

地下構造物の劣化現象と対策について

The degradation of underground structure and its countermeasure

岡嶋正樹*・池尻 健**・岡野法之***・塚本幸雄****

Masaki OKAJIMA, Takeshi IKEJIRI, Noriyuki OKANO, Yukio TSUKAMOTO

Nowadays, the degradation of structures becomes a social problem. As a consequence, it is hoped that their service life is prolonged by adequate maintenance, repair and reconstruction. And the result of researches about the cause of degradation of structures is coming useful for not only maintenance but also new construction. This paper details the public transactions about the deformed tunnel, and derives the technical matters from the researches concerning the degradation of structures.

[key word]: underground structure, degradation, deformed tunnel

1.はじめに

土木構造物は社会資本として、大きな役割を担うことから、その劣化による支障が社会に与える影響も大きく、その劣化対策の重要性が改めて注視されている。

一般的に、地下構造物は天候の変化や寒暖の差が少ない地中の、恒常的な環境に構築されることから、その耐用年数は他の構造物と比べて長いと考えられてきた。実際に、種々の地下構造物は、百年以前より道路、鉄道、各種水路等の貴重な社会資本として、産業・経済の発展とともに建設され、現在でも使用されているものもある。

しかし、近年、構造物の劣化現象が社会的問題になることもあり、維持、補修、改築による長寿命化対応が社会的要請として求められている。それに応えて、構造物の劣化現象や劣化要因に関する研究がなされ、その成果が新設工事にフィードバックされつつあり、長寿命構造物の構築が実施されつつある。

本報告は、上記の背景を踏まえ、種々の使用目的で構築された地下構造物における変状を劣化の現象としてとらえ、文献等で公表されたトンネルの変状について整理するとともに、それらの変状現象およびその要因の研究により、新設工事にフィードバックされてきた技術的事項について整理したものである。

2.近年の地下構造物の劣化状況

2.1 トンネル建設の推移

まず、基礎的な資料として、現在までのトンネル建設状況について大まかに整理した。整理に当たっては「トンネル年報：(社)日本トンネル技術協会」に示される、各用途ごとのトンネル工事延長の推移を調べた。トンネル工事延長は、トンネル供用延長を示すものではないが、トンネルの建設が各年代においてどの程度活発に行われてきたかを知る材料になると考えられる。図-1に、各用途ごとのトンネル工事延長の推移を示す(その年の工事中の延長で、一つのト

* パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部

** (株)セントラル技研 特殊実験室

*** (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

**** 東京都 下水道局 建設部 設計調整課 管路技術管理係

ンネルで複数年登録されているものもある)。

図-1より、トンネル建設状況について、以下の傾向が読みとれる。

- ①全体の伸びは微少な増加傾向を示している
- ②道路は増加傾向を示している
- ③鉄道は近年において微増傾向を示している
- ④水路(上下水他)は減少傾向を示している
- ⑤その他は、ほぼ横這い傾向を示している

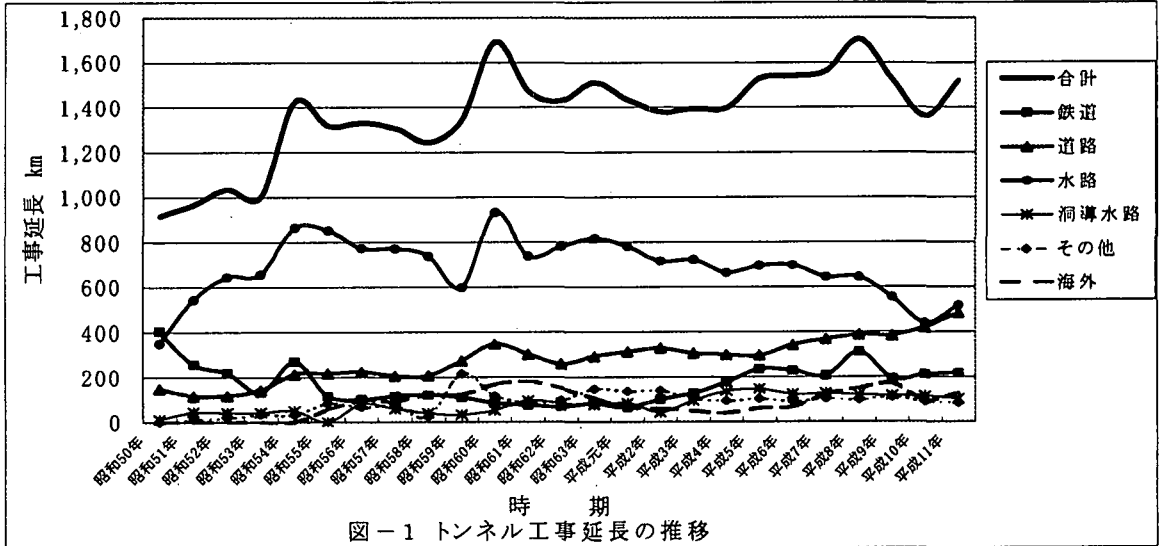


図-1 トンネル工事延長の推移

2.2 道路トンネルの劣化状況

2.2.1 現 状

道路トンネルの数は1995年現在、約7500カ所であり、その供用総延長は図-2のように約2200kmに及んでいる。その特徴を以下にまとめる。

- ・1970年以降に供用されたトンネルが約半数を占める。
- ・約20%は1950年以前に供用の古いトンネルである。
- ・全体のトンネル延長の伸びとしては「一般国道」および「高速道路」が著しく、それぞれのデータの変曲点としては、「一般国道」は1970年、「高速道路」は1980年付近である。

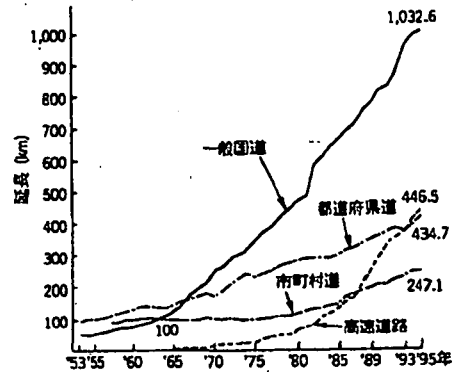


図-2 道路の延長と伸びトンネル

参考資料 5) より

2.2.2 変状の現状

現状の道路トンネルの変状について、既往の文献等をもとに以下にまとめる。

1) 変状の項目

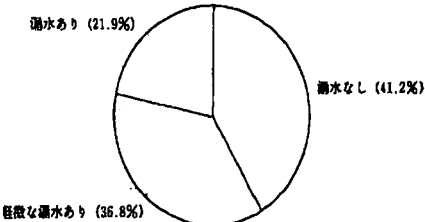
- ①最も発生の多い変状は図-3のように「漏水」であり、調査トンネルの中で漏水が発生している割合は、軽微な漏水を含めると約60%である。漏水を除く変状が発生している割合は図-4のように軽微な変状を含めると約20%であり、漏水が他の変状項目に比較して発生件数が多いことが分かる。
- ②漏水の次に多い変状項目は図-5のように「覆工のひび割れ」で、次いで「覆工の剥離」「打継目の開き」「石灰の析出」が多い。なお「路面の変状」「覆工コンクリートの変形・沈下・移動」「路肩側溝の変状」等の構造的変状は、上記の項目と比較すると少ない。

2) 供用年代

- ① 図一6の各供用年代別の変状の発生割合(変状トンネル数/供用トンネル数)によると、1930～1980年の年代が高く、1940年代を最大とし、次いで1960年代が大きな割合を示している。
- ② 一概に古い時期に供用されたトンネルに変状が発生する割合が多いといった傾向は見られない。

3) 変状の原因

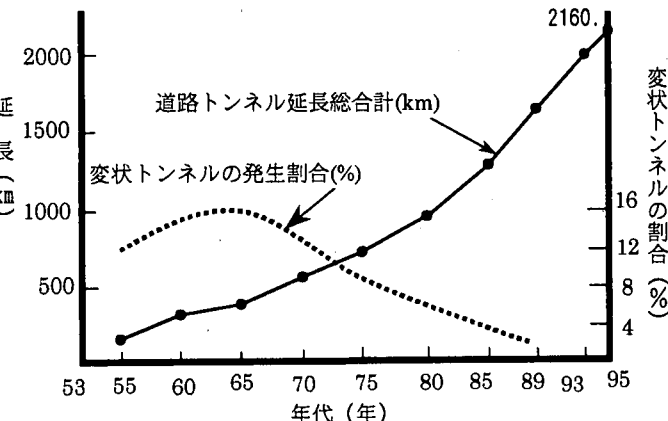
道路管理者が変状の原因として判断した項目としては、図一7のように「漏水または凍害」が最も多く、ついで「老朽」、「偏土圧」、「覆工背面の空洞」の順に多くなっている。



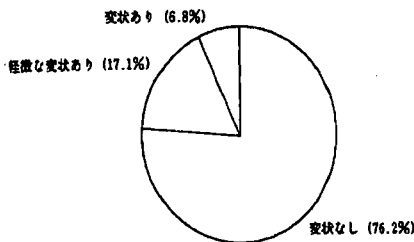
図一3 漏水発生割合²⁾

2.2.3 トンネル建設延長と変状発生年次

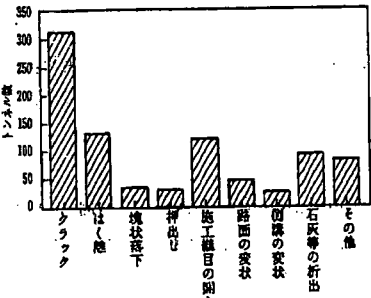
図一8に上記の図一2と図一6をもとに、道路トンネルの建設総延長とトンネル供用年次ごとの変状発生割合について整理した結果を示す。これによれば、近年のトンネル供用延長は増加しているにもかかわらず、その変状の発生割合は減少傾向にあり、その要因分析に関しては後述する。



図一8 トンネル建設延長と変状発生年次
参考資料5)をもとに作成



図一4 漏水を除く変状発生割合²⁾



図一5 変状項目別度数分布²⁾

2.3 鉄道トンネルの劣化状況

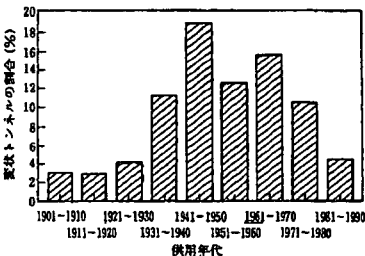
2.3.1 山岳トンネル

JRの鉄道トンネルの延長は図一9に示すように、1994年時点でJR全体で、約2,100kmの延長に及び、箇所数は約3,600となっている。このうち、新幹線のトンネルは延長で約570km、全体の約3割弱を占めている。

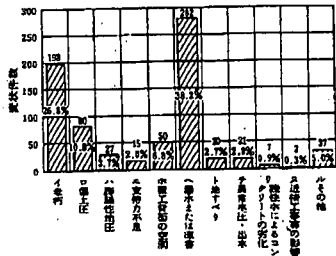
また、図一10に示すように、経年別に見ると、約1/4が戦前に建設されており、100年以上を経たトンネルが5km以上ある。

覆工の材質的には、昭和初期までレンガ、石造りが主流だが、その後コンクリートが急速に普及し現在に至っている。

変状トンネルの経年分布を図一11⁶⁾に示す。これによれば、経



図一6 供用年代別変状発生割合²⁾



図一7 道路管理者が推定する変状原因²⁾

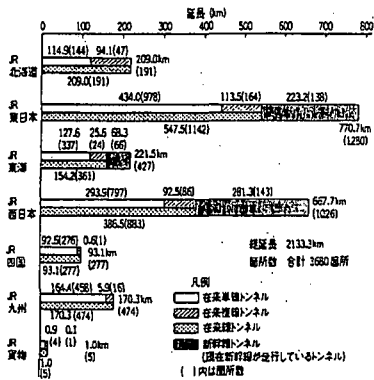


図-9 鉄道トンネルの延長と箇所数 (JR 各社別) ⁵⁾

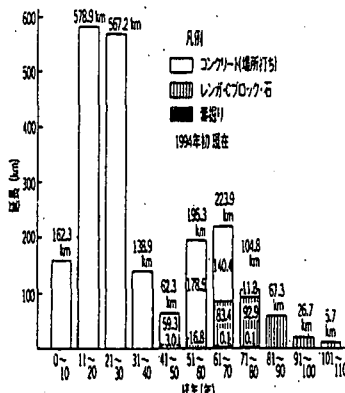


図-10 鉄道トンネルの経年別、材質別延長 ⁵⁾

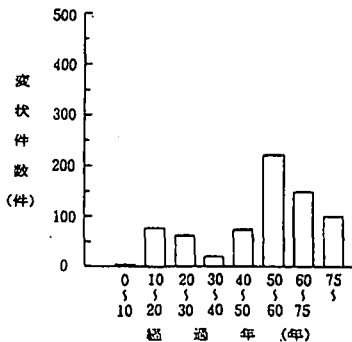


図-11 変状トンネルの経年分布 ⁵⁾

年 50~60年に変状件数のピークがあるが、経年 10~20年にも件数80件程度の小さなピークがある。

図-12 に上記の図-10 と図-11 をもとに、JR の鉄道トンネルの建設総延長とトンネル供用年次ごとの変状発生割合について整理した結果を示す。

これによれば、近年のトンネル供用延長は増加しているが、その変状の発生割合は減少傾向にある。また、経年 50~60年の戦前のトンネルに220件と、変状件数のピークがあるが、経年 10~20年の1975年頃にも件数80件程度の小さなピークがある。このような変状発生件数の推移に関しては後述する。

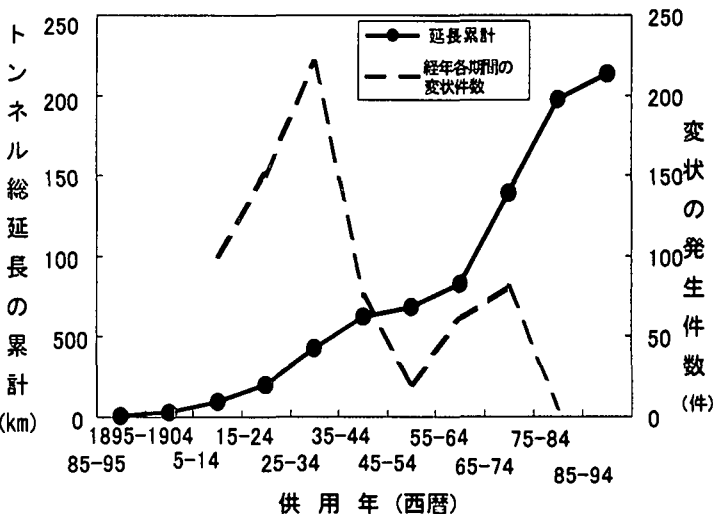


図-12 鉄道トンネルの延長と変状発生推移

2.3.2 シールドトンネル

1) 地下鉄の開業延長の推移

近年における地下鉄の開業延長の推移は図-13に示すとおりである。

これによると、その開業延長は緩やかに増加しているが、近年においてその増加傾向は小さくなっているようである。

東京の場合地下鉄の営業キロ数に対するトンネルの比率は約 85%であり、さらにその内のシールドトンネルの比率は約 23%、開削トンネルの比率は、約 77%となっている。この比率を図-13 の数量に当てはめると、平成9年におけるシールド延長は、首都圏で 52.8 km、中京圏で 15 km、京阪神圏で 28.4 km、三大都市圏計で 96.2 km、全国計で 111.4 kmと推計される。³⁾

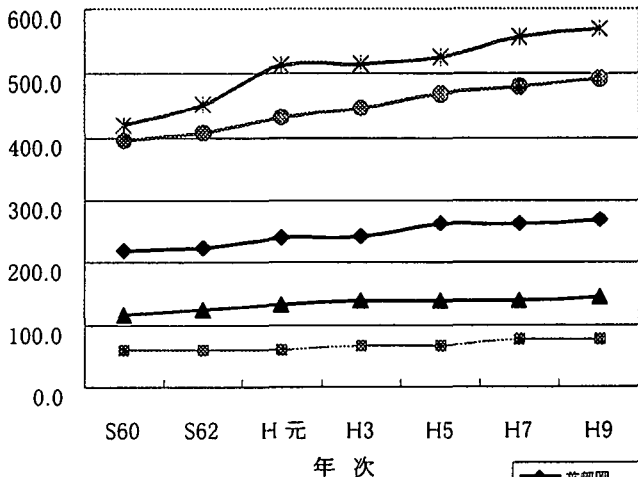


図-13 地下鉄開業延長の推移

参考資料 3) をもとに作成

2) シールドトンネルの劣化

シールドトンネルの劣化は、構造部材の一部が腐食したり、コンクリートにひびわれが発生する等で現象する。

① 継手金具およびボルトの腐食

二次覆工のない構造の場合、セグメント間の継手金具やボルトがトンネル坑内に露出し、腐食する可能性があり、最近では、二次覆工を行ったり、防食を考慮した継手金具が用いられている。

② 鉄筋の腐食

二次覆工のない構造の場合、セグメント内面が直接トンネル坑内の空気に曝される結果、セグメントの鉄筋が腐食し、ひび割れが発生したり、かぶりコンクリートが剥離した事例がある。さらに劣化が進行し、鉄筋が消失した事例もある。

③ 鉄鋼製セグメントの劣化

鉄鋼製セグメントの防食対策は、鋼製セグメントでは防錆塗装、ダクトイルセグメントではタールエポキシ塗装を行っているが、酸性の地下水などでダクトイルセグメントが腐食した事例がある。

④ 止水材の劣化

止水材が耐用期間を超過することにより、劣化するケースで、漏水が増加して、トンネル構造物の劣化を促進することがある。

2.3.3 開削トンネル

地下鉄トンネル等の開削トンネルの劣化現象について、文献調査をもとにまとめると以下のようにまとめられる。

1) 劣化の原因

開削トンネルは鉄筋コンクリート構造物であり、劣化の原因として「塩害」「アルカリ骨材反応」と「中性化」が考えられるが、営団では前二者の問題は生じていない。残る「中性化」は鉄筋コンクリート構造物では進行速度の遅速はあるものの確実に進行する現象であり、現在銀座線の一部区間で存在し、他の路線では問題になっていない。コンクリートの中性化は上床よりも側壁の方が進んでいて、中性化深さは平均 40mm 程度で、一部に鉄筋まで達しているが鉄筋の発錆は少ない。

2) 劣化を促進するトンネル構造物の変状

①漏水、②ひび割れ、③コンクリートの剥離、剥落、④露出鉄筋の腐食等があり、これらを放置するとコンクリートは劣化するために変状対策を適宜行っている。特に漏水を放置するとコンクリート内部が常に水と空気に曝されることになり、コンクリートの中性化を促進させ、鉄筋の腐食膨張によるコンクリート構造物の劣化を進行させる事になり、積極的に漏水防止対策を行っている。

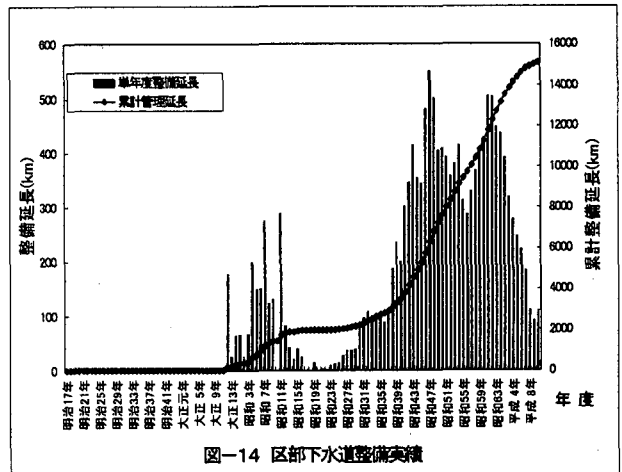
2.4 下水道トンネルの劣化状況

(東京都の下水道管渠の劣化とその対策)

2.4.1 下水道管渠建設の現状

東京都の区部下水道は、図-14 に示すように明治17年より建設が行われ、現状では、総延長約 15,000km が整備されるに至っている。

これらの管渠の断面には、円形、矩形、馬蹄形、卵形等の様々な形があり、その規模も円形管では内径 250mm から内径 8m 程度までと小口径から大口径まで幅が広い。また、開削工法、推進工法、シールド工法、NATM など都市の地下トンネルのあらゆる工法で施工されている。材質も多種多様で、ヒューム管、鉄筋コンクリート管、無筋コンクリート管、シールドセグメント、現場打ち鉄筋コンクリートボックスカルバート、陶管、硬質塩化ビニル管、強化プラスチック複合管、ダクトイル鋳鉄管、鋼



管等がある。

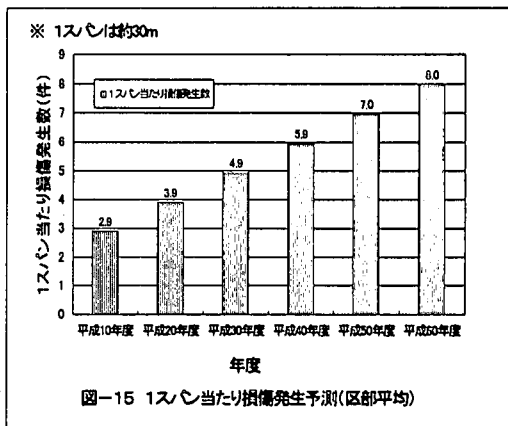
このうち、小口径管渠(内径 700mm 以下)が、管渠総延長の約 8 割を占める。また、鉄筋コンクリート(ヒューム管を含む)が、6割程度を占める。

2.4.2.下水道管渠の劣化の現状

老朽化の進行による下水道の破損が原因で 1999 年度には 1060 件の道路陥没が起きている。道路陥没は交通渋滞の原因になり都市活動に影響を与える。また、老朽化により下水の流れが悪くなると悪臭を生じ、市民生活の快適性を損なう。さらに、老朽化による管のつまりや流下能力不足から計画下水量が流せなくなる結果、浸水被害を引き起こす危険性もある。

下水道管渠の老朽化は、破損、クラック、目地ずれ、腐食等の現象をいい、その原因は劣化現象ごとに異なっている。一般的に老朽化の原因は、中性化、硫化水素等による化学変化など材料の劣化によるもの、施工ミス、近接施工等の施工に起因するもの、車両荷重や不等沈下等の外部荷重によるもの、流水中の砂やキャビテーションによる摩耗によるものなど、様々であるが、一般的には経年の中でこれらの原因が複合的に重なり合ったものと考えられる。

図-15は、過去の管渠調査のデータに基づき今後何も対策を施さない条件で算定した、1スパン当たりの管渠の損傷発生数予測である。この図が示すように、現状のまま放置すれば、老朽化により都民に悪影響をもたらす施設は確実に増加する。また、昭和30年後半より急ピッチで整備した管渠が一斉に耐用年数を迎える時期が始まる。これらの問題に対処するため、東京都下水道局では、各種調査データや独自のライフサイクルコスト分析から求めた経済的耐用年数72年をベースに計画的な再構築事業を鋭意推進しているところである。



3 地下構造物の劣化現象

以上の各地下構造物の現状より、その劣化現象を整理すると、トンネル工法にかかわらず、地下構造物の劣化現象は、以下のような「トンネルの変状」現象となって現れているようである。

- | | |
|-----------------------------|--------------|
| ①覆工のひび割れ、うき、はく離、はく落、 | ②覆工の変形、沈下、移動 |
| ③打継目の目地切れ、幅の拡大、段差、 | ④覆工の材質劣化 |
| ⑤供用部の基盤(路面路肩等)におけるひび割れ、盤ぶくれ | |
| ⑥漏水(壁水、つらら)、石灰の析出、滞水、沈砂、 | ⑦その他 |

地下構造物の変状の原因を「外力による変状」「材質劣化による変状」「漏水」および「その他」に分類してそれぞれの特徴を表-1 にまとめる。ただし、上記の変状が複合して発生している場合が大部分であること、変状の大部分が目視で確認できる覆工表面部の変状現象によるものであり「変状現象」と「変状原因」が必ずしも一対一で対応するものでないことから、現状では明確に変状原因を特定することが困難な場合が多い。

4.材料の変遷、設計・施工技術の変遷

4.1 材料の変遷

山陽新幹線トンネルのコンクリートはく落事故をきっかけとして、コンクリート構造物の劣化対策の重要性が改めてクローズアップされている。コンクリートはトンネルを含む土木構造物の主要材料である。シールドトンネルにおいては、鋼材も主要材料のひとつとして使用されているが、古くから、その防錆等に注意が向けられ、対応についてはある程度明確化されていると考えられる。したがって、現在ではコンクリートの劣化はトンネルの劣化の主要因とも考えられる。しかし、このコンクリートの劣化については、すでに研究が進んでおり、施工上の対策もとられている。

表－1 変状の現状

変 状 現 象		変 状 の 原 因
外力による 変状	緩み土圧	地山が自然に緩み、自重を支えられなくなり、覆工に荷重として作用する鉛直圧を主体とするものである。このため、アーチの先端にトンネル縦断方向の開口性ひび割れを生じるものが多い。
	突発性の崩壊	トンネルの上部に比較的大きい空隙があり、空隙の上部の岩塊が何らかの理由で地山と分離し落下し、場合によっては衝撃的に覆工に衝突する。覆工の強度が十分でなければ覆工を破壊し、岩塊もろともトンネル内へ落下する崩壊をいう。
	偏土圧	斜面下や、傾斜した片理や直行方向に緩みが生じて偏土圧が作用し、トンネルが変状するものである。山側アーチ肩部に水平開口ひび割れ、段差が生じることが多い。
	地すべり	地すべり粘土に地下水が作用して強度を低下させ、すべり面に沿って地すべり土塊を移動させ、トンネルが変状するものをいう。地すべりによる変状は、トンネルとすべり面の位置関係により変状の発生形態が異なる。
	膨張性土圧	膨張性土圧による変状では、左右の側壁あるいはアーチの両肩に、複雑な水平ひび割れが生じやすく、アーチと側壁間に打継目がある場合には段差が生じることがある。
	支持力不足	支持力の不足がトンネルの変状と結びつきやすいのは、縦断的、あるいは横断的な不同沈下である目前者の場合、輪切り方向のひび割れが生じやすい。また、後者の場合はトンネル軸の回転を伴い、斜め方向のひび割れを生じる。
	水圧・凍上圧	水圧・凍上圧は、漏水と深く係わっており、トンネルに作用する場合は通常、側圧が卓越し、側壁あるいはアーチ肩部の水平ひび割れが生じることが多い。
材質劣化に よる変状	経年劣化	ここでの経年劣化はコンクリートの中性化を主たる内容とする。
	凍害	寒冷地のトンネルでは、凍害は劣化要因の中で最も問題となることが多い。
	塩害	塩害による変状には、コンクリート中の鋼材腐食、海水とコンクリートの反応によるコンクリートの多孔質化などがある。
	有害水	背面地山中の地下水には、火山地帯に見られる強酸性水などのように、石工にとって有害成分を含むものがある。
	使用材料および施工 方法	使用材料および施工条件に起因する変状は、発生時期は早期なものが多い。使用材料の不適切な選定による強度不足やセメントの水和熱による温度変化とそれに伴う体積変化および、硬化収縮に伴うひび割れ等が考えられる。
	鋼材腐食	鉄筋コンクリート構造物では、鋼材の腐食・体積膨張により、鉄筋に沿ったひび割れの助長および鋼材断面の減少・耐力低下を生じる可能性がある。
	アルカリ骨核反応	これまでのところアルカリ骨材反応による変状事例は少ない。
	火災	力学的性質の低下、コンクリート表面および内部での爆裂現象、剝離およびひび割れ・その他煙害が挙げられるが、これによる直接的変状の例は少ない。
漏 水		漏水は、外力による変状の原因にもなるが、それ以外にも漏水が構造物の劣化促進となる場合がある
4 その他	背面の空隙	覆工背面の空隙は、地山を緩め、土圧を増加させる原因となるばかりではなく、受動土圧の発生を阻害して、覆工の構造的な強度低下の原因となる。
	巻厚	設計巻厚が小さいことにより想定される土圧が作用しても変状が発生する場合がある。
	インバートなし	施工時には大きな土圧の作用がなくインバートを設置しなくとも地山の安定が得られたトンネルにおいて、施工後になんかの要因により土圧が増大し、インバートを設置していないことにより変状が発生することがある。

4.2 設計・施工技術の変遷

トンネル技術は、古くは「トンネル十訓」等により伝承されてきたが、特に、戦後は社会基盤整備の進展とともに工事量も増加してきた。土木学会では、これを受け、昭和36年にトンネル工学委員会が設置され、昭和39年には当時のトンネル技術が集成された、トンネル標準示方書が制定された。

トンネル標準示方書は、その後も山岳トンネルにおける鋼製支保工の使用の一般化や NATM の導入をはじめ、シーロッド工法の普及、地中連続壁の普及等、トンネル技術の進歩にあわせて、その都度大きく改定され、常にその時代のトンネル技術のバイブル的な役割を果たしてきた。したがって、トンネル標準示方書における記述は、その時代の技術の指標であり、その時代の技術の反映でもある。そこで、過去のトンネル標準示方書に記される「トンネル耐久性に関する記述」の変遷を表－2 のように整理してみた。

表－2 に示されるように、時代が古いほど「トンネル耐久性に関する記述」は少ない。これは、昭和39年当時から、トンネルの建設は増え始めたものの、その後しばらくは、長期間供用されてきたトンネルの数は限られていたことから、トンネル劣化の問題も顕在化しにくかったためと考えられる。

前述の道路トンネル、鉄道トンネルにおいて昭和40年代、50年代に建設されたトンネルの変状割合が大きい原因は、現在検討中ですが、これまでの検討の中から明かになりつつあるのは、施工機械の大型化等のハード面の効率向上に対して、材料の品質やマニュアル類のソフト面のきめの細かさが不足していたように推測される。

5. 地下構造物の劣化現象への対応

道路トンネルにおける小山野トンネル覆工の剥落事故や豊浜トンネル坑口崩壊、山陽新幹線福岡トンネル、北九州トンネルや礼文浜トンネルの覆工剥落等を契機に国内各地のトンネル点検が実施され、その原因究明と共にトンネル保守に関する一連の研究成果が、表－3 のようにとりまとめられ、今後の設計・施工・維持管理等にフィードバックされている。

表-2 トンネル基準等（耐久性についての明示的な記述）

基準等	記事 内容			
	支保工 鋼材	吹付け コンクリート	覆工 コンクリート	覆工打設
昭和三十九年 トンネル標準示方書	腐食摩耗の著しいものは使用しない。	—————	漏水などによる浸食や強度の減少などのない耐久なものとする。	湧水のある場合にはコンクリートの品質を低下しないよう適切な処理をしなければならない。
昭和三十九年 トンネル標準示方書	腐食摩耗の著しいものは使用しない。	急結剤は支保工材を腐食しないものを使用すること。	・配合設計にあつたつては、湧水中の塩分や硫酸成分等の混入等も考慮する。	
昭和三十九年 トンネル標準示方書 (山岳編)	—————	—————	・漏水などによる浸食や強度の減少などのない耐久なものとする。	
昭和三十九年 トンネル標準示方書 (山岳編)	—————	配合は、必要な強度、耐久性が得られ、水密性、付着性、施工性の良いコンクリートが得られるように定めなければならない。	—————	
昭和三十九年 トンネル標準示方書 (シールド編)	—————	—————	二次覆工の目的の1つとしてセグメントの防食を挙げている。	—————
昭和三十九年 トンネル標準示方書 (開削編)	—————	—————	ひび割れによる鉄筋の錆を防ぐために、許容応力度を低く設定することとしている。	—————
平成二年 トンネル標準示方書 (山岳編)	—————	配合は、必要な強度、耐久性が得られ、水密性、付着性、施工性の良いコンクリートが得られるように定めなければならない。	・配合は、必要な強度、十分な耐久性が得られ、施工性が得られるように定めなければならない。 ・ひび割れ対策を講じなければならない。	・湧水のある場合にはコンクリートの品質を低下しないよう適切な処理をしなければならない。 ・ひび割れの発生を防止するよう努めること。
平成二年 トンネル標準示方書 (シールド編)	—————	—————	・二次覆工の目的の1つとしてセグメントの防食を挙げている。 ・著しい腐食環境下でのトンネルの耐久性を考慮し、鉄筋の許容応力度を低く設定することもあるとしている。	—————
平成二年 トンネル標準示方書 (開削編)	—————	—————	ひび割れによる鉄筋の錆を防ぐために、許容応力度を低く設定することとしている。	—————

表-3 トンネル保守に関する一連の研究成果（設計・施工・維持管理 マニュアル等）

	名 称	発行年月日	発 行 者
道路関係	道路トンネル維持管理便覧	平成 5 年	(社)日本道路協会
	設計要領第三集 トンネル本体工 保全編(変状対策)	平成 10 年 10 月	日本道路公団
鉄 道 関 係	トンネル補強・補修マニュアル	平成 2 年 10 月	(財)鉄道総合技術研究所
	既設トンネル近接施工対策マニュアル	平成 7 年 1 月	
	変状トンネル対策工設計マニュアル	平成 10 年 2 月	
	トンネル保守マニュアル(案)	平成 12 年 5 月	
下 水 関 係	再構築設計マニュアル(管渠編)	平成 6 年 10 月	東京都下水道局

6.おわりに

以上、現状における地下構造物の劣化状況とその対応について、整理することを目的として、既往の資料等より整理を行った。しかし、地下構造物の劣化に対する調査・研究と対応は、現在も進行中であり、本報告での資料は、今後とも随時更新される必要があろうと考える。

なお、本報をまとめるにあたって、資料の提供や貴重なご助言等を賜りました、土木学会 地下空間研究委員会 維持・再生小委員会の竹林委員長をはじめ、劣化WGの各位に感謝の意を表すると共に、作業を手伝ってくれたパンフィックコンサルタンツ㈱の木谷氏にお礼を申し上げたい。

7.参考資料

- 1) トンネル補強・補修マニュアル 平成 2 年 10 月 (財)鉄道総合技術研究所
- 2) 道路トンネル維持管理便覧 平成 5 年 11 月 (社)日本道路協会
- 3) 都市交通年報 (財)運輸経済研究センター
- 4) トンネルと地下、連載口座「トンネルの保守・維持管理」平成6年1月～9月
- 5) トンネルと地下、連載口座「建設・保守管理へのフィードバック」平成 10 年 5 月～8 月