

シールドトンネルのセグメント間の繰返し目開き変化がシール材の止水性能に及ぼす影響

石村利明・森本 智・佐々木亨・日下 敦

1. はじめに

シールドトンネルは、地下水位以下に構築されることが多く、止水が必要不可欠となる。シールドトンネルの止水は、セグメント継手面へのシール材の貼付、裏込め注入孔への止水栓の設置などによるものが一般的である。しかしながら、これらの止水対策を施してもトンネル供用後に漏水が発生することがある。漏水の要因は、セグメント継手部の変形（変位や回転角）やシール材の劣化、セグメント本体のひび割れ等が考えられる。トンネル内への漏水は、シールドトンネルを構成する各部材等の劣化を促進させるおそれがあるため、トンネルの長寿命化の観点からは、漏水の発生メカニズムを把握し、それをふまえた適切な止水対策を行っていく必要がある。

これまでに、筆者らは供用中のシールドトンネルを対象とした長期的な計測を行い、セグメント間の目地部の目開き量が温度変化の影響を受け、1年間の周期で繰返し変化している¹⁾ことを示した。これをふまえ、本稿ではセグメント継手面のシール材からの漏水メカニズムの把握を目的に、供用後において坑内の温度変化により毎年繰り返される継手面の目開き量の変化がシール材の止水性能に及ぼす影響について実験を行ったのでその結果を報告する。

2. シール材実験

2.1 実験装置

本実験は、トンネル内の温度変化に伴いセグメント目地部の目開き量が繰返し変化したという想定で図-1に示す実験装置によりシール材の止水性について検討を行った。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

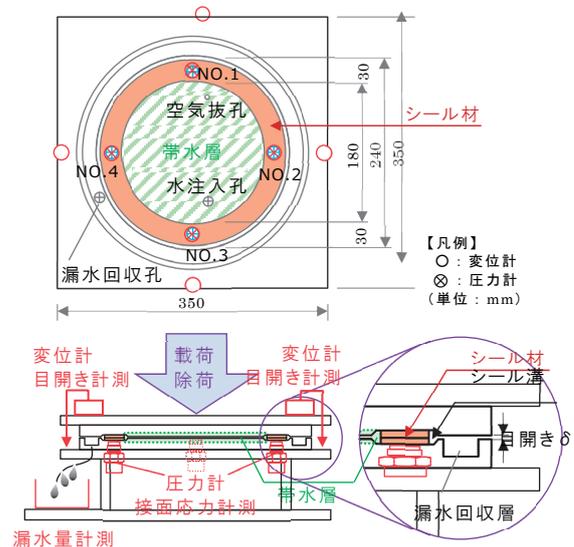


図-1 実験装置の概要

水圧を保持することが可能である。

2.2 実験条件および実験方法

本実験における目開きの変化量は、文献¹⁾を参考に、トンネル内の温度変化により生じるセグメントの変形量がRC構造物の線膨張係数 ($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) に比例すると仮定して設定した。検討対象は、直径12mの道路トンネルを対象として均等に8分割したRCセグメント（部材長4.7m）を想定し、実トンネルにおける計測結果を参考に1年間の温度変化が 20°C 、 30°C と仮定した場合の目開き変化量として算出される1.0mm、1.5mmとした²⁾。

実験ケース一覧を表-1に示す。初期の設計目開き量（荷重前）の状態から、水圧を作用させないCASEと、水頭を30mと仮定した水圧（0.3MPa）を作用させたCASEを実施し、界面応力の変化と漏水発生との関係を把握した。なお、一部のCASEにおいては、実験結果の再現性、荷重速度による影響を確認するため、複数回の実験を実施した。

シール材は、クロロプレンゴム（硬度は45）を主体とした非膨張性シール材と、水を含むと体積が膨張する膨脹性シール材（膨張率3倍）を対象とした。シール溝の寸法は実事例を参考に幅

表-1 実験ケース一覧

ケース名 (CASE)	シール材の種類	水圧 (MPa)	目開き変化量 (目標値) δ' (mm)	設計目開き量 (載荷前) δ_1 (mm)	目開き量 (載荷後) δ_2 (mm)	載荷速度 (mm/min)	繰り返し回数 (回)
1-1	非膨張性シール材	0.0	1.0	2.2	1.2	1.0	50
2-1~2-3		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
5-1~5-3		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	膨張性シール材	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_0 の状態で作
 ※2: 膨張率3倍(設計目開き量 δ_1 (載荷前)の状態の水膨潤を行い、界面応力が一定になるまで養生した後に繰返し載荷を実施)
 ※3: 50回の繰返し載荷後、目開き量を拡大し、漏水状況を確認

30mm、深さ2.6mmとし、シール材の寸法は幅20~21mm、厚さ4mmと設定した。

膨張性シール材を対象とした実験の手順を図-2に示す。実験は、シール材を接着剤によりシール溝に接着して必要な養生をした後、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てボルトで固定した。その状態を保持しながら試験機から取り外し、帯水層内に水を低圧(約0.01MPa)注入して180~240日間程度シール材を水膨潤させた。シール材の界面応力が収束 (【A₂】) ことを確認した後に実験装置を圧縮試験機に再度設置 (【B₀】) し、 δ_1 が最も温度が低い状態として目開きが閉じる側へ目開き変化量 δ' を載荷 (【C_i】: iは繰返し回数) する繰返し載荷を50回実施した。繰返し載荷速度は0.5~1.0mm/分で1ステップの時間は数分程度のため、1年の温度変化を想定した実際の時間とは異なる。なお、CASE12・CASE13を対象に、繰返し載荷実験終了 (【B₅₀】) 後、目開き量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、漏水開始時の目開き量を確認した。

また、非膨張性シール材を対象とした実験については、シール材の水膨潤の行程が省略された実験手順となる。

なお、シール材の設計は、シール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、設定水圧と比較することで止水性を照査する一般的な考え方³⁾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、非膨張性シール材・膨張性シール材ともに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。

3. 実験結果

3.1 非膨張性シール材の結果

図-3に水圧なしのCASE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、シール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³⁾の考え方に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、シール溝内に封入されているシール材が変形することによる密封の原理(パッキン理論)⁴⁾で界面応力が増加したと考えられる。

図-4、図-5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CASE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では複数回の実験において

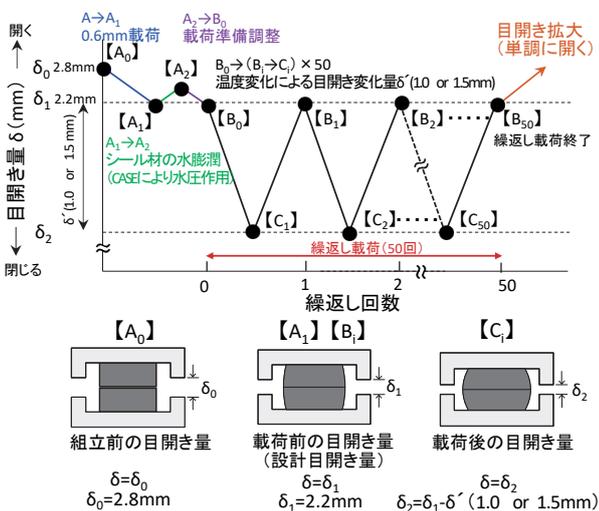


図-2 実験手順の概念図

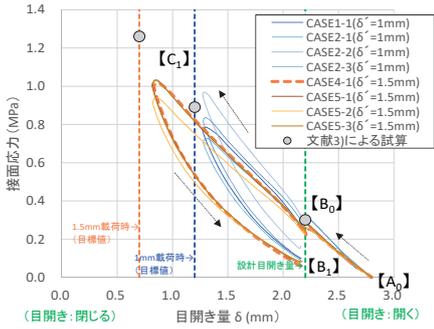


図-3 設計目開き量と界面応力の関係 (水圧なし) (非膨張性シール材)

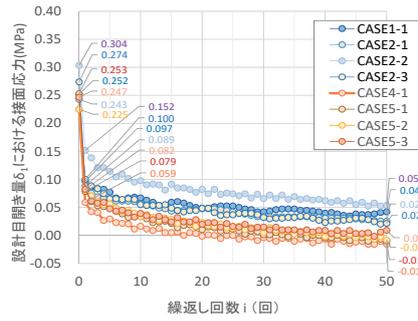


図-4 設計目開き量 $[B_1]$ における界面応力 (水圧なし) (非膨張性シール材)

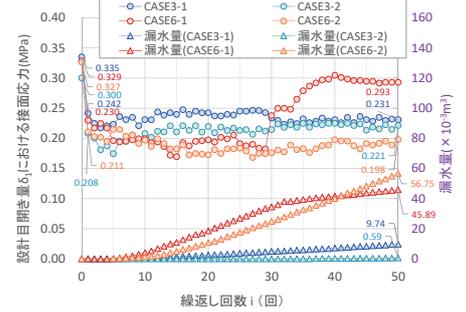


図-5 設計目開き量 $[B_1]$ における界面応力と漏水量 (水圧あり) (非膨張性シール材)

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では複数回の実験において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' が1.0mmと比較してCASE6の δ' が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、繰返し載荷によるシール材の物理的・力学的性質の変化が大きいと考えられる。

なお、一部CASEでの複数回の実験、載荷速度の違いによる実験の結果から顕著な差異は認められなかったことから再現性はあると判断している。

3.2 膨張性シール材の結果

図-6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界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CASEの界面応力は、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界面応力の増加率は約2~3倍程度であった。

図-7にシール材を圧縮する前から繰返し載荷1

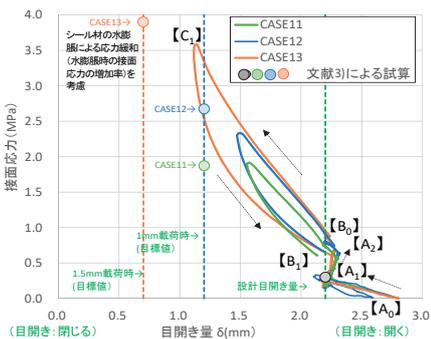


図-7 目開き量の変化量と界面応力との関係(膨張性シール材)

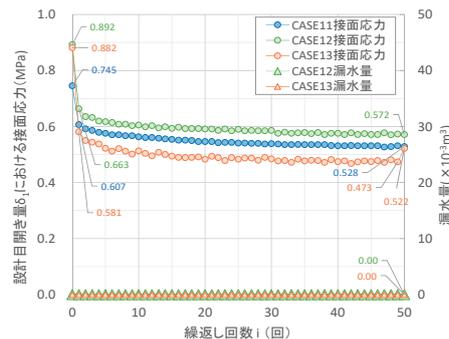


図-8 目開き変化の繰返し回数と設計目開き量 $[B_1]$ における界面応力の関係 (膨張性シール材)

回目までの界面応力とシール材の変形量の関係を示す。各段階での界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載荷した際の界面応力の値は約0.2MPaで、文献³⁾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【A₂】時に界面応力が0.55~0.65MPaまで増加する。その後、目開きが δ_2 (【C₁】)までの載荷により各CASEの界面応力は最大約1.9~3.6MPa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CASEともに載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³⁾で試算される界面応力に近い値を示した。

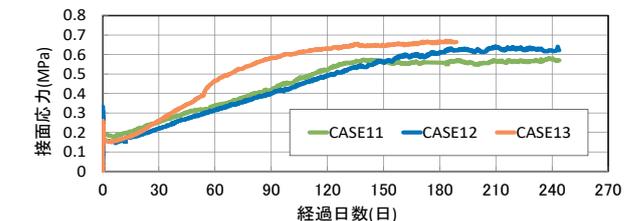


図-6 水膨潤時のシール材の界面応力

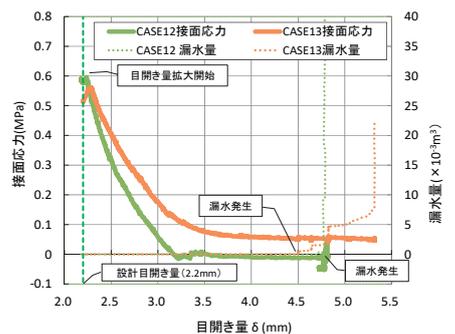


図-9 目開き量と界面応力・漏水量の関係 (膨張性シール材)

の場合で約 0.53 ~ 0.57MPa、 δ' が 1.5mm (CASE13) の場合で約 0.5MPa 程度と、全 CASE ともに高い界面応力を維持し、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と膨張性シール材は高い止水性が確保されていることが分かる。

次に、CASE12、CASE13を対象として50回の繰り返し载荷終了後、0.3MPaの水圧を保ったまま、設計目開き量 δ_1 の状態から徐々に目開きを拡大させた。図-9に目開き拡大時の目開き量と界面応力との関係を示す。両CASEともに漏水は設計目開き量の2倍程度の目開き量4.5mmに発生した。ただし、界面応力は目開き拡大前には約0.6MPaであったが目開き量の拡大とともに徐々に低下し、水圧0.3MPa以下となっても漏水しなかった。また、CASE12では目開き量約3.2mmで界面応力がほぼゼロまで低下したものの漏水は確認されなかった。

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、界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おり、文献³⁾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界面応力が水圧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、文献⁴⁾で示されている、シール材がシール溝端部で変形が抑制され、シール材の一部が目開きの間を閉塞することで止水性が高まる「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。

4. まとめ・今後の課題

セグメント目地部の目開き量を繰り返し変化させたシール材実験を行った結果、本実験条件の範囲において得られた結論は以下のとおりである。

- 1) セグメント目地部の目開き量が繰り返し閉じる側の変形を受けることでシール材の物理的・力学的性質が変化する。目開き変化量が大いほほどその変化は大きい。
- 2) 非膨張性シール材は、繰り返し閉じる側の変形を受けることで界面応力が低下し、漏水に至る可能性がある。
- 3) 膨張性シール材は、繰り返し閉じる側の変形を受けることで界面応力が低下するが、その程度は非膨張性シール材と比較して小さく、高い止水性が確保され、漏水しにくく、目開きが設計目開きの2倍程度まで止水性が確保される。
- 4) 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一部が目開きの間を閉塞することで止水性が高まる閉塞効果等により漏水しない場合がある。

本実験においては、シール材の接触面への滑材の塗布等を行っていない。実際の現場においては、セグメント組立ての際に、Kセグメント挿入時等の施工性やシール材の損傷防止等を考慮してシール面に滑材を塗布する場合がある。今後の課題として、滑材の塗布等がシール材の止水性へ与える影響の検討、シール材による閉塞効果等の止水メカニズムの把握があげられる。

参考文献

- 1) 坂本昇、森本智、砂金伸治、日下敦：シールドトンネルの覆工における挙動発生要因に関する一考察、(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-5、2017.11.
- 2) 森本智・砂金伸治・日下敦・坂本昇：シール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、2017.11.
- 3) (社)日本トンネル技術協会：セグメントシール材による止水設計手引き、1997.1.
- 4) 加賀宗彦、松浦純子：軟質ゴムシール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、1998.11.

石村利明



土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループ
トンネルチーム 専門研究員
ISHIMURA Toshiaki

森本 智



土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループ
トンネルチーム 主任研究員
MORIMOTO Satoshi

佐々木亨



土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループ
トンネルチーム 研究員
SASAKI Toru

日下 敦



土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループ
トンネルチーム 上席研究員
KUSAKA Atsushi