

シールドトンネルの耐久性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 2

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：日下敦、森本智、佐々木亨、石村利明

【要旨】

シールドトンネルの効率的な維持管理を実施する観点から、設計・施工段階および維持管理段階それぞれでの耐久性向上に関する考え方の提案が喫緊の課題となっている。本研究では、シールドトンネルにおける点検・診断手法の体系化をふまえつつ、構成部材の性能の評価および構造全体での耐久性向上に資する手法について提案を行うことを目標としている。構成部材の性能の評価手法については、既設シールドトンネルにおける観察や計測により、変状の実態を把握するとともに、季節的な温度変化等の環境変化の影響を把握した。加えて、変状と施工時データとの関連性を分析し、維持管理上の問題となる変状の発生メカニズムを解明した。また、変状事例として多数を占める漏水に関して、実トンネルにおける計測から明らかとなった目開き変動量を模擬した要素実験を行い、シールド材の漏水防止特性等を明らかにした。耐久性向上手法に関しては、構成部材の性能手法の成果等をもとに、環境変化等をふまえた変形傾向を整理し、変状原因推定方法として活用する方法を提案するとともに、維持管理上のリスクを低減するための計画・設計・施工・供用の各段階での留意点をとりまとめた。

キーワード：シールドトンネル、変状実態、変状メカニズム、耐久性向上

1. はじめに

シールド工法は都市部を中心にこれまで多くの共同溝に適用されているとともに、東京湾横断道路をはじめとする都市内の道路トンネルの建設時にも適用されている。これらシールド工法で建設されたトンネルにおいても、山岳トンネルと同様に供用後、セグメントのひび割れやうき・はく離、継手部の腐食、漏水等の変状が散見されている。シールドトンネルは、セグメントと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。トンネルの構造安定性や止水性能は、これらトンネルを構成する部材や材料、二次覆工の有無、トンネルが建設される地盤や周辺環境等の種々の条件等によって影響を受ける。

山岳トンネルにおいては、これまでに変状メカニズムや維持管理に関する多くの検討がなされ、これらの知見等に基づいて要領¹⁾・便覧²⁾が発出されている。

一方、シールドトンネルの変状メカニズムや維持管理に関する知見等も多くなく、統一された要領・便覧等がないのが現状である。今後、シールドトンネルの効率的な維持管理手法の確立にあたっては、上記構成部材等に求められる性能をふまえた耐久性向上手法の検討が必要となる。

本研究は、シールドトンネルにおける点検・診断手法の体系化をふまえつつ、①構成部材の性能の評価手法、②構造全体での耐久性向上に資する手法の提案を行うことを目標としている。そこで、①については、シールドトンネルの変状メカニズム推定のための数値解析を行うとともに、シールドトンネルの変状実態調査、変状と施工時データとの関連性の検討、観察や計測による季節的な温度変化等の環境変化によるシールドトンネルの挙動を調査した。また、変状事例として多数を占める漏水に関して、実トンネルにおける計測から明らかとなった目開き変動量を模擬した要素実験を行い、シールド材の漏水防止特性について検討した。②については、①の成果等をもとに、変状原因推定方法として活用する方法、維持管理上のリスクを低減するための計画・設計・施工・供用の各段階での留意点をとりまとめた。

2. 外力による変状メカニズム推定のための数値解析

2.1 数値解析の概要

数値解析は、外力による変状メカニズムを推定するための基礎資料とすることを目的に実施した。解析は、表-1に示す共同溝クラスのトンネルを想定し、図-1に示すようにセグメントを梁、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねでモデル化した。設定し

表-1 対象トンネル

項目	設定値
トンネル直径 D	5.45m
セグメント厚さ t	0.275m
セグメント幅 B	1.0m
セグメント分割数	6分割
セグメント継手構造	ボルト継手
リング継手構造	ボルト継手

表-2 設計荷重と設定諸定数

項目		設定値	
設計荷重 (土水分離)	土圧	2D (D=トンネル直径) 分の緩み土圧	
	水圧	頂部から17mの地下水位	
地盤反力係数 (MN/m ³)		20	
側方土圧係数 λ		0.5	
セグメント継手 回転ばね定数 (kN・m/rad)	正曲げ	離間前	∞
		離間後	2.57×10 ⁴
	負曲げ	離間前	∞
		離間後	6.27×10 ⁴
リング継手 せん断ばね定数 (kN/m)	半径方向	1.05×10 ⁶	
	接線方向	5.91×10 ⁶	

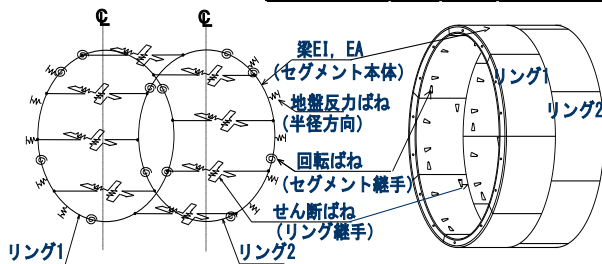


図-1 はり-ばねモデルの概要図

た荷重と諸定数は表-2 に示すとおりである。

解析は、基本条件のほか、表-3 に示すような供用段階、設計・施工段階における環境条件・材質劣化等による状況変化を想定し、それぞれ組み合わせたケースを実施した。解析条件の設定にあたっての状況変化は、供用段階においては圧密沈下や近接構造物・周辺地盤の改変等による土圧・水圧の増減を、計画・設計段階

表-3 解析条件一覧

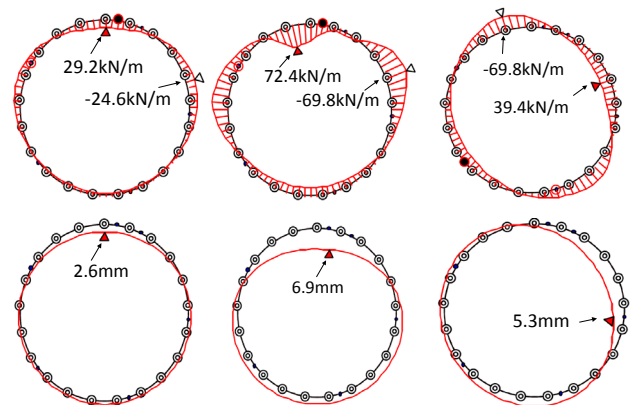
【供用段階における状況変化】			
NO.	荷重条件・構造条件の変化	想定した状況変化	解析上の変更値
1	基本条件	変化なし	-
2	偏土圧作用	トンネル上部の建築物等による偏土圧が作用	片側の側方土圧を1D (D=トンネル直径) 分増加
3	鉛直土圧増加	地盤沈下に伴って鉛直土圧が増加	鉛直土圧を1D分増加
4	鉛直土圧減少	地盤沈下に伴って鉛直土圧が減少	鉛直土圧を1D分減少
5	側方土圧増加	近接施工による側方からの土圧が増加	鉛直土圧の半分と、側方土圧を1D分増加
6	水圧増加	地下水位の上昇	水圧を1D分増加
7	水圧減少	地下水位の低下	水圧を1D分減少
8	地盤反力低下	裏込め注入材の劣化	トンネル右側部90度の範囲の地盤反力係数を1/2に低下
9	セグメント劣化	経年劣化によるセグメント強度の低下	セグメントの弾性係数を1/2に低下

【計画・設計段階における状況変化】			
NO.	荷重条件・構造条件の変化	想定した状況変化	解析上の変更値
1	基本条件	変化なし	-
2	土圧なし	実地盤条件と設計荷重との乖離	完成時に作用する土圧=0 (トンネルには水圧のみ作用)
3	土水一体	実地盤条件と設計荷重との乖離	設計荷重を土水一体の考え方で土水圧を作用
4	硬質地盤	実地盤条件と設定諸定数との乖離	地盤反力係数k=50, 側方土圧係数λ=0.35
5	軟弱地盤	実地盤条件と設定諸定数との乖離	地盤反力係数k=5, 側方土圧係数λ=0.55

においては設計荷重や諸定数の各設定値と実地盤条件とが不整合があった場合とした。

2. 2 解析結果

(1) 発生断面力と変形モード



(a) 基本条件 (b) 鉛直土圧増加 (c) 側方土圧増加

図-2 曲げモーメントと変形モード
(上段：曲げモーメント、下段：変形モード)

図-2 に供用段階における状況変化の代表的な例としてケース NO.1・3・5 における発生断面力(曲げモーメント)と変形モードを示す。図より、基本条件、鉛直土圧増加のケースは天端付近で正の曲げモーメントが最大となり、その付近が内側へ大きく変形しているのが分かる。一方、側方土圧増加のケースは右側壁部から肩部付近で正の曲げモーメントが発生し、右側壁部がから押しつぶされる状況となっている。これより、ある方向からの卓越した外力等が作用した場合、その方向からトンネル内側に断面変形する傾向にある。一般にコンクリート材料は引張強度が小さいことから、引張応力が生じる付近でセグメント縦断方向にひび割れが発生することが考えられる。したがって、トンネルの断面が変形し、トンネル内面が縮小する引張側となる箇所において、横つぶれの場合はトンネルの天端・底部に、縦つぶれの場合はトンネルの側部にセグメントの縦断方向の引張ひび割れが生じる可能性がある。

供用段階における状況変化、計画・設計段階における状況変化の土水一体の各ケースにおける発生断面力と MN 耐力曲線との関係を図-3、図-4 に示す。これより、供用段階の状況変化のみを想定した場合には MN 耐力曲線を超過するケースはない。一方、計画・設計段階において実地盤条件が設計荷重の考え方が土水分離ではなく、土水一体であった場合では、ほとんどのケースで MN 耐力曲線の範囲内の発生断面力となっているが、鉛直土圧増加、地盤反力低下が複合して発生するケースでは MN 耐力曲線を超過する結果となった。したがって、状況変化が重なった場合には MN 耐力曲線を超過する場合があることが分かった。

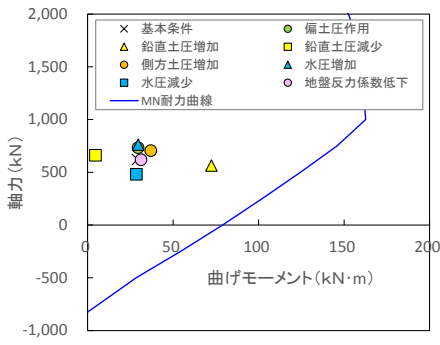


図-3 セグメント本体のMN耐力曲線と発生断面力(土水分離)

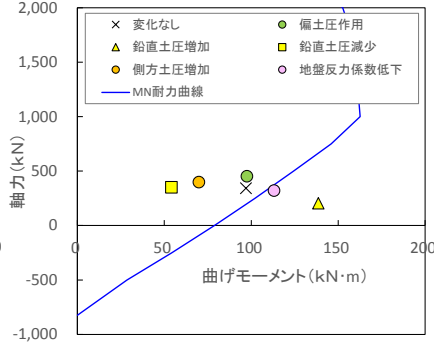


図-4 セグメント本体のMN耐力曲線と発生断面力(土水一体)

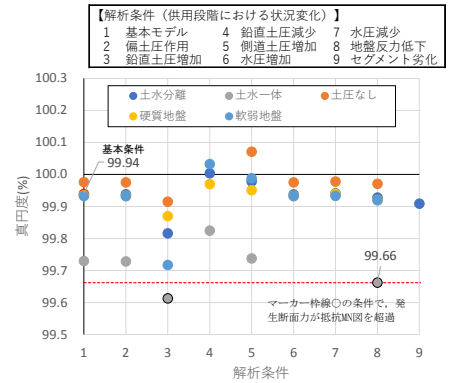


図-5 トンネル変形量に基づく真円度

(2) 維持管理上の目安例

次に、トンネルの断面変形の鉛直(天端~底部)、水平(側壁間)に着目して解析結果を整理する。これは、実際の維持管理において点検時等に得られる情報の一つとしてトンネル内空の測定値を想定したものである。図-5に供用段階、計画・設計段階における状況変化を組み合わせて実施したケースについて、下記で定義される真円度の結果を示す。

$$\text{真円度}(\%) = \left(\frac{\text{鉛直方向の変位量} - \text{側壁方向の変位量}}{\text{トンネル径}} \right) \times 100 + 100$$

ここで、真円度が100%未満の場合は横つぶれの状態
100%超の場合は縦つぶれの状態

図より、MN耐力曲線を超過しない解析条件のケースの真円度は概ね99.7%以上程度(真円に近い)となっている。一方、MN耐力曲線を超過する解析条件3、8は概ね99.66%程度以下の真円度となっていることが分かる。すなわち、MN耐力曲線の超過の有無のしきい値として概ね真円度が99.66%程度であると考えられる。この場合、今回の解析条件下での鉛直方向と側壁方向の変位量の差分が共同溝クラスの場合で約17mm以上となった場合にMN耐力曲線を超過する可能性がある。なお、道路トンネル断面クラスについても状況変化を考慮した解析を行った結果も概ね真円度が99.66%程度になるとMN耐力曲線を超過する結果が得られた。真円度のほか、MN耐力曲線を超過する

表-4 解析結果による各項目の目安例

項目	共同溝クラス (トンネル径5.45m)	道路トンネルクラス (トンネル径12.3m)
トンネル断面変形 (mm)	変形量(鉛直)	-8
	変形量(水平)	8
真円度 (%)	99.66	99.66
セグメントのひび割れ(mm)	0.2	0.2
継手の目開き(mm)	0.1	0.05

その他の項目を含めて整理した目安例を整理すると表-4のようになる。

(3) まとめ

供用後において周辺環境等の変化や圧密沈下等によってトンネルに外力が作用する場合や、設計時における諸定数の地盤条件との不整合等の場合に、セグメント本体の発生断面力がMN耐力曲線を超過することが確認された。この場合、トンネルの断面変形モードによってトンネル内面の引張側でセグメントの縦断方向にひび割れが生じる可能性がある。維持管理上の目安として、トンネルの断面変形が一つの目安と考えられた。

3. シールドトンネルにおける変状実態

3.1 調査方法

シールドトンネルの変状実態を把握するため、既往の文献や供用後の共同溝を対象に定期的実施された点検結果等をもとに、セグメントに発生する、ひび割れやうき・はく離、漏水等の変状について代表的な事例の収集を行い変状原因について整理した。また、継手構造の異なる条件として2トンネルの3区間(各区間概ね170m)を対象に、現地でのひび割れ調査や打音検査による、うき・はく離、漏水等の実態を把握した。表-5に変状実態を把握したトンネル諸元を示す。各シールドが通過する地盤は、各トンネルともにN値約10~40の洪積砂質土・沖積粘性土の互層が主体であり、

表-5 変状実態を把握したトンネル

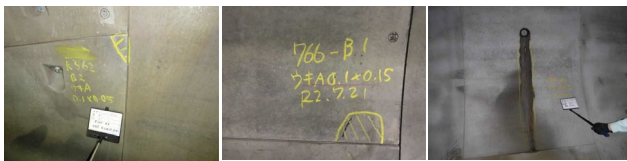
名称	完成年	調査延長(m)	土被り(m)	トンネル外径(m)	セグメント厚(mm)	セグメント幅(mm)	継手構造 (上段:セグメント間 下段:リング間)
A-1	2009	175	約12	3990	145	1400	曲がりボルト(凹凸なし)ピン継手
A-2	2009	175	約20	3990	145	1400	突合継手(パイプあり)ピン継手
B	2009	163	約12	3780	190	1300	曲がりボルト(凹凸あり)曲がりボルト(凹凸あり)

B トンネルの上部に N 値 10 以下の沖積層の砂質土が一部存在する。

3. 2 調査結果

(1) 確認された変状の種類と数

供用中における共同溝の 3 箇所調査によって確認された代表的な変状を写真-1 に示す。主な変状は、セグメントの隅角部・継手部・継手面のうき・はく離（欠け含む）および、注入孔等からの漏水のほか、ひび割れ、遊離石灰の析出、シーラ材のはがれ等が確認された。



(a)隅角部のうき (b)継手面のうき (c)注入孔からの漏水

写真-1 代表的な変状の例

図-6 に各トンネルにおいて確認された全ての変状について、うき・はく離、ひび割れ、漏水、その他に分類した変状数を示す。変状数には施工段階から概ね 10 年経過後までにセグメント損傷調査・点検等で確認された全ての変状を対象としており、これまでに補修等を行い既に回復した変状も含んでいる。なお、その他にはシーラ材のはがれ、ボルトの変形・破断がある。図より、各トンネルともに、うき・はく離が多く、B トンネルではひび割れも多い。図-7 に各トンネルにおいて確認されたすべての変状を対象に、変状の種類とセグメント箇所を示す。本調査で分類・整理した変状の種類は図-8 に示した。A-1 トンネル・A-2 トンネルでは隅角部のうき・はく離の変状が多く、他にリング継手面のうき・はく離、漏水が確認された。一方、B トンネルでは、セグメント継手部、リング継手部でうき・はく離、ひび割れの変状が多い。また、セグメントピース

ス別では K セグメントに隣接する B セグメントに変状が多い。これは、1 リングの最後に挿入・組立する際に隣接する B セグメントに一時的に何らかの荷重が作用することで変状が発生すると考えられる。一方、B トンネルでは、K セグメントに隣接する B・C セグメント以外の A1・A3 セグメントにおいても変状が確認された。なお、B トンネルで変状数が多いのは継手構造として凹凸のある継手面としていることから、隣接セグメントとの接触状況等によってコンクリートに引張力が一時的に作用したためではないかと推察される。また、漏水については土被りが大きく地下水位が高い A-2 トンネルが他のトンネルよりも変状数が多い。

(2) 変状と施工時データの関連

図-9 に A-1・B トンネルで確認された変状と施工時データとの関係を示す。

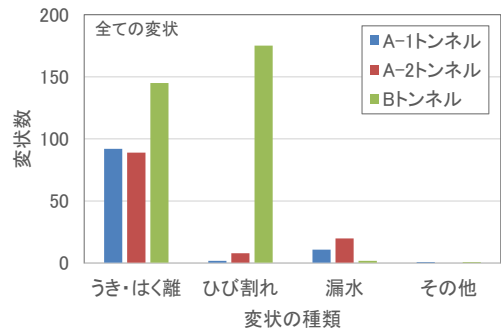


図-6 各トンネルで確認された変状数

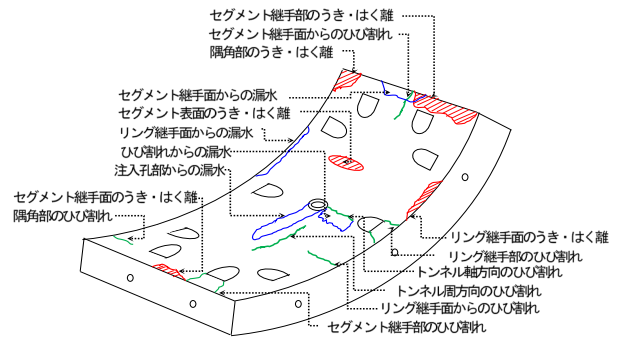


図-8 変状の種類

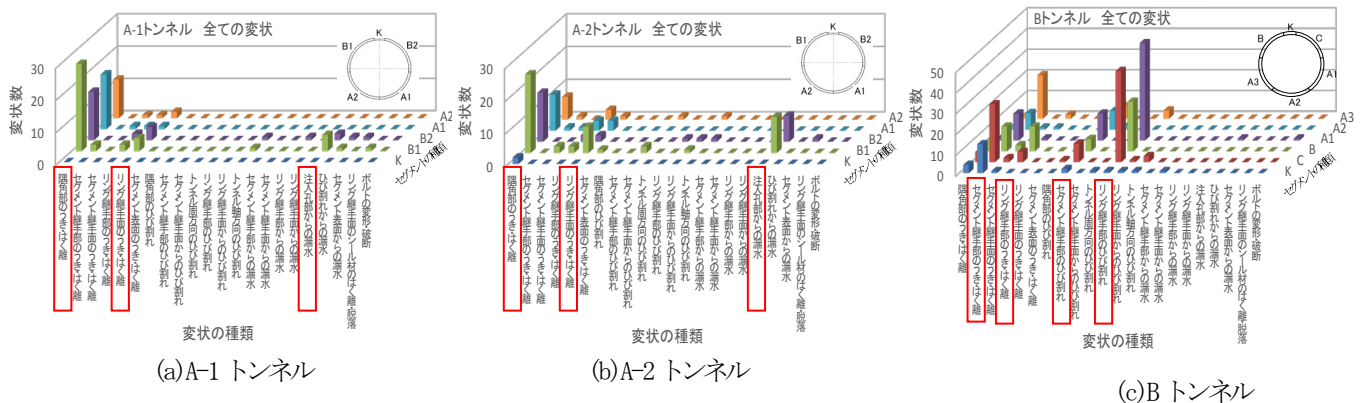


図-7 確認された変状の種類とセグメントピース位置

図中の施工時データは、シールドの姿勢、シールドとセグメントリングとの位置関係の指標となる掘進データ（ピッチング、テールクリアランス（Aトンネルのみ）、ジャッキストローク差（右-上）と工事完了後の出来形（真円度）とした。各トンネルにおいて、比較の変状数が多く発生したリング周辺（赤色・点線囲み）に着目して考察する。A-1 トンネルは施工完了後のセグメント損傷は「無し」との報告があったことから、施工完了後から約 10 年間に発生した変状として整理した。図中（a）、

（b）のすべての着目点で関連性は認められないが、各トンネルともに施工時データの変化が大きく、または正負が逆転するような急激に変化する付近で変状数が多い傾向にある。出来形（真円度）についても同様な傾向がある。なお、A-2 トンネルについても同様な傾向が確認されている。また、

（b）より、施工完了後と施工完了後～約 10 年に確認された変状数ともに、上記施工時データの変化が顕著な付近で多い傾向にある。したがって、施工時のみならず、供用後においても施工時データの変化が大きい付近で時間の経過とともに変状が顕在化する可能性があると考えられる。ただし、それぞれの調査・点検時における点検方法・点検者の技術レベル等に違いにより、変状の確認時期の誤差が生じている可能性があることに留意する必要がある。例えば、A トンネルでの隅角部のうき・はく離等はセグメント組立時等において他の資機材等との突発的な接触が主な要因として考えられ、施工時に発生していた可能性も考えられる。

(3)まとめ

シールドトンネルにおける変状実態調査により以下のことが明らかとなった。

- ①Kセグメントと隣接するセグメントに変状が発生しやすく、継手構造によっても発生変状数に違いがあることが分かった。
- ②シールド掘進の施工状況によって、施工時でのセグメント損傷（変状）が発生するだけでなく、供用後においてもシールドの姿勢制御やシールドとセグメントリングとの位置関係などの施工時データが特異な値を示した周辺で変状が発生する可能性がある。

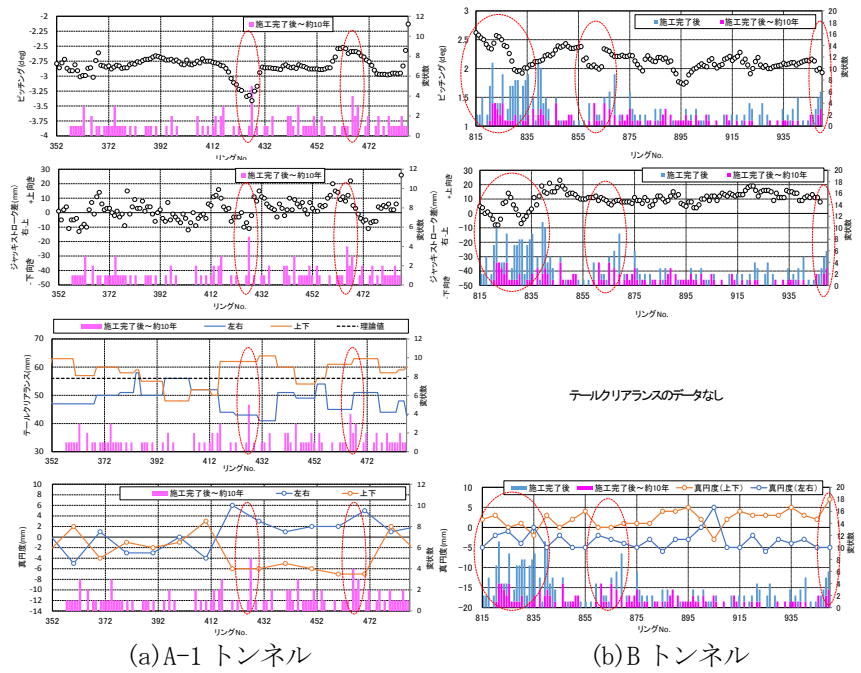


図-9 施工時データと各リングで確認された変状数の関係

4. シールドトンネルの季節変動等に関する挙動調査

4. 1 調査方法

シールドトンネルの基礎的な変形挙動を把握するため、表-6に示す2箇所共同溝を対象に現地計測を実施した。図-10に標準断面図を示す。Cトンネルは、最大土被り27m程度であり、シールドが通過する地盤は沖積粘性土または洪積砂質土が主体である。継手構造は直ボルトタイプを用いており、二次覆工は施工されていない。Dトンネルは、最大土被り25m程度、シールドが通過する周辺地盤は沖積粘性土または洪積砂質土が主体である。二次覆工はRC構造で厚さ200mm、打設スパン長さ9mである。トンネル内は占有物件の配置の都合等により、厚さ250mmの床版が水平方向に設置され、上下二層構造となっている。計測機器は図-11に示すように、覆工の周方向や縦断方向の挙動を把握するため、Cトンネルは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、Dトンネルは二次覆工の目地間、ひび割れに亀裂変位計を設置した。

表-6 現地計測を実施したトンネル

名称	完成年	トンネル延長 (m)	トンネル外径 (m)	セグメント厚 (mm)	セグメント幅 (mm)	二次覆工 (mm)
C	2003	1100	5.45	275	1000	省略型
D	1997	650	7.85	325	1000	200

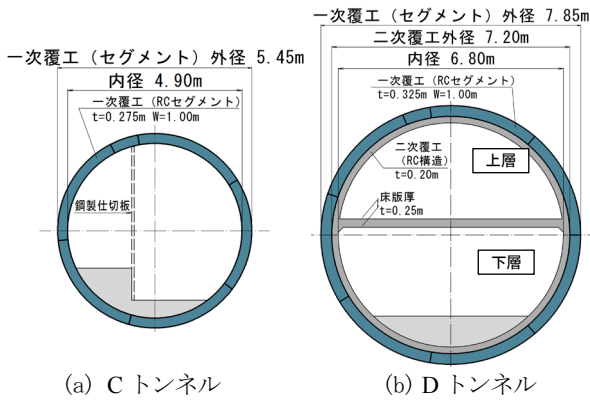


図-10 標準断面図

また、トンネル内環境を把握するための温・湿度計の設置、セグメントもしくは二次覆工に温度計をトンネル内面から 5cm 程度の深さに設置した。

4. 2 調査結果

シールドトンネルの季節変動等に関する挙動調査を実施した 2 トンネルの計測結果³⁾を以下に示す。

(1) C トンネルにおける計測結果

図-12 に C トンネル内の温度・湿度の変化を示す。トンネル内の温度は、1 年の周期で変化しており、夏季で高く、冬季で低くなる。年間を通じた温度差は 8°C 程度である。湿度は夏季の数ヶ月間は多湿となる傾向にある。図-13 にトンネルの断面変形（水平・鉛直変位）を示す。水平変位、鉛直変位ともに、温度とともに変動しており、年間を通じた変位差は、水平・鉛直変位ともに 3mm 程度である。図-14 にリング間の目開き量を示す。リング間の目開き量も温度の変化に伴って変動している。年間を通じた変位量は、天端と脚部で異なり、天端で 0.2mm 程度、脚部で 0.1mm 以下と小さい。なお、セグメント間も同様に温度とともに変化していたが、年間の変位量は 0.1mm 以下と非常に小さい値であった。

(2) D トンネルにおける計測結果

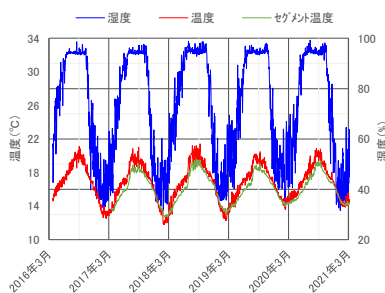


図-12 トンネル内の温度・湿度 (C トンネル)

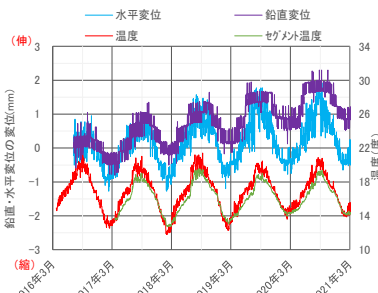


図-13 トンネルの断面変形 (C トンネル)

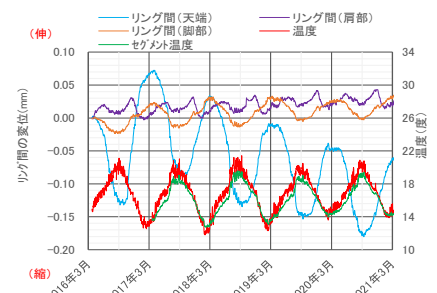
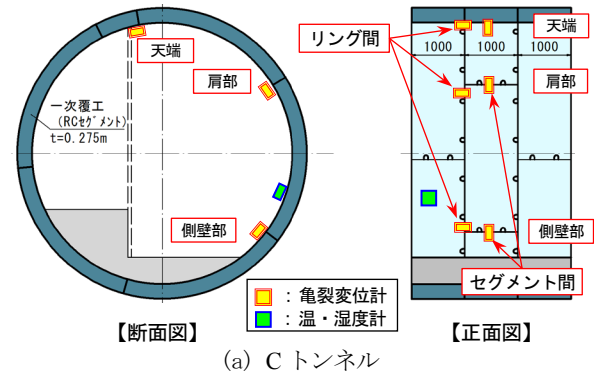
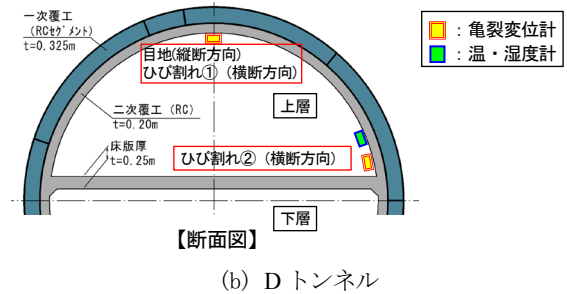


図-14 リング間の目開き量 (C トンネル)



(a) C トンネル



(b) D トンネル

図-11 計測機器の配置図

D トンネル内の温度・湿度の変化は、C トンネルと同様に 1 年の周期で変化しており、年間を通じた温度差は 8°C 程度であり、夏季に湿度が高い結果であった。トンネルの断面変形（水平変位）についても C トンネルと同様な傾向であり、温度変化に伴う年間を通じた変位量は 3mm 程度であった。図-15 に横断目地間の開き量とひび割れ幅を示す。目地間の開き量・ひび割れ幅ともに他の測定値と同様に温度の変化とともに変化しており、年間を通しての変化量は、目地部の目開き量は 1mm 程度、ひび割れ幅は 0.5mm 程度である。

(3) 温度変化に伴う覆工の挙動

(1) で示した結果をふまえ、温度差に伴うコンクリートの伸縮量の推定値として、温度差、部材長、熱膨張係数の積から算出できると仮定し、トンネル内の温度変化とコンクリートの伸縮量の関係を整理する。ここでの部材長は、目地等の方向に応じて使い分けて、縦

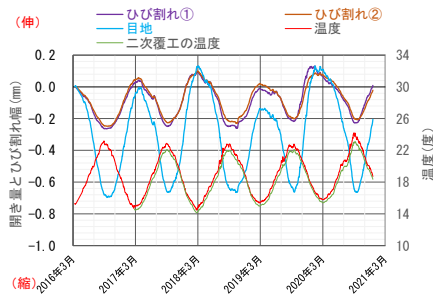


図-15 目地間の開き量とひび割れ幅 (D トンネル)

断方向の部材長さはセグメント幅もしくはスパン長、周方向の部材長さはセグメントの弧長、トンネルの断面変形の部材長さはトンネル周長と仮定した。熱膨張係数はRC 構造物の値 ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) とした。

図-16 に C トンネル内の温度とセグメント間の目開き量の関係を示す。セグメント間の目開き量は、温度の変化と傾向が概ね一致する関係にあるものの、その傾きは温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し小さい。図-17 に温度とリング間の目開き量の関係を示す。リング間の目開き量は、肩部・脚部においては温度の変化と傾向が概ね一致する関係にある

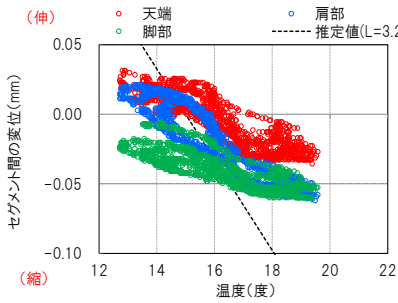


図-16 温度とセグメント間の目開き量の関係 (C トンネル)

ものの、その傾きは温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し小さい。一方、天端においては温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し大きい結果となった。これは、温度変化によるコンクリートの伸縮に加え、他の要因として、伸縮方向に対し角度を有する B セグメントと K セグメント間の目開き量が軸力の作用に複雑な挙動として現れている可能性が考えられる。図-18 に D トンネルの温度と目地間の開き量・ひび割れ幅の関係を示す。目地間の開き量とひび割れ幅は、温度の変化と傾向が

概ね一致する関係にあることがわかる。また、その傾きは、熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量と比較し、ひび割れ幅では小さいものの、目地間の開き量ではおおむね同程度となった。これは、温度変化により発生するひずみは、縦断方向は横断目地に集中し、横断方向は複数あるひび割れ等に分散するためであると考えられる。

上記と同様にトンネルの断面変形について熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量との比較を行った。図-19、図-20 に各トンネルの結果を示す。図中の推定値はトンネル断面の周長として算出した。両図より、温度の変化によりトンネル断面も変化しており、その変形量はコンクリート材料の熱膨張係数と部材長の積と概ね近似していることが分かる。

2. で示した表-4 のセグメントのひび割れ、継手の目開きと上記の計測結果を比較すると、目安を超える値が確認されたが、ほぼ 1 年の周期で繰り返し変化の挙動を示しており、大きな変化も認められないことから、C・D トンネルでは外力等が作用している状況ではないと判断される。

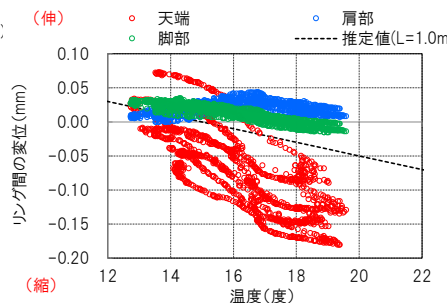


図-17 温度とリング間の目開き量の関係 (C トンネル)

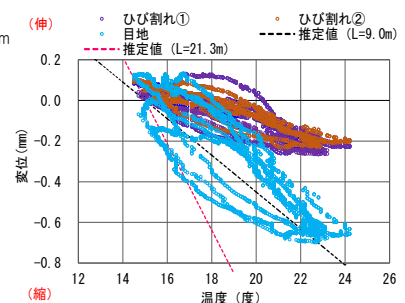


図-18 温度と目地間の開き量・ひび割れ幅の関係 (D トンネル)

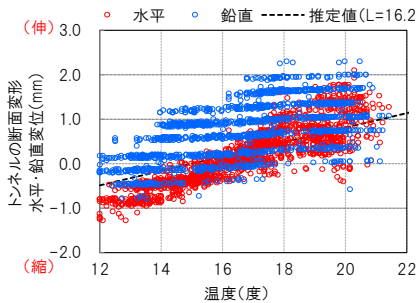


図-19 温度とトンネルの断面変形の関係 (C トンネル)

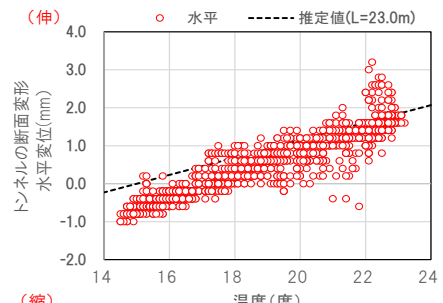


図-20 温度とトンネルの断面変形の関係 (D トンネル)

(4)まとめ

シールドトンネルにおける挙動調査により以下のことが明らかとなった。

①トンネル内は1年の周期で温度が変化し、それに応じてセグメント間の目開き量、二次覆工の目地間の開き量やひび割れ幅、トンネル断面が伸縮する挙動を示す。

②縦断方向の目地間の目開き量は、熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量と同程度となる。

5. シールドトンネルの止水性能

5.1 研究方法

シールドトンネル内への漏水は、トンネル全体の劣化を促進される要因となるため防止する必要がある。ここでは、セグメントピース間の止水性を確保するためのシール材に着目して、シール材の耐久性に関する実験、シール材の漏水に関する実験により止水特性の把握を行った。

(1) シール材の耐久性に関する実験

3.で実施した現地計測結果をふまえ、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要素実験を実施し、材料の耐久性の観点から漏水の発生への影響を検討した。図-21 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、帯層等から構成される。計測は、変位計による目開き量、圧力計による界面応力を測定した。本実験においては、直径が12mのトンネルを対象に、均等に8分割したRCセグメントを想定し4.71m（セグメント継手間の弧長）と仮定し、繰り返し変化する目開き変化量は1.0mm（温度変化量20℃程度）と、1.5mm（温度変化量30℃程度）とした。

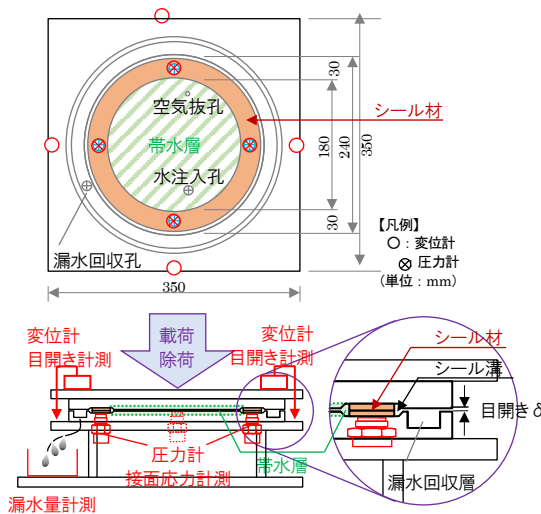


図-21 シール材の実験装置の概要

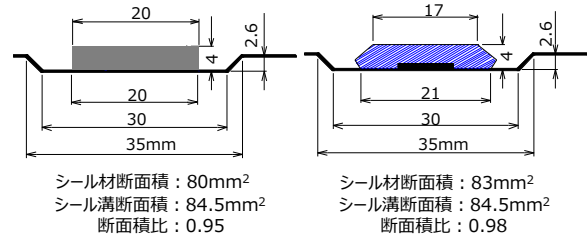
表-7 シール材の耐久性実験ケース一覧

ケース名	シール材の種類	水圧 (MPa)	目開き変化量 δ (mm)	設計目開き量 (荷重前) δ_1 (mm)	目開き量 (荷重後) δ_2 (mm)	荷重速度 (mm/min)	繰返し回数 (回)
1-1	非膨張	0.0	1.0	2.2	1.2	1.0	50
2-1、2-2、2-3		0.0	1.0	2.2	1.2	0.5	50
3-1、3-2 ※1		0.3	1.0	2.2	1.2	0.5	50
4-1		0.0	1.5	2.2	0.7	1.0	50
5-1、5-2、5-3		0.0	1.5	2.2	0.7	0.5	50
6-1、6-2 ※1		0.3	1.5	2.2	0.7	0.5	50
11 ※2	膨張性	0.0	1.0	2.2	1.2	0.5	50
12 ※2※3		0.3					
13 ※2※3		0.3					

※1: 水圧は δ_1 の状態で作用

※2: 膨張率3倍(目開き量(初期)の状態、界面応力が一定になるまで養生した後に繰返し荷重を実施)

※3: 50回の繰返し荷重後、目開き量を拡大し、漏水状況を確認



(a) 非膨張性シール材 (b) 膨張性シール材

図-22 シール材・シール溝の形状寸法

実施ケース一覧を表-7に示す。実験は、図-22に示した非膨張シール材および膨張性シール材の2種類のシール材を対象に、初期の設計目開き量に設定した後、目開き変化量の繰返し荷重を50回実施した。荷重条件は、圧縮試験機に治具を設置し荷重・除荷ともに0.5mm/minの速度を基本として、荷重速度による影響を確認するため、ケースによっては1.0mm/minの速度でも実施した。なお、繰返し荷重速度は0.5~1.0mm/分で1ステップの時間が数分程度であるため、1年の温度変化を想定した実際の時間とは異なる。なお、ケース12・13については、繰返し荷重実験が終了後、目開き調整用のボルトを手動により徐々に緩めながら目開き量を拡大し、漏水状況を確認した。

膨張性シール材の場合の実験手順を図-23に示す。実験手順は、シール材を実験装置に設置後、組立前の目開き δ_0 (【A₀】) から設計目開き量 δ_1 (【A₁】) まで圧縮試験機により圧縮し、ボルトで固定した。その状態を保持しながら試験機から取り外し、低压(約0.01MPa)で水膨潤させる。シール材の界面応力が収束(【A₂】)した後に実験装置を圧縮試験機に設置(【B₀】)し、目開き

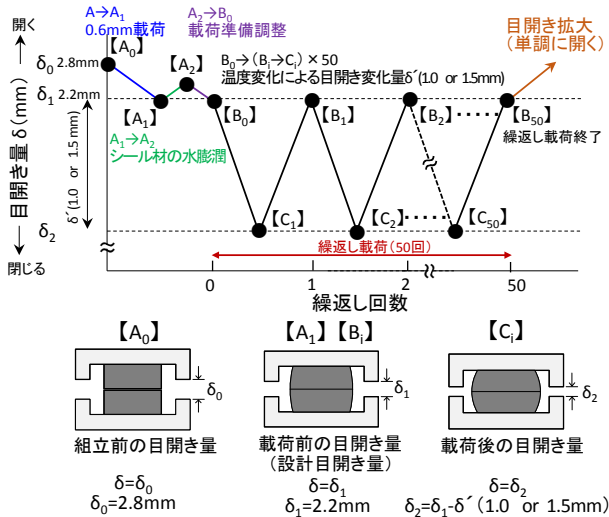


図-23 実験ステップの模式図 (膨張性シーラ材の場合)

変化量 δ' を載荷 (【C_i】) する繰返し載荷を50回実施した。なお、非膨張性シーラ材の実験手順は、図中の【A₁】【A₂】が省略されることになる。

シーラ材の設計は、シーラ材が変形し弾性反発力により発生する界面応力を算出し、その値と水圧とを比較して止水性について照査する一般的な考え方⁴⁾にもとづき行った。この場合、本実験での初期のセグメント組立て時を想定した設計目開き量2.2mmにおける界面応力は非膨張性シーラ材・膨張性シーラ材ともに0.30MPaとなり、その状態から1.0mm載荷時は0.89MPa、1.5mm載荷時は1.26MPaとなる。

(2) シーラ材の漏水に関する実験

シーラ材の漏水に関する実験は、膨張性シーラ材を対象とした表-7中のCASE12・13の2ケース実施した。実験は、(1)の耐久性に関する実験が終了した後、シーラ材の目開き量を設計目開き量の位置から徐々に拡大させて、漏水が発生する目開き量を把握した。

5. 2 研究結果

(1) シーラ材の耐久性に関する実験

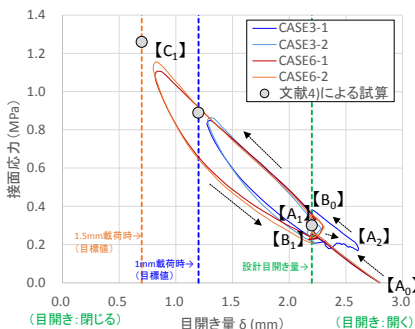


図-24 設計目開き量と界面応力の関係 (水圧あり) (非膨張性シーラ材)

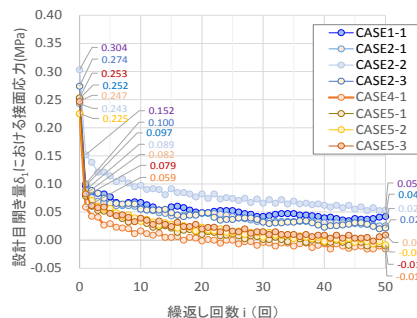


図-25 設計目開き量【B₁】における界面応力 (水圧なし) (非膨張性シーラ材)

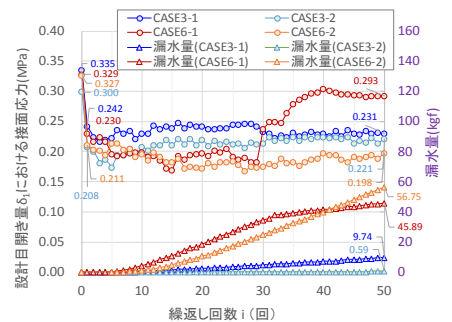


図-26 設計目開き量【B₁】における界面応力と漏水量 (水圧あり) (非膨張性シーラ材)

1) 非膨張性シーラ材の結果⁵⁾

図-24に水圧ありのCASE (CASE3、6) について、組立て前【A₀】から目開き変化量 δ' (1.0mm or 1.5mm) の繰返し載荷1回目【B₁】までの界面応力と目開き量の関係を示す。界面応力は、シーラ材の変形とともに上昇し、設計目開き量 δ_0 まで載荷した際の値は文献⁴⁾の考え方に基づき試算した値と同程度となった。なお、0.3MPaの水圧を作用させたCASEの場合も同様な傾向であった。ただし、水圧ありのCASEの【B₀】【C₁】【B₁】の各状態の界面圧力は水圧なしと比較して若干高い値であった。この違いは、水圧ありの場合、帯水層内に0.3MPaの水圧を作用させたことにより、シーラ溝内に封入されているシーラ材が変形することによる自封効果⁴⁾で界面応力が増加したと考えられる。

図-25、図-26に水圧なし・ありのCASEについて、目開き変化量の繰返し載荷を50回まで行った際の設計目開き量 δ_1 (【B_i】) における界面応力の変化を示す。すべてのCASEともに、1回目の載荷によって界面応力において全ケースともに大きく低下し、その後、徐々に低下しながら収束する傾向となる。

水圧なしの場合は、50回の繰返し載荷終了時においてゼロ付近まで低下している。一方、水圧ありの場合、上下の変動を繰り返しながら0.22~0.29MPa程度で推移した。目視による漏水状況の観察では、CASE3では両CASEともに漏水が発生しないか、もしくは10回程度の繰返し載荷あたりから若干の漏水が確認された。一方、CASE6では両CASEともに7回目~10回目程度の繰返し載荷あたりから漏水し、CASE6-1においては約30回目の繰返し載荷付近で界面応力が急激に上昇し、その後の漏水量が減少した。

目開き変化量 δ' の違いを見ると、 δ' 1.0mmに比較してCASE6の δ' 1.5mmのほうが界面応力の値が低

くなっており、また、漏水量も多いことから、目開き変化量が大きいほど、繰返し载荷による材料特性の変化が大きいと考えられる。

2) 膨張性シール材の結果

図-27にシール材を設計目開き量 δ_1 に圧縮した後の水膨潤時の接面応力の経時変化を示す。水膨潤時の水圧は低圧(約0.01MPa)で帯水層内へ水を注入した。各ケースの接面応力は、約0.2MPaから徐々に増加し、シール材が膨潤することにより約150日~180日程度で収束していることが分かる。シール材の水膨潤時の接面応力の増加率は約2~3倍程度であった。

図-28にシール材を圧縮する前から繰返し载荷1回目までの接面応力とシール材の変形量の関係を示す。各段階での接面応力の変化は水圧なしの場合は同じ傾向であった。全CASEともに設計目開き量まで载荷した際の接面応力の値は約0.2MPaで、文献⁴⁾で試算される値と同程度となった。ただし、シール材が水膨潤させることで【A₁】時に接面応力が0.55~0.65MPaまで増加する。その後、【C₁】までの载荷により各ケースの接面応力は最大約1.9~3.6 MPaまで増加後、目開きが δ_1 (【B₁】)まで戻った段階で約0.6MPaまで低下する。なお、各ケースともに载荷時に目標値の目開き変化量 δ_2 には至らなかったが、文献⁴⁾で試算される接面応力に近い値を示した。

図-29に、その後繰返し载荷を50回まで行った際の各段階の設計目開き量 δ_1 (【B₁】)における接面応力の変化を示す。図からは50回の繰返し载荷を行うものの、繰返し载荷終了時点における接面応力は目開き変化量 δ_1 が1mm (CASE11, CASE12)の場合で約0.53~0.57 MPa、 δ_1 が1.5mm (NO.13)の場合で約0.5MPa程度と、全CASEともに高い接面応力を維持し、漏水の発生は無かった。これにより、非膨張性シール材と比較する

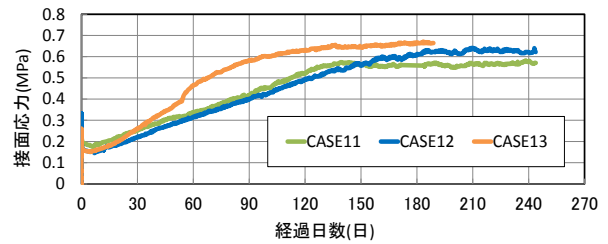


図-27 水膨潤時のシール材の接面応力

と膨張性シール材は高い止水性が確保されることが確認できる。

(2) シール材の漏水に関する実験

CASE12, CASE13を対象として50回の繰返し载荷終了後、設計目開き量 δ_1 の状態での0.3MPaの水圧を保ったまま、徐々に目開きを拡大した。図-30に目開き拡大時の目開き量と接面応力との関係を示す。目開き拡大前の接面応力は約0.6 MPaであったが目開き量の拡大とともに低下し、目開き量約3.2mmで接面応力がほぼゼロまで低下したが漏水は確認されなかった。CASE13についてもCASE12と同様な挙動を示しており、設計目開き量の2倍程度の目開き量4.5mmまでは漏水は確認されず、以降の漏水が発生している状態においても接面応力の平均値は約0.05MPa程度であった。その後、目開き量の拡大に応じて漏水量の増加が認められた。

シール材の止水の考え方は、ガスケットの密封の原理(パッキン理論)に基づき、接面応力が作用水圧以上であれば漏水は生じないとされている。文献⁴⁾においてもシール材の実験により妥当性が示されている。しかし、本実験においては、非膨張性シール材・膨張性シール材ともに接面応力以下となった状態においても漏水が発生しなかった。この要因としては、シール溝端部でシール材の変形を抑制することにより、文献⁶⁾で示されている「閉塞効果」と同様な効果が生じたことが一因と考えられる。

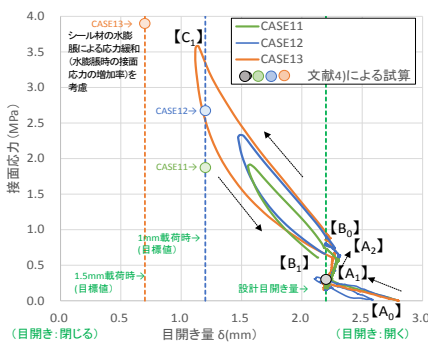


図-28 目開き量の変化量と接面応力との関係(膨張性シール材)

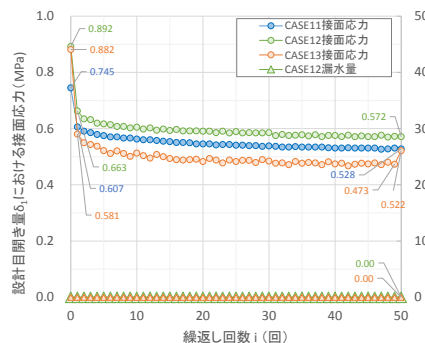


図-29 目開き変化の繰返し回数と設計目開き量【B₁】における接面応力の関係(膨張性シール材)

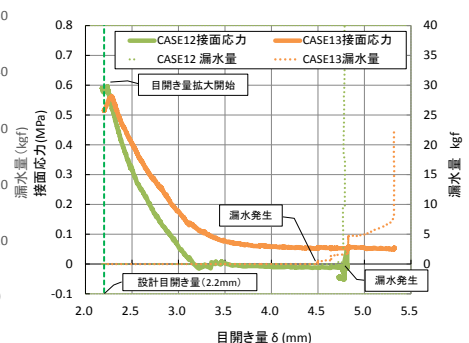


図-30 目開き量と接面応力・漏水量の関係(膨張性シール材)

以上より、適切な設計・施工のもとで膨張性シール材を適用することによりセグメント間の目開き量が設計目開き以上になった場合においてもシール材の止水性能は確保されることが分かった。

(4)まとめ

本実験条件下におけるセグメントシール材の要素実験により以下のことが明らかとなった。

- ①セグメント目地部の目開き量が繰り返し変化することによって、シール材の材料特性が変化する。繰り返し変化量が大きいほどその変化は大きい。
- ②非膨張性シール材は、繰り返して目開き量が変化することで材料特性が変化し界面応力が低下し、漏水に至る可能性がある。
- ③膨張性シール材は、繰り返しの目開き量の変化により材料特性が変化し界面応力が低下するが、本実験条件の範囲では界面応力の低下についての顕著な差違は認められず、非膨張性シール材と比較すると高い止水性が確保され、漏水しにくい。
- ④膨張性シール材の場合、目開きが設計目開きの2倍程度までは止水性が確保される。
- ⑤シール材の界面応力が水圧を下回る場合においてもシール材の自封効果、閉塞効果等により漏水しない場合がある。

6. シールドトンネルの構成部材に求められる性能に対する評価手法

(1)シールドトンネルの構造安定性

数値解析結果より、シールドトンネルの維持管理において、シールドトンネルの構造の安定性を評価する方法の一つとしてトンネルの変形量等を把握することを示した。

シールドトンネルのセグメント設計は、許容応力度に基づいて実施されることが多いことから、これらの目安値を超過しても直ちにトンネルの構造安定性を失うことはないが、維持管理を行ううえでのひとつの目安となると考えられる。ただし、実際のトンネルは施工完了時において、セグメントへのひび割れの発生、トンネルの変形が生じている可能性があるため、合理的な維持管理を行ためには初期段階でのトンネル状態を詳細に把握するとともに、供用後における点検等により進行性を把握することが重要であると考えられる。また、トンネル内の環境条件の変化により、ひび割れ幅やトンネル断面の変形状態が季節により異なることがあるため、評価にあたっては温度による影響の程度を考慮することや、所要の精度で継続的な変化を把握

するためには同季節での点検・調査を行って行く必要がある。

(2)セグメントシール材の止水性

シール材の繰返し載荷による要素実験より、繰り返して目開き変化することで材料特性が劣化するものの、膨張性シール材は高い界面応力を維持するが可能であり、十分な止水性が確保されることが確認された。また、目開きが設計目開き量以上に拡大した状態においても止水性が確保されることが分かった。ただし、非膨張性シール材は止水性能が低下するため、実トンネルにおいては、セグメントの継手面等からの漏水の有無について把握することが重要である。

7. シールドトンネルの耐久性向上手法

シールドトンネルの維持管理の現状をふまえ、2.～5.までの成果、文献等を参考に、変状発生時期と主な要因、トンネルに発生している変状状態から変状原因を推定する方法を整理した。さらに、維持管理上のリスクを低減するための計画・設計・施工・供用の各段階での留意点をとりまとめた。

(1)変状の発生時期と主な要因

文献・変状実態調査等をもとに、シールドトンネルに変状が発生する時期と主な要因を表-8に整理した。変状の発生時期は、施工前（セグメント製作時・保管時・運搬時～組立前）、施工時（セグメント組立時・シールド掘進時）、供用後の3つに分類することができる。各段階で発生する変状の主な要因は、施工時にはセグメント組立時、掘進時等における一時的な施工時荷重が、供用後に作用土圧の変化、止水材の経年劣化による漏水等が考えられる。

表-8 トンネルに発生する変状時期と主な要因

時期	主な要因
施工前	製作時 ・養生不足による温度応力の発生 ・所要強度発現前の脱型によるセグメントの自重
	保管時・運搬時 ・不適切な取扱い（積上げ・吊上げ） ・不適切な運搬 ・長期保管時の環境（温度）変化
施工時	セグメント組立時 ・不適切な取扱い（把持・隣接セグメントの接触） ・既設組立てリングの変形に伴う拘束 ・無理なセグメント挿入による応力集中
	掘進時 ・過大なジャッキ推力 ・過大なテルブラシ圧 ・過大なグリス圧 ・シールドテル内におけるセグメントとシールドとの擦り ・テル脱出時におけるトンネル浮上りに伴う継手部等への応力集中
供用後	・作用土圧・水圧の変化 ・トンネル内の環境（温度）変化 ・止水材（シール材）の経年劣化による漏水 ・裏込め注入材の経年劣化・流出等による地盤の拘束状況の変化 ・継手部の材質劣化（さび・腐食）による継手強度・剛性の変化

(2) 変状状態から変状原因を推定する方法

文献7、変状実態、数値解析結果等を参考に、主に発生する「ひび割れ」、「うき・はく離」、「継手部の変形・目違い・目開き」、「漏水」毎に発生時期と推定される変状の発生要因等についてフロー図を作成した。「ひび割れ」、「うき・はく離」のフロー図の例をそれぞれ図-31、図-32に示す。図より、各変状が想定される機会は、発生時期が供用段階よりも施工段階が多いことが分かる。変状が発生する要因として考えられるのは、圧密沈下等が生じる地盤条件の場合や供用後のトンネル周辺での近接施工、トンネル設計時における諸定数の各設定値と実地盤条件とが不整合が考えられる。なお、「材質劣化」、「漏水」については、セグメント本体・継手部・シール材・注入孔逆止弁等の材料が経年劣化することで生じると考えられる。

(3) 耐久性向上を図るための留意事項

シールドトンネルの維持管理における現状をふまえ、現状認識・課題点と具体的な耐久性の向上を図っていくための留意事項を表-9に整理した。今後のシールドトンネルの合理的な維持管理を行っていくための主な留意事項として下記等がある。

各段階において同様な点検方法、同レベルでの点検により変状展開図等の作成とともに、個別の変状ごとに変状の進展が確認できるような個別な記録を行うことが重要であると考えられる。また、発生する変状と施工時データとの関連があると考えられることから、シールド掘進時における施工時データを維持管理に活用できるようにすることが必要である。とくに、シールド姿勢に関するデータ、シールドとセグメントリングとの位置関係の指標が重要であると考えられる。

8. まとめと今後の課題

本研究により、シールドトンネルに関する変状・維持管理に関する文献、既設トンネルにおける観察や計測・変状実態等を把握するとともに、耐久性向上の検討を行った。

構成部材の性能の評価手法については、変状の実態を把握するとともに、季節的な温度変化等の環境変化の影響を把握した。また、変状と施工時データとの関連性を分析し、維持管理上の問題となる変状の発生メカニズムを解明した。また、目開き変動量を模擬した要素実験により、シール材の漏水防止特性等を明らかにした。耐久性向上手法に関しては、構成部材の性能手法の成果等をもとに、環境変化等をふまえた変形傾向を整理し、変状原因推定方法として活用する方法を

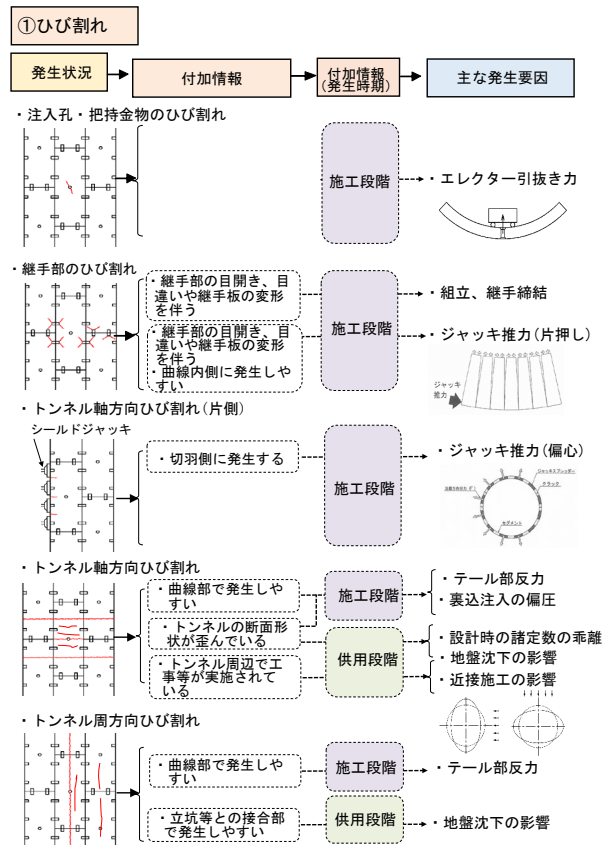


図-31 ひび割れの変状原因推定のためのチャート図

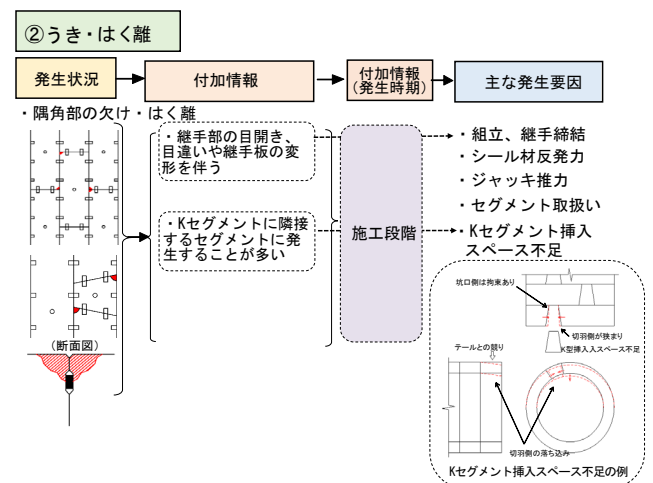


図-32 うき・はく離の変状原因推定のためのチャート図

提案するとともに、維持管理上のリスクを低減するための計画・設計・施工・供用の各段階での留意点を取りまとめた。

今後は、維持管理段階へ引き継ぐべき施工時情報の体系化や、点群データ等の診断への活用方法について検討を行うことが重要である。

表-9 耐久性向上に向けたシールドトンネルの維持管理上の課題点と留意事項（案）

段階	項目	現状認識と課題点	留意事項
計画・設計段階	設計荷重の設定	・軟弱粘性土中のトンネルの場合、想定外の荷重等がトンネルに付加土圧として作用することがある	・設計荷重の設定に必要なトンネル掘削地盤および周辺地盤に対する十分な調査の実施と、供用後におけるトンネル状況の把握
	地盤の諸定数の設定	・設計時に使用する地盤の諸定数が適切に設定されていない場合、セグメント構造が過小・過大となることがある	・地盤の諸定数の設定に必要なトンネル掘削地盤および周辺地盤に対する十分な調査の実施と、供用後におけるトンネル状況の把握
	トンネルの線形計画	・トンネルの線形が急勾配・急曲線等の場合、トンネル施工時にシールドとセグメントとの隙間のテールクリアランスが確保できず、セグメントに過大な荷重が作用してうき・はく離、ひび割れ等の不具合が発生することがある	・シールドとセグメントとの競り防止のための、急曲線施工の回避・平面曲線と縦断勾配変化点の重複の回避 ・立坑とトンネル本体およびトンネルが接続する箇所等での漏水等がトンネル全体へ流出しないような縦断勾配の考慮、漏水処理方法の適用
	セグメント・継手構造・シールド材	・セグメント構造や継手構造によってはシールド掘進時・供用後にセグメント損傷の不具合・変状が発生する可能性がある ・シールド材の種類によってはトンネル内の温度変化等に応じて生じる目聞き量の繰返し変化によって止水機能が低下することがある	・トンネル施工条件（地盤・土被り・地下水位・トンネル径）に応じた適切なセグメント幅と厚さの設定 ・施工時の操作性等に支障のないリング分割数とセグメントの寸法・重量の設定 ・施工時におけるリングの変形等に対して変状が発生しない継手構造の選定 ・高い止水性能を有する膨張性シールド材等の選定
施工段階	セグメント製作・運搬・保管	・セグメント製作時の養生不足、強度発現前の脱型等によって有害なひび割れや潜在的なひび割れ等が発生することがある ・運搬時・保管時におけるセグメントの取扱い、管理状況等が不適切な場合は、有害なひび割れや潜在的なひび割れ等が発生することがある	・セグメント製作時の十分な養生時間の確保と適切な脱型時期の設定 ・運搬・保管時におけるセグメントの丁寧な取扱いと適切な積上げ、荷吊りの実施、温度変化に対する適切な保管の実施
	シールド掘進	・所要のトンネルの線形を確保するために、シールドの急激な姿勢変更を行った場合、片押しによるジャッキパターンを採用等を用いて掘進する場合にテールクリアランスが確保できず、セグメントとシールドが競ることがある ・過大なジャッキ推力・テールブラシ圧・テールクリス圧等によりセグメントが損傷することがある ・テール脱出時においてテールポイドへの裏込め注入が未実施の場合に、トンネルの浮き上がりによって継手部等に過大な荷重が作用する可能性がある	・施工時における過大なジャッキ推力・テールブラシ圧・テールクリス圧の抑止 ・シールドの適切な姿勢制御と急激な姿勢変更の防止 ・シールドとセグメントの競り防止のためのテールクリアランスの十分な確保 ・早期における適切な裏込め注入材の確実な実施
	セグメント組立て	・セグメントの取扱いによってはシールド内でセグメントを組み立てる際に、他のセグメントとの接触等によりセグメントが損傷することがある ・既に組み立てられたリングが変形している場合や、Kセグメント挿入・組立時に一時的に予期しない過大な荷重がセグメントに作用することがある	・施工時のセグメントの慎重な取扱いと欠け防止対策の実施 ・真円保持装置等の採用による真円度の確保
	供用前におけるトンネルの状態把握と記録	・トンネル施工時における一時的な荷重によりセグメントが損傷することがある ・点検結果の記録が個別の変状を特定する様式となっていない場合は、変状の進行性を把握することが困難である ・トンネルの完成引き渡し前に実施された補修等の記録が体系的に残っていないことがある ・供用前のトンネルの状態が適切に記録されていない場合がある	・施工時に発生する変状（うき・はく離・欠け・ひび割れ等）に対する打音検査・近接目視による正確な把握 ・トンネルの断面形状の正確な把握 ・工事終了後までの補修実績（変状の種類・規模、補修材料）等の適正な記録・保存
	維持管理へ引き継ぐべきデータの記録・保存	・供用後に発生する変状もしくは顕在化する変状は、施工時データと関連がある可能性があるが、現状においてはトンネル完成後の出来型に関する一部の情報の報告はされるが、施工時の状況が把握できる種々の施工時データの報告がなされていない	・工事完成図書、出来形資料のほか、施工中におけるシールド掘進・セグメント組立て時等における施工時データの記録・保存
供用段階	トンネル状況の変化	・地盤状況等によっては想定外の荷重の作用や、水圧が変化する場合がある ・シールドトンネルを構成するセグメント・継手材・シールド材や、裏込め注入材等の劣化によってひび割れ、うき・はく離、漏水等の変状が発生することがある	・適切な頻度・時期・方法による点検の実施
	点検・診断	・セグメントのうき・はく離等の変状は、近接目視による覆工表面の観察だけでは発見できない場合がある ・点検結果の記録様式が、あるスパン長に対する記録となっていることが多く、個別の変状の特定や進行性が把握できない	・打音点検とあわせて近接目視による変状の把握 ・トンネルの断面形状の正確な把握 ・トンネル種別（共同溝・道路など）・トンネルの機能に応じて、適正な頻度・方法による点検の実施 ・維持管理を行ううえで重要となる、個々の変状に対する進行性を把握するための変状展開図の作成、セグメントリング番号・スパン割り等による管理
	供用後におけるトンネル状態の把握と記録	・点検結果の記録が個別の変状を特定する様式となっていない場合は、変状の進行性を把握することが困難である ・トンネル供用後に発生した変状・顕在化した変状に対して実施された補修・補強等の対策工の記録が体系的に残っていないことがある	・供用後に実施した点検・診断結果の適正な記録と保存 ・供用後に実施した補修・補強実績（変状の種類・規模、補修材料）等の適正な記録・保存
	対策工の適用	・実施された補修・補強等の対策工の記録が体系的に残っていないことがある ・実施された対策工が数年後に再劣化する可能性がある ・裏込め注入孔からの漏水が比較的多い	・変状の種類・状態に応じて、各発生要因に適合した適切な対策工の選定 ・トンネル内への漏水が構成部材の材質劣化とともに、鉄筋腐食等によるトンネル構造へ影響を与えるため、適正な時期での漏水対策工の実施 ・裏込め注入孔からの漏水防止のための耐久性の高い注入孔キャップの適用

謝辞

シールドトンネルの現地計測等にあたっては、国土交通省関東地方整備局東京国道事務所、近畿地方整備局大阪国道事務所より多大な協力を得た。関係各位に深甚なる謝意を表す。

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、2019
- 2) (公社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和2年版、2020
- 3) 森本智、坂本昇、日下敦、砂金伸治：シールドトンネルにおける覆工の温度収縮に関する一考察、(公社)

土木学会第トンネル工学研究発表会講演集、第29巻 II-3、2019

- 4) (社)日本トンネル技術協会：セグメントシールド材による止水設計手引き、1997
- 5) 森本智、砂金伸治、日下敦、坂本昇：シールド材に着目した漏水発生メカニズムに関する一考察、(公社)土木学会第トンネル工学研究発表会講演集、第27巻 II-6、2017
- 6) 加賀宗彦、松浦純子：軟質ゴムシールド材の閉塞効果による止水メカニズム、土木学会トンネル工学研究論文・報告集第8巻、1998
- 7) (社)土木学会：シールドトンネルの施工時荷重、2006

A STUDY ON IMPROVING THE DURABILITY OF SHIELD TUNNEL

Research Period : FY2017-2020

Research Team : Road Technology Research Group (Tunnel)

Author : KUSAKA Atsushi

MORIMOTO Satoshi

SASAKI Toru

ISHIMURA Toshiaki

Abstract : This study aims at improving at durability of shield tunnels. The authors have conducted field measurement, comparison between construction data and defects found in service stage, numerical analysis on tunnel deformation, and elemental experiment on durability of sealing materials. Major conclusions include: seasonal movement of lining influenced by temperature change is grasped. Mechanism of defects that may cause maintenance problems are clarified. Water-stop characteristics of sealing materials including swelling type sealers are grasped. Based on the results, we have proposed points of attention for each stages of plan, design, construction, and inspection to mitigate maintenance risks.

Keywords: shield tunnel、 deformation condition、 deformation mechanism、 durability improvement