

シールドトンネルにおける要求性能の一考察 Inquiry on performance requirement for Shield Tunnel

水口尚司[□] 粥川幸司^{□□} 高橋晃^{□□□} 田島聖一^{□□□□}

Takashi MIZUGUCHI Koji KAYUKAWA, Akira TAKAHASHI, Seiichi TAJIMA

In urban area, Shield Tunnel are important structure. But there is fear that shield tunnel which has been continued to use for long period of time are deteriorated on the main part of structure. And now it is important to ensure functions what it has.

This paper describes the following results; which are organized by the equipment and performance requirement of shield tunnel, and which are researched some examples of maintenance management for current shield tunnel. And furthermore, this paper describes what has been examined the direction for the future about design, construction and maintenance management of shield tunnel.

Key word : *Shield Tunnel, Performance requirement, Maintenance, Consolidation settlement, Tunnel lining, Water leak*

1. はじめに

我々がこれまでに培ってきた社会資本は、各種の性能を確保(利便性, 安全性, 快適性等)し, 過酷な自然環境, 使用条件を克服しながら, 長期間にわたり供用してきた。しかし, 我々の経済活動および生活基盤を支えてきた社会資本の多くは, 長期供用などにより, その耐用年数を迎えようとしている。昨今の緊縮財政からなる公共投資の縮減化により, 施設の新設および更新が抑制され, 既存の社会資本の延命化・長寿命化が非常に重要な課題となっている。このような状況において, 社会資本の維持管理方針, 延命化・長寿命化に関する研究・技術開発が緊急的な課題の中, 各方面でその取り組みがなされている。

シールドトンネルは, 我が国にその技術が導入されてから 80 年以上が経過しており, 数々の技術的改良を加えながら, 今や都市部におけるトンネル構築には欠かすことのできない工法となっている。一方, 供用後長期間使用し続けたシールドトンネルは, トンネル本体の劣化の進行が懸念され, その機能の確保についても注意, 懸念すべきケースの増加が予想される。

このような背景のもと, 本報では, シールドトンネルを対象として, その必要な機能および要求性能を整理し, 現状で行われているシールドトンネルの維持管理事例を調査した。さらに, これらの知見(調査から得られた課題など)を踏まえて, 今後のシールドトンネルの設計, 施工, 維持管理のあり方に関して考察したものである。

キーワード: シールドトンネル, 要求性能, 維持管理, 圧密沈下, トンネル覆工, 漏水

□ (株) ニュージェック 道路グループ 道路チーム

□□ 正会員 (財) 地域地盤環境研究所 東京事務所

□□□ 正会員 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター 都市土木技術グループ

□□□□ 正会員 (株) ロード・エンジニアリング 技術部

2. シールドトンネルの要求性能

2.1 地下構造物の要求性能

(a) 必要な機能と要求性能

我々が利用している地下構造物は、それ自身が果たすべき機能を備えている。ここでいう機能とは、対象である地下構造物の果たす役割、はたらきを指す。たとえば鉄道、道路トンネルでは、「列車や自動車が通過するための空間を確保すること」や「その空間を恒久的に維持すること」、あるいは下水道トンネルでは「雨水、汚水を自然に流下させること」、地下河川トンネルでは、「降雨時にある程度の量の雨水を一時的に溜めること」などが、構造物の持つ機能にあたる。

一方、地下構造物が恒久的にそれぞれの機能を果たすためには、構造物にそれなりの性能（能力）が備わっていなければならない。ここでは、構造物自身が機能を果たすために必要となる性能を要求性能と呼ぶ。

(b) 維持管理の概念と必要と思われる維持管理技術

コンクリート標準示方書、維持管理編によれば「維持管理とは、構造物の供用期間において構造物の性能を許容範囲内に保持するための行為」と謳われている。また、「許容範囲内に保持するとは、要求されるある水準以上に保持すること」とも述べられている¹⁾。

現状での維持管理技術として、コンクリートの非破壊検査法を代表とする維持管理への利用を目的とした個別の技術開発が盛んに行われている。その予測の手法としては、長期にわたる部材の劣化状況を調べる実験やそのシミュレーション技術の開発も進められている。さらには、これらをコストに換算する LCC 予測技術、最適な維持管理を目的としたアセットマネジメント技術も研究開発されつつある²⁾。

2.2 シールドトンネルの構造とその特徴

(a) シールドトンネルの構造

シールドトンネルは、図-1 に示すように覆工体にセグメント（プレキャスト部材）を用いて、土水の流入を防ぐものである。セグメント同士の締結には一般的には、ボルト継手が使われている。（近年ではボルトを用いない継手を有するセグメントも実用化されている）

(b) シールドトンネルの特徴

シールドトンネルの構造上の特徴を以下に示す。

- ① 構造物の負担している外荷重の状態（土圧）が不明確である（設計ではあくまでも仮定）
- ② 内空側からしか構造物を確認できず、外側の劣化状況が確認できない。
- ③ トンネル全体の剛性は継手が存在するのでセグメント本体の剛性よりも弱い
- ④ トンネル単体（自重のみが作用している状態）よりも、周辺の土圧、水圧で支えられた方が構造的に安定する
- ⑤ トンネル全体の動きは、地盤の挙動に支配される（いわゆる柔な構造である）
- ⑥ 地下水位以下に建設される場合が多いので、一般には防水トンネルとなる

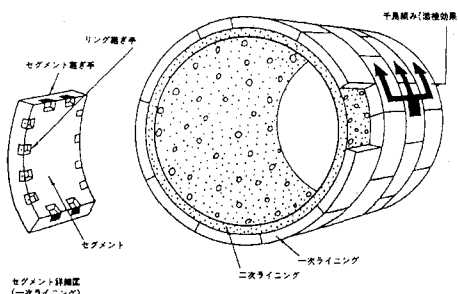


図-1 シールドトンネル覆工構造³⁾

2.3 シールドトンネルの要求性能

(a) KJ 法⁴⁾を用いたシールドトンネルの要求性能の整理

シールドトンネルに関する要求性能を整理するにおいて、ここでは KJ 法を用いた。KJ 法とは、対象となる問題の本質を追究し整理する方法で、考えられ得る具体的な項目（目標、課題、方法など）を体系的に組み立てるものであり、ブレーンストーミングなどで出された意見から、テーマの解決に役立つヒントやひらめきを生み出していこうとするものである。

(b) シールドトンネルの必要な機能、要求性能、指標

表-1、2 にシールドトンネルの必要な機能、要求性能、指標を整理した。表-1 では、「必要な機能を実現する

ために求められる性能はなにか」を、表-2 では「要求性能を評価するにおいて具体的な指標はなにか」といった基準で、関係が深いものから順に◎、○で示した。また、たとえば「道路トンネルでは退避場を設ける必要があるが、必ずしも鉄道や電力、水道トンネルでは必要としない」といったように、シールドトンネルの用途に応じて関連がある、ないの場合分けが発生するが、ここでは、すべての項目を含むこととした。

表-1 より、必要な機能と要求性能では、当然のことながら構造、安全、利便、環境影響、維持管理、経済性において、それぞれの項目で相関があり、また、指標においても調査、測定、シミュレーションなどの何らかの方法で、概ね定量的に評価できる項目になっていることがわかる。一方、特徴としては、必要な機能として考えられるメンテナンス性、水密性、気密性などの維持管理項目が、要求性能である構造性能も性能として要求されることである。また経済性も同様である。このことは、シールドトンネルが置かれる状況が地中で地下水位以下であり、水に対する対応が重要であることを示している。すなわち、シールドトンネルにおいては、構造性能の維持確保はもとより、水に関する課題についても確実な対応が必要であると考えられる。

表-1 シールドトンネルの必要な機能と要求性能

要求性能		構造性能					安全性能					利便性能			環境影響性能		維持管理性能		経済性		
		ながい発生位置	安定位置	荷重に耐える	周辺安定	耐久性	漏れ水	落し工	保護非	耐火性能	消火活動	良好な歩行	良好な照明	良好な換気	騒音振動	地下水	容易な点検	補修工事	安価な設備	維持管理費	安全性能
必要な機能	必要空間の保持	◎	◎	◎	◎	○		○													
	構造・耐久性		◎	◎	◎																
	設備の保持・安全性	○	○	○			○														
	第一者安全保持						◎	◎	◎	◎											
	耐火性						○		◎				○	○							
	地上とのアクセス性											○	○	○	○						
	伏通性											○	○	○	○						
	環境・環境保持													○	○						
	メンテナンス性		○	○	○	○	◎							○	○		◎	◎		◎	◎
	水密・保持性	○	○	○	○	◎											○	○			
	気密性	○	○		○	○															
	経済・経済性	○	○	○	○	○	○	○		○							○	○	◎	◎	○

表-2 シールドトンネルの要求性能と指標

要求性能		構造性能					安全性能					利便性能			環境影響性能		維持管理性能		経済性		
		ながい発生位置	安定位置	荷重に耐える	周辺安定	耐久性能	漏れ水	落し工	保護非	耐火性能	消火活動	良好な歩行	良好な照明	良好な換気	騒音振動	地下水	容易な点検	補修工事	安価な設備	維持管理費	安全性能
必要な指標	内空の形状・寸法	○	○	○	○	○					○	○	○	○			○	○	◎	○	
	内空変位	○	○	○	○	○					○										
	覆工耐力	○	○	○	○	○													◎	◎	
	覆工強度	○	○	○	○	○														○	○
	鉄筋・鋼材の腐食	○	○	○	○	○	○								○				◎	◎	
	ひび割れ	○	○	○	○	○	○								○				◎	◎	
	展開図	○	○	○	○	○									○				◎	◎	
	目録	○	○	○	○	○									○				◎	◎	
	地形・地質	○	○	○	○	○													○	○	
	地盤変位	○	○	○	○	○						○							○	○	
安全・防災指標	縦形・横形									○	○	○	○	○					○	○	○
	避難路の規模										○		○				○		○	○	○
	防災設備																○		○	○	○
	規模																○		○	○	○
指標便	覆工・内装の耐火性									○	○								○	○	○
	照度										○	○	○						○	○	○
環境影響指標	騒音・振動													○							
	漏水量	○	○	○	○	○	○								○				◎	◎	
	漏水の水質						○													○	○
	地下水	○	○	○	○	○	○								○					○	○
経済指標	建設費																			◎	◎
	維持管理費																		◎	◎	

3. シールドトンネル維持管理の現状

ここでは、シールドトンネル維持管理の現状について、2 件の事例を最近の文献から紹介する。

3-1 東日本旅客鉄道株式会社総武快速線東京～錦糸町間の事例⁵⁾

(a) 背景

東京都心部の地下水位は、工業用水および建築物用地下水の採取に対する規制が強化される昭和 46 年頃までは大きく低下していたが、規制強化以降、昭和 58 年頃まで急激に上昇し、その後もやや頭打ちとなっているとはいえ、漸次上昇している状況にある。

事例として取り上げる総武快速線東京～錦糸町間の延長約 3.0km の単線並列シールドトンネルは、昭和 41 年に建設に着手し、昭和 47 年に開業された（図-2）。当該トンネルを計画・設計した時期は、規制が強化される以前であったことから、施工時には地下水がなく、覆工は地下水を想定せずに 2 次覆工省略のトンネルとされた。

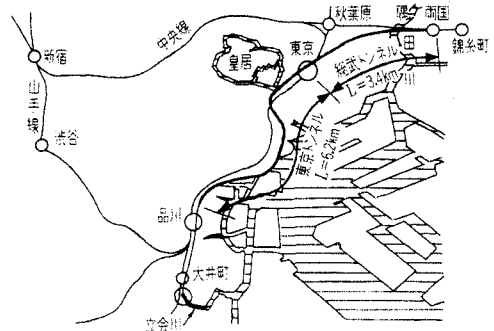


図-2 総武快速線トンネル

(b) 現状

トンネルは、供用後に強化された揚水に対する規制による地下水位の上昇にともない、セグメント継手部（パッキンはブチルゴムを使用）から塩素イオン（海水の 1/10 程度）を含んだ多量の漏水が生じ、レールおよび付属品の電蝕やまくら木の腐食などで線路の維持管理に手間を要する状況となった。

(c) 漏水の原因

シールドトンネルの防止対策としては、大きく次の 3 つに分けることができる。

- ①セグメントの背面側、すなわち地山側に位置する裏込め注入材による防水
- ②セグメントの継手面に施す防水
- ③トンネル内側に施す二次覆工、または一次覆工と二次覆工との間の防水

当該トンネルでは、施工時の環境条件から、③の対策を施していない。①については、特に軟弱地盤や砂質地盤における肌落ちなどからシールドトンネル周辺に均等に裏込め材を充填させ防水層として機能させるには、施工技術上の課題がある。②については、5. 漏水に関する取り組みで紹介するが、建設当時は、止水性能が認められ大部分のシールド工事で採用されている水膨張ゴム系シール材は開発されていなかった。

以上を考慮すると、地下水の採取に対する規制が強化される以前に地下水より上位に位置していることを条件に建設されたトンネルは、供用後の地下水位の上昇に伴い、トンネル位置が地下水以下となった場合、漏水という事象は避けられなかったものと考えられる。

(d) 対策

シールドトンネルにおいてトンネル内への漏水は、継手部からのものがほとんどであり、一度漏水すると完全に止水することは困難となる。また、トンネル内に漏洩した地下水は、下水道に放流するため、下水道処理費が必要となる。

このような状況のなかで、漏洩地下水を環境用水として活用することを考え、河床が 3 面張りで自然湧水がほとんどなく、下水流入のため水質悪化が著しい品川区内の立会川に総武トンネルの湧水を放流することとした。放流するための送水設備延長は約 12km にも及んだが、放流開始以降は、悪臭苦情の減少、従来、魚影が見られなかった湧水放水付近にボラが遡上したりし、河川環境の改善が図られた。

(e) 考察

シールドトンネル内への漏水は、長期間使用された場合ほどその可能性が高くなっており、地下水の上昇などによる条件が重なるとさらに被害が拡大していく。今回の事例は、『漏水がない』という要求性能に対して、設計時からの環境条件の変化によりトンネル内への漏水が発生し、それに対して漏洩地下水を環境用水として有効活用したものである。地下水が漸次上昇している地域では、周辺地盤、内空への影響もなく、排水処理

が可能であれば、無理にトンネル内への漏水を止める必要がないものと判断され、機能としては、環境および経済性が向上した事例である。

3・2 東京電力㈱の事例⁶⁾

(a) 背景

軟弱粘性土地盤（N値 0～1）中に構築された、経年約 20 年のシールドトンネル（図-3）が、設計では想定していなかった上下方向につぶれる形で長期的な変形が生じているものである。当該トンネルの設計は、土木学会トンネル標準示方書（シールド編）に基づき側方土圧係数、地盤反力係数を選択して行っている。なお、当時は、トンネルの位置する地質が粘性土の場合、二次覆工を施さないという考え方であった。

(b) 現状

シールドトンネル点検時に、中央の立金物において、セグメントと立金物との接続ボルトが破断しているのが発見された（図-4）。この段階で内空変位を計測した結果は、上下方向に約 12mm つぶれていることが判明した。この値は、設計時に想定していた 2mm よりもかなり大きいものとなっていた。

(c) トンネル上下方向のつぶれの原因

シールドトンネルが上下方向に長期間にわたって変形する要因として想定できる候補を次に示す。

- ① 地上に盛土や構造物などが新設されて、鉛直方向の応力が増大する。
- ② 側方に新規掘削工事などが行われ、側方の水平方向の応力が減少する。
- ③ 自然または周辺での揚水による地下水低下により、シールドトンネル周辺の軟弱粘性地盤が圧密して覆工に作用する鉛直方向荷重が増大する。
- ④ 覆工内への漏水により、シールドトンネル周辺の軟弱粘性地盤が圧密して覆工に作用する鉛直方向荷重が増大する。

以上の要因において、①、②については過去の工事履歴、③、④については、現場での調査や遠心模型実験により、長期的な上下方向のつぶれの要因は、④の影響によるものと結論付けしている。

(d) 対策

当該シールドトンネルは、コーキングによる止水対策を過去に 2 回行っている。しかし、漏水を完全に止めることができず、覆工の変形は長期的に進行していた。

このため、変形抑制対策としてセグメント構造をトンネル内において補強する方法を施した。具体的には、写真-1 に示すようにトンネル上下方向に補強用の柱を設置している。なお、補強時期や補強材の形状にあたっては、覆工の耐力を最大限に活用することができる限界状態設計法により決定し、従来の許容応力度法を基準とした場合に比べて、補強部材のスリム化を図っている。

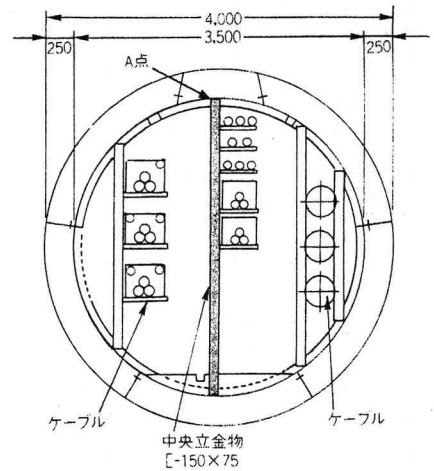


図-3 シールドトンネルの横断面図

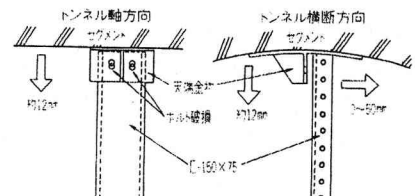


図-4 中央立金物のボルト破断状況

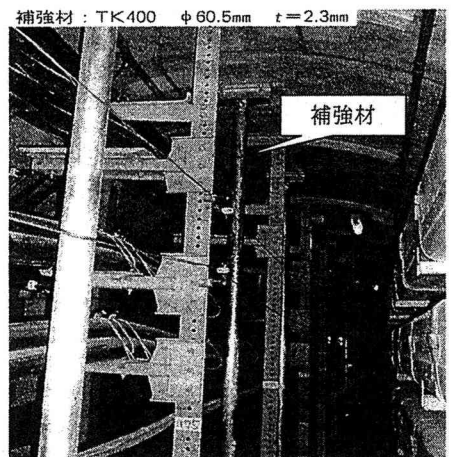


写真-1 補強材の設置状況

(e) 考察

この事例では、覆工内への漏水～圧密沈下～鉛直方向荷重の増加のメカニズムに従って、今回の変状につながった、対策工法は、限界状態設計法により補強柱を設置し、変形を抑制することとした。当事例の特徴は、①変状の原因が漏水から始まっていること、②補強柱の部材を最小限に抑えた限界状態設計法を用いたことにある。したがってトンネルの機能に対する要求性能は、『荷重に対して覆工が安定』、『漏水がない』に絞り込むことができ、さらには、経済性を重視した必要最低限の対応が重要ということが証明されている。

3.3 事例からの知見

上記 2 件の事例から、必要な機能を整理すると、構造的、維持管理性、経済性が重要であり、それに関連する要求性能は、表-1 から構造性能が最も関連深いものと判断される。さらに今回の変状原因、シールドトンネルの構造特性を考慮すると、『荷重に対し覆工が安定すること』、『漏水がない』に集約することができる。よってそれらに対する取り組みについて下記に示すものとする。

4. 覆工の安定性に関する取り組み

4.1 トンネル覆工の概要

シールドトンネルの覆工は、一次覆工、二次覆工からなり、地山を直接支持して所定の内空を保持するとともに、トンネルの使用目的に合致し、施工上必要な機能を有するものである。一次覆工は、地盤に接する側のセグメントであり、一般には、コンクリート、鋼、鋳鉄、コンクリートと鋼材との合成の材料がある。二次覆工は、一次覆工の内面に現場打ちコンクリートを巻き立てるもので、防食、補強、蛇行修正、防水、内装等の目的に使用されている。最近では、セグメント材質の向上(コンクリート強度、継手性能、止水性能等)、施工精度の向上、コスト縮減などから、特に鉄道、道路では、二次覆工の省略化が主流となっている。

4.2 トンネル覆工の設計

覆工の設計は、覆工に作用する荷重(土圧、水圧、上載荷重、自重等)に耐えうる計算を行うものであり、トンネルの用途、地山の状況、対象とする荷重、セグメント構造等に応じて、セグメントリングの構造をモデル化し、図-5 の手法により計算を実施する。

シールドトンネルの特殊性として、掘削などの施工時荷重の覆工設計への影響が注目される。その影響としては、①セグメントの組立からテールボイドへ注入した裏込め注入材が硬化するまでの間の一時的な荷重(施工時荷重:ジャッキ推力、裏込め注入圧、エレクターの操作荷重等)による影響、②シールドトンネルが近接して併設した際の相互干渉の影響、③他の構造物に近接した際の影響などが考えられる。これらは、必要に応じて適正な荷重、変位を設定し、覆工構造の安定性に対する検討が必要となる。

4.3 トンネル覆工の不安定要素

先述のシールドトンネルの維持管理事例では、地下水の変動、漏水～圧密沈下～鉛直方向荷重の増加からなる本体への影響(変状)を紹介した。こうした変状は、設計時からの条件変更による要因が大きく、設計上の対策としては、①トンネル横断方向に地盤バネを介して強制変位を与え、増加荷重分に対する覆工の安定を確保する、②トンネル縦断方向の構造モデルに沈下量を地盤バネから、地盤の不同沈下に対するトンネルの追従性を検討する(縦断方向の剛性低下、地盤改良等)などが考えられる。こうした事例をもとにトンネルの持つ機能に対する要求性能(表-1～2)との関連性も踏まえながら、考えられるトンネル覆工の不安定要素を表-3 のように整理する。

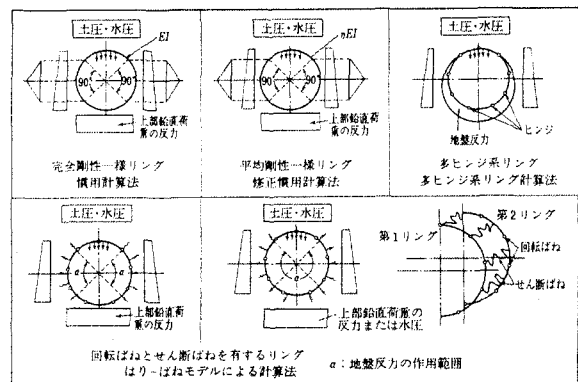


図-5 セグメント設計手法⁷⁾

表-3 トンネル覆工の不安定要素

区分	種別	不安定要素	考えられる事象
外的要因	地下水、土壌等外部環境	化学的腐食、電流作用、酸化等	継手目開き、目違い、ひび割れ、鉄筋・継手材腐食、隔離、剥落、漏水、浮き上がり、汚れ等
	坑内環境	湿度、温度、CO ₂ 、塩害（飛来塩分）等	
	荷重の過大	圧密沈下、不等沈下、地下水の上昇、活荷重等	
	近接施工	荷重の過大（他の構造物からの影響）	変色、強度低下、爆裂
	火災・爆発		
	地震・液状化		
内的要因	低品質材料	塩分、膨張性骨材、低品質配合、W/C等	継手目開き、目違い、ひび割れ、鉄筋・継手材腐食、隔離、剥落、漏水、浮き上がり、汚れ、断面欠損等
	施工不良	鉄筋のかぶり、締固め、養生、運搬等	
	設計瑕疵	鉄筋量、鉄筋のかぶり、設定荷重、設計強度、設計方法、部材寸法、内空寸法等（すべて不足）	

4.4 トンネル覆工の取り組み

(a) 設計・施工時の取り組み

トンネル覆工の設計では、それぞれのトンネル機能に応じた要求性能を理解し、設計条件を整理する必要がある。機能上重要と考えられる不安定要素から、将来的に予期せぬ要因を把握し、設計に盛り込むもので、そのためには必要とされる立地条件調査、支障物件調査、地形および土質調査、環境保全調査を、将来的な予測も踏まえて実施することが重要といえる。

これまでの設計法が構造物の許容応力度に基づくものであったが、主に構造物の構成材料の降伏に着目したものであり、構造物が設計時の状態と実際の応力度がどのようなレベルにあり、健全であるか否かの判断が重要であり、今回の事例にもあった限界状態設計法の活用も重視されるものと考えられる。

またシールドトンネルの覆工に関する新技術は、①空間機能への合理性（異形断面シールド、楕円形断面シールド、拡大シールド、複円形シールド等）、②施工の合理性（同時施工対応型セグメント、現場打ちライニング工法、クイックジョイント等）③耐久性能の確保（継手部の防食材、高強度コンクリート、内面ライニング工法等）など各機能に応じて、様々なものが開発されている。今後は、各要求性能に応じて、新技術、新工法に対応したトンネル覆工への取り組みが重要と考えられる。

(b) 維持管理時の取り組み

シールドトンネルは、①安定した円形の構造物であること、②セグメントが工場製作であり、材質のムラがなく高品質であること、③もともと高強度で製作され緻密化のコンクリートであること—などから、他の地下構造物に比べて劣化速度は遅いものと言われている。しかし経年的にその構成材料が劣化し、さらに外的環境の変化（主には地下水位の変動、近接施工の影響、温度変化、利用形態の変化、などに起因する作用荷重の変化）によって要求性能を満足できないケースが生じる可能性も高くなるものと想定できる。したがって今後は、覆工に対する補修・補強の頻度も高くなるものと考えられ、具体的な維持管理の方法として、構造物の必要な機能と要求性能を把握し、これに対する具体的な指標を選定すること、さらに既存の開発された技術を取り入れて、構造物の機能、性能に着目した総合的な状況判断ができるような技術が必要と考えられる。

5. 漏水に関する取り組み

5.1 概要

シールドトンネルの防水工は、トンネル標準示方書『シールド工法編』においてシール工、コーキング工、ボルト孔・注入孔、外周の防水工について示されており、使用目的に応じ、作業環境で適合する方法で施工しなければならないと謳われている。この中でシールドトンネルの漏水のほとんどが、セグメントの継手部分に発生していることから、シール材からの漏水が原因として挙げられている。

表-1 の分類表からシールドトンネルの『漏水が無い』要求性能に対する必要な機能として、維持管理でのメンテナンス性、水密保持性、気密性、経済性などが上げられる。これらは、漏水の対する必要な機能であるが、シール材に必要な機能に置換えられるため、ここでは、シール材の取り組みについて述べるものとする。

5.2 シール材の遷移

図-6のように1960年代後半から漸増し始めたシールド工法に対し、セグメントの継手面の止水はさまざまなシール材が提案され改良・検討が進められてきた。1970年代後半には、水膨張ゴム系のシールが開発され、現在に至っている。しかし長期的な耐久性についての十分な評価、シール材の耐久性試験方法や水膨張材の良否を判定する標準的な基準は定まっておらず、従来の工事の経験や実験に基づきシール材の選定を行っているのが実情である。

5.3 シール材の水密性、気密性について

水膨張ゴム系のシール材では、シール材が地下水を吸水し膨張し、接面応力を増加させ止水性を向上させる。これは長期浸漬試験より明らかにされており図-7に示すとおりである。しかし、この接面応力の増加により、一部で部分的な膨張が卓越した場合、セグメント相互の応力の伝達が不均一となりこれが原因で、ひび割れ等の原因と結びつく事も考えられ、シール材の張付け位置、膨張抑制について考慮する必要があると考えられる。

5.4 シール材の今後の取り組みについて

(a) 耐火性能への取り組み

東京湾横断道路建設以降、道路トンネルにおいてもシールドトンネルが施工されており、二次覆工の省略化に伴うシール材の耐火性能への取り組みが必要と考えられる。

(b) 新技術への対応

シールドの技術開発は、主にシールドマシン、セグメントについて行われてきた。今後は、大深度化に伴い『漏水が無い』要求性能が重要となるのは、前途のとおりであり、その技術開発は不可欠である。今後のシール材に求められる新技術への課題は以下のとおりと考えられる。

- ①さらなる防水性能を高めたシームレス化
- ②LCCを踏まえた長期耐久性の向上
- ③シール材の水膨張性ゴムを基調とする新素材の開発（施工性、止水性の向上）

6. おわりに

今回、シールドトンネルを対象として、その必要な機能および要求性能を整理し、現状での維持管理事例をもとに、今後のシールドトンネルの設計、施工、維持管理のあり方に関して考察した。シールドトンネルの要求性能は、その構造特性などから、『荷重に対し覆工が安定すること』、『漏水がない』が特化した要素であることが結論づけられた。今回の要求性能の整理は、2つの事例を基本としており、あくまでも構造物の維持管理（構造的な機能確保）を中心に組みまとめたものである。したがってトンネルの持つ空間的な機能についての要求性能（利用者の利便性、快適性、都市防災等）とは異なり、それぞれの目的・用途（鉄道、道路、ライフライン、貯留施設等）に応じた検討が必要と考えられる。今後は、こうした要求性能とも関連づけていくものとし、最適な設計、施工、維持管理手法の確立を目指すものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書維持管理編，p1，2001
- 2) 宮澤昌弘他：シールドトンネルの劣化と耐久性性能の評価に関する提案，土木学会トンネル工学研究論文・報告集第13巻，pp.377～382，2003.11
- 3) 松本嘉司：最新シールドトンネル，日経BP社，p73，1994
- 4) 川喜田二郎：川喜田二郎著作集〈5〉／KJ法，中央公論社，1996
- 5) 奥石逸樹他：都市部の地下水変動による鉄道トンネルへの影響，トンネルと地下，第35巻，pp289～296，2004.4
- 6) 山崎剛他：シールド掘進に伴う地盤変状入門(14)シールド新時代に向けて(その2)ー維持管理における新たな技術的課題ー，トンネルと地下，第35巻，1号，pp.65～71，2004.1
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，p78，1996
- 8) 水膨張ゴム研究会：水膨張ゴム技術資料，p13，1999

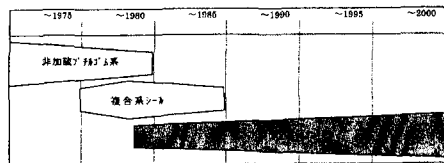


図-6 セグメントシール材の遷移⁸⁾

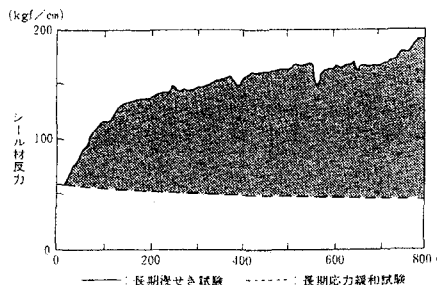


図-7 長期浸漬試験結果⁸⁾