

シールドトンネルの維持管理手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：砂金伸治，石村利明，日下敦，森本智

【要旨】

シールド工法はこれまで都市部を中心に多くの共同溝や東京湾横断道路などの建設時に適用されている。構造物の高齢化等により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、シールド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。本研究では、変状実態の把握、変状メカニズム・原因推定の整理、変状に応じた対策工の検討、耐久性の評価手法および点検手法等により、シールドトンネルの維持管理手法について検討を行った。その結果、シールドトンネルの構造は各年代に採用される構造は異なり、発生する変状はひび割れ、漏水が多く、漏水は非膨張性シールド材を用いたトンネルで多く発生しており、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いることが明らかとなった。また、二次覆工に発生した材質劣化によるひび割れを対象に実施した対策工について調査した結果、対策箇所自体は10年程度経過した時点においても健全な状態を保つものの、トンネル全体の耐久性を向上させるには、シールドトンネルを構成する部材に求められる性能を踏まえた対策工の選定が必要となることが課題として明らかとなった。

キーワード：シールドトンネル，変状実態，変状メカニズム，対策工，維持管理手法

1. はじめに

シールド工法はこれまで都市部を中心に多くの共同溝や東京湾横断道路などの建設時に適用されている。これらのシールドトンネルにおいても、山岳トンネルと同様に供用後に変状が発生し、セグメントにひび割れや欠け、継手部の腐食、漏水等の発生例が散見される。シールドトンネルはセグメント、それらを連結する継手、セグメント間に配置する止水材等から構成され、それらの材料はコンクリート、鋼材、ゴム等多岐にわたる。材料特性等は施工年代毎に力学的な特性や施工性、経済性等の観点から新たな技術を取り入れ、その時点で最適な仕様となるように見直しが行われてきている。また、二次覆工はコスト削減の観点等からある年代を境に省略される傾向にある。そのため、シールドトンネルに発生する変状は構成する部材や材料、二次覆工の有無等、シールドトンネル特有の複雑な構造による影響を受けると考えられ、メンテナンスサイクルの確立にあたっては、これらの特徴を踏まえた点検、診断等の実施が必要である。

一方で、シールドトンネルに発生する変状の実態、原因、発生メカニズム、対策工の効果の点で不明確な部分が存在し、これらの特徴を踏まえた点検による変状実態の把握や、発生原因の推定、さら

に、措置における対策工の選定やその後の効果の持続性等に関する事例は少なく、不明な点が多いことが課題として挙げられる。

本研究では、変状実態の把握、変状メカニズム・原因推定の整理、変状に応じた対策工の検討、耐久性の評価手法および点検手法等により、シールドトンネルの維持管理手法について検討を行った。

2. 研究方法

2.1 シールドトンネルの変状実態の把握

シールドトンネルの変状実態について把握するため、表-1に示す16トンネル（総延長約10km）を対象に、トンネルの構造、および変状事例について調査し整理した。調査は各トンネルを構成する部材等の構造を把握するため、施工時の完成図書等から完成年やトンネルの延長、外径等の寸法、セグメントの厚さや幅、二次覆工の厚さ等について整理した。また、変状事例を把握するため、既往の点検結果を調査し、シールドトンネルに発生するひび割れ、漏水等の変状について整理した。

表-1 変状実態の把握の対象としたトンネル
(N=16, 総延長約 10km)

名称	完成年	延長 (m)	外径 (m)	厚 (mm)	幅 (mm)	二次覆工 (mm)
A	1969	85	3.8	250	800	200
B	1972	240	4.7	250	不明	250
C	1979	520	5.2	250	不明	200
D	1983	500	5.6	275	900	不明
E	1988	190	5	250	900	200
F	1989	830	5.9	350	900	不明
G	1989	530	5.4	250	1000	200
H	1993	1040	7.3	325	1000	不明
I	1994	950	5.9	275	1000	225
J	1996	920	5.9	250	1000	不明
K	2000	1780	5.3	300	1000	省略
L	2002	350	5.1	250	1000	省略
M	2003	620	5.3	300	1000	省略
N	2004	1450	5.5	275	1000	省略

2.2 変状メカニズム・原因推定の整理

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、セグメント間に配置する止水材等さまざまである。変状メカニズムや原因を推定するためには、これらの特徴を踏まえ変状の種類や規模、発生頻度といった変状実態の把握が必要となる。変状メカニズムや原因を整理するため、表-1 に示した 16 トンネルを対象に、各トンネルの完成からの経過年、継手形状、止水材料、二次覆工の有無等の構造を指標にグループに分類し、グループ毎に変状の種類や規模、発生頻度等について整理した。変状の規模はひび割れ、漏水を対象に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】と仮定し分類した。表-2 に本研究で仮定した判定区分の分類を示す。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 を本研究においても仮定として採用したものである。変状の発生頻度は、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整理した。

また、あわせて推定した原因の分析をふまえシールドトンネルの維持管理に必要な手法の方向性を検討した。

表-2 本研究で仮定した判定区分

変状	点検時の 変状規模	本報告で定義 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

表-3 対策工の検討対象としたトンネル

名称	完成年	延長 (m)	外径 (m)	厚 (mm)	幅 (mm)	二次覆工 (mm)
0	1997	650	7.85	325	1000	200

2.3 変状に応じた対策工の検討

変状に応じた対策工について検討するため、完成から 5 年程度経過した時点に実施した目視点検（5 年目点検）結果の分析、および 5 年目点検において確認された変状に対する措置の選定手順の考え方、措置後 10 年が経過した時点における対策工の効果の持続性の把握を目的とした目視点検（経過観察点検）結果の分析を実施した。対象トンネルの主な諸元を表-3 に示す。対象トンネルはセグメントの防食やトンネル内空への漏水の低減等を期待して完成当初から二次覆工が設置されていた。施工時の資料調査の結果から、掘削断面周辺の地質は沖積粘性土または洪積砂質土が主体であった。ボーリング調査等によると、沖積粘性土は粘土またはシルト等から構成され、含水比は高く、N 値は 0 から 5 と大部分で極めて軟弱な層であった。洪積砂質土は直径 50mm 程度の礫や細砂等から構成され、N 値は 35 以上とよく締まっているとのことであった。自然地下水位は G.L. から下方 2m から 5m 程度であった。

2.4 耐久性の評価手法および点検手法の検討

耐久性の評価手法について検討するため、季節変動等によるトンネル内環境の条件変化に着目した実トンネルにおける現地計測を実施し、覆工の周方向や縦断方向等の基礎的な挙動を把握した。また、現地計測結果を踏まえ、セグメントが温度変化等による影響を受け目地部の目開き量が繰り返し変動すると仮定したシール材に関する模型実験を実施し、漏水の発生に影響をおよぼす要因について検討した。

2.4.1 シールドトンネルの基礎的な挙動

シールドトンネルの基礎的な挙動を把握するため、表-4 に示す 2 トンネル（0 トンネルは表-3 と同一）を対象に現地計測を実施した。0 トンネルは二次

覆工のひび割れや漏水を伴うひび割れ等の変状が一部区間にて確認されたが、ひび割れ注入工等の対策工が施され、直近の点検結果では健全な状態が確認されている。図-1に標準断面図を示す。計測は、トンネル内の環境の変化や覆工の周方向や縦断方向の挙動を把握するため、トンネル内に温・湿度計、二次覆工の目地間や一次覆工の継手間に亀裂変位計を設置し、10分間隔で測定を実施した。図-2に計測機器の配置図を示す。一次覆工のセグメント間（周方向）、リング間（縦断方向）の継手部に各3カ所（天端、肩部、側壁部）の計6カ所に亀裂変位計を設置した。

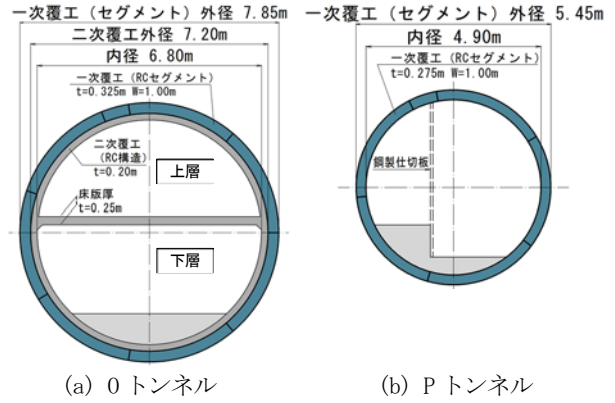


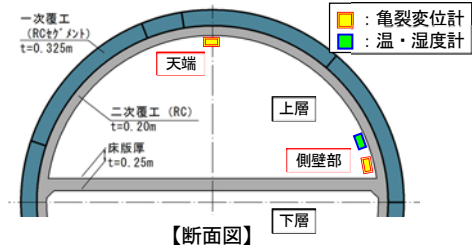
図-1 標準断面図

表-4 現地計測の対象としたトンネル

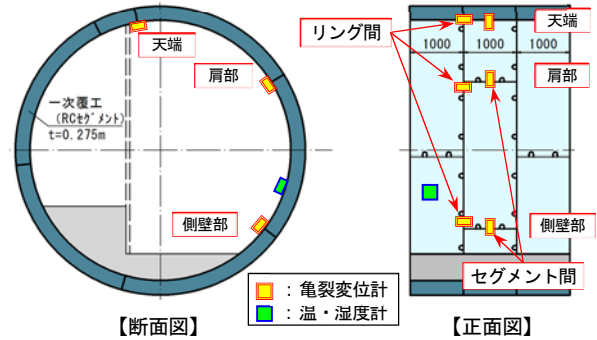
名称	完成年	延長 (m)	外径 (m)	厚 (mm)	幅 (mm)	二次覆工 (mm)
O	1997	650	7.85	325	1000	200
P	2003	1100	5.45	275	1000	省略型

2. 4. 2 シール材に着目した模型実験

現地計測結果を踏まえ、セグメントが温度変化等による影響を受け、目地部の目開き量が繰り返し変動すると仮定し、シール材に着目した模型実験を実施し、漏水の発生に影響を及ぼす要因について検討した。図-3に実験装置の概要を示す。実験装置は計測機器、止水溝、シール材、帯水層等から構成される。計測機器は目開き量を計測する変位計、界面応力を計測する圧力計から構成される。帯水層は別途設置した加圧ポンプおよび水槽等からなり、一定の水圧を保持することが可能である。本実験においては、セグメントの寸法、および温度変化量等の条件を仮定し、温度変化に伴い発生する目開き量が繰り返し変化を生じたという想定で、1mmの繰り返し変化を与えることにした。実験ケースは、初期の設計目開き量の時点以降、水圧を作用させないCASE 1と、水圧 (0.3MPaと仮定) を作用させるCASE 2の計2ケースとした。



(a) Oトンネル



(b) Pトンネル

図-2 計測機器の配置図

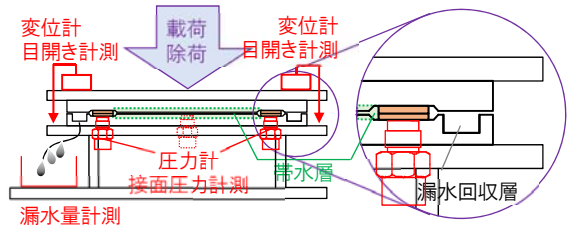
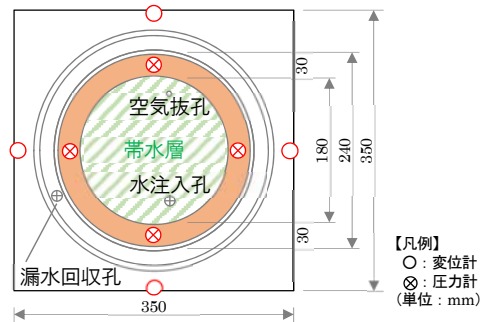


図-3 実験装置の概要

3. 研究結果

3. 1 シールドトンネルの変状実態の把握の結果

3. 1. 1 シールドトンネルの構造の特徴

表-1に示す対象トンネルにおいて、最も古いAトンネルは1969年に完成しており、すでに45年以上が経過している。トンネル外径は最小3.8m、最大7.3mであった。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、対象トンネルにおいても様々であった。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Fトンネルを境に900mm（または800mm）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。表-5に年代毎の主な継手構造、主なシール材料の特徴について示す。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。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¹⁾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。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¹⁾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の構造としていた。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。

以上のことから、シールドトンネルの構造は、継手形式、シール材、二次覆工の有無など、各年代に採用される構造は異なる傾向があることが明らかとなった。

3. 1. 2 シールドトンネルの変状実態

シールドトンネルにおける変状事例を把握するため、既往の点検結果を調査し、変状の種類、各変状

の発生頻度について整理した。図-4に変状の種類と発生頻度を示す。対象としたシールドトンネルに発生する変状のうち最も多くの割合を占めるのはひび割れであり全体の54%を占める。次いで漏水が43%、鉄筋露出が3%であった。

以上のことから、シールドトンネルに発生する主な変状は、ひび割れ、漏水が多く全体の多くを占めることが明らかとなった。また、変状の発生頻度は建設年次が古い方が相対的に高くなる傾向であることがわかった。

表-5 年代毎の構造の特徴

経年	主な継手形状	主なシール材料
45 ~30	直ボルト	特殊合成ゴム
25 ~20	斜め直ボルト	水膨張性
15 ~10	くさび締結タイプ	水膨張性

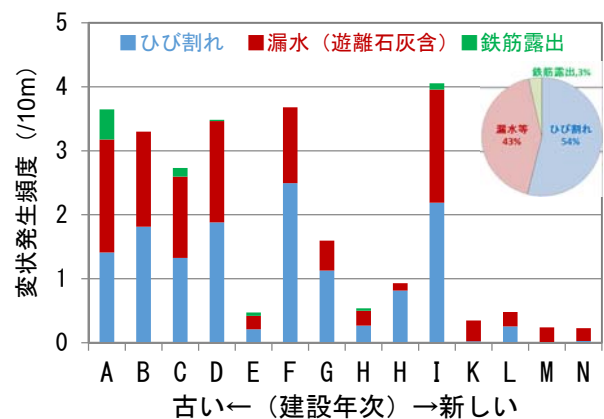


図-4 変状の種類と発生頻度

3. 2 変状メカニズム・原因推定の整理結果

シールドトンネルの構造は年代毎に異なる傾向があり、変状の種類や発生頻度についても関連性が確認されたことから、表-1に示した16トンネルを対象に完成からの経過年や構成する部材の構造等を指標に3つのグループに分類し表-6に整理した。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

のシーリング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リング材を使用した二次覆工が省略されたトンネルとした。ひび割れおよび漏水の発生頻度を図-5に示す。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、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の課題となる。漏水の発生頻度は、シーリング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-6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。

以上のことから、漏水は非膨張性シーリング材を用いたトンネルで多く発生しており、漏水のうち6割程度は注意を要する規模であった。一方、水膨張性シーリング材を用いたトンネルでは、漏水は確認できるものの、その規模は小さい。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。

また、これらの結果からシールドトンネルに必要な維持管理手法としては、とくに漏水とひび割れによる変状の程度を判断することが不可欠であり、変状区分の判定や健全性の評価に資する分析を行う必要があることが明らかとなった。

表-6 施工時期の違いによる各部材の適用状況

グループ(名称)	経年	主な継手形状	主な止水材料	二次覆工
① A, B, C, D	45 ~30	直ボルト	特殊合成ゴム	200 ~250
② E, F, G H, I, J	25 ~20	斜め直ボルト	水膨張シーリング材	200 ~225
③ K, L, M, N	15 ~10	くさび締結タイプ	水膨張シーリング材	省略型

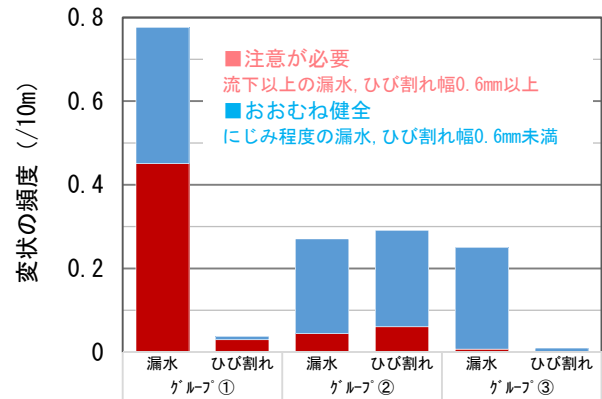


図-5 変状の頻度と規模

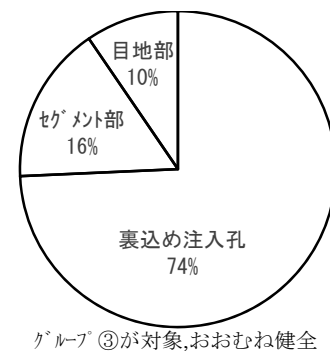


図-6 グループ③における漏水発生箇所

3.3 変状に応じた対策工の検討結果

5年目点検で確認した変状について2スパンを対象に記した変状展開図(黒字で記載)を図-7に示す。対象区間においては、ひび割れ幅が0.3mm以上の変状は確認できなかった。ひび割れ幅が0.3mm未満の変状は、上半部に多く、各スパンのS.L.付近から天端方向へ伸びる横断方向のひび割れや、天端部や肩部付近における縦断方向に伸びるひび割れが多い。これらの規模や形態から乾燥収縮や温度変化等による材質劣化に関係するひび割れであると考えられる。また、一部のひび割れにおいて、滴水、浸出

(にじみ)程度の漏水をとまなうものが確認された。

0トンネルにおける代表的な変状は、ひび割れ、および漏水をとまなうひび割れであった。とくに、漏水をとまなうひび割れは、長期的にはコンクリートおよび鋼材等の構造部材の劣化等による構造物の性能低下を生じるおそれがあるため、適切に対応することが必要となる。0トンネルにおいては措置を実施する際の基本的な考え方として、二次覆工を対象とした変状による劣化の進行抑制、および漏水等による占用物件等への支障抑制を目的とすることとした。図-8に措置の手順の例を示す。対策は漏水の有無、およびひび割れ幅の規模に応じて内容を決定した。漏水をとまなうひび割れは対策として「セメント系材料による充填+注入」とした。また、漏水を伴わないひび割れについても、漏水箇所の止水による水みちの変化により、新たな漏水発生のおそれがあることから、ひび割れ幅が0.4mm以上のものを対象に対策として「樹脂系材料による充填+注入」とした。これらの対策は変状箇所を深さ約40mmまではつり、その後充填し表面処理を施すこととした。一方、漏水を伴わないひび割れのうち、幅が0.4mm未満のものについては「監視」を実施することとした。

対策から10年程度経過した時点で、対策の効果の持続性の把握を目的とした経過観察点検を実施した。経過観察点検は幅0.1mm以上のひび割れを対象に記録した。なお、経過観察点検ではひび割れ幅が5年目点検より小さいものを対象とした近接目視による点検を実施したことから、5年目点検で記録されなかったひび割れが含まれている可能性があることに注意が必要である。変状展開図(赤字で記載)を図-7に示す。まず、対策を実施した箇所は、ひび割れや漏水等の新たな変状は確認されず、健全な状態を保っていることを確認した。対象区間における新たな変状として、対策を実施した箇所以外にひび割れと漏水をとまなうひび割れを確認した。新たなひび割れは最大で幅0.3mmであったが、ほとんどは0.3mm未満の規模であった。その形態は、5年目点検で確認されたひび割れが進展したものや、新たに横断方向、または縦断方向に伸びる規則性が乏しいと考えられる微細なひび割れであった。その規模や形態から乾燥収縮や温度変化等による材質劣化に関係するひび割れであると考えられる。一方、新たな漏水をとまなうひび割れは上半の一部箇所、および下半の目地部やひび割れ箇所を対象に確認した。これらは、い

ずれも5年目点検で確認した漏水に対策を実施した付近、またはそのスパンにおいて発生している。対策を実施した箇所は止水性能が向上したものの、その付近の目地部やひび割れ箇所等の相対的な弱部に水が回ったと考えられる。0トンネルにて実施した対策は、二次覆工を対象に行われたものであり、一次覆工(セグメント本体等)の漏水を抑制するものではないと考えられる。セグメント本体等の耐久性を向上させるための対策の手法や、トンネル構造全体の監視の手法等について、今後検討する必要がある。

以上のことから、対策を実施した箇所自体は10年程度経過した時点においても健全な状態を保っていることが確認された。一方、対策工の周辺に新たな変状が発生する場合があります。トンネル全体の耐久性を向上させるには、シールドトンネルを構成する部材に求められる性能を踏まえた対策工の選定が必要となることが課題として明らかとなった。

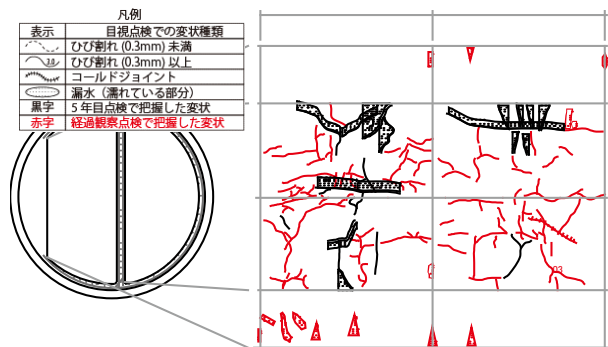


図-7 変状対策工の経年劣化状況の把握

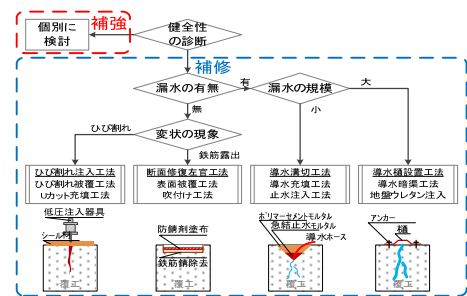


図-8 変状の規模に応じた措置の選定例

3.4 耐久性の評価手法および点検手法の検討結果

3.4.1 シールドトンネルの挙動計測の結果

シールドトンネルの挙動計測の結果を示す。0トンネルにおける二次覆工の目地間の変位量、トンネル内の温・湿度の計測結果を図-9示す。トンネル内の環境は、温度差で約9℃、湿度差で約40%の変化が

確認された。目地間の変位量は、側壁で約 1.1mm の変化が確認され、天端ではそれよりも小さかった。P トンネルにおける一次覆工の継手間の変位量、トンネル内の温・湿度の計測結果を図-10 に示す。トンネル内の環境は、温度差で約 8℃、湿度差で約 60% の変化が確認された。継手間の変位量は、リング間

(天端) が最大で約 0.3mm の変化が確認された。両トンネル内の環境は、外気との接触が少ないものの年間を通じて温・湿度の変化があり、夏季の数ヶ月は多湿な環境であった。二次覆工の目地間や一次覆工の継手間は、温度の変化とほぼ同様の傾向で伸縮が確認された。変位量の最小、最大時は、温度の最小・最大時に比べ、約 1 ヶ月後に出現しており、これはトンネル内と覆工内部の温度の変化の違いによるものと想定される。二次覆工の目地間や一次覆工の継手間は、温・湿度の変化に追従し、伸縮が発生しており、長期間において覆工の伸縮が繰り返し発生することが想定される。一次覆工の継手部で重要な防水工であるシール工にも一次覆工の伸縮の繰り返しが伝達すると想定される。シール工は、シール材が有する反発力や膨張圧等により防水するものである。仮に、覆工の伸縮繰り返しにより継手部の目開き量が繰り返し変動することで、シール工の防水効果が大きく低下した場合には、漏水の要因となる可能性がある。

以上のことから、セグメント間の目地、二次覆工の目地等は温度による影響を受ける可能性が示唆された。

3. 4. 2 止水材料に着目した模型実験の結果

覆工の伸縮繰り返しにより継手部の目開き量が繰り返し変動すると仮定し実施した止水材料に着目した模型実験の結果を示す。組立て前(シール材の変形量 0mm) から、繰り返し载荷 1 回目までの接面応力とシール材の変形量の関係を図-11 に示す。シール材による止水メカニズムはシール材の素材、硬度等をパラメータとして圧縮ひずみに応じた接面応力を算出し、その値と水圧とを比較して止水性について照査する考え方²⁾である。この考え方にもとづき、本実験条件における接面応力等について算出した結果を表-7 に示す。接面応力は、シール材の変形とともに上昇し、設計目開き量まで载荷した際の値は表-7 に示した値と同程度となった。設計目開き量の時点において CASE2 では水圧を作用させたが、その際に接面応力が上昇している。これは、文献²⁾でいう自封作用によるものと考えられる。その後、1mm 载荷し目開き

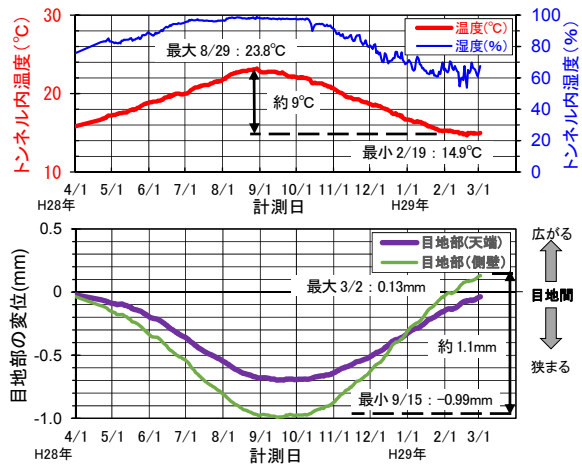


図-9 計測結果 (O トンネル)

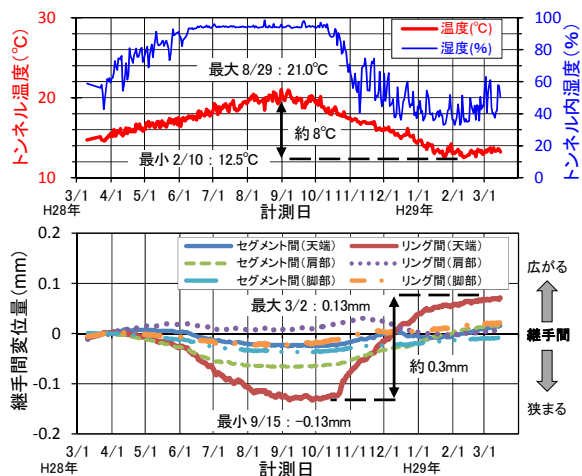


図-10 計測結果 (P トンネル)

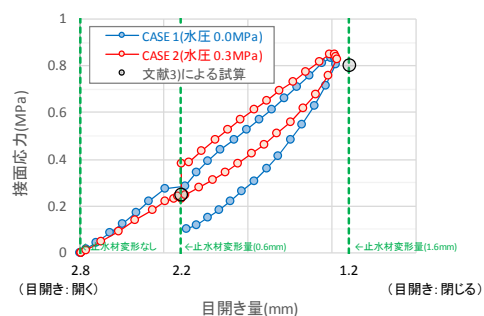


図-11 接面応力と目開き量

量が 1.2mm となった際の接面応力は表-7 に示した値と同程度となった。引き続き、繰り返し载荷を 50 回目に行った際の、設計目開き量における接面応力の変化を図-12 に示す。設計目開き量における接面応力は、CASE 1 の場合、初期は 0.27MPa であったが、1 回目において 0.10MPa まで減少し、50 回目の時点では 0.02MPa となった。一方、CASE 2 の場合、初期は 0.34MPa であったが、1 回目において 0.24MPa まで低下し、その後は 0.2MPa 程度で推移した。また、CASE

2にて漏水の発生状況を目視観察した結果、5回目に漏水が確認され、それ以降、設計目開き量付近において、毎回、漏水を確認した。

また、3.4.1の結果と3.4.2の結果から漏水に対しては経年劣化に伴うセグメントの耐久力に影響を及ぼす可能性があることに加え、坑内環境の変化に伴う止水材の接面応力の変化といったセグメントの力学的な挙動等に対する影響が考えられる。

以上のことから、目開き量が繰り返し変化した場合、接面応力が低下し漏水の発生が確認され漏水発生メカニズムの一要因が明らかとなった。また、これらの事象をふまえたうえで、判定区分等を検討する必要があることが明らかとなった。

表-7 接面応力等の算出結果

止水溝の形状寸法			目開き量		
深さ	d	2.6 mm	設計時	δ1	2.2 mm
底面幅	b	30 mm	1mm載荷時	δ2	1.2 mm
止水材料の諸元			止水材の載荷変位量		
材質	クロロブレンゴム		設計時	δ1'	0.6 mm
硬度	Hs	45	1mm載荷時	δ2'	1.6 mm
厚さ	t0/2	4 mm	接面応力等(設計時)		
幅	a	20 mm	圧縮ひずみ	ε1	0.05
形状率	S	1.22	接面応力 ^{注1)}	σ1	0.25 MPa
横弾性係数	G	0.585 N/mm ²	接面応力等(1mm載荷時)		
見かけのヤング率	Eap	5.205 N/mm ²	圧縮ひずみ	ε2	0.18
			接面応力 ^{注1)}	σ2	0.80 MPa

注1) 接面応力は次式により算出

$$Eap = (4+3.920 \cdot S^2) \cdot G \quad (1)$$

$$\sigma = Eap \cdot [(1+\epsilon) - (1+\epsilon)^2] / 3 \quad (2)$$

ただし、Eap:見かけのヤング率 (N/mm²), S:シーリング材形状率 (-)

G:横弾性係数 (N/mm²), σ:接面応力 (MPa), ε:圧縮ひずみ(-)

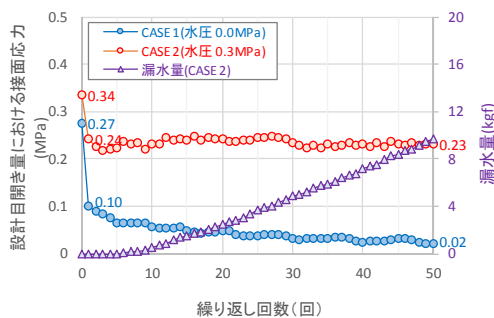


図-12 設計目開き量における接面応力

4. まとめ

本研究では、変状実態の把握、変状メカニズム・原因推定の整理、変状に応じた対策工の検討、耐久性の評価手法および点検手法等により、シールドトンネルの維持管理手法について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) シールドトンネルの構造は、継手形式、シーリング材、二次覆工の有無など、各年代に採用される構造は異なる。発生する変状はひび割れ、漏水

が多く、全体の変状のうち多くを占め、建設年次が古いトンネルに多い傾向である。

- 2) 漏水は非膨張性シーリング材を用いたトンネルで多く発生しており、漏水のうち6割程度は注意を要する規模であった。一方、水膨張性シーリング材を用いたトンネルでは、漏水は確認できるものの、その規模は小さい。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。
- 3) 二次覆工に発生した材質劣化によるひび割れを対象に実施した対策工について調査した結果、対策箇所自体は10年程度経過した時点においても健全な状態を保っていることが確認された。一方、対策工の周辺に新たな変状が発生する場合があります。トンネル全体の耐久性を向上させるには、シールドトンネルを構成する部材に求められる性能を踏まえた対策工の選定が必要となることが課題として明らかとなった。
- 4) 実現場における現地計測結果から、セグメント間の目地、二次覆工の目地等は温度による影響を受ける可能性が示唆された。また、温度変化により目地部が変化すると仮定した模型実験により、目開き量が繰り返し変化した場合、接面応力が低下し漏水の発生が確認され漏水発生メカニズムの一要因が明らかとなった。
- 5) シールドトンネルに必要な維持管理手法としては、漏水による影響を判断することが不可欠であり、加えて漏水に対しては経年劣化に伴うセグメントの耐久力に影響を及ぼす可能性があること、坑内環境の変化に伴う止水材の接面応力の変化といったセグメントの力学的な挙動等に対する影響が考えられる。それらのメカニズムをふまえたうえで判定区分等を検討する必要があることが明らかとなった。

今後は、シールドトンネルにおける点検・診断手法についてコンクリートの中性化や鋼材の腐食等、漏水以外の変状もふまえた体系化を目指し、あわせて構造全体での耐久性向上に資する手法について検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針，平成21年2月
- 2) 日本トンネル技術協会：セグメントシーリング材による止水設計手引き，1997.1

A STUDY ON MAINTENANCE OF SHIELD TUNNEL

Research Period : FY2013-2016

Research Team : Road Technology Research Group (Tunnel)

Author : ISAGO Nobuharu

ISHIMURA Toshiaki

KUSAKA Atsushi

MORIMOTO Satoshi

Abstract : 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. 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.

As a result, it was clarified that a countermeasure which was adopted to the tunnel against water leakage ten years ago is still healthy.

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