

地下構造物の耐久性と維持管理 Durability and maintenance of underground structure

廣瀬末雄*・水野敏実**・加茂富士男***

Sueo HIROSE, Toshimi MIZUNO, Fujio KAMO

To maintain the underground structures, we face problems such as change of the ground water level, corrosion of the structures, difficulty in surveying the precise geological conditions, difficulty in carrying out accurate inspection work, deterioration in sanitary conditions, etc.

In this paper, I identified the factors that affect the life of tunnels by analyzing past maintenance and rehabilitation data, I extracted the points to be considered in the stages of planning, designing, construction and maintenance of tunnels. Based on the said outcome I made a proposal for improving tunnel methods.

Key word: Underground structure, Tunnel, Maintenance, Durability, Life of structure

1. はじめに

わが国の社会資本のストックは、国土基盤整備の進展に伴い着実に増加してきた。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ことから、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、今後急速にこれらの老朽化が進展すると考えられる。

21 世紀には本格的な「社会資本の管理」の時代を迎える。増大する維持管理や補修更新コストを抑制しつつ、国民のニーズに応え、既存ストックの健全性・信頼性を維持し、次世代に良好な資産として引き継ぐための「既存ストックの維持管理・再生」が求められている。一方、安定成長化における良好な社会資本の蓄積、これにこたえるために地下構造物の長寿命化の実現も求められるようになってきている。

本報告では、地下構造物（主にトンネル）の耐久性をいかに考えるか、まず構造物の耐用年数に影響を与える要因を明らかにし、これまでの維持管理・再生事例の分析を通して、計画・設計あるいは建設，維持管理段階で考慮すべき事項の抽出を行い、新たな提案事項としてまとめた。

2. 耐用年数

2.1 耐用年数の考え方¹⁾

一般に耐用年数とは、建設・更新された施設がその機能を発揮できなくなるまでの年数といえる。建設省
キーワード：地下構造物，トンネル，維持管理，耐久性，耐用年数

* 正会員 株式会社建設企画コンサルタントトンネル設計部

** 正会員 応用地質株式会社技術本部道路部

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社CM部

が昭和 59 年にまとめた「社会資本のメンテナンス問題」において耐用年数に影響を与える要因として以下のものを挙げている。

① 物理的耐用性

施設を使用すると使用荷重によって施設が消耗し、また自然営力が作用することによって施設が消耗する現象が進行し、施設の使用そのものができなくなる。または施設を存在させることが人命・財産への危険その他から許されなくなる場合。

② 機能的耐用性

物理的耐用年数が経過する以前に、その施設に対する需用の量が当初前提とされた限界を越える、あるいは需要の質的水準がその施設の質的水準を越えることから機能不足を生じたために更新せざるを得なくなる場合。

③ 経済的耐用性

既存の施設を維持・管理していくために必要な費用が、その施設を更新する費用および更新後の新施設を維持・管理していくために必要な費用の和を上回るため、更新する方が経済的となる場合。

④ 社会的耐用性

ほかの公共施設の建設敷地となるため撤去を要する等、施設を使用に供することは関係ない外的事情のために、撤去または再建設を要することとなる場合。

⑤ 災害上の耐用性

自然災害または社会的事故のため、施設が破損・損害を受け、更新せざるを得なくなる場合。

2.2 税法上の償却資産の耐用年数¹⁾

表 2.1 は法人税法上、損金に換算する資産償却費を算出するうえで必要となる償却資産の耐用年数が、大蔵省令で資産の種類別に個別具体的に定められている。税法上の減価償却資産から、主な構造物の耐用年数を考えると以下と

表-2.1 税法上の減価償却資産（主要な構造物等）の耐用年数

区分	構造・用途	資 産	耐用年数
建	鉄道業用・軌道業用	橋 梁 鉄筋コンクリート造	5 0
		鉄骨造	4 0
		その他	1 5
		トンネル 鉄筋コンクリート造	6 0
		れんが造	3 5
		その他	3 0
		軌道施設 道床	6 0
	その他の鉄道用・軌道用	その他	1 6
		土工設備	5 7
		水力発電用貯水池、調整池、水路	5 7
築	発電用・送配電用のもの	汽力発電用岸壁、棧橋、堤防、防波堤	4 1
		発電用設備 鉄塔、鉄柱	5 0
		鉄筋コンクリート柱	4 2
		地中電線路	2 5
	競技場用・遊園地用	スタンド 主として鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄筋コンクリート造のもの	4 5
		主として、鉄骨造のもの	3 0
		野球場、陸上競技場等の土工施設	3 0
	学校用にももの	水泳プール	3 0
物	舗装道路・舗装路面	コンクリート敷、ブロック敷、れんが敷、石敷	1 5
		アスファルト敷・木れんが敷	1 0
	鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄筋コンクリート造の各種構造物（前掲のものを除く）	水道用ダム	8 0
		岸壁、防壁、堤防、上水道	5 0
		乾ドッグ	4 5
		下水道	3 5
		高架道路	3 0
	コンクリート・造コンクリートブロック造の各種構造物（前掲のものを除く）	岸壁、防壁、堤防、上水道	3 0
		下水道	1 5
		やぐら、用水池	4 0
	土造の各種構造物（前掲のものを除く）	防壁、堤防、防波堤、自動車道	4 0
		上水道、用水池	3 0
		下水道	1 5
建		事務所用建物	6 5
		店舗用、学校用建物等	6 0
		病院用建物等	4 7
		発電所用、変電所用、停車場用建物等	4 5
	鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄筋コンクリート造のもの	事務所用建物	5 0
		店舗用、学校用建物等	4 5
		病院用建物等	4 2
		発電所用、変電所用、停車場用建物等	4 0
	物	事務所用建物	2 4
		店舗用、学校用建物等	2 2
		病院用建物等	1 6
		発電所用、変電所用、停車場用建物等	1 6

(注)「減価償却資産の耐用年数等に関する大蔵省令」（大蔵省、1993 年）による。

なる。

土木構造物では、鉄道橋の鉄筋コンクリート造りのものが 50 年、鉄道トンネルの鉄筋コンクリート造りのものが 60 年、れんが造りのものが 35 年となっている。道路では、鉄骨鉄筋コンクリート・鉄筋コンクリート造りの高架道路が 30 年されている。建物については、鉄骨鉄筋コンクリート・鉄筋コンクリート造りの学校用建物が 60 年、同病院建物が 47 年、また木造モルタル造りの事務所用建物が 24 年とされている。

3. 地下構造物の維持管理上の問題点²⁾

地下構造物の維持管理上の問題点は、地下水、構造物の劣化、正確な地山条件の把握の困難さによるものが多く、構造物の変状等の機能上の問題により、交通等の安全確保に支障が生じ、機能確保のための維持修繕は厳しい条件下で難工事を強いられることが多く、迅速かつ適切な対応が迫られている。

主な維持管理におけるトンネルの問題点を以下に整理する。

(1) 地下水に関する問題点（地山条件、立地条件の変化）

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、昭和 46 年の地下水汲み上げ規制が施行され、その後、首都圏の地下水は回復傾向にある。上野駅周辺では、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起きている。

また、帝都高速度交通営団では地下水位の上昇によりトンネル内への漏水が増大し、下水道使用料の負担が増加し、レールの電食、道床破壊、電気設備の腐蝕劣化により保守費が増大しているとの報告がある。³⁾

(2) 構造物の劣化

構造物の劣化により維持管理のコストが増大する、あるいは歴史のある構造物の周辺環境が変化して、近接施工によるトンネルの変状が発生する等の問題が生じている。帝都高速度交通営団銀座線は、建設後 70 年を経過し、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増加している。

(3) 地山条件等の評価

山岳トンネルにおいて、いわゆる NATM で施工されたトンネルにおいて地山によってはトンネルに変状が生じ、インバート設置等の抜本的改築を余儀なくされる事例がある。一般にインバートの活線改築は、初期投資と比べて費用が高く、維持管理費の増大とともに、構造物のライフサイクルコストを引き上げる原因となるため、設計・施工時のインバートの設置判断が重要となっている。

(4) 点検・清掃作業の問題点

道路トンネルの維持管理の重要な項目として点検・保守・清掃がある。点検・保守の対象は、土木構造物よりもライフサイクルが短いトンネル付帯設備が中心となる。これらの点検・保守・清掃作業は、作業環境の悪い中、長時間に及ぶ高所作業を強いられることが多い。また、作業量の多い壁面内装の清掃や照明器具の清掃あるいは灯具の交換は、道路の通行規制を伴う。このような点検・清掃などマンパワーを必要とする作業費用は、維持管理費の省力化が望まれている。

(5) 検査・診断の問題点

トンネルの検査診断は、狭隘な暗い空間の中で、供用中の限られた検査時間内に連続した壁面をきわめて過酷な条件下において人力で行うのが現状である。そのため、覆工表面を連続撮影しひび割れなどを抽出する技術や非破壊の自動検査技術の確立が求められている。一方、変状原因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り、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求められている。

4. 構造物の耐用年数

4.1 構造物の耐用年数⁴⁾

地下構造物の耐久性を考える一つの方法として耐用年数から判断する方法がある。その耐用年数を決めている重要なものに、構造物の劣化がある。地下構造物は、時間の経過とともに劣化する。劣化とは、構造物の全体ならびに各部材が、建設時点より、または再生時点より、種々の要因により、当初の性能・機能の状態から低減して損耗を生じていくこと、また社会の変化により求められるより高い性能・機能の状態から低減して陳腐かまたは不足の状態を生じていくこと、ならびに利用形態が変化に対応できなくなる状態が生じていくこという。

地下構造物の耐用年数は、2.1 の構造物の耐用年数に影響を与える要因から一般に以下の3種類が挙げられる。

- ① 物理的耐用年数
施設を構成する材料が、時の経過による老朽化、漏水や塩害の作用を受けた腐食によって必要な材料強度を保てなくなるまでの年数。
- ② 機能的耐用年数
社会の変化により要求される空間が不足の状態を生じるまでや、性能・機能が不足の状態を生じるまでの年数。
- ③ 社会的耐用年数
新しいニーズの出現や変化等により、当初目的とした機能が不必要となるか、または別の機能を要請されるようになるまでの年数。

実際の構造物は、これらの複数の要因がからんでその寿命が決まると考えられる。
例えば道路トンネル場合は、漏水や塩害による覆工の劣化は「物理的耐用年数」を減少させ、換気・電気・照明・防災等の設備の使用期間の超過は「機能的耐用年数」を低下させる。しかし、これらは、覆工の維持・再生により「物理的耐用年数」を伸長し、耐用年数を超過した諸設備は取り替えることにより「機能的耐用年数」を伸長することが可能である。

4.2 耐久性と維持管理

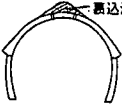
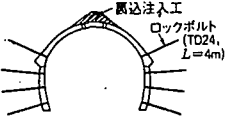
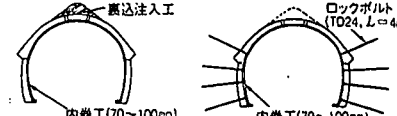
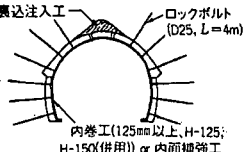
維持管理・再生事例から、トンネルの耐久性の向上や耐用年数に与える影響について、以下に整理する。

表・4.1 標準設計の例

(1) 補修・補強による耐久性の向上⁵⁾

供用後に何らかの外的要因によりトンネルに変状が生じる場合の対策工は、変状原因などを特定することは技術的に難しく、これまでは過去の類似例にならい、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い。

鉄道総合技術研究所では、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

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		 裏込注入工適用不可の場合 裏込注入・ロックボルト補強工適用不可の場合
補強ランクⅡ		 ：ロックボルト補強工適用不可の場合 裏込注入工適用不可の場合
補強ランクⅢ	 内巻工(125mm以上、H-125; H-150(併用)) or 内面補強工	

析と覆工模型実験などにに基づき、補強ランクに応じて、表・4.1 に示す標準設計を作成している。

(2) 改築による耐久性の向上⁶⁾

比較的古い時代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場合などがある。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。

このように古い時代に造られたトンネルは

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。

(3) 当初目的の変化による再利用⁷⁾

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は、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。宇津ノ谷隧道は開通から約 1 世紀が経過し、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、宇津ノ谷隧道周辺の旧東海道を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、明治期の宇津ノ谷隧道は歴史的価値を損なわずに耐久性が向上し、遊歩道として再整備した。

1997 年 2 月、現役のトンネルとしては全国で初めて登録文化財となっている。

(4) 地山条件の変化

NATM で施工された比較的新しいトンネルにおいて、供用後にインバートを設置していない区間からコンクリート舗装版の隆起や路面クラック、側壁表面のクラックなどの変状事例が長崎自動車道俵坂トンネル⁸⁾ や上信越自動車道浅間山トンネル⁹⁾ で起きた。トンネルの安定を図る目的で、インバートを設置して覆工と一体化を図る対策工を実施している。特に膨張性地山や岩の強度が低下し易い地山などで、施工時の変位が小さく、トンネルの長期安定性には問題がないとしてインバートを省略した区間において変状が起きている。

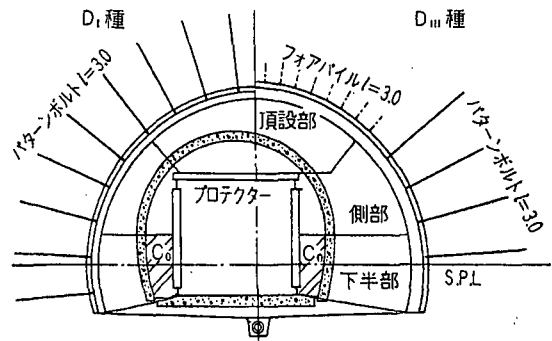
また、浅間山トンネルと同路線の日暮山トンネルは、Ⅰ期線施工において膨張性地山による変状で困難な施工を行ったことから、Ⅱ期線は膨張性地山を避けるようにルートを変更し、当初の計画線形より平面線形に約 100m、縦断線形で約 25m 移動している。

(5) 自然災害の回避

山岳トンネルは、路線選定上の制約などにより坑口付近や前後の道路部分が地形・地質などの不安定な場合がある。国道 229 号豊浜トンネル¹⁰⁾ や一般国道 39 号の銀河トンネル¹¹⁾ は、こうした坑口付近や道路部分を自然災害から安全で確実な交通を確保する目的で、トンネルのルートを見直し、危険区域を回避した新ルートに変更している。

(6) 構造物の劣化に対する耐久性の向上¹²⁾

エジプトの海底トンネル（アムハムド・ハムディトンネル）は、供用直後から激しい漏水に見舞われた。セグメント間の継ぎ手から海水が漏れ始め、この中の塩化分が主要因となって、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。類似する海底トンネルの東京湾横断道路（アクアライン）は、このアムハムド・ハムディトンネルの劣化の事例を参考に、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覆工と二次覆工の間に防水シートを設置して覆工の劣化を防止している。



図・4.1 松島トンネルの施工例

(7) 点検・清掃作業の省力化

清掃作業の省力化は、交通流に全く支障を与えることなく、安全に、しかも任意の時間帯に清掃などの維持管理の作業を行うことが可能となり、付帯設備の耐久性が向上する。

東京湾アクアライン¹³⁾は、サービス向上を目指す観点から、交通の障害となる通行規制を抑制し、維持管理作業の効率化と作業環境の改善を目的として、壁面内装と照明灯具の自動清掃車両を設置した。自動清掃車両は、あらかじめ設置されたレールにより壁面に沿って移動し、壁面と灯具を清掃する。清掃労力は自動化により大幅に省力化され、交通規制を不要となった。また、維持管理の削減とともに作業員の安全面でも有利である。

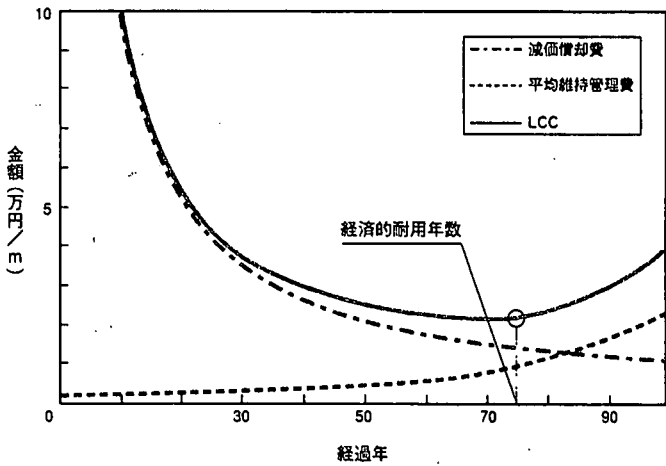
(8) 検査・診断技術¹⁴⁾

地下構造物の耐久性を向上させるためには検査・診断技術の開発は不可欠である。一般に、トンネルの検査は人力によることが多く、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の開発が進められている。特に、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。

(9) 計画的な下水道施設の再構築¹⁵⁾

東京都の下水道施設において、50年以上経過した管渠が13%、2,000kmに達し、古い下水管ほど損傷が増加している。特に、都心部では8割以上が50年を経過し、東京都下水道局では下水道施設の老朽化による都民生活への影響に配慮して計画的な老朽化対策を進めている。

管渠は、東京都区分の管渠全体のライフサイクルコスト分析に基づき経済的耐用年数を試算し、図・4.2の試算例から75年という結果を得ている。この結果を基に、管渠の計画的な再構築を行っている



図・4.2 管渠のライフサイクル試算例

(10) 計画的な補修・補強¹⁶⁾

JR 信越本線塚山トンネルは、使用開始からわずか4か月後の昭和43年に、待避所のひび割れに始まり、その後噴泥、断面縮小、圧ざ、剥離・剥落、漏水トンネルに見られる全ての変状が発生した。第1次の変状が発生し、第1次変状の対策後20年に第2次変状が発生した。この変状は、第1次変状対策のインパートを施工したことが起因し、覆工に作用する応力が変化したことによるものと考えられている。

表・4.2 第1次変状の発生経緯とその対策

JR は、深夜数時間の保守時間で狹隘なトンネルを30年に亘って計画的に補修・補強を実施した。

年月	変状および調査など	年月	主 な 対 策
S41.11	竣工		
42.9	使用開始		
43.1	覆工および待避所にひび割れが発生 (52k150m) 部分的に噴泥発生	45.7	中央排水溝新設 L=1,232m
44.1	ひび割れの創定開始 0.5cm/月 (52k150m~52k300m)	45.12	噴泥による道床交換 上り線 51k920m~53k000m L=1,080m 下り線 52k000m~52k850m L=850m
45.1	側壁間隔測定開始 最大1cm/月 (52k150m付近)		
46.4	待避所変状、噴泥が再度発生 (52k150m、52k300m、52k600m、52k750m) 覆工コンクリート落下 (52k130m)	47.10	トンネル変状対策 (本社・技研・信工・新鉄) 漏水処理 53k250m~53k450m 待避所修繕 10か所 クラウン部モルタル注入 (52k150m、52k160m、52k343m、52k370m) インパート施工 L=50m
46.11	調査用インパート設置 (52k141m、52k149m) 倒圧計測のためロードセルを併設 (52k143m)	48.12	52k145m~52k165m、52k313m~52k348m
46.12	地山調査用側壁孔開削 6か所	49.7	待避所改良 14か所 (大2、中3、小9) インパート施工 (間抜き) L=164m 52k111m~52k145m、52k165m~52k190m 52k247m~52k318m、52k348m~52k373m
50.4	側壁間隔測定点整備	49.11	モルタル吹付け工 50k130m付近圧入箇所
56.5	側壁間隔測定点整備	55.1	ストラット施工 L=53m 52k724m~52k776m
		56.1	ストラット施工 L=60m 52k777m~52k837m
		56.11	ストラット施工 L=65m 52k659m~52k724m
		57.11	ストラット施工 L=50m 52k555m~52k605m
		61.11	ストラット施工 L=45m 52k510m~52k555m

表・4.2、3 は変状の発生経緯と対策
工である。

ここでは、対策工を施工するときに
第2次変状の発生経緯とその対策
は対策工による地山応力の変化を考慮
することも必要であるとの報告がある。

表 4-3 第2次変状の発生経緯とその対策

年 月	変 状 お よ び 調 査 な ど	年 月	主 な 対 策
H 3. 1	52k130m 付近で浮きモルタル発見	H 3. 1	52k130m 付近モルタル一部除去
		3. 3	同か所浮きモルタル除去後落下防止網取り付け
3.12	同か所浮きモルタル繰り返し発見	3.12	同か所浮きモルタル除去後落下防止網一部補強
		6. 7	ロックボルト工、SFRC吹付け 52k124m～52k144m
		6.10	ロックボルト工(側壁部) 52k316m～52k327m
		7. 8	ロックボルト工、SFRC吹付け 52k731m～52k744m
			ロックボルト工(アーチ部) 52k316m～52k327m
			SFRC吹付け 52k316m～52k327m

これまでの維持管理・再生事例を整理すると、(1)、(4)、(6)、(7)、(8)、(10)は、「物理的耐用年数」、「機能的耐用年数」の伸長につながる。(2)、(5)、(9)は、その構造物の使命は終結するが、路線またはネットワークとしてとらえた場合は「機能的耐用年数」、「社会的耐用年数」の伸長につながる。(3)は、当初の目的は不必要になるが、別の寿命として新たな社会的ニーズを確保でき「社会的耐用年数」に伸長つながる。

5. まとめと今後の提案事項

トンネルの耐久性について、耐久性を判断する耐用年数に与える要因から整理し、維持管理・再生事例から耐久性を向上させる要因を検討した。

これらの結果を踏まえ、今後、トンネルの長寿命化を達成させるために必要な提案事項を以下に列挙する。

- ① 十分に計画された維持管理・点検と予防措置を講じることにより地下構造物の寿命を伸ばし、同時に大がかりな補修時期を遅らせたり避けたりすることができる。
- ② 設計条件としての地下水の考え方、地山の評価、適切な地山の判定によるトンネルは設計・施工は重要である。
- ③ 検査・診断の効率化と作業の安全を目的とした、自動検査システムの開発、定量的・合理的に判断する支援システムの開発。
- ④ 建設、維持管理、補修等の履歴の整理、または、データベースの構築
- ⑤ 維持管理作業の効率化と作業環境の改善を目的とした、点検・清掃作業のロボット化およびこのような機械が配置できる空間の確保。
- ⑥ 長寿命化を確保することは、ライフサイクルコストに配慮することも重要である。

6. おわりに

地下構造物の維持管理・再生事例から耐久性、または、長寿命化についての経緯とその対策について検討し、今後の提案事項としてまとめた。今後、地下構造物の耐久性について、増大する維持管理・再生技術や、計画・設計、建設段階から考慮すべき事項について、更なる検討を加えて行きたいと考えている。

本論文は、土木学会地下空間研究委員会維持・管理小委員会の活動の中で取りまとめた一部である。同小委員会の委員各位の尽力に対し、ここに記して謝意を表する。

7. 参考文献

- 1) 城処求行：社会資本の維持管理の現状と今後の方向，土と基礎，1995.2
- 2) 水野敏実他：ライフサイクルを考慮したトンネルの設計，地下空間シンポジウム論文・報告書・第4回，1999.1
- 3) 中村繁之他：地下鉄道維持管理・補修上の問題点，基礎工，1989.4
- 4) 齋藤嘉之：インフラストラクチャーとしての道路の維持管理，月刊建設，1999.3

- 5) 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
- 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
- 8) ズームアップ，俵坂トンネル地山膨張対策工事，日経コンストラクション，1997.9.26
- 9) 特集，予期せぬ地質，膨張性地山が路面を持ち上げる，日経コンストラクション，1999.7.9
- 10) ズームアップ，豊浜トンネル工事，日経コンストラクション，1999.5.28
- 11) 阿部康明：供用中の道路トンネルとの地下大断面交差，トンネルと地下，1996.9
- 12) 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
- 13) 東京湾横断道路株式会社：東京湾アクアライン，1997.6
- 14) 小島芳之他：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・報告書・第 4 回，1999.1
- 15) 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
- 16) 片寄紀雄他：緩やかな膨張現象と付き合って 30 年，JR 信越本線塚山トンネル，トンネルと地下，1997.3