部材（躯体、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、完全にトンネル外周の地下水を遮断する防水型トンネル（ウォータータイトトンネル）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。

東京湾横断道路（アクアライン）では、エジプトの海底トンネル（アムハムド・ハムディトンネル）が供用直後から激しい漏水により、セグメント間の継ぎ手から海水が漏れ始め、この中の塩化物が主要因となってセグメントや道路床版の鉄筋が腐食する塩害に見舞われた。この経験が基となって、防水シートを入れた場合のメンテナンス費用や設備投資から具体的な経済評価を行い、30年間のライフサイクルコストの試算から、シールド工法に併用して一次掘工

設計段階で行った防水シートの経済性評価の考え方

<経済性評価の方法>

シートの経済性は

費用＝シート設置費（C）

便益＝初期節約費（B1）

将来便益費（漏水対策工事節減費：B2）

将来便益費（設備寿命延長に伴う更新費用節減費：B3）

の現在価値を比較評価する。

費用現在価値C（シート設置費）と便益現在価値B（初期節約費B1+将来便益B2+将来便益B3）を比較して

$B/C \geq 1$ であれば防水シートの経済性は正当化され

$B/C < 1$ であれば防水シートの経済性は正当化されない。

<シートの経済性（90年度価格）>

	30年	60年	100年
B/C	1.01	2.28	2.62

<前提条件>

- ①防水シートは全周巻きの導水タイプとし、シート厚0.8mm、透水・緩衝材を3.0mmとする
- ②経済性評価年数は30年を基本に、60年、100年についても行う
- ③インフレ率は3%とする
- ④資金調達コストは6%とする
- ⑤予測漏水量はトンネル全体で1日に400m³とする
- ⑥設備更新期間の延長便益は、当該期間で更新回数が同じものの最大値とする

図-3.6 経済評価の考え方

と二次覆工の間に防水シートを設置し覆工の劣化を防止している。4) (図-3.6) このほか、都市域のトンネルでは、地下水低下による環境保全に配慮して防水型トンネルを採用している。

また、東京都や横浜市の下水道においては、ライフサイクルコストの分析に基づき耐用年数を試算して、計画的に維持・再生を行っている。

(2) 100 年の耐久性の確保するために性能保証の仕組みを導入

シンガポールに建設中の大深度下水道トンネル工事では、発注に 100 年の耐久年数を保証するために、覆工の厚さと材料を決め保証書を提出している。また、100 年の耐久性を担保するために、保険会社を加えた性能保証の仕組みをつくって発注に対応している。その契約内容は、「設計や使う材料について 100 年間の耐久性能を証明するリポ

●発注時の仕様に基づき設計したトンネルの断面図

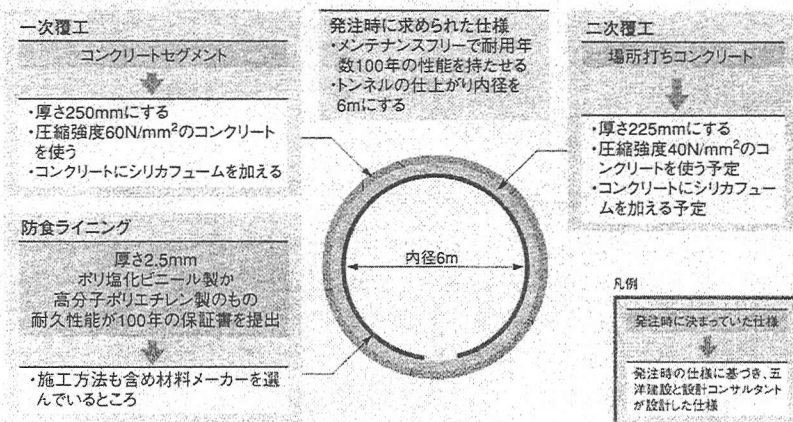


図-3.7 発注時の使用に基づき設計したトンネル

ートや保証書を提出すること」、「専門家賠償保険との契約」を求めている。5) (図-3.7)

3.3 社会（経済）環境の変化による改築と再利用

これまで述べてきた事例は、主に物理的耐久性について取り上げてきたが、以下は、新たなニーズの出現や変化、当初目的とした機能が不必要になる社会的耐久性についての事例を示す。

(1) 改築による耐久性の向上

高度経済成長期に建設されたトンネルは、現在の建築限界を満たさない狭隘な空間や歩道が設置されていないなど、性能・機能が不足の状態を生じている場合がある。このような狭隘なトンネルが交通渋滞の一因となっている。一般国道 45 号松島トンネル (図-3.8) 6) や一般国道 168 磐船トンネルは、交通量増加に伴う交通の円滑化と歩行者の安全通行を図る目的で、交通を確保しながらトンネルを拡幅する活線改築を行っている。

このようなトンネルの場合は、今日のトンネル仕様までを見据えて造られたとは考えにくく、多くの場合は需要に見合ったトンネルの再構築が必要となっている。

(2) 用途変更による再利用

東海道の難所の一つである静岡市丸子から岡部町に通じる宇津ノ谷峠に、1904 年に宇津ノ谷隧道が開通した。延長 203m、幅 3.9m、高さ 3.8m のレンガ積みトンネルは、明治時代の重要な交通路を確保し、昭和初期まで利用されていたが、レンガや目地の破損、目地のすき間からの漏水が激しく、雨が降ると路面がぬかるむ状態であった。静岡市は、旧東海道の点在する歴史的遺跡を遊歩道や広場で結びつける散策ネットワークとして同トンネルを改築し、歴史的価値を損なわずに再整備している。(図-3.10) 7)

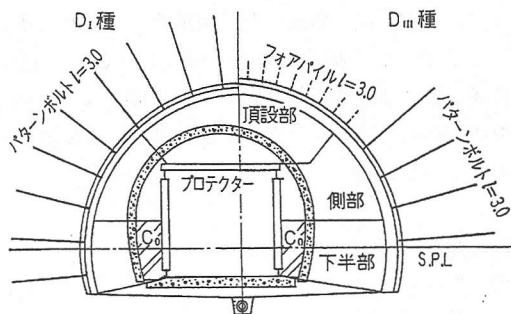


図-3.8 松島トンネルの施工例

4. 延命化技術の課題

構造物の寿命を長く保つためには、主に安全性、使用性、耐久性の性能が長期間維持されることが不可欠である。地下構造物の維持管理・再生の現状は、地上の構造物と異なり点検や補修が容易に行えないことや、作用する荷重や劣化特性が明確でない点にあった。しかし、ストックが増加するなかで、既存の地下構造物を延命化することは重要な課題であり、維持管理・再生をととしてライフサイクルコストを分析し、考慮することにより計画的に延命化を実施していくことが何よりも重要である。

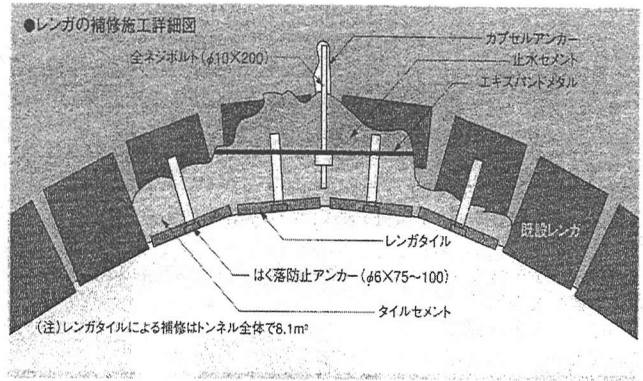


図-3.9 宇津ノ谷隧道のレンガの補修工図

今後、地下構造物を維持管理・再生し延命化を図るためには、以下のシステムを確立する必要がある。

- ① 現時点で取り扱う所要の機能（安全性、使用性、耐久性）を明確にする。
- ② 点検・診断により劣化特性を定量的に把握し、将来予測を行う。
- ③ 対策の費用対効果に基づき、最適な補修時期、期待する性能を確保できる補修材料及施工方法を選定する。
- ④ 対策の効果の検証およびモニタリングを実施する。

現時点では、地下構造物の寿命を知ることは実際に困難であるが、劣化要因や構造物に要求される性能を明確にし、新技術・新工法の開発・活用、丁寧な施工、維持・再生データのフィードバックなど、多くの努力の積み重ねによって延命化を可能にすることができると考えられる。

6. おわりに

地下構造物の再生事例をととして、過去に建設され現在まで寿命を保っている地下構造物の延命化技術に学ぶ点について取りまとめた。昨今の社会・経済情勢のなかにおいて、構造物の耐久性を向上させ、延命化を図っていくことは、新設・既設構造物にかかわらず、今後ますます重要な課題になると考えられる。

一方、コンクリート構造物の基準類については、現在、性能規定基準への移行が多くの機関で検討されており、必要とされる性能、設計耐用年数の概念などが明らかになってくるものと思われる。

最後に、本報告は土木学会地下空間研究委員会維持・再生小委員長寿命化 WG の活動の一部を取りまとめたものである。

（参考文献）

- 1) JTA 保守管理委員会：トンネルの保守・維持管理(5)，トンネルと地下，1994.5
- 2) 朝倉俊弘他：変状トンネル対策工の設計法，トンネルと地下，1998.8
- 3) 事例研究 地下水トラブル予防法，日経コンストラクション，2001.11.9
- 4) 東京湾をつないだ男たち第三話，日経コンストラクション，1997.7.25
- 5) 特集 補修の知らない新技術，日経コンストラクション，2001.10.26
- 6) 佐々木隆士他：鉄道トンネルに近接した国道トンネルに拡幅，一般国道 45 号松島トンネル，トンネルと地下，1988.10
- 7) 特集 生き延びる土木遺産，明治時期のレンガトンネルを歩道として再整備，日経コンストラクション，1999.7.23