

シールドトンネルにおける変状発生メカニズムに関する研究

森本 智¹・日下 敦²・石村利明³・砂金伸治⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:s-morimoto@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:kusaka@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:ishimura@pwri.go.jp

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: n-isago@pwri.go.jp

社会資本ストックに対する適切な維持管理が求められている背景のもと、道路トンネル定期点検要領が发出された。今後においては、山岳工法以外により構築されたトンネルにおいても、その特徴を踏まえたメンテナンスサイクルを確立していくことが求められている。

シールドトンネルは、都市部を中心に多数のストックが存在する。これらの効率的な維持管理を実施するためには、発生している変状の実態や原因、メカニズム等を把握することが重要である。

本報文では、シールドトンネルの構造と変状の関連性について把握することを目的に、既往の点検結果をもとに、継手形状や止水材料の種類、二次覆工の有無の観点から代表的な変状について発生箇所や頻度等を整理・分析した。その結果、代表的な変状としてひび割れおよび漏水が多く、そのメカニズムは建設年代に応じて異なる傾向があることが明らかとなった。

Key Words : shield tunnel, inspection, condition of deformation, mechanism of defect

1. はじめに

社会資本ストックに対する適切な維持管理が求められている背景のもと、道路トンネル定期点検要領¹⁾が发出された。定期点検要領の主たる内容は基本的には山岳工法によって施工されたトンネルが対象とされているが、今後においては、山岳工法以外により構築された、たとえばシールド工法により構築されたトンネルにおいても、その特徴を踏まえた点検の実施、適切な診断、措置、記録といったメンテナンスサイクルを確立していくことが求められている。

シールドトンネルは、都市部を中心にさまざまな用途で多数のストックが存在する。これらの効率的な維持管理を実施するためには、トンネルに発生している変状の実態やその原因、また、力学的なメカニズム等を把握することが重要である。

本報文では、シールドトンネルの構造と変状の関連性について、その基本的な特性を把握することを目的に、

複数のシールドトンネルで実施された既往の点検結果をもとに、継手形状や止水材料の種類、二次覆工の有無の観点からグループに分類し、代表的な変状事例について発生箇所や頻度等を整理・分析した結果について報告する。

2. 対象トンネル

本報文で対象とするトンネルを表-1に示す。対象とするトンネルはシールド工法により構築された14本（総延長約10km）のトンネルである。各トンネルの完成年や構造等、各諸元は完成図書等の調査により把握した。最も古いAトンネルは1969年に完成しており、完成後からすでに45年以上が経過している。トンネルの外径は3.8mから7.3mである。シールドトンネルを構成する部材は、セグメント、それらを連結する継手、およびセグメント間を止水するシール材、また、年代によっては二次覆工

表-1 対象トンネル

	完成年	延長 (m)	外径 (mm)	セグメント	
				厚 (mm)	幅 (mm)
A	1969	85	3.8	250	800
B	1972	240	4.7	250	不明
C	1979	520	5.2	250	不明
D	1983	500	5.6	275	900
E	1988	190	5.0	250	900
F	1989	830	5.9	350	900
G	1989	530	5.4	250	1000
H	1993	1040	7.3	325	1000
I	1994	950	5.9	275	1000
J	1996	920	5.9	250	1000
K	2000	1780	5.3	300	1000
L	2002	350	5.1	250	1000
M	2003	620	5.3	300	1000
N	2004	1450	5.5	275	1000

等である。各部材は、建設当時の知見により設計されるため、それらの継手形状や止水材料等、トンネルの構造は建設時代により異なると考えられる。結果として、本検討の対象トンネルにおいてもそれらの構造等は様々であった。

セグメントの形状・寸法は、セグメント厚さ、セグメント幅、鉄筋量、継手剛性等を土質条件やトンネル径等を勘案してセグメント種別毎に試算し、決定されていることが多い²⁾。対象トンネルにおいては、セグメントの形式はいずれもRC構造であり、幅は1989年完成のGトンネルを境に、800mmまたは900mmから1,000mmに移行している。厚さは250mmから300mmの範囲で年代による違いは確認できない。主な継手構造は、2000年完成のKトンネルを境に、ボルト締結タイプからくさび締結タイプに移行している。

止水構造は、シール材、およびそれを収容するシール溝、また内空側に施すコーキング等から構成される。対象トンネルにおけるシール溝は、2000年完成のKトンネルを境に、1段（図-1に示す(a) 1段タイプ）から2段（図-1に示す(b) 2段タイプ）に移行している。シール材は、1988年完成のEトンネルから水膨張性の材料を用いていることが完成図書より確認された。それ以前に完成したAからDの4トンネルは完成図書等の調査から使用材料は確認できなかった。水膨張性のシール材は1985年頃から採用されている例が多い³⁾ことから、AからDの4トンネルは水膨張性ではなく非膨張性のシール材が用いられたと推察される。なお、シール材は未加硫ブチルゴムに代表される非膨張単体シール材、非膨張複合シール材から水膨張シール材へと変遷²⁾してきている。シール溝やシール材の寸法は、対象トンネルにおいても様々であったが、大きな違いはなかった。

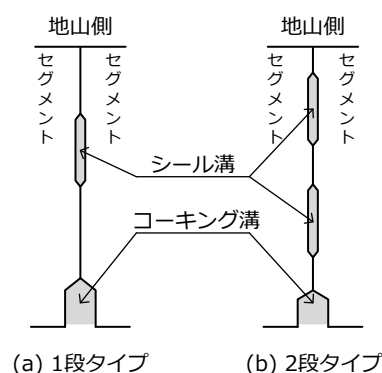


図-1 止水構造の例

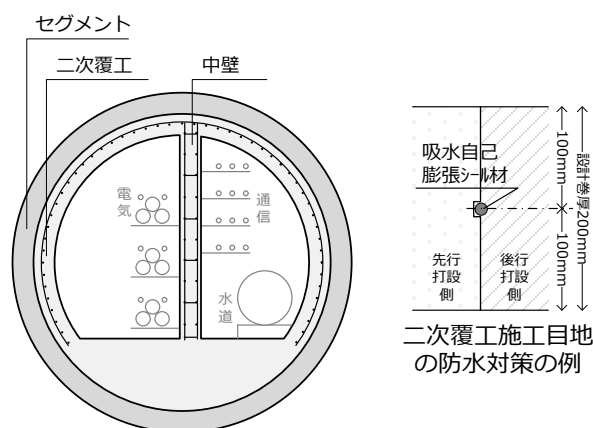
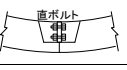
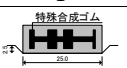
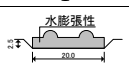
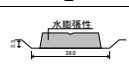


図-2 断面図の例（二次覆工がある場合）

二次覆工は、一般的にセグメントの防食や漏水の低減等を期待し施工²⁾される。1979年完成のCトンネルの場合、二次覆工は、主鉄筋としてD16を250mm間隔で単鉄筋配置とし、コンクリートの厚さは200mmの構造であった。コンクリートの打設は、鋼製の移動式型枠を使用し7.5m毎を基本とし、曲率半径に応じて一打設長を7.5m、6.0mと変更している。また、漏水の影響を受けやすい打継目は、厚さ200mmの断面の中立軸付近に吸水自己膨張シール材を設置し対策を施していた。また、対象トンネルは共同溝であったため、電気・通信等公益物件を収容するために中壁が設置されている。中壁は二次覆工と連続した構造となっている。図-2に二次覆工がある場合の断面図の例を示す。なお、対象トンネルにおいては2000年に完成したKトンネルを境に、施工の合理性、経済性、高度な漏水対策が可能となったなどの観点から二次覆工は省略されていた。

シールドトンネルは、完成図書等からの文献調査により、セグメント構造、止水構造、二次覆工の有無など、各年代に採用される構造には傾向があることが明らかとなった。本報文では、完成した年代毎に、3グループに分類し整理することとした。表-2に各グループに分類した対象トンネルの特徴を示す。主な分類は、グループ①は建設から30年以上経過し、継手形状が直ボルトで止水

表-2 点検対象トンネルの特徴

グループ	①	②	③
トンネル数	4本 (AからD)	6本 (EからJ)	4本 (KからN)
経過年	45～30年	25～20年	15～10年
主な継手形状			
シール溝段数	1	1	2
主な止水材料			
二次覆工	有	有	省略

材料に非膨張性のシール材を使用した二次覆工があるトンネル、グループ②は20年以上経過し、継手形状が斜め直ボルトで止水材料に水膨張性のシール材を使用した二次覆工があるトンネル、グループ③は2000年以降に完成し、継手形状がくさび締結タイプで止水材料に水膨張性のシール材を使用した二次覆工が省略されたトンネルである。

3. 分析方法

本報文では、国土交通省が所管する共同溝を対象にし、共同溝管理者が実施した点検結果について、筆者らが分析を実施したものである。共同溝管理者による共同溝の点検の方法、および筆者らによる点検結果の分析方法について、以下に述べる。

(1) 点検の方法

トンネルの点検は目視により行われた。観察された変状は、ひび割れ、漏水などの項目に分類され、距離標や発生箇所、変状の規模に応じた判定区分が記録されている。ここで、ひび割れを確認した場合は、単独のひび割れや、亀甲状等複数のひび割れ群の場合においても1箇所として記録されている。また、二次覆工があるグループ①、②については、ひび割れについて発生箇所に関する記録は二次覆工か中壁かの情報に限られ、例えば、二次覆工の具体的な箇所（天端、側壁、インバート等）に関する記録はされていない。さらに、ひび割れの長さに関する情報は記録されていないため、ひび割れ密度等の指標による評価は不可能である。

なお、本共同溝における判定区分の設定は、各変状の規模に応じて、ひび割れは幅0.6mmをしきい値とし、漏水はにじみ・湿り・流れに分類し評価している。

(2) 点検結果の分析方法

点検結果の分析は、各変状の規模に応じて、おおむね健全と考えられる【判定区分A】、注意が必要と考えら

れる【判定区分B】と定義し分類した。変状の頻度は、表-2に示したグループ毎に点検時に記録されたひび割れ、漏水の変状箇所数を算出し、10m長さあたりの頻度として表示した。この設定は、各グループともにセグメントの縦断方向の幅はほとんどが1m程度であったが、点検対象が二次覆工となるグループ①、②の変状事例が多かったため、その施工目地の間隔程度として統一を図ったものである。なお、グループ①、②は二次覆工を施工しているため、ひび割れの発生箇所について二次覆工または中壁に分類した。

表-3に本報文で定義した判定区分の分類を示す。判定区分の分類は、判定区分Aとしてひび割れは幅0.6mm未満、漏水はにじみ・湿り程度、判定区分Bとしてひび割れは幅0.6mm以上、漏水は流れ程度と仮定した。なお、ひび割れ幅のしきい値の設定は、点検時に採用された値である0.6mmを、本分析においても仮定として採用したものである。

4. 分析結果

(1) ひび割れに関する分析

図-3にひび割れの発生頻度を示す。まず、二次覆工があるグループ①、②について述べる。二次覆工と中壁のひび割れの発生頻度の割合は、二次覆工が3割未満、中壁が7割以上をしめる結果となった。二次覆工のひび割れ発生頻度は、グループ②が10mあたりで0.29と高く、グループ①は0.04と低い値となった。また、0.6mm以上のひび割れが発生し注意が必要と考えられる判定区分Bに分類された頻度は、グループ①、②が0.05程度であった。

一方、二次覆工が省略されたグループ③については、ひび割れ発生頻度は0.01未満となり、判定区分Bに分類された変状は確認されなかった。

ただし、二次覆工が省略されたグループ③についてひび割れの頻度が小さい理由は、観察等が可能である表面の部材がセグメントであり、通常は鉄筋を有するといった構造的な違いか、または、建設年次が他に比較して新しいものであるのかなどの検証は今後必要である。

(2) 漏水に関する分析

図-4に漏水の発生頻度を示す。漏水の発生頻度は、シール材が非膨張性であるグループ①は全体で0.78と高く、水膨張性であるグループ②、③は0.26程度と低いことがわかる。また、注意が必要と考えられる判定区分Bに分類された頻度は、グループ①が0.45と最も高く、一方、グループ②、③は0.04、0.01と低い値となった。ここで、グループ①のひび割れ発生頻度が低く、漏水の発

表-3 本報文で定義した判定区分の分類

変状	点検時の 変状規模	本報文で定義 した判定区分
ひび割れ	0.6mm未満	A
	0.6mm以上	B
漏水	にじみ・湿り	A
	流れ	B

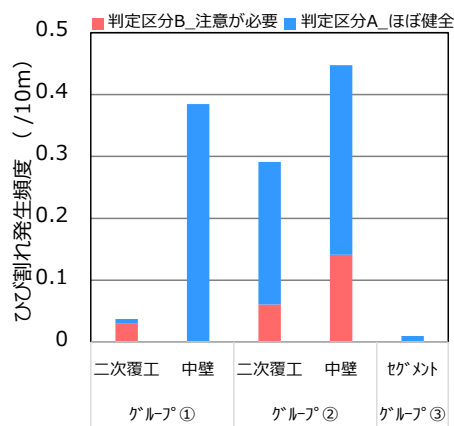


図-3 ひび割れ発生頻度

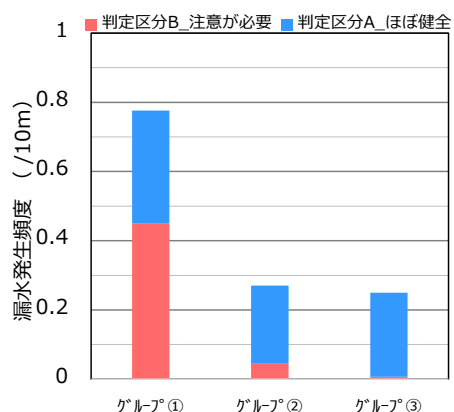


図-4 漏水発生頻度

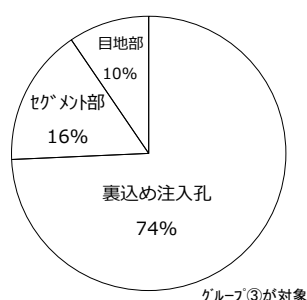


図-5 漏水発生箇所（グループ③）

生頻度が高い原因として、点検の際、漏水を伴うひび割れの場合は、漏水に分類しているためと考えられる。図-5に二次覆工を省略したグループ③の漏水発生箇所を示す。漏水は7割以上が裏込め注入孔からのもので、その規模はどれもにじみ程度の小さいものであった。

5. まとめ

シールドトンネルの構造と変状の関連性について把握することを目的に、複数のトンネルで実施された点検結果をもとに、完成年の違いによる継手形状や止水材料の種類、二次覆工の有無の観点からひび割れ、漏水の変状事例について発生箇所や頻度等を整理・分析した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 本点検対象トンネルにおいては、30年以上前に建設された非膨張性シーリング材を用いたと考えられるトンネルで漏水が多く発生しており、そのうち6割程度は流れ程度の規模であったことが明らかとなった。漏水の発生はシールドトンネルの各種部材に用いられる鋼材の腐食を促進させることから、維持管理を実施するうえで重要な要素となる。
- 2) 水膨張性シーリング材を用いたトンネルでは、漏水の事例は確認できるものの、その規模は小さいことが確認された。
- 3) ひび割れは20年以上前に建設された二次覆工があるトンネルにおいてある程度の頻度で発生しており、ひび割れ幅が0.6mmを超える規模の事例も確認された。
- 4) 近年に建設された二次覆工を省略したトンネルは、セグメント本体のひび割れの事例はごくわずかであり、その規模は小さいことが確認された。

本報文では、限られた延長の点検結果であることや、二次覆工がある場合は背面の観察ができないことから、セグメントや継手部の劣化状況、漏水箇所などの把握ができていない。維持管理を行ううえで、変状の原因が外力、あるいは材質劣化などに分類することは極めて重要である。また、現時点では変状事例が少なかったグループ③においても、経過年が増加するに伴う変状の発生が懸念される。今後は、より多くの点検結果の蓄積、長期にわたるシールドトンネル本体やその変状の挙動の観察を実施するとともに、変状の発生原因の推定などについて分析し、効率的な維持管理手法の確立に資する検討を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，平成 26 年 6 月
- 2) 日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針，pp.402-403，1996.
- 3) 大塚正博，塩冶幸男，小林亨，小泉淳：シールド工事用セグメントの水膨張シーリング材による止水設計法について，土木学会論文集 No.651/VI-47，pp61～pp.79，2009.2

(2015.8.7 受付)

Trend and Mechanism of Defects on Shield Tunnels

Satsohi MORIMOTO, Atsushi KUSAKA, Toshiaki ISHIMURA, Nobuharu ISAGO

Many shield tunnels are constructed, especially in urban area, and should be maintained properly as well as mountain tunnels to confirm the structural stability and secure the users' safety. However, the inspection method for shield tunnels for vehicle use has not been established due to lack of comprehensive knowledge of critical defects on shield tunnels. In this study, trends of defects in shield tunnel are analysed using inspection results over the last decade. The major acquired results are: Major defects in shield tunnels include cracks and water leakage and their trend of occurrence rate depends on the construction period. Occurrence of water leakage is possibly affected by water sealing material types.