

トンネルシーリング性能試験における  
試験領域の  
応力，水理及び応力水理連成解析

(研究報告)

2004年2月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複製・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

トンネルシーリング性能試験における試験領域の応力、水理及び応力水理連成解析  
(研究報告)

杉田 裕\*, 鈴木英明\*\*, 伊藤 彰\*, 酒井裕一\*\*, 川上 進\*

要 旨

核燃料サイクル開発機構は、原位置かつ実規模のプラグの性能を把握するとともに、それらの性能を評価する解析手法の開発を目的として、カナダの原子力公社の地下研究施設においてトンネルシーリング性能試験を実施している。試験で取得された実規模のコンクリートプラグおよび粘土プラグの閉鎖性能のデータに基づき、プラグの止水性能を解析で評価した。ここでは、岩盤中の間隙水圧分布及び湧水量を評価するため、応力解析、水理解析及び応力水理連成解析を実施した。

応力解析では試験坑道の掘削に伴う試験坑道周辺の応力状態を把握し、水理解析及び応力水理連成解析では試験坑道掘削からプラグの設置、加圧室への注水昇圧までを試験工程を考慮して間隙水圧及び湧水量の経時変化を解析で評価した。試験坑道を掘削することにより試験坑道周辺の岩盤は間隙水圧の変化等が生ずるため、これらを考慮できる応力水理連成解析により間隙水圧の変化及び湧水量の変化を表現できた。

---

\* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

\*\* 検査開発株式会社

Stress, Hydraulic and coupled Stress-Hydraulic analysis  
at experimental region in the Tunnel Sealing Experiment  
(Research Document)

Yutaka SUGITA\*, Hideaki SUZUKI\*\*, Akira ITO\*, Yuichi SAKAI\*\*  
and Susumu KAWAKAMI\*

Abstract

Japan Nuclear Cycle Development Institute has joined the international project, the Tunnel Sealing Experiment, to demonstrate the sealing performance of the full scale plugs in-situ, and to develop analytical method of the sealing performance of the plugs at the Underground Research Laboratory of Atomic Energy of Canada Limited in Canada. We performed the analysis of the sealing performance of the full scale plugs considering the monitored data on sealing performance of the plugs. In these analyses, stress analysis, hydraulic analysis and coupled stress-hydraulic analysis were performed to explain distribution of the pore pressure in host rock and seepage through plugs.

Stress analysis showed the stress condition in host around the test tunnel. Hydraulic and coupled stress-hydraulic analyses showed the change with time of pore pressure and seepages considering schedules of opening of the test tunnel, installation of the plugs and pressurizing of the chamber. Since opening the test tunnel caused changes of the pore pressure in host rock around the test tunnel, the coupled stress-hydraulic analysis explained distribution of the pore pressure in the host rock around the test tunnel and seepage through plugs.

---

\* Barrier performance group, Waste isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works  
\*\* Inspection and Development Cooperation

目 次

1	はじめに	1
2	解析	2
2.1	解析モデル	2
2.2	解析の流れ	4
3	解析結果	15
3.1	応力解析結果	15
3.2	水理解析結果	17
3.3	応力水理連成解析結果	40
4	まとめ	52
5	おわりに	53
	参考文献	54

表 目 次

表-2.1	応力解析に用いた岩盤物性	4
表-2.2	試験工程	5
表-2.3	水理解析に用いた物性値	11
表-2.4	水理解析ケース	12
表-2.5	応力水理連成解析に用いた物性値	12
表-3.1	試験で計測された各プラグ周辺からの湧水量	26

図 目 次

図-1.1	トンネルシーリング性能試験の概観	1
図-2.1	試験坑道の形状	2
図-2.2	試験坑道配置及び応力・水理・応力水理連成解析のモデル化領域の断面	2
図-2.3	応力・水理・応力水理連成解析モデル	3
図-2.4	試験坑道及び切り欠き部の形状	3
図-2.5	応力・水理・応力水理連成解析メッシュ図（モデル全体）	3
図-2.6	応力解析の境界条件	4
図-2.7	プラグ設置以降における水理解析及び応力水理連成解析モデル	5
図-2.8	プラグ設置以降におけるプラグ周辺の水理解析及び応力水理連成解析モデルの詳細	6
図-2.9	解析メッシュ拡大図（プラグ、加圧室及びこれら周辺岩盤）	7
図-2.10	水理解析模式図	9-11
図-3.1	プラグ切り欠き部の応力状態表示の断面位置	15
図-3.2	試験坑道周辺岩盤における引張り応力5MPa以上の分布	15
図-3.3	プラグ断面を含む試験坑道周辺岩盤における引張り応力 5MPa 以上の分布	16
図-3.4	試験坑道周辺岩盤におけるせん断応力 70MPa 以上の分布	16
図-3.5	プラグ断面を含む試験坑道周辺岩盤におけるせん断応力 70MPa 以上の分布	16
図-3.6	モールクーロンの破壊基準を用いて求めた局所安全率の分布	17
図-3.7	間隙水圧の出力ライン	18
図-3.8	加圧室中心位置断面におけるパッカーシステムの位置	18
図-3.9	両プラグ下流側のダム設置位置とダムに流れ込む範囲	18
図-3.10	case11 の各ステップでの間隙水圧の分布	19-21
図-3.11	case11 の間隙水圧コンター	22-23
図-3.12	case11 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較	25
図-3.13	case11 の湧水量の解析結果と実測値との比較	27

図-3.14	case12 の 0.8MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化	28
図-3.15	case12 の 2.0MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化	29
図-3.16	case12 の 4.0MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化	30
図-3.17	case12 の間隙水圧コンター	31-32
図-3.18	case12 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較	34
図-3.19	case12 の湧水量の解析結果と実測値との比較	35
図-3.20	case13 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較	36
図-3.21	case14 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較	38
図-3.22	case14 の湧水量の解析結果と実測値との比較	39
図-3.23	各ステップでの鉛直方向の間隙水圧	40-42
図-3.24	各ステップでの水平方向の間隙水圧	43-45
図-3.25	試験坑道掘削直後の間隙水圧の変化	46
図-3.26	試験坑道掘削前後の定常応力解析による岩盤の平均主応力	47
図-3.27	試験坑道掘削前後における岩盤の平均主応力の变化量	48
図-3.28	間隙水圧の解析結果と実測値との比較	49
図-3.29	湧水量の解析結果と実測値との比較	51

## 1 はじめに

トンネルシーリング性能試験は、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が平成7年（当時、動力炉・核燃料開発事業団）、カナダの原子力公社（以下、AECL）との国際共同研究として、AECLの地下研究施設（Underground Research Laboratory, 以下、URL）で開始した図-1.1に示すように実規模のコンクリートプラグ及び粘土プラグの閉鎖性能の検証試験である（藤田・杉田, 1998 ; Chandler et al., 1998 ; Chandler et al., 2001 ; Martino et al., 2003）。本試験は、サイクル機構とAECLに加え、フランスの放射性廃棄物管理機関（以下、ANDRA）及びアメリカのサンディア国立研究所（以下、SNL）が参加している。

地層処分における安全性能の評価のためには、人工バリアや天然バリアの性能の評価に加え、それ以外に存在する人工材料の評価も重要である。人工材料とは、たとえば人工バリア定置後に残された坑道を埋め戻す材料、あるいはレイアウトに応じて配置される止水プラグ等である。トンネルシーリング性能試験は、これらのうち、プラグの性能に着目している。トンネルシーリング性能試験では、原位置かつ実規模のプラグの性能を把握するとともに、それらの性能を評価する解析手法の開発を目的としている。具体的には、原位置で取得できる限られたデータから岩盤内の水理条件（間隙水圧等）やプラグからの湧水量といった止水性能の指標を評価する。

これまでに、試験坑道の掘削、プラグの施工、加圧室への試験水の注水、加圧、及び温水の注水と試験、トレーサー試験を実施し（杉田・升元, 2002 ; Dixon et al., 2002 ; 杉田ほか, 2003 ; Martino et al., 2003）、プラグの止水性能に関するデータを取得してきた。

ここでは、試験坑道の掘削から両プラグの設置、加圧室への試験水の注水・加圧という試験工程を考慮した応力解析、水理解析及び応力水理連成解析を実施し、岩盤内の計測データ及びプラグからの湧水量との比較を行い、プラグの止水性能の評価・解析手法としての妥当性について示す。得られた結果は、今後、湧水の移行経路の把握を目的として実施する、トレーサー解析の解析モデル及び入力条件の設定に資することとなる。

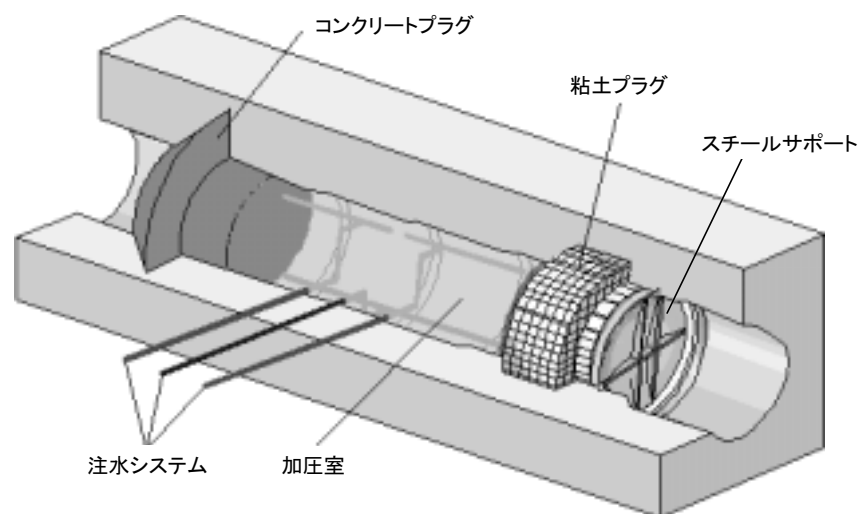


図-1.1 トンネルシーリング性能試験の概観



## 2 解析

解析はトンネルシーリング性能試験が行われている領域を考慮した3次元のモデルを用い、解析コードは有限要素解法の非線形構造解析システム「ABAQUS 6.1」を用いた。

### 2.1 解析モデル

トンネルシーリング性能試験の実施されている試験坑道は、最大主応力方向に平行となっているものの、坑道断面における主応力の比（中間主応力：最小主応力）は約4:1であり、図-2.1に示すように坑道は楕円形に掘削されている。このように坑道断面の形状を楕円形にすることにより、応力集中による岩盤の破壊を抑制することで坑道形状を確保している。したがって、解析モデルもこれに対応させ、断面を楕円形とした。

トンネルシーリング性能試験では、図-2.2に示すように試験坑道であるRoom425の周囲に複数の計測坑道が配置されている。そこで、試験坑道と計測坑道との間隔を考慮し、図-2.2に示した解析領域の断面を設定した。

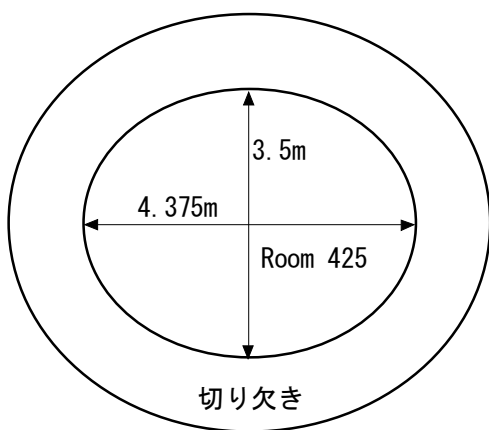


図-2.1 試験坑道の形状

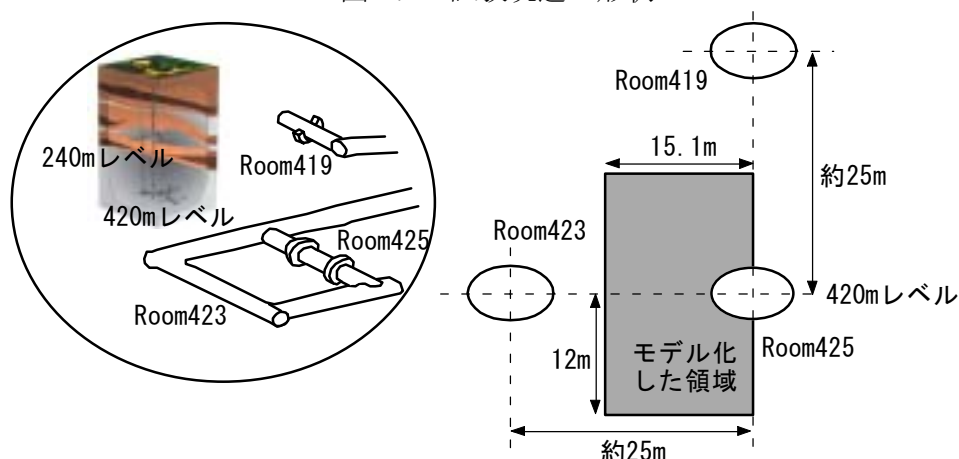


図-2.2 試験坑道配置及び応力・水理・応力水理連成解析のモデル化領域の断面

両プラグの形状を含めた解析モデル全体の形状を図-2.3に示す。また、試験坑道及び各プラグの切り欠き部の寸法を図-2.4に示す。解析モデルの試験坑道断面の楕円の長軸短軸比は、実

際の試験坑道と同じ5:4とした。図-2.5に解析メッシュを示す。節点は約27,000，要素は約33,000である。節点数に比べて要素数が多いのは，水理解析及び応力水理連成解析で二重要素を用いたためである。

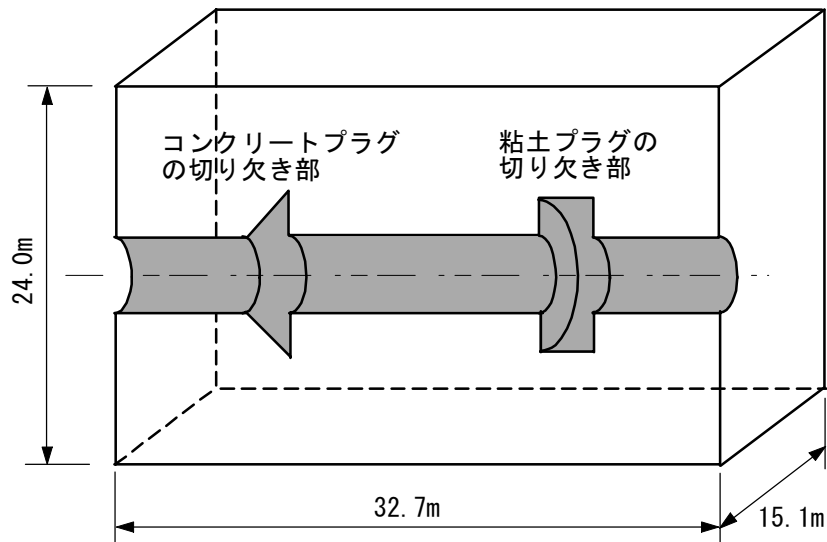


図-2.3 応力・水理・応力水理連成解析モデル

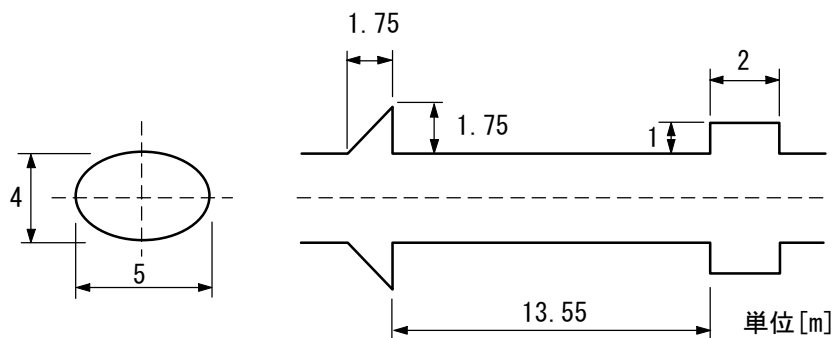


図-2.4 試験坑道及び切り欠き部の形状

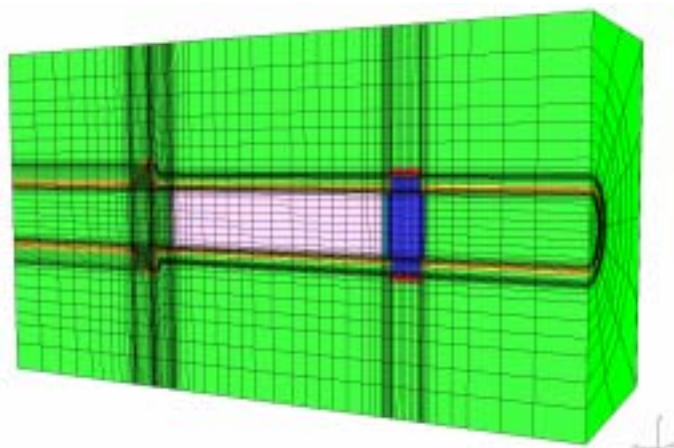


図-2.5 応力・水理・応力水理連成解析メッシュ図（モデル全体）

緑；コンクリートプラグ，岩盤，坑道，青；粘土プラグ，  
黄・赤；掘削影響領域，ピンク；加圧室

## 2.2 解析の流れ

はじめに、応力解析を実施し、プラグ周囲におけるゆるみ領域の発生状況をこれまでの解析結果（Chandler et al.,2001）と比較した。次に、試験坑道の掘削からプラグの設置、注水といった試験工程を考慮した水理解析を行い岩盤内に設置した間隙水圧計の計測値及びプラグからの湧水量との比較を行った。さらに、応力との連成を考慮した応力水理連成解析を行い、応力を連成させない水理解析結果との比較を行った。

### (1) 応力解析

応力解析は、はじめに地圧環境下での岩盤の自重解析を行い、次に、試験坑道部分の要素をモデル全体から削除することにより試験坑道掘削を表現した。応力解析では、岩盤強度に基づき、仮定した岩盤が破壊する応力値を用いて、岩盤の破壊の分布を求めた。また、モールクーロンの破壊基準を用いて局所安全率を求めた。局所安全率が 1.5 以下の部分を掘削影響領域とした（核燃料サイクル開発機構，1999）。

図-2.6 に境界条件を示す。URL で計測されている応力値を各境界に作用させた。解析に用いた岩盤物性（Chandler et al.,2001）を表-2.1 に示す。

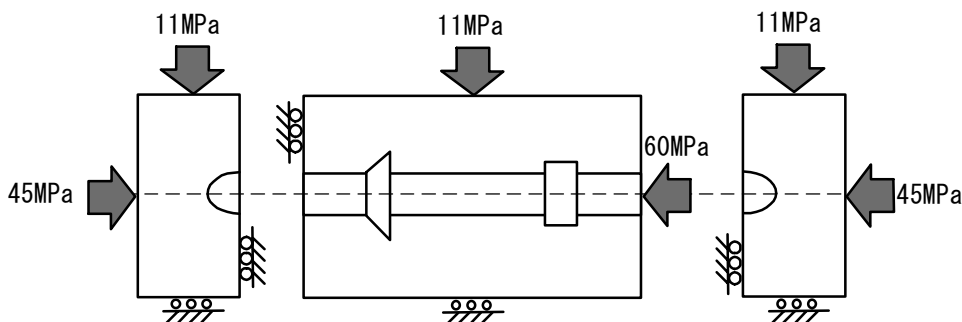


図-2.6 応力解析の境界条件

表-2.1 応力解析に用いた岩盤物性

密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	弾性係数 [GPa]	ポアソン比 [-]	粘着力 [MPa]	内部摩擦角 [°]
2700	65	0.25	27	47

### (2) 水理解析

水理解析では、トンネルシーリング性能試験における試験坑道周辺岩盤の水理環境を把握するために浸透流解析を実施した。ABAQUS 6.1 では、多孔質媒体中における間隙流体の流れと変形とが完全な連成問題として扱われているが、ここでは、節点すべての変位を拘束することにより、岩盤やプラグ等の変形は考慮せず地下水の流れだけの取り扱いとした。後の応力水理連成解析においては変形を考慮した。

解析は、表-2.2 に示す試験工程のように、試験坑道の掘削から各プラグの建設期間を経て加圧室への 0.8MPa から 4.0MPa の加圧水の注水に至るまでを連続して実施した。さらに、

試験坑道周辺に応力解析結果を参考にゆるみ域を設定した場合としない場合や、岩盤物性や境界条件を変化させた解析を実施し、試験で計測されている試験坑道周辺岩盤の間隙水圧及び粘土プラグ、コンクリートプラグ周辺からの湧水量との比較を行なった。

表-2.2 試験工程

		1998	1999	2000	2001
試験条件	プラグ設置	設置完了(9/16)			
	昇圧開始	(11/2)		(4/10)	(4/25)
	昇圧		800kPa	昇圧	2MPa
	注水開始	(9/28)	800kPa達成(5/19)	2MPa達成(7/28)	4MPa達成(9/6)
計測項目	間隙水圧				
	湧水量				

解析モデルの例として、両プラグ設置以降における解析モデル全体を図-2.7 に、両プラグ周りの詳細を図-2.8 に示す。ゆるみ域については、発破による損傷にあわせて試験坑道掘削にともなう応力再配分により岩盤が破壊していると考えられる部分 (EDZ1)、応力再配分により岩盤が破壊しているが、拡幅により発破の損傷部分が取り除かれている部分 (EDZ2)、さらに、これらの影響が少ない部分 (EDZ3) の三通りに分けて設定した。

境界条件は、試験が実施されたトンネル中心が地表から 420mの深度であることから、試験坑道中心から 12m上部となるモデル上面 (GL-408m) を 4.08MPa、トンネル中心から 12 m下部となるモデル下面 (GL-432m) を 4.32 MPa の水頭固定境界、それ以外の面は不透水境界とした。そして、試験坑道の掘削にともないトンネル壁面にあたる節点の間隙水圧をゼロに拘束した。岩盤及びトンネル掘削後に建設されるプラグ等の初期条件は完全飽和状態とした。

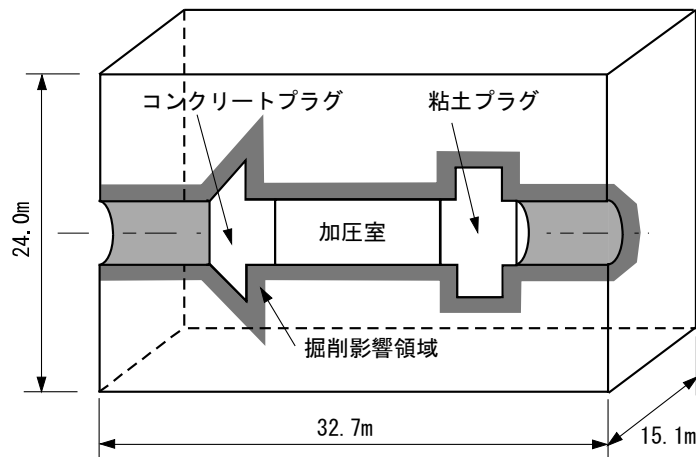


図-2.7 プラグ設置以降における水理解析及び応力水理連成解析モデル

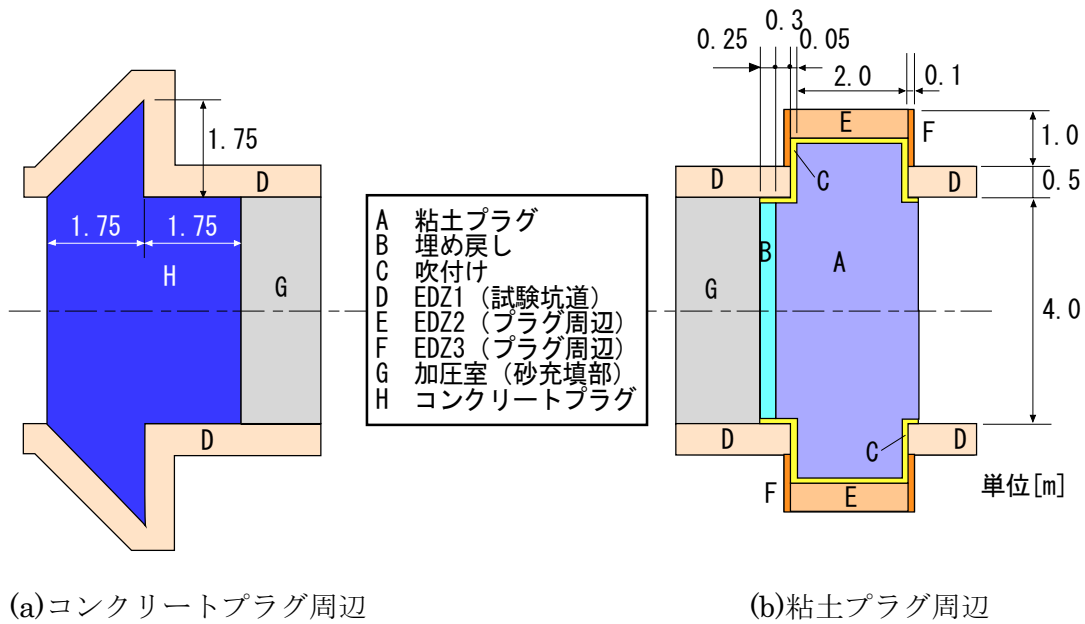


図-2.8 プラグ設置以降におけるプラグ周辺の水理解析及び  
応力水理連成解析モデルの詳細

水理解析では、岩盤中への試験坑道の掘削、粘土プラグとコンクリートプラグの建設、さらに、両プラグ間の加圧室に砂を充填し、この部分に水圧を作用させるまでの工程を連続して解析するために、ABAQUS6.1のモデルチェンジという機能を用いた。モデルチェンジは、要素を削除（不活性化）し、ふたたび復活（活性化）させるオプション機能である。この機能を用いて、例えば、試験坑道掘削後にプラグ建設を表現する場合には、試験坑道部分の岩盤の要素を削除（不活性化）した後、二重要素により用意しておいたプラグ部分の要素を復活（活性化）させた。また、この機能を用いて試験坑道掘削によって生じるゆるみ域を表現した。つまり、試験坑道部分の要素を削除（不活性化）するのと同時に、ゆるみ域が発生する部分に、二重要素により用意しておいたゆるみ域の物性を持った要素に入れ替えた。二重要素を用いていることから、水理解析で用いた要素分けは以下の①～⑩ようになる。これは、後の応力水理連成解析においても同様である。これらの要素の内、プラグ等設置以降における解析メッシュの拡大を図-2.9に示す。

- ①岩盤全部
- ②掘削する試験坑道部分
- ③後に EDZ1 と入れ代わる部分
- ④後に EDZ2 と入れ代わる部分
- ⑤後に EDZ3 と入れ代わる部分
- ⑥EDZ1 (図-2.9 の黄色部分)
- ⑦EDZ2 (図-2.9 のピンク部分)
- ⑧EDZ3 (図-2.9 の粘土プラグ切り欠き部の白色部分)
- ⑨埋め戻し材 (図-2.9 の粘土プラグ横の緑色部分)
- ⑩粘土プラグ (図-2.9 の青色部分)

- ①吹付け材（図-2.9 の粘土プラグと EDZ1-3 の間の黄色部分）
- ②コンクリートプラグ（図-2.9 の左側緑色部分）
- ③加圧室（図-2.9 の白色部分）

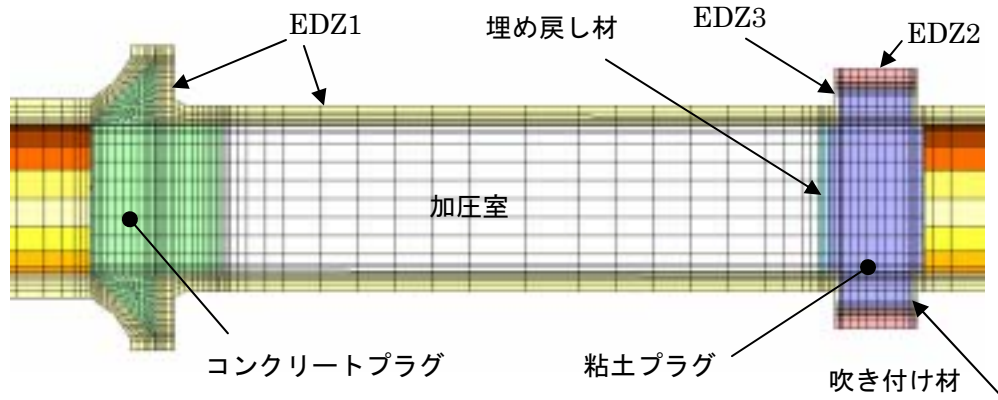


図-2.9 解析メッシュ拡大図（プラグ，加圧室及びこれら周辺岩盤）

解析では，試験坑道掘削，プラグの設置，そして加圧室の圧力を 800kPa, 2.0MPa, 4.0MPa と段階的に昇圧させる圧入試験までを連続して表現するため，以下に示すように 14 のステップで解析を構成した。各ステップにおける解析のイメージを図-2.10 に示す。Step1～Step14 は，トンネルシーリング試験のスケジュールから設定した。

### Step1

岩盤の初期状態を定常自重計算により求める。この段階では，後に建設を表現するために二重要素でモデル化しておいた粘土プラグ，埋め戻し材，吹付け材，コンクリートプラグ，加圧室の要素，及び試験坑道掘削後に生じる EDZ の要素は，モデルチェンジの機能を用いて削除（不活性化）しておく。

### Step2

試験坑道掘削を表現するため，試験坑道部分及び試験坑道掘削時に生じる EDZ となる部分の削除（不活性化）を行う。

### Step3

EDZ の発生を表現するため，EDZ 部分（Step1 で削除しておいた）を復活（活性化）させる。この段階では，41 日間の時間指定でトンネル壁面の間隙水圧を 0 に低下させることによりトンネル掘削期間を表現する。

### Step4

338 日間の非定常解析（次 Step の粘土プラグの建設開始までの待機期間）を行う。

### Step5

Step1 で削除（不活性化）しておいた粘土プラグ，埋め戻し材，吹付け材を復活（活性化）させる。この段階では，120 日の時間指定で復活させることにより建設期間を表現する。

同時に，境界条件の更新を行い，粘土プラグが接触する試験坑道壁面の間隙水圧の拘束を解除する。粘土プラグ等は飽和の取扱いとした。

**Step6**

41 日間の非定常解析（次 Step の加圧室，コンクリートプラグの建設開始までの待機期間）を行う。

**Step7**

Step1 で削除（不活性化）しておいた加圧室，コンクリートプラグを復活（活性化）させる。この段階では，49 日の時間指定で活性化させることにより建設期間を表現する。同時に，加圧室，コンクリートプラグが接触するトンネル壁面の間隙水圧の拘束を解除する。

**Step8**

47 日間の非定常解析（次 Step の加圧開始まで待機期間）を行う。

**Step9**

加圧室内圧力を 0.8MPa に昇圧（198 日間の時間指定でゼロから 0.8MPa に上昇）する。

**Step10**

327 日間の非定常解析（0.8MPa の保持期間）を行う。

**Step11**

加圧室内圧力を 2.0MPa に昇圧（109 日間の時間指定で 0.8MPa から 2.0MPa に上昇）する。

**Step12**

271 日間の非定常解析（2.0MPa の保持期間）を行う。

**Step13**

加圧室内圧力を 4.0MPa に昇圧（134 日間の時間指定で 2.0MPa から 4.0MPa に上昇）する。

**Step14**

以後 100 日間（2001 年 12 月末まで）の非定常解析を行う。

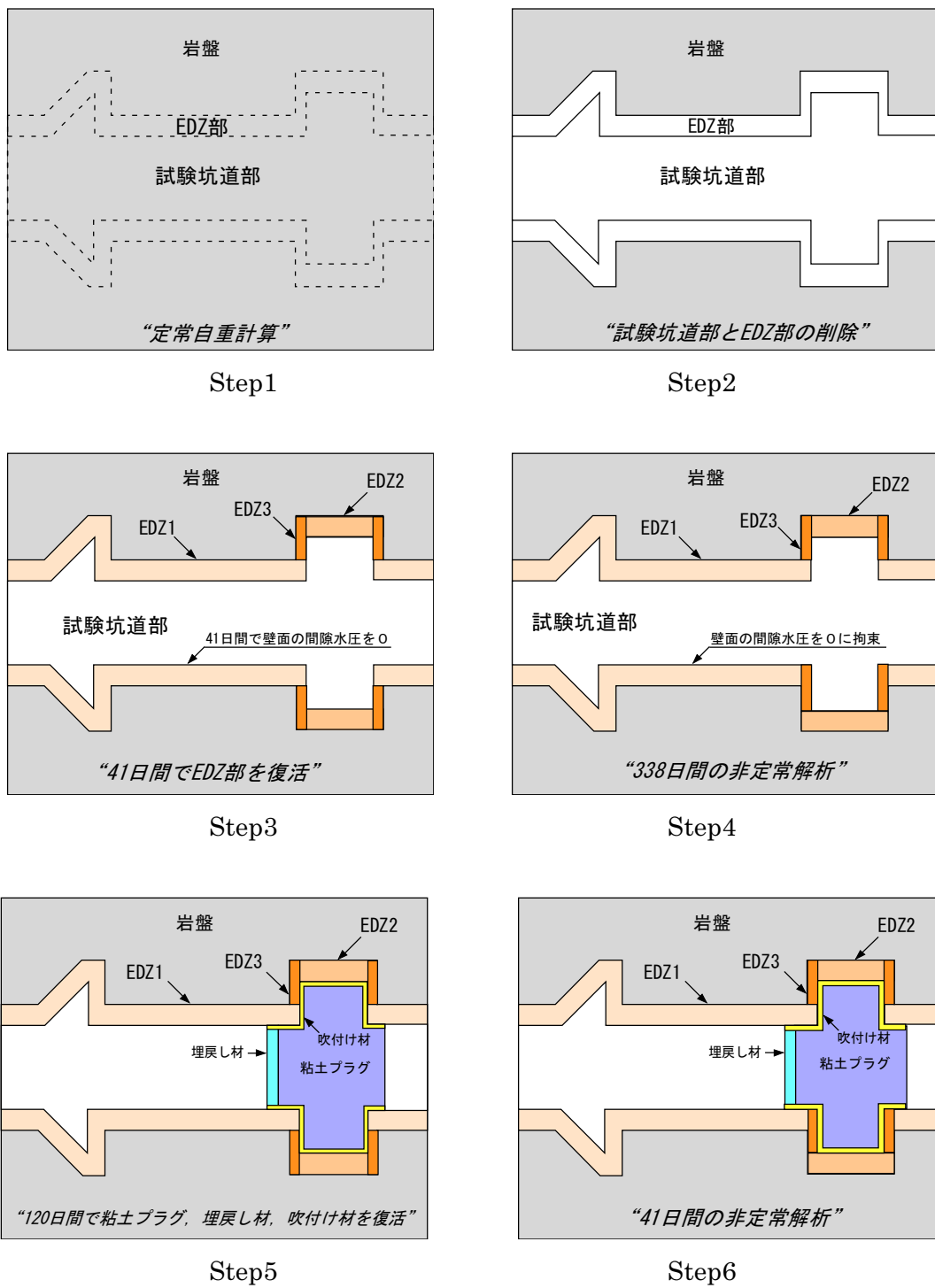


図-2.10 水理解析模式図（その1）



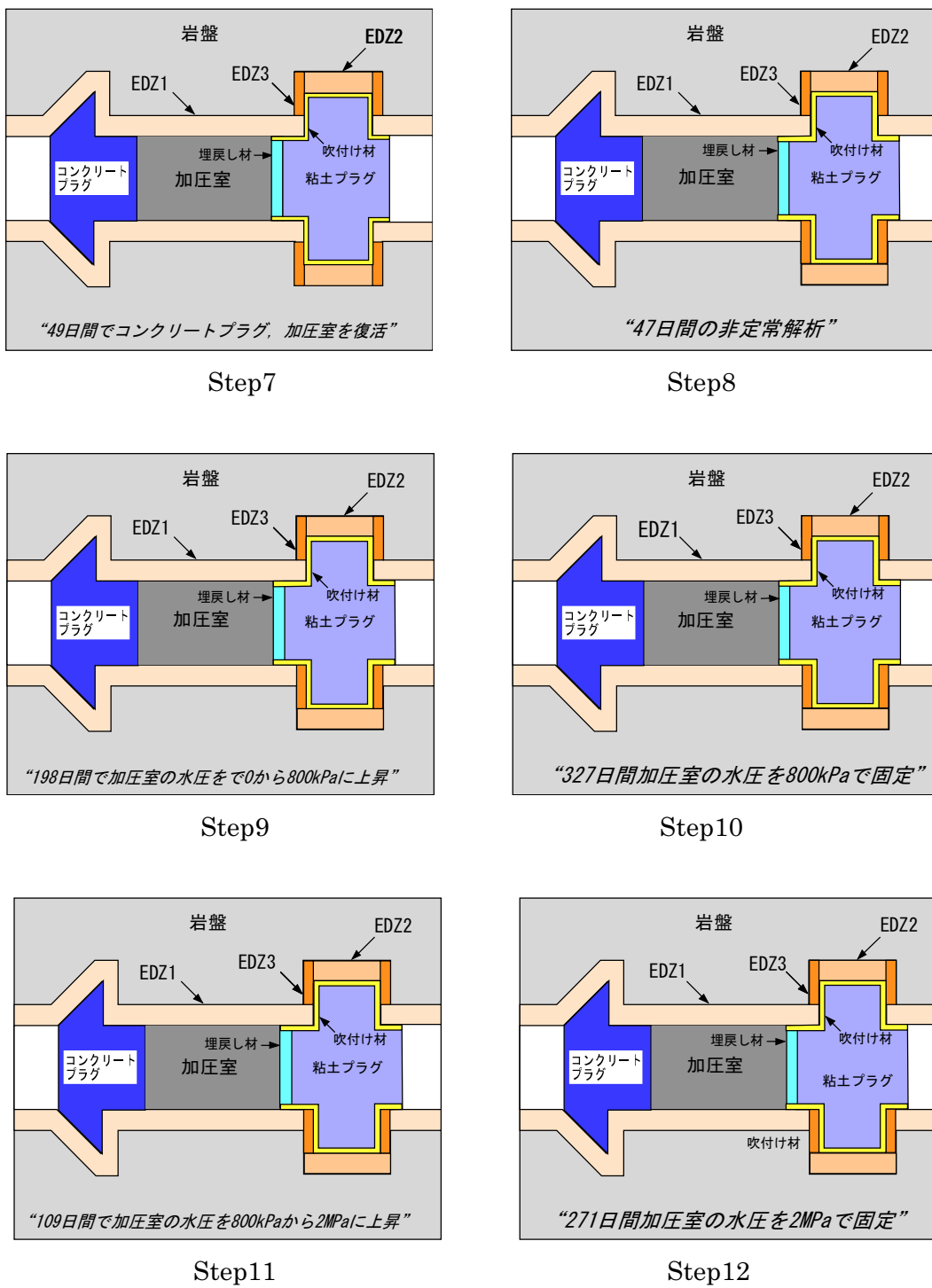


図-2.10 水理解析模式図 (その 2)

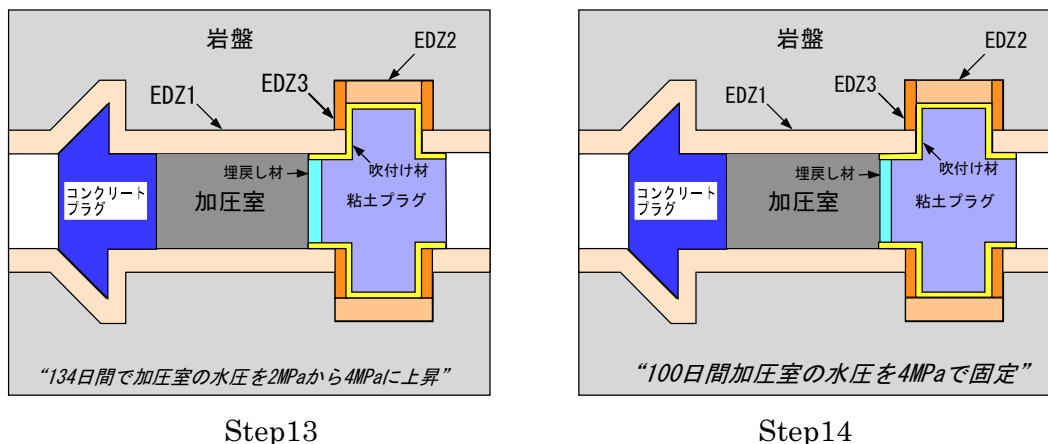


図-2.10 水理解析模式図 (その 3)

解析に用いた諸材料の物性を表-2.3 に示す。このうち、健岩部の透水係数は、原位置で計測された値を用いた (Chandler et al.,2001)。また、ゆるみ域の透水係数は、原位置での測定結果に基づき、発破による損傷にあわせて試験坑道掘削にともなう応力再配分により岩盤が破壊していると考えられる部分 (EDZ1)，応力再配分により岩盤が破壊しているが、拡幅により発破の損傷部分が取り除かれている部分 (EDZ2)，さらに、これらの影響が少ない部分 (EDZ3) の三つに分類した。コンクリートプラグの透水係数は、大型ブロックを用いた要素試験により得られた値を用いた (Chandler et al.,2001)。粘土プラグの透水係数については、粘土プラグがクニゲル V1 とケイ砂を混合したものであることから、有効粘土密度と固有透過度の関係より設定した (核燃料サイクル開発機構, 1999)。吹付け材、埋め戻し材の透水係数は、トンネルシーリング性能試験で施工した材料から取得したサンプルの試験結果から設定した。水理解析では、全節点の変位を拘束することにより岩盤の変形は考慮していないため力学物性の入力はない。

表-2.3 水理解析に用いた物性値

		密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	間隙比 [-]	透水係数 [m/s]
健岩部		2700	0.380	1.0×10 <sup>-13</sup>
ゆるみ域	EDZ1	2600	0.380	1.0×10 <sup>-9</sup>
	EDZ2	2600	0.380	1.0×10 <sup>-10</sup>
	EDZ3	2600	0.380	1.0×10 <sup>-11</sup>
粘土プラグ		1800	0.500	3.0×10 <sup>-13</sup>
吹付け材		1400	0.927	1.0×10 <sup>-12</sup>
埋め戻し材		1800	0.500	1.0×10 <sup>-11</sup>
加圧室 (砂充填部)		1800	0.500	1.0×10 <sup>-6</sup>
コンクリートプラグ		1800	0.429	2.0×10 <sup>-14</sup>

解析は、表-2.3 で示した物性を用いた解析をリファレンスケースとした。そして、表-2.4 に示すように試験坑道周辺にゆるみ域を設定しない場合や、健岩部の透水係数や境界条件を変化させた場合について解析も実施し、ゆるみ域の存在や物性の妥当性、境界条件の影響について検討を行った。

表-2.4 水理解析ケース

	物性の設定	目的
case11	表-2.3 で示した物性 (リファレンスケース)	間隙水圧の分布、プラグ周辺からの湧水量の実測値と解析結果との比較により、表-2.3 で示した物性値及びゆるみ域の設定範囲(トンネル壁面に約50cmの厚みで設定)の妥当性を確認する。
case12	ゆるみ域の設定なし(EDZ部分の透水係数を健岩部と同じ $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ に設定)	リファレンスケースとの間隙水圧の分布、プラグ周辺からの湧水量を比較し、トンネル周辺に水理的なゆるみ域が存在していることを確認する。
case13	リファレンスケースに比べ健岩部の透水係数を $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$ と1オーダー大きく設定	間隙水圧の反応から表-2.3 で示した健岩部の透水係数の妥当性を確かめる。
case14	境界条件の値を実測値に合わせるように大きく設定	プラグ周辺からの湧水量におよぼす境界条件の影響を把握する

湧水量は、後述するように両プラグの下流側に設置したダムにより計測している(図-3.9参照)。解析は、プラグの下流側の面及びダムまでの岩盤の壁面に相当する節点の湧水量を合計したものを湧水量とした。

### (3) 応力水理連成解析

応力水理連成解析では、水理解析の条件に加えて、力学的な境界条件として、応力解析で用いた試験坑道 Room425 周辺の応力、土かぶり圧 11MPa、側圧 60MPa 及び 45MPa を作用させた。応力水理連成解析で用いた物性値一覧を表-2.5 に示す。

解析ステップは水理解析とほぼ同じであるが、応力条件の追加に伴う部分が水理解析と異なる。応力水理解析の解析ステップを以下に示す。

表-2.5 応力水理連成解析に用いた物性値

	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	間隙比 [-]	透水係数 [m/s]	弾性係数 [MPa]	ポアソン比 [-]
健岩部	2700	0.036	$1.0 \times 10^{-13}$	$6.5 \times 10^4$	0.25
ゆるみ域	EDZ1	2600	$1.0 \times 10^{-9}$	$6.5 \times 10^4$	0.25
	EDZ2	2600	$1.0 \times 10^{-10}$	$6.5 \times 10^4$	0.25
	EDZ3	2600	$1.0 \times 10^{-11}$	$6.5 \times 10^4$	0.25
粘土プラグ	1800	0.500	$3.0 \times 10^{-13}$	30	0.4
吹付け材	1400	0.927	$1.0 \times 10^{-12}$	3	0.4
埋め戻し材	1800	0.500	$1.0 \times 10^{-11}$	30	0.4
加圧室	1800	0.500	$1.0 \times 10^{-6}$	10	0.4
コンクリートプラグ	1800	0.429	$2.0 \times 10^{-14}$	100	0.4

### Step1

岩盤の初期状態を定常自重計算により求める。ここでは、後に建設を表現するために二重要素でモデル化しておいた粘土プラグ、埋め戻し材、吹付け材、コンクリートプラグ、加圧室及び試験坑道掘削後に生じるゆるみ域に対応する要素をモデルチェンジ機能を用いて一時削除しておく。

### Step2

試験坑道掘削及びそれにとまなうゆるみ域の発生を表現するため、試験坑道部分とゆるみ域が発生する部分の要素（いずれも健岩の物性を持つ）を41日間の時間指定で不活性化させるのに合わせ、ゆるみ域の発生を表現するためStep1で削除しておいたゆるみ域に対応する要素を活性化させる。そして、試験坑道壁面の間隙水圧を0に低下させる。このことにより、試験坑道掘削及びゆるみ域の発生を表現する。

### Step3

次ステップの粘土プラグの建設が開始されるまでの待機期間（338日間）の非定常解析を行う。

### Step4

Step1で削除しておいた粘土プラグ、埋め戻し材、吹付け材を復活させる。ここでは、120日の時間指定で復活させることにより建設期間を表現した。

同時に、境界条件の更新を行い、粘土プラグが接触する試験坑道壁面の間隙水圧の拘束を解除する。

復活させる粘土プラグ等は飽和の取扱いとした。

### Step5

次ステップのコンクリートプラグ及び加圧室の建設が開始されるまでの待機期間（41日間）の非定常解析を行う。

### Step6

Step1で削除しておいた加圧室、コンクリートプラグを復活させる。ここでは、49日の時間指定で活性化させることにより建設期間を表現した。同時に、加圧室、コンクリートプラグが接触する試験坑道壁面の間隙水圧の拘束を解除する。

### Step7

圧入試験を開始するまでの待機期間（47日間）の非定常解析を行う。

### Step8

198日間の時間指定で加圧室内の水圧を0MPaから0.8MPaに線形的に昇圧させる。

### Step9

加圧室内の水圧0.8MPaの保持期間として327日間の非定常解析を行う。

### Step10

109日間の時間指定でチャンバー内水圧を0.8MPaから2.0MPaに線形的に上昇させる。

### Step11

加圧室内の水圧2.0MPaの保持期間として271日間の非定常解析を行う。

### Step12

134日間の時間指定で加圧室内水圧を2.0MPaから4.0MPaに線形的に上昇させる。

**Step13**

加圧室内の水圧 4.0MPa の保持期間として約 100 日間の非定常解析を行う。

### 3 解析結果

#### 3.1 応力解析結果

岩盤コアを対称とした引張り試験及び三軸試験によって得られた強度（Chandler et al., 2001）から、引張り応力及びせん断応力の値が  $5\text{MPa}$  及び  $70\text{MPa}$  を超えた場合に岩盤が破壊するものと仮定し、応力解析の結果から得られる岩盤の破壊する領域の把握を試みた。ここで、試験坑道周辺岩盤の応力状態コンターでプラグ断面を表示したものについては、図-3.1 に示す AA'および BB'を断面として見たものである。

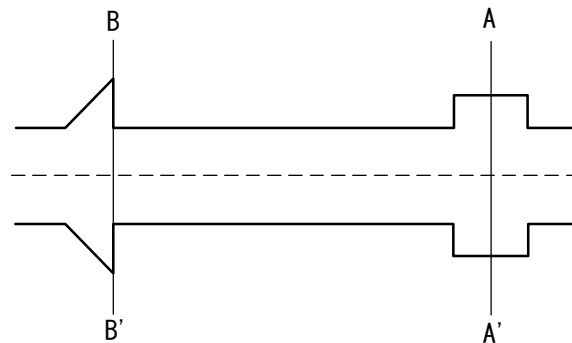
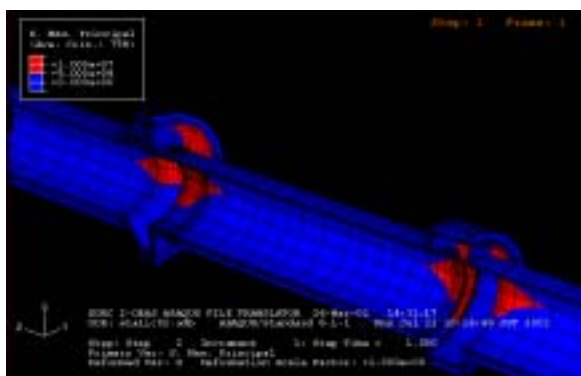


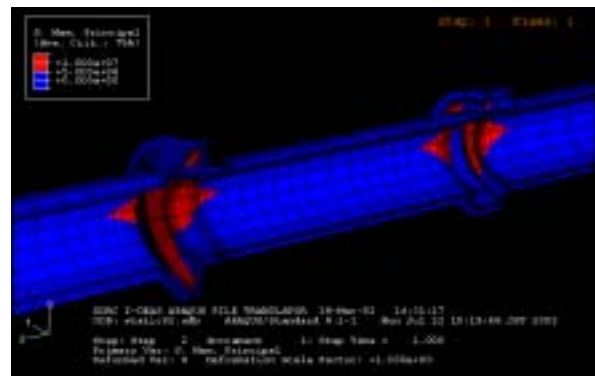
図-3.1 プラグ切り欠き部の応力状態表示の断面位置

試験坑道周辺岩盤の引張り応力、せん断応力による破壊の分布を図-3.2～3.5 に示す。図-3.2, 3.4 は、試験坑道壁面より  $50\text{cm}$  の範囲を切り出して表示したものである。図-3.3, 3.5 は、モデル全体を図-3.1 に示す各プラグの切り欠き部の断面で見たものである。

図-3.2, 3.3 は、 $5\text{MPa}$  以上の引張り応力が働いている部分を赤で示している。 $5\text{MPa}$  以上の引張り応力は、プラグの切り欠き部を中心として、試験坑道側面（楕円の試験坑道断面の長軸方向）に発生していることがわかる。このような場所は、岩盤の破壊により透水係数が大きくなっている可能性がある。図-3.4, 3.5 は、最大主応力と最小主応力の差が  $70\text{MPa}$  以上の部分を赤で示したものである。最大主応力と最小主応力の差が  $70\text{MPa}$  以上の部分は、試験坑道の上下（楕円の試験坑道断面の短軸方向）とプラグの切り欠き先端部に発生していることがわかる。このような場所も、岩盤の破壊により透水係数が大きくなっている可能性がある。

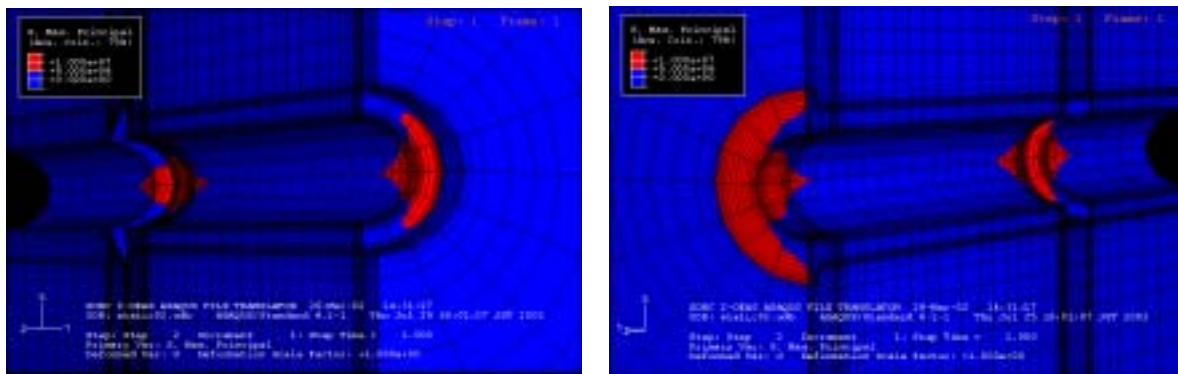


(a)粘土プラグ下流より



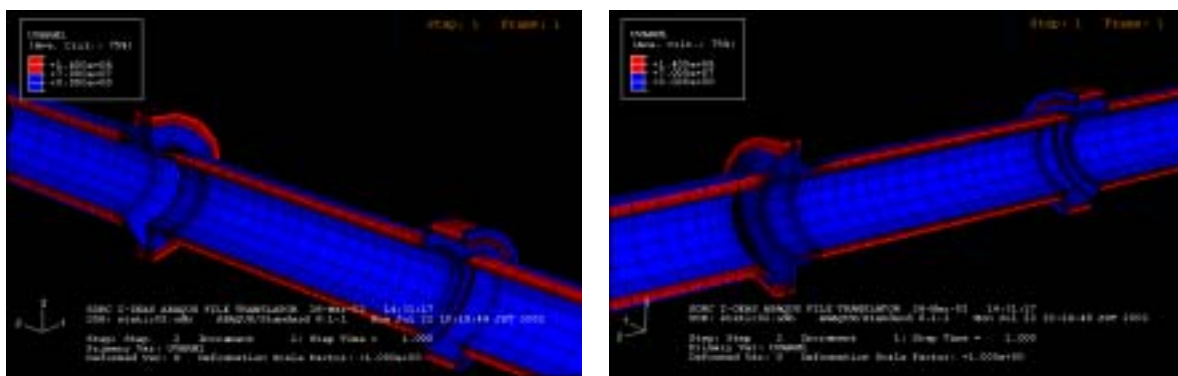
(b)コンクリートプラグ下流より

図-3.2 試験坑道周辺岩盤における引張り応力  $5\text{MPa}$  以上の分布（赤色）



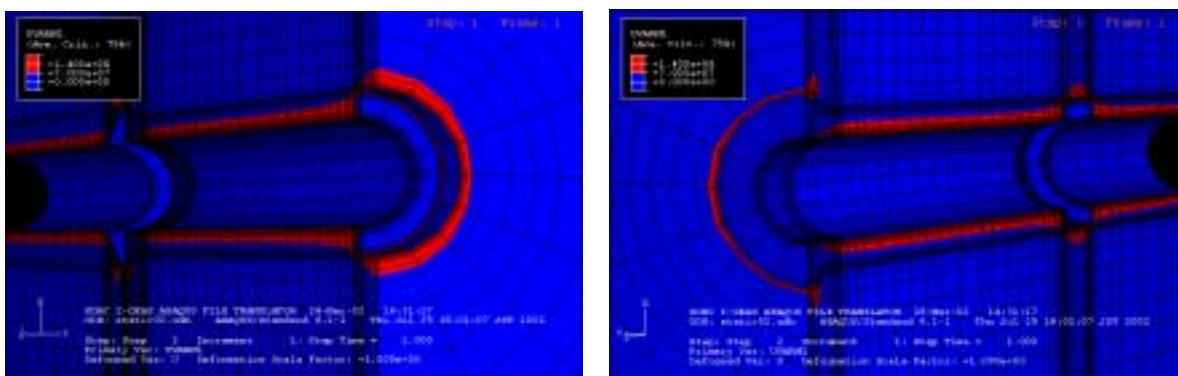
(a)粘土プラグ下流より (断面 AA') (b)コンクリートプラグ下流より (断面 BB')

図-3.3 プラグ断面を含む試験坑道周辺岩盤における引張り応力 5MPa 以上の分布 (赤色)



(a)粘土プラグ下流より (b)コンクリートプラグ下流より

図-3.4 試験坑道周辺岩盤におけるせん断応力 70MPa 以上の分布 (赤色)



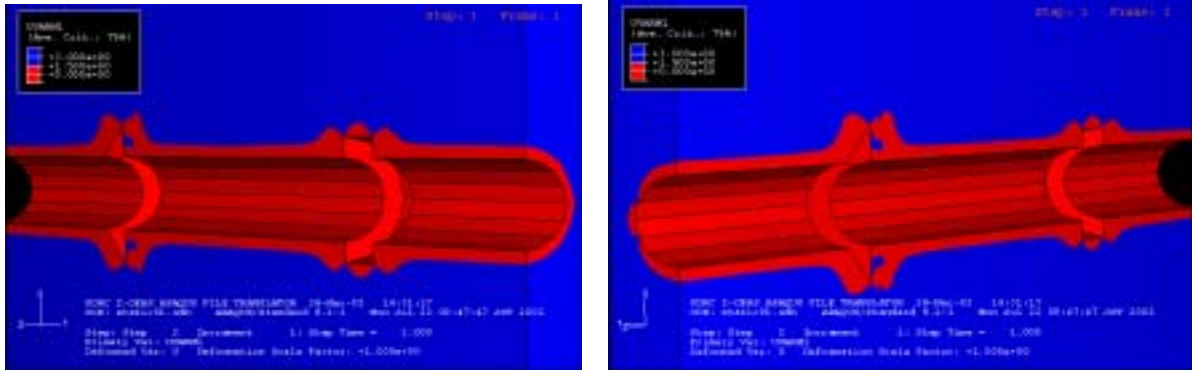
(a)粘土プラグ下流より (断面 AA') (b)コンクリートプラグ下流より (断面 BB')

図-3.5 プラグ断面を含む試験坑道周辺岩盤におけるせん断応力 70MPa 以上の分布 (赤色)

図-3.2～図-3.5 より, 引張り応力による破壊箇所とせん断応力による破壊箇所が互いに連続していないことが分かる。このことから, プラグに切り欠きを設けることは, 掘削により何らかの影響を受けた領域を坑道軸方向で連続させない有効な手段であるといえる。

次に, モールクーロンの破壊基準を用いて求めた局所安全率のコンター図を図-3.6 に示す。

図は局所安全率が 1.5 以上を青で、1.5 以下を赤で示している。局所安全率が 1.5 を下回ると不安定な状態となるといわれている（核燃料サイクル開発機構，1999）。図より，試験坑道掘削にともなう応力再配分により局所安全率が 1.5 を下回る範囲は，試験坑道壁面及びプラグの切り欠き部周辺に約 50cm の幅で分布している。試験坑道は制御発破広報で掘削されていることから，本解析で考慮されていない坑道掘削時の発破による損傷も含めると，50cm の範囲がゆるみ領域と考えられる。



(a)粘土プラグ下流より

(b)コンクリートプラグ下流より

図-3.6 モールクーロンの破壊基準を用いて求めた局所安全率の分布

(青：局所安全率 1.5 以上，赤：局所安全率 1.5 以下)

トンネルシーリング性能試験における試験坑道周辺岩盤の応力解析を実施し，応力に起因する破壊の分布及び局所安全率を求めた。その結果，応力に起因する破壊は，引張り応力ではプラグの切り欠き部を中心として試験坑道の側面に，せん断応力では，試験坑道の上下とプラグの切り欠き先端部で発生していることが分かった。このような部分では，例えば，透水係数が大きくなる可能性がある。

また，局所安全率が 1.5 を下回る範囲は，試験坑道壁面及びプラグの切り欠き部周辺に約 50cm の幅で分布しており，試験坑道が発破により掘削されていることを考慮すると，この 50cm の範囲がゆるみ域と考えられる。

応力解析により得られた応力に起因する破壊の分布及び局所安全率は，水理解析において，ゆるみ域の範囲及びゆるみ域の透水係数の設定に反映させた。

### 3.2 水理解析結果

水理解析の case11～case14 の結果について，解析結果及び実測値との比較結果を以降の(1)～(4)に示す。結果で示した間隙水圧は各ステップの最終値であり，間隙水圧の出力は図-3.7 に示す加压室中心部に位置するライン上である。

試験坑道 Room425 周辺には試験領域の岩盤内の間隙水圧を計測するために計測孔から掘削されたボーリング孔を用いたパッカーシステムが設置されている（杉田ほか，2003）。ここで，解析結果と比較する加压室中心位置断面のパッカーの設置位置を図-3.8 に示す。解析結果と実測値との比較では，パッカーシステムの設置位置の座標の間隙水圧と比較した。また，両プラグにおける湧水量は，プラグ下流面およびこの近傍の坑道壁面からの湧水を採水



するために設置したダムに流れ込む量として計測した。図-3.9 に両プラグの下流側に設置したダムとダムに流れ込む範囲の模式図を示す。湧水量の解析結果については、実測値との比較の中に示した。

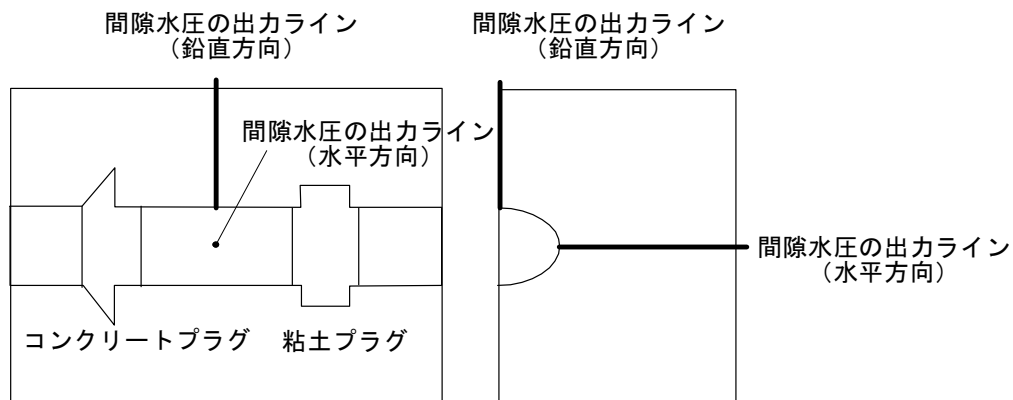


図-3.7 間隙水圧の出カライン

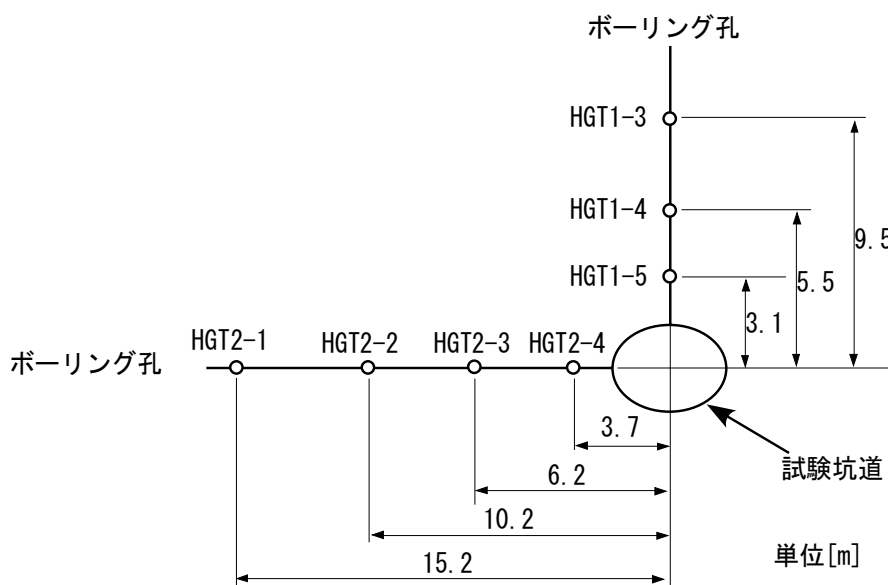


図-3.8 加压室中心位置断面におけるパッカーシステムの位置

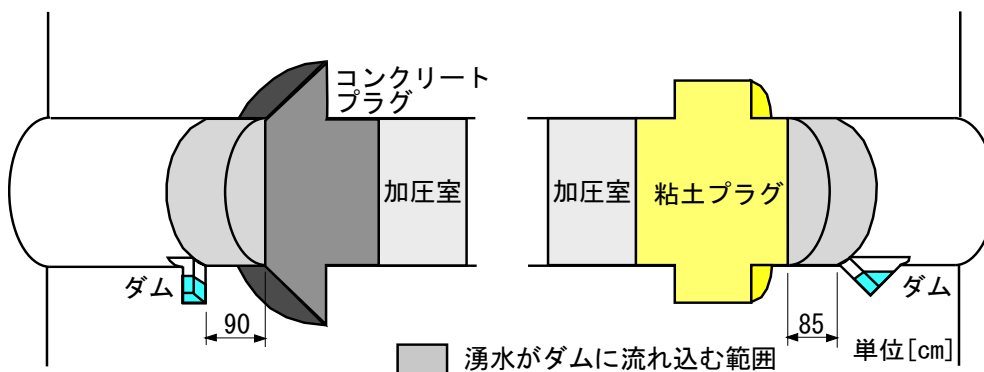


図-3.9 両プラグ下流側のダム設置位置とダムに流れ込む範囲

(1)case11 の解析結果

1)解析結果

間隙水圧の鉛直方向の変化を図-3.10 に示す。図の縦軸は試験坑道中心からの高さ（試験坑道中心より±2m以内は試験坑道の空洞部分にあたる）、横軸は間隙水圧である。解析結果では、水平方向の圧力分布もほぼ同様の傾向となった。

試験坑道掘削後は急激な圧力勾配が岩盤内に生じている（c : Step3）が、時間の経過とともに圧力勾配は緩やかになる。その後の加圧室の昇圧にともなって試験坑道周辺の間隙水圧は増加する。その際、圧力勾配は緩やかである。

各ステップの最終値の間隙水圧のコンターを図-3.11 に示す。

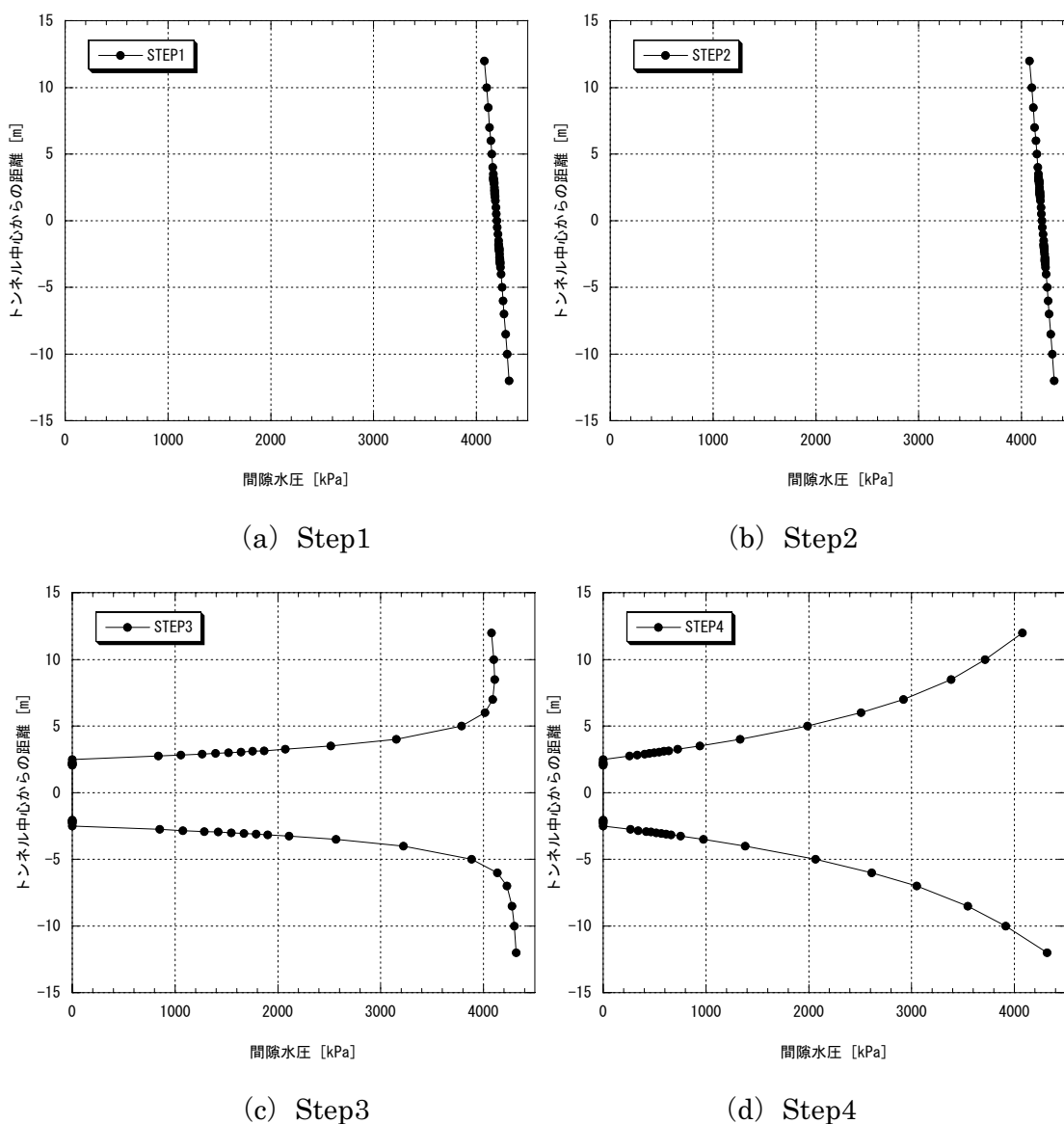
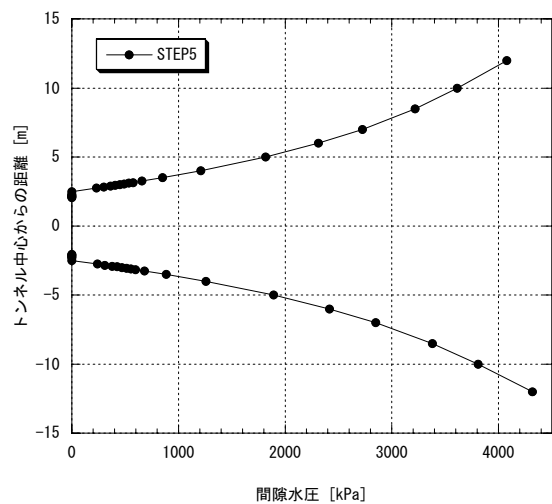
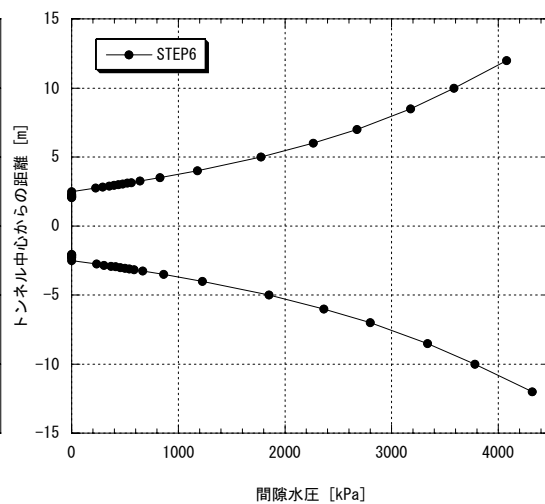


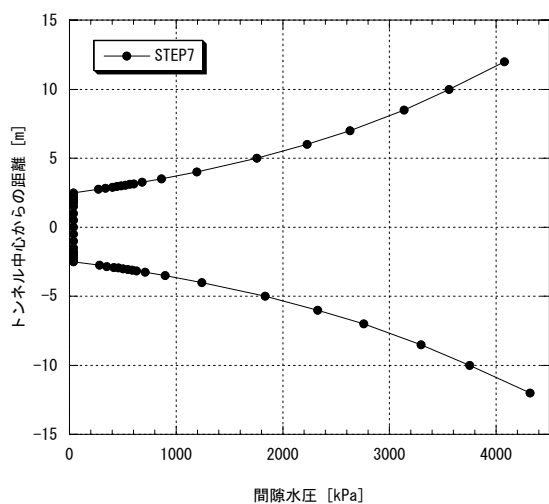
図-3.10 case11 の各ステップでの間隙水圧の分布（その 1）



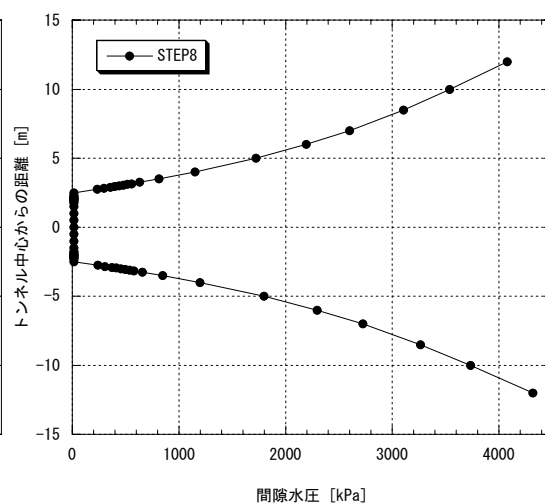
(e) Step5



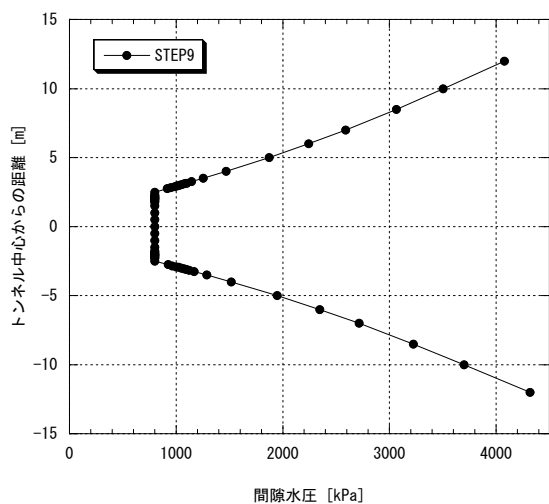
(f) Step6



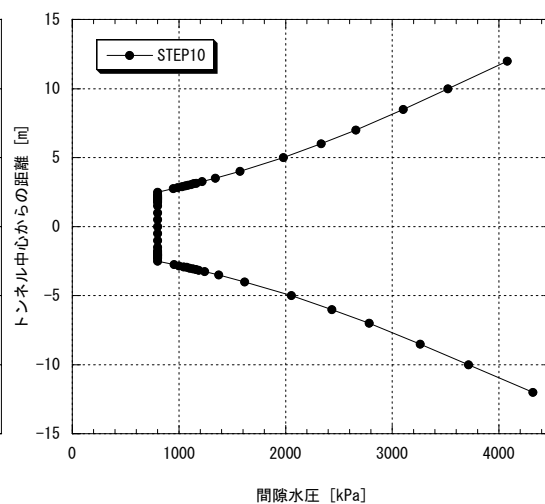
(g) Step7



(h) Step8

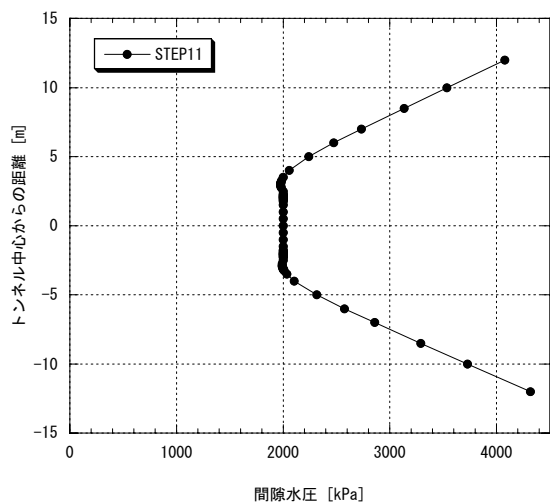


(i) Step9

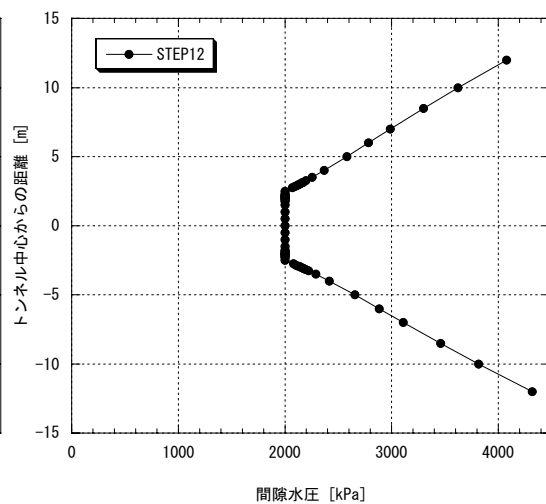


(j) Step10

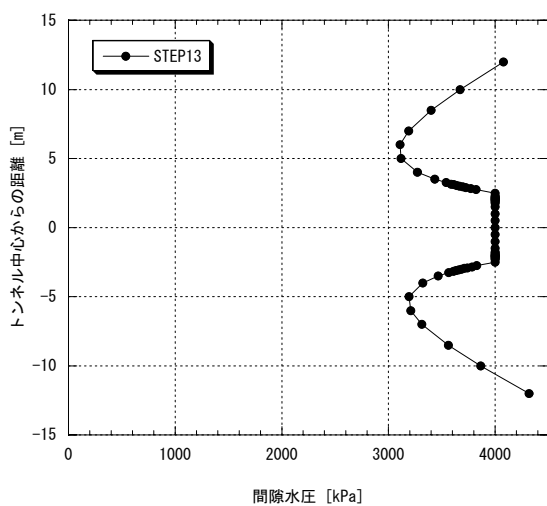
図-3.10 case11 の各ステップでの間隙水圧の分布 (その2)



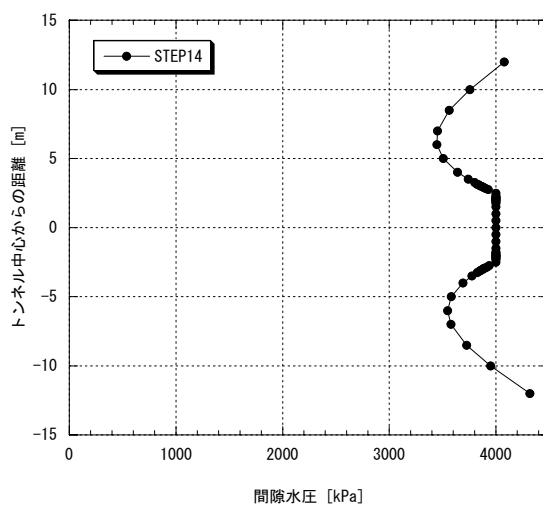
(k) Step11



(l) Step12

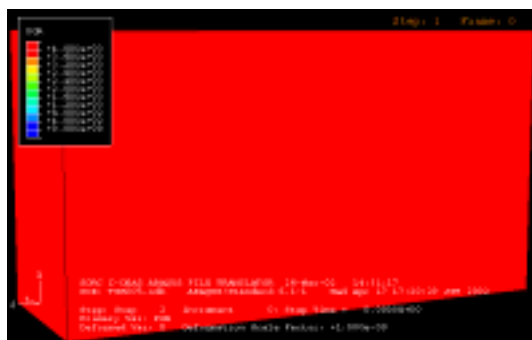


(m) Step13

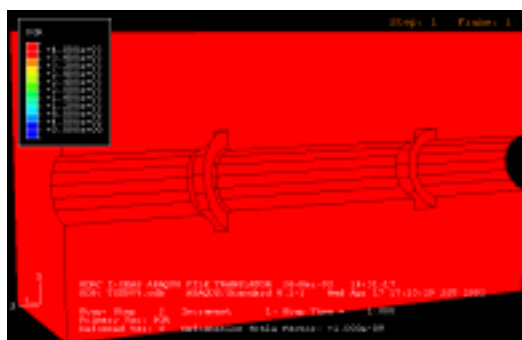


(n) Step14

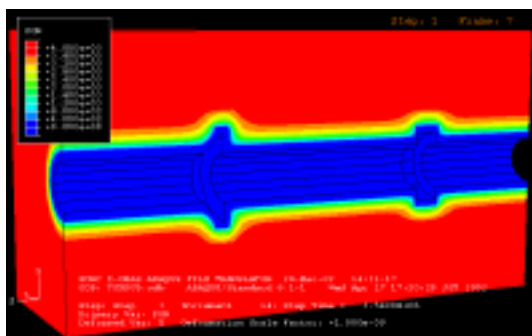
図-3.10 case11 の各ステップでの間隙水圧の分布 (その 3)



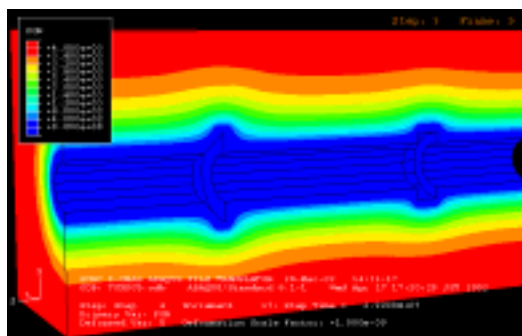
(a) Step1



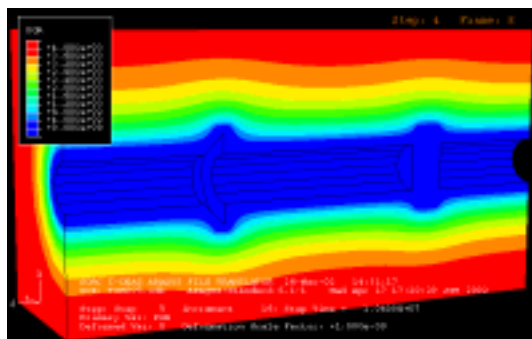
(b) Step2



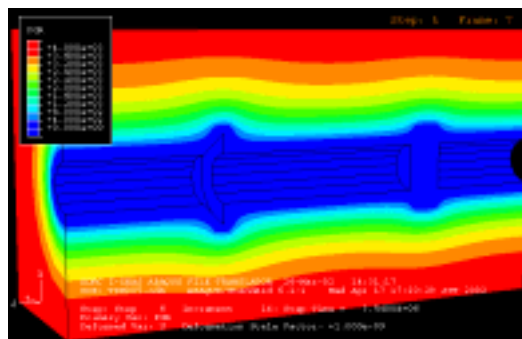
(c) Step3



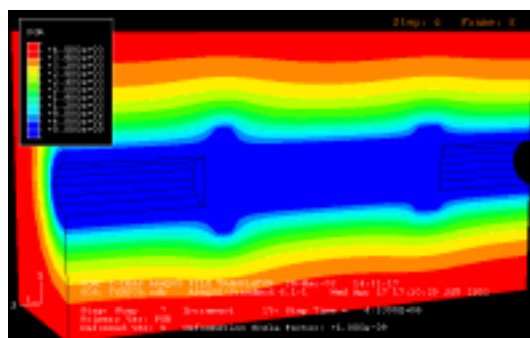
(d) Step4



(e) Step5



(f) Step6



(g) Step7

間隙水圧 (kPa)

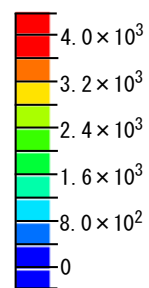
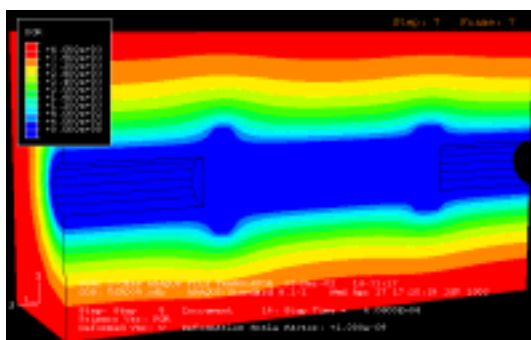
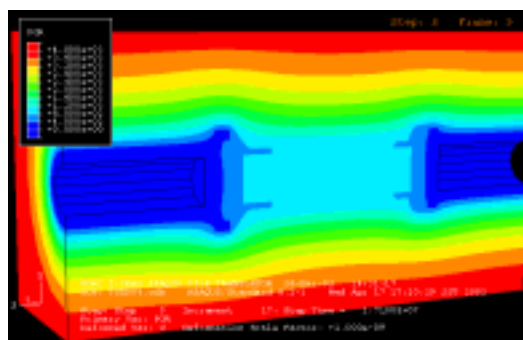


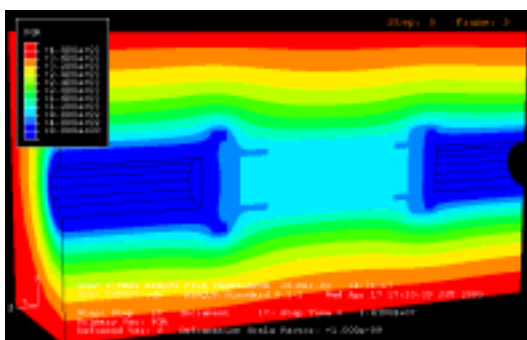
図-3.11 case11 の間隙水圧コンター (その 1)



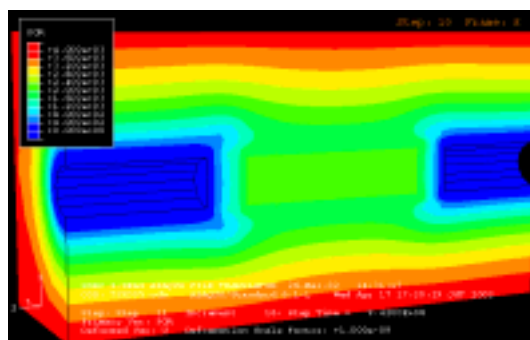
(h) Step8



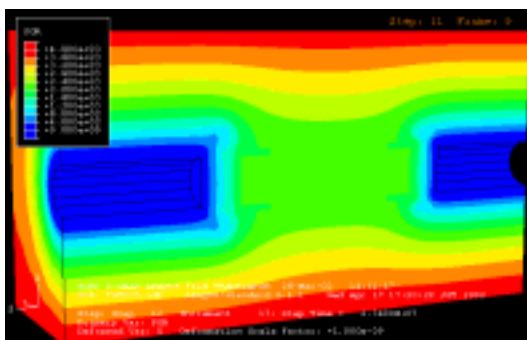
(i) Step9



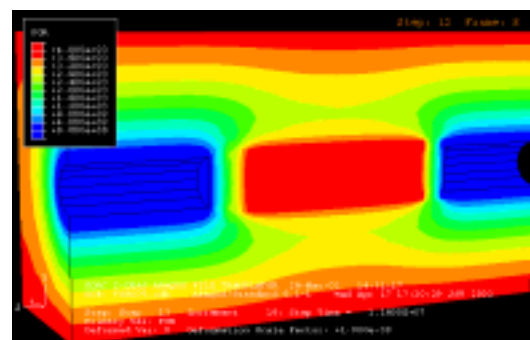
(j) Step10



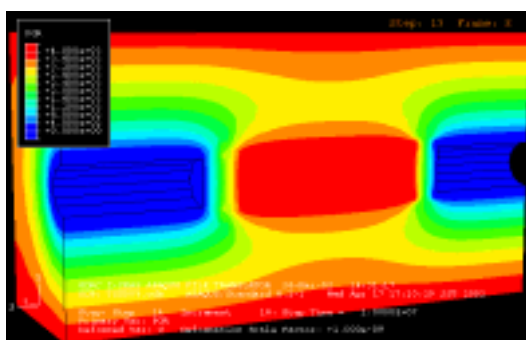
(k) Step11



(l) Step12



(m) Step13



(n) Step14

間隙水圧 (kPa)

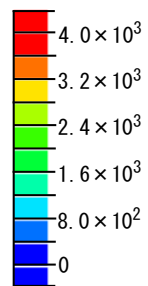


図-3.11 case11 の間隙水圧コンター (その 2)

## 2) 実測値との比較

### (a) 間隙水圧

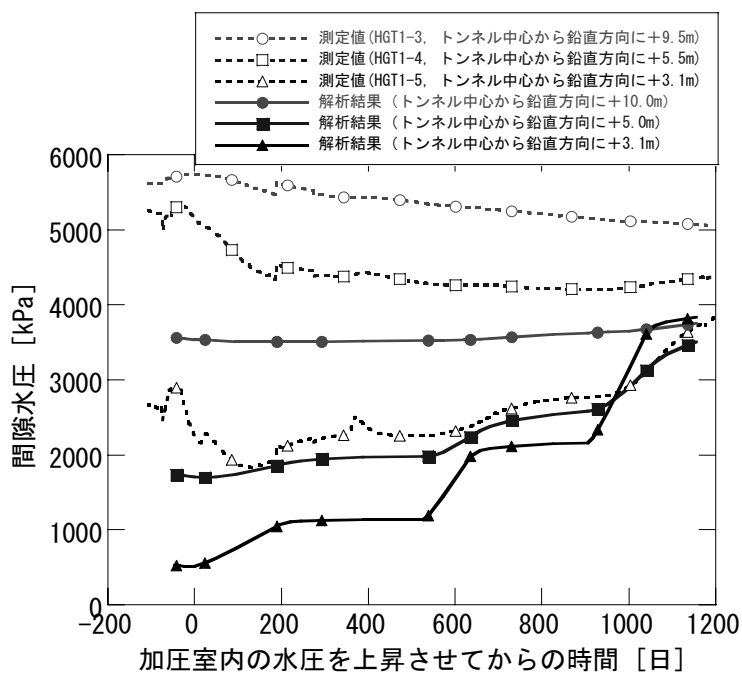
case11 の解析結果と間隙水圧計の計測値との比較を図-3.12 に示す。図-3.12 (a) は、試験坑道の鉛直方向、図-3.12 (b) は、水平方向の比較である。図の縦軸は間隙水圧、横軸は、加压室内に水圧を作用させてからの経過時間である。

図-3.12 (a) に示すように、試験坑道の鉛直方向において計測された間隙水圧は、深度に相当する水頭圧以上の間隙水圧となっており、計算結果に比べて 2000kPa 程度大きくなっている。これは、土被り圧 11MPa に対して側圧が 60MPa という地圧環境下 (Chandler et al.,2001) で、試験坑道が掘削されたことによる応力集中で間隙水が被圧された状態となっているためと考えられる。また、実測値のうち、試験坑道中心より 5.5m の HGT1-4 (図中凡例の記号□) 及び 9.5m の HGT1-3 (図中凡例の記号○) で計測された間隙水圧は、時間の経過とともに徐々に減少していることが分かる。これは、試験坑道の掘削影響による応力集中により被圧された間隙水圧がもとの値に回復する傾向と考えられる。

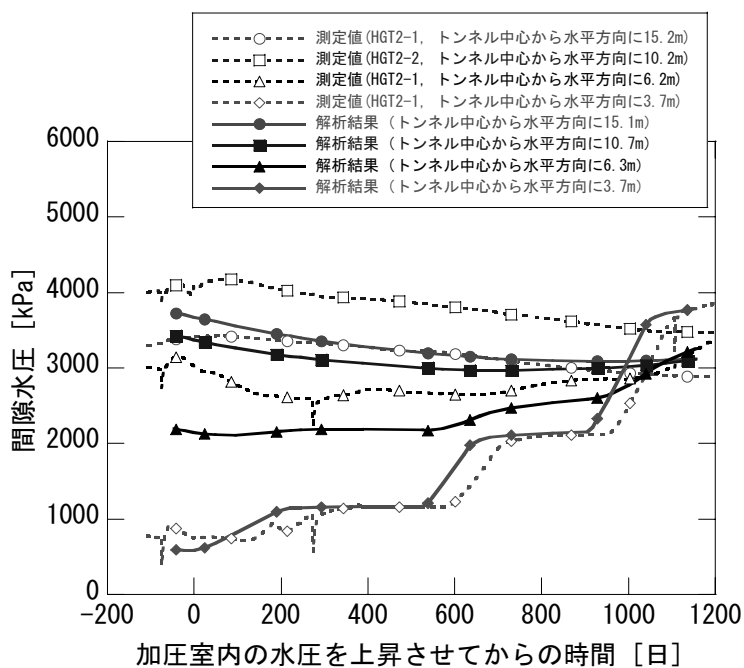
また、解析結果では、試験坑道の中心より 3.1m (図中凡例の記号▲) 及び 5.5m (図中凡例の記号■) で、加压室の昇圧に反応して間隙水圧が上昇しているのに対して、計測では 5.5m の HGT1-4 (図中凡例の記号□) で加压室の昇圧に反応した間隙水圧の上昇は計測されていない。これは、鉛直方向においては、掘削影響による岩盤内の圧力上昇が大きく、それに比して加压室の昇圧量が小さいことから、その影響が計測に現れていないと考えられる。

一方、図-3.12 (b) に示すように、試験坑道の水平方向については、解析結果と計測された間隙水圧とが良く一致する結果となっている。計測値、解析結果ともに、試験坑道の中心から水平方向に 10m 及び 15m 付近で間隙水圧が徐々に減少している。これは、試験坑道の掘削による試験坑道部分の圧力低下によるものと考えられる。また、実測値では、試験坑道の中心より水平方向に 15.2m の HGT2-1 (図中凡例の記号○) よりも、10.2m の HGT2-2 (図中凡例の記号□) で計測された間隙水圧の方が大きくなっている。これは、図-2.2 で示したように、隣接する坑道 Room423 の存在によるものと考えられる。また、計測では、試験坑道の中心より 3.7m の HGT2-4 (図中凡例の記号◇) 及び 6.2m の HGT2-3 (図中凡例の記号△) が、解析結果では、トンネル中心より 3.7m (図中凡例の記号◆) , 6.3m (図中凡例の記号▲) がともに加压室の昇圧に反応して間隙水圧が上昇していることが分かる。水平方向では、加压室の昇圧に反応する範囲が試験坑道の中心より 6m 程度 (試験坑道の壁面より約 3.5m 内部) であることが分かる。

このように、鉛直方向と水平方向とで加压室の昇圧に反応する異なる理由としては、実際の岩盤中に不連続面が存在することや、岩盤の透水係数の異方性などが考えられる。



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図-3.12 case11 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較

(b) プラグ周辺からの湧水量

トンネルシーリング性能試験では、両プラグの下流側において湧水量が測定されている。測定は、各プラグ面から約 1 m 離れた場所にダムを設置し、プラグとその周辺からの湧水を



一時的に貯留する方法で行われている。湧水量は、加圧室内に設置されたセンサー類のケーブル取出し口などから一時的に多くなることもあったが、加圧室内の各水圧で湧水量が安定したときの平均的な値はおおよそ表-3.1 のようになる。

表-3.1 試験で計測された各プラグ周辺からの湧水量 [ml/min]

	800kPa	2.0MPa	4.0MPa
粘土プラグ側	約 0.1	約 0.5	約 1.0 (後に 0.5 に低下)
コンクリート プラグ側	約 2.0	約 20.0	約 30.0 (後に 15.0 に低下)

解析では、図-3.9 に示すように、ダムに流れ込む流域、すなわちプラグ面及びダムとの間の試験坑道壁面にあたる節点の水移動フラックスを足しあわせることで湧水量を求めた。

解析によって求めたプラグ周辺からの湧水量を図 3.13 に示す。図-3.13(a)は粘土プラグ側、図-3.13(b)はコンクリートプラグ側からの湧水量であり、それぞれ実測により得られた湧水量及び加圧室内の水圧と合わせて示す。これより、加圧室内の水圧上昇にもなって実測値、解析値ともに湧水量が増加していることが分かる。粘土プラグは、設置時に不飽和状態で設置されており、粘土内に取り込まれる水量が無視できないと考えられるため、より飽和が進んだ後半（加圧室内の水圧が 2.0MPa）での湧水量を比較すれば、解析値は、実測値の 1/2 程度となっている。一方、コンクリートプラグ側での湧水量は実測値とおおむね一致している。粘土プラグ側での湧水量の解析結果が実測値よりも小さくなった原因として、解析で用いたゆるみ域（EDZ2 及び EDZ3）の透水係数の設定値が実際よりも小さいためと考えられる。

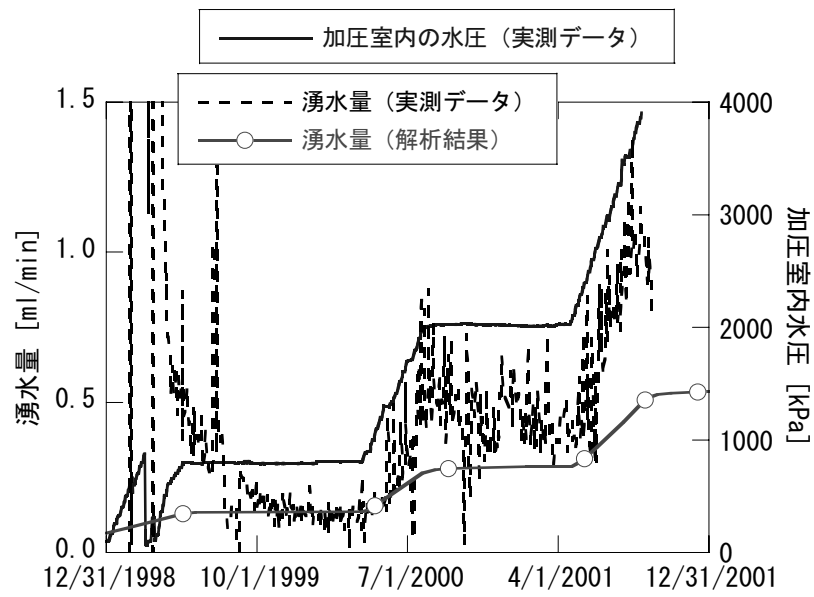
## (2)case12（ゆるみ域を設定しない場合）の解析結果

### 1)case11（ゆるみ域を設定した場合）との解析結果の比較

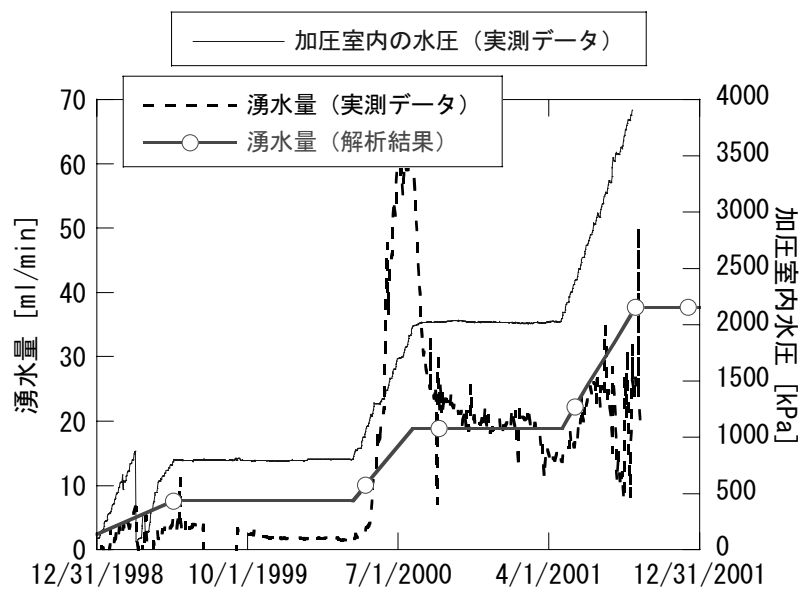
case12 は、試験坑道周辺にゆるみ域が発生しているかどうかを解析により評価するため、ゆるみ域を設定しない場合の解析を実施し、ゆるみ域を設定した場合の解析（case11）との比較を行った。ゆるみ域の部分の透水係数を健岩部と同一（ $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ ）に設定して実施した。

Case12 の間隙水圧の変化を、case11（ゆるみ域を設定した場合）と比較して図-3.14～3.16 に示す。図-3.14 は加圧室内の水圧が 0.8MPa、図-3.15 は 2.0MPa、図-3.16 は 4.0MPa の場合である。間隙水圧の出力ラインは図-3.7 のとおりである。これより、試験坑道周辺にゆるみ域を設定しない場合の方が加圧室の昇圧にもなう試験坑道周辺での間隙水圧の反応が若干遅いことが分かる。これは、ゆるみ域を設定しない解析では、ゆるみ域部分に相当する岩盤の透水係数が、ゆるみ域を設定した解析に比べて小さいためである。

図-3.17 には、ゆるみ域を設定しない場合の間隙水圧のコンターを示す。

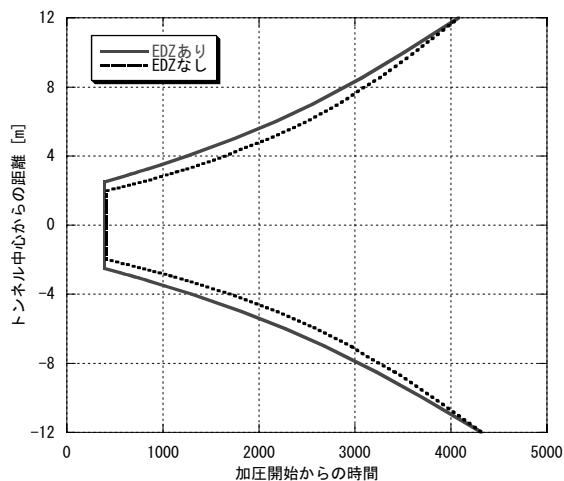


(a) 粘土プラグ

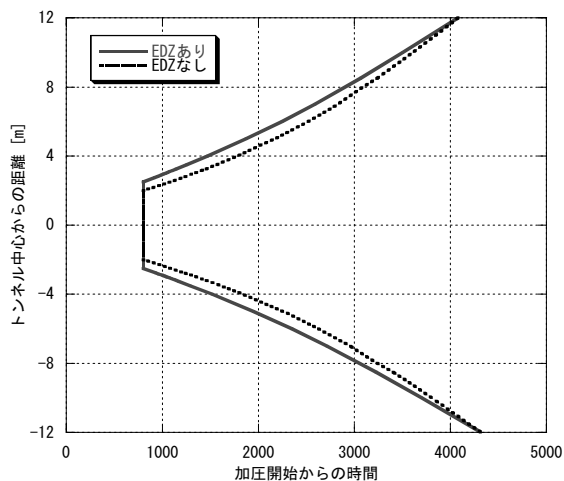


(b) コンクリートプラグ

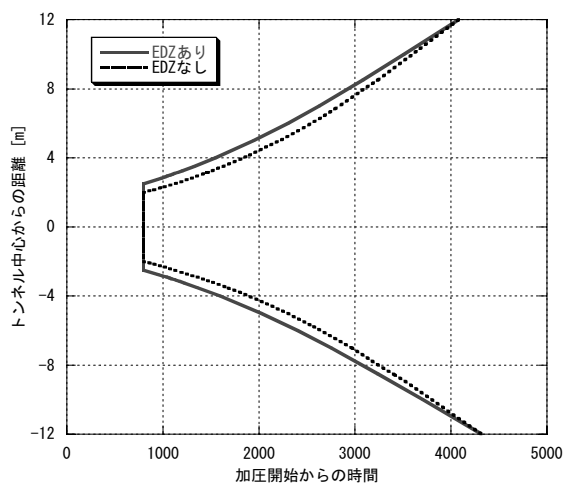
図-3.13 case11 の湧水量の解析結果と実測値との比較



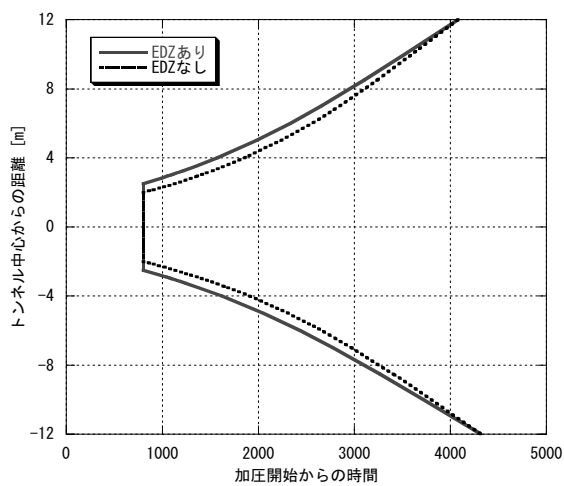
(1) 95 日後



(2) 198 日後

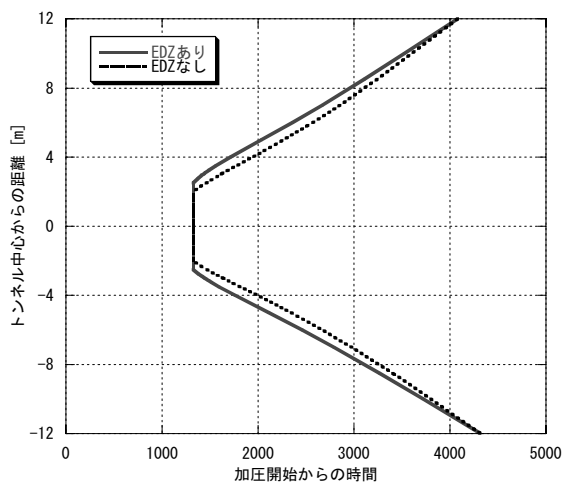


(3) 293 日後

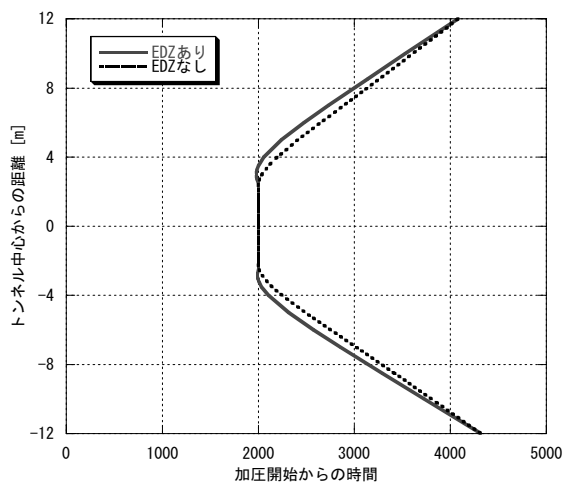


(4) 525 日後

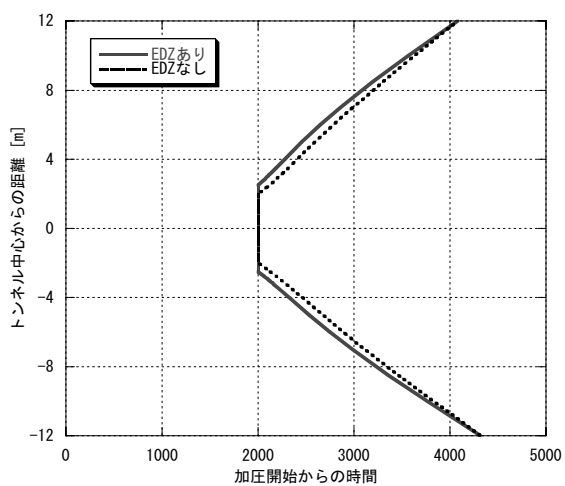
図-3.14 case12 の 0.8MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化



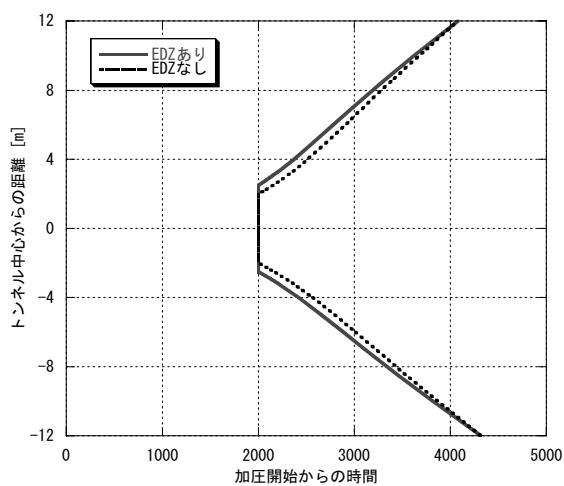
(1) 48 日後



(2) 109 日後

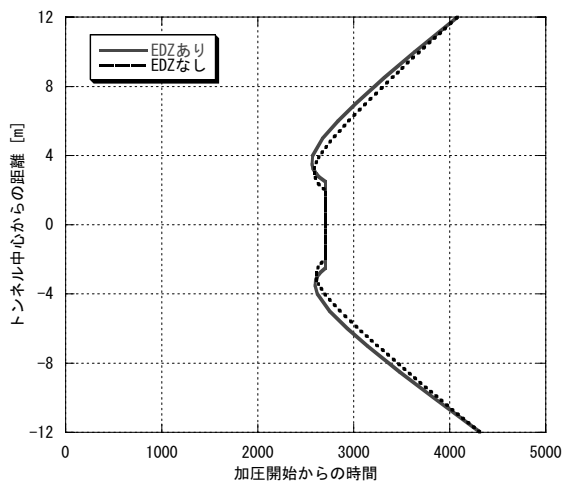


(3) 204 日後

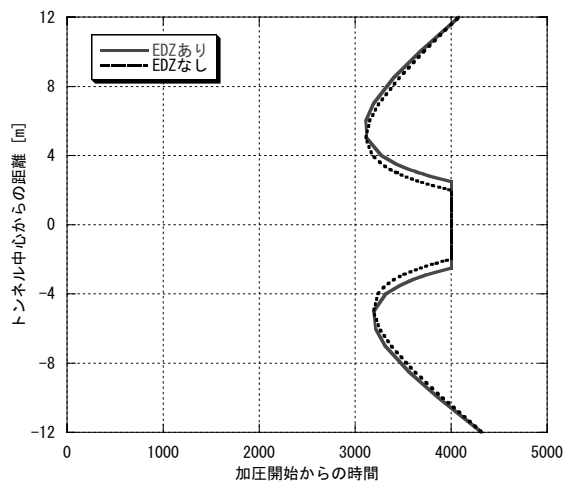


(4) 380 日後

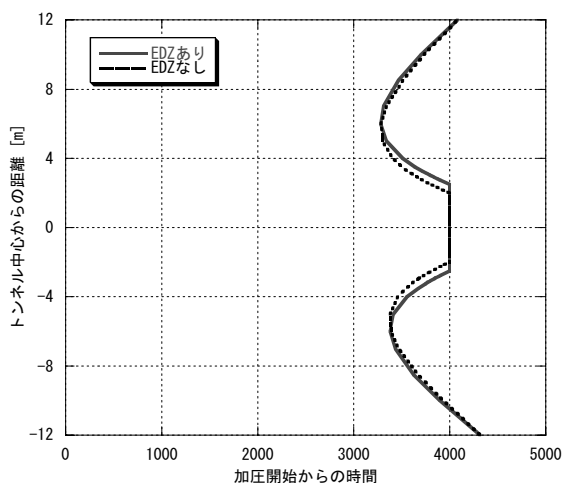
図-3.15 case12 の 2.0MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化



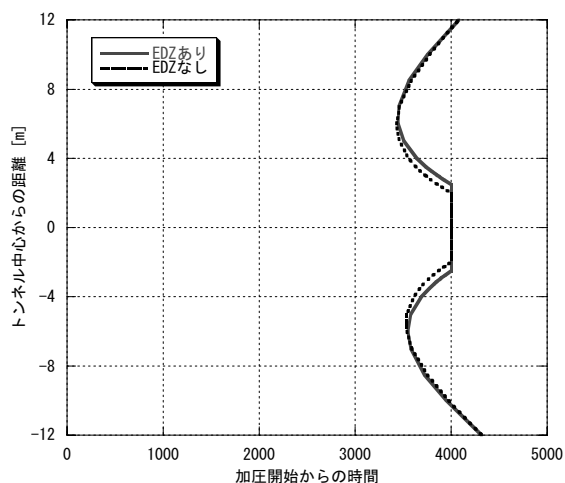
(1) 48 日後



(2) 134 日後

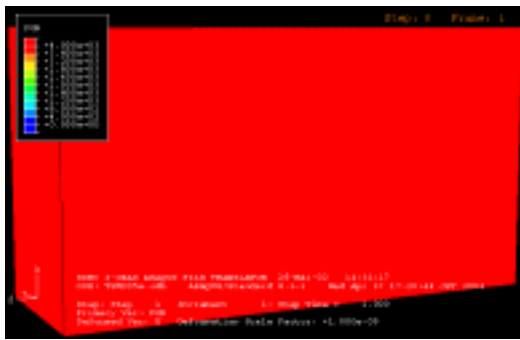


(3) 182 日後

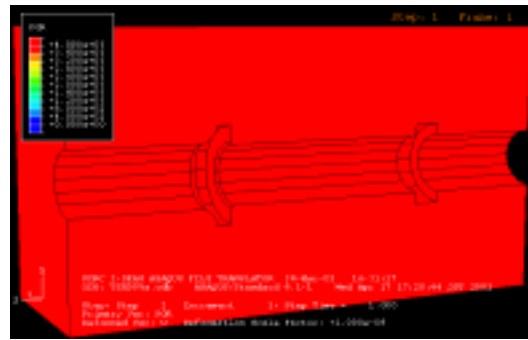


(4) 250 日後

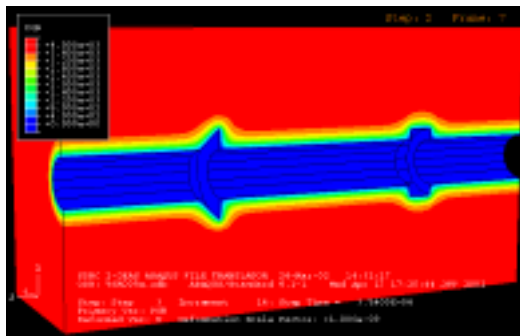
図-3.16 case12 の 4.0MPa 加圧開始からの間隙水圧の変化



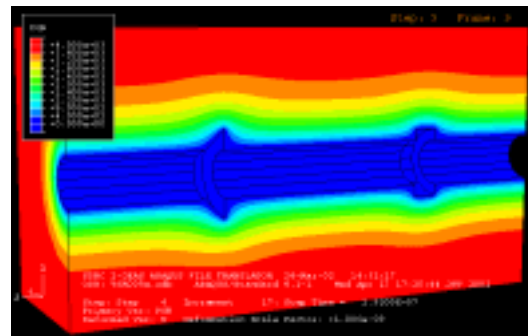
(a) Step1



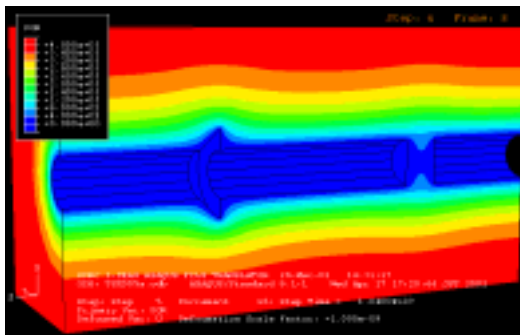
(b) Step2



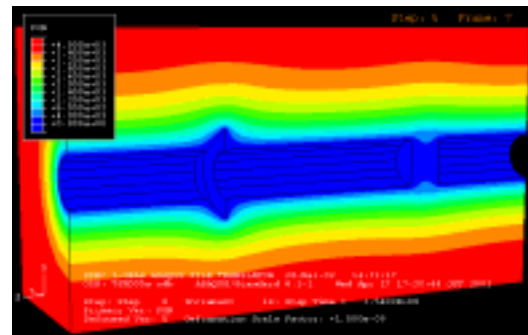
(c) Step3



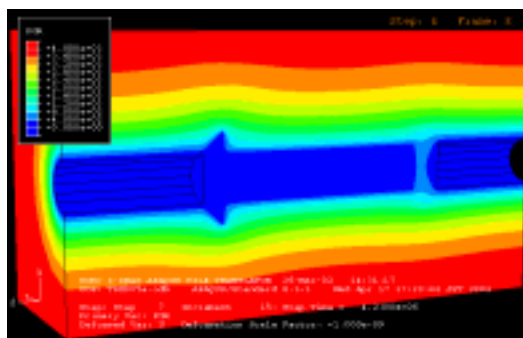
(d) Step4



(e) Step5



(f) Step6



(g) Step7

間隙水圧 (kPa)

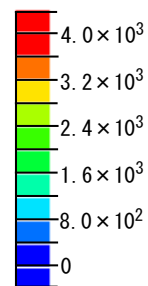
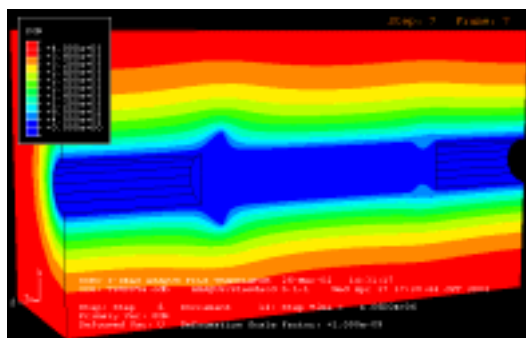
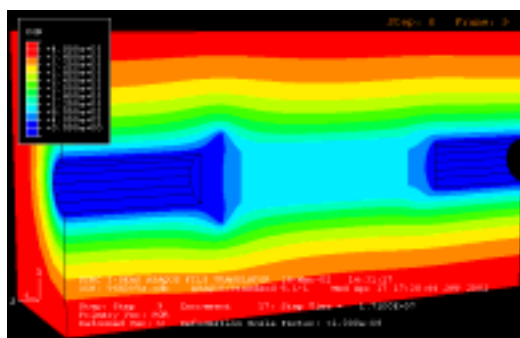


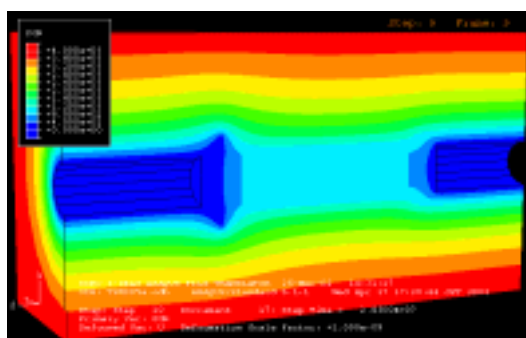
図-3.17 case12 の間隙水圧コンター (その 1)



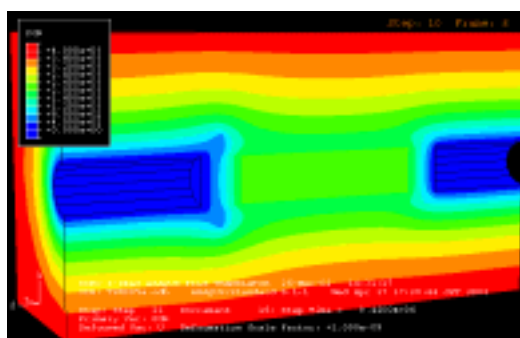
(h) Step8



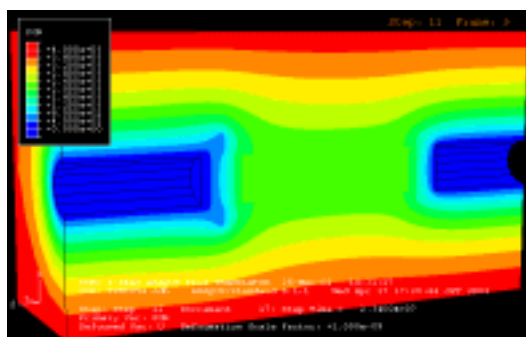
(i) Step9



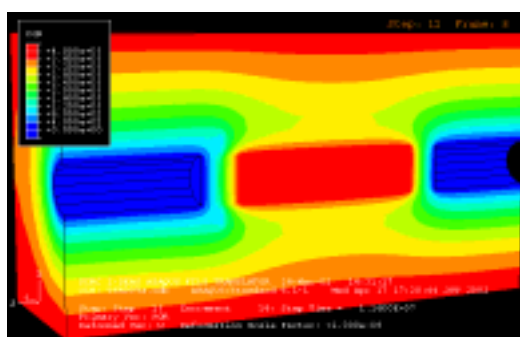
(j) Step10



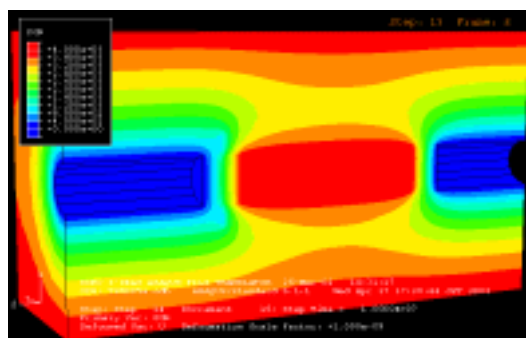
(k) Step11



(l) Step12



(m) Step13



(n) Step14

間隙水圧 (kPa)

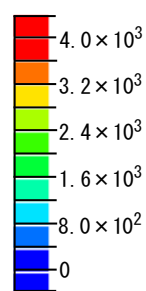


図-3.17 case12 の間隙水圧コンター (その 2)

## 2) 実測値との比較

case12 (ゆるみ域を設定しない場合) の間隙水圧の解析結果を実測値と比較して図-3.18 に示す。Case11 (ゆるみ域を設定した場合) の間隙水圧の解析結果 (図-3.12 (b)) に示したように、ゆるみ域を設定した場合には、試験坑道中心より水平方向に 3.7m のところでの間隙水圧が良く一致しているが (図中凡例の記号◇と◆) , 図-3.18 (b) に示すように、case12 (ゆるみ域を設定しない) の場合には、3.7m のところの解析結果 (図中凡例の記号◆) の間隙水圧が実測値 (図中凡例の記号◇) よりも大きくなっている。これは、ゆるみ域を設定しない case12 の場合では、試験坑道壁面近傍の透水係数が小さいため、case11 (ゆるみ域を設定した場合) にくらべて掘削影響にともなう間隙水圧の低下が緩慢であることによる。このため、間隙水圧が下がりきる前に加圧室昇圧により間隙水圧が上昇していると考えられる。このことから、試験坑道周辺の透水係数は  $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$  よりも大きいものと考えられ、これは試験坑道周辺にゆるみ域が発生していることを示すものである。

湧水量の解析結果を実測値と合わせて図-3.19 に示す。これより、case12 (ゆるみ域を設定しない場合) の湧水量の解析結果は、実測値に比べて、特に、コンクリートプラグ側で極端に小さくなるのが分かる (加圧室内の水圧が 4.0MPa の時で 0.024ml/min) 。これは、解析で用いたコンクリートプラグあるいはコンクリートプラグ周辺岩盤の透水係数が小さすぎるためである。コンクリートプラグの透水係数が大型ブロックを用いた要素試験により得られており、信頼できる値であると考えられることから、コンクリートプラグ周辺岩盤の透水係数はさらに大きいものと考えられる。これも、試験坑道周辺にゆるみ域が発生していることを示すものである。



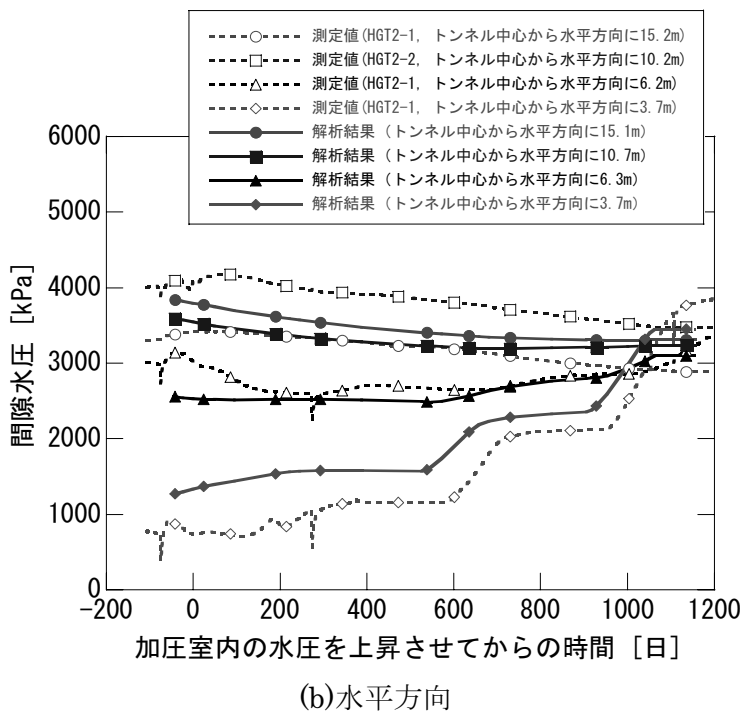
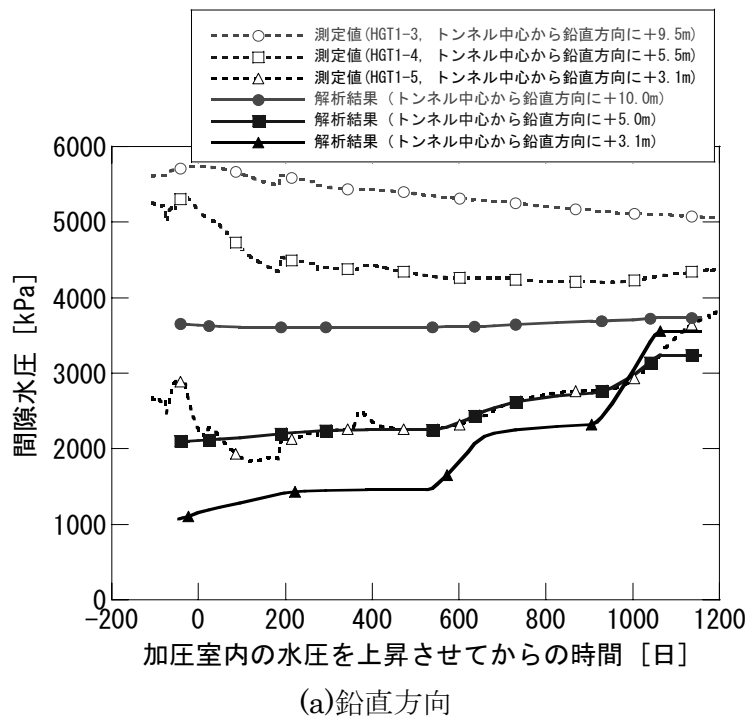


図-3.18 case12 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較

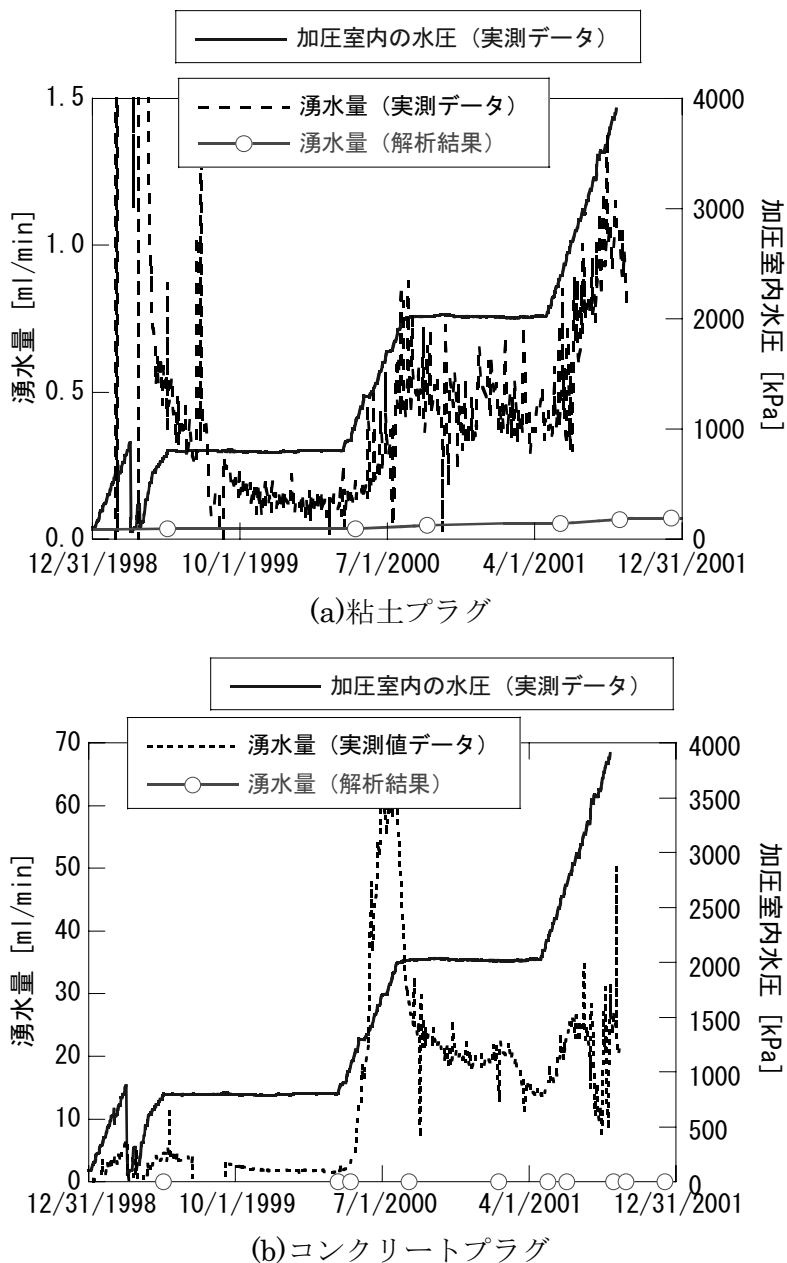


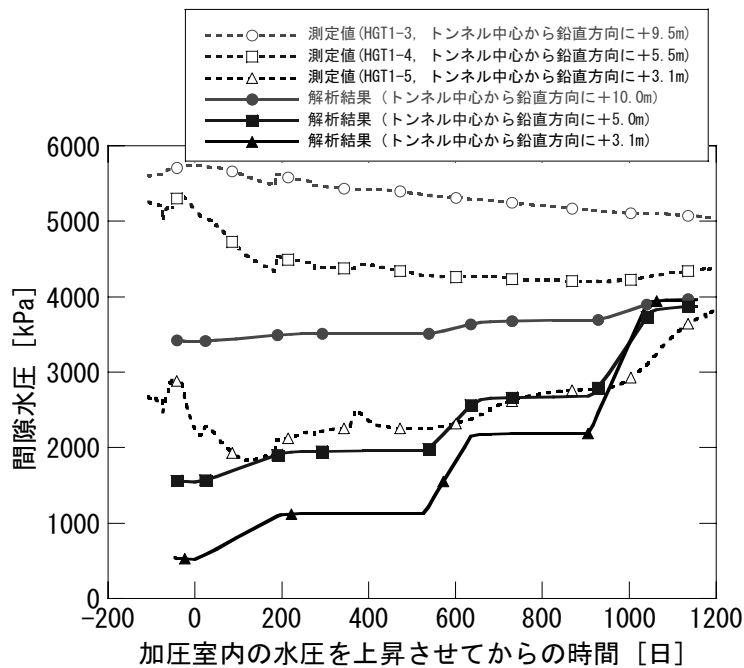
図-3.19 case12 の湧水量の解析結果と実測値との比較

(3)case13 (健岩部の透水係数を1桁大きく設定した場合) の解析結果

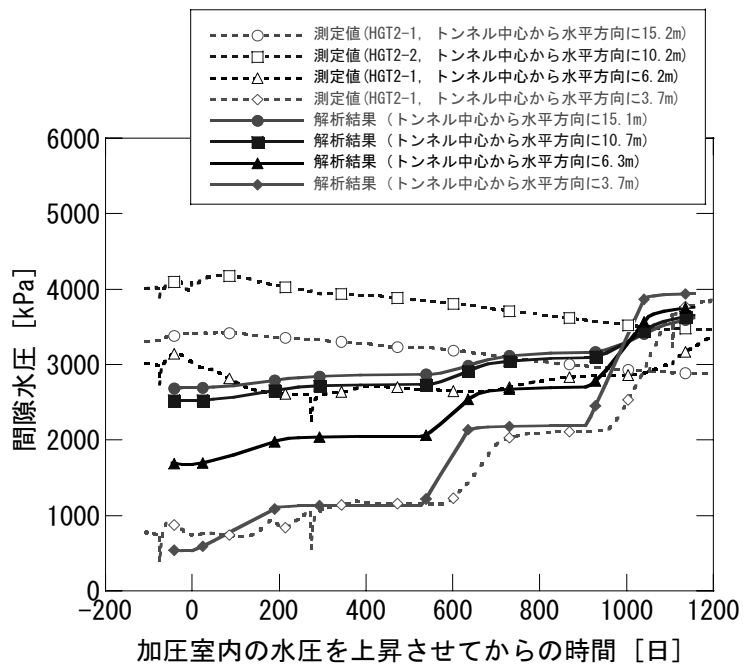
ここでは、試験坑道周辺の健岩部の透水係数を  $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$  として解析を実施し、case11 (健岩部の透水係数が  $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$ ) の解析結果と比較することにより、健岩部の透水係数について検討した (健岩部の透水係数以外は、case11 と同じである)。

case13 の間隙水圧の解析結果を実測値と合わせて図-3.20 に示す。実測値では、試験坑道中心より水平方向に 15.2m (図中凡例の記号○) 及び 10.2m (図中凡例の記号□) での間隙水圧が掘削影響と考えられる理由により徐々に低下しているのに対し、解析では 15.1m (図中凡例の記号●) 及び 10.7m (図中凡例の記号■) のところでの間隙水圧は加圧室の昇圧に反応して上昇している。これは、透水係数が大きいため圧力の低下や上昇の影響が岩盤内

の圧力の変化を大きくしており、このため、計測では圧力が下がっていない水平方向の岩盤内の圧力も低下させたと考えられる。これに対して、case11の解析結果(図-3.12参照)は、試験坑道中心より水平方向に15.1m(図中凡例の記号●)及び10.7m(図中凡例の記号■)のところで間隙水圧が、実測値と同様に掘削影響と考えられる理由により低下している。



(a)鉛直方向



(b)水平方向

図-3.20 case13 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較

このように、設定する透水係数の大小により、掘削影響あるいは加圧室内の昇圧に反応する範囲が異なり、間隙水圧の応答性からは、健岩部の透水係数については、**case11** で用いた  $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$  が妥当と考えられる。

#### (4) **case14** (境界条件を実測値に近づけた計算) の解析結果

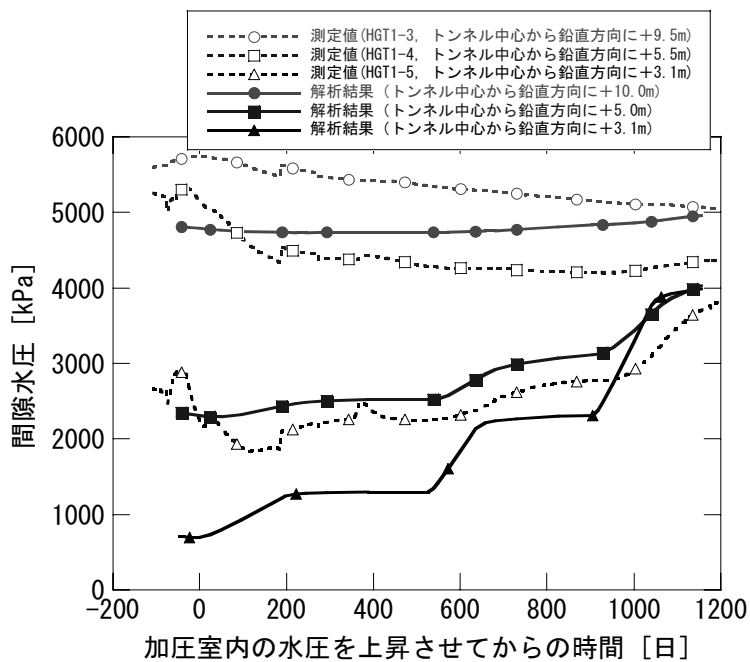
試験坑道の鉛直方向の間隙水圧は、深度 (GL-420m) に相当する水頭圧以上の間隙水圧 (約 **5500kPa**) が計測されており、深度に相当する水頭圧で境界条件を設定した解析結果に比べて **2000kPa** 程度大きくなっている。このため、解析によって得られた各プラグ周辺からの湧水量は少なく見積もられている可能性がある。

そこで、実際の間隙水圧に近づけるように、解析モデル上下面の圧力水頭の境界条件を設定した。実測値の間隙水圧に近づけるように境界条件の値をこれまでよりも大きくした場合、各プラグからの湧水量が多くなることも考えられるが、仮に、各プラグ周辺からの湧水量に大きな違いが生じない場合には、プラグ周辺からの湧水は加圧室の水圧に支配されていることを説明できる。

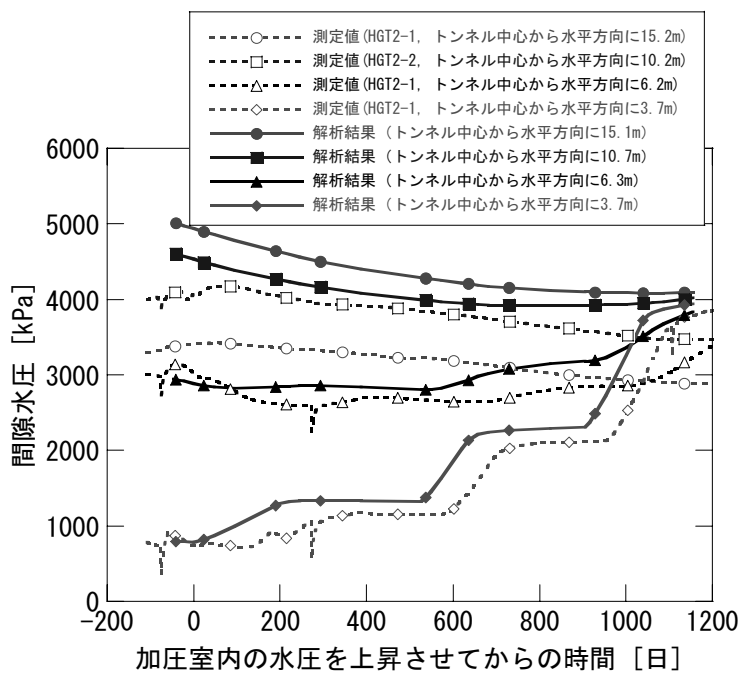
モデル上下面の圧力水頭の設定については、**case11** の図-3.12 (a) に示すように、試験坑道中心より鉛直方向の+9.5mの所で計測される間隙水圧 (図中の凡例○) は、掘削影響と考えられる理由により、時間とともに **5700kPa** 程度から **5000kPa** 程度に徐々に低下しているが、これ以外の試験坑道中心より鉛直方向に+9.5mのレベルで計測された間隙水圧は、コンクリートプラグの真上で約 **5500kPa**、粘土プラグの真上でも約 **5500kPa** であり、これらは時間に対してほぼ一定となっている (Chandler et al., 2001)。このように、一部で掘削影響と思われる間隙水圧の低下はあるものの、試験坑道中心より鉛直方向に+9.5mレベルの間隙水圧の分布が **5500kPa** 程度でほぼ一定であることから、ここでは、図-2.8 に示した解析モデルの上面 (試験坑道中心より鉛直方向に+12m) の間隙水圧を、実測値の **5500kPa** に 2.5m (12m-9.5m) 分の圧力水頭を足しあわせた **5525 kPa**、さらに、モデルの底面 (試験坑道中心より鉛直方向に-12m, 図-2.8 参照) については、モデル上面の **5525kPa** に 24m分の圧力水頭を足しあわせた **5765kPa** の圧力水頭固定境界として解析を実施した。

間隙水圧の解析結果を図-3.21 に、プラグ周辺からの湧水量の解析結果を図-3.22 にそれぞれ実測値と合わせて示す。モデル上下面の圧力水頭固定境界の値を実測値に合わせた結果、図-3.21 (a) に示すように、鉛直方向に+9.5mの所の間隙水圧 (図中凡例の記号●) は実測値 (図中凡例の記号○) に近づいたが、それ以外の試験坑道に近い部分での間隙水圧については境界条件の値を変更しても図-3.12 (a) で示した **case11** の場合と大きな違いは見られない。また、試験坑道の水平方向の間隙水圧については、図-3.12 (b) で示した **case11** の場合と比較しても分かるように、実測値よりも大きくなる結果となった。

図-3.22 に示すプラグ周辺からの湧水量については、**case11** の解析結果 (図-3.13 参照) と比較して分かるように、モデル上下の圧力水頭固定境界の値を大きくしてもほとんど変わることはない。このことから、前述したように、プラグからの湧水は、加圧室の圧力に支配されていることが明らかとなった。

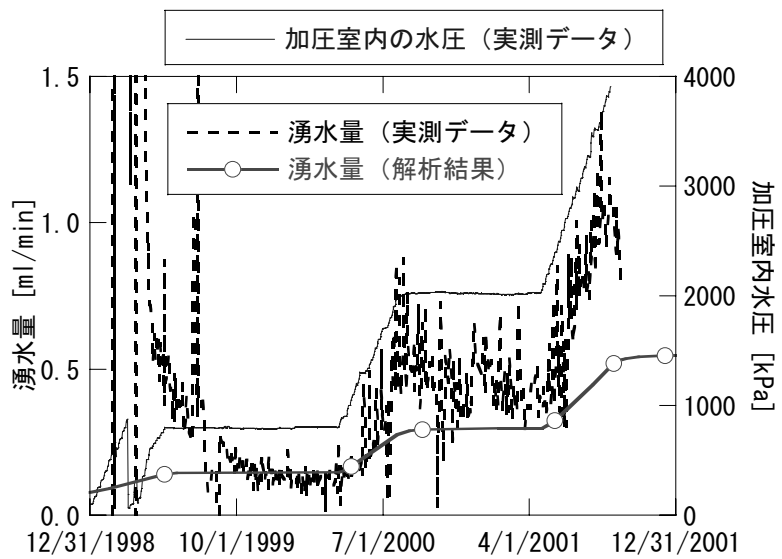


(a)鉛直方向

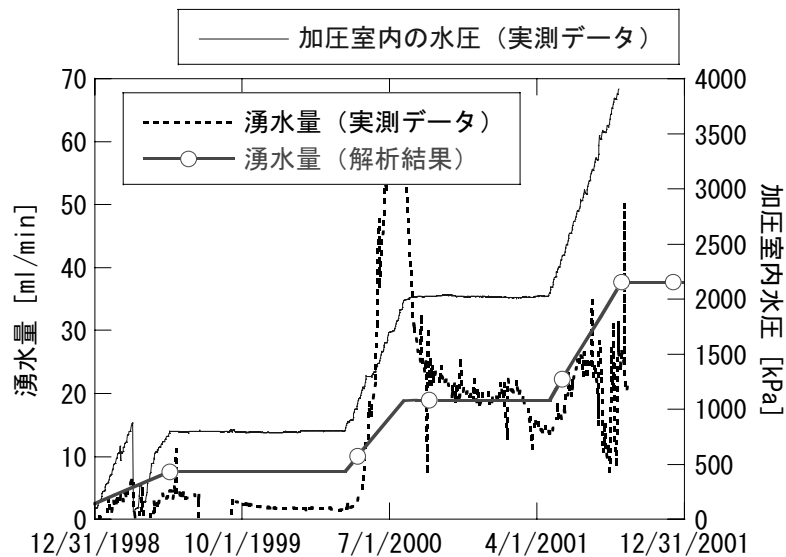


(b)水平方向

図-3.21 case14 の間隙水圧の解析結果と実測値との比較



(a)粘土プラグ



(b)コンクリートプラグ

図-3.22 case14 の湧水量の解析結果と実測値との比較

以上の水理解析の結果から以下のことが分かった。

- 1) ゆるみ域を設定しない解析では、湧水量が実測値よりも少なく、また、試験坑道周辺部分の間隙水圧が実測値よりも大きくなることから、試験坑道周辺にはゆるみ域が発生していると考えられる。
- 2) 健岩部の透水係数を  $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$  として解析したところ、加圧室の昇圧にともなう岩盤中の間隙水圧の反応範囲が実測値と異なることから、健岩部の透水係数は、原位置で測定された  $1.0 \times 10^{-13} \text{m/s}$  が妥当である。
- 3) 加圧室の昇圧にともなう岩盤中の間隙水圧の反応範囲が、試験坑道の鉛直方向と水平方向で異なることから、実際の岩盤中は均一ではなく、不連続面が存在すると考えられる。

4) 境界条件としての圧力水頭を変化させてもプラグ周辺からの湧水量は変わらないことから、プラグ周辺からの湧水は加圧室の水圧に支配されている。

### 3.3 応力水理連成解析結果

#### (1)各ステップにおける間隙水圧

各ステップにおける間隙水圧の最終値を試験坑道トンネル鉛直方向を図-3.23に、試験坑道水平方向を図-3.24に示す。図中には、岩盤の変形を考慮しない場合の間隙水圧解析結果(case11)を合わせて示す。間隙水圧の出力は、図-3.7に示すライン上である。

図-3.23に示すように試験坑道鉛直方向では、岩盤の変形を考慮した場合、変形を考慮しない場合に比べて Step2～Step8 で間隙水圧が大きくなっていることが分かる。特に、試験坑道掘削を表現した Step2 では、岩盤の変形を考慮した場合に、試験坑道壁面付近の間隙水圧が大きく上昇していることが分かる。そして、Step3以降は、試験坑道壁面付近で高くなった間隙水圧も徐々に消散し、加圧室内の水圧を 0.8MPa に昇圧する Step8 の段階になると変形を考慮しない場合と大きな違いは見られなくなった。

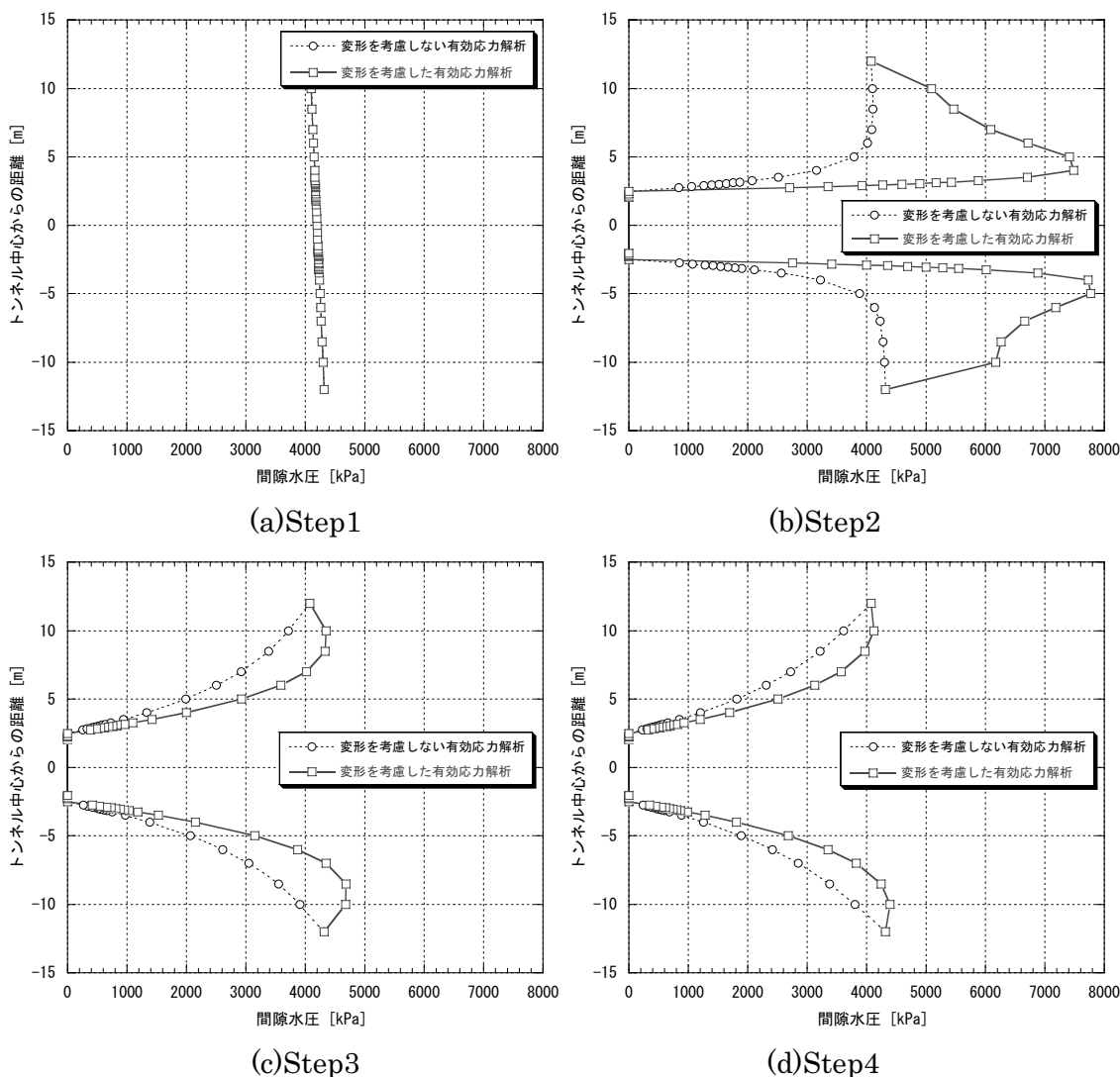
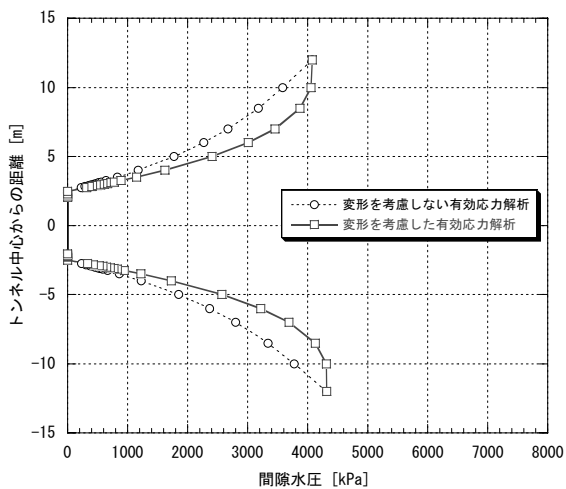
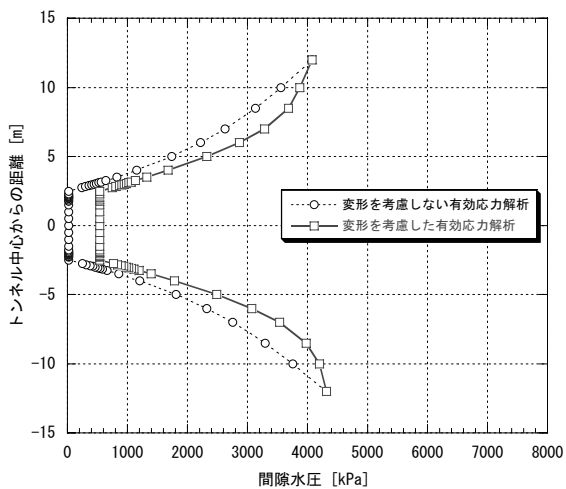


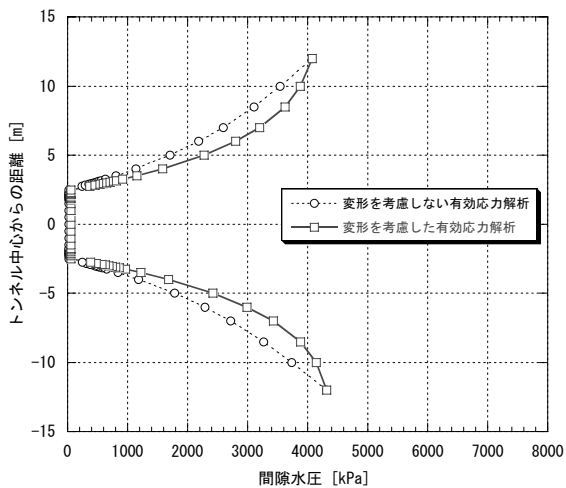
図-3.23 各ステップでの鉛直方向の間隙水圧 (その 1)



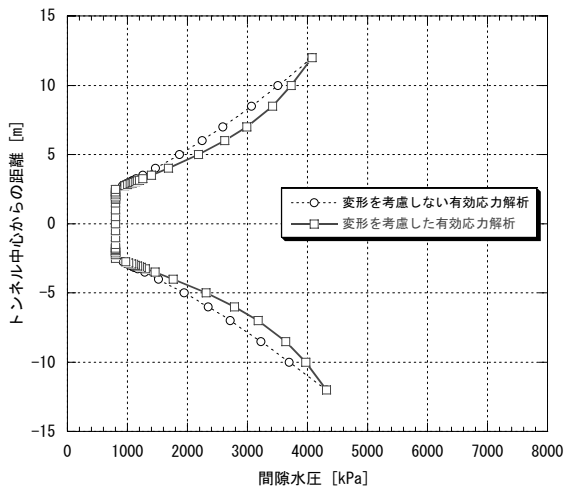
(e) Step 5



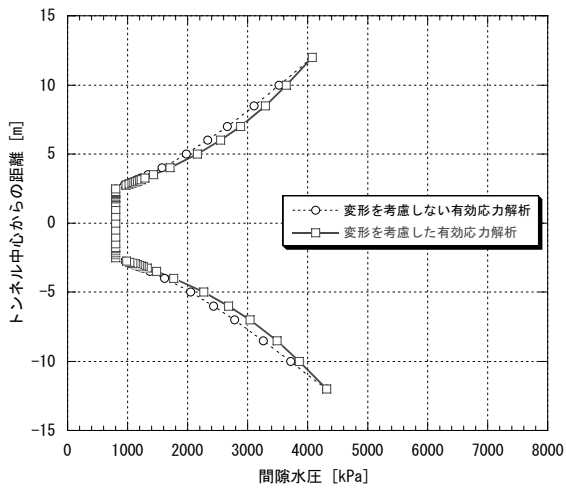
(f) Step 6



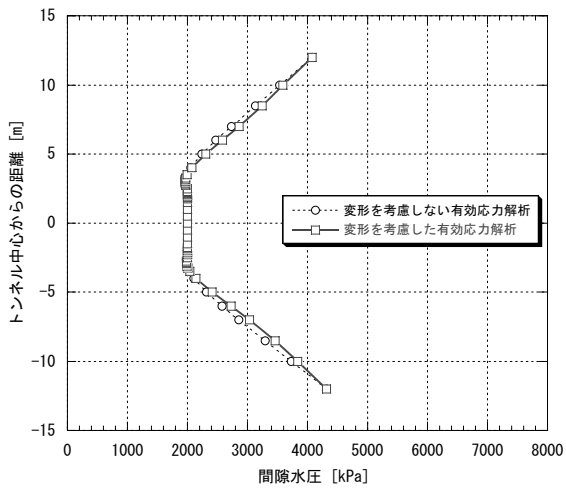
(g) Step 7



(h) Step 8



(i) Step 9



(j) Step 10

図-3.23 各ステップでの鉛直方向の間隙水圧 (その 2)



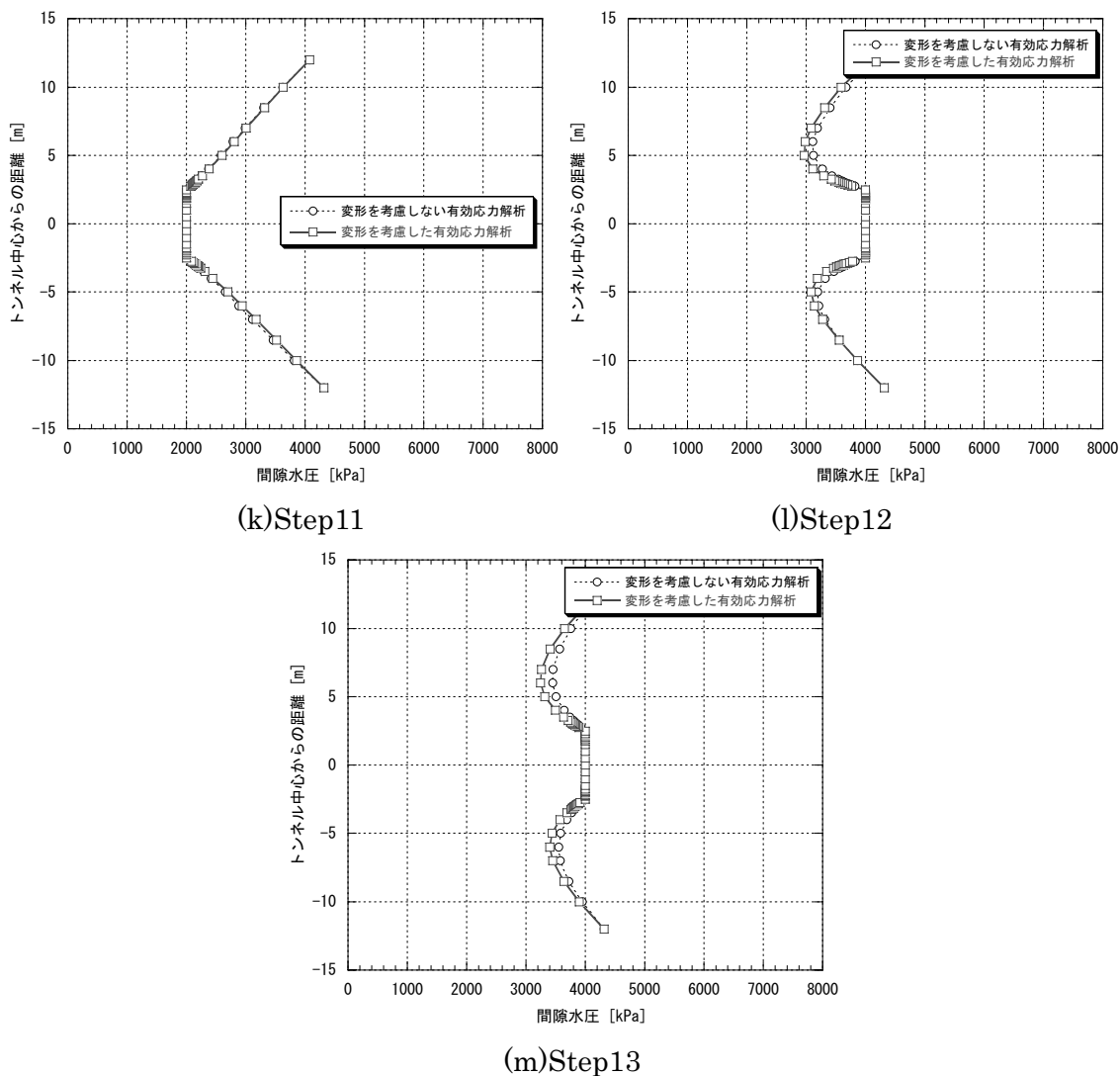


図-3.23 各ステップでの鉛直方向の間隙水圧 (その 3)

図-3.24 に示す試験坑道の水平方向では、岩盤の変形を考慮した場合、変形を考慮しない場合に比べて、試験坑道より遠い部分の間隙水圧が Step2～Step13 で大きくなっている。また、試験坑道掘削を表現した Step2 においては、試験坑道壁面付近の間隙水圧は減少していることが分かる。

このように、試験坑道掘削にともなう岩盤の変形を考慮した応力水理連成解析の場合には、試験坑道の鉛直方向と水平方向とでは間隙水圧の振る舞いが異なる結果となった。

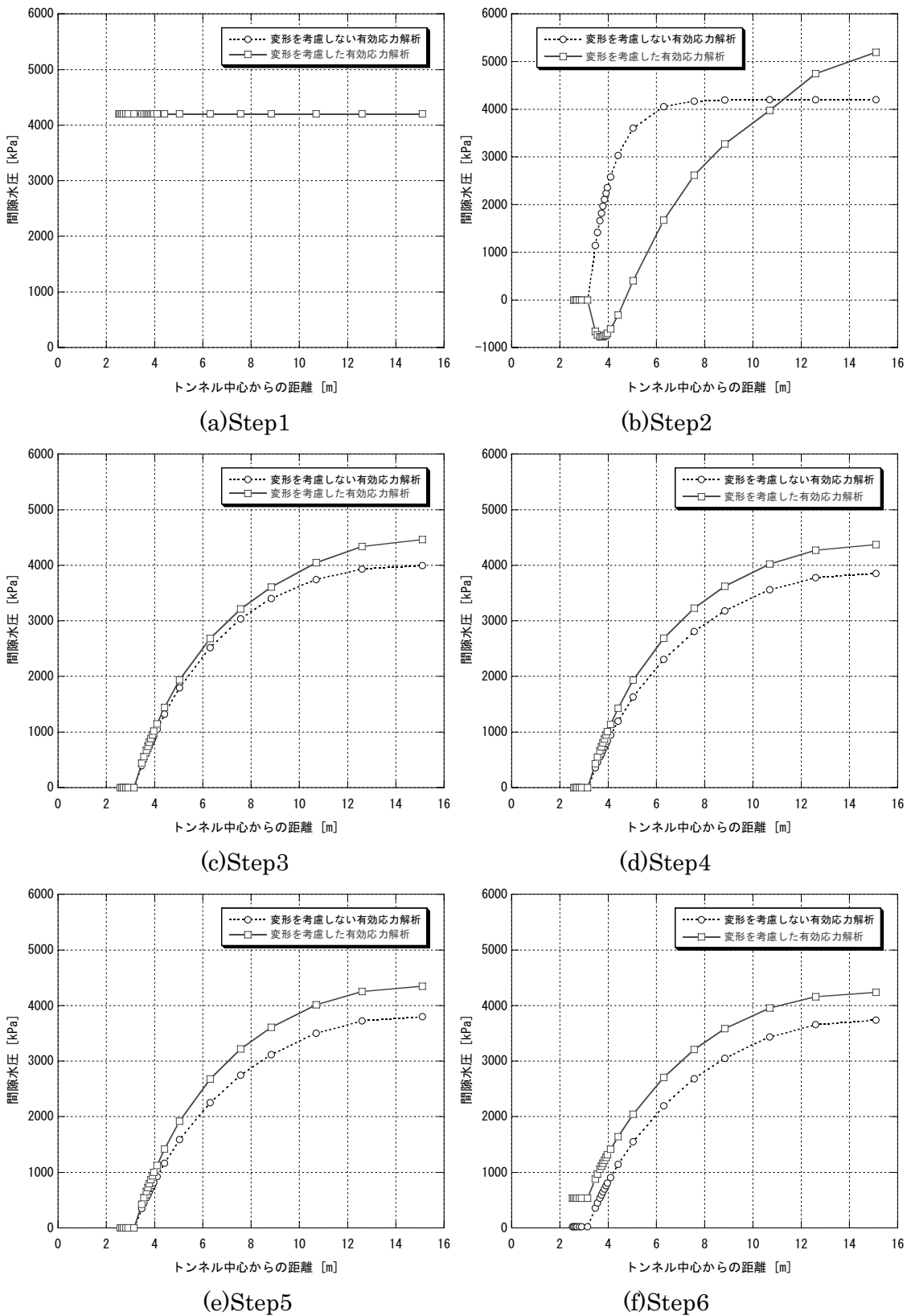


図-3.24 各ステップでの水平方向の間隙水圧 (その1)

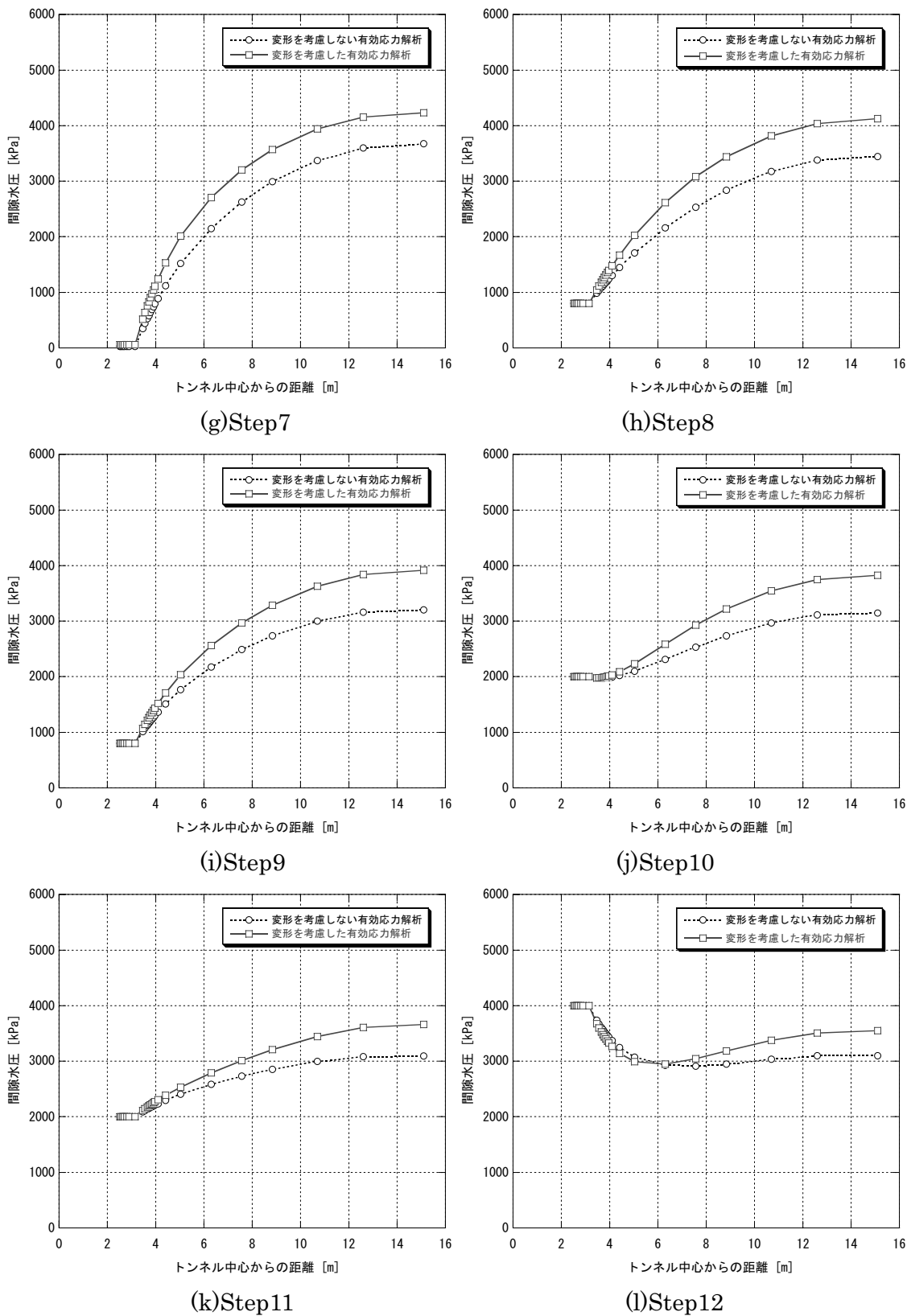


図-3.24 各ステップでの水平方向の間隙水圧 (その2)

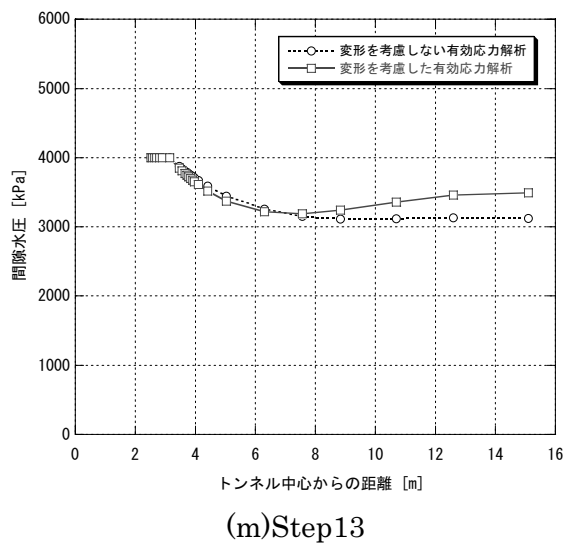


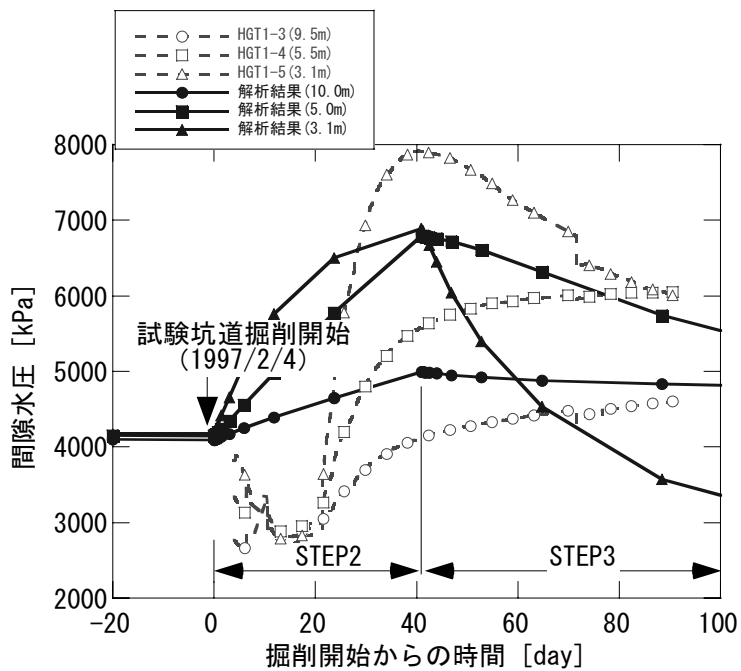
図-3.24 各ステップでの水平方向の間隙水圧 (その 3)

(2)間隙水圧の実測値との比較

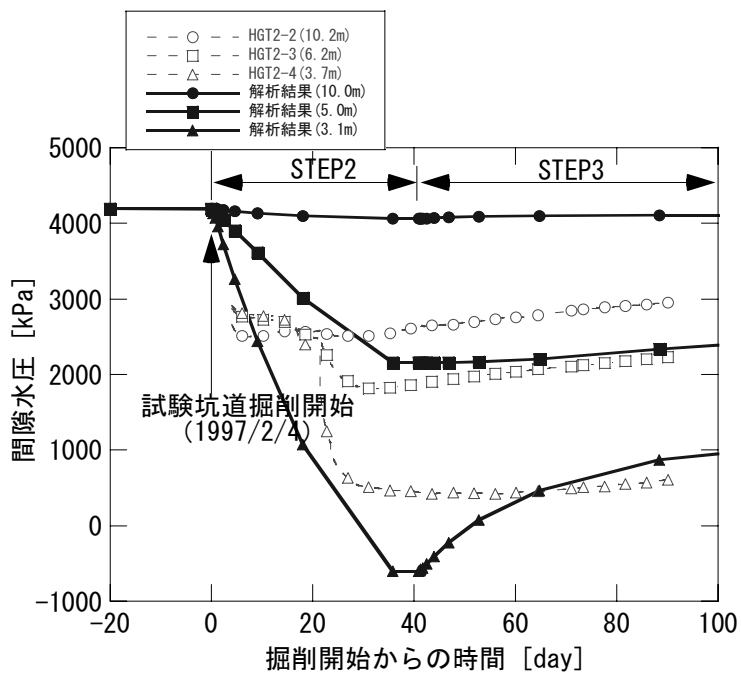
1)掘削直後

図-3.25 は、試験坑道掘削直後からの間隙水圧の実測値と変形を考慮した応力水理連成解析の 100 日までの結果を比較したものである。間隙水圧の比較ポイントは水理解析と同じである。試験坑道掘削後には、実測値、解析結果ともに、試験坑道の鉛直方向では間隙水圧が上昇し、また、水平方向では減少していることが分かる。

図-3.26 は、3.1 で行った応力解析の試験坑道掘削の定常応力解析の平均主応力のコンターである。平均主応力が、プラス側であれば圧縮、マイナス側であれば引張りである。図-3.26(a) は、試験坑道掘削前の平均主応力で、作用させた  $\sigma_1=60\text{MPa}$ ,  $\sigma_2=45\text{MPa}$ ,  $\sigma_3=11\text{MPa}$  の平均の  $39\text{MPa}$  となっていることが分かる。図-3.26(b)は、試験坑道掘削後の平均主応力である。図-3.27 は、試験坑道掘削後の値から掘削前の値を差し引いたものであり、掘削により岩盤においてどの位応力値が変化したかを示すものである。図から、試験坑道掘削により、試験坑道の鉛直方向では圧縮側に、試験坑道の水平方向では引張り側に変化していることが分かる。このような応力分布から、試験坑道掘削直後の試験坑道の鉛直方向では、圧縮により間隙水が被圧されて間隙水圧は上昇し、試験坑道の水平方向では引張り応力が発生していることから間隙水圧が減少するものと考えられ、応力解析の結果は、岩盤の変形を考慮した応力水理連成解析の間隙水圧の変化を説明することができる。

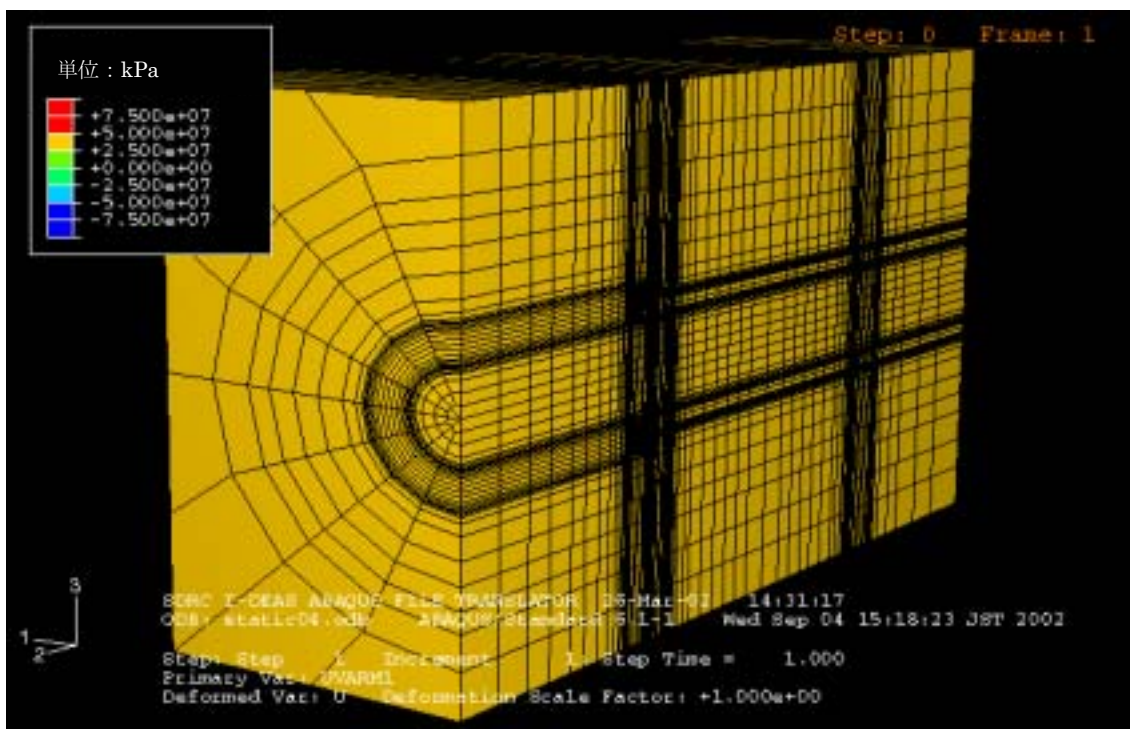


(a)鉛直方向

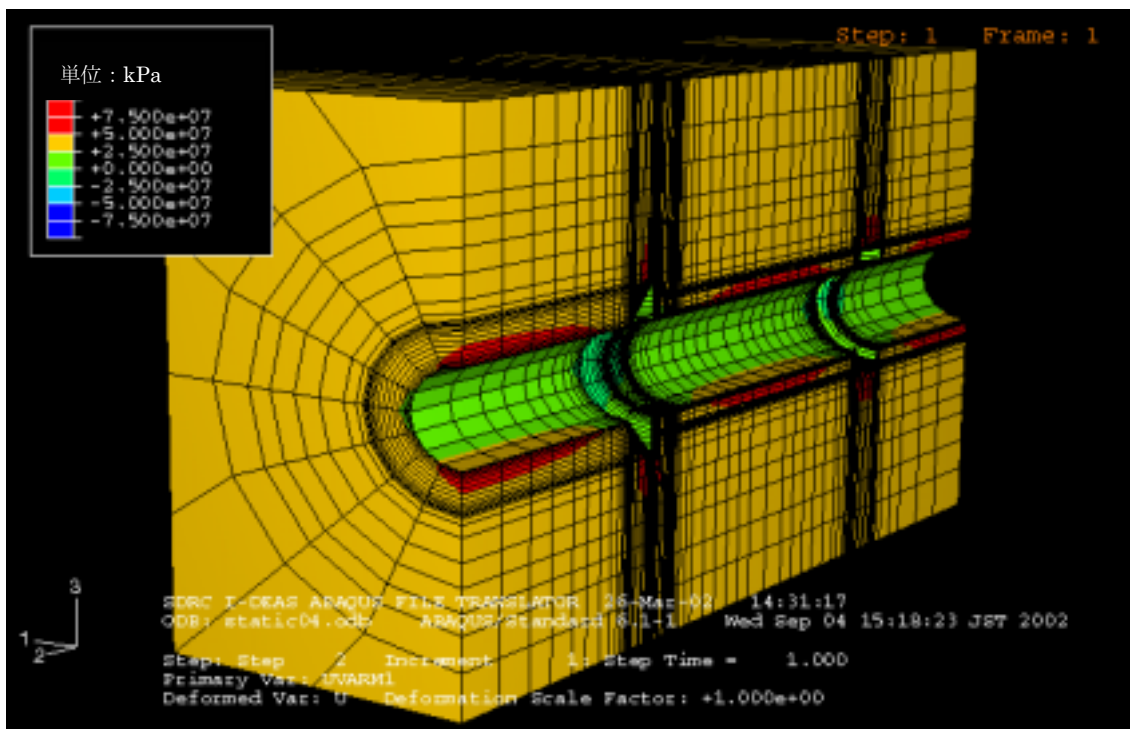


(b)水平方向

図-3.25 試験坑道掘削直後の間隙水圧の変化



(a)試験坑道掘削前



(b)試験坑道掘削後

図-3.26 試験坑道掘削前後の定常応力解析による岩盤の平均主応力  
(+ ; 圧縮, - ; 引っ張り)

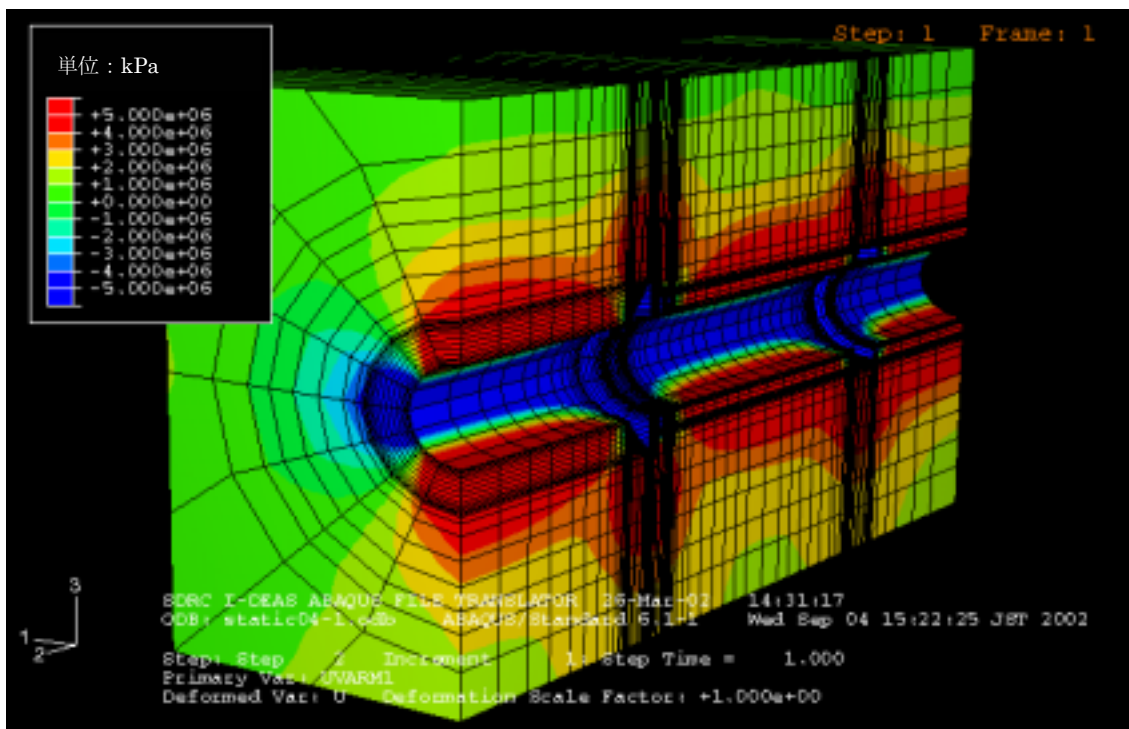


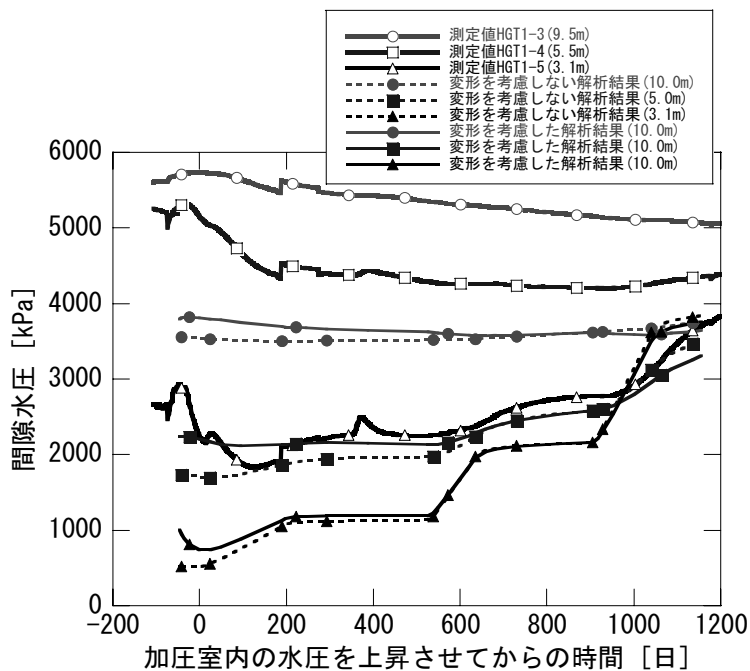
図-3.27 試験坑道掘削前後における岩盤の平均主応力の変化量

## 2) 加圧室の昇圧

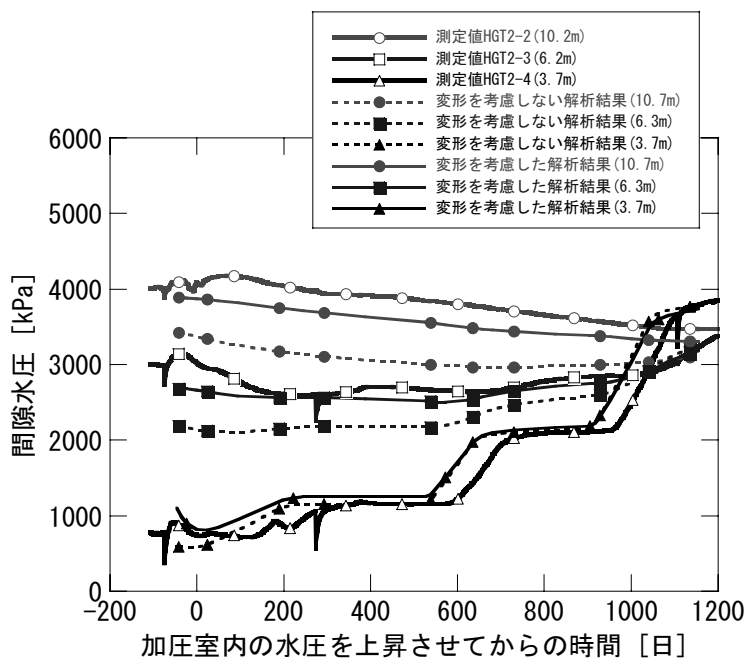
両プラグ間に位置する加圧室内の水圧を上昇させたときの間隙水圧の解析結果を実測値と比較して図-3.28に示す。図-3.28(a)は、試験坑道の鉛直方向、図-3.28(b)は、試験坑道の水平方向の比較であり、図中には、岩盤の変形を考慮しない場合 (case11) の結果を合わせて示す。間隙水圧の測定位置はこれまでと同様である。

図-3.28(a)に示す試験坑道の鉛直方向の間隙水圧は、試験坑道掘削にともなう岩盤の変形を考慮した場合、変形により間隙水圧が被圧されるため、変形を考慮しない場合に比べて間隙水圧が若干大きくなっていることが分かる。しかしながら、測定により得られた試験坑道の鉛直方向 9.5mの間隙水圧は 5500 kPa 程度であり、深度 (GL-410m) に相当する水頭圧 (約 4100kPa) 以上の値となっている。そして、解析で求めた値よりもまだ 2000kPa 程度大きいことが分かる。図-3.23(b)で示したように、変形を考慮した解析の場合、試験坑道掘削直後の間隙水圧は試験坑道鉛直方向 9.5mの場所で約 6000kPa に上昇している。また、図-3.25に示したように、試験坑道掘削直後の間隙水圧の実測値も、試験坑道の鉛直方向 9.5mの場所で約 5000 kPa に間隙水圧が上昇していることが分かる。しかしながら、図-3.23(h)の Step8に示すように、加圧室内の水圧を 0.8MPa に昇圧させる段階まで時間が経過すると、変形により被圧されて高くなった間隙水圧も消散し、変形を考慮しない場合と同等の値まで低下していることが分かる。このようなことから、図-3.28(a)で示すように、測定により得られた試験坑道鉛直方向 9.5mの間隙水圧が、深度 (GL-410m) に相当する水頭圧 (約 4100kPa) 以上の値を示している理由として、試験坑道掘削にともなう岩盤の変形により被圧され上昇した間隙水圧が、実際の岩盤の不連続性や不均一性により消散しきれていない、あるいは、図-3.27に示したように、鉛直方向においては、岩盤が圧縮側に变形するため透水係数が小さくなり、

試験坑道掘削にともない間隙水圧が低下しにくくなっていることも考えられる。



(a)鉛直方向



(b)水平方向

図-3.28 間隙水圧の解析結果と実測値との比較

次に、図-3.28(b)に示す試験坑道の水平方向の間隙水圧であるが、試験坑道の水平方向については、前述したように、試験坑道の鉛直方向に比べて試験坑道掘削にともなう間隙水圧の上昇は顕著ではなく、実測値においても深度に相当する圧力水頭以上の値は計測されていない。試験坑道掘削にともなう岩盤の変形を考慮した場合には、変形により間隙水圧が被圧さ



れるため、変形を考慮しない場合に比べて間隙水圧が大きくなり、その結果として実測値に近づく形となっている。

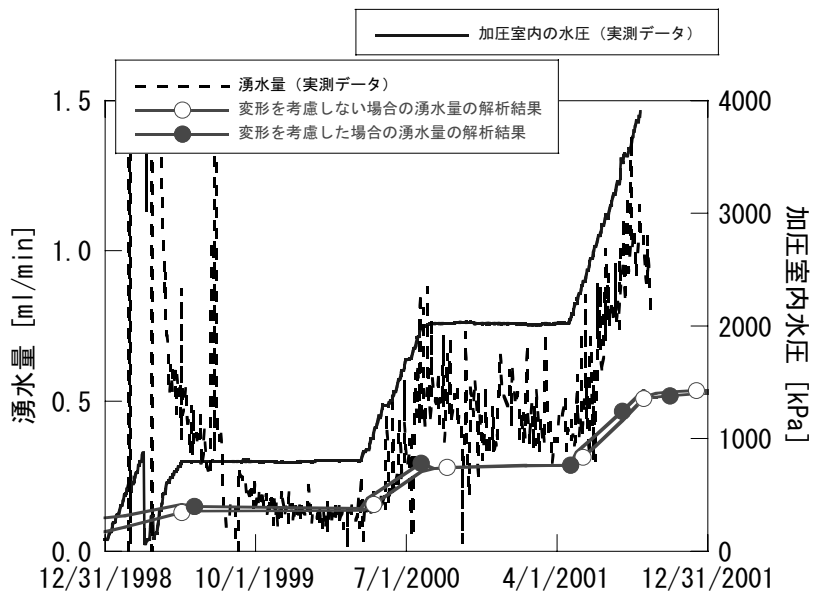
### (3)湧水量の実測値との比較

岩盤の変形を考慮した場合の各プラグ周辺から湧水量の解析結果を実測値と比較して図-3.29に示す。図-3.29(a)は、粘土プラグ周辺、図-3.29(b)は、コンクリートプラグ周辺からの湧水量の比較であり、図中には、岩盤の変形を考慮しない場合の結果を合わせて示す。

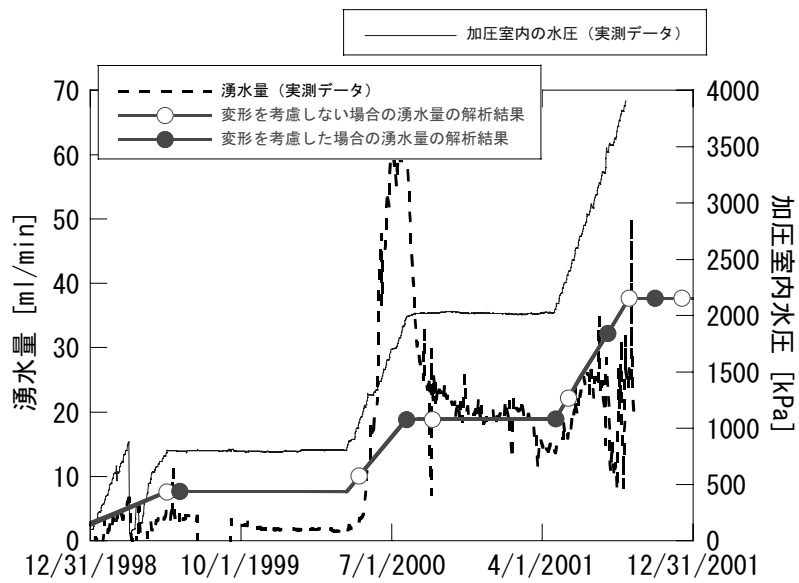
岩盤の変形を考慮した場合には、前述のように、岩盤の変形により間隙水圧が被圧され間隙水圧が高くなるため、変形を考慮しない場合に比べて湧水量は多くなると予想したが、図からわかるようにほとんど変わらない結果となった。

応力水理連成解析の結果、試験坑道掘削により岩盤が変形し間隙水圧が上昇すること、土被り圧に対して側圧がかなり大きいこのような地圧環境下で試験坑道を掘削した場合、試験坑道の鉛直方向と水平方向とで間隙水圧の変化が異なることなどが分かった。そして、このような間隙水圧の振る舞いを応力解析の結果から説明出来ることが分かった。URLのような対象となる岩盤が力学的に良好な場合（弾性体）には、岩盤の変形と地下水の流れを連成させた解析により、これらの挙動を良く表現できることが分かった。

しかしながら、その一方で、試験坑道の鉛直方向において測定された間隙水圧は、深度に相当する水頭圧以上の値となっており、解析で求めた値よりも大きくなる場所も見られた。この理由として、試験坑道掘削にともなう岩盤の変形により被圧され上昇した間隙水圧が岩盤の不連続性により消散しきれていないということも考えられる。これについては、不連続性・亀裂性の岩盤を連続体・多孔質体として取り扱うモデルの限界ということができる。



(a)粘土プラグ



(b)コンクリートプラグ

図-3.29 湧水量の解析結果と実測値との比較

#### 4 まとめ

応力解析，水理解析，応力水理解析の結果から，以下のことがわかった。

応力解析は，試験領域の形状が把握されていれば，水理解析に必要となる健岩部，掘削影響領域の分布やその連続性を把握するのに有効である。それらは，圧縮応力あるいは引張り応力の分布，局所安全率の分布で示すことができる。本研究では，この解析結果を用いて水理解析や応力水理解析における掘削影響領域や透水係数を設定した。このような方法により，取得されている物性値が限定されている場合でも，予測に基づく入力値の設定が可能と考えられる。

応力解析の結果から，応力に起因する破壊は，引張り応力ではプラグの切り欠き部を中心として試験坑道の側面に，せん断応力では，試験坑道の上下とプラグの切り欠き先端部で発生していることが分かった。また，局所安全率が 1.5 を下回る範囲は，試験坑道壁面及びプラグの切り欠き部周辺に約 50cm の幅で分布しており，試験坑道が発破により掘削されていることを考慮すると，この 50cm の範囲がゆるみ域と考えられる。

水理解析と応力水理解析結果から，ゆるみ域が発生している場合は，間隙水圧の分布や湧水量の評価のためにはそれを適切にモデルに取り込む必要があることが分かった。また，全体の場となる岩盤部の水理特性も適切に設定する必要がある。

また，本解析で対象としたような坑道形状が円形ではなく変形している，あるいは応力状態も偏っている場合は坑道周囲の応力状態が複雑になることから，岩盤の変形を考慮した応力水理連成解析のような連成解析が間隙水圧分布や湧水量の把握には有効であることがわかった。

本解析では岩盤は均一媒体としてモデル化した。このモデル化に関して，試験坑道の鉛直方向において測定された間隙水圧は，深度に相当する水頭圧以上の値となっており，解析では十分に表現できなかった。この理由として，試験坑道掘削にともなう岩盤の変形により被圧され上昇した間隙水圧が岩盤の不連続性により十分に消散されていないことが考えられる。この問題を解決するためには，不連続性や亀裂の考慮等の対応が必要になってくる。

## 5 おわりに

サイクル機構が参加している、カナダAECLのURLで実施しているトンネルシーリング性能試験におけるプラグの止水性能を解析で評価した。岩盤中の間隙水圧分布及び湧水量を評価するため、応力解析、水理解析及び応力水理連成解析を実施した。

応力解析では試験坑道の掘削に伴う試験坑道周辺の応力状態を把握し、水理解析及び応力水理連成解析では試験坑道掘削からプラグの設置、加圧室への注水昇圧までを試験工程に沿って経時変化を解析で評価した。試験坑道を掘削することにより試験坑道周辺の岩盤は間隙水圧の変化等が生ずるため、応力水理連成解析により間隙水圧の変化及び湧水量の変化を表現できた。

本解析で得られた結果は、今後、湧水の移行経路の把握を目的として実施する、トレーサー解析の解析モデル及び入力条件の設定に資する。

参考文献

Chandler, N., Dixon, D., Gray, M., Hara, K., Cournut, A. and Tillerson, J.: “An in situ Demonstration of Technologies for Vault Sealing”, Proc. 19<sup>th</sup> Annual Conference of Canadian Nuclear Society (1998)

Chandler, N., Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J. and Vignal, B.: “The five years report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP”, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727 (2001)

Dixon, D., Martino, J., Chandler, N., Sugita, Y. and Vignal, B.: “Water Uptake By A Clay Bulkhead Installed In The Tunnel Sealing Experiment At Atomic Energy of Canada’s Underground Research Laboratory”, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Experiments in underground laboratories, Proceedings, pp.36-49 (2002)

藤田朝雄, 杉田裕 : “JNC/AECL 共同研究 –トンネルシーリング性能試験の現況について–”, サイクル機構技報, No.1, pp.79-84 (1998)

核燃料サイクル開発機構 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999)

Martino, J., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F. : “The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design”, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, 2003, pp.602-609 (2003)

杉田 裕, 升元一彦 : “トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術”, JNC TN8400 2002-005 (2002)

杉田 裕, 川上 進, 戸井田克 : “トンネルシーリング性能試験における試験環境条件および計測項目”, JNC TN8400 2003-002 (2003)