# 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に関する検討

石村利明1・森本 智2・佐々木 亨3・日下 敦4

<sup>1</sup>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:ishimura-t477bs@pwri.go.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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:to-sasaki@pwri.go.jp

<sup>4</sup>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

シールドトンネル内への漏水は、各部材等の劣化を促進させる可能性があるためトンネルの耐久性の面 から防止することが重要である.本稿は、供用中のトンネルでの長期的な計測により、セグメント間の目 地部が1年間の周期で繰返し変化していることをふまえ、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止水性能に及ぼす影響について実験を行った.その結果、シール材の接面応力は、目 開きが繰返し変化することにより低下し、非膨張性シール材の場合は漏水の一因となることが確認された. 一方、膨張性シール材は繰返し変化により接面応力が低下するものの、高い接面応力を維持し漏水しにい ことが分かった.また、目開きが大きくなり、シール材の接面応力が水圧以下となった場合でも閉塞効果 等により漏水しない場合があることが分かった.

Key Words : shield tunnel, water swellable seal, repeated yearly joint movements, water sealing

# 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、一般的な止水は、セ グメント継手面に貼付するシール材、裏込め注入孔の止 水栓等によるものが一般的である、このほか、裏込め注 入材や二次覆工等により防水機能の向上を期待するとい う考え方もある、しかしながら、これらの止水対策を実 施してもトンネル供用後に漏水が発生することがある。

シールドトンネルに発生する主な漏水には、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、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.

供用中のシールドトンネルを対象とした長期的な計測 により、セグメント間の目地部が1年間の周期で繰返し変 化している<sup>1</sup>ことが明らかとなっている.そこで、セグ メント継手面に貼付するシール材を対象として供用後に 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 目開き量の変化が止水性能に及ぼす影響について実験を 行った結果を報告する.

## 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返し変化することが示 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 れに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) 実験条件および実験方法

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変化したという想定で、次の仮定に もとづき、目開き量を繰り返し変化させた.

目開き量の変化は、直径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



図-1 実験装置の概要



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<sup>6</sup>)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<sup>1</sup>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℃と仮定した場合 の目開き変化量は0.94mmとなる.これをふまえ、実験 においてセグメントに与える目開き変化量は1.0mm(坑 内の温度変化量20℃程度)と、1.5mm(坑内の温度変化 量30℃程度)とした.

実験ケースを表-1に示す.初期の設計目開き量(載荷前)の状態から,水圧を作用させない場合における接面

表-1 実験ケース一覧

ケース名 (CASE)	シール 材の 種類	水王 (MPa)	目開き変化量 (目標値) δ'(mm)	:337 日開き量 (載荷前) δ <sub>1</sub> (mm)	目開き量 (載荷後) δ <sub>2</sub> (mm)	載荷速度 (mm/min)	繰0返 U回数 (回)	
1-1		0.0	1.0	2.2	1.2	1.0	50	
2-1								
2-2		0.0	1.0	2.2	1.2	0.5	50	
2-3								
3-1 %1	非膨	03	10	22	12	05	50	
3-2 ※1	張性	0.5	1.0	2.2	112	0.5		
4-1		Ý 0.0 1.5 2.2 0.7					50	
5-1 5-2	材	0.0	1.5	2.2	0.7	0.5	50	
5-3								
6-1 %1		0.2	15	22	0.7	0.5	50	
6-2 ※1		0.5	1.5	2.2	0.7	0.5		
11 %2	膨	0.0			10			
12 %2 %3	隆シー	0.3	1.0	2.2	1.2	0.5	50	
13 %2 %3	ル 材	0.3	1.5	2.2	0.7	0.5	50	

※1:水圧はδ1の状態で作用

※2: 膨脹率3倍(器十目開き量及(載荷前)の状態で水脈潤を行い,接面応力が一定になるまで養生した後に発起し、動荷を実施)

※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



図-3 シール材・シール溝の形状寸法



応力の変化を把握するCASE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CASEについて実施した.なお、一部 のCASEにおいては実験結果の再現性を確認するため、 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膨脹性シール材を対象とした. シール溝の寸法は幅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(図-3). 膨脹性シール材は、膨張率3倍を使用した.

非膨張性シール材を対象とした実験の手順を図4に示 す. 実験は、シール材を専用の接着剤を用いてシール溝 に接着・養生した後、組立前の目開き&(【Ao】)から 設計目開き量δ<sub>1</sub>(【A<sub>1</sub>】)まで圧縮試験機により圧縮し、 ボルトで固定した. なお,実施工においてKセグメント 挿入時等においてシール材の損傷防止や施工性等を考慮 してシール面に滑材を塗布する場合があるが、本実験で は上下面が接触するシール材の間に滑材等は塗布してい ない. その状態を保持しながら試験機から取り外し、低 圧(約0.01MPa)で帯水層内へ水を注入して180~240日 間程度シール材を水膨潤させた.シール材の接面応力が 収束(【A2】)した後に実験装置を圧縮試験機に設置 (【Bo】)し、目開き変化量δ'を載荷(【Ci】)する繰 返し載荷を50回実施した.なお、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.繰返し 載荷実験が終了(【B<sub>50</sub>】)した後,CASE12・CASE13を 対象に、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,漏水状況を確認した.

一方、非膨張性シール材の実験の手順については、シール材の水膨潤の行程(【 $A_0$ 】 → 【 $A_1$ 】)がなくなる. このため、この工程は水圧を作用させるCASEでは水圧 作用の工程のみとなり、水圧を作用させないCASEの場

#### 表-2 接面応力等の試算結果

■非膨張性	シー	ル材									
レ水港の取得せた				目開き量(1.0mm載荷)				目開き量(1.5mm載荷)			
正水满0形状引法				CASE-1,CASE-2,CASE-3				CASE-4,CASE-5,CASE-6			
深さ	d	2.6	mm	設計時	δ1	2.2	mm	設計時	δ1	2.2	mm
底面幅	b	30	mm	1mm載荷時	δ2	1.2	mm	1.5mm載荷時	δ2	0.7	mm
止水材料の諸元				止水材の	載荷変	位量		止水材の載荷変位量			
材質	2	007°V)	З° Р	設計時	δ1'	0.6	mm	設計時	δ1'	0.6	mm
硬度	Hs	45	-	1mm載荷時	δ2'	1.6	mm	1.5mm載荷時	δ2'	2.1	mm
厚さ	t0/2	4	mm	接面応力	)等(設	計時)		接面応力	等(設	计時)	
幅	а	20	mm	圧縮ひずみ	ε1	-0.08	-	圧縮ひずみ	ε1	-0.08	-
形状率	S	1.22	-	初期接面応力注1)	σ1	0.45	MPa	初期接面応力注1)	σ1	0.45	MPa
横弾性係数	G	0.59	N/mm <sup>2</sup>	接面応力注2	σ3	0.30	MPa	接面応力注2)	σ3	0.30	MPa
見かけのヤンク率	Eap	5.21	N/mm <sup>2</sup>	接面応力等(1mm載荷時)				接面応刀等(1.5mm載何時)			
				圧縮ひずみ	ε2	-0.20	-	圧縮ひずみ	ε2	-0.26	-
				初期接面応力注印	σ2	1.32	MPa	初期接面応力注印	σ2	1.88	MPa
				接面応力注2)	σ4	0.89	MPa	接面応力注2)	σ4	1.26	MPa
■水膨張性	シー	ル材									
				目開き量(1.0mm載荷)				目開き量(1.5mm載荷)			
山小两の		-1/25		CASE-11,CASE-12			CASE-13				
深さ	d	2.6	mm	設計時	δ1	2.2	mm	設計時	δ1	2.2	mm
底面幅	b	30	mm	1mm載荷時	δ2	1.2	mm	1.5mm載荷時	δ2	0.7	mm
止水	材料の副	着元 -		止水材の載荷変位量			止水材の載荷変位量				
材質	2	007°V)	J. Y.	設計時	δ1'	0.6	mm	設計時	δ1'	0.6	mm
硬度	Hs	45	-	1mm載荷時	δ2'	1.6	mm	1.5mm載荷時	δ2'	2.1	mm
厚さ	t0/2	4	mm	接面応力	)等(設	計時)		接面応力	等(設設	计時)	
幅	а	21	mm	圧縮ひずみ	ε1	-0.08	-	圧縮ひずみ	ε1	-0.08	-
形状率	S	1.22	-	初期接面応力注印	σ1	0.45	MPa	初期接面応力注印	σ1	0.45	MPa
横弹性係数	G	0.59	N/mm <sup>2</sup>	接面応力注2	σ3	0.30	MPa	接面応力注2)	σ3	0.30	MPa
見かけのヤンク率	Eap	5.21	N/mm <sup>2</sup>	接面心刀等	(1mm	載何時)		送面心刀等()	1.5mn	n載何時)	)
				上稲ひすみ	ε2	-0.20	-	上稲ひすみ	ε2	-0.26	-
				初期接面応力なり	σ2	1.32	МРа	初期接面応力 <sup>(21)</sup>	σ2	1.88	MPa
				接面心力(11)	σ4	0.89	МРа	接面心刀''	σ4	1.26	MPa
注1) 初期援	面応	りは次	式により	<b>算出</b>							
Eap	=	(4+3	920 · S)	٠G				(1)			
σ	=	Fan•	[(1+ e	)-(1+ a <sup>-2</sup> ]/3			• •	ກ			
ただしての	日ふ	1400		(N (mm <sup>2</sup> ) Su		十十百公日	به / تحت	-)			
/2/2U, Eaj	p. <del></del>	win te	(アクギ	2 (N/mm) 3.5		1911A/	(apr (	-)			
	G:	甲生房	敪(N/	/mm) σ.]	发血	広力(N	(Pa)				
	ε:圧	縮ひす	み(-	)							
注2) 接面応	カはか	SUE	り算出								
設计時の接面応力: σ3=σ1×γs×p1×μ1											
載荷時の接面応力: σ4=σ2×γs×ρ2×μ2											
ys:シール材の寸法、硬さのばらつきを考慮した材料係数											
p1:設計時の応力緩和吃考慮した接面応力の有効率											
p2:載荷時の応力緩和を考慮した接面応力の有効率											
山: 設計時の自動作用による接面応力の増加率											
12:載荷時の自封作用による接面応力の増加率											

た乱,表中の接面応力はys=0.67, p=1.0, μ=1.0 とした場合

合は組立前の目開きδο(【Ao】)から設計目開き量δι

(【A<sub>1</sub>】= 【B<sub>0</sub>】) まで圧縮試験機により圧縮した後に, 目開き変化量δ を載荷(【C<sub>i</sub>】) する繰返し載荷を50回 実施することになる.

#### (3) シール材の接面応力

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 考え方<sup>3</sup>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 等の試算結果を表-2に示す.非膨張性シール材・膨張性 シール材ともに、主たる材料が同一で同じ硬度の材料を 使用しており、また、本試算においては設計時・載荷時 における応力緩和の有効率、自封作用による増加率を 1.0としているため同一の接面応力となっている.また、 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、非膨張性・膨張性シール材ともに 0.3MPaとなり、その状態から1.0mm載荷時に0.89MPa、 1.5mm載荷時に1.26MPaとなる.

## 3. 実験結果

## (1) 非膨張性シール材の結果

図-5に水圧なしのCASEで,目開き変化量&を変化させたCASE1,2,4,5について,組立て前【Ao】から目開き変化量&(1.0mm or 1.5mm)の繰返し載荷1回目【Bi】までの接面応力と目開き量の関係を示す.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&をまで載荷した際の値は文献<sup>3)</sup>の考え方に基づき算出した値と同程度となった.その後,目開き変化量&(1.0mm or 1.5mm)を載荷し,目開き量がそれぞれ1.2mm,0.7mmとなった際の接面応力は文献<sup>3)</sup>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、水圧なしのCASEについて、各CASEに応じた目開き変化量 $\delta$ の繰返し載荷を50回まで行った際の設計目開き量 $\delta$ 1(【B:】)における接面応力の変化を図-6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、すべてのCASEにおいて載荷前の状態(【Bo】)から1回目の載荷(【B1】)において大きく低下している。その後、50回目の繰返し載荷終了時点においてはさらに低下していることが分かる。目開き変化量 $\delta$ の違いによる接面応力について見ると、 $\delta$ が1.0mmに比較して $\delta$ 1.5mmのほうが大きく低下しており、50回目の載荷終了時【Bs0】における接面応力はゼロ付近まで低下している。なお、載荷速度を変化させたCASE(載荷速度1.0mm/min:CASE1、4、載荷速度0.5mm/min:CASE2、5)の目開き量の変化による接面応力の顕著な差異は認められなかった。

次に、図-7に水圧ありのCASEで、目開き変化量δ (1.0mm,1.5mm)を変化させたCASE3、6について、組 立て前【Ao】から目開き変化量δ(1.0mm or 1.5mm)の 繰返し載荷1回目【Bi】までの接面応力と目開き量の関 係を示す.接面応力は、水圧なしのCASEと同様に、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<sup>3</sup>の考え方に基づき試算した値と同程 度となった.0.3MPaの水圧を作用させたCASEの場合、 水圧なしのCASEと比較して【Bo】、【Ci】、【Bi】の 各状態の接面圧力が若干高めの値となっている.これは、 文献<sup>3</sup>でいう自封作用によるもの考えられる.すなわち、 設計目開き量の時点【Ai】において帯水層内に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で接面応力が増加したと考 えられる.

引き続き、水圧ありのCASEについて、各CASEに応じた目開き変化量&の繰返し載荷を50回まで行った際の設計目開き量&i(【Bi】)における接面応力の変化を図-8に示す.水圧なしのCASEと同様に、1回目の載荷に



図-8 設計目開き量【B】における接面応力と漏水量(水圧あり)



よって接面応力は全CASEともに大きく低下し、その後 は上下の変動を繰り返しながら0.22~0.29MPa程度で推移 した.

また、水の発生状況を目視観察した結果、CASE 3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. -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が発生し、50回の繰返し載荷終了 時において46~57kgfの漏水が確認された.また, CASE6-1においては約30回目の繰返し載荷付近で接面応 力が急激に上昇し、その後の漏水量も減少している. 実 験終了後におけるシール材の設置状況の観察では、シー ル材の接着部分がシール溝から一部剥がれていたことか ら、約30回目の繰返し載荷付近でシール材の接着が剥が れてシール材がシール溝の端部まで移動したことで接面 応力が増加して止水効果が高まったと推測される(写真 -1). なお、他のCASEを含めた実験後の観察において、 上下のシール材が密着した状態であったことから、漏水 の経路は、シール溝とシール材の間であると考えられる.

目開き変化量&の違いを見ると、CASE3の& 1.0mmに 比較してCASE6の& 1.5mmのほうが接面応力の値が低く、 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-9にシール材を設計目開き量δι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CASE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.なお、CASE13は接面応力を測 定する圧力計4点のうち、1点の圧力計の値が他に比べて 低かったことから約50日経過後に注水を再調整したため、 他のCASEと若干異なった挙動となった.結果的には他 のCASEと比べて収束する時間が最も早くなったものの、 いずれのCASEも約0.55~0.65MPa程度と同程度の接面応 力を示したことから、注水の再調整による接面応力への 影響はないものと考えている.

図-10にシール材を圧縮する前から繰返し載荷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.全 CASEともに,設計目開き量まで載荷した際の接面応力の値は約0.2MPaで,文献<sup>3)</sup>で試算される値と同程度となった.その後,水膨潤後の接面応力0.55~0.65MPaから,載荷準備調整のために設計目開き量δı(【Bo】)になるように再度設定することで各CASEの接面応力は約0.75~0.9MPaまで増加する.その後,【Ci】までの載荷により各CASEの接面応力は最大約1.9~3.6 MPaまで増加後, 目開きが $\delta_1$ (【 $B_1$ 】)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 $\delta$ には至らなかったが、文献<sup>3)</sup>で試算される接面応力に近い値を示した.

図-11に、その後繰返し載荷を50回まで行った際の各 段階の設計目開き量δı(【Bi】)における接面応力の変 化を示す.図からは50回の繰返し載荷を行うものの、繰 返し載荷終了時点における接面応力は目開き変化量

δが1mm (CASE11,CASE12)の場合で約0.53~0.57 MPa, δが1.5mm (CASE13)の場合で約0.5MPa程度であった. これより,目開きの変化が大きくなると接面応力の低下 が若干あるものの,本実験条件の範囲では接面応力の低 下についての顕著な差違は認められず,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.

なお、前述の非膨張性シール材での同様な条件下での 繰返し載荷時の接面応力は、載荷前の約0.33MPaが1回目 の載荷後に水圧0.3MPaを下回る約0.23MPaまで低下し、7 回目付近で漏水が発生した<sup>2</sup>ことから、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 ることが確認できる.

引き続き、CASE12、CASE13を対象として50回の繰返 し載荷終了後,設計目開き量δiの状態で0.3MPaの水圧を 保ったまま、徐々に目開きを拡大した.図-12に目開き 拡大時における目開き量,漏水量の挙動を示す. CASE12では、実験開始後約90分で目開き量δが4.7mmと なった時点で圧力計NO.1付近から滴水程度の漏水があ ったため、そのまま放置したところ約120分過ぎた時点 で漏水が急増した.図-13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.

## (3) シール材の接面応力と漏水との関係

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<sup>3</sup>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.しかしな がら、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.その要因を以下に考察する.

実験終了後におけるシール材の設置状況の観察では, 上下のシール材が密着していたことが確認された.これ



により接面応力が水圧以下となっても漏水が発生しなか ったことが考えられる.そのほか,図-8に示したように シール溝内におけるシール材の設置状況が変化すること で接面応力が変化し、止水効果(漏水状況)も変化する ことから,文献<sup>9</sup>で示されているシール材によるシール 溝内での閉塞効果が考えられる.

閉塞効果について確認するために、実験終了後にシー ル材のはらみ量・厚さをノギスにより測定した.水圧を 作用させないCASEについては顕著な差が確認できなか ったため、水圧を作用させたCASE3、6、12、13のはら み量を図-14に、膨張性シール材のCASE12、13の厚さを 図-15に示す.なお、各CASEにおけるシール材の計測箇 所を図-16に示す.図に示すようにシール材はシール溝 の中央の位置に専用の接着剤で貼付しており、実験終了 後にシール材端部を基準として外側・内側へそれぞれの はらみ量として計測した.なお、厚さについては参考値 としてシール材をシール溝から剥がした後に測定した.

図-14より,非膨張性シール材のCASEは,実験終了後にほぼすべての計測点において外側へはらみだしており, 一部のCASEでは最大約6mm程度のシール溝の端部付近まではらみだしていた.これは,水圧が作用したことによりシール材が外側へ押し出されたと考えられる.一方, 膨張性シール材は,外側に最大約2mm,内側へ最大約



目開き

, ール材が移動・変形

(b)シール材がずれた状態

本稿では、セグメント目地部の目開き量が、繰り返し 変化すると仮定した模型実験を実施し、繰り返しの目開 き変化量と接面応力の変化、およびそれにともなう漏水 の発生状況等について把握した.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接面応力が低下し、漏水に 至る可能性がある.
- 3) 膨張性シール材は、繰り返して目開き量が変化する ことで材料特性が変化し接面応力が低下するが、その 程度は非膨張と比較して小さく、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) シール材の接面応力が水圧を下回る場合においても シール材の閉塞効果等により漏水しない場合がある.

今後の課題としては、シール材の止水メカニズムにつ いてシール材の接面応力と漏水との関係について把握す ることが重要である.また、本実験においては、シール 材の接触面への滑材の塗布等は行っていない. 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 挿入時等のシール材の損傷防止や施工性等を考慮してシ

6mm程度のはらみ量であった(図-14). 膨張性シール 材の外側へのはらみ量は、2mm以下と小さいことからシ ール材が外側へ押し出されたのではなく、シール自体が 水膨潤したことによるものと考えられる. なお, 内側方 向のはらみ量が外側に比べて大きいのは内側から水を浸 透させていることから、外側よりも内側の材料のほうが 膨張している範囲が広がっていると考えられる. これは, 図-15に示したように、シール材の厚さについても場所 によって異なるが、約42~5mm程度と増加しており、 また、内側の厚さのほうが外側の厚さに比べて厚くなっ ていることと整合する.

図-17 シール材による閉塞効果の概念図

シール溝

(a)初期の状態

シール材

以上の実験終了後のシール材の状況の観察より、接面 応力が水圧以下となっても漏水が発生しなかった要因と して、上下のシール材が密着していたことともに、非膨 張性シール材の場合は図-17に示すようにシール全体が 水圧により押し出されてシール溝端部等で拘束されるこ とによる閉塞効果が、膨張性シールの場合はシール材 の内側と外側の材料の厚みや硬軟等の材料特性の違いに よりシール材の厚みの中で変形が抑制されることで閉塞 効果と同様な効果が発生したことが考えられる.

ール面に滑材を塗布する場合があるため、滑材の塗布等 がシール材の止水性へ与える影響について把握すること が重要である.

#### 参考文献

- 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.

- (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.

(2021.8.6 受付)

# A STUDY ON PERFORMANCE OF SEALING MATERIAL BETWEEN SHIELD TUNNEL SEGMENTS UNDER REPEATED YEARLY JOINT MOVEMENTS

# Toshiaki ISHIMURA, Satoshi MORIMOTO, Toru SASAKI and Atsushi KUSAKA

In this paper, we conducted an experiment on the effect of the change in the opening amount of the joint surface, which models yearly joint movements, on the water stopping performance due to the temperature change in the tunnel. As a result, it was confirmed that the contact surface stress of the sealing material decreases due to repeated changes in the opening of the joints caosing water leakage, in the case of the non-expandable sealing material. On the other hand, the contact surface stress of the expandable sealing material decreases due to repeated changes. However, it was found that water leakage is unlikely to occur by maintaining high contact surface stress. It was also found that even if the opening becomes large and the contact surface stress of the sealing material becomes less than the water pressure, water leakage may not occur due to the blocking effect.