

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)

2002年2月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

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)

杉田 裕\*, 升元一彦\*\*

要 旨

カナダ原子力公社の所有する地下研究施設において実施している国際共同研究「トンネルシーリング性能試験」では、実規模の処分坑道を模擬した試験坑道内に、処分概念で検討されている埋め戻し技術を適用している。埋め戻し技術は、坑道の埋め戻し技術、プラグの設置技術、グラウト注入技術などであるが、プラグ設置技術は坑道のシーリング性能への影響が大きく、その性能の把握は重要な課題の一つである。トンネルシーリング性能試験では、コンクリートプラグおよび粘土プラグの両材料のプラグを施工し、両者のシーリング性能をプラグ内外に設置した多種多様な計測センサーにより観測・評価している。

ここでは、本研究で実施されたプラグの設計・施工技術についてとりまとめた。プラグの設計は止水性に重点を置き、コンクリートプラグでは岩盤との密着を考慮した形状、切り欠き部の設定等を検討し、粘土プラグでは掘削影響領域の規模を考慮した切り欠き部の設定等を検討した。

コンクリートプラグは低発熱高流動コンクリートを材料として、所定の位置に打設し、粘土プラグはあらかじめ圧縮固化された粘土ブロックを現場へ搬入し、一つずつ積み上げて施工した。コンクリートプラグは大型のブロック打設により、粘土プラグは本試験と同じ施工条件を想定した設置予備試験により工学規模の施工性を確認し、本試験での施工性を確認した。

---

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

Design and construction technology of the engineered scale plug in the TSX  
(Research Document)

Yutaka SUGITA\* and Kazuhiko MASUMOTO\*\*

Abstract

JNC has conducted the international joint project "Tunnel Sealing Experiment (TSX)" with AECL at Underground Research Laboratory-(URL) in Canada. Full-scale sealing technologies are applied to the underground tunnel in the TSX. Sealing technologies contain backfilling, plugging, grouting and so on. Since development of the plugging technology has impact to the whole sealing technology, understanding of the sealing performance of the plug is one of the most important problems. The TSX has full-scale concrete plug and clay plug. The sealing performance of the plugs has been monitored with the various sensors in and around the plugs, and assessed by the monitored data.

This report summaries the design and construction technology of the plugs in the TSX. The design of the plugs focused on the impervious (seepage control). The concrete plug selected the shape and the size of the body and the size of the key considering the attachment between plug and rock mass. The clay plug selected the shape and the size of the key considering the volume of the EDZ.

The material of the concrete plug was Low-Heat High-Performance Concrete. The material of the clay plug was pre-compacted bentonite blocks with sand. Feasibility of design and construction of both plugs were demonstrated with engineer scale and in-situ full-scale plugs.

---

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

\*\* Kajima Corporation

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 TSX 試験の目的	2
1.3 TSX 試験のスケジュール	3
2. プラグ設計の要件	4
2.1 プラグの機能	4
2.2 地質環境条件	5
2.3 掘削影響領域	5
2.4 試験坑道の設定	8
2.5 試験領域の設定	9
3. プラグの設計	11
3.1 切り欠きの検討	11
3.2 コンクリートプラグの設計	16
3.2.1 コンクリート材料	17
3.2.2 透水性	18
3.2.3 体積変化	18
3.2.4 変形に伴う漏水量の評価	18
3.3 粘土プラグの設計	21
3.3.1 粘土材料	21
3.3.2 数値解析	24
3.4 プラグの形状	26
3.5 TSX 試験のための設計	28
4. プラグの施工	31
4.1 切り欠きの拡幅	31
4.2 コンクリートプラグの施工	32
4.3 粘土プラグの施工	36
5. おわりに	45
謝辞	45
参考文献	46

## 図表目次

表-2.1	TSX 試験におけるプラグ機能の一覧	5
表-3.1	切り欠き設計のための検討事項	16
表-3.2	LHHPC の配合	17
表-3.3	LHHPC の固化後の基本物性一覧	18
表-3.4	コンクリートプラグ設計のための検討事項	21
表-3.5	粘土材料の基本物性値	24
表-3.6	変形解析の主な入力データ	24
表-3.7	粘土プラグ設計のための検討事項	26
表-4.1	ベントナイトブロックの設置速度	44
図-1.1	URL のレイアウト	2
図-1.2	URL420m レベル坑道のレイアウト	3
図-1.3	TSX 試験のレイアウト	3
図-1.4	TSX 試験のスケジュール	3
図-2.1	設計の考え方	4
図-2.2	坑道方向による応力分布	6
図-2.3	試験区域周辺の各坑道形状による最大圧縮応力の分布	6
図-2.4	せん断応力の分布	7
図-2.5	坑道周辺に発生する掘削影響領域の模式図	8
図-2.6	TSX 試験および周辺坑道の形状	8
図-2.7	試験区域のレイアウト	9
図-3.1	プラグ設計の思想	11
図-3.2	TSX 試験で検討した切り欠き部の形状例	12
図-3.3	ノッチ型切り欠きの応力分布	13
図-3.4	決定した切り欠きの形状	13
図-3.5	ラインドリリングによる切り欠きの拡幅	14
図-3.6	矩形切り欠き部の引張応力分布	14
図-3.7	微小破壊（応力に起因）の分布	15
図-3.8	コンクリートの温度上昇	19
図-3.9	解析モデル	20
図-3.10	コンクリートプラグの変形	20
図-3.11	ケイ砂の粒度分布	22
図-3.12	吹付け予備試験状況	22
図-3.13	スチールサポート	23
図-3.14	粘土プラグの変形解析	25

図-3.15 プラグの形状	27
図-3.16 コンクリートプラグの特長	27
図-3.17 粘土プラグの特長	27
図-3.18 試験坑道の寸法	28
図-3.19 粘土プラグ設置環境の比較	29
図-3.20 スチールサポートの構造	29
図-4.1 Room419 における切り欠きの試掘削	31
図-4.2 矩形切り欠きの掘削手順	31
図-4.3 MVP ボーリング孔配置	32
図-4.4 MVP 検層結果	32
図-4.5 掘削された試験坑道の切り欠き	33
図-4.6 20m <sup>3</sup> のブロック打設	34
図-4.7 コンクリートの搬送ルート	34
図-4.8 コンクリートの打設	35
図-4.9 コンクリートプラグ-岩盤間の処置状況	35
図-4.10 粘土ブロックの圧縮成型	36
図-4.11 粘土ブロックの養生	37
図-4.12 粘土ブロックの組立て	37
図-4.13 粘土ブロックの設置予備試験	38
図-4.14 Room419 でのブロック施工予備試験状況	38
図-4.15 粘土プラグの施工手順(1)	39
図-4.16 粘土プラグの施工手順(2)	40
図-4.17 粘土プラグの施工状況	40
図-4.18 最終ブロックセット設置方法(PHASE8)(1)	41
図-4.19 最終ブロックセット設置方法(PHASE8)(2)	42
図-4.20 粘土プラグの施工状況(PHASE8 の STEP3)	43
図-4.21 粘土プラグの断面	43

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下、高レベル廃棄物という）処分場における廃棄体（ガラス固化体を金属製容器（オーバーパック）に封入したもの）定置後の埋め戻し段階においては、廃棄体および緩衝材を地下深部の処分場に運び込む時に利用した坑道や立坑が高レベル廃棄物の人間の生活圏への通路とならないように適切に埋め戻しておく必要がある。現在の埋め戻し概念としては、適切な埋め戻し材を坑道内に充填し、坑道周辺の岩盤や割れ目の状況に応じてプラグやグラウトを組み合わせることが考えられている（核燃料サイクル開発機構，1999）。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構という）は、このような埋め戻し技術に係わる技術的課題を明らかにするため、カナダ原子力公社（Atomic Energy of Canada Limited, 以下、AECLという）の所有する地下研究施設（Underground Research Laboratory, 以下、URLという）において国際共同研究「トンネルシーリング性能試験」（Tunnel Sealing Experiment, 以下、TSX試験という）を実施している（藤田・杉田，1998, Chandler et al., 1998）。

TSX試験は、力学的な閉鎖機能を期待するコンクリートプラグ、水理学的な閉鎖機能を期待する粘土プラグの両者を対象とした閉鎖技術の検証を目的としている。これは、サイクル機構が検討を行っている両材料のプラグに関するデータを取得するものであり、本試験の実施により実規模の処分坑道を模擬した試験坑道内における閉鎖機能を検証することができると考えられる。

TSX試験の成果は、試験開始から5年間に関しては5年間レポートにまとめられており（Chandler et al., 2001），ここでは、そこで示されているコンクリートプラグおよび粘土プラグの設計・施工技術についてとりまとめた。

### 1.1 背景

TSX試験は、高レベル廃棄物の処分において必要となる処分場の閉鎖機能を検証する目的で開始された実規模工学試験である。カナダのAECL、日本のサイクル機構（当時動力炉・核燃料開発事業団）のお互いのニーズに基づき1996年から開始したプロジェクトである。

TSX試験は、カナダ、マニトバ州の州都ウィニペグの北東約100kmに位置するAECLのURLの地下420mの坑道を利用して実施している。URLはカナダにおける放射性廃棄物地層処分の安全評価研究を目的として、処分地の候補岩体の一つであるカナダ盾状地中に建設された地下研究施設である（図-1.1）。TSX試験は、国際共同研究として、サイクル機構、AECLに加えてフランスから放射性廃棄物管理機関（Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 以下、ANDRAという）、アメリカからWaste Isolation Pilot Plant (WIPP) のサポートとしてSandia national Laboratory（以下、SNLという）が参加している。



## 1.2 TSX試験の目的

TSX試験の目的は以下に示す原文にあるように、実用的なコンクリートおよび粘土プラグを製作する技術の適用性を評価すること、それぞれ施工されたプラグの性能を評価すること、その性能に影響を与える要因を抽出し、示すことである。

The objectives of the experiment is:

To assess the applicability of technologies for construction of practicable concrete and bentonite bulkheads;

To evaluate the performance of each bulkheads;

And to identify and document the parameters that affect that performance.

この目的を満足するため、TSX試験では、図-1.1, 1.2, 1.3に示すように試験坑道 Room425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。粘土プラグは、圧縮成形機械により高密度圧縮した乾燥密度 $1900 \text{ kg m}^{-3}$ のベントナイトブロックを積上げて作成し、コンクリートプラグは、施工場所に型枠を組み、低発熱高流動コンクリート (Low-Heat High-Performance Concrete, LHHPC) を打設して作成した。両プラグ間には注水システムを組んだ注水区間11mの圧力チャンバーが設置されており、そこから高圧水を注入し、粘土プラグ、コンクリートプラグそれぞれのプラグの閉鎖機能を把握する (図-1.3) こととしている。閉鎖機能の評価のため、各プラグの両側でプラグや周辺岩盤を通過してきた湧水量の計測と共に、プラグ内や周辺岩盤内に設置した700個を超えるセンサーにより水分量、間隙水圧、膨潤圧、温度、変位、ひずみを計測している。

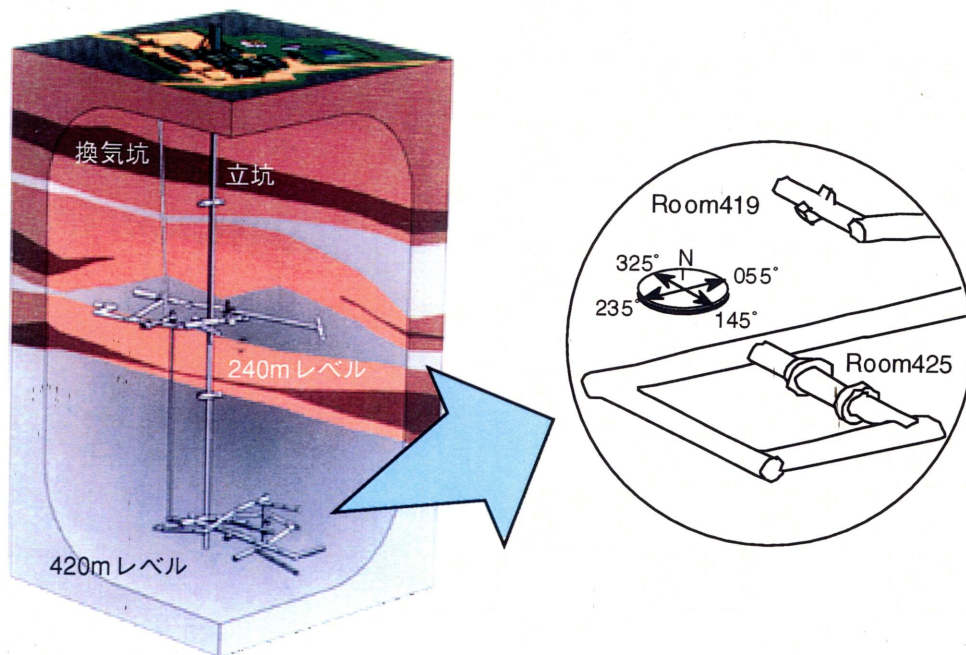


図-1.1 URLのレイアウト

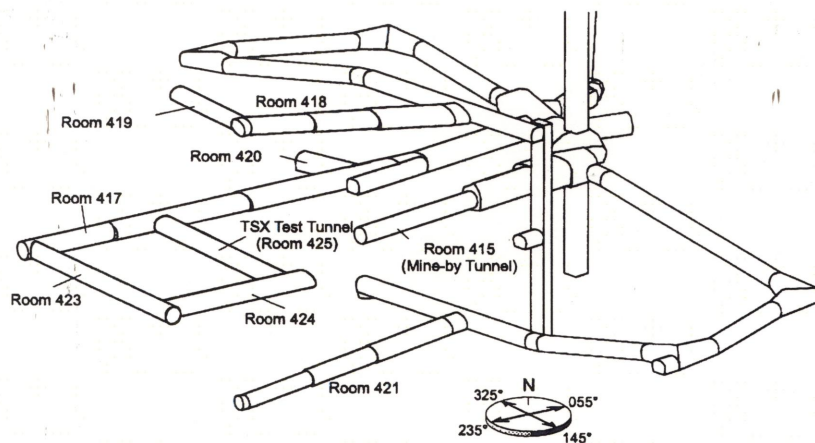


図-1.2 URL420mレベル坑道のレイアウト

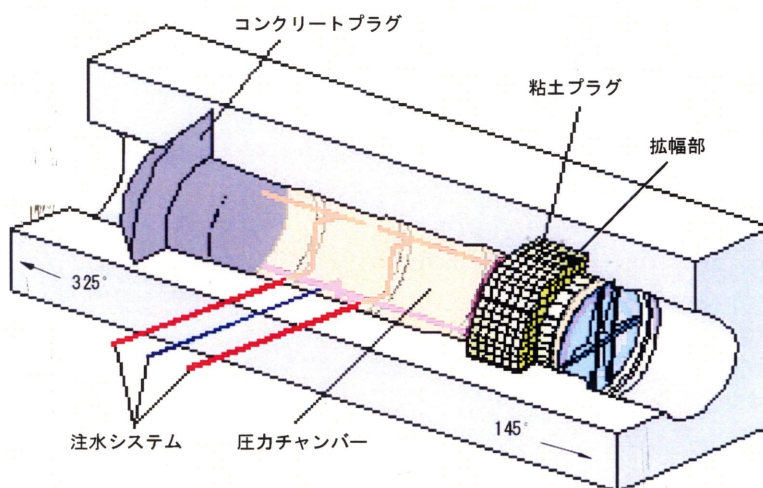


図-1.3 TSX試験のレイアウト

### 1.3 TSX試験のスケジュール

TSX試験は低圧力勾配、室温条件下での第1フェーズと高圧力勾配、加熱温度環境条件下での第2フェーズに別れている。図-1.4にフェーズ1の試験スケジュールを示す。

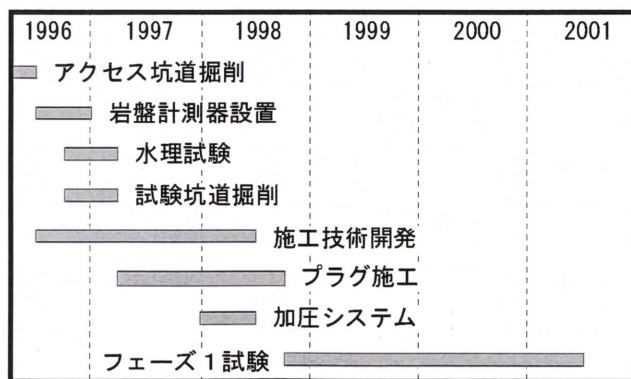


図-1.4 TSX試験のスケジュール

## 2. プラグ設計の要件

TSX 試験では、コンクリートプラグおよび粘土プラグの 2 つの実規模のプラグを設計・施工している。TSX でのプラグの設計に当たっては、図-2.1 に示すように処分場におけるプラグの設計で考慮すると考えられる地質環境条件の把握、プラグの設計に加え、URL の施設あるいは計測のためのさまざまな諸条件等、本試験固有の項目に関しても考慮することとなる。2 章ではプラグ設計のための諸条件の把握およびプラグの設計における試験領域の設定について示す。

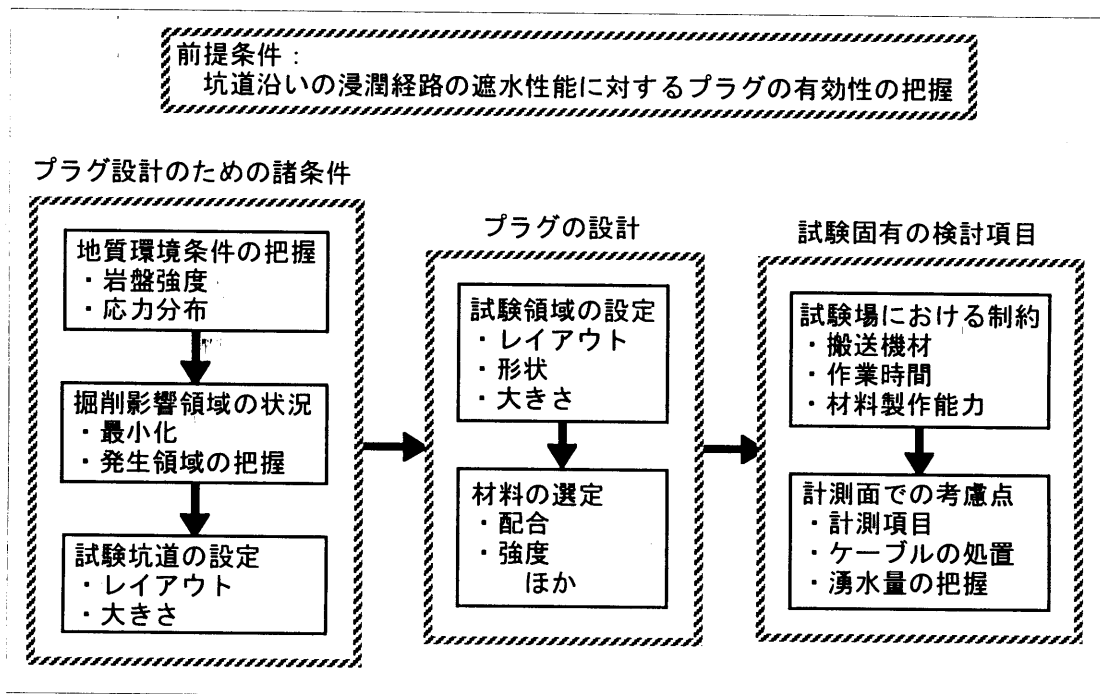


図-2.1 設計の考え方

### 2.1 プラグの機能

TSX 試験では、図-1.3 に示すようにコンクリートプラグおよび粘土プラグの 2 つの実規模プラグを用い、坑道沿いの浸潤経路の遮水性能に対する有効性を示し、その閉鎖機能を把握することを目的としている。各材料のプラグに求められる機能を明確にすることにより、その機能を発揮できるようなプラグを設計することが可能となる。TSX 試験でプラグに求めた機能を表-2.1 に示す。

コンクリートプラグでは、まず、プラグそのものが遮水性を持つこととしている。これは、打設されたプラグそのものが低透水性を有することを意味する。次に、設置されたプラグは岩盤と密着し、プラグと岩盤部の境界部を浸潤経路としないことである。さらに、処分場で想定される緩衝材の膨潤圧や周辺岩盤からの水圧が作用しても力学的に安定で破壊せず、なおかつその低透水性を岩盤部との接触部も含めて維持することである。

粘土プラグでは、コンクリートプラグ同様、まず、プラグそのものが遮水性を持つこととしている。そして、膨潤した粘土プラグにより岩盤との境界部においても遮水性は確保されるものとする。また、処分場での粘土プラグの設置環境では想定されないプラグの両端部に動水勾配を作用させ、厳しい条件下での低透水性の維持を確認する。

表-2.1 TSX 試験におけるプラグ機能の一覧

プラグ	機能
コンクリート	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。
粘土	プラグそのものが遮水性を発揮する。 プラグと岩盤との境界部分は膨潤したプラグが密着し、遮水性を確保する。 動水勾配作用下において遮水性を維持する。

## 2.2 地質環境条件

URL はカナダのほぼ中央部に位置し、岩盤は割れ目が少なく一様な花崗岩と考えられる。岩盤の強度は圧縮強度が 120MPa 以上、引張強度が 6MPa である。引張応力の発生は坑道壁面近傍の岩盤の透水性を増大させると考えられるため、引張強度の 1/3 の 2MPa を設計基準とした。

URL は大陸のほぼ中央部に位置することから、主応力分布には特徴があり、試験坑道が位置する地下 420m レベルの最大主応力、中間主応力、最小主応力はそれぞれ  $60 \pm 3\text{MPa}$ 、 $45 \pm 4\text{MPa}$ 、 $11 \pm 2\text{MPa}$  である。また、最大主応力方向は、走行 145 度、傾斜 11 度である (Chandler et al., 1996)。

## 2.3 掘削影響領域

上記のような応力分布のため、試験坑道のレイアウトによって、坑道に作用する応力は図-2.2に示すように大きく異なってくる。中間主応力方向に試験坑道を配置すると、坑道断面には垂直方向に最小主応力、水平方向に最大主応力が作用し、その応力比は約6倍になる。一方、最大主応力方向に試験坑道を配置すると、坑道断面の水平方向には中間主応力が作用し、応力比は約4倍である。中間主応力方向に坑道を配置した場合、坑道の方法は掘削影響試験を行ったMine-by坑道と同じ方向となり、応力比が大きいことから坑道周囲に応力集中が発生し、大きく坑道壁面が崩壊することが予想される (Read, 1996)。Mine-by試験では坑道掘削後に応力集中部での破壊が時間の経過にともない進行した。図-2.3は最大主応力方向に展開する坑道の応

力集中を，坑道の形状を変えて検討した結果を示している (Martin and Chandler, 1994)。いずれの形状においても最大応力値は100MPaを越えており，各坑道によって深度や方向（傾斜）の若干の違いはあるものの（図-1.2参照），420mレベルで中間主応力方向に安定な坑道を展開することの難しさを示している。そこで，TSX試験では応力比が小さくなる最大主応力方向に試験坑道を配置することとした。

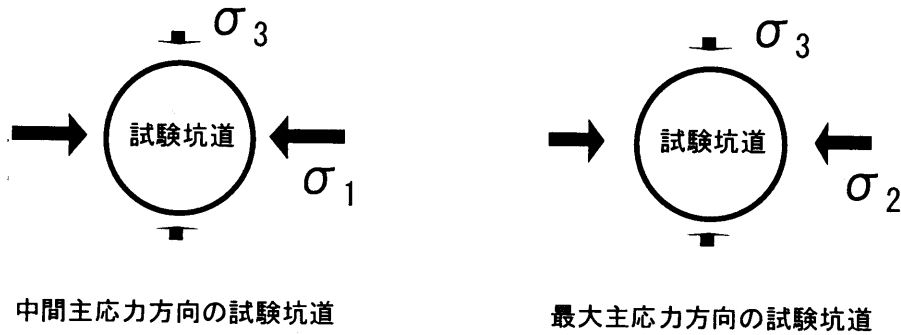


図-2.2 坑道方向による応力分布

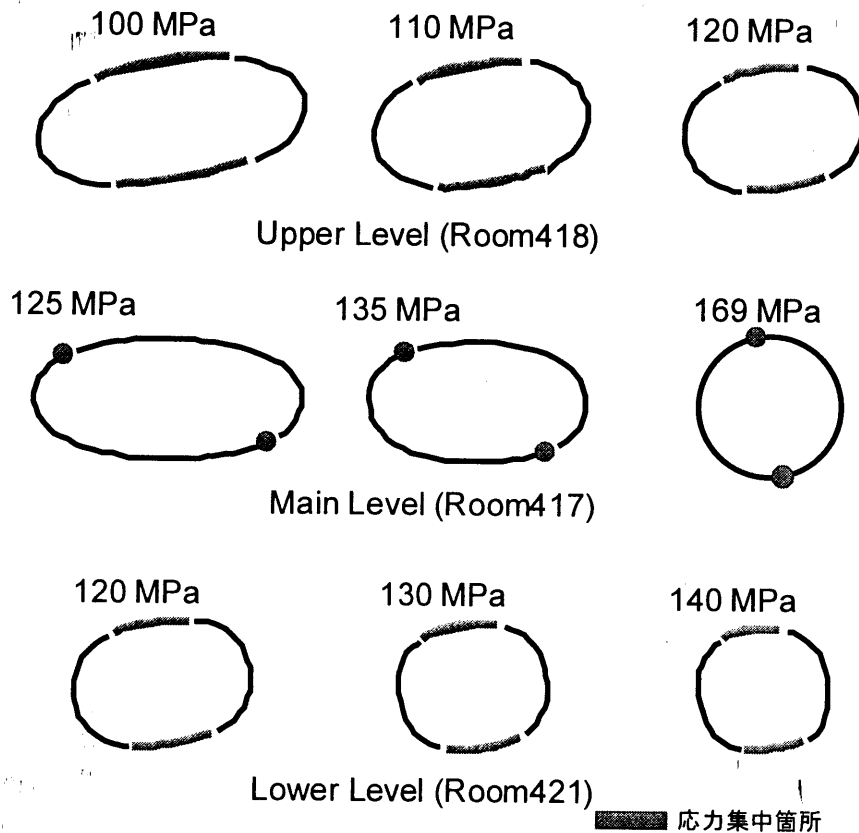


図-2.3 試験区域周辺の各坑道形状による最大圧縮応力の分布 (Martin and Chandler, 1994)

次に，試験坑道の形状の影響である。坑道形状を楕円形にすることにより応力集中を軽減できることは図-2.3からも明らかである。そこで，線形弾性の理論解により

最大主応力方向に掘削した楕円坑道の坑道に作用するせん断応力を計算した。計算式は(1)式を用いた。

$$\sigma_t = \frac{2ab(p_1 + p_2) + (p_1 - p_2)[(a^2 - b^2)\cos 2\beta - (a + b)^2 \cos 2(\beta - \eta)]}{a^2 + b^2 - (a^2 - b^2)\cos 2\eta} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_t$ はせん断応力、 $a$ は坑道の長軸長、 $b$ は短軸長、 $p_1$ は最小主応力、 $p_2$ は最大主応力、 $\beta$ は応力軸の傾斜、 $\eta$ は水平面からの角度である。最大主応力軸の傾斜11度を考慮すると $p_2$ は $45 \pm 4\text{MPa}$ 、 $p_1$ は $12.8 \pm 2\text{MPa}$ となり、 $\beta$ の応力軸の傾斜は8度である。

応力の組合せは、平均の応力値を用いた最小主応力：最大主応力=12.8：45、最大の応力比となる最小主応力：最大主応力=11：49の2通りを設定した。図-2.4に $\eta$ を横軸に坑道壁面のせん断応力の分布を示す。長軸比1.25 ( $a/b=1.25/1$ )の場合の平均応力値の組合せでは最大圧縮応力（正のせん断応力）は105MPa、最大引張応力（負のせん断応力）は0.5MPaで、いずれも岩盤の強度範囲内に収まっている。これに対して、応力比が最大となる組合せでは最大圧縮応力、最大引張応力ともに大きくなり、とくに最大引張応力17.7MPaはここでの設計基準2MPa、さらには岩盤の引張強度6MPaをも越えることとなる。これを、坑道の扁平率を変えることで平均応力値の組合せで発生する最大引張応力程度に軽減するには長軸比を1.71とすればよい。これは、同じ短軸長の場合、長軸長が約1.4倍になり坑道の掘削量は約2倍になる。

応力の設定が坑道形状に大きく影響することは理論解の結果からも明らかであるが、以後の設計では平均応力の組合せ（最小主応力：最大主応力=12.8：45）を用いることとした。

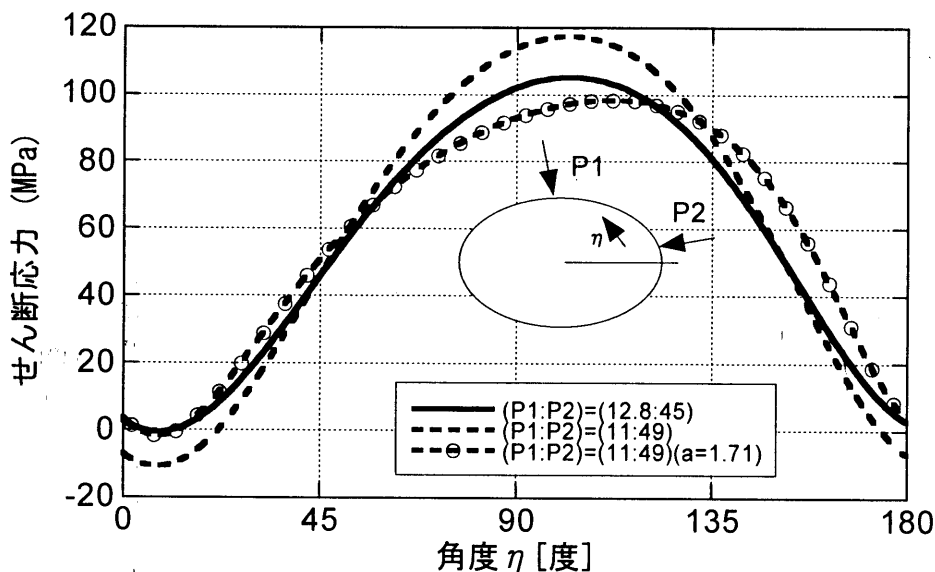


図-2.4 せん断応力の分布

2.4 試験坑道の設定

TSX試験では、設計・施工されたプラグおよび周辺岩盤を含んだ閉鎖性能を評価することが目的であることから、試験期間において坑道が安定であるように坑道壁面での応力集中を低減させる試験坑道の形状が望ましいと考えられた。この面では、前述したように楕円形の試験坑道が理想的である。しかしながら、日本の処分概念では楕円形の坑道形状は考えられていない（核燃料サイクル開発機構，1999）。本試験の成果を日本の処分概念に適用するためには日本の処分概念に近づけた坑道形状とする必要がある。そこで、坑道形状を円形に近づけ、平均応力の組合せでの設計で岩盤強度が許容範囲に設定できる長軸比1.25を試験坑道の形状に採用し、図-2.5に示すように高さ3.5m、幅4.375mの楕円形の形状とした。坑道掘削はURLでの坑道掘削で実績のある制御発破にて行った。坑道掘削後の状態として、坑道周辺には図-2.5に示すように、坑道掘削（制御発破）や応力集中に起因する掘削影響領域が発生すると考えられる。

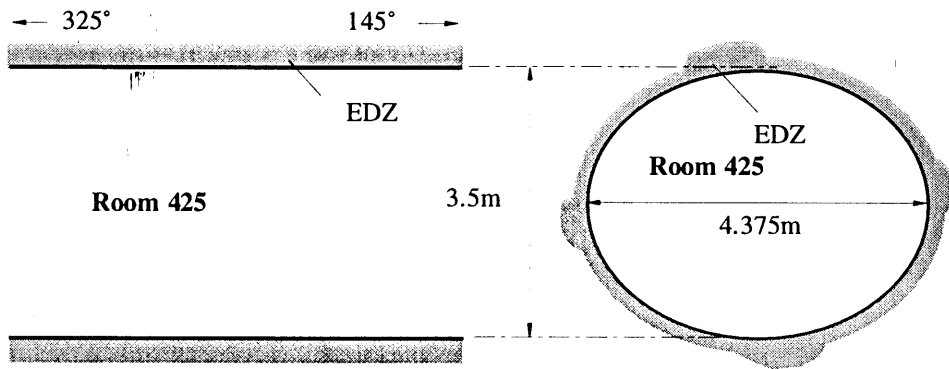


図-2.5 坑道周辺に発生する掘削影響領域の模式図

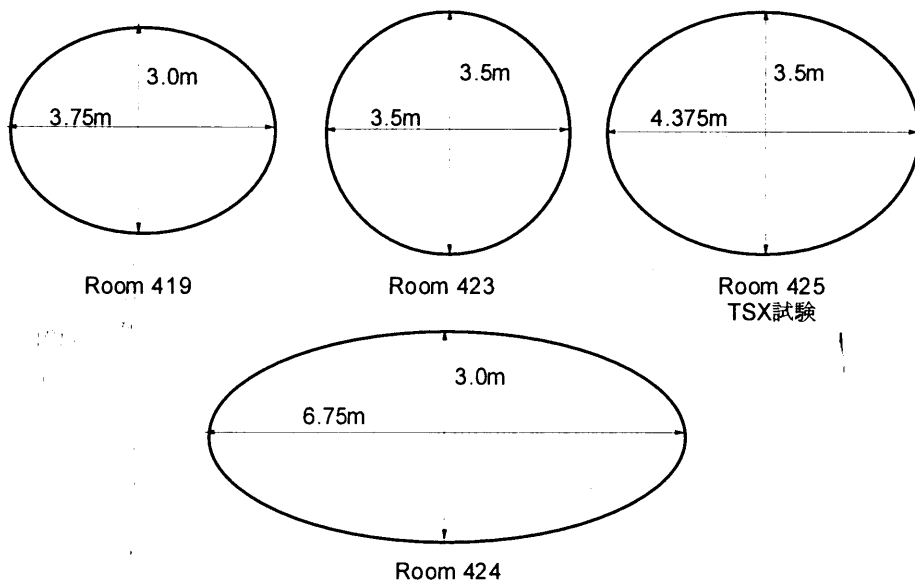


図-2.6 TSX試験および周辺坑道の形状

岩盤周囲に配置したAE/MSシステム（Acoustic Emission / Microseismic Systems）により掘削に伴う岩盤の損傷状況を観測した。図-2.6に最終的に決定されたTSX試験坑道および周辺坑道の形状を示す。Room419はTSX試験坑道と同じ長軸比（1.25）で、スケールを小さくしている。Room419は切り欠きの拡幅、粘土ブロックの施工等の予備試験を行う坑道として利用する。Room423は、Room425に平行して位置する坑道で、Room425に向けたボーリング孔の掘削用の計測坑道となると同時に粘土プラグ下流側へのアクセス坑道を兼ねる。また、Room425と形状を変えることにより坑道形状の影響を岩盤の表面の剥離等で観察できるように考慮した。Room424は最大主応力方向に位置する坑道で、力学的安定性から扁平率の大きい楕円形となっている。Room424はRoom423と425をつなぎ、粘土プラグ下流側へのアクセス坑道となる。

## 2.5 試験領域の設定

コンクリートプラグおよび粘土プラグを一つの試験坑道に設置するため、プラグ間の間隔、計測坑道との離間距離を設定した。岩盤力学の分野では、試験坑道から $5d$  離すことでその坑道の存在は隣接する坑道に力学的に影響しないと一般に言われている（土木学会，1996）。試験坑道 Room425 に対しては計測坑道 Room423 が隣接する坑道であるが、その坑道径は  $3.5\text{m}$  であり、 $5d$  は  $17.5\text{m}$  である。Room425 の長軸は  $4.375\text{m}$  であり、 $17.5\text{m}$  に坑道中心線からの距離  $2.1875\text{m}$ 、さらに切り欠きによる半径方向の拡張（3章で設計）を考慮して、Room425 の中心線から Room423 の坑道壁面までの距離をプラグ設置部で  $22\text{m}$  とした。試験区域のレイアウトを図-2.7 に示す。断面では Room418 および Room421 が試験坑道の上下に位置するが、いずれの坑道もこの範囲外になるようにレイアウトを決定した。

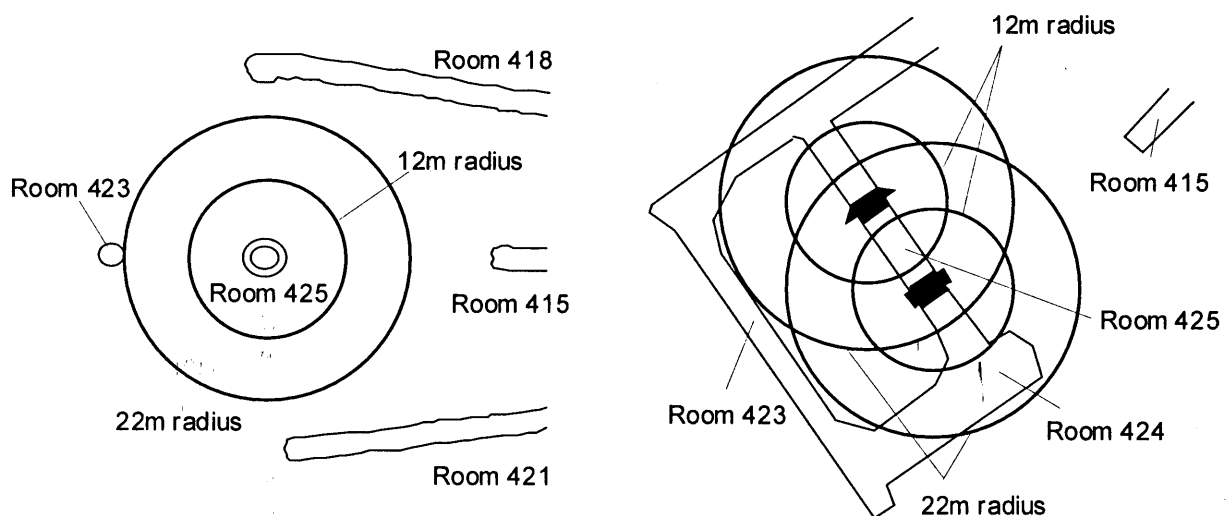


図-2.7 試験区域のレイアウト

また、プラグ間の設置位置は、試験坑道の地質条件を考慮して Room425 近傍に確



認された破碎帯を避けた位置とした。決定したプラグの配置ではプラグ間隔は中心間で 3d (12m) 以上となり、アクセス坑道となる Room417, Room424 との間隔も 3d となった。

### 3. プラグの設計

TSX 試験の対象とするプラグは、コンクリートプラグおよび粘土プラグである。2 章で述べたように、TSX 試験では坑道沿いの浸潤経路の遮水性能に対するプラグの有効性の把握を目的としている。このため、試験坑道の設計では坑道周辺の掘削影響領域の発生を制御し、プラグおよびその周辺岩盤との相互作用におけるシーリング性能に重点をおいた試験を行えるように配慮した。このような試験坑道環境に適したプラグ、さらには周辺岩盤との相互作用における挙動を評価するためのプラグを設計した。これまでに示した両プラグに共通する設計思想を図-3.1 のようになる。つまり、

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。

である。

以下に、コンクリートプラグおよび粘土プラグ、それぞれの設計について示す。なお、用語の定義として、それぞれのプラグに対して圧力チャンバー側を「上流側」、その反対側を「下流側」とする。

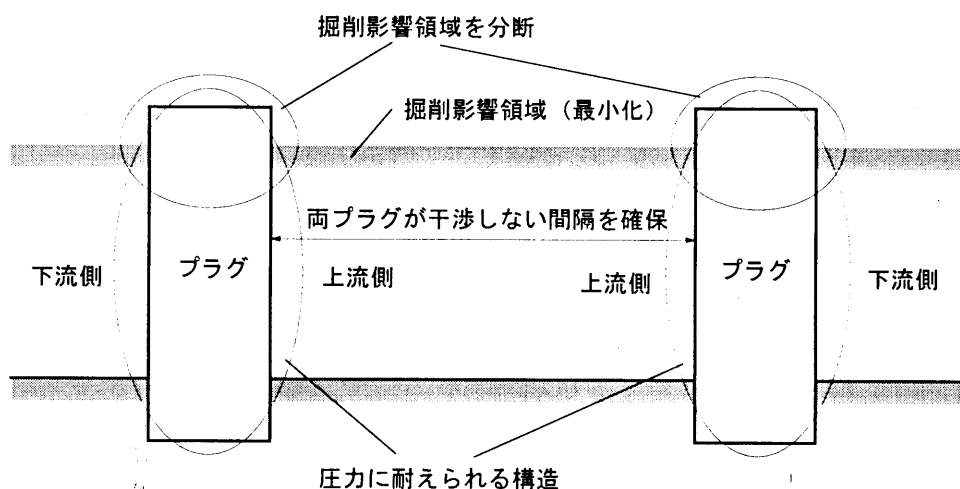


図-3.1 プラグ設計の思想

#### 3.1 切り欠きの検討

切り欠きの有無がどのように本試験の目的に影響するか、まず検討した。坑道を掘削することにより、坑道周辺には掘削（発破）に起因する割れ目と応力（応力再配分を含む）に起因する割れ目の2種類が発生する。これまでのURLでの試験結果

から、坑道壁面より最大 70cm 程度までが坑道掘削による影響を受け、その透水係数は健岩部に比して最大 6 桁上昇することが分かっている (Chandler et al., 1996)。

切り欠きなしで TSX 試験を行うことは、プラグを設置したとしても坑道壁面沿いの浸潤経路はそのまま残ることとなり、試験の目的を達成することは出来ない。切り欠きの設置は、それにより坑道沿いの浸潤経路の遮断を期待できることから試験の目的のためには不可欠である。しかしながら、切り欠きの設置は、それ自体を新たな坑道掘削とみなすことができることから、切り欠きそのものの外側に新たな浸潤経路を形成することになると考えられる。このため、切り欠きの形状、深さおよび掘削工法を選択が重要となる。発破に起因する割れ目の発生は、ラインドリリングや Rock-splitting を利用することによりほぼ解消することが出来る (4.1 参照)。坑道の形状が変わることから、応力に起因する割れ目の発生は避けられないが、切り欠きの形状により割れ目の発生を最小限に抑えることが出来る。切り欠きの深さは、坑道掘削時に坑道周辺に発生した掘削影響領域の深さのみが重要な項目となる。

コンクリートプラグの切り欠きに関して、図-3.2 に示すさまざまな形状について数値解析を行い、最終的な形状を決定した。解析で着目した点は、掘削影響領域を遮断する形状、切り欠きに伴う引張応力による微小亀裂の発生の影響、加熱試験時における熱応力の影響の評価である。応力解析は Examine3D (3次元線形弾性境界要素コード) (Curran and Corkum, 1993) を用い、熱応力解析は Flac2D (2次元有限差分コード) を用いた。

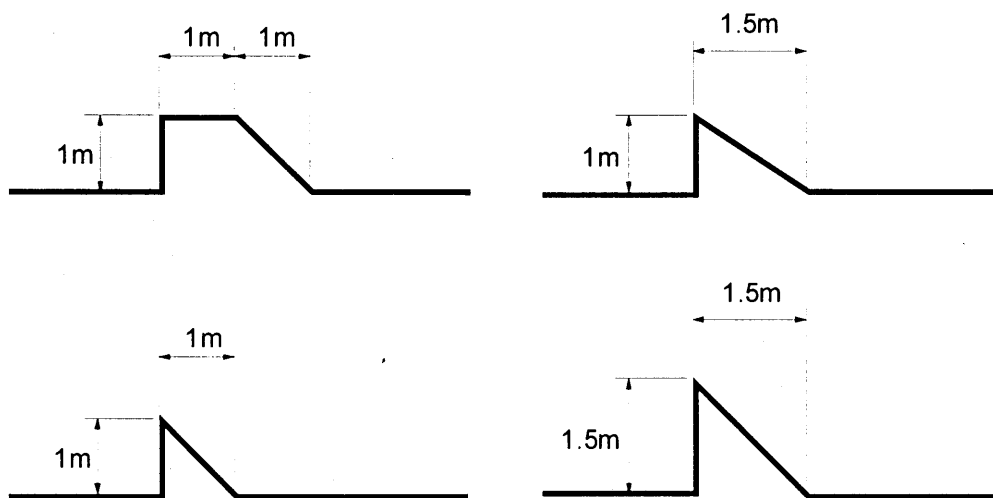


図-3.2 TSX 試験で検討した切り欠き部の形状例

解析の結果、上流側は鉛直の切り込みを配し、下流側は 45 度～60 度の傾斜を配すノッチ型が最適であることが分かった。鉛直の切り込みはせん断による微小破壊領域を遮断することができ、傾斜部は引張応力の発生領域を隔離できる。さらに、切り欠きの深さを最低 1.5m 以上とすることでせん断による破壊領域も隔離することが出来た。解析結果の一部を図-3.3 に示す。ノッチ型形状での応力分布を示してい

る。着色部は破壊が生じると考えられる最大主応力-最小主応力=70MPa の部分である。図から、切り欠き周辺の応力集中部は坑道の上部下部沿いおよび切り欠き頂上部周辺に発生することが分かった。また、この応力集中部は切り欠きにより分断されており、切り欠きの有効性が確認できた。加熱試験時の熱応力の影響は、プラグの拡幅部をプラグの下流側に配置することで低減できることがわかった。

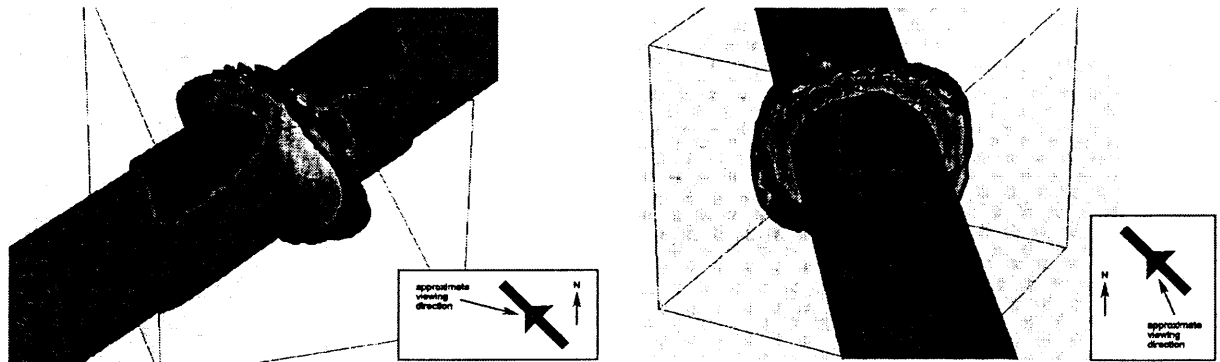


図-3.3 ノッチ型切り欠きの応力分布  
(最大主応力-最小主応力=70MPa を越える部分を着色)

以上の結果から、図-3.4 に示すようにコンクリートプラグの切り欠き部の深さは1.75m とし、斜辺の傾斜が 45 度のノッチ型とした。この形状は傾斜ボーリングと鉛直ボーリングの両ラインドリリングを組み合わせることにより、容易に達成することが出来る。この形状では切り欠き先端部の鋭角部で応力集中が発生するが、両ボーリングの交差部で図-3.5 に示すように角が取れるため、丸く加工され、掘削影響領域の発生も低減されると考えられる。また、この形状を採用した場合、プラグ外側からプラグと岩盤の接触部に対して追加のグラウト注入を行うことが容易であることが利点としてあげられる。

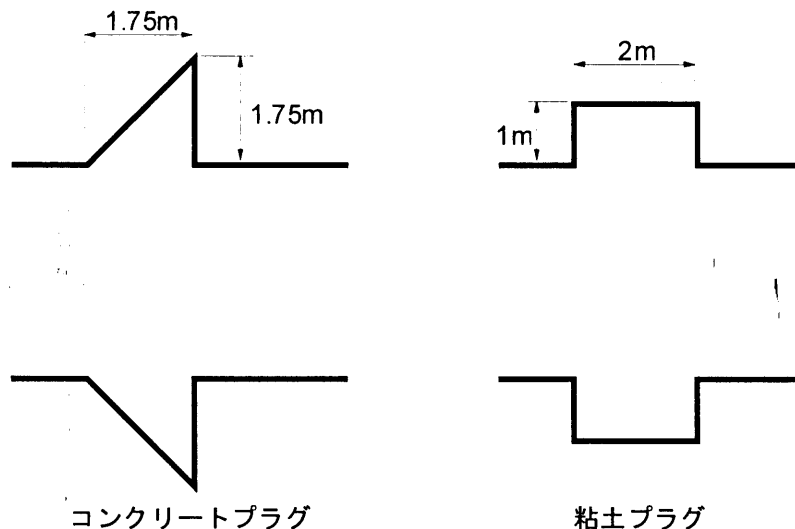
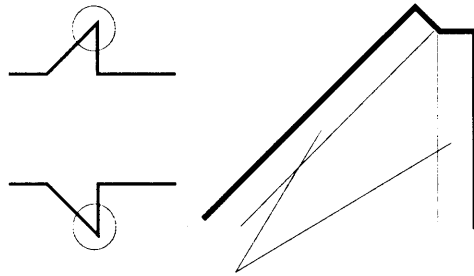


図-3.4 決定した切り欠きの形状



96mmラインドリリング

図-3.5 ラインドリリングによる切り欠きの拡幅

次に、粘土プラグの切り欠きであるが、形状は図-3.4 に示すように矩形とした。これは、粘土プラグがブロックにより製作されることによる。つまり、コンクリートプラグ同様の形状の切り欠きでは、粘土ブロックの設置の際、傾斜に合わせたブロックの加工が必要になるとともに、ブロックと岩盤との間に施工する吹付け層への依存度が増加する。この結果、ブロックの完成密度が結果的に低下し、プラグとしての遮水性能が低下し、切り欠き部を設置する効果を低下させてしまうと考えられる。

傾斜部を持たせることは応力の伝達の面では、有利であるが、コンクリートプラグと比してプラグそのものに固さがあるわけではなく、粘土プラグはベントナイトの膨潤応力による岩盤との密着の持続性が求められる。応力の面からも傾斜を持たせる効果は期待できないと考えられる。

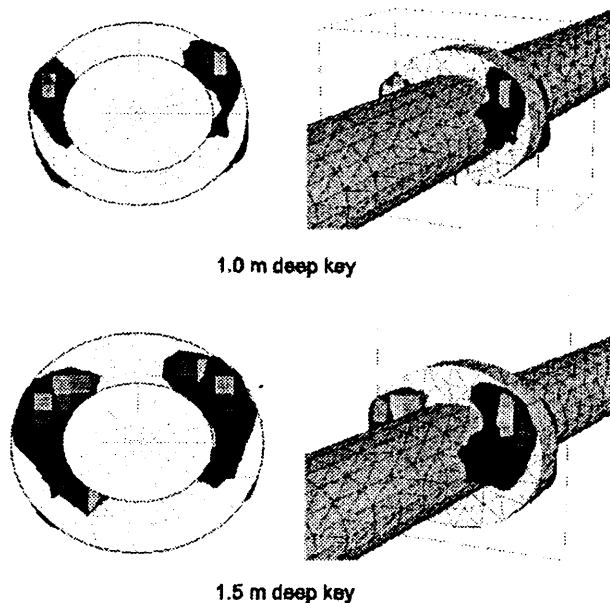


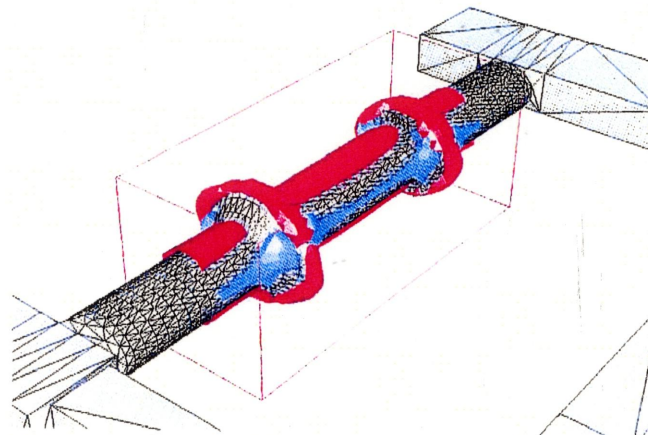
図-3.6 矩形切り欠き部の引張応力分布

両端を鉛直とすることで、坑道沿いの掘削影響慮域沿いの浸潤経路を効果的に遮断することができ、水理的には有効な形状である。一方、切り欠き部に発生する引

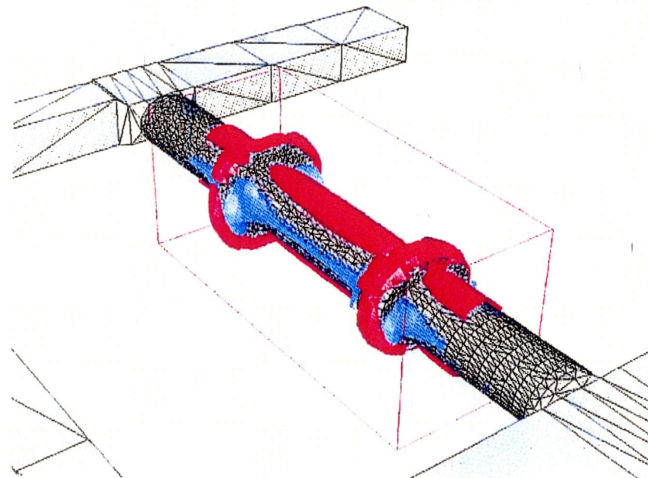
張応力の解析では、図-3.6 に示すように切り欠き深さを 1m と 1.5m にした場合ではどちらも切り欠き拡幅部に部分的に引張応力が発生するが、上流側と下流側はプラグによってその連続性は遮断されており、深さを 1.5m とする利点も見いだされなかった。また、施工の観点からは、切り欠きが深いほど切り欠き上部へのブロックの設置は困難になると考えられる。

以上の検討結果から、切り欠きの深さは 1m とした。粘土プラグの厚さについては、設計（3.3 参照）で決定することとした。

図-3.4 に示す形状で決定した切り欠き部の形状を用い、損傷領域の分布の検討を 3次元モデル (Examine3D) で行った。図-3.7 は坑道壁面上での最小主応力-5MPa (引張) およびせん断応力による微小破壊の発生分布を示したものである。図から、引張応力により発生すると考えられる微小亀裂領域 (水色部) とせん断応力により発生すると考えられる微小亀裂領域 (赤色部) がそれぞれプラグ周辺で発生することが分かった。しかしながら、これらは互いに連続せず、プラグの設置により坑道沿いの掘削影響領域を効果的に遮断できることが分かった。



コンクリートプラグ下流側より



粘土プラグ下流側より

図-3.7 微小破壊 (応力に起因) の分布

以上の切り欠きの設計に関する検討結果を表-3.1 にまとめる。表の項目が、今回TSX 試験で検討したものであり、岩盤条件、プラグに求める要件が合致する場合には本検討項目を適用することが出来る。また、目的が異なる項目については修正を加えることで対応が可能である。

表-3.1 切り欠き設計のための検討事項

検討項目	コンクリートプラグ (ノッチ型)	粘土プラグ (矩形型)
発破に起因する 微小破壊領域の遮断	坑道沿いに最大 0.7m 厚で存在することから、これを遮断することとして、ここでは 1.0m 以上の深さが必要とした。	
応力に起因する 微小破壊領域の遮断	応力に起因する破壊現象を判断するせん断基準は余裕を見込んでおくことで、切り欠き深さを大きく取ることとなり、遮断を確実にできる。	
	鉛直の切り欠き面上にはせん断応力による微小破壊は発生しない。 傾斜の切り欠きの場合、傾斜角 45 度以上であればせん断応力による微小破壊は発生しない。	鉛直の切り欠き面上にはせん断応力による微小破壊は発生しない。 切り欠き奥端面の平坦部ではせん断応力による微小破壊は発生する。
	鉛直の切り欠き面上には引張応力による微小破壊は発生する。 傾斜の切り欠きの場合、傾斜角が 60 度以下であれば引張応力による微小破壊は発生しない。	鉛直の切り欠き面上では引張応力による微小破壊は発生するが、切り欠き奥端面の平坦部までつながることはない。 切り欠き深さを深くすることによるメリットはない。
	引張応力による微小破壊とせん断応力による微小破壊の両者は発生場所が異なり、互いに連続しない。	
切り欠きの形状 (施工面)	ノッチ型の切り欠きはラインドリリングの組合せにより拡張しやすい。 2本のラインドリリングの交差により頂点部は丸くなるため、応力集中を低減できる。 ノッチ部の傾斜部沿いにコンクリートグラウトの施工がプラグ設置後も可能である。	矩形の切り欠きはブロックの設置に適している。 傾斜部がある場合、ブロック設置時のすき間が矩形の場合よりも大きくなる。 最終段階の切り欠き上部のブロック設置では、切り欠きが深くなると困難さが増す。

### 3.2 コンクリートプラグの設計

コンクリートプラグの設計は、はじめにコンクリート材料の設定を行い、次に基本物性の評価、変形解析を行った。コンクリートプラグの設計は、たとえば土木学会(1997)が鉱山、ダムおよび岩盤タンクにおける坑道の遮へいを例として設計の指標を示している。坑道の遮水という意味では本試験のプラグはこれら指標に掲載

されているプラグと用途は同じ部分もあるが、本試験の設計思想は若干異なる。土木学会の指標ではプラグの移動を長さで抑えるという設計思想であるのに対して、本試験のプラグは切り欠きで固定するというものである。これは、本試験の行われる地質環境条件として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、という考えに基づいている。

### 3.2.1 コンクリート材料

コンクリートプラグの材料は、AECL が高レベル廃棄物の地層処分に向けて開発した低発熱高流動コンクリート (LHHPC) である (Gray and Shenton, 1998)。これは、通常のセメントにそれと同量のポゾラン材料 (シリカフェーム) およびシリカフラワーを添加したものである。シリカフェームを多量に添加すると流動性が低下するが、高性能減水剤 (ナフタレン酸) だけでなくシリカフラワーを添加しているのが特徴である。表-3.2 に TSX 試験で候補材料として検討したほかのコンクリート材料 (High Fly Ash Concrete (PFAC) および Standard HPC (SHPC)) とともに LHHPC の配合を示す。

表-3.2 LHHPC の配合

コンクリート	配合 (kg/m <sup>3</sup> )		
	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

LHHPC はその名称の示す通り、打設後の発熱量が小さいことが特長の一つであり、実験室での試験では温度上昇量は 15℃程度、URL での 20m<sup>3</sup> の大型ブロック打設においても 21℃までとなっており、PFAC や SHPC と比較して半分以下である。同時に低アルカリ性を示し、普通ポルトランドセメントの間隙水が pH=12.5 以上であるのに対して 90 日材齢 25℃で pH=10.6, 100℃で pH=8.6 である。このため、普通ポルトランドセメントと比較して地層処分で共存する粘土材料への化学的影響が小さいと考えられ、地層処分研究開発での有力な候補材料である。



### 3.2.2 透水性

閉鎖機能の一つとして、TSX 試験ではコンクリートプラグそのものの低透水性を期待している。そこで、コンクリートプラグの透水性を把握するため、プラグ材料を用いた透水試験を実施した。試験は、実験室での透水試験および大型ブロックを用いたパルス試験を実施した。大型ブロックを用いた試験では、打設したコンクリートにボーリング孔を掘削し、パッカーで区切った試験区間 1m において 3 回のパルス試験を行った。

大型ブロックの透水試験結果から  $2 \times 10^{-14}$  m/s の透水係数が得られた。この試験結果は、URL420m レベルの健岩部の透水係数と同等の値である。このことから、LHHPCを用いることで、コンクリートプラグは健岩部同等の低透水性の閉鎖機能を有することが分かった。

### 3.2.3 体積変化

コンクリートは、空中で乾燥すると収縮し、水中（浸潤状態）で保存すると膨張する。また、打設時の水和熱により膨張・収縮する。TSX 試験のコンクリートプラグでは、岩盤とコンクリートプラグの密着性を閉鎖機能として期待しているわけであり、このような体積変化は岩盤とプラグとの密着性、つまり閉鎖機能に影響を与えると考えられる。とくに、コンクリートの収縮による岩盤部との接触部での引張応力の発生は掘削影響領域における亀裂の開口やコンクリートと岩盤の剥離等、その影響は閉鎖機能を求めるプラグに対しては重要な問題である。そこで、LHHPCの収縮特性を把握することとした。

100×100×250mm の角柱供試体を打設後、さまざまな養生環境下で保存し、それぞれの環境下での体積変化を把握した。設定した養生環境は、以下の 5 通りである。

- 1) 養生部屋で、温度  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 98% 保持。
- 2) 水中養生
- 3) ラップし、温度  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  保持。
- 4) 7 日間養生部屋で保持し、その後相対湿度 55% に変更。温度は  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  を保持。
- 5) 7 日間養生部屋で保持し、その後相対湿度 31% まで低下。

この結果、養生部屋と水中養生のものは打設後、膨張を続けた。一方、養生部屋から湿度を変更したものは養生部屋の中では膨張し、湿度変更後収縮に転じた。これに対し、ラップしたもののみ膨張はなく収縮のみであった。ラップしたものの収縮量は型枠から取りだし後、20 日間で  $250 \mu \epsilon$  であった。最も収縮の大きかった本条検を解析の入力値に用いた。

### 3.2.4 変形に伴う漏水量の評価

コンクリートの変形に伴う湧水量を評価するため、はじめに、室内試験で取得された物性値を用い、コンクリートプラグの温度変化およびそれによる体積変化を数

値解析で評価した。解析は TEXO モデルおよび MEXO モデルを用いた (Didry et al., 2000)。TEXO モデルでプラグの熱解析を実施し、その結果を MEXO モデルに入力し、プラグの変形解析を行った。表-3.3 に LHHPC の基本物性値を示す。本表より解析に必要なデータを入力した。

表-3.3 LHHPC の固化後の基本物性一覧

項目	物性値
Young 率(28 日 40%強度)	36 GPa
Young 率(引張)(40%強度)	31 GPa
ポアソン比	0.16
一軸圧縮強度(28 日 23°C)	75 MPa
一軸圧縮強度(28 日 50°C)	68 MPa
一軸圧縮強度(28 日 90°C)	67 MPa
引張強度(28 日 23°C)	3.37 MPa
温度上昇(熱量測定試験)	21°C
活性化エネルギー(Ea /R)	5650 °K
熱膨張係数(28 日)	8.5E-6 /°C
自己収縮係数	250 $\mu \epsilon$
初期水和率	0.15
熱伝導率*	1.67 W/m°C
比熱*	2.12E6 J/m <sup>3</sup> °C

\*は普通コンクリートの値

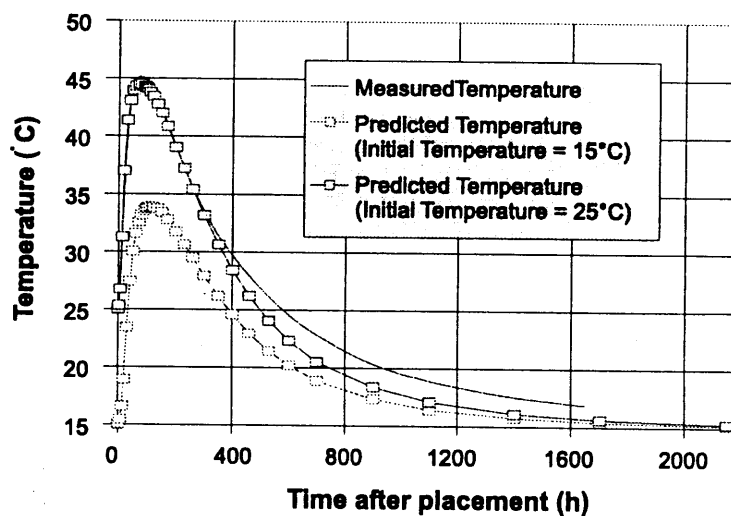


図-3.8 コンクリートの温度上昇

熱解析の結果を図-3.8 に示す。コンクリートプラグの中心における温度上昇は初期条件が 15°C の場合 18.9°C、初期条件が 25°C の場合 19.5°C であった。図には、実際のプラグ施工時の計測結果も示している。これより、初期条件 25 度の解析結果が実測値と良く一致している。この温度条件を MEXO モデルの入力値とした。MEXO モデルでは、岩盤とコンクリートプラグの接触部を二通りの方法でモデル化した。

図-3.9 に示すように一つは、岩盤とコンクリートプラグの接触を維持しながらコンクリートプラグが変形するもの、もう一つは岩盤とコンクリートプラグの接触部が変形に応じて剥離する（プラグが元の形状を維持しながら拡大縮小する）ものである。岩盤とコンクリートプラグの接触部が剥離するモデルでの解析結果では、図-3.10 に示すようにプラグ上部に最大 0.6mm のすき間が生じる結果となった。

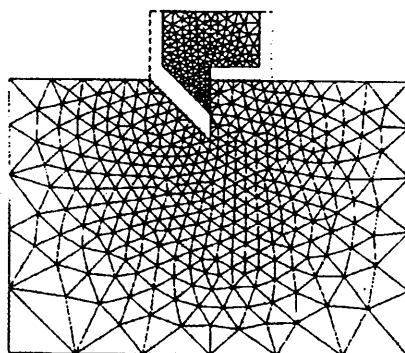


図-3.9 解析モデル

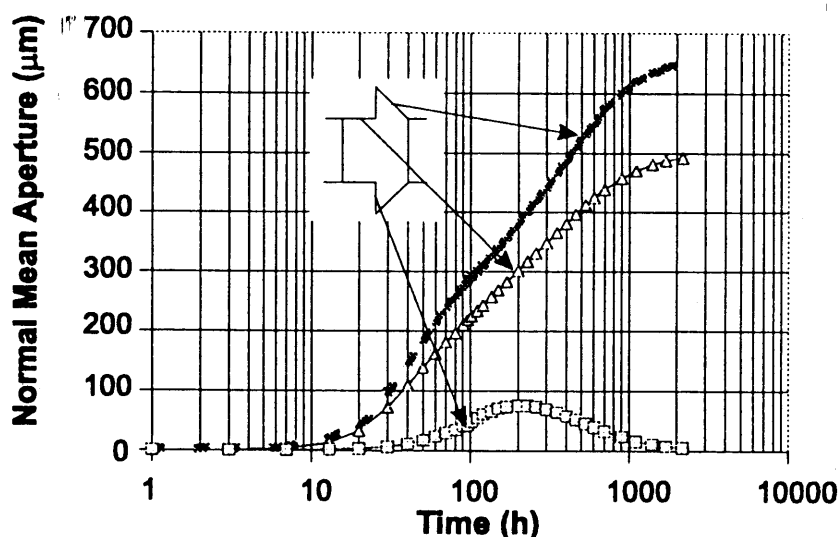


図-3.10 コンクリートプラグの変形

このすき間が円柱とみなしたプラグ全周に発生すると仮定してプラグ-岩盤間の漏水量を平行平板モデルで評価した。

$$Q = l \frac{b^3 \gamma g}{12 \mu} i \quad (2)$$

ここで、 $Q$  は流量、 $l$  はプラグの円周長 (12.4m)、 $b$  は開口幅 (0.0006m)、 $\mu$  は水の動粘性係数 (0.0015 Pa S)、 $\gamma$  は水の比重、 $g$  は重力加速度である。動水勾配  $i$  は圧力チャンバーの最大圧 4MPa での値 70 を用いた。このときのすき間からの漏

水量は 6000L/min となり、これは、プラグの施工時にすき間の発生に対する何らかの防止策を考慮する必要があることを示している。

TSX 試験では、膨潤性のシール材であるベントナイトストリップス（水分を吸収することにより膨潤し、隙間を充填するシール材）を、プラグの胴体部および切り欠き部のコンクリートプラグと岩盤との間に複数本設置することとした（4.2 参照）。岩盤-コンクリートプラグ間に漏水が生じた場合は、漏水を吸収して膨潤したベントナイトストリップスがそのすき間を塞ぐようにした。

さらに、プラグ切り欠き部の頂上部およびプラグ胴体部の上部には、プラグの乾燥収縮に伴うすき間を効率良く充填するため、あらかじめセメントグラウトを注入する配管を施工しておくこととした（4.2 参照）。

以上の結果をコンクリートプラグの設計のための検討事項として表-3.4 に示す。

表-3.4 コンクリートプラグ設計のための検討事項

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 粘土プラグの設計

粘土プラグの設計は、コンクリートプラグのような強度設計ではなく、粘土プラグの飽和までの時間との関連に重点を置いた。これは、TSX 試験で飽和後の粘土プラグの浸潤過程が閉鎖要素としての粘土プラグの性能として不可欠なデータのためである。粘土プラグの大きさ（長さ）はそのまま粘土プラグの飽和に要する時間に影響するため、試験期間との総合的な評価を行う必要がある。

#### 3.3.1 粘土材料

粘土材料は、サイクル機構がこれまで処分研究の標準材料に用いてきたクニゲル

V1 とケイ砂の混合材料である。混合比はクニゲル V1 が 70%、ケイ砂が 30%である。クニゲル V1 の総量は 150 ton となり、日本からカナダへ輸送した。30%のケイ砂混合率は第 2 次取りまとめの緩衝材の仕様と同じである（核燃料サイクル開発機構，1999）。ケイ砂はサイクル機構がこれまでに使用してきたケイ砂の粒度分布を参照して図-3.11 に示す粒度分布のケイ砂をカナダで調達した。

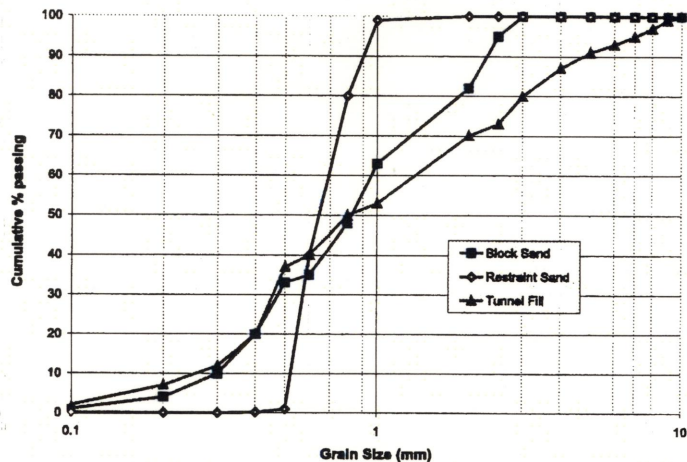


図-3.11 ケイ砂の粒度分布

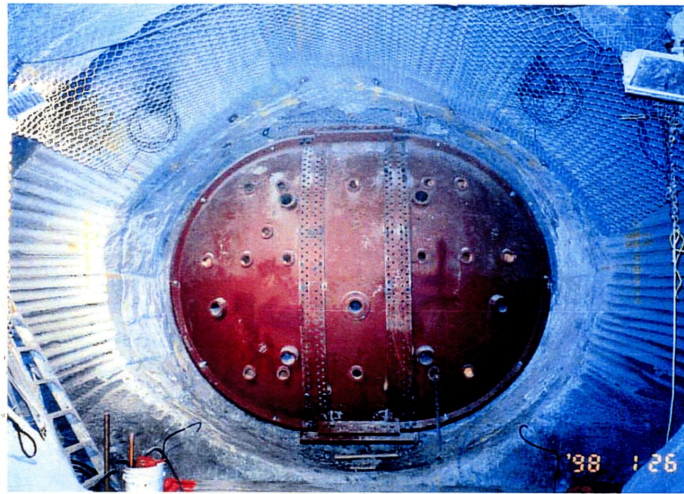
ブロックの乾燥密度  $1900 \text{ kg/m}^3$  は、有効粘土密度では  $1700 \text{ kg/m}^3$  に相当する。ブロックの含水比は 14% で、このときの膨潤圧は 1MPa であり、透水係数は  $10\text{E-}12 \text{ m/s}$  以下である。



図-3.12 吹付け予備試験状況

岩盤との接触部の処置に用いた吹付け材料は、ブロックの製作に失敗した試料を再度直径 10mm 以下に砕いたものを用いた。吹付けの予備試験では、図-3.12 に示すようにノズルからの吹き出し口で水を加える、乾式吹付け法により吹付けた。吹付け機械は在来のコンクリート吹付け機 (Aliva 社製 AL-240.5) である。吹付けた

材料の乾燥密度は  $1300 \text{ kg/m}^3$  で、含水比は 18.5%であった。有効粘土密度は  $1100 \text{ kg/m}^3$  であり、このときの透水係数は  $10\text{E-}11 \text{ m/s}$ 、膨潤圧は  $100\sim 200 \text{ kPa}$  である。ブロックの物性値と比較すると、透水係数は 1 オーダー以上大きく、吹付け部が浸潤経路となる可能性があるが、ブロックの浸潤が進行するに連れてブロックが膨潤し、それに伴い吹付け部の密度は増加することが期待でき、プラグを一体物と見なして透水係数を評価できると考えられる。



粘土プラグ側



粘土プラグ外側

図-3.13 スチールサポート

(スチールサポートを構成するスチールシェル)

粘土プラグの上流側には 25cm 厚さの埋め戻し層、下流側には図-3.13 に示すスチールサポートが設置された。これは、本来粘土プラグの設置される環境は、粘土プラグの上流下流の双方が埋め戻し材により埋め戻されていることによる。粘土プラグの下流側は解放されているため、TSX 試験では剛性の高いスチールサポートを設置し、上流側は埋め戻しにより処分環境を模擬している。埋め戻し材の混合比はク

ニゲル V1 が 10%，ケイ砂が 90%である。ケイ砂の最大粒径は 10mm である。埋め戻し層は，下半分はインパクトハンマーで締固め，上半分は吹付けの後に側方から締固めた。インパクトハンマーでの締固めは 50mm ずつとした。下半分の乾燥密度は 2100 kg/m<sup>3</sup>，含水比は 5%。このときの透水係数は 5.0E-11 m/s である。上半分の乾燥密度は 1850 kg/m<sup>3</sup>，含水比は 14%で，このときの透水係数は 10E-10 m/s である。埋め戻し層の設置は，TSX 試験では圧力チャンバー内に砂を充填するため，膨潤した粘土プラグがチャンバー内の砂の中へ侵入することを防ぐ効果，それ自体がプラグの膨張を抑制する効果を期待している。埋め戻し層の透水係数は粘土プラグと比較して 1 オーダー以上大きいことから，粘土プラグの水理境界は粘土プラグの上流端部と見なすことが出来る。

以上，示した粘土材料の物性の一覧を表-3.5 に示す。

表-3.5 粘土材料の基本物性値

	混合比 (ベントナイト/ケイ砂)	乾燥密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	含水比 [%]	透水係数 [m/s]	膨潤圧 [MPa]
ブロック	70/30	1900	14	< 10E-12	1.0
吹付け	70/30	1300	18.5	10E-11	0.1~0.2
埋め戻し層上	10/90	2100	5	5.0E-11	
〃 下		1850	14	10E-10	

### 3.3.2 数値解析

粘土プラグの挙動を予測するため，変形挙動を予測する変形解析（応力分布および変形分布）および浸潤を予測する浸潤解析を実施した。解析は，材料，計測項目の検討のために粘土ブロックの物性が取得される前に既存のデータを用いて実施した。

表-3.6 変形解析の主な入力データ

	物性値
乾燥密度	1800 kg/m <sup>3</sup>
粘土の弾性係数	200 MPa
粘土のポアソン比	0.3
砂充填層の内部摩擦角	25
粘土の内部摩擦角	15
粘着力	0 kPa 40 kPa 80 kPa

変形解析は，粘土プラグを一体物とし，線形弾性体，完全塑性体の両方で検討した。ここでは，粘土プラグ，粘土プラグの下流部に設置する砂充填層（粘土プラグとスチールサポートの間（図-3.18 参照）），その外側のスチールサポートを考慮した。表-3.6 に解析入力値の一覧を示す。完全塑性体の検討では，粘着力を 3 通り設

定した。境界条件は岩盤と粘土プラグ間の摩擦を考慮する場合、しない場合を設定した。なお、変形解析では、粘土の膨潤や浸潤の影響は考慮していない。

塑性変形を考慮した解析結果を図-3.14 に示す。塑性ひずみの分布結果から、プラグの上流部の岩盤との接触部から粘土プラグ内に塑性変形（コンターが密集している部分）が生じた。また、圧力チャンバーに 4MPa の圧力を負荷した条件では、プラグの上流端部の中心（左図の 1）で最大 101mm、砂層との境界部（左図の 2）で 26mm の変形が生じる結果となった。これは、圧力チャンバーから加圧することにより粘土プラグは下流側に変形することを示している。

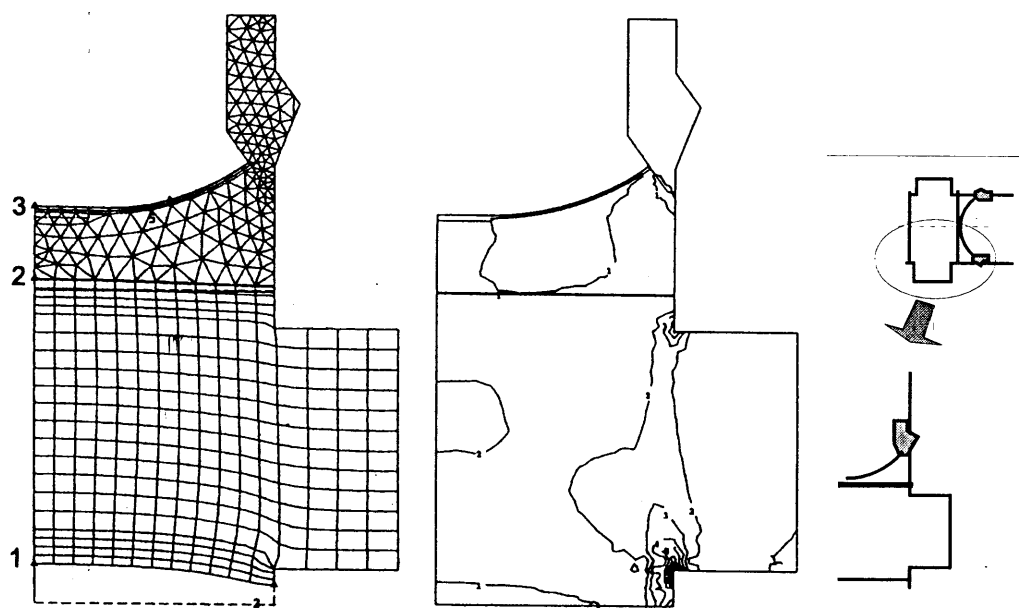


図-3.14 粘土プラグの変形解析  
(左：変形，右：塑性ひずみの分布)

この結果から、粘土プラグの上流および下流の境界に変位計を設置し、TSX 試験中における粘土プラグの変形挙動を計測することとした。

浸潤解析では、乾燥密度 1800 kg/m<sup>3</sup>、含水比 12%材料について実施した。材料の物性値が表-3.5 と異なるのは、上述したように材料の選定に先駆けて解析を実施したためである。浸潤解析の不飽和水分特性は van Genahuten モデルを用い、飽和度は式(3)の関係式を用いて計算した。

$$S_r = \left( 1 / \left( 1 + \left( \frac{P_c}{P} \right)^{1.49} \right) \right)^{0.33} \quad (3)$$

解析の結果、圧力チャンバーの圧力が 5MPa の場合、粘土プラグの飽和は 4 年間要する結果となった。本解析の物性値を TSX 試験の選定材料と比較すると、密度が 1800 kg/m<sup>3</sup> に対し 1900 kg/m<sup>3</sup>、飽和度は 65% に対し 92% である。浸潤時間の感度



解析結果から、初期の飽和度が大きくなることにより飽和の期間は短くなる結果が得られており、TSX 試験の材料は解析と比較して初期の飽和度が大きいことから飽和はより短期に達成すると考えられる。

遮水性能を期待している地下石油備蓄のプラグの長さが坑道半径と同じであることおよび本浸潤解析結果を考慮し、粘土プラグの厚さは坑道の長軸の半径である 2m 程度とすることとし、切り欠きの長さは 2m、粘土プラグの長さは切り欠き部の上流側下流側にそれぞれ 1 ブロックずつつぎ足した形とし、2.6m とした。

以上の結果を粘土プラグの設計のための検討事項として表-3.7 に示す。

表-3.7 粘土プラグ設計のための検討事項

検討項目	設計
材料	クニゲル V1 70%, ケイ砂混合 30%で乾燥密度 1900 kg/m <sup>3</sup> 以上, 含水比 14%の粘土ブロックを用いる。 透水係数は 10 <sup>-12</sup> m/s の低透水性の粘土プラグとなる。
施工性	ブロックによる粘土プラグの製作は、乾燥密度の揃った材料でプラグ全体を施工できることから、現場締め固め、吹付け手法より施工性の観点からは優れている。
すき間の遮断 (処理)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粘土-岩盤 吹付け工法により岩盤部の凸凹を解消し、ブロックはその形状に合わせて加工する。乾燥密度 1300 kg/m<sup>3</sup>, 含水比 18.5%の吹付け材料の透水係数は 10<sup>-11</sup>m/s である。吹付け層の厚さは水平部で 20mm, 鉛直部で 60mm。</li> <li>・ブロック間 ブロックは水準を保ちながら施工する。すき間は乾燥したケイ砂混合ベントナイトの粉末で充填する。</li> </ul>
浸潤経路の遮断	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削影響領域沿い 応力集中部となる粘土プラグ上流側切り欠き面の掘削影響領域 (坑道の上下左右端部) には粘土グラウトを注入する。</li> <li>・ブロックの配置 ブロックの配置がプラグ内の上流側から下流側まで一直線にならないようにする。</li> </ul>

### 3.4 プラグの形状

以上のように設計したコンクリートプラグおよび粘土プラグの形状を図-3.15 に示す。コンクリートプラグの切り欠きの形状は断面を三角形とし、切り欠き深さは 1.75m とした。プラグそのものの長さは切り欠きからチャンバー側に胴体を延長した形状で長さ 3.5m とし、切り欠きを含まない部分で試験坑道の短軸長の半径と同じ長さとした。一方、粘土プラグは切り欠きの断面形状は矩形とし、切り欠き深さは 1.0m、切り欠きの長さは 2.0m とした。切り欠きの前後に 30cm の胴体部を延長し、プラグ長は 2.6m とした。

また、TSX 試験のプラグの特長をコンクリートプラグ、粘土プラグごとにそれぞれ図-3.16, 3.17 に図解で示す。

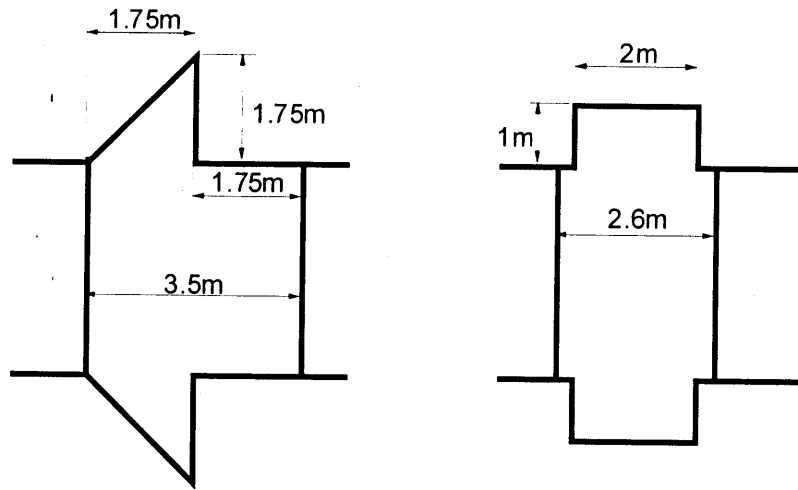


図-3.15 プラグの形状  
(左：コンクリートプラグ，右：粘土プラグ)

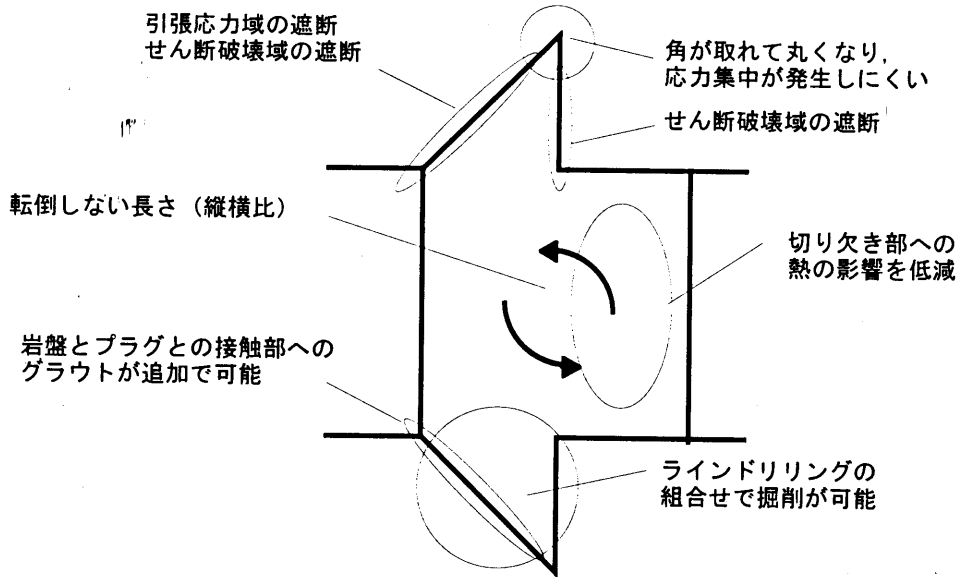


図-3.16 コンクリートプラグの特徴

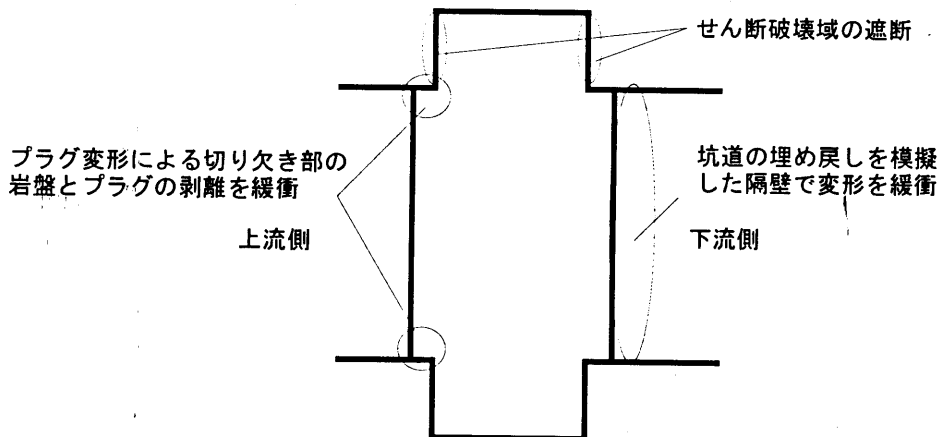


図-3.17 粘土プラグの特徴

プラグを配置した TSX 試験坑道の詳細寸法を図-3.18 に示す。粘土プラグはそのものには耐圧力性が期待できないことから、圧力に対抗するスチールサポートを設けた。粘土プラグは切り欠き部からそれぞれ上流下流側に 0.3m の突き出し部を設けた。粘土プラグと岩盤との間は吹付けベントナイトを行い、プラグと岩盤との隙間処理を行った。粘土プラグの上流側には 0.25m の埋め戻し層を設けた。埋め戻しは現場締め固めと吹付けを併用した。下半分の埋め戻し層に引き続き、上半分に砂充填層を設けた。

砂充填層とコンクリートプラグの境界にはコンクリート壁を設け、プラグ下流部に設けた打設壁との間にコンクリートプラグを打設した。

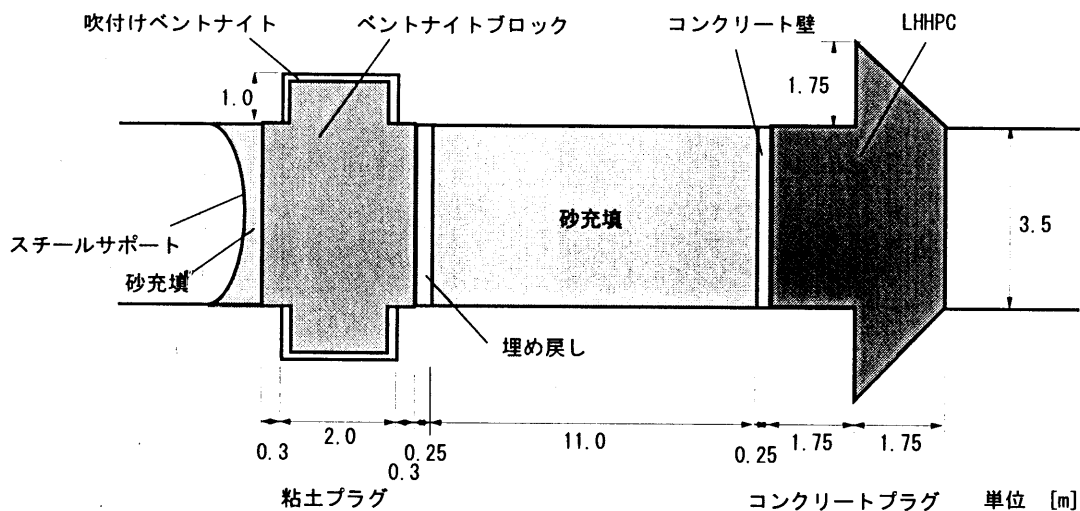


図-3.18 試験坑道の寸法

### 3.5 TSX 試験のための設計

TSX 試験では、これまで上述したようにコンクリート、粘土の両プラグの性能について設計を行った。しかしながら、TSX 試験固有の問題もあり、高レベル廃棄物の処分におけるプラグの設計という意味では本質ではないが、試験を実施するために不可欠の設計を行っている。粘土プラグの設計においても触れているスチールサポートは TSX において重要な役割を担っている。そこで、スチールサポートの設計についてここで示す。

スチールサポートは、粘土プラグの下流側が変形しない場を作るために設置されている。図-3.19 の左図に示すように、高レベル廃棄物の処分概念で示されている粘土プラグの設置環境（核燃料サイクル開発機構、1999）ではプラグの両側は設置と同時期に埋め戻し材により充填されている。しかしながら、図-3.18 からも明らかのように TSX 試験では一つの粘土プラグしか取り扱わない。そこで、図-3.19 に示すように一つのプラグとその直近の埋め戻し部をとりだし（左図の○の範囲）、右図のようにプラグの反対側は力学的に拘束する状態とした。

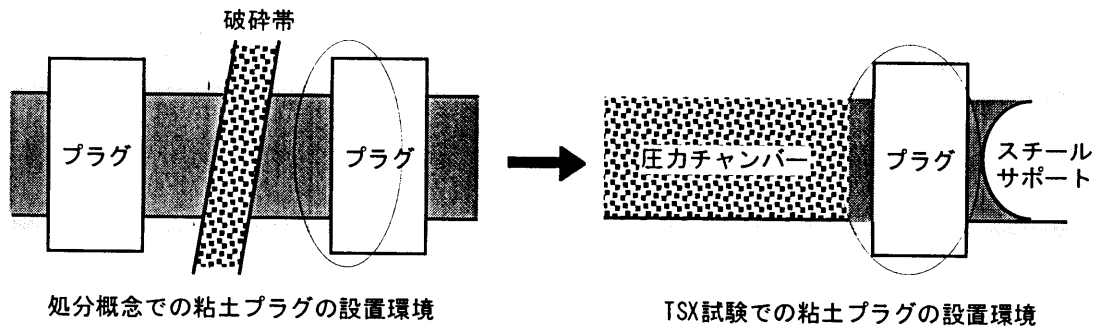


図-3.19 粘土プラグ設置環境の比較

粘土プラグは、コンクリートプラグのようにプラグの片側は緩衝材等で充填されており反対側は開口のままといった高圧力勾配下（作業時の緩衝材の膨潤圧および地下水圧力相当の力がかかった状態）になるような環境に置かれることはないと考えられる。スチールサポートは粘土プラグを力学的に支え、水理挙動を把握するための動水勾配下状態を作りだし、粘土プラグの閉鎖性能に関するデータを取得する役割として設置される。

このため、スチールサポートは試験期間中の圧力によって変形せず、圧力（水圧、膨潤圧等）に耐える設計が必要とされる。TSX 試験では、試験区域周辺の間隙水圧 4MPa に加え、ベントナイトの膨潤による粘土プラグの膨潤圧 1MPa が作用する。これより、スチールサポートは両者を合計した最低 5MPa の圧力に耐える設計とする必要がある。

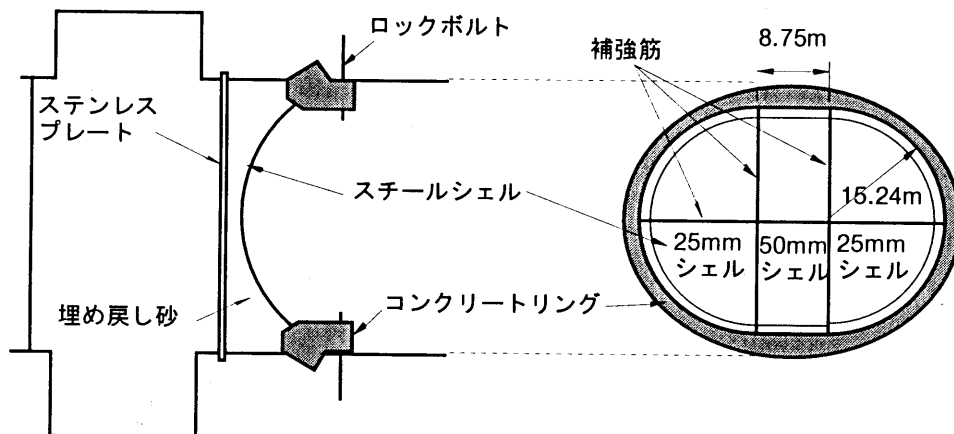


図-3.20 スチールサポートの構造

スチールサポートは、図-3.20 に示すようにベントナイトプラグと直接接するステンレスプレート（10mm 厚）、圧力を岩盤に伝えるスチールシェル（図-3.13 参照）、両鋼壁に囲まれた埋め戻し砂層、スチールシェルにかかった力を岩盤で支えるコンクリートリングおよびロックボルトで構成される。スチールサポートの要となるコ

ンクリートリングは坑道に平行に 5MPa のせん断応力が作用する条件で強度計算を実施した。コンクリートは一軸圧縮強度 60MPa 以上の高強度コンクリートを用い、岩盤に食い込む形状のコンクリートリング内には鉄筋を配した。コンクリートリング円周上に均等に配置した 28 本のロックボルトを 60cm まで打ち込んで岩盤に固定した。

スチールシェルは 3 つの曲面部材で出来ており、25mm 厚シェルは球面の形状であり、50mm 厚のシェル円柱状である。それぞれのシェルはボルトで固定されている。これらを組み合わせて図-3.13 のように球形状のスチールシェルとした。このような形状にすることにより、スチールシェルに作用した応力はコンクリートリングに分散して伝わる。また、この形状の場合、少ない部材で高強度のスチールシェルを設計することが出来る。

スチールシェルとステンレスプレートの間には砂を充填した。ここに充填する砂は図 3.11 に示すように直径 0.75mm の均一なケイ砂を充填した。これは、ステンレスプレートのしなりに対する変形が小さい、5MPa の圧力に対して十分な硬度をもつ、掘削影響領域を越えて来る湧水をスチールサポートの外側の注水スロットに導くための透水層となる、両鋼壁間の隙間への充填性が良い、粉塵がなく作業性が良い、といった利点による。スチールサポートの変形の評価に関しては、3.3.2 で示している(図-3.14 参照)。

#### 4 プラグの施工

3章で設計したコンクリートプラグおよび粘土プラグを試験坑道 Room425 に施工した。プラグの施工は、粘土プラグを支えるスチールサポートの設置から開始し、粘土プラグ、砂充填、コンクリートプラグの順に行った。

##### 4.1 切り欠きの拡幅

コンクリートプラグ側の切り欠きはラインドリリングの組合せで掘削が可能と考えられるが、粘土プラグ側の矩形の切り欠きはラインドリリングと Rock-Splitting の組み合わせとなるため、切り欠きの掘削性を確認しておく必要があった。そこで、図-4.1 に示すように、試験坑道と同じ方向で試験坑道の直上に掘削された Room419 において切り欠きの試掘削を行った。

切り欠きの掘削は図-4.2 に示す手順で行った。掘削は全周の 2/3 程度とした。はじめにノッチ型の切り欠きを掘削する要領で切り欠きを掘削する。次に、残りの鉛直面にラインドリリングにより切れ目を入れる。残された切り欠きの内部は Rock-splitting により慎重に破碎した。ラインドリリングではじめに切れ目を入れて掘削部を岩盤から切り離しておくことで、内部破碎時の衝撃による切り欠き沿いの損傷の発生を抑制することが出来る。ラインドリリングで岩盤から切り欠きを切り離すことの有効性は掘削前後に岩盤表面で実施した MVP 検層によって確認した。MVP 検層では、ボーリング孔沿いの弾性波 (S 波) の速度を計測し、その変化を岩盤内の空隙の変化 (掘削影響による微小破壊の発生) としてとらえることが出来る。

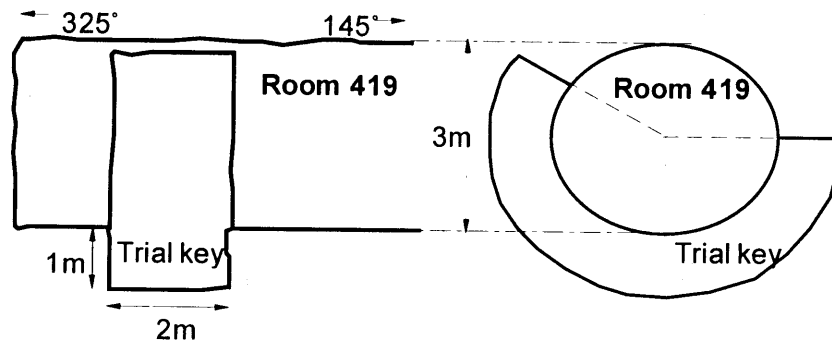


図-4.1 Room419 における切り欠きの試掘削

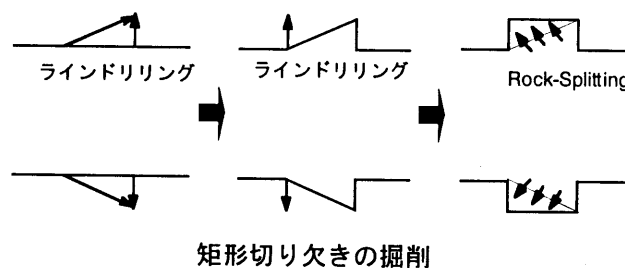


図-4.2 矩形切り欠きの掘削手順

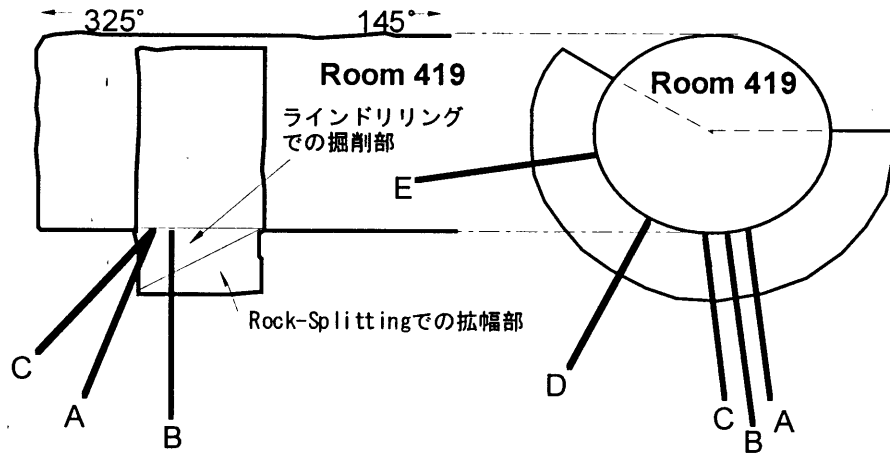


図-4.3 MVP ボーリング孔配置

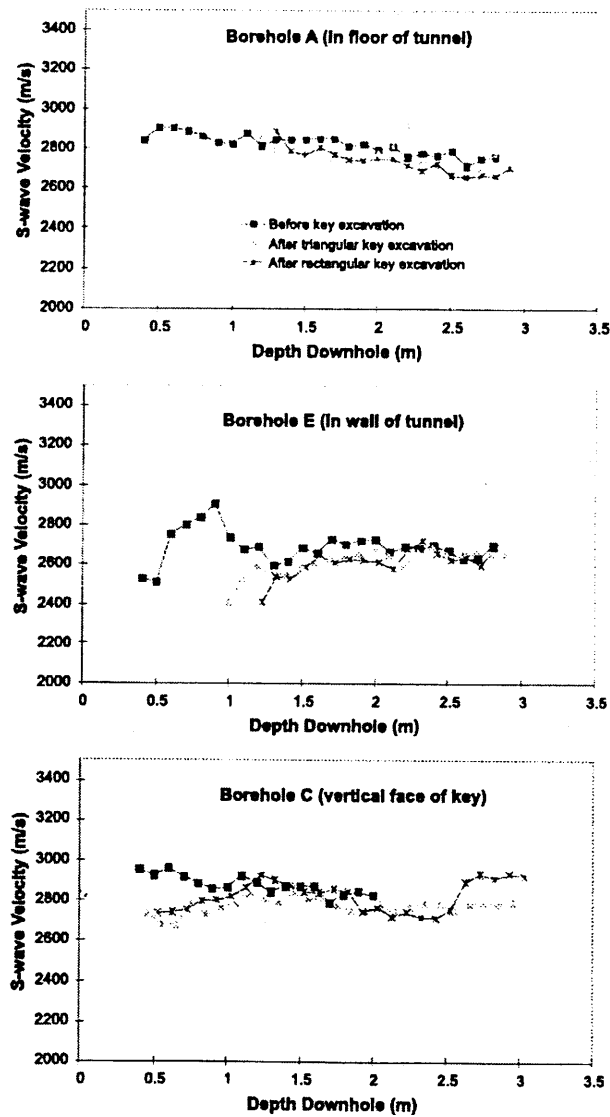


図-4.4 MVP 検層の結果

(上：ボーリング孔 A, 中：ボーリング孔 E, 下：ボーリング孔 C)

MVP 検層ボーリング孔配置を図-4.3 に、検層の結果を図-4.4 に示す。図には、ボーリング孔 A, C, E の結果を示す。ボーリング孔 A は切り欠きの鉛直部、ボーリング孔 C は切り欠きの始点部近傍、ボーリング孔 E は坑道側壁での測定結果である。ボーリング孔 A での結果から、坑道床盤では切り欠きの掘削前後で変化がなく影響のないことが分かる。ボーリング孔 E の結果では岩盤表面から内部にかけて速度の低下部分が見られる。ここは、引張応力の作用する部分であり、その影響によるものと考えられる。しかしながら、掘削前は速度の低下範囲が岩盤表面から奥部にかけて 60cm 程度であったのに対して掘削後は 20cm 程度となっており、引張応力による微小破壊の領域も減少していることが分かる。ボーリング孔 C では掘削後に速度の低下部分が現れているが、この部分は圧縮応力が作用している部分であり、もともと速度が速い部分である。速度低下は、切り欠きの掘削により圧縮応力が緩和されたことによるものであり、微小亀裂の破壊には至っていない。以上のことから、ラインドリリングと Rock-Splitting による掘削が、岩盤に損傷を与えずに切り欠きを掘削する方法として有効であることが確認できた。

Room419 での試掘削で確認された方法により、Room425 試験坑道の切り欠き拡張を行った（図-4.5 参照）。切り欠きの輪郭に用いるラインドリリングでは表面が凸凹になり、Rock-Splitting での破砕面も凸凹が残る。このような凸凹の解消は粘土材料の吹付けで円滑面を作成した。



図 4.5 掘削された試験坑道の切り欠き（粘土プラグ側）

#### 4.2 コンクリートプラグの施工

設計されたコンクリートプラグは容積が約 72 m<sup>3</sup> である。AECL が開発した LHHPC はこのコンクリートプラグのような巨大な躯体を製作した例がない。そこで、図-4.6 に示すように URL において 20 m<sup>3</sup> のブロック打設を行った（Gray and Shenton, 1998）。



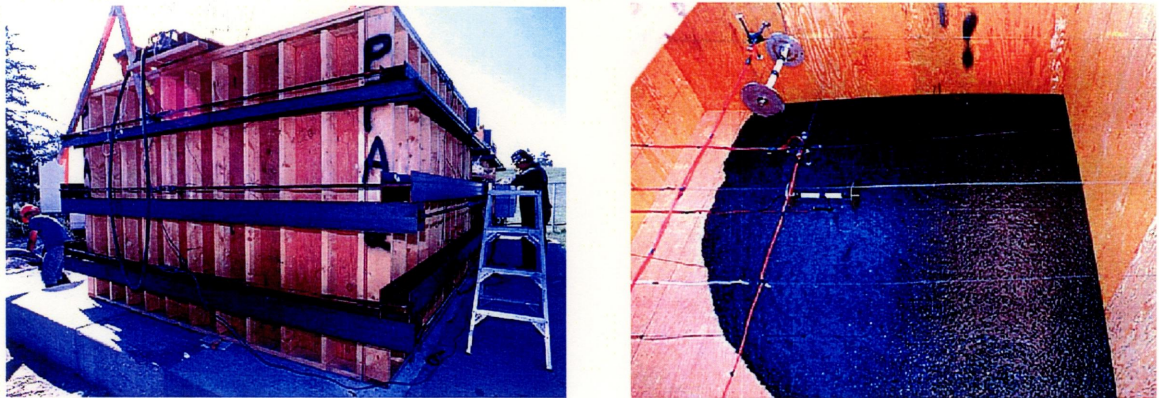


図-4.6 20 m<sup>3</sup>のブロック打設  
(左：型枠外観，右：型枠内部)

型枠の中には実プラグと同様に任意の位置に計測センサーを埋設できるようにワイヤーを張り巡らし，そこへ調整混合した材料を投入した（図-4.6 参照）。ブロック打設では施工性（流動性），打設後の温度上昇，センサーの性能維持性等を把握し，連続して打設することが可能であることを確認した。

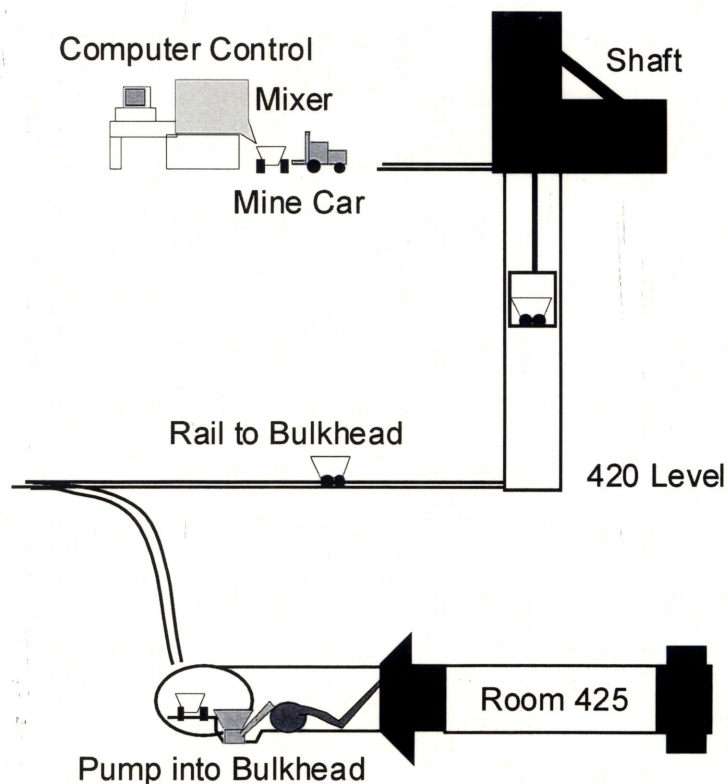


図-4.7 コンクリートの搬送ルート

図-4.7 は試験坑道へのコンクリートプラグの打設手順を示したものである。コンクリートは地上において 2 m<sup>3</sup> ミキサーで調合した材料を練り混ぜ，所定の練り混ぜ後，トロッコに積み込んだ。トロッコごと立坑のエレベータにより試験深度まで運

んだ。試験深度では軌道で所定の位置まで進み、図-4.8 に示すように材料をホッパに投入し、打設用のポンプで枠内に打設した。

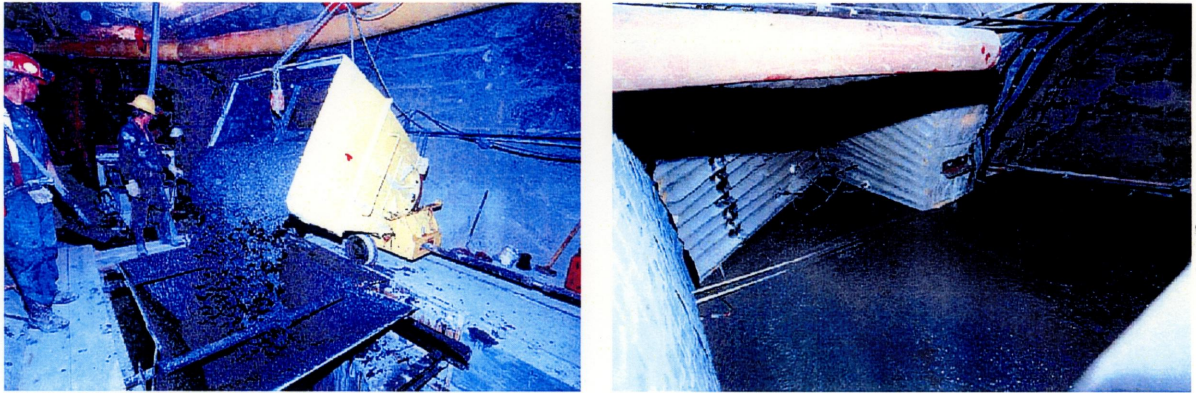


図-4.8 コンクリートの打設  
(左：ホッパへの投入，右：プラグ内部状況)

材料特性試験の結果から、LHHPC は打設後に収縮することが予想されるため、図-4.9 に示すようにプラグ拡幅部の頂上部およびプラグ胴体部の上部にグラウトを注入するパイプを設置した。また、プラグの周囲には水を含んで膨張しすき間をシールするベントナイトストリップを設置した。この処置により、プラグ打設後の収縮に対して頂上部のすき間は収縮後にグラウトを注入して充填し、微細なすき間はベントナイトストリップの膨潤により充填する。

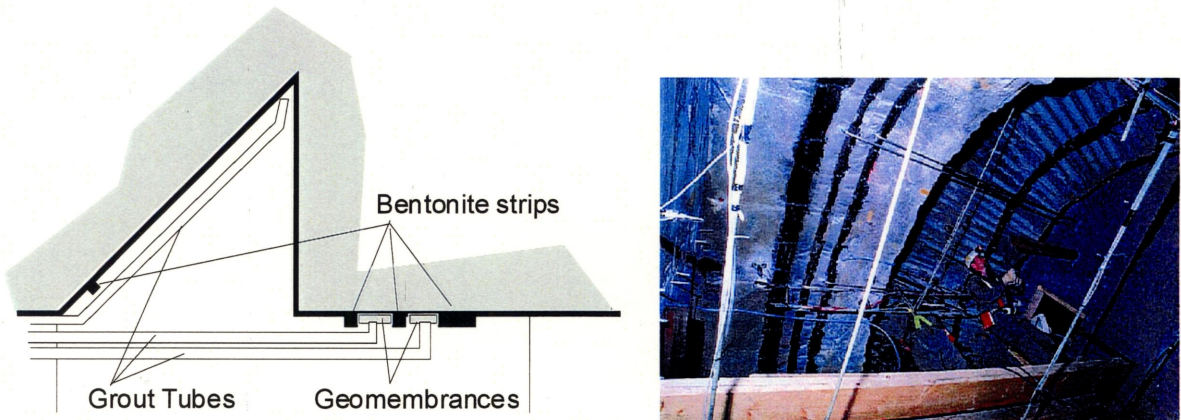


図-4.9 コンクリートプラグ-岩盤間の処置状況  
(写真の黒い筋がベントナイトストリップ。ベントナイトストリップ間に設置されたパイプがグラウト注入用パイプ)

プラグ内にはその挙動を把握するため、さまざまな計測機器を設置する。計測機器はプラグ内の計測機器取付け位置にワイヤーを張り、所定の位置、方向になるようにワイヤーに計測機器を固定する。打設の設置状況に対する影響については  $20 \text{ m}^3$  のブロック打設 (図-4.6 参照) で確認した。全ての計測機器を固定した後、コンク

リートの打設を行った。

コンクリートの打設がプラグ全体におよんでいることを確認するため、プラグの最上部となる切り欠き部の頂上部に内部撮影用のカメラをセットした。カメラによって内部の打設状況を確認し、最終的にはカメラがコンクリートに埋もれることを確認してプラグ全体がコンクリートで充填されたことを確認した。打設時間は  $76 \text{ m}^3$  で 8 時間 28 分であった。

#### 4.3 粘土プラグの施工

粘土プラグは、ブロックを積み上げることで施工した。ブロック製作は WIPP で開発された Adobe Block Compactor で実施した。この機械は操作が簡単で、1 時間あたり 100 個のブロックを製作することが出来る (図-4.10 参照)。

WIPP のブロック製作機器のブロック製作性の予備試験の結果、含水比が 14.5% 以上、あるいは 12% 以下であると製作性に難があることが分かった。また、一つの大きさに関しては、長さおよび幅が  $0.105\text{m}$  および  $0.36\text{m}$  の場合、厚さが  $0.175 \text{ m}$  以上であるとブロック内に密度分布が生じることが分かった。これより、ブロックの目標厚さは  $0.150\sim 0.175\text{m}$  とし、目標含水比は 14% とした。



図-4.10 粘土ブロックの圧縮成型

まず、 $2 \text{ m}^3$  のロータリードラムミキサーを用いて 1 バッチ  $2.1 \text{ ton}$  (自然含水比 6% のクニゲル V1  $25 \text{ kg}$  入り 54 袋、ケイ砂  $566 \text{ kg}$ 、クニゲル V1 の自然含水比も考慮した総量  $260$  リットルの水) の材料調整を行った。1 バッチの調整時間は 20 分である。1 バッチごとに初めおよび最後にそれぞれ 3 ブロックずつ密度、含水比測定用のサンプルを採取し、密度、含水比、厚さの確認を行った。全部で 90 バッチの材料調整を行い、 $14,000$  個のブロックを製作した。全てのブロックの平均は、乾燥密度が  $1933 \text{ kg/m}^3$ 、含水比が 14.42%、厚さが  $0.174\text{m}$  であった。製作したブロックは、図-4.11 に示すようにバッチごとにパネルに載せ、シートで養生した。

プラグの施工において、ベントナイトブロックは下から水平に積んでいくことを

基本とした。ブロックの大きさが  $0.1\text{m} \times 0.36\text{m} \times 0.17\text{m}$  であるため、最も安定する  $0.36\text{m} \times 0.17\text{m}$  の面を下にする置き方（横積み）で下から積み上げた。さらに、プラグの設計で検討したプラグ上流部から下流部への直接の流路をプラグ内部に発生させないという要件を満たすため、図-4.12 に示すようにブロックの横積みと縦積みを組み合わせて設置した。この組合せでは、B から I まででプラグ長は  $1.9\text{m}$  弱である。粘土の切り欠き幅は  $2.0\text{m}$  であるため、B 列および I 列の岩盤部との接触部には  $0.05\text{m}$  厚の吹付けを行うこととなる。また、切り欠きを含むプラグの高さが  $5.5\text{m}$  であるため横積みの層で 55 層となる。



図-4.11 粘土ブロックの養生

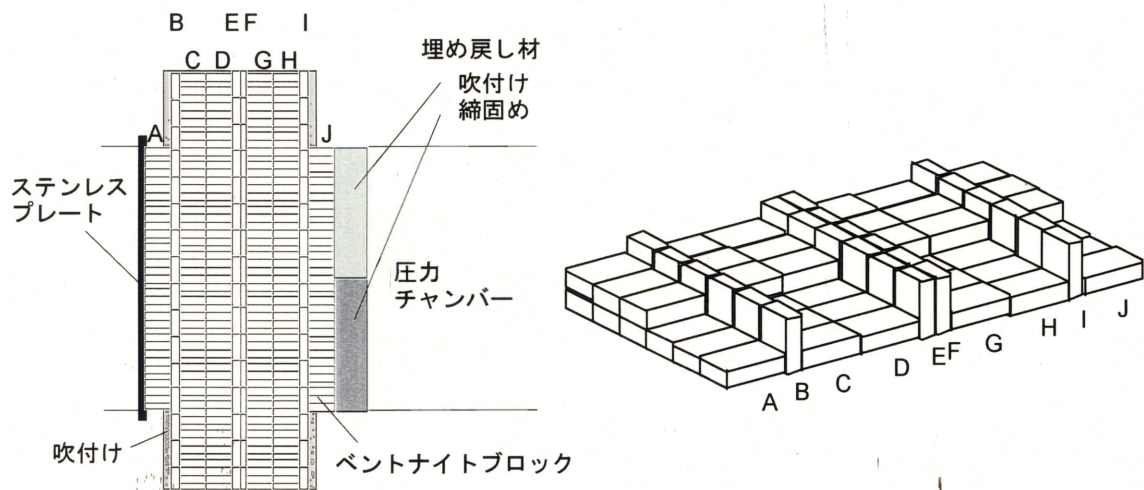


図-4.12 粘土プラグの組立て

TSX 試験のような実規模の粘土プラグの施工は世界初であり、試験坑道での施工前に、図-4.13, 4.14 に示すように Room419 の Trial key で施工性を確認した。Room419 は、試験坑道 Room425 と同じ方向に掘削された坑道で、試験坑道よりも一回り小さい試験坑道となっている。

粘土ブロックでプラグを施工するためには、岩盤表面の凸凹を解消しておく必要がある。はじめに、粘土材料の吹付けでブロック設置のための滑らかな面を作成した。試験坑道の粘土プラグは容積が  $67\text{m}^3$  であり、総計約 9,500 個ものブロックを積み上げるため、わずかな水平のずれはブロックを積み上げる過程で狂いとなり、ブロック間のすき間や層毎の高さの違いが生じてくる。そのため、Room419 での予備試験で図-4.12 に示す組合せで、水準を取りながらブロックを多層に施工できることを確認した。図-4.14 は予備試験での施工状況であるが、ブロックが水平かつ隙間なく施工できることが分かる。

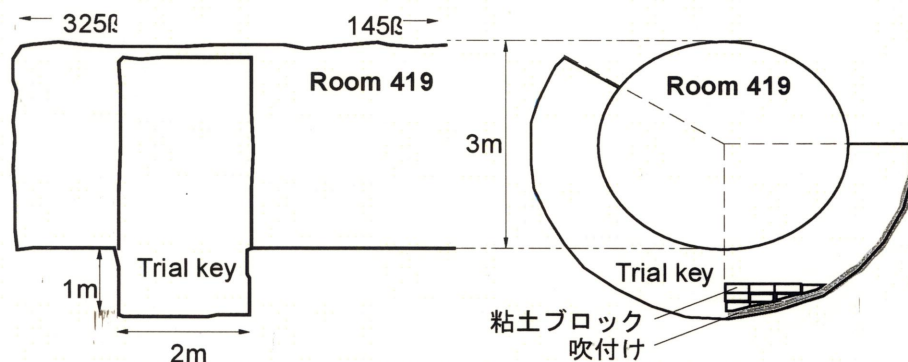


図-4.13 粘土ブロックの設置予備試験

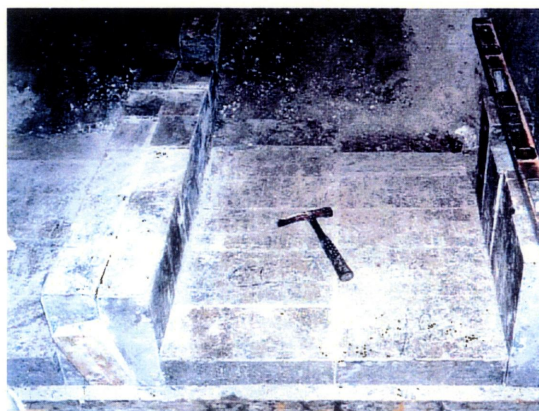


図-4.14 Room419 でのブロック施工予備試験状況

次に、粘土プラグの施工状況について示す。粘土ブロックの施工は以下の手順を繰り返して、下層部から施工した。

- 切り欠き掘削 (Rock-Splitting) で生じた浅い孔の処置 (ベントナイト充填)
- 切り欠き岩盤面への粒状ベントナイトの吹き付け
- ベントナイトブロックの積み上げ

施工は基本的にこのサイクルで図-4.15, 16, 18, 19 に示す 8 つの PHASE に分

類した。ただし、PHASE 5 ではサイクルの期間が短かったため2つのサイクルで1つの PHASE としており、PHASE 7, 8 はブロック設置の最終段階であるためこのサイクルには当てはまらない。PHASE 1 から PHASE 4 までは、下から水平にブロックを積んだ。この時各層毎に水平度をチェックした。また、岩盤との境界付近ではブロックが空間を隙間なく埋めるよう、岩盤面に合わせてブロックを整形（形状に合わせてカット）した。図-4.17 に PHASE 4 の施工状況を示す。

残り高さ 2m 程度（34 層目）になってから側方からブロックの設置を開始した（PHASE 5）。作業員1人が入れるぐらいの幅（幅 70cm）になるまで側方の積み上げを行い（PHASE 6）、その後奥から手前に向かって設置を行った（PHASE 7）。

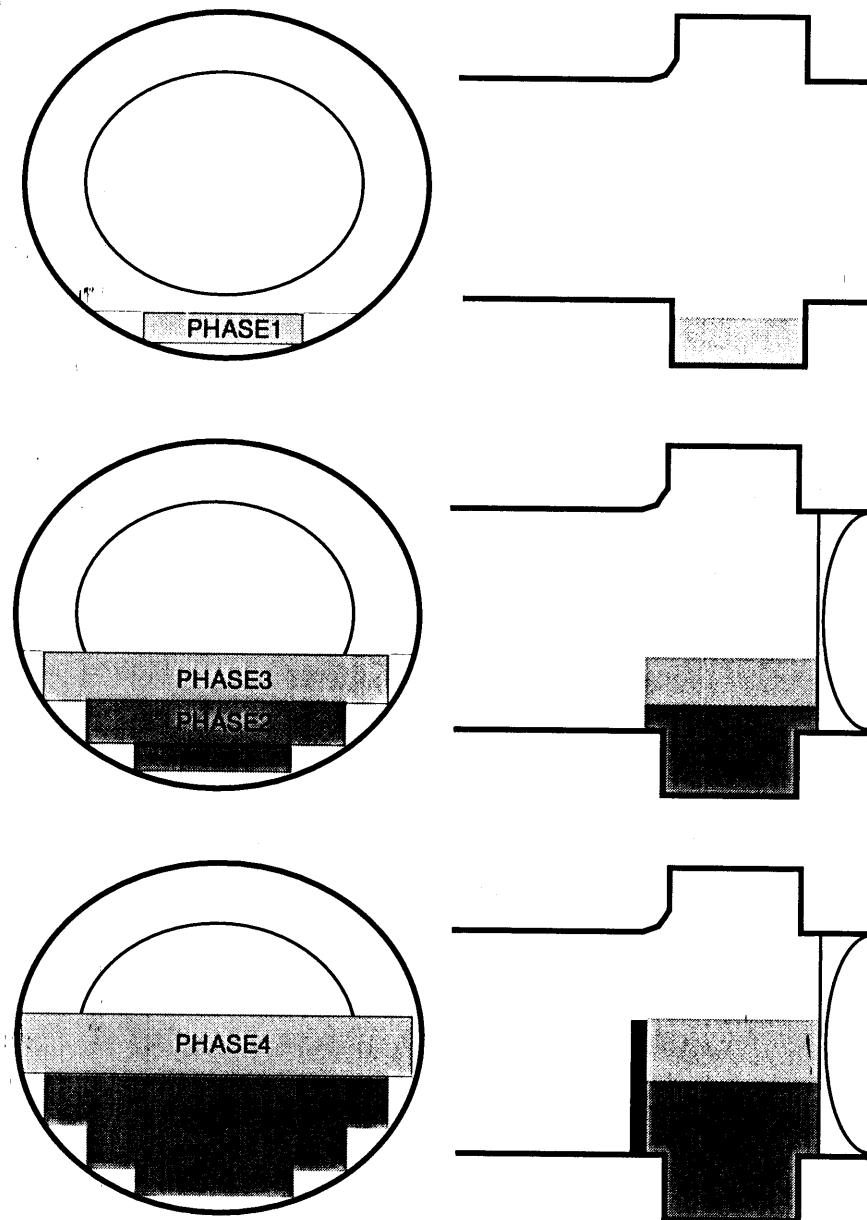


図-4.15 粘土プラグの施工手順（1）

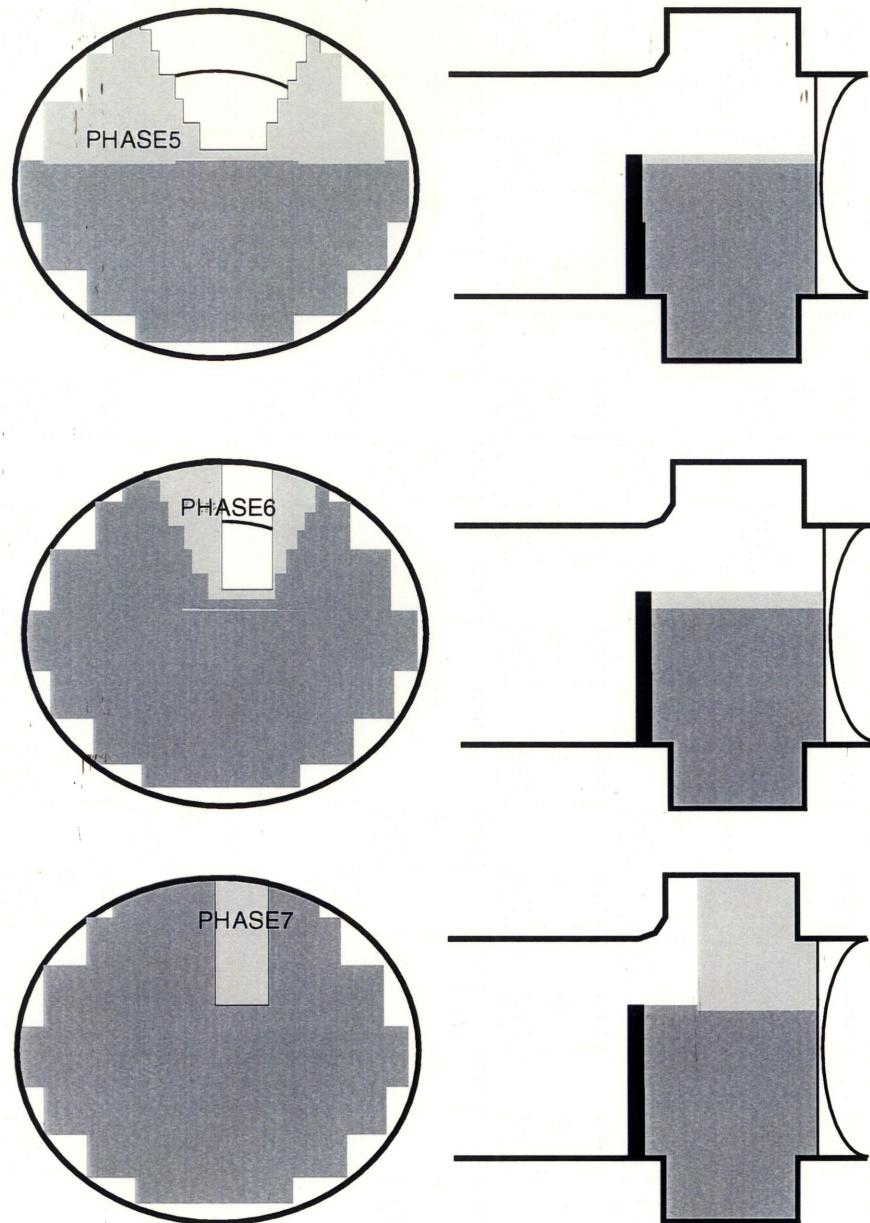


図-4.16 粘土プラグの施工手順 (2)

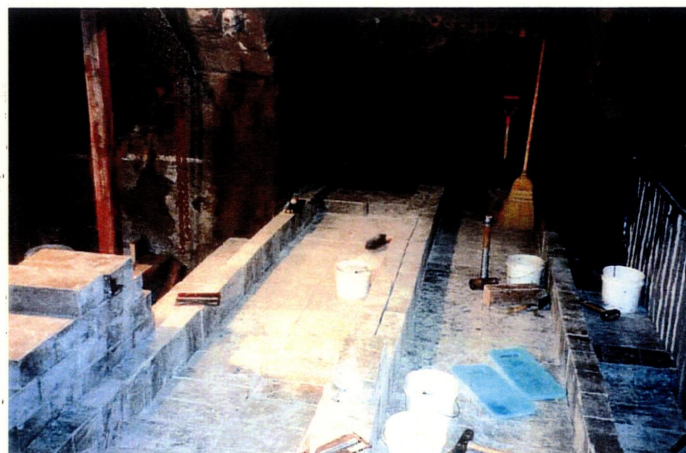


図-4.17 粘土ブロックの施工状況

最終ブロックセットは図-4.18, 19, 20 に示すようにリフトを使い設置を行った (PHASE 8)。残りの幅 70cm, 奥行き 50cm, 高さ 2.0m (この内約 0.8m は切り欠きの裏側で隠れている) の空間をベントナイトブロックで占める必要があり, ベントナイトブロック設置において最も困難で, 繊細な作業が要求される所であった。方法としては, 初めに事前に幅 70cm, 奥行き 50cm, 高さ 1.2m の 64 個のブロックセットを設置予定の空間下部に積み上げ (STEP1), これをリフトを使って上方に押し上げた (STEP2)。ブロックセットより上の空間の長さ (切り欠きの裏側) は約 0.8m と計測されているので, この長さ分押し上げればこの空間はブロックで占められたことになる。

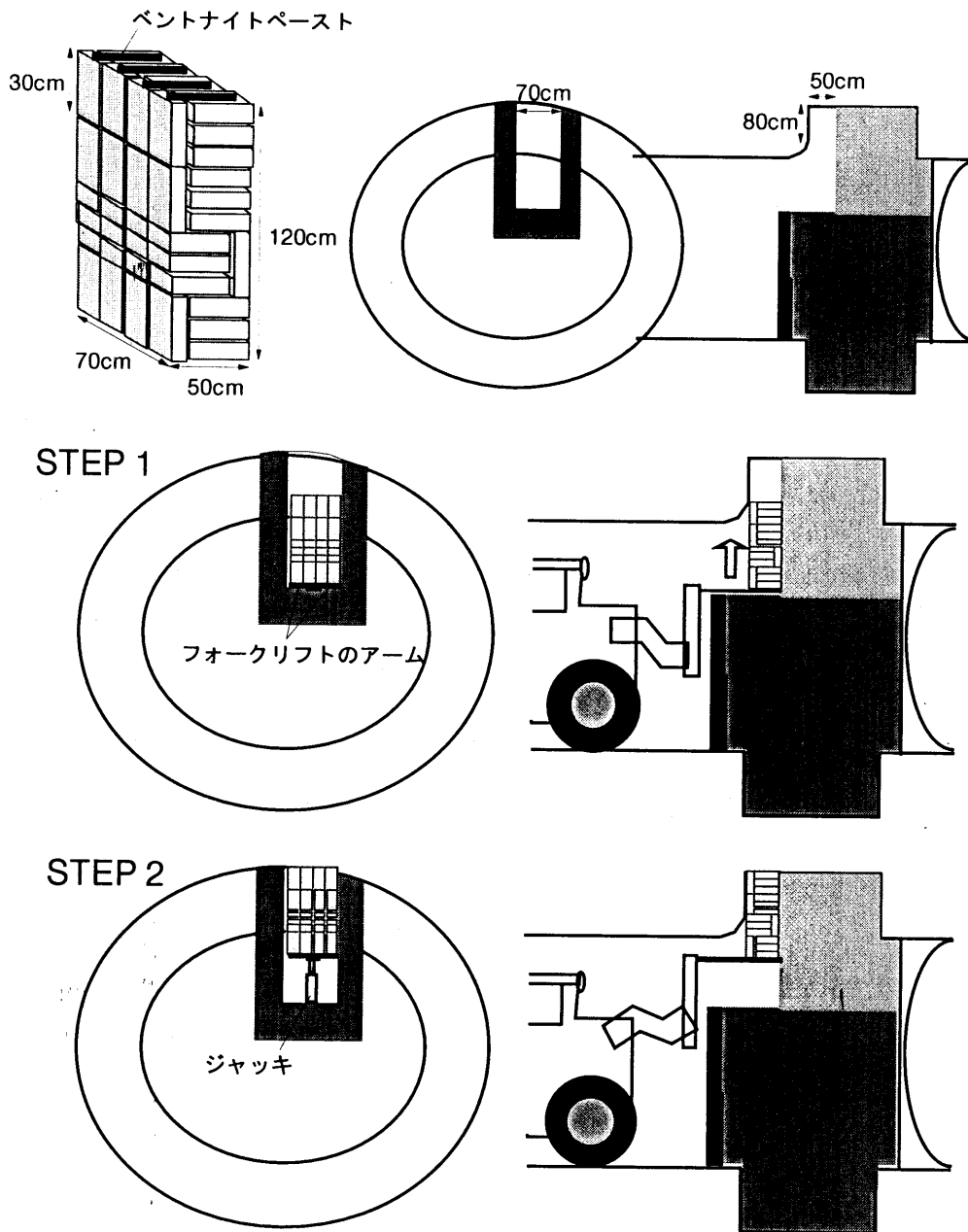


図-4.18 最終ブロックセット設置方法 (PHASE 8) (1)



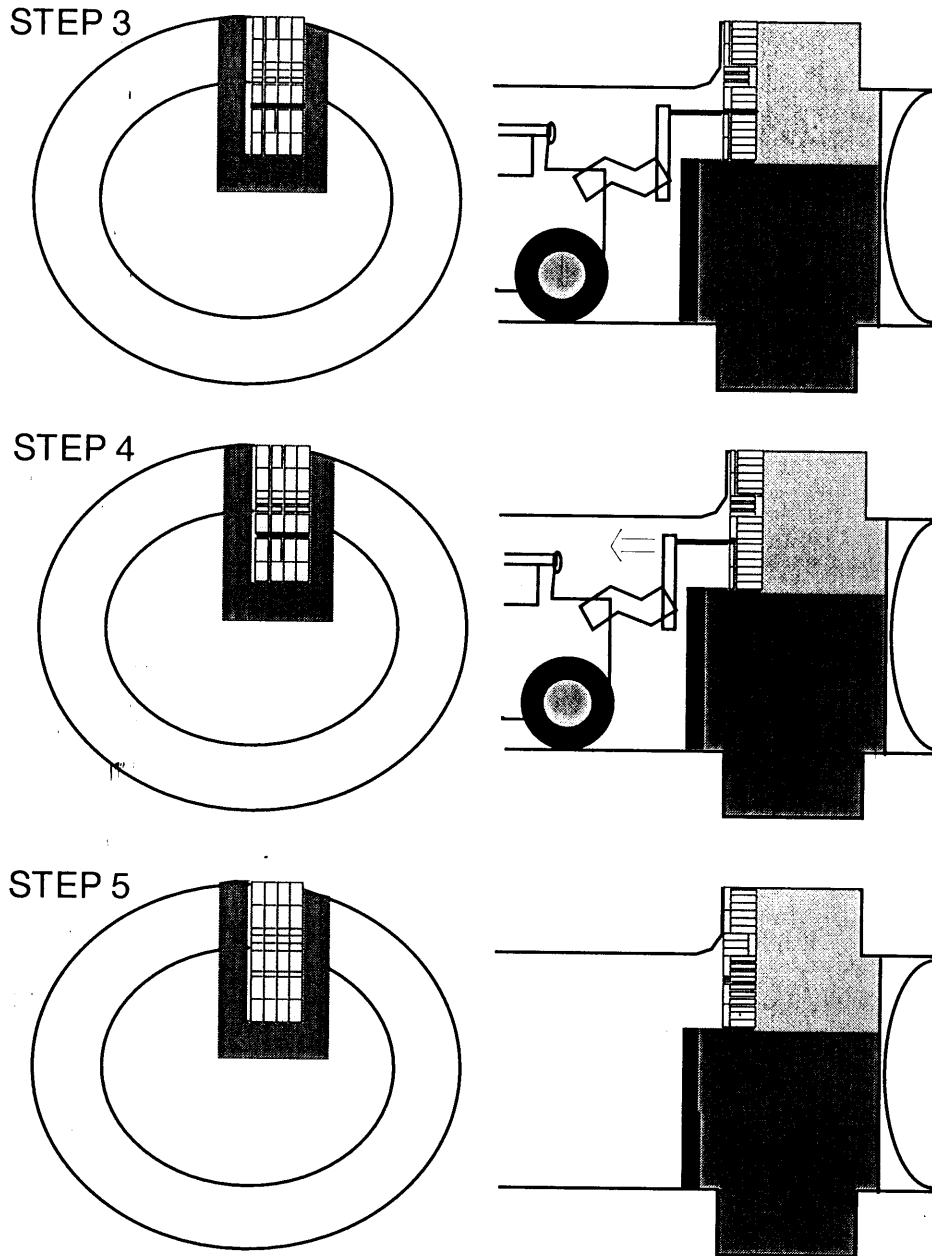


図-4.19 最終ブロックセット設置方法 (PHASE 8) (2)

また、ブロックセットの上面にベントナイトペーストを着けておいたため、押しつけることにより岩盤とブロック間の空隙をなくすことができる。その後、リフトで上のブロックセットを支えたままで、下の部分のブロック設置（約 48 個）を人力で行った（STEP3）。その時、フォークリフトの2本の"腕"の分だけは積めないで、"腕"以外の部分をブロックで積んでそれを支えにしてリフトの"腕"を外し（STEP4）、最後に"腕"の部分の空間にブロックを詰め込めんで設置を完了した（STEP5）。

実際には、ブロックセットを上方に押し上げる時、ブロックとブロックの境界がそれほどなめらかではなかったり少し斜めに持ち上げられたりしたため、途中で引

つかかってしまった。最後の 10cm をリフトだけの力では上げることができなかつたため、水圧ジャッキを併用して押し上げる必要があった (STEP2)。また、リフトの"腕"を抜くときも慎重に行われたのだが、最終的にはブロックセットを前述のように上方に水圧ジャッキを使って押しつけたため、ブロック間の摩擦によりブロックセットは落ちてこず、"腕"を抜くのには全く力がかからなかった (STEP4)。

以上のように施工した粘土プラグの断面を図-4.21 に示す。



図-4.20 粘土プラグの施工状況 (PHASE8 の STEP3)

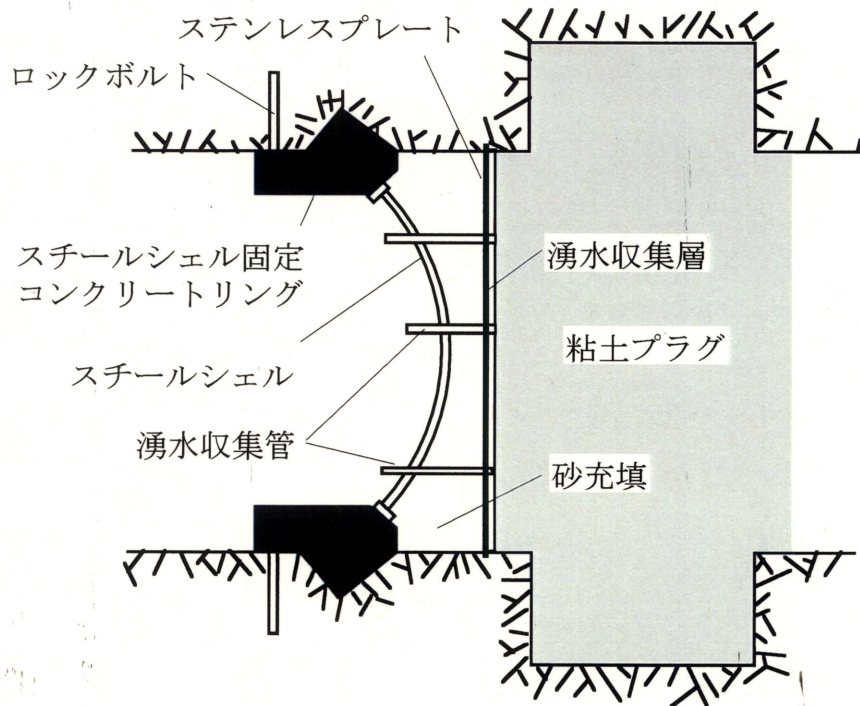


図-4.21 粘土プラグの断面

粘土プラグの施工実績としては、1日の実作業時間は、基本的に PHASE 1 を除き 8時間 2シフトであった。計測機器の設置、ケーブルの処置も含めて、合計で 93日かかっていることが分かる。1週間5日計算とすると 19週、約4ヶ月かかったことになる。表-4.1 に計器の埋設やケーブル処理も含んだ各 PHASE 毎のブロックの

設置速度を示す。PHASE 5 まで設置速度は上がっていることが分かる。この理由として、トンネルの中央付近の層では作業領域が大きくなり一度に3人程度が同時に作業できることと、作業員自身の作業能率のアップが考えられる。しかし最終段階では作業スペースが狭くなり、計器の埋設やケーブル処理に複雑な作業が要求されたため、設置速度が低下した。

表-4.1 ベントナイトブロックの設置速度

PHASE	ブロック数	日数	1日あたりの設置数
1	609	12	50.8
2	944	11	85.8
3	1744	18	96.9
4	2424	16	151.5
5	2718	16	169.9
6	1000	14	71.4
7	192	4	48.0
8	64	1	64.0

## 5. まとめ

カナダの AECL との共同研究として TSX 試験を実施している。TSX 試験は原位置において実規模のコンクリートプラグおよび粘土プラグを設置し、そのプラグのシーリング性能を把握することを目的としている。本報告は、ここで用いられたコンクリートプラグおよび粘土プラグの設計・施工技術について取りまとめた。

はじめに、本試験でのプラグの要件を明らかにし、その要件を満たすプラグの設計を行った。ここでの要件はプラグそのものが遮水性を有し、周辺岩盤においても有意な浸潤経路にはならないというものであった。

次に試験環境条件であるが、URL は、北米大陸北部の中心部に位置することもあり、水平応力が極端に大きい偏重応力分布を呈し、一般的な日本の岩盤条件とは異なる特異な地質環境条件であった。ここでは、どのように試験坑道を展開することが最も試験目的に合致するかを検討し、坑道の方向、大きさ、形状等を設定した。

プラグ形状の設計では、各プラグの設計の前に坑道沿いの浸潤経路の遮断という目的で設置する切り欠きを検討した。応力集中、応力緩和、掘削影響領域の遮断等の観点から検討し、選定した形状により坑道形状を考慮した 3 次元の応力解析を実施した。解析結果から、構造沿いの浸潤経路（掘削影響領域）を遮断するための切り欠きが新たな浸潤経路とならず、効果的に機能することを微小破壊の分布の把握により確認した。

コンクリートプラグの設計・施工では、LHHPC の特性を把握するとともに、大型打設試験によってその材料の施工性を確認し、試験プラグを製作した。

粘土プラグの設計・施工では、クニゲル V1 を材料として材料特性の把握を行うとともに、数値解析でプラグの挙動を予測した。プラグはブロックの組合せで施工し、約 9,500 個のブロックを用い均一なプラグを製作した。

## 謝辞

TSX 試験は、AECL のスタッフの全面的なバックアップに支えられて実施されている。AECL の Mitch Ohta 前 URL 所長、Neil Chandler 現 URL 所長、Malcom Gray 氏、David Dixon 氏、Jason Martino 氏、その他、URL のスタッフ一同には、ここに記して感謝の意を表す。また、共同研究の参加者である ANDRA の Bertrand Vignal 氏、SNL の Frank Hansen 氏に感謝の意を表す。

参考文献

Chandler, N., Read, R. and Martin, C.: "In situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design, in Aubertin", M., Hassani, F. and Mitri, H. (eds.), Rock Mechanics Tools and Techniques, pp.929-936, Balkema (1996)

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

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

Curran, H. and Corkum, T.: "Examine3D a 3D boundary element program for calculating stresses around underground excavations in rock, Version 2.0 Toronto, Canada" Data Visualization Laboratory, University of Toronto (1993)

Didry, O., Gray, M., Cournut, A. and Graham, J.: "Modelling the early age behaviour of a low heat concrete bulkhead sealing an underground tunnel". Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 27, No. 1, pp. 112-124 (2000)

土木学会：”トンネル標準示方書「山岳工法偏」・同解説”(1996)

土木学会：”圧縮空気貯蔵発電システムと土木技術”(1997)

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

Gray, M. and Shenton, B.: "For better concrete, take out some of the cement", 6<sup>th</sup> ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand (1998)

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

Martin, C. and Chandler, N.: The progressive fracture of Lac du Bonnet granite,

Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr 31, pp. 643-659 (1994)

Read, R.: "Characterization Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory", Proc. EDZ Workshop, Int. Conf. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Canadian Nuclear Society, pp. 35-46 (1996)

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

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

2002