Ⅳ 三次元有限要素法によるセグメントの挙動解析

1. 解析モデルの概要

図1.1に、解析モデルの概要図を示す。解析範囲は、事故発生時に組立てていた 112 リングから後方 30 リング(42m)とし、裏込め注入材が充填された地盤中にある部分を地盤ばねで支え、テールシール 中にある部分をテールシールばねで支える。また、セグメントピースはシェル要素でモデル化するとと もに、ばね要素でモデル化したセグメント継手、リング継手により隣接ピースと結合する。

トンネル、地盤、シールドの境界条件は、以下のように設定する。

- : 鉛直ローラー トンネル坑口側節点
- ・トンネル切羽側節点 :自由
- ・地盤ばねの地盤側節点 :固定
- ・テールシールばねのシールド側節点 :固定

セグメントに作用する外力は、以下を考慮する。

・裏込め注入材が充填された地盤中にある部分

: 土水圧

(土圧は設計土圧(2Dの緩み土圧)とした)

- ・裏込め注入材が充填されていない地盤中にある部分 :水圧
- テールシール部

- :テールシール圧(水圧と同等とする)
- ・112 リング、111 リングの切羽側端面 :ジャッキ力

裏込め注入材は、施工関係者へのヒアリングにおいて掘進リングから3リング後方で注入していたこ とが確認されており、112R 掘進時には 109R まで裏込め注入が行われたこととなるが、この時の裏込め 注入材は注入直後であるため未固結な状態と考え、基本的なモデルにおける裏込め注入材の充填範囲は 108Rから坑口側とした。

表1.1~表1.5に、入力値として、セグメント、セグメント継手ばね、リング継手ばね(ボルト部、 コンクリート接触部)、地盤ばね、テールシールばねの物性値を、図1.2~図1.3に荷重条件をそれぞれ 示す。



図 1.1 解析モデルの概要図

表 1.1 セグメントのモデル化

項目		モデル化	備考	
諸元	図心径	4660mm	外径 4820mm、内径 4500mm	
	厚さ	160mm		
	幅	1400mm		
	分割	5 分割 (4+K)		
要素分割	軸方向	5 分割(280mm)		
	周方向	52 分割(282mm)	リング継手 13 個所	
コンクリート	のヤング率	$3.6 imes10^7$ kN/m ²	f'ck=45N/mm ²	





	備考
2×10 ⁶ kN/m	引張ばね値の算出は、 別紙1参照
n	設計値を採用
理論値 解析使用値 0.50 0.60	セグメント継手と同等 とする

表 1.3 セグメ	ント継手、	および、	リング間コン	クリー	ト接触部のばね
-----------	-------	------	--------	-----	---------

項目	ばね値	備考
軸方向ばね	N ↑ 引張:k=ゼロ > δ 圧縮:k=∞	
せん断方向ばね	$S = \mu \cdot N \xrightarrow{k = t \neq \Box}_{k = \infty} \delta$	
回転ばね	(Wperformation of the second state of the s	レオンハルトの理論より

項目	ばね値	備考
法線方向ばね	40MN/m ³	設計値を採用
せん断方向ばね	13MN/m ³	法線方向ばね値/3

表 1.5 テールシールばね

項目		ばね値	備考
法線方向ばね	通常時	5MN/m ³	既往の文献*1)より 昨年度の多リングはり-ばねモ デルの解析と同様
	裏込め材固結時	17MN/m ³	既往の文献*1)より

・土圧:設計土圧(最小 2D=86.76kN/m² $\gamma' = 9.0 \text{kN/m}^3$ •水压:Hw=26.335m (HWL=MP+3.270m)







図 1.3 ジャッキパターン、ジャッキ反力



18.5

19.0

20.0



鹿島提出資料より抜粋



(a) モデル全体 (セグメントと地盤・継手ばね)



(b) セグメント (2 リング)



(c) セグメントと地盤・継手ばね(2リング)

2. 解析ケース

解析は、111RのKセグメントの抜出しに着目し、111RのK-B間セグメント継手の摩擦係数、シー ルドとセグメントの競りによるテール部の偏圧、出水によるセグメントに作用する水圧低下、109R~ 111Rの裏込めの有無に関して、表2.1に示す10ケースを実施した。

シールドとセグメントの競りによるテール部の偏圧は、右スプリングラインと天端で、テールクリア ランスがゼロとなった状態を想定し、既往の文献*2)から図2.2に示すように設定した。

また、出水によるセグメントへの作用水圧の低下は、浸透流解析の結果から111R、110R 周りの水圧 を抽出し、図2.2に示すように設定した。

なお、109R~111Rの裏込めを考慮したケースでは、裏込め注入材の硬化過程を考慮し、既往の文献*3) を参考に、112R 掘進時に注入された 1R 分については、表 2.2 に示す低減させた地盤ばねを設定した。

<u>4</u> 7	B-K間の	テール	部偏圧	出水による	109R-111R
<i>////</i>	μ	側部	上部	水圧低下	裏込めの有無
Case1-1	0.5	_	_	_	無し
Case1-2	0.1	_	_	_	無し
Case2-1	0.5	0	_	-	無し
Case2-2	0.1	0	_		無し
Case2-3	0.1	0	_	_	有り
Case3-1	0.5		0	_	無し
Case3-2	0.1	_	0	_	無し
Case3-3	0.1		0	-	有り
Case4-1	0.5			0	無し
Case4-2	0.1		_	0	無し

表 2.1 解析ケース一覧



a) 側部が競った場合 b)上部が競った場合 図 2.1 テール部偏圧の考え方









図 2.3 出水による水圧低下

表 2.2 裏込め注入材の硬化過程を考慮したばね値の設定

	時間	経過時間	経過時間	裏込めばね	ばね値
	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hour	kN∕m3	kN∕m3
110R掘進完了	8:42:19	3:23:43	3.395	1344000	地盤ばねと同等
111R掘進完了	10:16:57	1:49:05	1.818	600000	地盤ばねと同等
112R掘進完了	11:45:59	0:20:03	0.334	18000	12000
No.2、3ジャッキ引抜き	12:06:02				
				•	•

※地盤ばねと裏込め材ばねとの足し合わせは、直列ばねとして値を算出した。 ※110R、111R掘進時に注入した裏込め材は、地盤ばね(40MN/m3)以上の強度となっているため、 地盤ばねと同じばね値で設定した。



切羽に向って





b) 110R

3. 解析結果

3.1 断面力の分布

(1) トンネル円周方向の曲げモーメント

トンネル円周方向に生じる曲げモーメントの分布を表3.1に示す。

CASE1 および CASE4 は円周方向の曲げモーメントが比較的小さく、テールシールの偏圧を考慮した CASE2 と CASE3 は比較的大きな曲げモーメントが生じている。

CASE2 では 111R のスプリングライン付近で $0.6 \sim 0.8 \text{kN} \cdot \text{m/m}$ の曲げモーメントが生じており、 CASE3 では 111R のクラウン部付近で 1.2~1.4 kN·m/m の曲げモーメントが発生している。これらの 位置はテールシールの偏圧を作用させた位置であり、荷重条件と発生断面力の分布は一致している。

(2) トンネル軸方向の曲げモーメント

トンネル軸方向に生じる曲げモーメントの分布を表 3.2 に示す。

セグメントに発生するトンネル軸方向の曲げモーメントは、比較的荷重が均一な CASE1 と CASE4 では-0.2~0.2 kN·m/m であり円周方向に発生する曲げモーメントと同様に小さい値を示している。-方、テールシールの偏圧を作用させた CASE2 と CASE3 では-0.6~0.6 kN·m/m であり CASE1 や CASE4 と比較すると大きな曲げモーメントが発生している。これらの曲げモーメントが発生している 位置は円周方向の曲げモーメントと同様にテールシールの偏圧を作用させた位置の周辺である。

(3) トンネル周方向の軸力

トンネル周方向に生じる軸力の分布を表3.3に示す。

4つのケースに共通して 112R には大きな軸力が生じていない。とくに、切羽側には軸力がほとんど 発生していないことが分かる。これは、112Rには外荷重が作用していないことと一致している。

一方、111R と 110R には 1000kN/m 程度の軸力が発生している。これは、土水圧によって発生する 軸力であると考えられる。また、CASE2 のスプリングライン付近と CASE3 のクラウン付近には 2000kN/m 程度の軸力が発生している箇所が確認できる。この位置は、テールシールの偏圧を作用させ た位置と一致している。

(4) トンネル軸方向の軸力

トンネル軸方向に生じる軸力の分布を表3.4に示す。

4つのケースに共通して112Rの切羽側で1000kN/m程度の圧縮力と概ね0kN/mの軸力が交互に分布 していることが確認できる。これは、シールドジャッキの拘束効果によるものであると考えられる。一 方、111R のクラウン部付近では、ジャッキが作用していないことからこのジャッキによる拘束効果の 影響が見られない。

111R と 11OR のクラウン部付近に注目すると、いずれのケースにおいても軸圧縮力が極端に小さく なっており、CASE2 の u =0.1 としたケースと CASE3 では 500~1000kN/m 程度の軸引張力が発生し ていることが分かる。とくに CASE3 においては 110R のKセグメント付近に引張力が発生しているこ とが分かる。これは、111RのKセグメントが抜出すのに合わせて 111Rの B1 セグメントが切羽側に移 動するために 110RのKセグメントが引張られることによるものと考えられる。

3.2 セグメントの変位分布

セグメントの絶対変位の分布を表3.5に示す。

CASE1 と CASE4 では、セグメントの変位は十分に小さく、最大でも 0.5mm に満たない。一方で、 テールシールの偏圧を作用させた CASE2 と CASE3 では変位量が大きくなており、CASE2 ではセグメ ントリングが縦に伸びる方向に変形していることが、CASE3 ではセグメントリングが横に伸びる方向 に変位していることが分かる。これらの変形は側部に偏圧を考慮した CASE2 と頂部に偏圧を考慮した CASE3の荷重条件と一致している。

図 3.1 に CASE2-2 の 111R のKセグメント付近の変位図を示す。 Kセグメントが抜出し、その動きに引かれてB1セグメントと110Rとの間に目開きが生じているこ とが分かる。また、KセグメントはB2セグメント側に寄っていると思われ、B2セグメント側のセグ メント継手には目開きが確認できないが、B1セグメント側のセグメント継手には目開きが確認できる。



図 3.1 変位図 (CASE2-2)

図 3.2 に CASE3-2 の 111R のKセグメント付近の変位図を示す。 KセグメントがB2セグメント側に押しつけられながら回転を起こして抜けていく変位を示している。 これは、テールシールの偏圧をクラウン部に作用させているため、B1セグメントが押下げられること によってKセグメントを押出しているものと考えられる。



図 3.2 変位図 (CASE3-2)

3.3 Kセグメントの抜け出し

111RのKセグメントと110RのBセグメントとの間のリング継手の断面力とリング継手の伸び 量の算定結果を表3.6に示す。

解析ケース	曲 十	せん断力			曲げモーメ	伸び星
		(kN)			ント	()
	(KIN)	半径方向	接線方向	合力	(kN·m)	(mm)
CASE1-1	22.3	-1.3	-1.2	1.7	-0.1	0.02
CASE1-2	83.7	-2.4	-3.5	4.3	0.2	0.08
CASE2-1	2.0	3.4	-70.2	70.3	-1.0	0.00
CASE2-2	$103.0^{\% 1}$	-10.9	-19.7	22.5	-4.3	2.09
CASE2-3	$103.0^{\% 1}$	-12.7	-20.1	23.8	-3.4	2.15
CASE3-1	$103.0^{\% 1}$	-2.2	54.2	54.2	-1.3	0.18
CASE3-2	$103.0^{\% 1}$	-10.7	-1.1	10.8	-2.9	1.22
CASE3-3	$103.0^{\% 1}$	-10.6	-17.4	20.3	-5.8	2.03
CASE4-1	29.3	1.3	0.0	1.3	-1.1	0.03
CASE4-2	41.7	1.0	-1.4	1.7	-0.9	0.04

表 3.6 リング継手の発生断面力と伸び量の算定結果

※1:リング継手に作用する引張力がボルトの降伏点を超えている。

この結果から、リング継手のボルトが降伏する可能性がある荷重状態は CASE2・2 (設計荷重+側部テ ールシール偏圧/µ=0.1)、CASE2・3 (設計荷重+側部テールシール偏圧/µ=0.1/109R~111R 裏込めあり)、 CASE3・1 (設計荷重+頂部テールシール偏圧/µ=0.5)、CASE3・2 (設計荷重+頂部テールシール偏圧/ µ=0.1) および CASE3・3 (設計荷重+頂部テールシール偏圧/µ=0.1/109R~111R 裏込めあり) である。 また、CASE1・2 (設計荷重/µ=0.1) については短期許容応力度相当の軸力 89.5kN に近い軸力が発生し ている。セグメント継手の摩擦係数を低減し、偏圧を作用させたケースではリング継手ボルトの引張力 が降伏点を超える傾向が得られた。このとき、K セグメント部からの湧水を考慮した水圧を作用させた CASE4 は荷重強度が小さいためにリング継手ボルトは降伏点に至っていないが、μ=0.5 のケースに比 ベてμ=0.1 のケースの軸引張力が大きくなっていることから、セグメント継手の摩擦係数が小さい場合 にはリング継手に過大な引張力が作用すると考えられる。

ー方、リング継手に作用するせん断力を見ると、設計荷重(CASE1)や水圧を軽減させた荷重条件 (CASE4)では顕著な傾向が見られないが、テールシールの偏圧が作用した CASE2 と CASE3 では摩 擦係数をμ=0.5 としたケースのせん断力が卓越する傾向を示している。

リング継手に作用する曲げモーメントはいずれのケースでも小さい値を示しているが、引張力やせん 断力との組合せを考慮した場合にはその影響が顕在化する可能性がある。とくに、テールシールの偏圧 を考慮し、摩擦係数 *μ* =0.1 としたケースでは曲げモーメントが比較的大きくなっており、引張力やせん 断力が大きなケースと一致している。

リング継手の伸び量(リング継手の目開き量)は、テールシールの偏圧を考慮し、摩擦係数 μ =0.1 と したケースでは大きな値を示している。その絶対値は数 mm の水準であるが、継手に作用する断面力の 水準からリング継手が破断している可能性が高く、この条件ではKセグメントが抜出す可能性が高いと 判断される。109R~111R の裏込めの有無による違いを見ると、側部にテールシールの偏圧を作用させ た CASE2 では、裏込めを考慮することで、伸び量が低下する結果となっているが、頂部にテールシー ルの偏圧を作用させた CASE3 では、裏込めを考慮することで、伸び量が増加する結果となっている。

参考文献

- *1) 高橋正朗ら:シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究、土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号 Vol.66、pp.109-120、2010.
- *2) 荻野竹敏ら: テールシールの拘束力に関する要素実験について、土木学会第 64 回年次学術講演会 VI-010、pp.19-20、2009.
- *3) 小山幸則:シールド工法におけるセグメント設計法の合理化に関する研究、p.43、1999.

与える影響に関する研究、土木学会論文集 F1 について、土木学会第 64 回年次学術講演会 合理化に関する研究、p.43、1999.



表 3.1	トンネル周方	向の曲げモー	-メン	トの分	·布
衣 ℑ.Ⅰ	トンイル周万	回の囲けモ-	-メン	トの方	11



表 3.2 トンネル軸方向の曲げモーメントの分布



表 3.3 トンネル周方向の軸力の分布



表 3.4 トンネル軸方向の軸力の分布



表 3.5 変位量の分布