

シールドトンネルの基礎的挙動に着目したシール材に関する実験的考察

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○森本 智, 砂金伸治, 日下 敦, 坂本 昇

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、止水対策が必要不可欠となる。主な対策として、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、継手の腐食等、漏水に関係するものが多く、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されている。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から、セグメント間の目地部はおおむね1年間を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。

本稿は、界面応力に着目した漏水の発生メカニズムについて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概要と結果を報告する。

2. 実験概要

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、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。

3. 実験条件

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、次の条件にもとづき1mmの繰り返し変化を与えることにした。

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ものとし、4.71m(セグメント継手間の弧長)と仮定した。また、温度変化量は1年間の温度変化は20℃と仮定した。この条件において、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})を乗じた場合0.94mmとなる。

シール材は、非膨張性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。この場合、シール材の変形量が0mmの場合、目開き量は2.8mmとなる。ここで、シール材による止水メカニズムは、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考え方³⁾である。この考え方にもとづき、本実験条件における界面応力等について算出した結果を表-1に示す。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。まず、シール材の変形量が0mmの状態からセグメント組立て時を想定した設計目開き量2.2mmとなるまで0.6mm载荷する。この状態から1mm

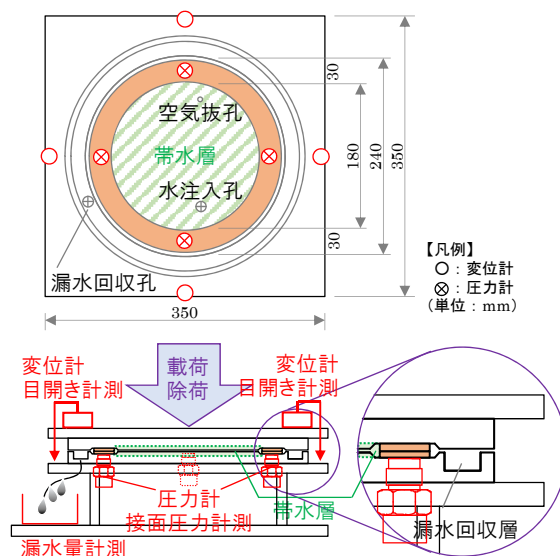


図-1 実験装置の概要

キーワード シールドトンネル, シール材, 界面応力, 目開き量

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 国立研究開発法人土木研究所 TEL 029-879-6791

の載荷・除荷を 50 回繰り返した。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。

4. 実験結果と考察

図-2 に組立て前 (シール材の変形量 0mm) から、繰り返し載荷 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。接面応力は、シール材の変形とともに上昇し、設計目開き量まで載荷した際の値は文献³⁾の考え方に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³⁾でいう自封作用によるものと考えられる。その後、1mm 載荷し目開き量が 1.2mm となった際の接面応力は文献³⁾の考え方にに基づき算出した値と同程度となった。

引き続き、繰り返し載荷を 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-3 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。

本実験における初期の接面応力は、設計目開き量、および 1mm 載荷時においてはおおむね従来からの考え方³⁾に準じた値となった。その後、水圧の影響を受けない接面応力は、載荷を繰り返すことで低下を続け、50 回目の時点では初期に対し 7%程度の値となった。また、水圧を作用させた場合、載荷を 5 回程度繰り返した時点において漏水が発生した。これは、CASE 1 において確認した接面応力の低下による影響が考えられる。

5. まとめ

セグメントが温度変化による影響を受け、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行ったところ、シール材に発生する接面応力の低下に伴い、作用水圧との関係から漏水が発生することが確認され、漏水発生メカニズムの一要因が明らかとなった。

今後は、漏水の発生に影響をおよぼすさまざまな要因、たとえば、シール材の劣化や疲労に伴う材料特性の変化、それに伴う接面応力への影響等について把握し、シール材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) 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
- 2) 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)
- 3) 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

表-1 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	クロロブレンダム			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

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

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

ただし, Eap: 見かけのヤング率 (N/mm²)

S: シール材形状率 (-)

G: 横弾性係数 (N/mm²)

σ: 接面応力 (MPa)

e: 圧縮ひずみ (-)

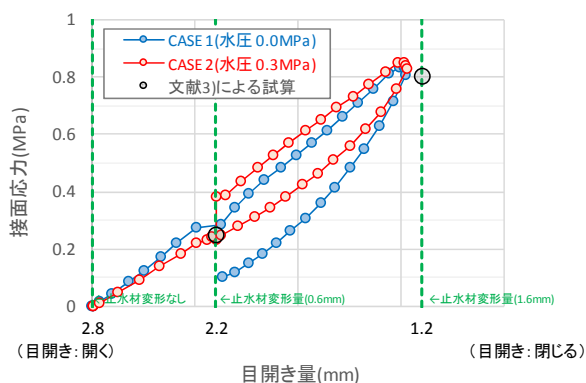


図-2 接面応力と目開き量

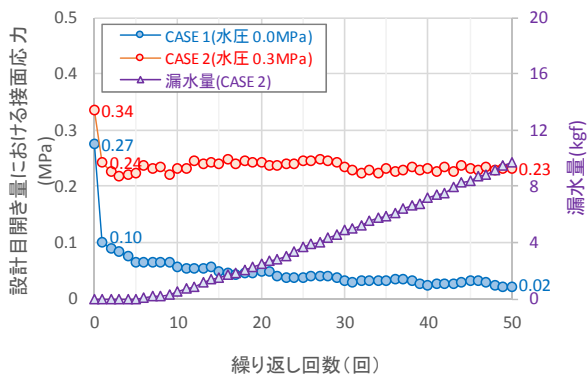


図-3 設計目開き量における接面応力