

3.5 事故発生時のシミュレーション解析

3.5.1 三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討

(1) 検討の目的

現地調査の結果から、事故の発生のきっかけとしてKセグメントの抜出しの可能性が高いと考えられる。施工関係者へのヒアリングでは、Kセグメント挿入時にセグメント継手面に滑剤を塗布していたこと、裏込め注入の実施が掘進リングから3リング後方であったことが確認されている。また、施工データの調査結果では、シールドとセグメントが競っていた可能性があると考えられることから、これらの要因がKセグメントの抜出しに与える影響を把握するために三次元解析を実施した。

(2) 解析モデルの概要

図3.5.1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、テールシール内にある部分をテールシールばねで支えた。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、以下のように設定した。

- ・トンネル坑口側節点 : 鉛直ローラー
- ・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、以下を考慮した。

- ・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
(水圧と同等とした)
- ・112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。

セグメント、セグメント継手ばね、リング継手ばね、地盤ばね、テールシールばねの物性値は、参考資料に示している。

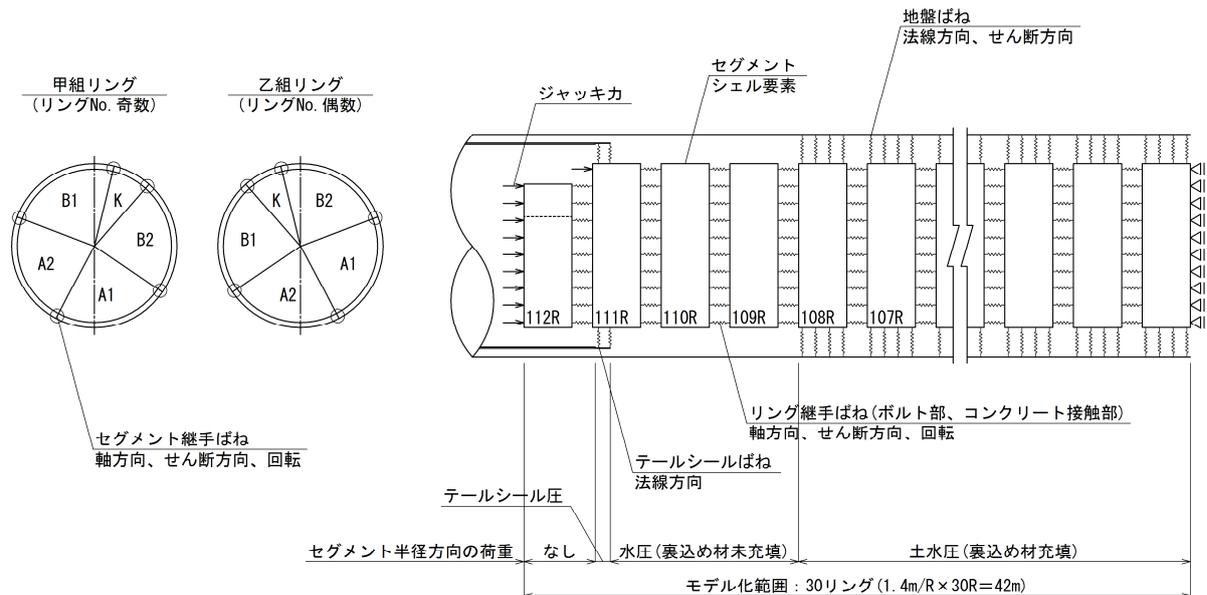


図 3.5.1 解析モデルの概要図

(3) 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 3.5.1 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¹⁾から図 3.5.2 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 3.5.3 に示すように設定した。

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²⁾を参考に、112R 掘進時に注入された 1R 分については、表 3.5.2 に示す低減させた地盤ばねを設定した。

表 3.5.1 解析ケース一覧

ケース	B-K間の μ	テール部偏圧		出水による 水圧低下	109R-111R 裏込めの有無
		側部	上部		
Case1-1	0.5	—	—	—	無し
Case1-2	0.1	—	—	—	無し
Case2-1	0.5	○	—	—	無し
Case2-2	0.1	○	—	—	無し
Case2-3	0.1	○	—	—	有り
Case3-1	0.5	—	○	—	無し
Case3-2	0.1	—	○	—	無し
Case3-3	0.1	—	○	—	有り
Case4-1	0.5	—	—	○	無し
Case4-2	0.1	—	—	○	無し

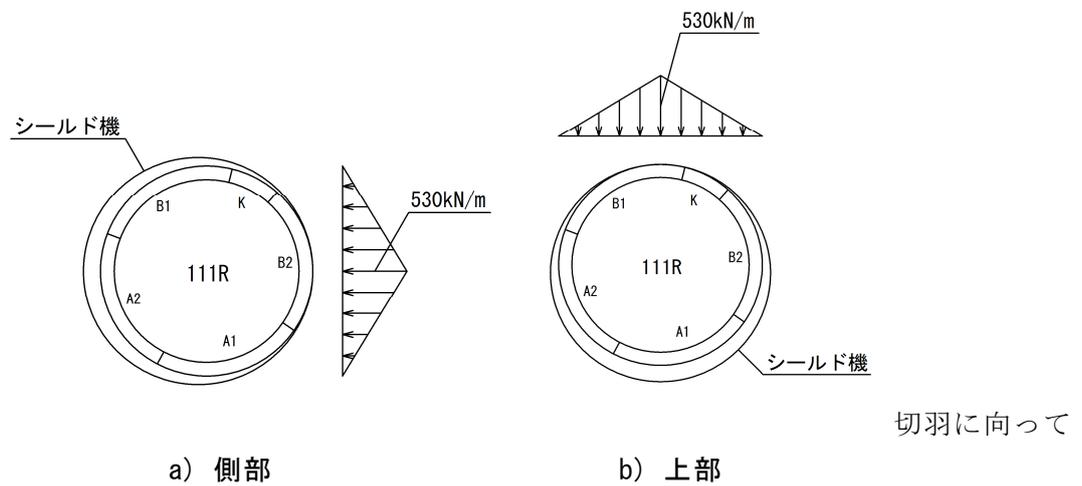


図 3.5.2 テール部偏圧

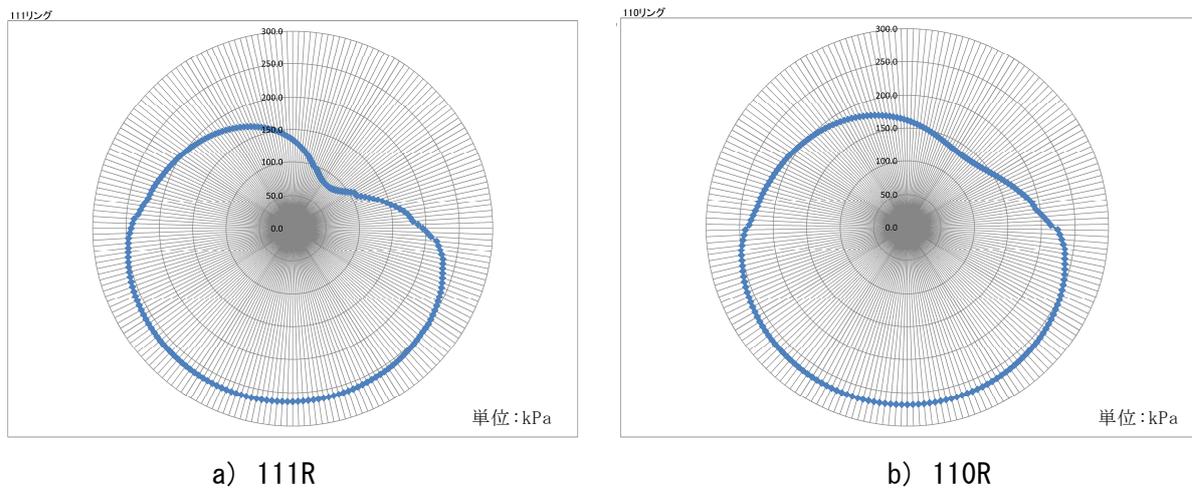


図 3.5.3 出水による水圧低下

表 3.5.2 裏込め注入材の硬化過程を考慮したばね値の設定

	時間 hh:mm:ss	経過時間 hh:mm:ss	経過時間 hour	裏込めばね kN/m ³	ばね値 kN/m ³
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。

(4) 解析結果

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3.5.3に示す。

表 3.5.3 リング継手の発生断面力と伸び量の算定結果

解析ケース	軸力 (kN)	せん断力 (kN)			曲げモーメント (kN・m)	伸び量 (mm)
		半径方向	接線方向	合力		
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

※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/ $\mu=0.1$ ）、CASE2-3（設計荷重+側部テールシール偏圧/ $\mu=0.1/109R\sim 111R$ 裏込めあり）、CASE3-1（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.5$ ）、CASE3-2（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.1$ ）およびCASE3-3（設計荷重+頂部テールシール偏圧/ $\mu=0.1/109R\sim 111R$ 裏込めあり）である。また、CASE1-2（設計荷重/ $\mu=0.1$ ）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、 $\mu=0.5$ のケースに比べて $\mu=0.1$ 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。

一方、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 $\mu = 0.5$ 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 $\mu = 0.1$ 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 $\mu = 0.1$ 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 セグメントが拔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。

(5) まとめ

三次元有限要素法によるセグメント挙動の検討を行った結果、セグメント継手面の摩擦係数が低下し、セグメントに偏荷重が作用することで、リング継手にボルトの降伏点を越えるような引張力が作用することが確認された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

3.5.2 三次元浸透流解析による切羽圧変化の検討

(1) 検討の目的

事故発生時において切羽圧の急激な低下が計測されており、この時から出水が始まったと推定しているが、出水と切羽圧低下の関連については明らかになっていない。そのため、111RのKセグメント付近で出水が発生することで、切羽の圧力が低下するかを確認するために三次元浸透流解析を実施した。なお、解析の手法は、時間の経過に伴う圧力の変化を表現するため、非定常解析とした。

(2) 解析モデルの概要

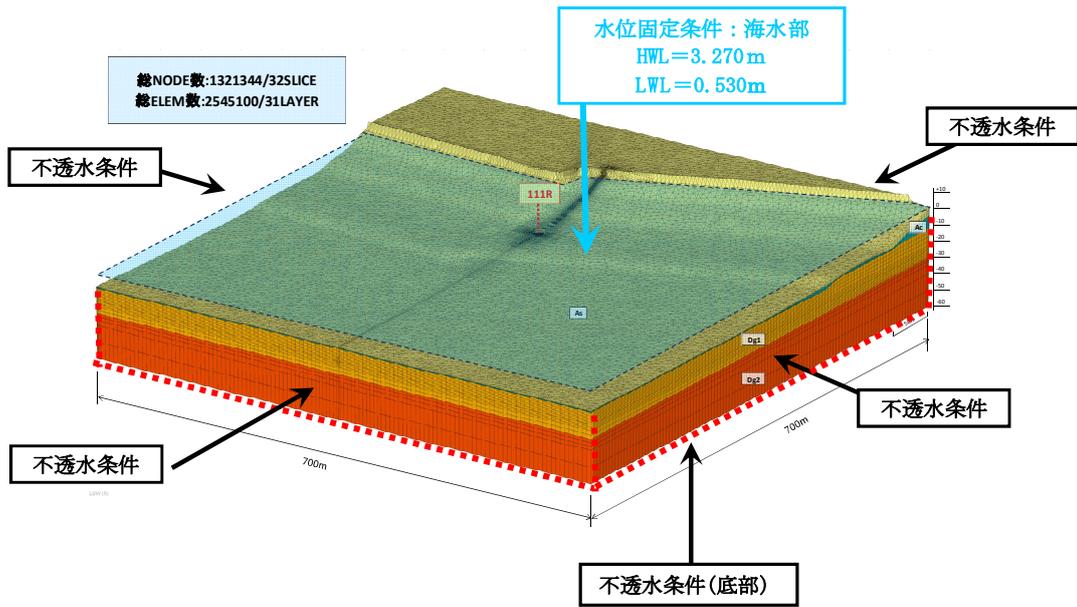
三次元地盤モデルは、縦断方向700m、横断方向700mの矩形、鉛直方向はGH-60m~GH+10mの範囲である。また、要素分割はシールド軸方向、および横断方向について最小距離0.2mとして詳細分割し、セグメントの変状が比較的小さい区域と地盤データの少ない地域は、地形凹凸が再現でき、地表水の流下が再現できる程度までの分割とし、要素分割数は表3.5.4に示すとおりである。図3.5.3に三次元モデルの概要図を示す。本地盤モデルにおける帯水層区分は、既往地質概要を基に4区分とし、各地層に表3.5.5に示す透水係数、体積含水率、比貯留係数を設定した。境界条件は、図3.5.3に示すとおり、海水部は潮位として水位固定条件、モデル側面と底面は、地下水流出入量が無い不透水境界として扱う。Kセグメントの抜き出し量（出水面積）は、現地調査の結果によると初期の抜き出し量がエレクションガイドの寸法より150mm程度以内と考えられることから、100mm（出水面積は約0.1m²）として検討を行った。

表 3.5.4 三次元地盤モデルの要素分割

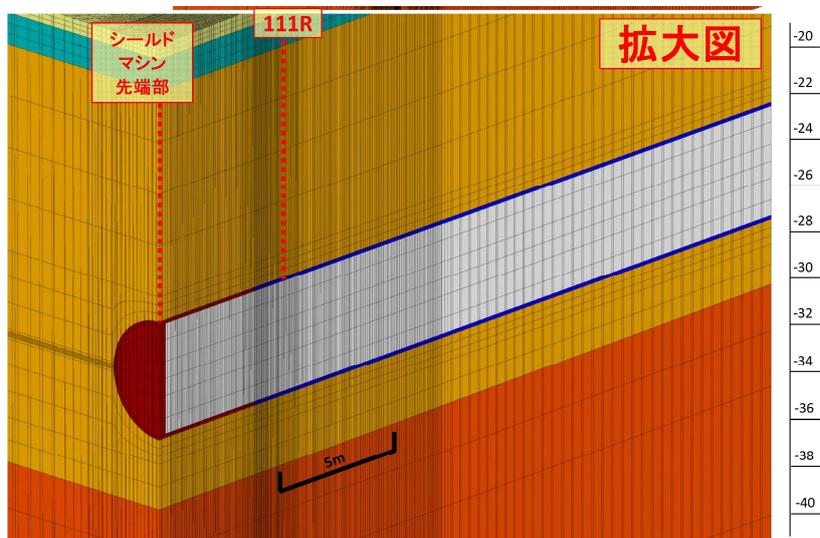
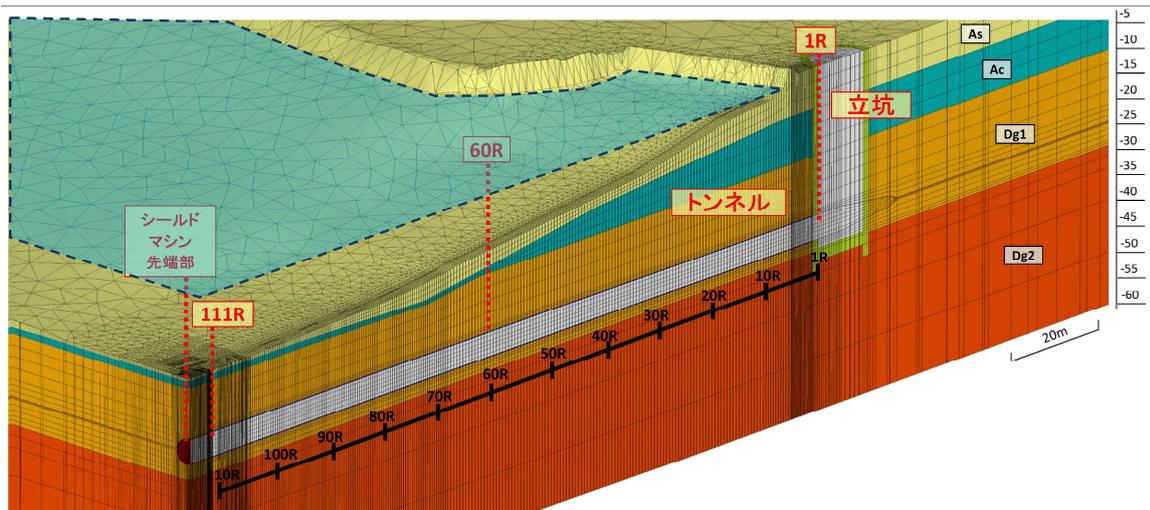
要素数	2,545,100	要素分割最小長 シールド縦断方向 0.20m 横断方向 0.20m 鉛直方向 0.05m
節点数	1,321,344	
水理区分数	6	

表 3.5.5 帯水層区分と水理定数

	地質	透水係数の試験値 (cm/sec)	透水係数 (cm/sec)	飽和体積含水率 (%)	比貯留係数 (-)
1	表層(As1)	-	1.00E-03	3.00E+01	1.00E-03
2	Ac		1.00E-05	3.00E+01	3.00E-03
3	Dg1	1.00E-2~7.00E-3	1.00E-02	3.00E+01	5.00E-05
4	Dg2	1.00E-1~2.00E-2	1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
5	セグメント		1.00E-10	1.00E-03	1.00E-10
7	Kセグメント破損部		1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
8	シールド外周緩み範囲		1.00E-01	3.00E+01	1.00E-04
9	立坑コンクリート		1.00E-10	1.00E-03	1.00E-10

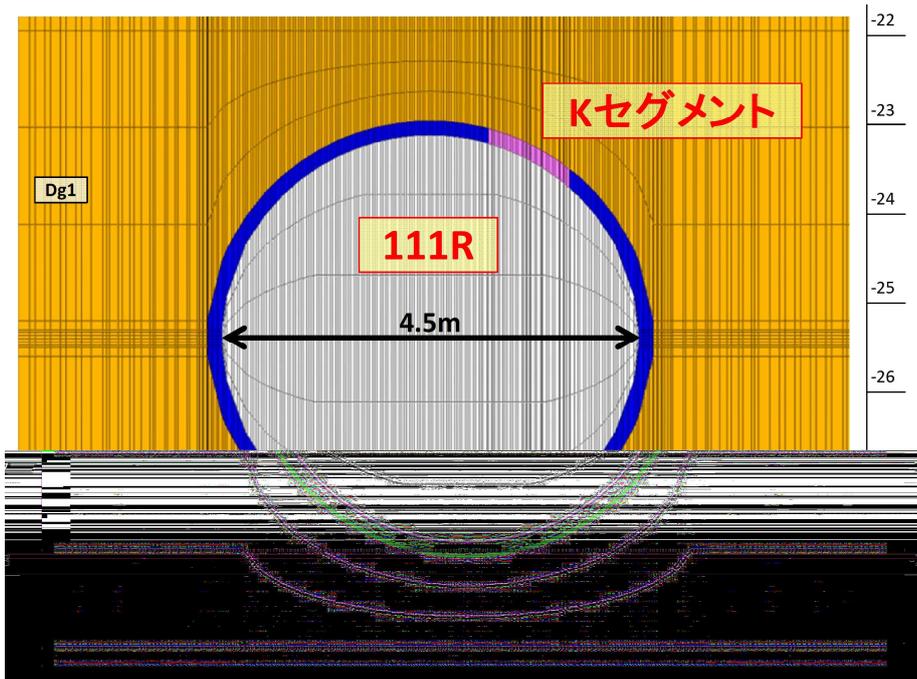


a) モデル全体図と境界条件

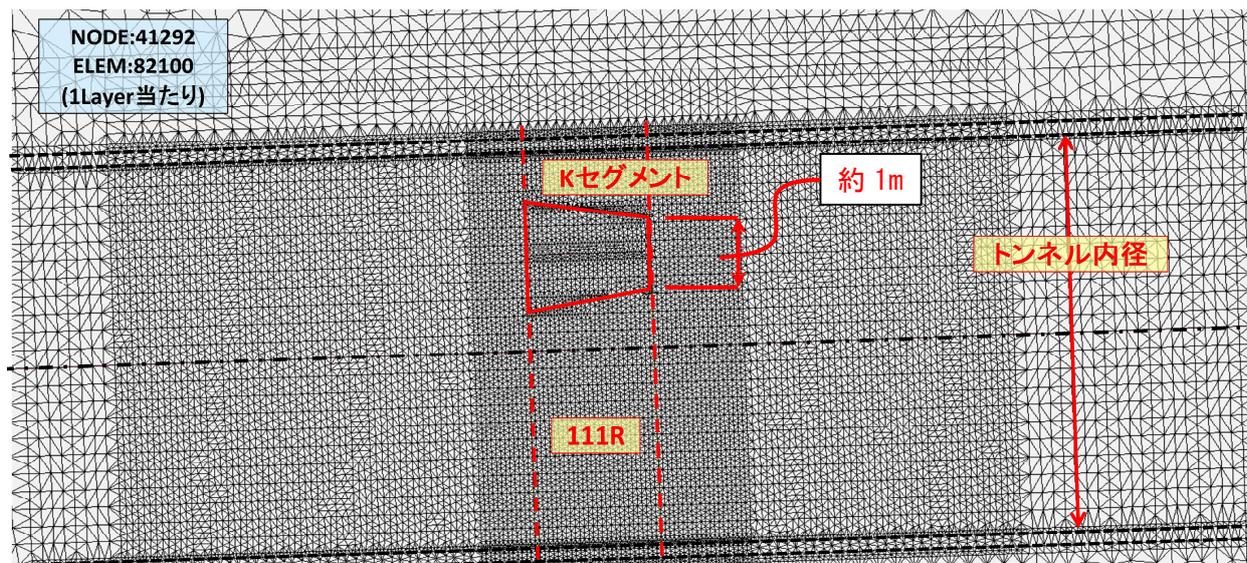


b) モデル縦断面図

図 3.5.3 三次元モデルの概要図と境界条件



c) 111R 断面図 (坑口より見て)



d) 111R 付近の平面図

図 3.5.3 三次元モデルの概要図と境界条件

(3) 解析結果

図 3.5.4 に、事故時に計測された切羽圧と三次元浸透流解析により得られた土圧計の位置における間隙水圧の経時変化の比較を、図 3.5.5 に三次元浸透流解析により得られた湧水量をそれぞれ示す。この図から、解析結果は計測された切羽圧の低下を良く再現できていることから、出水が発生することで切羽圧が低下することが確認された。また、湧水量は定常状態で約 $0.9\text{m}^3/\text{min}$ であり、 1cm^2 あたりに換算すると $15\text{cc}/\text{sec}$ の湧水量である。

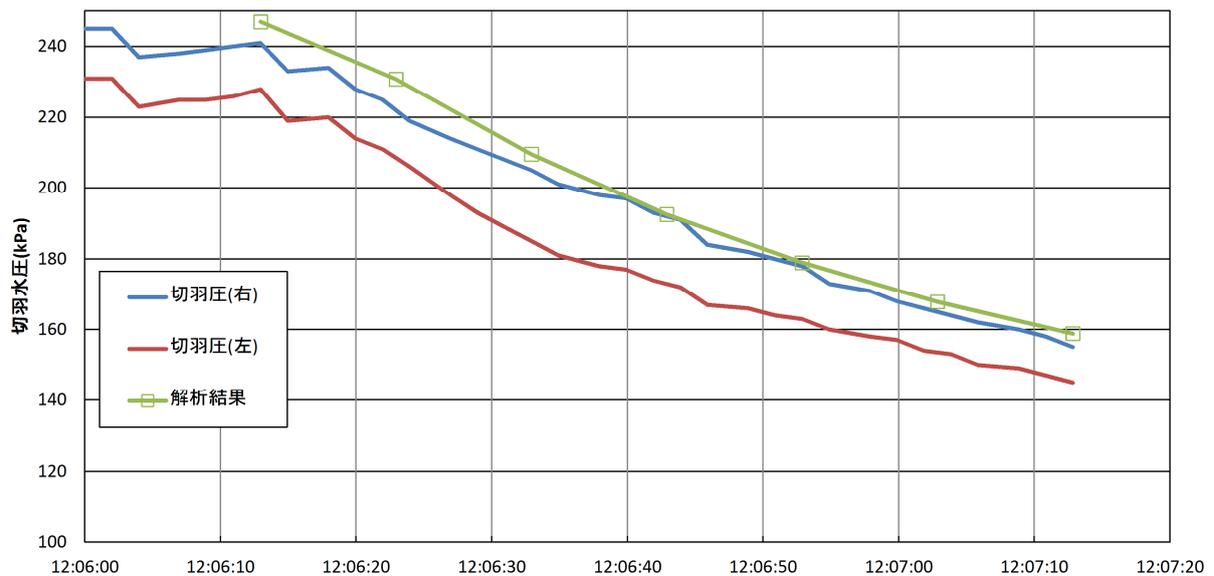


図 3.5.4 間隙水圧の経時変化

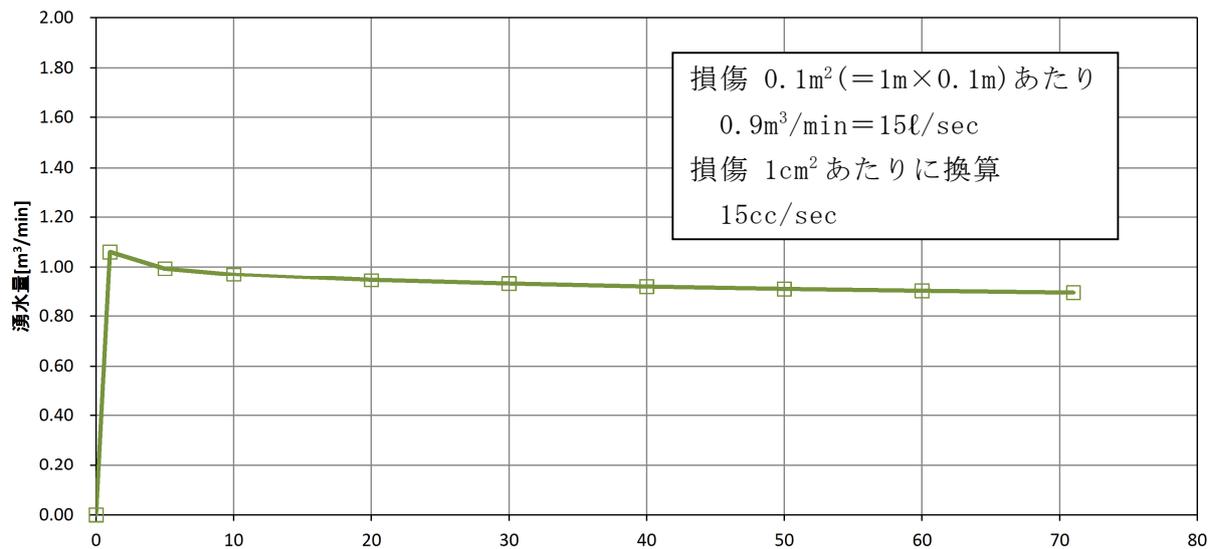


図 3.5.5 湧水量

(4) まとめ

三次元浸透流解析による切羽圧の変化の検討を行った結果、111R の K セグメント付近で出水が発生することで、切羽の圧力が低下する可能性が十分にあることが確認された。