

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

森本 智¹・砂金伸治²・日下 敦³・坂本 昇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: n-isago@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: kusaka@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-sakamoto44@pwri.go.jp

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一方，主な変状は漏水に関係するものが多い．また，シールドトンネルの現地計測を実施した結果，セグメントが温度変化による影響を受けている可能性が示唆されている．目地部における目開き量が繰り返し変動する挙動は，シール材にも連動して作用することとなるものの，この挙動がシール材へ与える影響の程度については不明な点が多い．

本稿は，漏水の発生メカニズムを把握することを目的とし，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実験を実施した．その結果，シール材に発生する界面応力は，目地部の目開きが繰り返し変動することにより低下し，作用水圧との関係によっては漏水の一因となることが確認された．

Key Words : shield tunnel, the leakage, pressure acting on the sealing material, repeated movement

1. はじめに

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，道路トンネル定期点検要領¹⁾が発出された．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，山岳工法以外の工法，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，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．主な手法として，裏込め注入材による防水，セグメントに施すシール材等による防水，二次覆工の施工等がある．

シールドトンネルに発生する主な変状は，二次覆工のひび割れやそれからの漏水，目地部や裏込め注入孔からの漏水，漏水にともなう継手の腐食等，漏水に関係する

ものも多く，とくに建設年次が古く非膨張性のシール材を使用しているトンネルに多いことが報告²⁾されている．漏水の発生メカニズムは，継手部の変形（変位や回転角）や劣化，セグメント本体のひび割れ等，さまざまな要因が考えられるものの，不明な点が多いことが課題としてあげられる．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ことから，シールドトンネルの維持管理を適切に実施するためには，漏水の発生メカニズムを把握し，それをふまえた適切な点検・診断等の実施が必要不可欠となる．

また，供用中のシールドトンネルを対象として長期的に現地計測を実施した結果³⁾から，セグメント間の目地部はおおむね1年間で周期として変化しており，その要因の一つとして，セグメントが温度変化による影響を受けている可能性が示唆されている．目地部における目開き量が繰り返し変動する挙動は，シール材にも連動して作用することとなるものの，この挙動がシール材へ与える影響の程度については不明な点が多い．

本稿は、漏水の発生メカニズムを把握することを目的とし、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実験の結果について報告する。

2. 実験内容

供用中のシールドトンネルを対象として、長期的に現地計測を実施した結果³⁾から、シールドトンネルを構成するセグメントは、坑内または地中の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可能性が示唆されている。このことをふまえ、セグメント目地部の目開き量が、繰り返し変動すると仮定した模型実験を実施し、設計目開き量における接面応力の変化、およびそれともなう漏水の発生状況等について把握した。

(1) 実験装置

図-1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、接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。

(2) 実験条件

本実験においては、温度変化に伴い発生する目地部の目開き量が繰り返し作用したという想定で、次の仮定にもとづき、目開き量を繰り返し変化させた。セグメントの寸法は、直径が12mのトンネルを均等に8分割したRCセグメントで構築すると想定し4.71m（セグメント継手間の弧長）と仮定した。また、温度変化により生じるセグメントの変形量は、RC構造物の線膨張係数（ 10×10^{-6} ）に比例すると仮定した。この条件における温度変化量に対する目開き変化量について図-2に示す。図には各部材長に線膨張係数と温度変化量を乗じた理論値、および文献³⁾における温度変化による目開き変化量の計測値を示す。本研究で仮定したセグメント部材長4.7mにおいて、1年間の温度変化を20度と仮定した場合の目開き変化量は0.94mmとなる。これを踏まえ、実験においてセグメントに与える目開き変化量は1.0mm（温度変化量20度程度）と、1.5mm（温度変化量30度程度）とした。

シール材は、非膨張を想定したクロロプレンゴム（硬度は45）を使用した。止水溝の寸法は幅30mm、深さ2.6mmとし、シール材の寸法は幅20mm、厚さ4mmと設定した。

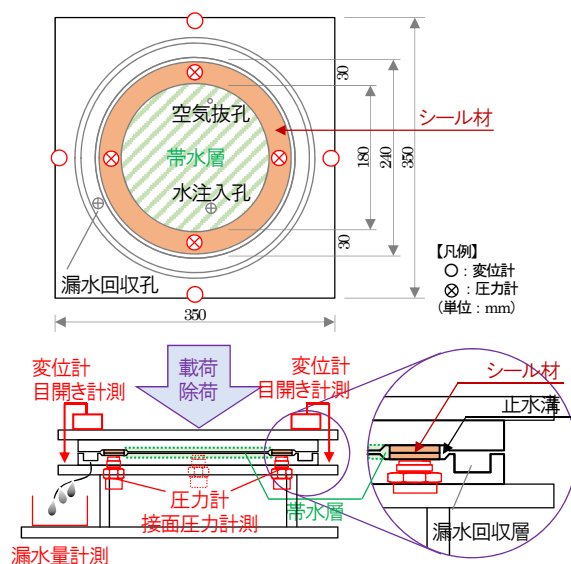


図-1 実験装置の概要

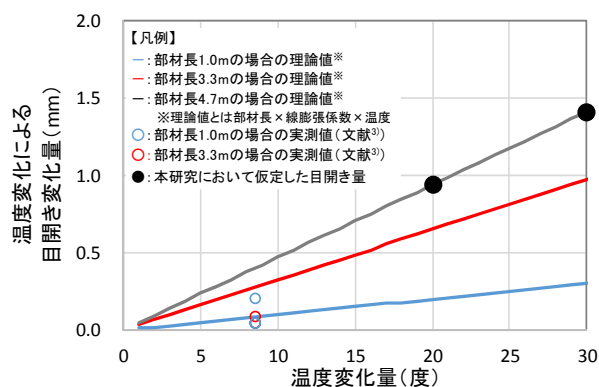


図-2 温度変化に対する目開き変化量

载荷条件は、万能試験機に治具を設置し载荷・除荷ともに0.5mm/minの速度で実施した。図-3に実験ステップの模式図を示す。シール材の変形量が0mmの状態【A】からセグメント組立て時を想定した設計目開き量2.2mm【B】となるまで0.6mm载荷する。この状態から1.0mmまたは1.5mmの载荷・除荷【B→C→D】を50回繰り返しした。

実験ケースを表-1に示す。初期の設計目開き量の時点以降、水圧を作用させない場合における接面応力の変化を把握するケースと、水頭を30mと仮定した水圧（0.3MPa）を作用させ接面応力の変化と漏水発生との関係を把握する場合について実施した。

(3) シール材の設計

シール材の設計は、一般に、シール材が変形し弾性反発力により発生する接面応力と水圧との関係を照査することが基本となる。すなわち、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

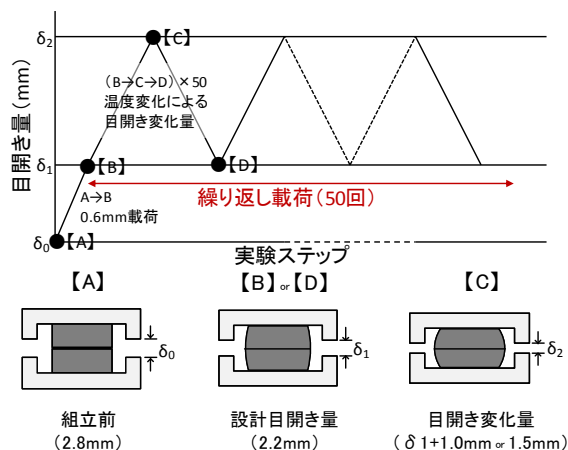


図-3 実験ステップの模式図

表-1 実験ケース

ケース名	載荷回数 (回)	作用水圧 (MPa)	目開き変化量 (mm)
CASE 1	50	—	1.0
CASE 2	50	0.3	1.0
CASE 3	50	—	1.5
CASE 4	50	0.3	1.5

表-2 接面応力等の算出結果

止水溝の形状寸法			目開き量 (1.0mm 載荷) CASE-1, CASE-2		目開き量 (1.5mm 載荷) CASE-3, CASE-4	
深さ	d	2.6 mm	設計時	δ 1 2.2 mm	設計時	δ 1 2.2 mm
底面幅	b	30 mm	1mm 載荷時	δ 2 1.2 mm	1.5mm 載荷時	δ 2 0.7 mm
止水材の諸元			止水材の載荷変位量		止水材の載荷変位量	
材質	材質	EPDM	設計時	δ 1' 0.6 mm	設計時	δ 1' 0.6 mm
硬度	Hs	45 -	1mm 載荷時	δ 2' 1.6 mm	1.5mm 載荷時	δ 2' 2.1 mm
厚さ	t0/2	4 mm	接面応力等 (設計時)		接面応力等 (設計時)	
幅	a	20 mm	圧縮ひずみ	ε 1 0.05 -	圧縮ひずみ	ε 1 0.05 -
形状率	S	1.22 -	接面応力 (δ 1)	σ 1 0.25 MPa	接面応力 (δ 1)	σ 1 0.25 MPa
横弾性係数	G	0.59 N/mm ²	接面応力等 (1mm 載荷時)		接面応力等 (1.5mm 載荷時)	
見かけのヤング率	Eap	5.21 N/mm ²	圧縮ひずみ	ε 2 0.18 -	圧縮ひずみ	ε 2 0.24 -
			接面応力 (δ 2)	σ 2 0.80 MPa	接面応力 (δ 2)	σ 2 1.03 MPa

注 1) 接面応力は次式により算出

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

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

ただし, Eap: 見かけのヤング率 (N/mm²)
G: 横弾性係数 (N/mm²)
ε: 圧縮ひずみ (-)
S: シール材形状率 (-)
σ: 接面応力 (MPa)

考え方⁴⁾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の算出結果を表-2に示す。セグメント組立て時を想定した設計目開き量2.2mmにおける接面応力は0.25MPaとなり、その状態から1.0mm載荷時は0.80MPa、1.5mm載荷時は1.03MPaとなる。

3. 実験結果

(1) 目開き変化量1.0mmの結果

図-4に組立て前【A】から、目開き変化量1.0mmの繰返し載荷1回目【D】までの接面応力とシール材の変形量の関係を示す。接面応力は、シール材の変形とともに

に上昇し、設計目開き量まで載荷した際の値は文献⁴⁾の考え方に基づき算出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⁴⁾でいう自封作用によるものと考えられる。その後、1.0mm載荷し目開き量が1.2mmとなった際の接面応力は文献⁴⁾の考え方に基づき算出した値と同程度となった。

引き続き、温度変化を想定した繰返し載荷を50回まで行った際の設計目開き量における接面応力の変化を図-5に示す。繰返し載荷段階の設計目開き量における接面応力は、CASE1の場合、初期値(図-3に示す【B】)は0.27MPaであったが、1回目(図-3に示す【D】)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。また、0.3MPaの水圧を作用させたCASE2の場合、初期値は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、CASE2にて漏水の発生状況を目視観察した結果、7回目に漏水が確認された。CASE1で確認した接面応力は、この時点において水圧と比較し十分低下しており、接面応力と水圧との関係から漏水が発生したと考えられる。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。

(2) 目開き変化量1.5mmの結果

図-6に組立て前(シール材の変形量0mm)から、目開き変化量1.5mmの繰返し載荷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。設計目開き量まで載荷した際の接面応力の値、およびCASE4で水圧0.3MPaを作用させた際の接面応力の値は図-4と同程度となった。その後、1.5mm載荷し目開き量が0.7mmとなった際の接面応力は文献⁴⁾の考え方に基づき算出した値と同程度となった。

引き続き、繰返し載荷を50回まで行った際の繰返し載荷段階の設計目開き量における接面応力の変化を図-7に示す。設計目開き量における接面応力は、CASE3の場合、初期値は0.25MPaであったが、1回目において0.08MPaまで減少し、50回目の時点では0.01MPaとなり、その値はCASE1と比較し減少の程度が大きい結果となった。また、0.3MPaの水圧を作用させたCASE4の場合、初期値は0.33MPaであったが、1回目において0.23MPaまで低下し、その後、繰返し回数30回目程度までは0.2MPa程度で推移し、それ以降は増加に転じ、50回目の時点では0.29MPa程度となった。また、CASE4にて漏水の発生状況を目視観察した結果、6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、その量はCASE2と比較し多い結果となった。

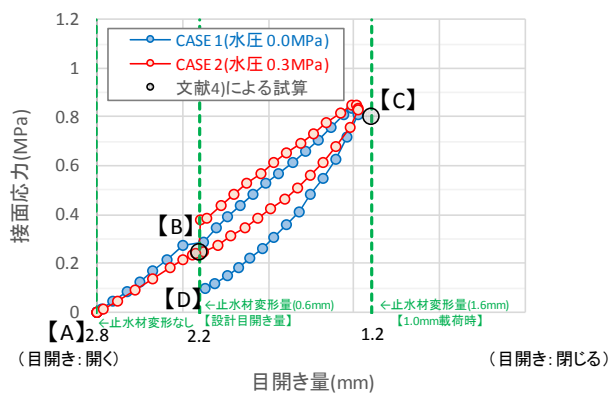


図-4 接面応力と目開き量

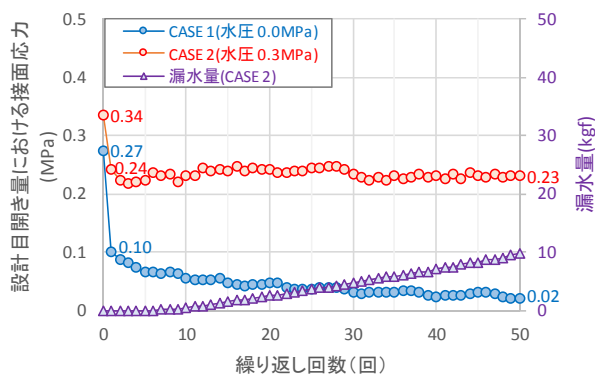


図-5 設計目開き量における接面応力

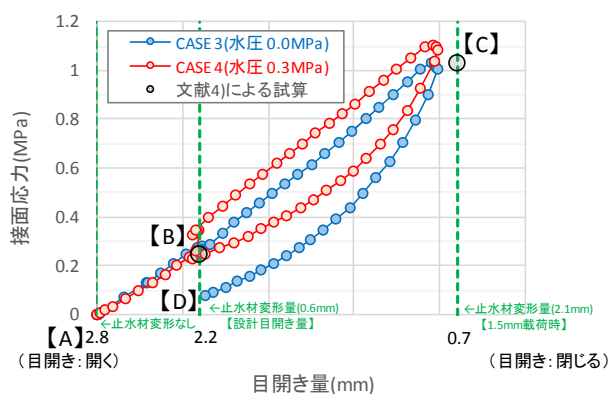


図-6 接面応力と目開き量

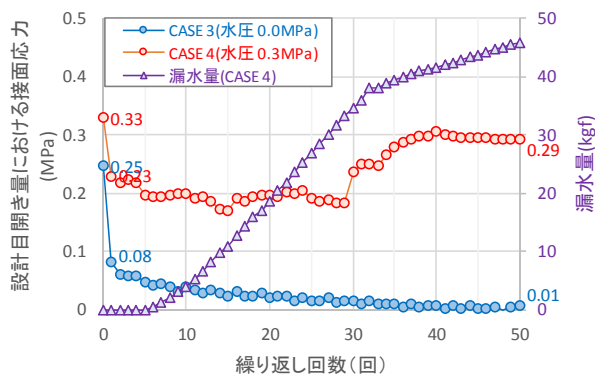


図-7 設計目開き量における接面応力

4. まとめ

本報告では、セグメント目地部の目開き量が、繰り返し変動すると仮定した模型実験を実施し、繰り返しによる接面応力の変化、およびそれにもなう漏水の発生状況等について把握した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 設計目開き量の状態から繰り返し载荷を行うことにより接面応力の値は低下を続け、50回目の時点では、初期値に対し繰り返し変位量1.0mmの载荷時は7%程度、繰り返し変位量1.5mmの载荷時は4%程度の値となった。
- 2) 0.3MPaの水圧を作用させた場合、载荷を6回程度繰り返し替えた時点において漏水が発生し、漏水量は1mm载荷時に比べ1.5mm载荷時が多い結果となり、接面応力の低下による影響が確認された。

以上の結果から、本実験条件におけるシール材に発生する接面応力は、繰り返し変動することにより低下し、作用水圧との関係によっては漏水の一因となることが確認された。

シールド工法は、都市部における道路トンネルへの適用が進んでおり、大深度化による高水圧の作用、長大化にともなう車両からの排熱による坑内温度の変化等、厳しい環境条件での適用事例が増加している。シールドトンネルにおける漏水発生メカニズムは、セグメントの温度変化に限らず、継手部の変形（変位や回転角）や劣化、セグメント本体のひび割れ等、さまざまな要因が考えられる。今後は、漏水の発生に影響をおよぼすさまざまな要因やそれにもなう漏水発生メカニズムへの影響等について把握し、シールドトンネルの止水性能に関する長期耐久性について、検討を進めたいと考えている。

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，2014.6
- 2) 森本智，日下敦，石村利明，砂金伸治：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，トンネル工学報告集第25巻 報告Ⅱ-3，2015.11
- 3) 坂本昇，砂金伸治，日下敦，森本智：シールドトンネルの覆工における基礎的挙動に関する一考察，土木学会年次学術講演会，（2017.投稿中）
- 4) 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

(2017.8.11 受付)

A STUDY ON MECHANISM OF THE WATER LEAKAGE BY THE INFLUENCE OF SEALING IN SHIELD TUNNELS

Satsohi MORIMOTO, Nobuharu ISAGO, Atsushi KUSAKA and Noboru
SAKAMOTO

Many shield tunnels have been 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 mechanism of the leakage for shield tunnels has not been grasped. In this study, the relation between the leakage of water and the pressure acting on the sealing material was investigated. As a result, the pressure acting on the sealing material decreased due to repeated movement of joints. It was confirmed that leakage of water occurred due to the relationship of the pressure acting on the reduction of the pressure acting on the seal material.