

瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討
(平成25年度)

－掘削影響の修復・軽減技術の開発－
(委託研究)

Study on Engineering Technologies
in the Mizunami Underground Research Laboratory (FY 2013)
- Development of Recovery and Mitigation Technology on Excavation Damage -
(Contract Research)

深谷 正明 畑 浩二 秋好 賢治 佐藤 伸
竹田 宣典 三浦 律彦 鷗山 雅夫 金田 勉
上田 正 戸田 亜希子 佐藤 稔紀 見掛 信一郎
真田 祐幸 堀内 泰治 青柳 芳明

Masaaki FUKAYA, Koji HATA, Kenji AKIYOSHI, Shin SATO
Yoshinori TAKEDA, Norihiko MIURA, Masao UYAMA, Tsutomu KANATA
Tadashi UEDA, Akiko TODA, Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE
Hiroyuki SANADA, Yasuharu HORIUCHI and Yoshiaki AOYAGI

バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

March 2015

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 25 年度）
－掘削影響の修復・軽減技術の開発－
（委託研究）

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部

深谷 正明*1、畑 浩二*1、秋好 賢治*1、佐藤 伸*1、竹田 宣典*1、三浦 律彦*1、
鶴山 雅夫*1、金田 勉*1、上田 正*1、戸田 亜希子*1、
佐藤 稔紀、見掛 信一郎、真田 祐幸、堀内 泰治*1、青柳 芳明*2

（2014 年 11 月 11 日受理）

超深地層研究所計画における工学技術に関する研究は、①「研究坑道の設計・施工計画技術の開発」、②「研究坑道の建設技術の開発」、③「研究坑道の施工対策技術の開発」、④「安全性を確保する技術の開発」および⑤「掘削影響の修復・軽減技術の開発」の 5 項目に分類して進めている。これまでは、「第 2 段階」の調査研究として、研究坑道掘削工事で取得される計測データや施工データを用いた評価に基づく設計の妥当性についての検討などを中心として進めてきた。

本研究は、「掘削影響の修復・軽減技術の開発」の一貫として、深度 500m 研究アクセス北坑道における再冠水試験のための止水壁に関する検討を実施した。具体的には、止水壁に関する国内外の文献調査を実施し、この結果を基に、設計条件を検討するとともに、解析により止水壁躯体の設計と岩盤安定性を評価し、主な部材の材料を選定するとともに、止水グラウトの計画を立案した。

本報告書は、大林組が日本原子力研究開発機構との委託研究により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

※1 技術開発協力員（現：新日建コンサルタント株式会社）

※2 技術開発協力員

*1 株式会社 大林組

Study on Engineering Technologies
in the Mizunami Underground Research Laboratory (FY 2013)
- Development of Recovery and Mitigation Technology on Excavation Damage-
(Contract Research)

Masaaki FUKAYA*¹, Koji HATA *¹, Kenji AKIYOSHI *¹, Shin SATO *¹, Yoshinori TAKEDA *¹,
Norihiro MIURA*¹, Masao UYAMA *¹, Tsutomu KANATA *¹, Tadashi UEDA*¹, Akiko TODA *¹
Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE, Hiroyuki SANADA, Yasuharu HORIUCHI*¹
and Yoshiaki AOYAGI*²

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 11, 2014)

The researches on engineering technology in the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project consist of (1) development of design and construction planning technologies, (2) development of construction technology, (3) development of countermeasure technology, (4) development of technology for security and (5) development of technologies for restoration and/or reduction of the excavation damage. The researches on engineering technology such as verification of the initial design were being conducted by using data measured during construction as a part of the second phase of the MIU project.

Examination of the plug used for the groundwater recovery experiment in the GL-500m Access/Research Gallery-North was conducted as a part of the development of technologies for restoration and/or reduction of excavation damage. Specifically, literature survey on the plug, was performed. Based on the literature survey result, examination of the design conditions, also assessment of design of the plug and rock stability by using numerical simulation were carried out, and the grouting plan for water inflow between rock and plug, including select of material used for major parts, was made.

Keywords: Engineering Technology, Design, Plug, Reflood Test

This work was performed by OBAYASHI Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

※1 Collaborating Engineer (Present affiliation Shinnikken Consultant CO.,LTD)

※2 Collaborating Engineer

*1 OBAYASHI Corporation

目 次

1. 目的.....	1
2. 研究の概要.....	2
2.1 研究の範囲.....	2
2.2 研究工程.....	2
2.3 研究内容.....	2
2.3.1 文献調査.....	2
2.3.2 止水壁の検討.....	3
2.3.3 止水壁周辺の岩盤挙動評価.....	3
3. 文献調査.....	4
3.1 実施方針.....	4
3.2 文献調査の実施および調査情報の整理.....	4
3.2.1 次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発プロジェクト（ANGAS）.....	4
3.2.2 波方における国家石油ガス備蓄基地.....	7
3.2.3 DOPAS プロジェクト.....	10
3.2.4 AECL における TSX（Tunnel Sealing Experiment）.....	12
3.3 瑞浪超深地層研究所における止水壁で考慮すべき事項.....	15
4. 止水壁の検討.....	17
4.1 再冠水試験の止水壁に求められる機能の検討.....	17
4.2 止水壁検討に必要な原位置情報の収集整理.....	20
4.2.1 MIZ-1 のボーリングデータ.....	20
4.2.2 12MI33 号孔のボーリングデータ.....	22
4.2.3 止水壁設置位置における岩盤掘削の状況.....	24
4.3 止水壁検討条件の設定.....	26
4.4 止水壁オプションの検討.....	26
4.4.1 止水壁の形状.....	26
4.4.2 マンホールの形状.....	30
4.4.3 使用材料.....	31
4.4.4 止水グラウトおよび止水壁における止水措置.....	34
4.4.5 止水壁オプション.....	35
4.5 止水壁の設計.....	37
4.5.1 設計基準.....	37
4.5.2 各種部材の設計検討.....	39
4.5.3 今後の研究課題.....	63
5. 止水壁周辺の岩盤挙動評価.....	74
5.1 連成事象の整理.....	74
5.1.1 環境変化の想定.....	74
5.1.2 現地で想定される連成事象.....	74
5.2 岩盤挙動評価における課題.....	75
6. まとめ.....	76

6.1 文献調査.....	76
6.2 止水壁の検討	76
6.3 止水壁周辺の岩盤挙動評価.....	76
参考文献	77
付録.....	79

CONTENTS

1. Objectives of research.....	1
2. Outline	2
2.1 Research field	2
2.2 Research schedule	2
2.3 Contents.....	2
2.3.1 Literature survey.....	2
2.3.2 Examination of the plug.....	3
2.3.3 Evaluation of rock mass behavior around the plug	3
3. Literature survey	4
3.1 Implementation policy	4
3.2 Implementation of literature survey and organizing of information obtained.....	4
3.2.1 Project of Advanced Natural Gas Storage (ANGAS)	4
3.2.2 Project of NAMIKATA underground LPG Storage.....	7
3.2.3 Project of DOPAS.....	10
3.2.4 TSX(Tunnel Sealing Experiment) at AECL.....	12
3.3 Consideration on the plug adopted to the MIU	15
4. Examination of the plug	17
4.1 Evaluation of functions required for the plug applied to the reflood test.....	17
4.2 Collection and organizing of in-situ data required for the plug examination	20
4.2.1 Data obtained from MIZ-1 borehole.....	20
4.2.2 Data obtained from 12MI33 borehole	22
4.2.3 Excavation status at the plug setting position.....	24
4.3 Conditions for examination of the plug	26
4.4 Evaluation of the plug options	26
4.4.1 Structure of the plug	26
4.4.2 Structure of the manhole	30
4.4.3 Employed material	31
4.4.4 Grouting and countermeasure against water inflow for the plug	34
4.4.5 Plug options	35
4.5 Design of the plug	37
4.5.1 Design standard.....	37
4.5.2 Parts design	39
4.5.3 Future tasks.....	63
5. Evaluation of rock mass behavior around the plug.....	74
5.1 Organizing of coupling phenomenon	74
5.1.1 Prediction of environmental change	74
5.1.2 Coupling phenomenon expected at the site.....	74
5.2 Tasks for evaluating of rock mass behavior	75
6. Conclusions.....	76

6.1 Literature survey	76
6.2 Examination of the plug	76
6.3 Evaluation of rock mass behavior around the plug	76
References	77
Appendix	79

表リスト

表 2.2-1	研究工程.....	2
表 3.2-1	計測機器一覧.....	9
表 3.2-2	コンクリートの目標品質.....	9
表 3.2-3	使用材料.....	9
表 3.2-4	コンクリートの配合.....	10
表 3.2-5	コンクリートの配合 (LHHPC : 低発熱高流動コンクリート).....	13
表 3.2-6	コンクリートプラグ設計のための検討事項.....	14
表 3.3-1	文献事例の止水壁検討への反映.....	15
表 4.1-1	施工中に求められる要件 (SKB).....	17
表 4.1-2	止水性として求められる要件 (SKB).....	17
表 4.1-3	閉鎖後求められる要件 (SKB).....	18
表 4.1-4	その他考慮すべき事項.....	18
表 4.2-1	室内力学試験の結果.....	22
表 4.2-2	各区間の間隙水圧の代表的な値 (PQ 区間).....	23
表 4.2-3	各区間の間隙水圧の代表的な値 (HQ 区間).....	23
表 4.2-4	透水試験結果一覧 (PQ 区間).....	23
表 4.2-5	透水試験結果一覧 (HQ 区間).....	23
表 4.3-1	設計に必要な力学定数.....	26
表 4.4-1	マンホール形状オプションと寸法 (参考) (ANGAS).....	31
表 4.4-2	漏水経路と止水措置.....	34
表 4.4-3	止水壁オプション.....	35
表 4.5-1	要求性能.....	37
表 4.5-2	要求性能, 限界状態, 照査指標と設計荷重.....	38
表 4.5-3	検討する限界状態.....	38
表 4.5-4	安全係数.....	40
表 4.5-5	マンホールの設計に用いるコンクリートの安全係数.....	42
表 4.5-6	低アルカリコンクリートに使用する材料の例.....	47
表 4.5-7	低アルカリコンクリートの基本配合の一例 (60N/mm ² の場合).....	47
表 4.5-8	二次元解析による応力最大・最小値.....	48
表 4.5-9	三次元解析による応力最大・最小値.....	49
表 4.5-10	マンホール材料表.....	51
表 4.5-11	止水壁計測計画案.....	61
表 4.5-12	止水壁計測機器例.....	62
表 4.5-13	使用材料案.....	64
表 4.5-14	暫定配合.....	64
表 4.5-15	フレッシュコンクリートの試験結果の一例.....	66
表 4.5-16	硬化コンクリートの試験結果の一例.....	67
表 4.5-17	使用材料一覧.....	67

表 4.5-18	標準配合選定における暫定配合	68
表 4.5-19	最適膨張材量選定における暫定配合	69
表 4.5-20	参考表 コンクリートの試験項目一覧	71
表 5.1-1	THMC 関連の一例	74

図リスト

図 2.3-1	水質・水圧観測用配管レイアウト (JAEA 計画案)	3
図 3.2-1	実証試験貯槽の基本構造	5
図 3.2-2	光ファイバの設置概念	5
図 3.2-3	プラグ鉄筋の組み立て方法	6
図 3.2-4	プラグコンクリートの打ち込み方法	7
図 3.2-5	貯蔵施設全体図	8
図 3.2-6	気密試験のレイアウト	8
図 3.2-7	DOPAS におけるワークパッケージの構成	10
図 3.2-8	DOMPLU の概要	11
図 3.2-9	TSX 試験のレイアウト	12
図 3.2-10	プラグ設計の考え方	12
図 4.2-1	力学試験結果 (一軸圧縮試験)	20
図 4.2-2	室内力学試験の結果 (圧裂引張試験)	21
図 4.2-3	室内力学試験の結果 (三軸圧縮試験)	21
図 4.2-4	等粒状花崗岩の例 (41~42mabh)	22
図 4.2-5	掘削後の止水壁位置の状況	24
図 4.2-6	3次元スキャナの測量手順	24
図 4.2-7	3次元スキャナによる測量結果の例	25
図 4.2-8	3次元スキャナによる測量結果 (図示)	25
図 4.4-1	ANGAS の実証試験で用いられたプラグ形状	27
図 4.4-2	AECL における TSX で用いられたプラグ	27
図 4.4-3	SKB の KBS-3V で用いられているプラグ形状	27
図 4.4-4	止水壁構造比較	28
図 4.4-5	構造検討用解析モデル	29
図 4.4-6	最大主応力分布と変形図 (変形倍率: 500 倍)	29
図 4.4-7	止水壁変形分布及び変形図 (変形倍率: 500 倍)	30
図 4.4-8	マンホール形状参考図 (ANGAS)	30
図 4.4-9	瑞浪超深地層研究所の現場プラントのセメントサイロ (現状 50t×2 基)	33
図 4.5-1	伝達板強度検討に用いる寸法記号と強度検討断面	43
図 4.5-2	伝達板の曲げモーメント算出モデル	44
図 4.5-3	伝達板の曲げモーメント減衰算出モデル	46
図 4.5-4	二次元解析モデル	48
図 4.5-5	三次元解析モデル	49
図 4.5-6	止水壁の設計結果 (配筋図)	50
図 4.5-7	マンホールの設計結果 (組立図)	51
図 4.5-8	止水壁グラウトストッパー配置図	55
図 4.5-9	注入孔・注入管配置図	55
図 4.5-10	注入フロー	57

図 4.5-11	コンタクトグラウト計画例.....	58
図 4.5-12	表面止水工施工範囲	59
図 4.5-13	止水壁境界部コーキング箇所.....	59
図 4.5-14	配管及び残留部材（切断）コーキング箇所.....	60
図 4.5-15	計器配置案	62
図 4.5-16	JIS スランプフロー試験.....	65
図 4.5-17	JSCE U型充填性試験（間隙通過性試験）	65
図 4.5-18	自己収縮歪計測手法の事例（□10×10×40cm 供試体, ひずみ計）	66
図 4.5-19	断熱温度上昇試験装置.....	66

1. 目的

超深地層研究所計画における工学技術に関する研究は、①「研究坑道の設計・施工計画技術の開発」、②「研究坑道の建設技術の開発」、③「研究坑道の施工対策技術の開発」、④「安全性を確保する技術の開発」および⑤「掘削影響の修復・軽減技術の開発」の5項目に分類して進めている。これまでは、「第2段階」の調査研究として、研究坑道掘削工事で取得される計測データや施工データを用いた評価に基づく設計の妥当性についての検討などを中心に進められてきた。

本業務では、建設の結果発生する掘削影響の修復・軽減技術の開発の一環として、瑞浪超深地層研究所深度500mレベル研究アクセス北坑道の冠水坑道に設置が予定されている止水壁とその周辺岩盤を対象として、以下に示す研究を行った。

- (1) 文献調査
- (2) 止水壁の検討
- (3) 止水壁周辺の岩盤挙動評価

本業務は、第3段階の「研究坑道を利用した研究段階」において実施される再冠水試験で、湧水を貯留するための止水壁設置にむけた設計ならびに事前検討が目的である。

本業務では、止水壁が満足すべき機能および性能を達成するための構造、材料等の決定、研究開発課題の提案、再冠水試験における岩盤挙動評価解析の課題抽出を行った。

2. 研究の概要

2.1 研究の範囲

下記の範囲についての研究を実施した。

- (1) 文献調査
- (2) 止水壁の検討
- (3) 止水壁周辺の岩盤挙動評価

2.2 研究工程

表 2.2-1 の工程に従い研究を実施した。

表 2.2-1 研究工程

検討項目 担当者	平成 25 年				平成 26 年
	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月
1.実施計画の策定	▼着手 ■			▼中間報告	報告会▼
2.文献調査	■	■			
3.止水壁の検討			▼掘削形状決定	■	
4.止水壁周辺の岩盤挙動評価				■	
5.報告書作成				■ ドラフト▼	■ 納期▼

2.3 研究内容

瑞浪超深地層研究所においては、深度 300m レベルから第 3 段階「研究坑道を利用した研究段階」を開始している。さらに掘削をすすめ、深度 500m レベルに水平坑道を掘削した。深度 500m レベル研究アクセス北坑道では、冠水坑道が掘削され、坑道閉鎖に関わる地質環境調査技術、工学技術開発の一環として再冠水試験が行われる予定である。再冠水試験の実施にあたっては、冠水坑道の入口に止水壁を設置し、冠水坑道が地下水で冠水される際の周辺岩盤挙動が観測・計測される。この止水壁は、冠水が可能となる機能が求められる。また、将来の研究坑道の閉鎖時に設置されることが想定されるとともに、高レベル放射性廃棄物の地層処分場におけるプラグに類する役割を担うこととなる。このような観点を踏まえて、以下の項目についての検討を行うことで、平成 26 年度に予定されている止水壁設置のための設計ならびに事前検討に位置づける。

2.3.1 文献調査

止水壁に関する国内外の文献調査を実施し、求められる性能、用途や種類、および基準や実績などについて整理し、瑞浪超深地層研究所において設置される止水壁で考慮すべき事項を取りまとめた。

2.3.2 止水壁の検討

深度 500m レベル研究アクセス北坑道の掘削に先立って実施された先行ボーリング調査（12MI33 号孔）の結果や研究アクセス北坑道の掘削状況，坑道周辺岩盤や地下水の状況を前提として止水壁の検討を行った。検討にあたっては，2.3.1 の文献調査の結果を考慮するとともに，再冠水試験を実施するにあたって止水壁に求められる機能を満足させることを最優先とし，現場の状況を踏まえた複数のオプションを検討した。具体的には，止水壁本体の材料選定および必要な構造計算や数値解析等を行った。止水壁には図 2.3-1 のような配管や人員の出入りのための通路を設置することとした。具体的要求事項については，本研究と並行で検討されている事項と調整を行いつつ検討を進めた。止水壁を設置する周辺岩盤は，坑道掘削時に損傷を受けている可能性があるとともに，吹付コンクリートや止水壁岩盤の接触面などが水みちとなる可能性がある。このため，コンタクトグラウト等を実施し岩盤の透水係数を低減させる処置を考慮する必要があることから，その設計および施工等について検討を行い，実施計画として取りまとめた。さらに，今後の研究開発課題を抽出し，必要な調査，試験および解析の計画を立案した。

水質・水圧観測用配管レイアウト

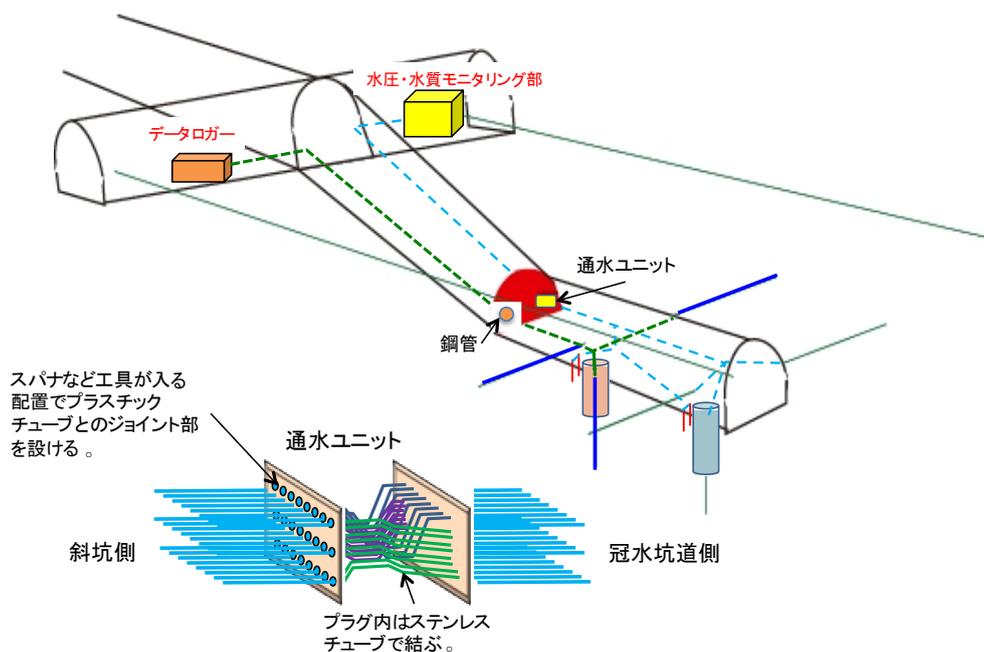


図 2.3-1 水質・水圧観測用配管レイアウト（JAEA 計画案）

2.3.3 止水壁周辺の岩盤挙動評価

冠水坑道の復水とそれに伴う地下水圧の上昇によって，止水壁や周辺岩盤が熱，水，応力および化学的連成的な影響を受けることとなる。ここでは，2.3.1 および 2.3.2 の検討結果を踏まえて，今後，止水壁周辺の岩盤挙動評価を行う上での課題について検討した。

3. 文献調査

3.1 実施方針

止水壁に関する国内外の文献調査を実施して、求められる性能、用途や種類及び基準や実績などについて整理し、瑞浪超深地層研究所において設置される止水壁で考慮すべき事項を取りまとめた。

調査対象は公開文献を原則とし、特に止水壁の検討に資する内容を重点的に整理した。

3.2 文献調査の実施および調査情報の整理

調査対象の分野は次のとおりとした。

- ・放射性廃棄物処分（研究）分野におけるプラグの設計，試験
- ・エネルギー貯蔵分野におけるプラグの設計，試験，建設
- ・放射性廃棄物処分施設に適したセメント系材料（低アルカリ）の検討，試験

以上から、以下の施設、実験及びプロジェクトを文献調査の対象候補として、瑞浪超深地層研究所の止水壁で考慮すべき事項を取りまとめた。

国内

- ・次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発プロジェクト（ANGAS）
- ・波方における国家石油ガス備蓄基地

海外

- ・DOPAS project（Full-scale Demonstration Of Plugs And Seals）
- ・SKBにおけるプラグの設計要件（4.1 再冠水試験の止水壁に求められる機能の検討にて記述）
- ・AECL（カナダ原子力公社）におけるTSX（Tunnel Sealing Experiment）

3.2.1 次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発プロジェクト（ANGAS）

(1) 基本情報

ANGASの計画諸元は、以下のとおりである。

- ・貯蔵流体（加圧流体）：空気及び水（実プロジェクトでは天然ガスの計画）
- ・貯蔵圧力：20MPa
- ・貯蔵容積：240m³

ANGASは、社団法人日本ガス協会により、将来の全国天然ガスネットワーク構築時のローカルバッファとして計画されている岩盤貯蔵施設に関する実証試験として、岐阜県神岡鉱山内の空洞にて実施された。図 3.2-1 に実証試験貯槽の基本構造を示す¹⁾。

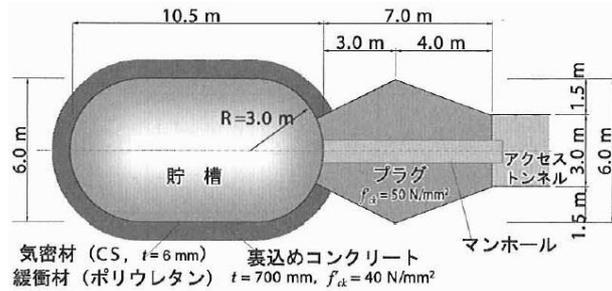


図 3.2-1 実証試験貯槽の基本構造¹⁾

(2) プラグ部の掘削施工

穿孔時は、ジャンボの穿孔角度を計算し、スラント定規などを用いて掘削している。口切部においては、吹付けコンクリートにて厚吹きを行いジャンボの口先が同じ角度になるように測量したうえで穿孔している¹⁾。

(3) 計測機器の設置

貯槽・プラグ・マンホールの構造的検証および水密性・気密性の確認を行うため、主要構造部（岩盤・裏込めコンクリート・気密材・プラグ・マンホールなど）に各計測機器を配置し計測している。地中内に設置する岩盤変位計や間隙水圧計に加えて、貯蔵内外のひずみ挙動を把握するため光ファイバセンサによるひずみ計測を行っている（図 3.2-2）。全ての計器からの計測用ケーブルは坑内の計測室まで配線し測定を行うとともに、1,600m 離れた地上事務所においても、坑内計測室の計測用パソコンモニターと同一画面を表示できるモニターを設置し、試験・計測状況を確認した後に入坑できるようにしている¹⁾。

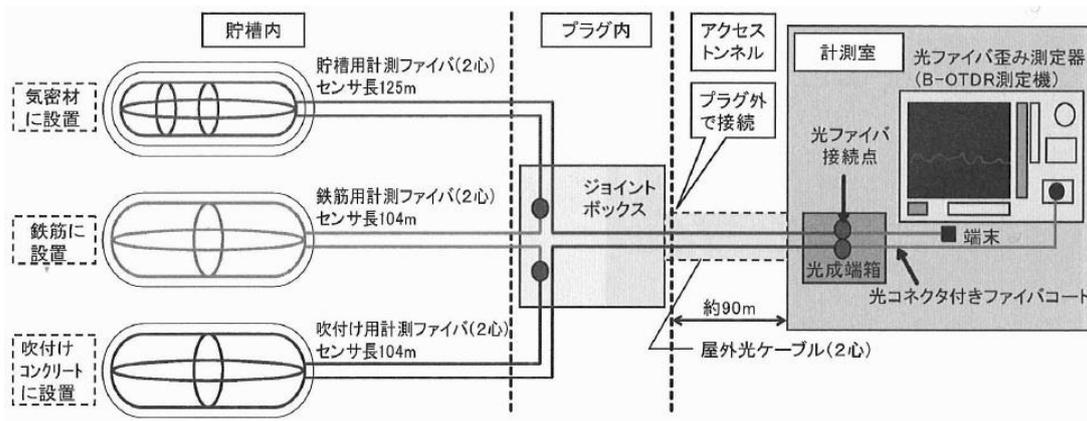


図 3.2-2 光ファイバの設置概念¹⁾

(4) プラグの施工

マンホール（総重量約 12t, L=8m）を据付け後、プラグ鉄筋の施工、坑口部の型枠を組み立てている。鉄筋の配筋時には、プラグコンクリート（総容量：約 120m³, 設計基準強度：59N/mm²）を打設するための配管設置も同時に行い、計測機器・ケーブルの設置などもあったため、複雑を極めたとされている。プラグ鉄筋の組み立て方法が図 3.2-3 のように示されている¹⁾。プラグ部

の鉄筋数量は、総重量が 14.29t で単位体積あたり 125kg/m³ と比較的高密度とされている。

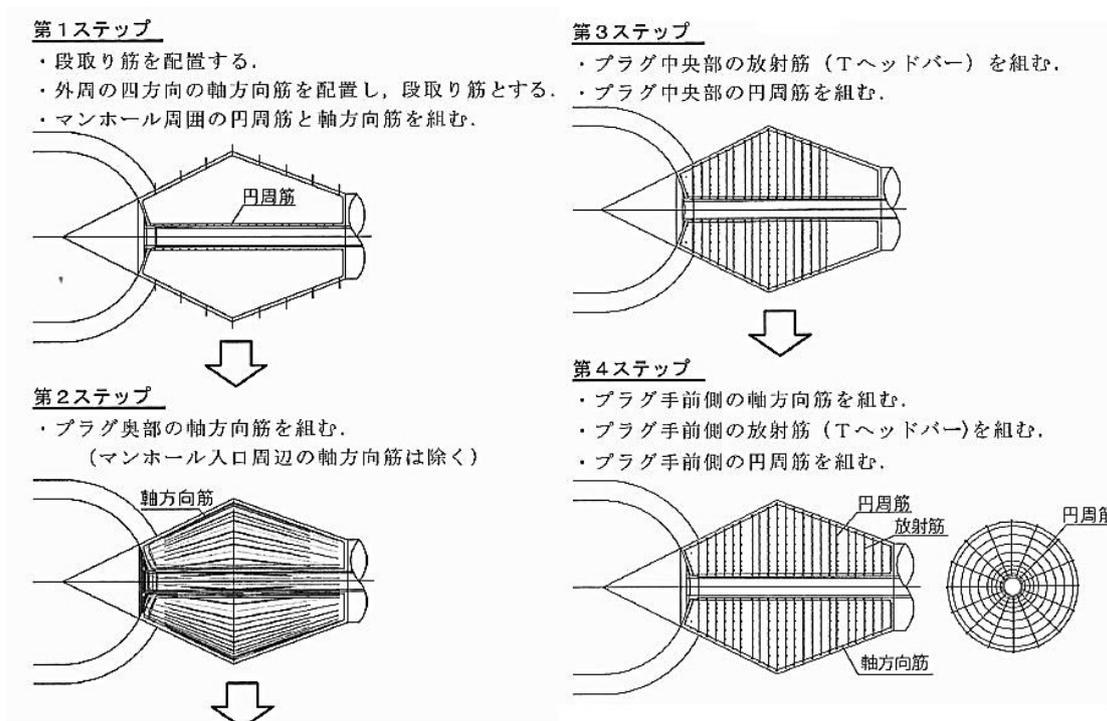


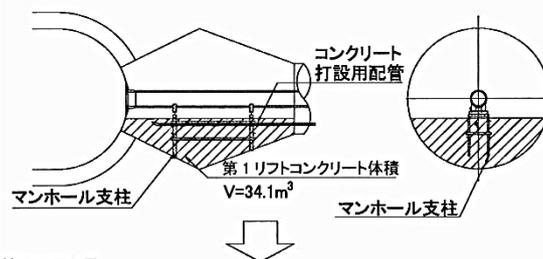
図 3.2-3 プラグ鉄筋の組み立て方法¹⁾

(5) プラグコンクリートの施工

プラグコンクリートは、本来一体打ちが望ましいが、サイト上の制約すなわちコンクリート打設量が 1 日あたり最大 40m³ 程度であることから 4 回に分けて打設している。プラグコンクリート打設にあたっては、最終打設となる 4 回目は、頂部への充填を確認するために、光センサによるコンクリート充填感知センサを設置して打設している。プラグコンクリートの打設方法は図 3.2-4 のとおりとしている¹⁾。

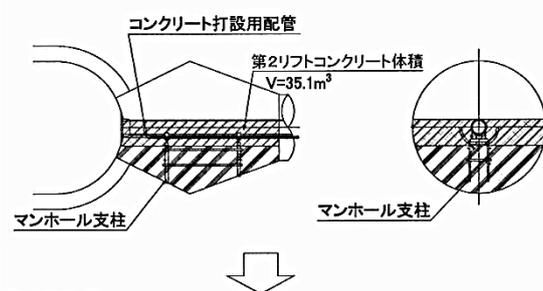
第1リフト目

- ・プラグ底部から高流動コンクリートを打設する。
- ・充填性をより確実にすることを図り、吹き上げ方式とする。



第2リフト目
第3リフト目

- ・気密材内部に貯槽変形防止用の水をためる。
- ・水深は、満水と同じ効果の5.2mとする。
(第2リフト～第4リフトとも)



第4リフト目

- ・プラグセンター中央に配置した配管からコンクリートを打設する。
- ・天端部の充填性は、天頂に設置したセンサにて確認する。

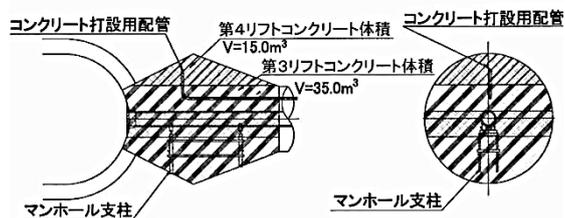


図 3.2-4 プラグコンクリートの打ち込み方法¹⁾

3.2.2 波方における国家石油ガス備蓄基地

本貯蔵基地は、ブタン、プロパンガスの国家備蓄を目的に、地下に大空洞型の水封式岩盤貯槽を設置したものである。地下の貯槽は、幅 26m、高さ 30m、長さ 485m×2 列で構成されている(図 3.2-5 参照)²⁾。コンクリート製のプラグは、貯槽と作業トンネル、水封トンネル及び配管堅坑との間に設置される³⁾。

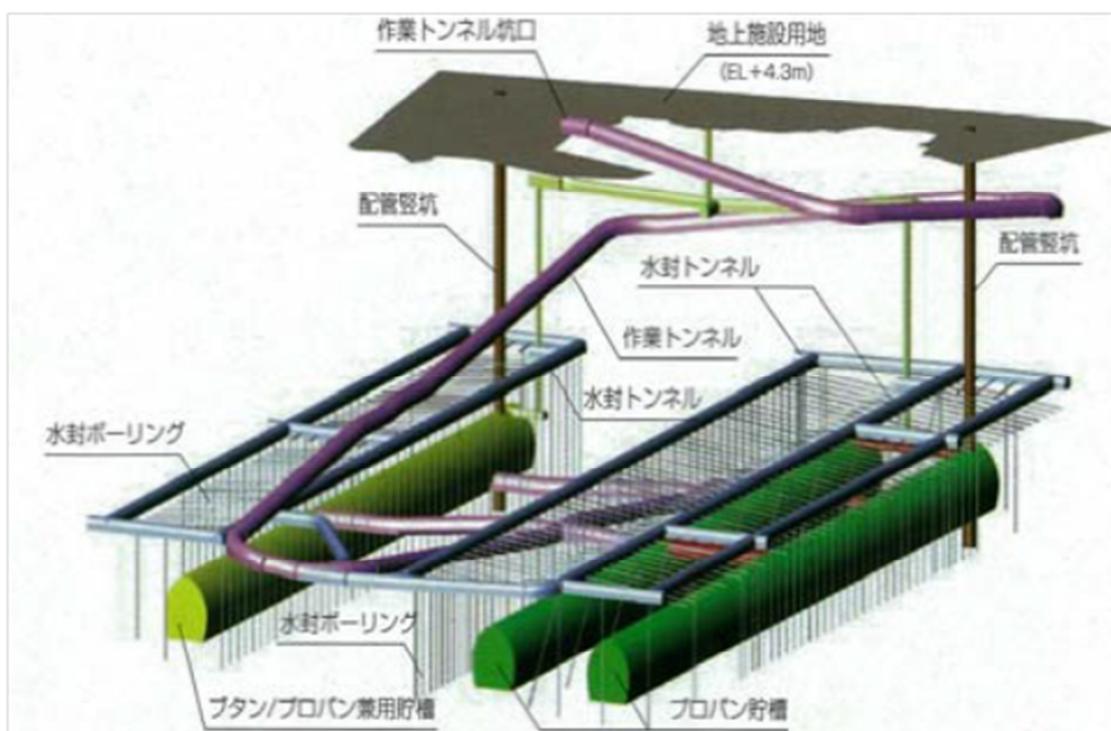


図 3.2-5 貯蔵施設全体図²⁾

(1) 気密試験

模擬空洞を用いて、事前に気密試験が実施されており、本調査の参考となることから、調査・整理した。気密試験のための調査坑の断面は、幅 3m、高さ 3.4m の馬蹄形であり、気密試験のレイアウトは、図 3.2-6 に示すとおりである⁴⁾。調査横坑の先端 16m を気室とし、順に、気室を隔離する No.1 コンクリートプラグ (厚さ 3.6m)、水室 (延長 7m)、No.2 コンクリートプラグ (厚さ 3.6m)、坑道区間 (延長 10m) 及び計測室が設けられている。計測には、プラグコンクリート内の計測機器を除く、表 3.2-1 に示すような計測機器が用いられている⁴⁾。また、気室内の体積は、3次元レーザースキャナーにより、測定精度 1.5mm、10mm 間隔で形状測定が行われている。

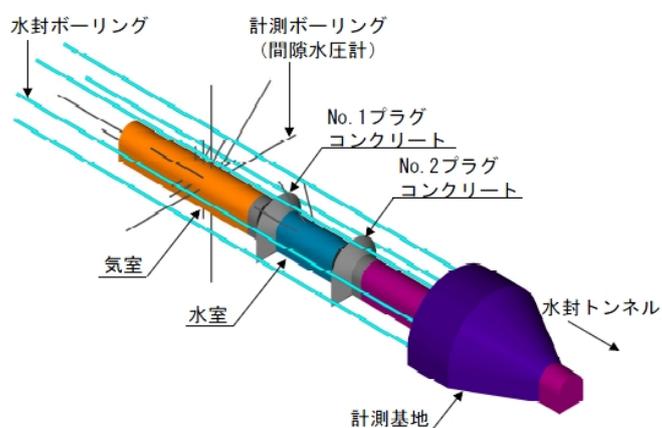


図 3.2-6 気密試験のレイアウト⁴⁾

表 3.2-1 計測機器一覧⁴⁾

設置箇所	計器名	仕様			数量	計測方式
		測定範囲	精度	分解能		
計測ボーリング	間隙水圧計	0~2.0MPa	±0.1%(±2kPa)	0.01%(0.2kPa)	27	拡散型半導体
	AEセンサー	5~200kHz	60db	—	12	圧電素子
気室内	温度計	-80~200℃	±0.01℃	0.001℃	23	サーミスタ
	湿度計	0~100%RH	±1.8%RH	0.05%FS	1	静電容量式
	水位計	0~1000mm	±0.01%(±0.1mm)	0.01%(0.1mm)	1	磁歪式
計測基地	大気圧計	50~1300hPa	±60Pa	10Pa	1	シリコンダイアフラム
	圧力計(気室)	0~1.38MPa	±110Pa(±0.008%)	1.38Pa	1	水晶発信式
	温度計(送気温度)	-80~200℃	±0.01℃	0.001℃	1	サーミスタ
	流量計(送気流量)	0~1500L/分	75L/分	5L/分	1	
	圧力計(送気圧力)	0~2.0MPa	±0.1%(±2kPa)	0.01%(0.2kPa)	1	拡散型半導体
	流量計(排水量)	0.5~10L/分	0.15L/分	30mL/分	1	タービン流量計
		0.1~2.5L/分	0.0375L/分	0.05mL/分	1	
	圧力計(水室水圧)	0~1.5MPa	±0.2%	0.02%	1	ひずみゲージタイプ
	流量計(水封 Bor)	—	—	1L	6	水道メータ(積算型)
	圧力計(水封 Bor)	0~2.0MPa	±0.5%	0.05%	6	ひずみゲージタイプ
	溶存ガス発泡量	0~2L	0.02L	0.02L	1	メスシリンダー
	溶存ガス圧計	±750mmHg	1mmHg	1mmHg	1	膜浸透圧型

(2) コンクリートの配合選定

温度ひび割れの防止や収縮を低減するため、配管堅坑プラグのセメントには低熱ポルトランドセメントを使用し、膨張材を併用したとしている。プラグコンクリートに求められる要求品質は表 3.2-2、コンクリートに使用した材料は表 3.2-3、配合の詳細は表 3.2-4 のとおりとしている⁵⁾。

表 3.2-2 コンクリートの目標品質⁵⁾

項目	目標品質
自己充填性のレベル	ランク 1 (U 型容器, 障害 R1)
スランプフロー	70±5 cm
空気量	4.5±1.5 %
塩化イオン濃度	0.3 kg/m ³ 以下
圧縮強度	設計基準強度 21 N/mm ² 以上 (材齢 28 日)

表 3.2-3 使用材料⁵⁾

種類	記号	材料	品質・主成分
水	W	地下水	JIS A 5308 付属書 C 適合品
セメント	C	低熱ポルトランドセメント	密度 3.22 g/cm ³
混和材	EX	膨張材(石灰系)	密度 3.22 g/cm ³
	LP	石灰石微粉末	密度 3.22 g/cm ³
細骨材	S	S1 高炉スラグ砕砂	表乾燥密度 2.78 g/cm ³ , 粗粒率 2.50
		S2 砕砂	表乾燥密度 2.67 g/cm ³ , 粗粒率 2.55
		S3 山砂	表乾燥密度 2.53 g/cm ³ , 粗粒率 2.60
粗骨材	G	G1 砕石 1305	表乾燥密度 2.73 g/cm ³ , 粗粒率 6.20
		G2 砕石 2013	表乾燥密度 2.73 g/cm ³ , 粗粒率 7.00
混和剤	VM	分離低減材	多糖類ポリマー系
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

表 3.2-4 コンクリートの配合⁵⁾

水結合 材比 (%) W/B	細骨 材率 (%) s/a	単体量 (kg/m ³)									分離低 減材 (kg/m ³) VM	高性能 AE 減水剤 (kg/m ³) SP
		水 W	セメ ント C	膨張 材 EX	石灰石 微粉末 LP	細骨材			粗骨材			
						S1	S2	S3	G1	G2		
55.0	51.5	175	303	15	282	165	436	188	612	153	0.3	6.00

3.2.3 DOPAS プロジェクト

DOPAS プロジェクトはヨーロッパの 8 カ国より 14 機関（地層処分実施主体および研究機関）が参画するプラグおよびシールシステムを試験するための技術開発プロジェクトである。プロジェクトは原位置試験・室内試験・性能評価研究より構成され、2012 年 9 月～2016 年 8 月の期間において Posiva のコーディネートのもとで実施されている⁶⁾。

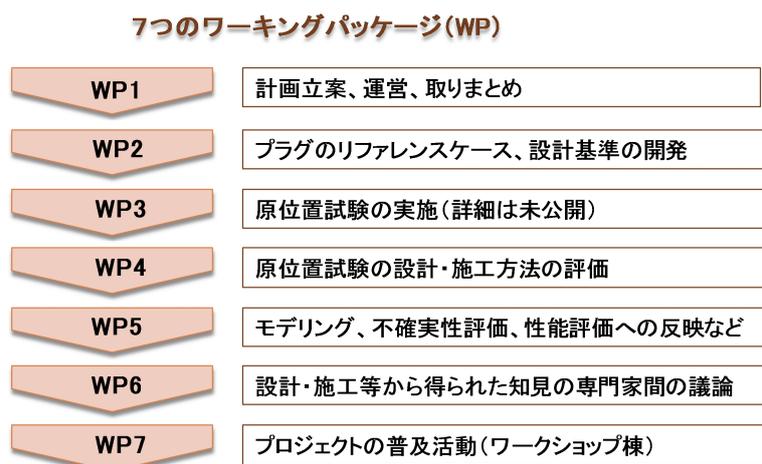
DOPAS は以下の項目に関する妥当性および一貫性を向上させることを目的としている。

- ・プラグおよびシールの工業的実現可能性
- ・プラグおよびシールの特性計測
- ・処分場環境下における長期間の挙動制御
- ・安全目標に対して許容され得る水理学的性能

そのためプロジェクトにおいては設計基準、リファレンス設計およびリファレンス設計の設計基準に対する整合性の検証手法について取り組んでいる。

(1) プロジェクトの構成

DOPAS プロジェクトは、図 3.2-7 に示すように 7 つの WP (Work Package) により構成されている⁶⁾。



※ 参考文献⁶⁾を基に作成

図 3.2-7 DOPAS におけるワークパッケージの構成

(2) 原位置試験の実施

DOMPLU (Dome Plug Experiment) は、DOPAS プロジェクトにおけるフルスケール処分トンネルのエンドプラグでの実証試験 (場所: エスポ岩盤研究所, -400m) である (図 3.2-8 参照)。プラグ実証試験の特徴は以下のとおりであり、本冠水試験用止水壁に参考となると思われる⁷⁾。

- ・低アルカリセメントを使用 (無筋コンクリート)。
- ・アーチ型 (アーチダムと似たような考え方で、プラグ表面の引張破壊する領域をあらかじめ取り除いている) にすることにより、水圧の岩盤側への負担による構造強化及びセメントの最小化を実現。
- ・低アルカリセメントの欠点 (低強度, 高収縮) を克服。
- ・冷却システム (プラグにセメント硬化時の温度をコントロールできるような管などを設置している) を利用することにより、数か月かけてゆっくりと硬化させる。
- ・硬化後、岩盤をプラグの境界に生じる隙間をグラウトで充填。
- ・設計上は深度 3000m~4000m の静水圧に耐える。
- ・本試験で 4 回目 (HRL の模擬試験等で実績あり) の施工。過去の経験に基づき改良をつみかさねている。
- ・改良例; フィルターを設置することにより、浸出水をコントロールしている (浸出水が施工に悪影響を及ぼしていたようである)。
- ・約 100 個のセンサで計測を実施 (変位, 応力, 圧力等のセンサをプラグ, ベントナイト, 岩盤等に設置)。

Valvplugg - Dome plug (DOMPLU)

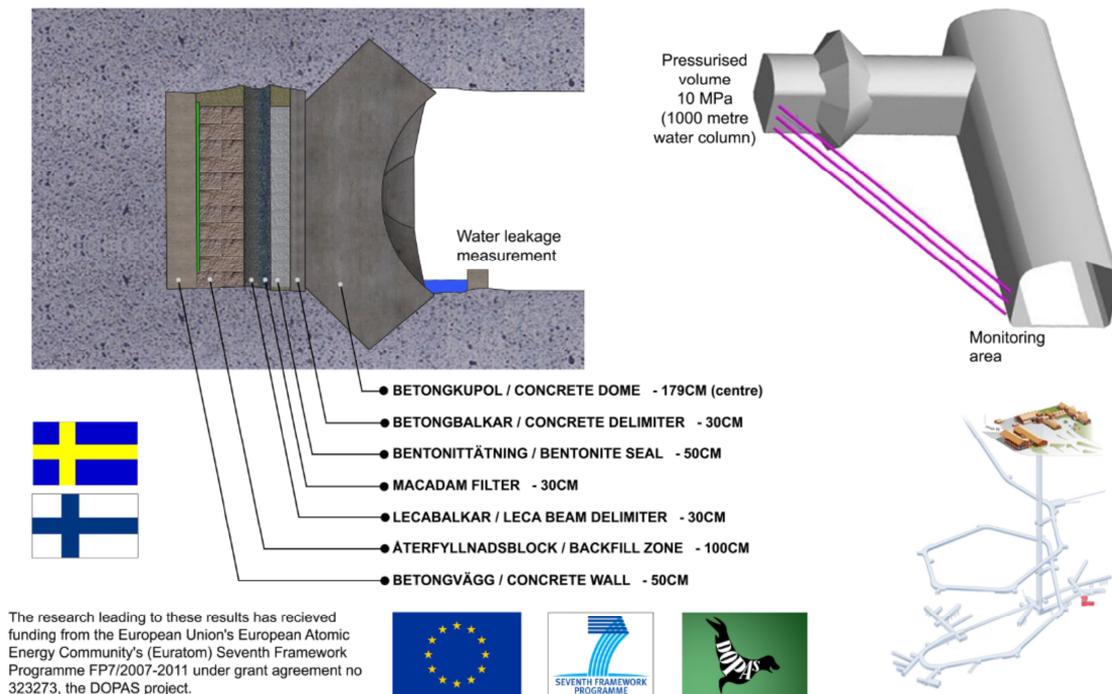


図 3.2-8 DOMPLU の概要⁷⁾

3.2.4 AECL における TSX (Tunnel Sealing Experiment)

TSX 試験では、図 3.2-9 のように試験坑道に粘土プラグとコンクリートプラグの 2 種類のプラグを実スケールで施工している⁸⁾。

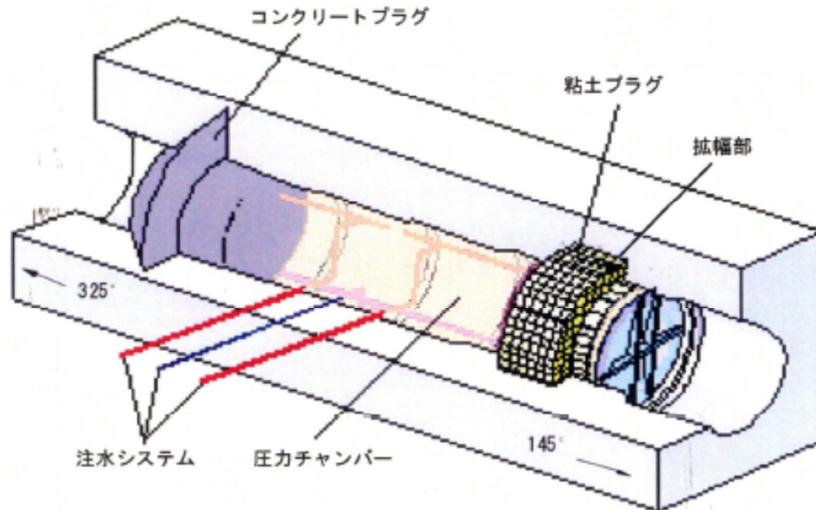


図 3.2-9 TSX 試験のレイアウト⁸⁾

(1) プラグ設計の要件

設計の考え方が図 3.2-10 のように示されている。また、コンクリートプラグには、以下のよう な機能を求めている⁸⁾。

- ・ プラグそのものが遮水性を発揮する。
- ・ プラグは岩盤に密着し、プラグと岩盤との境界部に関しても遮水性を確保する。
- ・ 高圧力作用下でも力学的、水理学的健全性を維持する。

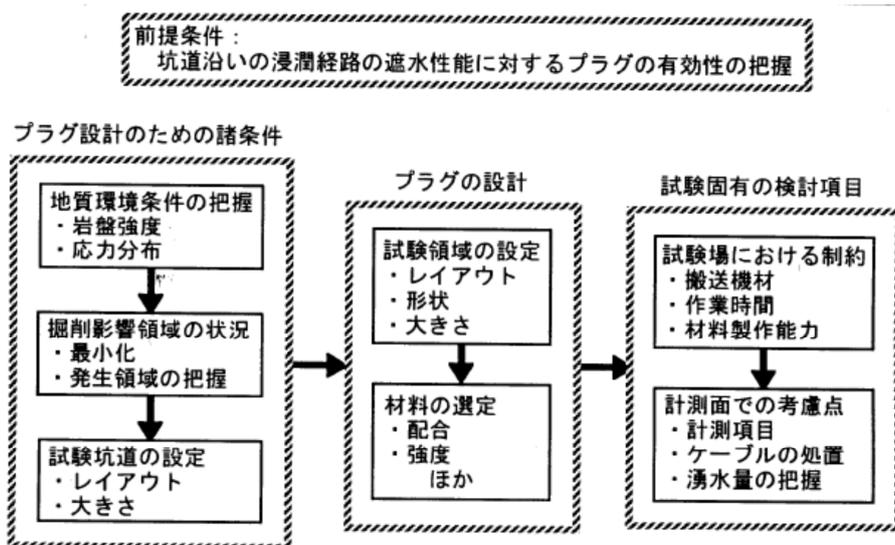


図 3.2-10 プラグ設計の考え方⁸⁾

(2) プラグの設計

コンクリートプラグ及び粘土プラグに共通する設計思想は以下のとおりとしている⁸⁾。

- ・掘削影響領域の発生を極力抑制するように制御発破工法により試験坑道を掘削すること
- ・そこに圧力に耐えうるプラグを現状の工学技術によって施工すること
- ・このとき坑道沿いに連続して発生する掘削影響領域はプラグ設置のための切り欠きによって、その連続性を分断すること

(3) コンクリートプラグの設計

初めにコンクリート材料を設定し（表 3.2-5 参照）⁸⁾、次に基本物性の評価、変形解析を実施している。岩盤が十分に堅固であることから、プラグそのものの強度が耐圧設計されていれば試験条件に十分耐えられる、という考えに基づき本試験のプラグは切り欠きで固定するとしている。

表 3.2-5 コンクリートの配合（LHHPC：低発熱高流動コンクリート）⁸⁾

コンクリート	配合(kg/m ³)		
	LHHPC	SHPC	PFAC
セメント	97 (CSA Type 50)	497 (CSA Type 50)	194 (CSA Type 10)
シリカフェーム	97	49.7	-
フライアッシュ	-	-	194
シリカフラワー	194	-	-
高性能減水剤	10.3	7.1	1.5
細骨材	895	703	895
粗骨材	1040	1100	1040
水	97	124	128
水・結合材比 [※]	0.50	0.23	0.33
※ 単位は無次元			

(4) コンクリートプラグ設計のための検討事項

コンクリート材料の設定，基本物性の評価，変形解析の結果からコンクリートプラグ設計のための検討事項を表 3.2-6 のようにまとめている⁸⁾。

表 3.2-6 コンクリートプラグ設計のための検討事項⁸⁾

検討項目	設計
低水和熱	熱の影響を軽減するためには発熱量の小さいコンクリートが望ましい。シリカフェーム、シリカフラワーの混入により発熱量を低減できる。 同時にpHも下げる効果がある。
強度	LHHPcは28日材齢で75MPaの強度となる。
ワーカビリティ	打設後に材料が分離したりせず（プラスチックシーを維持する）、作業の容易さ（運搬性、打込み性等）を備えている。
低透水性	高流動コンクリートは低透水性であるが、微細なシリカを用いることで効果（より低透水性）を向上できる。
低収縮性	LHHPcは乾燥収縮量が大きいことから、打設直後は湿潤状態に置くことが望ましい。
岩盤－プラグ接触部のシール性	接触部のすき間充填対策として、ベントナイトストリップスやグラウトの施工を考慮しておく必要がある。
無ジョイント	プラグを一体とするため、コンクリート打設は一度に行う。打設システムは予備も含めて連続供給できるように準備しておく。

3.3 瑞浪超深地層研究所における止水壁で考慮すべき事項

文献調査を通じて得られたコンクリートプラグの設計の基本的考え方を抽出し、止水壁の検討方針としての採用可否と方法について整理したものを表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 文献事例の止水壁検討への反映 (1/2)

事例	内容	瑞浪止水壁への反映方法
ANGAS (高圧ガス貯蔵)	<p>①延長方向に長い形状。</p> <p>②貯槽側もアクセス側の 75%の長さを確保。</p> <p>③坑道径3mに対してプラグ外径6m, 延長7mと大型。</p> <p>④中央にマンホールを有する。</p>	<p>①荷重支持で必要な長さとするが、坑道延長の制約などから、できるだけ短い長さを実現する。水密性はメンブレンとは別の方法で確保する。</p> <p>②冠水の「満一空」の繰り返しがあることから、冠水側についても坑道側とほぼ同様の接触・支持面積を確保して、除荷時の過剰な変位を予防する。</p> <p>③荷重は5.1 MPaと小さく、岩盤強度も高いことから、小型とすることが可能。</p> <p>④同様の試験用マンホールを設ける。非対称構造物であるので、位置は応力状況と利便性を考え併せて設定する。</p>
波方ガス国家備蓄	<p>①そろばんの珠型形状。</p> <p>②貯槽側・坑道側ほぼ同じ長さを確保。</p> <p>③躯体のひび割れ抑制, コンタクトグラウトなどで気密性を確保。</p>	<p>①長さの考え方は岩盤の支持強度で決定するが、コンクリート体積をできるだけ減らすよう工夫する。</p> <p>②戻りの変位抑制が必要なのは同様。自重が変位の均等性に寄与しないため、不均等な「戻り」が生じる危険性があり、再冠水時の変位挙動に注意を要する。</p> <p>③緩み域は深部まで到達していない事が予想されるため、カーテングラウトは不要である可能性がある。その他については同じ原則で設計する。</p>

表 3.3-1 文献事例の止水壁検討への反映 (2/2)

事例	内容	瑞浪止水壁への反映方法
DOMPLU	<p>①坑道側面アーチ型，構造厚は比較的薄い。</p> <p>②埋戻し側・坑道側ほぼ同じ長さを確保（埋戻し側の径が小さいため，少し長くなっている）。</p> <p>③止水は，埋戻し側のベントナイトブロックおよびプラグ凸部のベントナイトにより確保。</p>	<p>①岩盤強度が大きいことから，同様の考え方を採用し，コンクリート量と鉄筋量の低減を図る。</p> <p>②試験体系が異なるため，このような事象は考慮しないが，「戻り」を考える必要性としては同様である。</p> <p>③冠水試験を実施するための止水壁，という目的と冠水と排水を繰り返すことからベントナイトの流失も予想されるため，ここではベントナイトによる止水は採用しない。</p>
AECLにおけるTSX	<p>①そろばんの珠型形状。埋戻しは無く水圧のみ作用。</p> <p>②ベントナイトプラグも試験されているが，コンクリートプラグにも止水性を期待している。</p>	<p>①長さの考え方は岩盤の支持強度で決定するが，コンクリート体積をできるだけ減らすよう工夫する。</p> <p>②低透水性を実現するための，コンクリート材料・配合の選定を参考とする。</p>

4. 止水壁の検討

深度 500m 研究アクセス北坑道の掘削に先立って実施された先行ボーリング調査（12MI33 号孔）の結果や研究アクセス北坑道の掘削状況、坑道周辺岩盤や地下水の状況を前提として、文献調査の成果を反映しつつ、止水壁の検討を行った。具体的には、岩盤調査結果と設計水圧の情報をもとに、瑞浪超深地層研究所に適した止水壁の構造を提案し、提案した止水壁構造に対して性能照査型設計を適用するとともに、構造並びに設計法についても合理性の追求を行った。これにより、処分場の閉鎖技術に係わる設計法や構造形式についての一例を示すことができた。

4.1 再冠水試験の止水壁に求められる機能の検討

(1) 止水壁に求められる機能

本止水壁は、水圧を支持する力学的機能は当然であるが、冠水試験目的に応じた水密性も要求される。そのような観点からは、止水壁本体及び岩盤との境界の止水性への要求をどのように設定するか、それに対して設計的にどのように対処するかが重要な要件となる。表 4.1-1～表 4.1-3 に SKB が設定した各段階における設計要件を示す⁹⁾。本検討でもこのように止水壁として求められる設計要件を明確にして設計を行うものとする。

表 4.1-1 施工中に求められる要件 (SKB) ⁹⁾

要求される機能・特性	設計される特性およびパラメータ	設計要件
・高い信頼性を持ってプラグの施工が可能であること	・コンクリートの温度・粘弾性・収縮特性が若齢時において内部クラックを発生させないこと	・コンクリートの水和反応による熱膨張に起因する引張応力
	・プラグの強度発現までの間、高い水圧に曝されないようフィルター材料が機能すること	・排水される水の体積および流入量

表 4.1-2 止水性として求められる要件 (SKB) ⁹⁾

要求される機能・特性	設計される特性およびパラメータ	設計要件
メイン坑道が埋め戻されるまでの間、処分場深度における静水圧および(背面の)埋戻材の膨潤圧に耐えること	・コンクリート強度 ・コンクリート配合 ・補強材(鉄筋他) ・埋戻材の最大膨潤圧 ・埋戻領域の長さおよび材料の密度	・5MPaの水圧と埋戻材の膨潤圧の和 ・コンクリートプラグの強度および負荷
メイン坑道が埋め戻され、冠水するまでの間、水の流れを制限すること	・プラグ自身の水密性 ・水密シール;材料構成および導入密度 ・プラグ境界における特性(プラグ・母岩・グラウト)	・プラグを通過する水の許容量 →この量は処分坑道からのベントナイト流出許容量に依存する(今後決まる)。
メイン坑道が埋め戻され、冠水するまでの間、上記の機能を維持すること	・プラグの変形特性およびプラグー母岩間の接合 ・コンクリート配合 ・補強材(鉄筋他)	・5MPaの水圧と埋戻材の膨潤圧の和 ・プラグの変形が背面材料の密度減少および水密シールの連結性増加の観点で許容されること
	・プラグー母岩間の接合(水みちを生じないこと)	・プラグを通過する水の許容量 →この量は処分坑道からのベントナイト流出許容量に依存する(今後決まる)。
	・コンクリート強度 ・コンクリート配合 ・補強材(鉄筋他) ・コンクリートプラグの耐久性	・廃棄体からの温度荷重が岩盤およびプラグの体積膨張を引き起こす。 →処分場環境下で予測される温度変化
	・コンクリート配合 ・補強材(鉄筋他) ・排水管 ・材料の腐食レベル	・処分場環境下で生じる湿度と地下水の組成
	・プラグおよび排水管の設計耐用年数	・100年

表 4.1-3 閉鎖後求められる要件 (SKB) ⁹⁾

要求される機能・特性	設計される特性およびパラメータ	設計要件
プラグが工学・天然バリアの機能を著しく阻害しないこと	プラグの体積および圧縮性	・体積変化(収縮)が埋戻材の密度低下を招かないこと
	コンクリートの構成材料	・低アルカリコンクリートを用いること(漏出液のpH≦11) ・有機材料の使用量が制限されていること(高性能減水剤以外の有機材料を使用しない)

その他、上記影響事項から予想されるものとしては、構造体としての安定性、止水壁内外のアクセス性、設計応力の裕度、許容変位および通水ユニットからの要求事項、などがあげられる。なお、地層処分における閉鎖技術の一つとしての実証試験も担うことも考えられる。

(2) その他止水壁で考慮すべき事項

要求機能以外で、止水壁検討において考慮すべき事項を整理する。主なものとしては、施工面からの制約(コンクリート打設、グラウト注入、重量物の運搬、仮設設備等)、地下環境からの制約(温度、湿度、湧水等)、表面仕上げ、建設コスト低減、などが想定される。

それぞれについて整理したものを表 4.1-4 に示す。

表 4.1-4 その他考慮すべき事項 (1/2)

考慮事項	内容	対処方針
コンクリート打設	<ul style="list-style-type: none"> ・キブルによる運搬、立坑底部からのポンプによる圧送打設となる。 ・水密性を高めるために打継目をできるだけ創出しない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・極力コンクリート量を低減させるような設計を採用する。 ・コンクリートの流動性が十分維持されるような配合とする。 ・連続打設が可能な製造、運搬計画とする。
コンクリート製造	<ul style="list-style-type: none"> ・プラント設備の制約あるいは運搬距離が長くなることによる流動性低下等により配合および使用材料に制約を受ける懸念がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・プラントの制約を予想して、複数の配合を検討する。 ・外部プラントでの製造の場合、運搬距離が決定した時点で、これを考慮した閉合への調整を行う。
グラウト注入(止水策)	<ul style="list-style-type: none"> ・水圧が作用している箇所への注入では、十分な注入量が確保できない懸念がある。 ・漏水箇所が試験毎に変わる可能性がある。 ・吹付コンクリートと岩盤との間に空隙が形成されている可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・十分な注入圧を確保するとともに、適切な注入のタイミングを検討する。 ・注入作業が2段階で実施できるように計画する。 ・空隙を事前に調査し、検出された箇所については、止水壁コンクリート打設前に、吹付コンクリートを除去することを計画しておく。
重量物の運搬・据付	<ul style="list-style-type: none"> ・狭隘な坑道での重量物の運搬となるので、最大重量や運搬動線に制約を受ける可能性がある。 ・マンホール等の支持固定鋼材は、コンクリートの充填性を阻害する危険性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・マンホール等の重量物の重量をできるだけ抑制できるような設計とする。 ・重量物は、できるだけ坑道中央に据え付けられるような計画とする。 ・支持固定用鋼材の断面形状と配置がコンクリートの従選定を阻害しないように計画する。

表 4.1-4 その他考慮すべき事項 (2/2)

考慮事項	内容	対処方針
型枠	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特殊な形状となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ (施工計画) 型枠の加工ピース, 組み合わせ等を工夫して, 現場での取り扱いをできるだけ容易にする。
鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高密度配筋は, コンクリートの充填性に支障し, 止水性能を低下させる危険性がある。 ・ 太径鉄筋は狭隘な作業場所での運搬, 据付は望ましくない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ できるだけ鉄筋量の少ない設計とする。 ・ できるだけ細径の鉄筋を使用する。
仮設設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ 狭隘な坑道内での設置となり, 型枠支保やコンクリート打設設備に制約を受ける可能性がある。特に冠水側の仮設は, 施工後はマンホールからの回収となるため, 部材の寸法に配慮が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大型の仮設機材を必要としない計画とする。
設置位置の環境	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度, 湿度に影響される工程は, それらを考慮して計画する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主にコンクリートとグラウトの流動性について, 環境条件影響を考慮する。
表面仕上げ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大きな制約は無いが, 止水性を向上させる対策を取ることも考えられる。 ・ 見栄えもよい方がのぞましい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 止水性を向上させる対策を取る。 ・ 坑道側は, 見栄えにも配慮する (亀裂の防止, 仕上げ)。
建設コスト低減	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1品生産であるが, 将来の止水壁建設コストの参考とされる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 必要性能を確保したうえで, できるだけコスト低減を図る。
貫通部材	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計測ケーブル等の貫通部材が止水および構造上の弱点となる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ケーブル等を集約して, 貫通部材の数を減らす。 ・ 貫通部材周辺の漏水対策を取る。

4.2 止水壁検討に必要となる原位置情報の収集整理

止水壁は、満水時の水圧を岩盤へ伝達して機能維持を図る構造が想定される。そのため、水圧を支持することができる岩盤の強度が要求される。ここでは、これまでに得られている止水壁設置位置あるいはその付近の岩盤力学データを収集・整理して、検討の条件を整備する。

止水壁設置原位置情報の収集対象は次のとおりとする。

- ・ MIZ-1 のボーリングデータ
- ・ 12MI33 号孔のボーリングデータ
- ・ 止水壁設置位置における岩盤掘削の状況

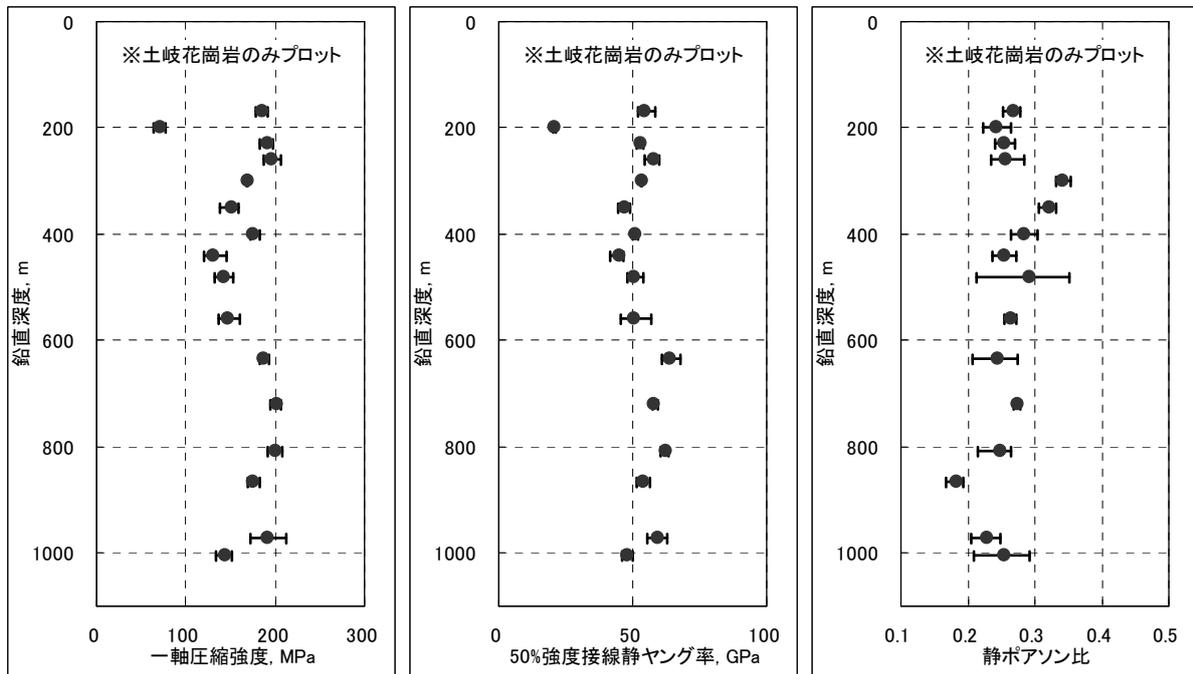
ボーリングデータより、当該位置岩盤はおおよそ健全であり、透水性も低い事が判明した。また、止水壁設置位置での切り欠き部掘削結果からも、当該位置岩盤の健全性が確認されている。

さらに、止水壁切り欠き部掘削形状を 3次元で測量し、掘削が適切に実施されたことの確認と、設計に使用する構造解析モデルの構造寸法条件を得た。

4.2.1 MIZ-1 のボーリングデータ

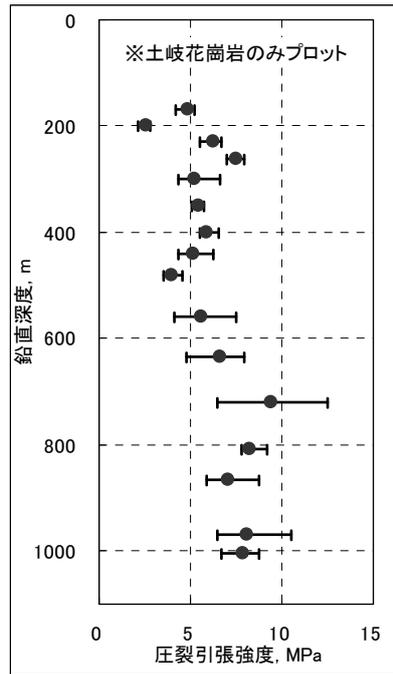
具体的には、原子力機構がこれまで実施したボーリングデータ（MIZ-1、H24 年度設置の水圧・水質観測孔）等が対象となる¹⁰⁾。

以下に MIZ-1 から取得した岩盤定数を（図 4.2-1～図 4.2-3、表 4.2-1）に示す。



※エラーバーは測定値の上限と下限を示す。

図 4.2-1 力学試験結果（一軸圧縮試験）¹⁰⁾



※エラーバーは測定値の上限と下限を示す。

図 4.2-2 室内力学試験の結果（圧裂引張試験）¹⁰⁾

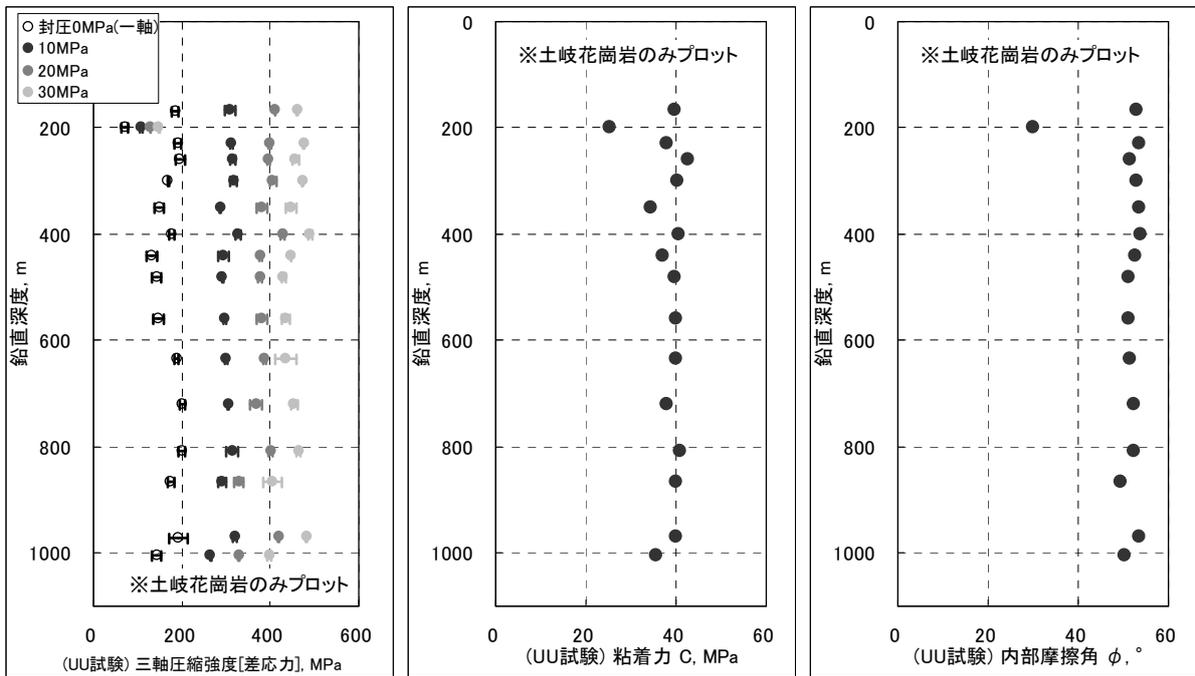


図 4.2-3 室内力学試験の結果（三軸圧縮試験）¹⁰⁾

表 4.2-1 室内力学試験の結果¹⁰⁾

室内物理試験の項目	MIZ-1号坑(今回調査) 鉛直深度167.5~1004.3m		正馬様用地の 土岐花崗岩 平均 ¹⁰⁾	国内における 花崗岩の平均 ¹⁰⁾
	測定値の 上限と下限	平均値		
一軸圧縮強度、MPa	63.7~212 (121~212)	166 (173)	168	136
50%強度接線静ヤング率、GPa	20.3~67.9 (41.6~67.9)	51.8 (53.9)	51	33
静ポアソン比	0.168~0.354 (0.168~0.354)	0.263 (0.265)	0.34	0.23
圧裂引張強度、MPa	2.12~12.5 (3.53~12.5)	6.24 (6.48)	7.6	8.0
(UU試験)粘着力 c 、MPa	25.2~42.6 (34.4~42.6)	38.2 (39.1)	34	21
(UU試験)内部摩擦角 ϕ 、°	30.1~53.8 (49.3~53.8)	50.8 (52.2)	55	52

※ 括弧内は花崗岩のうち鉛直深度199.5mの脆弱部データを除いて計算したもの

4.2.2 12MI33号孔のボーリングデータ

12MI33号孔は、深度500m研究アクセス北坑道(以下、500m北坑道)の掘削に先立ち、湧水や岩盤の性状に関する情報を取得し、坑道の掘削仕様等の検討・準備に資するため、105mの先行ボーリングを実施したものである。

(1) コア観察・RQD他

当孔は、そのほとんどが等粒状黒雲母花崗岩(中粒~粗粒)で構成されている。コアの例を図4.2-4に示す。



図 4.2-4 等粒状花崗岩の例(41~42mabh)

また、12MI33号孔のRQDの平均は89.1%、割れ目数の平均は3.3本/mであった。

(2) 水理試験結果

当該ボーリング孔にて実施された間隙水圧の測定結果をまとめたものを表4.2-2および表4.2-3に、透水試験結果を表4.2-4および表4.2-5に示す。全体として、水圧は静水圧より低く、想定荷重としての水圧は、静水圧相当の5MPaを採用すれば安全側となる。また、全体としての透水性は低く、透水係数の値はすべて 5.5×10^{-7} (m/sec)以下となった。したがってEDZあるいは隠れた透水性亀裂が無い限りは、水が止水壁を迂回して冠水側から坑道側へ流出する可能性は低いといえる。

表 4.2-2 各区間の間隙水圧の代表的な値 (PQ 区間)

試験区間	試験深度 (mabh)	測定時間 (h:mm)	間隙水圧記録時期	間隙水圧 (MPa)	換算水位 (GL m)	PSR 終了時の変化量 (m/hour)
No. 1	12.10~18.90	2:40	PW1 前	3.7294	-119.72	0.06
No. 2	37.10~42.56	9:20	PW1 前	4.0201	-90.08	0.004
No. 2'	20.10~36.10	6:30	DEF 前	3.8381	-108.64	0.39

表 4.2-3 各区間の間隙水圧の代表的な値 (HQ 区間)

試験区間	試験深度 (mabh)	測定時間 (h:mm)	間隙水圧記録時期	間隙水圧 (MPa)	換算水位 (GL m)	PW1 前の変化量 (m/hour)
No. 3	44.20~54.50	2:00	PW1 前	3.9837	-93.79	0.35
No. 4	53.20~63.50	45:00	PW1 前	3.9960	-92.54	0.05
No. 5	65.20~85.50	14:40	PW1 前	4.0001	-92.12	0.13
No. 6	105.20~107.00	2:00	PW1 前	4.0162	-90.48	0.05

表 4.2-4 透水試験結果一覧 (PQ 区間)

試験区間	上端深度 (m)	下端深度 (m)	区間長 (m)	湧水量 (L/min)	試験	透水量係数 (m ² /sec)	透水係数 (m/sec)	貯留係数 (-)	非貯留係数 (1/m)	解析式
No. 1	12.10	18.90	6.80	2.50	PW1	1.50E-07	2.21E-08			Hvorslev
					RW	1.78E-07	2.62E-08	7.95E-08	1.17E-08	Cooper-Jacob
					RWS	3.47E-07	5.10E-08	2.86E-12	4.21E-13	Agarwal
					PW2	1.91E-07	2.81E-08			Hvorslev
No. 2	37.10	42.56	5.46	7.50	PW1	1.28E-06	2.34E-07			Hvorslev
					RW	1.98E-06	3.62E-07	1.05E-27	1.92E-28	Cooper-Jacob
					RWS	解析不可				Agarwal
					PW2	1.33E-06	2.44E-07			Hvorslev
No. 2'	20.10	36.10	16.00	約0.10	PW	4.03E-08	2.52E-09			Hvorslev
					PW	9.78E-08	6.11E-09	1.21E-08	7.59E-10	Cooper

表 4.2-5 透水試験結果一覧 (HQ 区間)

試験区間	上端深度 (m)	下端深度 (m)	区間長 (m)	湧水量 (L/min)	試験	透水量係数 (m ² /sec)	透水係数 (m/sec)	貯留係数 (-)	非貯留係数 (1/m)	解析式
No. 3	44.20	54.50	10.30	1.90	PW1	1.88E-07	1.83E-08	-	-	Hvorslev
					PW2	1.93E-07	1.87E-08	-	-	Hvorslev
No. 4	53.20	63.50	10.30	0.42	PW1	4.96E-09	4.82E-10	4.45E-04	4.32E-05	Cooper
					PW2	5.46E-09	5.30E-10	4.79E-04	4.65E-05	Cooper
No. 5	65.20	85.50	20.30	0.50	PW1	1.93E-08	9.53E-10	1.73E-06	8.53E-08	Cooper
					PW2	1.75E-08	8.63E-10	2.17E-06	1.07E-07	Cooper
No. 6	105.20	107.00	1.80	5.20	PW1	3.96E-07	2.20E-07	-	-	Hvorslev
					RW	9.80E-07	5.45E-07	1.96E-13	1.09E-13	Cooper-Jacob
					RWS	解析不可				
					PW2	解析不可				

4.2.3 止水壁設置位置における岩盤掘削の状況

掘削は発破掘削とし、上半→下半へ次の手順で実施された。

上半掘削：測量→削孔・発破・コソク①→仮吹付（高強度）→削孔・発破・コソク②→吹付
（スプリングラインより上）

下半掘削：測量→削孔・発破・コソク①→削孔・発破・コソク②

掘削後の止水壁位置の状況を図 4.2-5 に示す。



図 4.2-5 掘削後の止水壁位置の状況

掘削後の観察によれば、特に目立った弱部、亀裂はみあたらず、岩盤は健全な状況と考えてよいということであった。

次に、設計用の岩盤形状を把握するために、3次元スキャナによる測量を実施した。測量手順を図 4.2-6 に、測量結果の例を図 4.2-7 示す。測量結果をドットの集合体で表現したものを図 4.2-8 に示す。また、すべての断面における測量結果を、付録 I に添付した。

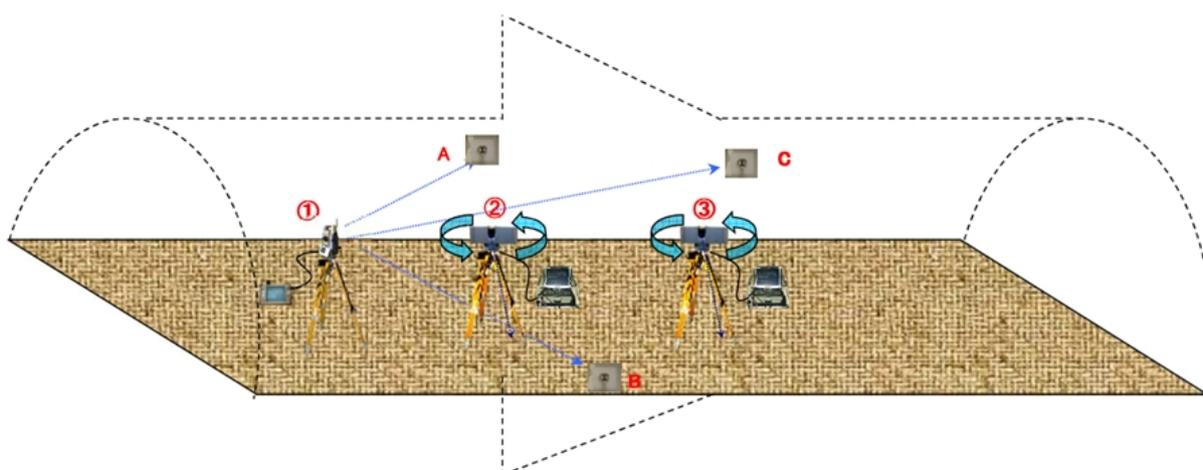


図 4.2-6 3次元スキャナの測量手順

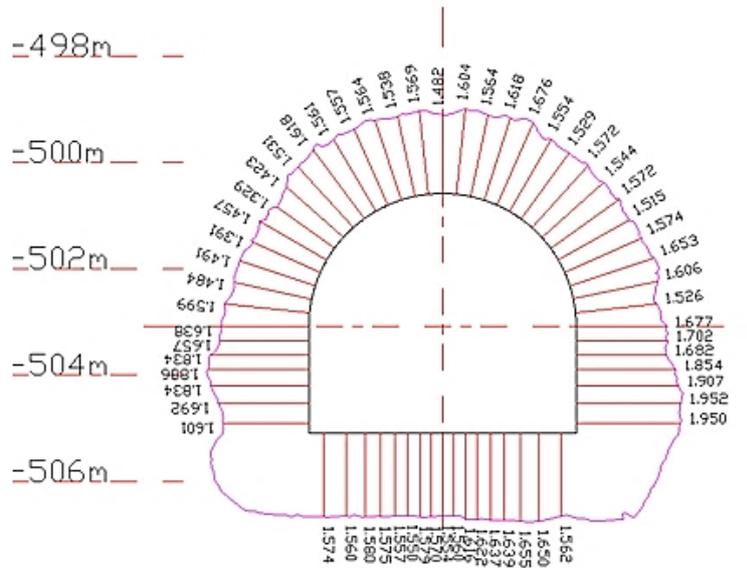


図 4.2-7 3次元スキャナによる測量結果の例

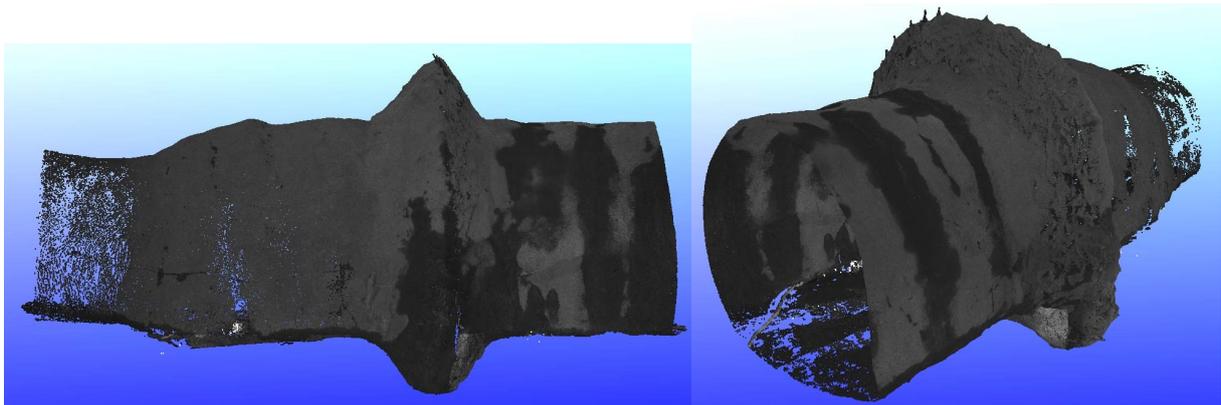


図 4.2-8 3次元スキャナによる測量結果（図示）

4.3 止水壁検討条件の設定

(1) 原位置岩盤・水理条件

上記 4.2 の成果を踏まえ、止水壁を検討する際の岩盤力学・水理条件を設定した。

岩盤定数のうち、力学定数については、Mohr – Coulomb 降伏判定基準による弾塑性解析を実施することから、弾性係数、ポアソン比のほかに粘着力と内部摩擦角の設計値を設定した。また、止水壁受圧面における支圧強度に対する照査も必要となることから、一軸圧縮強度も安定性の検討で用いた。今回は水理解析は実施していないが、水理条件については、間隙水圧、湧水速度、必要に応じて透水係数を設定することとなる。

解析に用いる岩盤条件を表 4.3-1 に示す。ここで、力学条件については止水壁位置に近い MIZ-1 の値を用いるものとする。

表 4.3-1 設計に必要な力学定数

適用	記号	単位	値	
力学条件	弾性係数	E_{50}	GPa	53.9
	ポアソン比	ν	—	0.265
	比重		—	2.62
	粘着力	c	MPa	39.1
	内部摩擦角	ϕ	°	52.2
	一軸圧縮強度	σ_c	MPa	173
	引張強度	σ_t	MPa	6.48

(2) 荷重条件

止水壁を検討する際の荷重条件を設定する。ここで想定されるのは、止水壁本体（通路含む）の自重、大気圧、冠水坑道側からの水圧、施工管理上のコンクリートの硬化時を含む温度変化、コンクリートのクリープ、ベントナイトの膨潤圧（今回は考慮しない）などである。

試験定常時の外荷重としては、大気圧および冠水坑道側からの水圧が想定される。当該坑道の深度まで静水圧が採用したと仮定した場合、外荷重は水圧と大気圧との合計で 5.1 MPa となり、これを外荷重として考慮した。

4.4 止水壁オプションの検討

これまでの検討を踏まえて、止水壁の形状、材料他の概略のオプションを検討し、設計対象とする止水壁を選定した。

4.4.1 止水壁の形状

止水壁の形状については、天然ガス高压貯蔵技術（ANGAS）等で用いられた図 4.4-1 に示すひし形¹¹⁾、AECL における TSX のコンクリートプラグで用いられた図 4.4-2 に示す受圧面部分のみを拡幅したタイプ¹²⁾、SKB の KBS-3V で用いられている図 4.4-3 に示すアーチ型などがある¹³⁾。

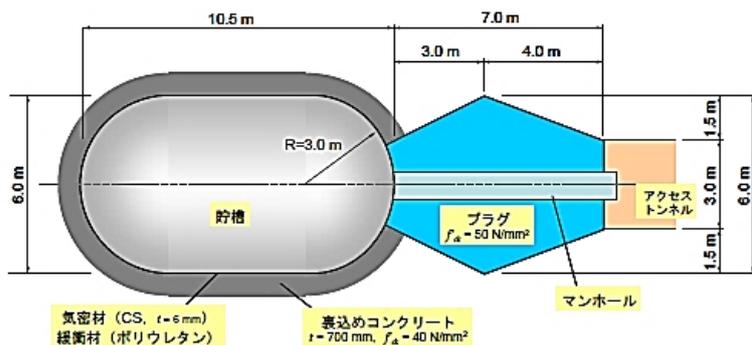


図 4.4-1 ANGAS の実証試験で用いられたプラグ形状¹¹⁾

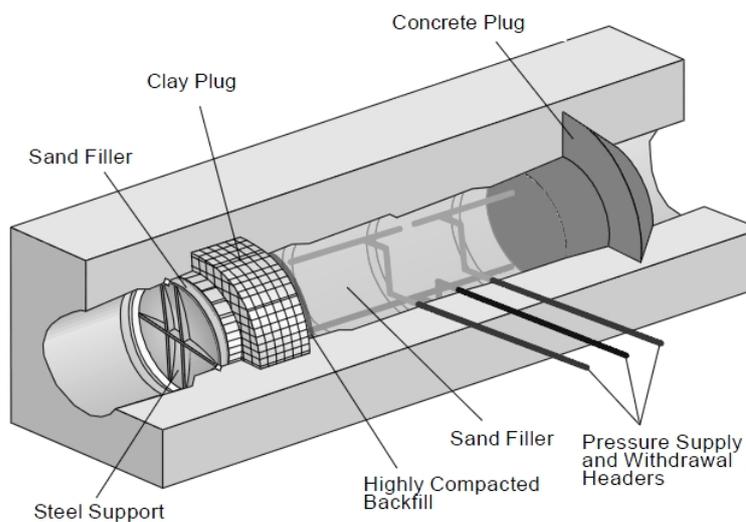


図 4.4-2 AECL における TSX で用いられたプラグ¹²⁾

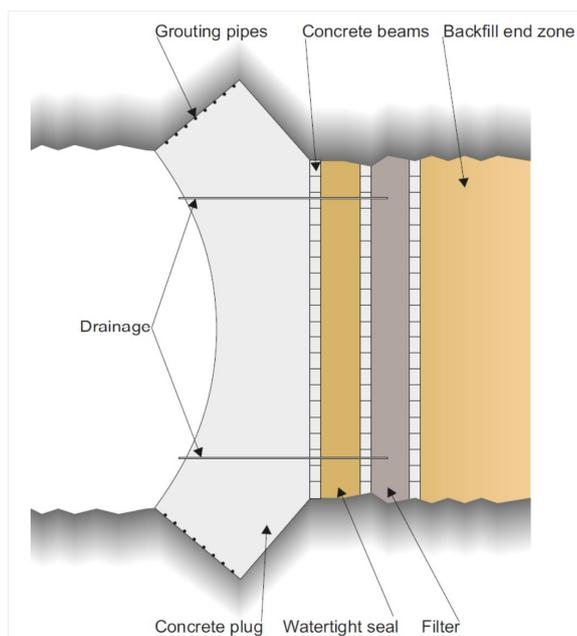


図 4.4-3 SKB の KBS-3V で用いられているプラグ形状¹³⁾

各々に特徴があり，岩盤条件や要求性能に応じて形状を設定するのが良い。そこで，以下に簡条書きで示す条件をもとに再冠水試験で用いる止水壁の形状を決定するため，比較検討を実施する。

- ・ 止水壁縦断面形状：これまでの実績等から，2～3種類程度をパラメータとする。
- ・ 使用材料：コンクリートを基本に，鋼製，合成構造の3種類程度をパラメータとする。コンクリートについては，低アルカリと通常のセメントの両方を検討する。
- ・ 止水壁側面形状：アーチ形状および直面の2種類を検討する。
- ・ 止水用ベントナイト：3.2.1の結果により検討要否を決定する。有無の2種類をパラメータとする。

止水壁形状の決定については，設定した要求機能に対して構造的，施工性等を考慮して決定する。例えば，再冠水坑道まで打設するコンクリートを搬入する必要があるため，最大でも100m³程度が限界である。よって，できるだけコンクリート体積の少ない構造とする必要がある。一方で，止水壁本体の応力が許容値内であること，圧力を支持する岩盤が健全であること等は必須の事項であることから，これらを加味したできるだけ合理的な構造を採用する。

止水壁の構造検討として，ひし形止水壁とSKBのKBS-3Vで採用しているアーチ型の構造の両方で成立性の検討を実施する。すなわち，実際にFEM解析を行うことにより，止水壁コンクリートに生じる応力，岩盤の支持性能を照査し，構造成立性を照査する。検討より，瑞浪の再冠水坑道で採用する構造として施工性，構造的及び経済性等に優れた構造を採用する。

比較検討に用いる構造としては，図4.4-4に示すひし形とアーチ型の構造を比較する。

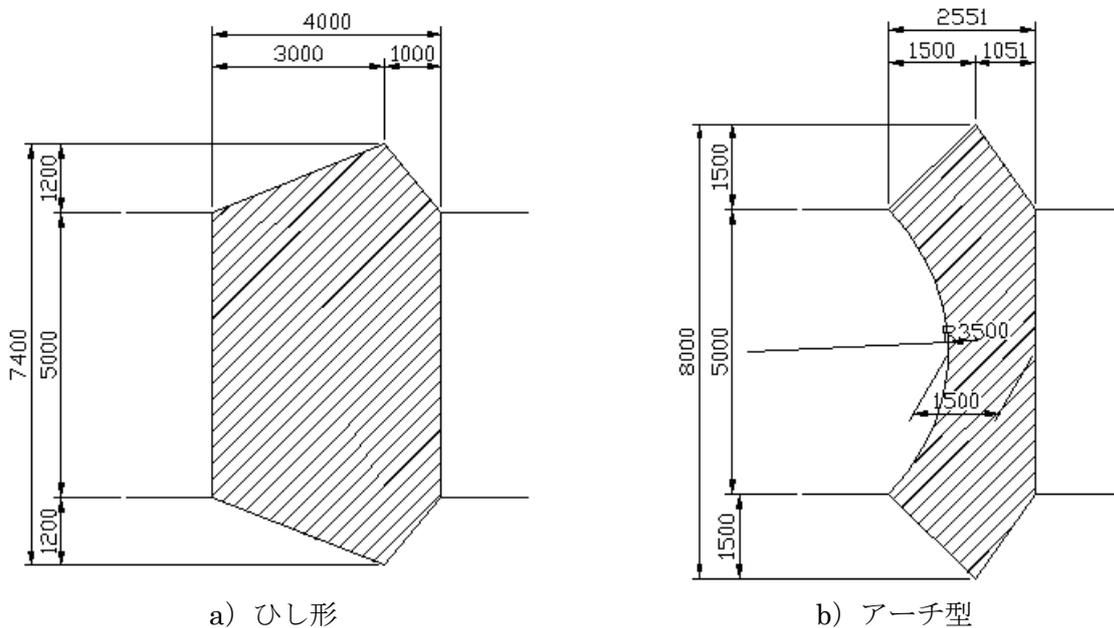


図 4.4-4 止水壁構造比較

比較を行う際の解析モデルは軸対称モデルとし，図4.4-5に示すような解析モデルを用いる。この時，止水壁と岩盤の界面は不連続体とし，接触体を定義する。さらに，岩盤と止水壁コンクリート間は摩擦が生じるものと考えられることから，摩擦係数を定義し，接触における摩擦の影響を考慮する。このようなモデル化を行うことにより，連続体でモデル化した場合に起こり得な

い部材間の引張等の影響を排除することができ、より現実的なモデル化及び評価が可能となる。

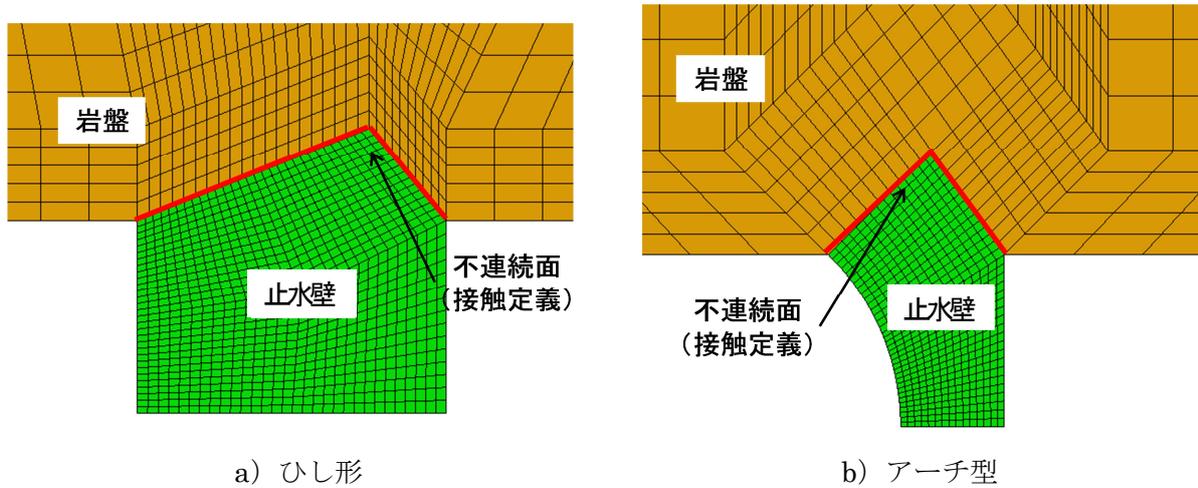


図 4.4-5 構造検討用解析モデル

再冠水試験時に载荷される荷重は止水壁背面に面圧力として定義し、静水圧に加え大気圧に相当する圧力が载荷されるとすると、止水壁に载荷される設計圧力は $P=5.1\text{MPa}$ となる。

例えば、図 4.4-5 に示したモデルの止水壁背面に設計荷重 $P=5.1\text{MPa}$ を载荷すると、図 4.4-6 あるいは図 4.4-7 のようになる。ひし形の形状の止水壁は背面から荷重が加わると、くさびを打ち込むような挙動となり、基本的には圧縮部材となる。一方で、アーチ型については背面から荷重が加わると、止水壁としては撓むものの、前面側のアーチ形状によって、岩盤へは圧縮力が生じて岩盤を押し付けるような荷重状態となる。

瑞浪超深地層研究所の岩質は比較的硬質な結晶質岩であり、一軸圧縮強さも 173MPa 程度ある。また、現地の設備的にもできるだけコンクリート体積を減らしたいことから、アーチ形状の方が瑞浪では優位な形状と考えられる。

ここでは簡易な方法で挙動を確かめるのみとしたが、検討時には岩盤の応力状態及び安定性等についても検討を行い、構造形式を設定する。

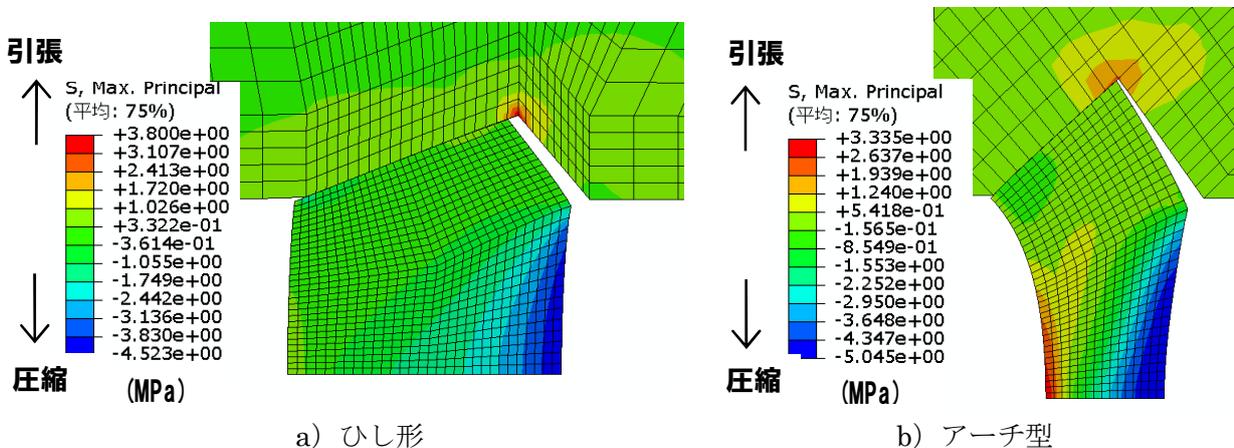


図 4.4-6 最大主応力分布と変形図 (変形倍率 : 500 倍)

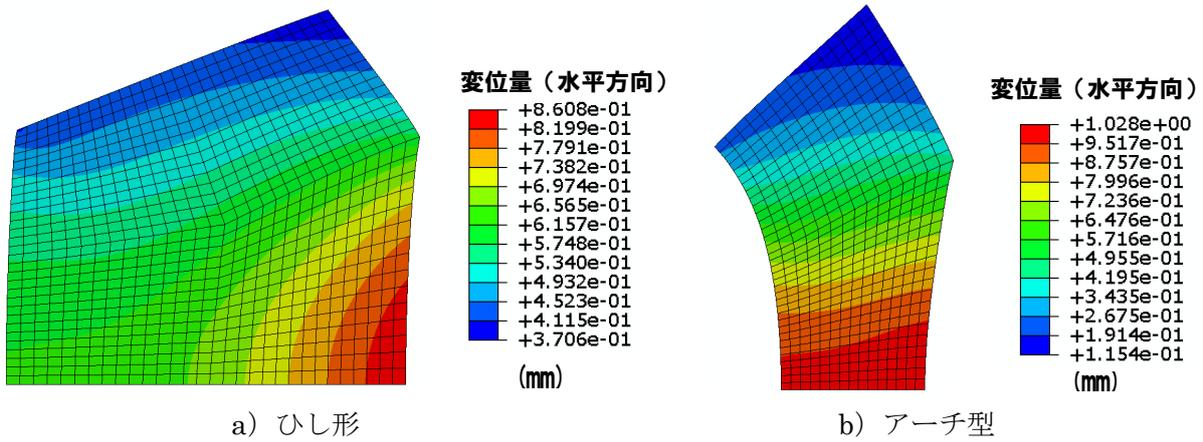


図 4.4-7 止水壁変形分布及び変形図 (変形倍率 : 500 倍)

4.4.2 マンホールの形状

5.1 MPa の設計荷重に耐える必要があり、断面を小さくして設置に必要な面積をできるだけ小さくしたいことから、マンホールは鋼製とする。

等内圧が作用する部材であるので、耐荷性の高い円形断面とする。内部を人が資材を運んで移動することから、ある程度の内寸が必要となり、できるだけ小型軽量化することが望ましいことから、ここではそのうちの最小値と考えられる 80cm とする。

試験用止水壁のマンホールとして参考となるのは、先の文献調査で対象となった ANGAS のマンホールである。ここでは、オプションの比較対象として、この ANGAS タイプのマンホール (複数ケース) と、ケーブル用枝管の無いケースを取り上げる。なお、図 4.4-8 のうち、当止水壁については気密材 (ライニング) は採用しない事から、③気密材取付ハブへの気密材取付は検討の対象としない (したがって、表 4.4-1 のケース 2 は対象外)。このため、表 4.4-1 では、気密材取付ハブに内圧を負担させるか否か (ケース 1 とケース 3・4) の比較となる。

また、図 4.4-8 のうち、③の左側 (貯槽内側) の蓋は工場検査用であるため、今回は不要である。

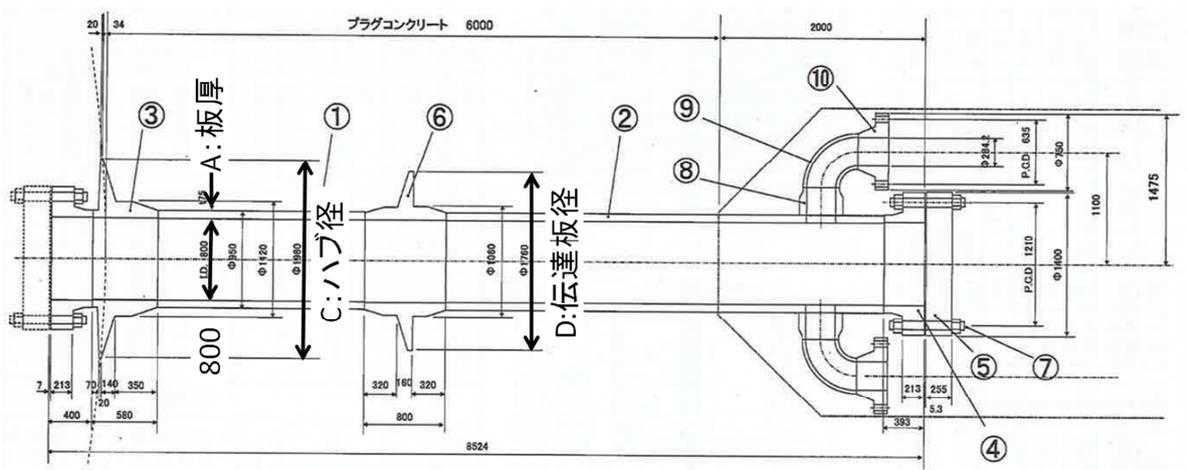


図 4.4-8 マンホール形状参考図 (ANGAS)

表 4.4-1 マンホール形状オプションと寸法（参考）（ANGAS）

記号	A	B	C	D	重量	記事
部位	板厚	全長	ハブ径	伝達板径		
ケース	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	
1	75	8524	1960	1760	23600	
2	25	5836	1400	←	5900	前面のハブにより支圧伝達
3	44	6424	1810	1470	10900	
4	44	6927	1810	1470	11800	

(1) 貯槽側ハブの内圧負担

気密材取付ハブ（今回は気密材は採用しないので、この呼び方は適切ではないが、伝達板と区別するために便宜的にこう呼ぶ）に内圧を負担させる方が、部材厚を薄くでき、重量を軽くできるとともに取り扱いを容易にできる。

ただし、設計荷重が小さい場合は、この負担による部材軽減効果も小さいものとなる。

気密材取付ハブで内圧を負担させた場合は、ハブ背面を止水壁面に密着させる必要がある。その場合、この背面へのコンクリートの充填性に課題が残り、施工が十分でない場合は、止水上の欠陥となる危険性があるので、十分に注意する必要がある。

(2) ケーブル用枝管

ケーブル用枝管が無い場合、計測用ケーブルはすべて別途の配管で止水壁を貫通させることとなる。計測仕様が確定していないので、その必要断面積および本数は明確ではないが、ケーブル数が多い場合は、マンホールにケーブル用枝管を装備して、できるだけそこを通過させることで、止水壁を貫通する配管を減らすことができ、構造上あるいは止水面での漏水の可能性を減らすことができる。

また、できるだけ止水措置を取らなければならない部材数を減らした方が、漏水発生時の対策が取り易い。

4.4.3 使用材料

止水壁躯体の材料として考えられるのは、コンクリート、鋼およびそれらの合成構造である。コンクリートについては、先の表 4.1-4 で述べたように、プラントや施工上の制限により、配合に制約を受ける可能性がある。そこで、オプションを検討する際には、止水壁コンクリートとして想定しうる2種類の配合を対象とする。

(1) 鋼製

鋼製の利点は、ある程度まで予備的に工場で組み立てる事が可能であることにある。したがって、建設工事では、現場での作業期間を短縮するために採用される事が多い。また、鉄筋コンクリート工事が困難な条件（水中での作業、コンクリートの運搬が困難など）で採用されることも多い。ただし、本止水壁の場合は、鋼製の場合の重量が大きくなること、および工場製作の場合は坑内運搬による制約を受けて、メリットが小さいことが考えられる。さらに、強度的に最適な設計を実施した場合には、鋼製では同じ寸法のコンクリート製と比較して、剛性が低くなること

が予想され、変形による岩盤接触面からの漏水を防ぐために、適切な補強を十分施す必要がある。さらに、湿度の高い坑道内での溶接作業となる事から、品質の高い溶接を行うには配慮が必要となる。

(2) 合成構造

合成構造の利点は、鋼製の欠点である剛性の低さを中詰めコンクリートが補うことと、鋼製外殻の重量を純鋼製より軽くできることにある。その一方で、溶接などの作業は鋼製と同様に必要となり、さらにコンクリート工事も鉄筋コンクリート製と同様に必要であることから、工種が複雑となり、工期短縮メリットは少ないと思われる。

鋼製、合成構造とも長期的な腐食という課題があり、地層処分における長期的な性能維持を期待される部材には使用されていない（腐食がシナリオに想定されているオーバーパックを除く）。

(3) コンクリート

3章の文献調査の例ならびに土木分野における例をふまえると、止水壁材料として数多く使用されているのは、コンクリートである。有力な材料と考えられることから、下記のように詳しい検討を行った。

(a) 止水壁、およびコンクリートに求められる性能

止水壁に求められる性能としては以下のものが考えられる。

- ・岩盤との一体性を確保し、長期間の水密性を担保する。
- ・長期間、十分な体積安定性を発揮し、栓材としての機能を発揮する。
- ・高水圧下でも十分な構造安定性、ひび割れ抵抗性を保有する。

以上のことから、止水壁に用いるコンクリートには以下の性状が求められる。

- ①閉所での施工性に優れた、高充填性、高流動性のコンクリートであることが望ましい。
- ②打設後のブリーディング等の材料分離が少なく、凝結・硬化過程での体積変化も少ない均質なコンクリートである。
- ③高水圧下でも十分耐えられる高強度、高弾性のコンクリートである。
- ④地層処分分野では、長期間人工バリア材に化学的影響を与えない材料、すなわち低アルカリ性が望ましいとされており、文献調査の例においても類似の材料が採用されている。

これらのことから、処分坑道の止水壁の施工に用いるコンクリートとしては、「低アルカリ性・低収縮性・高強度・高流動コンクリート」が最適と判断した。

(b) 低アルカリ性セメントの適用上の課題

上記の止水壁には体積安定性を考慮した「低収縮性の高流動コンクリート」を施工することが最も重要であるが、周辺地質環境などへの化学的影響をできるだけ低減する目的を考慮すると、「低アルカリ性セメント」を使用した高流動配合（基本案）が最適と判断した。ここでは、その場合の適用上の課題と改善策について考察する。

低アルカリ性セメントは、「低熱ポルトランドセメント LPC」、「シリカフェーム SF」、「フライアッシュ FA」の粉体材料を 40 : 20 : 40 (%) の割合で混合させて、コンクリート用の結合材（別途膨張材を少量併用する）として使用するものである。

数百 m³ 以上の大量の施工があるような場合には、あらかじめセメント工場やサービスステーション等で粉体材料をプレミックス（事前混合）することが可能であり、ローリー車等で運搬して、製造プラントのサイロに保管し、コンクリート製造に供することができる。この場合には、サイロは所定量が貯蔵できる 1 系統あれば済むことになる。しかし、今回のケースのように、コンクリートボリュームが 120m³ 程度の小規模工事では、総結合材量が 70t 程度にしかならず、従来の施設でプレミックス処理をすることが難しい規模といえる。従って、今回の止水壁の施工ボリュームでは、各粉体材料を個別に運搬し、貯蔵する必要があるため、結果的に 3 系統の貯蔵サイロ・計量設備が必要になる。瑞浪の現場プラントには、現在 2 系統のサイロ（図 4.4-9 参照）が設置されており、3 系統とするには、新たにあと一つのサイロを仮設（新設）する必要が生じることになる。



図 4.4-9 瑞浪超深地層研究所の現場プラントのセメントサイロ（現状 50t×2 基）

なお、サイロの新設が難しい場合でも、もう 1 系統の占有粉体配管があるような場合には、ローリー車を直結させてバッチャーの計量器に空気圧送させる方法も可能であるが、瑞浪の現場プラントの場合にはそのような配管設備もなく、この手法が使用できない。

以上のことから、現状の現場プラントで 3 成分系の低アルカリ性セメントを使用してコンクリートを製造するためには、プラントの改造などの措置が必要となり、コストダウンすべきことと並行している換気坑道工区もプラントを使用しているなどの制約から、かなり難しい対策であると思われる。従って、止水壁のコンクリートとしては、下記のような別の粉体材料を用いた代替配合の検討も必要となる。

(c) 2 成分系の低収縮性セメントを用いた配合例

低アルカリ性セメントの代替案として、大型地下ガス貯蔵基地（波方等）での実績のある、「低熱ポルトランドセメント LPC」と「石灰石微粉末 LP」の 2 成分からなる結合材を用いた「低収縮性高流動コンクリート配合」を提案する。なお、低収縮性は前述と同様に膨張材の併用により実現できるが、この材料は少量使用（20kg/m³）のため、プラントのミキサーに小袋で手投入（人力）することで使用できるため、新たなサイロは必要がないことから、オプションとして比較対象となり得る。

4.4.4 止水グラウトおよび止水壁における止水措置

止水グラウト手法の選定についてのオプションを検討する。なお、止水グラウトおよび壁面止水の実施計画については、4.5.2 (6) および 4.5.2 (7) で詳細に検討する。

止水を「冠水坑道内の地下水のアクセス抗道への漏出抑制」と考えた場合、表 4.4-2 に示すような漏水経路分類が可能である。なお、岩盤マトリクス部は不透水と仮定する。

表 4.4-2 漏水経路と止水措置

漏水経路	漏水増加の要因	止水措置
止水壁躯体（コンクリート・鋼部分）：躯体の亀裂，躯体材料の透水	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートのひび割れ幅，本数増加。 ・コンクリート自体の透水性が高い。 ・鋼製の場合の溶接欠陥。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートは，配合（低発熱）と施工方法の改良（クーリング等）により回避するが，ゼロにはならない。 ・溶接欠陥は検査により回避する。
止水壁躯体と貫通物との境界	<ul style="list-style-type: none"> ・不完全な充填による，貫通物と周辺コンクリートとの連続した空隙，特に下部にできやすい。 ・コンクリートのブリージング。 	<ul style="list-style-type: none"> ・充填性の良好なコンクリート配合と十分な締固め。 ・貫通物表面に凹凸を設ける。 ・貫通物外面に止水ゴムなどを貼付する。
貫通物自体	<ul style="list-style-type: none"> ・蓋と管の接合部，ケーブル取り出し部の不完全な密着。 	<ul style="list-style-type: none"> ・貫通物の止水設計と適切な締込等で回避する。
止水壁と岩盤の境界	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートと岩盤との間の連続した空隙。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート打設前の適切な岩盤清掃。 ・充填性の良好なコンクリート配合と十分な締固め。 ・コンタクトグラウト注入。
止水壁と吹付コンクリートの境界（上半）	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートと吹付コンクリートとの間の連続した空隙。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート打設前の適切な吹付表面の清掃。 ・充填性の良好なコンクリート配合と十分な締固め。 ・コンタクトグラウト注入。
吹付コンクリートと岩盤の境界（上半）	<ul style="list-style-type: none"> ・吹付コンクリートと岩盤との間の連続した空隙。 	<ul style="list-style-type: none"> ・空隙の調査と必要に応じた空隙位置の吹付コンクリートの除去。 ・コンタクトグラウト注入。
岩盤の掘削影響領域（止水壁を迂回した漏水）	<ul style="list-style-type: none"> ・掘削緩み域の連続した微小亀裂。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンソリデーショングラウトの実施。
岩盤内の亀裂（止水壁を迂回した漏水）	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤内の連続した微小亀裂。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンソリデーショングラウトあるいはカーテングラウトの実施。

4.4.5 止水壁オプション

以上の比較検討をもとに、その他の項目も含めて、今回の採用方式について検討したものを表 4.4-3 にまとめる。

表 4.4-3 止水壁オプション (1/2)

対象	オプション	内容	選定
止水壁形状	くさび型	比較的荷重が大きいあるいは岩盤強度が低い条件での止水構造向き。 コンクリート構造への負担は小さい。 必要鉄筋量は比較的少ない。 掘削およびコンクリート体積は大きい。 マンホール延長は大きくなる。 過大な外力が作用した場合でも転倒や崩壊の可能性は低い。	× 実績が多く、安定性にも優れるが、コンクリート等の物量が多い。
	アーチ型	比較的荷重が小さいあるいは岩盤強度が高い条件での止水構造向き。 コンクリート構造への負担は大きい。 必要鉄筋量は比較的大きい。 掘削およびコンクリート体積は小さい。 マンホール延長は短くなる。 過大な外力が作用した場合には転倒や崩壊の可能性はある。	○ 実績は少ないが、構造合理性はある。物量を減らすことができる。比較的新しい形式を提示できる。
マンホール形状	冠水空洞側ハブに荷重を負担させる。	マンホール構造部材を軽くすることができる。 マンホール外面に加えて、止水壁との接触面の止水性確保対策が必要。	○ 重量物の扱いが楽になる。施工安全性が増す。
	冠水空洞側ハブに荷重を負担させない。	マンホール構造部材が重くなる。 マンホール外面の止水性確保対策のみでよい。	× 重量物の扱いにより注意が必要となる。コストが増す。
	ケーブル用枝管を採用しない。	マンホールの設計が簡潔で、管肉厚をやや薄くすることができる。 マンホール内部からの漏水対策箇所を蓋のみとすることができる。 止水壁貫通管の数あるいは面積が大きくなり、止水壁の構造的な負担、貫通管沿いの漏水対策箇所が増える。	× 漏水の可能性が増す。止水壁の構造欠陥部が据えて、躯体のひび割れや貫通管沿いの漏水の可能性が高まる。
	ケーブル用枝管を採用する。	マンホールの設計が断面欠損を考慮した複雑なものとなり、管肉厚はやや厚くなる。 マンホール内部からの漏水対策箇所が増える。 止水壁貫通管の数あるいは面積を小さくすることができる、止水壁の構造的な負担、貫通管沿いの漏水対策箇所を減らすことができる。	○ 枝管口の漏水対策は比較的容易であるが、貫通管沿いの対策は比較的困難。

表 4.4-3 止水壁オプション (2/2)

対象	オプション	内容	選定
止水壁材料	鋼製	構造体自体が原因となる漏水の可能性は低い。 長期的な腐食が懸念される。 変形が大きい。 原位置溶接が必要。 コストが高い。	× 将来の処分施設の止水壁で採用される可能性は低い。
	鋼-(鉄筋)コンクリート合成	鋼製と比較して、変形以外のメリットは小さい。 コンクリートと比較して、止水性が有利なこと以外のメリットは小さい。	× 将来の処分施設のプラグで採用される可能性は低い。
	鉄筋コンクリート	ひび割れ、鋼製部材との境界沿いなどによる漏水の可能性はある。 コストは低い。 岩位置岩盤との馴染みはよい。 重量物ではないため、施工安全性は高い。	○ 実績が多く、将来の処分施設のプラグで採用される可能性は高い。
止水対策 (グラウト)	カーテングラウト	深部まで改良可能。 面積が大きくなるため、コストは高い。	× 岩盤深部の透水性は低いと予想される。
	コンソリデーショングラウト	近傍を効率よく改良可能。	× 坑道近傍の掘削影響等による透水をもたらすような亀裂の発達は見当たらない。
	コンタクトグラウト	境界面の改良。 岩盤-吹付-止水壁コンクリートの境界面の空隙をゼロにする事は極めて困難。 荷重のサイクルにより剥離する可能性がある。	○ 他の分野でも広く採用されており、効果は高い。繰り返しの実施に備える必要がある。
	止水壁表面止水	目に見えない亀裂やコンクリートの空隙に対して効果的。 止水壁設置後の施工が可能。	○ 試験中の漏水が確認された後でも施工可能。
止水対策 (グラウト以外)	コーキング	コンタクトグラウト、貫通管沿いの漏水対策などの不完全さを補う。 止水壁設置後の施工が可能。	○ 試験中の漏水が確認された後でも施工可能。
	ベントナイトブロック	膨潤性、流動性などにより、境界面の空隙を効果的に埋める可能性がある。 水分を極端に嫌うため、対策が必要。 接地面分の支圧面積が減るため、支持部あるいはその外縁部を大きくする必要がある。	× 効果は期待できるが、掘削・躯体が大きくなるため採用しない。
	ベントナイトテープ	簡易な工法。 効果については確認が必要。	△ 構造に影響しないため、今後検討を継続して判断。

この結果，以下の設計検討では，次のようなオプションを取り扱うものとする。

- ・止水壁形状：アーチ型
- ・マンホール形状：冠水側ハブにも荷重を負担させる，ケーブル用枝管付き
- ・止水壁材料：鉄筋コンクリート
- ・グラウト：コンタクトグラウト
- ・その他：コーキング（ベントナイトテープは検討継続）

4.5 止水壁の設計

4.5.1 設計基準

(1) コンクリート躯体の設計

止水壁の設計手法については，天然ガス高圧貯蔵施設（ANGAS）の設計¹⁴⁾を参照し，形状としてはアーチ構造タイプの止水壁の設計を採用する。これは，従来のプラグの設計では，プラグの抵抗力は岩盤とのせん断力に基づく設計（せん断支持タイプ）を基本としているため，高圧になると，十分なせん断力を確保するためには必要プラグ長が極端に長くなり経済性が劣る結果となる。そこで，アーチ作用に基づく合理的でコンパクトなプラグの設計手法であるアーチ構造タイプを採用する。

具体的な照査方法は，岩盤については破壊に対する安全性（局所安全率）と支持岩盤の滑動（止水壁剛体安定）を，構造不連続部については止水壁の変形量，鉄筋コンクリートについては，コンクリート圧縮応力，引張応力及びコンクリートせん断応力（押抜きせん断）を採用する。

(a) 要求性能

止水壁の設計は，土木学会「コンクリート標準示方書【設計編】」¹⁵⁾に基づいて，性能照査型設計法により行う。性能照査型設計法は耐久性，安全性，使用性，復旧性，環境及び景観などに関する要求性能を設定し，それを満足するように設計を行うこととなる。なお，土木学会コンクリート標準示方書によれば要求性能は表 4.5-1 のように設定されている。

表 4.5-1 要求性能¹⁵⁾

耐久性	想定される作用のもとで，構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性とする。
安全性	想定されるすべての作用のもとで，構造物が使用者や周辺の人々の生命や財産を脅かさないための性能とする。安全性には，構造物の構造体としての安全性と機能上の安全性があり，これらの両者の要求性能を設定しなければならない。
使用性	想定される作用のもとで，構造物の使用者や周辺の人々が快適に構造物を使用するための性能，及び構造物に要求される諸機能に対する性能とする。
復旧性	地震の影響等の偶発荷重等によって低下した構造物の性能を回復させ，継続的な使用を可能にする性能とする。復旧性は，構造物の修復の難易度や，性能の低下が及ぼすすべての要因を考慮して設定する。
その他の要求事項	環境や景観などの要求性能は，必要に応じて適切に設定するものとする。

構造物の性能照査は、要求性能に応じた限界状態を施工中および設計耐用期間中の構造物あるいは構成部材ごとに設定し、それらが限界状態に至らないことを確認する。限界状態とは、一般に耐久性、安全性、使用性及び耐震性に対して設定する。

安全性は、一般に物理的特性にもとづく限界状態を設定する。具体的には断面破壊、疲労破壊、構造物の安定に対する要求性能を照査するものとする。

使用性は、使用上の快適性や構造物のそれ以外の諸機能から定まる機能性の限界状態として、一般的に、外観、騒音・振動、走行性・歩行性、水密性、損傷等がある。

本設計に関係する要求機能、限界状態、照査指標と設計荷重を表 4.5-2 に示す。

表 4.5-2 要求性能、限界状態、照査指標と設計荷重

要求機能	限界状態	照査指標	考慮する設計荷重
安全性	断面破壊	力	全ての荷重（最大値）
	疲労破壊	応力度・力	繰返し荷重
	変位変形・メカニズム	変形・基礎構造による変形。	全ての荷重（最大値）・偶発荷重
使用性	水密性	構造体の透水量 ひび割れ幅	比較的しばしば生じる。 大きさの荷重
	損傷（機能維持）	力・変形等	変動荷重等

(b) 限界状態

具体的な限界状態の照査としては軸圧縮力による断面破壊と押抜きせん断破壊を、剛体安定の終局限界状態として支持岩盤の滑動による破壊を検討対象とする。なお、坑道の再冠水は数回程度のみであることから、疲労限界に対する照査は行わないものとする。

各限界状態に関する検討項目と検討方法を表 4.5-3 に示す。

表 4.5-3 検討する限界状態

区分	検討項目	検討方法（照査項目）
限界状態	断面破壊	軸方向力に対する安全性。 設計圧縮強度と設計圧縮応力を比較。
	剛体安定	押抜きせん断に対する安全性。 設計せん断伝達耐力と設計せん断力を比較。
	剛体安定	周辺支持岩盤の安定性。 支持岩盤の想定滑り線の開始位置付近での岩盤のせん断破壊の有無。

なお、使用性に関わる水密性については、湧水量や本試験の目的と要求事項を整理した段階で設定する。また、変形については、止水壁に設置する変位計あるいは岩盤と止水壁の境界に設置するひずみ計の対応能力に応じて設定する。

(2) マンホールの設計

マンホールの設計は、マンホール自身が単独で圧力容器として強度を有するものとする。日本ボイラ協会の規定では、圧力容器はゲージ圧力と内容積によって第一種圧力容器、第二種圧力容器などに区分けされる。本件は、荷重規模がゲージ圧で 0.2MPa 以上となるため第二種圧力容器に相当する。なお、設計については JIS に基づいた弾性域での検討を行う。

マンホールの設計検討は、支圧応力を受ける止水壁コンクリートの強度、伝達板の強度及び

「JIS B8265：圧力容器の構造—一般事項」¹⁶⁾による、内筒の強度、フランジの強度、ふた板の強度を検討する。

なお、「JIS B8265：圧力容器の構造—一般事項」によらない部位のコンクリート系材料の設計については止水壁の設計と同様に性能照査型設計法による設計を行う。

4.5.2 各種部材の設計検討

(1) 解析による本体・岩盤の応力変位評価による形状の決定

止水壁本体及び岩盤の応力評価による形状の決定を行うための解析は、有限要素法による応力解析を実施する。用いる解析コードは汎用非線形有限要素法プログラム「Abaqus」を用いる。適用する材料構成則は、岩盤は弾塑性とし降伏判定は Mohr – Coulomb 破壊基準による。コンクリート止水壁は弾性体でモデル化する。なお、ひび割れ等の非線形挙動の影響を評価する必要がある場合には分散ひび割れモデルを適用し解析を実施する。

止水壁と岩盤部のモデル化は不連続体としてモデル化する。これは、止水壁が水圧を受けるときに、止水壁受圧面と岩盤との接触条件によって止水壁の応力状態が異なることによる。牛田ら¹¹⁾の検討によれば、プラグの実証試験時の加圧試験結果と設計時の解析値との比較を行った結果、プラグと岩盤との接触条件は固着または摩擦ありに近い状態であったと示している。よって、今回行う実験でも止水壁と岩盤との界面性情は同様の傾向を示すものと考えられることから、本検討でも止水壁と岩盤との界面は摩擦なし、摩擦あり及び固着状態の3ケースについて検討を行う。なお、岩盤とコンクリートとの摩擦係数は、「道路橋示方書・同解説IV下部工編 10.3 地盤の許容支持力」¹⁷⁾に従い $\tan \phi_B = 0.6$ とする。

上記の解析から算出される応力、ひずみ及び変形量を用いて止水壁の安定性の照査を実施する。設計評価指標については以下による。

(2) 設計評価指標

各限界状態に対する安全性の検討方法を以下に示す。

(a) 荷重の特性値

止水壁の設計では、荷重は再冠水坑道内の水圧を対象とする。永久圧力荷重の特性値としては、想定水圧に大気圧を加えた絶対圧となる。すなわち、大気圧を P_{atm} 、作用する水圧を P_w とすると永久圧力荷重の特性値 P_p は式 (4.5-1) となる。

$$P_p = P_{atm} + P_w \quad (4.5-1)$$

(b) 安全係数

設計に用いる安全係数は表 4.5-4 に示す値を用いるものとする。

表 4.5-4 安全係数

	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数 (永久) γ_{fp}	荷重係数 (変動) γ_{fr}	構造物係数 γ_i
安全性 (断面破壊)	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2
使用性	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

(c) 安全性に関する照査

1) 止水壁及び岩盤

安全性に関する照査のうち、断面破壊の限界状態に対する照査は、設計断面力 S_d の設計断面耐力 R_d に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行うものとする。

$$\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0 \quad (4.5-2)$$

設計断面耐力 R_d は、設計強度 f_d を用いて部材断面の耐力 R (R は f_d の関数) を算定し、これを部材係数 γ_b で除した値とする。

$$R_d = R(f_d) / \gamma_b \quad (4.5-3)$$

設計断面力 S_d は、設計荷重 F_d を用いて断面力 S (S は F_d の関数) を算定し、これに構造解析係数 γ_a を乗じた値を合計したものとする。

$$S_d = \sum \gamma_a S(F_d) \quad (4.5-4)$$

i) 軸方向力に対する安全性の検討

FEM 応力解析により、設計荷重作用時に止水壁内部に発生する圧縮応力 σ_a を把握し、式(4.5-5)より設計圧縮強度 f'_{cd} と比較し照査する。

$$\frac{\gamma_i \gamma_a \sigma'_a}{0.85 \frac{f'_{cd}}{\gamma_b}} \leq 1.0 \quad (4.5-5)$$

ii) 押抜きせん断に対する安全性の検討

FEM 応力解析結果に基づいて、設計荷重作用時の押抜きせん断に対するせん断伝達耐力 V_{cwd} を評価し、設計せん断力 V_d と式(4.5-6)に従い比較し照査する。

$$\frac{\gamma_i V_d}{V_{cwd}} \leq 1.0 \quad (4.5-6)$$

設計せん断伝達耐力 V_{cwd} は、式 (4.5-7) により求められる。

$$V_{cwd} = \left\{ \left(\tau_c + p \cdot \tau_s \cdot \sin^2 \theta - \alpha \cdot p \cdot f_{yd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \right) A_c + V_k \right\} / \gamma_b \quad (4.5-7)$$

ここに、

$$\tau_c = \mu \cdot f_{cd}'^b \left(\alpha \cdot p f_{yd} - \sigma_{nd} \right)^{1-b} \quad (4.5-8)$$

$$\tau_s = 0.08 f_{yd} / \alpha \quad (4.5-9)$$

$$\alpha = 0.75 \left\{ 1 - 10 \left(p - 1.7 \sigma_{nd} / f_{yd} \right) \right\} \quad (4.5-10)$$

f_{cd}' : コンクリートの設計圧縮強度

σ_{nd} : せん断面に垂直に作用する平均応力度で、圧縮の場合には、 $\sigma_{nd} = -\sigma_{nd}' / 2$ とする。

いずれの場合にも、 $(\alpha \cdot p \cdot f_{yd} - \sigma_{nd})$ が正でなければならない。

σ_{nd}' : せん断面における鉄筋比で、せん断面から両側にそれぞれ十分な定着長をもった鉄筋のみを考慮する。

p : せん断面における鉄筋比で、せん断面から両側にそれぞれ十分な定着長を持った鉄筋のみを考慮する。

A_c : せん断面の面積

θ : せん断面と鉄筋のなす角度

b : 面形状を表す係数 (0~1) で、以下の値を標準とする。

2/3 = ひび割れ面 (普通強度のコンクリート)

1/2 = 打継面 (処理あり) あるいは高強度コンクリートのひび割れ、プレキャスト部材の継目に接着剤を用いた場合の継ぎ目

μ : 固体接触に関する平均摩擦係数で、0.45 とする。

V_k : せん断キーによるせん断耐力で、今回は 0 である。

また、無筋コンクリート構造物の設計せん断伝達耐力 V_{cwd} は、式 (4.5-11) により求められる。

$$V_{cwd} = \pi_c \cdot A_c / \gamma_b \quad (4.5-11)$$

ここに、

$$\tau_c = \mu \cdot f_{cd}'^b \left(\sigma_{nd}' / 2 \right)^{1-b} \quad (4.5-12)$$

iii) 剛体安定の限界状態に対する検討

FEM 応力解析結果に基づいて、設計荷重作用時に、支持岩盤の想定滑り破壊線開始位置付近で岩盤にせん断破壊が発生しないことを確認する。具体的には、止水壁中央の最大拡幅位置において、岩盤の局所安全率が 1.0 以上であることを確認する。なお、せん断破壊が発生している場合は、詳細検討を行う。

2) マンホール

i) 止水壁コンクリート支圧強度の検討

止水壁コンクリート支圧強度の検討は、「コンクリート標準示方書【設計編】」¹⁵⁾に基づき安全性に関する限界状態を設定し、性能照査を行う。

使用するコンクリートの安全係数を表 4.5-5 に示す。

表 4.5-5 マンホールの設計に用いるコンクリートの安全係数

	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数 γ_f	構造物係数 γ_i
安全性	1.3	1.15	1.0	1.1	1.2
使用性	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

支圧応力 σ_a は、ふた板の受ける内圧の合計を伝達板の面積で割り、伝達板の平均応力で評価する。

また、止水壁コンクリートの内部圧縮応力も考慮する。止水壁内部の圧縮応力は最内面で内圧に等しく、埋設部終端でゼロになると考え、その中間部では線形分布と仮定して式 (4.5-13) より算出する。

$$\sigma_a = \frac{\frac{\pi}{4}(D+2t)^2 \cdot P \cdot \gamma_f}{\frac{\pi}{4}\{D_0^2 - (D+2t)^2\}} + P \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \gamma_f = \left\{ \frac{(D+2t)^2}{D_0^2 - (D+2t)^2} + \left(1 - \frac{x}{L}\right) \right\} P \cdot \gamma_f \quad (4.5-13)$$

ここに、

σ_a : 支圧応力

D : マンホール内径

t : マンホール板厚

D_0 : 伝達板外径

x : 荷重載荷面伝達板までの距離

L : マンホールの止水壁コンクリート内の埋設長

設計支圧強度 f_{ad} は、設計基準強度 f_{ck} 、設計圧縮強度 f_{cd} と式 (4.5-14) の関係がある。

$$f_{ad} = f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad (4.5-14)$$

照査は式 (4.5-15) により行う。

$$\frac{\gamma_i \gamma_a \sigma_a}{0.85 \frac{f_{ad}}{\gamma_b}} \leq 1.0 \quad (4.5-15)$$

ii) 伝達板の強度検討

伝達板強度検討に用いる寸法記号と強度検討の対象とする3断面A, B, Cを図4.5-1に示す。

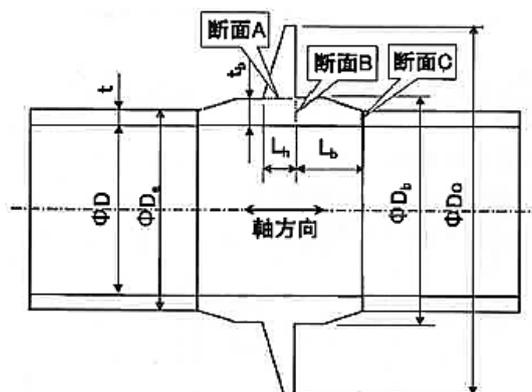


図 4.5-1 伝達板強度検討に用いる寸法記号と強度検討断面

①断面Aでは、伝達板の受けるコンクリート支圧荷重 q により発生するモーメント M_q による曲げ応力と、コンクリート支圧荷重 q によるせん断応力を検討する。

②断面Bでは、上記モーメント M_q と、 L_h 部と L_b 部での剛性の違いにより生じる内圧 P によるモーメント M_P の、両者による曲げ応力と、内圧 P により内筒に発生する引張応力とを重畳させた軸方向応力を検討する。

③断面Cでは、上記モーメント M_q と M_P が、距離 L_b で減衰した時の両者による曲げ応力と、内圧 P により内筒に発生する引張応力とを重畳させた軸方向応力を検討する。

応力評価に用いる許容応力は、「JIS B8265 : 4.3 材料の許容応力」を参照し、曲げ応力及びそれを含む軸方向応力に対して $1.5 \sigma_a$ 、せん断応力に対しては $0.8 \sigma_a$ とする（ここに、 σ_a はJIS B8265に規定する許容引張応力）。

① 断面A：曲げ応力及びせん断応力の検討

A) 曲げ応力

伝達板の曲げ応力は、内圧 P がある時、図4.5-2のように伝達板に加わる分布荷重を q として、周辺自由、内縁位置で拘束された円盤でモデル化し、理論式¹⁸⁾から内縁の応力 σ_{Ab} として求める。

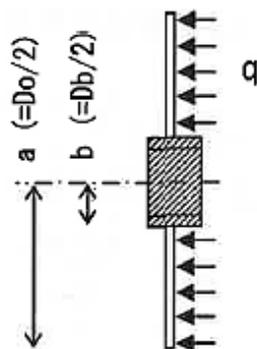


図 4.5-2 伝達板の曲げモーメント算出モデル

$$q = \frac{\frac{\pi}{4} D_a^2 P}{\frac{\pi}{4} \{D_0^2 - D_a^2\}} = \frac{D_a^2 P}{\{D_0^2 - D_a^2\}} \quad (4.5-16)$$

$$\sigma_{Ab} = M_q \frac{6}{L_h^2} \quad (4.5-17)$$

$$M_q = \frac{qa^2}{C_8 \left\{ \frac{C_9}{2ab} (a^2 - b^2) - L_{17} \right\}} \quad (4.5-18)$$

ここに、 $a = D_0/2$, $b = D_b/2$,

$$C_8 = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \nu + (1 - \nu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right\}$$

$$C_9 = \frac{b}{a} \left[\frac{1 + \nu}{2} \ln \frac{a}{b} + \frac{1 - \nu}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right\} \right] \quad (4.5-19)$$

$$L_{17} = \frac{1}{4} \left[1 - \frac{1 - \nu}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^4 \right\} - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \left\{ 1 + (1 + \nu) \ln \frac{a}{b} \right\} \right]$$

ν はポアソン比 (=0.3)

B) せん断応力

せん断応力は、伝達板の受ける荷重を伝達板根元の断面積で割り、式(4.5-20)で求める。

$$\tau_A = \frac{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_b^2) q}{\pi \cdot D_b \cdot L_h} = \frac{(D_0^2 - D_b^2)}{4 \cdot D_b \cdot L_h} q \quad (4.5-20)$$

C) 応力評価

算出応力を以下のように評価する。

$$\text{曲げ応力} : \sigma_{Ab} \leq 1.5\sigma_a$$

$$\text{せん断応力} : \tau_A \leq 0.8\sigma_a$$

ここに、 σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力である。

② 断面 B : 軸方向応力の検討

A) 剛性の違いにより生じる内圧 P によるモーメント M_p

図 4.5-1 の L_h 部の板厚として、その平均板厚をとり t_0 とする。この t_0 と t_b の違いにより断面 B に以下のモーメント M_p が生じる。

$$M_p = -\frac{P}{2k^2} \cdot \frac{1 - \alpha - \alpha^2 + \alpha^3}{1 + \alpha^4 + 2(\alpha^{3/2} + \alpha^2 + \alpha^{5/2})} \quad (4.5-21)$$

$$\text{ここに、} k_1 = \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} / \sqrt{D/2 \cdot t_b} \quad (4.5-22)$$

$$\alpha = t_b / t_0$$

B) 曲げ応力

式 (4.5-21) の M_p と式 (4.5-18) による M_q は、伝達板の中で、打ち消しあう箇所と重畳する箇所が存在するが、ここでは重畳する箇所での検討を進める。断面 B では M_q が半分になることも考慮して曲げ応力は式 (4.5-23) で求まる。

$$\sigma_{Bb} = \frac{|M_q/2| + |M_p|}{t_b^2/6} \quad (4.5-23)$$

C) 引張応力

断面 B に発生する引張応力は式 (4.5-24) で求まる。

$$\sigma_{Bt} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 p}{\frac{\pi}{4} (D_b^2 - D^2)} = \frac{D^2 p}{(D_b^2 - D^2)} \quad (4.5-24)$$

D) 応力評価

算出応力を以下のように評価する。

$$\sigma_{Bb} + \sigma_{Bt} \leq 1.5\sigma_a$$

ここに、 σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力である。

③ 断面 C : 軸方向応力の検討

A) モーメントの減衰

断面 B でのモーメント M_0 ($= M_q/2 + M_p$) は L_b 間で減衰してゆく。

図 4.5-3 のように円筒シェルの自由端部に曲げモーメント M_0 が作用する場合、端部から軸方向距離 x におけるモーメントは式 (4.5-25)、式 (4.5-26) であらわされる。

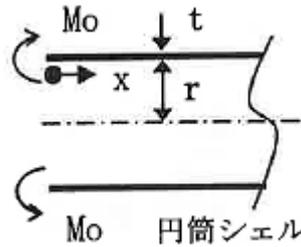


図 4.5-3 伝達板の曲げモーメント減衰算出モデル

$$M(x) = -M_0 e^{-k_1 x} (\sin k_1 x + \cos k_1 x) \quad (4.5-25)$$

$$\text{ここに, } k_1 = \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} / \sqrt{rt} \quad (4.5-26)$$

上記 $M(x)$ の x に L_b をとり、断面 C でのモーメント $M(L_b)$ を計算する。

この時、 $M_0 = M_q/2 + M_p$ 、 $r = D/2$ 、 $t = t_b$ 、 $x = L_b$ である。

B) 曲げ応力

上記により求めた $M(L_b)$ を用いて断面 C での曲げ応力は式 (4.5-27) で求まる。

$$\sigma_{cb} = \frac{|M(L_b)|}{t^2/6} \quad (4.5-27)$$

C) 引張応力

断面 C に発生する引張応力は式 (4.5-28) で求まる。

$$\sigma_{ct} = \frac{(\pi/4) \cdot D^2 p}{(\pi/4) \cdot (D_a^2 - D^2)} = \frac{D^2 p}{(D_a^2 - D^2)} \quad (4.5-28)$$

D) 応力評価

算出応力を以下のように評価する。

$$\sigma_{cb} + \sigma_{ct} \leq 1.5\sigma_a$$

ここに、 σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力である。

(3) 材料選定

これまでに検討した結果および設計結果を基本に、材料の仕様を決定する。なお、主たる部材のうち、マンホールについては、前記の設計検討において材料が決定しているため、ここでは止水壁本体材料であるコンクリートの仕様について検討する。

使用コンクリートとして候補に挙げられるのは、これまでも原子力機構において研究が進められてきた、低アルカリコンクリートである。ここで対象とする低アルカリ・コンクリートは、フライアッシュ高含有シリカフェームセメント（HFSC424）を用いた高強度・低収縮・高流動コンクリートである。また、止水性に影響するような貫通ひび割れが予想される場合には、膨張材の使用を検討する。

表 4.5-6 に使用材料の一例を示す。可能な範囲で、現在プラントで使用している材料を使用するものとする。

要求強度については、設計により決定する。比較的高強度（60N/mm²）の場合に想定される基本配合の一例を表 4.5-7 に示す。

表 4.5-6 低アルカリコンクリートに使用する材料の例

材料	記号	銘柄・産地
低熱ポルトランドセメント	LPC	太平洋セメント社製
シリカフェーム	SF	今後選定
フライアッシュ	FA	今後選定
膨張材	EX	太平洋マテリアル社製
石灰岩微粉末	LSP	3500 ブレーン級
細骨材	S	岐阜県恵那市矢作川産
粗骨材	G	同上 Gmax:20mm
高性能 AE 減水剤	SP	BASF ホ゜ゾリス社製 マスターグレニウム SP8SV 等

表 4.5-7 低アルカリコンクリートの基本配合の一例（60N/mm²の場合）

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
		W	HFSC (424)			EX	LSP	S	G	SP
			LPC	SF	FA					
35.0	48.0	165 ~ 175	470~500			15 (試験練りで調整)	試験練りで決定	767 ~ 797	773 ~ 802	3.76~4.0 程度 (P×0.8%程度)
	~		188	94	188					
	52.0		~	~	~					
			200	100	200					

なお、配合試験計画については、4.5.3 (1) で述べる。

さらに、この配合試験で決定されるコンクリートを打設した場合に、温度ひび割れを防止するためのクーリング作業の要否及びクーリングの方法についても、4.5.3 (1) での配合試験による熱

特性取得に引き続き検討が必要となる。

(4) 止水壁の設計

(a) 設計計算

鉄筋コンクリート製止水壁の設計を行う。以下に概要を述べる。設計検討書の詳しい内容，図面等については，付録Ⅱを参照されたい。

設計の考え方および設計定数は先に述べたとおりである。

構造解析については，一般的な二次元平面モデルと三次元モデルの両者を用いて実施した。それぞれを図 4.5-4 および図 4.5-5 に，解析結果のうち最大値を表 4.5-8 および表 4.5-9 に示す。なお，三次元解析については，岩盤と止水壁の間の摩擦係数を三段階設定した。

また，解析結果に基づき設計を行った止水壁の配筋図を図 4.5-6 に示す。

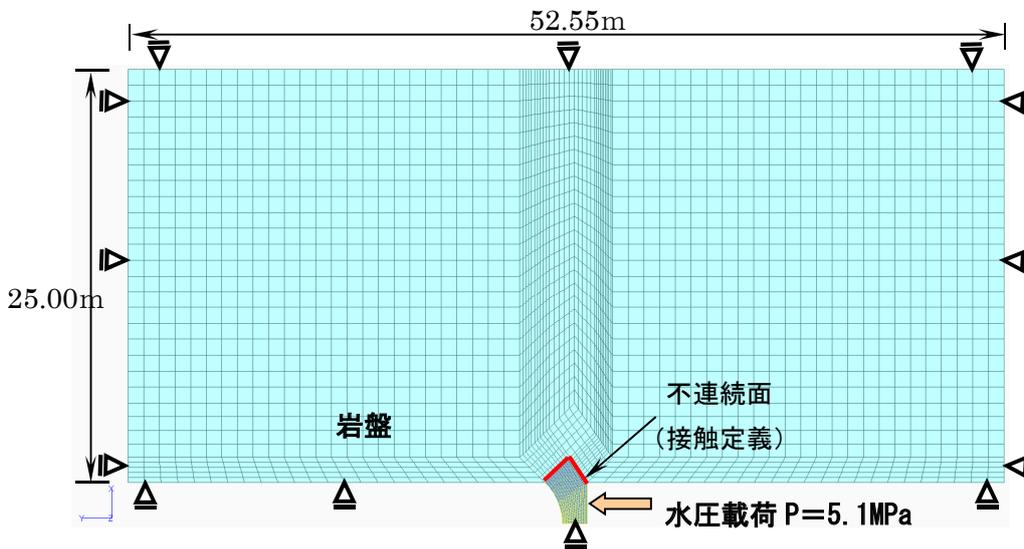


図 4.5-4 二次元解析モデル

表 4.5-8 二次元解析による応力最大・最小値

場所	最大主応力 (MP a)		最小主応力 (MP a)	
	最大値	発生場所	最大値	発生場所
止水壁	3.160	中央断面	-10.93	前面先端部
岩盤	2.324	止水壁の頂部と接する場所	-5.668	止水壁の前面先端部と接する場所

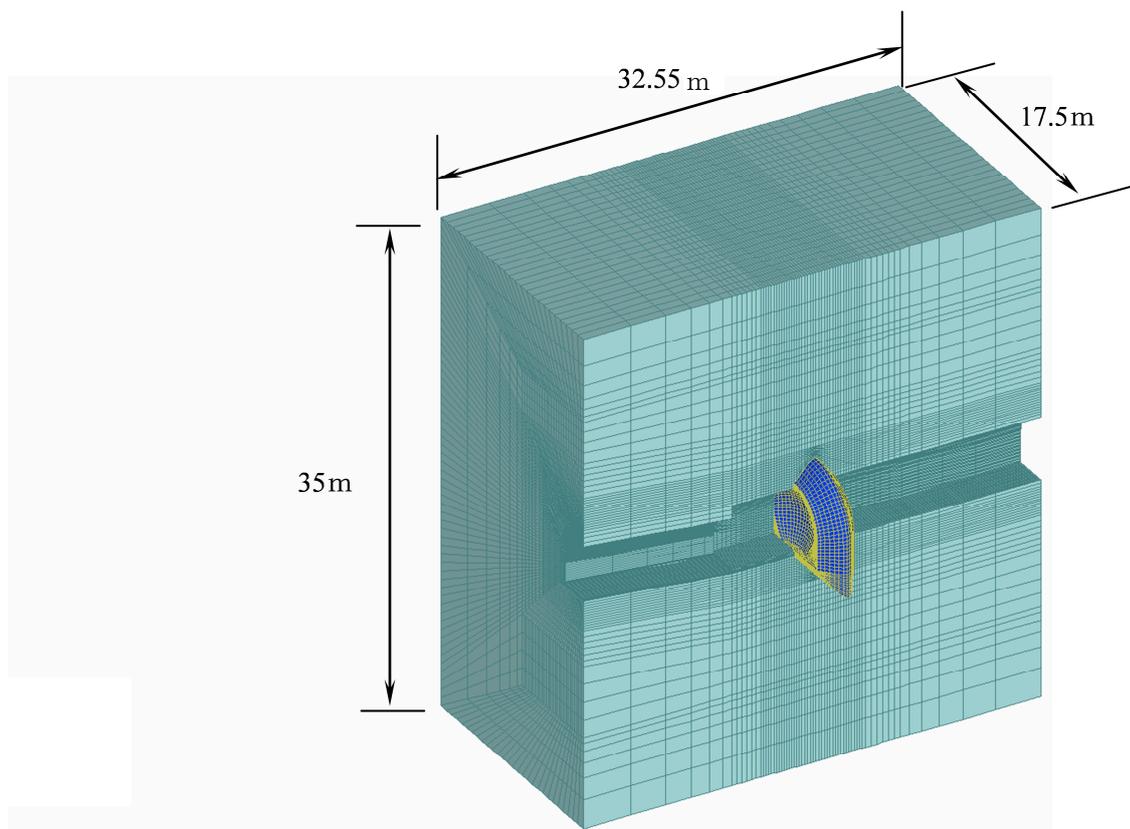


図 4.5-5 三次元解析モデル

表 4.5-9 三次元解析による応力最大・最小値

摩擦係数	最大値	
	最大主応力 (MP a)	最小主応力 (MP a)
$\mu = 0.1$	4.216	-9.175
$\mu = 0.6$	4.110	-9.088
$\mu = 1.0$	4.049	-9.037

(5) マンホールの設計

鋼製マンホール設計を行う。以下に概要を述べる。設計検討書の詳しい内容については、付録Ⅲを参照されたい。

設計方法については、先に述べたとおりである。ANGAS のマンホールを参考に設計作業を進めた。先にも述べたように、ANGAS と比較して荷重が小さいことから、鋼材については全体として裕度のある設計となっている。

設計結果をもとに作成した材料表を表 4.5-10 に、組立図を図 4.5-7 示す。総鋼材重量はボルトナットを除いて 3,910kg となった (マンホールふたは 1 ケのみをカウント)。

表 4.5-10 マンホール材料表

部材記号	名称	寸法	材質	数量	重量(kg)	記事
8	ノズルフランジ	外径 φ605/内径 φ317.6×(165.1+6.4)L	JIS G3202 FSVC2A	1式	140	JPI-600クラス 350A突合せ溶接形
7	エルボ	外径 φ355.6/内径 φ317.6×t19.0	JIS B2312 PS480	1式	90	300A 90E(S) sch80
6	ノズル管台	外径 φ414/内径 φ317.6	JIS G3202 FSVC2A	1式	80	
5	スタッドボルト・ナット	M48	JIS G4107 SNB-7	48組	8/組	ねじメートル細めピッチ3
4	マンホールふた板	外径 φ11806×t(110+7)	JIS G3204 SFVQ2B	2式	1060/ケ	
3	マンホールフランジ	外径 φ1180/内径 φ800×230L	JIS G3202 FSVC2A	2式	550/ケ	
2	気密材取付ハブ	外径 φ1400/内径 φ800×469L	JIS G3202 FSVC2A	1式	1000	
1	内筒	外径 φ850/内径 φ800×t25	JIS G3103 SB480	1式	1000	2枚割り

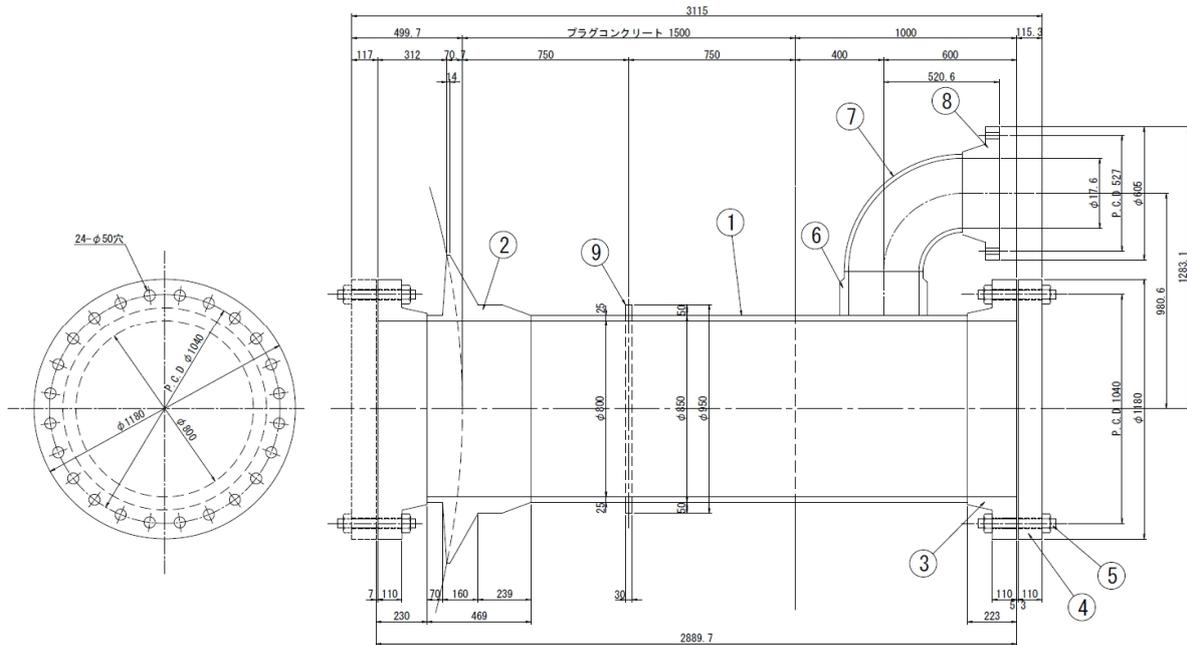


図 4.5-7 マンホールの設計結果 (組立図)

(6) コンタクトグラウトの検討

コンクリート硬化時に岩盤との間に空隙が発生することが予想され、止水壁外周面と岩盤の境界の止水性が低下することが懸念される。それを防止するためには、止水壁と岩盤の間にコンタクトグラウトを施工することが有効であると考えられる。

ここでは、そのコンタクトグラウトの配管、材料、注入制御等について検討を行った。参考として、図 4.5-11 に原子力機構幌延深地層研究施設における人工バリア性能試験で計画実施中のコンタクトグラウト（クーリング配管計画を含む）計画図を示す。

止水壁コンクリートと岩盤（吹付けコンクリート）との接触面よりの漏水を防止する目的で、接触面（止水壁コンクリート～吹付けコンクリート及び吹付けコンクリート～岩盤）の空隙をセメントミルクにより充填、閉塞するものである。

止水壁のコンタクトグラウトについては標準的な基準はない。このためダム関連（仮排水路閉塞や堤体コンクリート打ち継ぎ目）の事例や LPG 地下岩盤タンクの止水壁施工事例を参考とし、現地特性を考慮して以下のように検討した。

(a) 事前の対応について

コンタクトグラウト施工の前段階で極力境界面の空隙を低減する方策及びコンタクトグラウトの効果を発揮できるような方策を実施しておくことが重要である。

- ・吹付けコンクリート背面空洞を調査し、除去する。
打音検査により、もし異音（空洞音）の箇所があれば当該吹付けコンクリートを事前に撤去しておく。
- ・周辺岩盤、吹付けコンクリート面にエア溜まりができないように事前に整形しておく。
上部がくぼんだ形状の箇所などをなくす。
- ・止水壁躯体内部の工作物に関してもエア溜まりがないよう設置する。
アングル（鋼材）の下方が凹んだ配置などは避ける。
- ・高流動コンクリートを使用して充填性を高める。
特に隅角部や工作物の背面などに対し、締固めフリーとする。
- ・止水壁躯体両棲部にグラウトストッパーを施工する。
水膨張シールを選定（下地の平滑化処理が前提）。

(b) コンタクトグラウト注入孔（吐出口）の配置

止水壁境界面の周方向に連続的に止水ゾーンが形成されれば目的が達成される。以下の留意点に基づき注入孔及び配管ラインを検討する。

- ・注入孔はφ30mm程度、深さ300mm程度、吹付けコンクリートを貫通して岩盤まで貫通させる。注入管はφ19mm、孔口は仮閉塞し注入圧で容易に開放できる構造とする。
- ・注入孔の配置密度は1孔/2m²程度とする。
- ・各配管系統の吐出側、排出側双方にバルブを設置し、閉塞時に圧力計を設置できる構造とする。
- ・他の系統からのリーク時に水通し（注入路の確保）可能なリターン配管とする。
- ・最頂部に独立のエア抜き管を配置する。
- ・再注入バルブ（冠水試験時の漏水対策）は一次コンタクトグラウト孔の中間に配置する。

コンタクトグラウト注入孔と配管系統の配置は以下のように行う。(図 4.5-9)

A 系統	8 孔			坑道底盤-1.0m
B(L)系統	2 孔	B(R)系統	2 孔	坑道底盤+0.5m
C(L)系統	2 孔	C(R)系統	2 孔	坑道底盤+2.0m(SL)
D(L)系統	2 孔	D(R)系統	2 孔	坑道底盤+3.5m
E 系統	4 孔			坑道底盤+5.0m
T (エア抜き)				頂部
計 8 系統	24 孔	エア抜き	1 孔	

※ L : 切羽に向かい左, R : 切羽に向かい右を示す。

(c) 注入材, 注入濃度, 注入圧力, 注入吐出量

注入材 超微粒子セメント

注入濃度 1 : 4, 1 : 2 1 : 1 の 3 配合を水押し時のリーク状況に応じ使用
最終は 1 : 1 濃度で仕上げる。

注入圧力 最大 1.0MPa (湧水がある場合は湧水圧+0.5MPa かつ 1.0MPa 以上)

注入吐出量 最大 10L/分

(d) 水押し試験

下部の各系統より順次水押し試験を実施する。

各ラインのバルブは全開より開始し, 次のステップの下部より順次閉塞して, その都度リーク状況及びほかの配管系統へのリーク状況 (漏水個所と漏水量) を把握する。

(e) 漏水個所の処置

急結モルタルによりコーキングを行う。

(f) 注入手順

基本的な方針は以下のようである。

- ・全孔バルブ開放で下部系統より順次注入を行う。
- ・壁面へのリークに対しては急結モルタルでその都度コーキングを実施する。
- ・他の系統へのリークについては, 所定濃度の注入材の到達を確認して閉塞。所定濃度に到達しない場合は水通し洗浄により注入系統を確保する。
- ・リークした隣接配管系統については硬化前に (6 時間以内) に注入を実施する。

以上のように下部より順次確実に充填を行いつつ頂部に到達する考え方である。

コンタクトグラウトの注入手順は以上の基本方針にかかわらず注水試験の結果に基づき見直すことも必要である。

(g) グラウトストッパー

コンタクトグラウトの壁面側へのリーク防止の目的でグラウトストッパーを施工する。

設置理由は以下の通り。

- ・コンタクトグラウト注入材は微細な間隙への浸透性，恒久的な耐力，高強度が要求されるため，懸濁型注入材（超微粒子セメントミルク）を使用し，急結性（早期の硬化性能ーゲルタイム）は持たない。
- ・特に岩盤（ないし吹付けコンクリート）との接触部での壁厚は 2.5m と非常に薄く，外部へのリークが問題となる恐れがある。

事前に止水壁の両側棲部全周にグラウトストッパーを施工する。配置図を図 4.5-8～図 4.5-9 に示す。

以下のような特性があり，ここでは，坑壁の凹凸に追従性が高く，施工が簡便な膨潤シールタイプを選定する。

①止水板方式

コンクリート相互の打継目に対しては一般的であるが，岩盤などとの境界部に対しては特殊な設置方法が必要となる。（波方の事例ーアングル鋼材を設置）

凹凸が激しい場合は設置が難しい。確実な設置が行われれば止水効果は比較的良好。

②膨潤シール方式

プレキャストコンクリート相互の止水によく使用される。打継ぎ箇所の後設置用途にも使用可能な膨潤シールが開発されている。この特徴としては，コンクリートの硬化にあわせてシールが膨潤し（少し遅いまたはアルカリ性の水に対し反応），シールの変形や蛇行が発生しにくい。事例としてはダムコンクリート打設打継目のグラウトストッパーとして使用されている。（型枠撤去後の平滑な面での使用である）

利点はある程度の凹凸に対する追従性があり，設置が比較的容易である。一方で膨張圧でシールされているためグラウト圧に対する抵抗力のばらつきが懸念される。

いずれの方式も完全なリーク防止は難しく，試験的な水押し試験によるリーク箇所は現場対応で急結モルタルなどで追加的な対処が必要である。

当該止水壁に対しては凹凸に対する追従性を考慮して，水膨張シール方式を採用する。

（参考）水膨潤シール材

ネオスパンシール DSW-0930-TG（早川ゴム株式会社）

遅延膨張タイプ（コンクリート硬化後膨張） 0.5MPa までの耐圧試験

アクアシージェイ CJTA-0725-3K（シーアイ化成株式会社）

アルカリ水反応遅延膨張タイプ 0.3MPa までの耐圧試験

（参考）下地処理材

弾性エポキシ樹脂 アルプロン SW-104（日米レジン株式会社）¹⁹⁾など

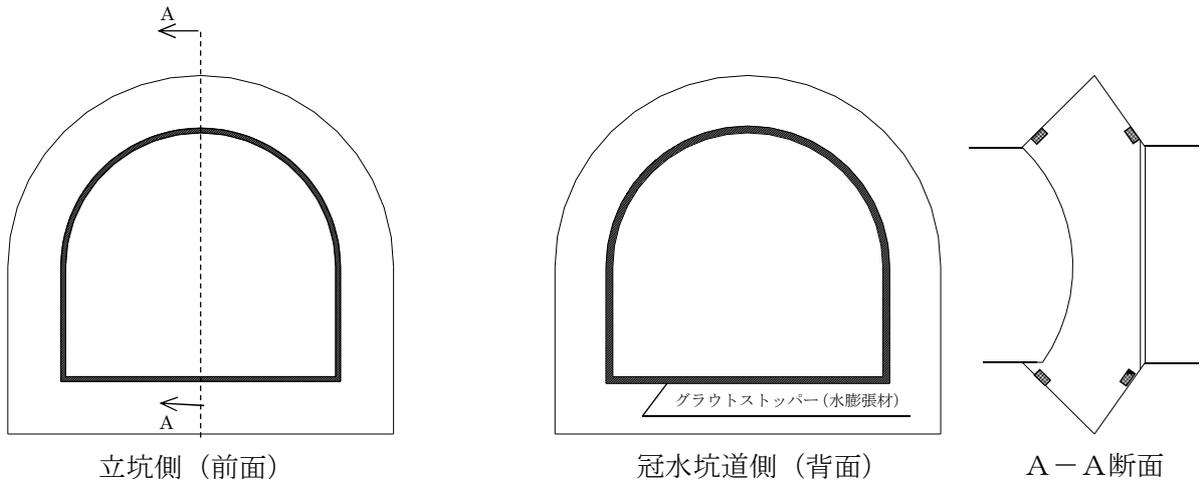


図 4.5-8 止水壁グラウトストッパー配置図

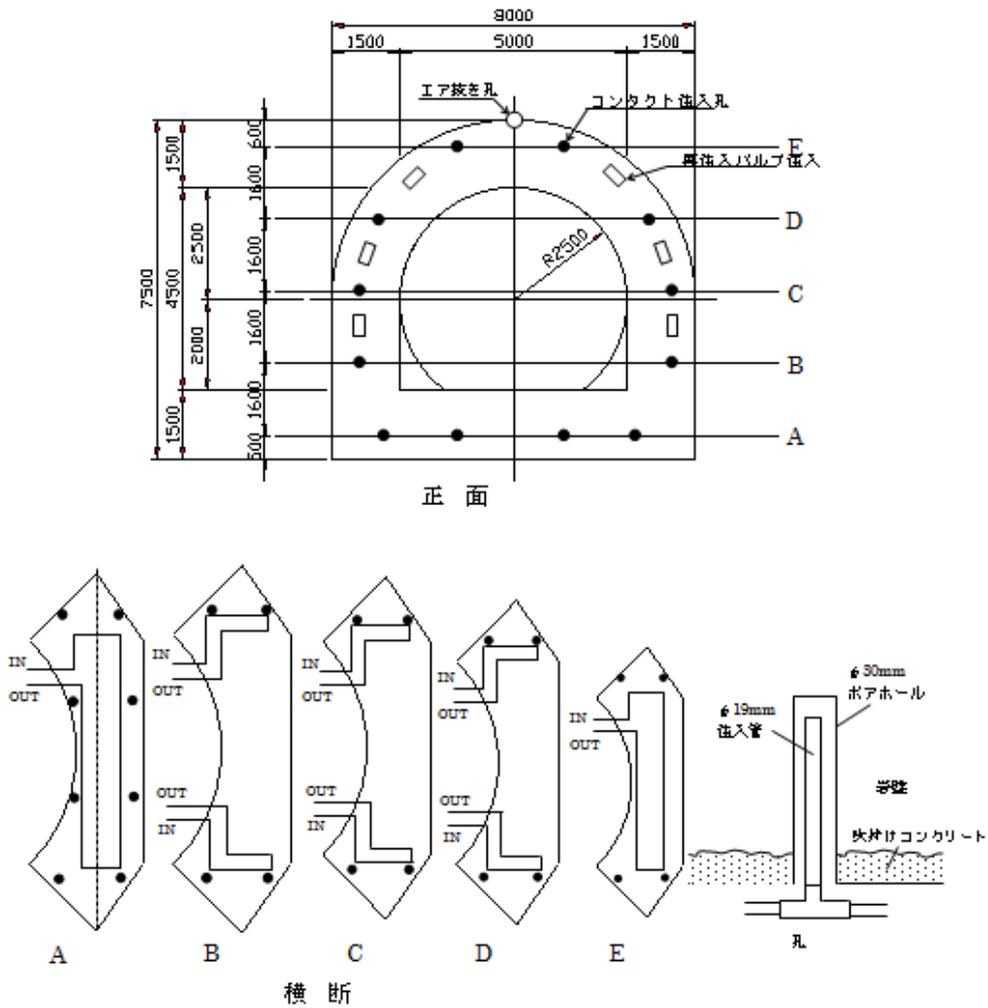


図 4.5-9 注入孔・注入管配置図

(h) 各仕様案

注入フローを図 4.5-10 に示す。

1) コンタクトグラウト配管仕様 (図 4.5-11)

亜鉛メッキ鋼管 $\Phi 19.1 \times 1.6$ t

同上伸縮エルボー (45° , 90° , 伸縮チーズ, 伸縮カップリング)

注入孔 $\Phi 50$ mm 深さ 200mm (吹付けコンクリートを貫通して岩盤内に挿入)

2) 再注入バルブ仕様

再注入用ベントバルブ 10 箇所

配管 亜鉛メッキ鋼管 $\Phi 38.1$ mm

3) 水押し試験仕様

最大注水圧 湧水圧+0.5MPa (かつ 1.0MPa 以上)

最大注水量 10L/分

- ① 全バルブを解放し湧水量を測定。
- ② 湧水系統のバルブを閉じ湧水圧を測定する。
- ③ 下段系統から順に注水を開始。
- ④ 壁面及びリーク配管系統の湧水量 (流量) を測定。

4) 注入仕様

最大注入圧 湧水圧+0.5MPa (かつ 1.0MPa 以上)

最大注入量 10L/分

注入材 超微粒子セメント

配合 (濃度) 1 : 4 1 : 2 1 : 1 の3種類とする 最終は必ず 1 : 1 とする。

切換え基準 水押し注水量が 0 以上 1 : 4 より注入開始

水押し注水量が 0 の場合 1 : 1 より注入

リターン側バルブ閉塞は注入濃度に近い濃度を確認して行う。

(概ね注入濃度の 90%程度)

5) 完了基準

最終濃度は 1 : 1 とする

注入量 0 の後 30 分のダメ押し注入を行う。

6) 別配管系統の対策・処置 (リーク時)

注入濃度に対し十分な濃度を確認した後閉塞する。(概ね注入濃度の 90%程度)

硬化前 (6 時間以内) に最終濃度で再注入

※濃度上昇のなかった配管系統

硬化前に水通し洗浄後注入を行う。

7) 壁面へのリーク対策

リークの都度急結モルタルによりコーキングを行う。

リークの状態によっては注入の抑制, 中断処置を行う。

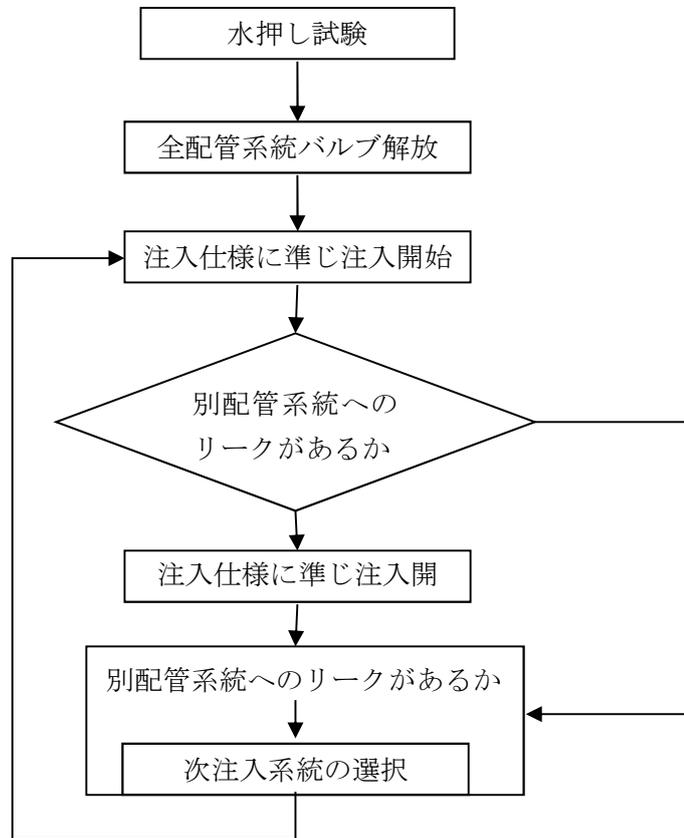


図 4.5-10 注入フロー

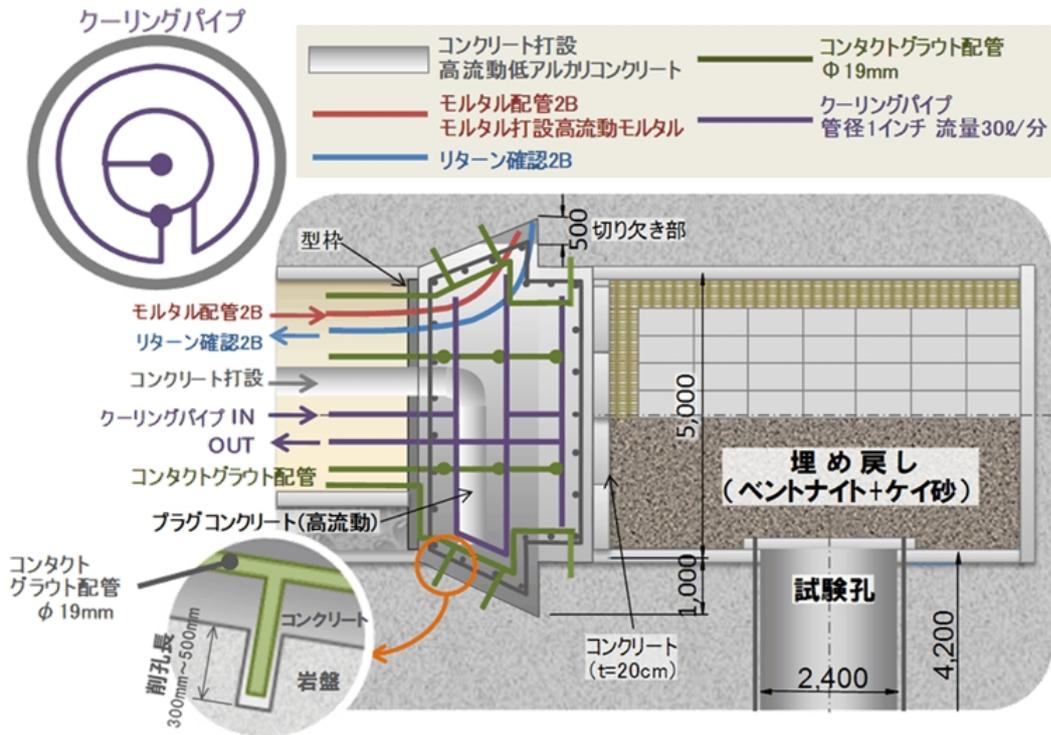


図 4.5-11 コンタクトグラウト計画例

(7) 止水壁表面及び岩盤・吹付けコンクリート境界部の止水・防水対策工

長期的な劣化に伴う止水性能の低下及び水圧作用時の微小な変位による止水機能の低下の懸念に対し止水壁表面及び岩盤境界部，貫通部材周囲などに対する対策を検討する。

止水壁本体については高流動コンクリートの採用とひび割れ対策などにより，漏水要因は極力排除する。また岩盤（吹付けコンクリート）接触部境界はコンタクトグラウトにより十分な止水性は確保できると考える。貫通する主要配管についても境界部の水みちの遮断処置が実施される。これらの対策により短期的には十分な止水が達成できると考えられる。

長期的な要因や環境変化に伴う懸念としては以下のようなものがある。

- ・冠水抗道内の水圧の作用に伴う岩盤と止水壁の相対的な変位の発生
- ・水圧や温度変化による貫通部材の変形，変位
- ・長期的なコンクリートの変質，劣化
- ・長期的な岩盤の劣化

以上のような懸念に対し今回の試験は比較的短期的であり，追加の対策を講ずる必要性は小さいと思われるが，将来の長期的な機能確保を考慮して試験的に実施する意義はあると考える。

(a) 止水壁コンクリートの表面防護と改質（表面止水工）

止水壁表面の風化変質防護と積極的なコンクリート表層の改質・緻密化を兼ねた表面止水工を前面にわたり実施する。施工範囲を図 4.5-12 に示す。

コンクリート改質剤はシラン系，ケイ酸塩系などあり，微細な亀裂，空隙に浸潤してコンクリート内部のカルシウムなどの物質と反応して止水効果，緻密化の効果があるとされる。

施工対象：止水壁両側全面，吹付けコンクリート（止水壁両側 1m間全面）
 施工時期：残留配管の切断，防護処理終了後
 使用材料（参考）：塗布型透水性防水材「ハイドロモルタル EX²⁰」または同等品
 施工方法（参考）：メーカー仕様に従い 1.5kg/m²の 2回塗り（刷毛）

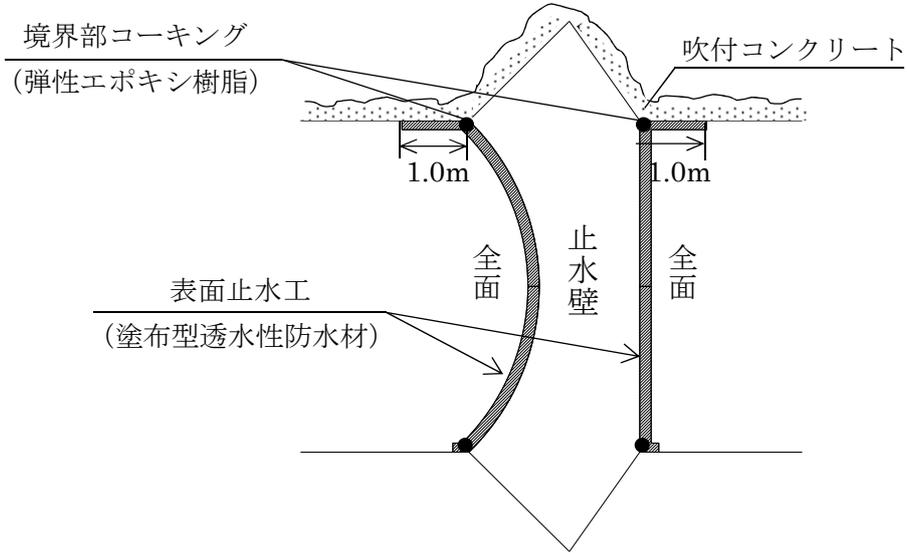


図 4.5-12 表面止水工施工範囲

(b) 止水壁と岩盤（吹付けコンクリート）境界部外周コーキング

止水壁と外周岩盤・吹付けコンクリートとの境界外周部の長期的な観点からの止水対策として，弾性があり耐久性の大きなコーキング剤を選定する。コーキング箇所を図 4.5-13 に示す。

施工対象：止水壁と岩盤・吹付けコンクリートとの境界外周部の立坑，水室両側全周
 施工時期：コンタクトグラウト終了後
 使用材料（参考）：弾性エポキシ樹脂「アルプロン SW-104¹⁹」または同等品
 施工方法（参考）：メーカー仕様に従い，可使時間内に施工箇所に圧着する

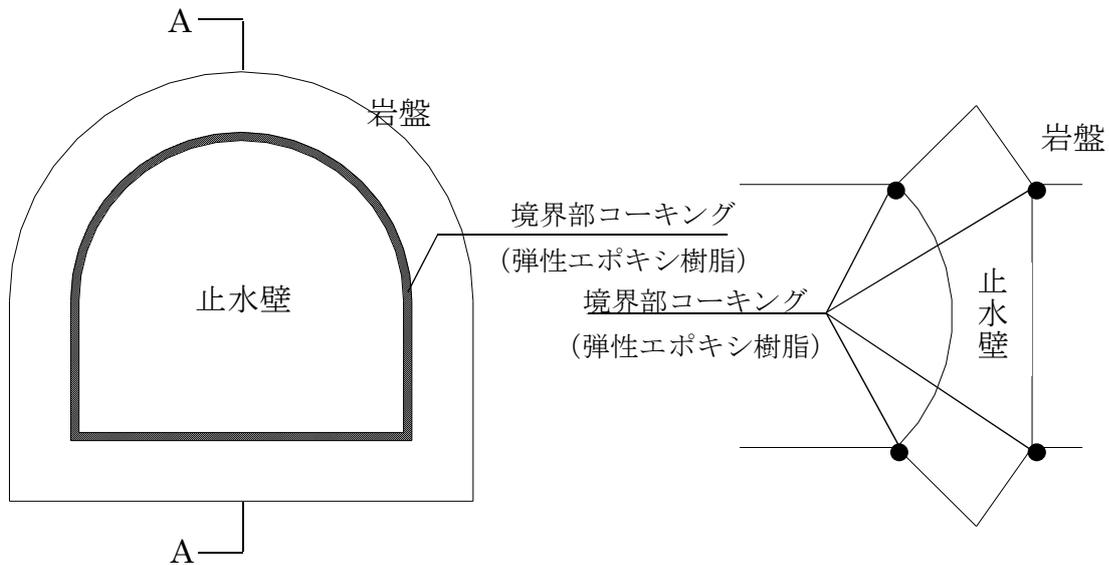


図 4.5-13 止水壁境界部コーキング箇所

(c) 貫通配管の止水壁表面部分の境界外周部コーキング

施工対象:マンホール, 計測, 新合繊他各種配管, 注水・排水管, エア抜き管

施工時期: 止水壁打設終了脱型後

使用材料 (参考): 弾性エポキシ樹脂「アルプロン SW-104¹⁹⁾」

施工方法 (参考): メーカー仕様に従い, 可使時間内に施工箇所に圧着する。

(d) 貫通部材切断部の止水壁表面での処置

施工対象: コンクリート管 (打設用), クーリングパイプ配管, コンタクトグラウト配管

施工時期: 使用後の貫通部材を切断処理後

使用材料 (参考): 弾性エポキシ樹脂「アルプロン SW-104¹⁹⁾」

施工方法 (参考): メーカー仕様に従い, 可使時間内に施工箇所に圧着する。

コーキング箇所の例を図 4.5-14 に示す。

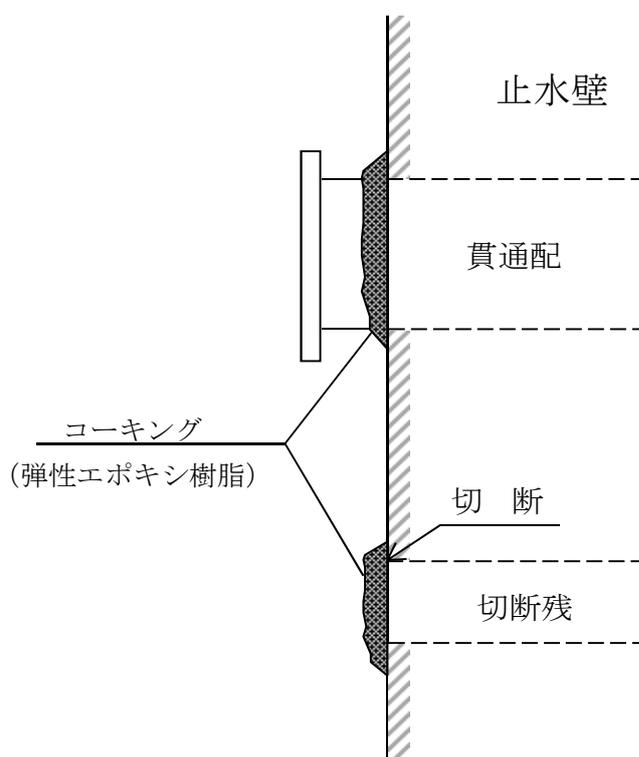


図 4.5-14 配管及び残留部材 (切断) コーキング箇所

(8) 計測計画

止水壁については、施工管理、設計の妥当性確認、冠水試験における解析評価および今後の類似事例に反映する知見を得るための計測を行うことを提案する。

止水壁での計測項目と目的を表 4.5-11 に仕様例を表 4.5-12 に示す。また、配置案を図 4.5-15 に示す。

その他、冠水試験中は、止水壁支持岩盤の計測（ひずみ、AE、変位など）を行う事により、総合的な評価が可能となる。

表 4.5-11 止水壁計測計画案

計測対象	計測位置	計器・数量	目的
練上り後のコンクリート温度	プラントバッチから採取	温度計 1本(適宜)	コンクリートの製造管理, プレクーリング管理(実施する場合のみ)。
打設前のコンクリート温度	筒先から採取	温度計 1本(適宜)	コンクリートの製造管理, パイプクーリング管理(実施する場合のみ), 温度応力解析の入力値取得。
硬化時のコンクリート温度	止水壁上部・下部(肉厚部), 中央部(肉薄部)	熱電対 6個	パイプクーリング管理(実施する場合のみ), 温度応力解析の入力値取得。
硬化時のクーリングパイプ温度	パイプ入口・中間・出口	熱電対 3個	パイプクーリングを実施する場合のみ。
鉄筋のひずみ	構造設計上クリティカルな中央, 周辺肉厚部など	鉄筋歪計 7か所	設計の妥当性確認, コンクリート温度評価管理の妥当性確認と応力評価(ひび割れ予測), 作用荷重の推定。
コンクリートの有効応力	鉄筋のひずみと同様	有効応力計 7か所	鉄筋のひずみと同様。
止水壁から岩盤への荷重伝達	止水壁中央上部・下部・左右切込部(内外)	土圧計 8箇所	構造モデルの妥当性確認, 作用荷重の推定, 載荷-除荷サイクルにおける荷重開放確認。
止水壁変位	止水壁中央・上下縁部2箇所(坑道側)	変位計 5箇所	構造モデルの妥当性確認, 載荷-除荷サイクルにおける変位確認。
止水壁と岩盤の離れ	止水壁外縁部4箇所	継目計 8個	構造モデルの妥当性確認, 載荷-除荷サイクルにおける変位確認(止水壁の, 倒れ, 横ブレ)。
漏水量	漏水が認められたところ	収集・計量	漏水量を把握して冠水試験の境界条件を明確にする, 止水対策のデータとする。

表 4.5-12 止水壁計測機器例

種類	仕様	数量	備考
変位計	容量 10mm 程度	5	防水タイプ
コンクリート有効応力計	測定範囲 20N/mm ² 程度	7	同上
土圧計	容量 2MPa 程度	8	同上
鉄筋計	揚力 300N/mm ² 程度	7	同上
温度計	測定範囲 -20℃～100℃, 精度 0.1℃	6	同上
継目計	測定範囲～5mm	8	同上

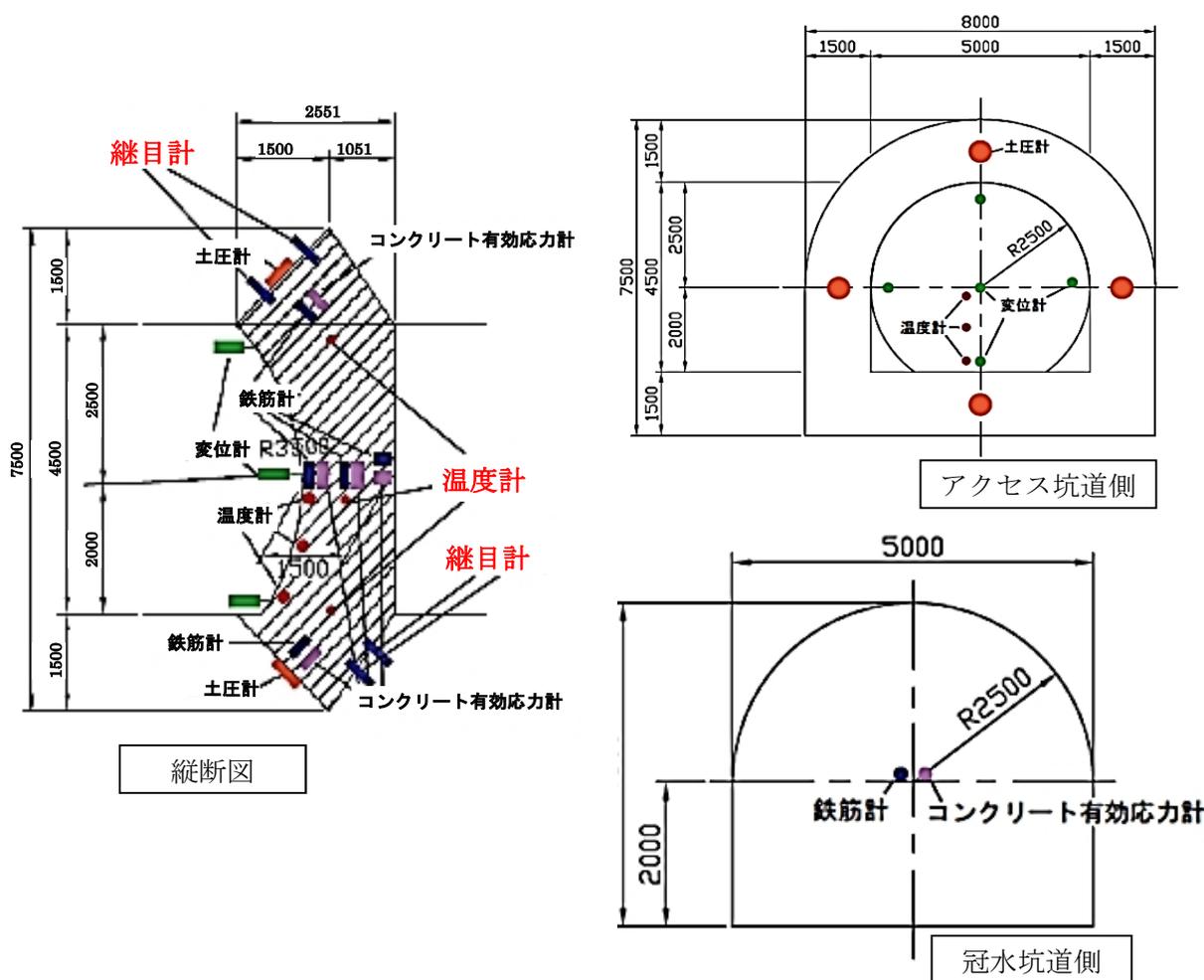


図 4.5-15 計器配置案

4.5.3 今後の研究課題

これまでの検討結果をもとに、平成 26 年度以降の止水壁設置までに検討が必要な事項を整理するとともに課題を抽出する。我が国では、実績の多くないシステムであることから、止水壁設置前・後両方にわたる種々の研究を行う事を提案する。特に、コンクリートの物性取得等については、比較的長い時間を要するため、止水壁設置に先行して早目の着手が望ましいことから、やや詳細にわたる試験方法をあげた。

(1) 調査・試験

(a) コンクリート関連

止水壁コンクリートについては、2種類の配合の提案をしたが、これらについて、平成 25 年度の検討を基にした配合決定試験および実機製造試験を中心とした、下記のような事項が実施課題となると考えられる。

- ・平成 25 年度成果および施工計画を基にしたコンクリートの要求性能の精査
- ・使用材料の検討、および室内配合選定試験
- ・基礎物性取得試験（フレッシュ性状、発熱特性、強度発現性、収縮特性など）
- ・プレケーリング手法の検討、および温度依存性に関する試験検討
- ・実機（現場プラント）製造試験、および施工性確認試験（ポンプ圧送性、充填性など）

このうち、実施工に先立って実施する必要がある、比較的長い時間を要する室内配合試験について、先に述べた2種の配合について、試験計画案を詳細に検討したものを下記に示す。

1) 低アルカリ性・低収縮・高流動コンクリート

「低アルカリ性セメント」とは、ポルトランドセメントの一部にフライアッシュやシリカフェュームを多量に混合したものであり、硬化後に長期にわたって相対的に低アルカリの環境が保持できることから、岩盤や人孔バリア材（ベントナイト系材料）に対してアルカリ影響の少ないコンクリート構築物が施工できるという特徴がある。中でも JAEA とで開発した HFSC424（ポルトランドセメント 40%、シリカフェューム 20%、フライアッシュ 40%を混合した "Highly Fly ash Silica fume Cement"）は、これまでも吹付コンクリート、覆工コンクリート、岩盤グラウト、埋戻し材等への適用が試行・検討されており、地層処分において実用性の高い技術として期待されている。

ここでは、この HFSC424 を用いた「止水壁用の高流動コンクリート」の配合技術等に関する検討概要について示す。

i) 低アルカリ性・低収縮・高流動コンクリートの概要

<配合検討の基本仕様、(表 4.5-13)>

- ・低アルカリ性：HFSC424（LPC：SF：FA＝40：20：40）
- ・高強度配合（設計基準強度：50～60N/mm²程度、材齢 91 日想定）
- ・高流動性（充填性のランク：ランク 1、目標スランプフロー：65±7.5cm、空気量：4.5%程度）
- ・低収縮性（長期の収縮補償コンクリート、低熱ポルトランドセメント・膨張材を併用）
- ・材料条件：現地通常使用の粗骨材・細骨材・FA・LPC 等

表 4.5-13 使用材料案

使用材料		記号	銘柄 (例)	物性 (例)
低アルカリ セメント HFSC424	低熱ポルトランドセメント	LPC	住友大阪, 太平洋, 宇部三菱	3.22 g/cm ³
	シリカフェーム	SF	JIS A 6207 (エルケム社製)	2.22 g/cm ³
	フライアッシュ	FA	JIS A 6201 II種規格品	2.25 g/cm ³
膨脹材		Ex	太平洋マテリアル社製	2.91 g/cm ³
細骨材		S	岐阜県恵那市矢作川産 (未定)	2.64 g/cm ³
粗骨材		G	同上 (未定), Gmax:20mm	2.68 g/cm ³
石灰石微粉末		Lp	粉末度 3500 ブレーンクラス	2.71 g/cm ³
高性能 AE 減水剤		SP	ポリカルボン酸塩系	—

※ 物性値は過去の一例

ii) 標準配合の選定

変更があるものの、暫定的な配合例を 表 4.5-14 に示す。

① 単位水量, 混和剤添加率, 最適細骨材率, 膨脹材混入量等の検討

【検討項目】フレッシュ性状 (スランプフロー(図 4.5-16), 空気量, U型充填性(図 4.5-17)), 材料分離抵抗性 (目視)

表 4.5-14 暫定配合

W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
		W	HFSC (424)			EX	LSP	S	G	SP
			LPC	SF	FA					
28.0 ~ 34.0	47.0 ~ 51.0	165 ~ 175	525~550			15~23 (試験練り で調整)	試験練り で決定	767	773	6.3~6.6 程度 (P×1.2%程度)
		210 ~ 220	105 ~ 110	210 ~ 220	~			797	802	

※ 試験練りの結果で変更あり

② 基礎物性の検討

【試験項目】

- ・フレッシュ性状 (経時変化を含む), 凝結特性, ブリーディング性状
- ・自己収縮歪(図 4.5-18), (乾燥収縮歪: 必要な場合), 膨脹率
- ・熱特性: 線膨張係数, 比熱, 熱伝導率, 断熱温度上昇特性 (K, α など) (図 4.5-19)
- ・強度発現性: 圧縮強度, 割裂引張強度, 静弾性係数, ポアソン比
- ・透水係数 (Input 法)



図 4.5-16 JIS スランプフロー試験

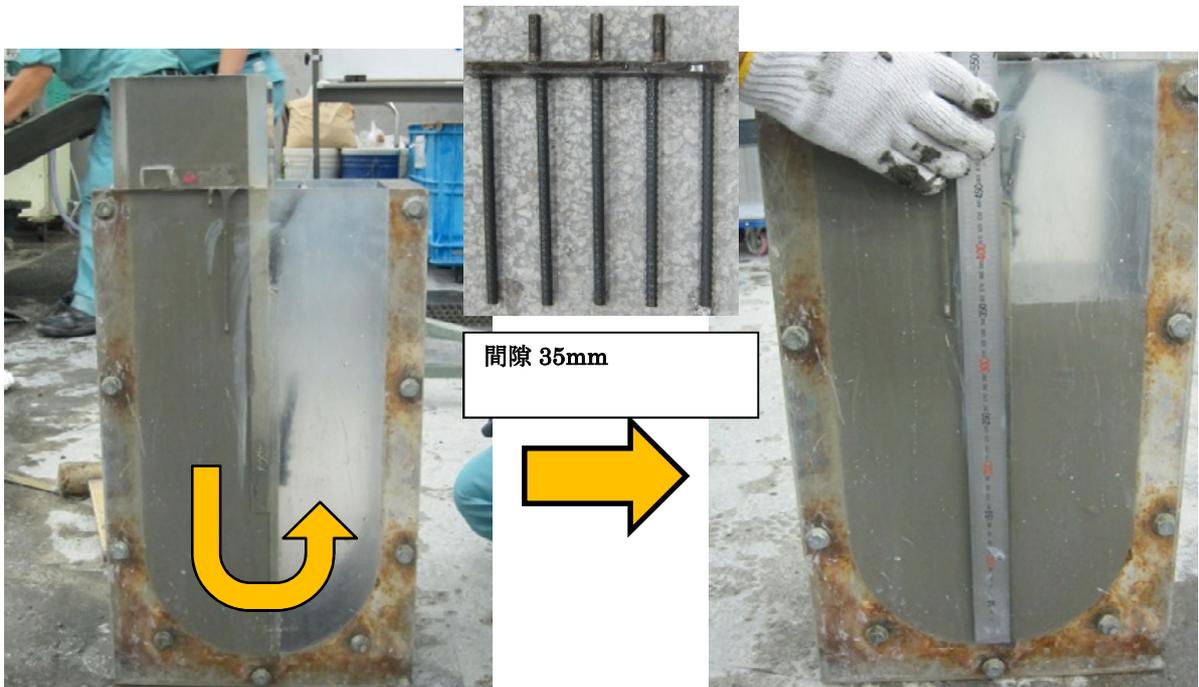


図 4.5-17 JSCE U型充填性試験（間隙通過性試験）

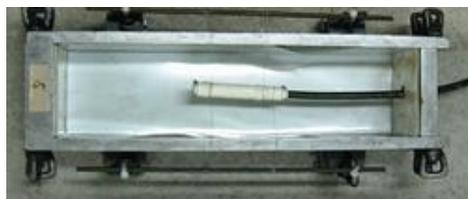


図 4.5-18 自己収縮歪計測手法の事例
($10 \times 10 \times 40$ cm 供試体, ひずみ計)



図 4.5-19 断熱温度上昇試験装置 (空気循環式の例)

iii) 実機試験練りでの物性確認

室内試験で決定された配合を基本に, 実機試験練りを行って, 最終配合を確定する。

【試験要因】温度条件: 2段階【実施工時温度 (10~15°C, 標準温度 (20°C程度)】

【検討項目】・フレッシュ性状, 凝結特性, 膨張率, 自己収縮歪など
・強度特性: 圧縮強度, 割裂引張強度, 静弾性係数など

iv) 水和熱に伴う温度膨張・収縮量の評価, および発生応力に関する解析的検討

室内試験で得られた強度特性や熱特性を用いて, 実規模での収縮量の算定や, 温度応力解析による評価を行い, 硬化後の健全性 (ひび割れ発生の有無), 岩盤と止水壁の一体性, 間隙の水密性などの定量評価を試みる。

v) クーリング手法に関する解析的検討

今後, 温度応力解析で得られた結果をベースに, 止水壁コンクリートのクーリングの要否や実施レベル, およびクーリングの効果を定量検証する。

【クーリングの種類】①コンクリートのプレクーリング (打込み前の冷却)
②打設後のパイプクーリング (冷却水循環による手法)

vi) 既往の検討例

W/B=29~35%程度の HFSC 高流動配合で得られた物性例を以下 表 4.5-15 に示す。

表 4.5-15 フレッシュコンクリートの試験結果の一例
(W/B=29~35%, Ex 併用あり, Lp 使用なし)

スランプ フロー (mm)	0 ロート 流下時間 (s)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	コンクリート 温度 (°C)	ブリーディ ング率 (%)	凝結時間 (h-m)	
						始発	終結
640 ~ 690	3.5 ~ 5.0	4.0 ~ 5.0	2, 280 ~ 2, 320	23	0	11-40	15-50

W/P=45%の硬化コンクリートの試験で得られた物性例を以下 表 4.5-16 に示す。

表 4.5-16 硬化コンクリートの試験結果の一例
(W/P=45%, Ex 併用なし, Lp 使用配合)

物性値	単 位	材 齢 (日)				
		1	7	28	56	91
圧縮強度	N/mm ²	1.30	9.71	41.0	55.3	67.4
静弾性係数	kN/mm ²	—	22.8	37.9	38.1	39.5
割裂引張強度	N/mm ²	—	—	3.58	3.94	4.58
自己収縮ひずみ	10 ⁻⁶	126	234	238	261	301
長さ変化	× 10 ⁻⁶	—	211	293	347	365
透水係数	× 10 ⁻¹³ cm/s	—	—	0.13	0.04	0.01

2) 低収縮性高流動コンクリート

i) 低収縮性高流動コンクリートの概要

< 配合検討の基本仕様(表 4.5-17) >

- ・ 高強度配合 【設計基準強度：50～60N/mm²程度，材齢 56 or 91 日】
- ・ 高流動配合 【自己充填性 (JSCE 基準_U 型充填性試験)：ランク 1，
目標スランプフロー：70±5cm 程度，90 分程度以上保持すること，
目標空気量：4.5±1.5%程度，90 分程度以上保持すること】
※粉体材料として石灰石微粉末を，材料分離低減の目的で分離低減剤等を併用
- ・ 低収縮性 【長期の収縮補償コンクリート：低熱ポルトランドセメント+膨張材の組合せ
で 150 μ 程度までの収縮を補償する。】
- ・ 他の材料条件：現地サイトで通常のコンクリートに使用している粗骨材・細骨材を使用

表 4.5-17 使用材料一覧

使用材料	記号	銘柄等(一例)	物性(一例)
低熱ポルトランドセメント	LPC	住友大阪, 太平洋, 宇部三菱他	3.24 g/cm ³
膨張材	Ex	太平洋 ハイパーエクспан M	3.16 g/cm ³
石灰石微粉末	Lp	粉末度 3500 プレーン級(未定)	2.71 g/cm ³
細骨材	S	岐阜県恵那市矢作川産(未定)	2.64 g/cm ³
粗骨材	G	同上(未定), Gmax:20mm	2.68 g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸塩系(標準型)	—
分離低減剤	V	武田薬品 ビオポリー(未定)	—
水	W	水道水	—

※ 銘柄，物性値等は過去の一例を示す。

ii) 標準配合の選定

変更があるものの、暫定的な配合例を表 4.5-18 に示す。

① 単位水量, SP 添加率, 最適細骨材率等の検討

【試験項目】

フレッシュ性状の確認 (代表の 5 配合で 90 分までの経時変化性状の確認を含む)。

- ・スランプフロー, 50cm フロー時間, フロー静止時間
- ・空気量, 単位容積質量 (エアメータによる)
- ・練上り温度 (室温は標準 20℃とする)
- ・U 型充填性 (充填高さ, 充填時間)
- ・材料分離抵抗性 (写真撮影, 目視)
- ・硬化性状の予備確認 (代表の 6 配合のみに限定して実施)
- ・圧縮強度の発現性 (材齢 7 日, 28 日, 56 日)

表 4.5-18 標準配合選定における暫定配合

水粉体比 W/P (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	LPC	EX	LSP	S	G	SP
29.0~35.0	40.0~46.0	48.0~52.0	170~ 175	350~ 418	15~23 (試験で決定)	200~ 250	760~ 800	750~ 800	P×1.0% 程度

※ 試験練りの結果で変更あり、分離低減剤 V は 0.30kg/m³ 使用

【検討要因】

- ・単位水量 W (2 段階) : 170, 175kg/m³
- ・水結合材比 W/B (3 段階) : 40, 43, 46%
- ・水粉体比 W/P (3 段階) : 29, 32, 35% (上記 W, W/B が固定された代表配合で検討)
- ・細骨材率 s/a (3 段階) : 48, 50, 52% (上記 W, W/B が固定された代表配合で検討)
- ・膨張材混入率 (1 段階) : 20kg/m³ (暫定)
- ・SP 添加率 (2 段階程度, 適宜フロー合せ)
- ・最適な練混ぜ時間の選定
- ・経時変化性状の確認 (代表 5 配合)

【検討ケース】

上記より, 小計 12 配合, 15 ケース 【W₂×W/B₃+W/P₃+s/a₃+調整₃】 + 別途 SP 量調整予備 10 ケース程度 + 経時変化性状確認 5 配合 5 ケース = 全 30 ケース (練混ぜ試験 : 延べ 4 日間) (強度試験 : 延べ 3 日間, 材齢 56 日まで)

② 最適膨張材量の選定

変更があるものの、暫定的な配合例を表 4.5-19 に示す。

【試験項目】

フレッシュ性状の確認

- ・スランプフロー，50cm フロー時間，フロー静止時間
- ・空気量，単位容積質量（エアメータによる）
- ・練上り温度（室温は標準 20℃とする）。

凝結・硬化性状の確認

- ・凝結時間（始発・終結時間）
- ・拘束膨張量（水中養生材齢 14 日まで）
- ・圧縮強度（材齢 7 日，28 日，56 日）

【検討要因】

膨張材 Ex 混入量（4 段階）：15，17，20，23 kg/m³（表-3 の配合参照）

表 4.5-19 最適膨張材量選定における暫定配合

W/P (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	LPC	EX	LSP	S	G	SP
32.0 (試験で決定)	43.0	50.0	175	392	15	140 (試験で決定)	795	807	P×1.0% 程度
32.0 (試験で決定)	43.0	50.0	175	390	17	140 (試験で決定)	795	807	P×1.0% 程度
32.0 (試験で決定)	43.0	50.0	175	387	20	140 (試験で決定)	795	807	P×1.0% 程度
32.0 (試験で決定)	43.0	50.0	175	384	23	140 (試験で決定)	795	807	P×1.0% 程度

※ 試験練りの結果で変更あり

【検討ケース】

上記より，小計 4 配合，4 ケース】+別途 SP 量調整予備 2 ケース程度，予備配合試験に 1 日＝全 6 ケース（練混ぜ・フレッシュ試験：延べ 2 日間）

【試験実施工程】

- ・凝結試験：約半日間（材齢 12 時間程度まで）
- ・膨張率試験：計 6 回（=0，1，3，7，10，14 日），14 日間継続）
- ・強度試験：延べ 3 日間（材齢 56 日まで）

③ 基礎物性の把握

【試験項目】

フレッシュ性状の確認（90 分程度までの経時変化を含む）。

- ・スランプフロー試験（50cm フロー時間，フロー静止時間の計測を含む）。
- ・空気量試験，単位容積質量の計測（エアメータによる）
- ・練上り温度（室温は標準 20℃とする）。
- ・ブリーディング試験
- ・加圧ブリーディング試験

凝結・硬化特性の確認

- ・凝結時間（始発・終結時間）
- ・拘束膨張量試験（水中養生材齢 14 日まで）
- ・自己収縮試験（封緘養生材齢 14 日まで）
- ・断熱温度上昇量試験（K, α など, 材齢 14 日まで）

硬化性状の確認

- ・圧縮強度試験（材齢 1 日, 3 日, 7 日, 28 日, 56 日, 91 日）
- ・割裂引張強度試験（材齢 3 日, 7 日, 28 日, 56 日, 91 日）
- ・静弾性係数試験（材齢 7 日, 28 日, 56 日, 91 日）
- ・ポアソン比（材齢 7 日, 28 日, 56 日, 91 日）
- ・曲げ強度試験（材齢 7 日, 28 日, 56 日, 91 日）
- ・透水試験（Input 法, 材齢 28 日, 91 日）

熱特性把握試験

- ・線膨張係数試験（材齢 7 日, 91 日）
- ・比熱の計測（材齢 7 日, 91 日）
- ・熱伝導率試験（材齢 7 日, 91 日）

【検討要因】

選定配合 2 種類：A 配合, B 配合（試験により決定）

【検討ケース】

A 配合, B 配合の 2 ケース

【試験実施工程】

- ・練混ぜ・フレッシュ試験・供試体作製：述べ 1 日
- ・膨張・収縮・断熱試験：14 日間継続（材齢 14 日まで）
- ・強度・弾性試験：4～6 材齢（延べ 4～6 日間, 材齢 91 日まで）
- ・透水・熱特性試験：2 材齢（各 2 日間継続, 材齢 91 日まで）

iii) 実機試験練りでの物性確認

室内試験で決定された配合を基本に、実機試験練りを行って、施工に用いる最終配合を確定する。

【試験要因・ケース】製造温度条件：1～2 段階【実施工温度（15℃程度, 必要なら標準温度（20℃）】

配合要因：2 配合【A 配合, B 配合】

【試験項目】

フレッシュ性状の確認（90 分までの経時変化性状を含む）。

- ・スランプフロー
- ・空気量
- ・U 型充填性
- ・材料分離抵抗性
- ・凝結・硬化性状の確認
- ・凝結時間（始発・終結）
- ・拘束膨張量（水中養生材齢 14 日まで）

- ・自己収縮歪（封緘養生材齢 14 日まで）

強度特性の確認

- ・圧縮強度（材齢 7 日，28 日，56 日，91 日）
- ・割裂引張強度（材齢 7 日，28 日，56 日，91 日）
- ・静弾性係数・ポアソン比（材齢 7 日，28 日，91 日）

【試験実施工程】

- ・練混ぜ・フレッシュ試験・供試体作製：実質 1 日，または 2 日間
- ・凝結試験：約半日間（12 時間程度まで）
- ・膨張・収縮試験：14 日間継続
- ・強度・弾性試験：4～6 材齢（延べ 4～6 日間）

水和熱に伴う温度膨張・収縮量の評価，発生応力に関する解析的検討およびクーリング手法に関する解析的検討については，1) 低アルカリ性・低収縮・高流動コンクリートと同様である。参考として，コンクリート試験項目一覧をまとめたものを表 4.5-20 示す。

表 4.5-20 参考表 コンクリートの試験項目一覧（1/2）

試験項目	試験規格	試験時期
スランプ	JIS A 1101	練上り直後（5 分後），他適宜
スランプフロー	JIS A 1150	練上り直後（5 分後），他適宜
空気量	JIS A 1128	練上り直後（5 分後），他適宜
O 漏斗流下時間	JSCE-F512	練上り直後（5 分後），他適宜
コンクリート温度	温度計	練上り直後（5 分後），他適宜
ブリーディング	JIS A 1123	練上り直後（5 分後），他適宜
凝結試験	JIS A 1147	練上り直後（5 分後）に試験体採取
断熱温度上昇試験	—	空気循環式：練上り直後～材齢 14 日程度まで 供試体寸法：円柱 φ400×400mm，1 体／配合
膨張率	JIS A 6202	A 法（膨張だけを対象）で実施 約 2 週間の水中養生期間で膨張量を計測
圧縮強度（若材齢）	JIS A 1108	材齢：18 時間，24 時間，36 時間，2 日，3 日 供試体寸法：円柱 φ100×200mm，15 本／配合
圧縮強度（通常材齢）	JIS A 1108	材齢：7 日，28 日，56 日，91 日 供試体寸法：円柱 φ100×200mm，12 本／配合
静弾性係数	JIS A 1149	材齢：7 日，28 日，91 日，コンプレッソメータ使用 圧縮強度試験時に測定
ポアソン比	—	材齢：7 日，28 日，91 日，コンプレッソメータ他使用 圧縮強度試験時に測定，縦ひずみと横ひずみの日から算定
割裂引張強度	JIS A 1113	材齢：7 日，28 日，91 日 供試体寸法：円柱 φ100×200mm，9 本／配合
自己収縮ひずみ	JCI 高流動 コンクリート 委員会	高流動コンクリートの自己収縮ひずみ測定方法 埋込み型ひずみ計使用で自動計測 供試体寸法：角柱 100×100×400mm 3 本／配合，（環境温度 20℃）

表 4.5-20 参考表 コンクリートの試験項目一覧 (2/2)

試験項目	試験規格	試験時期
長さ変化率 (乾燥収縮ひずみ)	JIS A 1129	試験材齢：7日水中養生後 乾燥材齢 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 182日に測定 供試体寸法：角柱 100×100×400mm 3本/配合, (環境温度 20℃)
熱膨張係数	—	コンクリート角柱供試体に段階的に温度変化を与えて 長さ変化を埋め込み型ひずみ計の計測で行う。
比熱	—	物理的手法による
熱伝導率	—	物理的手法による
透水係数	Input 法	浸透深さから拡散係数を算定し, 透水係数を評価, 材齢 28日, 91日 供試体寸法 $\phi 15 \times 15 \text{cm}$ (一例),

(b) 岩盤関連

止水壁支持岩盤については、止水壁設置前に再調査を行い、止水壁設置に支障が無い事を確認するとともに、必要な措置（浮石除去、岩盤清掃、岩盤との間に空隙を有する吹付コンクリートの扱い）を取ることが実施課題と考えられる。

- ・止水壁設置前での設置部の岩盤の状況（支持強度に影響するような亀裂や浮石の有無等）の詳細な調査
- ・岩盤清掃の方法とノロの除去方法
- ・コンクリートの充填性評価（予備的な岩盤との接触面に関する充填実証試験）
- ・グラウトの充填性評価（予備的実証試験）

(2) 解析・評価・計画等**(a) コンクリート関連**

コンクリート配合選定試験と同時に実施される発熱特性取得をもとに、コンクリート打設時の温度ひび割れ発生予測解析および必要に応じて実施されるひび割れ制御のためのクーリング方法の検討が今後の実施課題と考えられる。

- ・止水壁のひび割れ抑制のための温度応力解析、およびクーリング手法に関する検討
- ・パイプクーリングの要否に関する解析検討

また、止水壁コンクリート打設時に、最上部への充填が十分に行われぬ可能性があるため、充填システムや重点を確認するシステム等の設置運用が必要と考えられる。

(b) コンタクトグラウトの止水性能（長期的観点）

コンタクトグラウトによる止水の試験中の対応については 4.5.2 (7) で検討したが、さらに長期的な観点と初期の冠水試験結果を踏まえた予測評価の可能性についての検討が今後の課題と考えられる。

- ・止水壁と岩盤間の長期止水性評価（载荷・除荷のサイクルによる止水壁と岩盤との変位履歴と漏水の関係、止水壁コンクリートの収縮等）
- ・除荷時のコンタクトグラウトの観察方法

(c) 岩盤関連

止水壁コンクリートの収縮が発生する場合には、岩盤に対しても応力的な影響が生じる可能性がある。このような測定・評価の実績が少ないことから、冠水による応力場変化（冠水試験の主目的）と合わせて、その評価方法について検討する。岩盤挙動解析との関連については、(b)と同様である。また、止水壁コンクリートと岩盤との接触条件についても状態が、固着、摩擦あり、摩擦なしの3ケース考えられるが、どの状態にあるのかは計測及び解析における課題である。

- ・ 止水壁コンクリートの収縮に基づく周辺岩盤への影響検討
- ・ 冠水、排水時の岩盤応力場の変動

5. 止水壁周辺の岩盤挙動評価

冠水坑道の冠水に伴う地下水圧の上昇によって、止水壁や周辺岩盤が熱、水、応力、化学の連成的な影響を受けることになる。今後、止水壁周辺の岩盤挙動評価を行う上での課題について概略検討する。

5.1 連成事象の整理

5.1.1 環境変化の想定

原位置における岩盤の状態をもとに、冠水坑道の掘削～試験期間満了までの周辺岩盤の環境の変化を想定する。また、既往の検討で、再冠水試験の水理場の評価を行っている場合は、坑道周辺の水圧の低下の推定、再冠水試験時の回復水圧等を参考にして水理場の環境変化を想定する。力学場については、解析及び岩盤の状況から試験における環境変化の想定を行うこととなる。

5.1.2 現地で想定される連成事象

変化が予想される諸特性値について、連成事象として考慮する事ができる特性値相互を関連付けるとともに、長期的にどのような事象が予測されるかについて検討する。この時、予測しうる事象は THMC に分類し、試験中の止水壁及び岩盤における状態変遷を明確化する。表 5.1-1 に THMC 関連の一例を示す。

表 5.1-1 THMC 関連の一例

熱 (T)	熱→水 <ul style="list-style-type: none"> 透水性の変化 間隙水密度の温度依存性 間隙水粘性係数の温度依存性 蒸気水と液状水間の状態変化・分離 水分特性曲線の変化 	熱→応力 <ul style="list-style-type: none"> 熱応力の発生 弾性係数の温度依存性 	熱→物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 平行定数の温度依存性 分子拡散係数の温度依存性
熱←水 <ul style="list-style-type: none"> 熱輸送 熱物性の変化 	水 (H) <ul style="list-style-type: none"> 飽和・不飽和浸透流解析 透水性の変化 	水→応力 <ul style="list-style-type: none"> 力学物性値の含水比依存性 	水→物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 飽和度に応じた液相濃度変化 物質移行パラメータの変化
熱←応力 <ul style="list-style-type: none"> 熱物性の変化 	水←応力 <ul style="list-style-type: none"> 透水性の変化 不飽和水分特性の変化 飽和度の変化 	応力 (M) <ul style="list-style-type: none"> 力学変形 	応力→物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 流速の変化 気相分圧の変化 物質移行パラメータの変化
熱←物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 熱物性の変化 	水←物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 透水性の変化 不飽和水分特性の変化 飽和度の変化 	応力←物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 力学物性値の変化 物理定数の変化 	物質移行・化学 <ul style="list-style-type: none"> 移流分散／拡散 イオン交換反応 酸・塩基反応 鉱物の溶解など

5.2 岩盤挙動評価における課題

前記 5.1 連成事象の整理を含む、冠水試験時の岩盤挙動を評価する際に用いる解析手法を整理し、その実施方法をまとめる。この時、解析を行う際の課題の抽出を行う。また、完全に連成現象を表現できることが不可能な場合は、適切な事象の考慮方法について提案する。例えば、化学影響を陽に力学解析で考慮することは難しいことから、弾性係数を時間ごとに変化させて解析を実施することが考えられる。

再冠水試験における岩盤の挙動を評価する際に、水圧の載荷方法について複数考える必要がある。これは、瑞浪における岩盤は結晶質岩であるため、多孔質体とは考えにくい。また、現地の岩盤計測結果をみると、亀裂も少ない。よって、冠水坑道に湛水すると、多孔質体の中に水が浸透していくというよりも岩盤を水圧で押すような挙動となることが考えられる。そこで、岩盤挙動評価を実施する際には、応力解析で水圧を止水壁背面のみならず、岩盤にも載荷するケースの検討を実施し、計測結果と比較する必要がある。また、確認のためにも水-応力連成解析も実施してその違いについて考察するのが良いと考えられる。

解析による止水壁の変位挙動を再現性を確認するため、止水壁と岩盤との摩擦についてパラメータスタディを行うのが良いと考えられる。これは、ANGAS のプラグ挙動における評価で牛田らはプラグの挙動が摩擦ありと固着状態の間程度の状態であると示している。よって、本試験でも止水壁と岩盤との状態を照査するのがよい。

6. まとめ

6.1 文献調査

文献調査の結果を要約すると次のとおりである。

- ・放射性廃棄物地層処分施設におけるプラグの検討例は多くは無いが、水密性の確保（水理プラグ）及び埋戻しを含む人工バリアの力学的安定性の確保（力学プラグ）の2つの機能をそれぞれ単独の2つの構造を組み合わせて止水性を確保しているものと、コンクリートプラグにも止水性を期待しているものの両方がある。
- ・力学プラグの形状は、支持岩盤の強度、除荷・載荷サイクルの有無、施工条件に合わせた適切なコンクリート打設量などの要因が考慮されていると思われる。
- ・漏水に備えて、グラウトなどのコンクリート打設後実施される止水対策が講じられている。
- ・コンクリート躯体自体にも低透水性が期待されている（材料、打継目など）。

6.2 止水壁の検討

止水壁の検討条件・結果を要約すると次のとおりである。

- ・止水壁支持部の岩盤の状況は良好であり、特別に強度を低減する等の措置は必要ない。
- ・止水壁形状は、コンクリート打設量を低減できるアーチ型とした。
- ・設定した構造寸法に基づく力学解析の結果、岩盤の応力は許容範囲内であった。
- ・止水壁支持部の岩盤掘削結果の調査の結果、掘削形状的に大きなひずみは無く、全体的に10～20cm程度の余掘りが認められたが、設計への影響は無いと考えられる。
- ・ケーブル用の貫通管数が多く、止水上の欠陥になる可能性が高い。実施設計の際には、ケーブルをできるだけマンホールによって貫通させる、あるいは貫通管の数を減らす等の対策を取る事が望ましい。
- ・漏水対策としてグラウトを提案した。
- ・吹付コンクリート背面と岩盤の間に空隙がある場合は止水上の欠陥部となるので、十分な調査とコンクリートの一部除去などの対策が必要と考えられる。
- ・止水壁支持岩盤の計測については、岩盤へ伝達される荷重とそれによる岩盤の変化を適切に把握できるシステムの高案が必要である。

6.3 止水壁周辺の岩盤挙動評価

主な課題は次のとおりである。

- ・再冠水坑道は亀裂の少ない硬質の岩盤であることから、湛水をして岩盤は有効応力変化による変形ではなく、岩盤壁面に水圧荷重が加わるような変形が生じるものと考えられる。よって、岩盤に荷重を載荷する応力解析と水-応力連成解析の両者を実施して岩盤に載荷されている水の荷重状態を検証する必要がある。
- ・止水壁と岩盤との境界の取り扱いについて、既往の文献では固着状態と摩擦ありの状態の間ぐらいが実測値から得られた結果であると示されている。よって、評価解析でも止水壁と岩盤の状態について検討を行い、止水壁挙動予測を行う必要がある。

参考文献

- 1) 今津雅紀, 奥野哲夫, 小松原徹: 国内初の天然ガス高圧岩盤貯蔵実証試験, トンネルと地下, 2010, pp.33-44.
- 2) 社団法人エンジニアリング協会 地下開発利用研究センターHP, 波方国家石油ガス備蓄基地 <http://www.namikataterminal.co.jp/business/lpg.html> (accessed 2014/9/12).
- 3) 下野正人, 原佑友, 島屋進, 前島俊雄, 山本浩志: プラグコンクリートの水圧作用時における岩盤拘束効果の評価, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, 63, 5, 2008, pp.1143-1144.
- 4) 前島俊雄, 下茂道人, 宇野晴彦, 青木謙治: 模擬岩盤空洞を用いた気密試験, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 39, 2010, pp.238-243.
- 5) 川西貴士, 片野啓三郎, 竹田義典, 市川雅之, 宮崎裕光: LPG 岩盤貯槽における配管堅坑プラグコンクリートの品質管理と施工, 大林組技術研究所報, No.77, 2013, p.2.
- 6) Johanna Hansen : D1.2 Project Plan including risk management plan, DOPAS(Contract Number:FP7-323273), 2013, 100p.
- 7) DOPAS のウェブサイト, Experiment3.DOMPLU. http://www.posiva.fi/dopas/wp_3/experiment_3_domplu (accessed 2014/9/12).
- 8) 核燃料サイクル開発機構東海事業所: 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 (研究報告), JNC TN8400 2002-005, 2002, 47p.
- 9) Svensk Kärnbränslehantering AB : Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB TR-10-16, 2010, 99p.
- 10) 平野亨, 中間茂雄, 山田淳夫, 瀬野康弘, 佐藤稔紀: 超深地層研究計画 (岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1 号孔における岩盤力学調査, JAEA-Research 2009-031, 2009, 58p.
- 11) 牛田洋介, 小松原徹, 新美勝之, 奥野哲夫, 若林成樹: 天然ガス高圧貯蔵技術開発における実証実験中のプラグ挙動の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, 63, 3, 2008, pp.579-580.
- 12) 藤田朝雄, 杉田裕, 升元一彦, 風間秀彦: 結晶質岩における粘土プラグの閉鎖性能に関わる原位置試験及び解析評価, 原子力バックエンド研究, Vol.14 No.1, 2007, pp.13-30.
- 13) Richard Malm, Vattenfall Power Consultant AB : Low-pH concrete plug for sealing the KBS-3V deposition tunnels, SKB R-11-04, 2012, p.28.
- 14) 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会: 次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発プロジェクト評価 (事後) 報告書 (案), 第 2 回次世代天然ガス高圧貯蔵技術開発プロジェクト評価 (事後) 検討会, 資料 2, 2009, 129p. http://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H20/090317_gas2/gas2_2.pdf (accessed 2014/9/16).
- 15) 土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2012, pp.13-15.
- 16) JIS B8265: 圧力容器の構造—一般事項, 2010, 271p.
- 17) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2012, pp.246-338.
- 18) Warren C. Young, Richard G. Budynas : Roark's Formulas for Stress and Strain (Seventh Edition), McGraw-Hill Book Co., 2002, pp.457-467.
- 19) 日米レジン株式会社のウェブサイト: 水中接着用エポキシ樹脂, アルプロン SW-104 <http://www.nichibeiresin.co.jp> (accessed 2013/12/10).
- 20) 日本ジッコウ株式会社のウェブサイト: ハイドロモルタルEX http://www.jikkou.co.jp/index.php?action=cabinet_action_main_download&block_id=675&room_id=1&cabinet_id=1&file_id=15&upload_id=608 (accessed 2014/9/16).

This is a blank page.

付録

I. 止水壁図面集

II. 止水壁設計計算書および設計図

III. マンホール設計計算書および設計図

This is a blank page.

I. 止水壁図面集

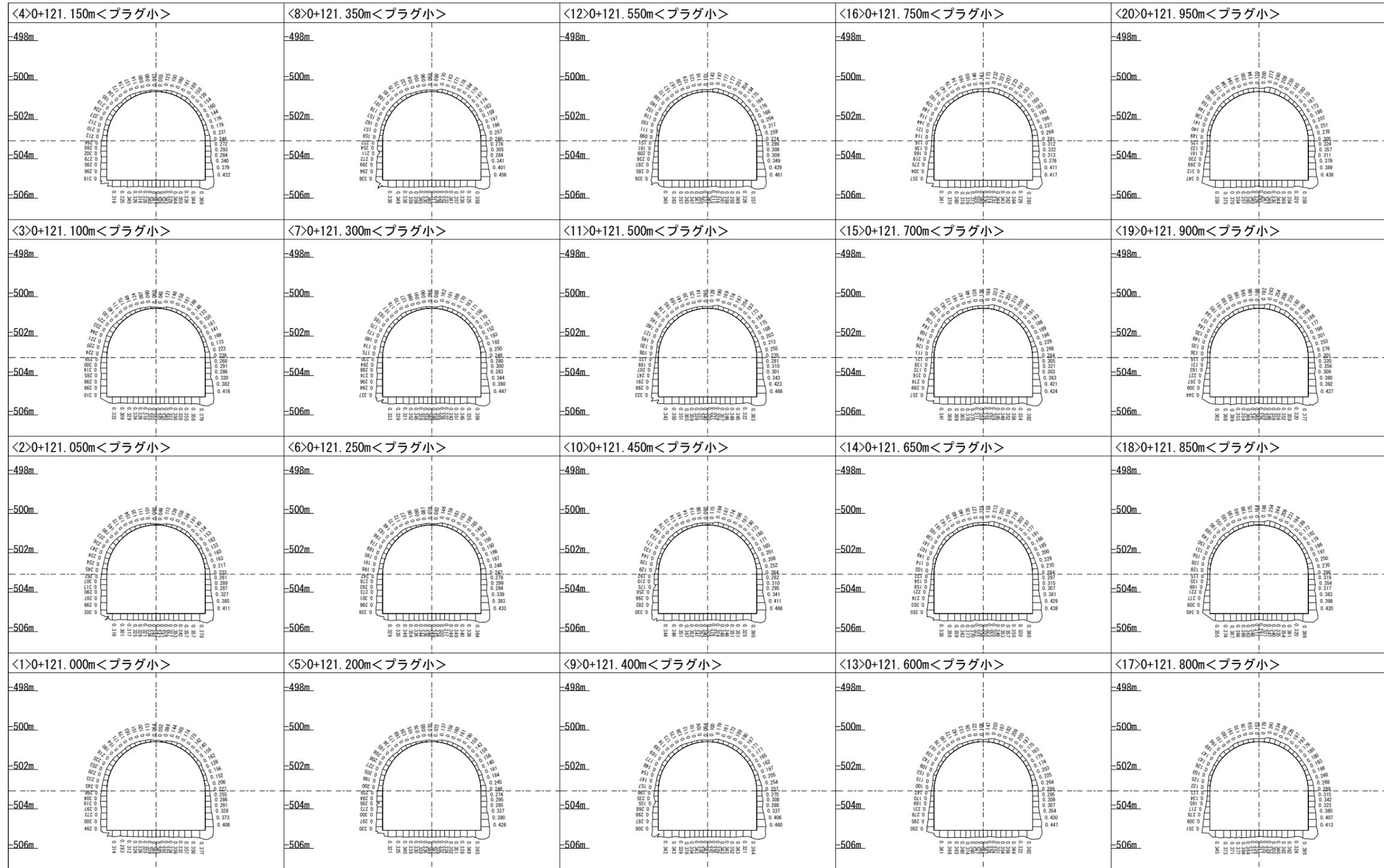
This is a blank page.

図面目録

図番	図面名称
1	冠水坑道全体一般図
2	計測結果断面図（その1）
3	計測結果断面図（その2）
4	計測結果断面図（その3）
5	計測結果断面図（その4）
6	計測結果断面図（その5）
7	計測結果断面図（その6）
8	計測結果断面図（その7）
9	計測結果断面図（その8）
10	計測結果断面図（その9）
11	プラグ構造一般図
12	プラグ配筋図（その1）
13	プラグ配筋図（その2）
14	プラグ配筋図（その3）
15	マンホール全体組み立て図

計測結果断面図 (その1) S=1/100

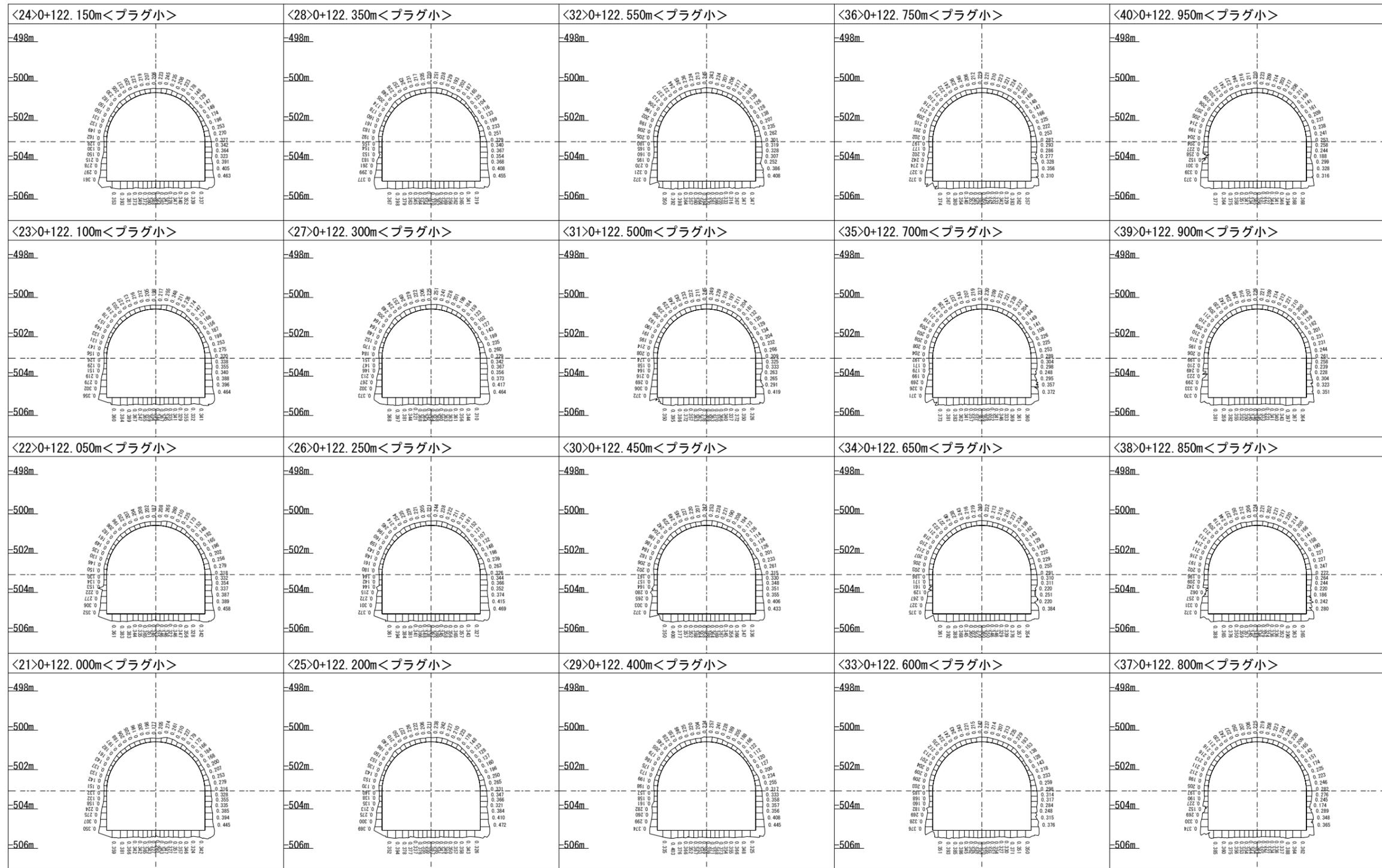
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 2
	図面名称 計測結果断面図 (その1) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その2) S=1/100

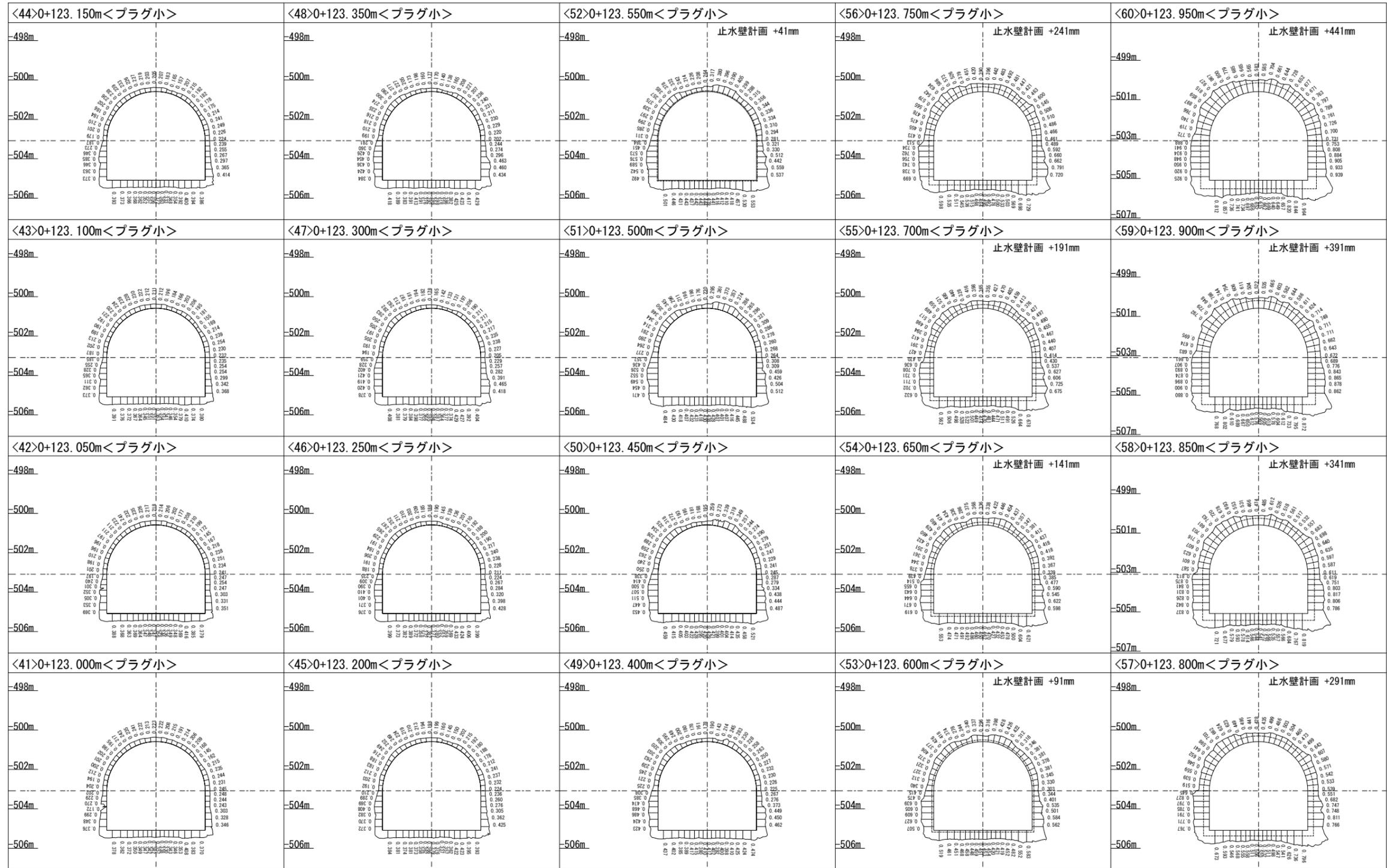
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 3
	図面名称 計測結果断面図 (その2) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その3) S=1/100

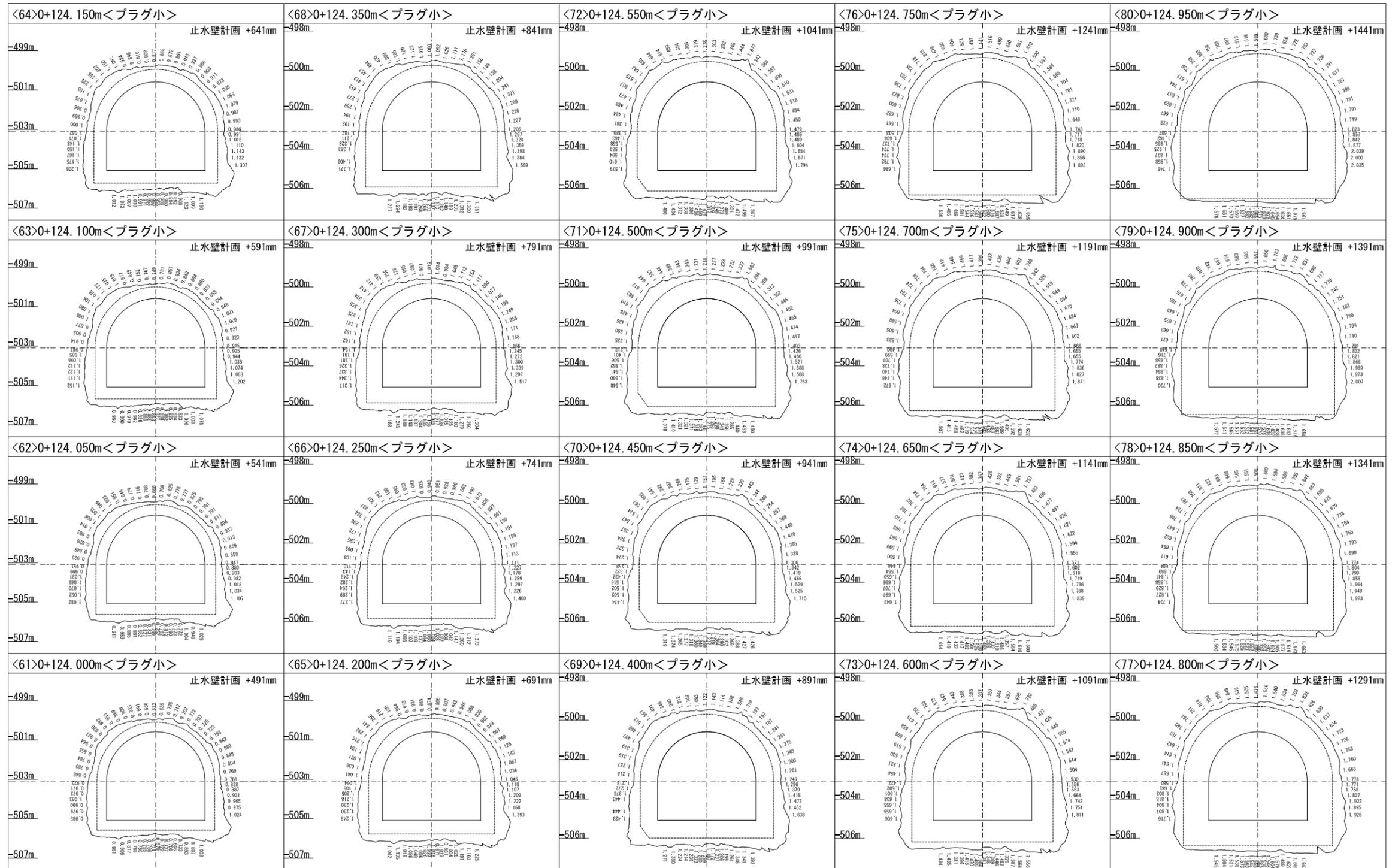
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 4
	図面名称 計測結果断面図 (その3) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その4) S=1/100

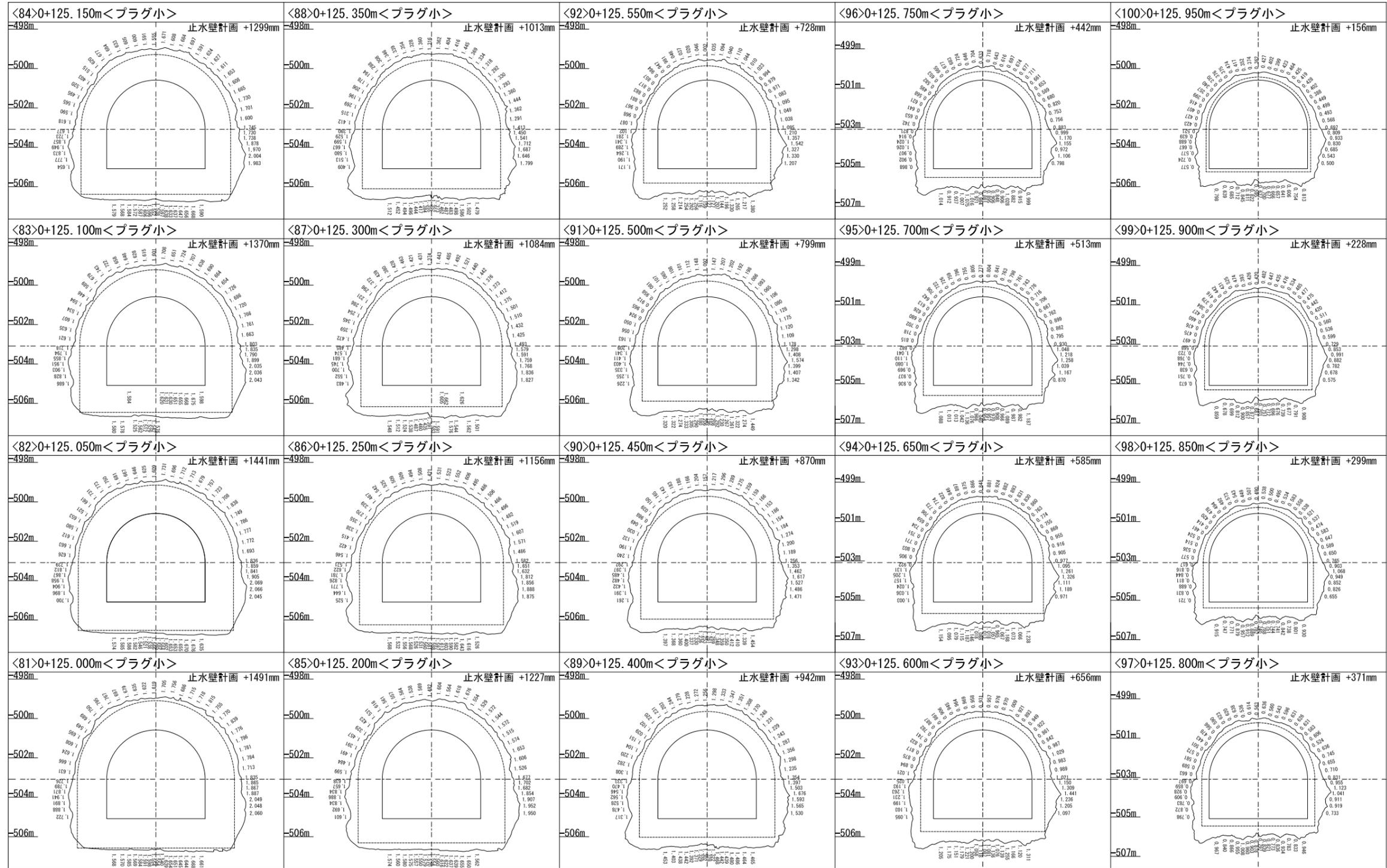
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討(平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 5
	図面名称 計測結果断面図(その4)	設計コード 縮尺 1/100

計測結果断面図 (その5) S=1/100

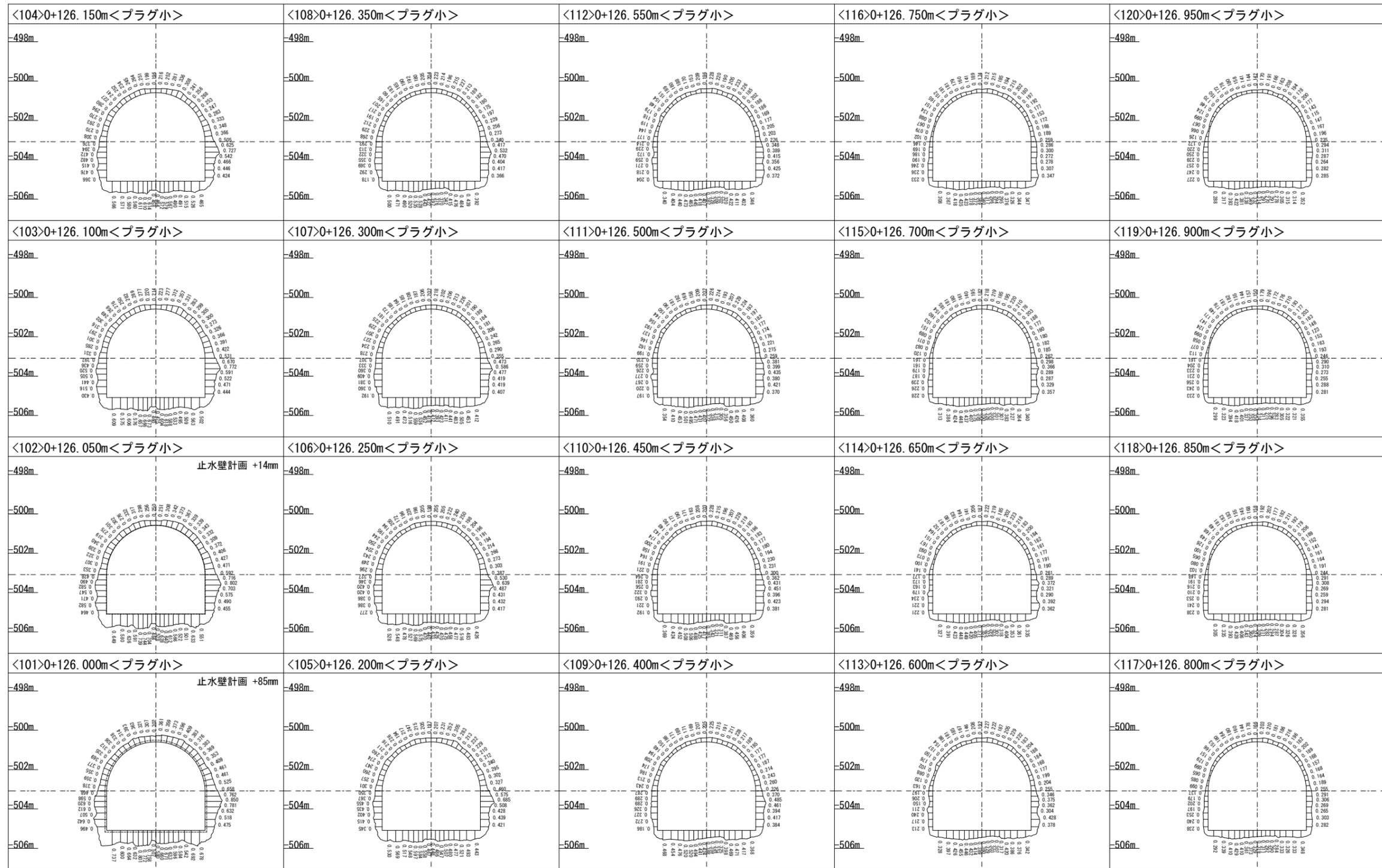
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討(平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 6
	図面名称 計測結果断面図(その5) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その6) S=1/100

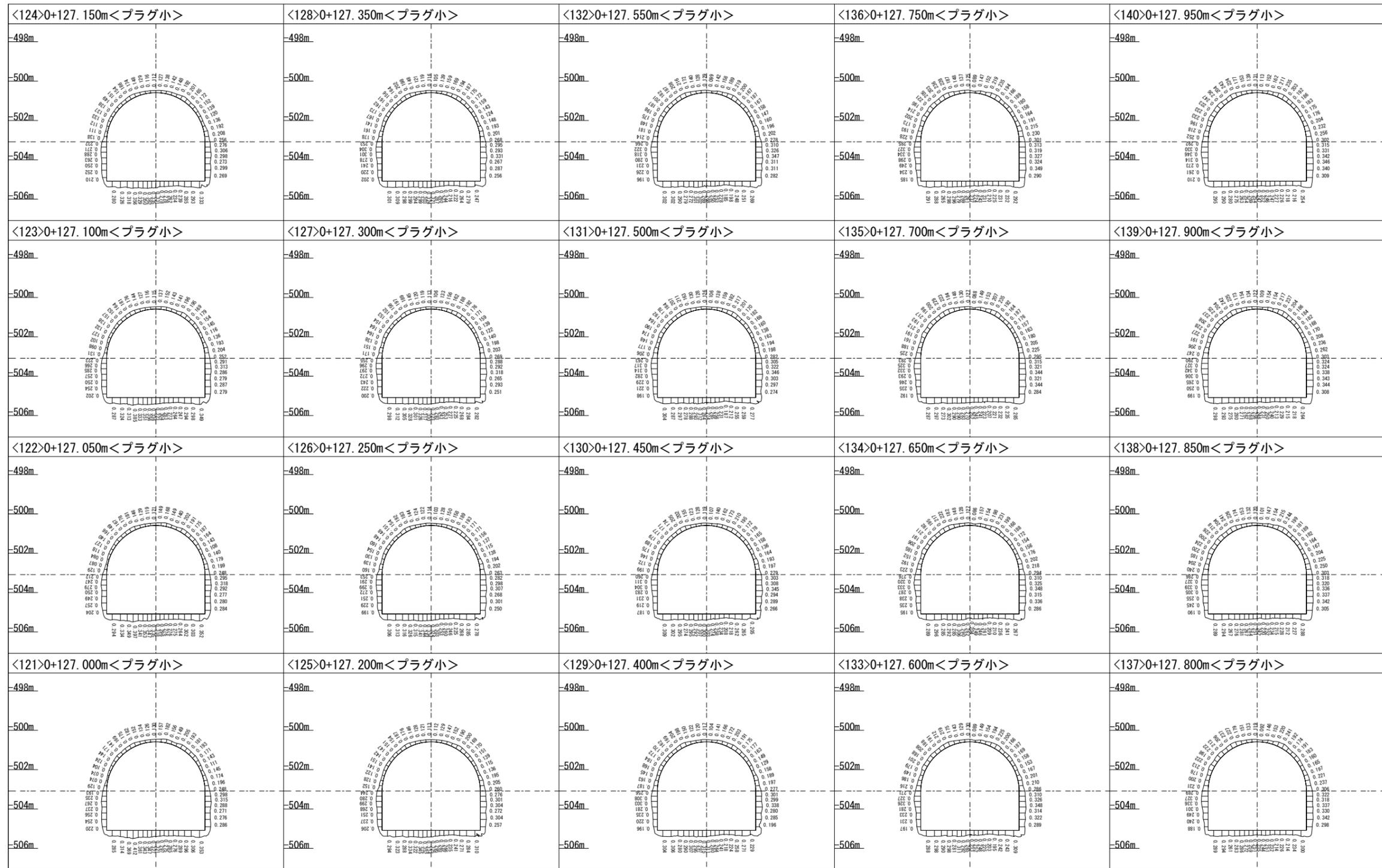
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 7
	図面名称 計測結果断面図 (その6) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その7) S=1/100

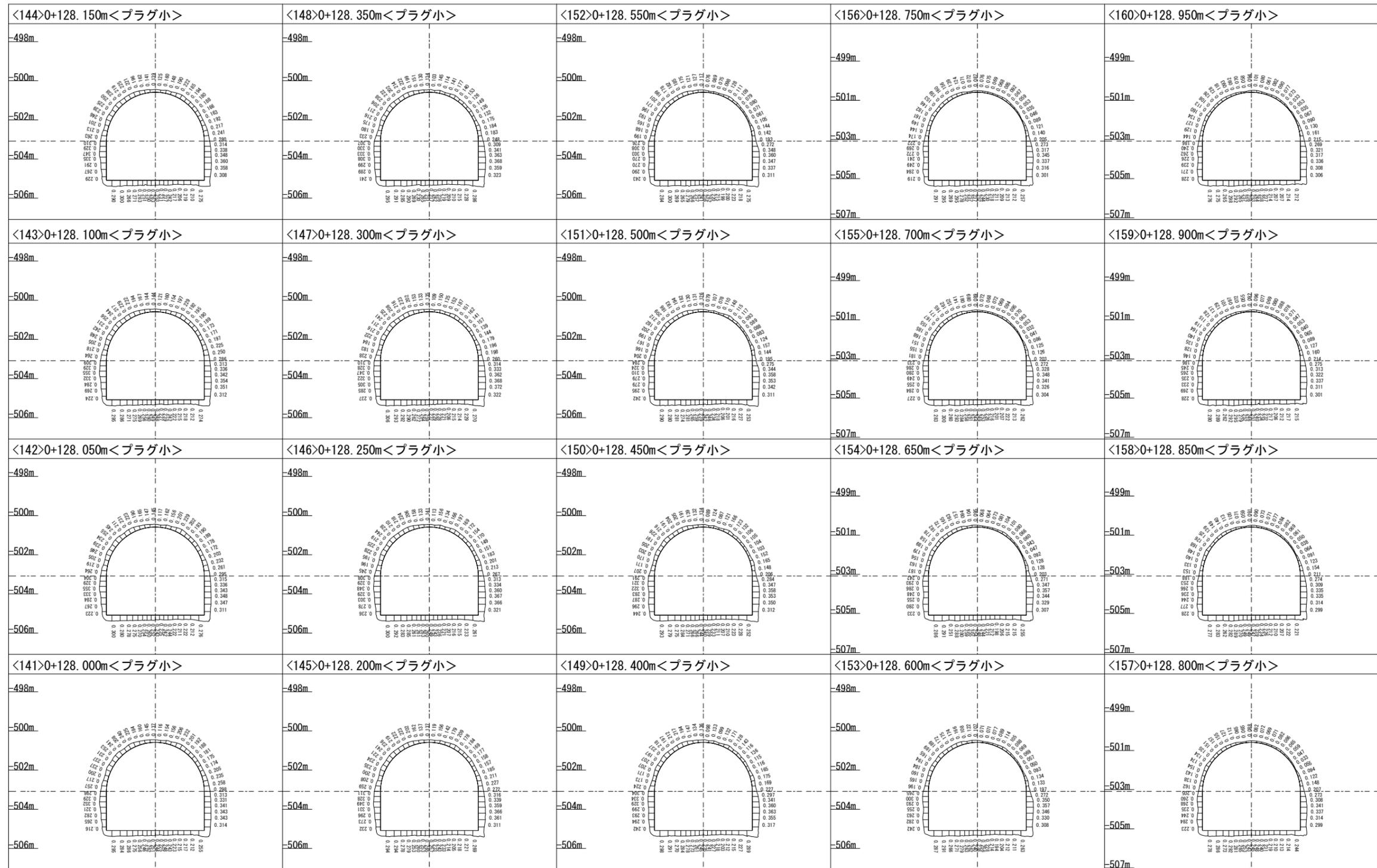
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 8
	図面名称 計測結果断面図 (その7) 縮尺 1/100	設計コード

計測結果断面図 (その8) S=1/100

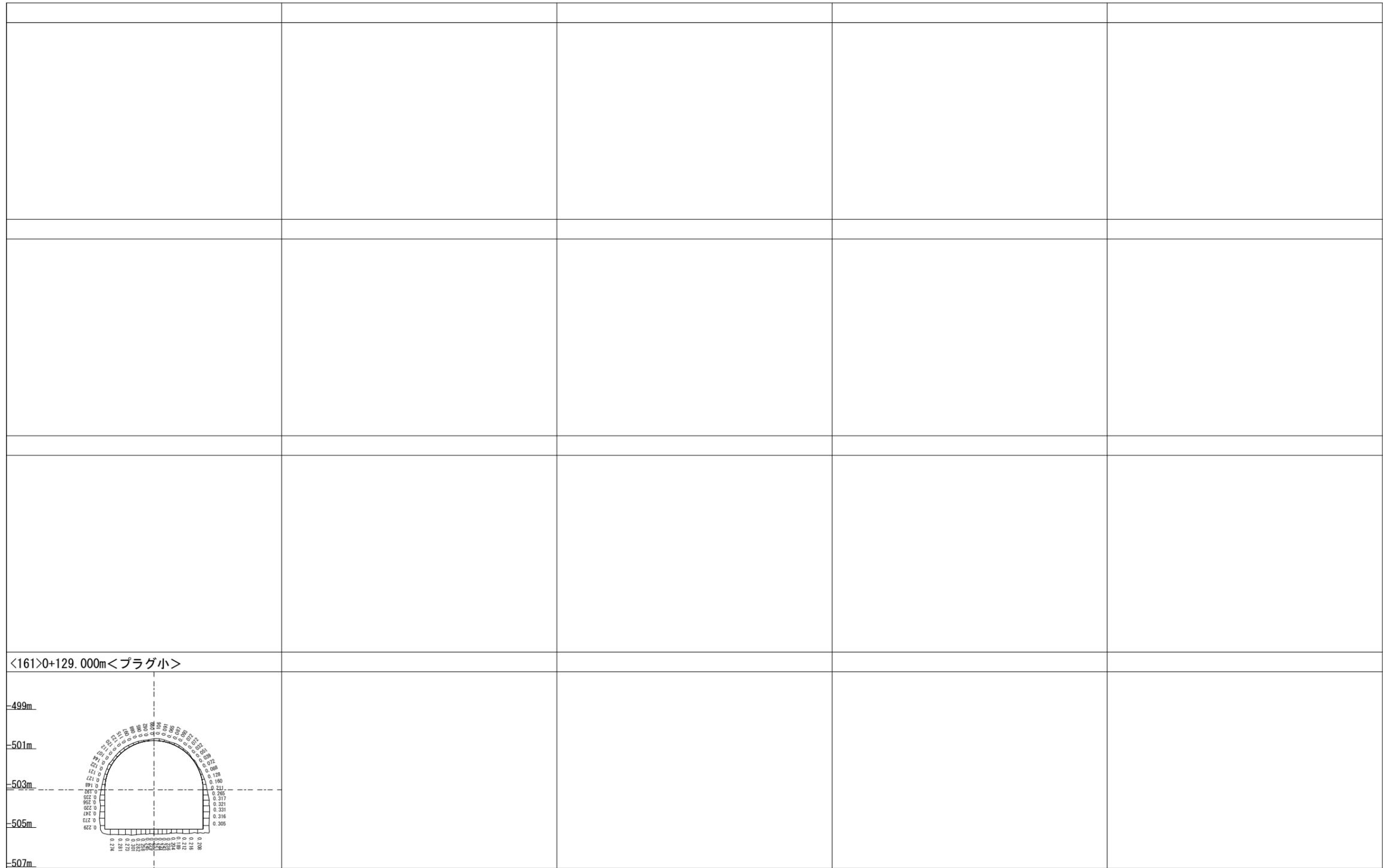
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 9
	図面名称 計測結果断面図 (その8)	設計コード 縮尺 1/100

計測結果断面図 (その9) S=1/100

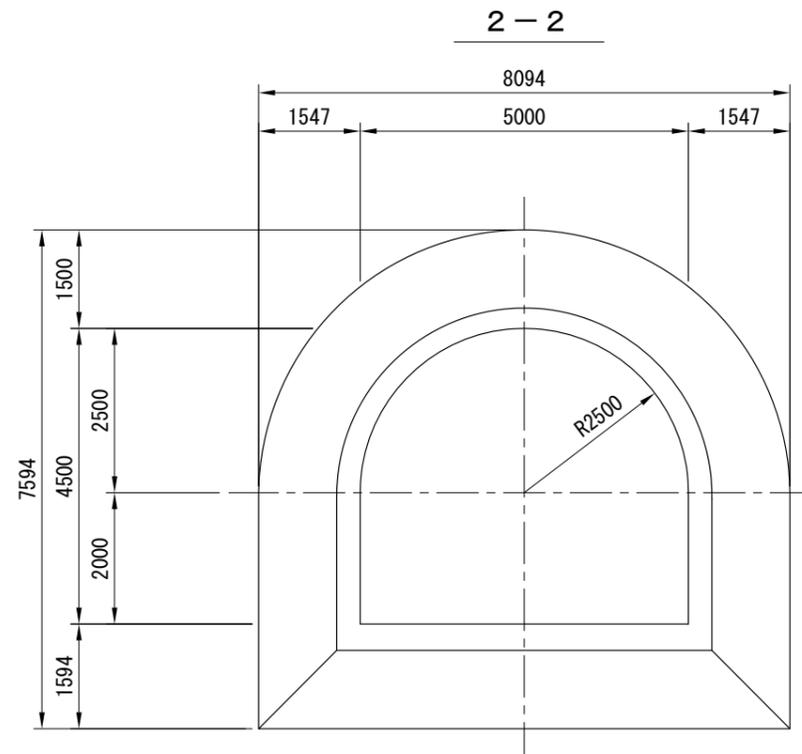
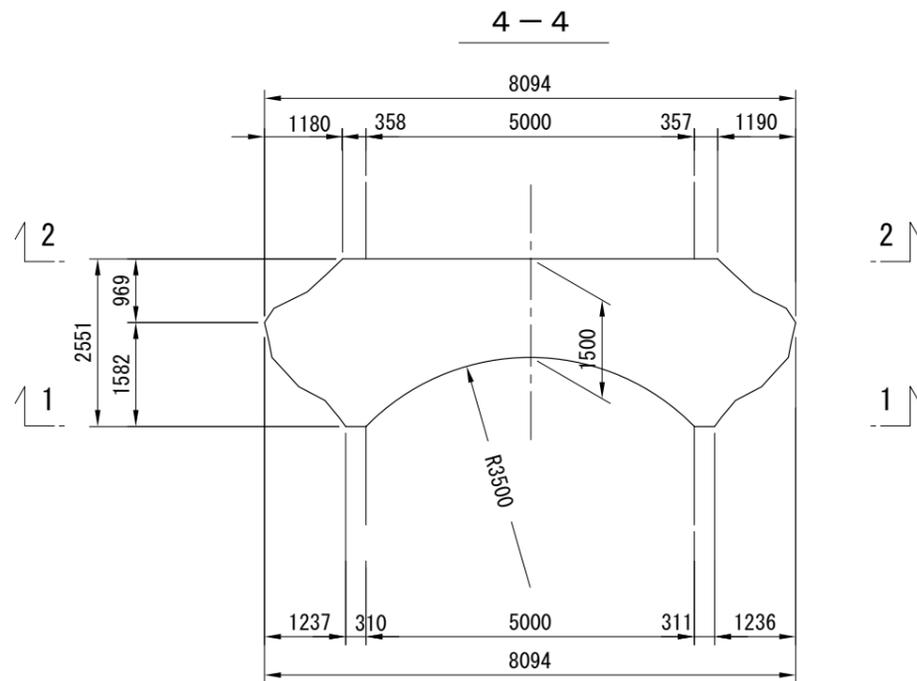
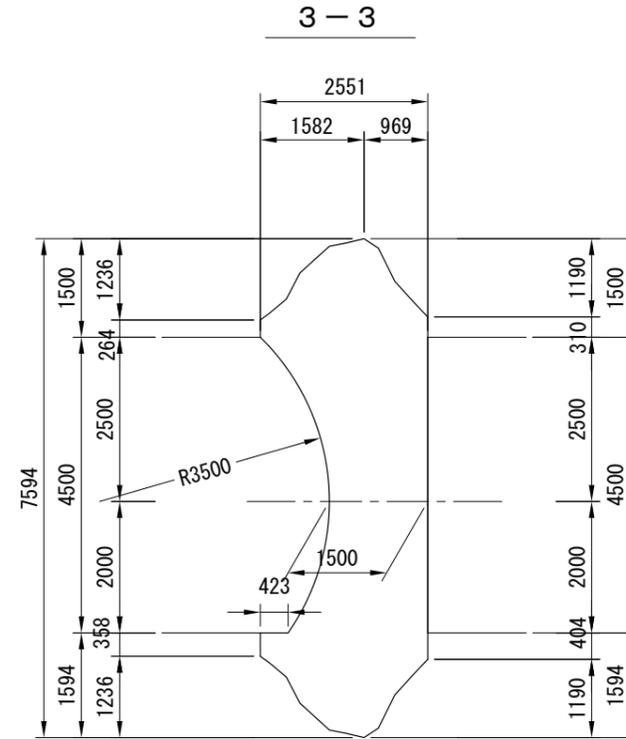
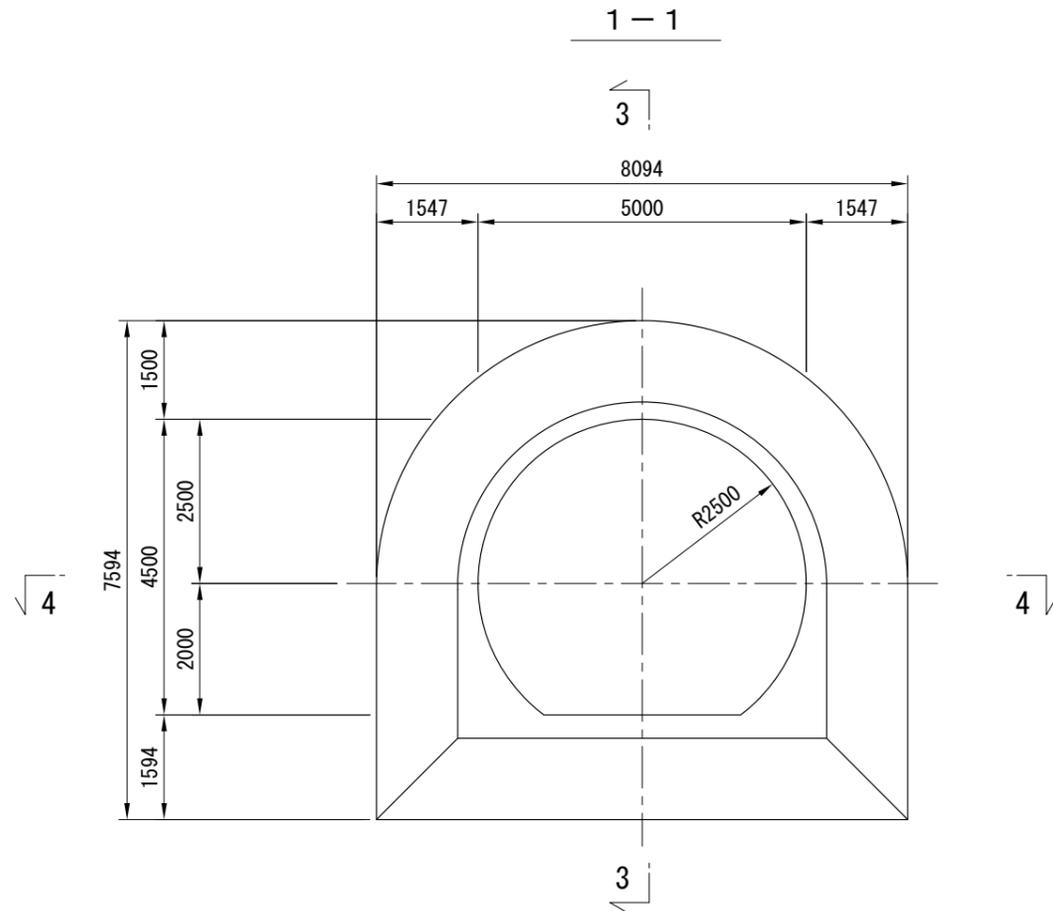
NO.	日付	内 容	担当	照 査	承 認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 10
	図面名称 計測結果断面図 (その9) 縮尺 1/100	設計コード

プラグ構造一般図 S=1/50

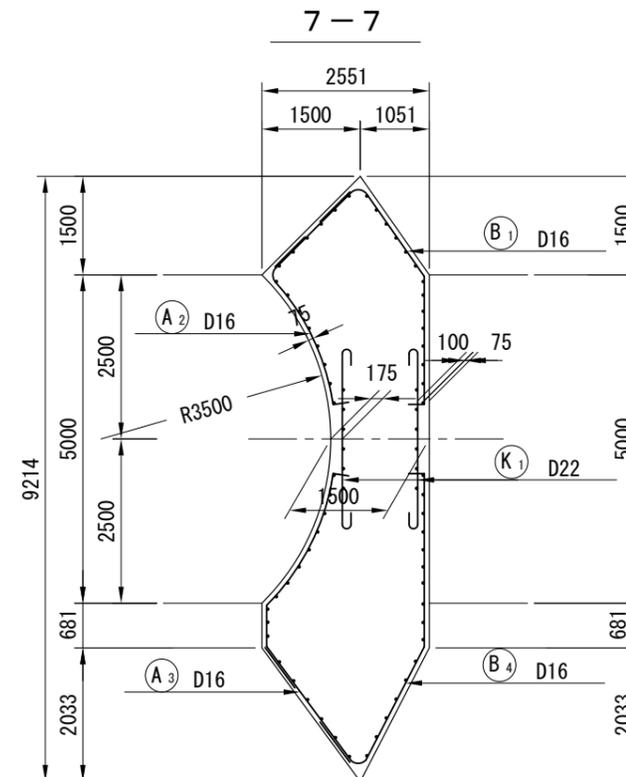
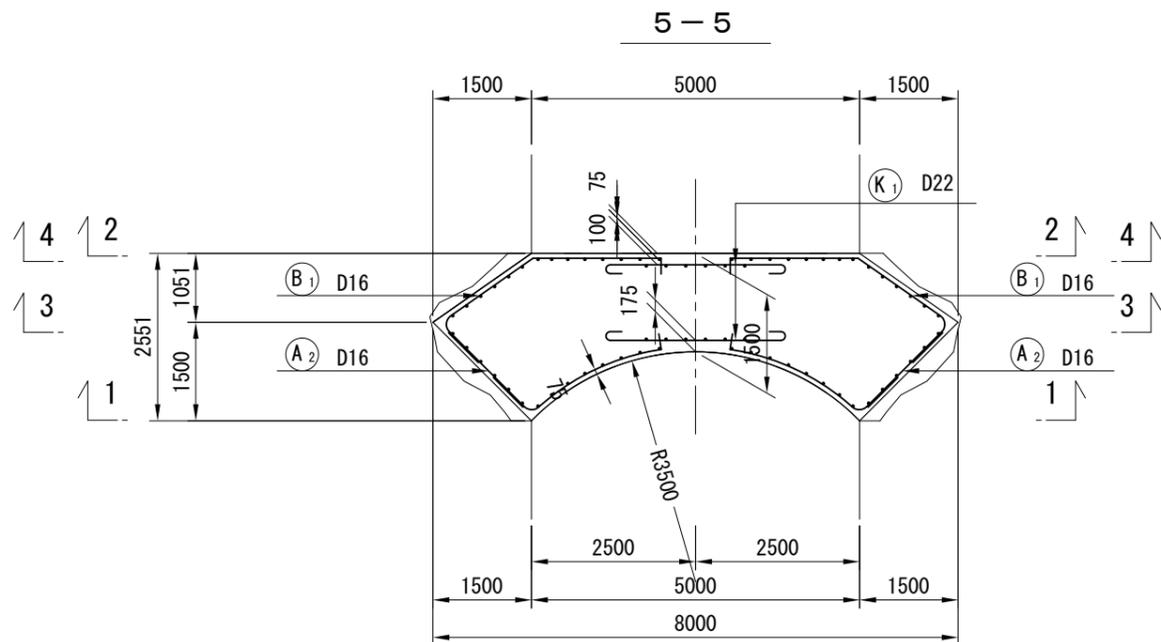
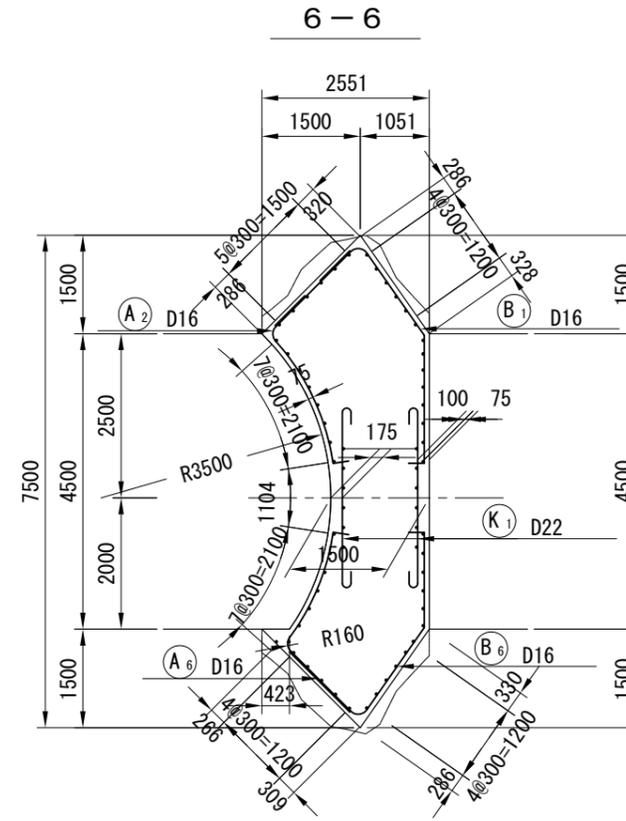
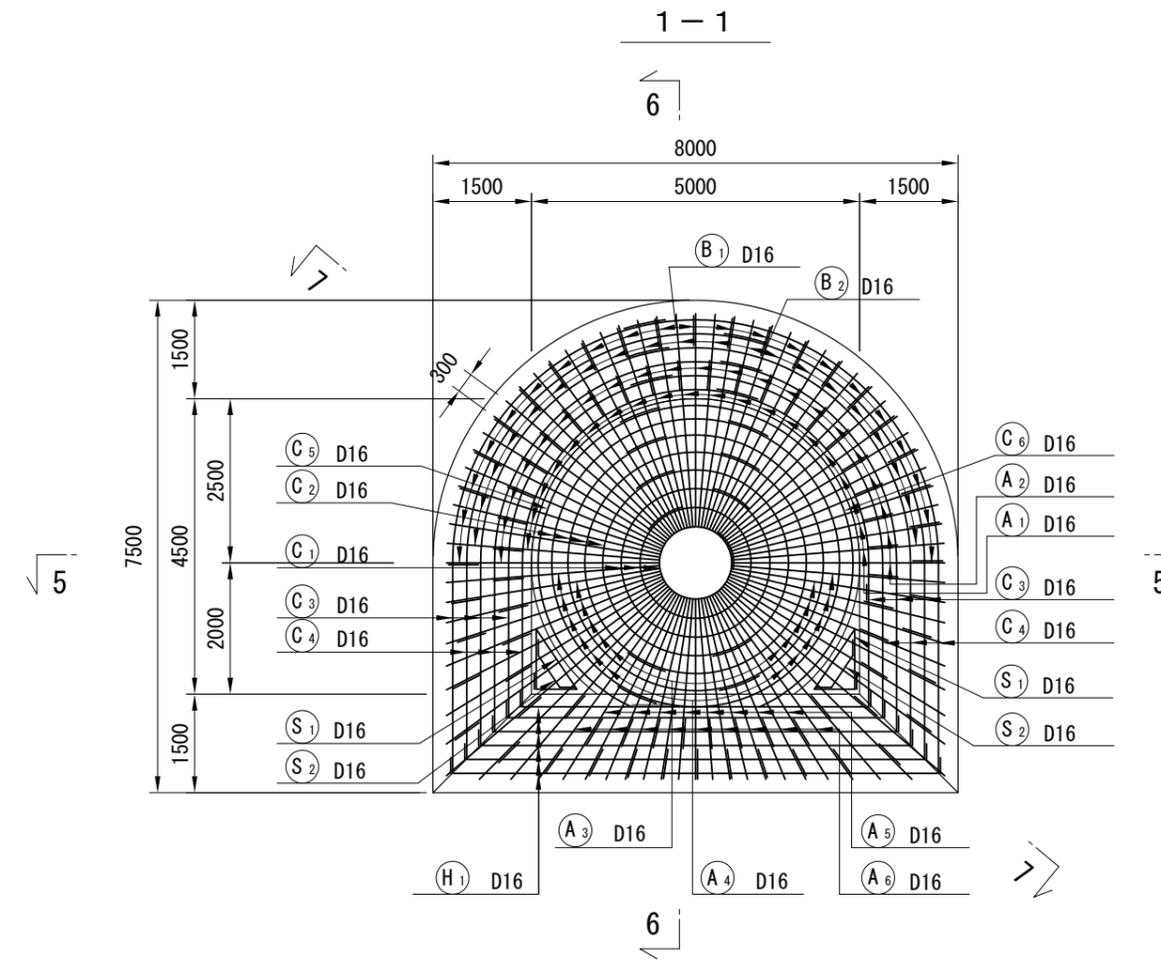
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



 株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討（平成25年度） 日付 2014.01.31	図面番号 11
	図面名称 プラグ構造一般図	設計コード 縮尺 1/50

プラグ配筋図 (その1) S=1/50

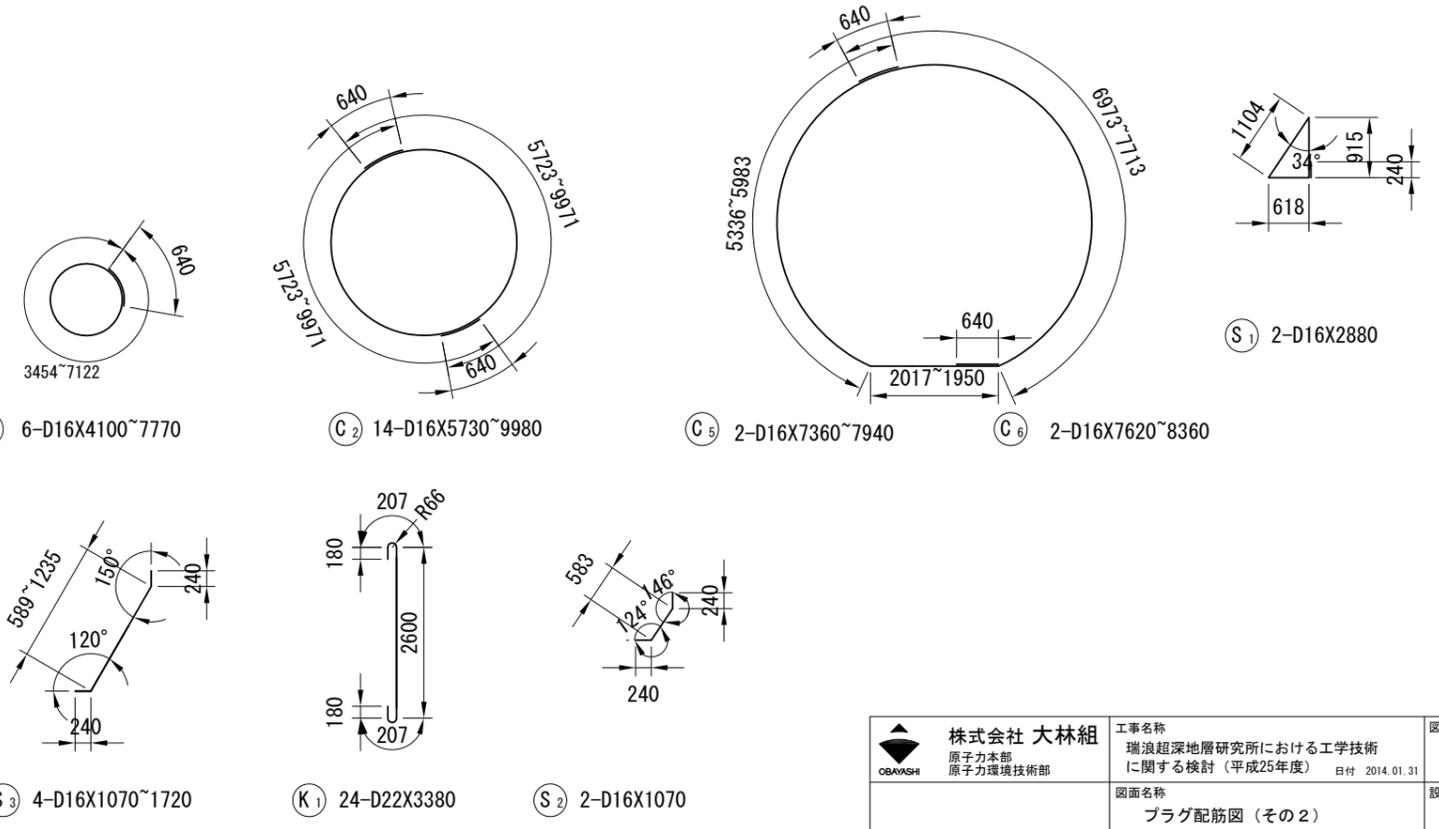
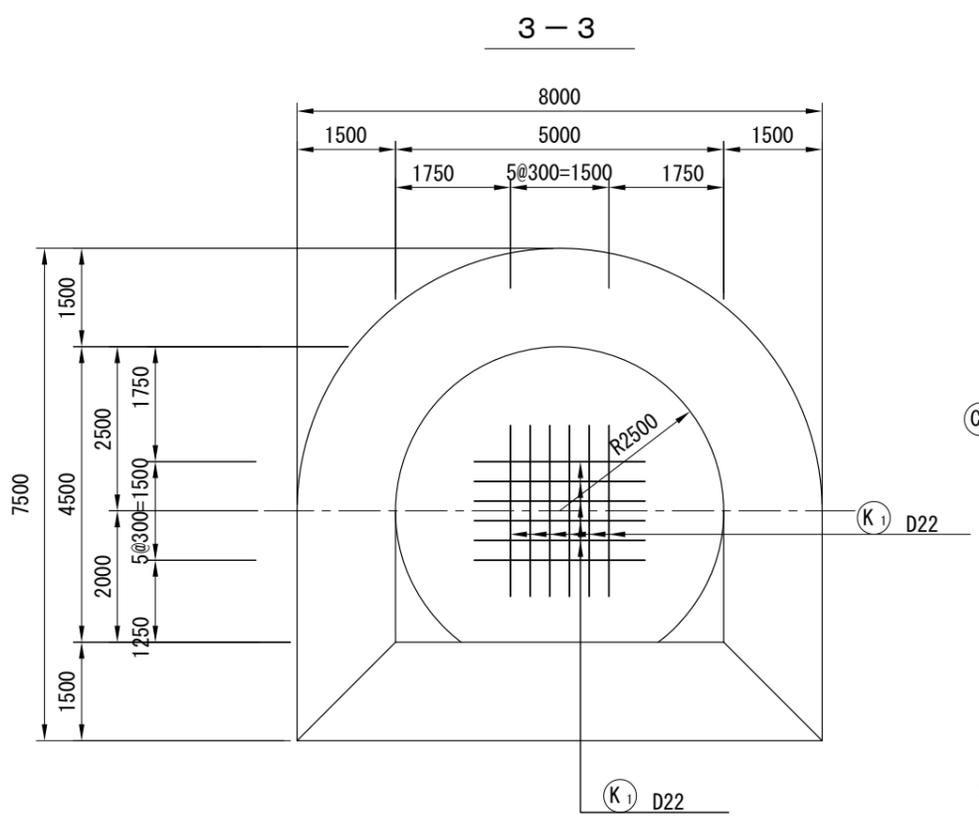
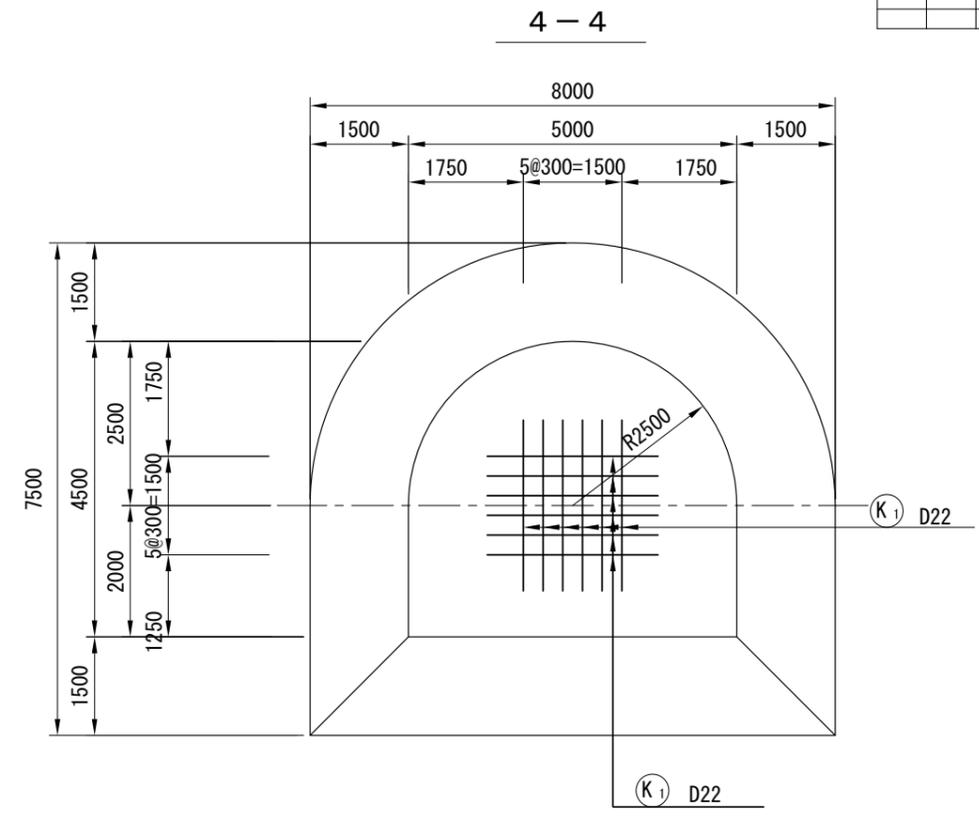
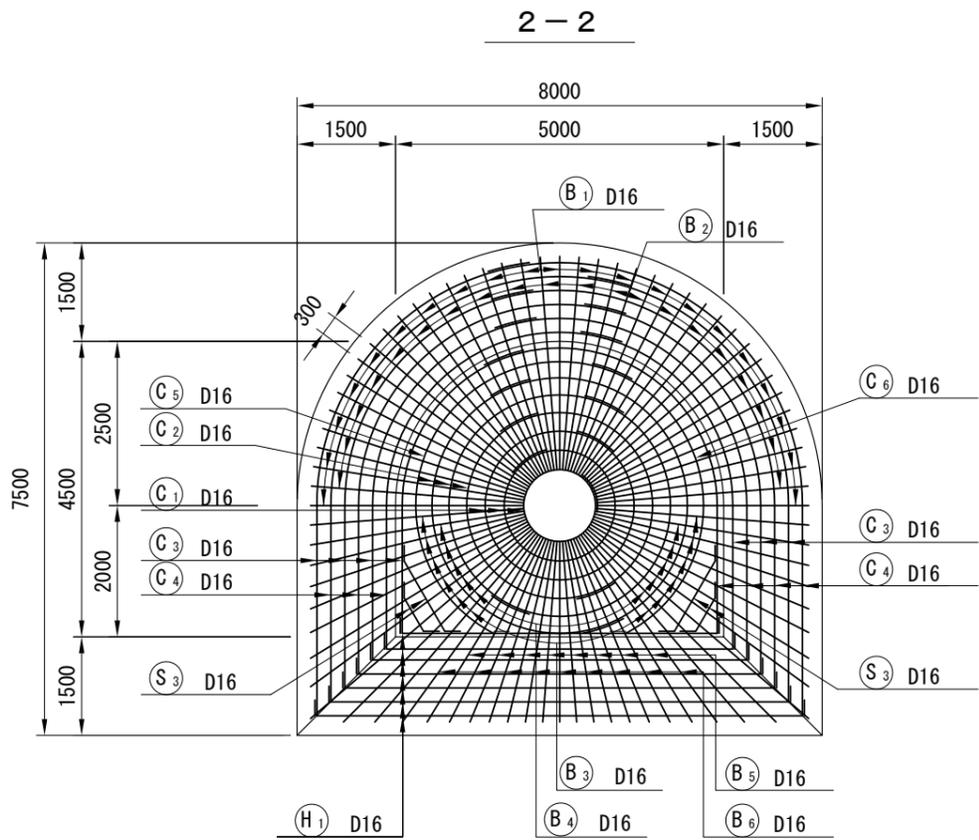
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 12
	図面名称 プラグ配筋図 (その1)	設計コード 縮尺 1/50

プラグ配筋図 (その2) S=1/50

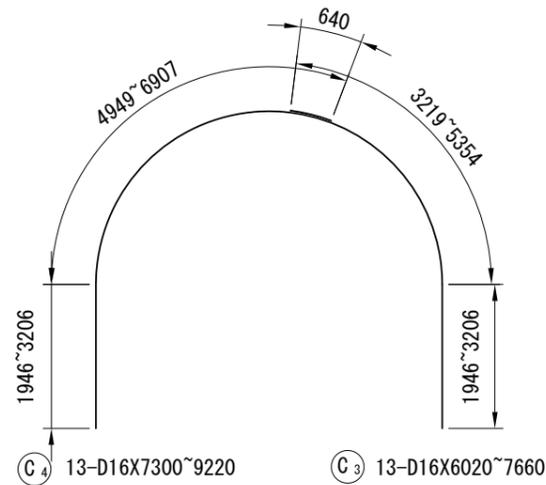
NO.	日付	内容	担当	照査	承認



株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 13
	図面名称 プラグ配筋図 (その2)	設計コード 縮尺 1/50

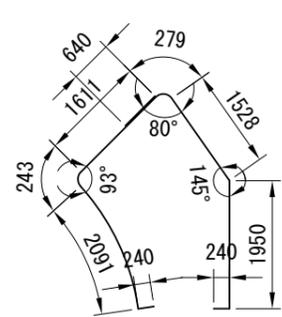
プラグ配筋図 (その3) S=1/50

NO.	日付	内 容	担当	照 査	承 認



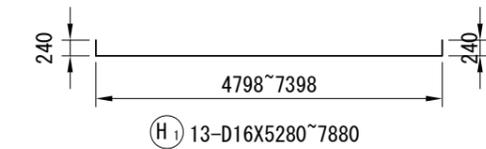
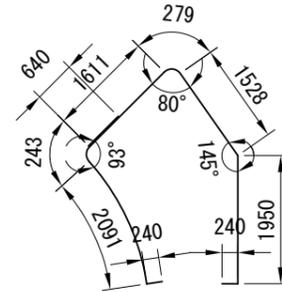
Ⓐ₂ 21-D16X4190

Ⓑ₁ 21-D16X4640

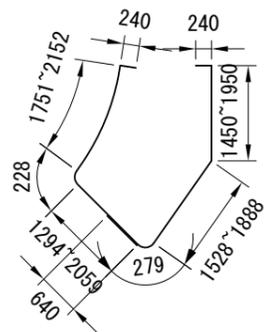


Ⓐ₁ 20-D16X3220

Ⓑ₂ 20-D16X5610

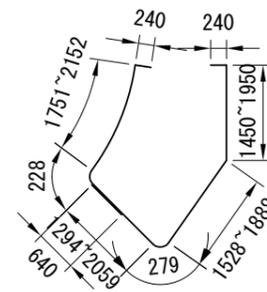


Ⓗ₁ 13-D16X5280~7880



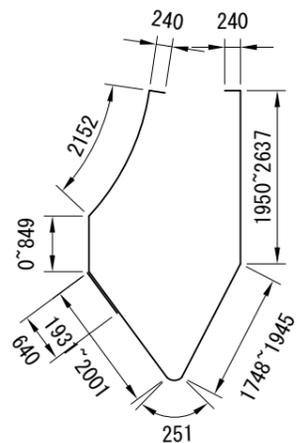
Ⓐ₆ 9-D16X3520~4680

Ⓑ₆ 9-D16X4140~5000



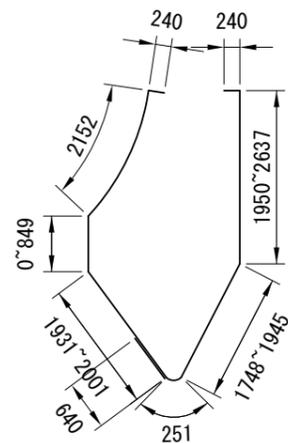
Ⓐ₅ 8-D16X2860~3260

Ⓑ₅ 8-D16X4800~6420



Ⓐ₄ 12-D16X3040~3890

Ⓑ₃ 12-D16X6120~7080



Ⓐ₃ 10-D16X4330~5250

Ⓑ₄ 10-D16X4830~5720

鉄筋表

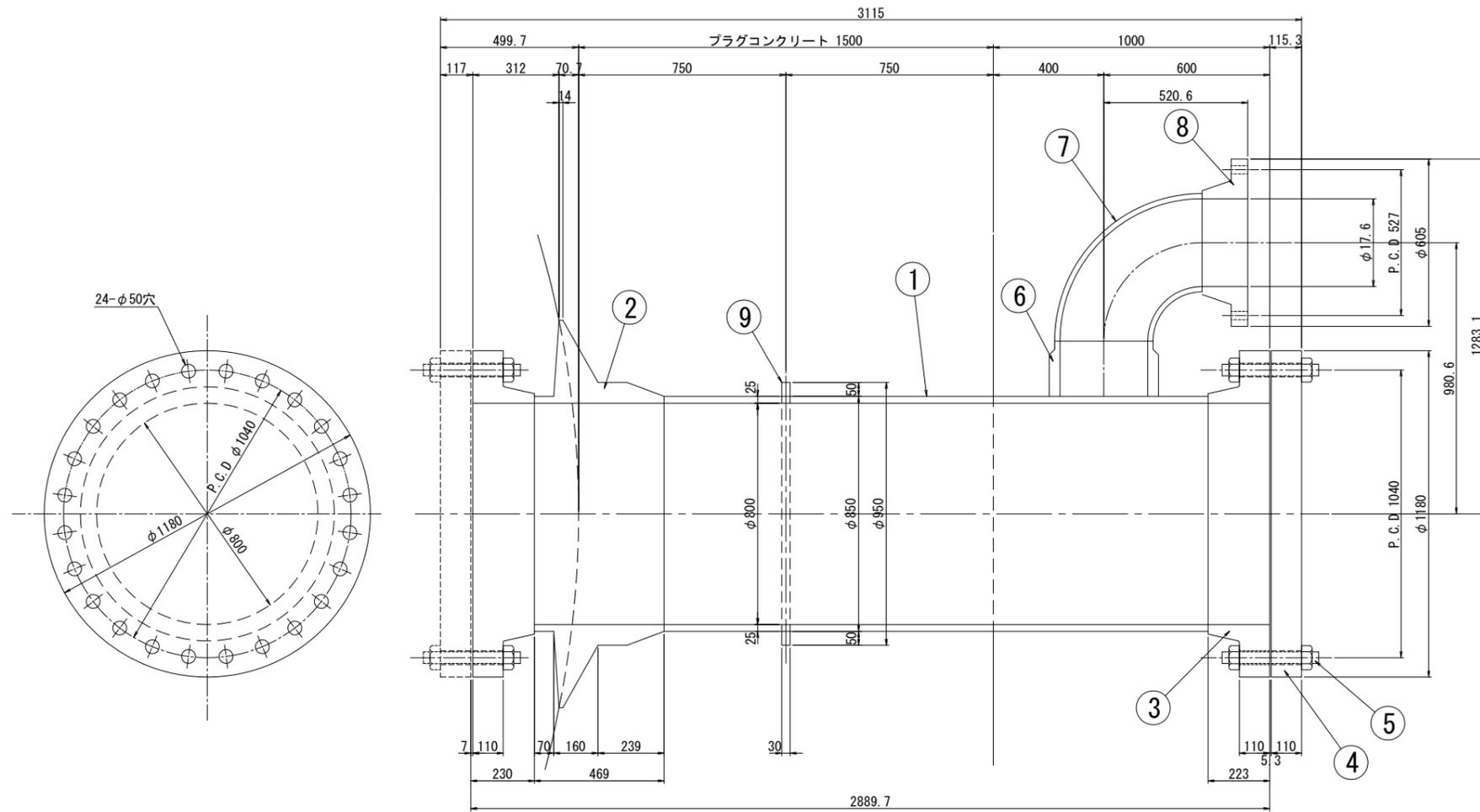
種別	径	長さ (mm)	本数	単位質量 (kg/m)	1本当り質量 (kg)	質 量 (kg)	摘 要
A ₁	D16	3220	20	1.56	5.02	100	
A ₂	D16	4190	21	1.56	6.54	137	
A ₃	D16	4790 (平均長)	10	1.56	7.47	75	
A ₄	D16	3465 (平均長)	12	1.56	5.41	65	
A ₅	D16	3060 (平均長)	8	1.56	4.77	38	
A ₆	D16	4100 (平均長)	9	1.56	6.40	58	
B ₁	D16	4640	21	1.56	7.24	152	
B ₂	D16	5610	20	1.56	8.75	175	
B ₃	D16	6600 (平均長)	12	1.56	10.30	124	
B ₄	D16	5275 (平均長)	10	1.56	8.23	82	
B ₅	D16	5610 (平均長)	8	1.56	8.75	70	
B ₆	D16	4570 (平均長)	9	1.56	7.13	64	
C ₁	D16	5935 (平均長)	6	1.56	9.26	56	
C ₂	D16	7855 (平均長)	14	1.56	12.25	172	
C ₃	D16	6840 (平均長)	13	1.56	10.67	139	
C ₄	D16	8260 (平均長)	13	1.56	12.89	168	
C ₅	D16	7650 (平均長)	2	1.56	11.93	24	
C ₆	D16	7990 (平均長)	2	1.56	12.46	25	
S ₁	D16	3000	2	1.56	4.68	9	
S ₂	D16	1070	2	1.56	1.67	3	
S ₃	D16	1395 (平均長)	4	1.56	2.18	9	
H ₁	D16	6580 (平均長)	13	1.56	10.26	133	
K ₁	D22	3380	24	3.04	10.28	247	

	D16	1877	
	D22	247	
鉄筋重量合計		小 計	2124
D16	1877	kg	
D22	247	kg	
合 計		2124	kg

株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 (に関する検討 (平成25年度) 日付 2014.01.31)	図面番号 14
	図面名称 プラグ配筋図 (その3)	設計コード 縮尺 1/50

マンホール全体組み立て図 S=1/10

NO.	日付	内容	担当	照査	承認



9	伝達板	外径 φ950×t30.0	JIS G3202 FSVC2A	1式	40	
8	ノズルフランジ	外径 φ605/内径 φ317.6×(165.1+6.4)L	JIS G3202 FSVC2A	1式	140	JPI-600クラス 350A突合せ溶接形
7	エルボ	外径 φ355.6/内径 φ317.6×t19.0	JIS B2312 PS480	1式	90	300A 90E (S) sch80
6	ノズル管台	外径 φ414/内径 φ317.6	JIS G3202 FSVC2A	1式	80	
5	スタッドボルト・ナット	M48	JIS G4107 SNB-7	48組	8/組	ねじメートル細めピッチ3
4	マンホールふた板	外径 φ11806×t(110+7)	JIS G3204 SFVQ2B	2式	1060/ケ	
3	マンホールフランジ	外径 φ1180/内径 φ800×230L	JIS G3202 FSVC2A	2式	550/ケ	
2	気密材取付ハブ	外径 φ1400/内径 φ800×469L	JIS G3202 FSVC2A	1式	1000	
1	内筒	外径 φ850/内径 φ800×t25	JIS G3103 SB480	1式	1000	2枚割り
部材記号	名称	寸法	材質	数量	重量(kg)	記事

株式会社 大林組 原子力本部 原子力環境技術部	工事名称 瑞浪超深地層研究所における工学技術 に関する検討(平成25年度) 日付 2014.01.31	図面番号 15
	図面名称 マンホール全体組み立て図 縮尺 1/10	設計コード

Ⅱ. 止水壁設計計算書および設計図

This is a blank page.

1. プラグ二次元解析

1. 1 解析モデル及び解析条件

モデル範囲及び解析境界条件，载荷条件を図 1.1-1 に示す。

岩盤とプラグの界面は，不連続体とし，接触定義を行い，道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編に基づき，摩擦係数 $\mu = 0.60$ とした。

材料構成則は，コンクリートを線形弾性とし，岩盤は弾塑性（Mohr-Coulomb）モデルとした。用いた材料定数を表 1.1-1 に示す。

解析は，汎用非線形有限要素法解析プログラム ABAQUS を使用し，軸対称性を用いて行う。

作成した全体モデルの要素数は 2,900 で，節点数は 3,057 であった。

表 1. 1 - 1 材料定数

1) 岩盤（M I Z 1 における平均値）

適用	記号	単位	値
弾性係数	E_{50}	G P a	53.9
ポアソン比	ν	—	0.265
比重		—	2.62
粘着力	c	M P a	39.1
内部摩擦角	ϕ	°	52.2
一軸圧縮強度	σ_c	M P a	173
引張強度	σ_t	M P a	6.48

2) コンクリート（低アルカリコンクリート）

適用	記号	単位	値
設計基準強度	σ_{ck}	M P a	60
弾性係数	E	G P a	35
ポアソン比	ν	—	0.2
単位体積重量	γ	k N / m ³	24.5

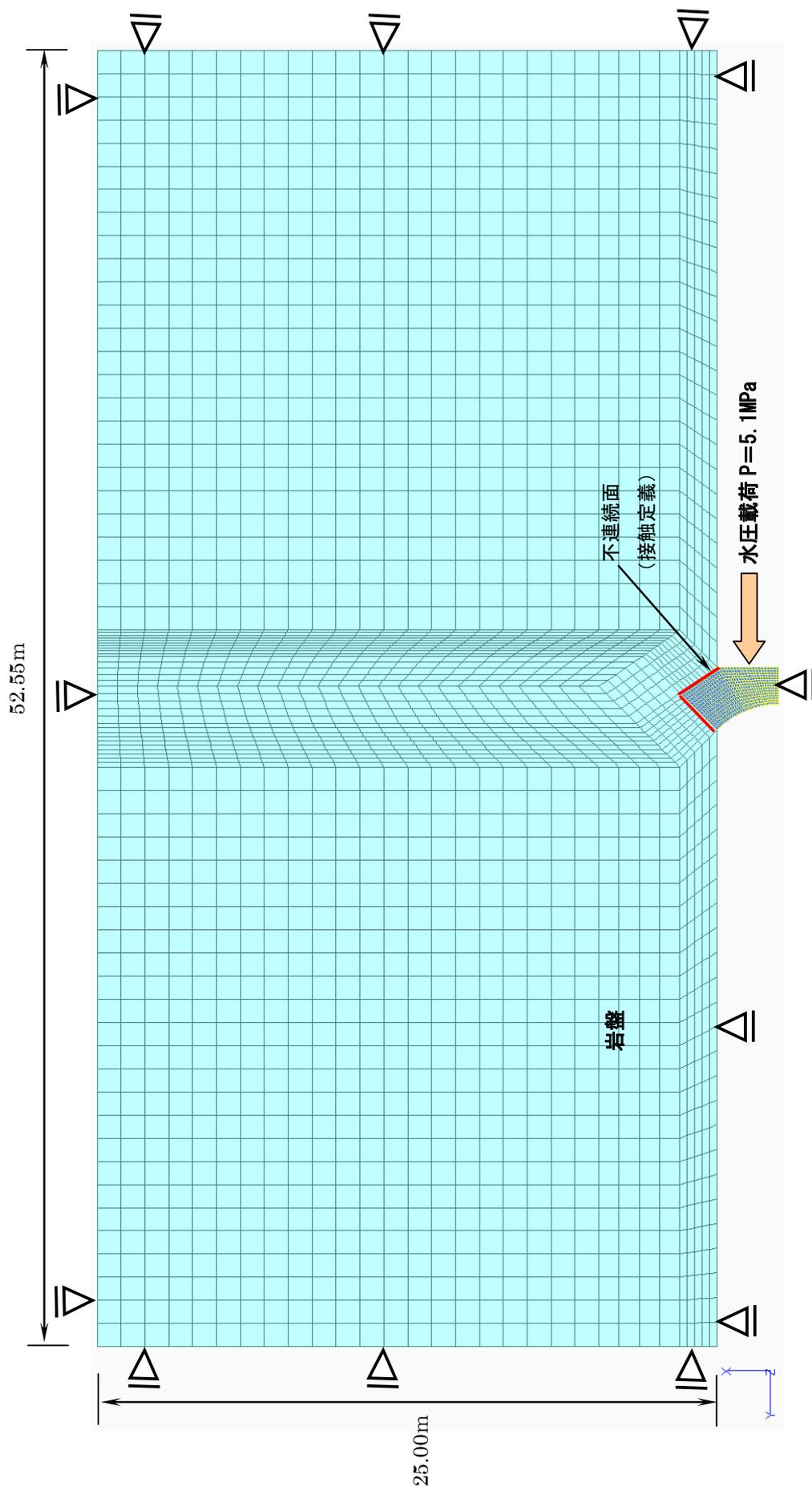


図1-1 解析モデルおよび解析条件

1. 2 解析結果

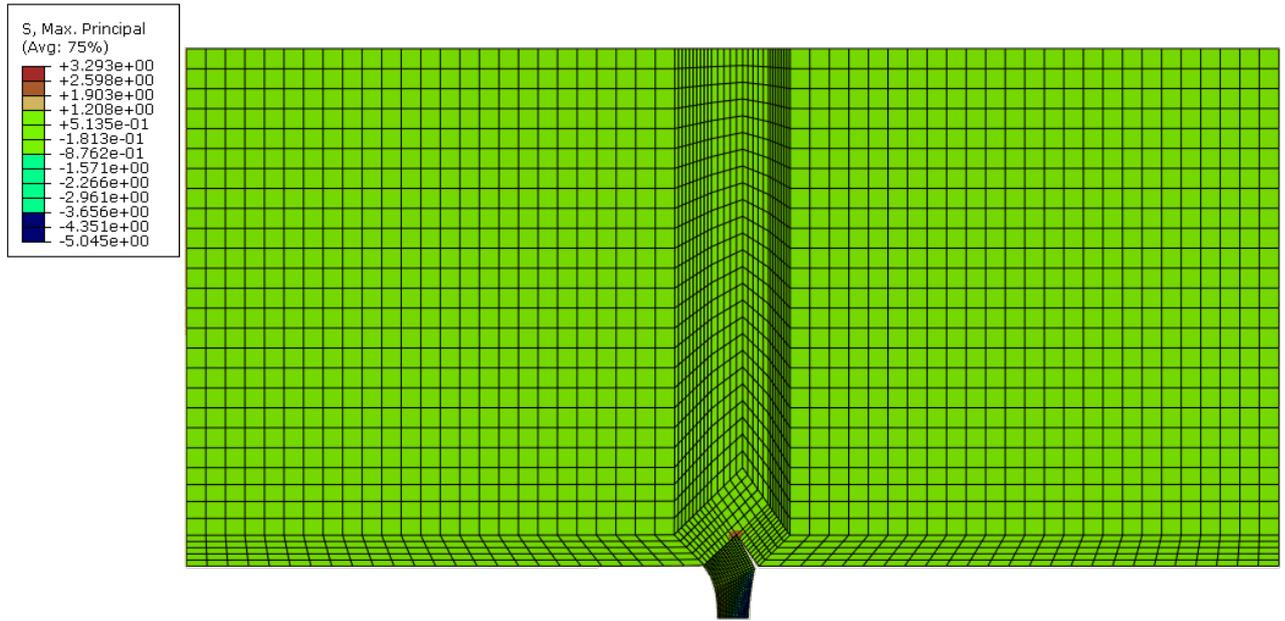
解析結果，最大・最小主応力分布を図 1. 2-1～1. 2-3 に示す。変位分布を図 1. 2-4～1. 2-8 に示す。プラグおよび岩盤における最大・最小主応力の最大値を表 1. 2-1 に示す。

プラグの応力状態については，最大主応力（プラスの値）の最大値はプラグの最も薄い中央断面で生じ，3.160MPa であった（図 1. 2-2 参照）。また，最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの前面先端部で生じ，-10.93MPa であった（図 1. 2-3 参照）。

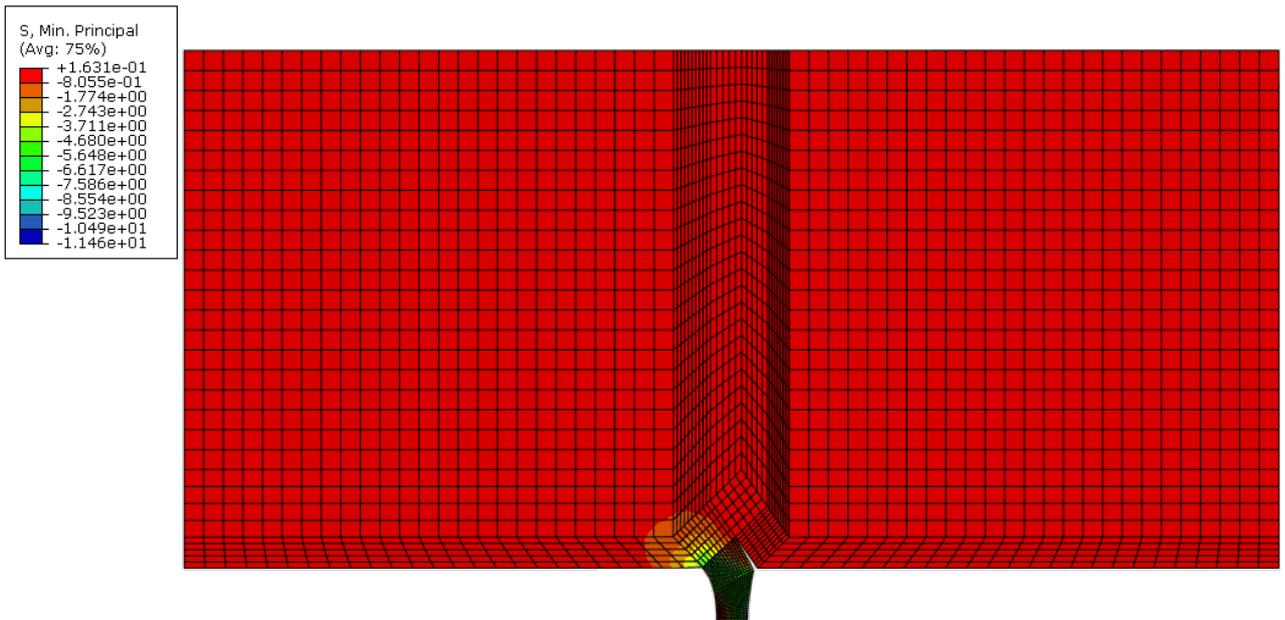
岩盤の応力状態については，最大主応力（プラスの値）の最大値はプラグの頂部と接する場所で生じ，2.324MPa であった（図 1. 2-2 参照）。また，最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの前面先端部と接する場所で生じ，-5.668MPa であった（図 1. 2-3 参照）。

表 1. 2 - 1 最大・最小主応力の最大値一覧（「+」＝引張）

場所	最大主応力 (MP a)		最小主応力 (MP a)	
	最大値	発生場所	最大値	発生場所
プラグ	3.160	中央断面	-10.93	前面先端部
岩盤	2.324	プラグの頂部 と接する場所	-5.668	プラグの前面先端部 と接する場所

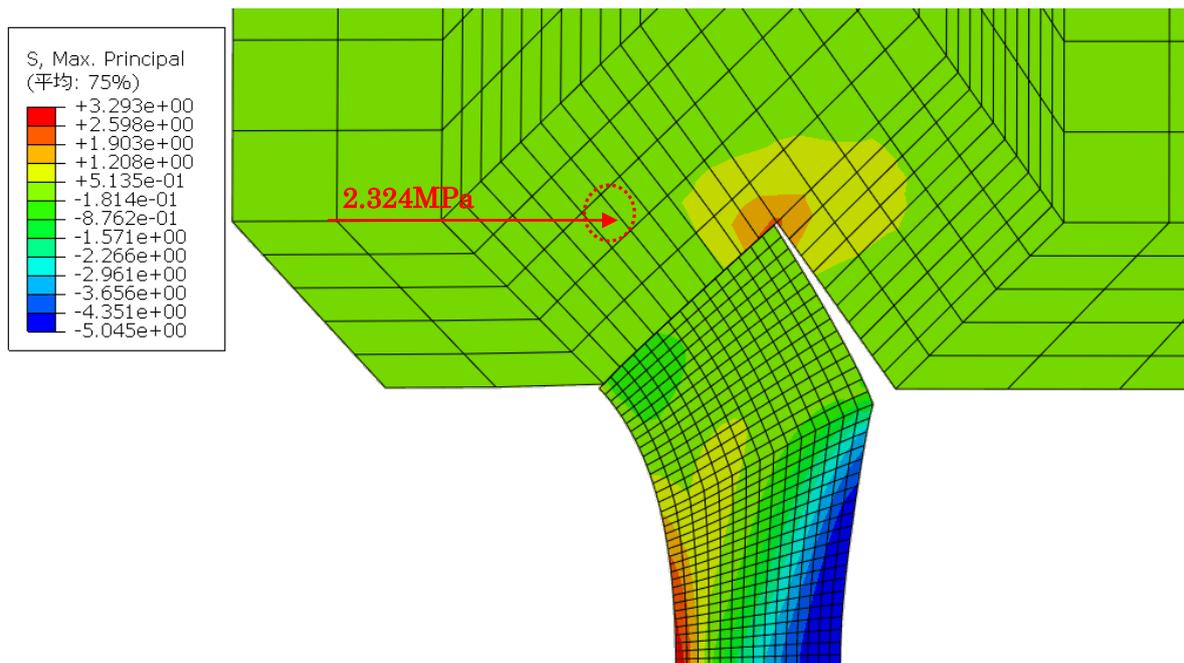


1) 最大主応力

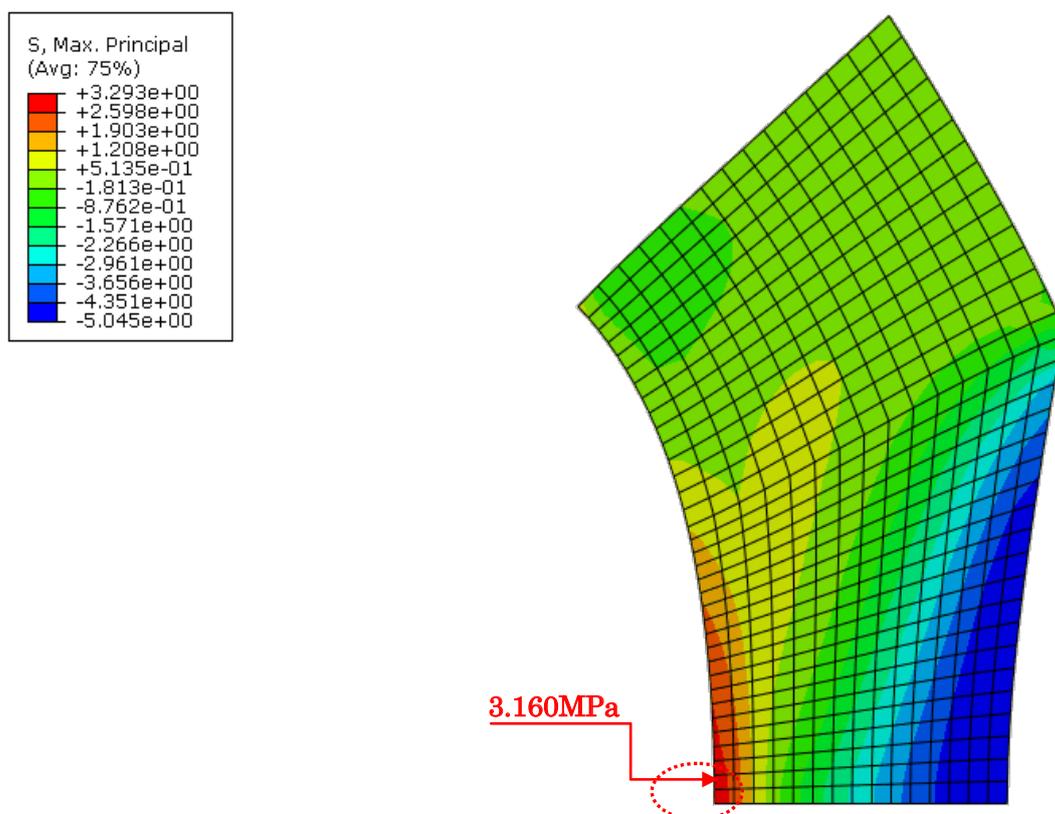


2) 最小主応力

図 1.2-1 最大・最小主応力分布 (「+」=引張; 単位=MPa): 全体
(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)

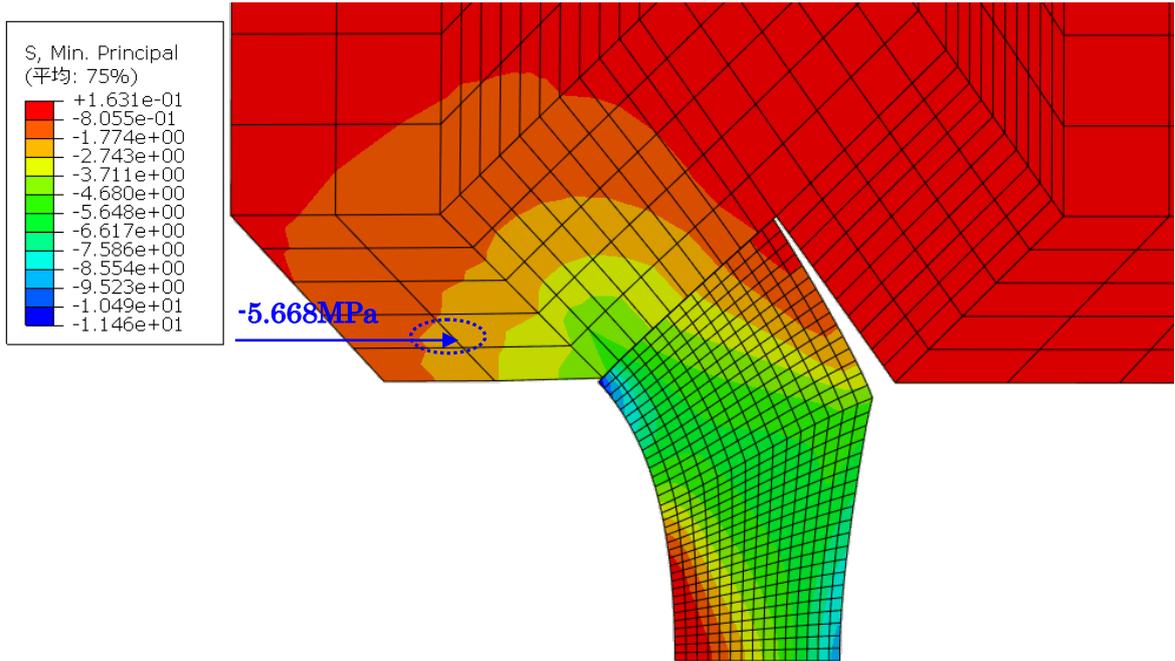


1) プラグとその近傍の岩盤

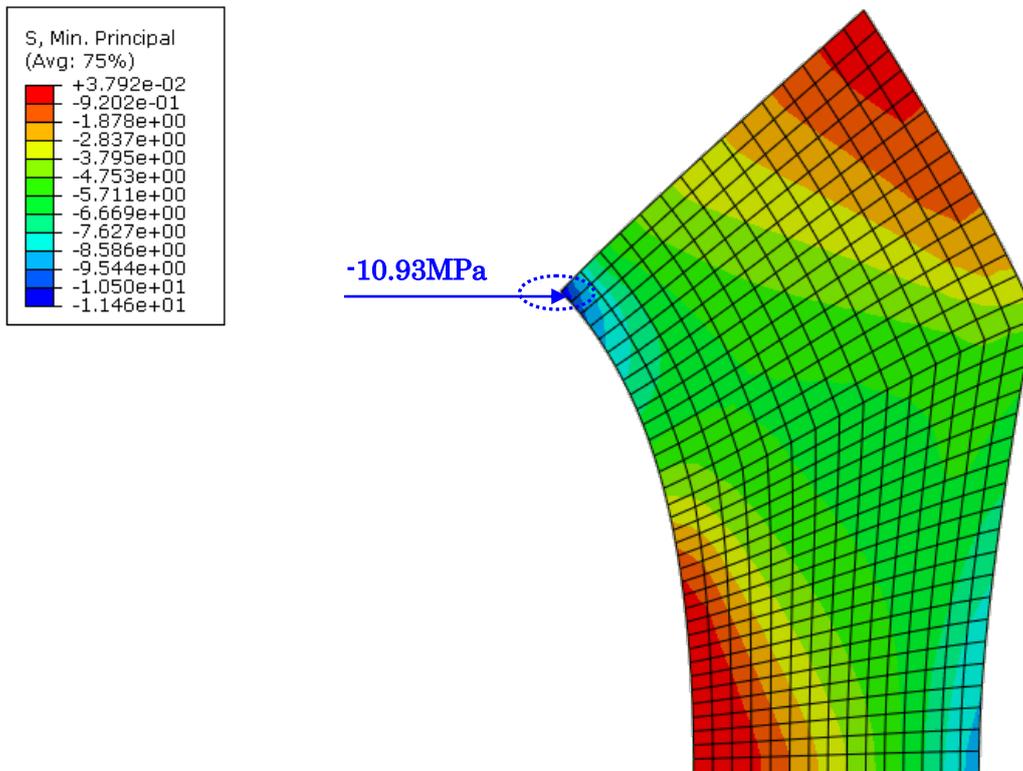


2) プラグ

図 1.2-2 最大主応力分布 (「+」=引張; 単位=MP a): プラグおよび近傍岩盤
(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)



1) プラグとその近傍の岩盤



2) プラグ

図 1.2-3 最小主応力分布 (「+」=引張; 単位=MPa): プラグおよび近傍岩盤
(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)

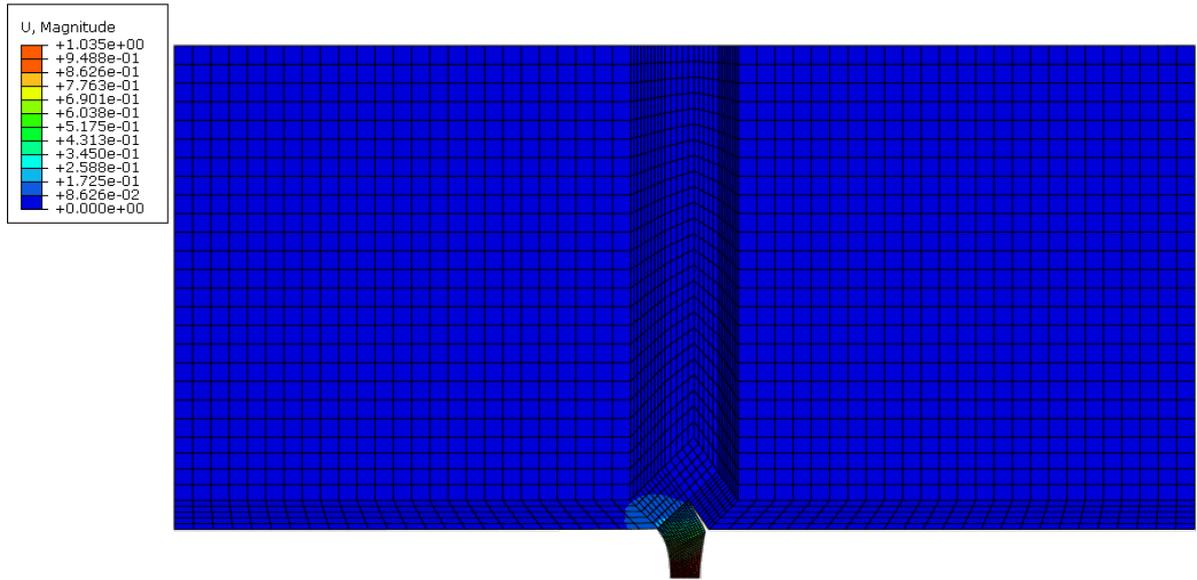
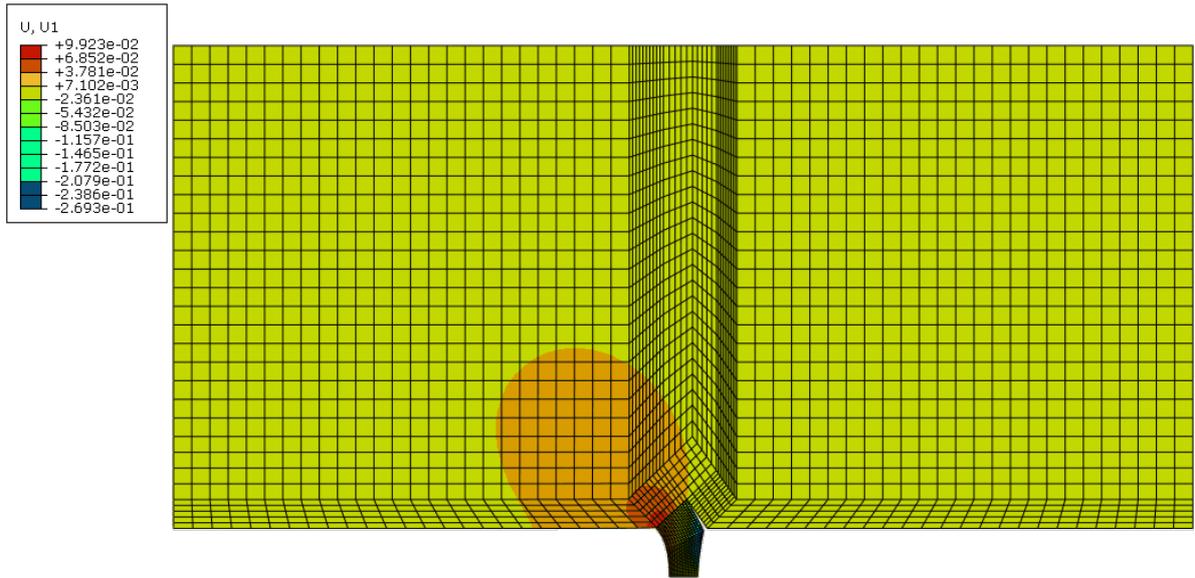
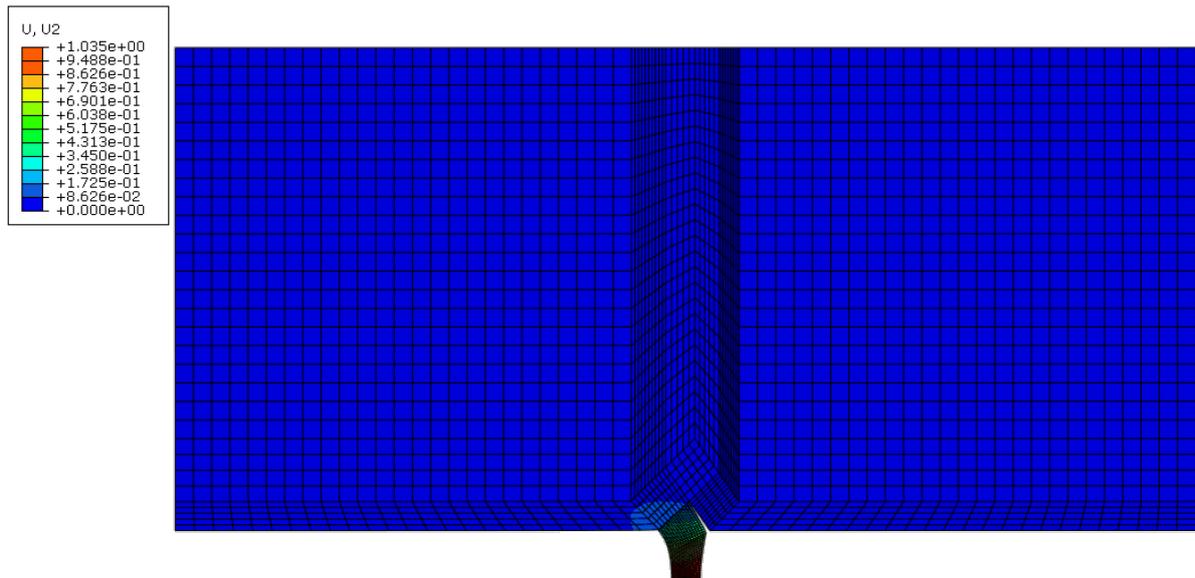


图 1.2-4 全体変位 (単位=mm) : 全体
(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

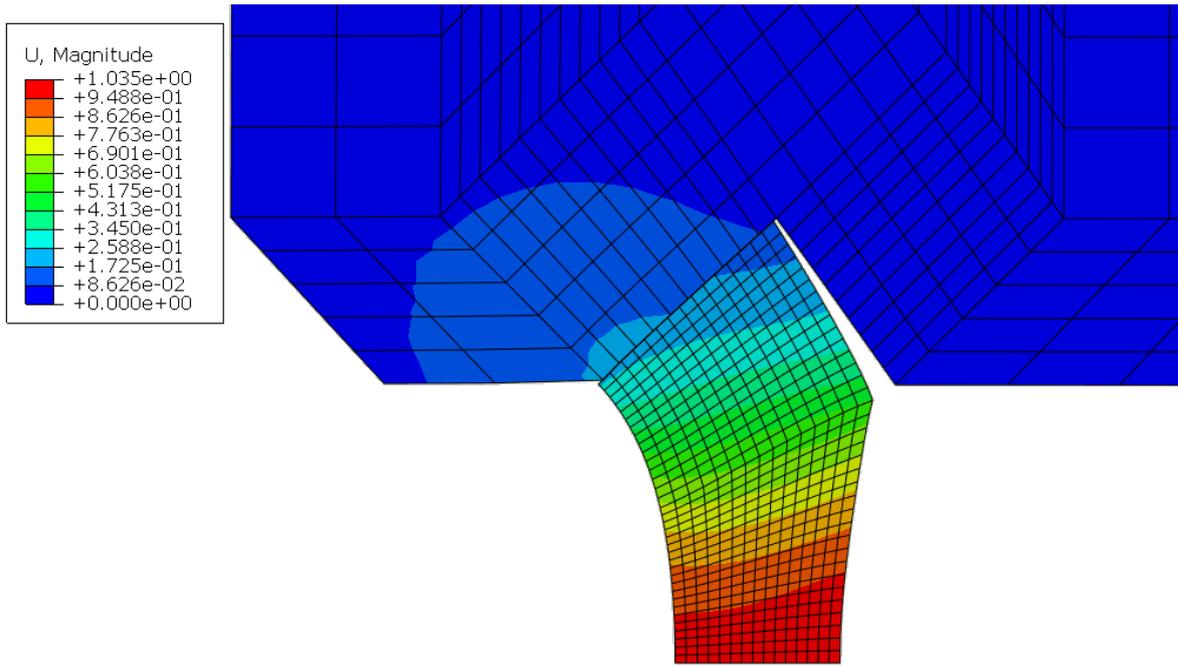


1) 水平方向変位

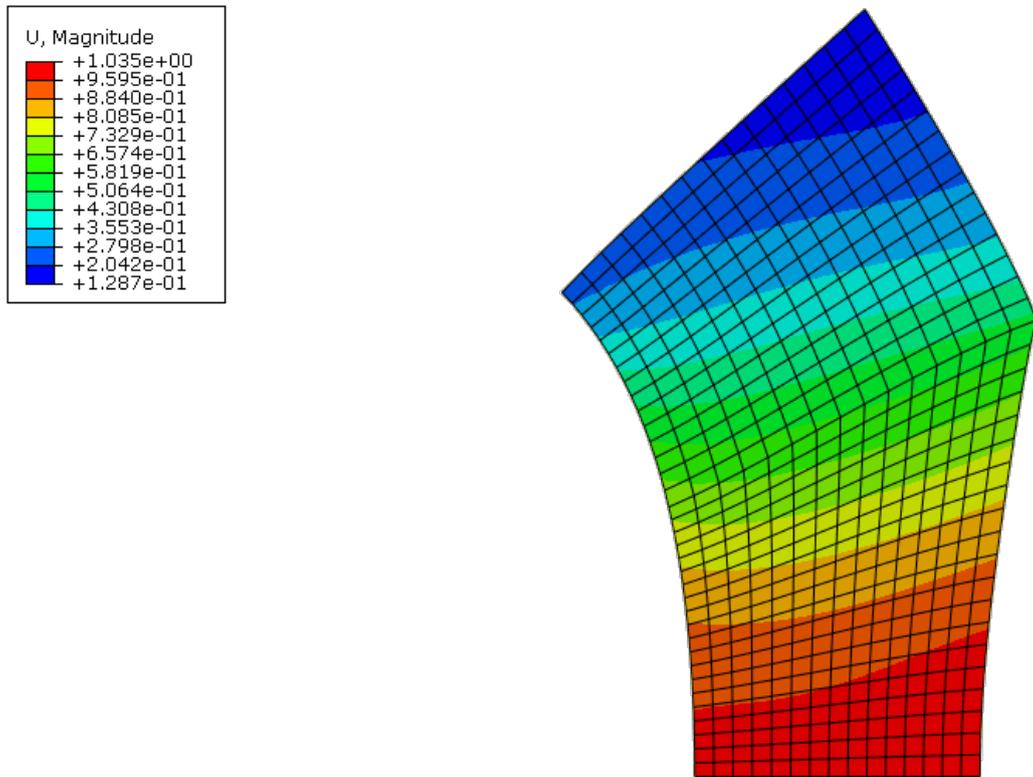


2) 鉛直方向変位

図 1.2-5 水平・鉛直方向の変位 (単位=mm) : 全体
(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

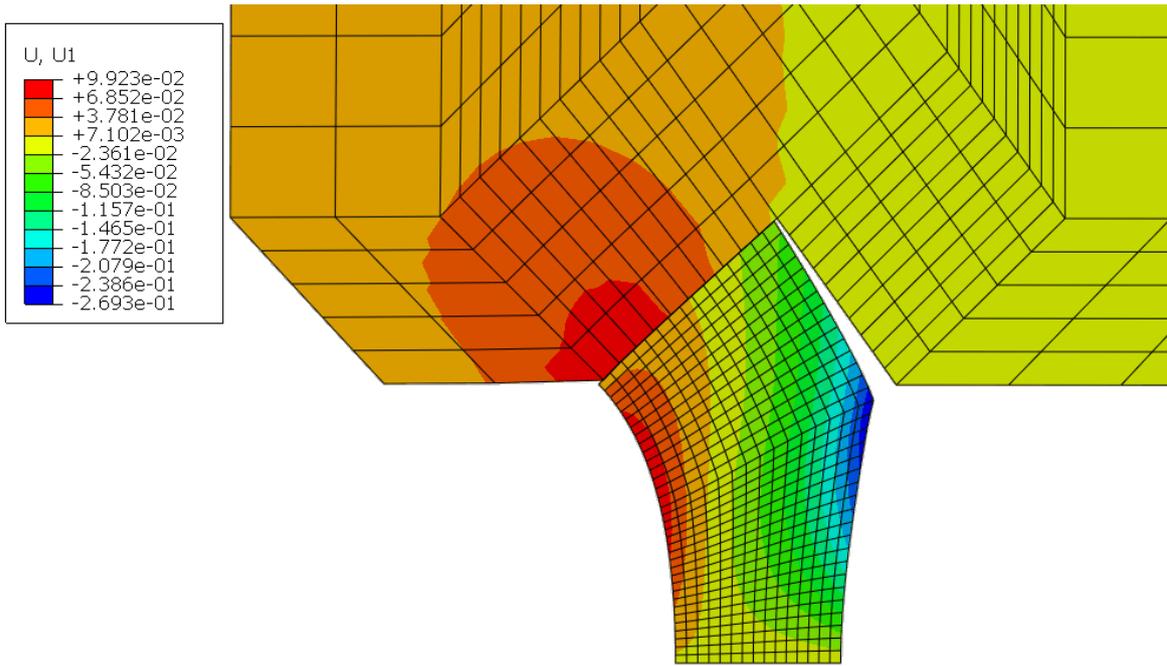


1) プラグとその近傍の岩盤

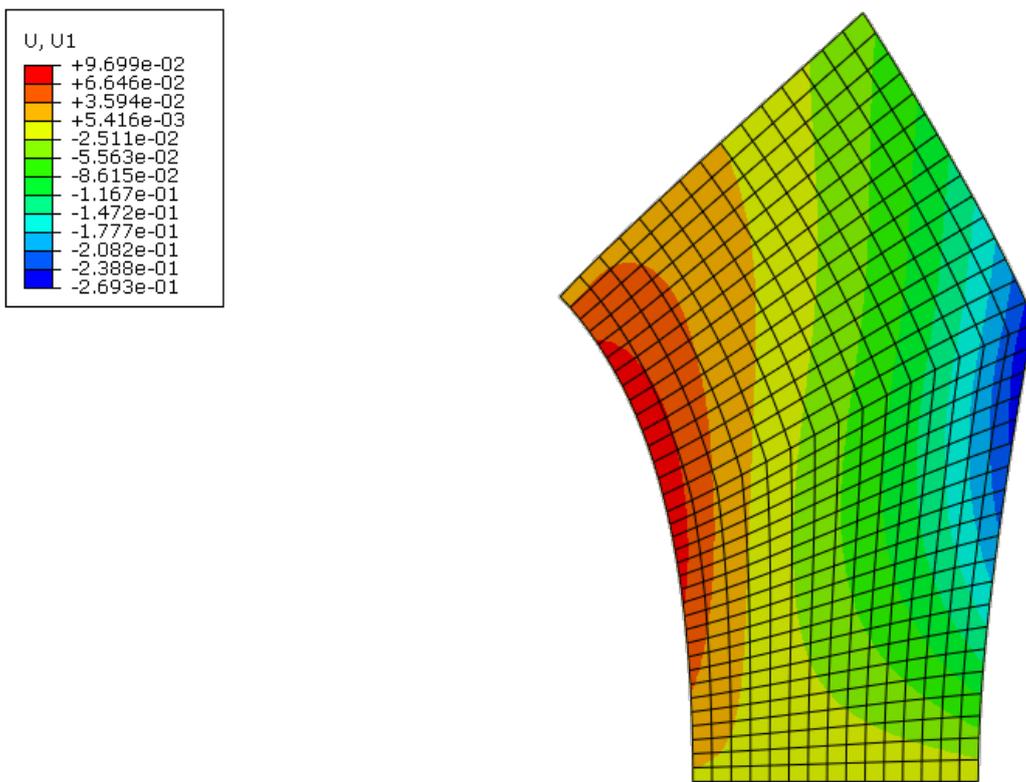


2) プラグ

図 1.2-6 全体変位 (単位=mm) : プラグおよび近傍岩盤
(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

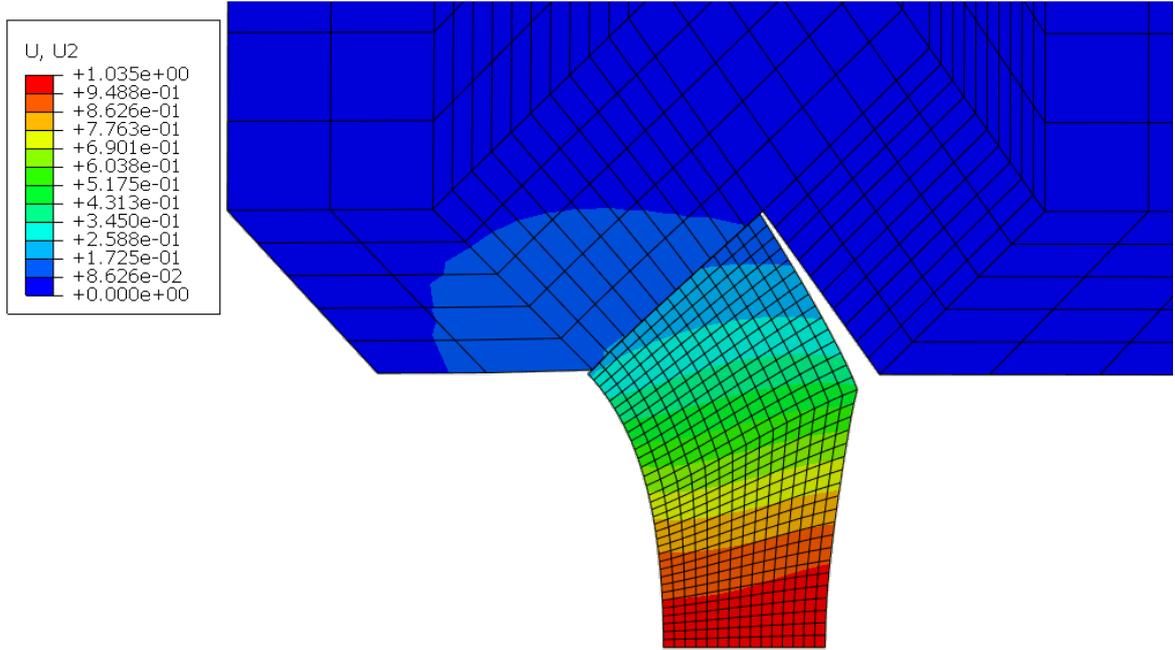


1) プラグとその近傍の岩盤

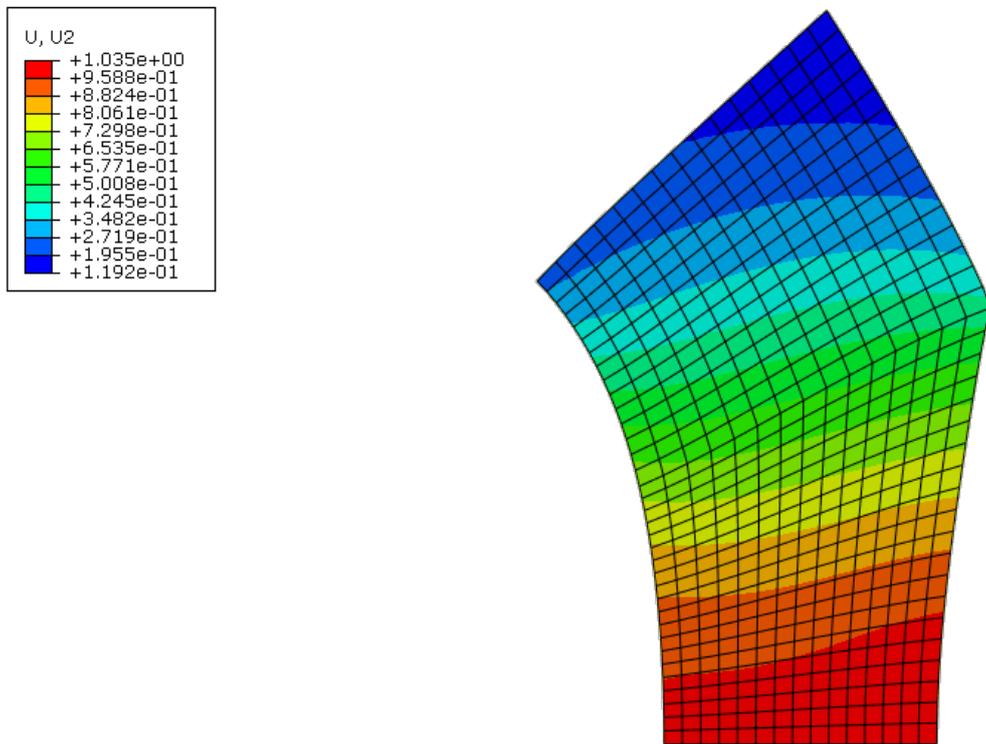


2) プラグ

図 1.2-7 水平方向変位 (単位=mm) : プラグおよび近傍岩盤
(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) プラグとその近傍の岩盤



2) プラグ

図 1.2-8 鉛直方向変位 (単位=mm) : プラグおよび近傍岩盤
(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

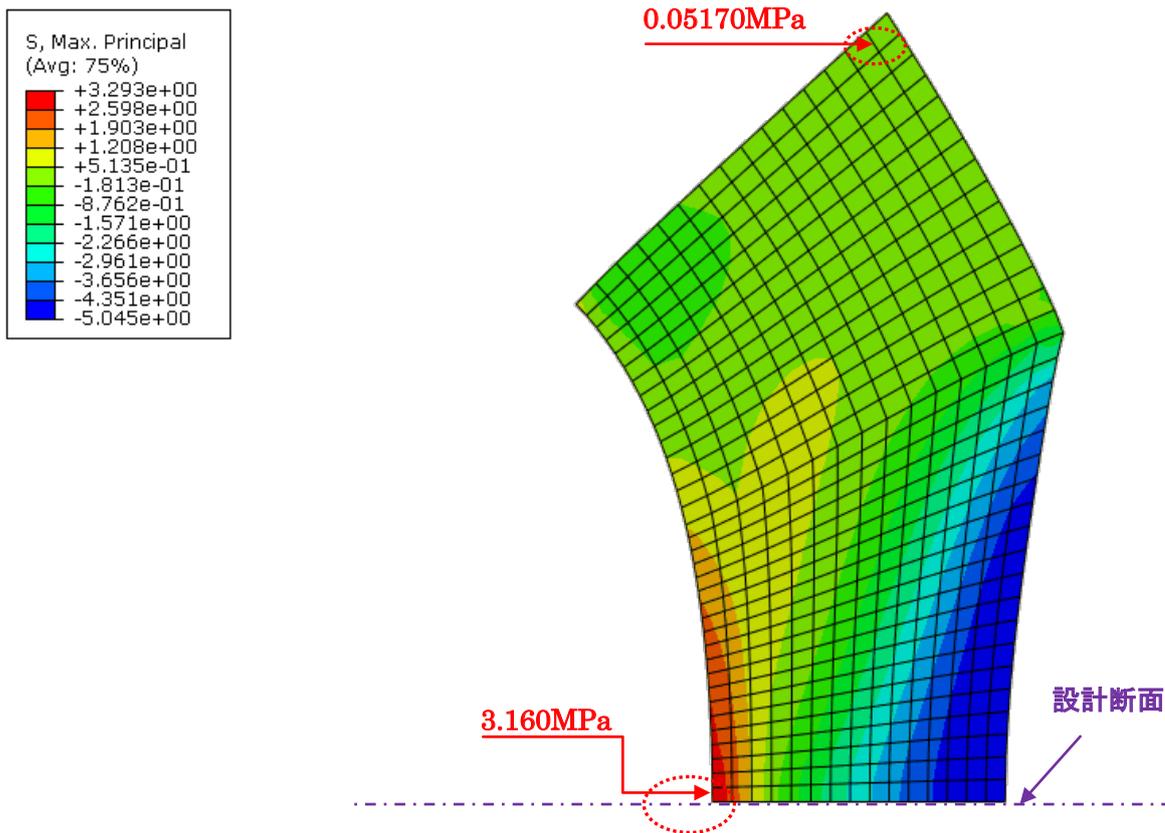
1. 3 二次元解析結果に基づく設計計算

1.3.1 設計断面の選定

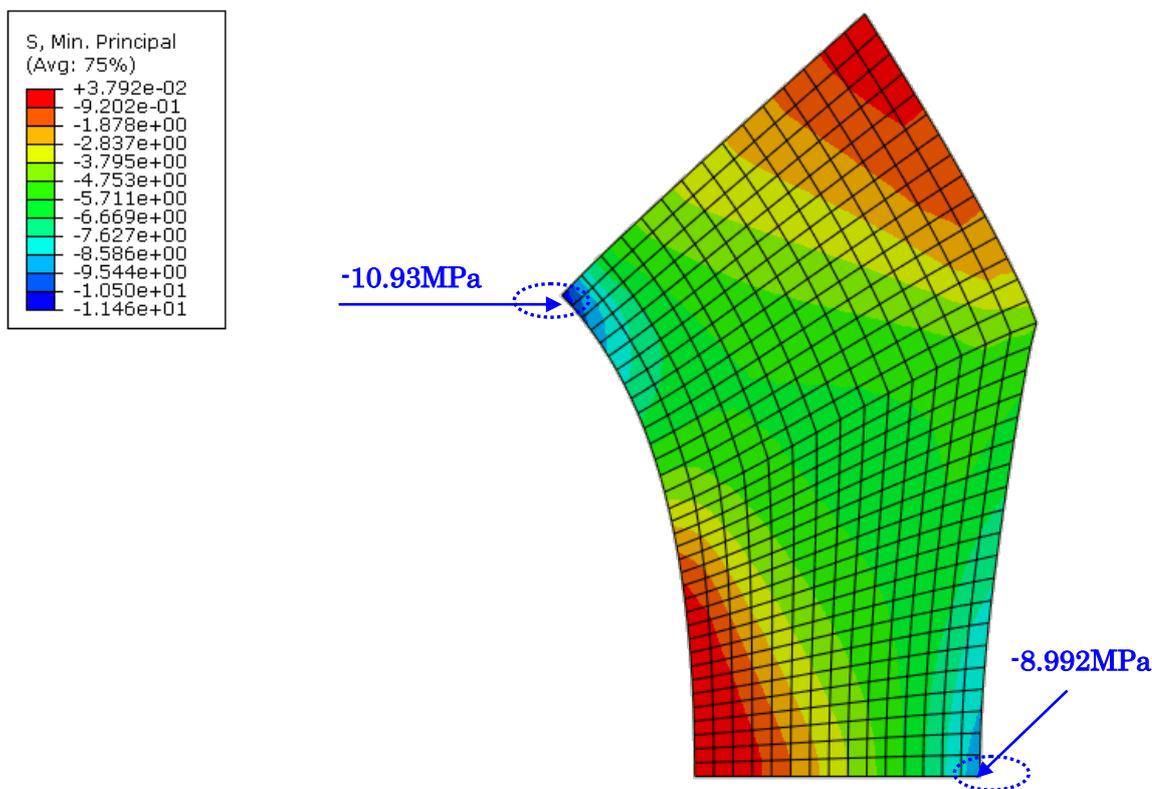
プラグの応力分布特徴については、図 1.3.1-1 (1.2 の解析結果再掲) に示すプラグの最大・最小主応力分布によると、プラグ頂部の断面において最小主応力が生じているものの、その反対側の最大主応力が小さかった。

一方、プラグの中央断面は、最も薄い断面であり、プラグの前面で最大主応力 3.160MPa が最大となり、プラグの背面における最小主応力-8.992MPa がプラグ前面先端部を除き、最も大きかった。

以上のことより、設計断面としてプラグの中央断面を選定した。



1) 最大主応力



2) 最小主応力

図 1.3.1-1 プラグの最大・最小主応力分布（「+」＝引張；単位＝MPa）（解析結果再掲）

1.3.2 プラグの設計計算

プラグの設計は、土木学会「コンクリート標準示方書【設計編】（2012年制定）」に基づいて、性能照査型設計法により行う。ここでは、表 1.3.2-1 に示す安全係数を用いて使用状態の設計を行う。

設計計算は下記の通り行った。

1) 断面力の算出

図 1.3.1-1 に示す設計断面における解析結果の引張応力度、圧縮応力度を用いて下記のように単位長さ（1m）当たりの断面力、すなわち軸力 N および曲げモーメント M を算出した。

$$\sigma_t = N/A - M/Z$$

$$\sigma_c = N/A + M/Z$$

ここでは： $\sigma_t = -3.160\text{MPa}$ （設計計算上、引張応力 = 「-」）

$\sigma_c = +8.992\text{MPa}$ （設計計算上、圧縮応力 = 「+」）

$$A = 1000 \text{ mm} \times 1500\text{mm} = 1.5 \times 10^6 \text{mm}^2$$

$$Z = 1/6 \times 1000 \text{ mm} \times 1500^2 \text{mm}^2 = 3.75 \times 10^8 \text{mm}^3$$

$$\text{よって：} \quad -3.160 = N/1.5 \times 10^6 - M/3.75 \times 10^8$$

$$8.992 = N/1.5 \times 10^6 + M/3.75 \times 10^8$$

上記の連立方程式を解くと、

$$N = 4.374 \times 10^6 \text{ (N)} = 4374 \text{ kN}$$

$$M = 2.279 \times 10^9 \text{ (Nmm)} = 2279 \text{ kNm}$$

2) RC 断面計算による配筋の決定

表 1.3.2-2 に示す単位幅（1m）当たりの RC 断面計算を行う。

主鉄筋は引張側、圧縮側をすべて D16@300（材質 SD345）とした。

かぶりは 75mm とした。

計算の結果を表 1.3.2-3 に示す。

曲げひび割れに対する照査結果は下記の通りである。

$$\text{ひび割れ幅設計値 } w_1 = 0.161 \text{ mm} < w_a = 0.375 \text{ mm} (= 0.005 \times 75 \text{ mm}) \rightarrow \text{OK}$$

$$(w_1 / w_a = 0.429 < 1.0)$$

なお、曲げひび割れに関する照査の詳細は【付属資料】に参照されたい。

圧縮応力度に対する照査の結果は下記の通りである。

$$\text{コンクリート圧縮応力度 (全断面有効)} \sigma_{c1} = 12.041 \text{ MPa} < \sigma_{ca} = 24 \text{ MPa} (= 0.4f_{ck}') \rightarrow \text{OK}$$

$$(\sigma_{c1} / \sigma_{ca} = 0.502 < 1.0) \quad (f_{ck}' = \sigma_{ck} = 60 \text{ MPa})$$

ここで、 $\sigma_{ca} = 0.4f_{ck}'$ の設定は、コンクリート標準示方書（2012年制定）[設計編：本編]10章 使用性に関する照査“10.2 応力度の制限”に準拠して設定した。

表 1. 3. 2-1 安全係数

	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数(永久) γ_{fp}	荷重係数(変動) γ_{fr}	構造物係数 γ_i
安全性 (断面破壊)	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2
使用性	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 1. 3. 2-2 RC断面計算の入力条件

	鋼種	位置 (m)	鉄筋径 (mm)	本数 (本)	鉄筋量As (cm ²)
	D1	0.0750	16.00	3.330	6.613
	D1	1.4250	16.00	3.330	6.613
鉄筋量の合計 Σ					13.226
《鋼種の説明》 D:鉄筋(φ:丸鋼) P:PC鋼材1 R:PC鋼材2 Q外ケーブル 1:上縁~高さ 0:全周 -1:上下かぶり -2:左右かぶり					
ウェブ幅	bw	(cm)	100.00		
部材の高さ	h	(cm)	150.00		

表 1. 3. 2-3 使用限界に対する照査結果

使用限界・曲げ		使用限界・曲げ	
曲げ(永久) Mpd (kN.m)	0.000	σ_{c1} (引張無視) (N/mm ²)	12.041
曲げ(変動) Mrd (kN.m)	2279.000	σ_{c2} (引張無視) (N/mm ²)	0.000
曲げ(設計) Md (kN.m)	2279.000	ひびわれ幅(設計) W1 (cm)	0.0161
軸力(永久) N'pd (kN)	0.000	ひびわれ幅(永久) W2 (cm)	0.0000
軸力(変動) N'rd (kN)	4374.000	許容ひびわれ幅 wa (cm)	0.0375
軸力(設計) N'd (kN)	4374.000	W1/wa	0.429
変動荷重係数 k 曲げ	1.000	W2/wa	0.000
変動荷重係数 k 軸力	1.000		

2. プラグ三次元解析

2. 1 解析モデル

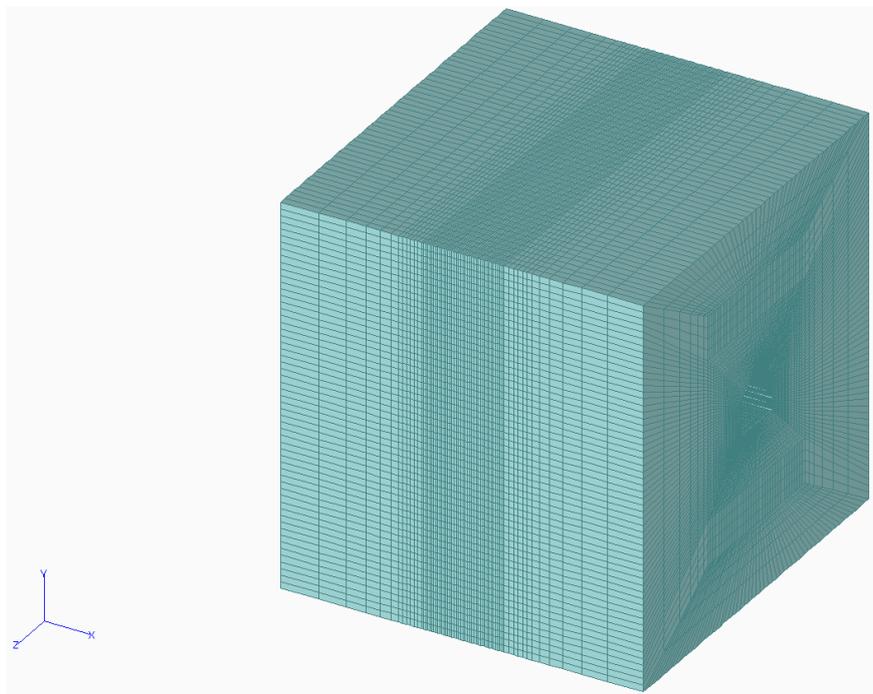
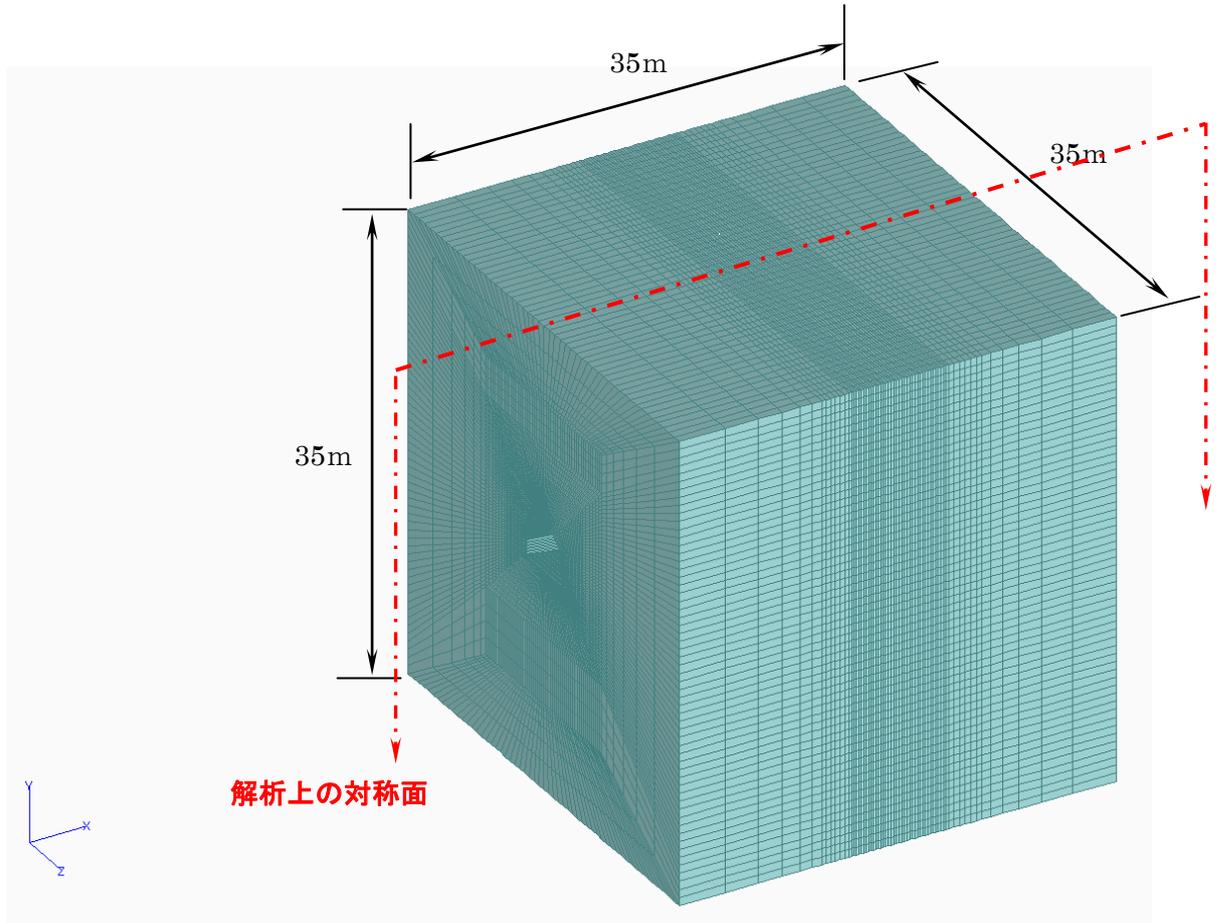
モデル範囲は、プラグから 3D ($D=5.0\text{m}$) 離れた範囲とし、岩盤のモデル範囲は $35\text{m}\times 35\text{m}\times 35\text{m}$ の立方体とした (図 2.1-1)。プラグは、計測データを反映し、厚さ方向に 13 分割とした (図 2.1-2)。プラグ全モデルの要素数は 19,000 で、節点数は 21,279 であった。

メッシュ分割は、0.5D 範囲にて大きさ 0.20m で、0.5D~1D 範囲では大きさ 0.40m とし、それ以外の範囲では、縦断方向に等比例逓増で前面および背面をそれぞれ 6 分割とした。

作成した全体モデルの要素数は 390,582 で、節点数は 413,316 であった。

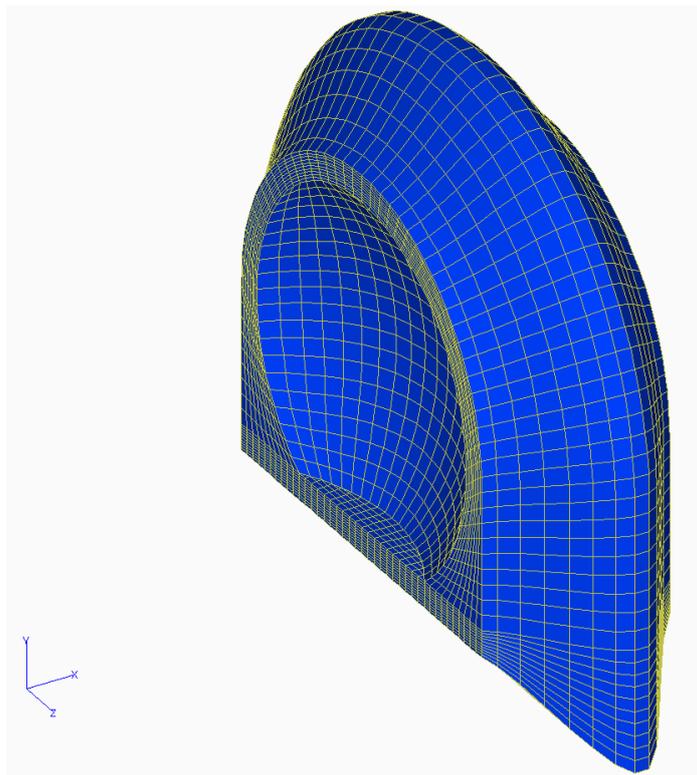
各角度から見たモデルの様子を図 2.1-3~図 2.1-7 に示す。

なお、解析において、図 2.1-1 に示す対称面における対称条件を利用し、二分の一モデルで解析を行った。

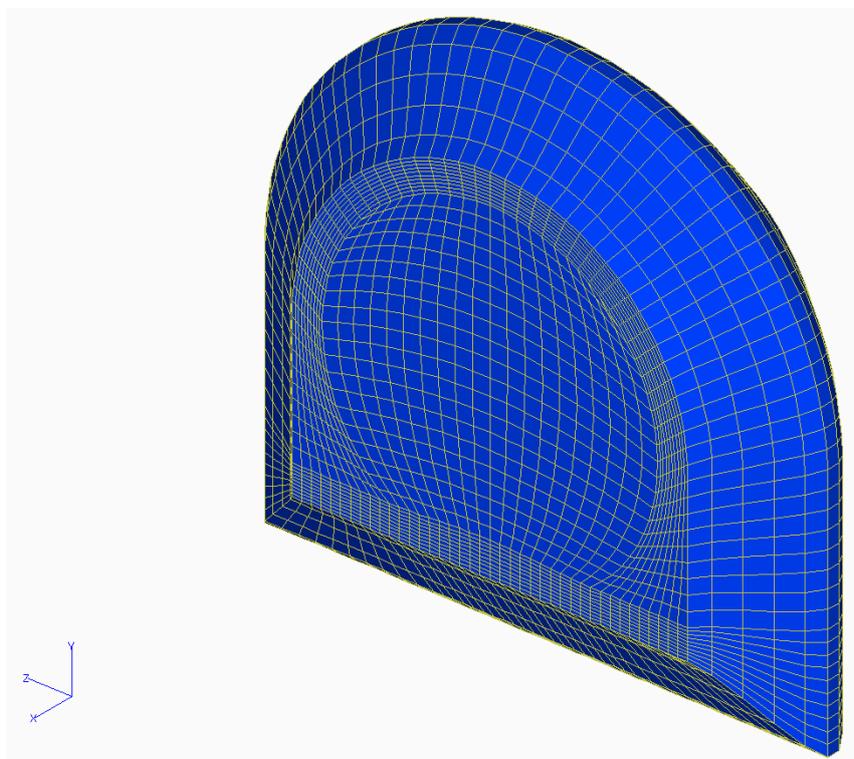


2) 背面から斜視

図2. 1-1 岩盤のモデルおよび範囲

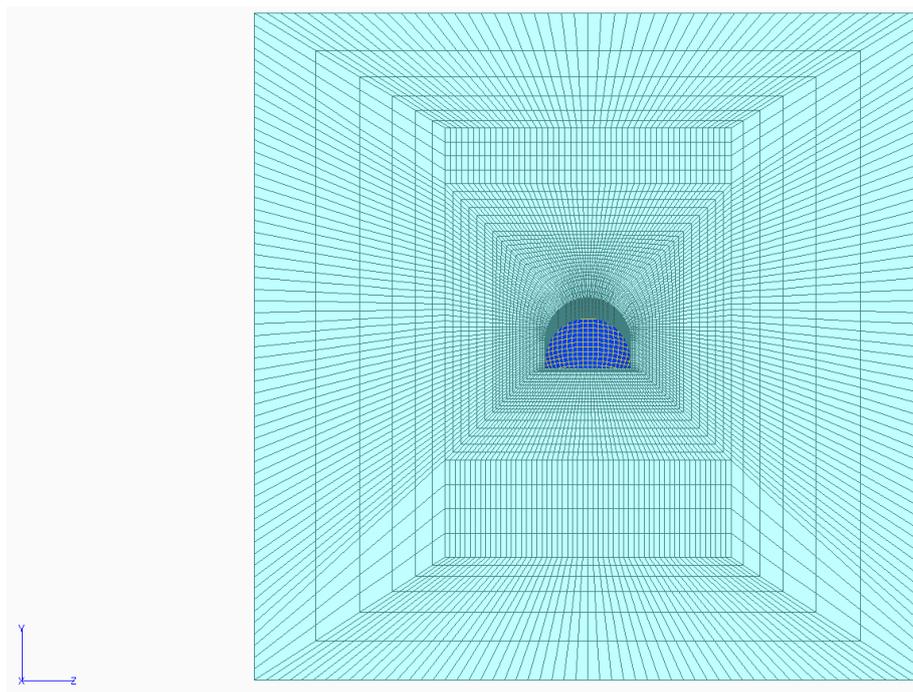


1) 前面から斜視

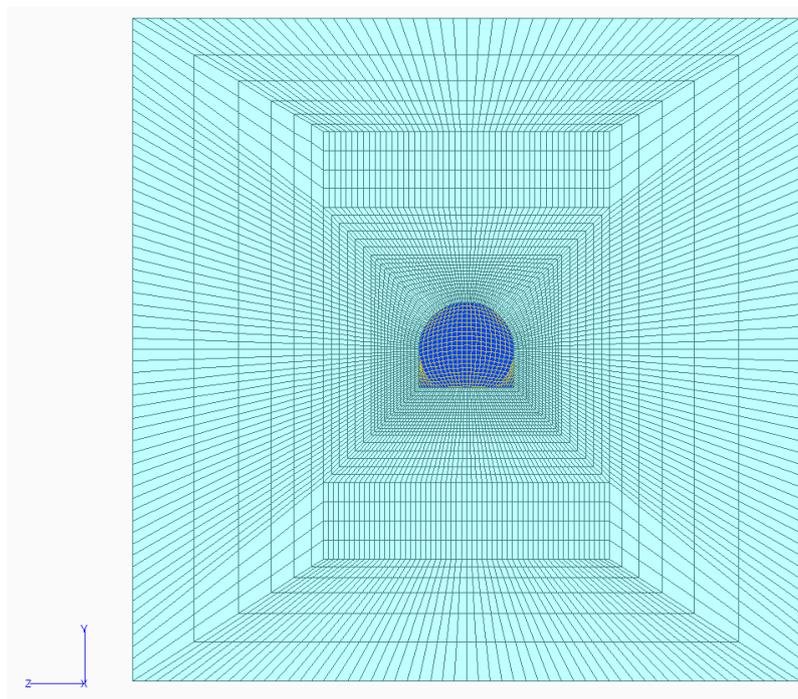


2) 背面から斜視

図2. 1-2 プラグのモデル

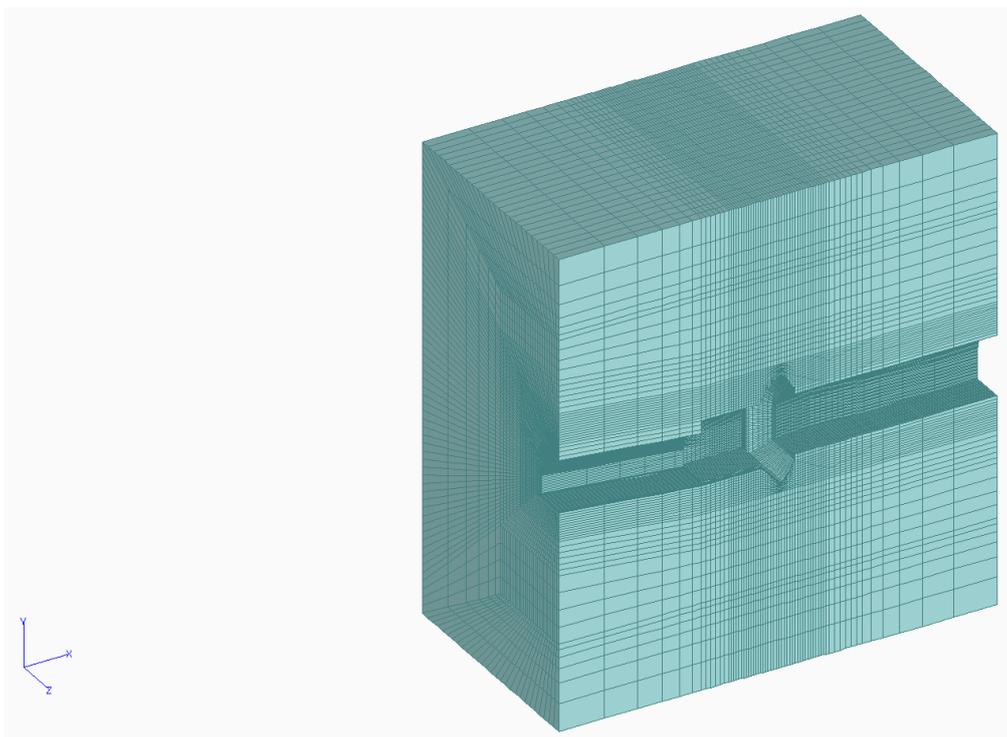


1) 前面から直視

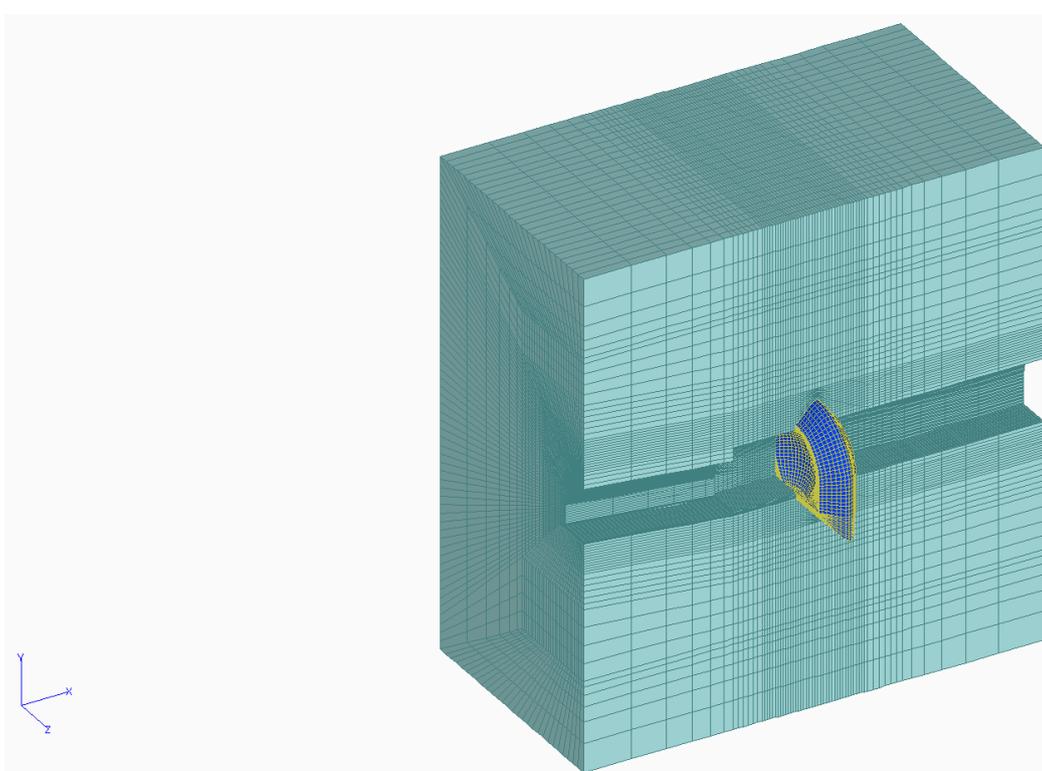


2) 背面から直視

図2. 1-3 岩盤+プラグのモデル

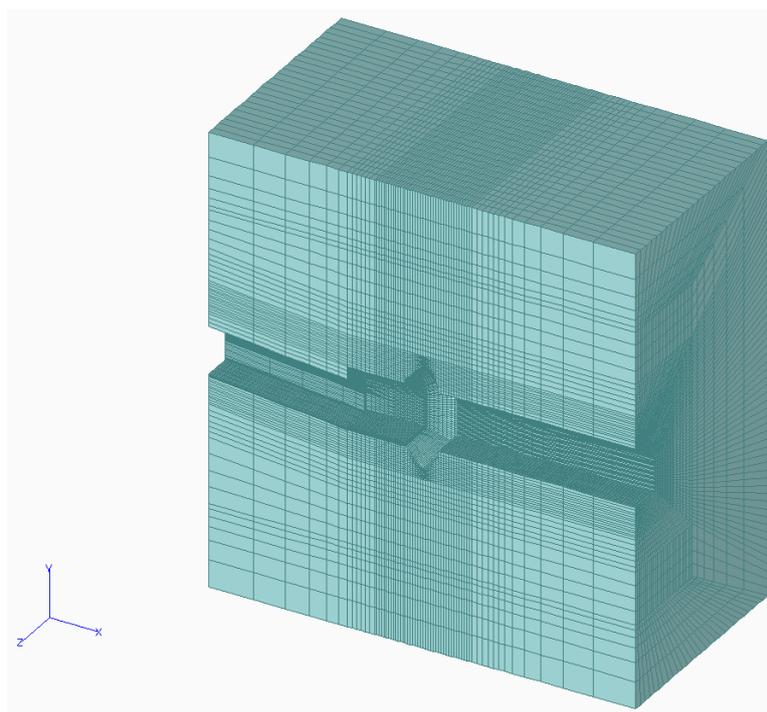


1) 前面から斜視：岩盤

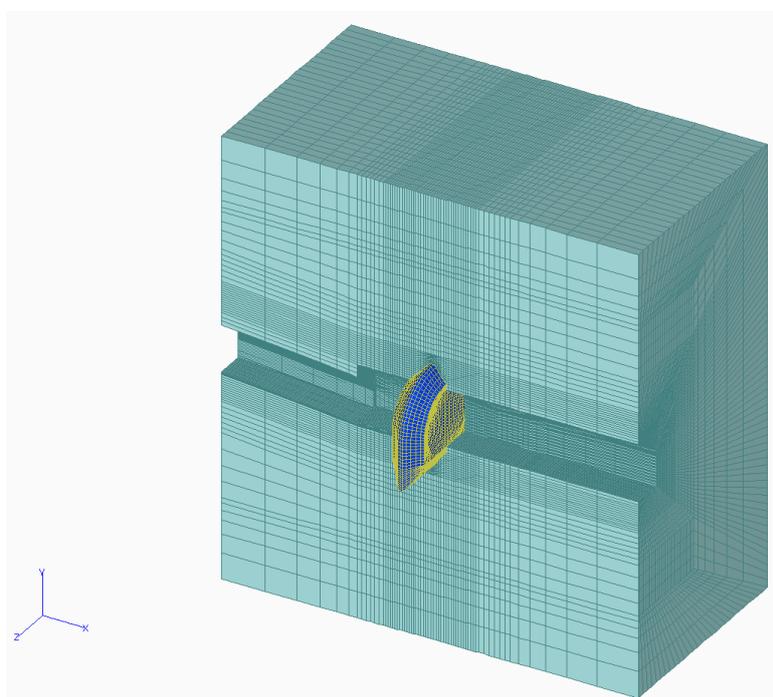


2) 前面から斜視：岩盤+プラグ

図 2. 1-4 岩盤+プラグのモデル：縦断方向中央断面その 1

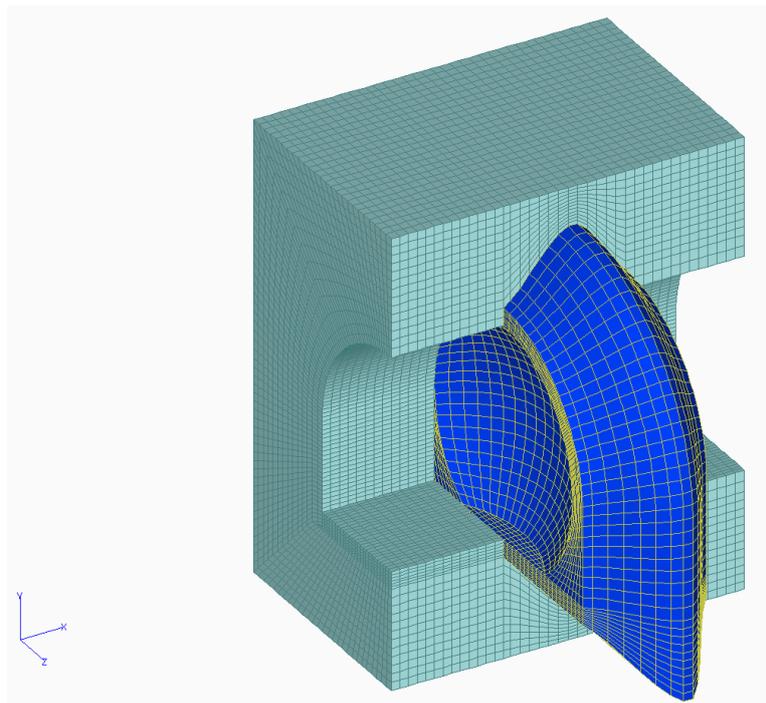


1) 背面から斜視：岩盤

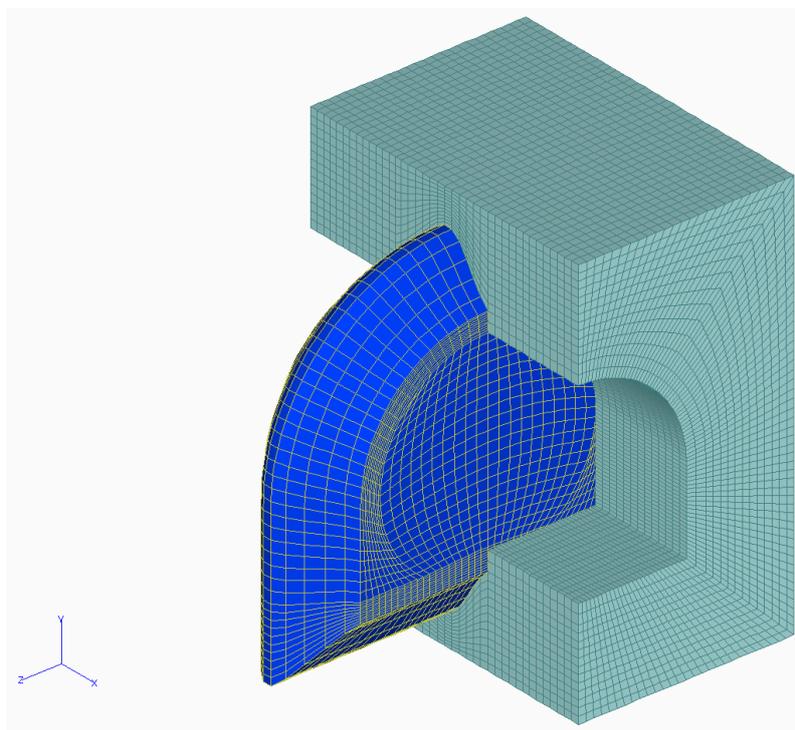


2) 背面から斜視：岩盤+プラグ

図2. 1-5 岩盤+プラグのモデル：縦断方向中央断面その2

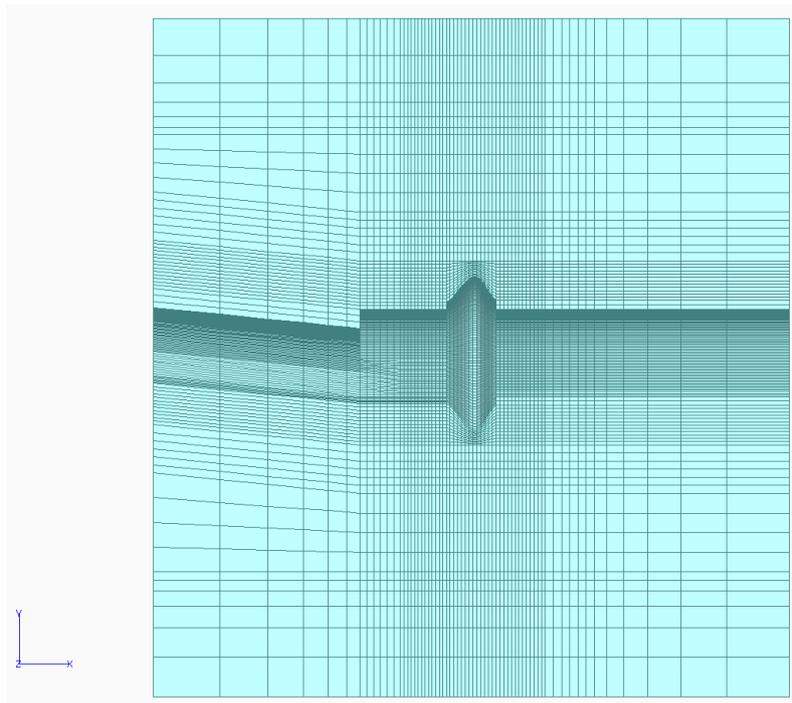


1) 前面から斜視

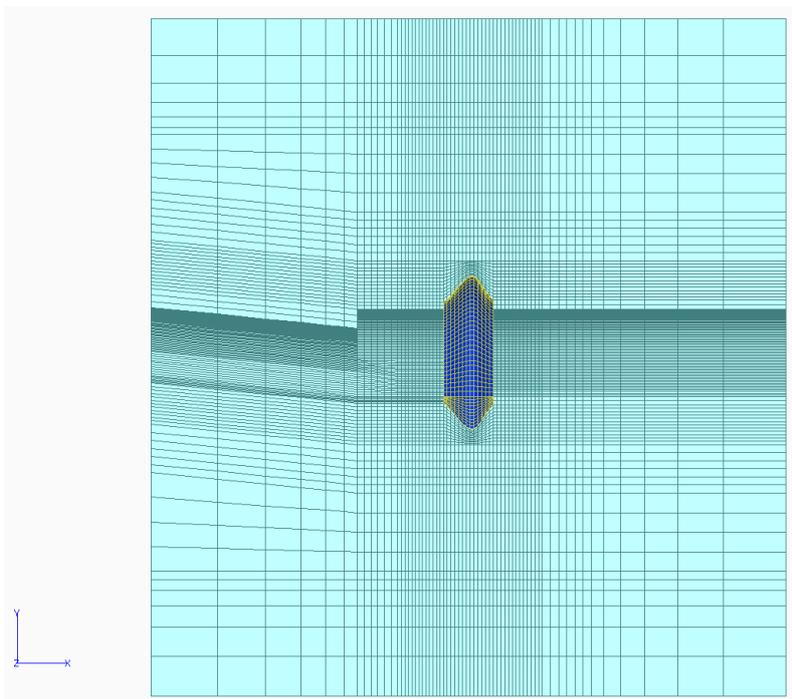


2) 背面から斜視

図2. 1-6 岩盤とプラグの位置関係：局部拡大



1) 岩盤



2) 岩盤+プラグ

図2. 1-7 岩盤+プラグのモデル側面図：縦断方向中央断面

2. 2 解析条件

解析における境界条件は下記のとおり設定した。

- 1) 対称面：対称条件
- 2) 各面の法線方向＝固定；各面の切線方向＝自由

初期応力状態については，解析モデルの上面に深さ 500m 相当の鉛直方向土圧 p_v を加える。

$$p_v = \gamma \cdot h = 2.62 \times 9.8 \text{ (kN/m}^3\text{)} \times 500 \text{ (m)} = 12,838 \text{ (kN/m}^2\text{)} = 12.838 \text{ (MPa)}$$

また，坑道の縦断方向（解析モデルの X 軸方向）および横断方向（解析モデルの Z 軸方向）の面における横拘束土圧は下記のとおりとした。

$$\text{坑道縦断方向に平行する面： } p_z = 1.4 p_v = 1.4 \times 12.838 \text{ (MPa)} = 17.973 \text{ (MPa)}$$

$$\text{坑道横断方向に平行する面： } p_x = 1.8 p_v = 1.8 \times 12.838 \text{ (MPa)} = 23.108 \text{ (MPa)}$$

解析ステップは，

- 1) 坑道および切り欠き部の掘削（応力一括解放）
- 2) プラグの建設
- 3) プラグ背面に設計荷重（ $P=5.1\text{MPa}$ ）を載荷する

とした。

材料構成則は，コンクリートを線形弾性とし，岩盤は弾塑性（Mohr-Coulomb）モデル（同二次元解析時）とした。

用いた材料定数は表 1.1-1（同二次元解析時）のとおりである。

岩盤とプラグの界面は，不連続体とし，接触定義を行う。プラグと岩盤との界面は摩擦なし，摩擦あり及び固着状態の 3 ケース検討を行う。摩擦係数は下記 3 種類とした。

- 1) 摩擦係数 $\mu = 0.1$ （摩擦なしの状態に対応）
- 2) 摩擦係数 $\mu = 0.6$ （摩擦ありの状態に対応）
- 3) 摩擦係数 $\mu = 1.0$ （固着状態に対応）

解析は，汎用非線形有限要素法解析プログラム ABAQUS を使用し，対称面における対称条件を用いて行った。

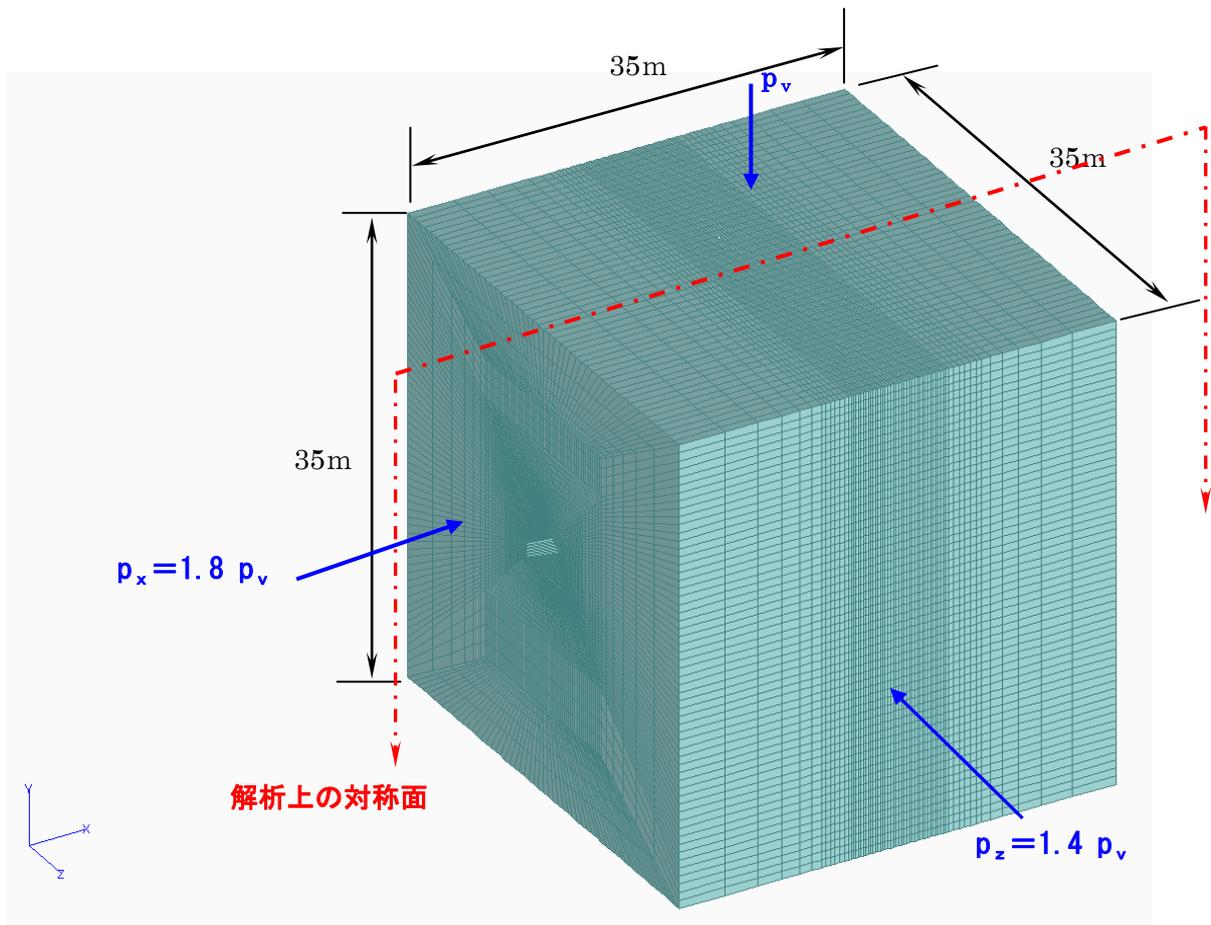


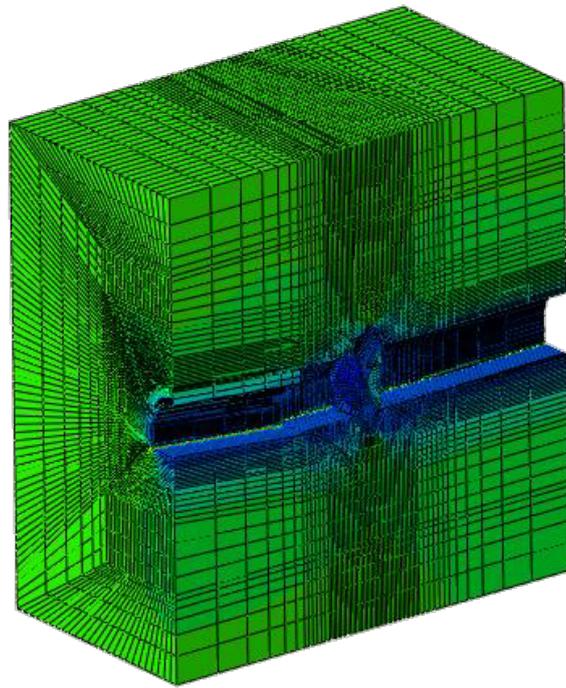
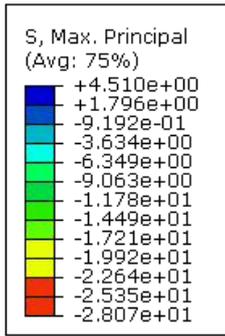
図 2. 2 - 1 解析条件の説明

2. 3 解析結果

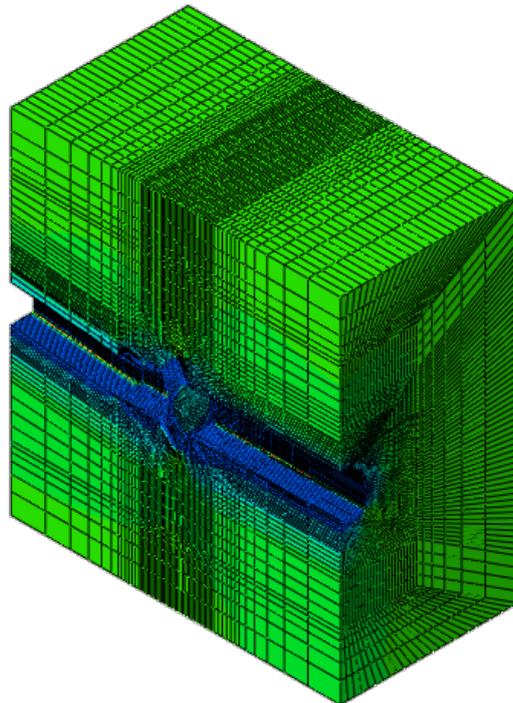
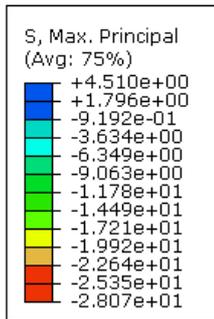
2.3.1 摩擦係数 $\mu = 0.1$ の場合

解析結果，最大・最小主応力分布を図 2.3.1-1～2.3.1-8 に示す。変位分布を図 2.3.1-9～2.3.1-10 に示す。

プラグの応力状態については，最大主応力（プラスの値）の最大値，また最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの最も薄い中央断面で生じ，それぞれ 4.216MPa，-9.175MPa であった（図 2.3.1-3，2.3.1-7 参照）。

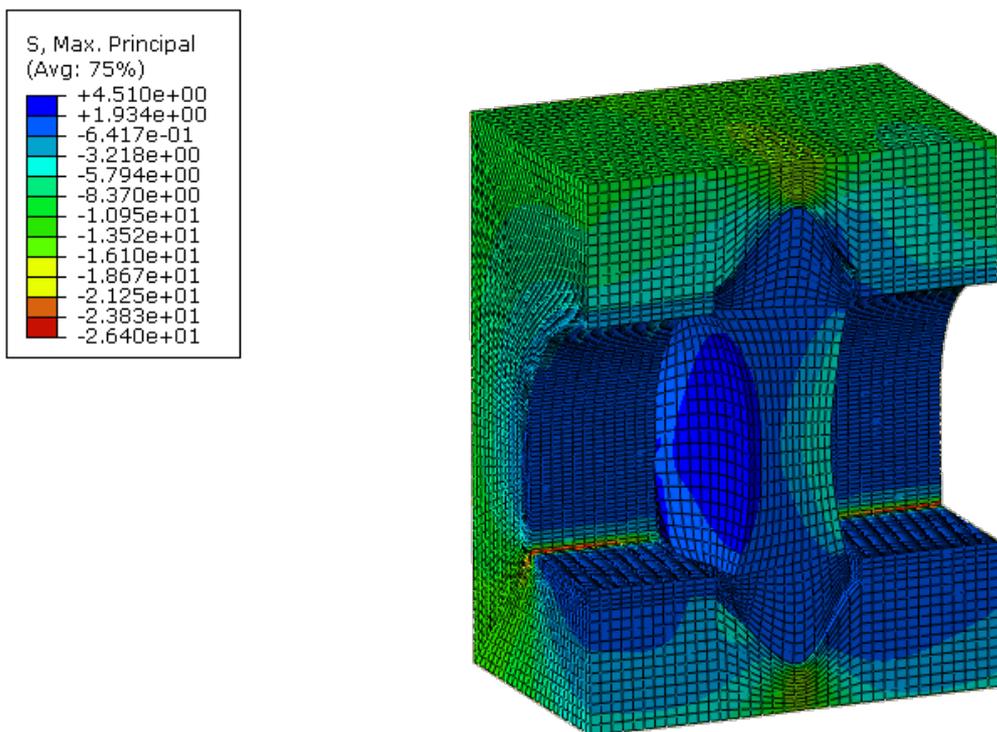


1) 前面

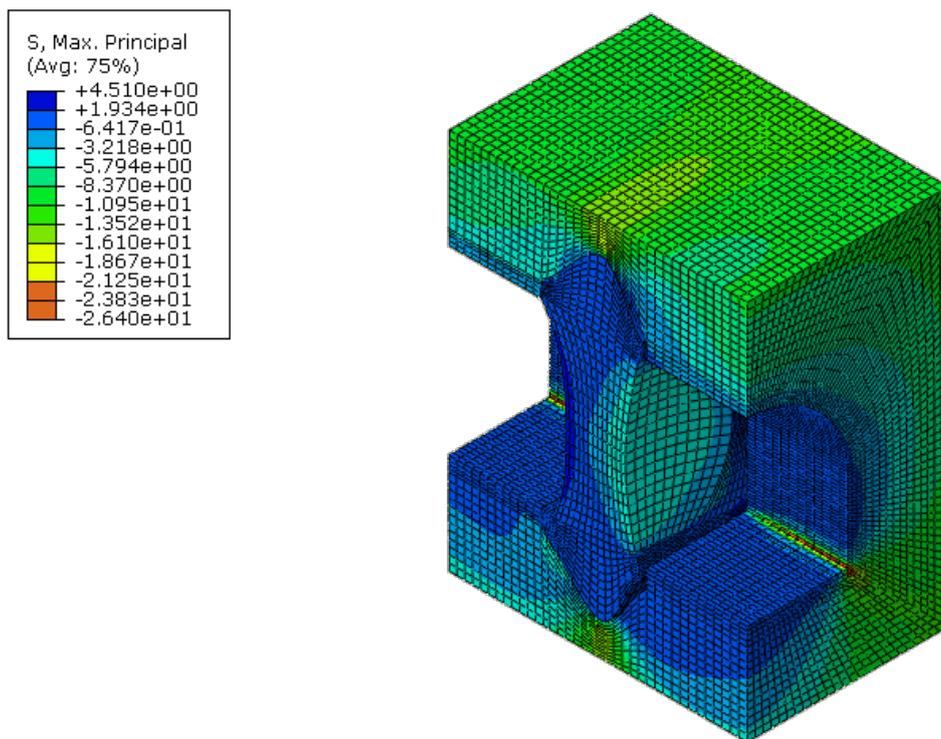


2) 背面

図 2. 3. 1-1 $\mu=0.1$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 全体
(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)



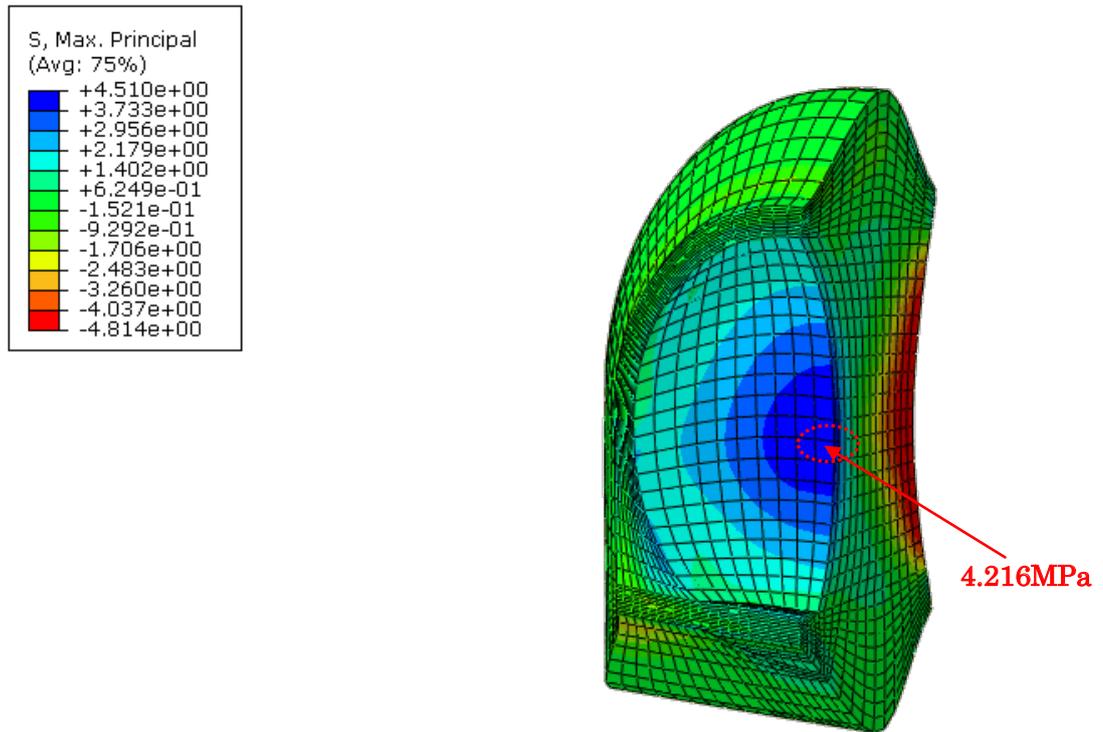
1) 前面



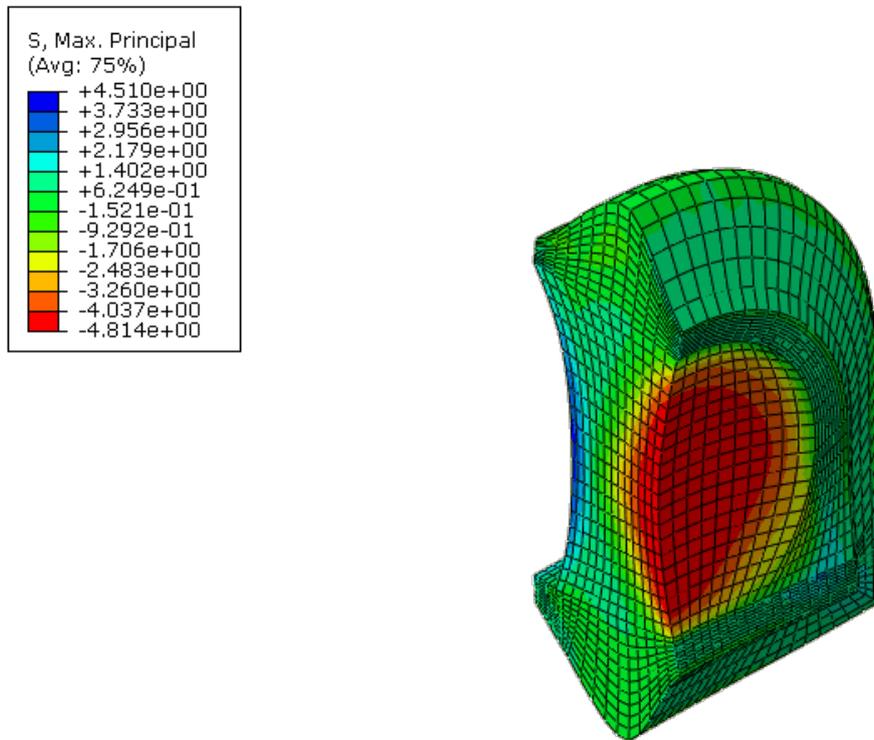
2) 背面

図2. 3. 1-2 $\mu=0.1$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 局部

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



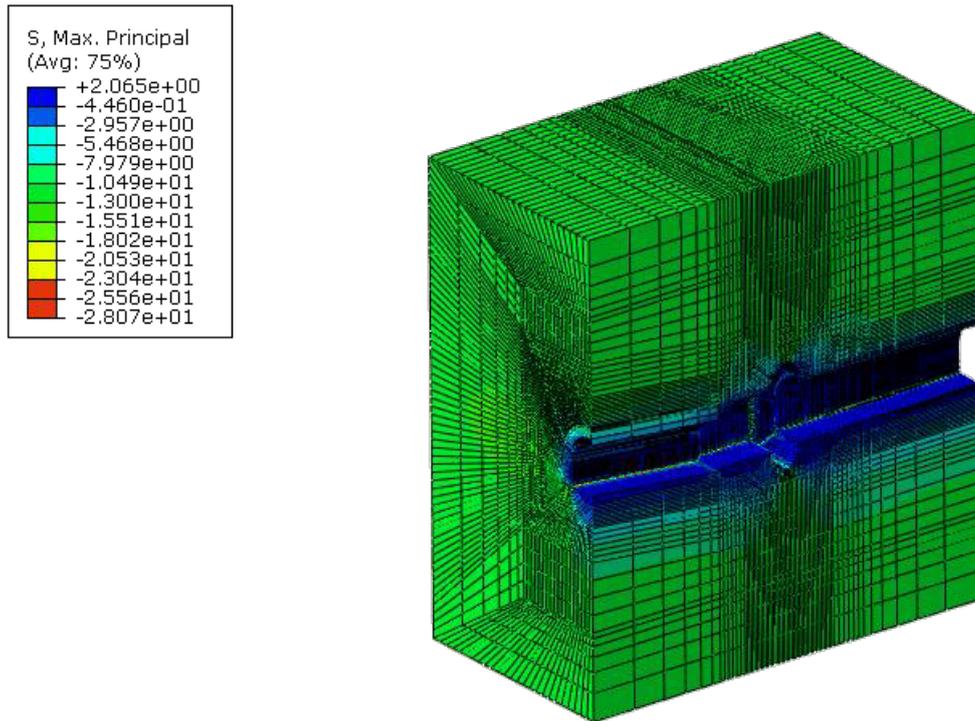
1) 前面



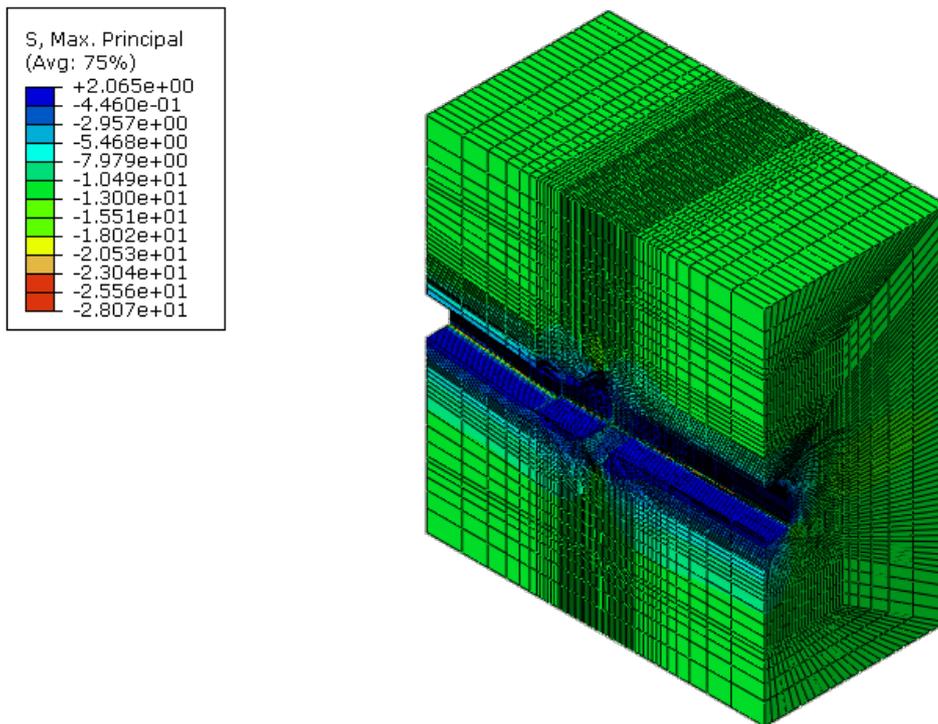
2) 背面

図2. 3. 1-3 $\mu=0.1$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): プラグ

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



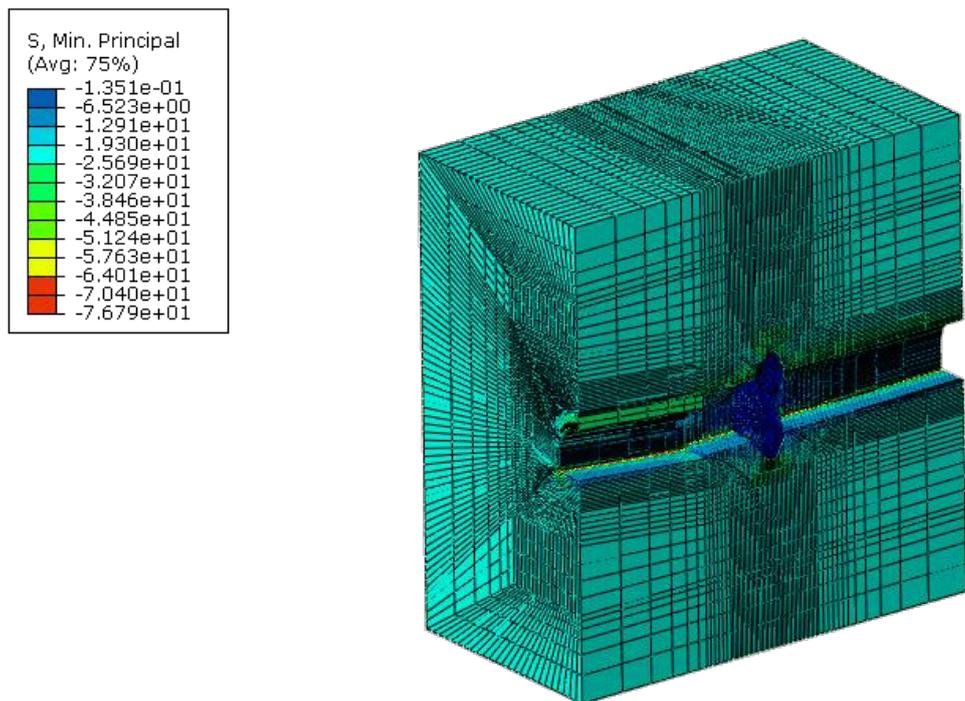
1) 前面



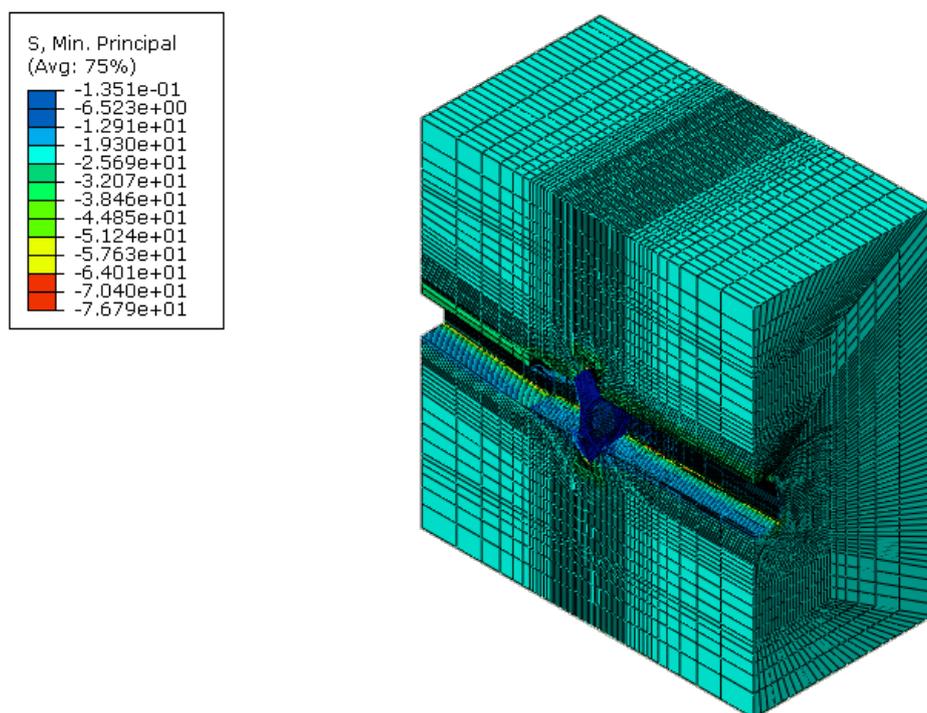
2) 背面

図 2. 3. 1-4 $\mu = 0.1$ の場合-最大主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : 岩盤

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



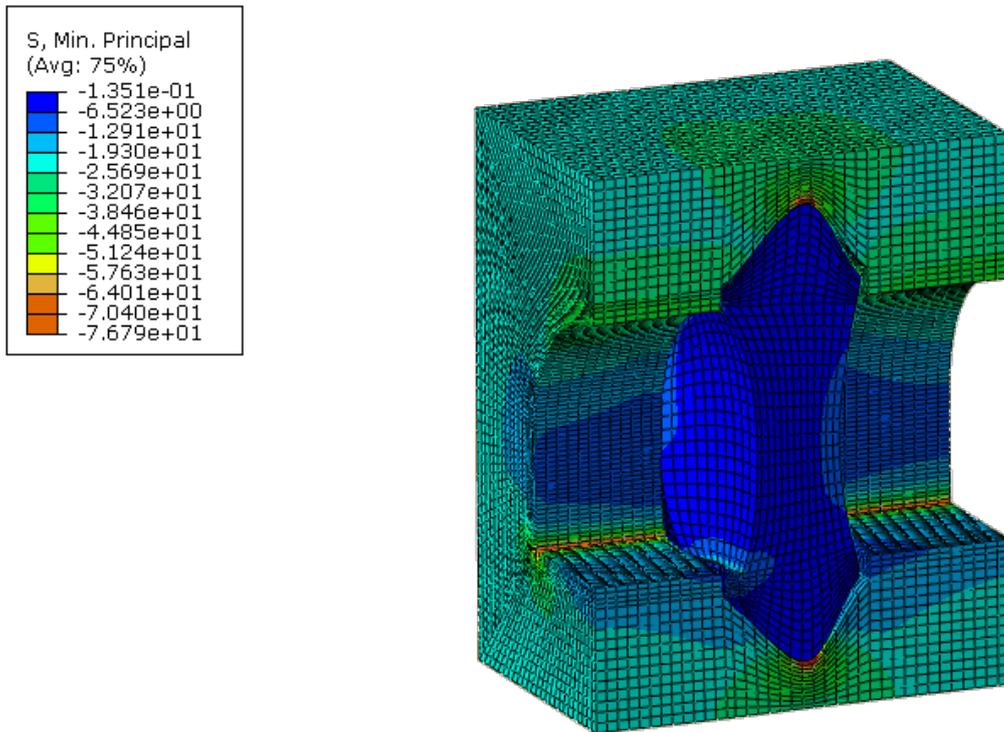
1) 前面



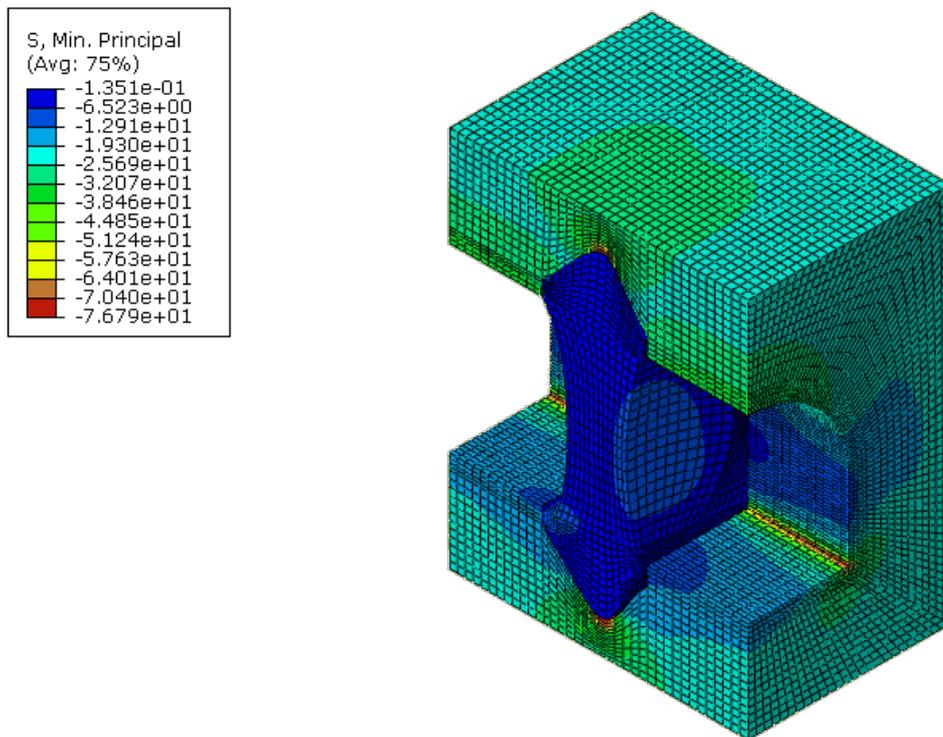
2) 背面

図2. 3. 1-5 $\mu = 0.1$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : 全体

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



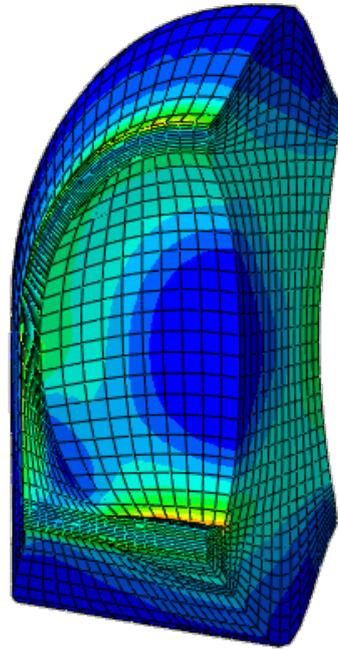
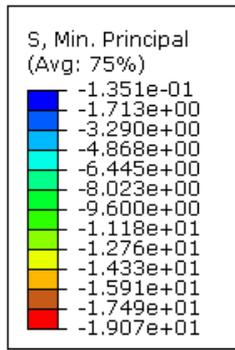
1) 前面



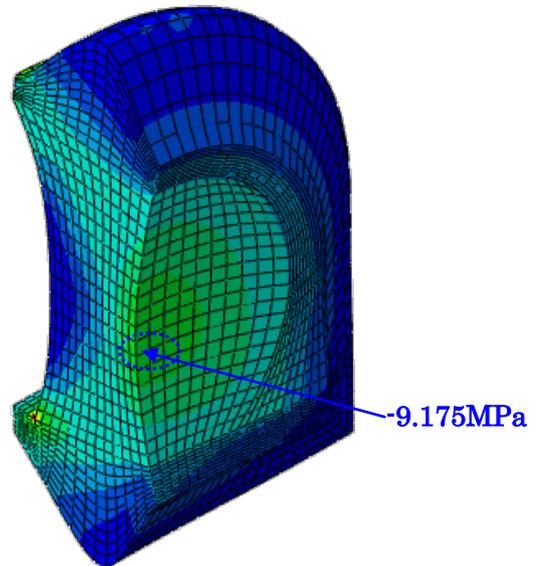
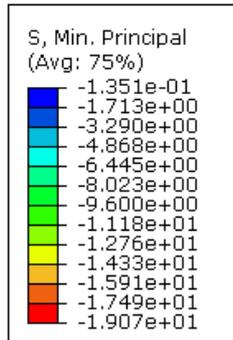
2) 背面

図2. 3. 1-6 $\mu=0.1$ の場合-最小主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 局部

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



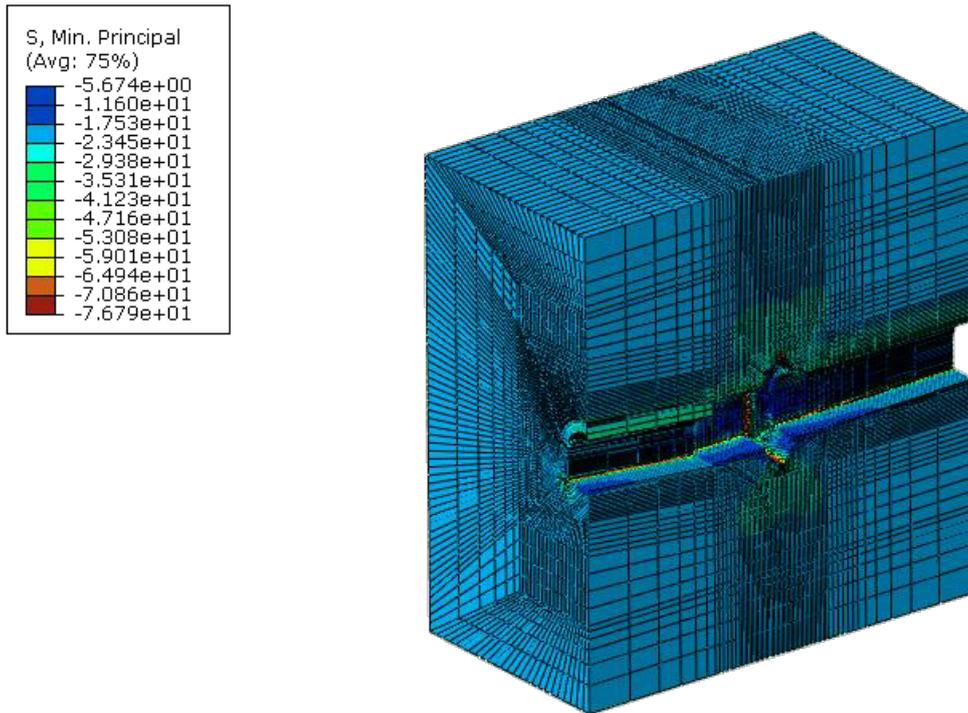
1) 前面



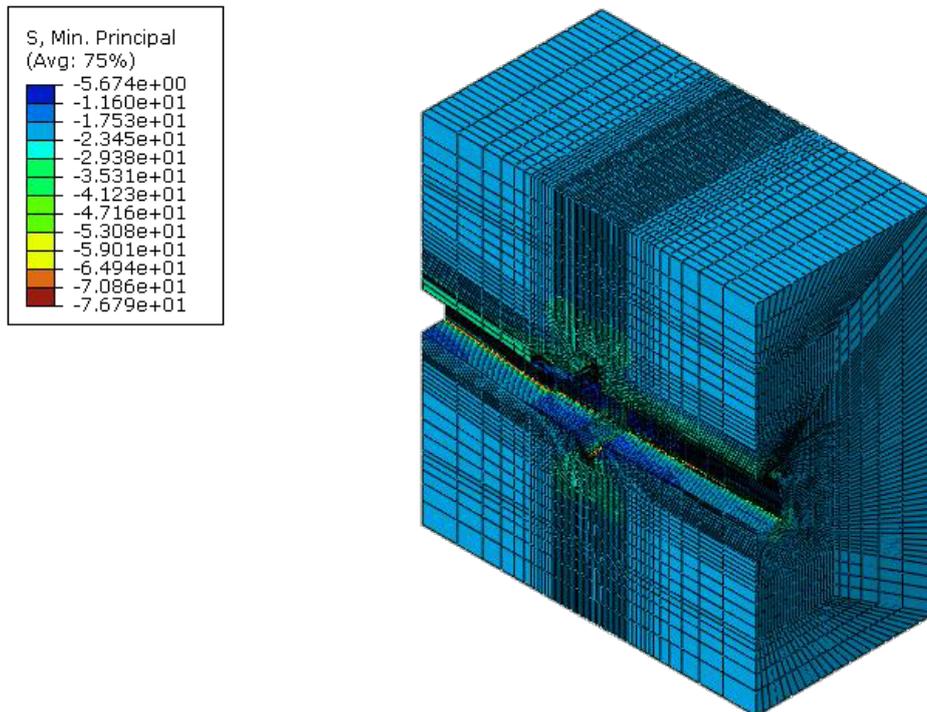
2) 背面

図2. 3. 1-7 $\mu=0.1$ の場合-最小主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): プラグ

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



1) 前面



2) 背面

図2. 3. 1-8 $\mu = 0.1$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張; 単位 = MPa) : 岩盤
(変形後表示; 変形倍率: 500倍)

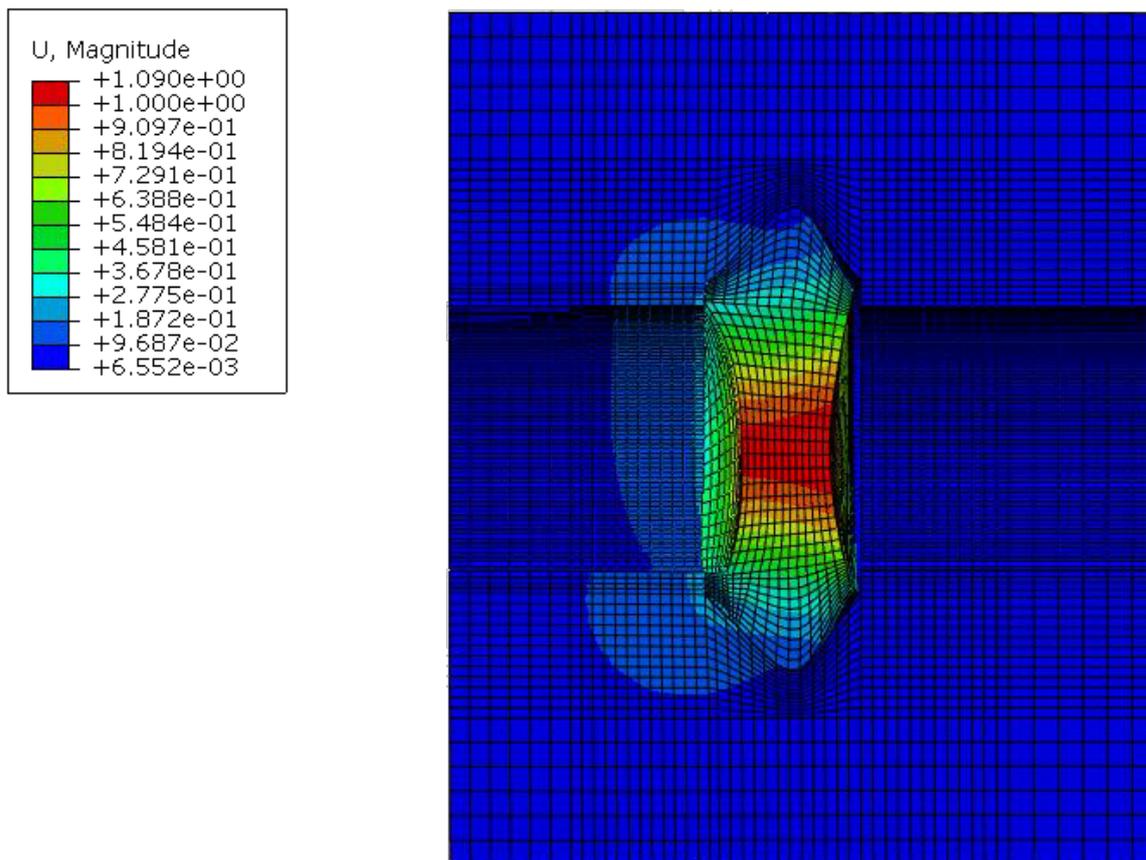
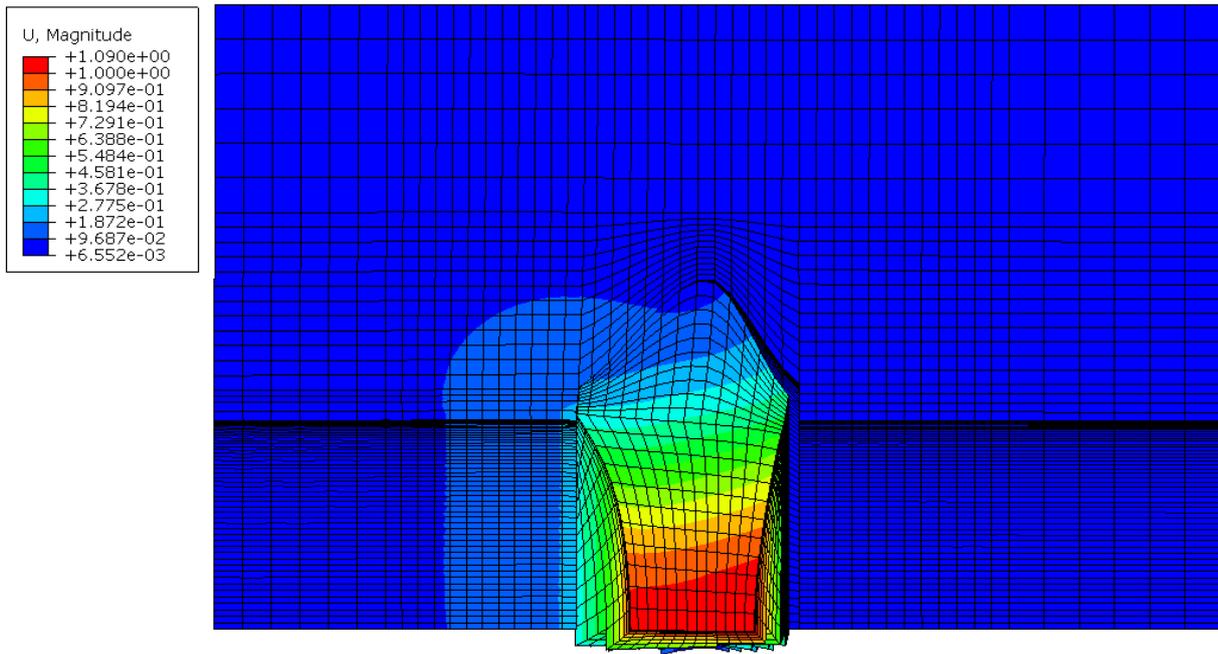
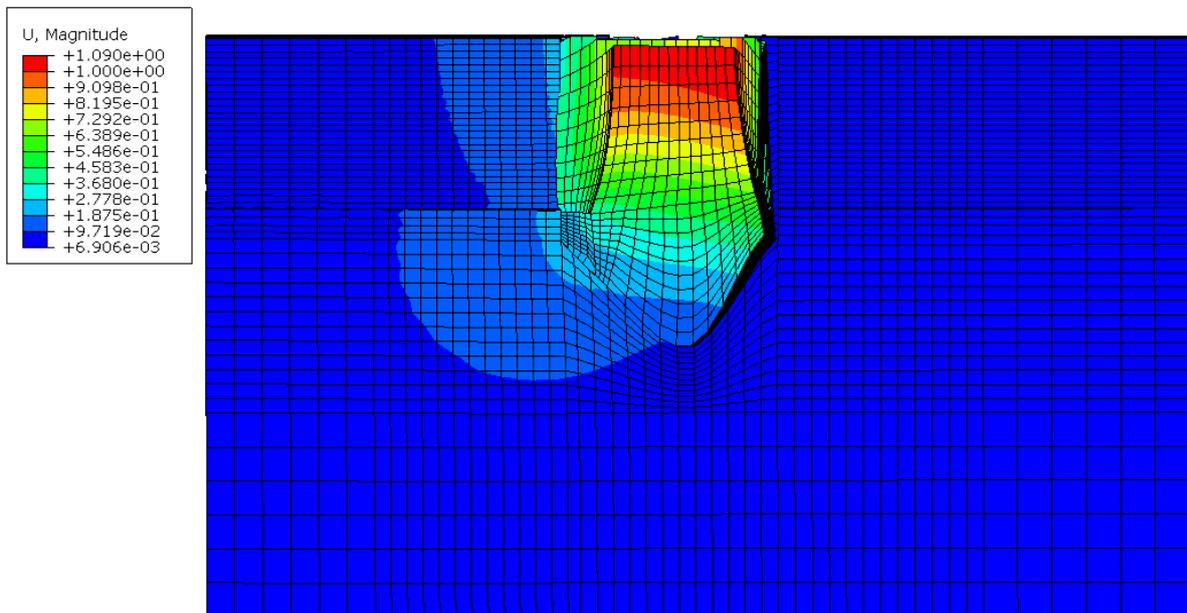


図 2. 3. 1-9 $\mu = 0.1$ の場合-全体変位 (単位 = mm)

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) 上部



2) 下部

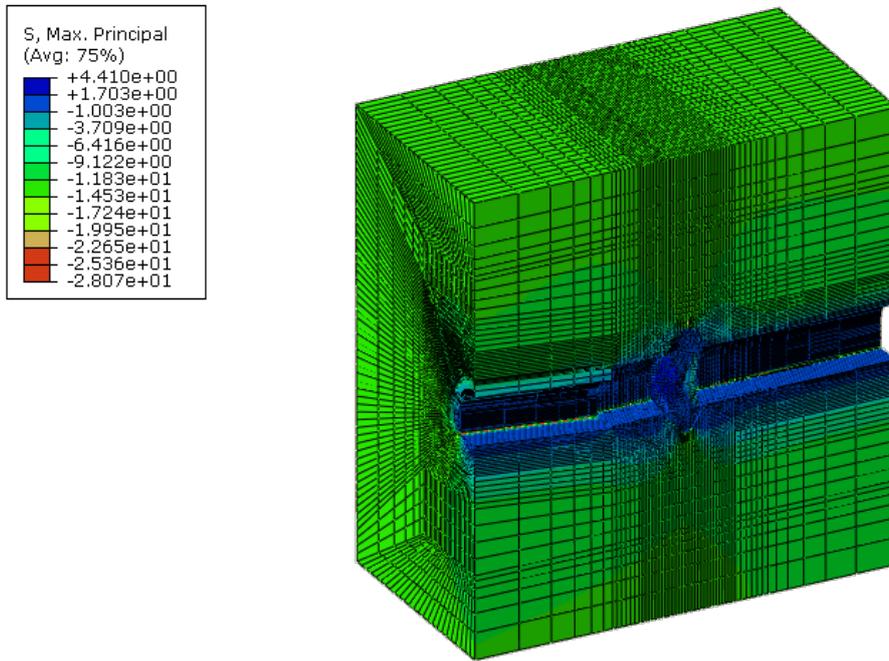
図2. 3. 1-10 $\mu=0.1$ の場合-全体変位 (単位=mm) : 局部出力

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

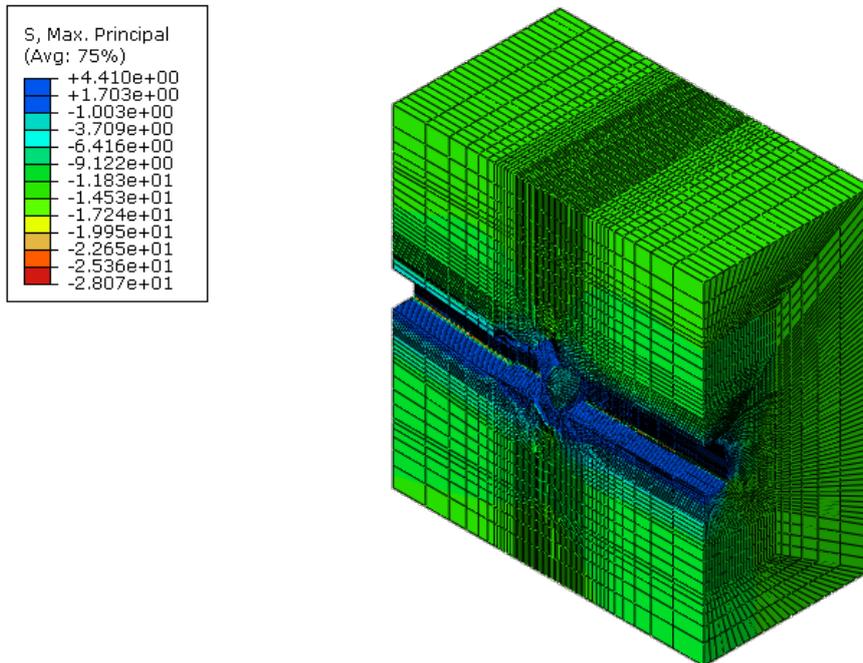
2.3.2 摩擦係数 $\mu = 0.6$ の場合

解析結果，最大・最小主応力分布を図 2.3.2-1～2.3.2-8 に示す。変位分布を図 2.3.2-9～2.3.2-10 に示す。

プラグの応力状態については，最大主応力（プラスの値）の最大値，また最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの最も薄い中央断面で生じ，それぞれ 4.110MPa，-9.088MPa であった（図 2.3.2-3，2.3.2-7 参照）。

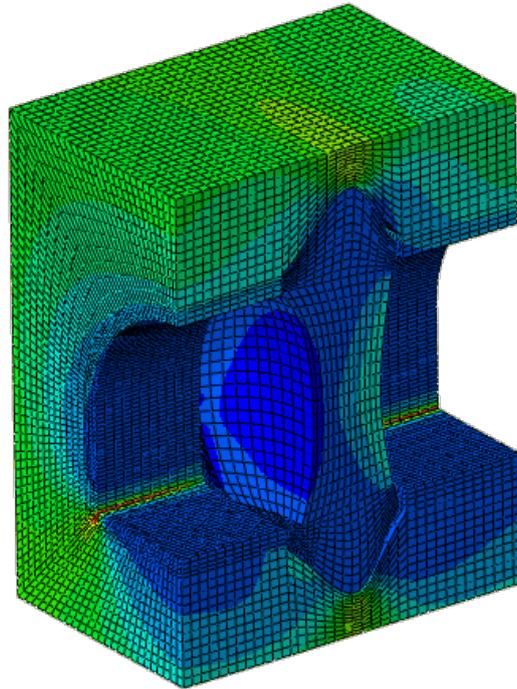
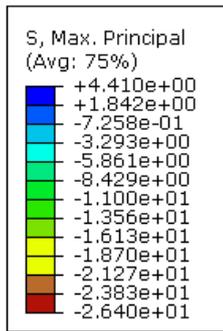


1) 前面

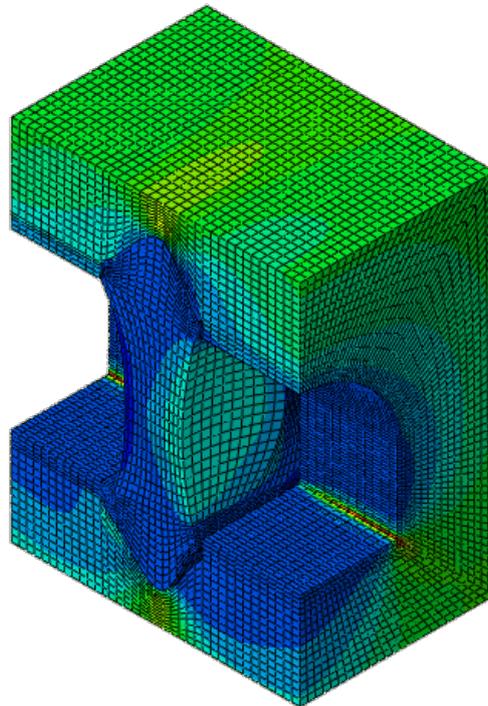
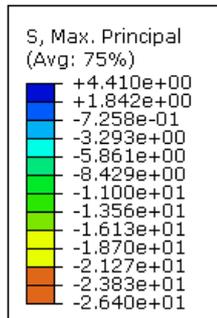


2) 背面

図2. 3. 2-1 $\mu=0.6$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 全体
(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



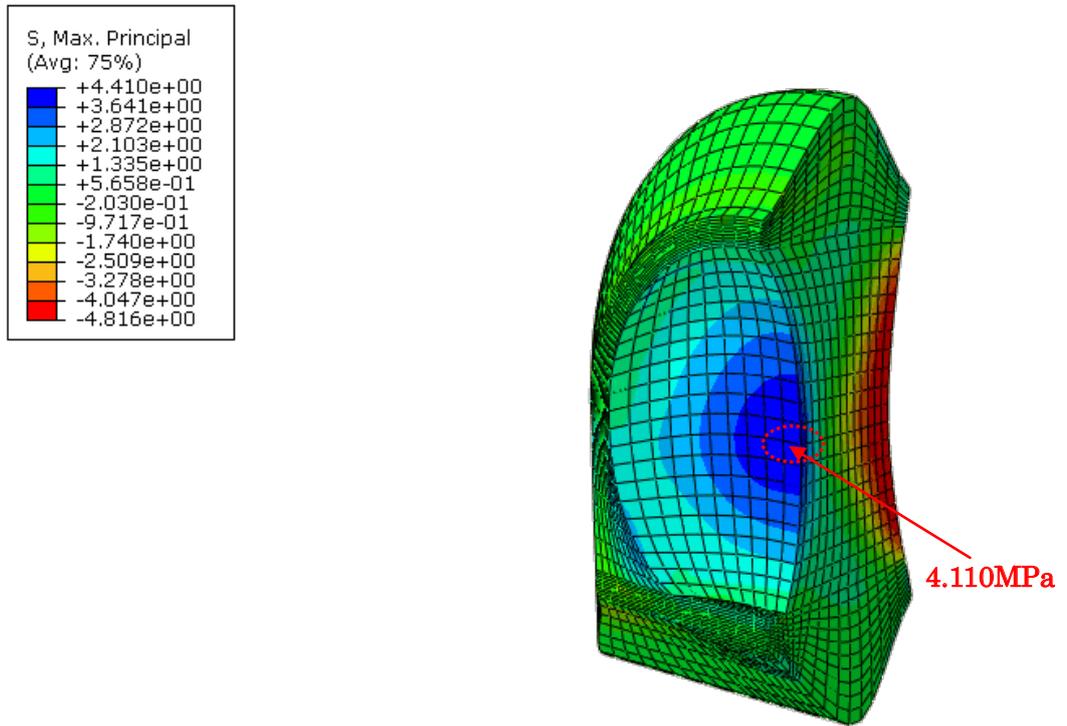
1) 前面



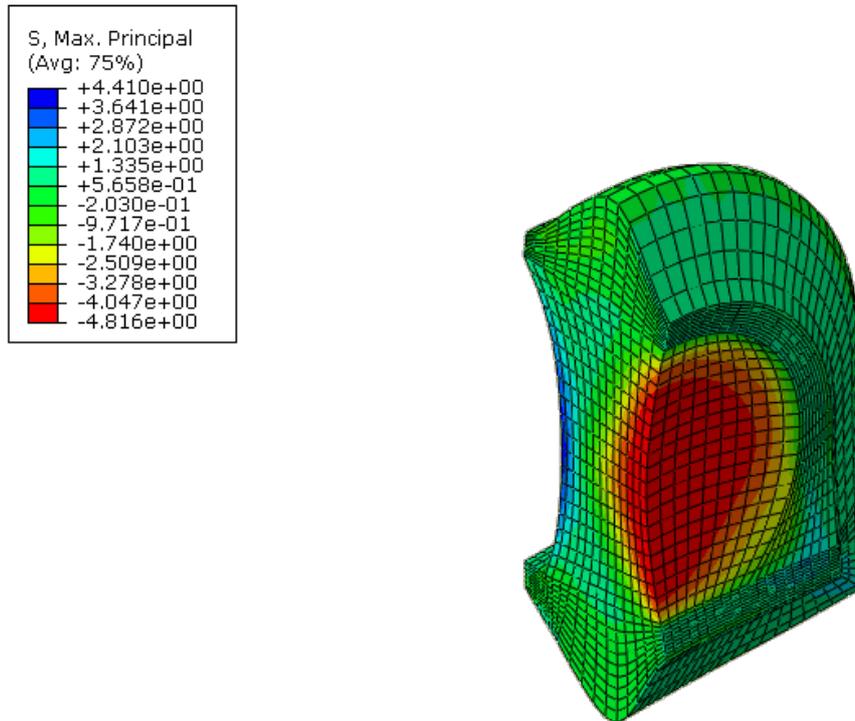
2) 背面

図 2. 3. 2-2 $\mu=0.6$ の場合-最大主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : 局部

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



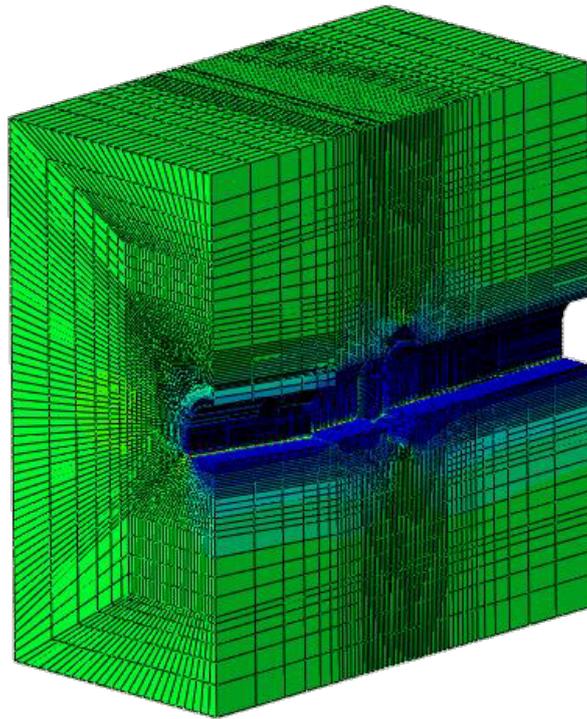
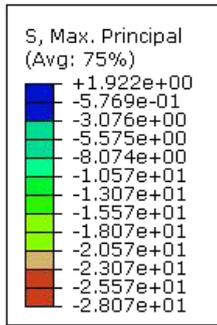
1) 前面



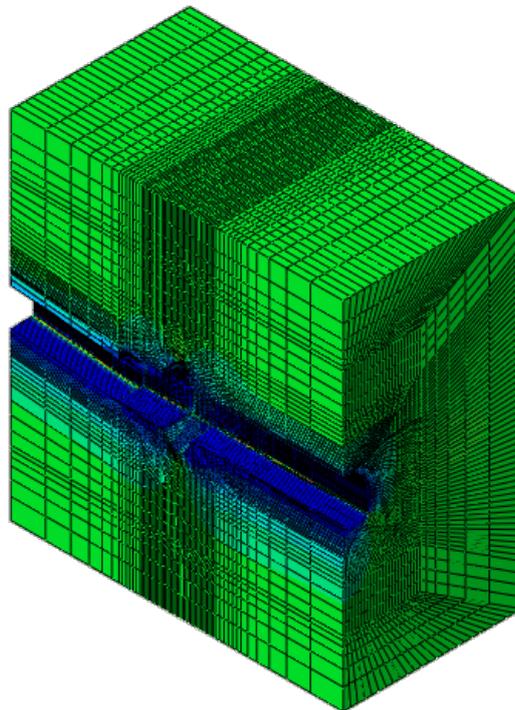
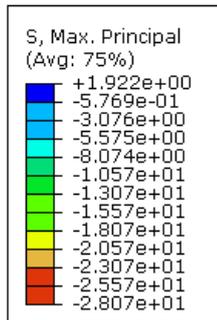
2) 背面

図 2. 3. 2-3 $\mu=0.6$ の場合-最大主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : プラグ

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

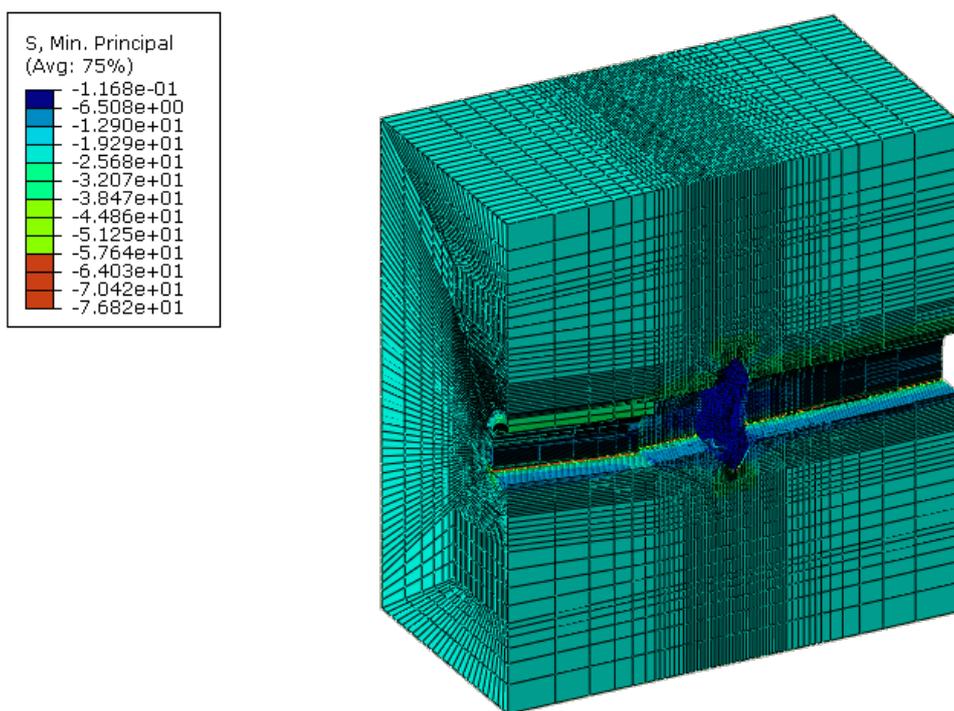


1) 前面

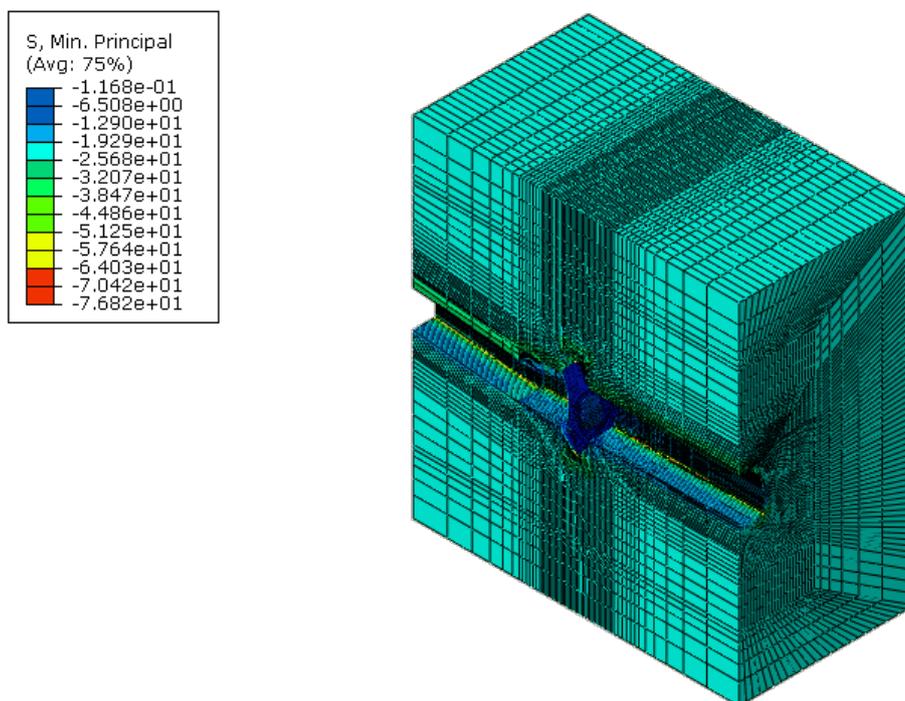


2) 背面

図 2. 3. 2-4 $\mu=0.6$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 岩盤
(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)

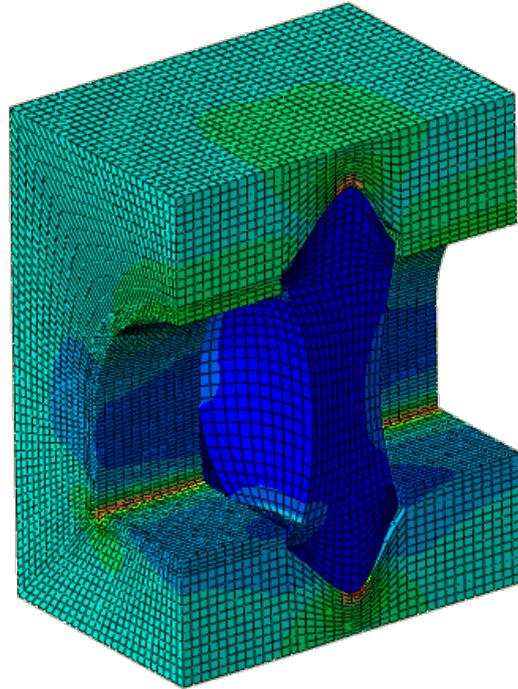
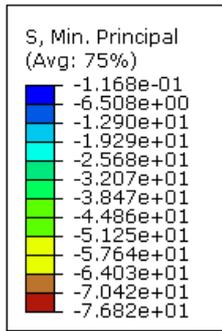


1) 前面

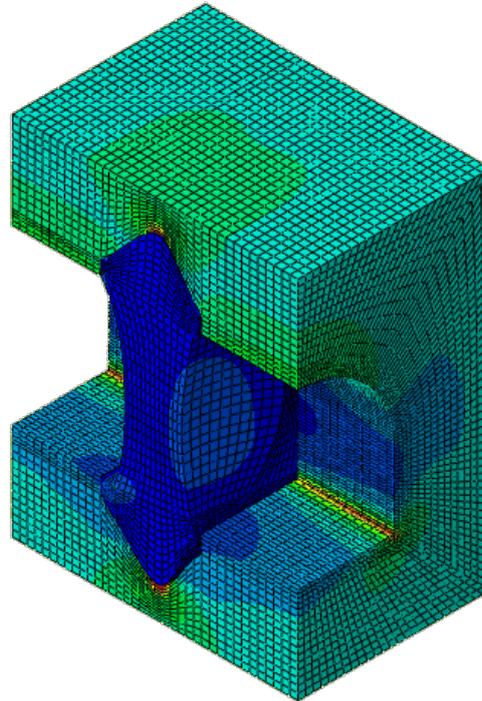
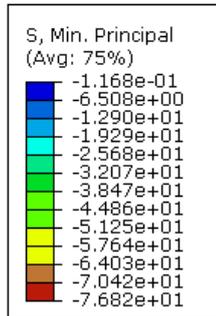


2) 背面

図2. 3. 2-5 $\mu=0.6$ の場合-最小主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 全体
(変形後表示; 変形倍率: 500倍)

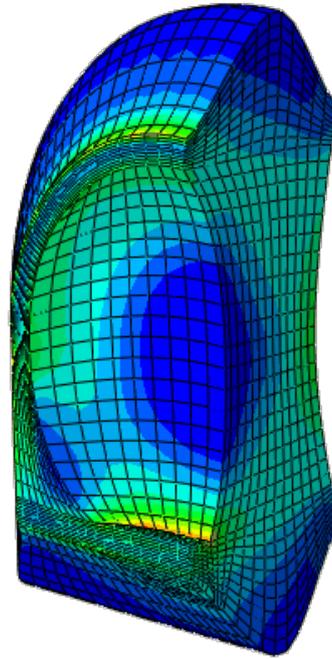
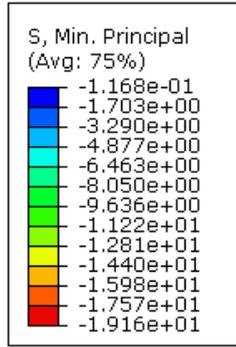


1) 前面

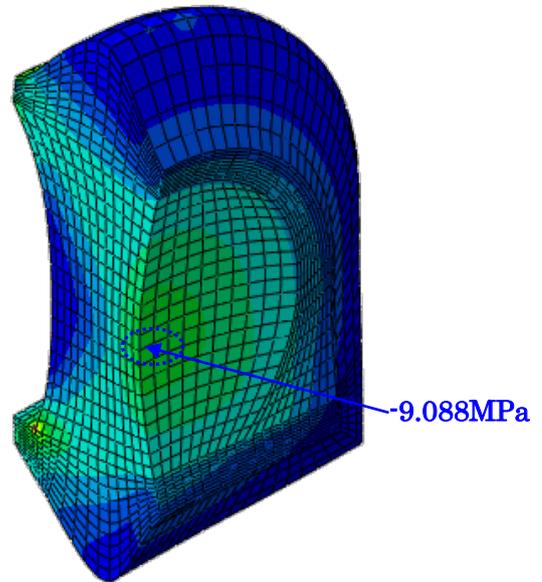
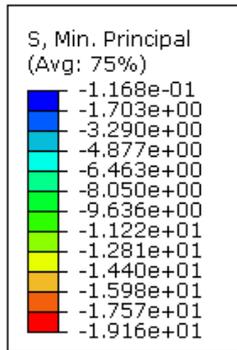


2) 背面

図2. 3. 2-6 $\mu=0.6$ の場合-最小主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 局部
(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



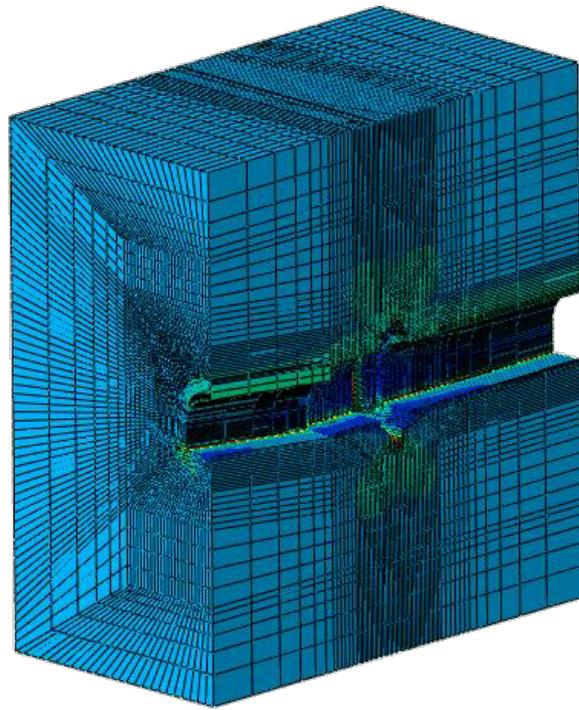
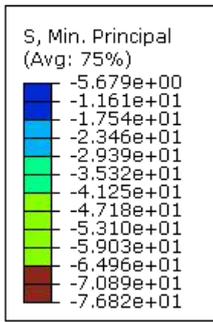
1) 前面



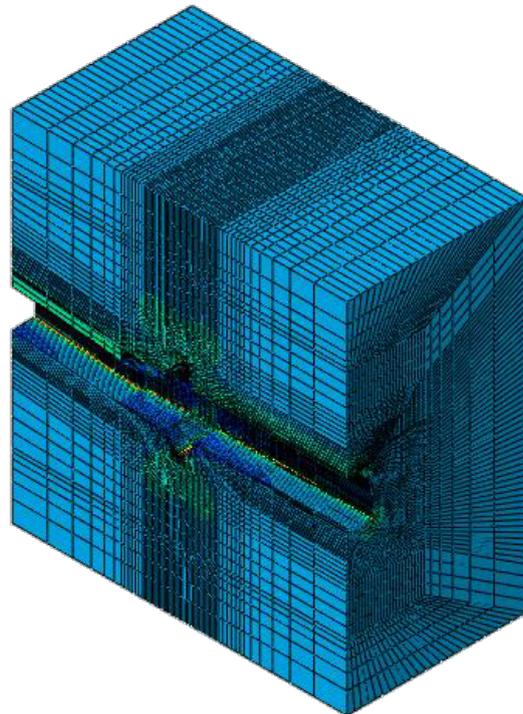
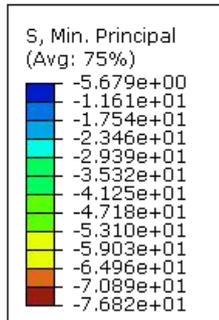
2) 背面

図 2. 3. 2-7 $\mu = 0.6$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : プラグ

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) 前面



2) 背面

図 2. 3. 2-8 $\mu=0.6$ の場合-最小主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 岩盤

(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)

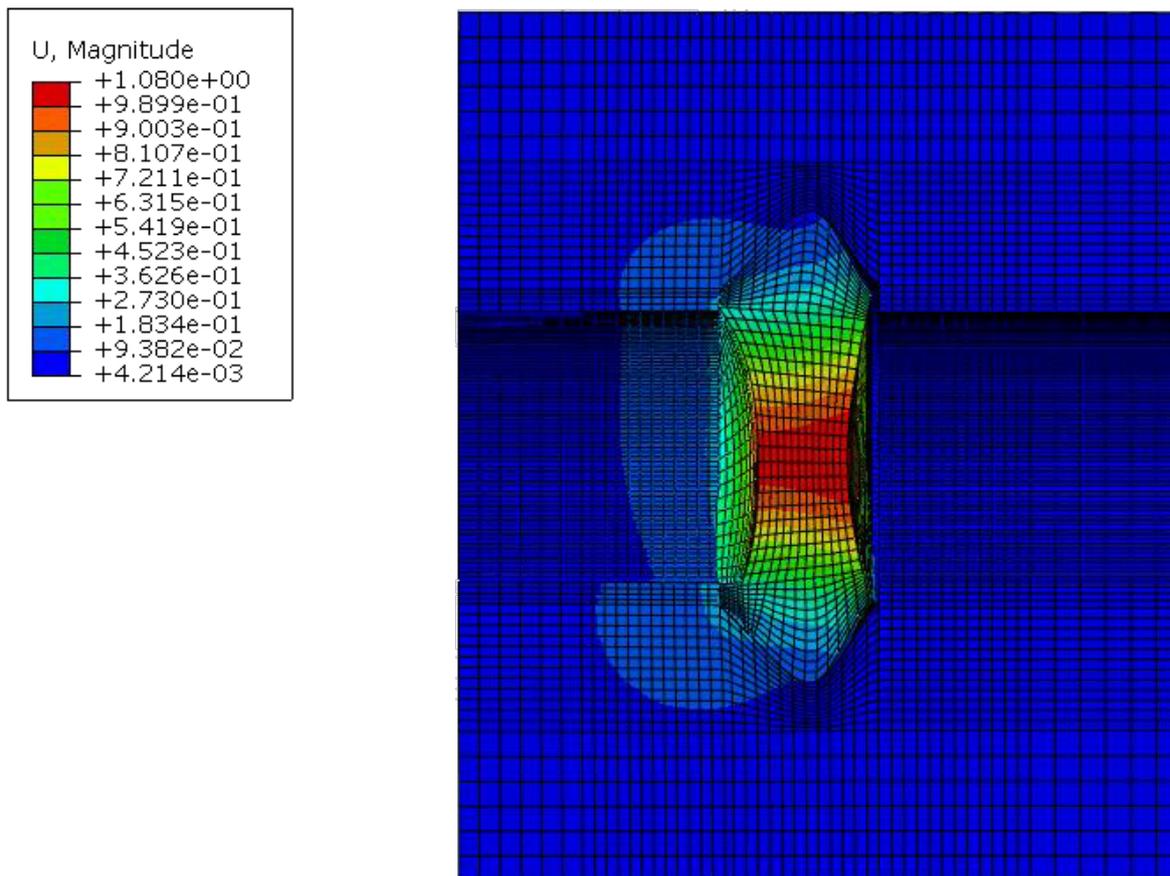
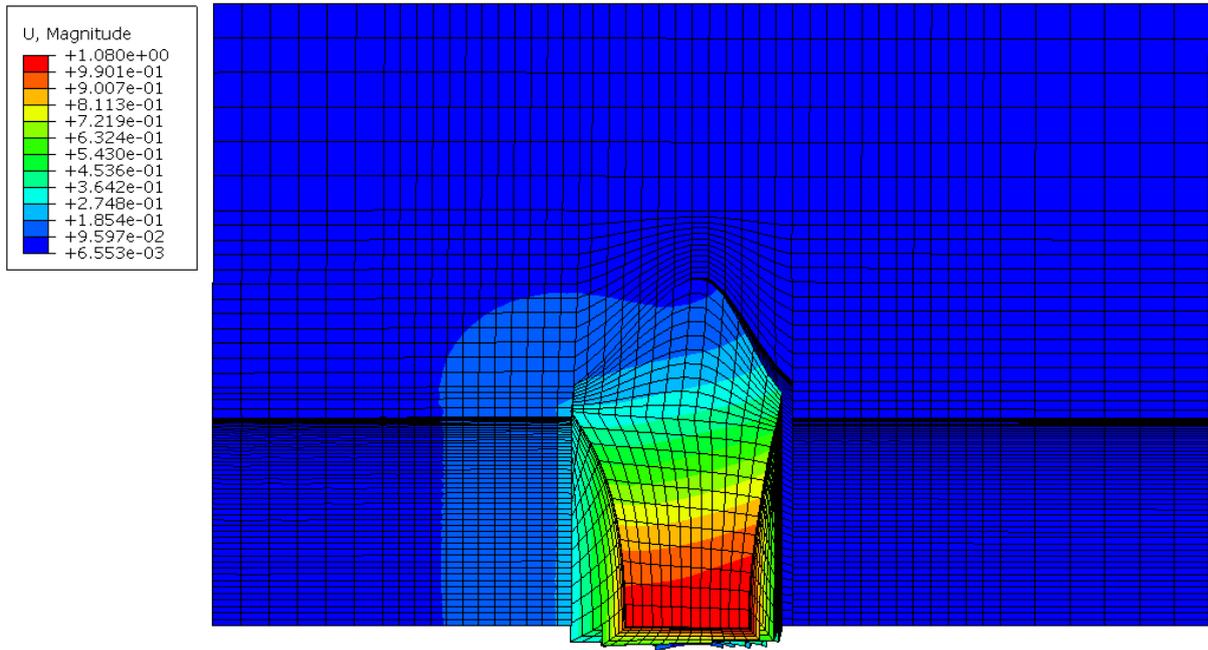
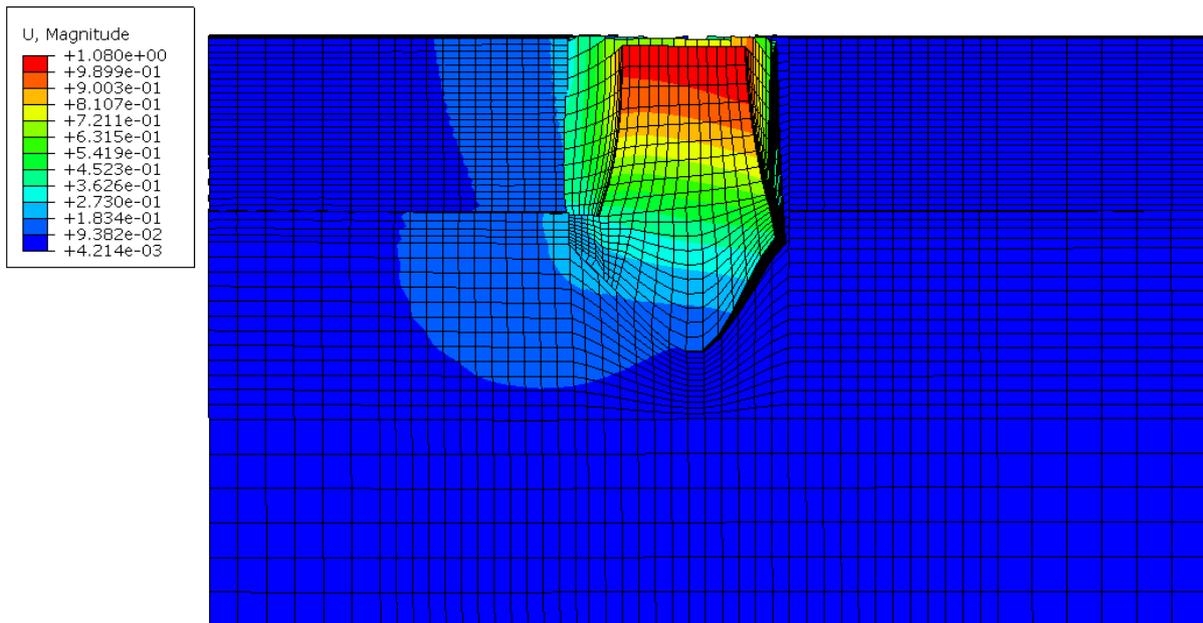


図 2. 3. 2 - 9 $\mu = 0.6$ の場合-全体変位 (単位=mm)

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) 上部



2) 下部

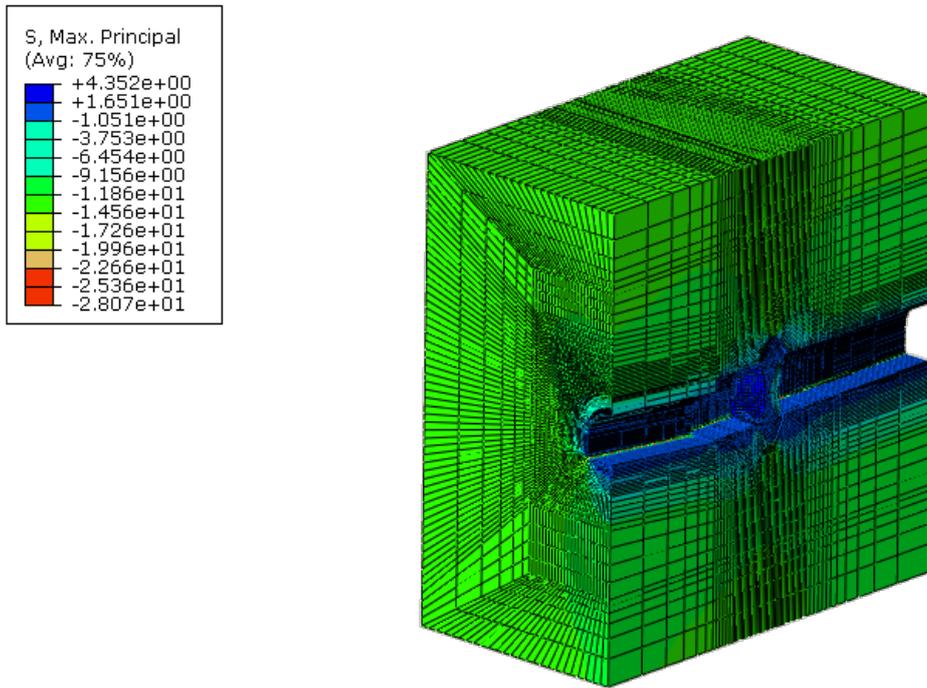
図2. 3. 2-10 $\mu=0.6$ の場合-全体変位 (単位=mm) : 局部出力

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

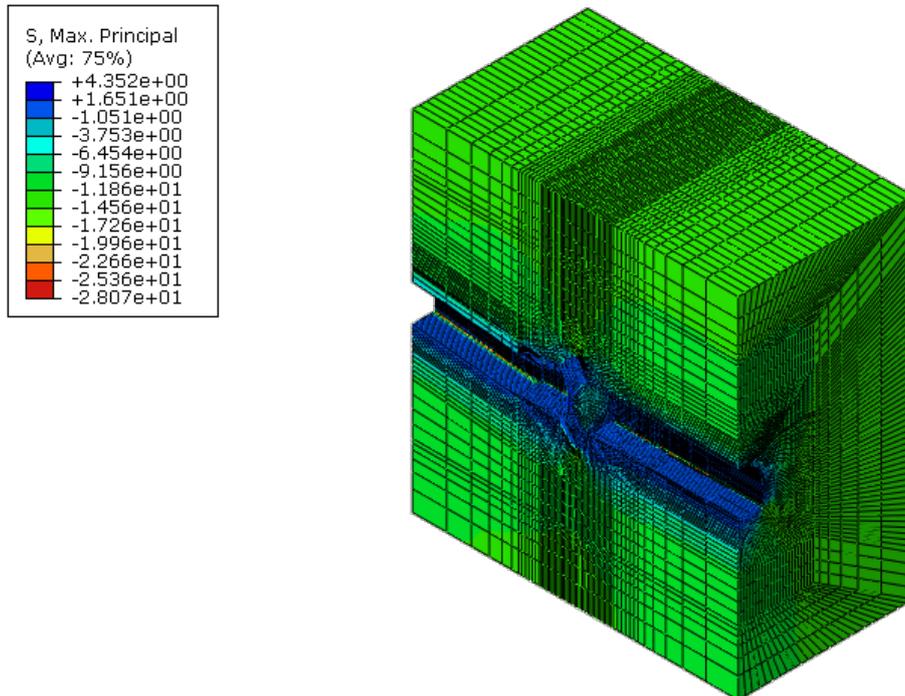
2.3.3 摩擦係数 $\mu = 1.0$ の場合

解析結果，最大・最小主応力分布を図 2.3.3-1～2.3.3-8 に示す。変位分布を図 2.3.3-9～2.3.3-10 に示す。

プラグの応力状態については，最大主応力（プラスの値）の最大値，また最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの最も薄い中央断面で生じ，それぞれ 4.049MPa，-9.037MPa であった（図 2.3.3-3，2.3.3-7 参照）。



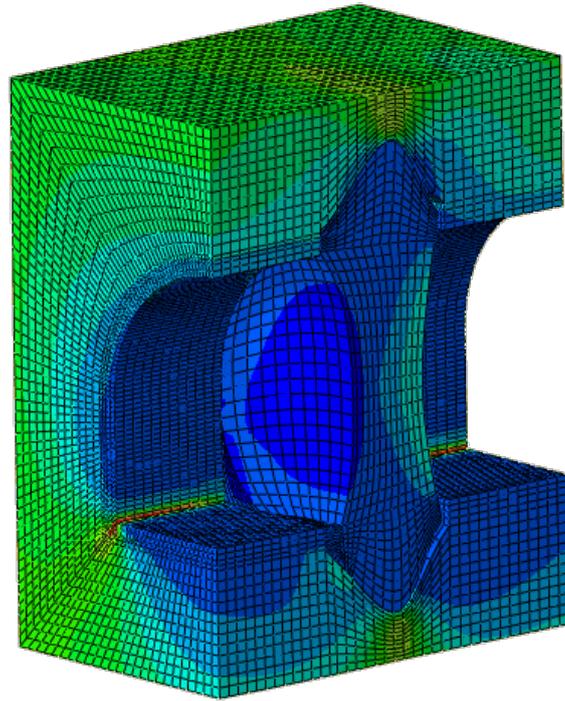
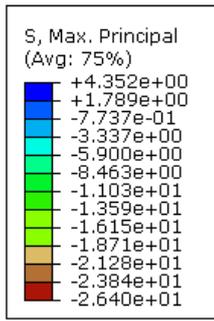
1) 前面



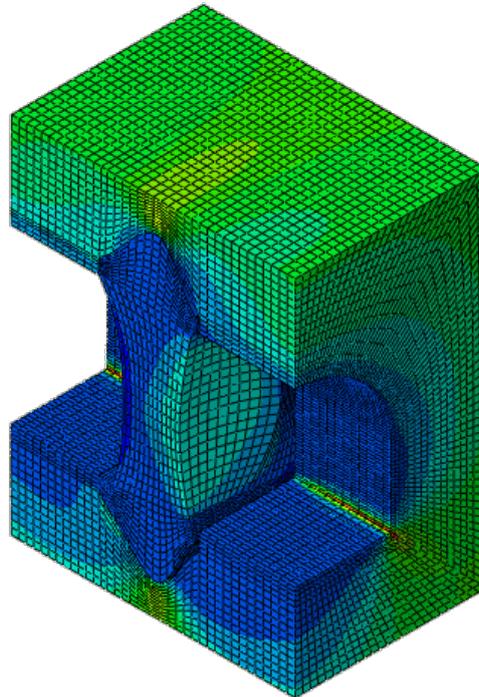
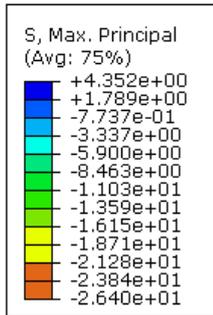
2) 背面

図2. 3. 3-1 $\mu=1.0$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 全体

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



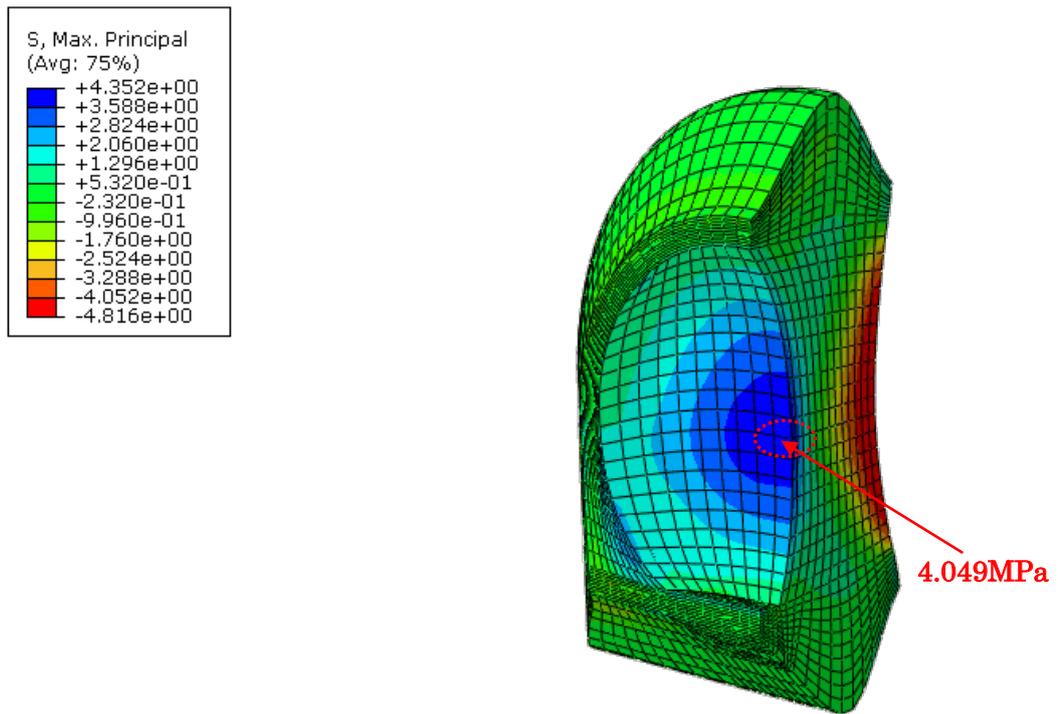
1) 前面



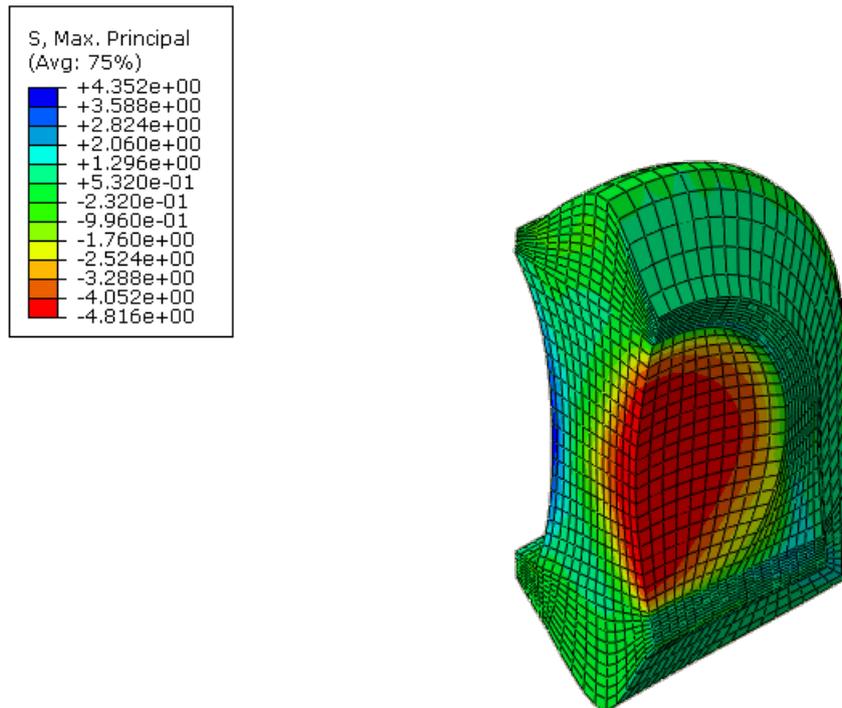
2) 背面

図 2. 3. 3-2 $\mu = 1.0$ の場合-最大主応力 (「+」 = 引張; 単位 = MPa) : 局部

(変形後表示; 変形倍率: 500 倍)



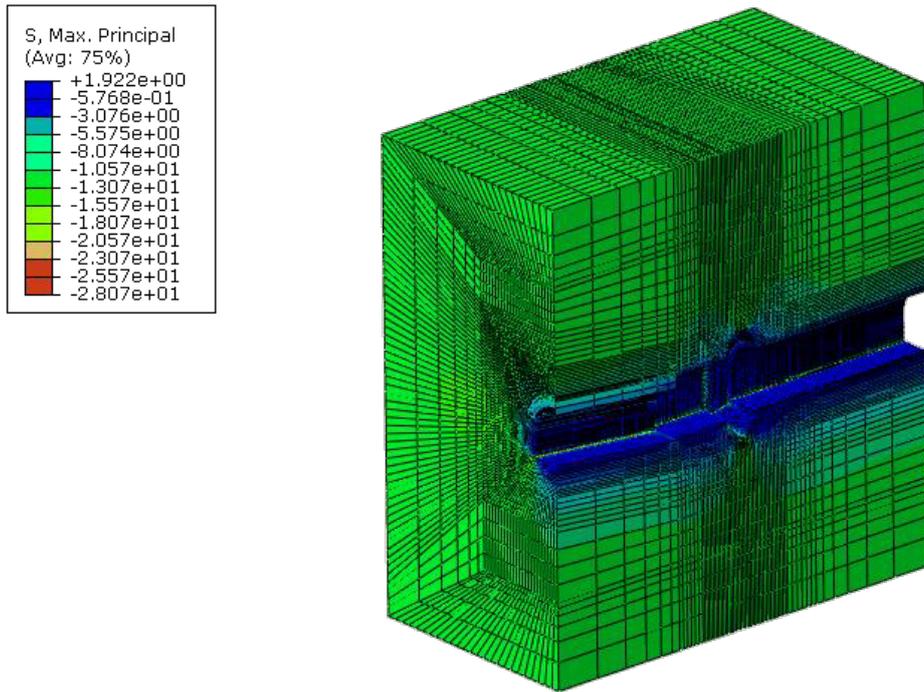
1) 前面



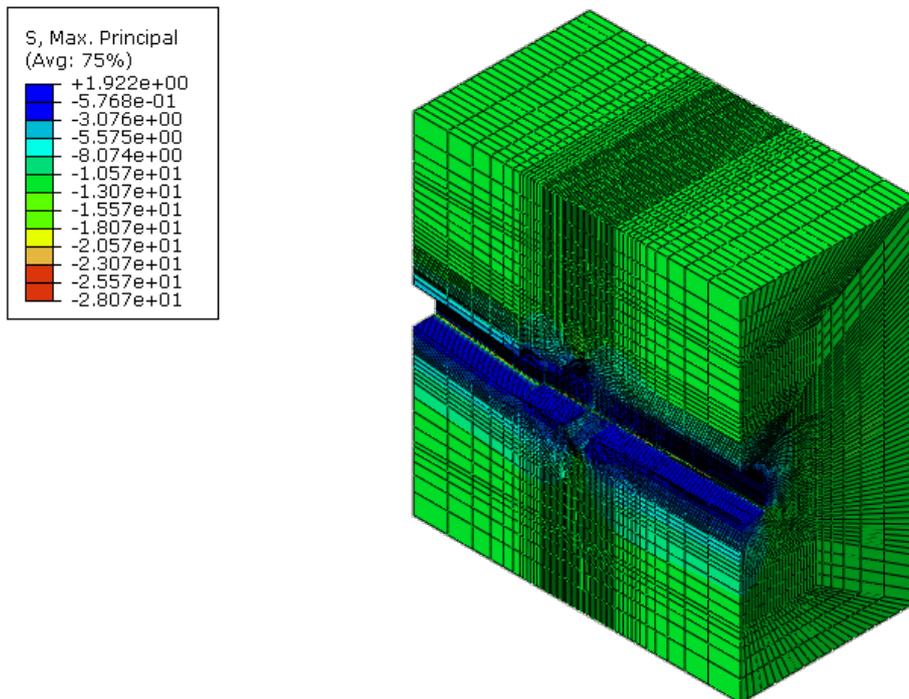
2) 背面

図2. 3. 3-3 $\mu=1.0$ の場合-最大主応力（「+」=引張；単位=MPa）：プラグ

（変形後表示；変形倍率：500倍）



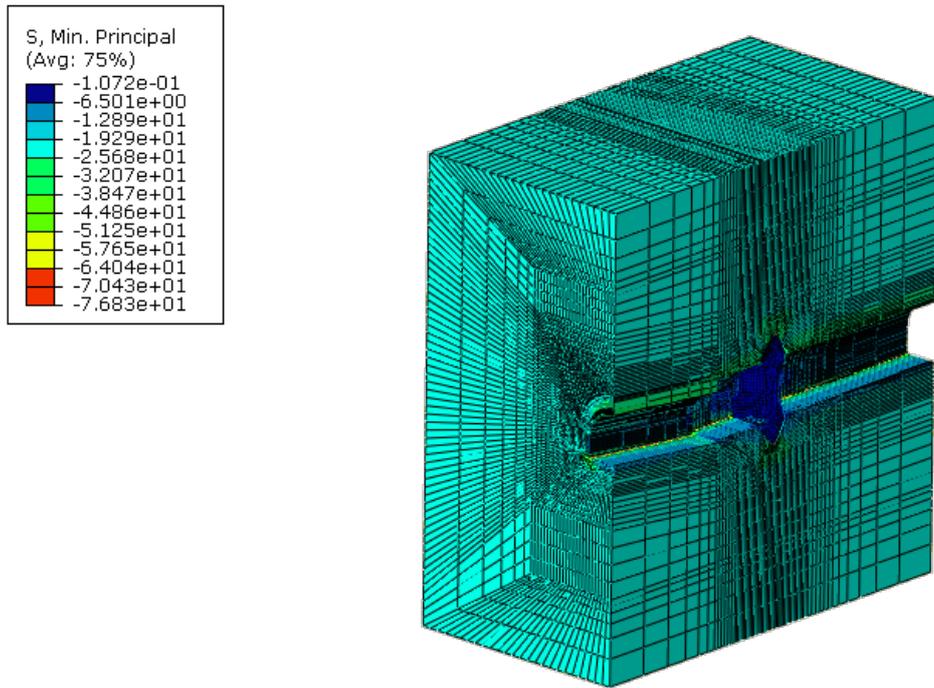
1) 前面



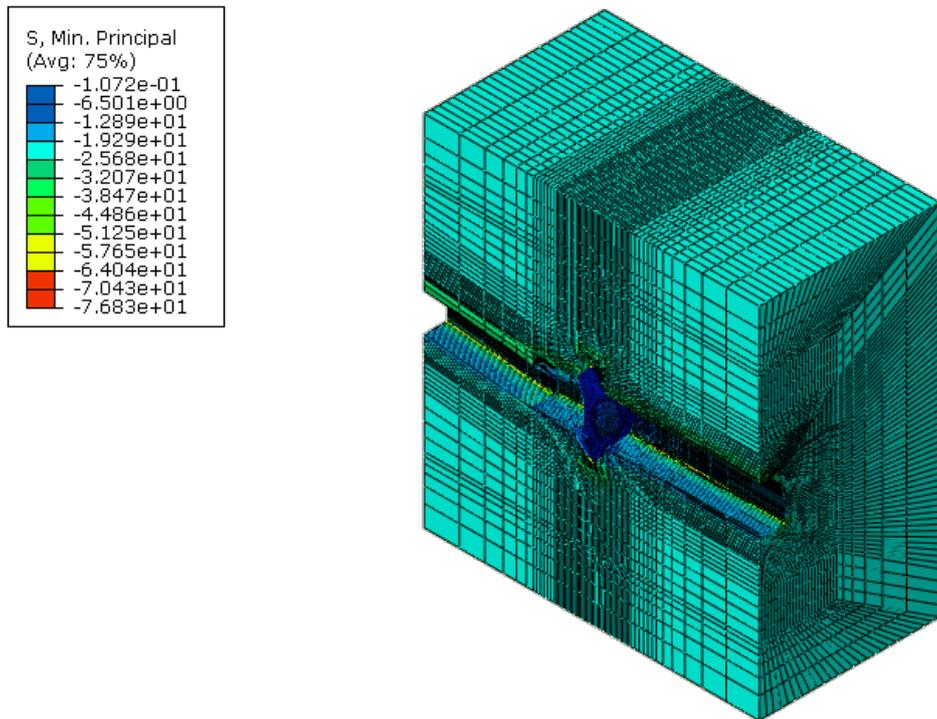
2) 背面

図2. 3. 3-4 $\mu=1.0$ の場合-最大主応力 (「+」=引張; 単位=MPa): 岩盤

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



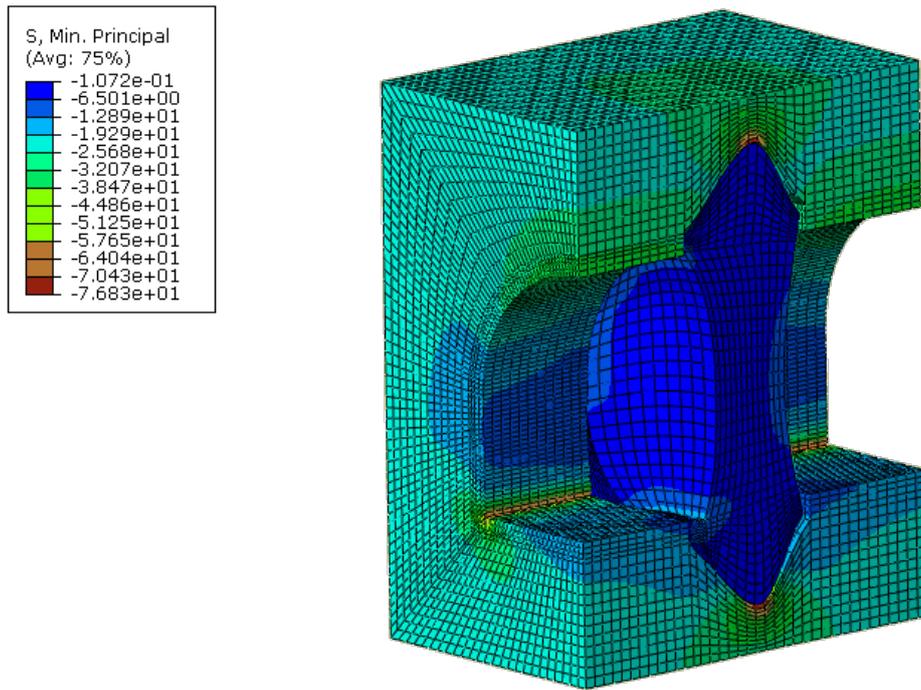
1) 前面



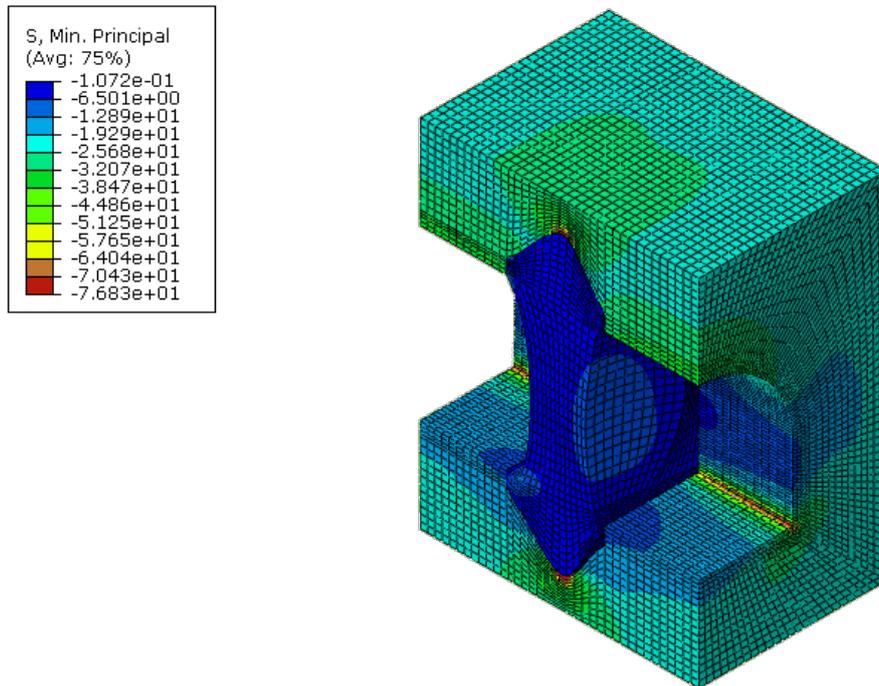
2) 背面

図2. 3. 3-5 $\mu = 1.0$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : 全体

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



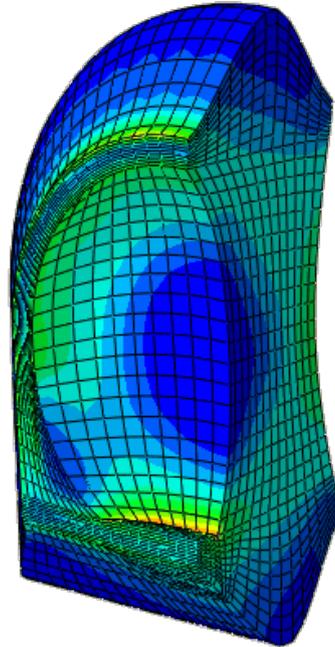
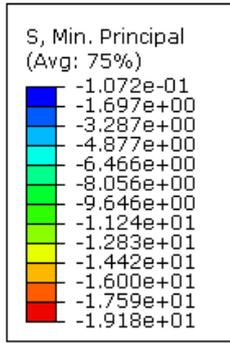
1) 前面



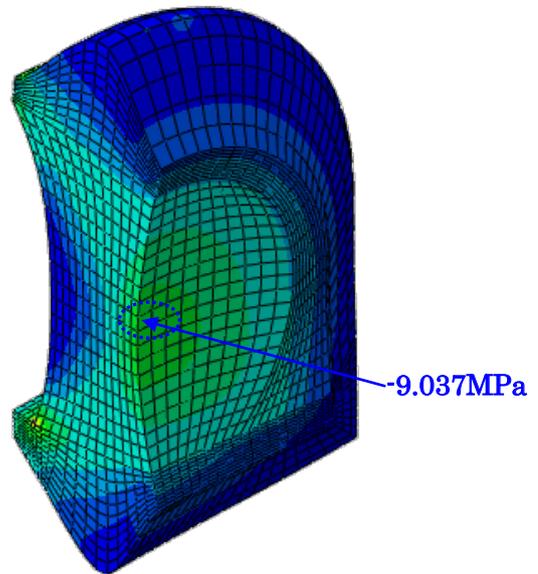
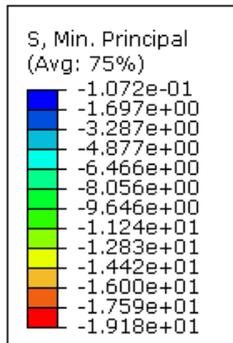
2) 背面

図2. 3. 3-6 $\mu = 1.0$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張; 単位 = MPa) : 局部

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)



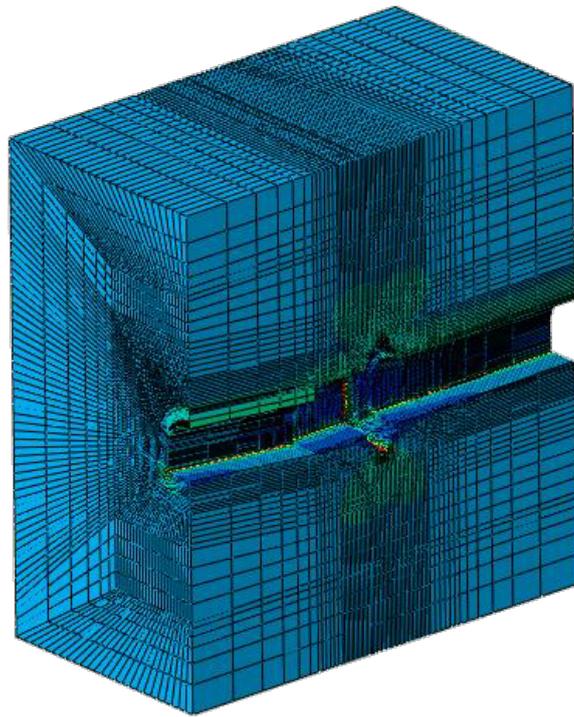
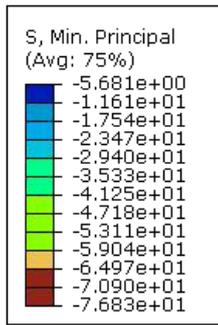
1) 前面



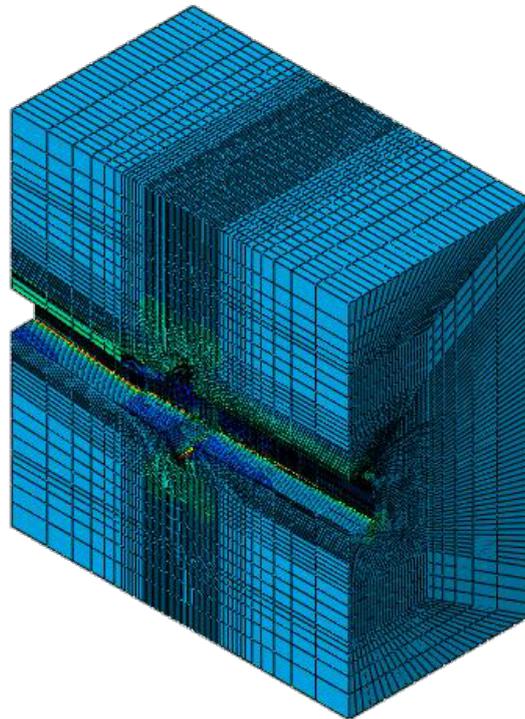
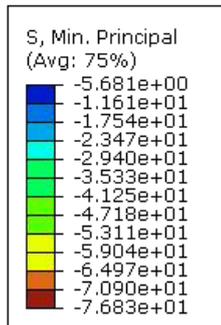
2) 背面

図2. 3. 3-7 $\mu = 1.0$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張 ; 単位 = MP a) : プラグ

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) 前面



2) 背面

図2. 3. 3-8 $\mu = 1.0$ の場合-最小主応力 (「+」 = 引張; 単位 = MPa) : 岩盤

(変形後表示; 変形倍率: 500倍)

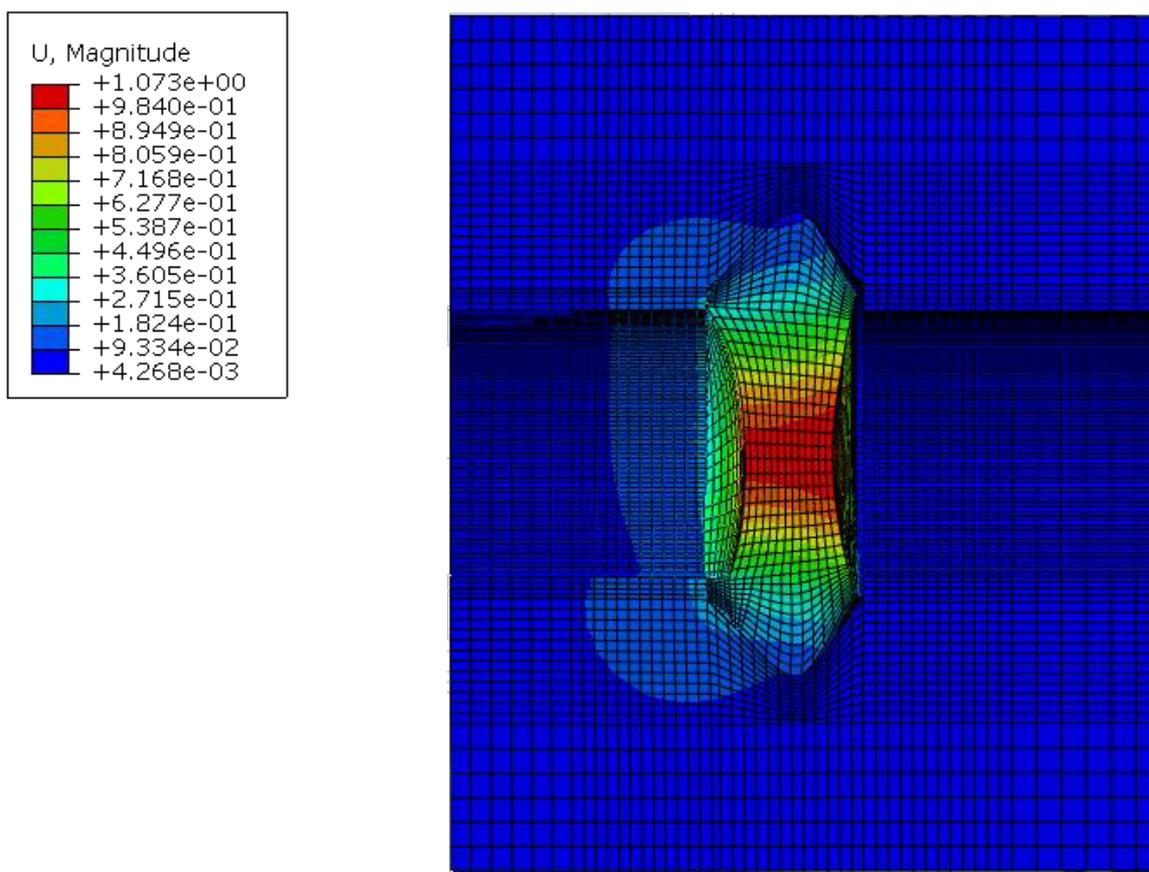
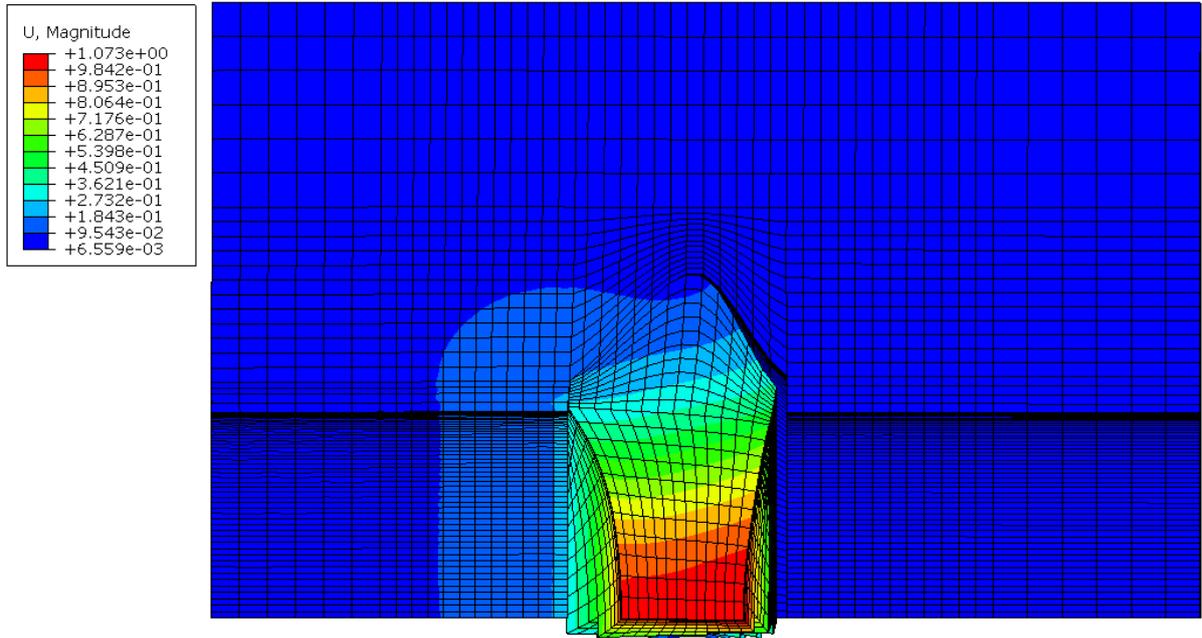
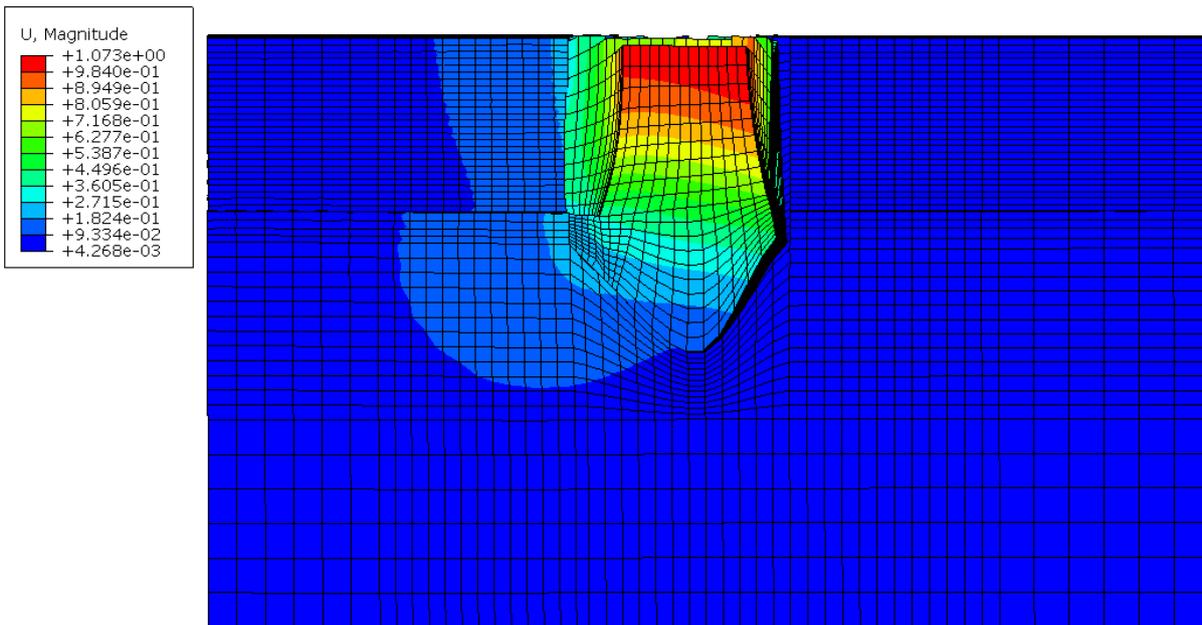


図2. 3. 3-9 $\mu = 1.0$ の場合-全体変位 (単位=mm)

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)



1) 上部



2) 下部

図2. 3. 3-10 $\mu = 1.0$ の場合-全体変位 (単位=mm) : 局部出力

(変形後表示 ; 変形倍率 : 500 倍)

2. 4 三次元解析結果に基づく設計計算

2.4.1 設計断面の選定

プラグの応力分布特徴については、最大主応力（プラスの値）の最大値、また最小主応力（マイナスの値）の最大値はプラグの最も薄い中央断面で生じ、各ケースの結果を表 2.4.1-1 に示す。

解析の結果、摩擦係数 $\mu = 0.1$ （摩擦なしの状態に対応）の場合は最大・最小主応力がともに一番大きかった。したがって、まず、設計断面-1としてプラグの中央断面（厚さ 1500mm）を選定し、摩擦係数 $\mu = 0.1$ の場合の結果（図 2.4.1-1）を用いて設計計算を行う。

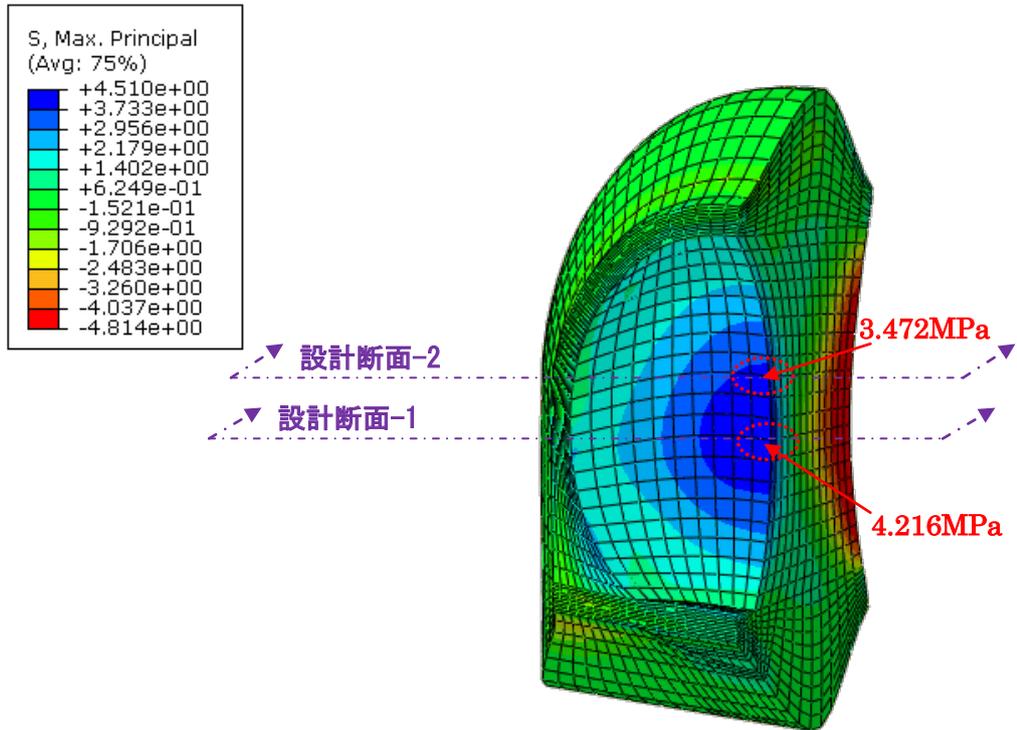
次に、応力集中が生じている設計断面-1 から 0.75m離れた断面の応力分布に着目する。摩擦係数 $\mu = 0.1$ の場合の結果（図 2.4.1-1）によると、この位置の最大主応力・最小主応力はそれぞれ 3.472MPa, -8.127MPa となっている。ここでは、この断面（厚さ 1650mm）を設計断面-2とする。各解析ケースの設計断面-2 の最大主応力・最小主応力を表 2.4.2-2 に示す。したがって、摩擦係数 $\mu = 0.1$ の場合の結果を用いて設計計算を行う。

表 2. 4. 1 - 1 最大・最小主応力の最大値一覧（「+」＝引張）

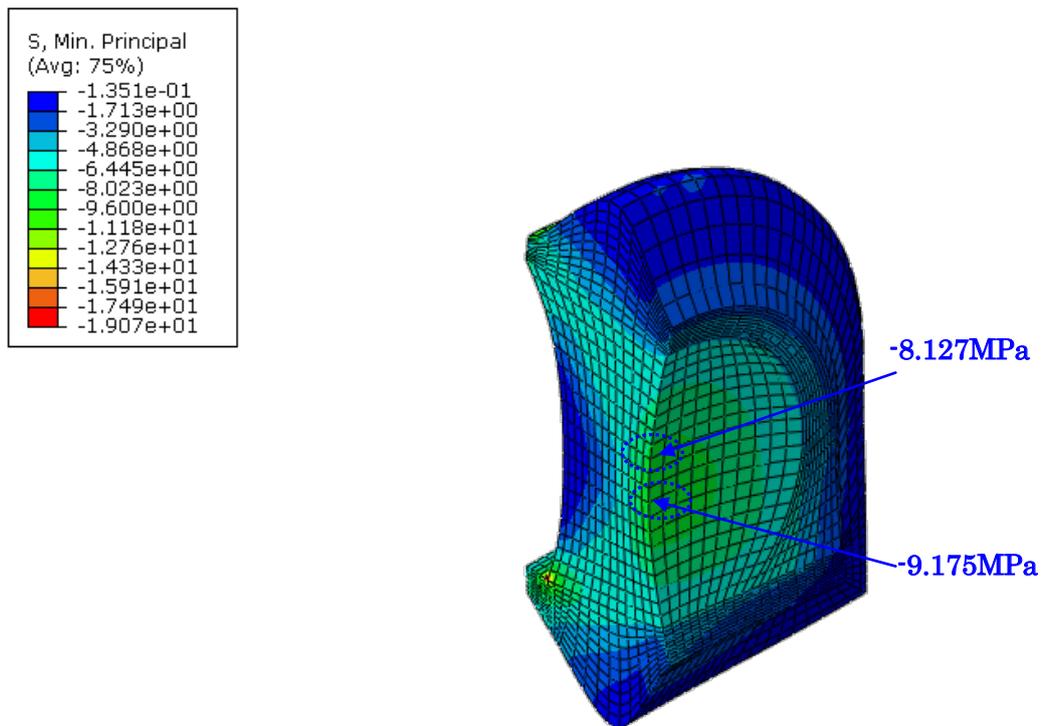
摩擦係数	最大値	
	最大主応力 (MP a)	最小主応力 (MP a)
$\mu = 0.1$	4.216	-9.175
$\mu = 0.6$	4.110	-9.088
$\mu = 1.0$	4.049	-9.037

表 2. 4. 1 - 2 設計断面-2 の最大・最小主応力一覧（「+」＝引張）

摩擦係数	最大主応力 (MP a)	最小主応力 (MP a)
$\mu = 0.1$	3.472	-8.127
$\mu = 0.6$	3.327	-8.047
$\mu = 1.0$	3.246	-7.999



1) 最大主応力



2) 最小主応力

図 2.4.1-1 プラグの最大・最小主応力分布 (「+」 = 引張 ; 単位 = MPa)
 $\mu = 0.1$ の場合解析結果再掲

2.4.2 プラグの設計計算

プラグの設計は、土木学会「コンクリート標準示方書【設計編】（2012年制定）」に基づいて、性能照査型設計法により行う。ここでは、前出の表 1.3.2-1 に示す安全係数を用いて使用状態の設計を行う。

設計計算は下記の通り行った。

I) 設計断面-1 について

1) 断面力の算出

表 2.4.1-1 に示す $\mu = 0.1$ の場合の引張応力度、圧縮応力度を用いて下記のように単位長さ（1 m）当たりの断面力、すなわち軸力 N および曲げモーメント M を算出した。

$$\sigma_t = N/A - M/Z$$

$$\sigma_c = N/A + M/Z$$

ここでは： $\sigma_t = -4.216 \text{MPa}$ （設計計算上、引張応力 = 「-」）

$\sigma_c = +9.175 \text{MPa}$ （設計計算上、圧縮応力 = 「+」）

$$A = 1000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} = 1.5 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$Z = 1/6 \times 1000 \text{ mm} \times 1500^2 \text{ mm}^2 = 3.75 \times 10^8 \text{ mm}^3$$

$$\text{よって：} \quad -4.216 = N/1.5 \times 10^6 - M/3.75 \times 10^8$$

$$9.175 = N/1.5 \times 10^6 + M/3.75 \times 10^8$$

上記の連立方程式を解くと、

$$N = 2.511 \times 10^6 \text{ (N)} = 2511 \text{ kN}$$

$$M = 3.719 \times 10^9 \text{ (Nmm)} = 3719 \text{ kNm}$$

2) RC 断面計算による配筋の決定

表 2.4.2-1 に示す単位幅（1 m）当たりの RC 断面計算を行う。

主鉄筋は引張側、圧縮側をすべて D22@300（材質 SD345）とした。

かぶりは 75mm とした。

計算の結果を表 2.4.2-2 に示す。

曲げひび割れに対する照査結果は下記の通りである。

ひび割れ幅設計値 $w_1 = 0.354 \text{ mm} < w_a = 0.375 \text{ mm}$ （ $= 0.005 \times 75 \text{ mm}$ ） → OK

（ $w_1 / w_a = 0.944 < 1.0$ ）

なお、曲げひび割れに関する照査の詳細は【付属資料】に参照されたい。

圧縮応力度に対する照査の結果は下記の通りである。

コンクリート圧縮応力度（全断面有効） $\sigma_{c1} = 16.227 \text{ MPa} < \sigma_{ca} = 24 \text{ MPa}$ （ $= 0.4f_{ck}'$ ） → OK

（ $\sigma_{c1} / \sigma_{ca} = 0.676 < 1.0$ ）（ $f_{ck}' = \sigma_{ck} = 60 \text{ MPa}$ ）

ここで、 $\sigma_{ca} = 0.4f_{ck}'$ の設定は、コンクリート標準示方書（2012年制定）[設計編：本編]10章 使用性に関する照査“10.2 応力度の制限”に準拠して設定した。

Ⅱ) 設計断面-2 について

1) 断面力の算出

表 2.4.1-2 に示す $\mu = 0.1$ の場合の引張応力度, 圧縮応力度を用いて下記のように単位長さ (1 m) 当たりの断面力, すなわち軸力 N および曲げモーメント M を算出した。

$$\sigma_t = N/A - M/Z$$

$$\sigma_c = N/A + M/Z$$

ここでは: $\sigma_t = -3.472 \text{MPa}$ (設計計算上, 引張応力 = 「-」)

$\sigma_c = +8.127 \text{MPa}$ (設計計算上, 圧縮応力 = 「+」)

$$A = 1000 \text{ mm} \times 1650 \text{ mm} = 1.65 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$Z = 1/6 \times 1000 \text{ mm} \times 1650^2 \text{ mm}^2 = 4.538 \times 10^8 \text{ mm}^3$$

$$\text{よって: } -3.472 = N/1.65 \times 10^6 - M/4.538 \times 10^8$$

$$8.127 = N/1.65 \times 10^6 + M/4.538 \times 10^8$$

上記の連立方程式を解くと,

$$N = 2.632 \times 10^6 \text{ (N)} = 2632 \text{ kN}$$

$$M = 3.840 \times 10^9 \text{ (Nmm)} = 3840 \text{ kNm}$$

2) RC 断面計算による配筋の決定

表 2.4.2-3 に示す単位幅 (1 m) 当たりの RC 断面計算を行う。

主鉄筋は引張側, 圧縮側をすべて D16@300 (材質 SD345) とした。

かぶりは 75mm とした。

計算の結果を表 2.4.2-4 に示す。

曲げひび割れに対する照査結果は下記の通りである。

ひび割れ幅設計値 $w_1 = 0.305 \text{ mm} < w_a = 0.375 \text{ mm} (= 0.005 \times 75 \text{ mm}) \rightarrow \text{OK}$

($w_1 / w_a = 0.813 < 1.0$)

なお, 曲げひび割れに関する照査の詳細は【付属資料】に参照されたい。

圧縮応力度に対する照査の結果は下記の通りである。

コンクリート圧縮応力度 (全断面有効) $\sigma_{c1} = 14.496 \text{ MPa} < \sigma_{ca} = 24 \text{ MPa} (= 0.4f_{ck}') \rightarrow \text{OK}$

($\sigma_{c1} / \sigma_{ca} = 0.604 < 1.0$) ($f_{ck}' = \sigma_{ck} = 60 \text{ MPa}$)

ここで, $\sigma_{ca} = 0.4f_{ck}'$ の設定は, コンクリート標準示方書 (2012 年制定) [設計編: 本編] 10 章 使用性に関する照査 “10.2 応力度の制限” に準拠して設定した。

表 2. 4. 2-1 設計断面-1のRC断面計算の入力条件

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th> <th>位置 (m)</th> <th>鉄筋径 (mm)</th> <th>本数 (本)</th> <th>鉄筋量As (cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D1</td> <td>0.0750</td> <td>22.00</td> <td>3.333</td> <td>12.902</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>1.4250</td> <td>22.00</td> <td>3.333</td> <td>12.902</td> </tr> <tr> <td colspan="4">鉄筋量の合計 Σ</td> <td>25.804</td> </tr> </tbody> </table>				鋼種	位置 (m)	鉄筋径 (mm)	本数 (本)	鉄筋量As (cm ²)	D1	0.0750	22.00	3.333	12.902	D1	1.4250	22.00	3.333	12.902	鉄筋量の合計 Σ				25.804
	鋼種	位置 (m)	鉄筋径 (mm)	本数 (本)	鉄筋量As (cm ²)																			
D1	0.0750	22.00	3.333	12.902																				
D1	1.4250	22.00	3.333	12.902																				
鉄筋量の合計 Σ				25.804																				
《鋼種の説明》 D:鉄筋(φ:丸鋼) P:PC鋼材1 R:PC鋼材2 Q:外ケーブル 1:上縁~高さ 0:全周 -1:上下かぶり -2:左右かぶり																								
ウェブ幅	bw	(cm)	100.00																					
部材の高さ	h	(cm)	150.00																					

表 2. 4. 2-2 設計断面-1の使用限界に対する照査結果

使用限界・曲げ		使用限界・曲げ	
曲げ(永久) Mpd (kN.m)	0.000	σ c1(引張無視) (N/mm ²)	16.227
曲げ(変動) Mrd (kN.m)	2511.000	σ c2(引張無視) (N/mm ²)	0.000
曲げ(設計) Md (kN.m)	2511.000	ひびわれ幅(設計)W1 (cm)	0.0354
軸力(永久) N' pd (kN)	0.000	ひびわれ幅(永久)W2 (cm)	0.0000
軸力(変動) N' rd (kN)	3719.000	許容ひびわれ幅wa (cm)	0.0375
軸力(設計) N' d (kN)	3719.000	W1/wa	0.944
変動荷重係数 k 曲げ	1.000	W2/wa	0.000
変動荷重係数 k 軸力	1.000		

表 2. 4. 2-3 設計断面-2のRC断面計算の入力条件

	<table border="1"> <thead> <tr> <th>鋼種</th> <th>位置 (m)</th> <th>鉄筋径 (mm)</th> <th>本数 (本)</th> <th>鉄筋量As (cm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D1</td> <td>0.0750</td> <td>16.00</td> <td>3.333</td> <td>6.619</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>1.5750</td> <td>16.00</td> <td>3.333</td> <td>6.619</td> </tr> <tr> <td colspan="4">鉄筋量の合計 Σ</td> <td>13.238</td> </tr> </tbody> </table>				鋼種	位置 (m)	鉄筋径 (mm)	本数 (本)	鉄筋量As (cm ²)	D1	0.0750	16.00	3.333	6.619	D1	1.5750	16.00	3.333	6.619	鉄筋量の合計 Σ				13.238
	鋼種	位置 (m)	鉄筋径 (mm)	本数 (本)	鉄筋量As (cm ²)																			
D1	0.0750	16.00	3.333	6.619																				
D1	1.5750	16.00	3.333	6.619																				
鉄筋量の合計 Σ				13.238																				
<p>《鋼種の説明》 D:鉄筋(φ:丸鋼) P:PC鋼材1 R:PC鋼材2 Q外ケーブル 1:上縁~高さ 0:全周 -1:上下かぶり -2:左右かぶり</p>																								
ウェブ幅	bw	(cm)	100.00																					
部材の高さ	h	(cm)	165.00																					

表 2. 4. 2-4 設計断面-2の使用限界に対する照査結果

使用限界・曲げ		使用限界・曲げ	
曲げ(永久) Mpd	(kN.m)	0.000	σ c1(引張無視) (N/mm ²)
曲げ(変動) Mrd	(kN.m)	2632.000	σ c2(引張無視) (N/mm ²)
曲げ(設計) Md	(kN.m)	2632.000	ひびわれ幅(設計)W1 (cm)
軸力(永久) N' pd	(kN)	0.000	ひびわれ幅(永久)W2 (cm)
軸力(変動) N' rd	(kN)	3840.000	許容ひびわれ幅wa (cm)
軸力(設計) N' d	(kN)	3840.000	W1/wa
変動荷重係数 k 曲げ		1.000	W2/wa
変動荷重係数 k 軸力		1.000	
			14.496
			0.000
			0.0305
			0.0000
			0.0375
			0.814
			0.000

【付属資料】曲げひび割れ照査について

コンクリート標準示方書(2012年制定)に準拠して、曲げひび割れの照査を以下のように行う。

1) 曲げひび割れ幅の計算

以下に示す示方書[設計編：標準]4編“2.3.4 曲げひび割れ幅の設計応答値の算定”(2.3.3)式で計算する。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} \left(\text{または} \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \right) + \varepsilon'_{csd} \right]$$

ここに、

k_1 : 鋼材の付着性状の影響を表す係数で、一般に、異形鉄筋の場合に 1.0、普通丸鋼の場合 1.3 としよ

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す定数で、次の式による。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

k_3 : 引張鋼材の影響を表す係数で、引張鋼材段数 n を使用して以下の式により計算する。

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

c : かぶり (mm)

c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)

ϕ : 鋼材径 (mm)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、標準的な値として同標準示方書表 2.3.1 に示す値としてよ

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

σ_{pe} : PC 鋼材応力度の増加量 (N/mm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数

2) 鉄筋応力度の増加量

以下の仮定に基づいて、コンクリートおよび鉄筋の応力度を計算する。

- ① 歪みは、断面の中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートおよび鉄筋は弾性体とする。
- ③ コンクリートの引張応力は無視する。
- ④ コンクリートおよび鉄筋のヤング係数は、入力値を用いる。
- ⑤ 軸方向力はコンクリート断面の図心に作用する。
- ⑥ コンクリート断面は鉄筋を控除しない総断面を用いる。

3) 許容曲げひび割れ幅

コンクリート標準示方書(2012年制定)[設計編：標準]2編“2.2.2 ひび割れ幅に対する照査”(2)に準拠して、許容ひび割れ幅 $w_a = 0.005c$ (c はかぶり) とした。

This is a blank page.

Ⅲ. マンホール設計計算書および設計図

This is a blank page.

(a) プラグコンクリート支強度の検討

プラグコンクリート支強度の検討は、「コンクリート標準示方書」[設計編]に基づき終局限界状態および疲労限界状態について照査する。
使用するコンクリートの安全係数を表4.3.2-12に示す。

表4.3.2-12 コンクリートの安全係数

	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数 γ_f	構造物係数 γ_i
終局限界状態	1.3	1.15	1.0	1.1	1.2
疲労限界状態	1.3	1.0	1.0	1.0	1.1

① 支圧応力の算出

支圧応力 σ_a は、ふた板の受ける内圧の合計を伝達板の面積で割り、伝達板の平均応力で評価する。

また、プラグコンクリートの内部圧縮応力も考慮する。プラグ内部の圧縮応力は再内面で内圧に等しく、埋設部終端でゼロになると考え、その中間部では線形分布と仮定して下記により計算する。

$$\sigma_a = \frac{\frac{\pi}{4} (D+2\cdot t)^2 \cdot P \cdot \gamma_f}{\frac{\pi}{4} \{D_o^2 - (D+2\cdot t)^2\}} + P \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \gamma_f$$

$$= \left\{ \frac{(D+2\cdot t)^2}{\{D_o^2 - (D+2\cdot t)^2\}} + \left(1 - \frac{x}{L}\right) \right\} P \cdot \gamma_f = 25.32 \text{ MPa} \quad \dots(4.3.2-17)$$

ここに、

P	: 運用上限圧力	=	5.1 MPa	
D	: 内径	=	800 mm	
t	: 内筒板厚	=	25 mm	
Do	: 伝達板外径	=	950 mm	
x/L	: 伝達板位置	=	0.5	(L = 1,500 mm , x = 750 mm)

② 終局限界状態の検討

設計支圧強度 f_{ad} は、設計基準強度 f_{ck} 、設計圧縮強度 f_{cd} と以下の関係にある。

$$f_{ad} = f_{cd} := f_{ck} / \gamma_c \quad \dots(4.3.2-18)$$

$$= 46.15 \text{ MPa}$$

ここに、

f_{ck}	: 設計基準強度	=	60 MPa
----------	----------	---	--------

照査は以下の評価式により行う。

$$\frac{\gamma_i \cdot \gamma_a \cdot \sigma_a}{0.85 \cdot \frac{f_{ad}}{\gamma_b}} = 0.89 \leq 1.0 \quad \dots(4.3.2-19)$$

(b) 伝達板の強度検討

①断面 A では、伝達板の受けるコンクリート支圧荷重 q により発生するモーメント M_q による曲げ応力と、コンクリート支圧荷重 q によるせん断応力を検討する。

②断面 B では 上記モーメント M_q と、 L_n 部と L_b での剛性の違いにより生じる内圧 P によるモーメント M_p の、両者による曲げ応力と、内圧 P により内筒に発生する引張応力とを重畳させた軸方向応力を検討する。

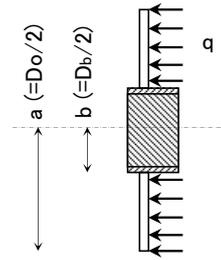
③断面 C では、上記モーメント M_q と M_p が、距離 L_b で減衰した時の両者による曲げ応力と、内圧 P により内筒に発生する引張応力とを重畳させた軸方向応力を検討する。

応力評価に用いる許容応力は、JIS B8265「4.3 材料の許容応力」を参照し、曲げ応力及びそれを含む軸方向応力に対して、 $1.5\sigma_a$ 、せん断応力に対して、 $0.8\sigma_a$ とする。
(ここに σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力)

① 断面 A : 曲げ応力およびせん断応力の検討

i) 曲げ応力

伝達板の曲げ応力は、内圧 P がある時、右図のように伝達板に加わる分布荷重を q として、周辺自由、内縁位置で拘束された円盤でモデル化し、理論式から内縁の応力 σ_{Ab} として求める。



$$q = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot Da^2 \cdot P}{\frac{\pi}{4} \cdot \{Do^2 - Da^2\}} = \frac{Da^2 \cdot P}{\{Do^2 - Da^2\}} = 20.471 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-24)$$

ここに、

P	: 運用上限圧力	=	5.1 MPa
Da	: 内筒外径	=	850 mm
Db	: 伝達板根元径	=	850 mm
Do	: 伝達板外径	=	950 mm

$$\left. \begin{aligned} C_8 &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \nu + (1 - \nu) \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right\} = 0.9302 \\ C_9 &= \frac{b}{a} \cdot \left[\frac{1 + \nu}{2} \cdot \ln \frac{a}{b} + \frac{1 - \nu}{4} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right\} \right] = 0.0959 \\ L_{17} &= \frac{1}{4} \cdot \left[1 - \frac{1 - \nu}{4} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^4 \right\} - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \cdot \left\{ 1 + (1 + \nu) \cdot \ln \frac{a}{b} \right\} \right] \\ &= 0.0052 \end{aligned} \right\} \dots(4.3.2-27)$$

$$Mq = \frac{q \cdot a^2}{C_8} \cdot \left\{ \frac{C_9}{2 \cdot a \cdot b} \cdot (a^2 - b^2) - L_{17} \right\} = 27,204 \text{ N-mm} \quad \dots(4.3.2-26)$$

$$\sigma_{Ab} = Mq \cdot \frac{6}{L_h^2} = 181.4 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-25)$$

ここに、

a	=	Do/2	=	475 mm
b	=	Db/2	=	425 mm
ν	: ポアソン比	=	0.3	
Lh	: 伝達板根元の板幅	=	30 mm	

ii) せん断応力

せん断応力は、伝達板の受ける荷重を伝達板根元の断面積で割り、下式で求める。

$$\tau_A = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_b^2) \cdot q}{\pi \cdot D_b \cdot L_h} = \frac{(D_o^2 - D_b^2)}{4 \cdot D_b \cdot L_h} \cdot q = 36.1 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-28)$$

iii) 応力評価

算出応力を以下のように評価する。

$$\begin{aligned} \text{曲げ応力} & : \sigma_{Ab} = 181.4 \text{ N/mm}^2 \leq 1.5 \cdot \sigma_a = 183 \text{ N/mm}^2 \\ \text{せん断応力} & : \tau_A = 36.1 \text{ N/mm}^2 \leq 0.8 \cdot \sigma_a = 97.6 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

ここに σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力である。

② 断面 B : 軸方向応力の検討

i) 剛性の違いにより生じる内圧 P によるモーメント M_p

図4.3.2-28 の L_h 部の板厚として、その平均板厚をとり t_o とする。
この t_o と t_b の違いにより断面Bに以下のモーメント M_p が生じる。

$$k_1 = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{\frac{D}{2} \cdot t_b}} = 0.011734 \quad \dots(4.3.2-30)$$

$$M_p = -\frac{P}{2 \cdot k_1^2} \cdot \frac{1 - \alpha - \alpha^2 + \alpha^3}{1 + \alpha^4 + 2 \cdot (\alpha^3/2 + \alpha^2 + \alpha^{5/2})} = -5,147 \text{ N-mm/mm} \quad \dots(4.3.2-29)$$

ここに、

$$\begin{aligned} t_b & : \text{伝達板根元の板厚} & = & 30 \text{ mm} \\ t_o & : \text{伝達板の平均板厚} & = & 80.00 \text{ mm} \\ \alpha & = t_b / t_o & = & 0.375000 \end{aligned}$$

ii) 曲げ応力

上記 M_p と (4.3.2-26) 式による M_q は、伝達板の中で打ち消し合う箇所と重畳する箇所が存在するが、ここでは重畳する箇所を検討を進める。

断面Bでは M_q が半分になることも考慮して曲げ応力は下式で求まる。

$$\sigma_{Bb} = \frac{\left| \frac{M_q}{2} \right| + |M_p|}{t_b^2 / 6} = 125.0 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-31)$$

iii) 引張応力

断面Bに発生する引張応力は、下式で求まる。

$$\sigma_{Bt} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_b^2 - D^2)} = \frac{D^2 \cdot P}{(D_b^2 - D^2)} = 39.6 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-32)$$

iv) 応力評価

算出応力を以下のように評価する。

$$\sigma_{Bb} + \sigma_{Bt} = 164.6 \text{ N/mm}^2 \leq 1.5 \cdot \sigma_a = 183 \text{ N/mm}^2$$

ここに σ_a は JIS B8265 に規定する許容引張応力である。

(c) 気密材取付ハブの強度検討

気密材取付ハブに対する荷重は、気密材からの引張荷重と、気密材取付ハブ内径に加わる内圧がある。伝達板で検討したふた板の受ける内圧の、気密材取付ハブでの分担は、これまでの研究（例えば平成 13 年度都市ガスの岩盤貯蔵技術調査事業報告書 3.7.5 章）で、その殆どを伝達板が担い、気密材取付ハブでは考慮不要であることが明らかとなっている。

① 気密材からの引張荷重による応力

気密材に発生する応力は最大内圧時、降伏応力を超える。ここでは安全側に、気密材に発生する応力 σ_o を、気密材材料の規格引張強さの最小値として検討する。

この荷重に対するハブ根元部 ($r = D_b / 2$) の応力は外圧 (= $-\sigma_o$) のかかる厚肉円筒として、下式で求める。

$$\text{径方向} \quad \sigma_{r1} = \frac{\sigma_o \cdot t_o}{t_p} \cdot \frac{r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) = 18.52 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-37)$$

$$\text{周方向} \quad \sigma_{\theta 1} = \frac{\sigma_o \cdot t_o}{t_p} \cdot \frac{r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) = 108.81 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-38)$$

ここに、

σ_o :	気密材の応力	=	490 N/mm ²
t_o :	気密材取付ハブの外径での板厚	=	14 mm
t_p :	気密材取付ハブ根元部の板厚	=	160 mm
$r =$	$D_b/2$	=	475 mm
$r_o =$	$D_o/2$	=	700 mm
$r_i =$	$D/2$	=	400 mm

② 内圧による応力

ハブの内径 D_i に内圧 P が加わった時のハブ根元部 ($r = D_b / 2$) の応力は内圧のかかる厚肉円筒として、下式で求める。

$$\text{径方向} \quad \sigma_{r2} = p \cdot \frac{r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) = -2.90 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-39)$$

$$\text{周方向} \quad \sigma_{\theta 2} = p \cdot \frac{r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \cdot \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) = 7.84 \text{ N/mm}^2 \quad \dots(4.3.2-40)$$

ここに、

P :	運用上限圧力	=	5.1 MPa
-------	--------	---	---------

③ 応力の組合せと許容応力

ハブ根元部に生じる応力を以下のように評価する。

$$\text{径方向} \quad : \quad \max(|\sigma_{r1}|, |\sigma_{r2}|, |\sigma_{r1} + \sigma_{r2}|) = 18.52 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_a = 122 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{周方向} \quad : \quad \sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} = 116.65 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_a = 122 \text{ N/mm}^2$$

ここに σ_a は JIS B 8201 に規定する許容引張応力である。

(3) 検討結果

(a) プラグコンクリート支圧強度の検討結果

検討結果を表4.3.2-13に示す。

終局限界状態および疲労限界状態における評価式の値はいずれも1.0以下であり、検討した構造寸法で問題ない。

表4.3.2-13 プラグコンクリート支圧強度の検討結果

設計条件	1	運用上限圧力	Pu	MPa	5	
	2	運用下限圧力	P1	MPa	5	
	3	圧力変動繰返し数	N		10,000	
	4	内径	D	mm	800	
	5	内筒板厚	t	mm	25	
	6	伝達板外径	Do	mm	950	
	7	伝達板位置	x/L		0.5	
	終局限界状態	コンクリートの安全係数	8	材料係数	γ_c	1.3
			9	部材係数	γ_b	1.15
			10	構造解析係数	γ_a	1.0
			11	荷重係数	γ_f	1.1
			12	構造係数	γ_i	1.2
			コンクリートの設計強度	13	設計基準強度	fck
	14	設計圧縮強度		fcd	MPa	46.15
	15	設計支圧強度		fad	MPa	46.15
計算及び評価	終局限界状態	22	支圧応力 (4.3.2-17)式	σ_a	MPa	25.32
		23	評価式 (4.3.2-19)式			$0.89 \leq 1.0$ (∴OK)

(b) 伝達板の強度検討結果

「4.3.2 2)マンホールの設計(2) (b)伝達板の強度検討」に示すように伝達板の強度検討は下記3断面A,B,Cに対して行う。

① 断面 A : 曲げ応力およびせん断応力の検討結果

検討結果を表4.3.2-14に示す。計算応力は許容応力以下で問題ない。

表4.3.2-14 断面 A : 伝達板の強度検討結果

設計条件	1	設計圧力	P	MPa	5.1
	2	設計温度	P1	°C	0 ~ 40
	3	使用材料名	JIS G3202 SFVC2A		
	4	設計温度における材料の許容引張応力	σ_a	N/mm ²	122
	5	内径	D	mm	800
	6	内筒板厚	t	mm	25
	7	内筒外径	Da	mm	850
	8	伝達板外径	Do	mm	950
	9	伝達板根元径	Db	mm	850
	10	伝達板根元(断面A)の板幅	Lh	mm	30
	11	伝達板根元(断面B)の板厚	tb	mm	30
計算	12	分布荷重 (4.3.2-24式)	q	N/mm ²	20.471
	13	モーメント計算係数 (4.3.2-27)式	C ₈		0.9302
	14	モーメント計算係数 (4.3.2-27)式	C ₉		0.0959
	15	モーメント計算係数 (4.3.2-27)式	L ₁₇		0.0052
	16	曲げモーメント (4.3.2-26)式	Mq	N-mm	27,204
	17	伝達板根元に発生する曲げ応力 (4.3.2-25)式	σ_{Ab}	N/mm ²	181.4
	18	伝達板根元に発生するせん断応力 (4.3.2-28)式	τ_A	N/mm ²	36.1
評価	19	内伝達板根元に発生する曲げ応力	$\sigma_{Ab} =$	$181.4 \leq 1.5 \cdot \sigma_a = 183$	OK
	20	伝達板根元に発生するせん断応力	$\tau_A =$	$36.1 \leq 0.8 \cdot \sigma_a = 97.6$	OK

② 断面 B : 軸方向応力の検討結果

検討結果を表4.3.2-15に示す。計算応力は許容応力以下であり問題ない。

表 4.3.2-15 断面B : 伝達板の強度検討結果

計 算	1	計算係数k1 (4.3.2-30)式		0.011734
	2	計算係数 α		0.375
	3	モーメント M_p (4.3.2-29)式		N-mm/mm
	4	モーメント	$M_q / 2 + M_p$	N-mm/mm
	5	断面定数 $tb^2/6$		mm ³ /mm
	6	断面Bの表面に発生する曲げ応力 (4.3.2-31)式	σ_{Bb}	N/mm ²
	7	断面Bに発生する引張応力 (4.3.2-32)式	σ_{Bt}	N/mm ²
評 価	8	断面Bでの軸方向応力 $\sigma_{Bb} + \sigma_{Bt}$	$164.6 \leq 1.5 \cdot \sigma_a = 183$	OK

(c) 気密材取付ハブの強度検討結果

検討結果を表4.3.2-17に示す。いずれの計算応力もそれぞれ許容応力以下であり検討した構造寸法で問題ない。

表4.3.2-17 気密材取付ハブの強度検討結果

設 計 条 件	1	設計圧力	P	MPa	5.1
	2	設計温度		°C	0 ~ 40
	3	使用材料名	JIS G3202 SFVC2A		
	4	JIS B8265での許容引張応力	σ_a	N/mm ²	122
	5	気密材の応力	σ_o	N/mm ²	490
	6	気密材取付ハブの内径	D	mm	800
	7	気密材取付ハブの外径	D_o	mm	1,400
	8	気密材取付ハブ根元部の径	D_b	mm	950
	9	気密材取付ハブの外径での板厚	t_o	mm	14
	10	気密材取付ハブ根元部の板厚	t_p	mm	160
計 算	① 気密材からの引張荷重による応力	11	径方向 (4.3.2-37)式	σ_{r1}	N/mm ²
		12	周方向 (4.3.2-38)式	$\sigma_{\theta 1}$	N/mm ²
	② 内圧による応力	13	径方向 (4.3.2-39)式	σ_{r2}	N/mm ²
		14	周方向 (4.3.2-40)式	$\sigma_{\theta 2}$	N/mm ²
評 価	15	径方向に発生する応力	$\max(\sigma_{r1} , \sigma_{r2} , \sigma_{r1} + \sigma_{r2}) = 18.52 \leq \sigma_a = 122$		
	16	周方向に発生する応力	$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} = 116.65 \leq \sigma_a = 122$		

(d) 内筒の強度検討結果

検討結果を表4.3.2-18に示す。

内筒の一部はコンクリート(プラグ)に覆われ、内圧の一部はコンクリートに伝達されてコンクリートで受け持たれるため、内筒としては荷重分担が減り、発生応力は小さくなるが、ここでは荷重条件ほ厳しいコンクリートに覆われていない部分を対象とした。

表4.3.2-18 内筒の強度検討

円筒胴の胴板				内圧、 $P < 0.385 \cdot \sigma_a \cdot \eta$			
JIS B8265 付属書 E : $t = P \cdot D_i / (2 \cdot \sigma_a \cdot \eta - 1.2 \cdot P)$							
設計条件	1	設計圧力	P	MPa	5.1	10 ① $1.2 \cdot P$	6.12
	2	設計温度		°C	0~40	11 ② $2 \cdot \sigma_a \cdot \eta$	244.00
	3	使用材料名	JIS G3103 SB480			12 ③ ②-①	237.88
	4	設計温度における材料の許容引張応力	σ_a	N/mm ²	122	13 ④ $P \cdot D_i$	4,080
	5	溶接継手の種類	突合せ両側溶接			14 $t = ④ / ③$	17.2
	6	放射線透過試験の割合			100%	15 最小厚さ + 腐れしろ	mm 18.2
	7	溶接継手の効率	η	(B-1)	1.00	16 使用厚さ	mm 25
	8	胴の内径	D_i	mm	800	実際の購入板厚は曲げしろ 2mmを加え、27mmとする。	
	9	腐れしろ		mm	1.0		

(e) フランジの強度検討結果

表4.3.2-19にボルト荷重の計算、表4.3.2-20にフランジに発生する応力の検討結果を示す。
 応力検討結果はいずれの応力も許容応力以内であり、検討したフランジ寸法で問題ない。

表4.3.2-19 ボルト荷重の計算

内圧、一体形フランジ					ボルト荷重の計算						
JIS B8265 付属書 G											
設計条件 フランジ	1	設計圧力	P	MPa	5.1	設計条件 ボルト	12	使用材料名	渦巻形金属ガスケット (ステンレス鋼)		
	2	設計圧力		°C	0~40		13	座面の形状	溝形 1a		
	3	使用材料名	JIS G3202 SFVC2A				14	区分	I II		
			許容引張応力	4 設計温度	σ_{fb}		N/mm ²	122	15	幅	N
		5 常温	σ_{fa}	N/mm ²	122		16	厚さ		mm	4.5
	6	使用厚さ	t_o	mm	110		17	座の基本幅	b_o	mm	12.5
	7	外径	A	mm	1,180		18	座の有効幅	b_1	mm	8.91
	8	内径	B	mm	800		19	ガスケット荷重反力径	G	mm	900
	9	ハブ先端厚さ	g_o	mm	25		20	ガスケット係数	m	mm	3.00
	10	フランジ背面のハブの厚さ	g_i	mm	60		21	最小設計締付圧力	y	N/mm ²	68.9
	11	ハブの長さ	h	mm	115		22	使用材料名	JIS G4107 SNB-7		
形状 単位:mm (腐れ後)					設計条件 胴	許容引張応力	23	設計温度	σ_b	N/mm ²	160
							24	常温	σ_a	N/mm ²	160
						25	ボルト中心円の直径	C	mm	1,040	
						26	ねじの谷底径	d	mm	42.587	
						27	使用本数	n	本	24	
						28	使用材料名	JIS G3103 SB480			
								許容引張応力	29 設計温度	σ_{nb}	N/mm ²
							30 常温	σ_{na}	N/mm ²	120	
						設計条件 ボルト荷重の条件	使用状態	31	$H = (\pi/4) \cdot x \cdot G^2 \cdot P$		3,244,480
								32	$H_p = 2 \cdot \pi \cdot b_1 \cdot G \cdot m \cdot P$		770,849
								33	① $H + H_p$		4,015,329
					34			$W_{m1} = \max(①, W_{m11}) = W_o$		4,015,329	
ガスケット締付時	35	② $\pi \cdot b_1 \cdot G \cdot y$		1,735,670							
	36	$W_{m2} = \max(②, W_{m21})$		1,735,670							
ボルトの所要断面積	37	$A_{m1} = W_{m1} / \sigma_b$		25,096							
	38	$A_{m2} = W_{m2} / \sigma_a$		10,848							
39	$A_m = \max(A_{m1}, A_{m2})$		25,096								
40	ボルト総断面積 $A_b = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot n > A_m$		34,187								
41	ガスケット締付時ボルト荷重 $W_g = (A_m + A_b) / 2 \times \sigma_a$		4,742,588								
フランジに作用するモーメントの計算	42	$R = (C - B) / 2 - g_1$		60							
	フランジの荷重(使用状態)		モーメントアーム	モーメント(使用状態)							
	43	$H_D = (\pi/4) \cdot B^2 \cdot P$	2,563,540	44 $h_D = R + 0.5 \cdot g_1$	90	45 $M_D = H_D \cdot x \cdot h_D$	230,718,564				
	46	$H_G = W_o - H$	770,849	47 $h_G = (C - G) / 2$	70	48 $M_G = H_G \cdot x \cdot h_G$	53,959,435				
	49	$H_T = H - H_D$	680,940	50	95	51 $M_T = H_T \cdot x \cdot h_T$	64,689,320				
				$h_T = (R + g_1 + h_G) / 2$							
	52	使用状態における全モーメント $M_o = M_D + M_G + M_T$				349,367,319					
53	ガスケット締付時における全モーメント $M_g = W_g \cdot (C - G) / 2$				331,981,166						

表4.3.2-20 フランジに発生する応力

内圧、一体形フランジ		応力の検討			
JIS B8265 付属書 G					
計	1	$h_o = \sqrt{(B \cdot g_o)}$	141.4214		
	2	h/h_o	0.81317		
	3	g_i/g_o	2.40000		
	4	ハブ応力修正係数 f	0.73461		
	5	一体形フランジの係数 F	0.74265		
	6	$K = A/B$	1.47500		
	7	係数 T	1.72156		
	8	係数 U	5.67779		
	9	係数 Y	5.16680		
	10	係数 Z	2.70122		
	11	一体形フランジの係数 V	0.13038		
	12	$e = F/h_o$	0.00525		
	13	$d = (U/V) \cdot h_o \cdot g_o^2$	3,849,175		
	14	$L = \{(t_o \cdot e + 1)/T\} + (t_o^3/d)$	1,26219		
算	使用状態	許容応力	15 $\sigma_{Fb} = 1.5 \cdot \sigma_{fb}$ 又は $2.5 \cdot \sigma_{nb}$ の小なる方	183	
		応力の検討	16	ハブ軸方向応力 $\sigma_{Ho} = f \cdot M_o / (L \cdot g_i^2 \cdot B_i)$	68.463 $< \sigma_{Fb} = 183.0$
	17		フランジの半径方向応力 $\sigma_{Ro} = \{(1.33 \cdot t_o \cdot e + 1) \cdot M_o\} / (L \cdot t_o^2 \cdot B)$	50.56 $< \sigma_{fb} = 122$	
	18		フランジの周方向応力 $\sigma_{To} = (Y \cdot M_o) / (t_o^2 \cdot B) - Z \cdot \sigma_{Ro}$	49.90 $< \sigma_{fb} = 122$	
	19		$(\sigma_{Ho} + \sigma_{Ro}) / 2$	59.51 $< \sigma_{fb} = 122$	
	20		$(\sigma_{Ho} + \sigma_{To}) / 2$	59.18 $< \sigma_{fb} = 122$	
	ガスケット締付時	許容応力	21	$\sigma_{Fa} = 1.5 \cdot \sigma_{fa}$ 又は $2.5 \cdot \sigma_{na}$ の小なる方	183
			応力の検討	22	ハブ軸方向応力 $\sigma_{Hg} = f \cdot M_g / (L \cdot g_i^2 \cdot B_i)$
		23		フランジの半径方向応力 $\sigma_{Rg} = \{(1.33 \cdot t_o \cdot e + 1) \cdot M_g\} / (L \cdot t_o^2 \cdot B)$	48.05 $< \sigma_{fa} = 122$
		24		フランジの周方向応力 $\sigma_{Tg} = (Y \cdot M_g) / (t_o^2 \cdot B) - Z \cdot \sigma_{Rg}$	47.41 $< \sigma_{fa} = 122$
25		$(\sigma_{Hg} + \sigma_{Rg}) / 2$		56.55 $< \sigma_{fa} = 122$	
26		$(\sigma_{Hg} + \sigma_{Tg}) / 2$		56.24 $< \sigma_{fa} = 122$	

(f) ふた板の強度検討

検討結果を表4.3.2-21に示す。

表4.3.2-21 ふた板の強度検討

胴のフランジにボルトで取り付けられる円形平板										
JIS B8265 付属書 K $t = d \cdot \sqrt{(C \cdot P / \sigma_a)}$										
設計条件	1	設計圧力	P	MPa	5.1	計 算	使用 状態	10	① $1.9 \cdot W_{m1} \cdot h_G$	534,038,742
	2	設計温度		°C	0~40			11	② $P \cdot d^3$	3,717,900,000
	3	使用材料名	JIS G3204 SFVQ2B					12	③ $C = 0.3 + \text{①}/\text{②}$	0.4436
	4	設計温度における 材料の許容引張応力	σ_a	N/mm ²	155			13	④ $C \cdot P / \sigma_a$	0.0146
	5	ガスケットの 荷重反力径	d	mm	900		14	⑤ $t = d \cdot \sqrt{\text{④}}$	108.74	
	6	モーメントアーム	h _G	mm	70		ガス ケッ ト 締 付 時	15	⑥ $1.9 \cdot W_g \cdot h_G$	630,764,215
	7	使用状態での ボルト荷重	W _{m1}	N	4,015,329			16	⑦ $\sigma_a \cdot d$	139,500
	8	ガスケット締付時の ボルト荷重	W _g	N	4,742,588			17	⑧ $\text{⑥}/\text{⑦}$	4,522
	9	腐れしろ		mm	1.0		18	⑨ $t_n = \sqrt{\text{⑧}}$	67.24	
ふた板全高さ 117mm 内、はめ込み凸部 7mm						19	最小厚さ	mm	108.74	
						20	最小厚さ+腐れしろ	mm	109.74	
						21	使用厚さ	mm	110	

(4)ノズル

マンホールの内筒にはガス受入・払出用や安全弁用、ドレイン用、計測用などいくつかのノズルが取り付けられ、外部配管あるいはバルブや計器に接続される。

ここでは、その中で最も口径が大きいと予想されるガス受入・払出用ノズルについて検討する。

(a)ガス受入・払出用ノズル

ガス受入・払出管のサイズは「4.3.7 地上設備の設計」より 500A×1本となっている。

内径 800mmのマンホール内筒に 500A(外径 508mm)の配管ノズルを設置すると、ノズルフランジがプラグの監査廊内壁と干渉し(下図参照)、またノズル補強も複雑となるため、ほぼ同じ断面積となる 350A(外径 355.6mm)の配管ノズル 2本を用いることとする。

ノズルは外部配管と取り合うノズルフランジ、エルボ、およびマンホール内筒に溶接されるノズル管台から構成される。

① ノズルフランジ

ガス事業法「ガス工作物技術基準の解釈例」第34条に則り、石油学会規格JPI-7S-15「石油工業用フランジ」のフランジを選定する。

表4.3.2-22 ノズルフランジ

設計条件	1	設計圧力	P	MPa	5.1	フランジ寸法	8	外径	O	mm	605
	2	設計温度		°C	0~40		9	ハブ先の径	X	mm	495
	3	使用材料名	JIS G3202 SFVC2A				10	ハブ元の径	H	mm	355.6
	4	フランジ形式	突合せ溶接形				11	平面座の径	R	mm	527
	5	フランジのクラス	1,500				12	厚さ	Q	mm	133.4
	6	フランジの呼び径	350A				13	ボルト中心円の径	C	mm	527
	7	配管外径	B	mm	355.6		14	ボルト穴	16 - φ60mm (M56)		

② エルボ

ガス事業法「ガス工作物技術基準の解釈例」第40条に則って必要板厚を計算し、その結果からJISB2312「配管用鋼製突合せ溶接式継手」で定める 90° エルボ(ショート)を選定する。

表4.3.2-18 内筒の強度検討

曲管部分の厚さ→直管の厚さ					外径と内径の比が1.5以下のもの				
$t = P \cdot D_o / (2 \cdot f \cdot \eta - 0.8 \cdot P) + C$									
設計条件	1	設計圧力	P	MPa	5.1	計	10	① 0.8・P	4.08
	2	設計温度		°C	0~40		11	② 2・f・η	240.00
	3	使用材料名	JIS G3103 SB480				12	③ ②+①	244.08
	4	設計温度における材料の許容引張応力	f	N/mm ²	120		13	④ P・Do	1,814
	5	溶接継手の種類	突合せ両側溶接				14	t = ④/③	7.43
	6	放射線透過試験の割合	100%			15	最小厚さ + 腐れしろ	mm	8.43
	7	溶接継手の効率	η	1.00		16	使用厚さ	mm	19.0
	8	管の内径	Do	mm	355.6	JIS B2312「配管用鋼製突合せ溶接式継手」で定める90E(S)呼び径 350A スケジュール 160を選定			
	9	腐れしろ	C	mm	1.0				

③ ノズル管台

ガス事業法「ガス工作物技術基準解釈例」第31条に従い、ノズル設置のため耐圧部(内筒)に設けた穴にはJIS B8265「圧力容器の構造—一般事項」付属書2で定める 強め材(ノズル管台)による補強を行う。設計した管台の大きさが穴の補強に必要な断面積以上であることを以下の表に示す。

表4.3.2-24 ノズル管台の計算

穴の補強(一体形-1)					内圧、外圧							
JIS B8265付属書 F : 穴の補強に必要な断面積 胴板(内圧)					A = d・tr・F + 2・tn・tr・F・(1-fr1)							
設計条件	1	設計温度	°C	0~40	設計条件	19	腐れしろ	α	mm	1.0		
	2	当該断面が 長手軸となす角度	θ	°		0	20	溶接金属部の寸法	a	mm	0	
	3	図により 得られる係数	F			1.0	21	溶接金属部の寸法	a1	mm	0	
	胴	4	使用材料名	JIS G3103 SB480		22	溶接金属部の寸法	b	mm	0		
		5	設計温度 における許容 引張応力	σ_{a1}	N/mm ²	120	23	溶接金属部の寸法	b1	mm	0	
		6	厚さ (腐れしろを除く)	t	mm	18	必要面積	24	A = d・tr	mm ²	4,909	
	7	最小厚さ	tr	mm	17.2	補強有効 範囲の検討		25	補強の 有効範囲	Y	mm	286.20
	8	使用材料名	JIS G3202 SFVC2A		26			補強の 有効範囲	H1	mm	145.99	
		9	設計温度における 許容引張応力	σ_{a2}	N/mm ²		122	27	補強の 有効 範囲	H2	mm	86.75
	管台	10	厚さ (腐れしろを除く)	tn	mm	34.7	許容応力 比穴の補強 に有効な 断面積	28	$f_{r1} = \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}$ (1以上の場合は1.0)		1.02	
		11	最小厚さ	trn	mm	7.43		29	A1	mm ²	89.04	
		12	穴の径 (腐れしろを除く)	d	mm	286.2		30	A2	mm ²	82.68	
		13	外径	D	mm	355.6		31	A3	mm ²	2081.8	
		14	外径	Dp	mm	424.0		32	①	mm ²	19,971	
		15	管台の高さ	h1	mm	235.0		33	②	mm ²	0.00	
		16	管台の高さ	h2	mm	175.0		34	③	mm ²	0.00	
		17	内側管台の高さ	h3	mm	0		35	④	mm ²	0.00	
		18	補強高さ	te	mm	59.24		36	⑤A1から④ の合計	mm ²	22,224	
						37		⑤ > = Aの検討			OK	

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²
誘電率	ファラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

