

# 地層処分における閉鎖技術の開発

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

1998年2月

鹿島建設株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13  
動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

## 地層処分における閉鎖技術の開発

稻葉 武史\* 戸井田 克\* 塩釜 幸弘\* 山本 拓治\*  
安井 信吾\* 深沢 栄造\* 田中 益弘\* 山本 博之\*  
古市 光昭\*\*

### 要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために建設した地下構造物を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材により閉鎖し、廃棄体の隔離性能を長期にわたり確保する必要がある。

そこで、わが国の地質環境条件に適応し得るこれら閉鎖システムの確立に資するため、室内試験および原位置試験を通じてこれらの性能を定量的に評価していくことが必要である。本年度は、ペントナイトの動的拘束性値の取得及びカナダにおいて開始したトンネルシーリング性能原位置試験の設計や計測に係わる調査、検討を行った。以下にその概要を示す。

- I) 不飽和ペントナイト単体及び飽和砂ペントナイトの動的三軸試験を行い、ペントナイト単体及び混合土の動的変形特性を取得した。
- II) A E C L 地下研究施設において実施しているトンネルシーリング性能試験に係わる、① 計測項目、計測機器の配置、② ペントナイトブロックの施工、③ グラウト予備試験、④ トレーサー試験計画、⑤ ワークショップに係わる資料作成、の項目についての調査、検討を行った。

---

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：

事業団担当部課室および担当者 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室 室長 石川 博之

\* 鹿島建設（株）技術研究所

\*\* 鹿島建設（株）建設総事業本部 原子力室

## Investigation on Sealing in Geological Disposal

T.Inaba\* , M.toida\* , Y.Shiogama\* , T.Yamamoto\* ,  
S.Yasui\* , E.Fukazawa\* , M.Tanaka\* , H.Yamamoto\* ,  
M.Furuichi\*\*

### Abstract

For the geological disposal of high level radioactive wastes, after placement of the wastes, it is necessary to close off ( to be called "sealing" hereafter ) the underground potential passages ( disposal pits, disposal tunnels, liaison tunnel and construction tunnels ) with an effective combination of engineered barriers such as buffers, backfilling materials, plugs and grout. It is necessary to ensure the long-term liability to isolate disposed wastes in the system.

The results of the research works this year are as follows ;

- 1) To determine the deformation properties of unsaturated bentonite and saturate-bentonite mixture, three cyclic triaxial tests were carried out.
- 2) The objectives are to discuss the design of tunnel sealing experiments at URL site. The results of research are as follows;
  - ① instrument types and layout
  - ② clay bulkhead construction
  - ③ tracer experiment
  - ④ clay grouting trial

---

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works,  
Hiroyuki Ishikawa

\* : Kajima Technical Research Institute.

\*\* : Kajima Corporation, Nuclear Power Dept.

## 目 次

1. 研究の目的および範囲 .....	1 - 1
1.1 目 的 .....	1 - 1
1.2 研究の範囲 .....	1 - 1
1.3 研究の内容 .....	1 - 1
2. 動的三軸試験 .....	2 - 1
2.1 試験目的 .....	2 - 1
2.2 使用材料と試験条件 .....	2 - 1
2.3 試験方法 .....	2 - 2
2.3.1 試料調整 .....	2 - 2
2.3.2 圧縮固化 .....	2 - 2
2.3.3 飽和過程（砂ベントナイト） .....	2 - 3
2.3.4 供試体の設置 .....	2 - 4
2.3.5 載荷過程とデータ処理方法 .....	2 - 6
2.4 試験結果 .....	2 - 7
2.4.1 供試体諸数値 .....	2 - 7
2.4.2 動的特性 .....	2 - 9
2.5 試験結果の検討 .....	2 - 18
2.5.1 オーバーパック自重載荷時の動的変形特性の推定 .....	2 - 18
2.5.2 減衰定数の見直し .....	2 - 25
2.5.3 $h_0$ 見直しによるR-0モデルのフィティングについて .....	2 - 33
参考文献 .....	2 - 36
3. 原位置試験検討 .....	3 - 1
3.1 試験の概要 .....	3 - 1
3.2 計測項目、計測機器の配置 .....	3 - 13
3.3 ベントナイトブロックの施工 .....	3 - 18
3.4 グラウト予備試験の評価 .....	3 - 40
3.5 トレーサー試験計画 .....	3 - 52
3.6 ワークショップ支援 .....	3 - 55
参考文献 .....	3 - 65

## Appendix

- |  |           |
|--|-----------|
| I. 計測機器のレイアウト  | 付-I-0~35  |
| II. A E C L サイドのスティール・サポート検討結果                               | 付-II-0~7  |
| III. スティール・サポートの力学的安定性に関する検討結果                               | 付-III-0~9 |
| IV. 1997/6/25~26のプレゼンテーション資料                                 | 付-IV-0~36 |
| V. 1997/12/2~3のプレゼンテーション資料                                   | 付-V-0~3   |
| VI. 地盤材料の変形特性を求めるための<br>繰返し三軸試験方法 (JGS T 542-1995) 付-VI-0~11 |           |

## 図一覧

### 2 章

- 図-2.1 一軸圧縮試験機による圧縮固化  
図-2.2 砂ベントナイト飽和セル  
図-2.3 飽和状況  
図-2.4 振動三軸変形試験装置  
図-2.5 三軸セルへの設置  
図-2.6 データ処理模式図  
図-2.7  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.8  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.9  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.10  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.11  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.12  $\nu$ と $\gamma$ の関係 (飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.13  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.14  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.15  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.16  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.17  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)  
図-2.18  $G/G_0$ ,  $h$ と $\gamma$ との関係  
(飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.19 せん断ひずみとせん断剛性比の対比  
図-2.20 せん断ひずみと減衰定数の対比  
図-2.21 拘束圧とせん断剛性の関係  
図-2.22 拘束圧と減衰定数の関係  
図-2.23 拘束圧0.08MPaの $G/G_0$ ,  $h$ ～ $\gamma$ の関係 ( $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )  
図-2.24 拘束圧0.08MPaの $G/G_0$ ,  $h$ ～ $\gamma$ の関係 ( $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ )  
図-2.25 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , GS)  
図-2.26 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
図-2.27 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , GS)

- 図-2.28 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , LDT)  
 図-2.29 粘性土についての  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の関係の比較  
 図-2.30 粘性土の試験結果例 (I)  
 図-2.31 粘性土の試験結果例 (II)  
 図-2.32  $h_0 = 20\%$  の  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の関係  
     (不飽和ペントナイト,  $\rho d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT,  $\sigma_c = 0.1 \text{ MPa}$ )

### 3 章

- 図-3.1 試験の概要  
 図-3.2 試験レイアウト (当初計画)  
 図-3.3 試験位置の鳥かん図 (当初計画)  
 図-3.4 420m レベル試験坑道周辺のレイアウト  
 図-3.5 試験坑道のレイアウト  
 図-3.6 アクセストンネルの形状  
 図-3.7 試験坑道付近の発破掘削実績  
 図-3.8 試験坑道付近の地質概要  
 図-3.9 トンネルシーリング試験のスケジュール  
 図-3.10 トンネルシーリング試験の詳細スケジュール  
 図-3.11 プラグ断面ごとの埋設計器配置  
 図-3.12 プラグ埋設計器の最終レイアウト  
 図-3.13 プラグ断面ごとの埋設計器配置 (最終レイアウト)  
 図-3.14 プラグの施工方法  
 図-3.15 埋戻し施工手順  
 図-3.16 埋戻し材の材料・配合・施工方法  
 図-3.17 埋戻し部の計測方法  
 図-3.18 埋戻し材の粒度分布  
 図-3.19(1) ベントナイトプラグの施工手順(1)  
 図-3.19(2) ベントナイトプラグの施工手順(2)  
 図-3.19(3) ベントナイトプラグの施工手順(3)  
 図-3.19(4) ベントナイトプラグの施工手順(4)  
 図-3.20 ベントナイトブロックの配置 (最終レイアウト)  
 図-3.21 ベントナイトブロック中の止水方法  
 図-3.22 ベントナイトブロック/スティールサポート境界部のケーブル配線  
 図-3.23 ベントナイトブロック背面からの集水方法  
 図-3.24 ベントナイトブロック/スティールサポート構造概要  
 図-3.25 注入概要  
 図-3.26 注入手順

- 図-3.27 注入結果(1)  
図-3.28 注入結果(2)  
図-3.29 注入時の変位状況  
図-3.30 注入量の経時変化  
図-3.31 注入深度と注入速度の関係  
図-3.32 溢水量の経時変化  
図-3.33 ラージ・スケール・トレーサー試験  
図-3.34 スモール・スケール・トレーサー試験  
図-3.35 1997/6/25 の agenda  
図-3.36 1997/6/26 の agenda  
図-3.37 1997/6/25~26 の参加者  
図-3.38 1997/12/2 の agenda  
図-3.39 1997/12/3 の agenda

## 表一覧

### 2 章

- 表-2.1 試験条件
- 表-2.2 供試体諸数値一覧表（不飽和ペントナイト）
- 表-2.3 供試体諸数値一覧表（飽和砂ペントナイト）
- 表-2.4 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$ （不飽和ペントナイト）
- 表-2.5 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$ （飽和砂ペントナイト）
- 表-2.6 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$ （不飽和ペントナイト）

### 3 章

- 表-3.1 ペントナイトプラグ中の埋設計器
- 表-3.2 埋戻し材使用材料
- 表-3.3 ペントナイトブロック等の物性値
- 表-3.4 注入孔の透水試験結果
- 表-3.5 注入結果
- 表-3.6 注入スラリーの電気伝導度

## 1. 研究の目的および範囲

### 1.1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために建設した地下構造物を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材といった要素技術により閉鎖し、廃棄体の隔離性能を長期にわたり確保する必要がある。

そこで、わが国の地質環境条件に適応し得るこれら閉鎖システムの確立に資するため、室内試験および原位置試験を通じてこれらの性能を定量的に評価していくことが必要である。

本年度は、ペントナイトの動的物性値の取得およびカナダA E C Lにおいて開始したトンネルシーリング性能原位置試験に係わる調整設計あるいは計測等に係わる技術的検討等を実施した。

### 1.2 研究の範囲

- (1) 動的三軸試験
- (2) 原位置試験検討

### 1.3 研究の内容

- (1) 動的三軸試験
  - 1) 試験材料：クニゲルV 1 (100%) , クニゲルV 1 (70%) +ケイ砂 (30%)
  - 2) 試験ケース
    - (a) クニゲルV 1 (100%) , 乾燥状態 : 6 ケース
      - ・ 乾燥密度 1.6, 1.8g/cm<sup>3</sup>
      - ・ 拘束圧 0.08MPa, 0.1MPa, 0.2MPa
    - (b) クニゲルV 1 (70%) +ケイ砂 (30%) , 飽和状態 : 3 ケース
      - ・ 乾燥密度 1.6g/cm<sup>3</sup>
      - ・ 拘束圧 0.3MPa, 0.5MPa, 0.7MPa
  - 3) 試験方法

試験は、動的三軸圧縮試験機を用い、等方圧密排水条件のもとで、軸差応力振幅を制御する応力制御により行った。軸差応力振幅は、1試験体に対してひずみの小さい方から大きい方へ10段階程度変化させるステージ方式により載荷し、0.5Hz程度の正弦波を10回程度加えた。供試体の寸法等は基本的に土質試験方法（JGS T 542-1995）に準拠した。詳細については、Appendixに示す。

4) 測定目標

軸ひずみ、軸差応力、拘束応力、間隙水圧（飽和状態のみ）、ポアソン比

5) 試験結果の整理

試験結果を各試験ケースごとに、せん断剛性（G）、減衰定数（h）およびポアソン比とせん断ひずみの関係に整理する。また、粘性土における既存の非線形構成式に取得されたデータをフィッティングさせ、構成式上のパラメータを取得した。

(2) 原位置試験検討

カナダA E C Lと動燃との共同研究として、A E C L地下研究施設において実施しているトンネルシーリング性能試験に係わる以下の技術的な検討を行った。

- 1) 計測項目、計測機器の配置等に関する調整
- 2) ベントナイトブロックの施工に関する調整
- 3) グラウト予備試験の評価
- 4) トレーサー試験計画の検討
- 5) ワークショップに係わる資料作成支援

## 2. 動的三軸試験

### 2.1 試験目的

人工バリア材（ペントナイト単体及び砂ペントナイト）の長期健全性の中で重要なと考えられる耐震性を評価することを目的として、不飽和ペントナイト及び飽和砂ペントナイトの動的変形特性を調べるとともに、動的解析に必要なパラメータを取得する。

### 2.2 使用材料と試験条件

ペントナイトは、国産で産出量が最も豊富である山形県産のNa型ペントナイト（クニゲルV1, 土粒子の密度  $\rho_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ）を用いた。

また使用したケイ砂は愛知県瀬戸市窯元産ケイ砂3号と愛知県知多郡美浜産ケイ5号とを、乾燥重量比1:1で混合した砂を用いた。表-1に試験条件（乾燥密度  $\rho_d$ , 拘束圧  $\sigma_3$ ）を示す。 $\sigma_3$ は、ペントナイトの膨潤圧、圧密時間及び試験機の性能を考慮して以下の範囲に設定した。

表-2.1 試験条件

試験ケース	乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{g/cm}^3$ )	拘束圧 $\sigma_3$ (MPa)
1	不飽和ペントナイト 1.6	0.1
2		0.2
3		4.5
4	不飽和ペントナイト 1.8	0.1
5		0.2
6		4.5
7	飽和砂ペントナイト 1.6	0.3
8		0.5
9		0.7

## 2.3 試験方法

### 2.3.1 試料調整

#### ①不飽和ベントナイト

粉末のベントナイトを必要重量測定した後、加湿器で含水比が 10 % になるまで養生し、十分に混合する。

#### ②飽和砂ベントナイト

自然含水比の粉末ベントナイトとケイ砂（3号と5号を 1 : 1 で混合）を乾土比 7 : 3 の割合で十分に混合する。

### 2.3.2 圧縮固化

混合したベントナイト単体及び砂ベントナイトを設定の乾燥密度に必要な湿潤重量を測定、圧縮固化体作製治具に投入して、図- 2.1 に示す一軸圧縮試験装置を用いて、圧縮応力 10MPa 程度で供試体寸法径  $\phi$  50mm × 高さ h100mm になるように静的に固化させる。

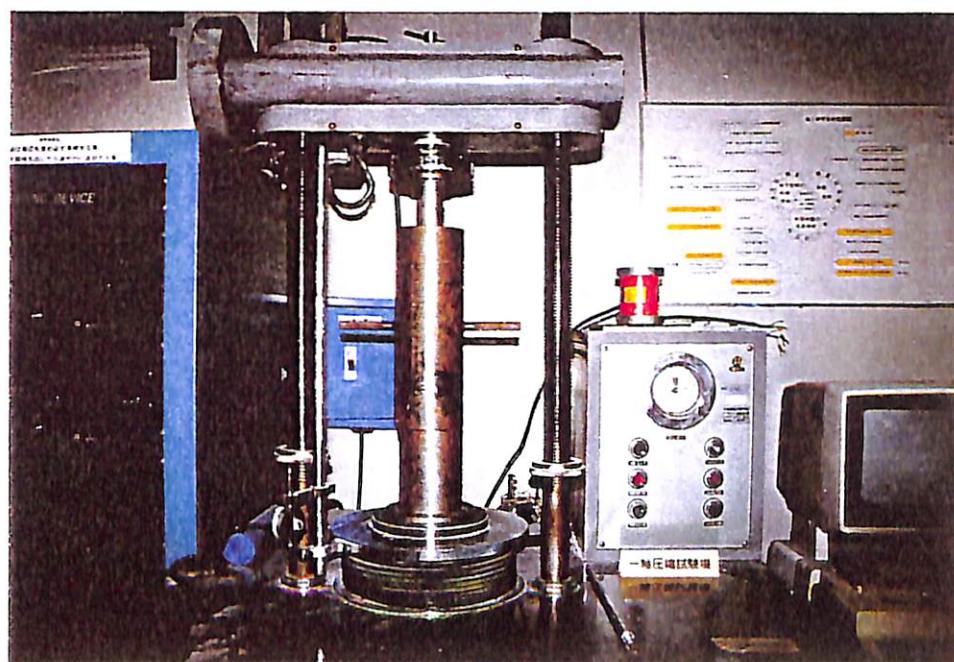


図- 2.1 一軸圧縮試験機による圧縮固化

### 2.3.3 飽和過程（砂ベントナイト）

圧縮固化した砂ベントナイトは、飽和は、以下の方法で行った。

- ①供試体を図-2.2に示すように、飽和セルにろ紙を介して設置する。
- ②上下から真空度を徐々に高めていき、負圧（-0.1MPa）の状態で24時間保持する。
- ③負圧を徐々に解除して、上下から吸水させた後、通水圧0.7MPaで30日間以上吸水させる。

図-2.3に飽和状況を示す。



図-2.2 砂ベントナイト飽和セル

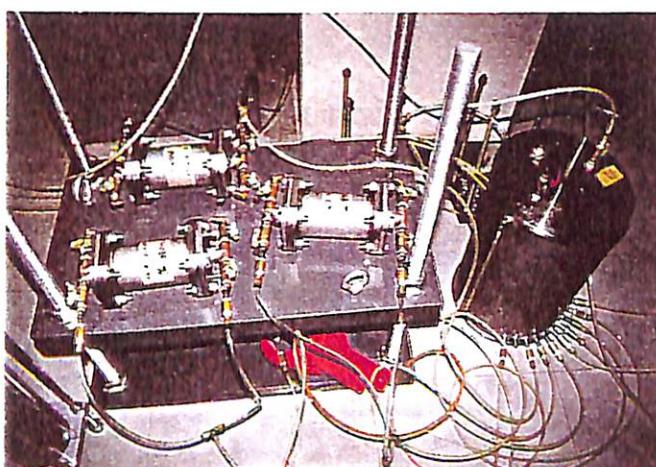


図-2.3 飽和状況

### 2.3.4 供試体の設置

飽和セルから砂ベントナイトの供試体を取り出した後、ろ紙を外し、径  $\phi$ 、高さ  $h$ 、重量  $W$  を測定して、図-2.4 に示す振動三軸変形試験装置に設置した。図-2.5 に三軸セルへの設置状況を示す。手順は以下のとおり行った。

- ①ポーラスストーンと一体になったペデスタル上にろ紙を敷き、供試体を置く。
- ②供試体側面には、新たにペーパードレーン（ろ紙）を巻き、上端面にろ紙を敷く。
- ③供試体の側面に軸ひずみ測定のためのストレインゲージ型供試体局所軸ひずみ測定装置（LDT）を設置する。
- ④ゴムスリーブをかぶせキャップを置き、上下のゴムスリーブをシールする。
- ⑤上下端面からの排水設備のセットを行う。
- ⑥三軸セルをセットし、セル内に水を充満させる。

なお、不飽和ベントナイトについて基本的には同じ操作で実施した。

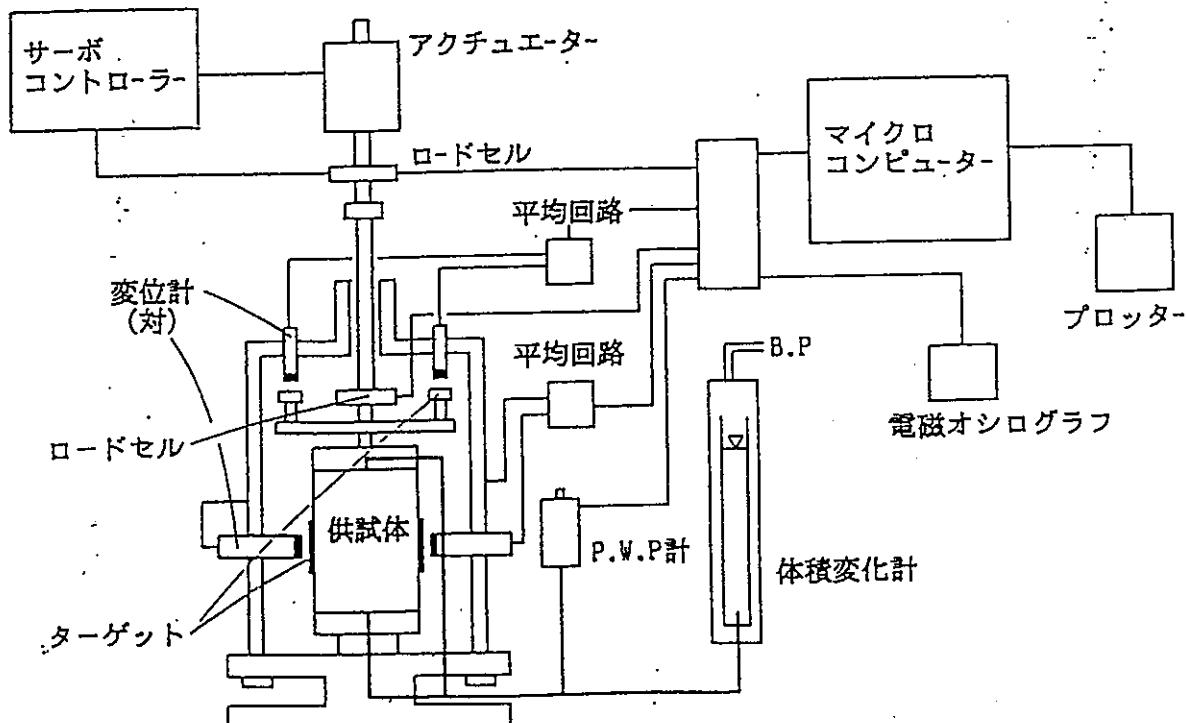
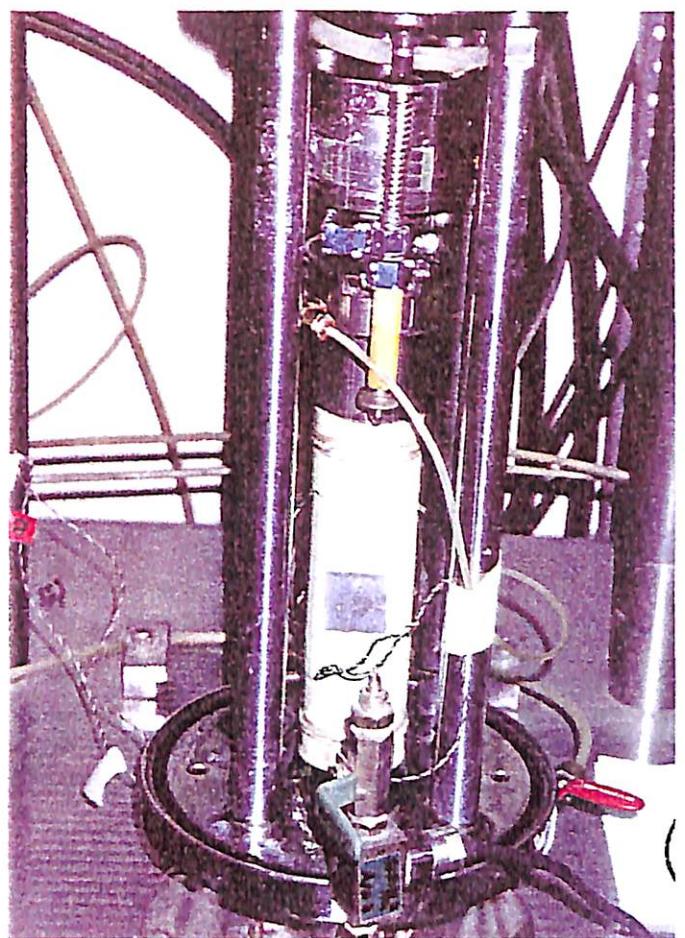


図-2.4 振動三軸変形試験装置



図－2.5 三軸セルへの設置

### 2.3.5 載荷過程とデータ処理方法

動的応力の載荷は、三軸セルの上下のコックを閉じて、非排水状態にして、軸差応力振幅を制御する応力制御により行う。軸差応力振幅は、1供試体に対して、ひずみの小さい方から大きい方へ10段階程度変化させるステージ方式により載荷し、0.2Hz程度の正弦波を1回程度載荷し、10波目のヒステリシスループでデータ処理するものとする。図-2.6にデータ処理模式図を示す。

なお、動的応力の載荷に伴う間隙水圧の発生は拘束圧に比較して極めて小さく、載荷中ほぼ一定と見なすことができる。

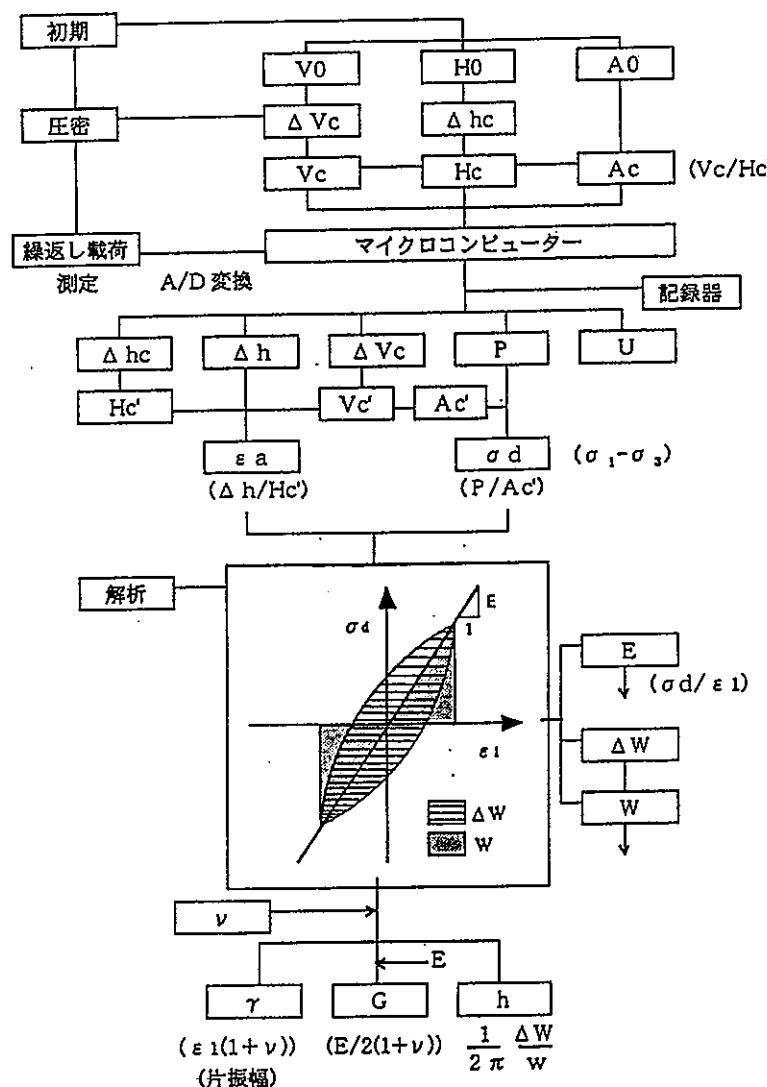


図-2.6 データ処理模式図

## 2.4 試験結果

### 2.4.1 供試体諸数値

表-2.2～3に不飽和ベントナイト及び飽和砂ベントナイトの供試体諸数値一覧表を示す。

不飽和ベントナイトの初期状態での飽和度は、乾燥密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$  で約41%， $1.8 \text{ g/cm}^3$  で約54%である。なお、不飽和ベントナイトについても動的応力の載荷に先だって所定の拘束圧で圧密（圧縮）した。したがって、乾燥密度は初期状態に比べ若干大きくなっている。

表-2.2 供試体諸数値一覧表（不飽和ベントナイト）

設定乾燥密度 拘束圧 直 径 D0 高 さ H0 体 積 V0 湿潤重量 WW 乾燥重量 DW 含 比 Wn 湿潤密度 ρt 乾燥密度 ρd 間 隙 比 e0 飽 和 度 Sr	1.60			1.80		
	0.098	0.196	4.410	0.098	0.196	4.410
初期 状 態	直 径 D0 (cm)	4.96	4.99	4.97	4.98	4.98
	高 さ H0 (cm)	9.90	9.99	9.97	10.00	10.00
	体 積 V0 (cm <sup>3</sup> )	191.29	195.37	193.42	194.78	194.78
	湿潤重量 WW (g)	337.90	343.90	342.40	385.30	383.20
	乾燥重量 DW (g)	307.09	310.80	309.89	350.27	347.42
	含 比 Wn (%)	10.0	10.6	10.5	10.0	10.3
	湿潤密度 ρt (g/cm <sup>3</sup> )	1.766	1.760	1.770	1.978	1.967
	乾燥密度 ρd (g/cm <sup>3</sup> )	1.605	1.591	1.602	1.798	1.784
	間 隙 比 e0	0.682	0.697	0.685	0.501	0.514
圧 密 過 程	飽 和 度 Sr (%)	39.7	41.2	41.3	53.8	54.1
	拘束圧 σc' (Mpa)	0.098	0.196	4.410	0.098	0.196
	軸変位 Δh (cm)	0.009	0.008	0.049	0.005	0.007
	体積変化 Δv (cc)	0.5	0.8	1.2	0.5	0.5
	乾燥密度 ρdc (g/cm <sup>3</sup> )	1.610	1.597	1.612	1.803	1.788
	間 隙 比 ec	0.677	0.690	0.675	0.498	0.510
	B 値	-	-	-	-	-
圧密時間 (min)		60	60	60	30	30

飽和砂ベントナイトの初期飽和度は、100 %以上の値になっており、供試体作成時飽和度約 20 %でも 30 日飽和セルで吸水させることで、ほぼ飽和していると考えることが出来る。また、圧密後に測定したB 値は 0.96 ~ 0.98 となっており、一般的な飽和状態の基準値 0.95 に達している。

表- 2.3 供試体諸数値一覧表（飽和砂ベントナイト）

設定乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )		1.60		
拘束圧 $\sigma_c'$ (Mpa)		0.297	0.49	0.686
初期状態	高さ H <sub>0</sub> (cm)	5.01	5.01	5.02
	直径 D <sub>0</sub> (cm)	10.00	10.01	10.03
	体積 V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	197.14	197.33	198.52
	湿潤重量 W <sub>W</sub> (g)	391.60	395.50	395.10
	乾燥重量 W <sub>D</sub> (g)	305.12	310.23	310.29
	含水比 W <sub>n</sub> (%)	28.3	27.5	27.3
	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.986	2.004	1.990
	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.548	1.572	1.563
	間隙比 e <sub>0</sub>	0.706	0.679	0.689
圧密過程	飽和度 S <sub>r</sub> (%)	106.0	106.8	104.7
	拘束圧 $\sigma_c'$ (Mpa)	0.297	0.490	0.686
	軸変位 Δh (cm)	0.01	0.015	0.091
	体積変化 Δv (cc)	2.7	5.6	8.4
	乾燥密度 $\rho_{dc}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.569	1.618	1.632
	間隙比 e <sub>c</sub>	0.682	0.632	0.618
	B 値	0.96	0.96	0.98
圧密時間 T (min)		11040	8520	10200
$\rho_s = 2.640$				

## 2.4.2 動的特性

### (1) 動的ポアソン比

図-2.7～2.12に不飽和ベントナイト  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$  及び  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ 、また飽和砂ベントナイト  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$  の場合の動的ポアソン比  $\nu$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係(Gap センサー, LDT)を示す。不飽和ベントナイトのポアソン比は 0.3 以下と小さい。

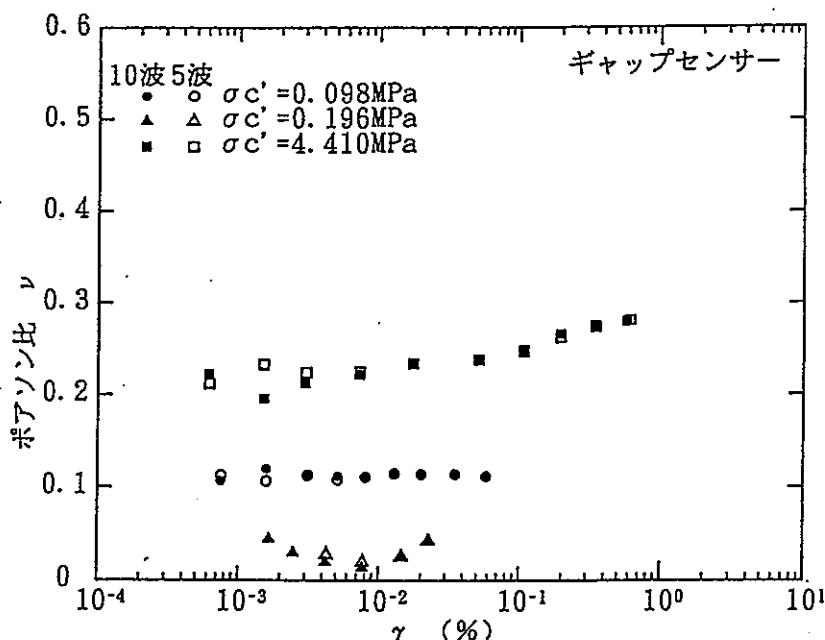


図-2.7  $\nu$  と  $\gamma$  の関係(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)

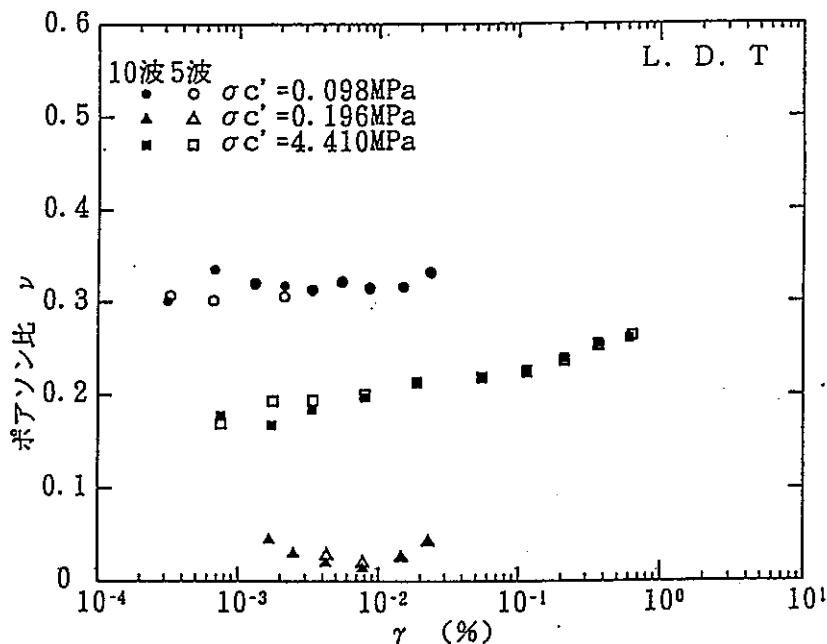


図-2.8  $\nu$  と  $\gamma$  の関係(不飽和ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)

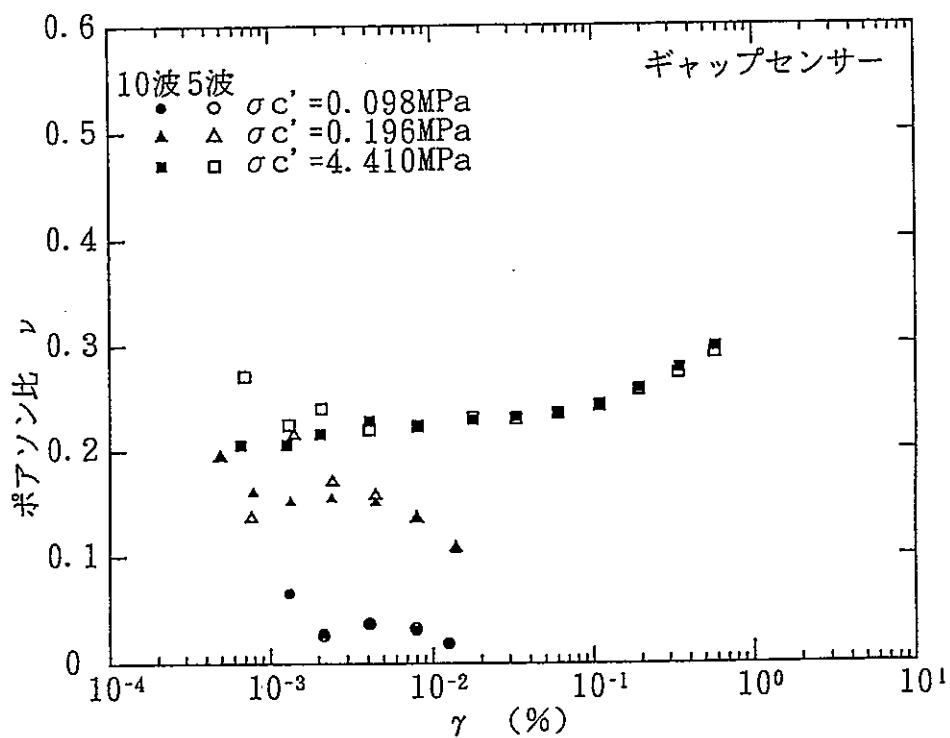


図-2.9  $\nu$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)

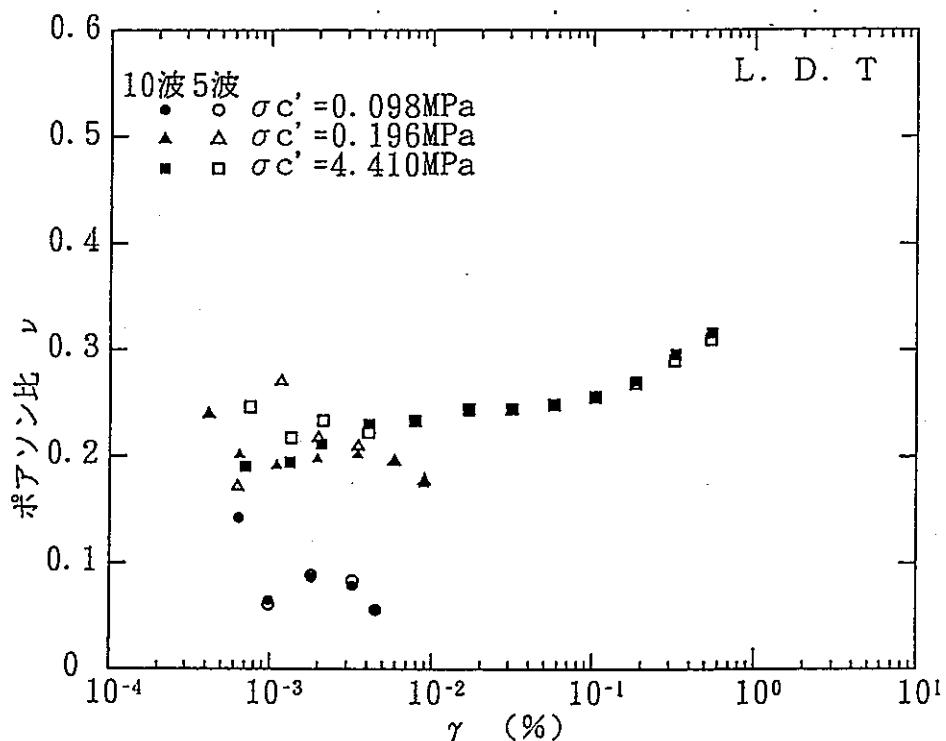
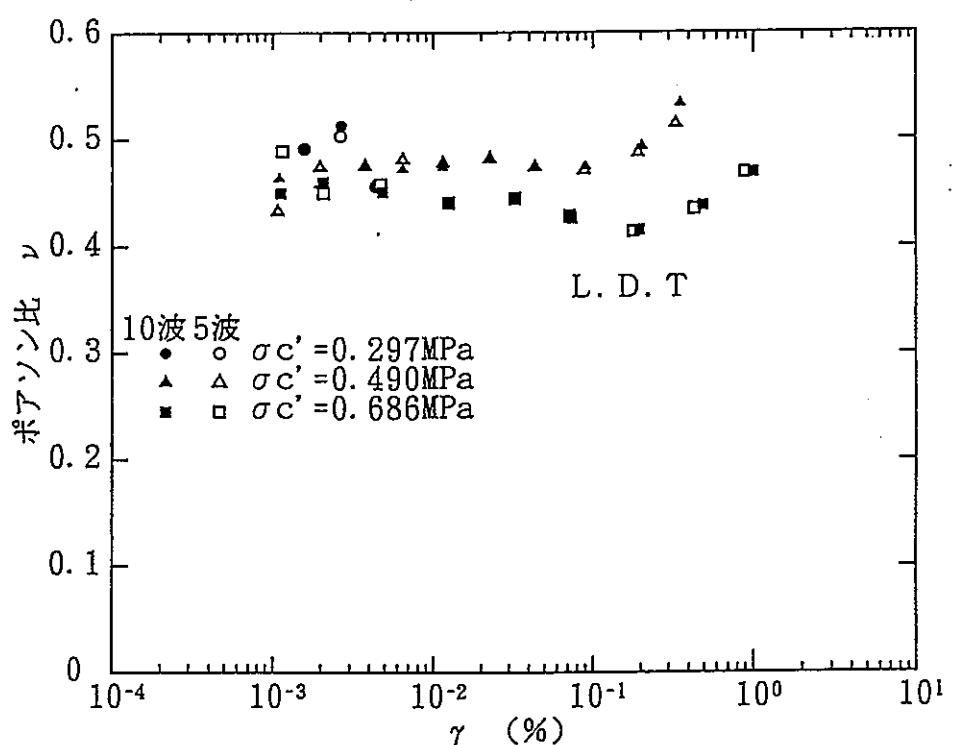
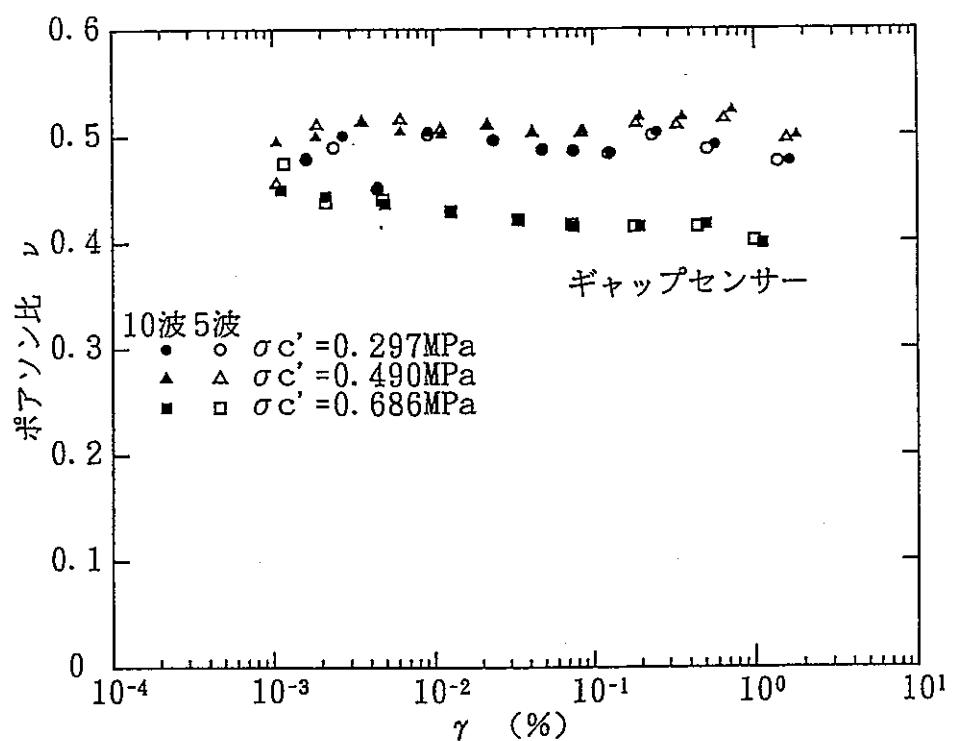


図-2.10  $\nu$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , LDT)



## (2) せん断剛性率, 減衰定数

図-2.13～2.18に $\nu=0.5$ とした場合の不飽和ペントナイト $\rho_d=1.6\text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_d=1.8\text{ g/cm}^3$ 及び飽和砂ペントナイト,  $\rho_d=1.6\text{ g/cm}^3$ の代表的な結果についてのせん断剛性率 $G/G_0$ と $\gamma$ の関係を示す。図中には, Ramberg-Osgood(ランベルグ・オズグッド)モデル(以下, R-Oモデル)による近似曲線を記した。

R-Oモデルは、式(2.1)～(2.2)で表される<sup>1)</sup>。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{\max}} \left(1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{\beta-1}\right) \quad (2.1)$$

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right) \quad (2.2)$$

ここに,  $G_{\max}$ : 微小ひずみ時のせん断弾性係数,  $h_{\max}$ : 最大等価減衰比,  $\tau_f$ : せん断強度,  $\alpha$ ,  $\beta$ : モデル固有のパラメータ

今回、必要なパラメータ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\tau_f$ ,  $G_{\max}$ )は、以下の方法で設定した。

① $G_{\max}$ ,  $h_{\max}$ を, Hardin-Dmievich(ハーディン・ドネルヴィッヂ)モデル(以下, H-Dモデル)から求める。

②式(2.2)に $G/G_{\max}=0$ ,  $h=h_{\max}$ を代入して $\beta$ を求める。

③ $\tau_f$ は、 $\tau_f=q_u/2$ から求めた。クニゲルV1の乾燥密度 $\rho_d$ と一軸圧縮強さ $q_u$ の関係は、式(2.3)で表される<sup>2)</sup>。

$$q_u = 2.95 \times 10^{2.21 \rho_d - 4} \quad (2.3)$$

④式(2.1)にH-Dモデルから求めた規準ひずみ $\gamma_T$ ( $G/G_{\max}=0.5$ の場合,  $\tau=G\gamma_T$ )を代入して、 $\alpha$ を求める。

表-2.4～2.5にR-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$ を示す。最大減衰定数が小さいモデルでは近似が良くない傾向が見られる。

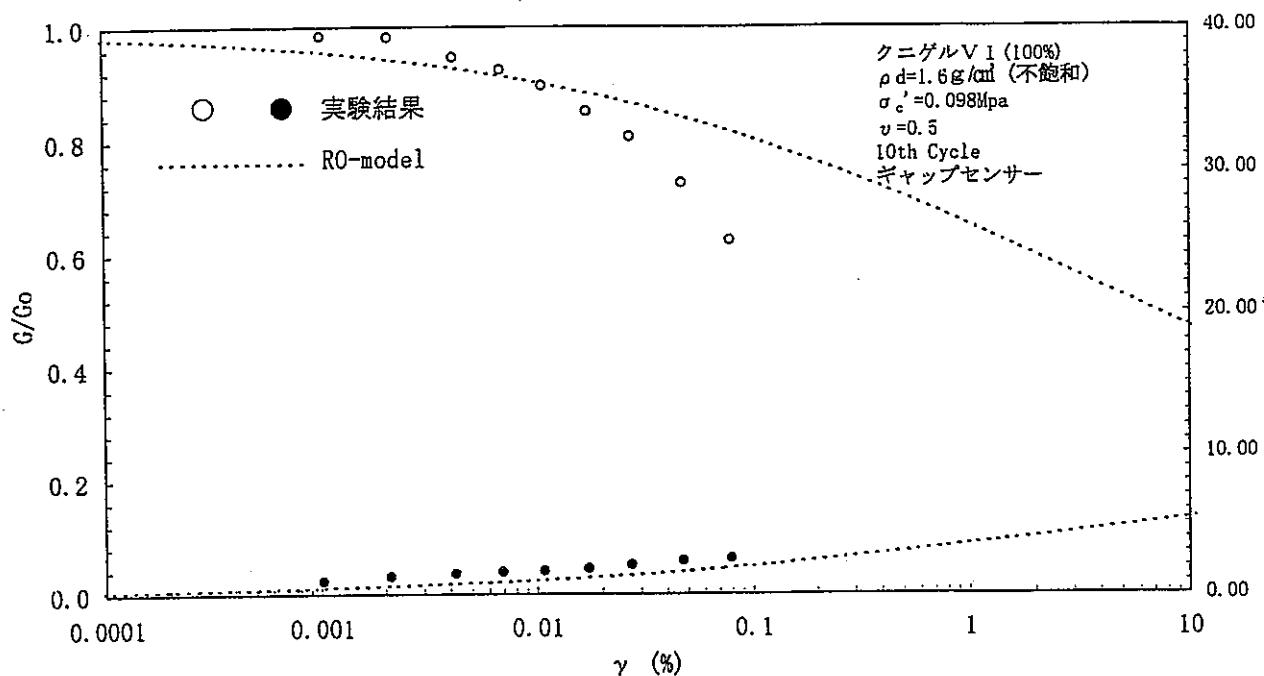


図- 2.13  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)

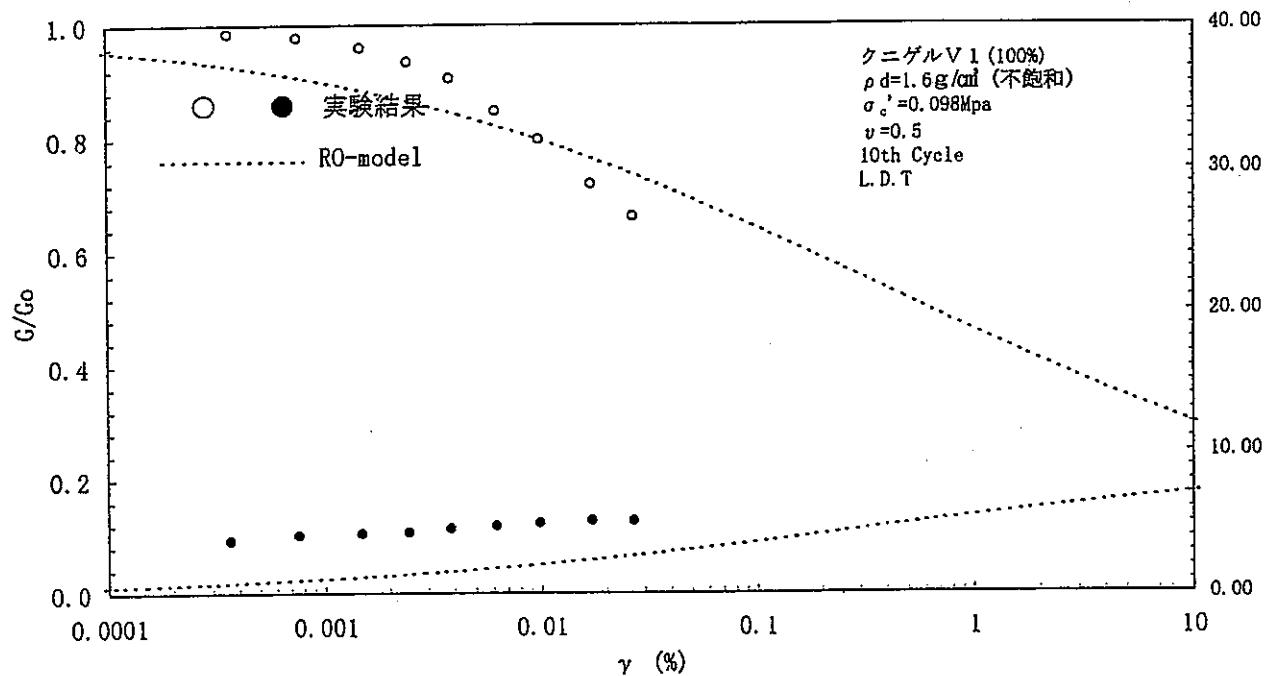


図- 2.14  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , L D T)

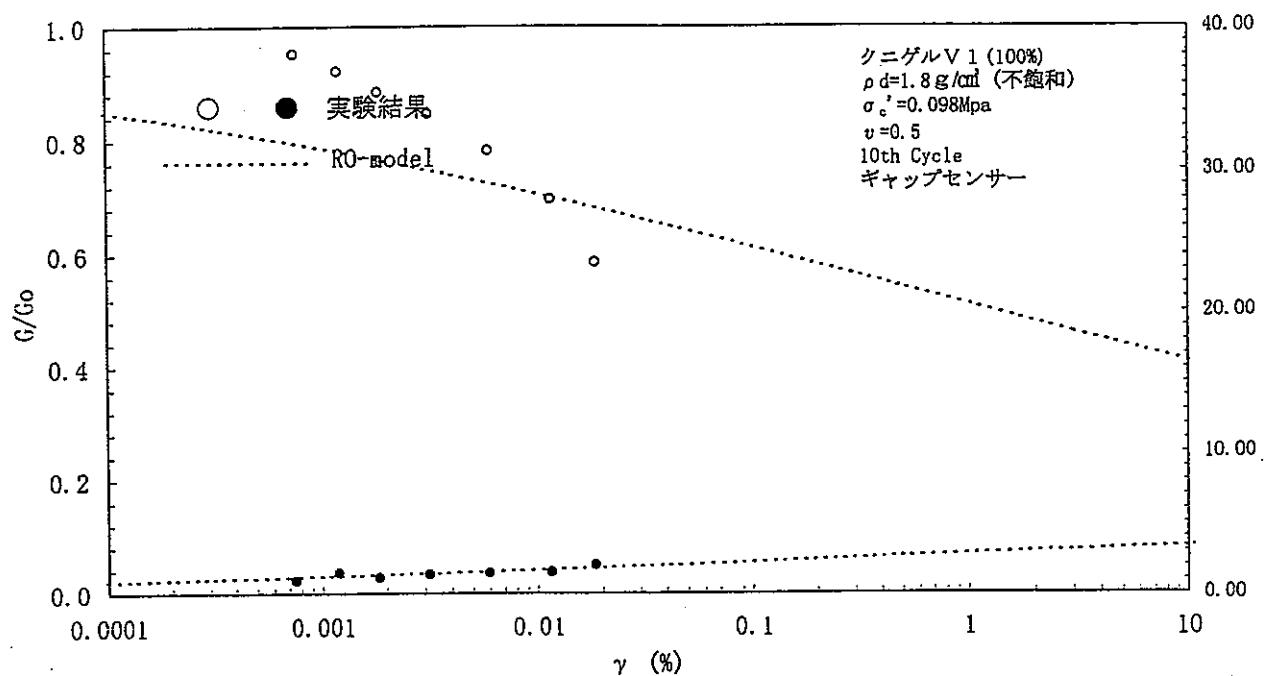


図- 2.15  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)

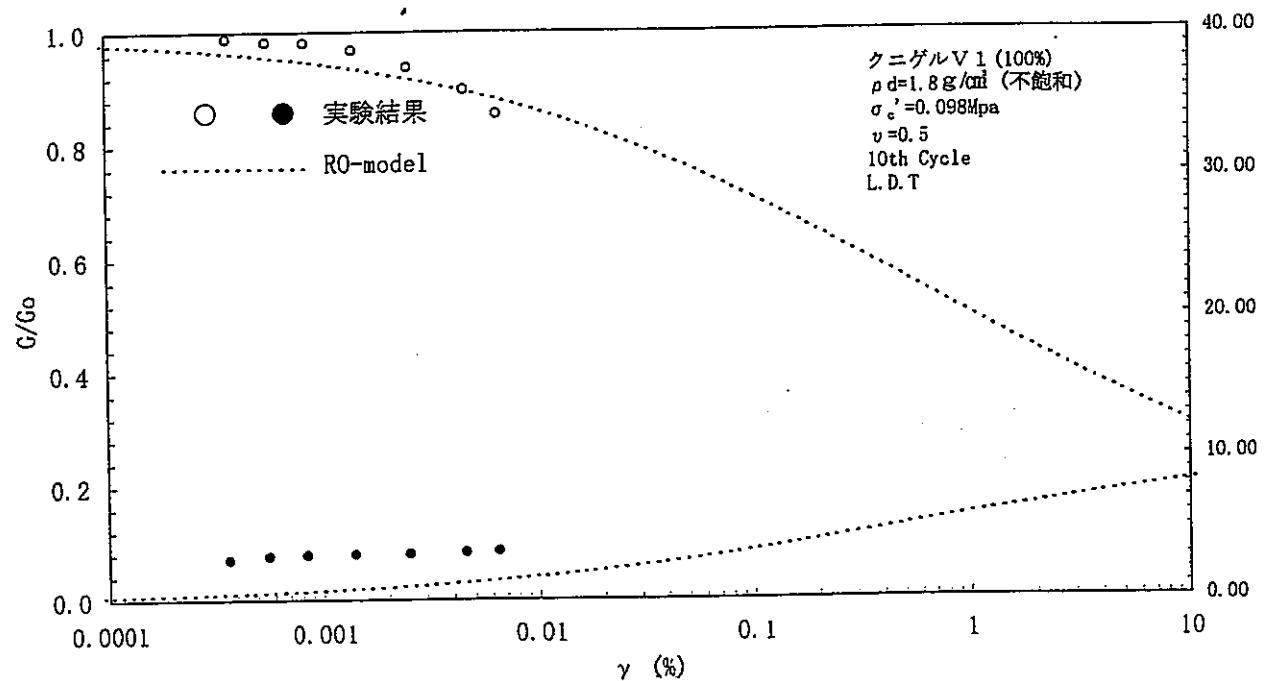


図- 2.16  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (不飽和ペントナイト,  $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ , L D T)

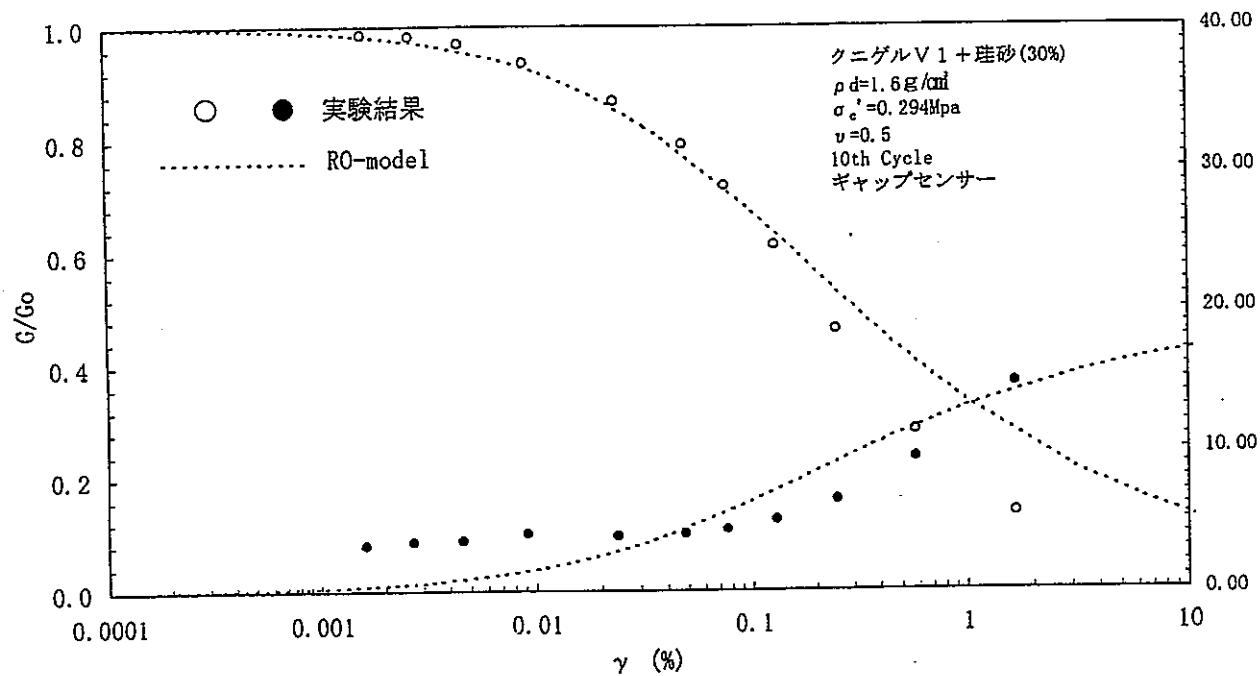


図- 2.17  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , Gap センサー)

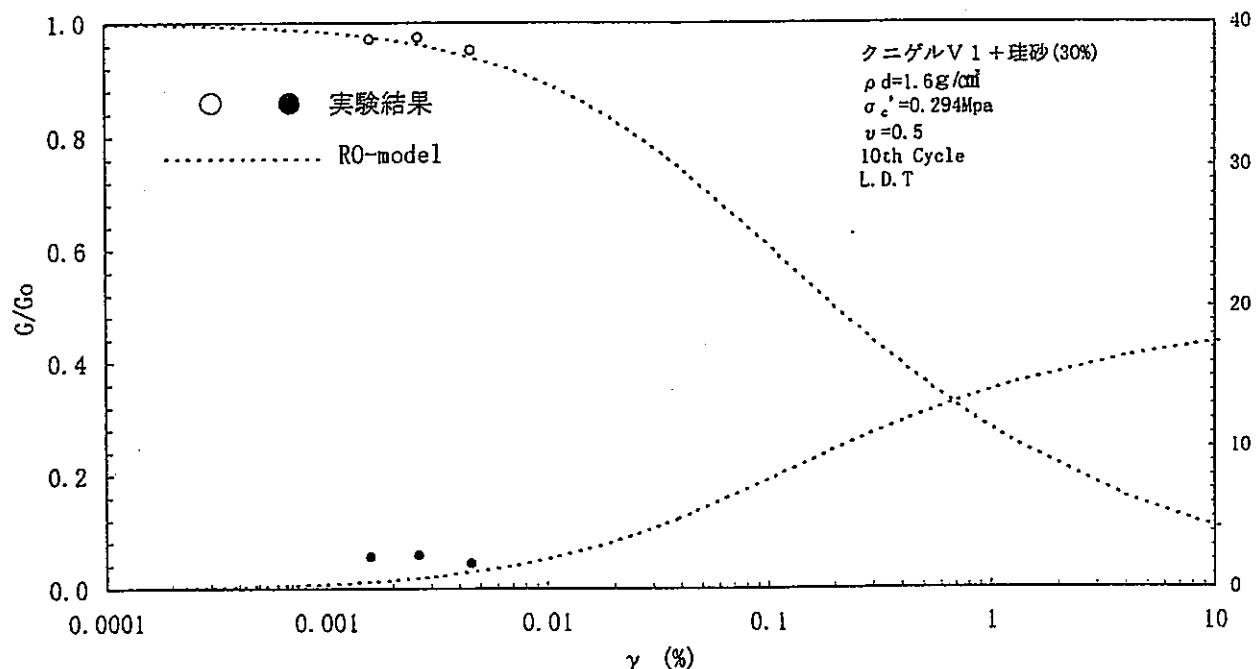


図- 2.18  $G/G_0$ ,  $h$  と  $\gamma$  の関係 (飽和砂ベントナイト,  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT)

表-2.4 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$  (不飽和ベントナイト)

乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	圧密応力 MPa	軸変位計	整理波数	$\alpha$	$\beta$
1.6	0.098	G S	5	0.57	1.39
			10	0.49	1.38
	0.196	LDT	5	0.85	1.39
			10	0.82	1.38
	4.41	G S	5	1.84	1.92
			10	3.16	2.12
		LDT	5	0.39	1.74
			10	5.52	2.68
1.8	0.098	G S	5	2.12	2.41
			10	2.42	2.42
	0.196	LDT	5	2.67	2.92
			10	3.25	2.92
	4.41	G S	5	0.68	1.13
			10	0.90	1.19
		LDT	5	0.73	1.33
			10	1.16	1.45
	0.098	G S	5	0.56	1.25
			10	0.52	1.23
	0.196	LDT	5	0.11	1.25
			10	0.10	1.23
	4.41	G S	5	4.16	2.12
			10	4.04	2.11
		LDT	5	1.61	2.37
			10	2.60	2.43

\* G S : ギャップセンサー  
L D T : 局所変位計

表-2.5 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$  (飽和砂ペントナイト)

乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	圧密応力 MPa	軸変位計	整理波数	$\alpha$	$\beta$
1.6	0.297	G S	5	5.33	1.88
			10	7.07	1.88
		LDT	5	8.29	1.88
			10	10.15	1.88
	0.490	G S	5	6.59	1.94
			10	7.04	1.95
		LDT	5	1.82	1.68
			10	2.67	1.76
	0.686	G S	5	2.10	1.73
			10	2.34	1.73
		LDT	5	2.57	1.80
			10	3.08	1.80

\* G S : ギャップセンサー

L D T : 局所変位計

## 2.5 試験結果の検討

### 2.5.1 オーバーパック自重載荷時の動的変形特性の推定

今回の不飽和ベントナイトの試験においては、試験条件の一つとしてオーバーパック自重載荷状態を考慮した 0.08MPa の拘束下での動的変形特性の把握が計画されていた。しかし、図- 2.13 ~ 2.16 の 0.1MPa の試験結果からも明らかのようにひずみに対するせん断剛性や減衰定数の取得が十分でないためこれより小さい 0.08MPa の拘束下ではさらに不十分になることが予想された。そこで、計画を変更して拘束圧の大きいところでの実験を実施し、その結果等を用いて 0.08MPa の拘束下のデータを推定することにした。

図- 2.19 ~ 2.22 は不飽和ベントナイト  $\rho d = 1.8 \text{ g/cm}^3$  のデータより、各ひずみレベルにおけるせん断剛性比 ( $G/G_0$ ) および減衰定数 ( $h$ ) を求める過程で図示したものである。

図- 2.23 ~ 2.24 には、 $\rho d = 1.6 \text{ g/cm}^3$  および  $1.8 \text{ g/cm}^3$  の推定データと R - 0 モデルによるフィティング結果を示す。

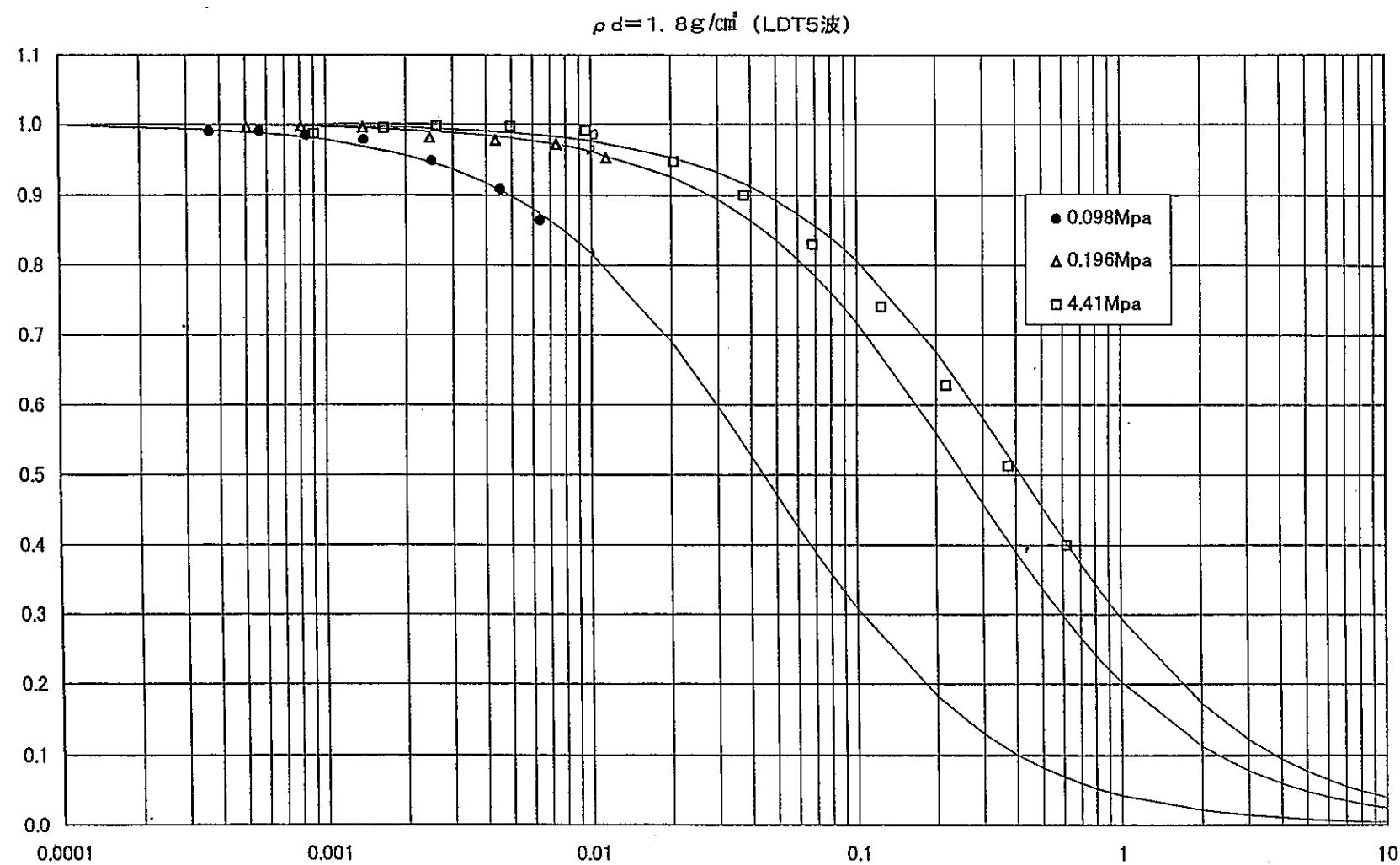


図-2.19 せん断ひずみとせん断剛性比の対比

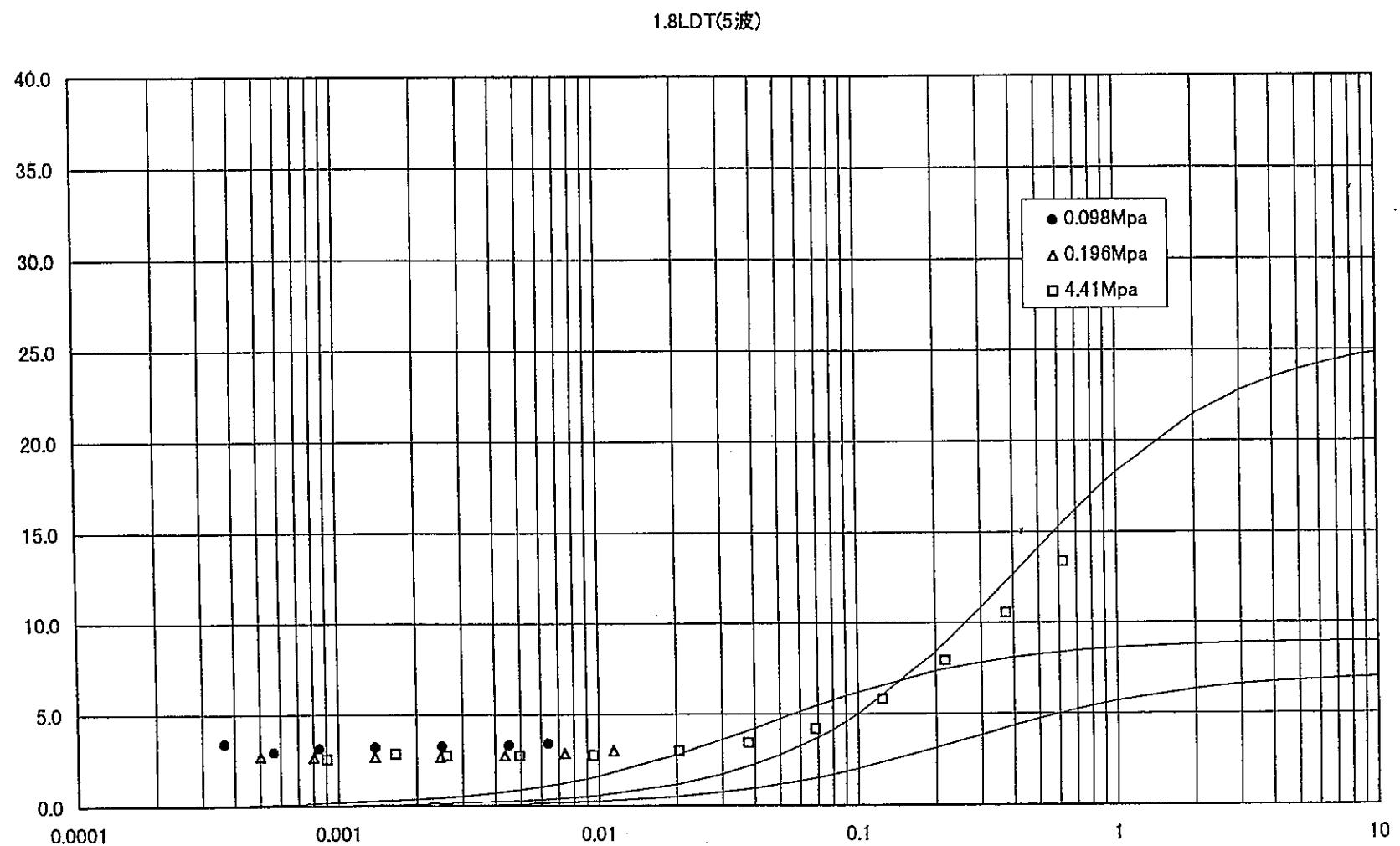


図-2.20 せん断ひずみと減衰定数の対比

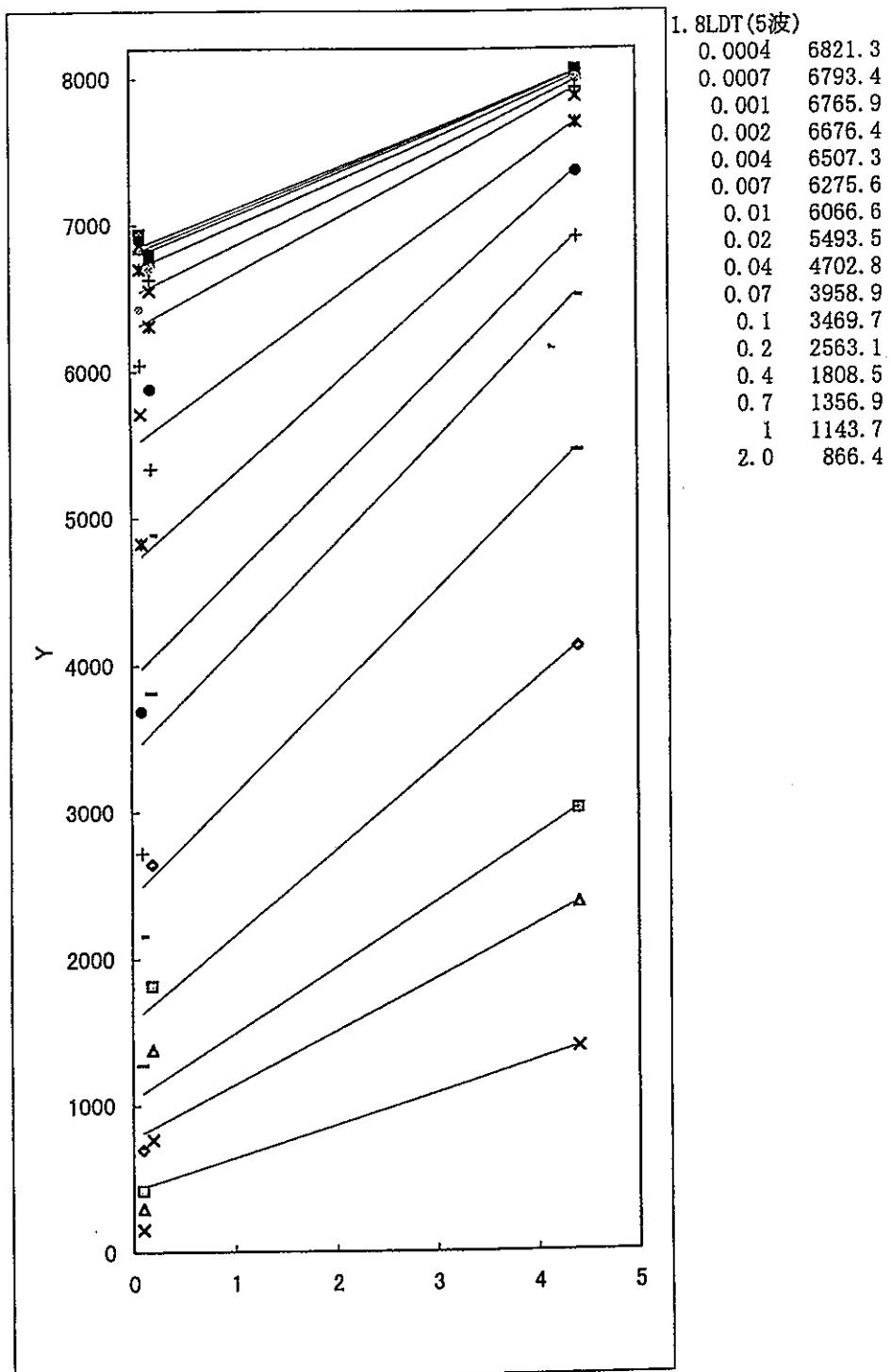


図- 2.21 拘束圧とせん断剛性の関係

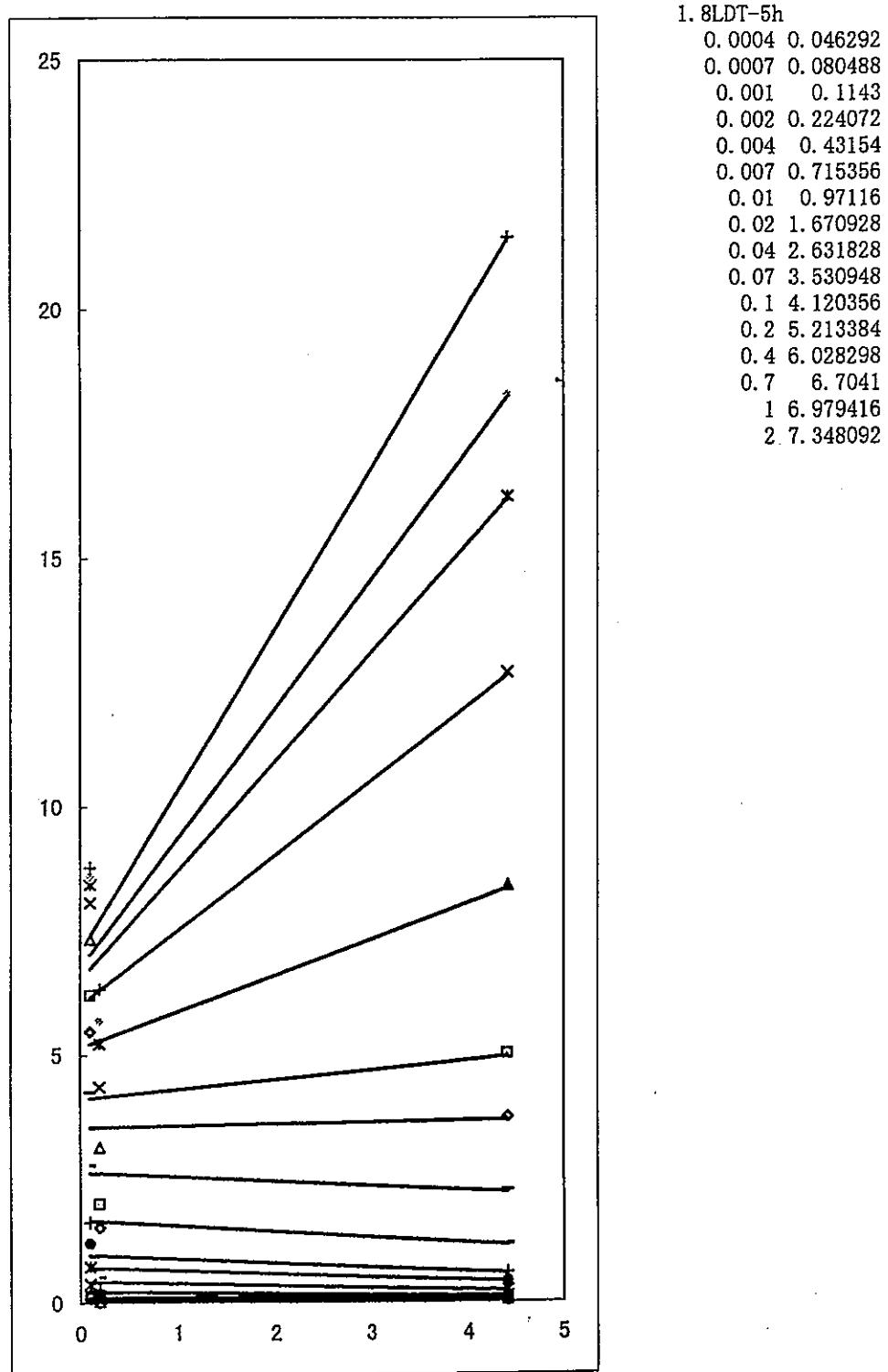
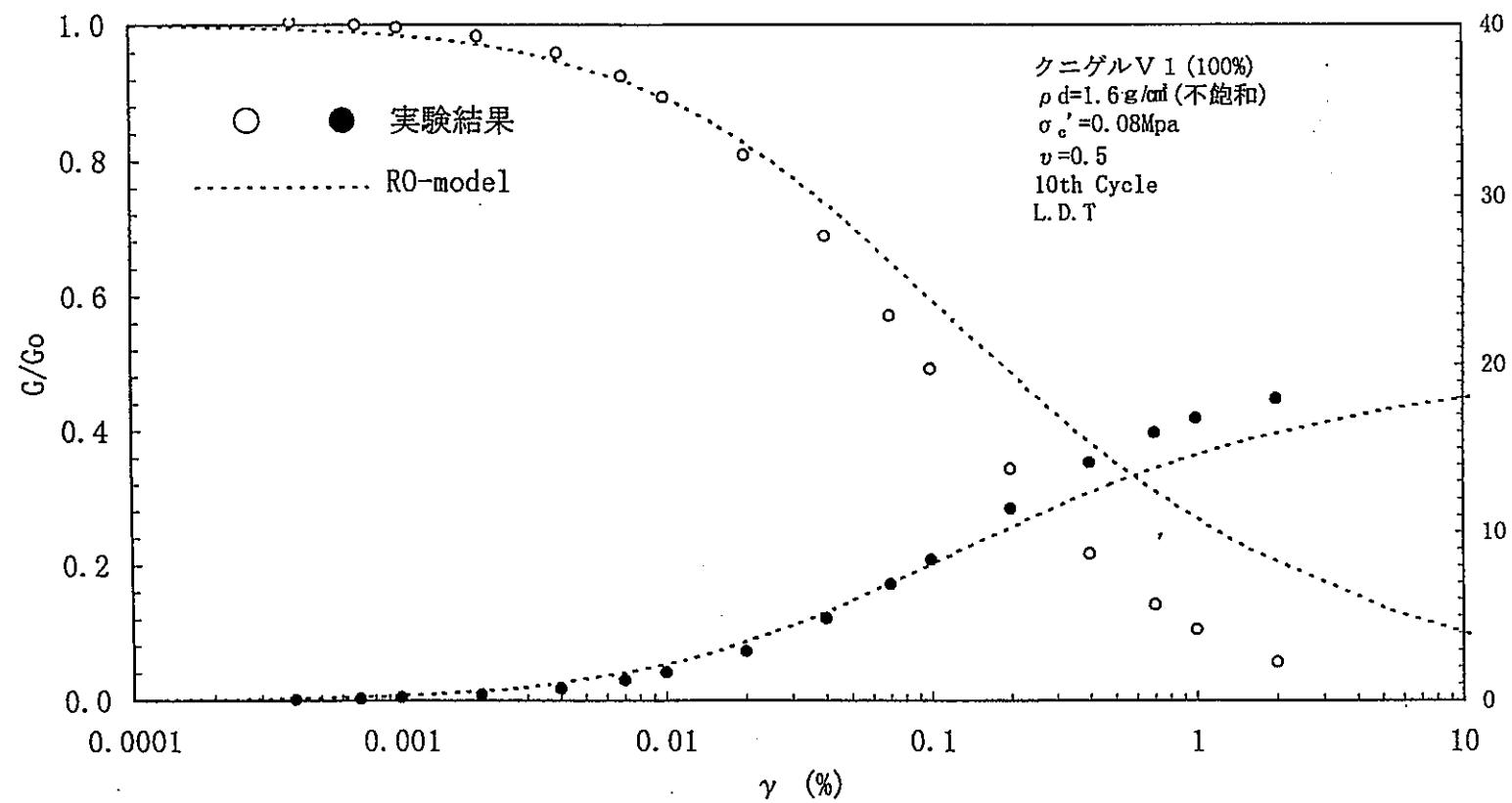
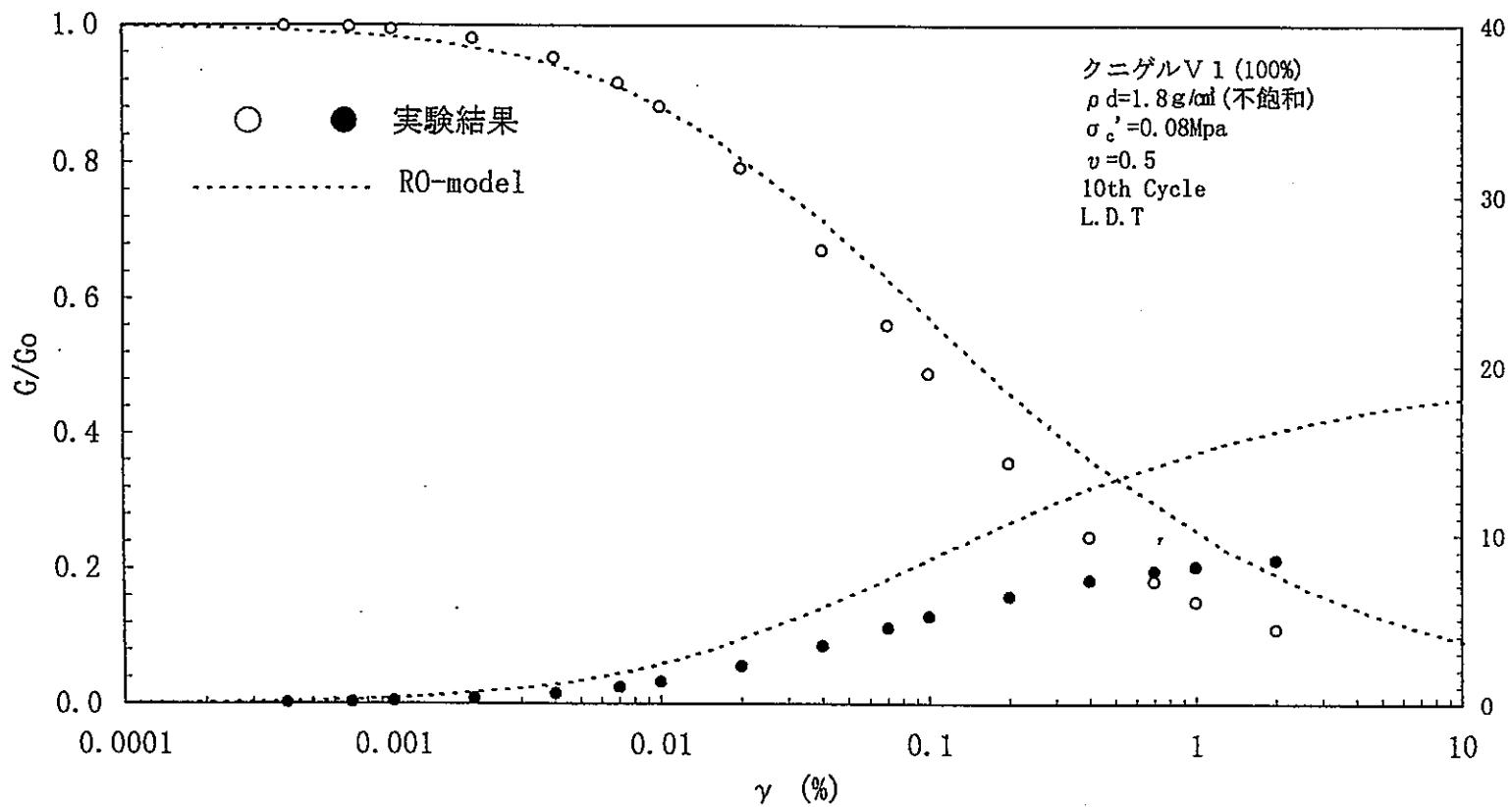


図- 2.22 拘束圧と減衰定数の関係

図- 2.23 拘束圧 0.08MPa の  $G/G_0$ ,  $h$  ~  $\gamma$  の関係 ( $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )

図- 2.24 拘束圧 0.08MPa の  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の関係 ( $\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$ )

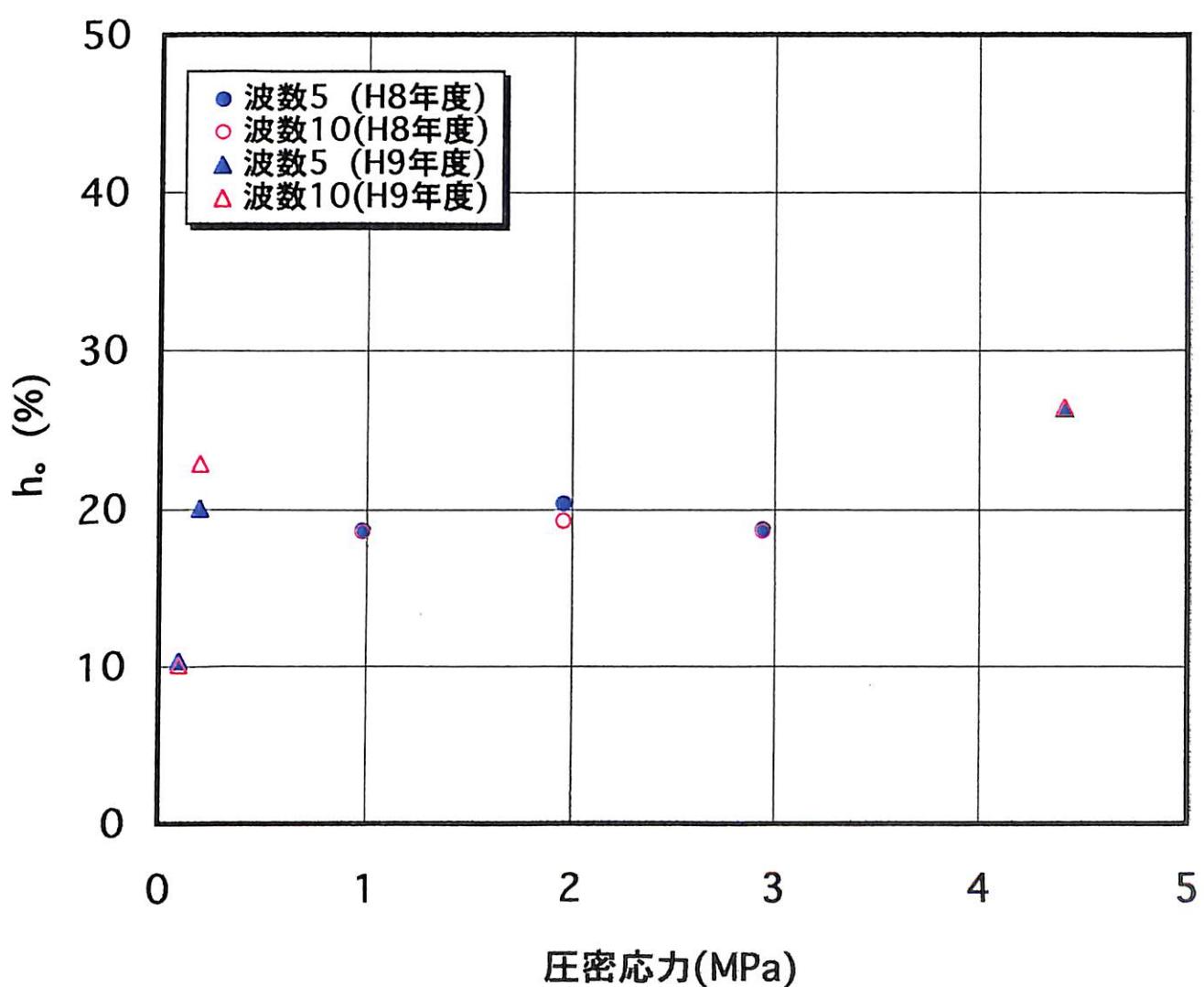
## 2.5.2 減衰定数の見直し

図-2.13～2.16に示すように、特にせん断剛性比( $G/G_0$ )におけるR-Oモデルによるフィティングは良くない。そこで、R-Oモデルによるフィティングを良くするため最大減衰定数 $h_0$ の見直しを行った。

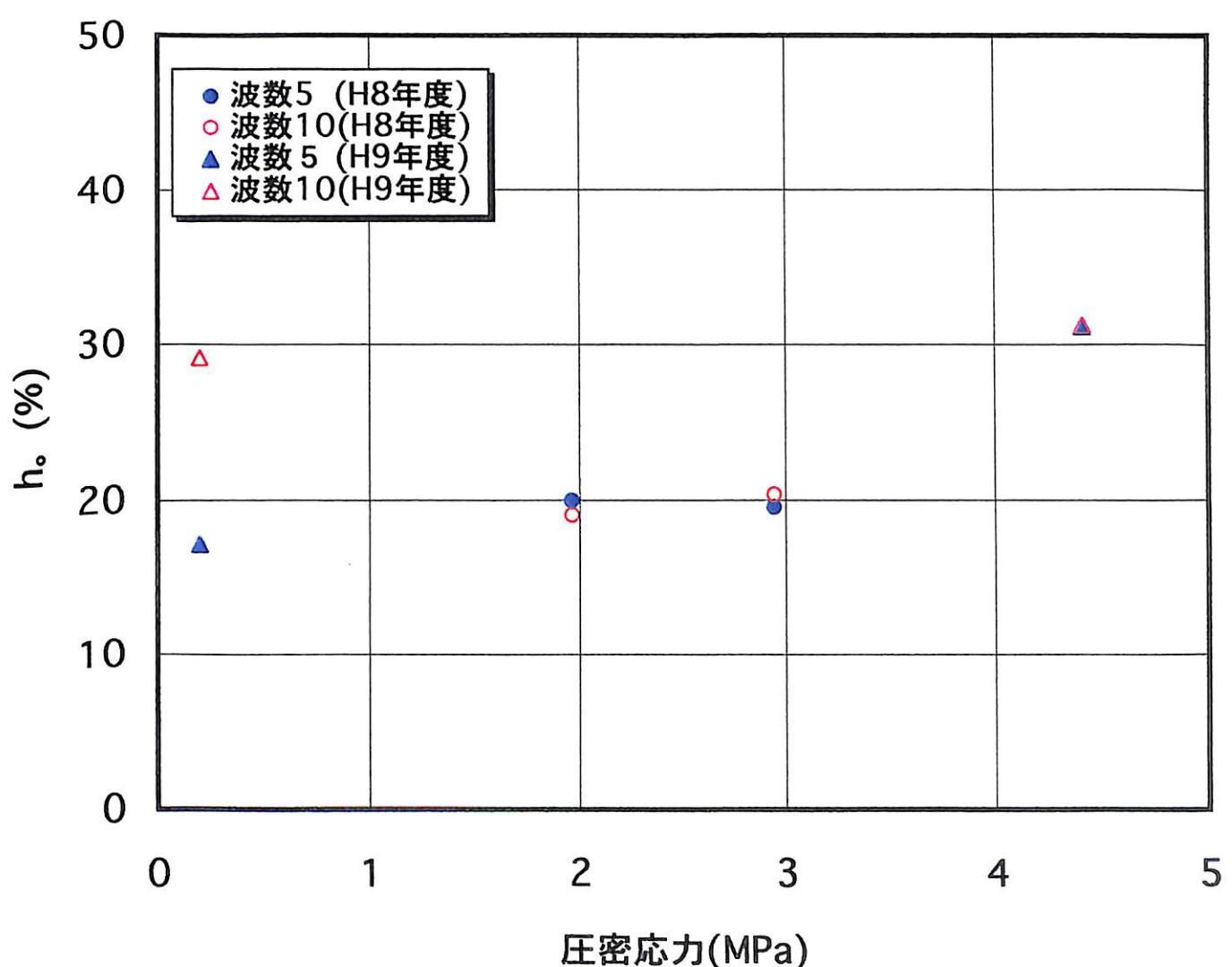
今年度実施した試験結果より求めた $h_0$ は、図-2.25～2.28に示すように前年度<sup>3)</sup>の $h_0$ に比較してばらつきが多く、特に $h_0$ が小さい試験結果ではR-Oモデルによるフィティングが良くない傾向にある。そのため、文献等<sup>4)5)6)</sup>により適切な $h_0$ について調べてみた。

粘性土の減衰定数についての系統的研究事例は少ないが、一般にはひずみの増大とともに増加する傾向にある。減衰定数 $h_0$ のひずみ依存曲線についてとりまとめた例を図-2.29に示す。また、図-2.30～2.31に粘性土の試験結果の事例を示す。

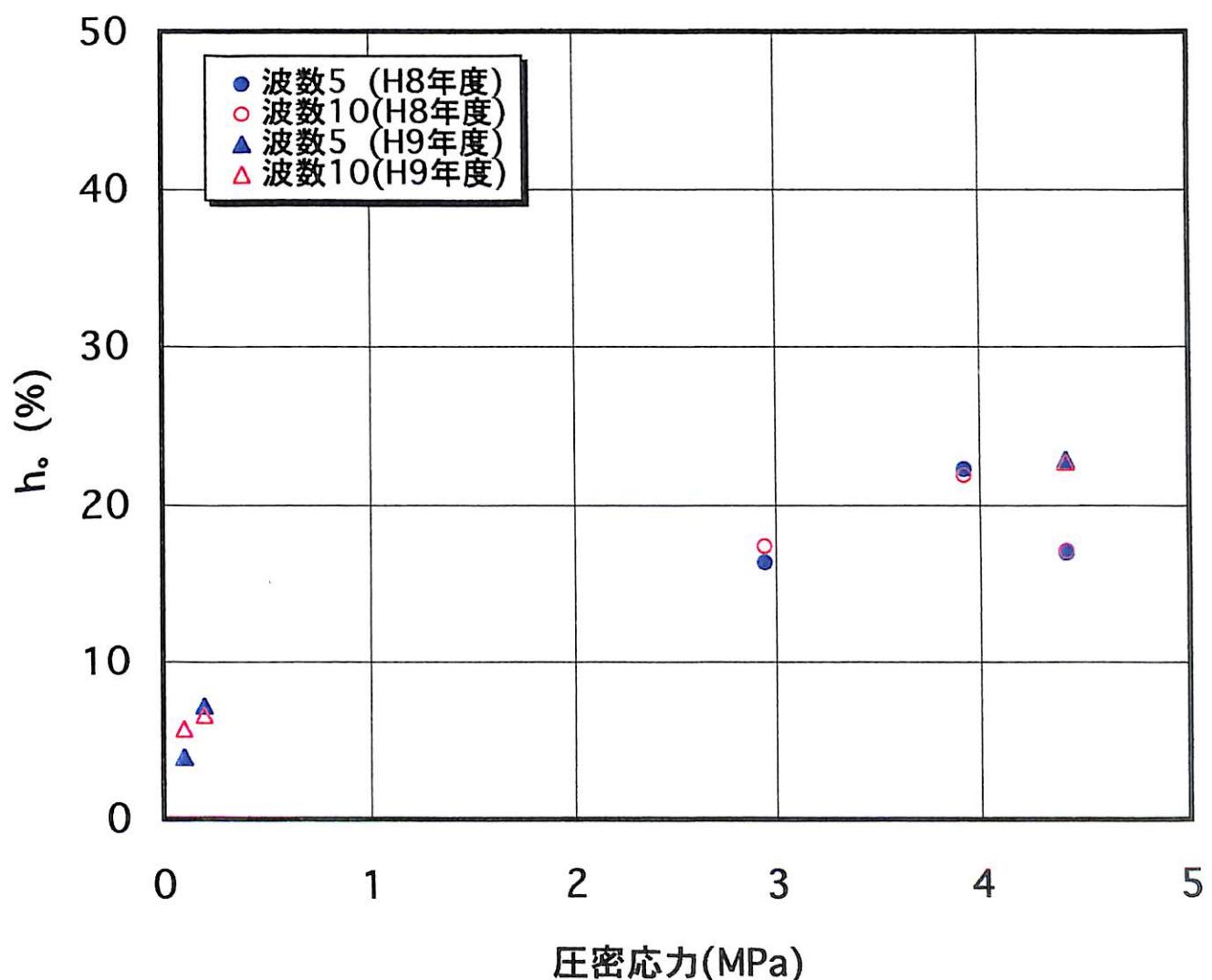
$h_0$ については、明確に言及しているものはないが、前年度の結果や事例から判断して $h_0$ は20%程度と見なすことが出来る。



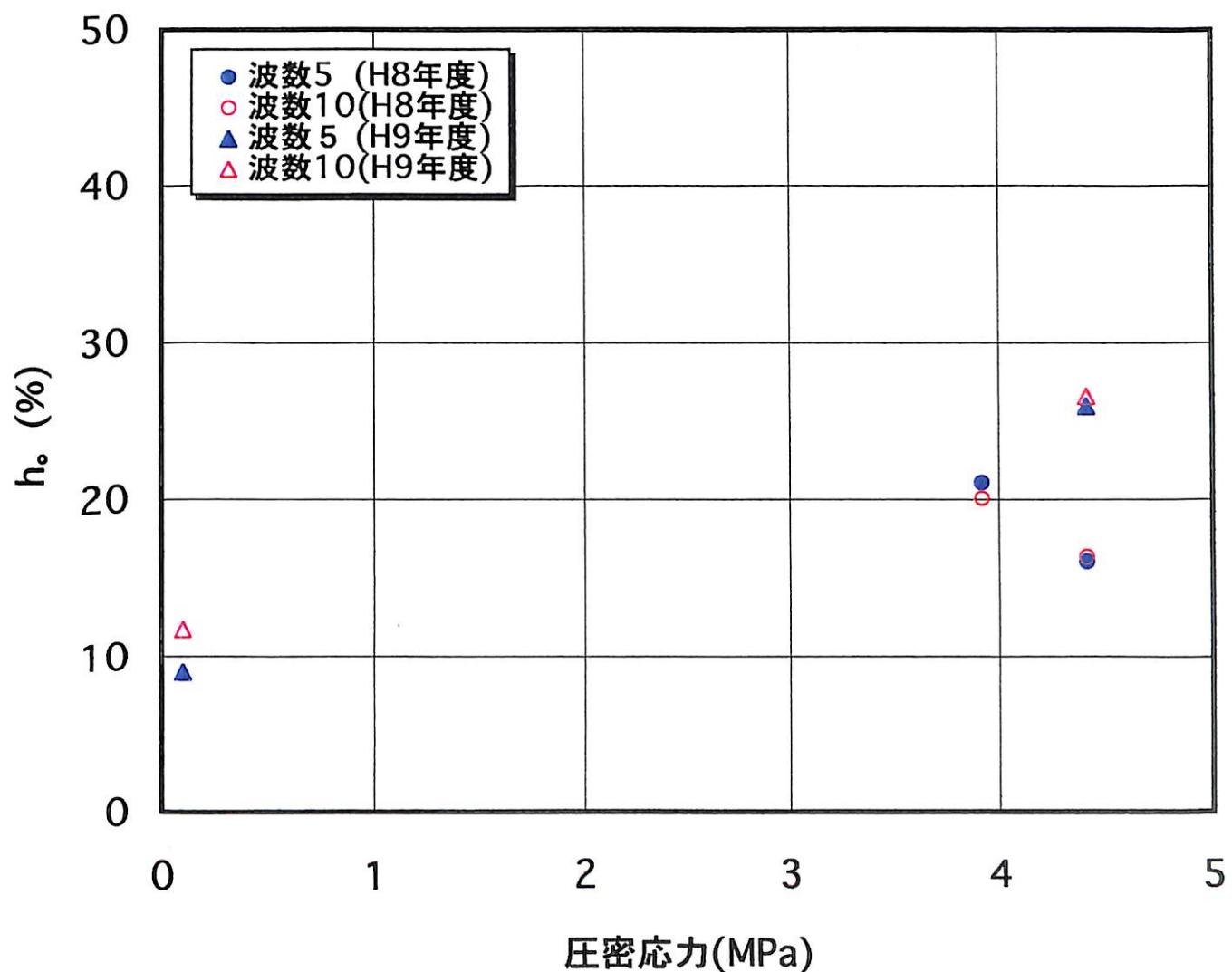
図－2.25 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho$  d=1.6g/cm<sup>3</sup>, GS)



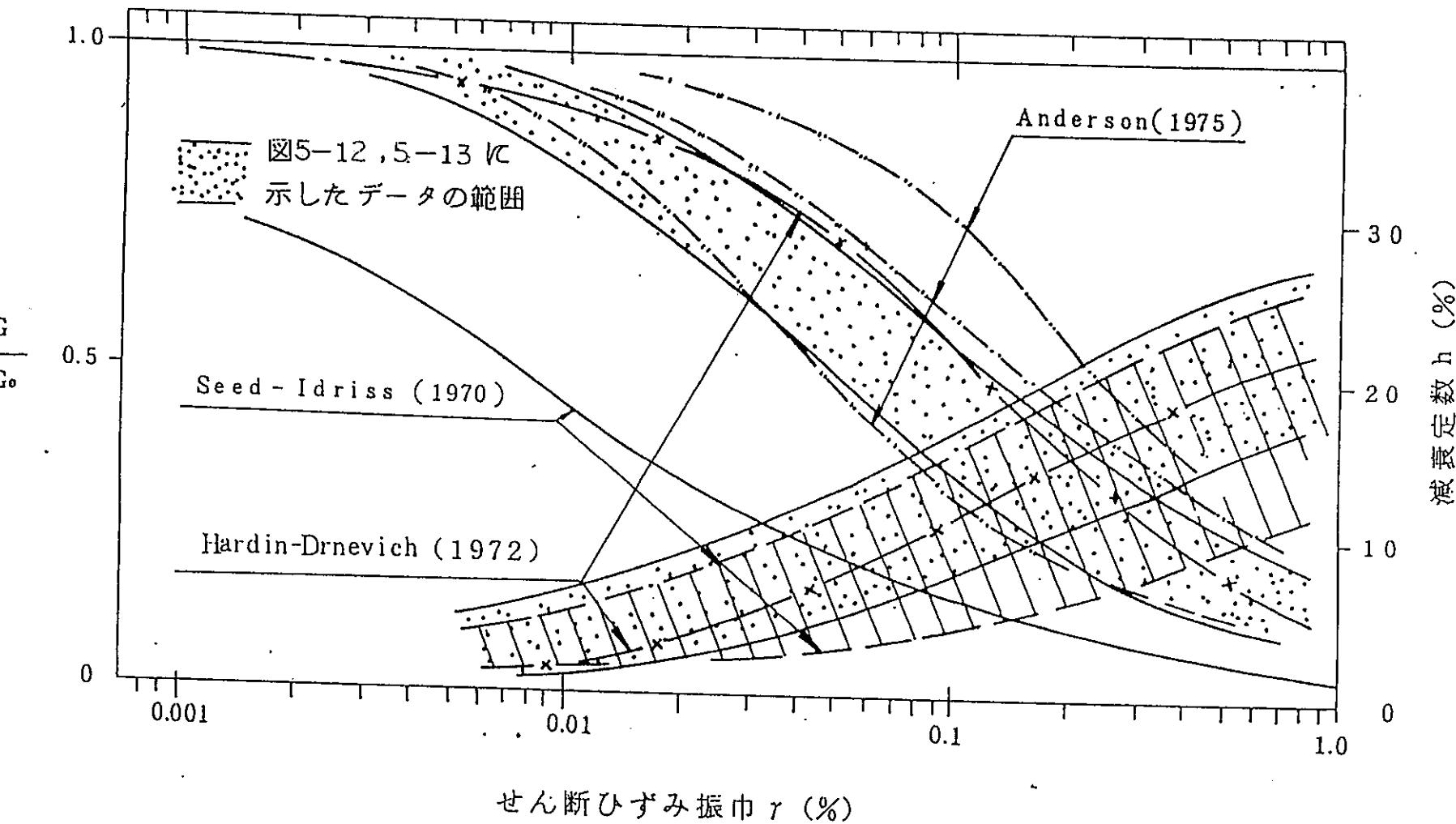
図－2.26 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho$  d=1.6g/cm<sup>3</sup>, LDT)



図－2.27 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho$  d=1.8g/cm<sup>3</sup>, GS)



図－ 2.28 圧密圧力と最大減衰定数の関係 ( $\rho d=1.8g/cm^3$ , LDT)

図- 2.29 粘性土についての  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の関係の比較

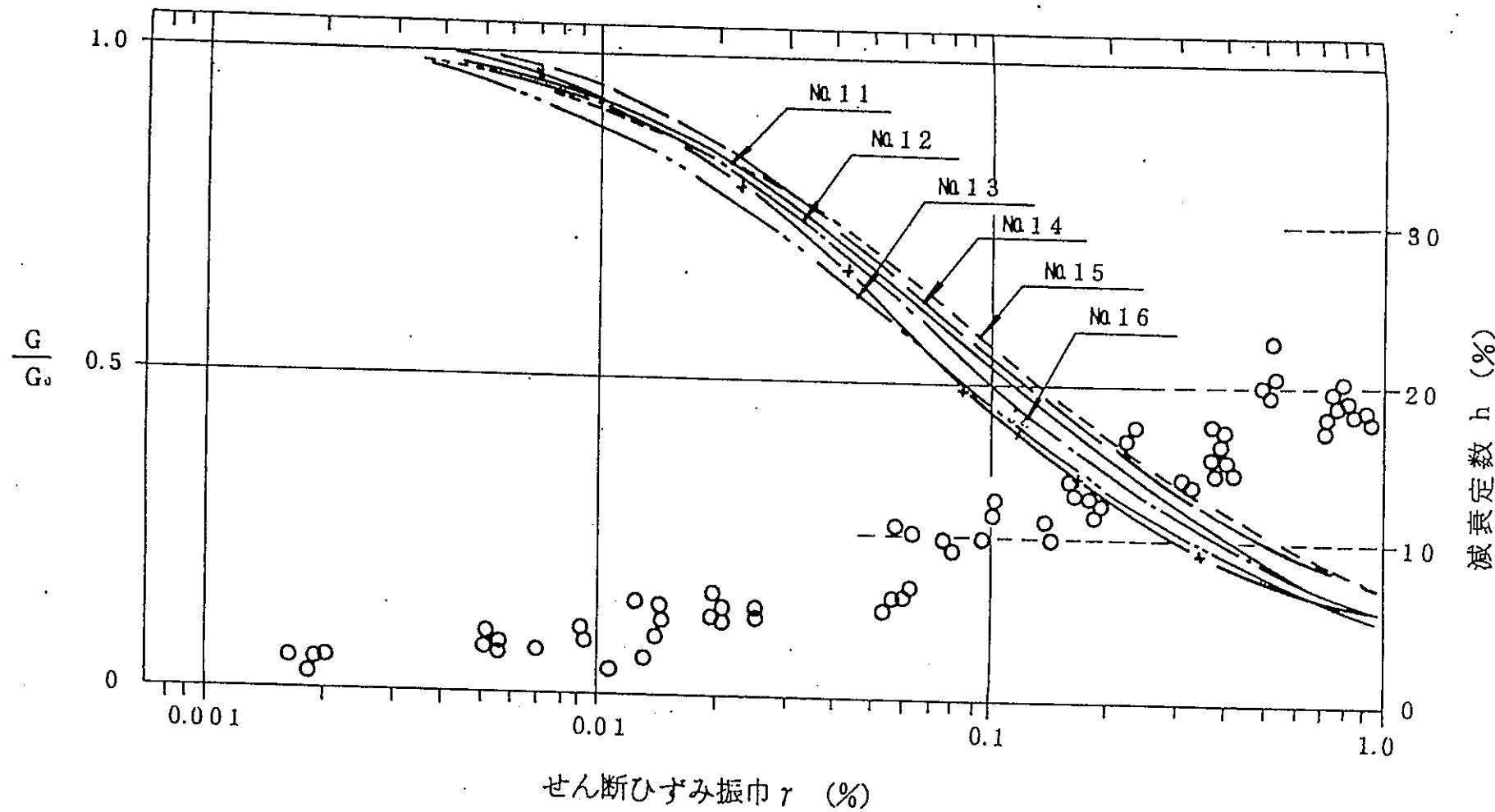


図-2.30 粘性土の試験結果例 (I)

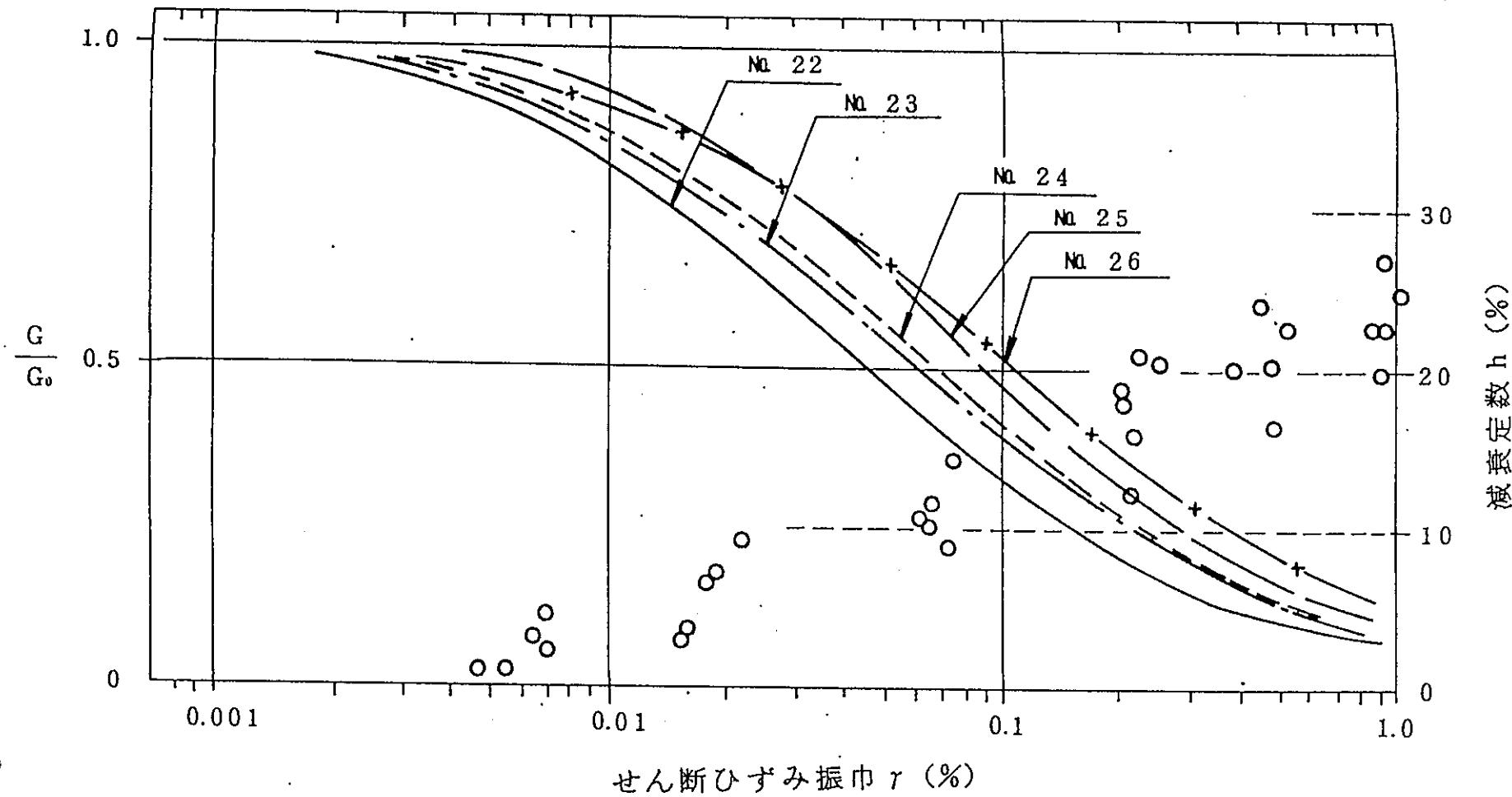


図-2.31 粘性土の試験結果例 (II)

### 2.5.3 $h_0$ 見直しによるR-Oモデルのフィティングについて

$h_0$ を20%としてR-Oモデルの $\alpha$ 、 $\beta$ を求め、試験値と近似させた結果の一例を図-2.32に示す。その結果、図-2.14のものに比較してかなりフィティングしていることが解る。

このため、 $h_0$ を20%としてR-Oモデルのフィティングを行うこととした。表-2.6に $h_0$ を20%として算定したR-Oモデルの $\alpha$ 、 $\beta$ の一覧を示す。

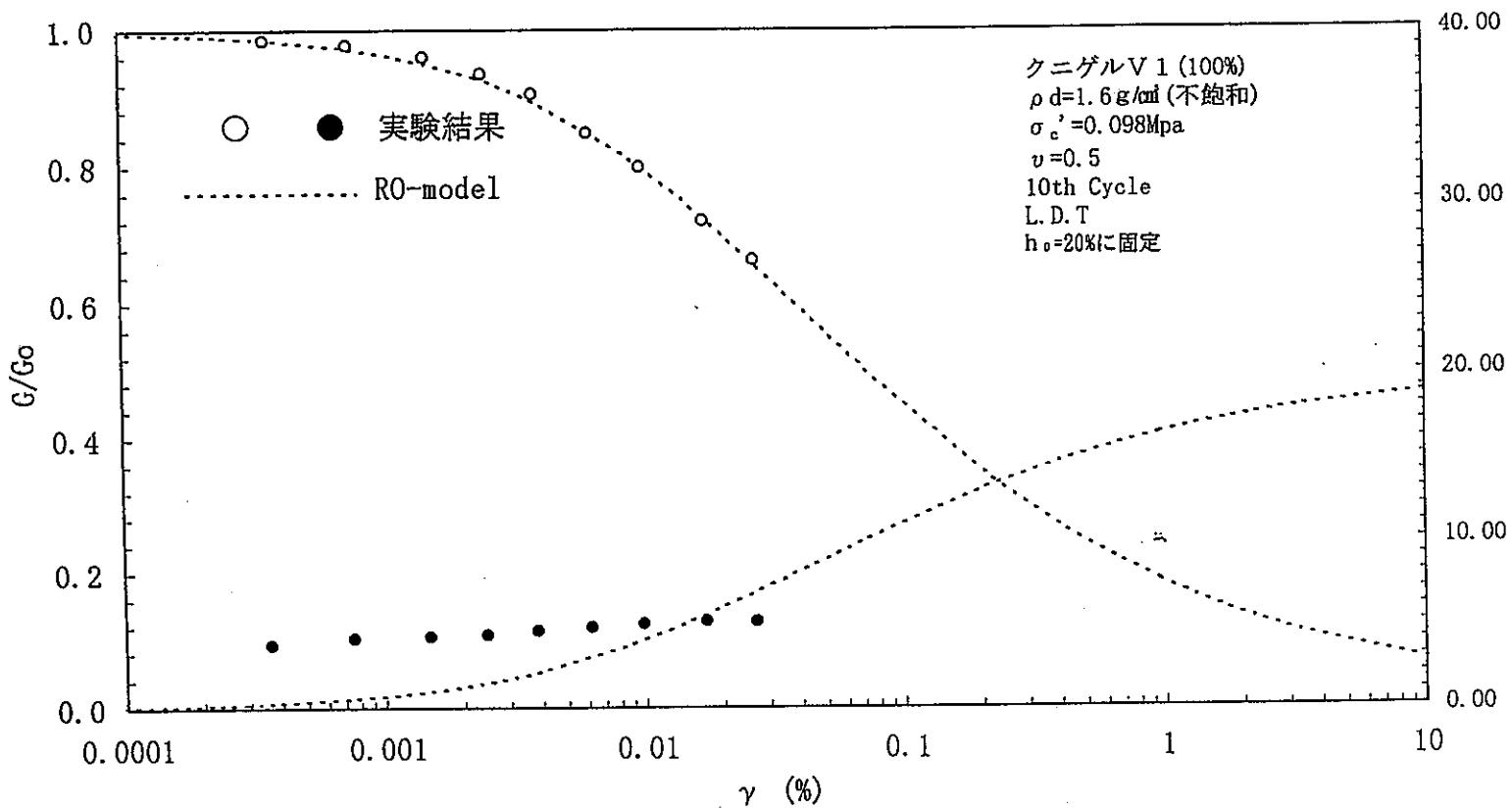


図-2.32  $h_0=20\%$ の  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  の関係  
(不飽和ペントナイト、 $\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$ , LDT,  $\sigma_c=0.1 \text{ MPa}$ )

表-2.6 R-Oモデルの $\alpha$ ,  $\beta$  (不飽和ベントナイト)

乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	圧密応力 MPa	軸変位計	整理波数	$\alpha$	$\beta$
1.6	0.08	LDT	5	3.67	1.92
			10	1.80	1.92
	0.098	LDT	5	4.17	1.92
			10	4.17	1.92
	0.196	LDT	5	0.64	1.92
			10	0.61	1.92
	4.41	LDT	5	0.28	1.92
			10	0.34	1.92
1.8	0.08	LDT	5	2.30	1.92
			10	2.42	1.92
	0.98	LDT	5	4.81	1.92
			10	5.19	1.92
	0.196	LDT	5	0.78	1.92
			10	0.78	1.92
	4.41	LDT	5	0.42	1.92
			10	0.57	1.92

\* G S : ギャップセンサー  
L D T : 局所変位計

## 参考文献

- 1)地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで、現場技術者のための土と基礎シリーズ 20, pp.70～73, 平成 5 年.
- 2)鹿島建設株式会社：T R U 廃棄物の処分概念の検討Ⅱ(動力炉・核燃料開発事業団研究内容報告書), 1997 年 3 月.
- 3)鹿島建設株式会社：圧縮固化ペントナイトの動的変形試験（動力炉・核燃料開発事業団研究内容報告書), 1997 年 3 月.
- 4)Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), "Soil Moduli and Damping Factors and Dynamic Response Analysis" , Earthquake Eng. Res. Cen., Uni. of Cali. Berkeley, Cali., Report No.EERC 70-10.
- 5)Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972a), "Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects" , J. SMFD, Proc. ASCE, V.98, No.SM6, pp 603-624
- 6)Anderson, D. G. and Richart, F. E. Jr. (1976), "Effects of Straining on Shear Modulus of Clays" , J. GED, Proc. ASCE, v. 102, No. GT9, pp 975-987

### 3. 原位置試験検討

カナダA E C Lと動燃との共同研究として、A E C L地下研究施設において実施しているトンネルシーリング性能試験に係わる以下の技術的な検討を行った。各項目ごとに検討結果を示す。

#### 3.1 試験の概要<sup>1) 2) 3) 4) 5)</sup>

##### 3.1.1 試験全体の概要

原位置での処分坑道のシーリング性能試験（トンネルシーリング試験）はカナダA E C Lと動燃殿P N Cの共同研究として進められている。試験サイトは、カナダU R Lの420mレベルに新たに掘削した試験坑道での実施が予定されており（図-3.1），日本側の粘土系材料によるシーリング概念とカナダ側のコンクリートによるシーリング概念を並行して評価する計画になっている。

具体的には、水平に掘削された坑道にペントナイトブロックを積み上げたプラグと低発熱高流動コンクリートによるプラグの2つを設置し（図-3.1），これらのプラグの間の区間に注水を行う。フェーズ1（Pressure Test）では地下420mでの間隙水圧を想定して最大4 MPaまで水圧を上昇させ，その間のE D Z（Excavation Damage Zone）や周辺岩盤とプラグの境界部やプラグ内部の水の流れを観測する。フェーズ2（Thermal Test）では約85°Cの温水を注水する。

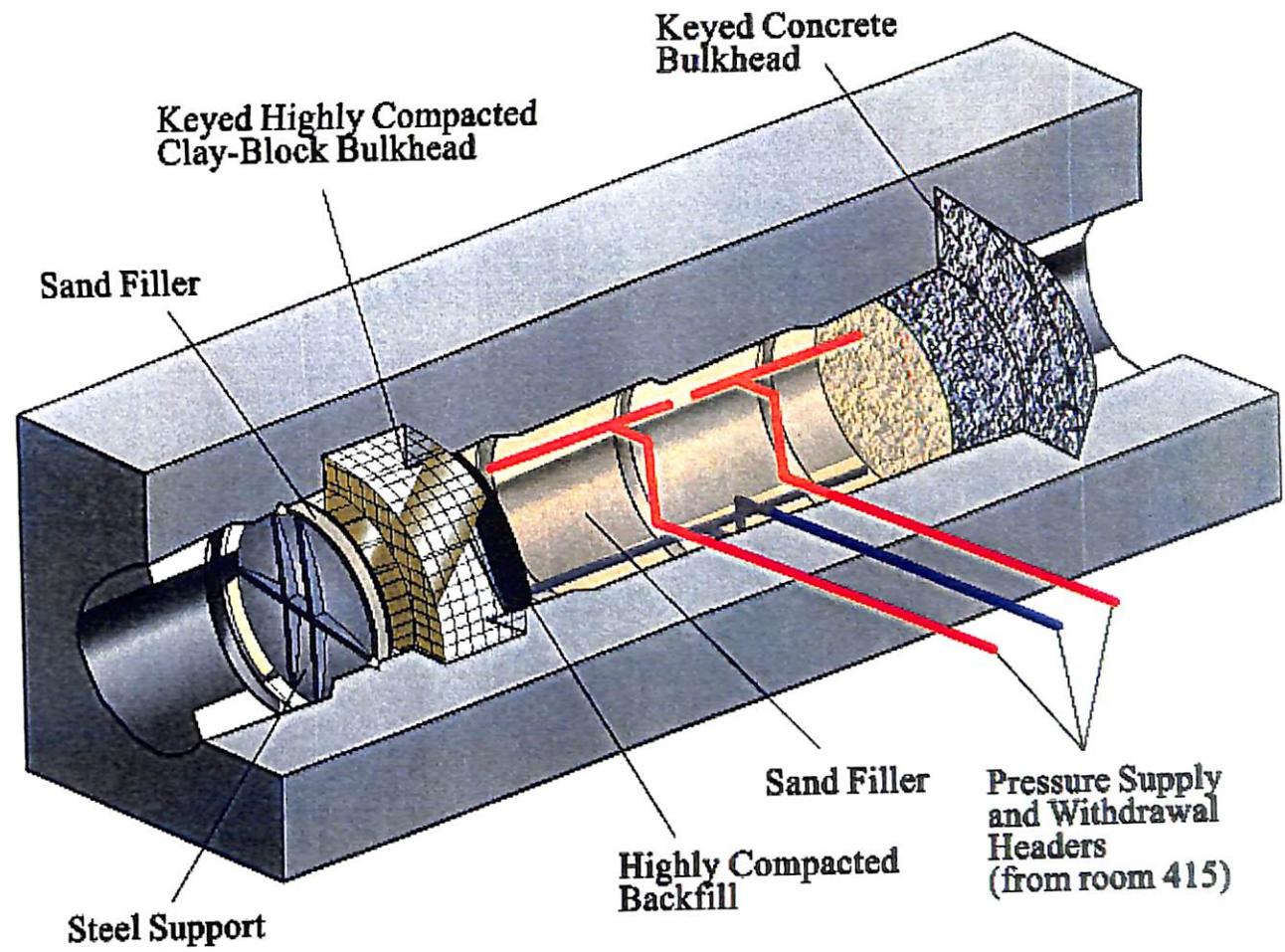
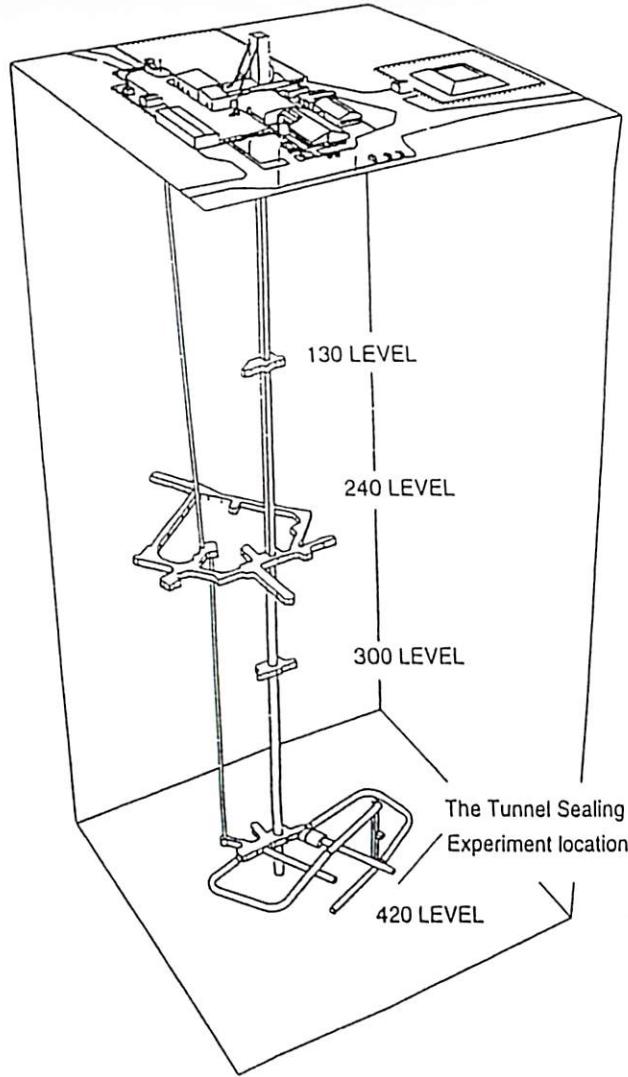
##### 3.1.2 試験坑道のレイアウト

試験坑道（Room425）のレイアウトについては、U R Lの420mレベルにおける地圧を考慮する必要がある。試験位置での地圧の特徴は、図-3.2に示すように最大主応力がほぼ水平方向を向いていることである。当初、カナダ側から中間主応力 $\sigma_2$ に平行な方向で橢円形の断面形状の試験坑道のレイアウトが提案された（図-3.2, 3.3, Experiment Arrangement 2）が、日本側の地層処分概念として橢円形状の処分坑道の可能性が小さいため、最大主応力 $\sigma_1$ に平行な方向で極力円形の断面形状に近づける試験坑道のレイアウトが日本側から提案された（図-3.2, 3.3, Experiment Arrangement 1）。協議の結果、試験坑道のレイアウトは図-3.4, 3.5に示すように、坑道長が40m、最大主応力 $\sigma_1$ （ $\sigma_1$ は $55\pm 5$  MPa,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ は各々 $48\pm 5$  MPaおよび $14\pm 1$  MPa）に平行な方向でアスペクト比1.25の断面形状の試験坑道が採用された。周辺のアクセストンネルは、メインレベルでRoom417, 423, 424が掘削され、上部レベルでRoom418, 419が、下部レベルでRoom421が掘削された。アクセストンネルの断面形状を図-3.6に示す。また、図-3.7は試験坑道付近の発破掘削実施、図-3.8には掘削結果による地質観察結果の概要を示す。

### 3.1.3 全体工程

トンネルシーリング試験の全体工程を図-3.9に示す。1998年1月から2年間フェーズ1についての試験が行われ、2000年1月から2年間フェーズ2についての試験が行われる予定である。アクセストンネル、試験坑道の掘削を1997年3月までに完了し、その後9ヶ月間でプラグの拡幅、プラグの設置、注水装置の設置、注水チャンバー内の埋め戻し等を実施する。

図-3.10に全体の施工の詳細手順を示す。プラグサポート、ベントナイトプラグの設置、注水装置の設置（ベントナイトプラグと同時施工）、埋め戻し（ベントナイトプラグと同時施工）、コンクリートプラグの設置の順に施工を行う。鉄板のプラグサポートをベントナイトプラグ施工上の型枠として利用するため、これを最初に設置する必要があり、そのためコンクリートプラグを最後に施工する手順になっている。粘土グラウト用の設備に関しては、注入用のボーリング孔の削孔と配管の設置をベントナイトプラグの設置前に行う。



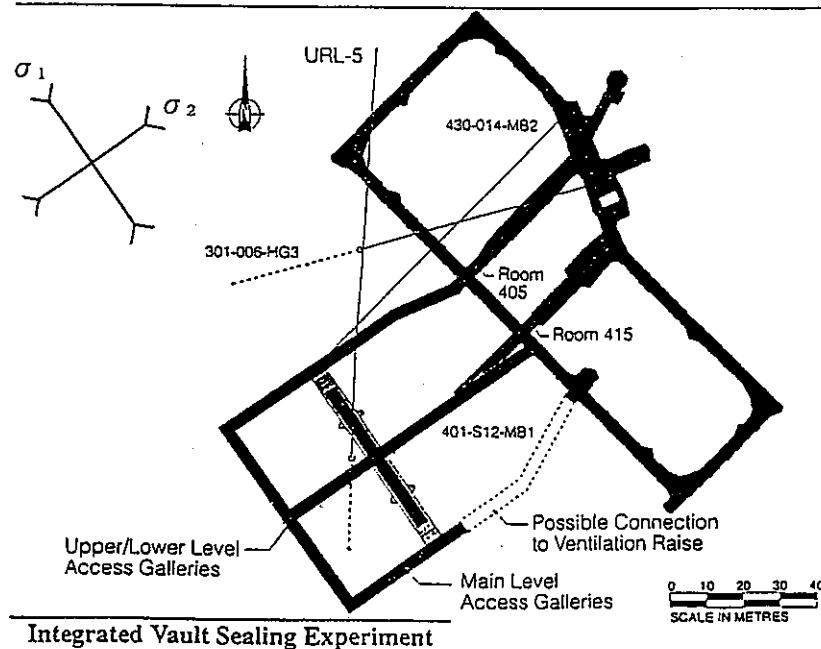
URLレイアウト

トンネルシーリング試験

図-3.1 試験の概要

Stress Components	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Magnitude (MPa)	$55 \pm 5$	$48 \pm 5$	$14 \pm 1$
Trend ( $^{\circ}$ )	$135 \pm 10$	$044 \pm 10$	$290 \pm 25$
Plunge ( $^{\circ}$ )	$10 \pm 5$	$05 \pm 5$	$79 \pm 5$
Stress Ratios	$\sigma_1/\sigma_2$	$\sigma_1/\sigma_3$	$\sigma_2/\sigma_3$
	$1.15 \pm 0.1$	$3.93 \pm 0.5$	$3.43 \pm 0.5$

## Experiment Arrangement 1



## Experiment Arrangement 2

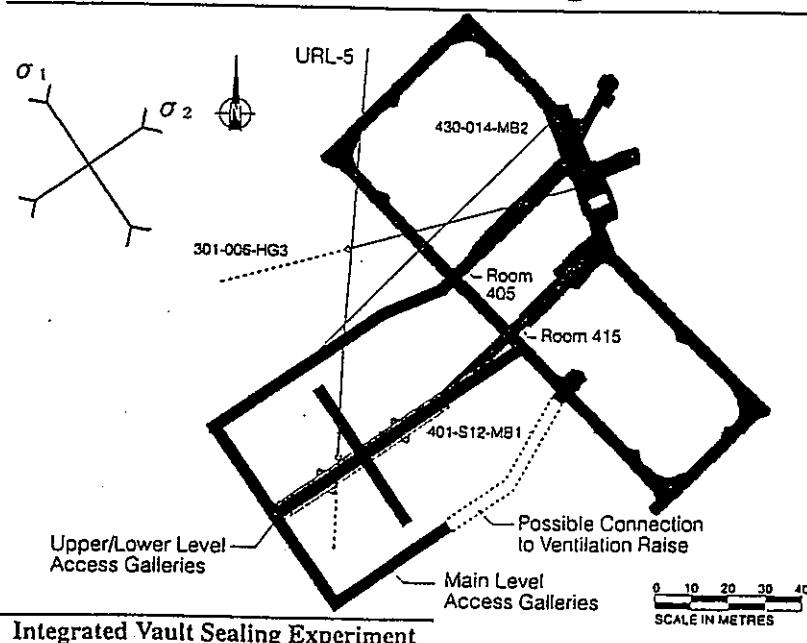
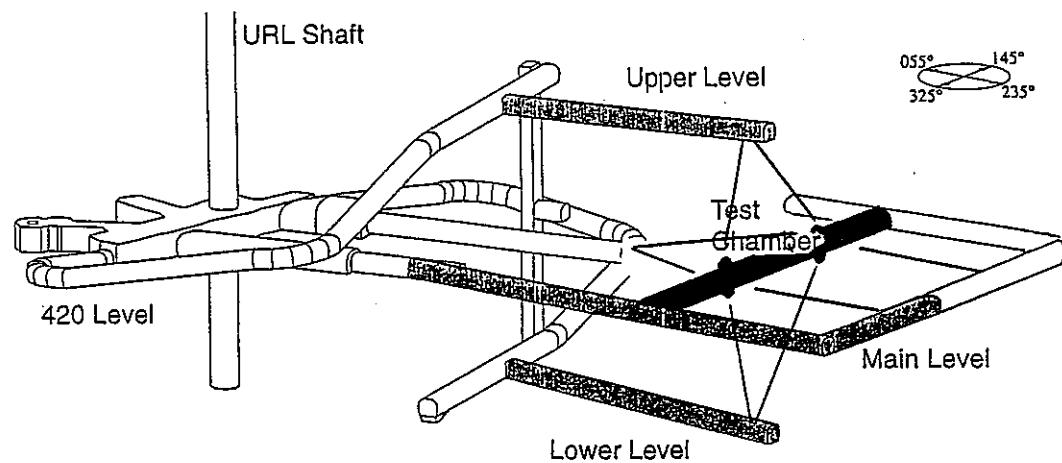
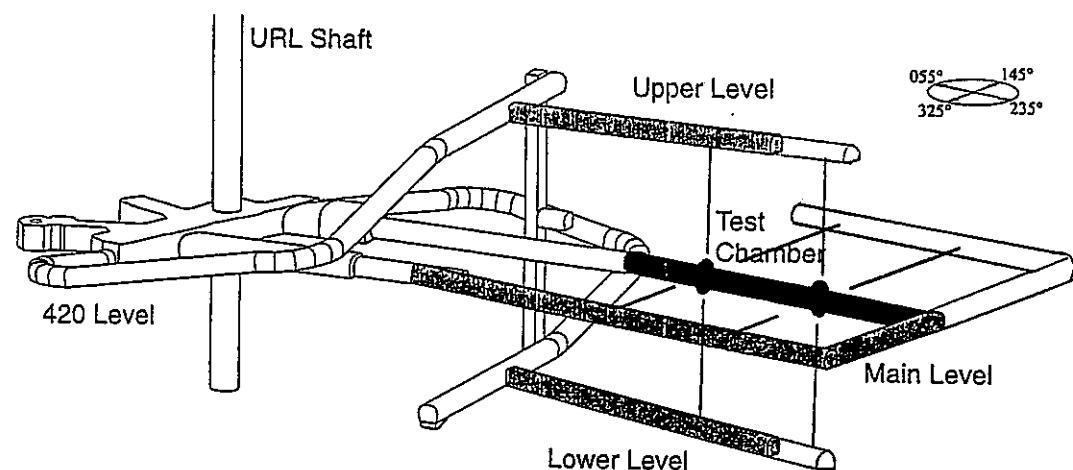


図-3.2 試験レイアウト（当初計画）

## Experiment Arrangement 1



## Experiment Arrangement 2



● : Plug

| : Measurement Boring

図-3.3 試験位置の鳥かん図（当初計画）

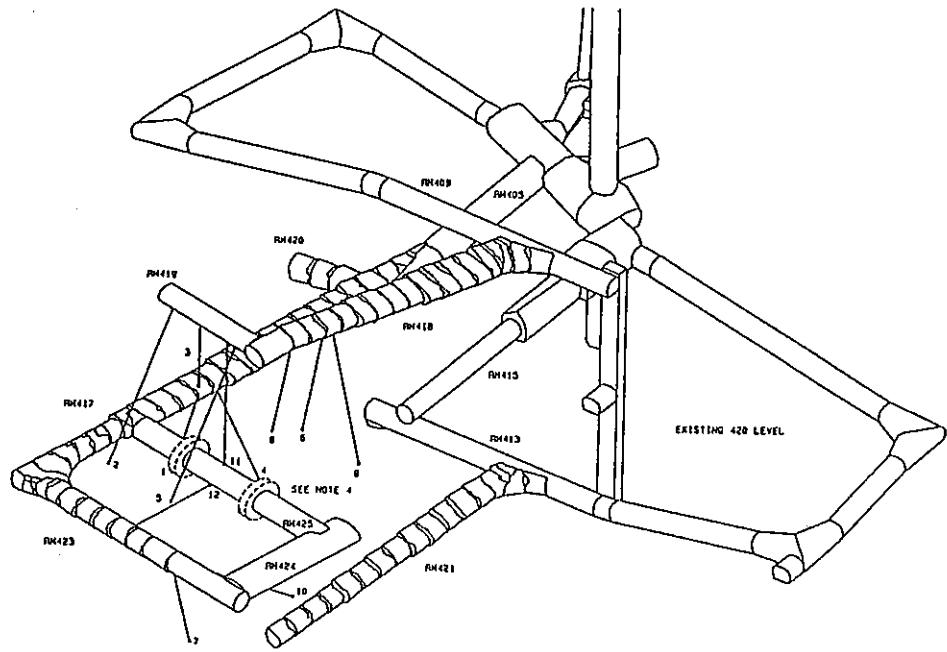
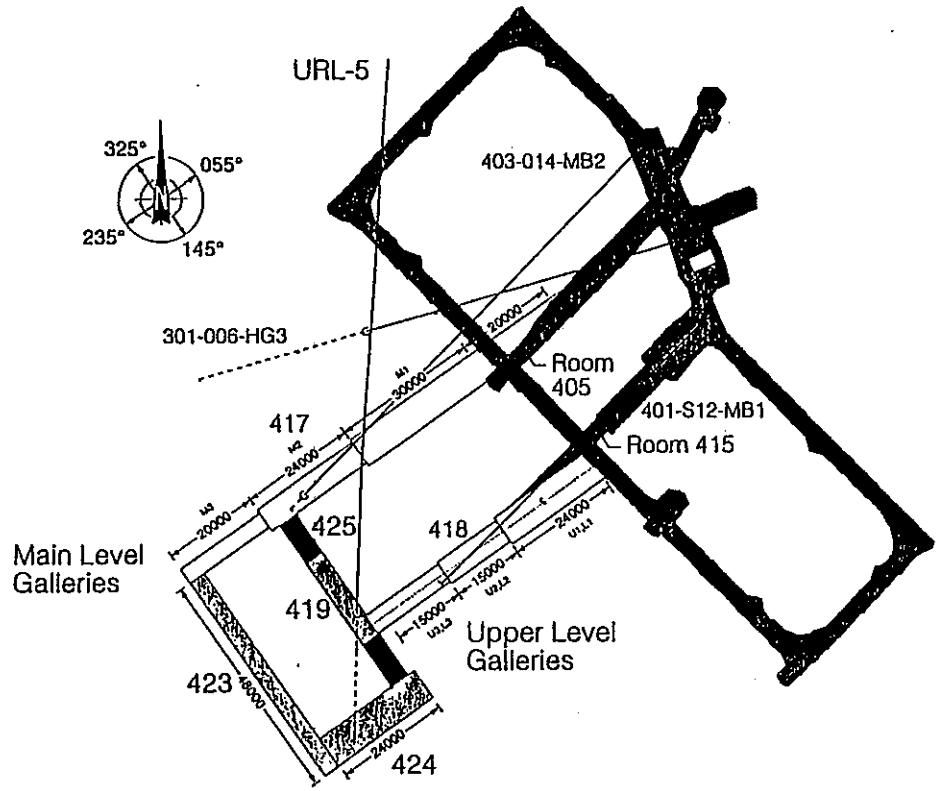
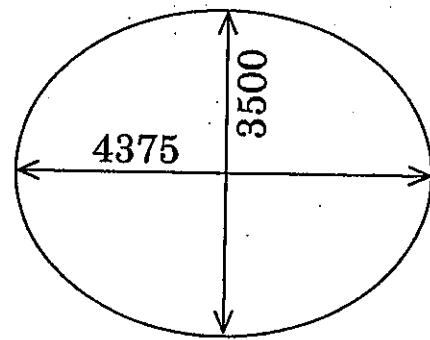


図-3.4 420mレベル試験坑道周辺のレイアウト



Room425

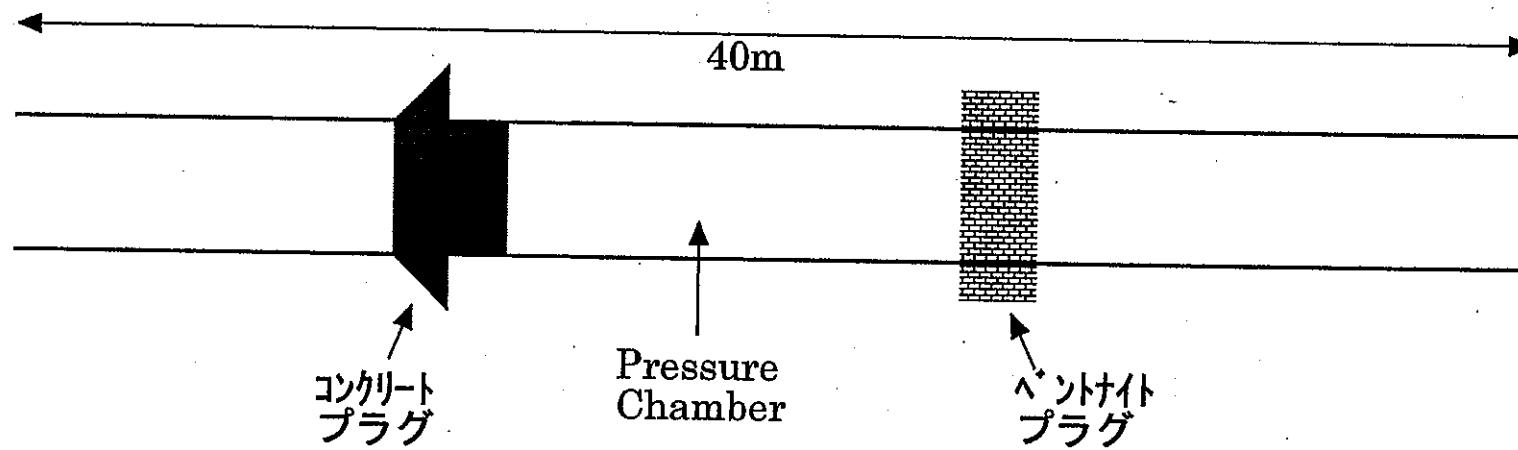
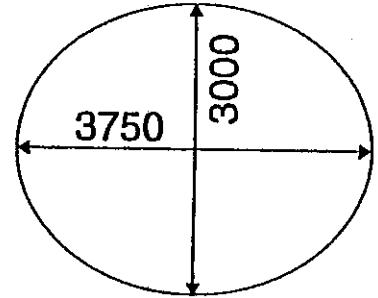
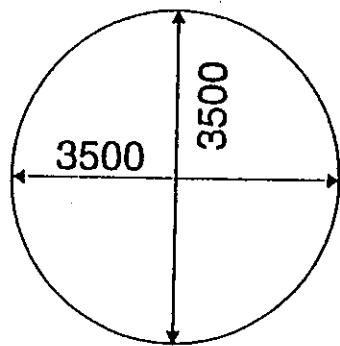


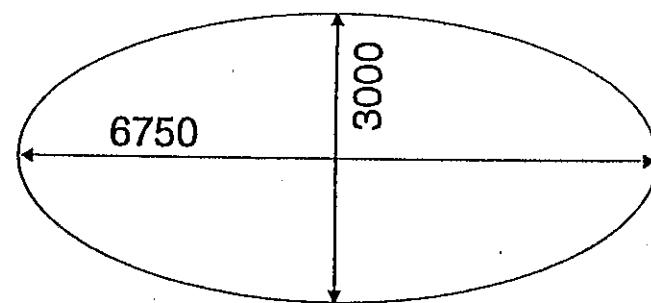
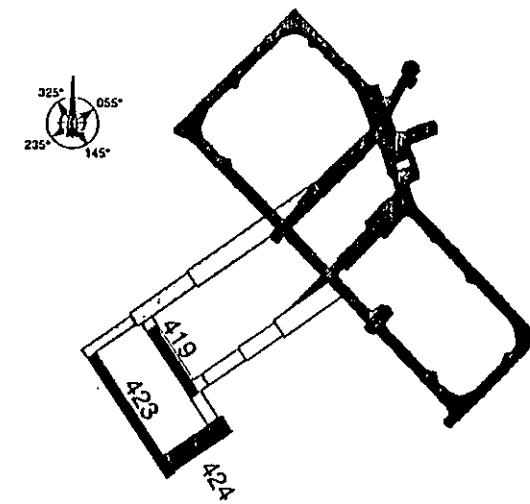
図-3.5 試験坑道のレイアウト



Room 419

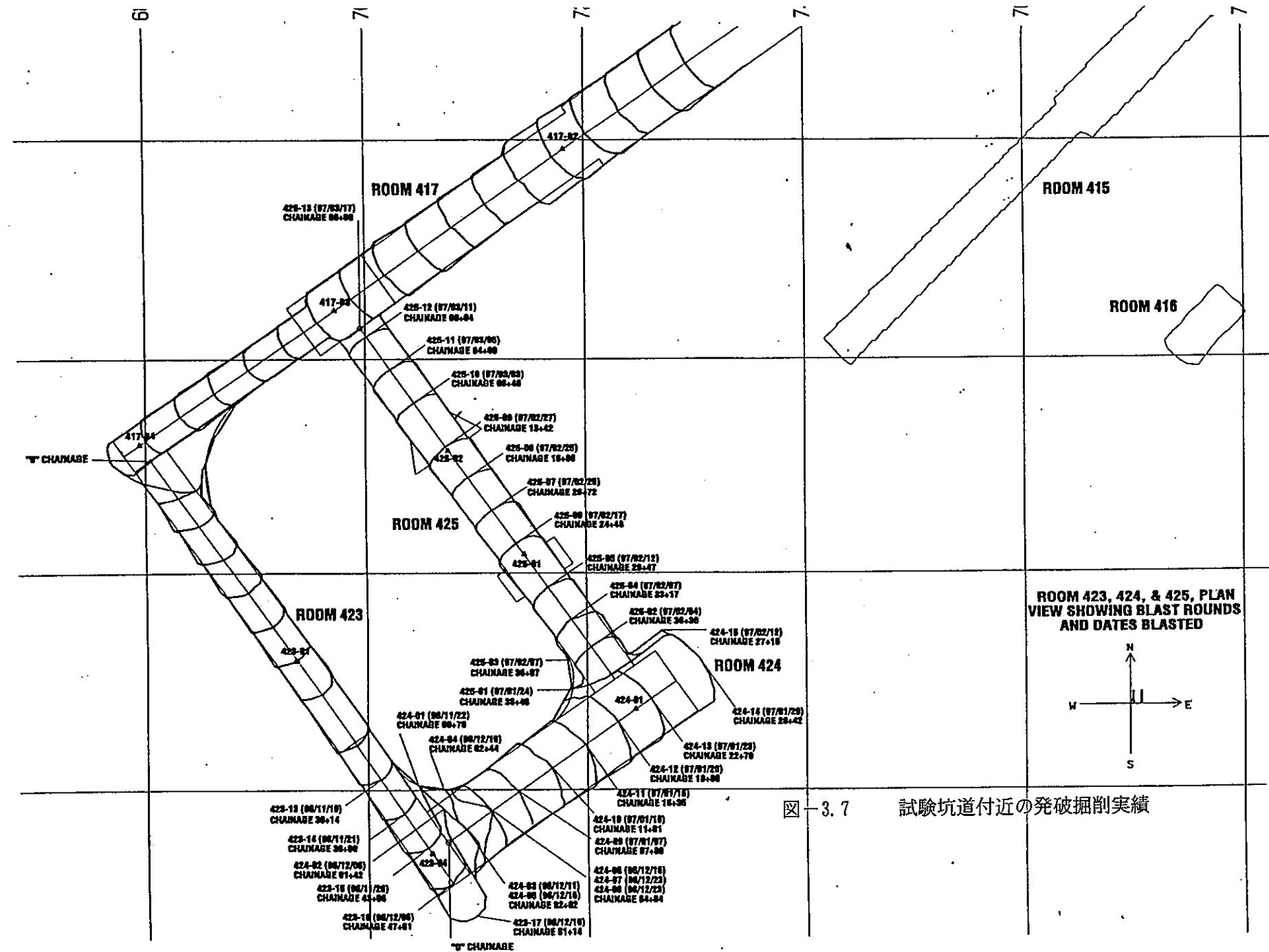


Room 423



Room 424

図-3.6 アクセストンネルの形状



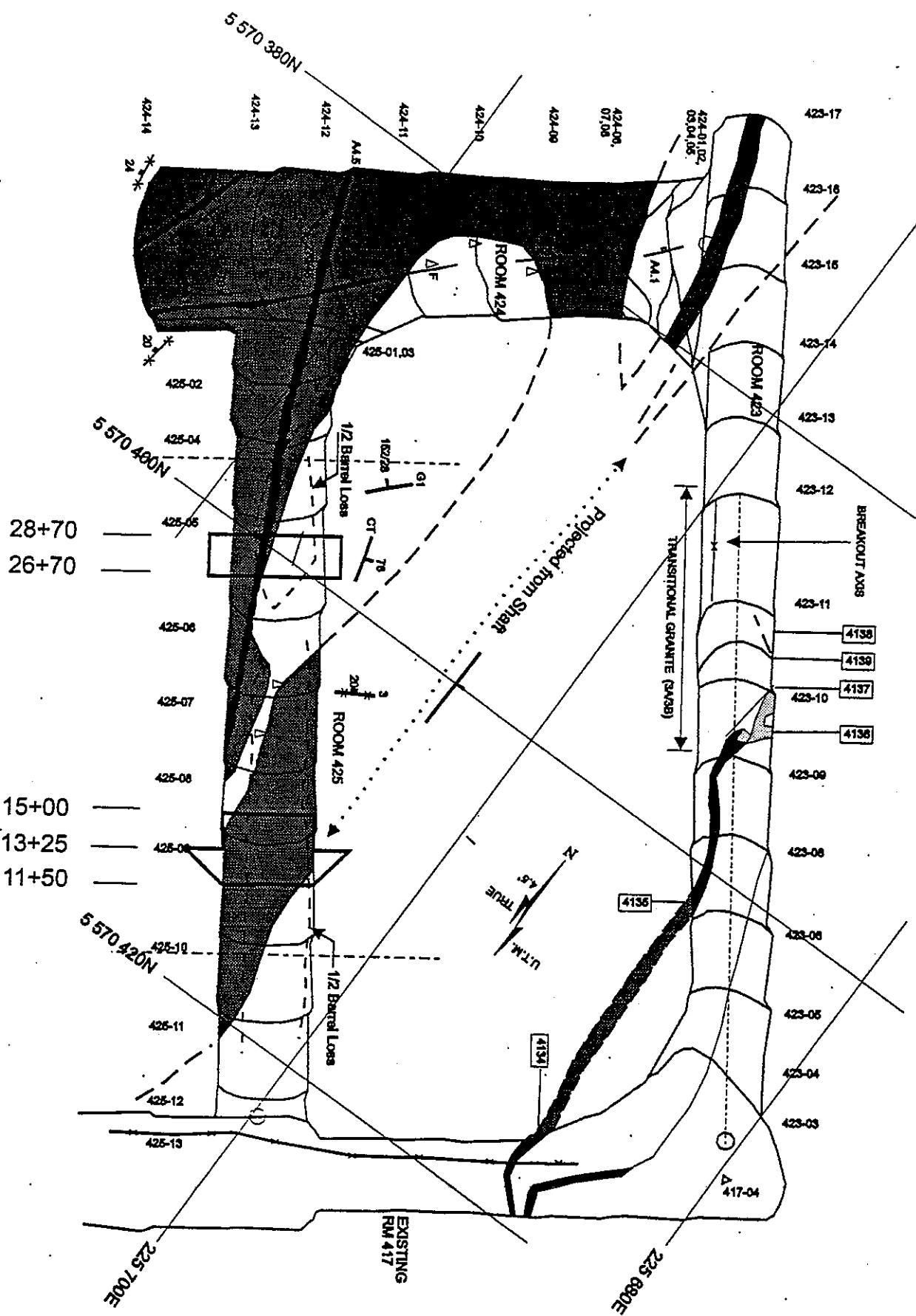


図-3.8 試験坑道付近の地質概要

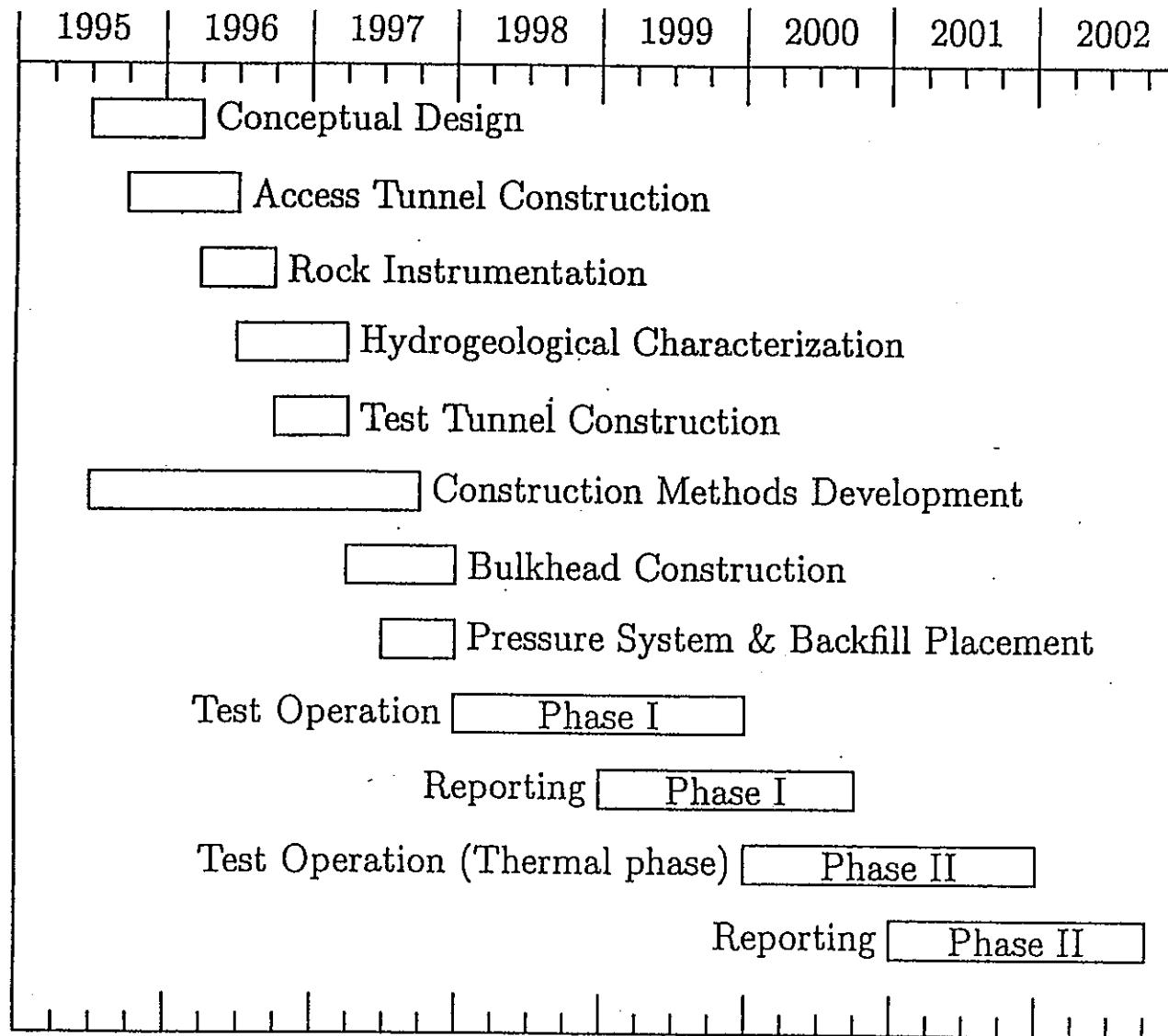


図-3.9 トンネルシーリング試験のスケジュール

		95	96 年	97 年	98 年	備 考
1. 挖削作業	アクセストンネルの掘削		[■]			
	アクセストンネルの掘削（継続）			[■]		
	試験トンネルの掘削			[■]		
	ペントナイトKeyの拡幅			[■]	[■]	
	コンクリートKeyの拡幅			[■]	[■]	
2. Hydrogeology (水理特性調査)	削孔			[■]		
	パッカー設置		[■]	[■]		その後計測中
3. Characterization (周辺岩盤特性調査)	削孔		[■]	[■]		
	パッカー設置		[■]	[■]		
	計測		[■]	[■]	[■]	計器設置後、注水中も実施
4. ペントナイトグラウト	注入孔削孔				[■]	
	グラウト注入				[■]	
5. ペントナイトプラグの設置	ペントナイトブロックの作成				[■]	
	試験トンネル底盤部まで設置				[■]	
	設置再開				[■]	
	計器の埋設				[■]	
	計器の埋設（継続）				[■]	周辺岩盤部へは10月中
6. 注水システムの設置	流出防止層（Backfill）の施工				[■]	
	注水用ボーリング孔の削孔			[■]		
	注水システムの設置				[■]	
7. スチールサポートの設置					[■]	
8. 注水チャンバーの埋戻し					[■]	
9. コンクリートプラグの設置					[■]	
10. 注水試験					[■]	98年7月開始
11. テストKey (Room419) での Activity	Room419の掘削			[■]		
	MVP計測孔の削孔、計測					
	試験keyの掘削			[■]		
	拡幅後のMVP計測			[■]		
	試験ペントナイトグラウト			[■]		
	試験ペントナイトブロック設置				[■]	
12. その他	ペントナイトブロック作成試験			[■]		
	Clay Sealing Simulation			[■]	[■]	
	Connected K Test			[■]	[■]	

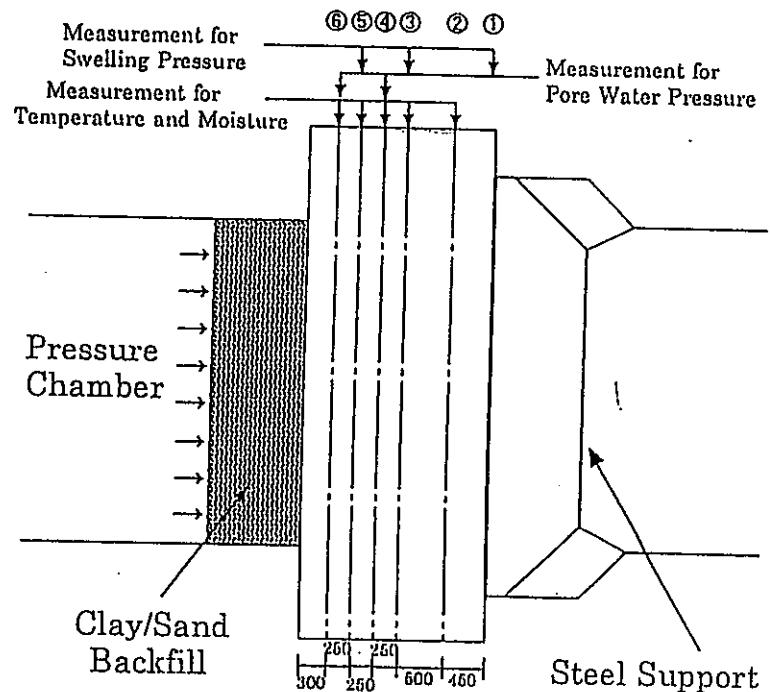
図-3.10 トンネルシーリング試験の詳細スケジュール

### 3.2 計測項目、計測機器の配置

1997年4～5月時点ではA E C Lに対し、図-3.11および表-3.1に示すように、ベントナイトプラグへの浸潤に時間を要することを勘案し、注入チャンバーから近いベントナイトプラグ部に埋設センサーを多く配置することを提案した。しかしながら、最終的には5～6月時点で共同研究に参加している4ヶ国での協議の結果、図-3.12～3.14に示すように、ベントナイトプラグ中に均等に配置することが決定された。

Appendix-Iに最終的な計器の埋設仕様を示す。

# ARRANGEMENT OF INSTRUMENTS FOR BENTONITE PLUG



## Measuring Sections

UNIT : mm

- Legend :
- Thermo-couple Psychrometer
  - Earth Pressure Cell  
(Radius Direction)
  - ▲ Piezometer
  - Earth Pressure Cell  
(Axis Direction)

図-3.11 プラグ断面ごとの埋設計器配置

表-3.1 ベントナイトプラグ中の埋設計器  
**INSTRUMENTS FOR BENTONITE PLUG**

Instruments	Sect. ①	Sect. ②	Sect. ③	Sect. ④	Sect. ⑤	Sect. ⑥	Total
Thermocouple Psychrometer		2 1	2 5	2 5	2 5	2 5	1 2 1
Piezometer				4		4	8
Earth Pressure Cell (Radius Direction)	4		4		4		1 2
Earth Pressure Cell (Axis Direction)	4		2		2		8
Total	8	2 1	3 1	2 9	3 1	2 9	1 4 9

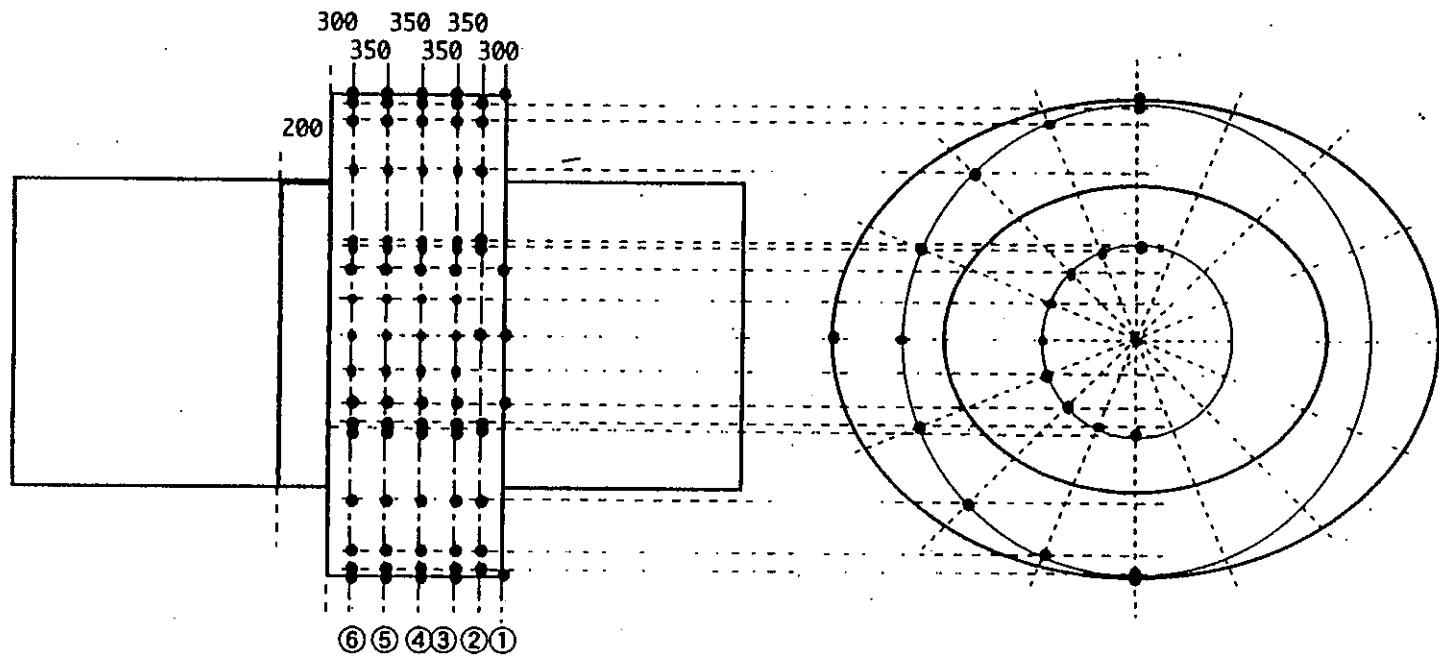


図-3.12 プラグ埋設計器の最終レイアウト

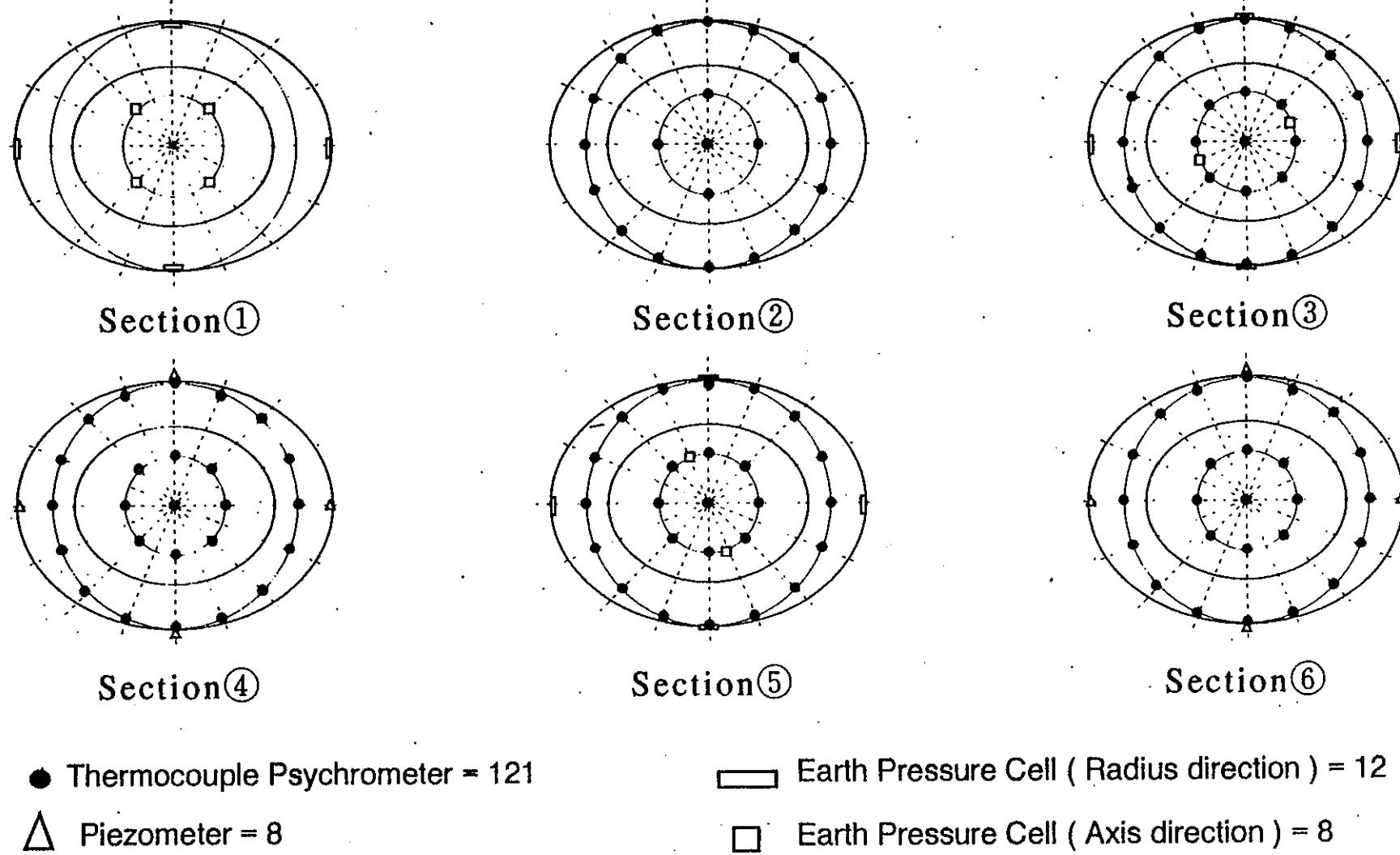


図-3.13 プラグ断面ごとの埋設設計器配置（最終レイアウト）

### 3.3 ベントナイトブロックの施工

ベントナイトブロックの施工に関しては、関連する範囲が広いため、下記の3項目に分類して整理を行った。

- (1) ベントナイトプラグ部の施工およびベントナイトブロックの品質管理について
- (2) 流出防止層および埋戻し材料について
- (3) スティールサポートについて

上記の各項目ごとに検討結果を以下に示す。

#### 3.3.1 ベントナイトブロックの施工

1997年4月時点でのA E C Lへの要望事項を以下に示す。

##### (1) 本施工について

###### 1) プラグ形状について

キー（拡幅部）の幅が2mであり、その上流側（チャンバー側）に0.7m、下流側に0.3mのエクステンションは持たせない。また、ベントナイトブロックからなるプラグが水の浸潤に伴い一体化し、プラグ効果を評価するまでのデータを取得するためには、できるだけ早くプラグに水が接触する必要があるため、限られた試験期間を考え、エクステンションなしの形状を選択する。シーリングシステム全体を評価する場合、シンプルな形状の方が望ましい。また、現状のシーリングシステムにおいては、エクステンションなしのプラグを考えている上、経済性の観点からもベントナイト使用量を少なくする方がよい。もし、エクステンションなしのプラグで不具合が生じた場合（岩盤接触部において、ベントナイトのせん断破壊等）、その後のコンセプトにおいてエクステンションを考慮することが可能である。

###### 2) プラグ幅

ベントナイトブロックの施工期間を長くとることで原位置試験での注水期間を極端に短くしないこと、およびプラグ長が短いという難しい条件下での施工を勘案して2mとする。

###### 3) 施工順序

ベントナイトブロック間の隙間を極力少なくし、水圧（4 MPa）作用時の力学的安定性を保つために、下記手順とする（図-3.14参照）。

プラグサポート（スティール・サポート）\* → 埋戻し材の施工性能試験  
→ ベントナイトブロック積み上げ（センサーの埋設と併行）\*\*

\*：ベントナイトブロック中に埋設するセンサーのケーブルを引き出すための穴をセンサー位置に合わせて開けておく。

\* \* : 別の場所でのテスト・バルクヘッドの建設時に施工方法を確認（テスト）しておく。また、スティールサポート側にはプラグ中の湿潤水を集水するためのテフロン・フィルターを設置する。

#### 4) ベントナイトブロックの密度

これまでのPNCでの研究方針に沿って  $\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$  としたい。ただし形成時の条件は自然含水状態であり、出来型の精度は  $1.0 \pm \%$  程度である。

カナダでのベントナイトブロックの試験的製作結果の情報を提供してもらう。

- ・製作時の含水状態
- ・角部の欠損の有無・程度
- ・成形後のひびわれの有無
- ・形成後の地下空洞内での保存方法（作成したブロックを実際に地下坑道で保存して、ブロックの膨潤状況を確認する。）

#### 5) プラグ拡幅部の施工方法

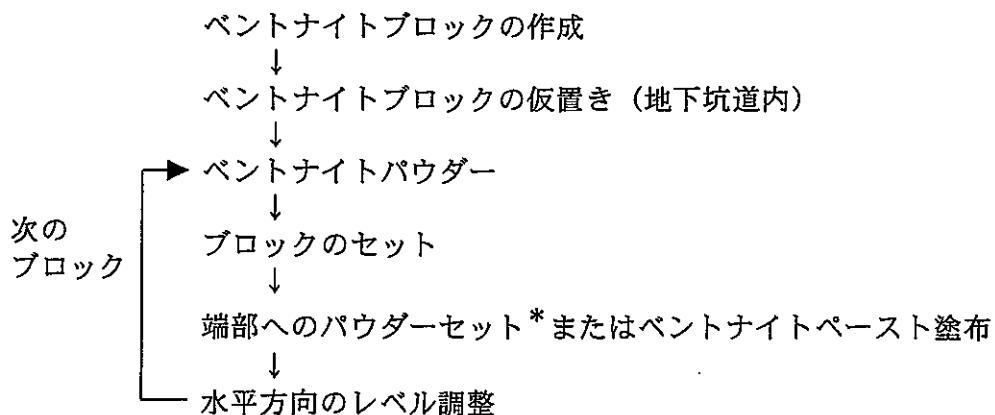
テスト・バルクヘッドにおける施工結果について情報を提供してもらう。特に岩盤表面の凹凸状況。

#### 6) ブロック間の隙間および岩盤境界部の処理

ブロック間の隙間および岩盤境界部にはベントナイト粉末を充填し、木槌等で締め固める。岩盤との境界部には必要に応じてベントナイトペーストを塗布する。

#### (2) テストバルクヘッドの試験施工について

- ・ベントナイトブロックの作成・保管・積み方の確認



\* : パウダーセットはベントナイト粉末を隙間に塗布し、木槌等で突き固める。

- ・サイクルタイムの計測
- ・本プラグの施工方法および全体工程への反映

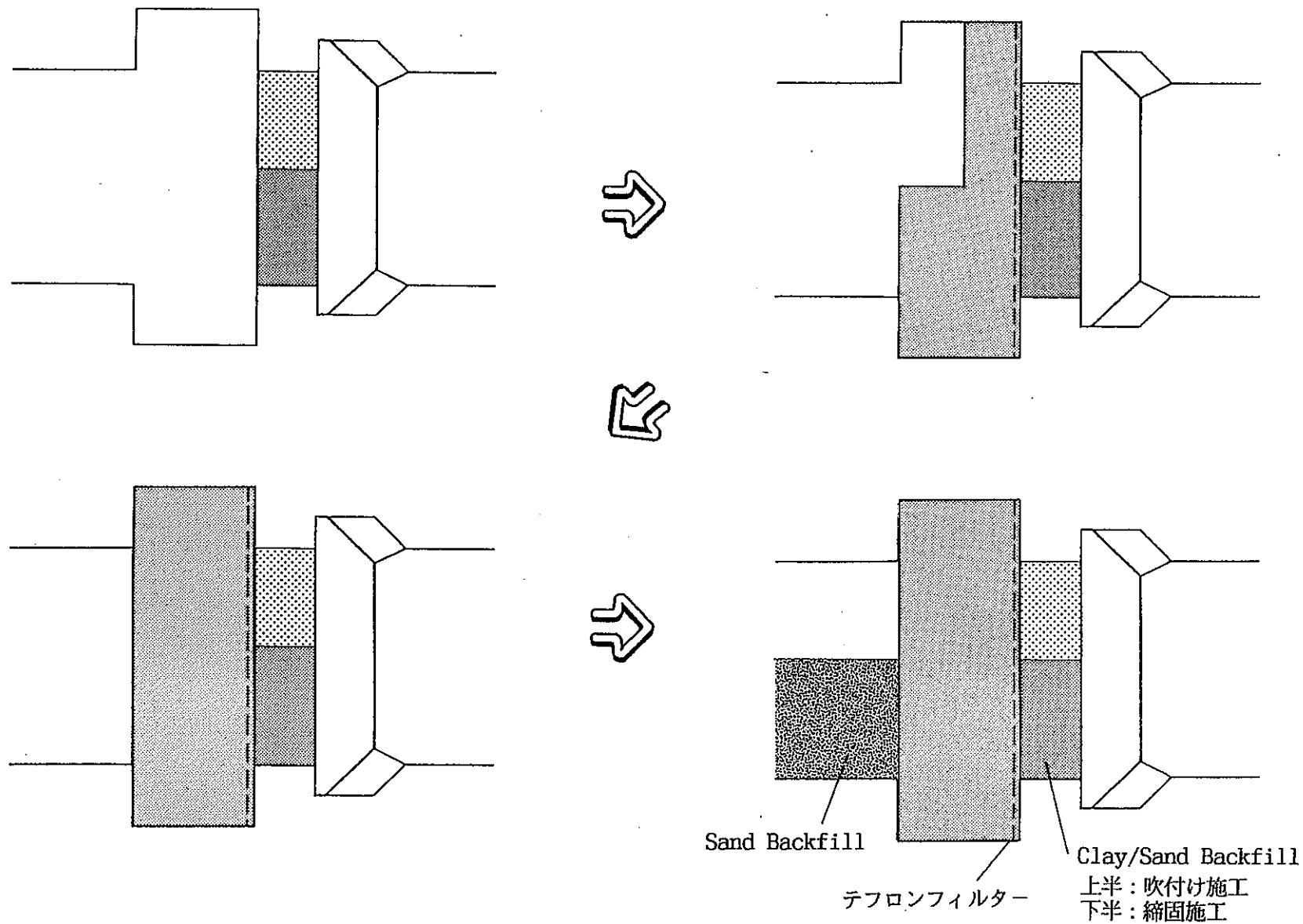


図-3.14 プラグの施工方法

### 3.3.2 流出防止層について

1997年4月時点のA E C Lへの要望事項を以下に示す。

#### (1) 本施工について

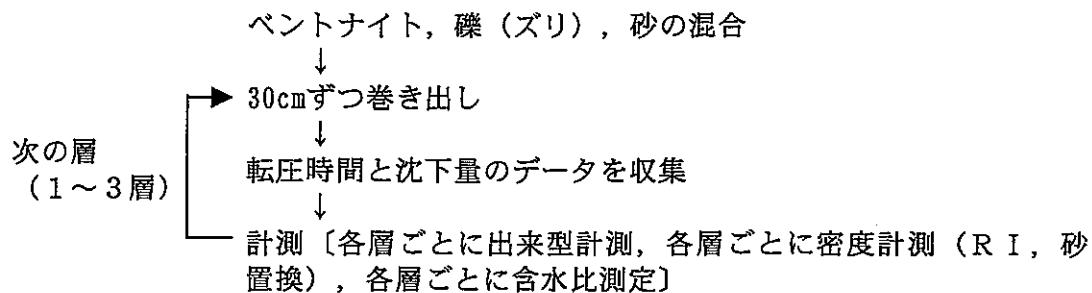
下半部はタンバーによる転圧施工を行い、内部に埋設した水分計によって水の湿潤状況を計測する。上半部は吹付け施工を行う。また、施工中に品質確認のためのサンプリングや密度、含水比測定を行う（R I, コアカッター）。埋戻し材の施工方法（締固め、吹付け）については事前に別の場所で確認（テスト）しておく。

埋戻し材の施工手順、埋戻し材の材料・配合、および埋戻し部の計測方法を図-3.15～図-3.17に示す。

#### (2) 埋戻し材の試験施工について

##### 1) 締固め施工試験（底盤1m×4m程度のエリア）

- ・締固め施工方法の確認



- ・本施工時の巻き出し厚、転圧管理項目の確認

- ・本試験への工程への反映

##### 2) 吹付け施工試験（坑壁1m×1m程度のエリア）

- ・吹付け施工方法の確認

ペントナイト、磯（ズリ）、砂の混合 → 50cm吹付け → コアカッターによるサンプリング

- ・サイクルタイム、ハネ返り率の計測

- ・本試験の工程、材料準備への反映

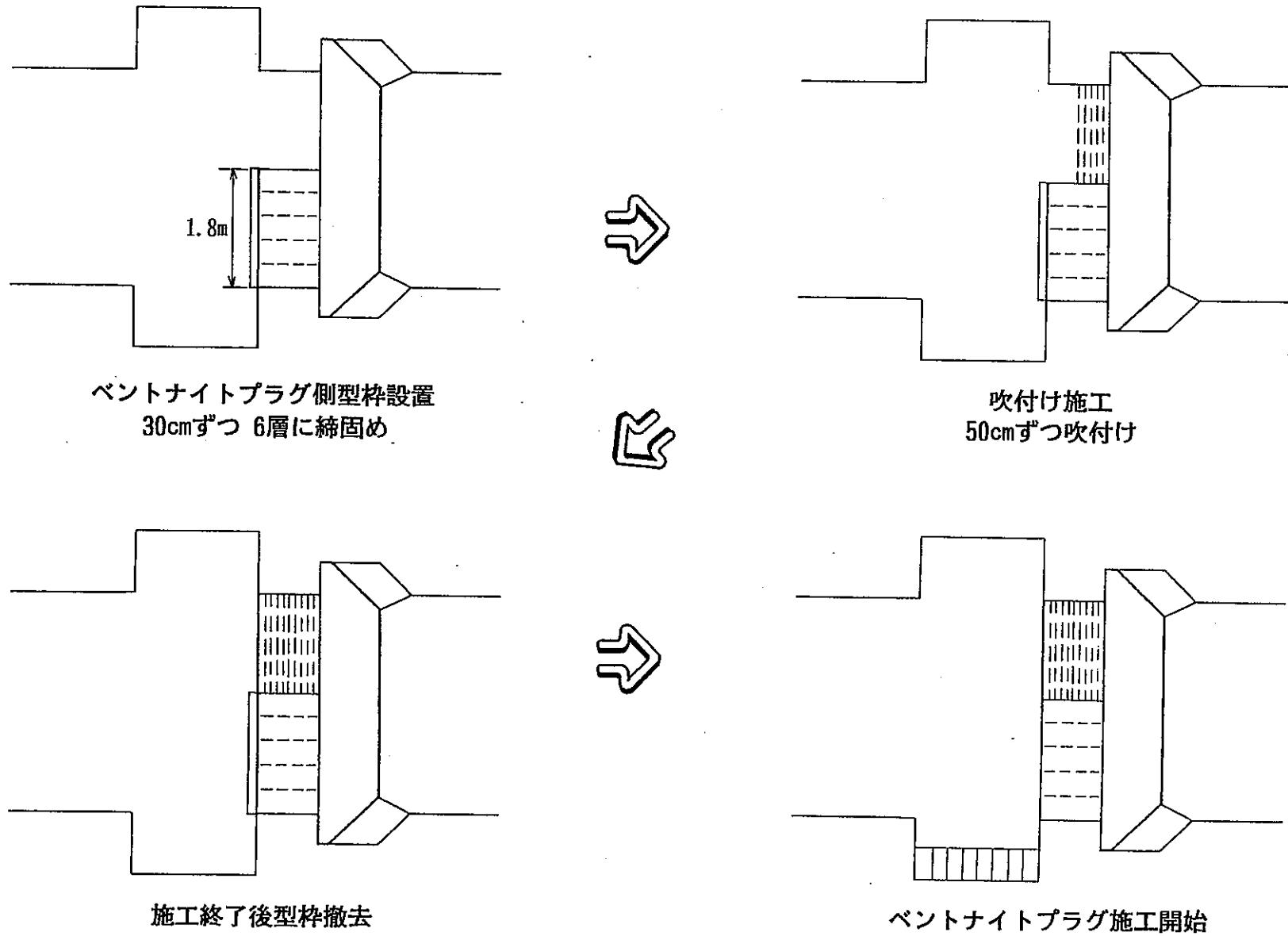


図-3.15 埋戻し施工手順

埋戻し材の材料・配合・施工方法（図-3.18、表-3.2参照）

材料・配合 ベントナイト：10% クニゲルV1  
礫（ズリ）：50% G<sub>max</sub>=13mm  
砂：40% 珪砂6号相当  
含水比w=10 (%)

必要量の試算結果

・ベントナイト  $75 \times 2 \times \frac{10\ (\%) }{70\ (\%) } \times \frac{1\ (m)}{2\ (m)} \doteq 10\ (t)$

$10 + 4\ (\text{試験施工分}) = 14\ (t)$

・礫 (G<sub>max</sub>=13mm)  $14 \times \frac{50}{15} \doteq 50\ (t)$

・砂  $14 \times \frac{35}{15} \doteq 30\ (t)$

施工方法

① 下半部：タンパーによる締固め

・高さ1.8mを30cmずつ巻き出して締固める（詳細は、試験施工結果に基づいて決定する）。

・計測項目：各層ごとに出来型測定

各層ごとに密度測定（R Iで13点、砂置き換えにより2点）

各層ごとに含水比測定

② 上半部：吹付け

・ベントナイトプラグ側から手前に向かって順次吹付けを行う。

・計測項目：吹付け厚50cm、100cmの際に撮影

吹付け厚50cm、100cmの時に密度測定1点ずつ（コアカッター）

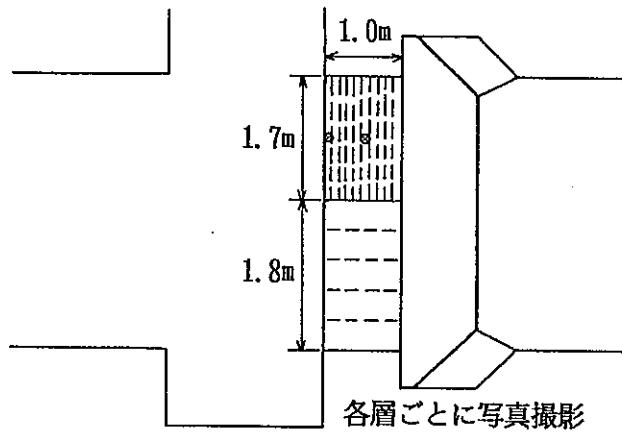
③ 型枠の撤去

施工終了後に型枠を撤去する。

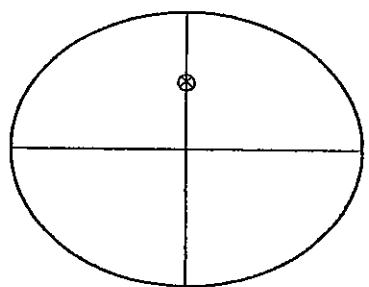
工 程

約1ヶ月

図-3.16 埋戻し材の材料・配合・施工方法



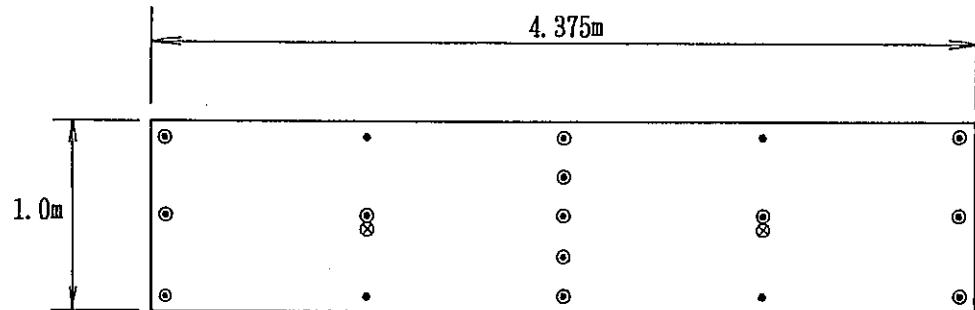
断面図（縦断）



◎ コアカッターによる  
密度測定(2点)

断面図（横断）

上半部  
(吹付け施工)



• 出来型の測定位置 (19点／層)

◎ コアカッターによる  
密度測定位置 (2点／層)

○ RI密度計及び含水比の  
測定位置 (15点／層)

平面図

下半部  
(締固め施工)

図-3.17 埋戻し部の計測方法

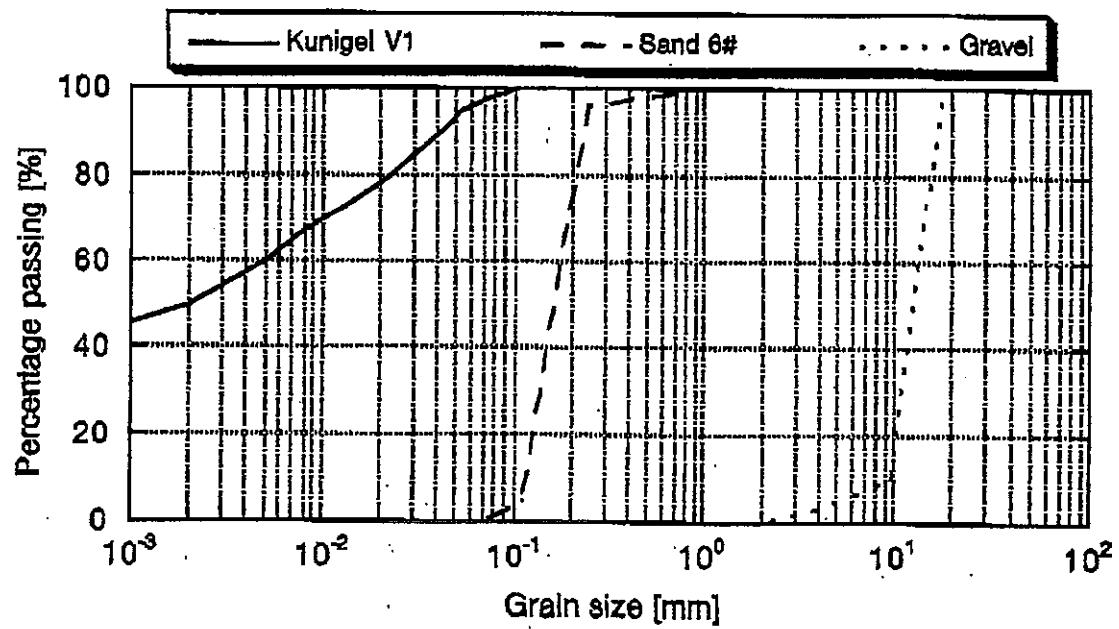


図-3.18 埋戻し材の粒度分布

表-3.2 埋戻し材使用材料

材 料	内 容	土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
礫 (G)	コンクリート用骨材 (G <sub>max</sub> =13mm)	2.664
砂 (S)	珪砂6号	2.680
ペントナイト (B)	クニゲルV1	2.736

### 3.3.3 スティール・サポートについて

1997年4月時点でのA E C Lへの要望事項を以下に示す。

- (1) Golderによる設計結果の提出依頼
- (2) スティール・サポート全体へのサビ止め塗布の依頼

さらに、1997年8月～9月時点でA E C Lから提案されたシェル形状のスティール・サポート（案）（Appendix-II参照）に対しては、各構造要素に対して検討を行った（Appendix-III参照）。その結果、下記のような検討、依頼を行った。

#### 1) 局部座屈について

Golderに設計計算をしてもらうよう依頼したが、返答が遅くなる可能性が懸念された。一方、縦方向に2つスティフナーを設置することは可能だということだったので、厳密な数値計算結果に基づいているわけではないが、現在、予定されているスティフナーと側壁のちょうど真ん中に、左右1つずつ縦方向に設置してもらうよう提案した。

#### 2) 支保コンクリートについて

掘り込みの違いは力学的に決定されたのではないので、コンクリートプラグとベントンライトプラグを同等に比較はできないようであった。具体的には、せん断の計算については、 $53\text{kgf/cm}^2$ となるところまでは同じだが、それを評価するコンクリート標準示方書にある $24\text{kgf/cm}^2$ が違うようである。A E C Lサイトは、コンクリートの強度は $600\text{kgf/cm}^2$ （たぶん実測値）でせん断強度はその半分で $300\text{kgf/cm}^2$ と考えており、そのため十分もつという結果になっている。

これに対して、せん断強度の $24\text{kgf/cm}^2$ という値は、地震の多いわが国の特徴が反映された設計値であり、具体的には、1923年の関東大震災をきっかけに、せん断破壊によると考えられる被害が多いとの観点から、諸外国に比べてせん断強度の安全率が徐々に大きくなり、現在のコンクリート標準示方書にある $24\text{kgf/cm}^2$ に至っている（1996年の阪神大震災の時にも、この設計値を採用した構造物での、せん断破壊による被害はなかった）。最近、コンクリート分野で、高強度（ $400\sim 450\text{kgf/cm}^2$ 以上）コンクリートに関する指針作成の動きもあるが、ここでも、現在のコンクリート標準示方書に準拠する形での議論が進められているようで、せん断強度が現行の $24\text{kgf/cm}^2$ に比べて飛躍的に大きな値として見直されることはない模様との検討結果を得た。

逆に、カナダやアメリカでの設計上のせん断強度の設定方法があると思われたので、どのような基準（日本のコンクリート標準示方書のようなもの）に照らして設定しているのかを教えてもらうよう依頼をしたが、明確な回答は得られなかった。

仮に、「コンクリートの強度は $600\text{kgf/cm}^2$ （たぶん実測値）でせん断強度はその半分で $300\text{kgf/cm}^2$ と考えています。」ということでも、 $300\text{kgf/cm}^2$ は強度なので、日本的な考え方では弾性域として約 $1/3$ の $100\text{kgf/cm}^2$ を採用することになると思われる。

したがって、安全率は約2（100／53）となり、この安全率が他の構造計算、具体的にはコンクリートプラグの構造計算での安全率と同程度なら日本サイドとしても納得のいくことだと判断される（コンクリートプラグとベントナイトプラグで安全率が大きく異なっているとしたら、これは構造上、問題があると考えられる）。

### 3) 岩盤のすべりについて

本体については、ロックボルトを掘り込みの外側25cmのトンネル周上の位置に、28本、深さ60cmで既に打つてあるとのことだった。これで大丈夫かどうかは、詳細な数値計算によるチェックをしていないのでyes/noについての判断はできないが、AEC-Lサイド（Golder）が、このロックボルトで岩盤のすべりについては安全だと考えている根拠（例えば、岩盤のすべりについての設計検討書）となる資料の提供を依頼したが、これについても明確な回答は得られなかった。

### 4) 座屈防止のスティフナーについて

スティフナーの追加については、AEC-L側のコメントとして「スティフナーを追加することはやぶさかではない。横方向に追加しなくていいのか？」という意見に対応して、「追加可能であれば、縦方向2本に加えて横方向2本もぜひ追加していただきたい」（横方向の荷重が卓越していることから）との検討結果を得た。

### 5) コンクリート部のせん断について

コンクリート部のせん断については、AEC-L側では「トンネル軸方向のコンクリートのせん断破壊に対する安全率は8.5」としているが、設計的には、こちら側の主張はあくまで「日本的に考えればもちろん」ということになった。日本式の考え方では、

- ・荷重を最も安全側にとっている（トンネル軸方向の支点反力をそのまま岩盤切り込み部分に作用するせん断力とみなしている）点
- ・日本の現状の基準では高強度コンクリート（圧縮強度40MPa以上）に対して常に $24\text{kgf/cm}^2$ 以上のせん断強度はみれないことになっているが、この設定自体が今回のコンクリート（圧縮強度60MPa）に対してある程度安全側であるともいえる点
- ・実際にはせん断力だけではなく、軸方向圧縮力も作用する2軸応力状態と想定され、このような場合にはせん断強度の増加が見込まれる点

等から、安全率が大きくなり、現実には「もつかもしれない」と言える。しかし「必ずもつ」と断言はできない。「コンクリート工学年次論文報告集」などの文献をみても、高強度コンクリートのせん断耐力に関する研究はなされており、せん断耐力の評価式が提案されてたりするが、これらとて

- ① オーソライズされたものではない

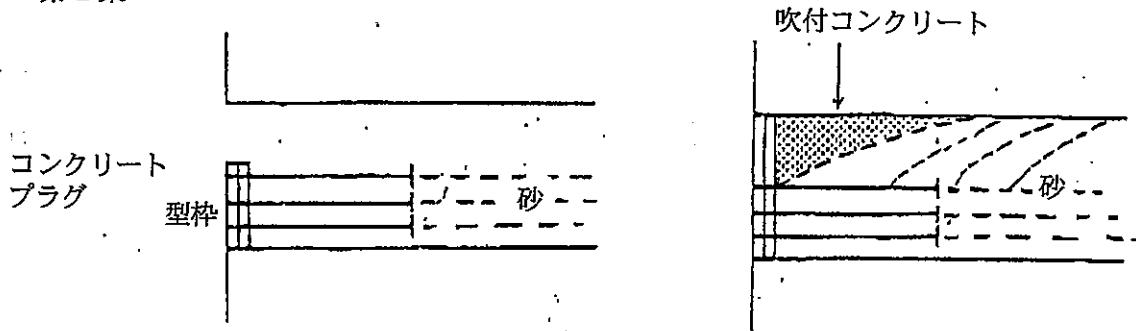
② 論文で扱っている対象構造物が典型的なRC柱やRC梁である（今回のような特殊な部材とは実験状況が違う）

ため、そのまま適用しうるとは判断しかねる。ただし、カナダ側と日本側の考え方で根本的に違うと思われるのは、「コンクリート中を伝わる荷重（応力）の向き」だとと思われた。これを日本側はせん断破壊に対して最も安全側に設定しており、一方、カナダ側は以前のチャンドラー氏のコメントに「せん断力を極力抑えるためにサポートの形状をアーチ型のシェルにしたのだから…云々」とあることから、荷重の伝播方向（主応力方向）はアーチ軸線延長上に設定しているものと推定された。この“コンクリート中の応力状態”について詳細に知るには、全体系を対象とした大がかりなスケールでのFEM解析を実施するなどして確認する必要があると判断された。

### 3.3.4 コンクリートプラグ側の型枠固定のためのアンカー設計

下記の2案が成立可能と考え、第1案が実現可能性大と判断した。

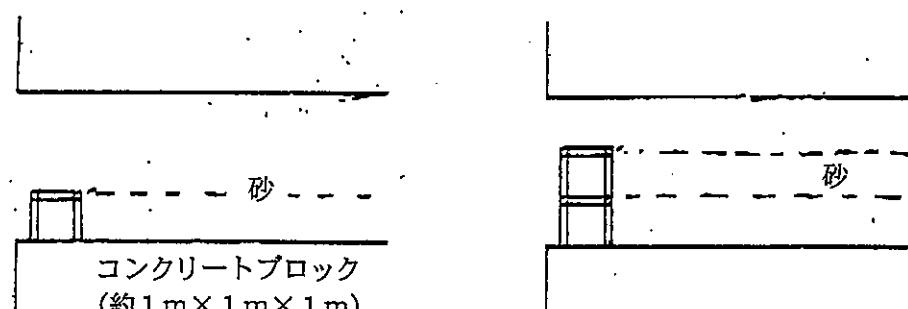
第1案



プレート付きアンカーを設置しておく  
(水圧がかかるように型枠は二重にしておく)

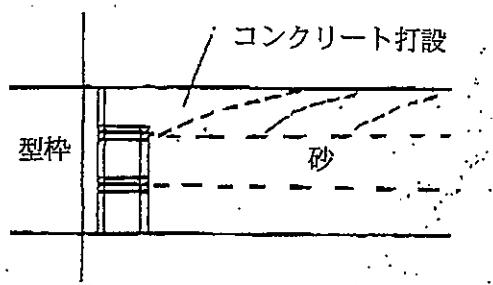
上部はコンクリートまたはシルトを  
吹付け、型枠をセットする

第2案



コンクリートブロック打設  
→ 砂の締め固めを順次行う

後で水圧を作用させるためブロックの  
型枠は付けたままにする



最後にもう一枚型枠をセットする

また、この時点での確認を依頼したベントナイトプラグの施工手順を図-3.19(1)～図-3.19(4)に示す。

さらに、最終的なベントナイトプラグのブロックレイアウトやベントナイトに関する物性試験結果、集水システムやスティールサポートとの関連等を図-3.20～3.24および表-3.3に示す。

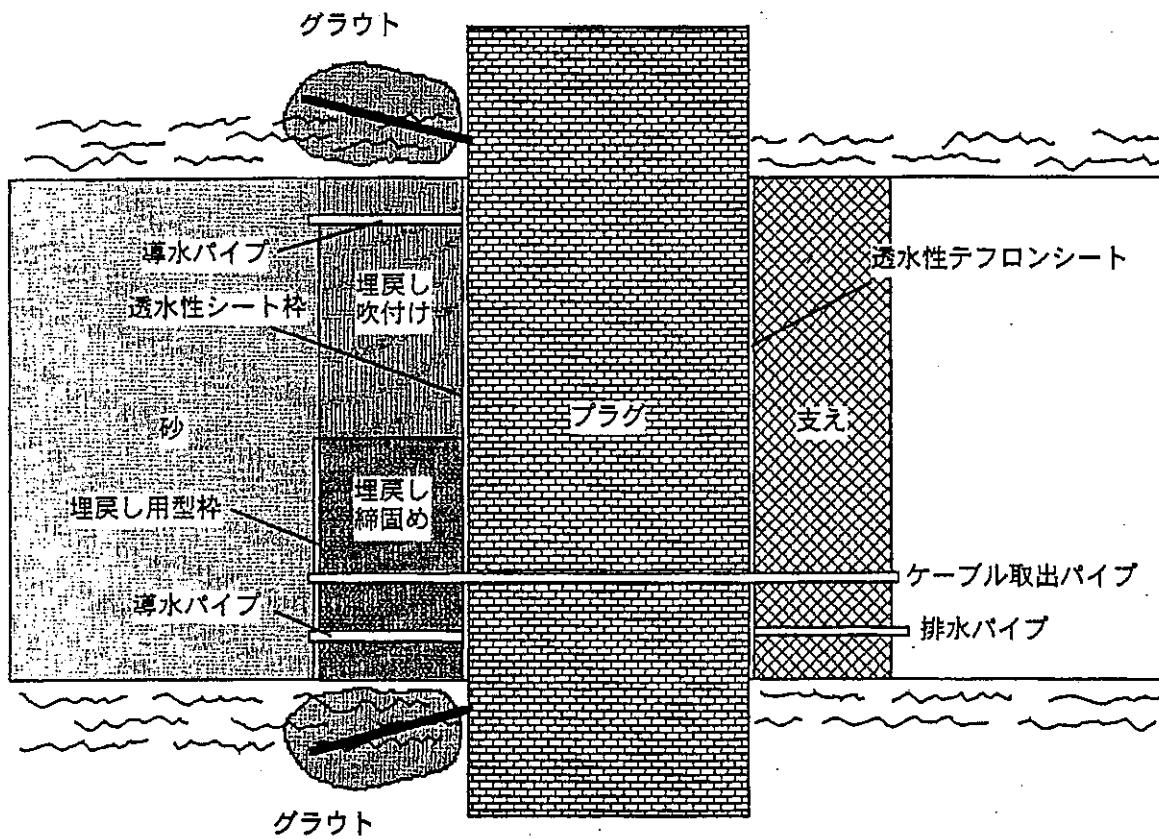
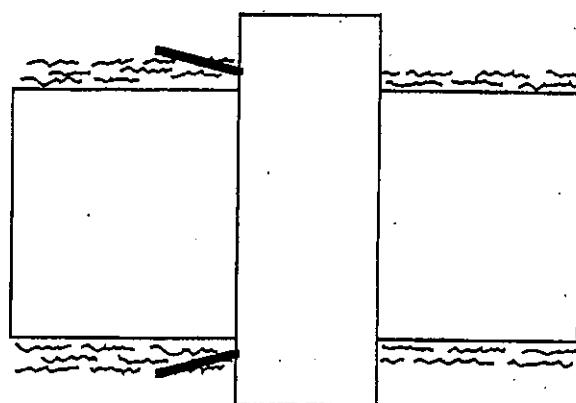
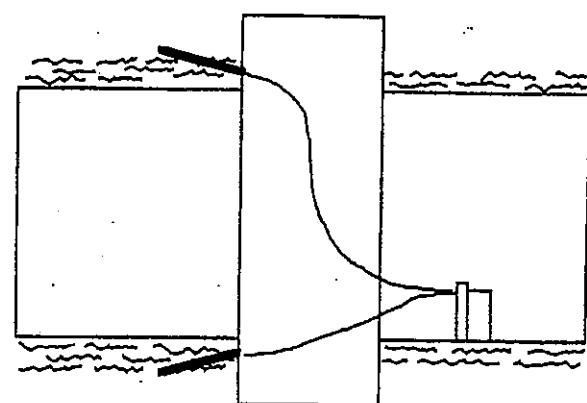


図-3.19(1) ベントナイトプラグの施工手順(1)

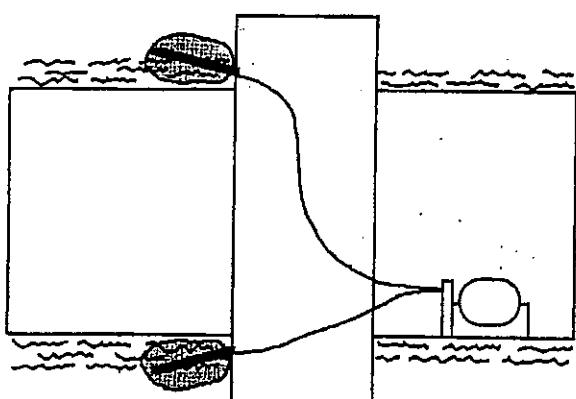
## TSXにおける粘土プラグの施工



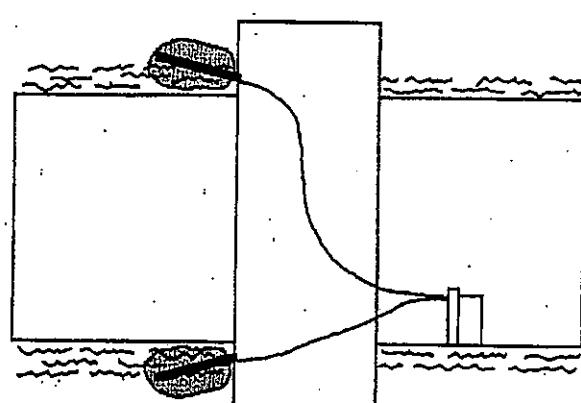
1. グラウト孔の削孔



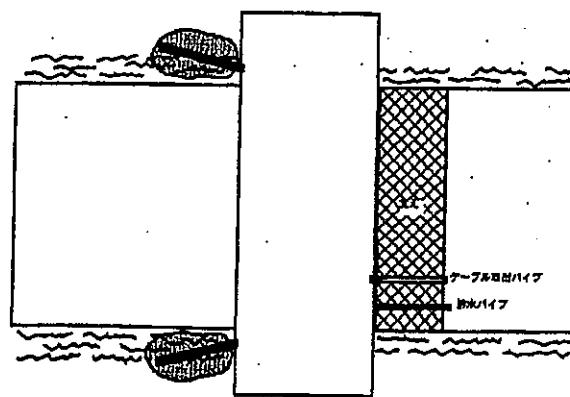
2. グラウト孔における透水試験



3. グラウト注入



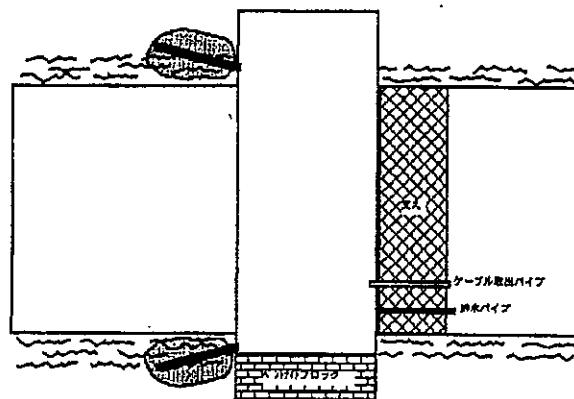
4. グラウト孔における透水試験



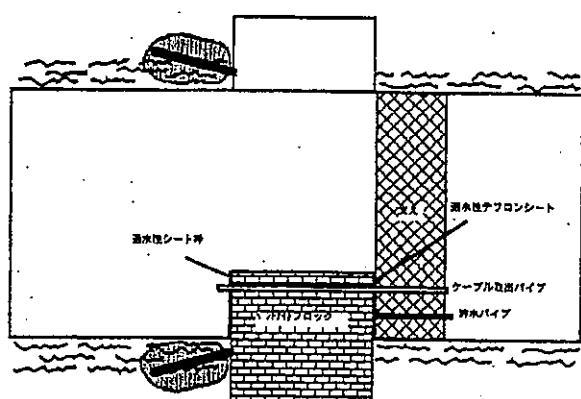
5. 鋼鉄製サポートの設置

図-3.19(2) ベントナイトプラグの施工手順(2)

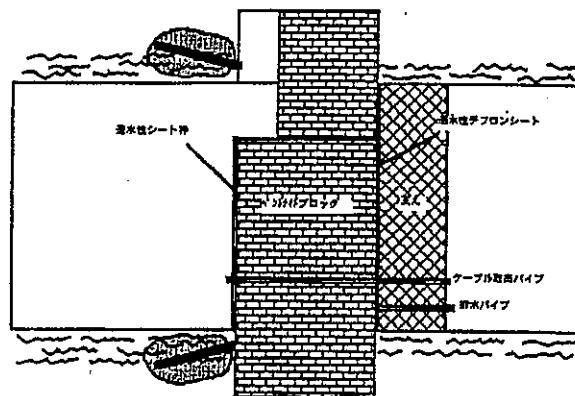
## TSXにおける粘土プラグの施工



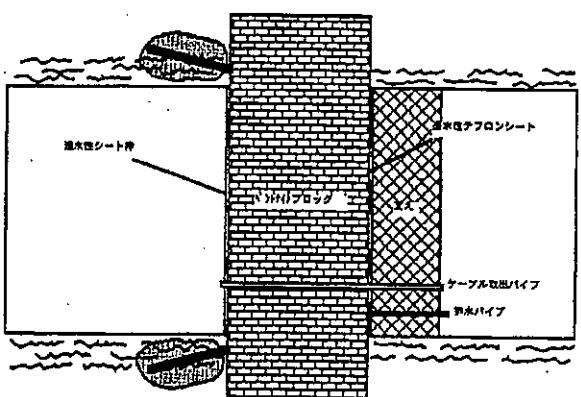
6. ベントナイトブロックの積み上げ、センサー設置  
(その1 切り欠き部)



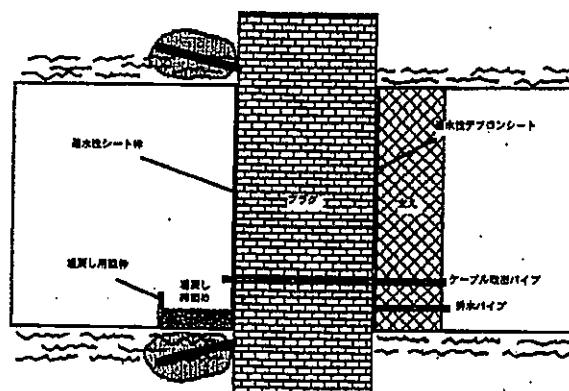
7. 透水性テフロンシート、透水性シート枠の設置  
ベントナイトブロックの積み上げ、センサー設置  
ケーブル取出パイプの延長



8. 透水性テフロンシート、埋め戻し用型枠の設置  
ベントナイトブロックの積み上げ、センサー設置



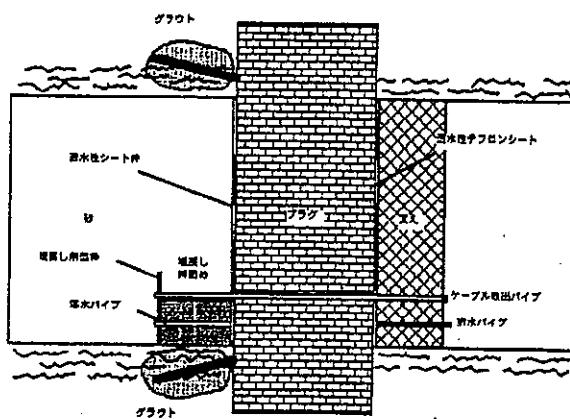
9. センサー設置  
ベントナイトブロックの積み上げ終了  
透水性シートの設置



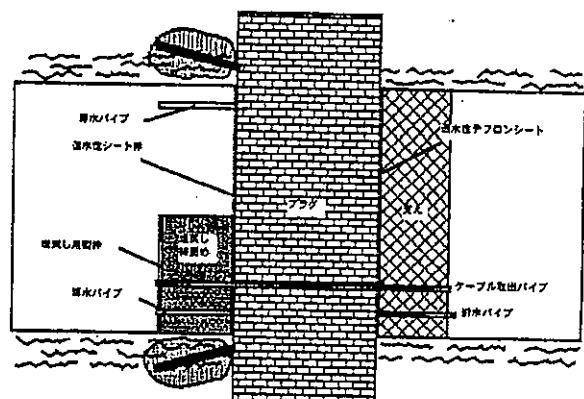
10. 埋戻し用型枠設置、締固め

図-3.19(3) ベントナイトプラグの施工手順(3)

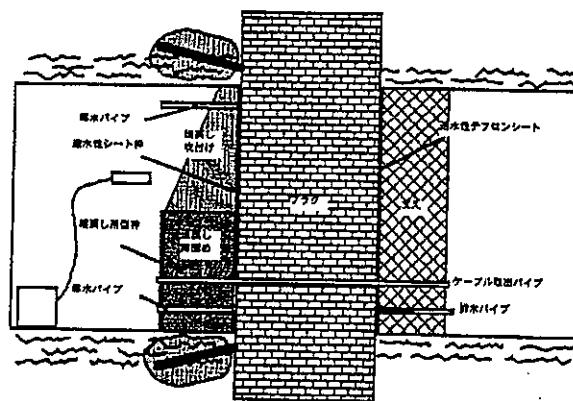
## TSXにおける粘土プラグの施工



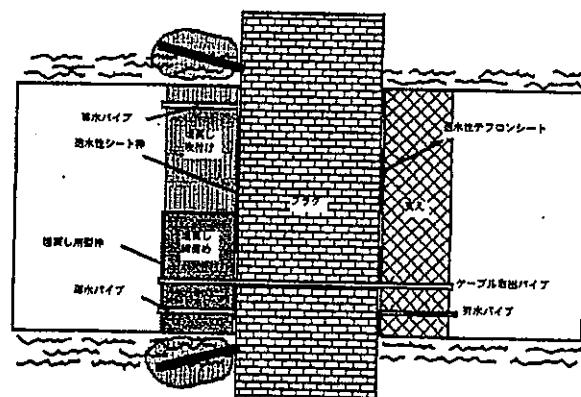
11. 導水パイプ設置  
埋戻し用型枠設置、綿固め  
ケーブル取出パイプ延長



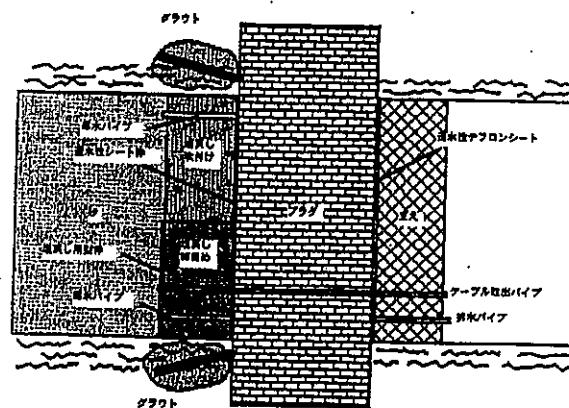
12. 埋戻し用型枠設置、綿固め終了  
導水パイプ（上方）設置



13. 埋戻し吹付け



14. 埋戻し吹付け終了  
施工終了



15. 砂充填

図-3.19(4) ベントナイトプラグの施工手順(4)

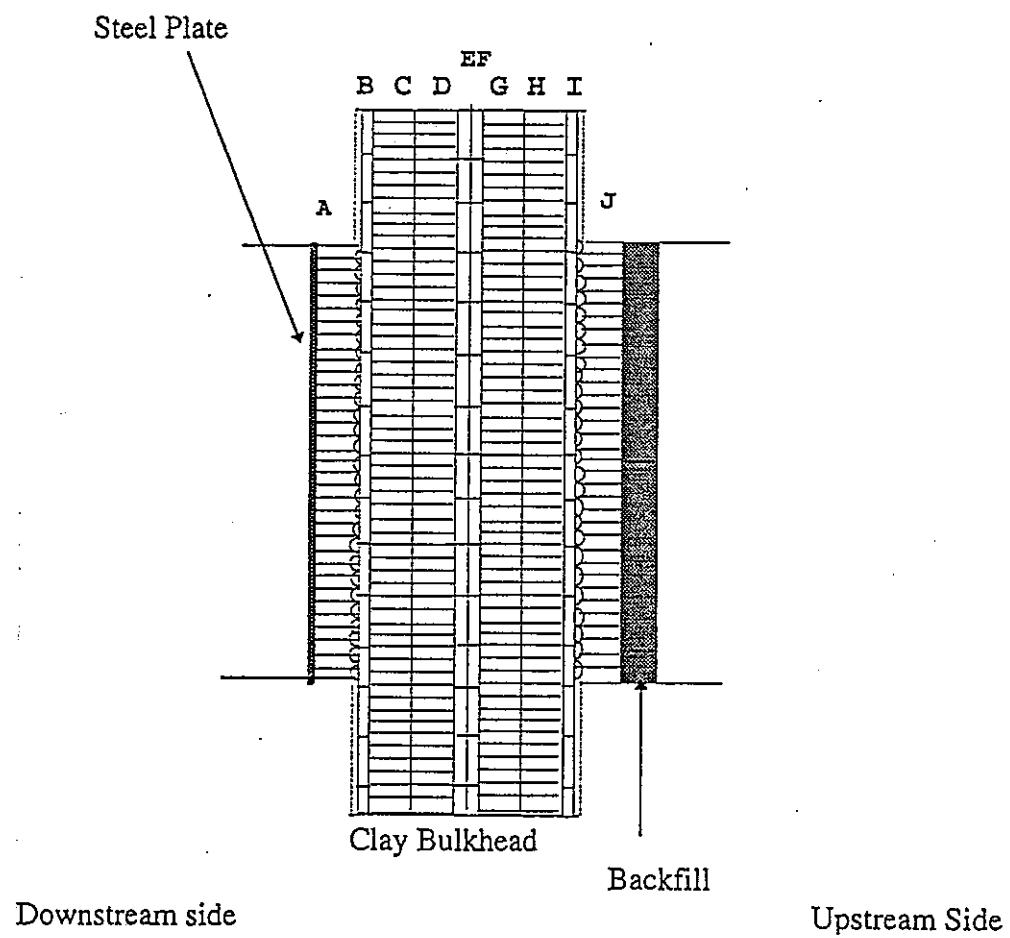
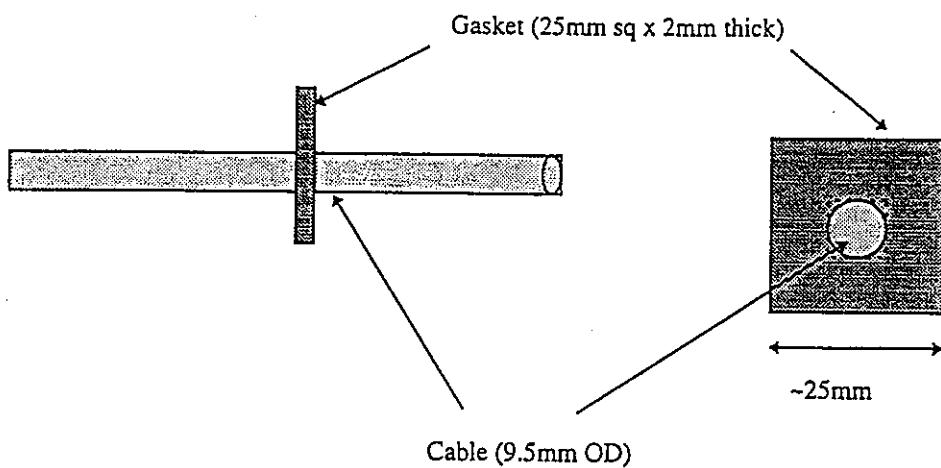
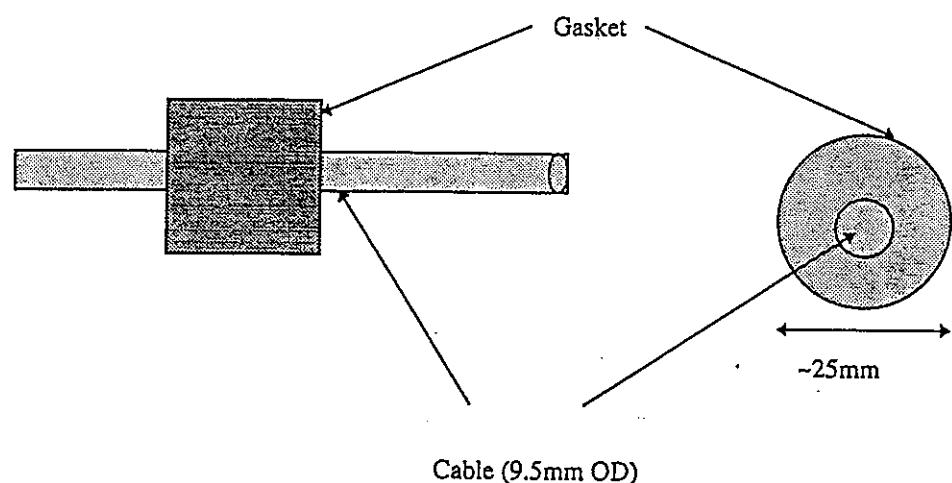


図-3.20 ペントナイトブロックの配置（最終レイアウト）



Bentonite Gasket Installation on Cables Within Clay Bulkhead



Rubber Stopper Gasket Installation on Cables Within Clay Bulkhead

図-3.21 ベントナイトブロック中の止水方法

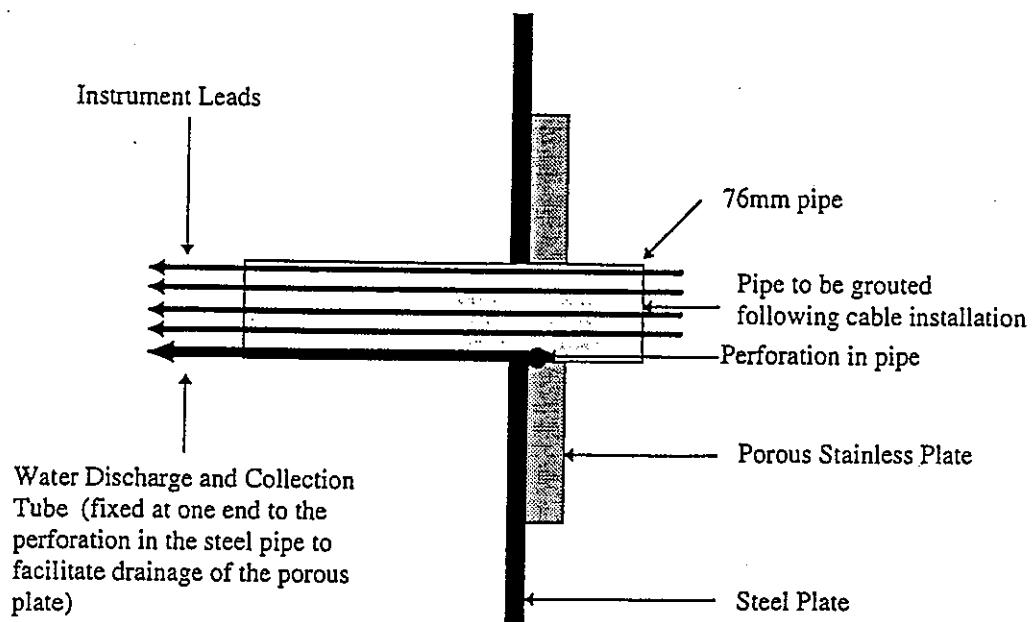


図-3.22 ベントナイトブロック／スチールサポート境界部のケーブル配線

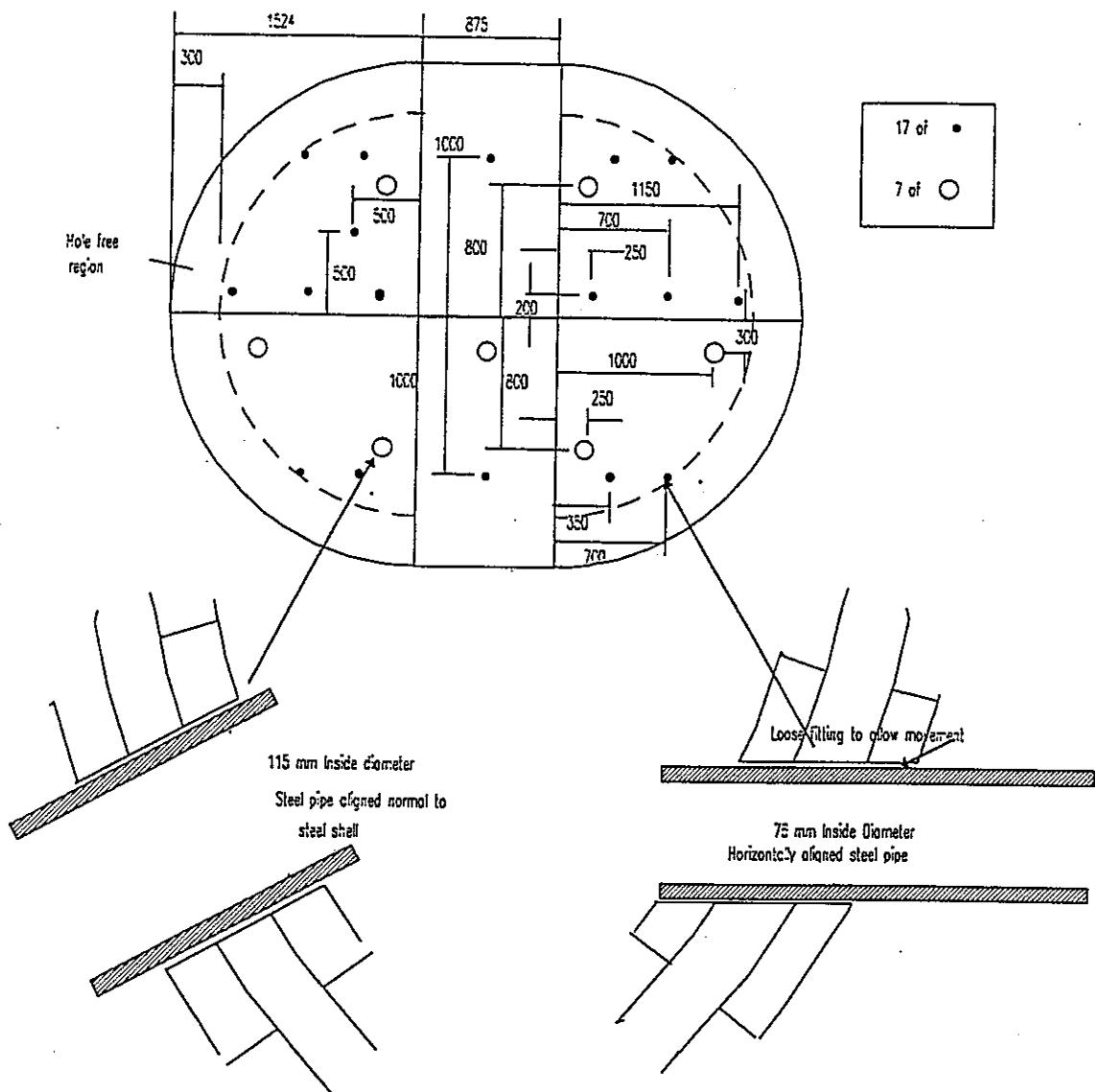


図-3.23 ベントナイトブロック背面からの集水方法

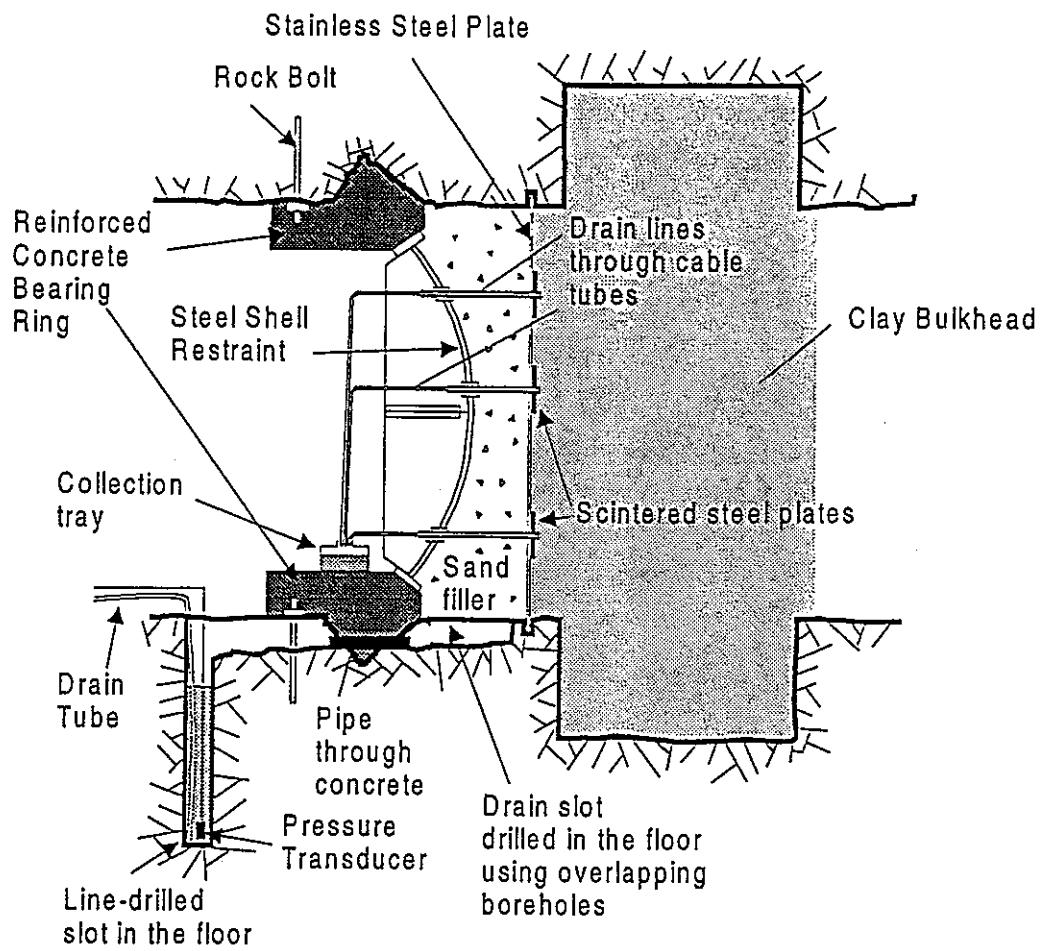


図-3.24 ベントナイトブロック／スティールサポート構造概要

表-3.3 ベントナイトブロック等の物性値

Component	Composition	As-Placed Properties	Swelling Pressure (kPa)	Hydraulic Conductivity (m/s)
Dense Clay Blocks	70% Kunigel 30% Sand	~1.9 Mg/m <sup>3</sup> Dry Density ~1.7 Mg/m <sup>3</sup> Clay Density ~14.5% Gravimetric m/c > 90% Saturation	< 1000	< 10 <sup>-12</sup>
Shotclay	70% Kunigel 30% Sand	1.2 to 1.4 Mg/m <sup>3</sup> Dry Density 1 to 1.17 Mg/m <sup>3</sup> Clay Density ~ 22% to 25% Gravimetric m/c ~ 60% Saturation	150-200	< 5 x 10 <sup>-11</sup>
Joint and Gap Filler	70% Kunigel 30% Sand	~ 1 Mg/m <sup>3</sup> Dry Density ~ 0.8 Mg/m <sup>3</sup> Clay Density	<100	< 10 <sup>-10</sup>
Backfill	10% Kunigel 90% Aggregate	~ 2.1 Mg/m <sup>3</sup> Dry Density ~ 0.7 Mg/m <sup>3</sup> Clay Density ~ 8% Gravimetric m/c	nil	~ 10 <sup>-10</sup>
Tunnel Fill	100% Aggregate	~2.1 Mg/m <sup>3</sup> Dry Density ~ 8% Gravimetric m/c	nil	~ 10 <sup>-6</sup>

m/c - moisture content

### 3.4 グラウト予備試験の評価<sup>6)</sup>

#### 3.4.1 概要

グラウト予備試験は、グラウト注入方法の開発とグラウト効果の確認の2つのパートに分けられる。大まかな手順としては、削孔 → グラウト注入 → 注入孔のプラギングとなる。また、注入前に注入孔を利用した透水試験を行うとともに、注入孔周辺からの湧水量の測定を注入前後で行い、注入効果の評価についての検討資料として用いた。また、注入中は湛水用ダムと岩盤の境界部にL V D Tを2ヶ所配置して、注入によって水圧破碎を発生させないよう監視を行った。具体的な手順を以下に示す。なお、( )内は実施日を表わしている。

- ① コンクリートダム（2つ）の構築およびこのダム間への湛水（7／18開始）
- ② 湧水量測定（調査日段階）
- ③ 注入孔の削孔（7／28～31）
- ④ 注入前の湧水量測定
- ⑤ 注入孔での透水試験（8／6～11）
- ⑥ グラウト注入（8／13～18）
- ⑦ 注入後の湧水量測定
- ⑧ 注入孔のプラギング（8／25）
- ⑨ 湧水量測定（最終段階）

#### 3.4.2 レイアウト

試験位置のレイアウトは図-3.25に示すとおりであり、Room419のラストキー（ペントナイトプラグ）から145°の方向で実施された。注入孔5孔は直径76mmであり、G1, G2, G3の3孔は水平から20°で長さ1m, G4, G5の2孔は水平から10°で長さ0.7mで各々削孔された。傾斜角度を小さくしたのは、できるだけ長くE D Z区間への注入ができるようにしたためである。また、G2孔はこのトンネルの最小主応力方向の延長上になるよう配置し、他の4孔でG2を取り囲むようなレイアウトとした。

図-3.25に示すように、コンクリートダムは厚さ0.2m、高さ2m、幅35mであり、岩盤との接触面にはペントナイトストラップスを設置して、止水性能を向上させた。また、テストキー岩盤の表面にはダム間の湛水による湧水を測定するためのトレイを設置した。図-3.26に注入手続きを示す。

#### 3.4.3 試験結果

##### (1) 透水試験結果

表-3.4は、削孔後のボーリング孔での透水試験結果を示したものであり、ボーリン

グ孔長、試験区間長、および透水試験結果を整理した。試験時の最大圧力は0.1MPaである。

## (2) グラウト注入

グラウトは前掲の図-3.26に示したように5孔同時注入で実施し、最大圧力は0.5MPaとした。注入圧力については、当初計画時に1MPaであったが、注入中に周辺岩盤に水圧破碎が発生する恐れが生じたため、最大圧力を小さくした。注入濃度は0.2%、0.5%、1%、2%、4%、6%、8%と薄いスラリーから濃いスラリーへと漸移させて、できるだけ微小亀裂にペントナイトスラリーがいきわたることを期待した。

実際の注入は、8/13に0.2%，8/14に0.5%と1%，8/15に2%と4%，8/15に6%と8%の注入が各々行われた。これらの結果を図-3.27(1)～(2)および表-3.5に示す。また、図-3.28はグラウト注入中のLVDTの計測結果であり、マイナスの値は、ダムコンクリート～岩盤の間の距離が大きくなっていることを示しており、注入(8/13～18)による影響が見受けられる。

## (3) 注入孔のプラギング

注入後、直径68mm、長さ11～18cmのペントナイトブロックを人力で5孔のボーリング孔に挿入することによって埋戻しを行った。

### 3.4.4 グラウト効果について

#### (1) グラウト注入効果による評価

図-3.29は注入速度の経時変化を濃度ごとに示したものである。また、図-3.30は、注入されたペントナイト量は(流出量-注入量)という計算を行うことによって算出した結果である。これらより以下のことがわかる。

- ・注入速度の傾きは、0.2%と0.5%がいちばん大きいが、1%，2%，4%と小さくなつてほぼ同程度となり、6%，8%ではより小さくなる傾向がみられ、岩盤の透水性の低下を示しているものと考えられる。
- ・注入量や流出量についても、0.2%から0.5%や1%までは増加傾向にあったものが、1%以降は低下傾向になり、この観点からも岩盤の透水性が小さくなつたと判断される。
- ・さらに前掲の図-3.27(1)～(2)においても、0.2%と0.5%では経時的な注入量の減少はみられないが、1%以降は経時的に注入量の減少がみられ、0.5%を境に岩盤の亀裂での目詰まりが生じたものと考えられる。

#### (2) 湧水量測定結果による評価

図-3.31は注入前後の湧水予測結果を示したものである。下段の図は調査月湧水量、ボーリング削孔後、グラウト注入後の3つのイベントごとの湧水量を比較したものであ

り、これらより以下のことがわかる。

- ・ボーリング孔削孔前の湧水量は、ダム湛水後10日で約 $6.7\text{m}^3/\text{分}$ であり、削孔後の計測データも11日経過後に約 $6.55\text{m}^3/\text{分}$ と同程度である（ただし透水試験による乱れはある）。一方、グラウト注入後6日で、湧水量が $5.3\text{m}^3/\text{分}$ まで低下しており、注入孔のプラギングによりその傾向が加速されているものの、グラウト注入により湧水量が低下したものと判断できる。

表-3.6は、グラウト注入中の注入液およびダムに湛水した水の電気伝導度の測定結果を示したものである。

### 3.4.5 結論

本予備試験において、グラウト注入によりダム間に貯留された水の、テストキー岩盤表面への漏水が低減されている。そして、この地下水の経路となっていると判断されるEDZでの透水係数はグラウト注入前で $k = 10^{-11} \sim 10^{-14}\text{m}/\text{秒}$ と極めて小さい値であるが、このような低透水性岩盤に対しても、本グラウトの適用可能性が示されたものと考えられる。

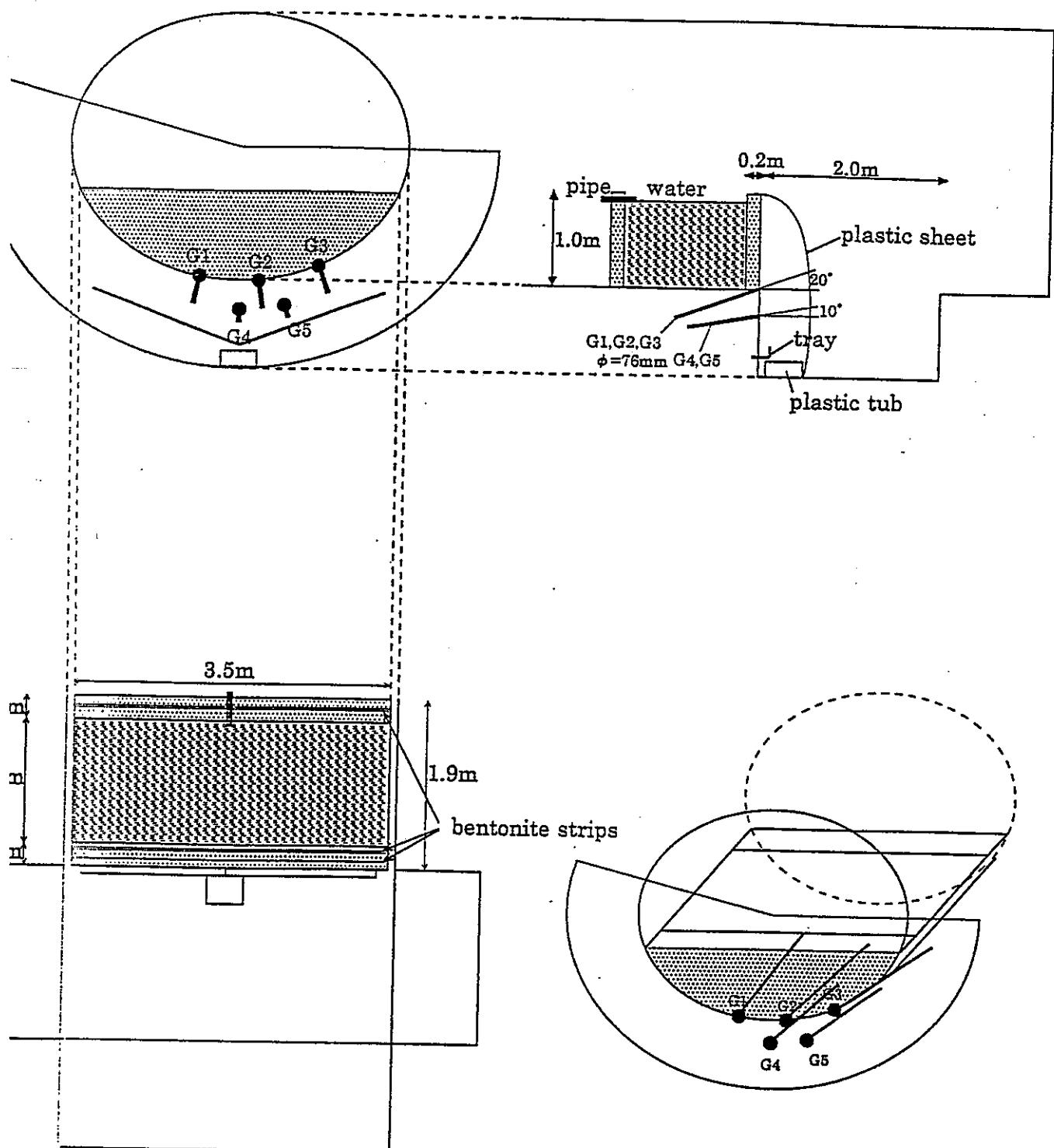


図-3.25 注入概要

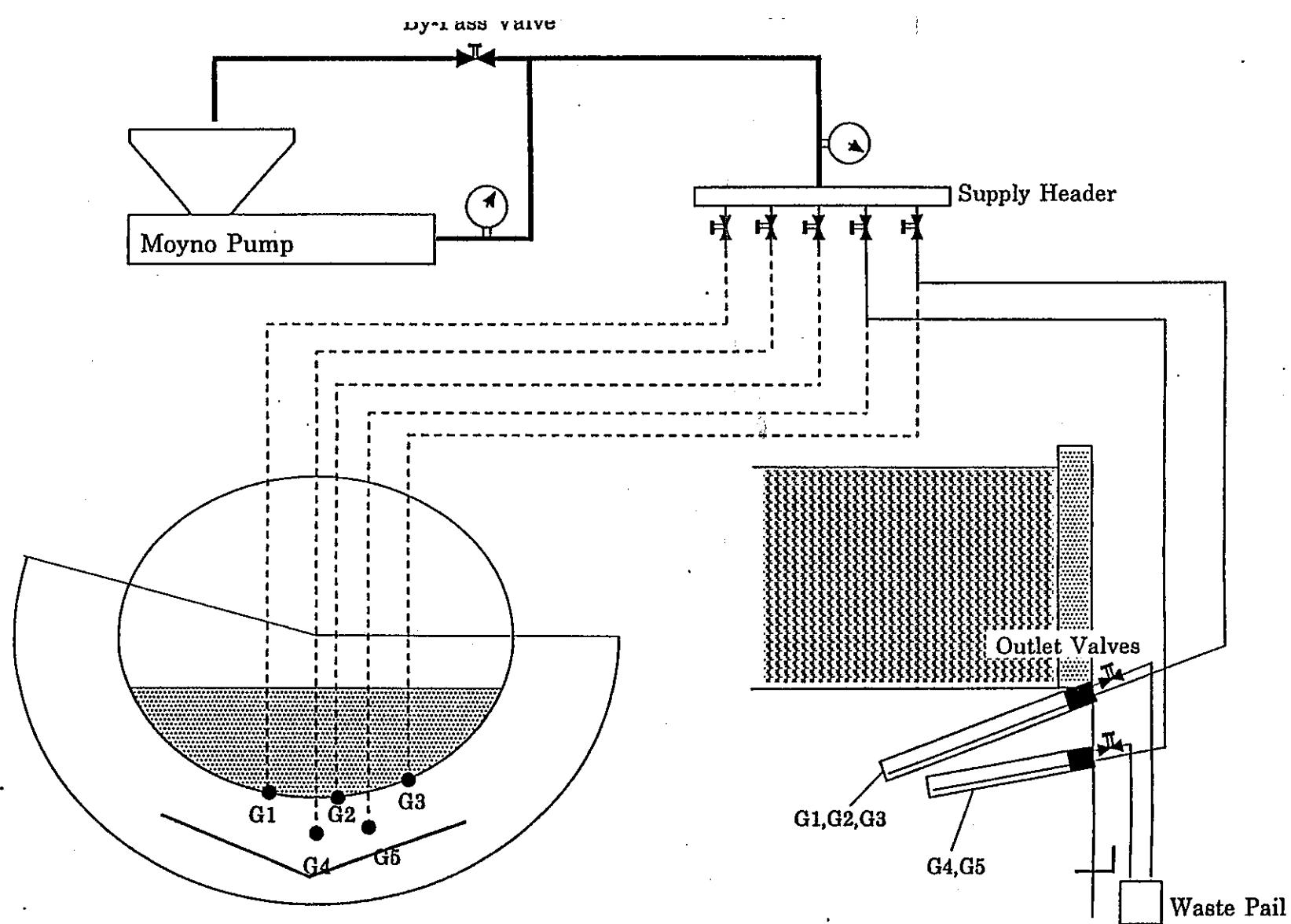


図-3.26 注入手順

表-3.4 注入孔の透水試験結果

Hydraulic test result			
borehole	length(cm)	test length(cm)	K (m/s)
G1	0.97	0.85	6.33E-13
G2	0.91	0.64	2.06E-12
G3	0.94	0.82	2.28E-11
		0.69	1.95E-12
G4	0.66	0.54	5.76E-14
G5	0.69	0.57	3.86E-14

表-3.5 注入結果

proportion	spent time to 500kPa	injection time at 500kPa	total injection vol.(L)
0.2%	47min.	4hrs.	53.21
0.5%	20min.	3hrs. 20min.	60.52
1.0%	16min.	1hr. 33min.	29.79
2.0%	12min.	1hr. 42min.	30.44
4.0%	16min.	1hr. 39min.	17.57
6.0%	20min.	1hr. 50min.	12.50
8.0%	16min.	1hr. 52min.	4.06

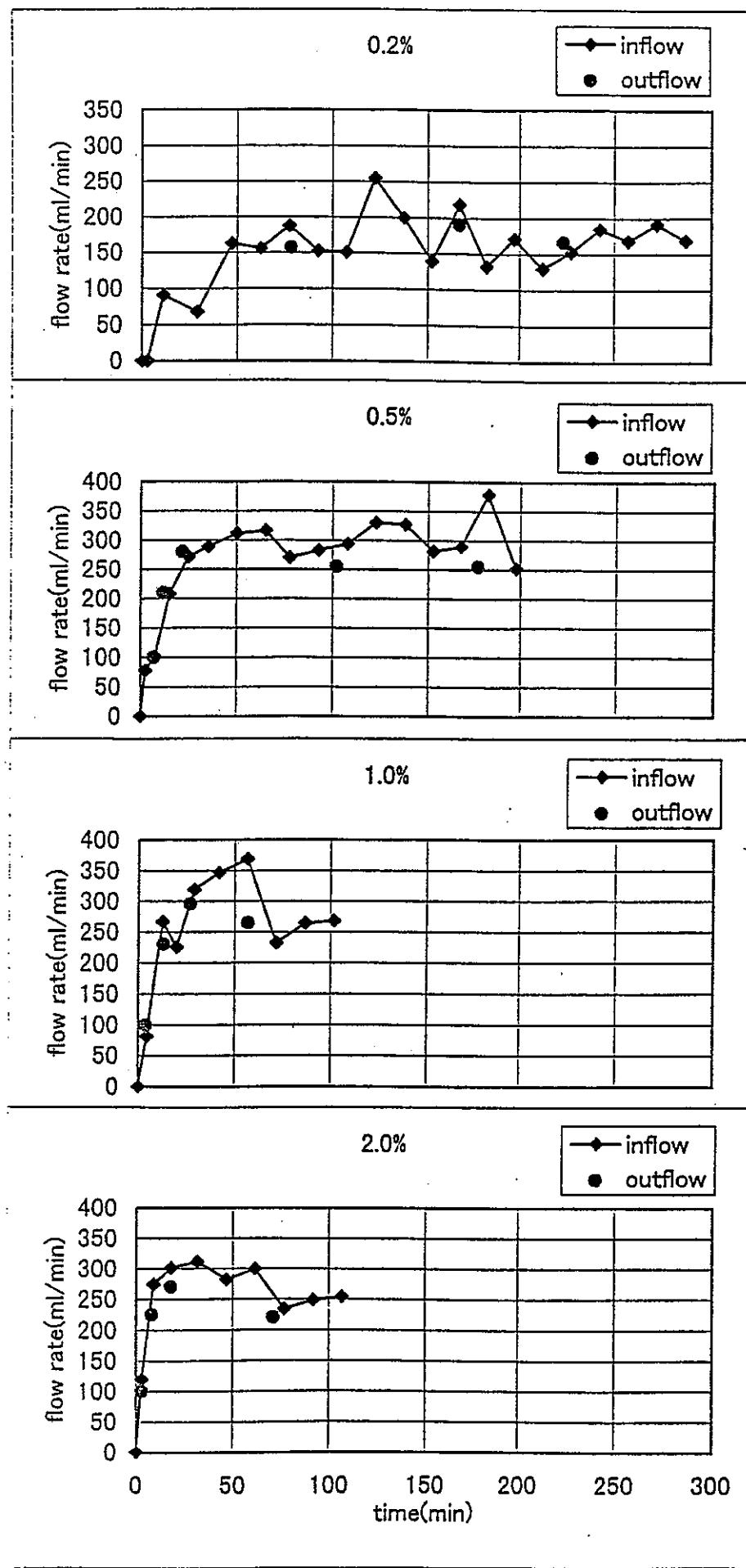


図-3.27 注入結果(1)

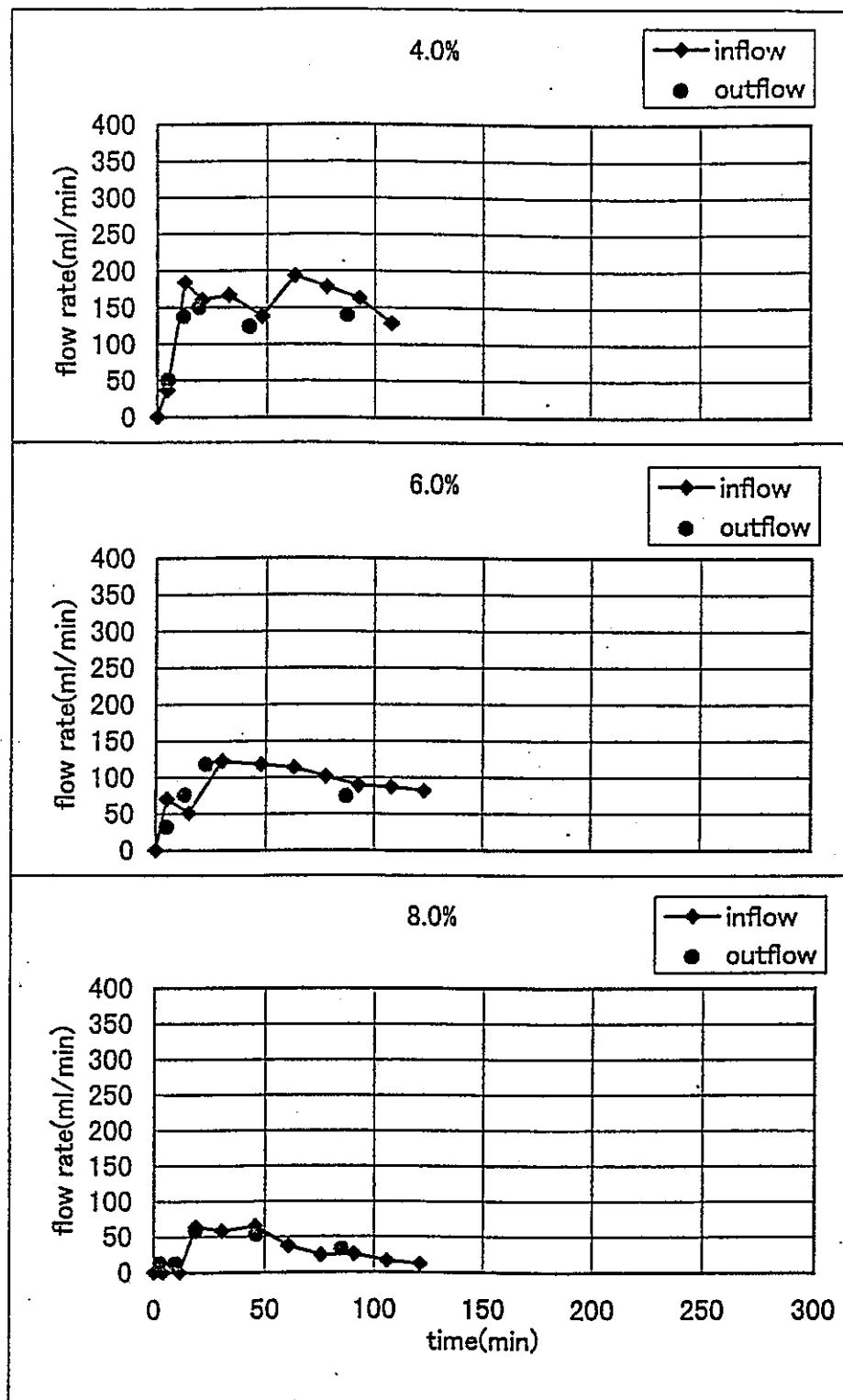


図-3.28 注入結果(2)

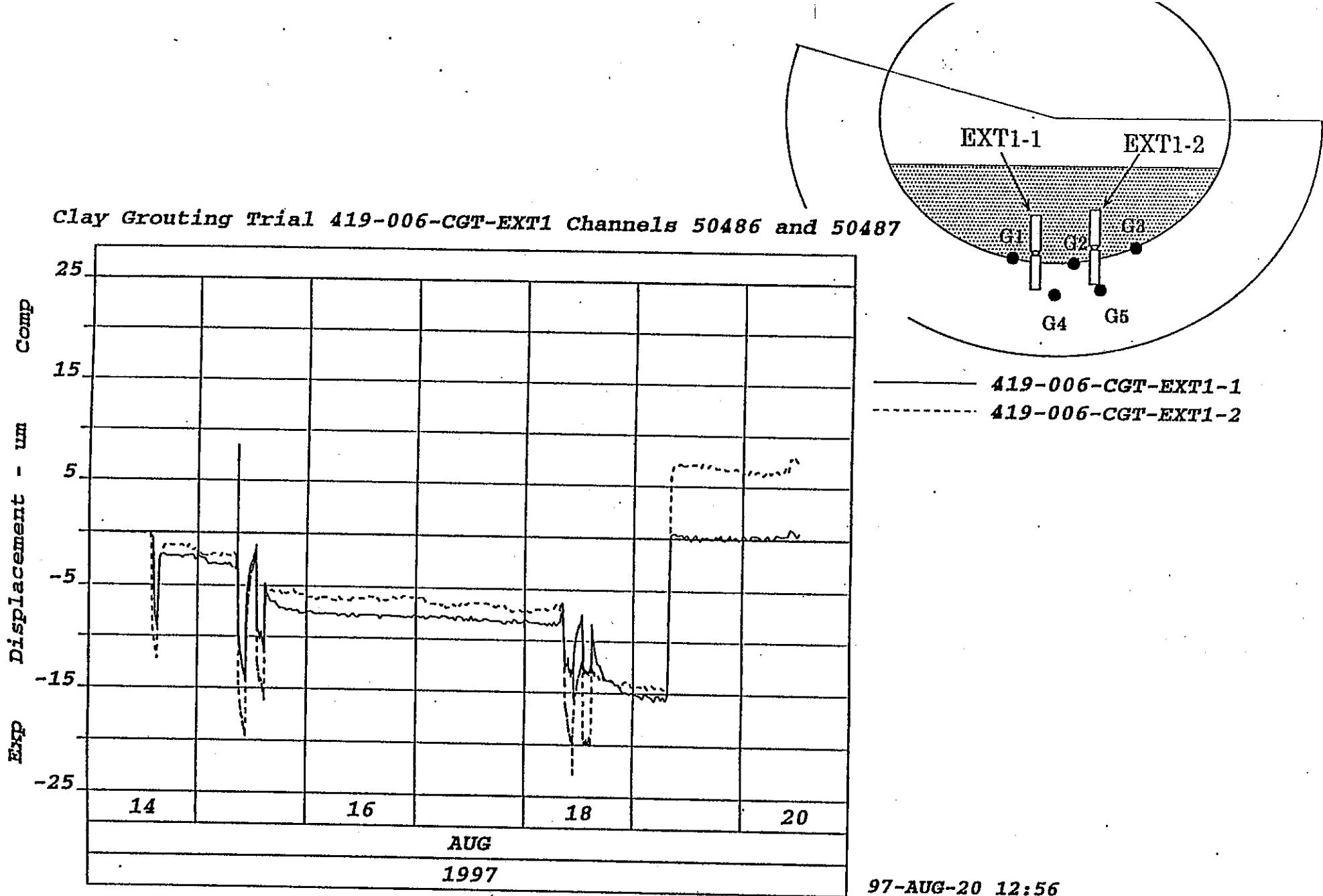


図-3.29 注入時の変位状況

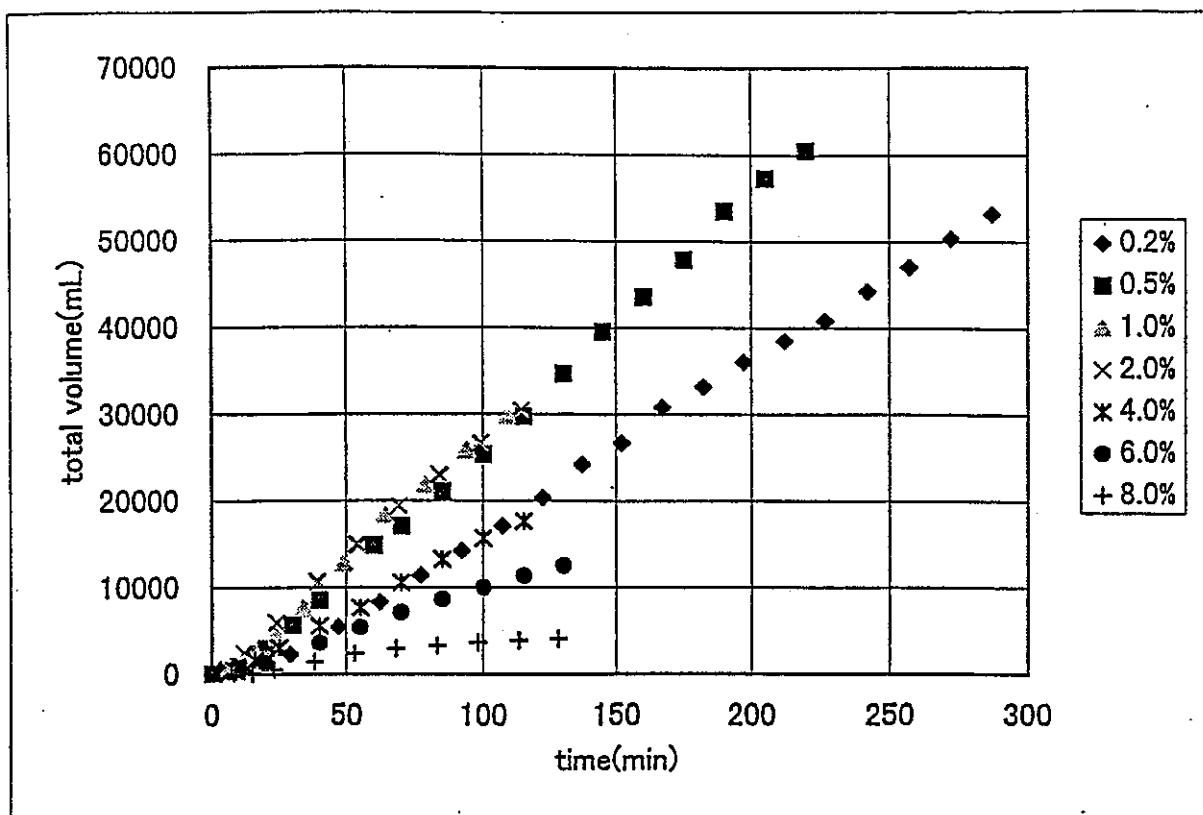


図-3.30 注入量の経時変化

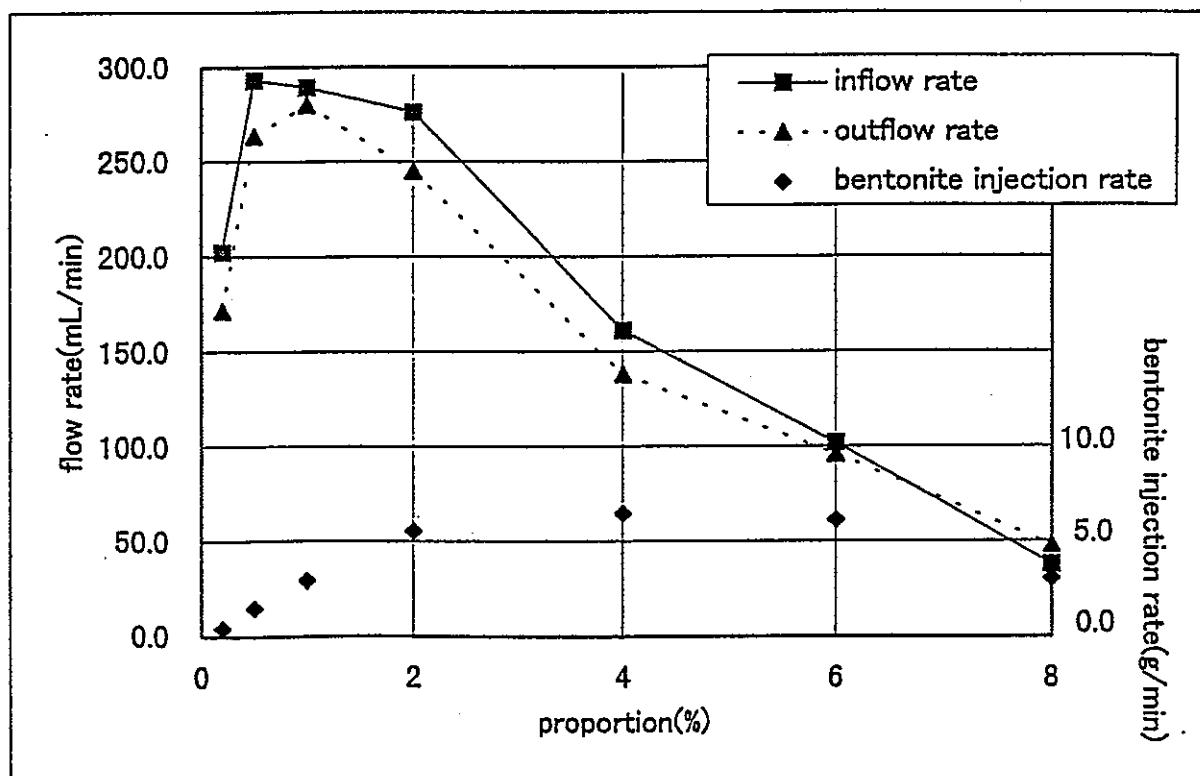


図-3.31 注入深度と注入速度の関係

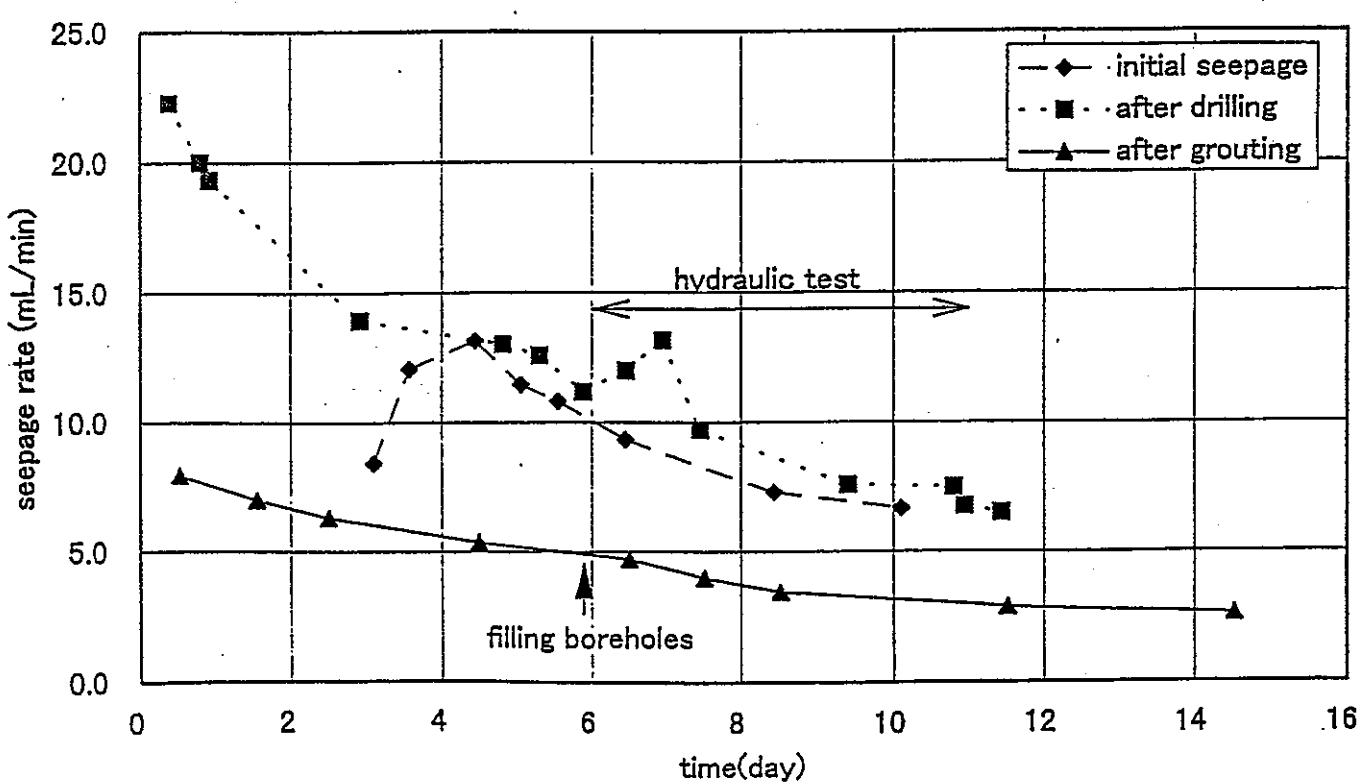
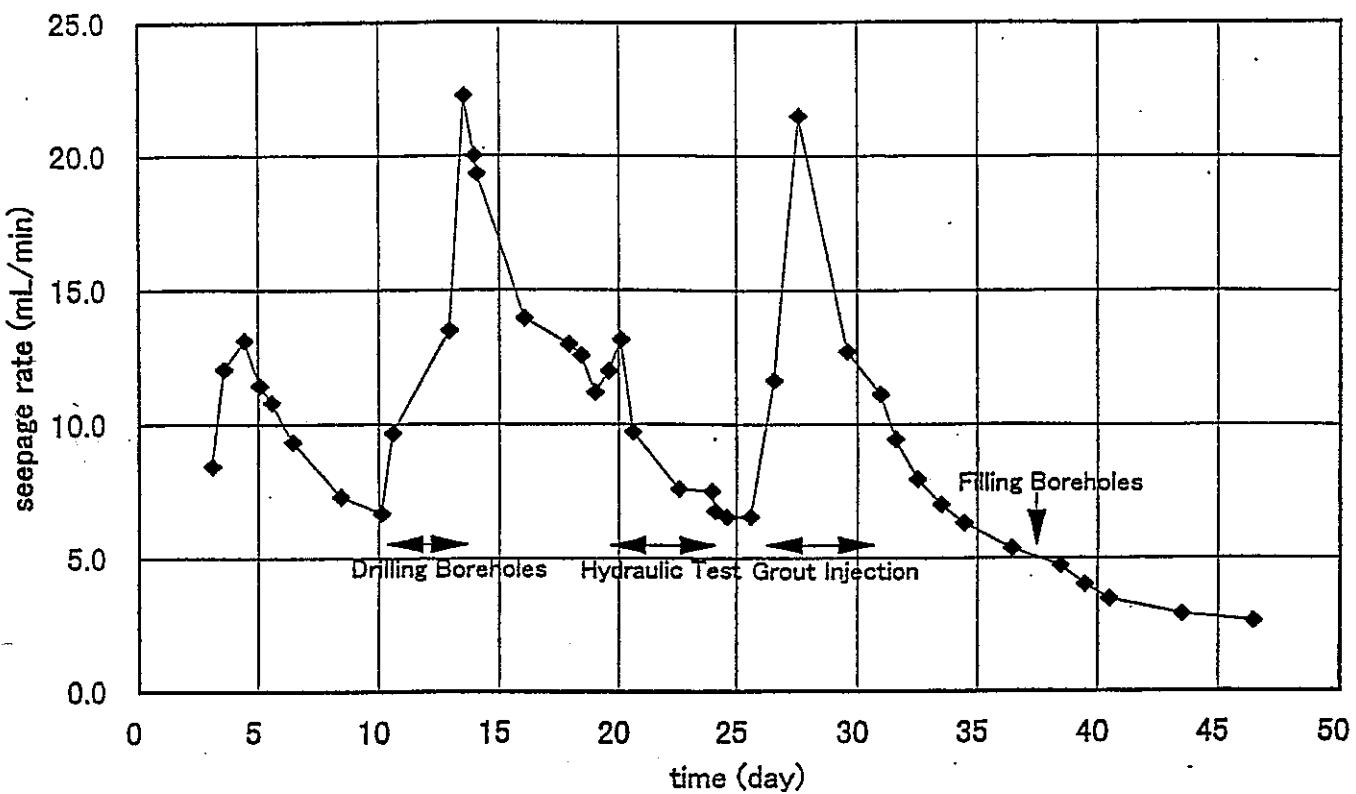


図-3.32 漏水量の経時変化

表-3.6 注入スラリーの電気伝導度

proportion	Conductivity(mS/cm)		
	slurry	flushing	outflow
0.2%	0.823	0.821	0.800
0.5%	0.836	0.836	0.807
1.0%	0.886	0.860	0.848
2.0%	1.002	0.974	0.966
4.0%	1.208	1.060	1.142
6.0%	1.388	1.227	-
8.0%	1.587	1.336	0.977
Mixing water	0.788		
Dam water	0.235		

### 3.5 トレーサー試験計画

トレーサー試験については、A E C L サイドより図－3.32～図－3.33に示す2つのスケールでのトレーサー試験計画が1997年8月に提案された。これに対する検討を以下に示す。

#### (1) 目的

「トレーサー試験の目的は、注水した水の経路を把握することによってプラグを含めたシーリングシステムの効果を確認することであり、周辺岩盤を通ったトレーサーの量を確認する。」ことだったが、それに付け加えてバルクヘッド中の移行経路も把握する。

周辺岩盤を通ったトレーサーの量を確認することについては、普通の注水を長時間続けて下流側への湧水量を測れば、プラグまわりの水理状況はかなり把握できると思われる。そうすると、目的の1つに、水とトレーサー物質の移行状況がどのように違うかを確かめるということも入ってくると考えられる。

#### (2) トレーサーの材料

トレーサー試験の目的から、吸着性のものを選択するか、あるいは非吸着性のものを選択するか、という要素がないか？トレーサーの収支をきちんとおさえるのなら、非吸着性のものがよく、バルクヘッド中の移行経路の把握という観点からすると吸着性のものがよいと判断される。

#### (3) 計測方法

圧力4 MPaで注水しても、周辺岩盤、E D Z、坑道から削孔した4本のボーリング孔で集められる湧水はそんなに多くないと思われる。これ以外は、坑道壁面からしみ出てくることが予想されるので、STRIPAやGRIMSELのようにテフロン？シートを張って区分集水することが望ましい。

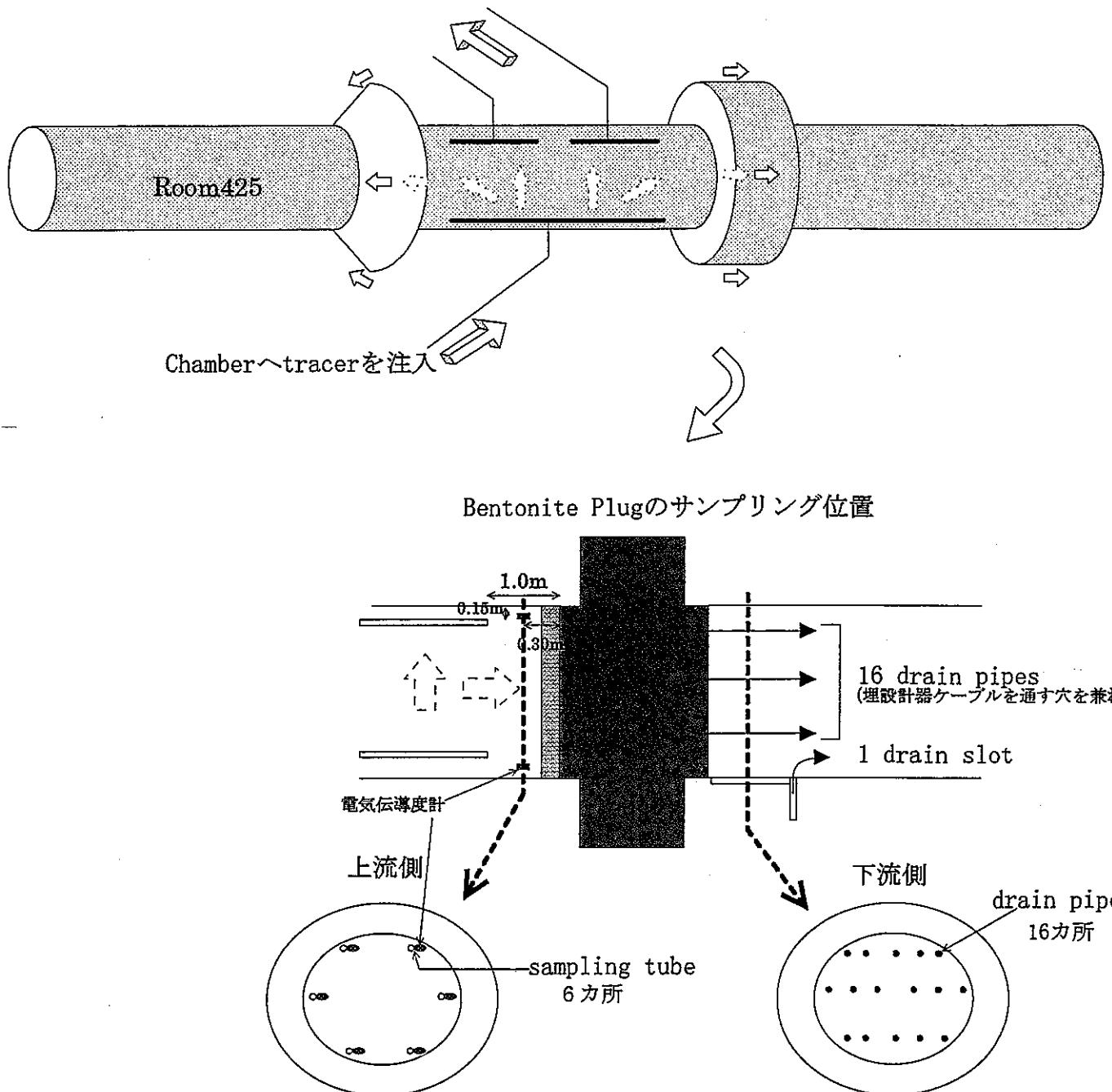
#### (4) トレーサー注入圧力

ラージ・スケール・テストの圧をかけたまま、トレーサーの注入は可能だろうか。もし、注水試験中に水があまり入らなければ、水からトレーサーに置換するのに大変時間がかかるか、場合によっては置換できないことも考えられる。

スマール・スケール・テストについては、普通の水を使った注水試験と関連づけてプラグ周辺の水理状況を把握するには時間がかかるかもしれないが、岩盤に不飽和を経験させない方がよいと思われる。

# Large Scale Test

注水システムを利用



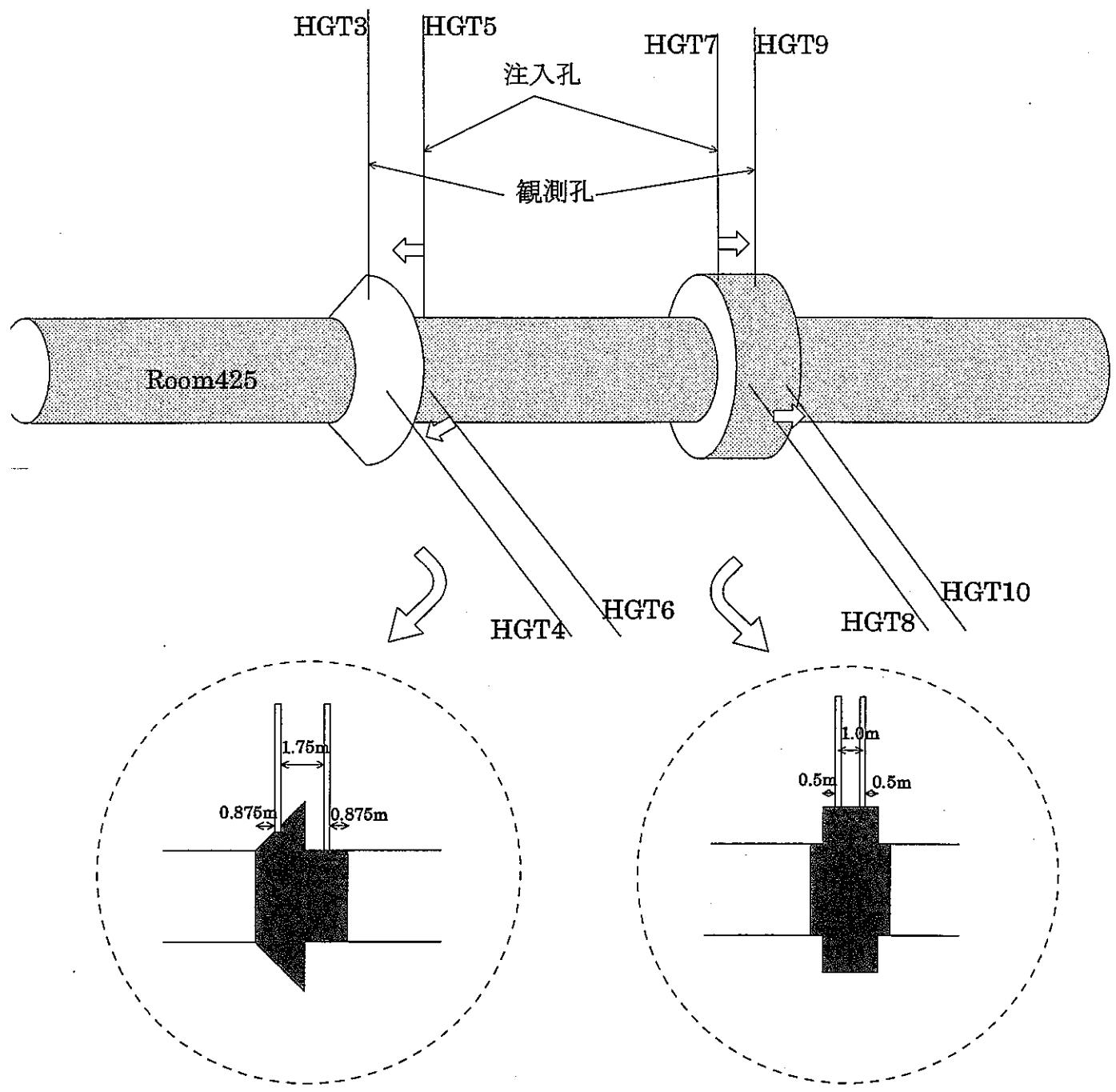
詳細はTracer Experiment Meeting #4(Feb. 4)参照  
電気伝導度計でプラグに到達したトレーサーの濃度、時間を測定  
sampling tubeでチャンバー内の水を実際にサンプリング、濃度測定を行ふことによって電気伝導度の値をチェックする。  
コンクリートプラグ側の配置も同じ。

詳細はDesign Report(TSX-18)参照  
コンクリートプラグ側のサンプリング方法はまだ不明。

図-3.33 ラージ・スケール・トレーサー試験

# mall Scale Test

Hydrogeology用のboreholeを利用



ボーリング孔の配置の詳細はBorehole Design Report(TSX-08)参照  
Hydrogeology用BoreholeにはPacker Systemが埋め込まれているため、  
プラグの近傍だけにトレーサーを注入することは可能。

図-3.34 スモール・スケール・トレーサー試験

### 3.6 ワークショップ支援<sup>7) 8)</sup>

ワークショップ支援については、下記2回のコーディネーション・ミーティングが挙げられる。

- ① 1997年6月25～26日（カナダ）
- ② 1997年12月2～3日（カナダ）

各々のミーティングにおけるagendaと参加者リストを図-3.35～3.39に示す。また、上記2回のミーティングにおける審議内容を中心に以下に整理する。また、Appendix-IV, Vとして、上記①, ②でのプレゼンテーション資料を添付する。

#### ・ 1997年6月25～26日（カナダ）

- (1) 今回のコーディネイト・ミーティングの目的
  - 1) 前回ミーティング以降に進捗した事項のレビュー
  - 2) ベントナイトプラグの仕様の決定
- (2) 前回ミーティング（1996年9月）からの進捗状況
  - ① 拡副を除くすべての掘削作業が完了（アクセストンネル、テストトンネル、テストキー）
  - ② 56孔のボーリング孔の内、46孔の削孔が終了
  - ③ ベントナイトブロックの試験施工が終了
  - ④ テストトンネルでの透水試験準備が完了
  - ⑤ テストキーでのベントナイトグラウト準備が完了
  - ⑥ 掘削影響測定のためのA E / M S システム設置が完了
  - ⑦ ベントナイトプラグ関連のデータ収集システムが完成
  - ⑧ 注水システム及びスチールサポートシステムのドラフトが完成
  - ⑨ ベントナイトプラグ中に埋設する計器のキャリブレーションとケーブルの止水仕様作成を実施中
  - ⑩ ベントナイトの吹付け試験を実施中
  - ⑪ ベントナイトプラグのシミュレーション試験を実施中
  - ⑫ ベントナイトプラグの拡副部掘削をミーティング後に開始予定
  - ⑬ ベントナイトプラグ用ブロックをミーティング後に作成開始予定
- (3) コーディネイト・ミーティング（6/25～26）の概要

下記事項についてのプレゼンテーション及び質疑応答が行われた。決定事項等については、項目(4)に示すとおりである。

- ・トンネルの掘削状況（Read）
- ・試験位置（地下坑道）及びベントナイトブロック作成状況・吹付け試験状況（地

上) の見学

- ・注水システム (Martino)
- ・水理試験・透水試験 (Kozak)
- ・トレーサー試験 (Frost)
- ・掘削影響計測 (Read)
- ・ペントナイト・ブロック作成 (Dixon)
- ・ペントナイトの浸潤モデリング (Vercoutere)
- ・ペントナイト・プラグのシミュレーション試験 (Chandler, Dixon)
- ・スチール・サポート・システム (Hawk)
- ・TDR (Cournut)
- ・プラグの形状、施工方法及び計器埋設 (Dixon)
- ・ペントナイト・グラウト (升元)
- ・ペントナイト・プラグの設計に関するコメント (藤田, 戸井田)
- ・ペントナイト・砂の吹付け及び埋め戻し (流出防止層を含む) 材料 (Dixon)
- ・コンクリート・プラグの施工及び計器埋設 (Gray, Hawk)
- ・コンクリート・プラグの浸潤モデリング (Didry)
- ・討 議

(4) 決定・審議事項 (案)

1) ペントナイトプラグの形状

PNCサイドとしては、AEC案を基本的に了承。したがって、形状は2m-Keyで27.5cmの両側へのエクステンション（合計 2.55m）で各国了承。

上流の20cmのフィルターについては特に異存はない様子。

2) ペントナイトプラグのスチール・サポート

PNCからの申し入れに応じて、AECが7月中旬までに構造計算書をゴールダ一から提出させ、各国からのコメントをもらうことになった。

また、スチールサポートと下流側ペントナイトプラグの間に埋める予定の砂の代わりにコンクリートを用いることがMalcom Gray氏から提案されている。これは、下流側をしっかりと押さえなければ十分な膨潤圧、シーリング機能は得られないため、砂を締め固めるのでは不十分との考えによるものである。（これについてPNCが何らかのコメント、もしくは別の提案をする必要があると思われる。Golderの構造計算では、鉄板の厚さを変えたりサポートとしてロックボルトを使ったりして何とか保たせるようにしてくることが予想されるので、構造計算結果が出た後でも、砂を使う状況に変わりはないと思われる。）

### 3) ベントナイトプラグへの注水方法について

PNCおよびWIPPは上流側からの1方向注水、ANDRAは上下流両側からの2方向注水（既存設備を使用するため、エクストラの費用は発生しない様子）を各々提案したが、結論には至らなかった。次回のコーディネートミーティングで再度検討予定。具体的には、ANDRAは本当のシーリング性能は飽和する過程を見ることではなく、飽和した後が重要であるという認識の元で2方向注水を提案しており、一方、WIPPはシーリングにより全体が飽和することすらなかなか達成しないということをデモンストレーションしたいらしく、2方向注水にはあまり乗り気ではない。現状での各国の共通認識は、とにかく2年後飽和していなければ下流側からも注水できるようにしておくといった程度と判断される。2方向注水の場合でも、下流側からの注水は圧力をかけるのではなく、現在の設計で考えられている集水用チューブを使って坑道の水頭分をかける程度と思われる。

### 4) ベントナイトプラグ中の計器配置について

1)によりベントナイトプラグ形状が決定したので、Dixon氏が計器埋設案とケーブルの止水対策案を作成し、各国からのコメントをもらうことになった（時期未定）。

### 5) 蒸発散量測定

PNCからの提案（渡辺先生案）に対し、Kozak氏からコメントがPNCへ送付される予定なので、これへの対応が必要（時期未定）。ただし、Chandler氏の意見としては、工程上、Wallを作る時期が難しく、来年になるのではないかとのこと。

### 6) ベントナイト・プラグのモデリングについて

ANDRAの実施した材料試験結果や解析結果に対するPNCからのコメントや参考資料提出を求められた。材料試験結果については、藤田殿からAECIへ既存の研究レポートを送付予定。解析結果に対してコメントするかどうかについてはペンドィング。

### 7) 今後のスケジュール

- ・9月 : 次回のバイラテラル・ミーティング
- ・11／10～または11／17～ : 次回のコーディネーション・ミーティング
- ・8／1 : ベントナイトプラグの拡幅掘削終了予定
- ・8／8 : ベントナイトプラグのブロック作成完了予定
- ・9／26 : ベントナイトプラグのスチールサポート完成予定
- ・9／26 : コンクリートプラグの拡幅掘削終了予定
- ・12／5 : ベントナイトプラグ完成予定
- ・12／24 : 注水チャンバーの砂吹付け終了予定
- ・1／26 (1998) : コンクリートプラグ完成予定

・ 1997年12月2～3日（カナダ）

- (1) 今回のコーディネイト・ミーティングの目的
  - 1) トンネルシーリング試験におけるペントナイトプラグおよびスチールサポート・システムのレビュー
  - 2) プラグ部拡幅結果および岩盤特性評価試験結果のレビュー
  - 3) コンクリートプラグ構築計画のレビュー
- (2) 前回ミーティング（1997年6月）からの進捗状況
  - ① スチール・サポートの設計終了および構築開始
  - ② 埋設計器の校正終了
  - ③ ペントナイトプラグのシミュレーション試験開始
  - ④ プラグ部拡幅時のAEモニタリング
  - ⑤ ペントナイトプラグ中への計器埋設
  - ⑥ ペントナイトプラグのブロックの作成および設置開始
  - ⑦ 51孔のボーリング孔削孔終了
  - ⑧ ペントナイト・グラウト・トライアルの実施（Room419）
  - ⑨ ペントナイトプラグへのペントナイトグラウトの実施
  - ⑩ 注水チャンバーへの給水システムの設計終了
- (3) コーディネイト・ミーティング（12/2～3）の概要

下記事項についてのプレゼンテーションおよび質疑応答が行われた。決定事項等については、項目(4)に示すとおりである。

- ・ スチールサポートシステムおよび給水システム（Onagi/Martino）
- ・ ペントナイト・グラウト・トライアル（升元）
- ・ 岩盤特性調査：弾性波トモグラフィ（Hayles）
- ・ 弾性波反射法、AE/MS測定（Young）
- ・ MVP（Martino）、SEPP I（Courtnut）
- ・ 送水試験、水理試験（Kozah）
- ・ トレーサー試験のシミュレーション（平）
- ・ ペントナイトブロック作成（Dixon）
- ・ 計器埋設（Roach）
- ・ ペントナイトプラグシミュレーション（Dixon）
- ・ ペントナイトの特性（Plas）
- ・ ペントナイトプラグ構築（Dixon）
- ・ コンクリートプラグ構築（Gray/Cravalho）
- ・ コンクリートプラグモデリング（Didry）

#### (4) 決定・審議事項（案）

- 1) スケジュールは、スチール・サポートの設置が1月16日まで、ペントナイトプラグの設置が3月末まで予定されている。その後、4月末までにプラグ間の砂の埋戻し、5月末までにコンクリートプラグの設置、6月に注水開始となっており、1998年中に4 MPaまで昇圧して、1999年末までに結果を出したいとしている。その後、トレーサー試験、温水注水phaseと続く。
- 2) 実験の評価のため、モデル化（数値解析）が望まれている。既にANDRAが着手しており報告書（TSX-09）も出されているが、日本側からも検討することになった。特にトレーサー試験についての事前解析を期待されている。
- 3) 実際の注水時のoperation（昇圧ステップの期間、トラブル時の対処のしかた）についてAECIから試案が出された。その一部分として、たとえば、
  - ・はじめに100kpaをかけ、圧力センサーに十分な膨潤圧が観測されてから昇圧に入る
  - ・100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,500, 2,000, 3,000, 4,000kpaの10段階で、それぞれ2週間ずつ圧をかける（20週が必要だが、20週という期間は長すぎたり短すぎたりしないか？）
  - ・4 MPaをかけることができない場合、それ以下の圧で試験結果が得られる場合はその圧を最大圧として実験する。あまりに小さい圧しかかけられない場合は、両面注水（?）を行う。等の、いろいろな場合を想定した対処方法が検討されている。
- 4) スチールサポートに関しては、日本側から安全性の確認を再度求めた結果、設計は変えられないので、
  - ・コンクリートリングの設計の詳細な計算書の提出
  - ・コンクリートリングにモニタリングセンサーを設置
  - ・スチール部にもモニタリングセンサーを設置これらのセンサーを追加で設置することで、危険がないか常時監視する、ということで合意している。

#### (5) 今後のスケジュール

1998/1/16 : スチールサポートの構築完成  
1998/3/27 : ペントナイトプラグ完成  
1998/4/24 : 流出防止層完成  
1998/5/15 : コンクリートプラグの構築完成

## 4<sup>th</sup> Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting

### Agenda

Wednesday June 25, 1997 (URL)

- 8:45 Arrive URL - Coffee/Muffins
- 9:00 Introduction - opening comments (comments invited from experiment partners)
- 9:15 Status & schedule - Chandler
- 9:30 Excavation summary video - Read
- 9:45 Underground Site Visit and Surface Tour
- 12:00 BBQ Lunch
- 13:15 Pressure system - Martino
- 13:35 Hydrogeology/Connected permeability - Kozak
- 14:00 Tracer testing - Frost
- 14:20 Rock characterization & AE/MS - Read, Cournut (SEPP1)
- 14:40 Modelling of bulkhead keys - Chandler, Carvahlo, Cournut
- 15:10 Coffee break
- 15:30 Shape and location of keys (review) - Chandler
- 15:45 Trial keys/MVP data/key excavation methods - Read
- 16:15 Adjourn
- 17:45 Return to Winnipeg
  
- 18:45 Dinner (Winnipeg)

図-3.35 1997/6/25 の agenda

## **4<sup>th</sup> Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting**

### **Agenda**

Thursday June 26 (Delta Hotel)

- 8:30 Clay block making (review) - Dixon
- 9:00 Issues from clay modelling - Vercoutere
- 9:30 The Clay Bulkhead Simulation - Chandler/Dixon
- 10:00 Break
- 10:20 Clay bulkhead restraint system - Hawk
- 10:40 TDR - Cournut
- 10:50 Bulkhead geometry, construction and instrumentation - Dixon
- 11:20 Clay bulkhead grouting - Masumoto
- 11:35 Comments on clay bulkhead design - Fujita, Toida
- 12:00 Lunch
- 13:15 Shot-clay, filter (backfill) material, pneumatic sand placement - Dixon
- 13:40 Concrete bulkhead construction & instrumentation - Gray/Hawk
- 14:40 Break
- 15:00 Concrete modelling - Didry (EDF)
- 15:30 Construction/Operation sequence and Operation Protocol - Chandler
- 15:45 Reporting - Chandler
- 16:00 Participants Comments (PNC, WIPP, ANDRA, Fairhurst)
- 16:20 Meeting wrap-up - Chandler
- 16:30 Adjourn

図-3.36 1997/6/26のagenda

## LIST OF MEETING PARTICIPANTS

### 4<sup>TH</sup> TUNNEL SEALING EXPERIMENT COORDINATION MEETING

Kiyoshi Amemiya	- Hazama Corporation
José Carvalho	- Golders Associates
Neil Chandler	- AECL
André Cournut	- ANDRA
Olivier Didry	- E.D.F.
David Dixon	- AECL
Prof. Charles Fairhurst	- Reviewer, University of Minnesota
Laurie Frost	- AECL
Tomoo Fujita	- PNC
Malcolm Gray	- AECL
Frank Hansen	- WIPP
Hugh Hawk	- Delcan
Prof. Yoji Ishijima	- Reviewer, Hokkaido University
Ed Kozak	- AECL
Jason Martino	- AECL
Kazuhiro Masumoto	- Kajima Corporation (attached to URL)
Glen McCrank	- AECL
François Pineau	- ANDRA
Rod Read	- AECL
Joe Tillerson	- WIPP
Masaru Toida	- Kajima Corporation
Gautier Vercoutere	- ANDRA
Bertrand Vignal	- ANDRA

図-3.37 1997/6/25~26 の参加者

## **5<sup>th</sup> Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting**

### **Agenda**

Tuesday December 2, 1997 (URL)

- 8:45 Arrive URL - Coffee/Muffins
- 9:00 Introduction - opening comments, status and schedule - Chandler
- 9:20 Underground Site Visit
- 11:00 Opening comments - PNC, WIPP, Andra
- 11:15 Experiment Reporting and Publications - Chandler
- 11:30 Construction summary, steel shell restraint & pressure supply system - Onagi/Martino
- 11:45 Lunch
  - (a video of TSX construction will be played 12:15-13:00)
- 13:00 Clay grouting trials & placement - Masumoto
- 13:20 Rock characterization:
  - Seismic Tomography - Hayles
  - Seismic Refraction & AE/MS - Young
- 14:30 BREAK
- 14:50 MVP (Martino) & SEPPI (Cournut) (comment on status)
- 14:55 Connected permeability - Kozak
- 15:10 Hydrogeology and seepage measurements - Kozak
- 15:25 Tracer test
- 15:40 Plan for water flow simulation (K. Taira, Kajima)
- 16:00 Adjourn
  
- 17:45 Return to Winnipeg

図-3.38 1997/12/2 の agenda

## **5<sup>th</sup> Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting**

### **Agenda**

Wednesday December 3 (Delta Hotel)

- 9:00 Clay block making and materials summary - Dixon
- 9:30 Instrumentation summary - Roach
- 10:00 Clay Bulkhead Simulation & cable seal tests - Dixon
- 10:20 BREAK
- 10:40 Characterization of clay (comparison between PNC and CERMES) - Andra
  - Results of Hydromechanical modelling - Andra
  - Experiment on effective stress - Andra
- 11:20 Clay bulkhead construction - Dixon
- 11:50 LUNCH
- 13:10 Concrete bulkhead issues - Gray
- 13:40 Concrete bulkhead construction sequencing and method - Cravalho (Golder)
- 14:10 Concrete bulkhead modelling - Didry (E.d.F.)
- 14:40 BREAK
- 15:00 Concrete instrumentation - Gray
- 15:20 Experiment operation and remedial actions - Chandler
- 15:40 Participants Comments (PNC, Andra, WIPP, Peer reviewers)
- 16:00 Adjourn

図-3.39 1997/12/3 の agenda

## 参考文献

- 1) The Tunnel Sealing Experiment Conceptual Design Report, N. A. Chandler, D. A. Dixon, M. N. Gray, and R. S. Read
- 2) Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting No. 1, July 26, 1995
- 3) Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting No. 2, April 9&10, 1996
- 4) Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting No. 3, September 12&13, 1996
- 5) Scoping Analysis for the Tunnel Sealing Experiment, E. Dzik and R. Read
- 6) Reasults of Clay Grouting Trail, K. Masumoto (Kajima Corp.)
- 7) Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting No. 4, July 25&26, 1997
- 8) Tunnel Sealing Experiment Coordination Meeting No. 5, December 2&3, 1997

## Appendix—I 計測機器のレイアウト

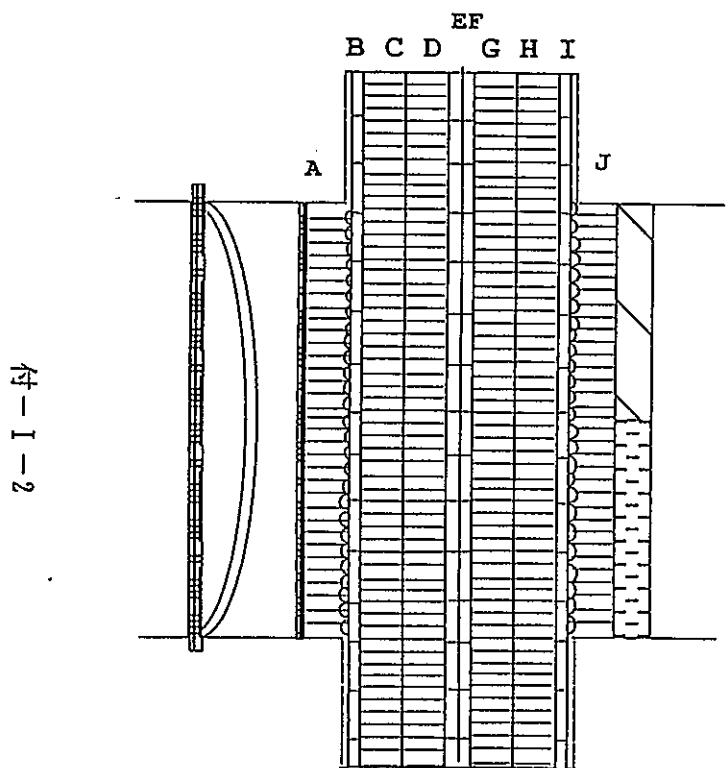
Instrument	Purpose	Location	# Installed
Geonor TPC*	monitor rock/clay contact pressure	in rock immediately around clay bulkhead	11
Roctest TPC	monitor rock/clay contact pressure	in rock immediately around clay bulkhead	16
Roctest EPC	monitor total pressures within clay	in clay blocks	35
Piezometers	monitor water pressure	in clay blocks in adjacent rock	8 5
Rotronic Hygrometers	monitor moisture content	in clay blocks	14
TDR Probes	monitor moisture content	in clay blocks	12
Wescor Psychrometers	monitor moisture content	in clay blocks in shotclay	82 48
Linear Potentiometers	monitor displacement	clay/backfill interface in clay	3 1
Rotating Potentiometers	monitor displacement	clay/backfill interface	1
LVDT's	monitor displacement	steel restraint	6
Sonic Probe	Bulkhead Strain	through blocks	1

\* TPC Total Pressure Cell, Only one face of cell will sense pressure

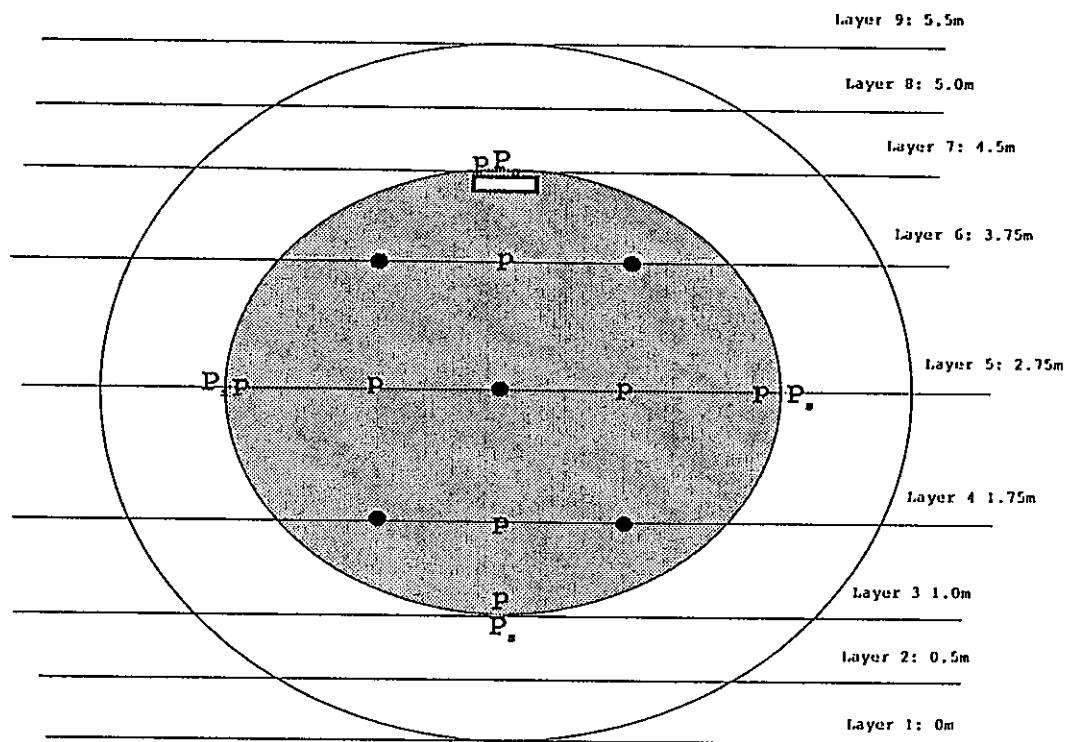
Geonor and Roctest are different manufacturers of this type of instrument

\*\* EPC = Earth Pressure Cell, Similar to TPC except it can sense pressure on both faces

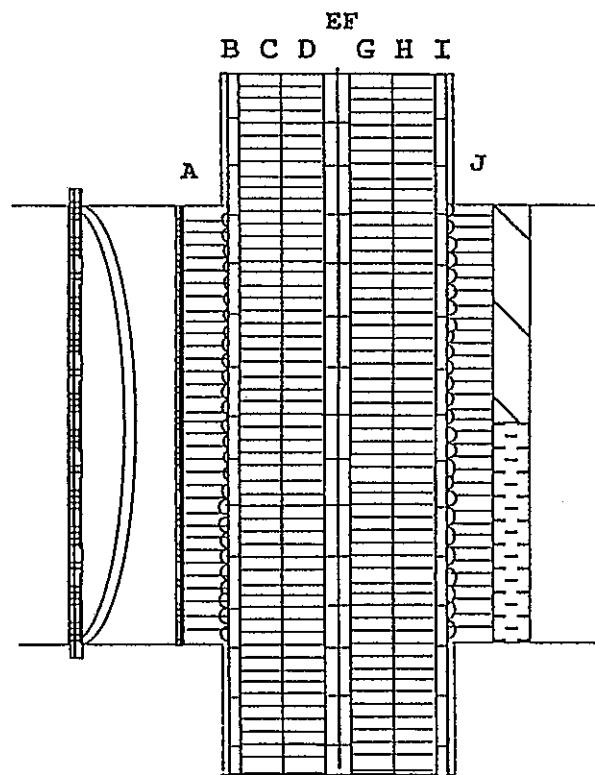
- Total Pressure Cells (5)  
Mounted on face of steel plate
- P Psychrometers: mounted in series A blocks  
close to plate surface (8)
- P. Psychrometers: mounted in shot clay (4)



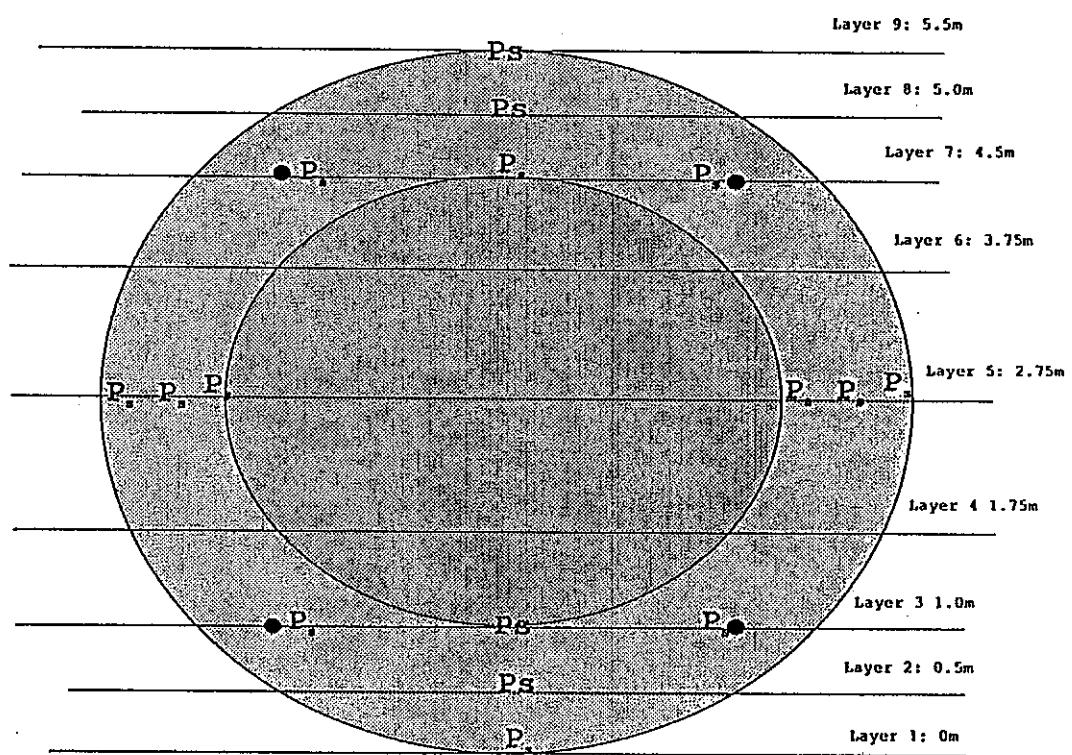
Profile View of Clay Seal



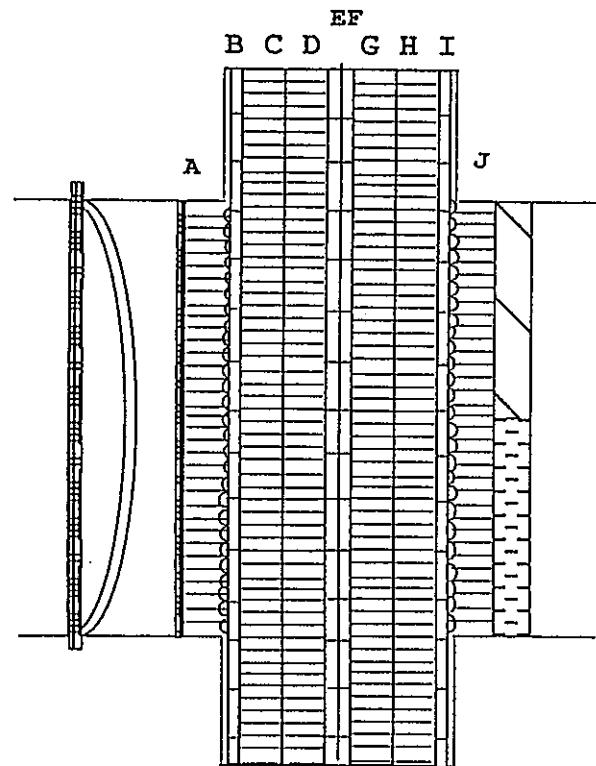
- Total Pressure Cells (4)  
Mounted on Rock Face measuring pressures parallel to the tunnel axis
- P. Psychrometers, mounted in Shotclay (8)
- H. Hygrometers: Mounted in series A block near B interface (1)



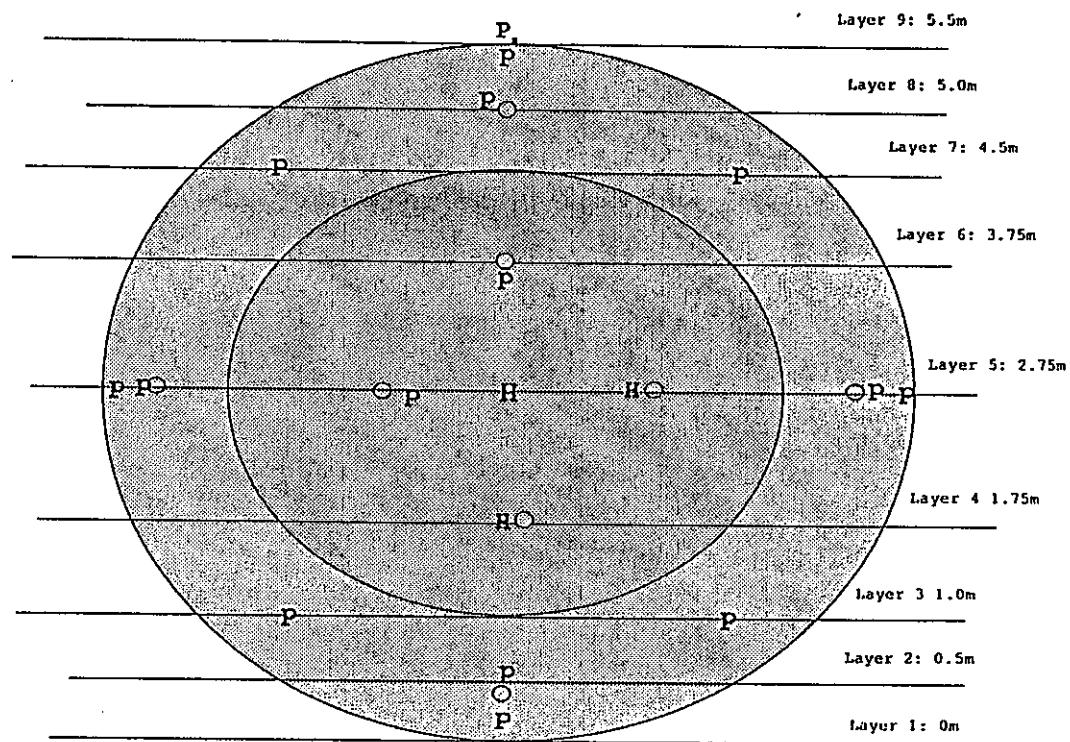
Profile View of Clay Seal



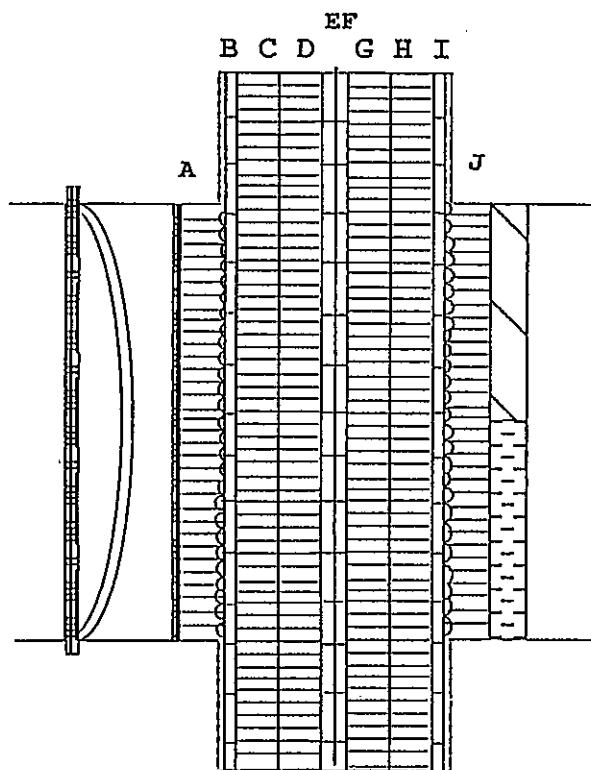
- Earth Pressure Cells (8)  
Mounted at interface of B & C
- P Psychrometers mounted in series B blocks (14)
- H Hygrometers: mounted in series B blocks (2)
- P Psychrometers mounted in shot clay (4)



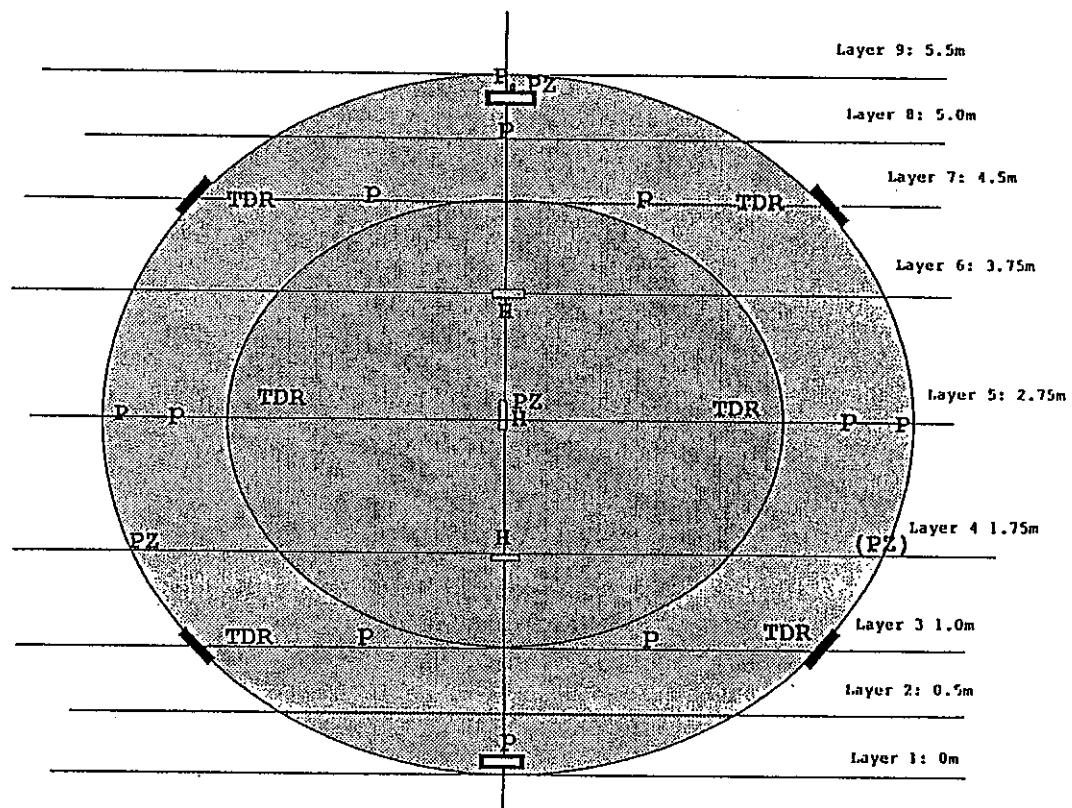
Profile View of Clay Seal



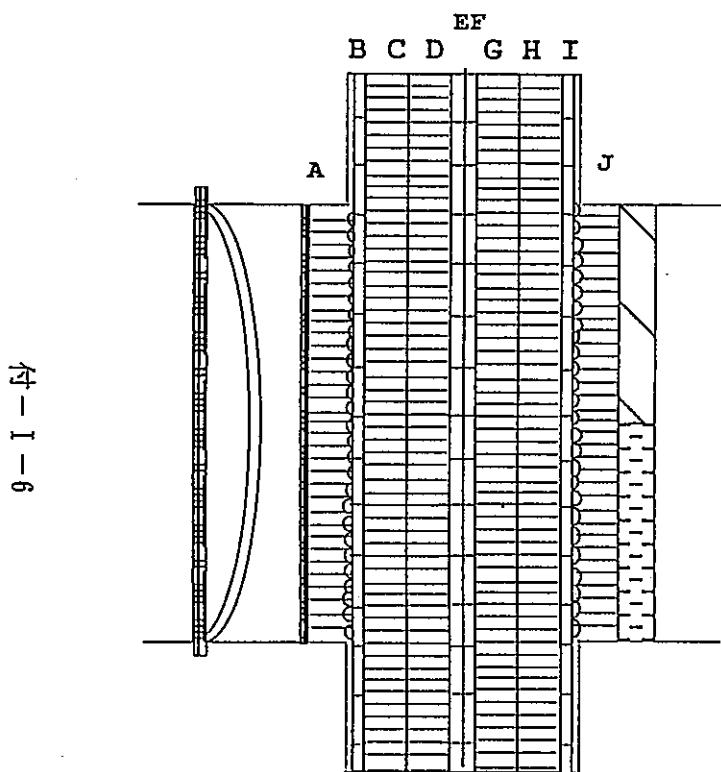
- Total Pressure Cell mounted on rock face (4)
- Earth Pressure Cells: mounted in series D blocks
- P Psychrometers mounted in Series D blocks (10)
- H Hygrometers, mounted in series D blocks (3)
- P Psychrometers mounted in shot clay layer (4)
- PZ Piezometers: mounted in series C blocks (6)



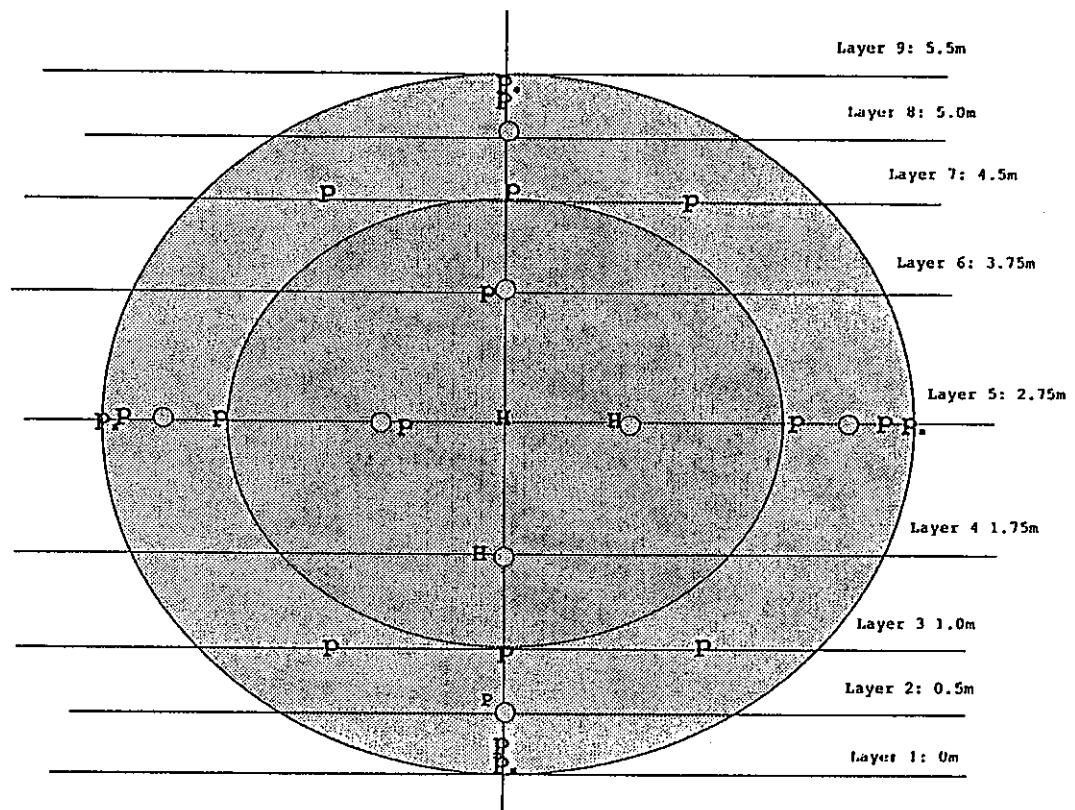
Profile View of Clay Seal



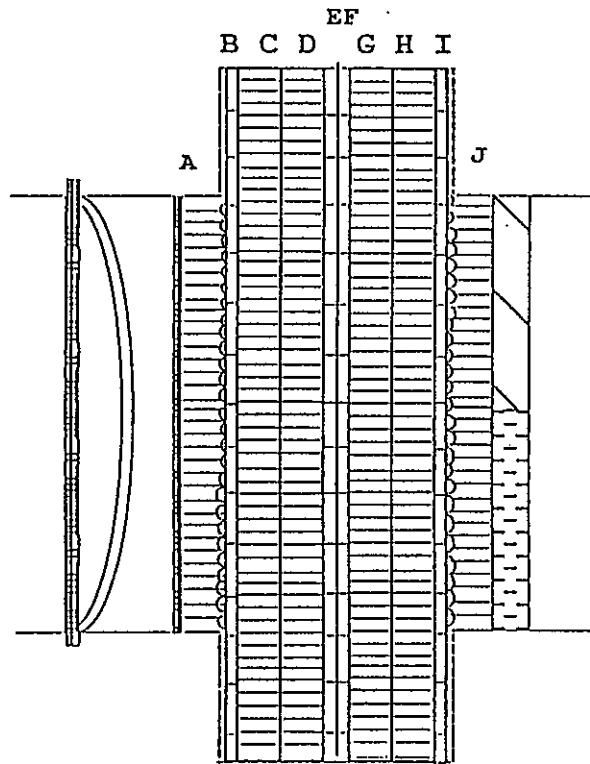
- Earth Pressure Cells: mounted at interface of series E & F (8)
- P Psychrometers mounted in series F blocks (14)
- P. Psychrometers, mounted in shotclay (4)
- H Hygrometers mounted in series F blocks (3)



Profile View of Clay Seal

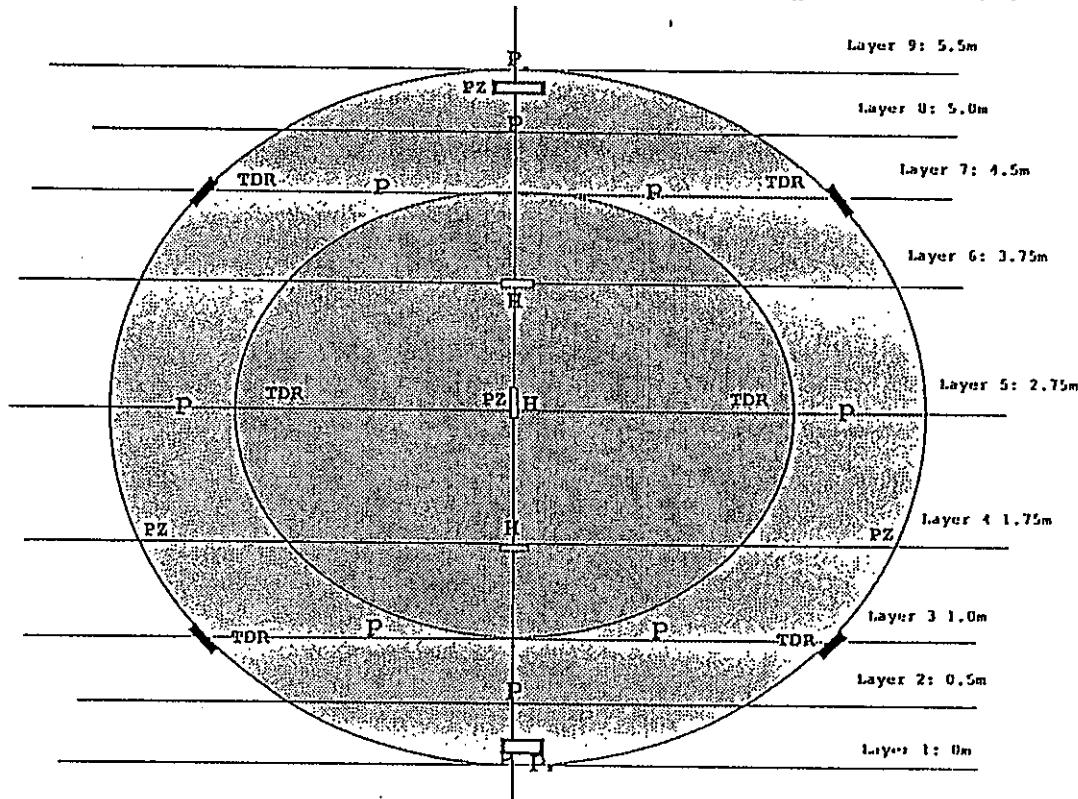


Sections E, F

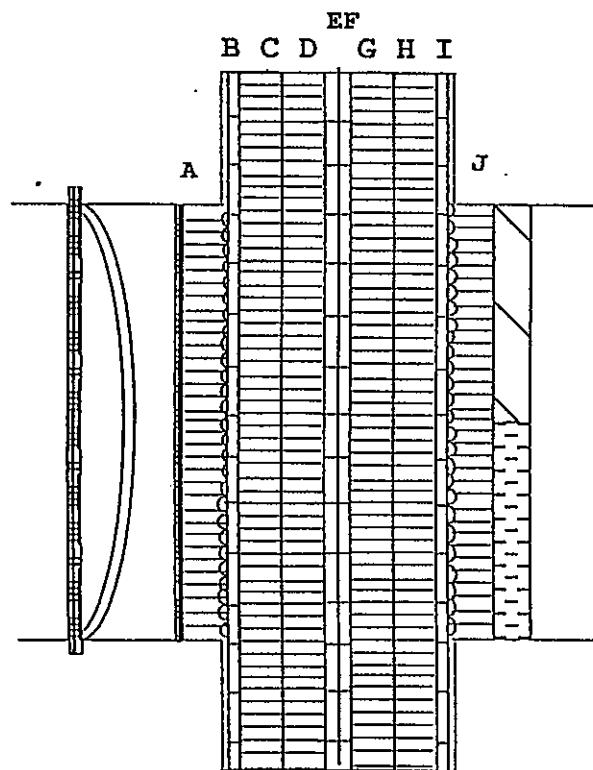


Profile View of Clay Seal

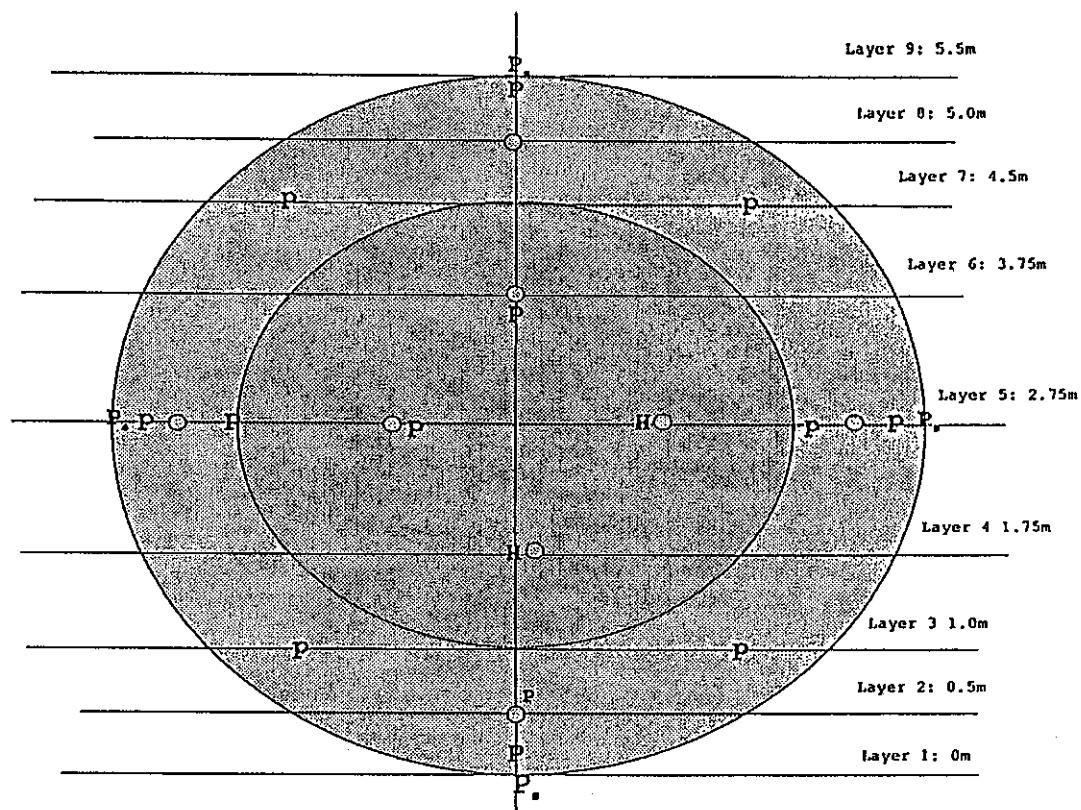
- Total Pressure Cell mounted on rock face (4)
- Earth Pressure Cells (4)  
Mounted on Rock Face measuring pressures  
Normal to the tunnel axis
- PZ Piezometers: mounted in series G blocks (1)
- P Psychrometers: mounted series H blocks (8)
- P Psychrometers, mounted in shotclay layer (4)
- H Hygrometers, mounted in series H blocks (3)
- TDR TDR Probes: mounted in clay blocks (6)



- Earth Pressure Cells: mounted on interface of series H & I (8)
- P Psychrometers mounted in series I blocks (12)
- H Hygrometers: mounted in series I blocks (2)
- P. Psychrometers mounted in shot clay layer (4)

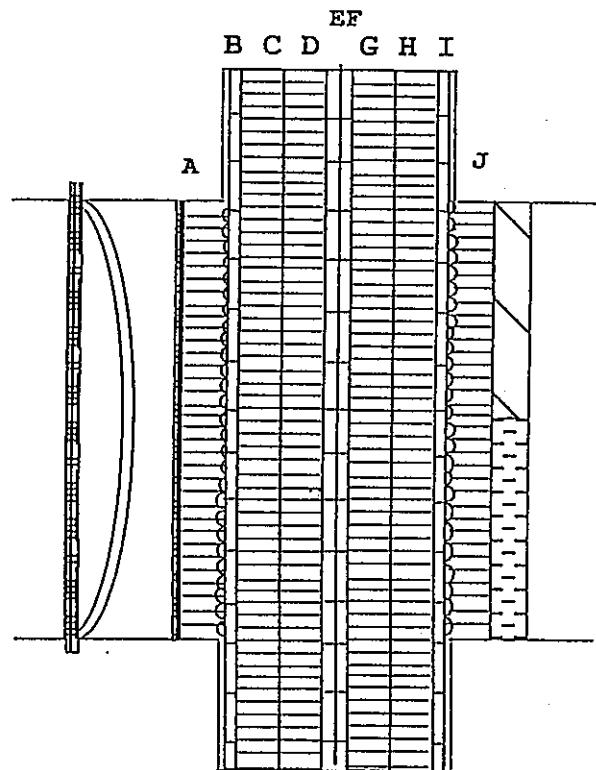


Profile View of Clay Seal

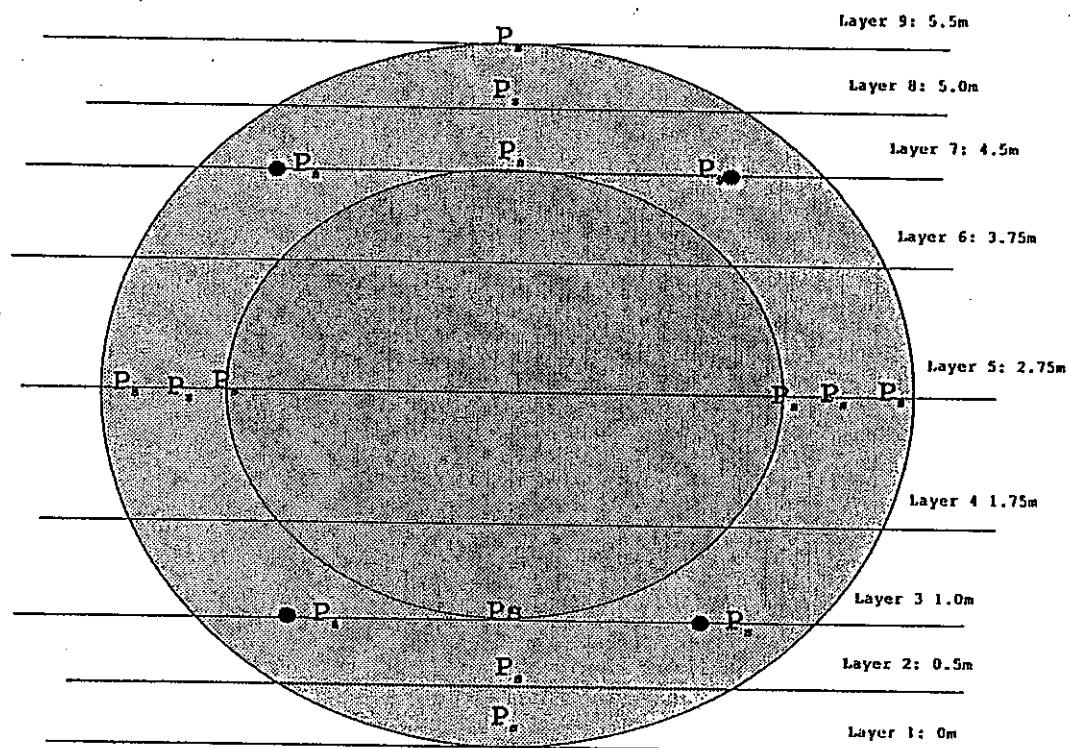


- Total Pressure Cells: mounted on rock face (4)
- P. Psychrometers, mounted in Shotclay (8)
- PZ Piezometers: mounted in series I blocks (4)

6 - I - 4



Profile View of Clay Seal

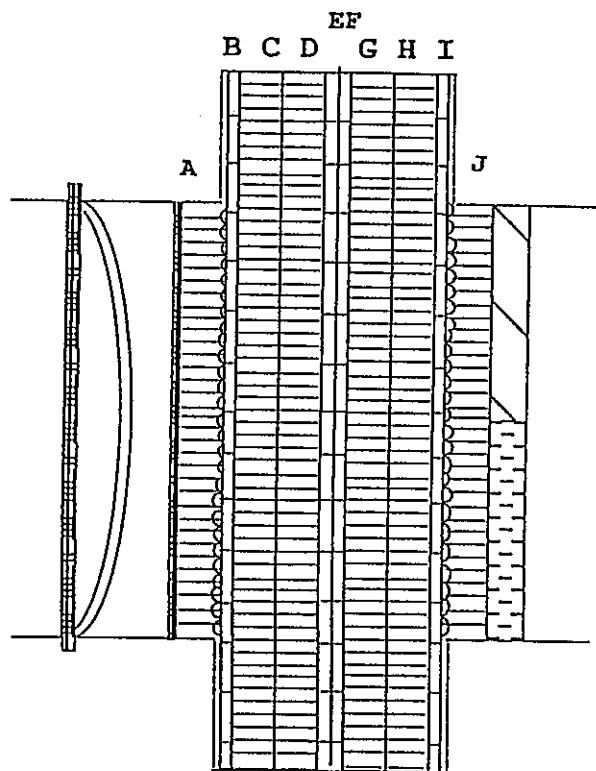


Profile View of Clay Seal

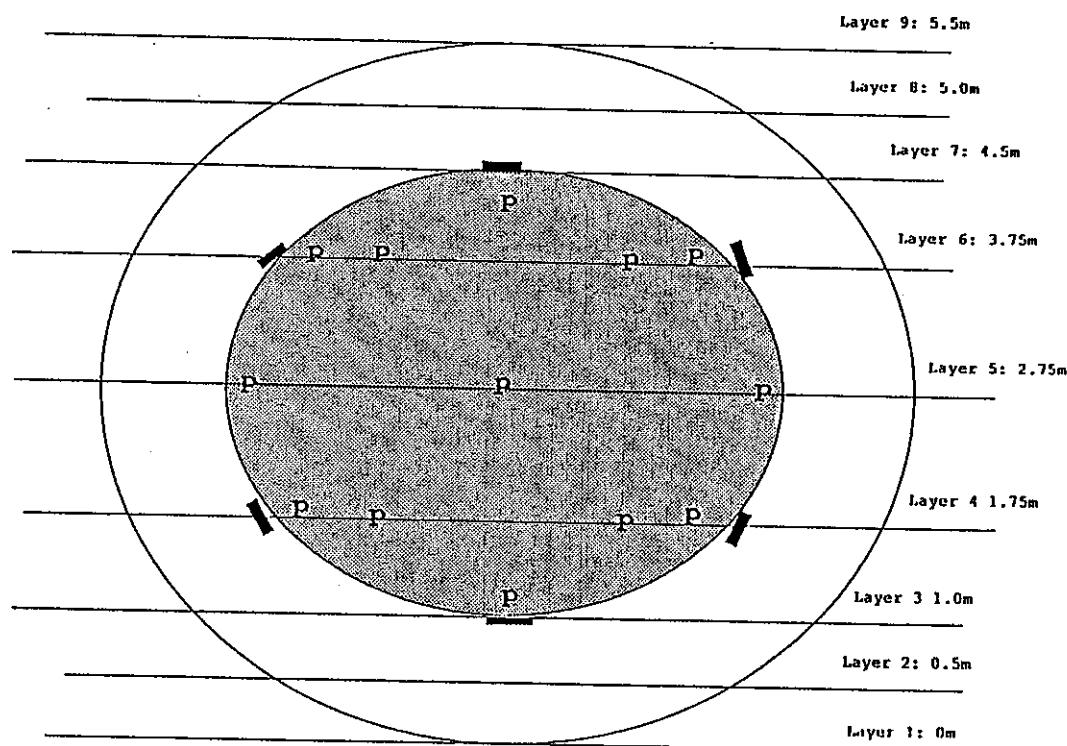
— Total Pressure Cells (6)

P Psychrometers, Mounted in clay Blocks (13)

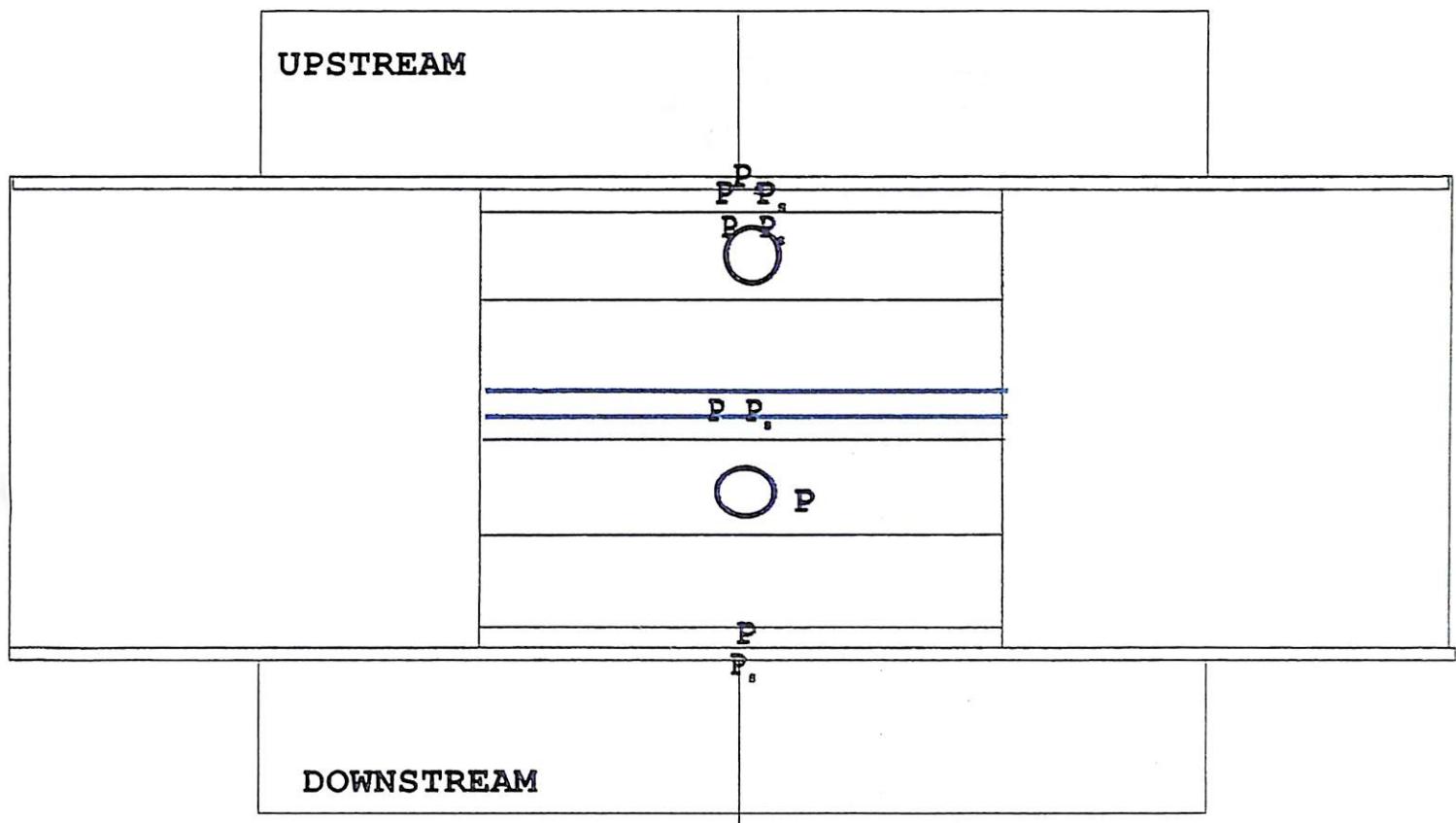
# - I - 10



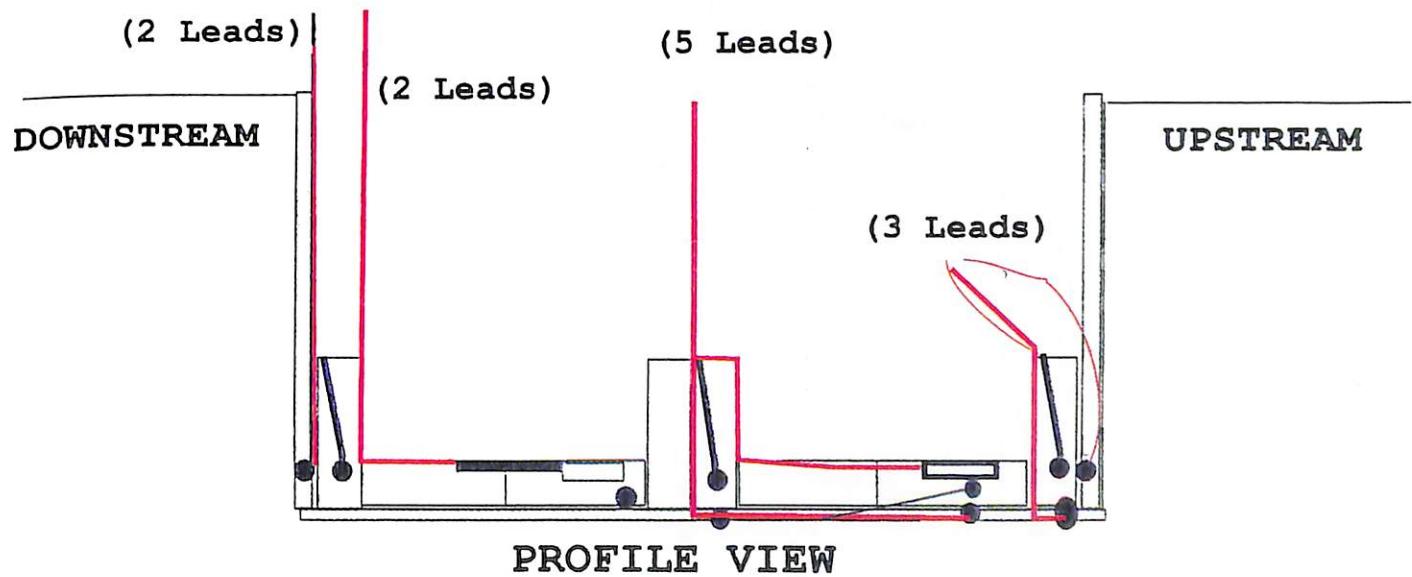
Profile View of Clay Seal



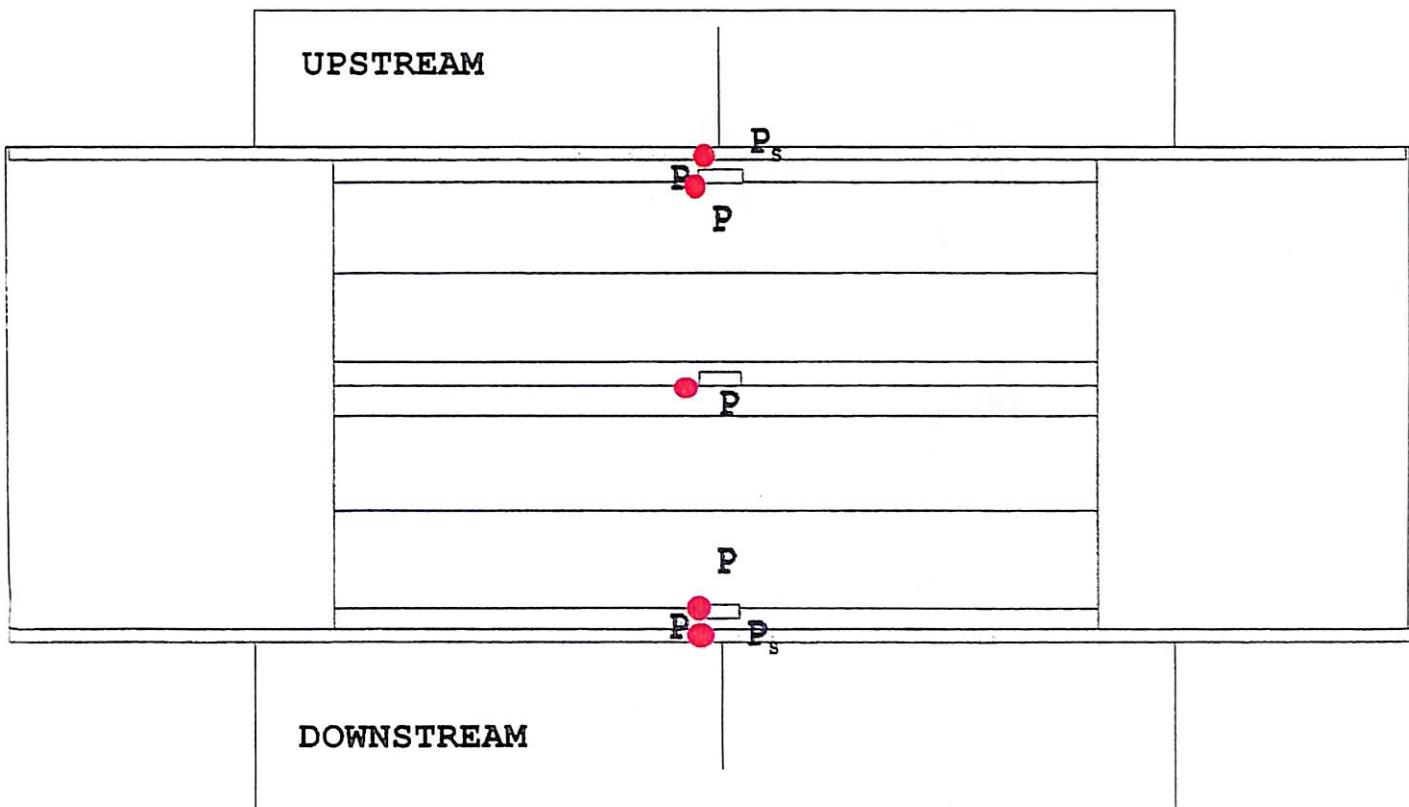
**PLAN VIEW**



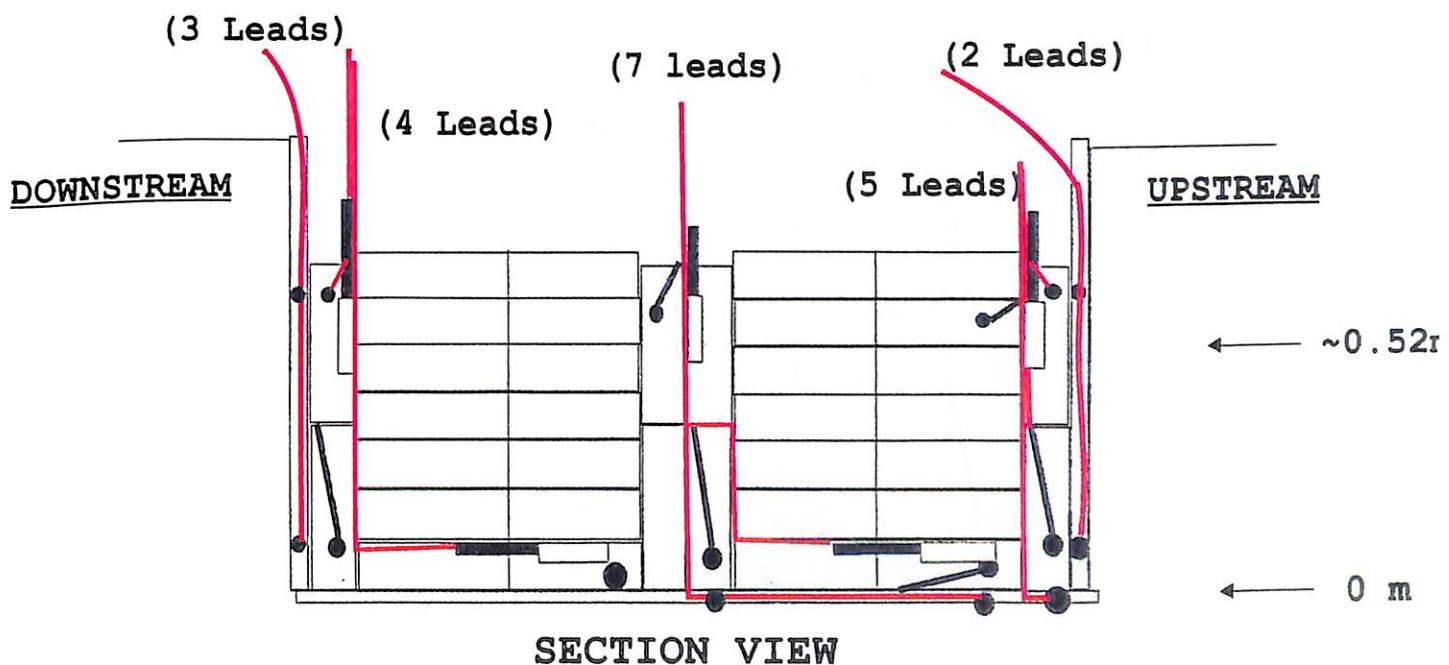
TOTAL OF 12 INSTRUMENTS



**PLAN VIEW**

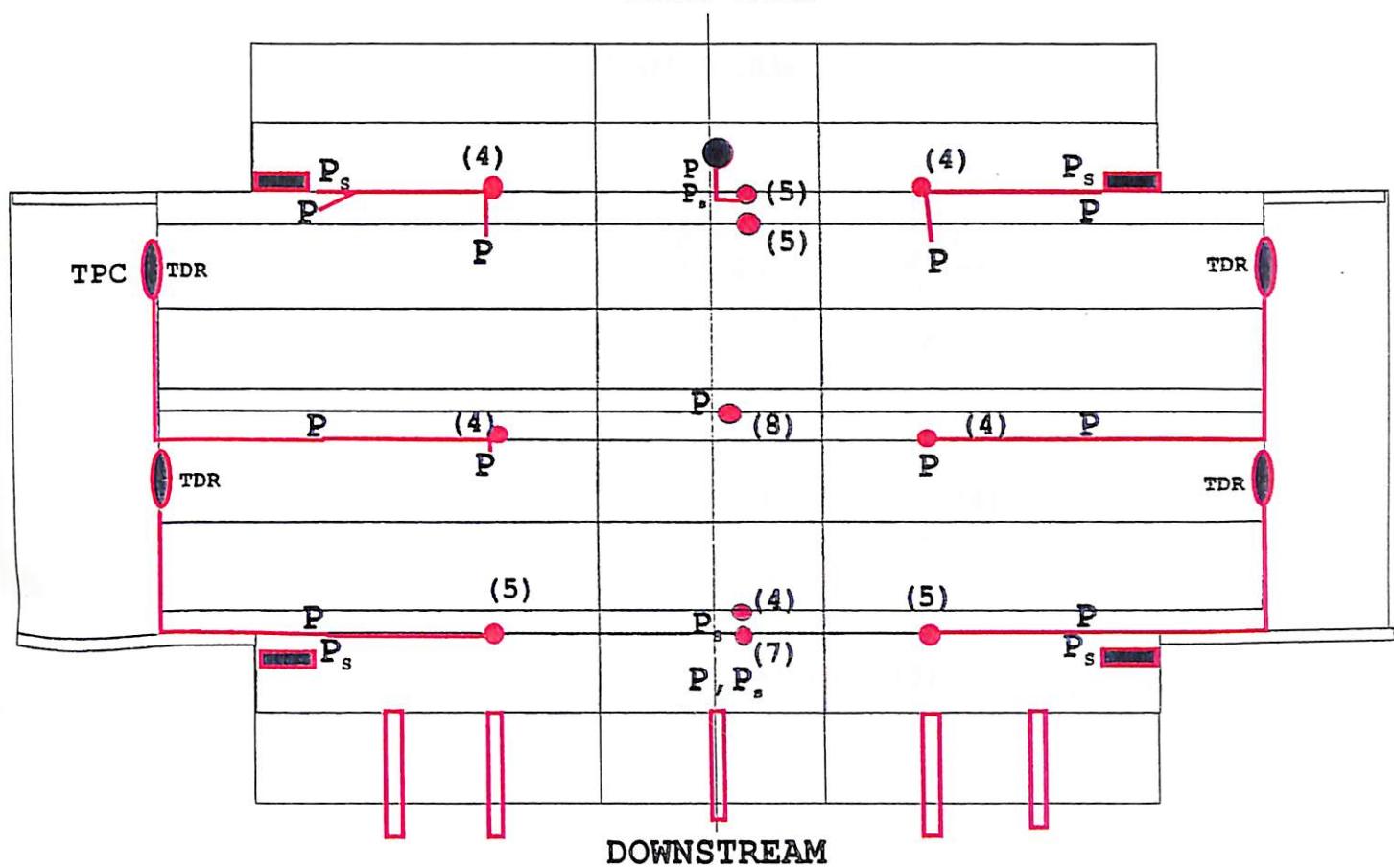


TOTAL # INSTRUMENTS = 12+9 =21

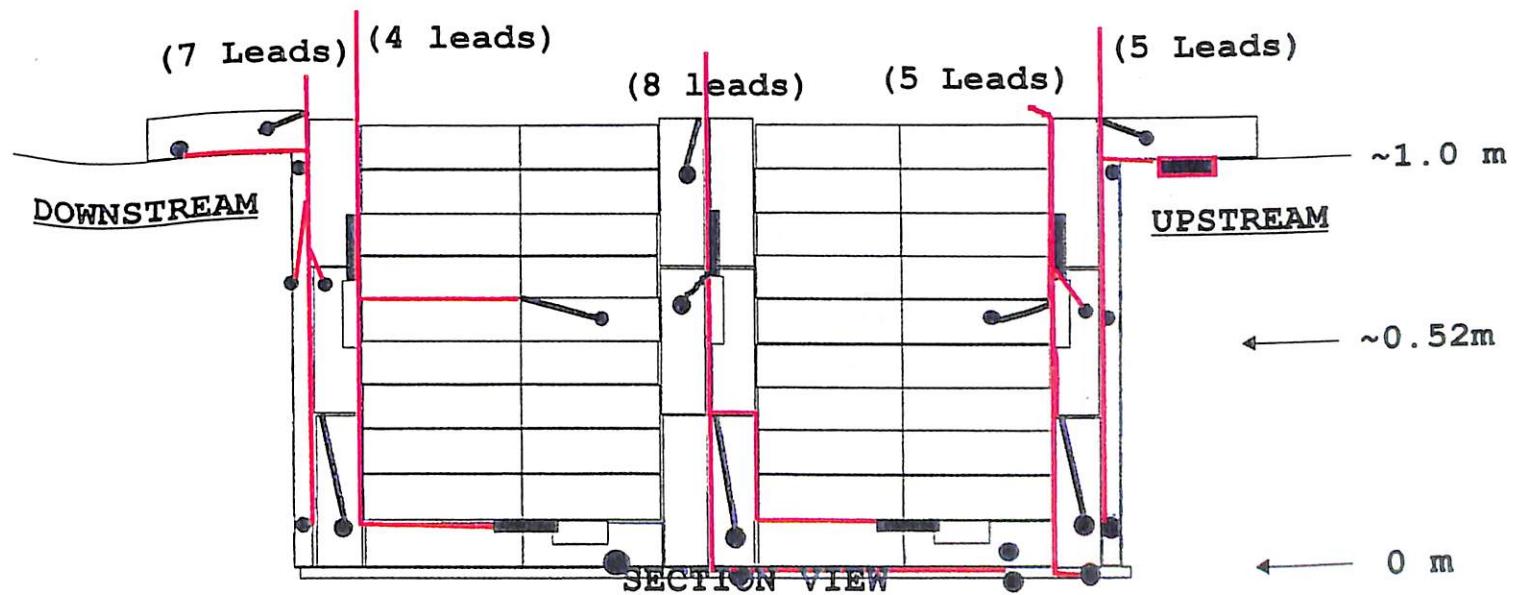


**SECTION VIEW**

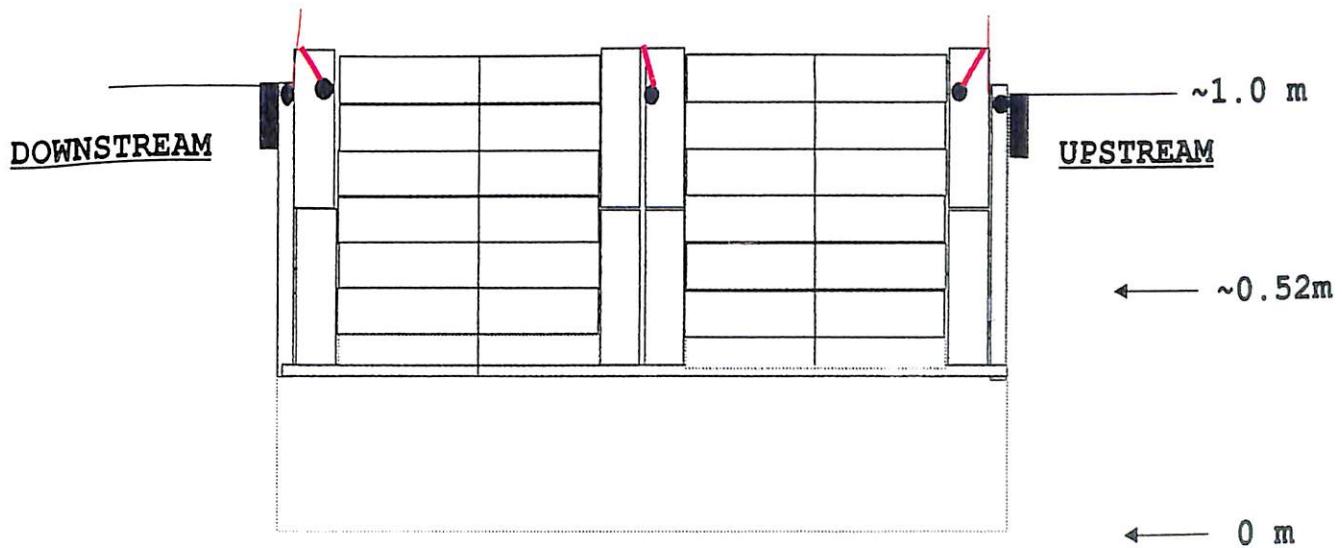
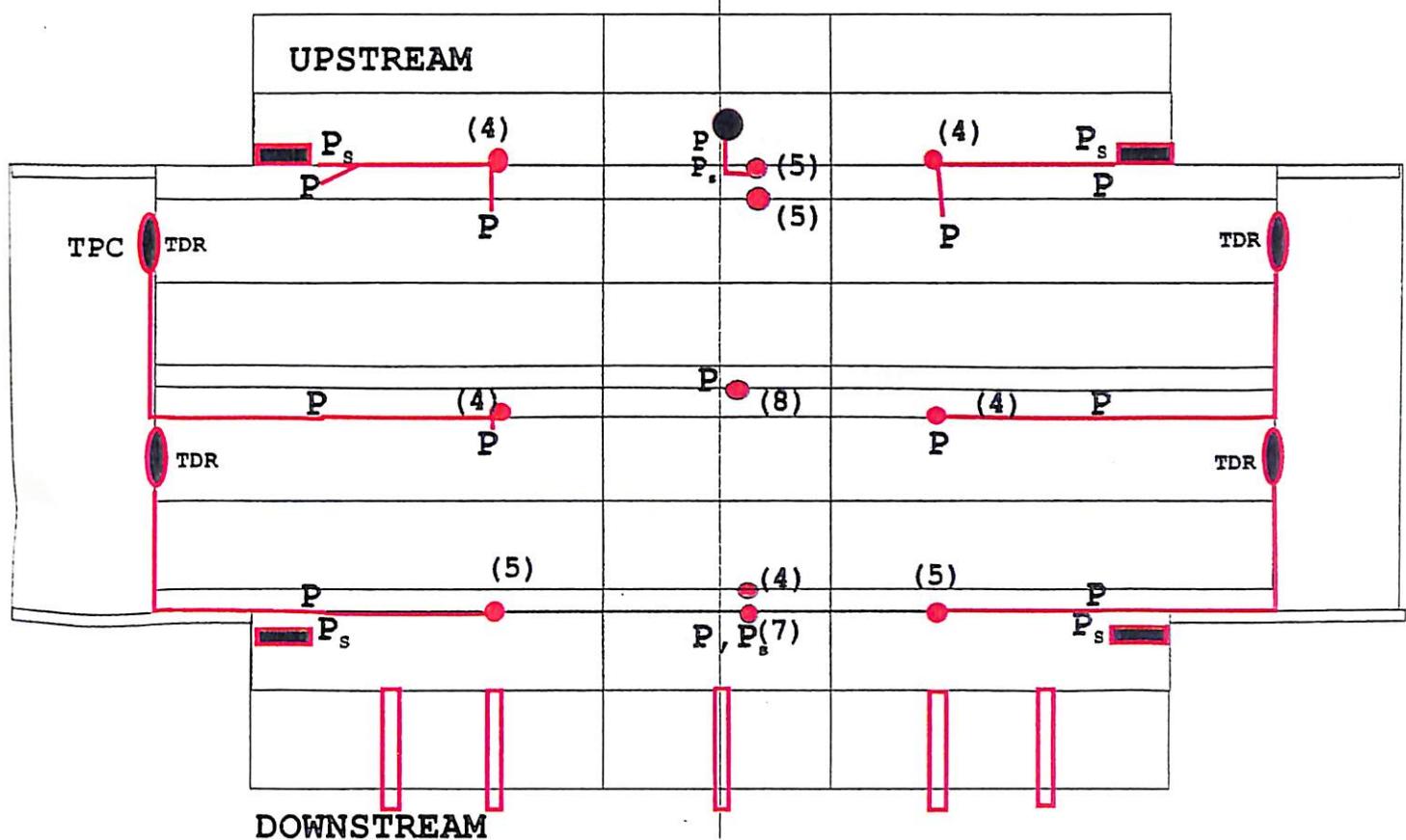
**PLAN VIEW**

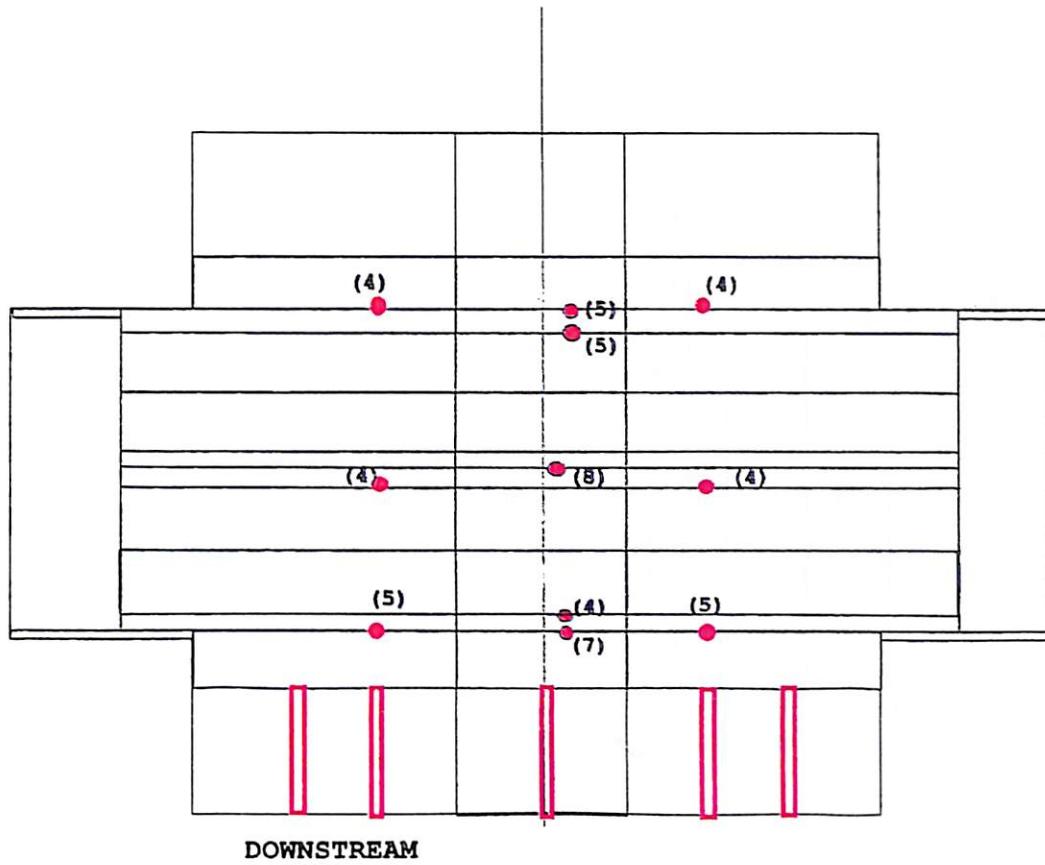


Total leads = 55



**PLAN VIEW**

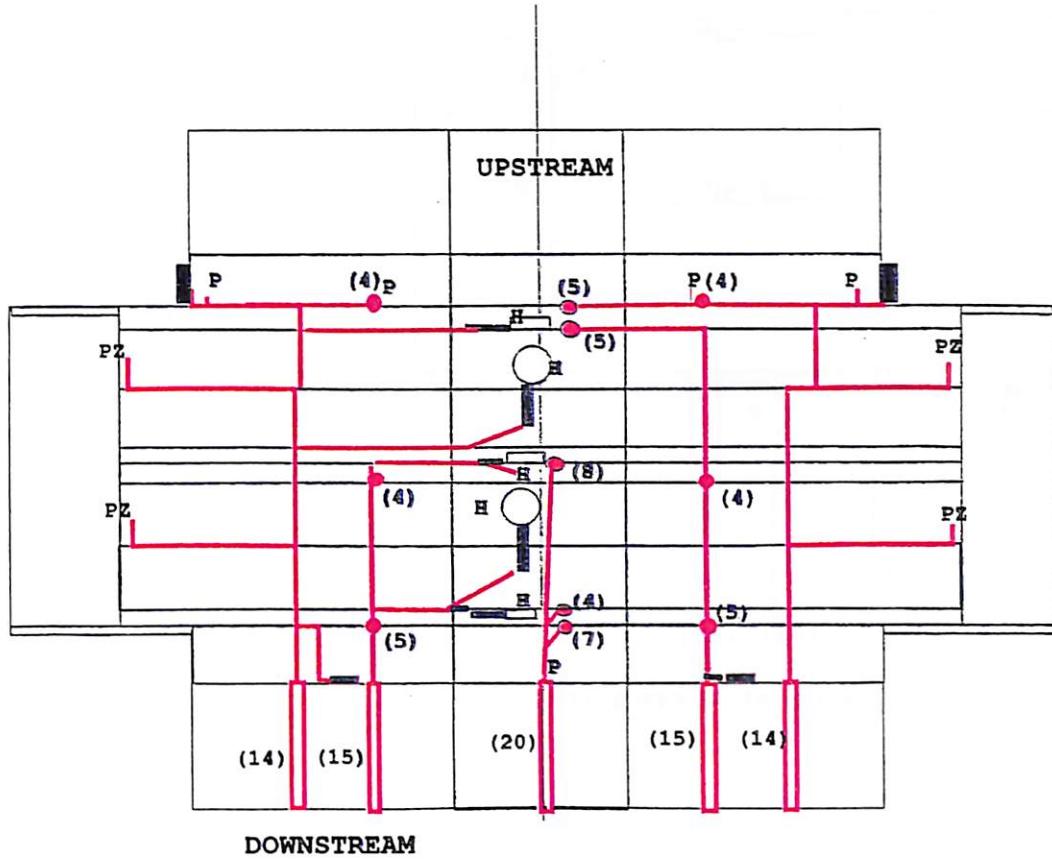




**Number and Location of Instrument leads Extending  
Upwards through the Clay Barrier at Tunnel Floor  
Level (1.0m Elevation)**

Note: There are an additional 5 leads coming up through the Clay key which originate from the rock immediately below the key (5 VW Piezometers)

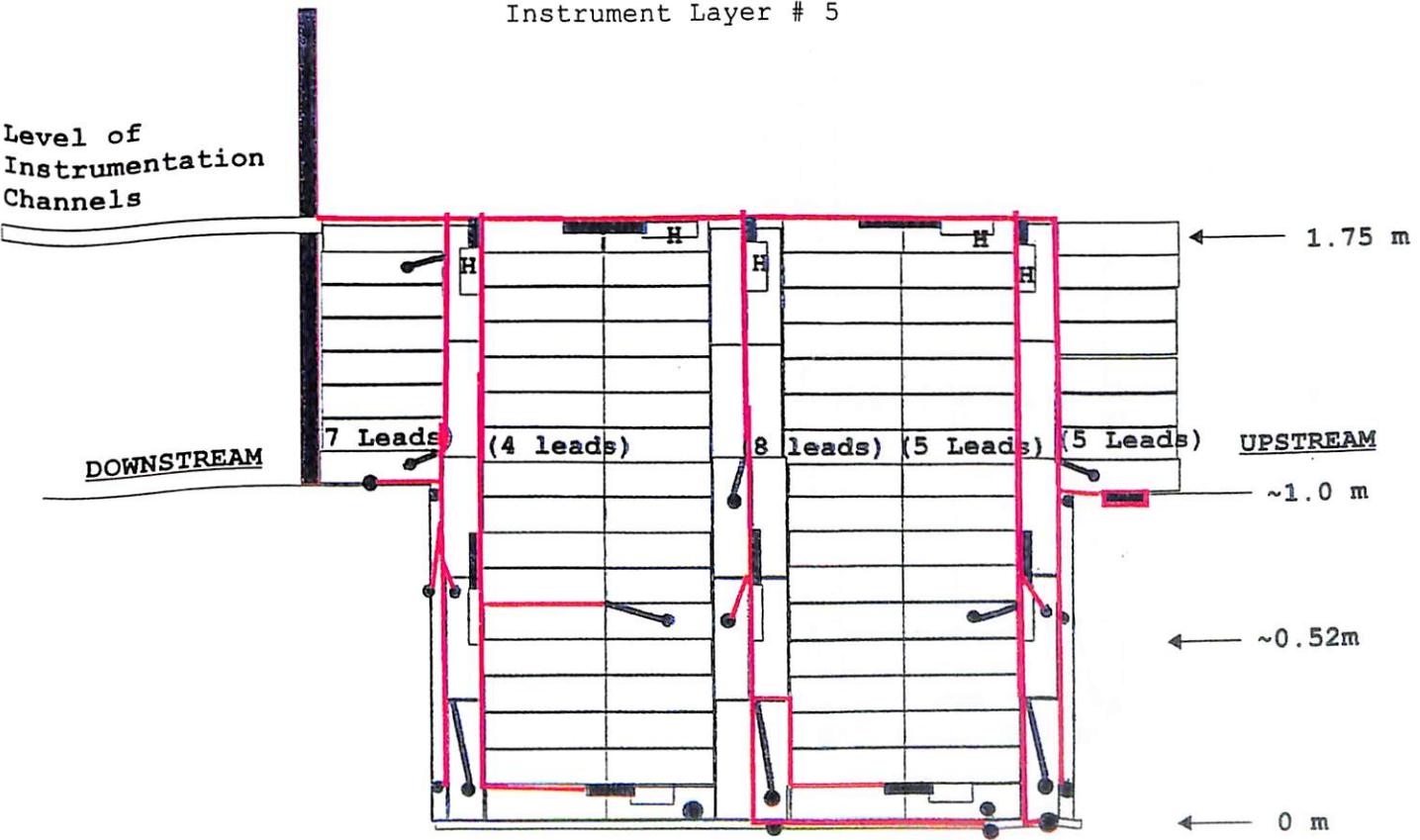
Total # of Instruments = 55 from Clay + 5 from Rock

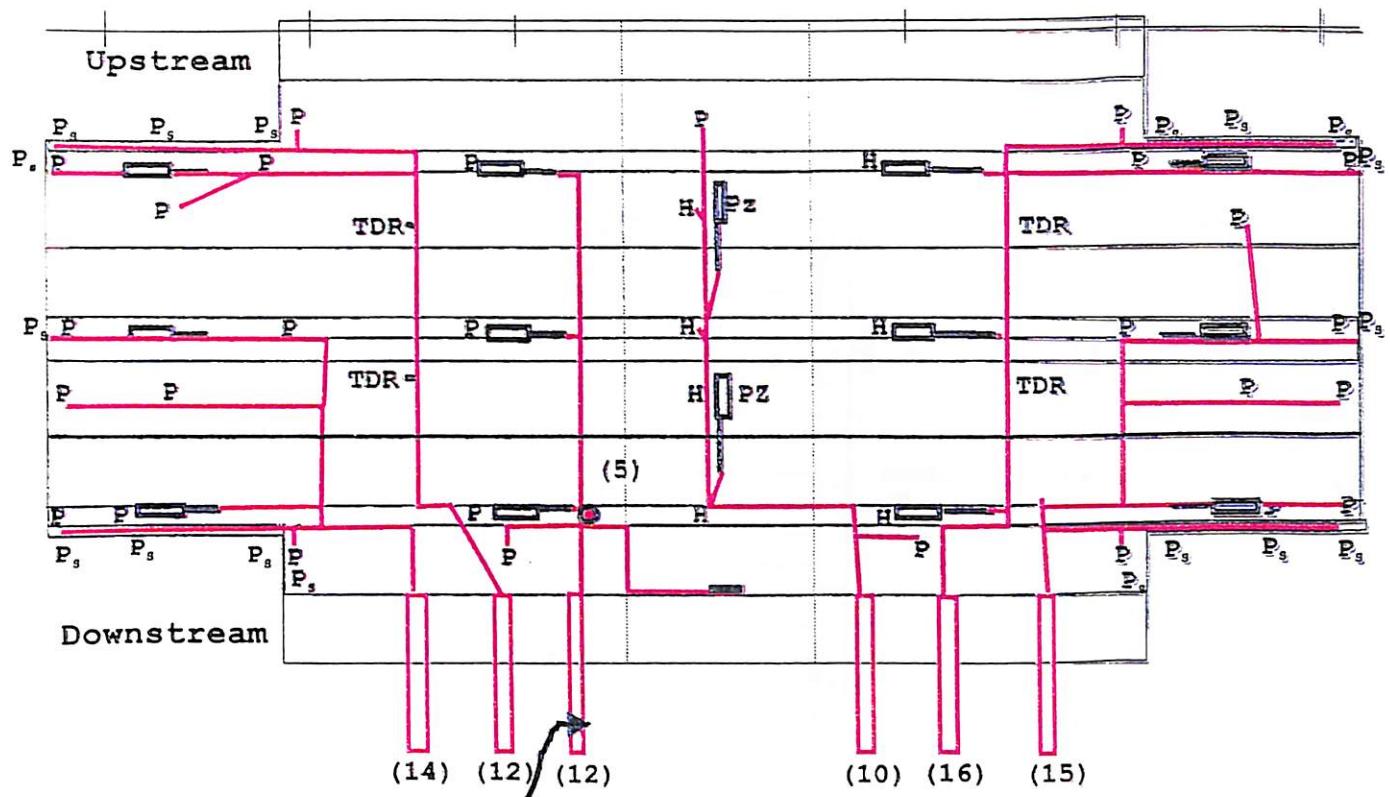


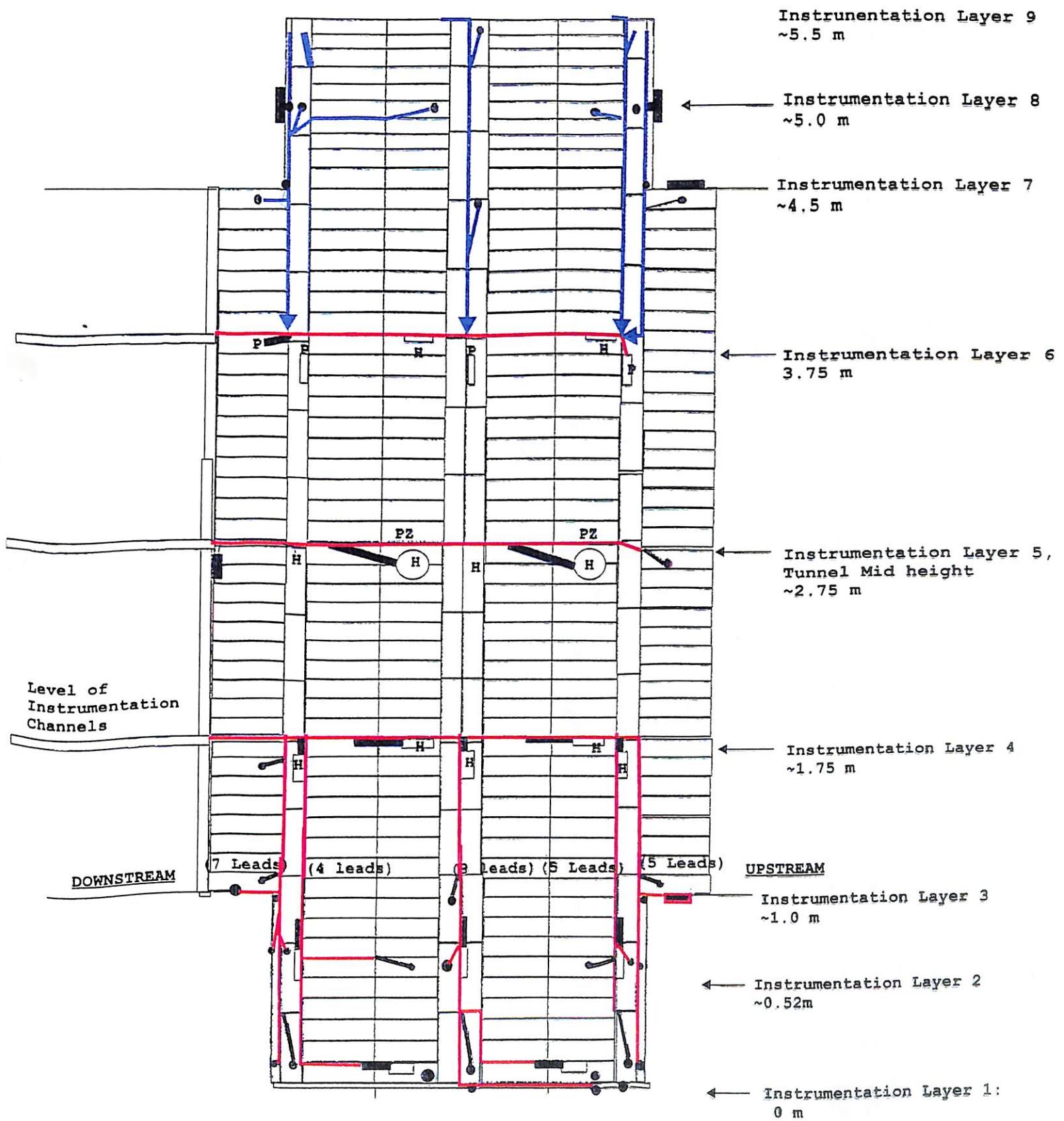
**TOTAL INSTRUMENTS = 78**

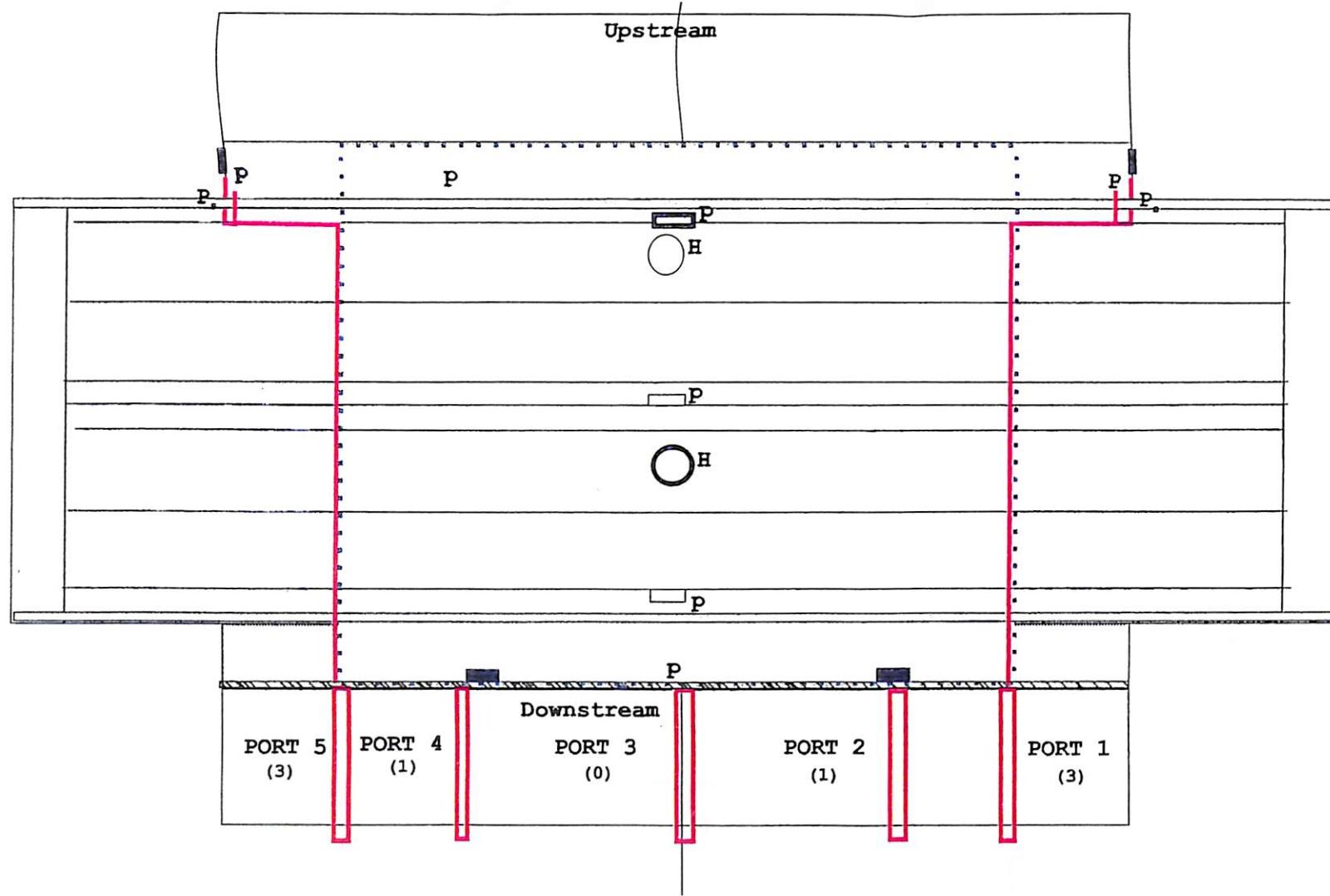
Note: Rock-mounted Piezometers will exit via  
Instrument Layer # 5

Level of  
Instrumentation  
Channels



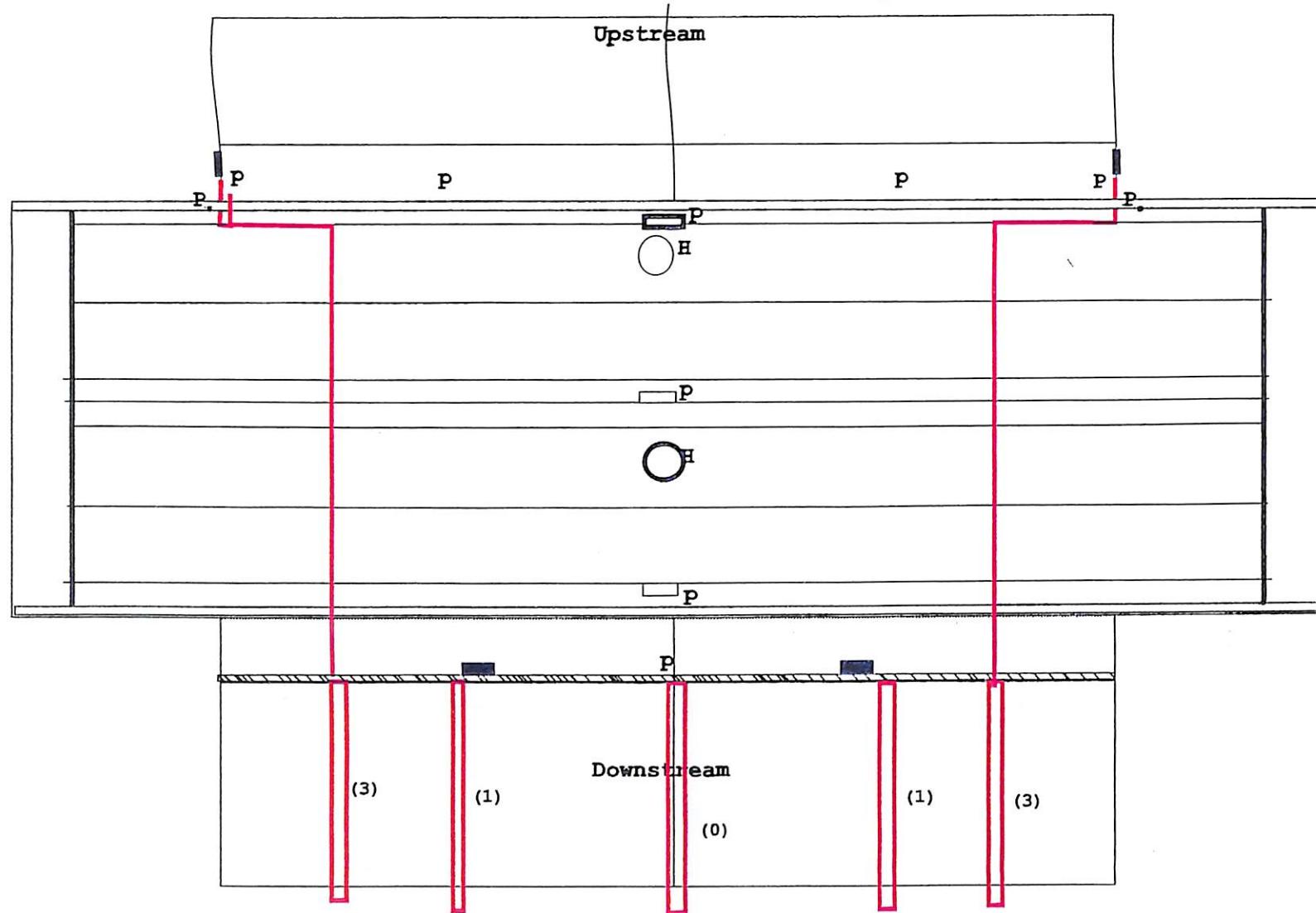


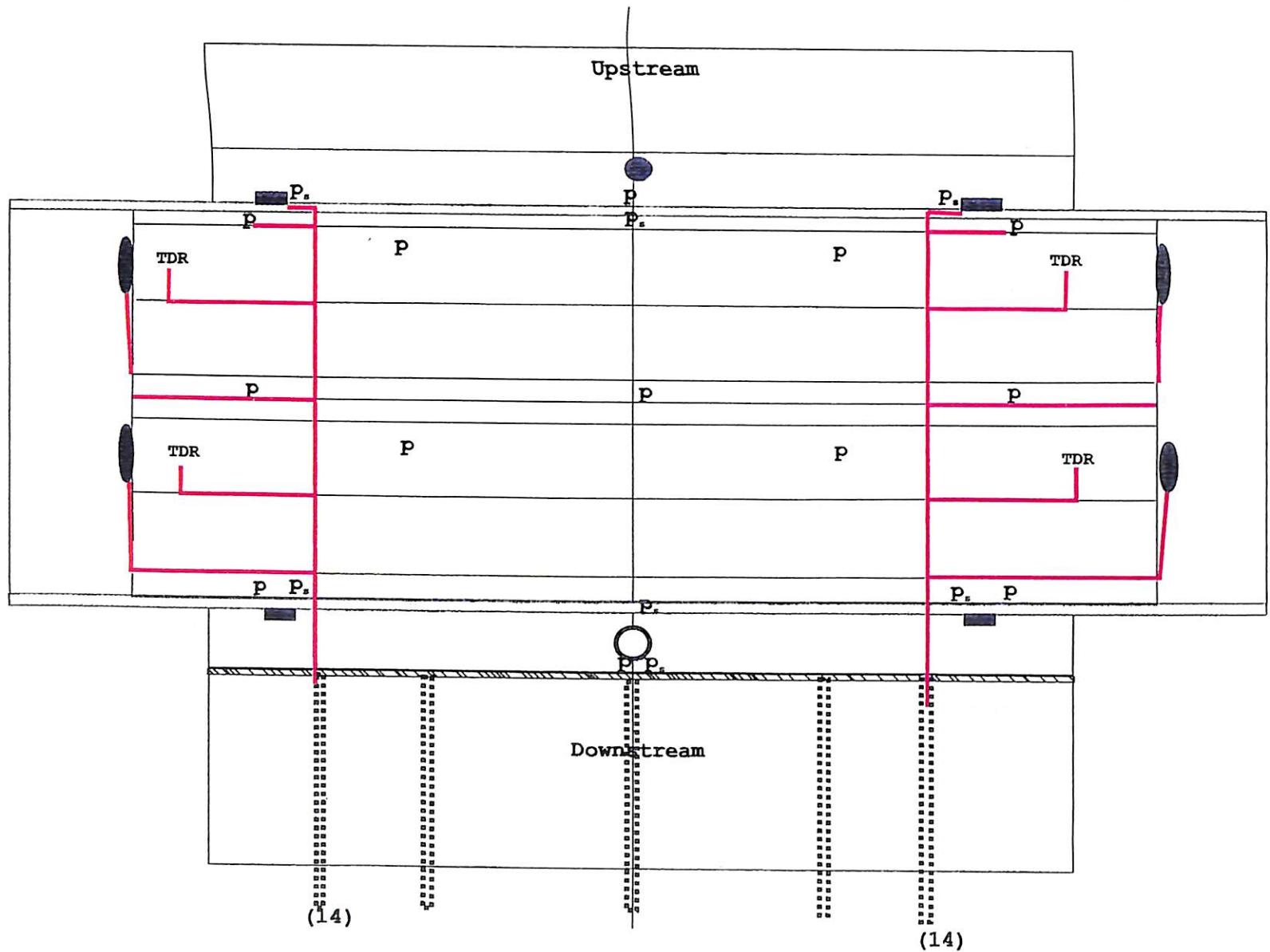


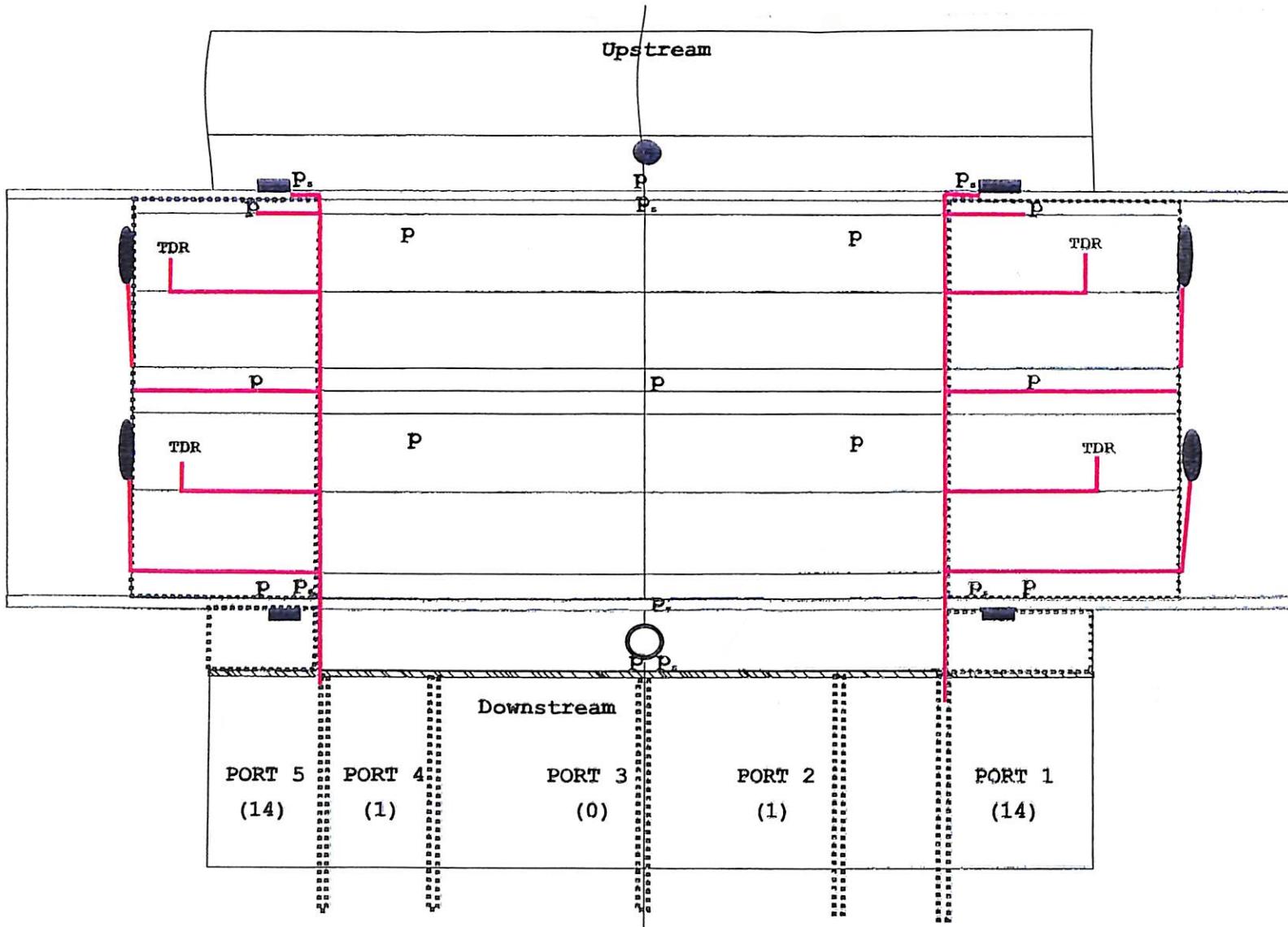


### Construction of Instrument Layer # 6:

Note: The unshaded region is the floor level (instrument layer #5 + 0.2m) which is used to allow access to layers 6 through 9 for construction purposes. Instruments will not be installed until layers 7-9 are ready to be installed above them.

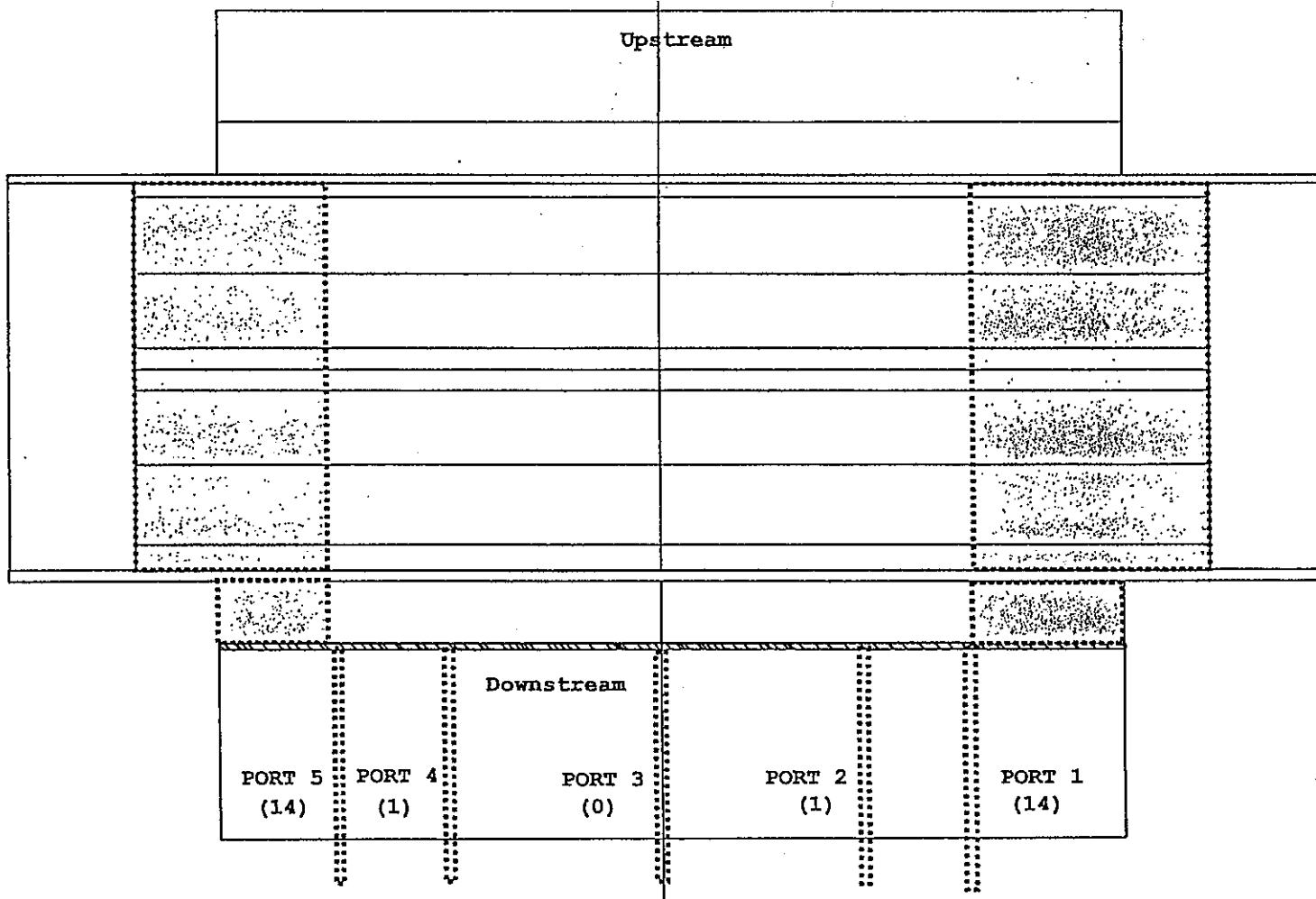






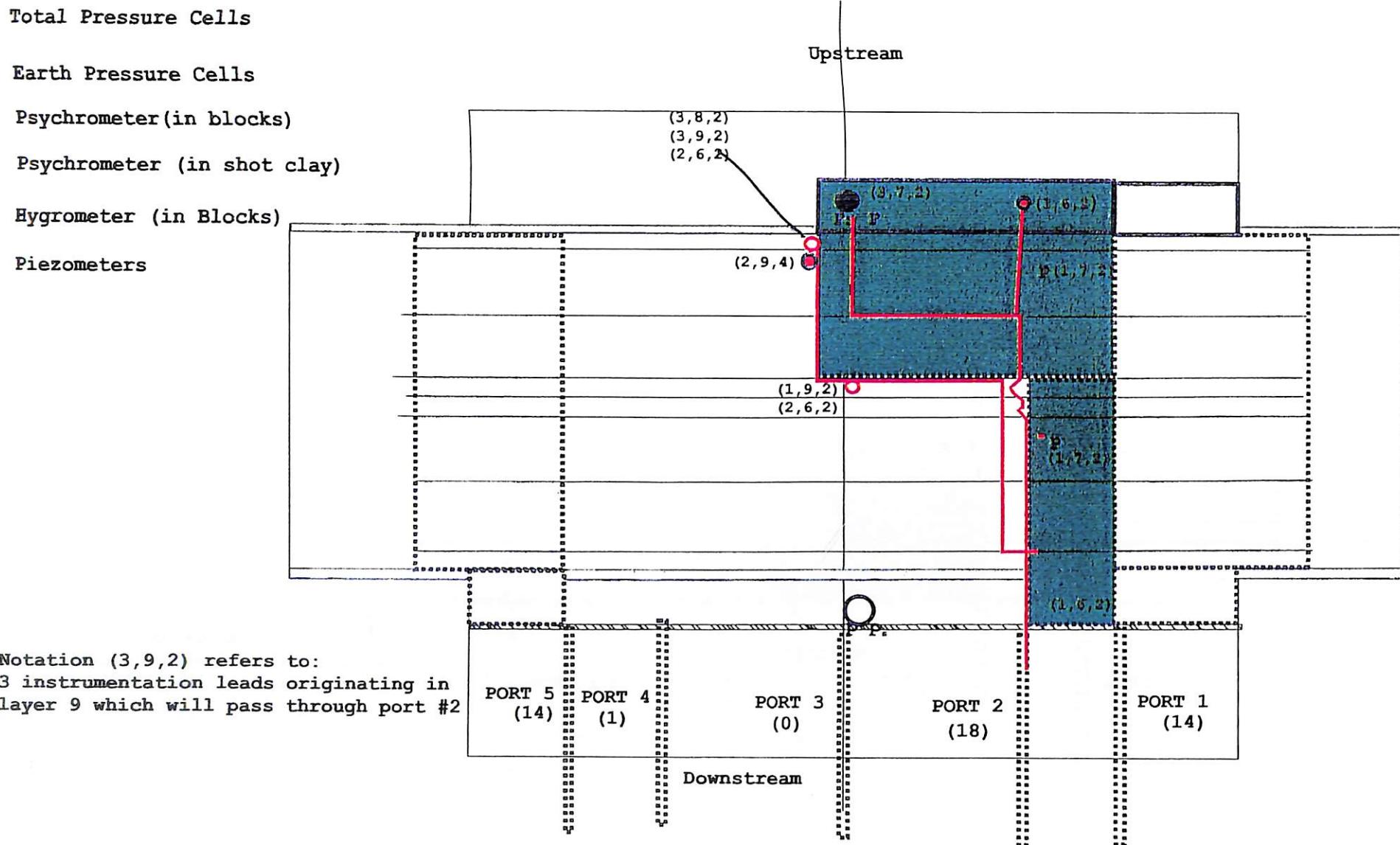
### Instrument Layer 7 :

Note: Floor level for this activity is instrument layer #5 +0.2m  
No other instruments from Layers 8 or 9 are present in the region constructed as Stage 1



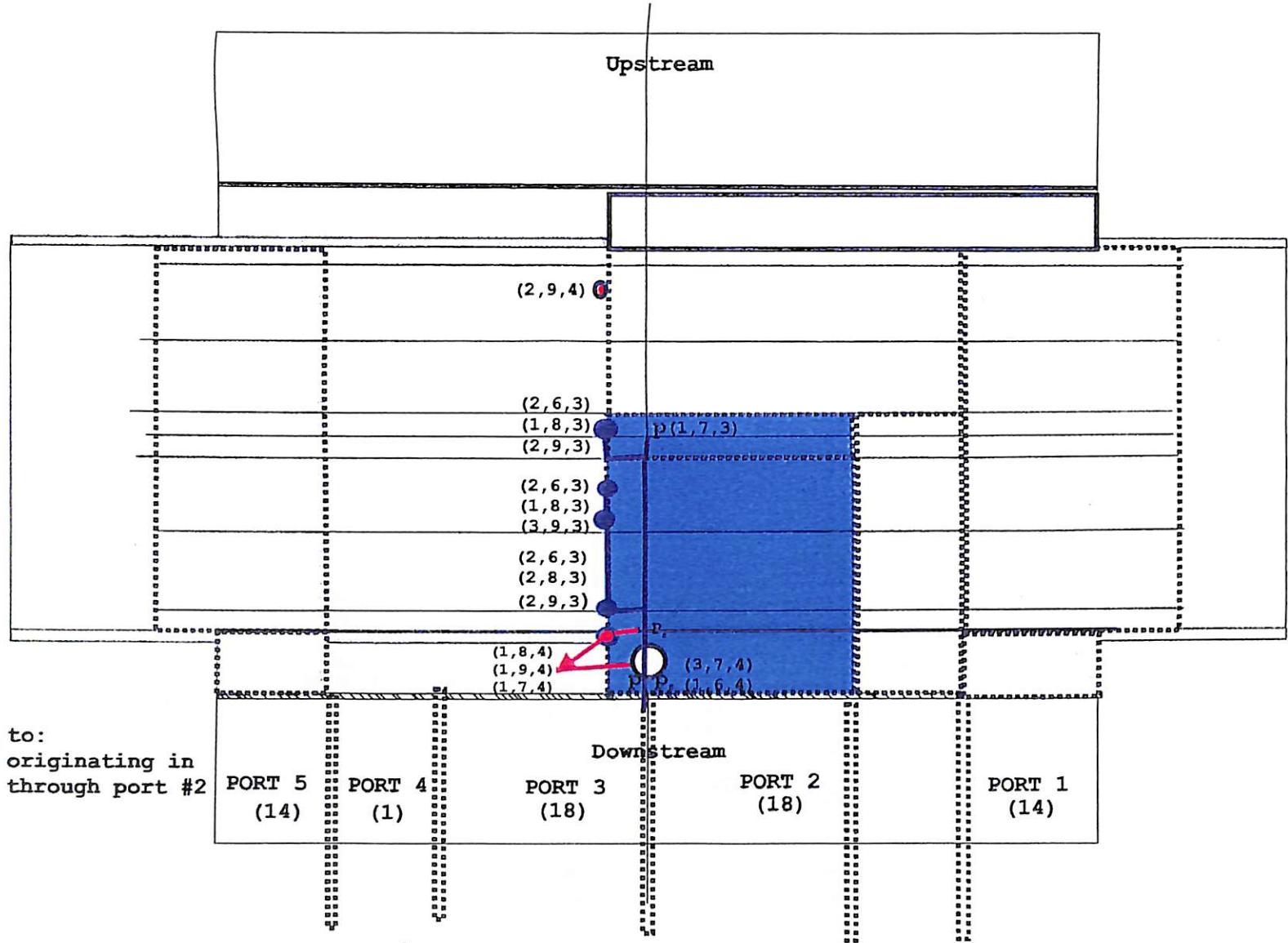
Instrument Layers 8 to 9:

There is no instrumentation to be installed in outermost regions.  
Complete construction vertically to roof level,  
fill gaps between blocks with powder material and finally,  
blow in material into any space at roof level



Build from Upstream to Downstream and all way to roof,  
installing instruments at appropriate elevations as locations  
are reached

Instruments shown are those on Layer #7,  
Others are shown in layout plans for layers 6,8,9



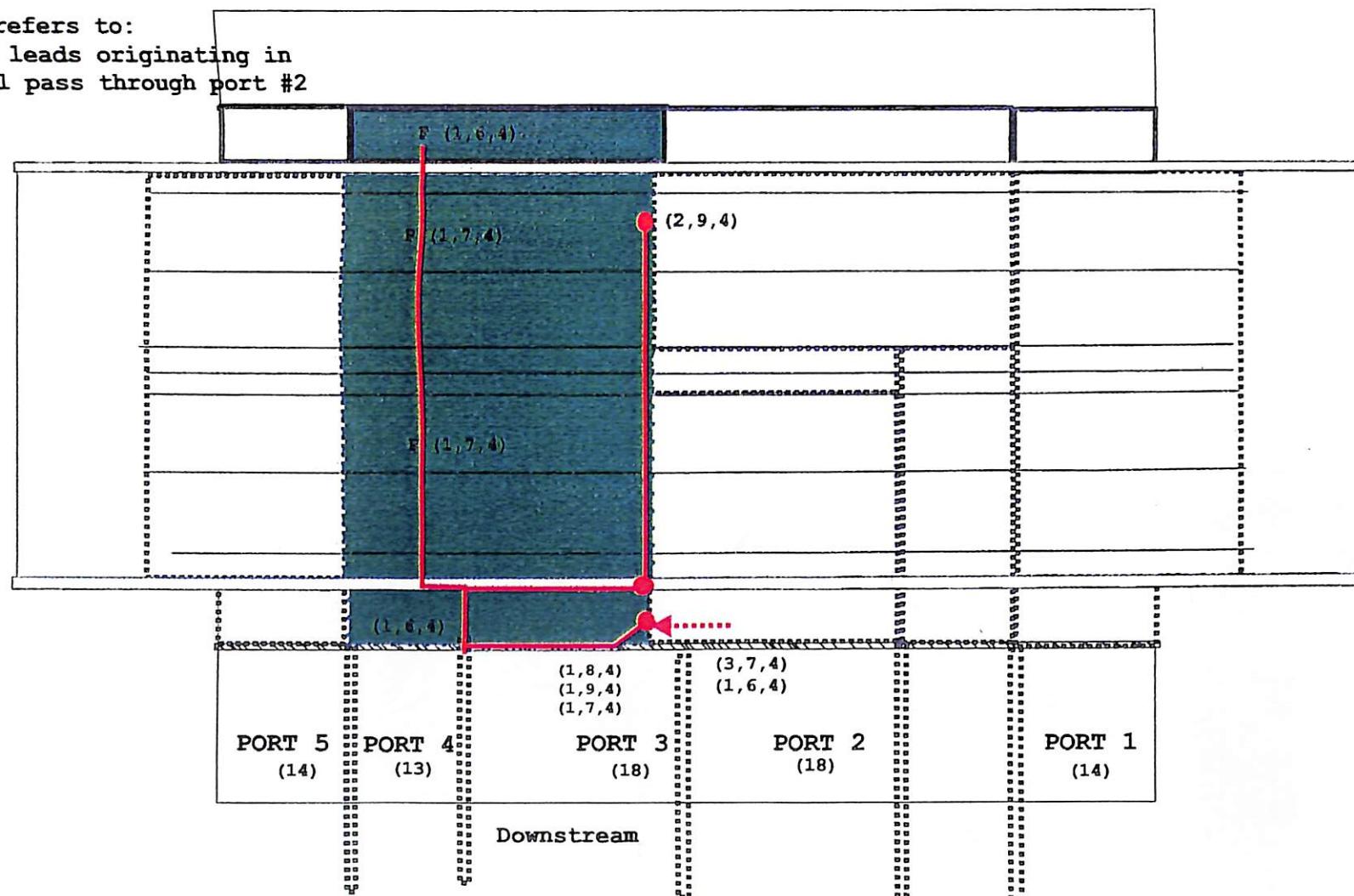
Notation (3,9,2) refers to:  
3 instrumentation leads originating in  
layer 9 which will pass through port #2

Build from Upstream to Downstream and all way to roof  
Build from floor to ceiling completing each instrument as appropriate  
elevation is reached

Upstream

Notation (3, 9, 2) refers to:

3 instrumentation leads originating in  
layer 9 which will pass through port #2



4] - I - 26

Build from Downstream to Upstream and all way to roof

Only the 3 psychrometers mounted in layers 6 & 7 will require prestringing of their cables

Note: Construction is based on using Instrument Layer #5 + 0.2m as the floor from which the higher instrument layers are constructed, thereby providing sufficient headroom for working.

APPENDIX C

PROCEDURES FOR INSTALLATION OF TOTAL PRESSURE CELLS AND  
PIEZOMETERS INTO THE ROCK ADJACENT TO THE  
CLAY BULKHEAD-ROCK INTERFACE

<b>AECL</b>	<b>EACL</b>	Approved:	Date:
WASTE TECHNOLOGY DIVISION		Checked:	Date:
		Prepared:	Date:
Title: Roctest VW Piezometer 100 mm Depth Installation Procedure URL Proc. No.			
Doc. No.: ..	Section: NA	Revision:0	Date Issued: 97/09/25 Page 1 of 3

**ROCTEST VIBRATING WIRE PIEZOMETER  
100 mm DEPTH INSTALLATION  
PROCEDURE**

by

Peter J. Roach  
1997 Sept

<b>AECL EACL</b>	Approved:	Date:
WASTE TECHNOLOGY DIVISION	Checked:	Date:
	Prepared:	Date:
Title: Roctest VW Piezometer 100 mm Depth Installation Procedure URL Proc. No.		
Doc. No.:	Section: NA	Revision:0
		Date Issued: 97/09/25
		Page 2 of 3

#### 1.0 Purpose:

This procedure describes the methods and responsibilities for the installation of the Roctest Vibrating Wire Piezometer at a 100 mm depth within the rock.

#### 1.1 Scope:

This procedure is used when conducting Roctest Vibrating Wire Installations at depth of a 100 mm with in rock, in the URL experiment program. It operates at Grade II quality level.

#### 1.2 Definitions:

**Swagelok Pressure Fitting** - A pressure fitting that is used to connect standard size tubing to other fittings.

**Roctest Vibrating Wire Piezometer** - An instrument that measures pore water pressure via vibrating wire transducer.

**Transducer** - Converts a mechanical property into an electrical signal.

**Vibrating Wire Readout Box** - The instrument used to obtain readings from a variety of different types of vibrating wires transducers. Model # MB-6

**Silica fume** - Ground Silica.

#### 1.3 Responsibilities:

It is the responsibility of the Geotechnical Science and Engineering Branch technicians performing the calibrations to follow this procedure.

#### 1.4 References:

Nil

<b>AECL FACL</b>	Approved:	Date:
WASTE TECHNOLOGY DIVISION	Checked:	Date:
	Prepared:	Date:
Title: Roctest VW Piezometer 100 mm Depth Installation Procedure URL Proc.		
Doc. No.:	Section: NA	Revision: 0
	Date Issued: 97/09/25	Page 3 of 3

**1.5 Procedure:**

The calibration procedure is contained in Attachment 1.

**1.6 Records:**

Installation report

Instrument Header Sheet

**1.7 Attachments:**

Attachment 1: Roctest Vibrating Wire 100 mm Depth Piezometer Installation Checklist

Attachment 2: Roctest Vibrating Wire 100 mm Depth Piezometer Commissioning Checklist

Attachment 1

CHECKLIST FOR VIBRATING WIRE PIEZOMETER INSTALLATION  
100 mm DEPTH - Tunnel Sealing Experiment

Instrument Name: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

Inspectors Initials: \_\_\_\_\_

A. Equipment for the Installation

Gather the listed equipment for the installation

- |  |       |
|--|-------|
| 1. VSM Readout Box                     | _____ |
| 2. Vibrating Wire Piezometer           | _____ |
| 3. 16-30 Sand (dry)                    | _____ |
| 4. Silica Fume                         | _____ |
| 5. Clean Water                         | _____ |
| 6. Cement (Portland Type 50)           | _____ |
| 7. Superplasticizer                    | _____ |
| 8. Tape Measure                        | _____ |
| 9. 5 litre Pail                        | _____ |
| 10. Hilti TE22 Drill with 5/8" Bit     | _____ |
| 11. Power Drill with Mixing Attachment | _____ |
| 12. Paper Towels                       | _____ |

B. Calibrations

1. Ensure the piezometer selected is calibrated.  
Record the serial number. \_\_\_\_\_

C. Installation

1. Using the Hilti drill with a 5/8" bit, drill a hole into the rock to a depth of a 100 mm. \_\_\_\_\_
2. Clean the drilled hole of any rock dust.
3. Record the depth of hole. \_\_\_\_\_ mm

4. Place a small amount of sand in the hole, enough to fill the rounded bottom portion, roughly  $0.5 \text{ cm}^3$ . \_\_\_\_\_
5. Insert Piezometer filter into the hole allowing the bottom of the filter to rest on the sand. \_\_\_\_\_
6. Place sand around filter to a depth of 85mm from the hole collar. \_\_\_\_\_
7. Record the depth of the top of sand. \_\_\_\_\_ mm
8. Mix a stiff grout mixture in the 5 litre pail using the ingredients in the following order. Mix water, superplasticizer, silica fume, and cement. Mix the ingredients together with the drill and mixer attachment, for a period of 5 minutes. \_\_\_\_\_

Water	250	g
Superplasticizer	18	g
Silica Fume	15	g
Cement	2700	g

9. Tamp the stiff grout into the hole and tightly around the piezometer tubing, to the top of hole collar. \_\_\_\_\_
10. Allow 24 hours for the grout to harden before disturbing the piezometer. \_\_\_\_\_

**Roctest Total Pressure Cell  
Installation Checklist**

INSTRUMENT

TAG # \_\_\_\_\_

SERIAL # \_\_\_\_\_

URL REGISTRY FILE # \_\_\_\_\_

DATE (YY/MM/DD) \_\_\_\_\_

INSPECTOR \_\_\_\_\_

**Equipment:**

1. Rock Saw
2. Allan Wrench - 3/16 "
3. Adjustable Wrench
4. Mixer and Mixer Bowl
5. Trowel
6. Electronic Scale
7. Scrub Brush
8. 20 L. Cleaning Bucket
9. 5/16" Concrete Drill Bit
10. TE22 Hilti Drill
11. Rubber Hammer
12. Ball Pein Hammer
13. Weighing Containers
14. Tube Bender, and Cutter
15. Roctest Mold Template

**Materials:**

1. Type 50 Cement
  2. Silica Flume
  3. \* Premixed Grout Water
  4. 6 mm Hilti bolts, Nuts
  5. Alignment bars
  6. Roctest Cell
  7. Clean Water
  8. Paper Towels
  9.  $\frac{1}{4}$ " ready rod bolts cut to 150 mm long
- \*      71.6 gms Superplastisyer to  
          558.4 gms of water

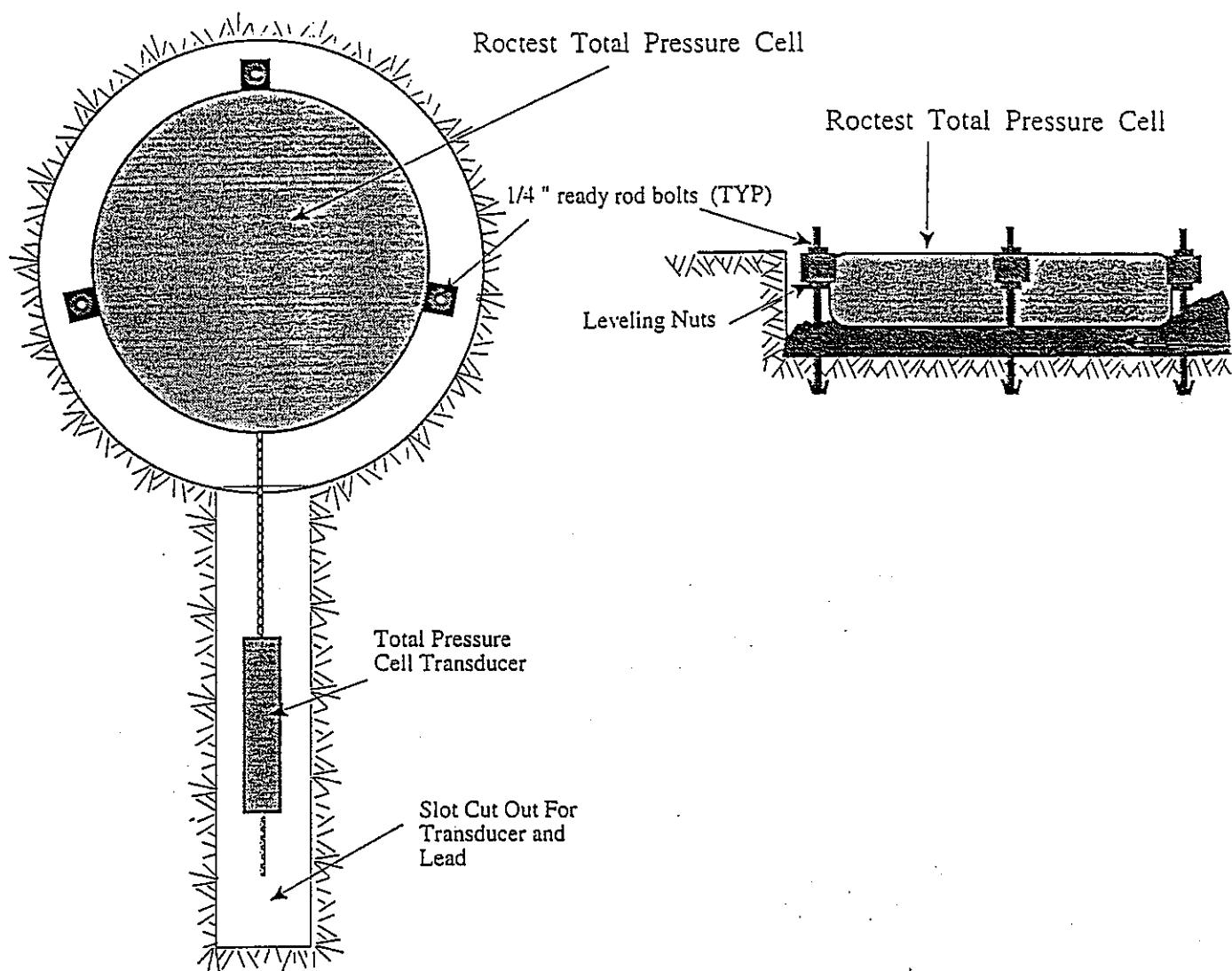
**Grout Mix Design:**

Type 50 cement	=	2700 gm
Silica Fume	=	300 gm
* Pre Mixed Water	=	630 gm

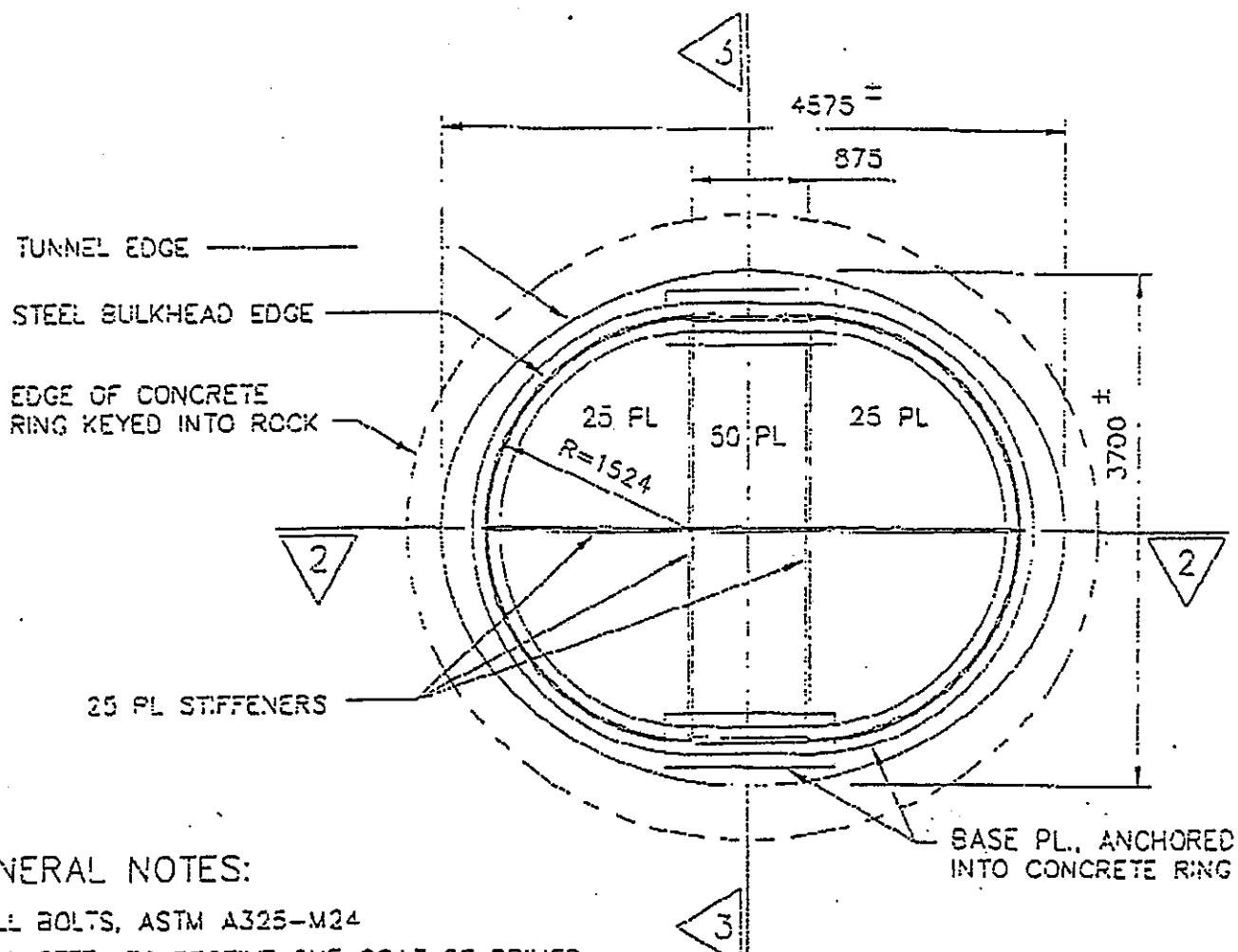
\* 71.6 gms of superplasticiser to 558.4 gms of water.

stallation:

1. Using the Roctest Template, mark the first hole position on the flattened rock face for the location of the Roctest Earth Pressure Cell..
2. Using the TE22 and a 5/16 " concrete drill bit , drill the first hole for the Roctest cell.
3. Install a 1/4 " ready rod bolt and fasten the template to the rock.
4. Drill the next two holes through the template.
5. Continue doing this for 4 pressure cells before grouting them in.
6. Place pre mixed water into the mixer bowl, add the silica fume and mix it up well. Use a dust mask while doing this so you do not inhale the silica fume. The grout material proportions on page 1 are sufficient for 4 pressure cells.
7. While mixing at a slow speed, add the cement slowly and mix for 5 minutes after it has all been added.
8. Let the mixture set for 5-10 minutes after it has been mixed.
9. While the grout mixture is setting, adjust the bottom out nuts on the 1/4 " ready rod bolts by placing the nuts on the bolts and place the cell onto the bolts. Adjust the nuts until the Roctest cell face is flush with the rock surface.( See Figure 1 attached)
10. Remove the cell and clean any dust off of the area where the Roctest cell will be installed. Dampen the area with a wet towel.
11. Grab a handful of the grout and tap on the back of your hand until the mixture is at the right consistency to apply to the face of the dampened area for the cell. You should use plastic surgical gloves before grabbing a handful of the grout.
12. Apply the grout to the center of the cell cutout and place the Roctest cell onto the three 1/4 " ready rod bolts.
13. Put three more nuts on and fasten down securely.
14. Spread some more grout around the cell to build it up CLOSE to the rock face. (Do not fill right to the face). It can have a final coat of grout to level it to the rock face at a later date.
15. While the buffer blocks are being placed, the 1/4 " ready rod bolts can be cut off flush with the Pressure Cell before placing the buffer blocks.



Appendix-II A E C L サイドの  
スティール・サポート検討結果

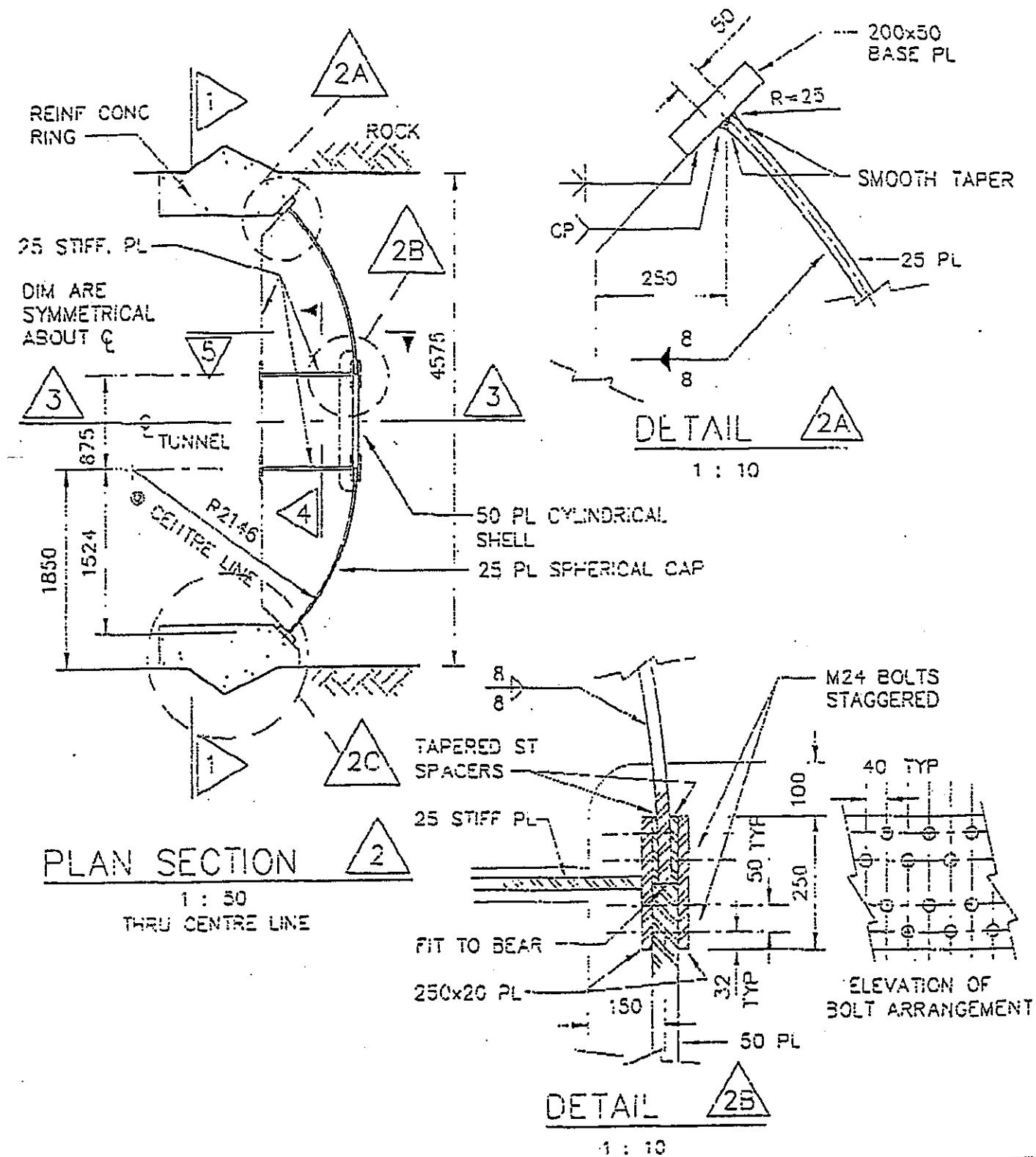


## GENERAL NOTES:

- ALL BOLTS, ASTM A325-M24
- ALL STEEL TO RECEIVE ONE COAT OF PRIMER
- ALL STEEL GRADE 400W OR BETTER
- FABRICATION ONLY, PLUS SHIPPING TO URL AT PINAWA MANITOBA
- ASSEMBLY BY OTHERS
- EDMONTON EXCHANGER WILL SUPPLY 25mm THICK SPHERICAL CAPS, SPHERICAL SHELL PLATE AND CURVED COVER PLATES, BUT NOT THE TAPERED FILLER PLATES. FOB EDMONTON
- NON-CURVED PLATES ONLY CAN BE REPLACED BY 300W MATERIAL BASED ON A SUBSTITUTION OF THICKNESS 15% GREATER THAN SPECIFIED
- TAPERED SPACERS CAN BE 300W

**SECTION**  
(ELEVATION OF STEEL SHELL BULKHEAD)  
1 : 50

**U.R.L. - T.S.X.**  
**TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM**  
**STEEL SHELL BULKHEAD**

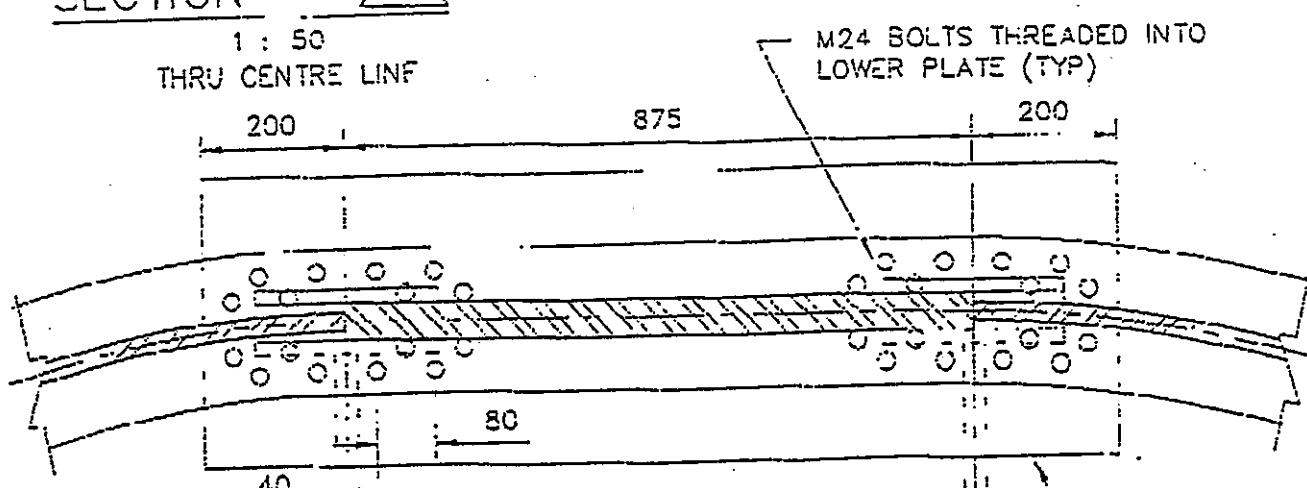
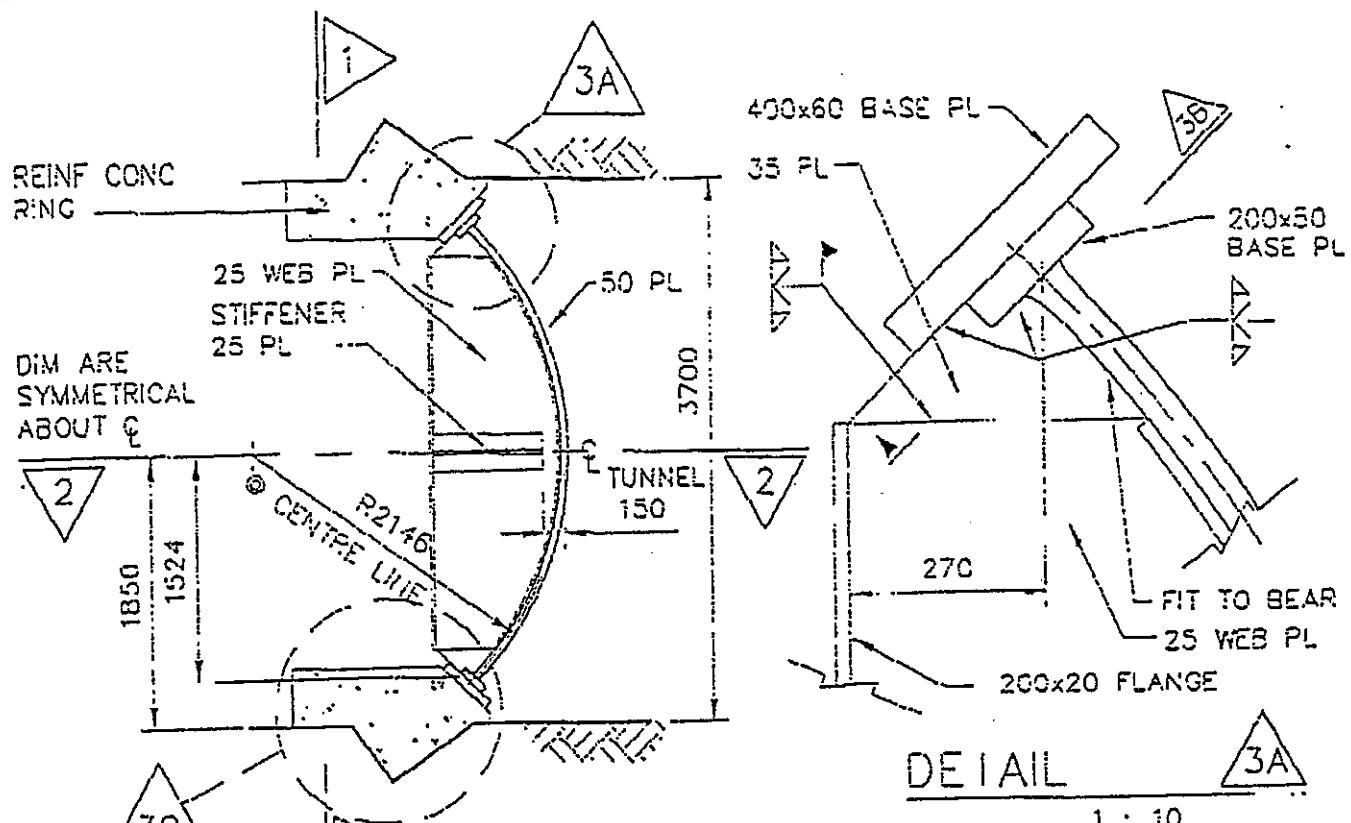


U.R.L. - T.S.X.  
TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
STEEL SHELL BULKHEAD

T-02-97 THU 13:29

DELCAN PROG. & PROJ. MGT.

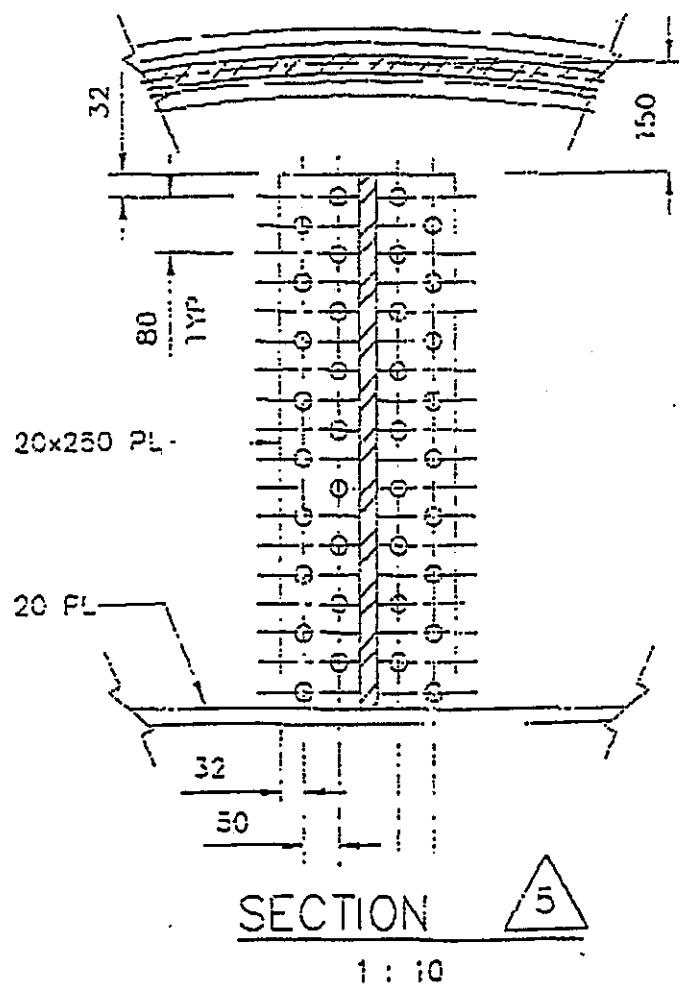
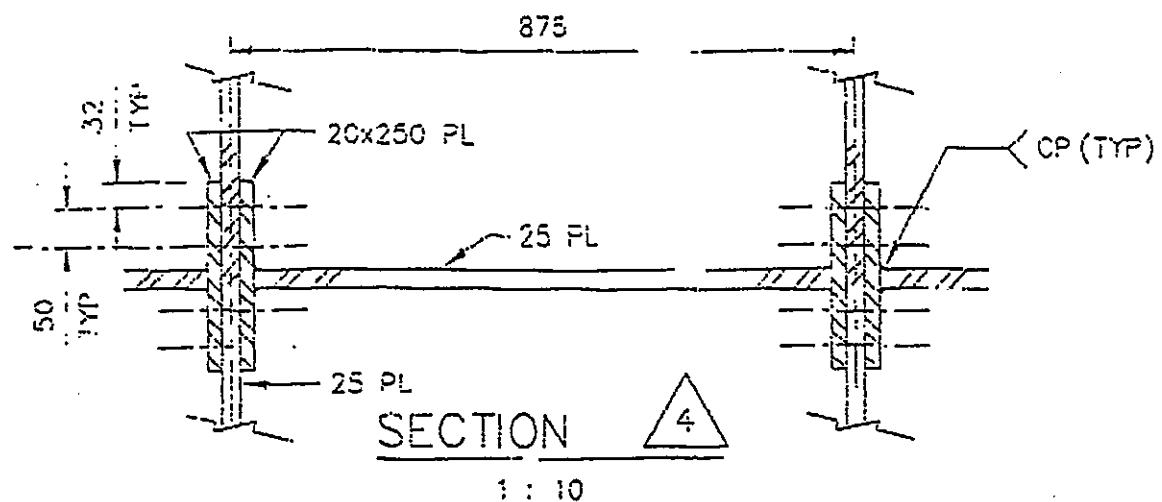
FAX NO. 416 391 7590



U.R.L. - T.S.X.  
TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
STEEL SHELL BULKHEAD

CT-02-97 THU 13:30

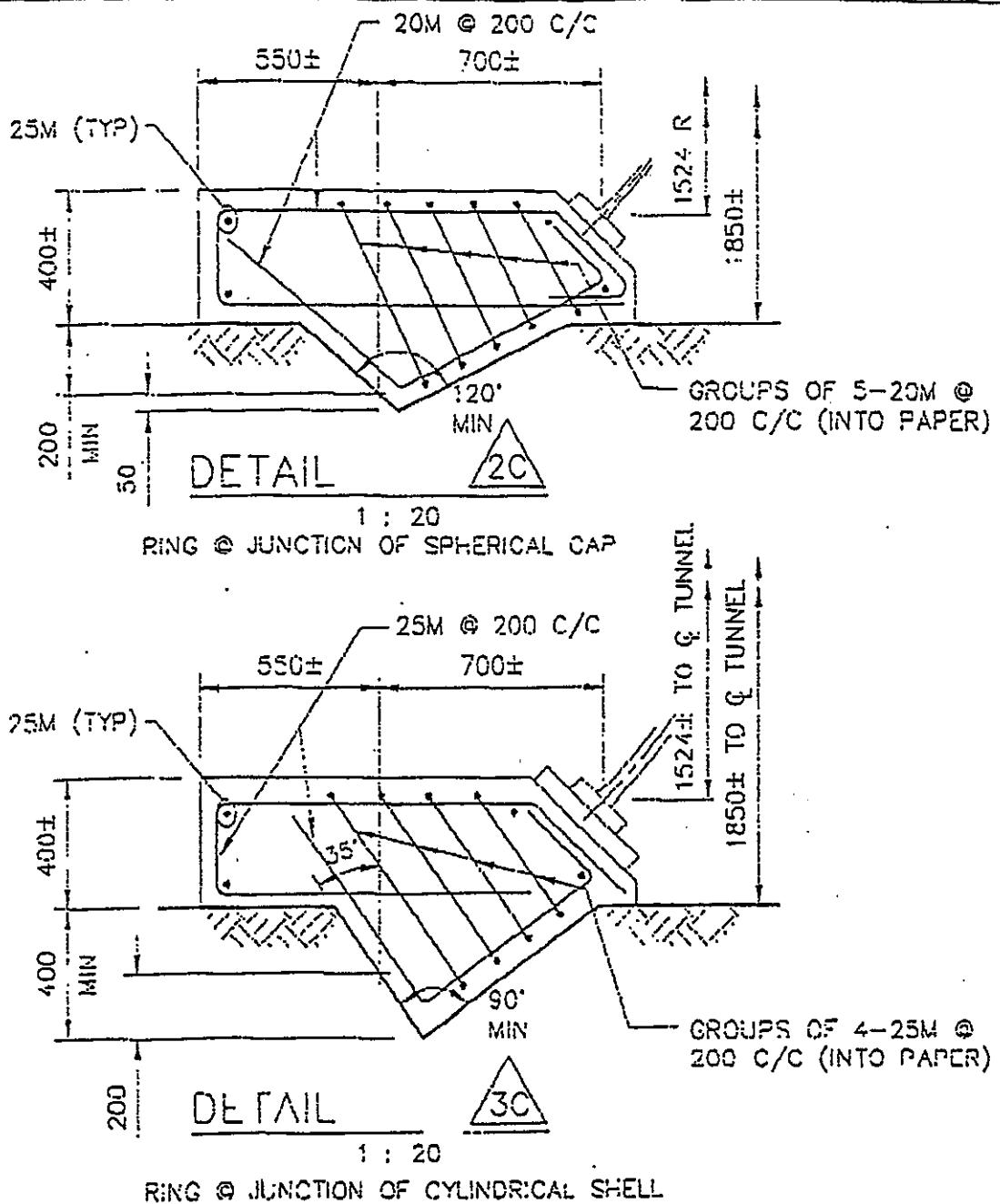
DELOAN PROG. & PROJ. MGT. FAX NO. 416 391 7590



U.R.L. - T.S.X.  
TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
STEEL SHELL BULKHEAD

COLDERS / DELOAN

SHEET 4 of 7



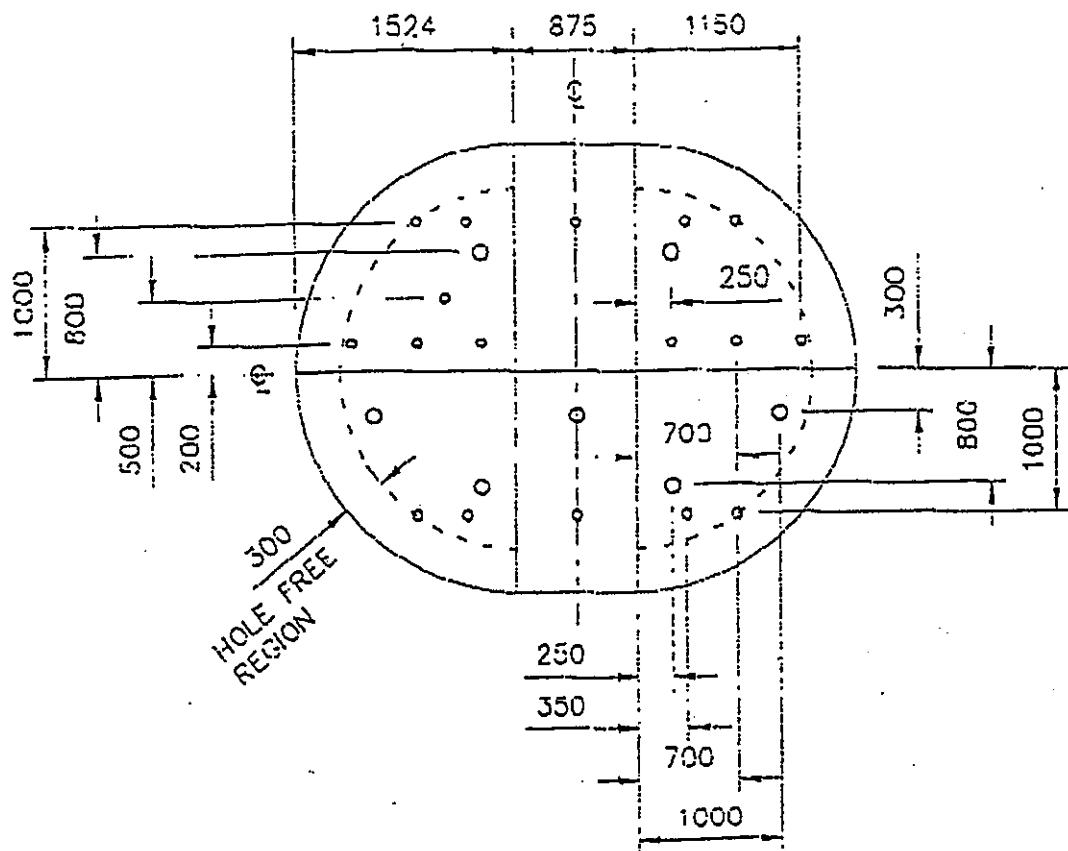
BY OTHERS  
FOR REFERENCE ONLY

#### CONCRETE SUPPORT RING

NOMINAL  $3500 \times 4375$  TUNNEL IS CLOSER TO  $3700 \pm \times 4575 \pm$ . STEEL SHELL IS 3048¢ WITH AN ADDITIONAL STRAIGHT PIECE OF 875mm

MINIMUM CONCRETE STRENGTH 60MPa @ TIME OF MAXIMUM LOADING

U.R.L. - T.S.X.  
TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
STEEL SHELL BULKHEAD



### ELEVATION

(PIPE LOCATIONS)

1 : 50

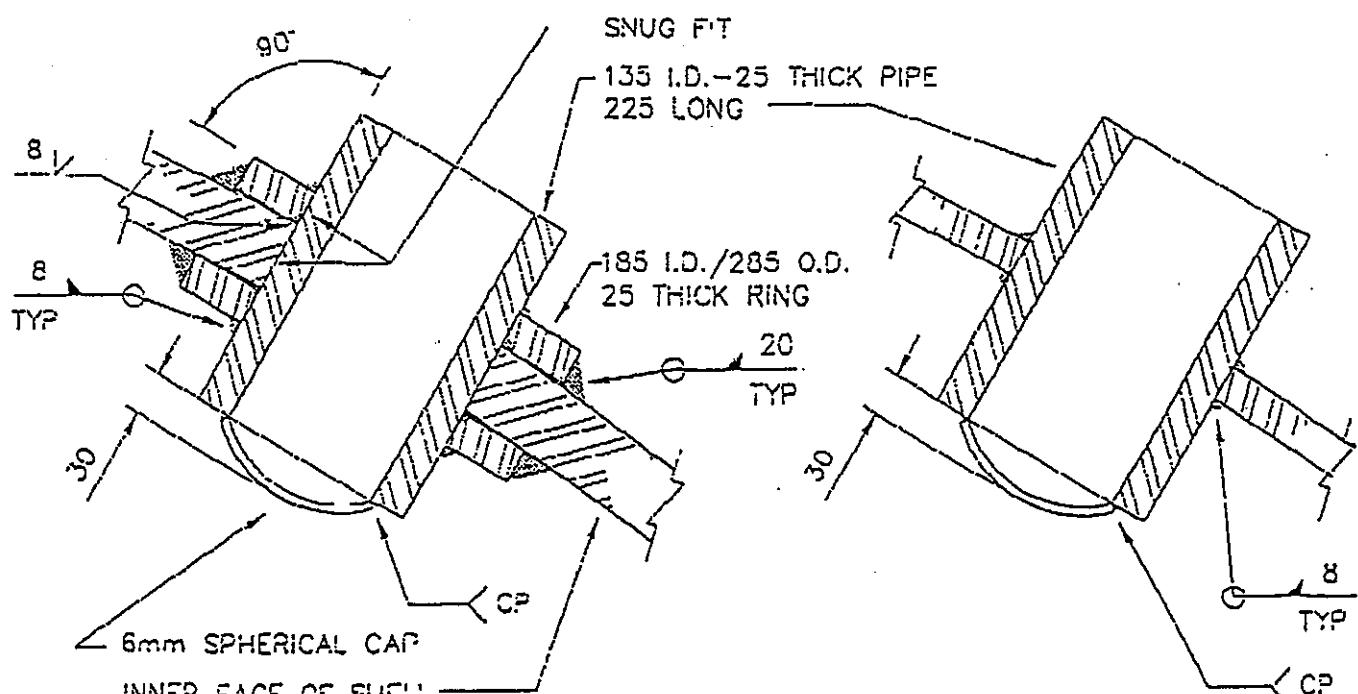
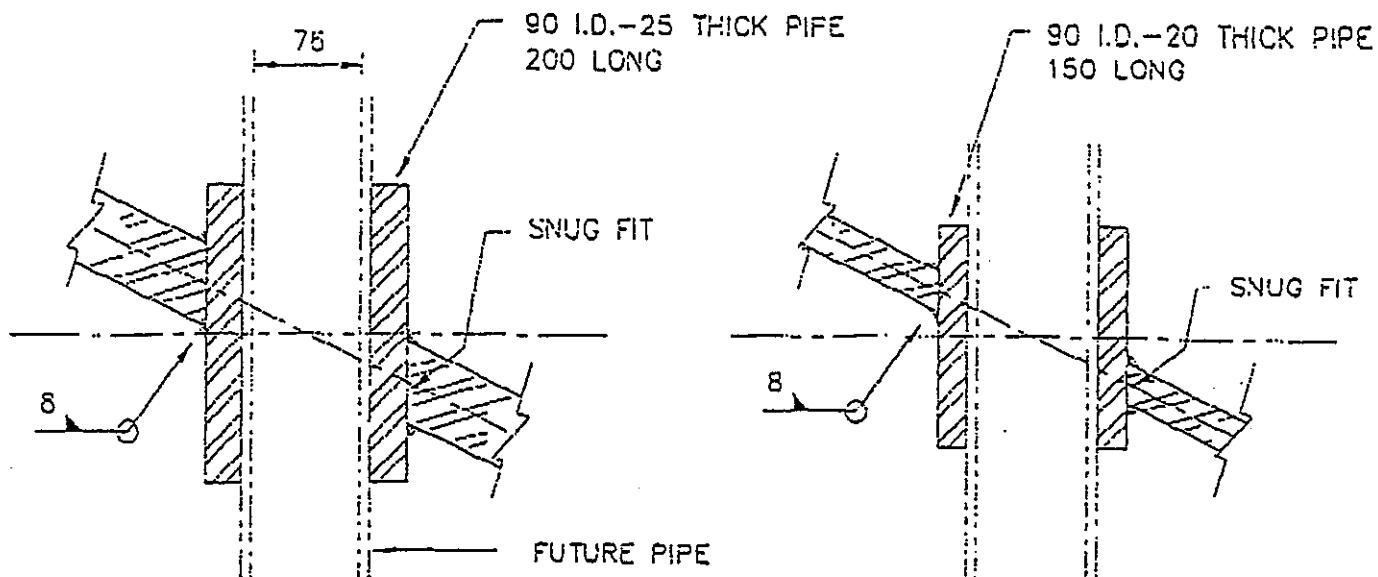
#### LEGEND:

○ 7 @ 115mm I.D.

● 17 @ 76mm I.D.

FOR DETAILS SEE SHEET 7 of 7

U.R.L. - T.S.X.  
TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
STEEL SHELL BULKHEAD



## SHELL PENETRATION DETAILS

1 : 5

SEE SHEET 6 of 7 FOR PIPE LOCATIONS

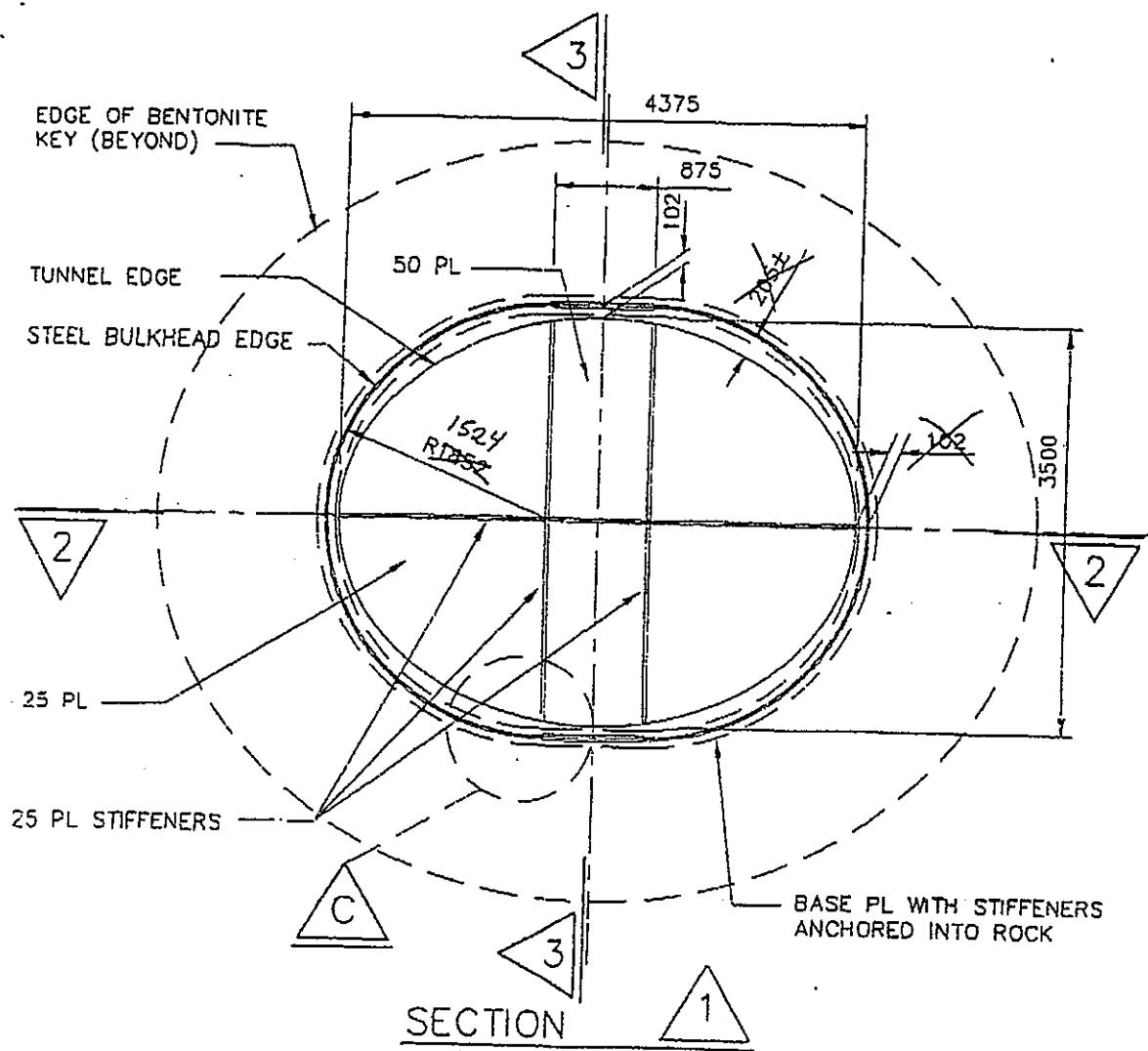
U.R.L. - T.S.X.  
 TUNNEL SEALING EXPERIMENT BENTONITE RESTRAINT SYSTEM  
 STEEL SHELL BULKHEAD

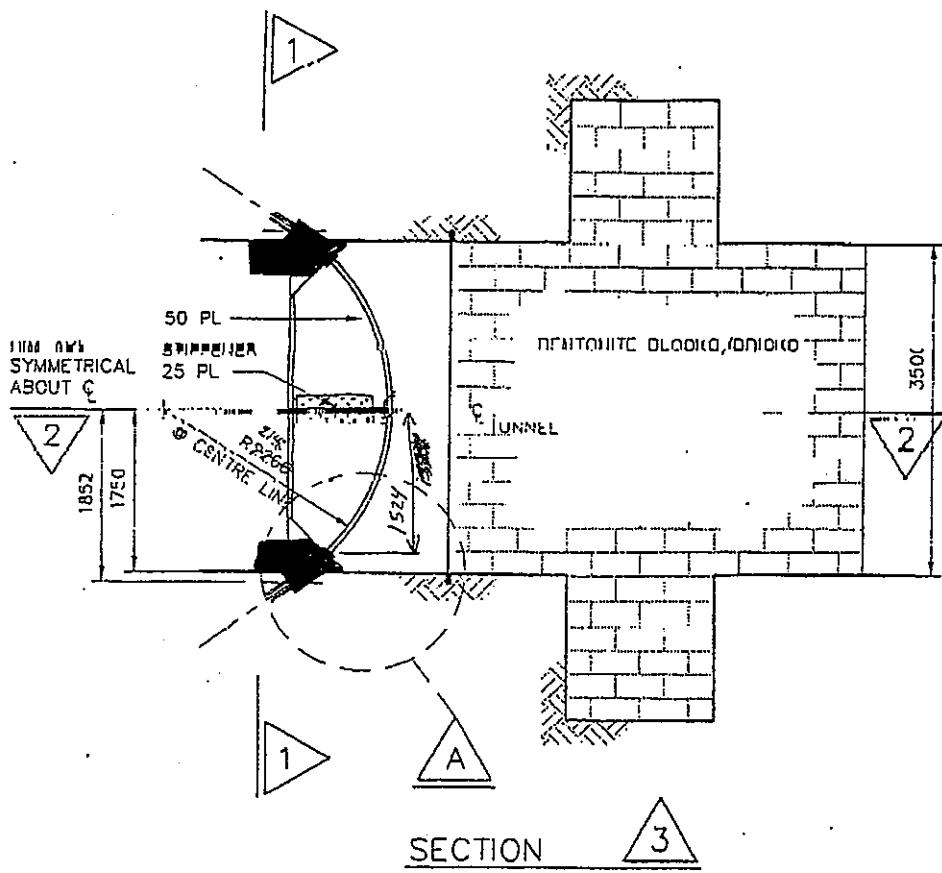
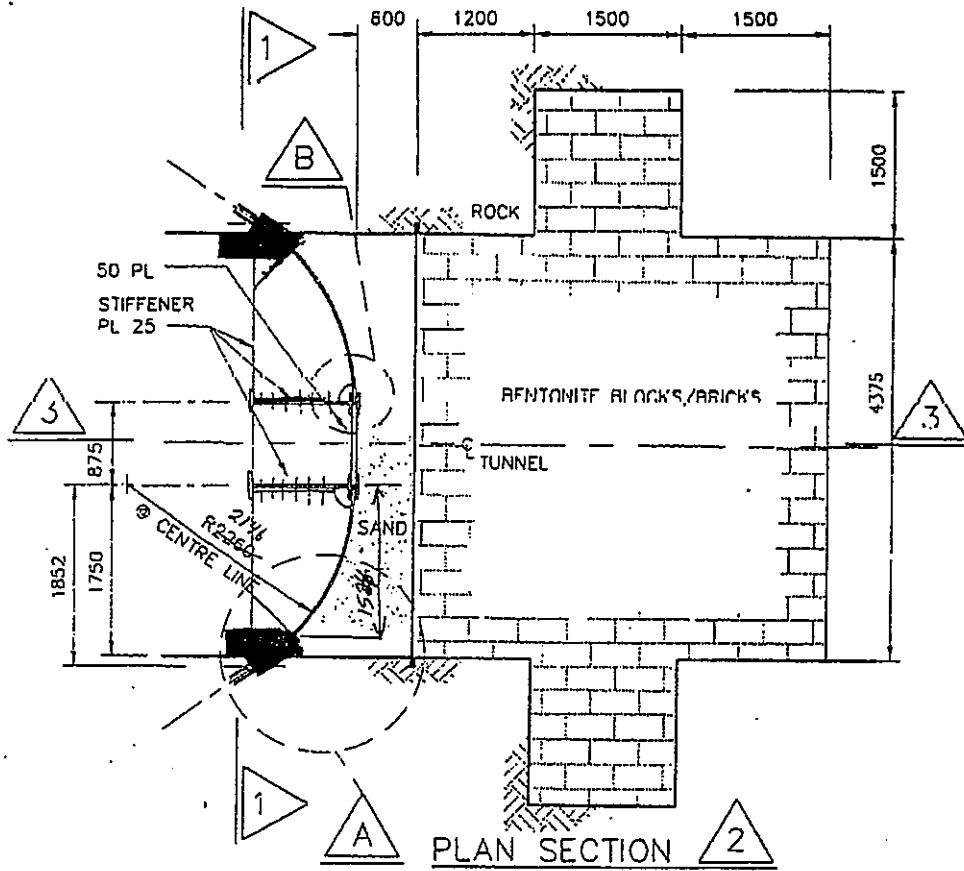
COLDERS / DEFICAN

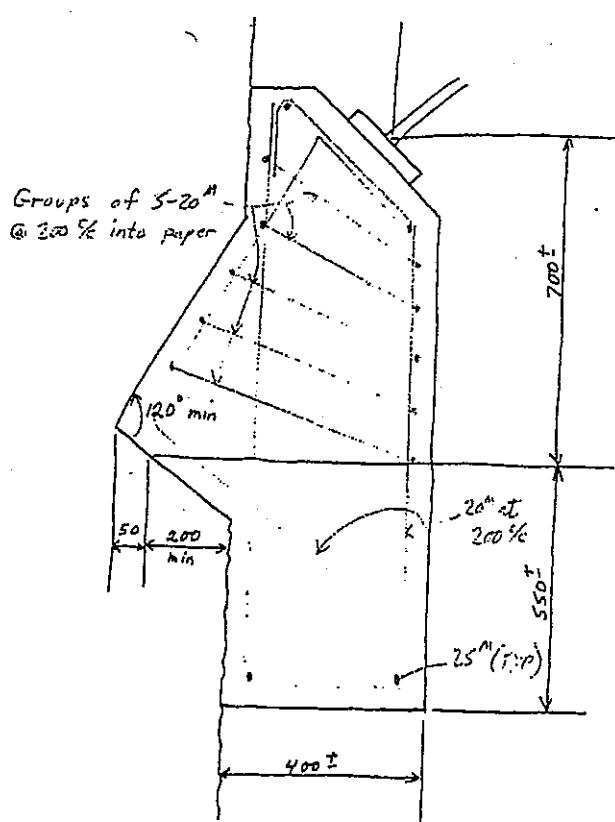
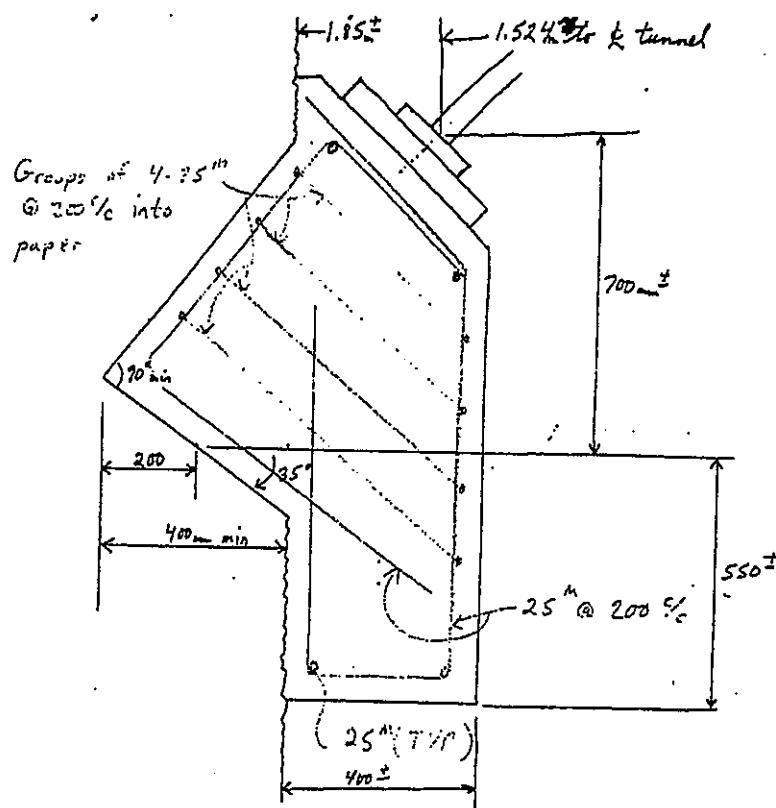
SHEET 7 of 7

Appendix-III スティール・サポートの  
力学的安定性に関する検討結果

## 1. 仕様







## 2. Delcan の検討

Delcan はスチール部材をシェル（円筒形シェル、球状シェル）として計算している。およそ以下の項目について検討しているようである。

- ① シェルの座屈
- ② 部材応力（軸力、曲げ）
- ③ 応力度
- ④ コンクリートの支圧
- ⑤ ベースプレートの応力度

設計条件としては、設計荷重が 5Mpa、スチールのヤング率として  $2.0 \times 10^5$  Mpa、ボアソン比を 0.15 としている。

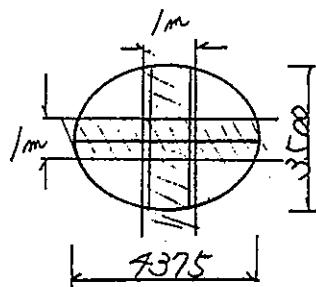
ただし、

一、設計計算書の形ではないため、計算の流れが理解しにくい  
一、出所不明の数字がある  
等の理由で内容が把握しがたい。  
さらに、この計算のみで部材の仕様を決めているとは考えにくいが、資料に記述されていない検討項目（コンクリートのせん断破壊、岩盤のすべりなど）について、原案の仕様のままでは危険性があると思われる。

- Delcan の計算資料をもってプラグサポートの安全性を保証するのは困難であると考える。
- 可能であれば、詳細な計算書を先方に提示していただきたい。

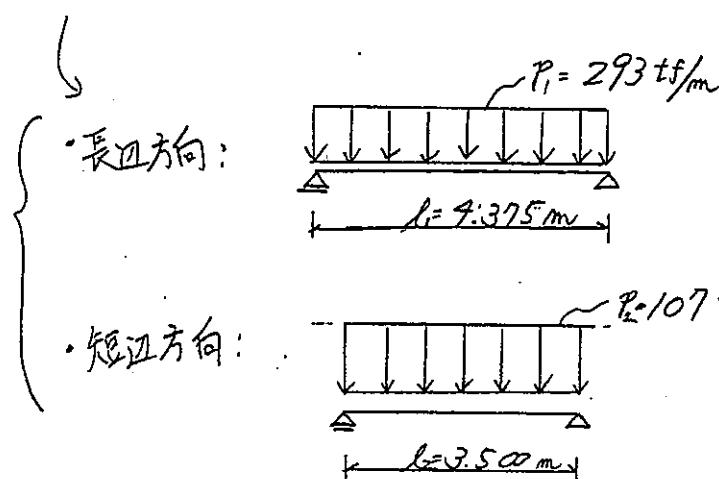
### 3. 検討

#### (1) 単純梁でのモデル化



長辺方向、短辺方向に単位幅をとて  
単純梁としてモデル化する。

4 MPa



※ 両者の荷重の割り当では、中央部のたわみが等しくなる様、支間長と  
断面2次モーメントから設定。

— 略 —

支間中央の応力度；

・長辺方向

$$\begin{cases} \sigma_{\text{上}} = 2430 \text{ kgf/cm}^2 & (\text{圧縮}) \\ \sigma_{\text{下}} = 1740 \text{ kgf/cm}^2 & (\text{引張}) \end{cases}$$

・短辺方向

$$\begin{cases} \sigma_{\text{上}} = 664 \text{ kgf/cm}^2 & (\text{圧縮}) \\ \sigma_{\text{下}} = 412 \text{ kgf/cm}^2 & (\text{引張}) \end{cases}$$

⇒ 概略では問題なし。

## (2) シェルの計算

### ・薄膜理論による面内応力

spherical shell (球形シェル) としてモデル化する。水圧は放射状に作用するが、ここでは保守的に水平方向に 4Mpa の等分布荷重を作用させる。

このときの断面力は、

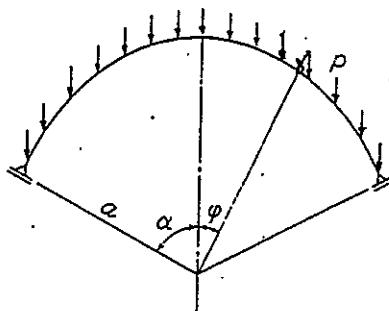
$$\text{経線方向: } N_\phi = -\frac{ap}{2}$$

$$\text{緯線方向: } N_\theta = \frac{ap}{2}(1 - 2\cos^2 \phi)$$

となる。

$$\frac{pa}{2} = \frac{400 \times 2.146}{2} = 430 \text{ tf/m}$$

$$\therefore \sigma = \frac{430 \times 10^3}{100 \times 2.5} = 1720 \text{ kgf/cm}^2 \text{ ok}$$



\*) 曲げ理論によるモーメントの照査は検討中。

### ・座屈の検討

〔構造力学公式集（土木学会）〕より

#### (B) 回転体シェルの座屈

##### 1) 外圧の場合

球形シェル

$$p_K = 17.95 E \left( \frac{t}{d} \right)^{2.6}$$

$$p_K = 14.82 E \left( \frac{t}{d} \right)^{2.5} \quad \left( \frac{t}{d} > 0.0045 \right)$$

$$p_K = 0.0122 E \left( \frac{t}{d} \right)^{1.19} \quad \left( \frac{t}{d} < 0.0045 \right)$$

近似圧壊圧力として、

$$p_K = 16.70 E \left( \frac{t}{d} \right)^{2.5}$$

$$\frac{25}{500} = 0.00625$$

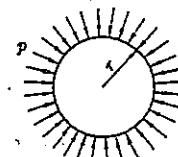


図 8.45 外圧を受ける球形シェル

Kármán (カルマン) は有限変位理論により、次の近似公式を与えた<sup>20)</sup>。

$$\underline{\underline{p_K^{\min} = 0.36516 E \left( \frac{t}{r} \right)^2}}$$

$$P_{K^{\min}} = 0.36516 \times (2.1 \times 10^7) \times (0.025 / 2.146)^2 = 1041 \text{ tf/m}^2 > 400 \text{ tf/m}^2.$$

→ 全体座屈に対しては ok

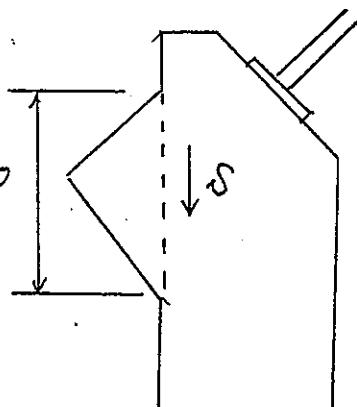
可能であれば中詰めコンクリート

### (3) コンクリート支承部の検討

局所支圧等については問題ないと判断されるため省略する。

#### ■前回指摘した事項

前回、支承コンクリートのせん断について見直しが必要と思われるため、以下のような指摘を先方に送って頂いた。



$$S = \frac{4600t}{(4.375 + 3.5)/2 \times \pi} = 372 \text{ t/m}$$

$$\tau = \frac{372 \times 10^3}{100 \times 70} = 53 \text{ kgf/cm}^2$$

コンクリート標準示方書では

$\tau_{a2} = 24 \times 1.5 = 36 \text{ kgf/cm}^2$  ( $f_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$  以上, 短期)

→ 図中  $B = 1500 \text{ mm}$  程度は必要であると思われる。

#### ■これに対するチャンドラー氏のコメント：

「この水平方向のせん断力を極力抑えるためにサポートの形状をアーチ状のシェルにしたのだから、保守的に見てもこのせん断力は大きすぎるのではないか、またコンクリートには鉄筋を入れる予定であるのでもう少しコンクリートがもつのではないか、つまり 70cm でも大丈夫ではないか」

(荷重を全て水平方向のせん断力として考えた理由)

保守的ではあるが、荷重を全て水平方向のせん断力として考えた理由は以下による。

- ・仮にスチール部材が完全に球状であり、荷重も全て放射状に作用すれば、アーチ端部に作用する反力の方向はアーチ軸線に一致すると考えられるが、

- 1) 長辺方向の中央部は直線（円筒形）となっていること
- 2) スチールには水圧（放射状）のみでなく、充填砂からの土圧（大きさは？）が平行に作用すると思われること。

さらに、

- 3) コンクリートリング部は充填砂と接しているため、スチールからの荷重以外に、幾分直接の土圧、水圧を受けること。

これらより、コンクリートが受ける荷重の方向はアーチ端部の軸線方向とは一致せず、トンネルの水平方向に幾分ずれるということが考えられる。

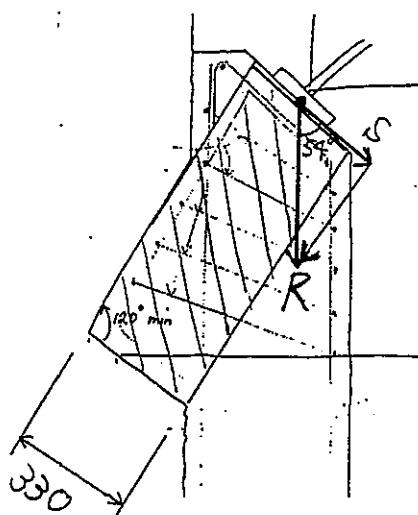
また、

- ・コンクリート中の応力状態が現状でははっきりしないこと。（詳細にはFEM？）

### ■ 再検討

チャンドラー氏の指摘を受けて、以下のように再検討した。

コンクリート支承部への反力をアーチ軸線方向と直角方向に分割し、この直角方向の力を図中の梁に作用するせん断力とみなす。



$$R = \frac{4600t}{(4375 + 35)/2 \times \pi} = 372 \text{ t/m}$$

$$S = 372 \times \cos 54^\circ = 219 \text{ t/m}$$

$$\tau = \frac{219 \times 10^3}{100 \times 33} = 66 \text{ kgf/cm}^2$$

$$> \tau_{a2'} = 24 \times 1.5 = 36 \text{ kgf/cm}^2 \quad (f_{ek}=400 \text{ kgf/cm}^2 \text{ 以上, 短期})$$

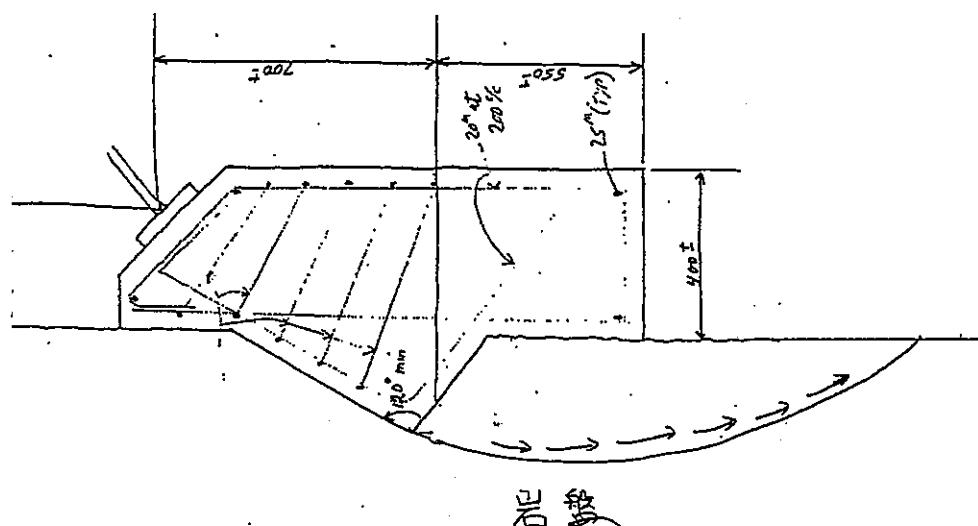
となり、やはり 原案の形状では危険であると思われる。

注) このせん断許容応力度  $\tau_{a2}$  は、鉄筋が負担する応力を差し引いた値で照査するではなく、「いかなる場合もこの値を超えてはならない」という基準値である。

以上のこと考慮すると、ノッチ部は原案のままでは危険であると判断されるため、変更をお願いしたい。

#### (4) 岩盤のすべり（未検討）

荷重が大きく、原案では岩盤への切り込みが浅いため、岩盤を巻き込んだ抜けだし（すべり破壊）に対する危険性が考えられる。この点についても再検討をお願いしたい。



Appendix-IV 1997/6/25~26 の  
プレゼンテーション資料

# **Laboratory Test of Bentonite Plugging**

**&**

## **Clay Grouts Experiment in Kamaishi Mine**

**1997.6.26**

**PNC/Kajima**

# **Laboratory Test of Bentonite Plugging ( Mixture of bentonite and quartz sand )**

## **Objective of the Laboratory Test**

**■ To evaluate the properties of  
Compacted Bentonite Plug  
(Mixture of Bentonite and Quartz Sand)**

- (1) Self-Sealing Capability**
- (2) Low Water Permeability**

## **Scheme of the Laboratory Test**

### **■ Conditions of Bentonite Blocks**

**Material : Mixture of Sodium Bentonite  
(Kunigel V1) and Quartz sand (B:S=7:3)**

**Dry Density : 1.8t/m<sup>3</sup>**

**Initial Water Content : 10%**

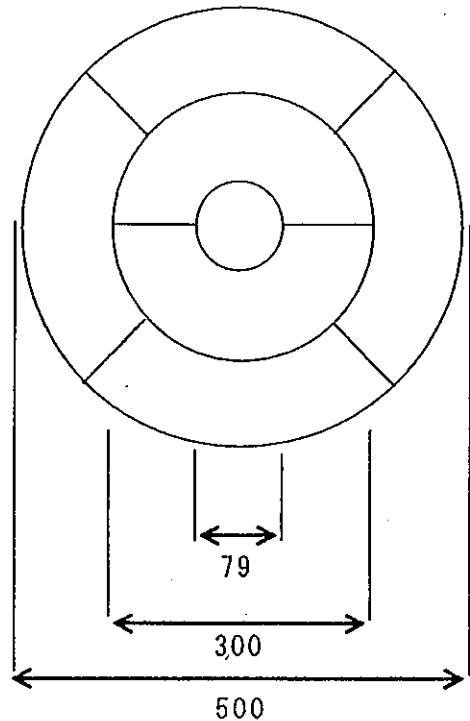
### **■ Installation of Bentonite Blocks**

**Seven Bentonite blocks**

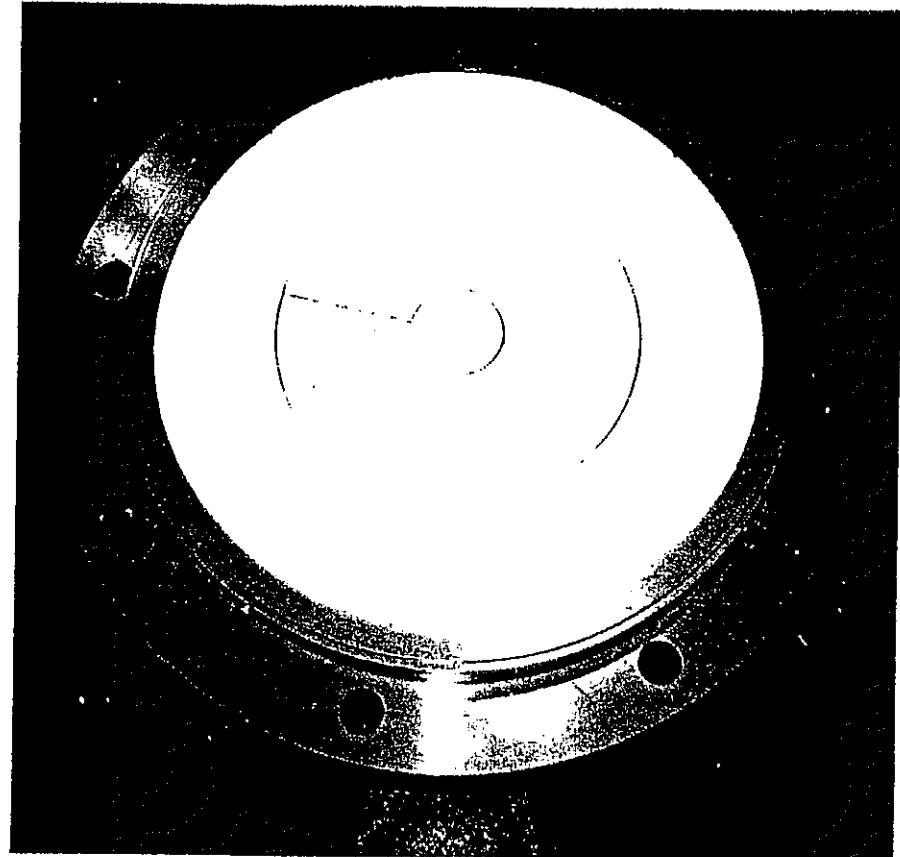
**Diameter 50 cm × Thickness 5cm**

**No Bentonite Power between the Blocks**

UNIT: mm



thickness: 50



**Bentonite Blocks installed in the Equipment**

## Scheme of the Laboratory Test

### ■ Equipment of Water Permeability Measurement

Water Pressure : 4MPa(Max)

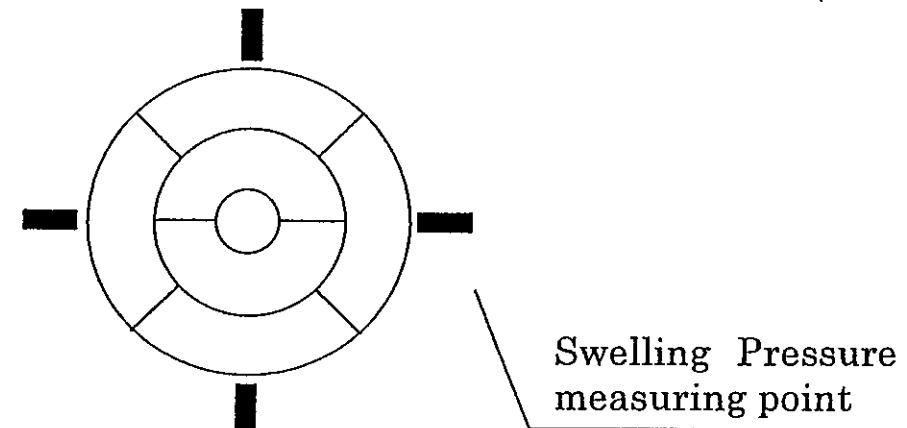
Injected Water : Distilled Water

### ■ Equipment of Swelling Pressure Measurement

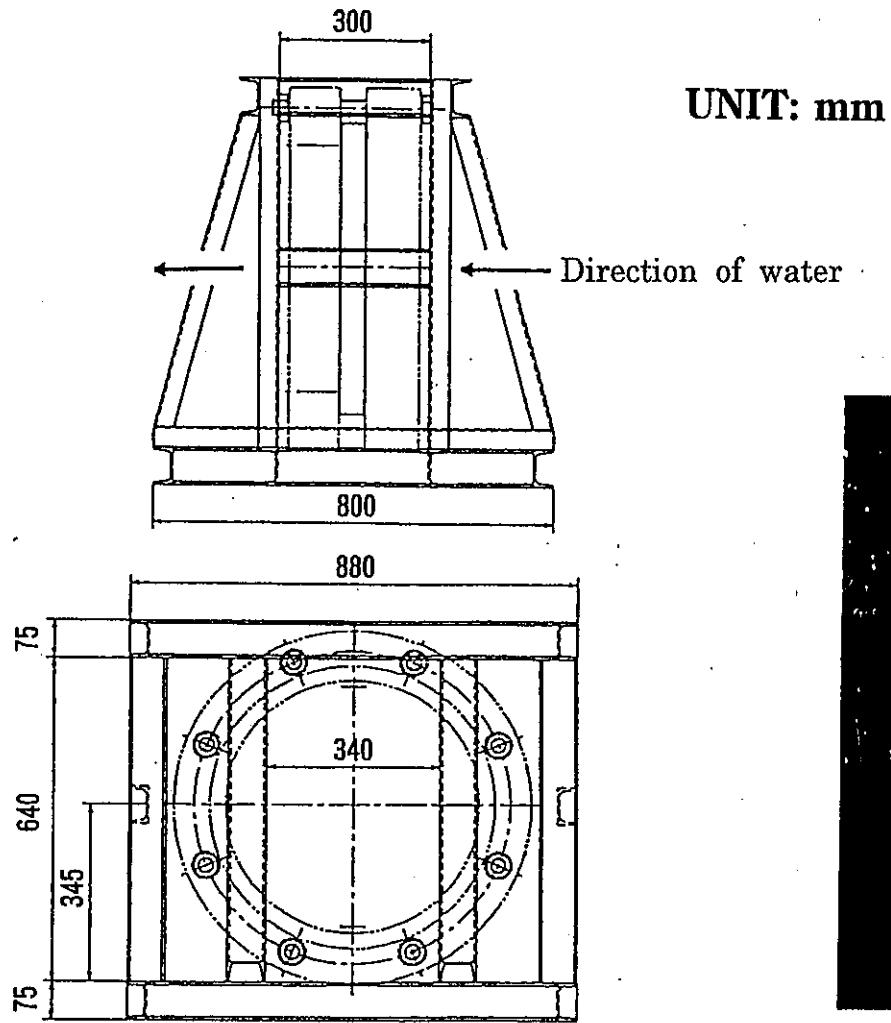
Type : Flush Diaphragm(Earth Pressure Cell)

Capacity : 10MPa

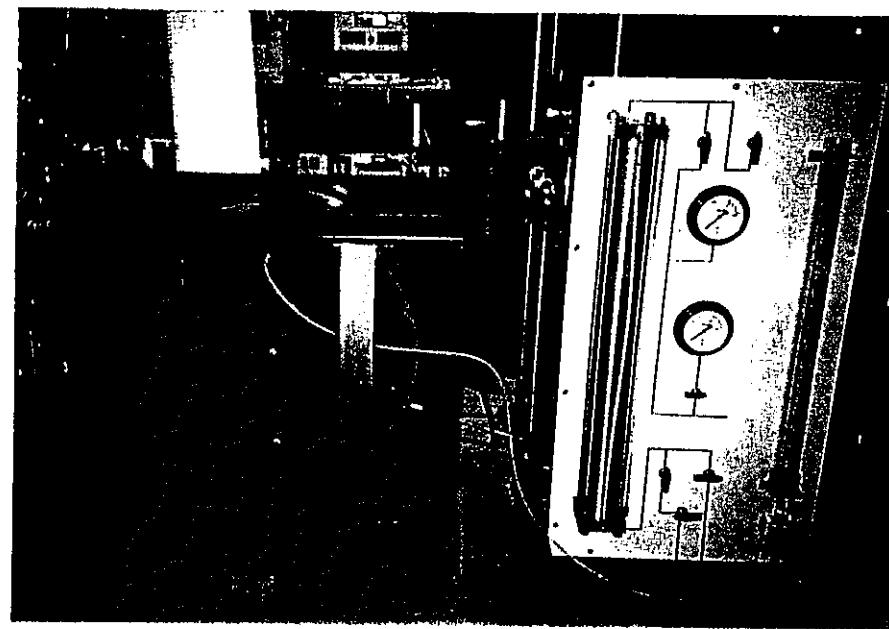
Measuring Point : 4 points



1 - N - 1



UNIT: mm

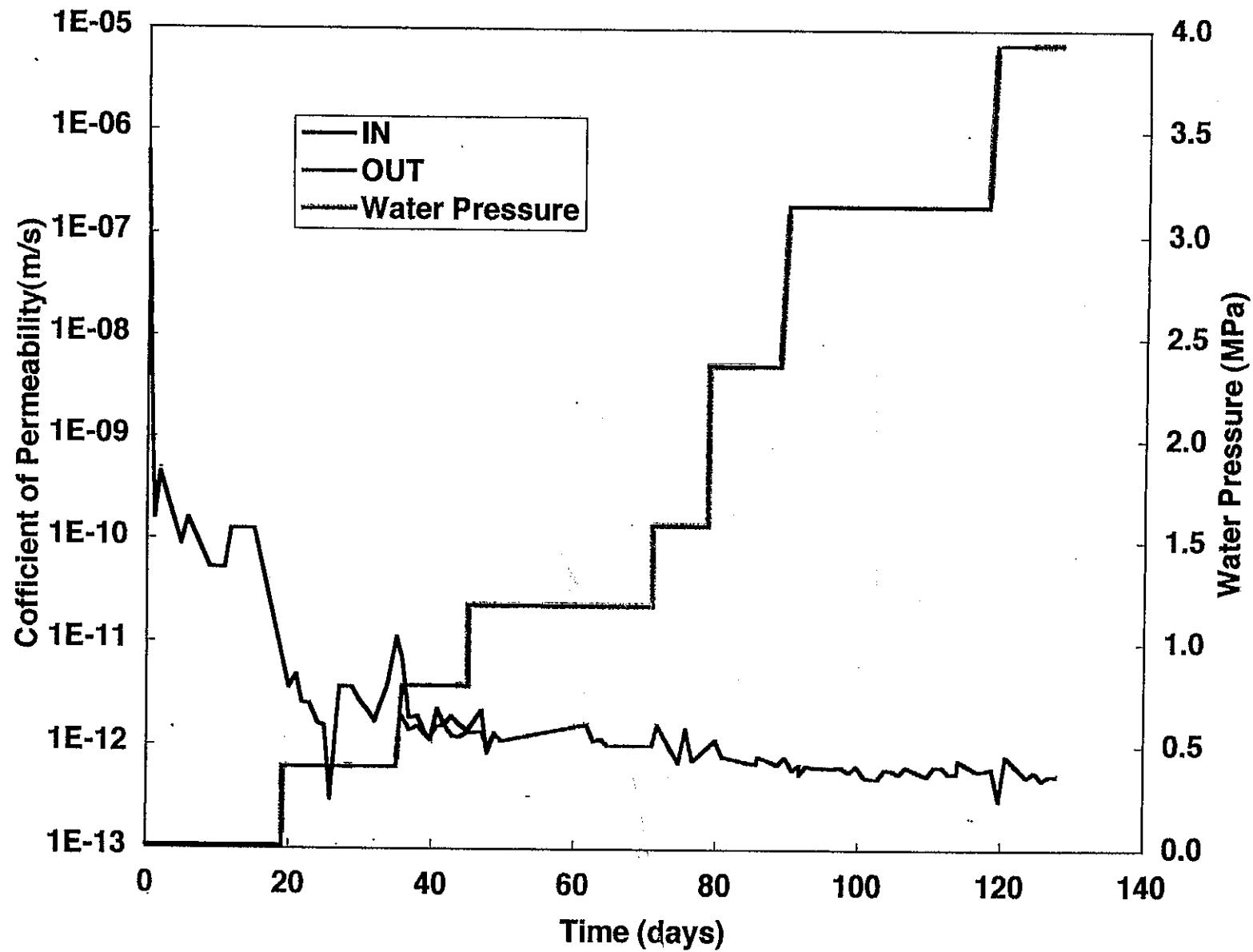


## Equipment of Water Permeability Measurement

## **Procedure of the Laboratory Test**

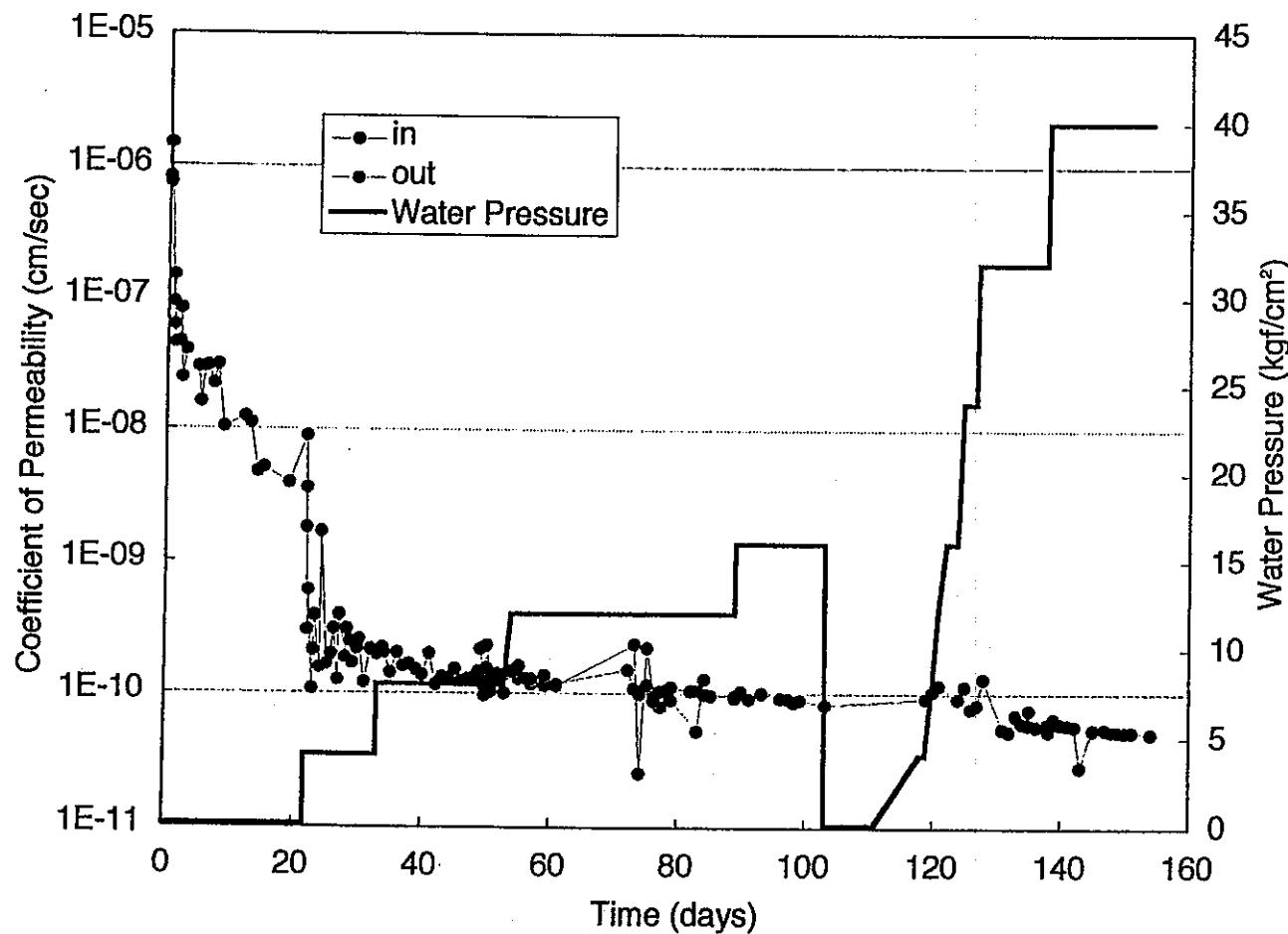
- (1) Compacted blocks\*** are installed in the equipment
- (2) 1m water head is given for saturation of the compacted bentonite blocks\***
- (3) Value of earth pressure cell and amount of water supply are measured**
- (4) When swelling pressure become constant, water pressure is raised stepwise**
- (5) Starting water pressure is 0.4 MPa, and final water pressure is 4 MPa**

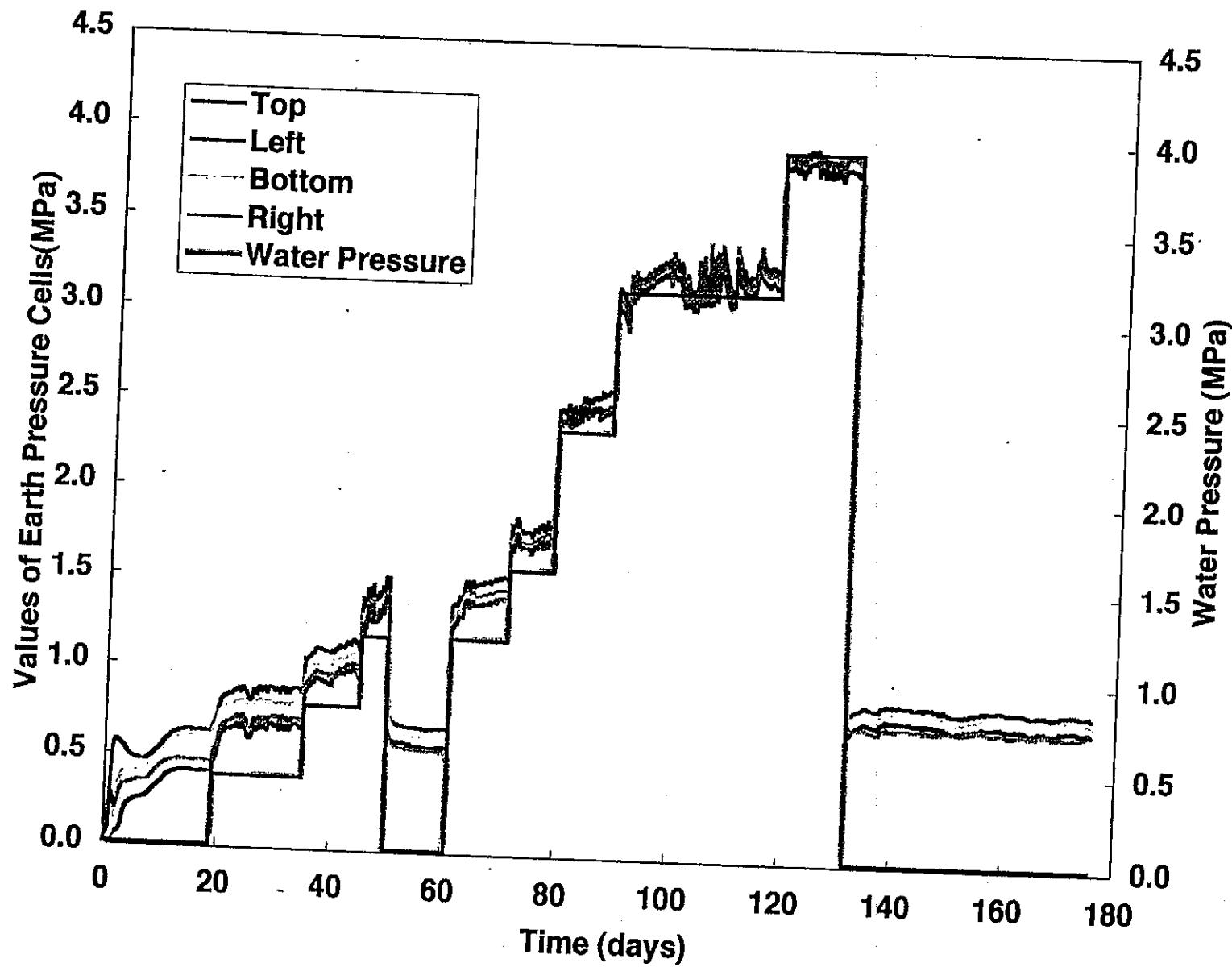
**\* Mixture of bentonite and quartz sand (B:S=7:3)**



## Result of the Laboratory Test

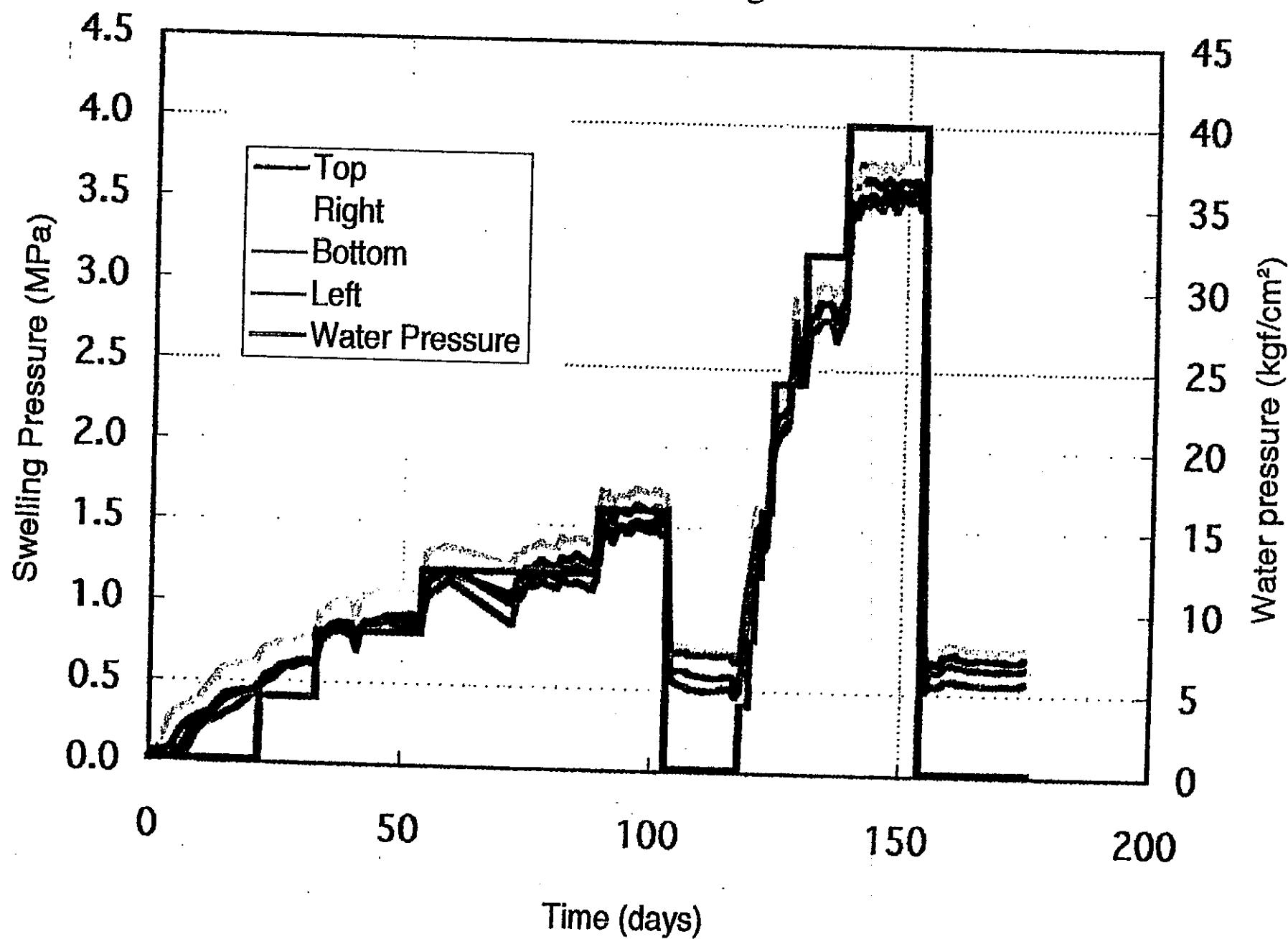
Time History of Coefficient of Permeability





## Time History of Swelling Pressure

ZI - AI - H

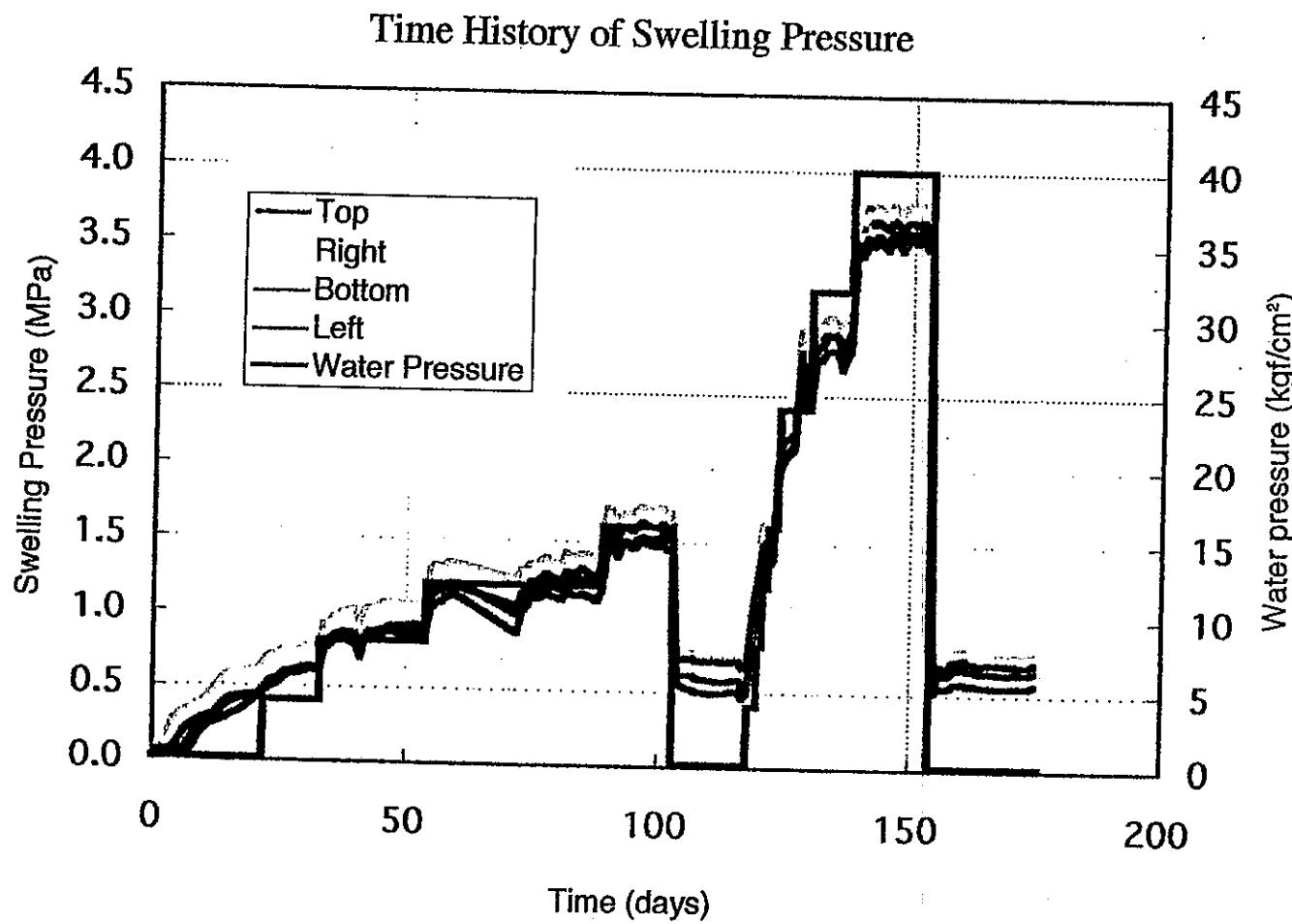


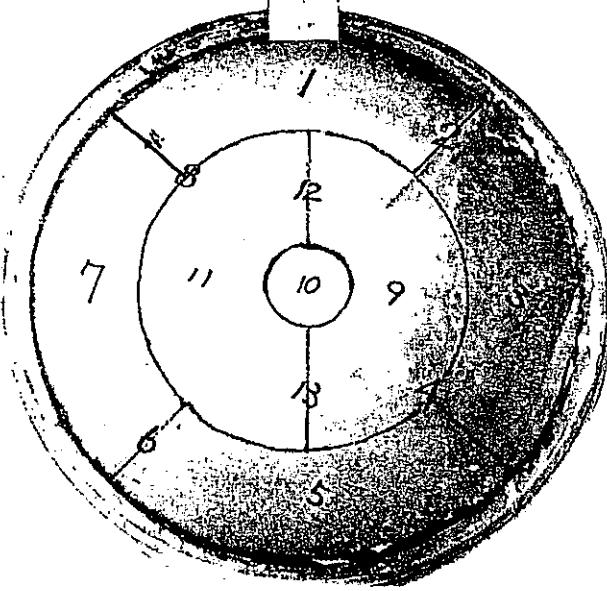
## **Results of the Laboratory Test**

- (1) The coefficient of permeability of blocks\* was  $10^{-10}$  cm/s under pressure 0.8-4.0 MPa**
- (2) Swelling pressure of bentonite blocks\* with dry density 1.8 t/m<sup>3</sup> was 0.5-0.7 MPa**
- (3) The measured values of earth pressure cell were 3.3-4.3 MPa under water pressure 4.0 MPa**
- (4) The apertures of blocks were closed, because of the swell of bentonite**

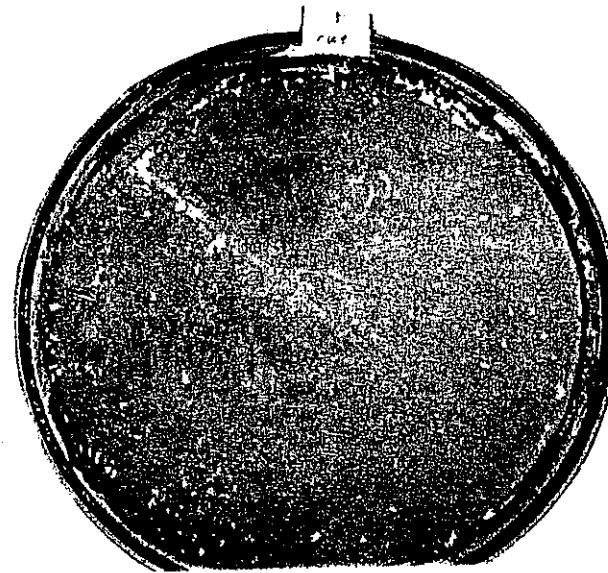
**\* Mixture of bentonite and quartz sand (B:S=7:3)**

## Result of the Laboratory Test





Inflow Side



Outflow Side

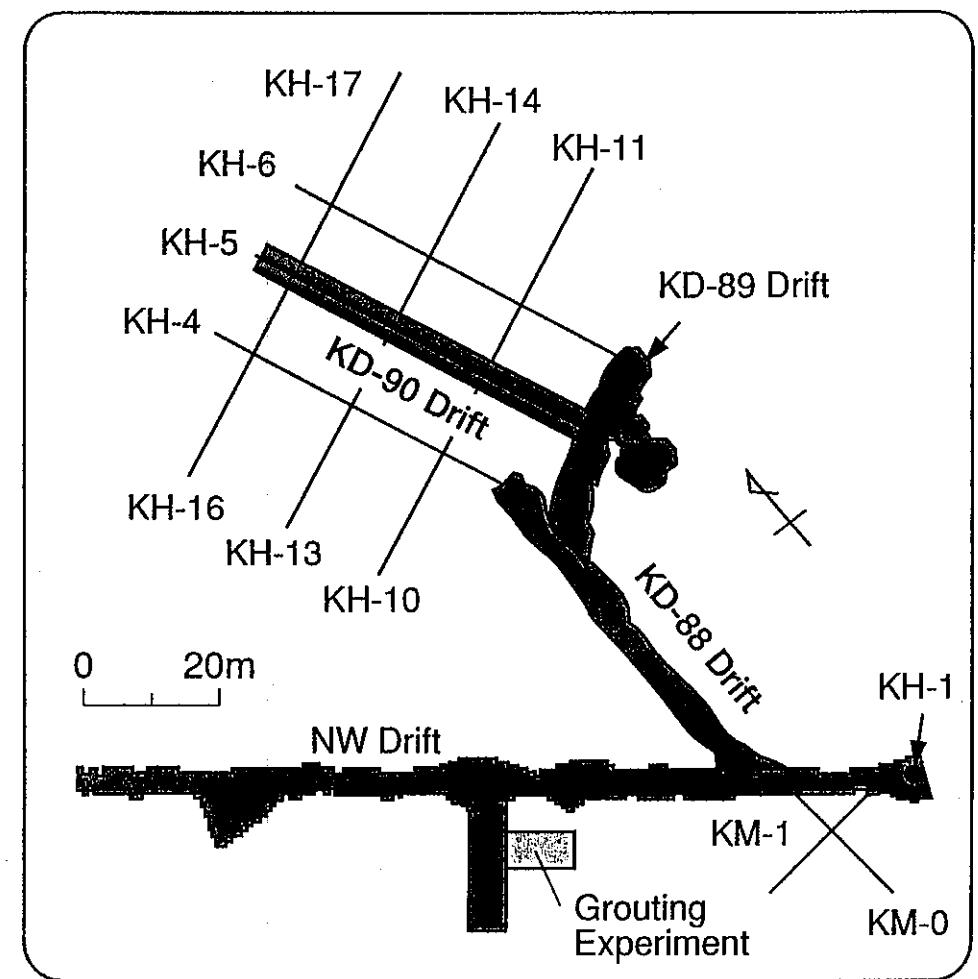
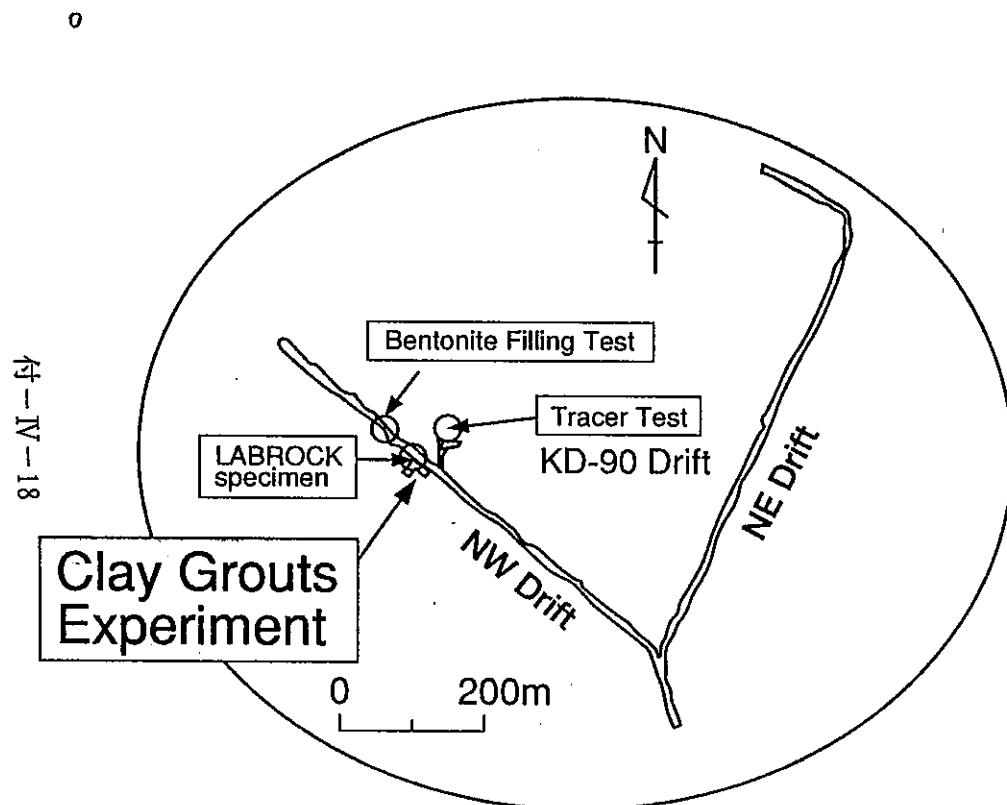
Bentonite Blocks after the Laboratory Test

# Clay Grouts Experiment in Kamaishi Mine

# **Objectives of the Clay Grouts Experiment**

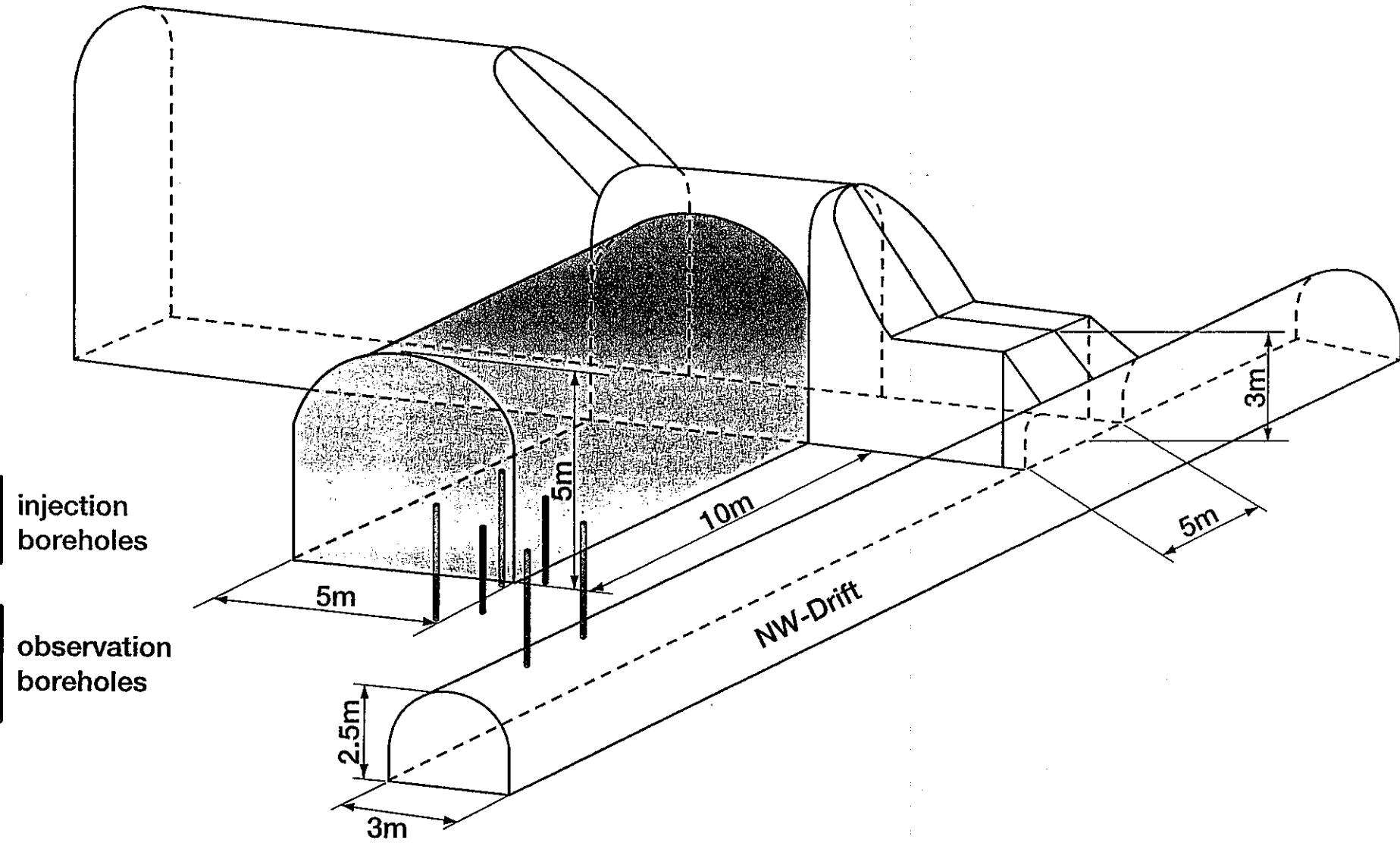
- To improve the hydraulic conductivity of fractured rock mass
  - (1) Low Permeability
  - (2) Longevity

## The Location of Experiment Area



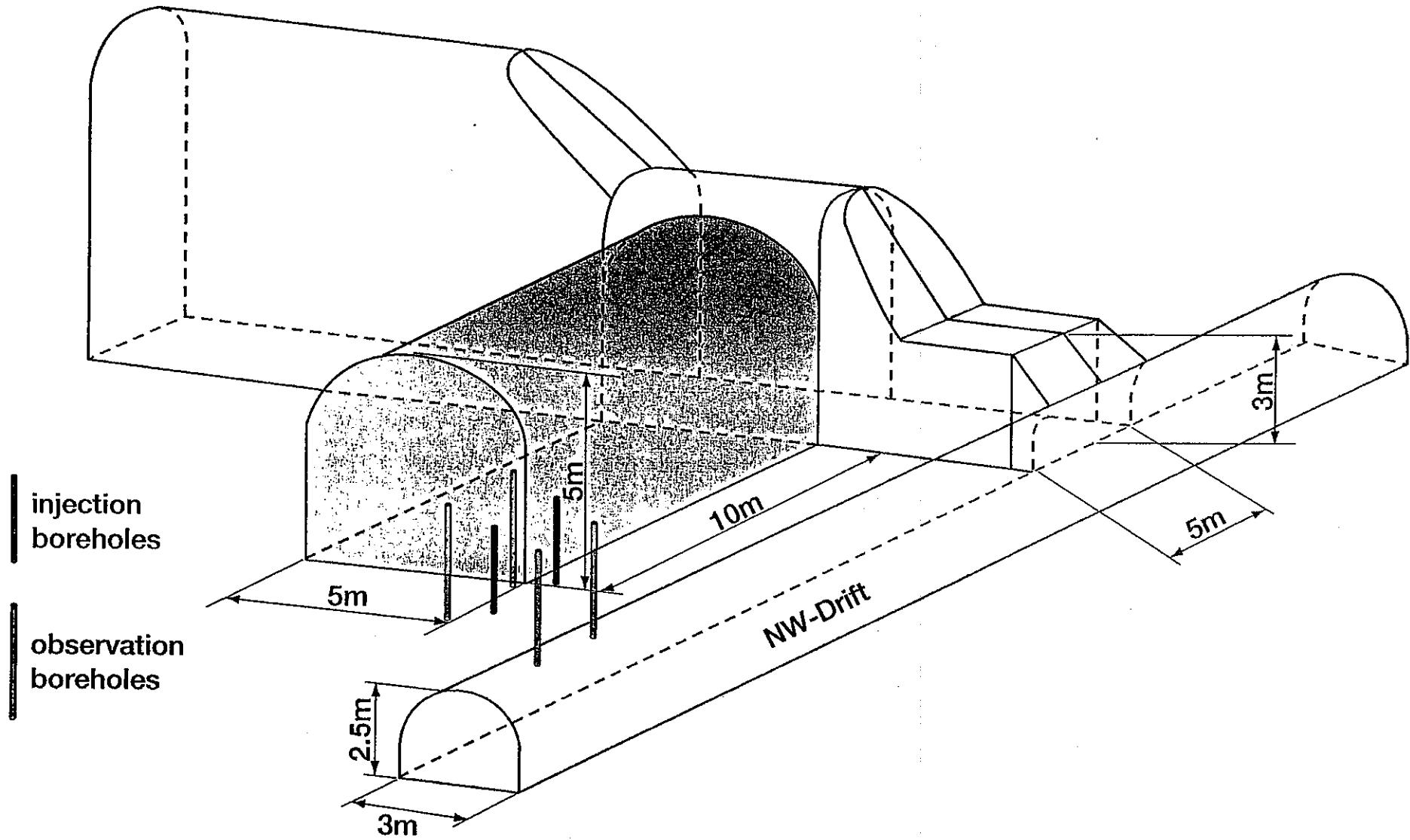
## The Layout of the Clay Grouts

61 - II - 44

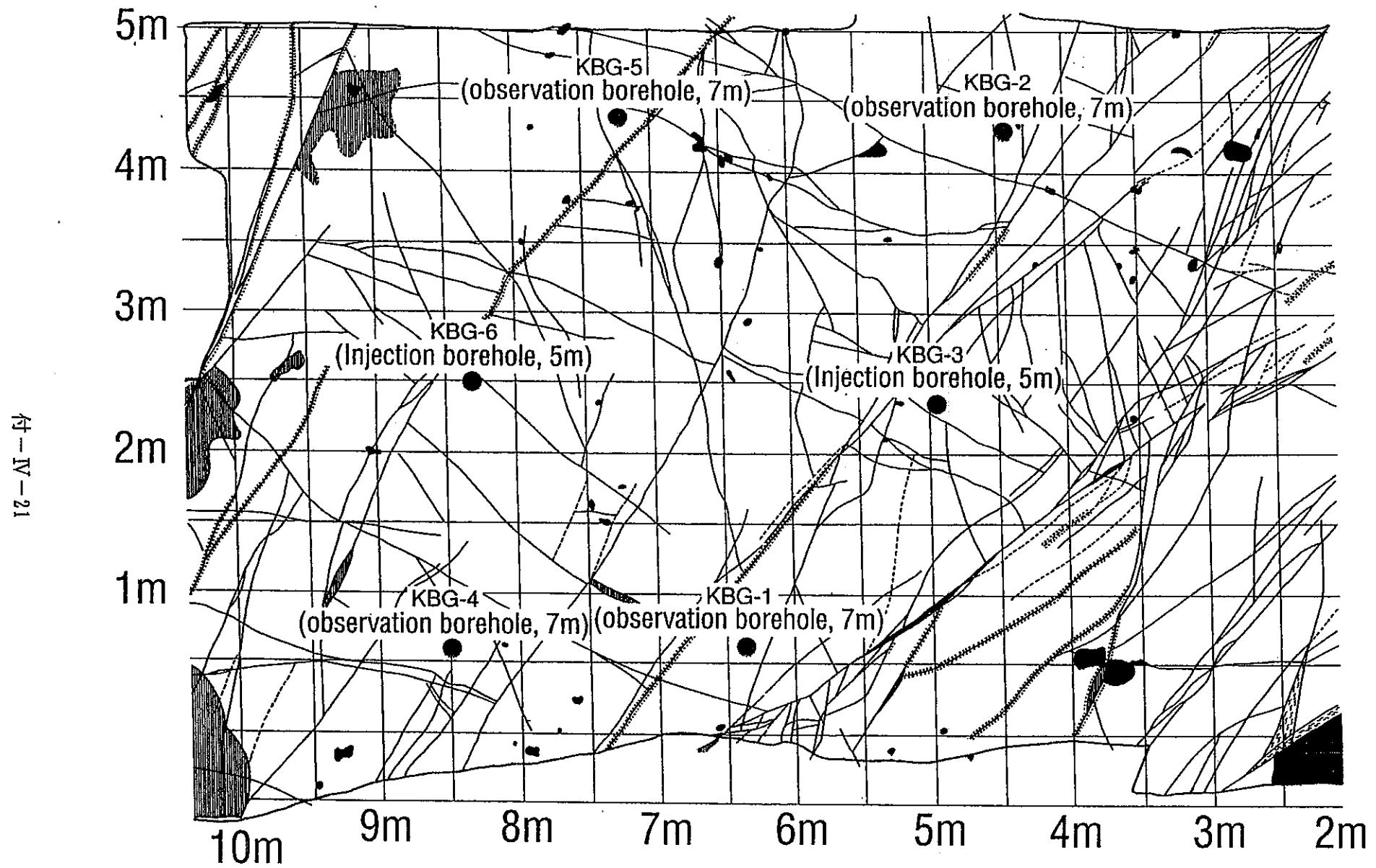


## The Layout of the Clay Grouts

Fig. 20



## Arrangement of Boreholes and Map of Fractures



# Procedure of Experiment

**Permeability Test  
(before Grouts)**



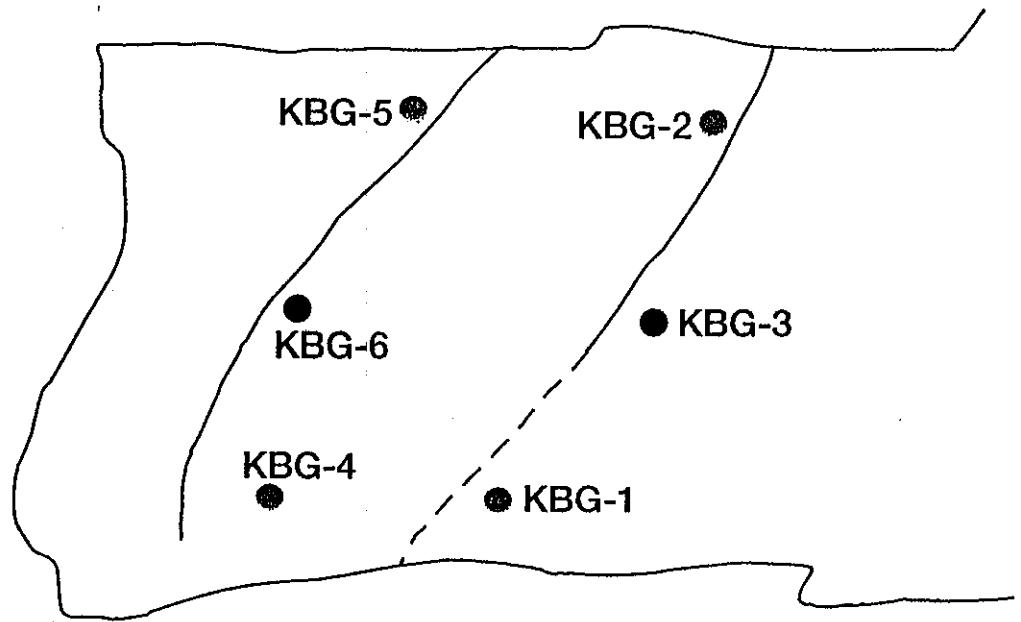
**Injection of Clay Slurry**



**Permeability Test  
(after Grouts)**

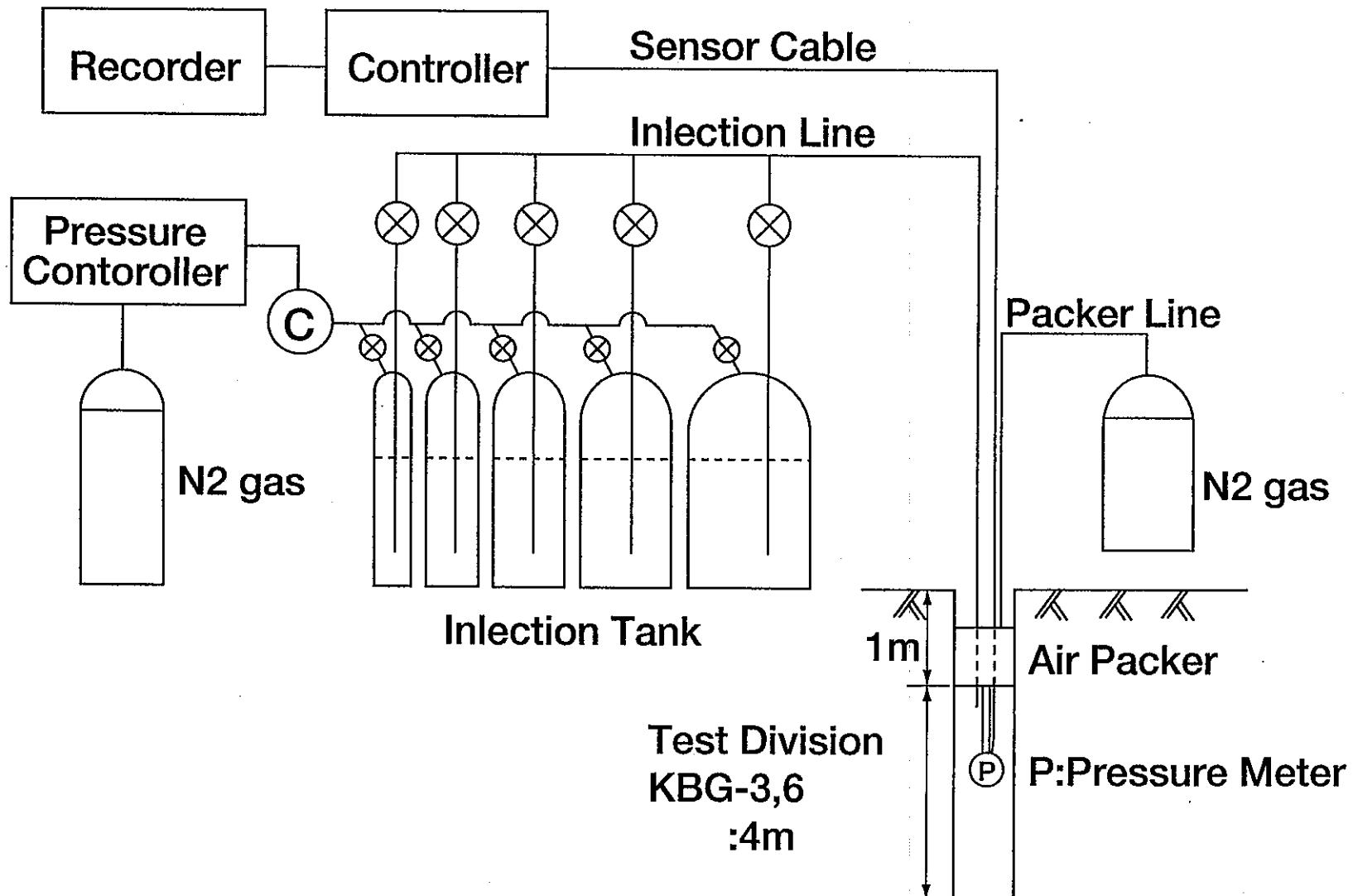


**Permeability Test  
(after 1 year)**

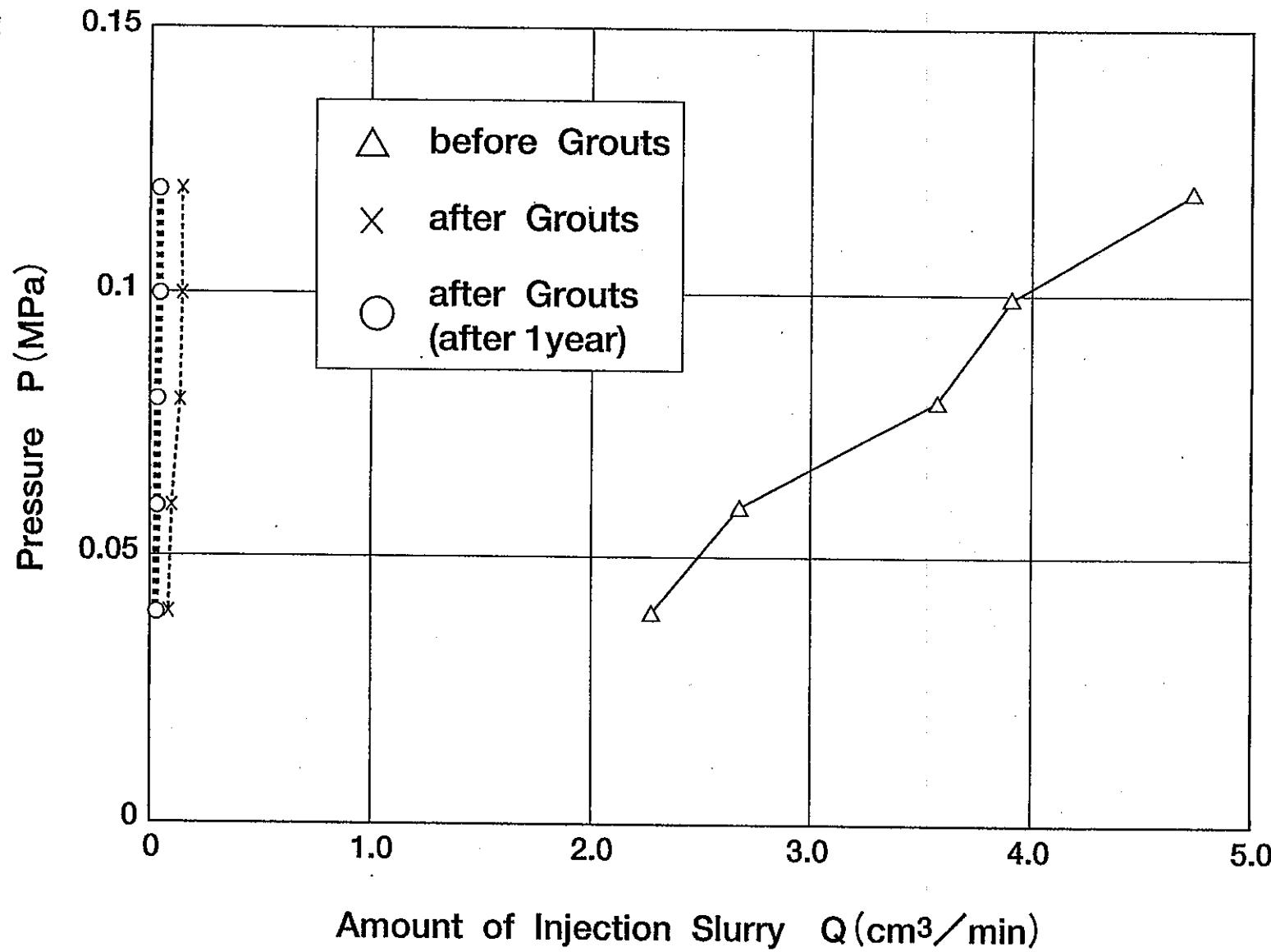


**Injection boreholes : KGB-3,6**

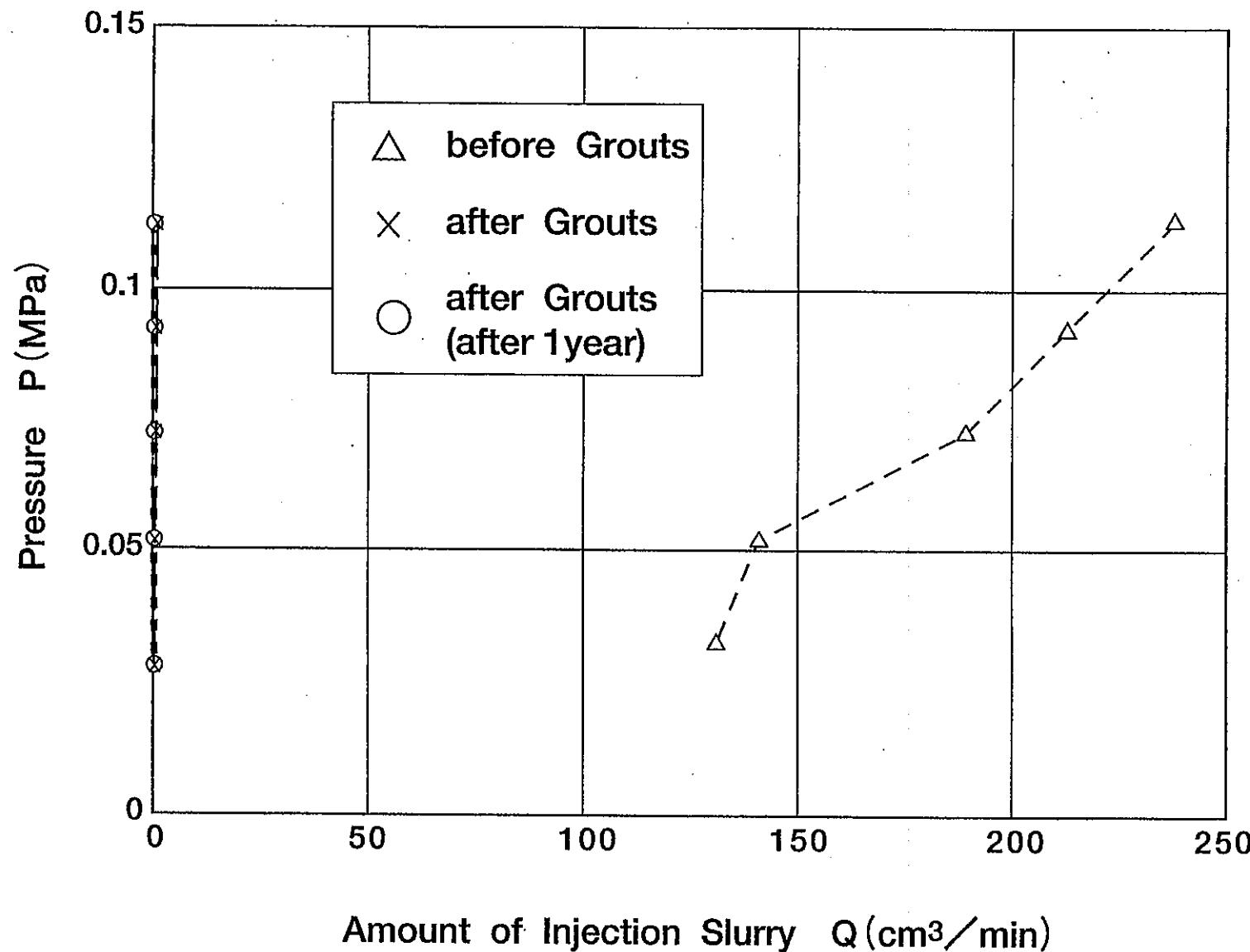
# Outline of Permeability Test



## Results of Permeability Test (KBG-3)



## Results of Permeability Test (KBG-6)



## Results of Permeability Test

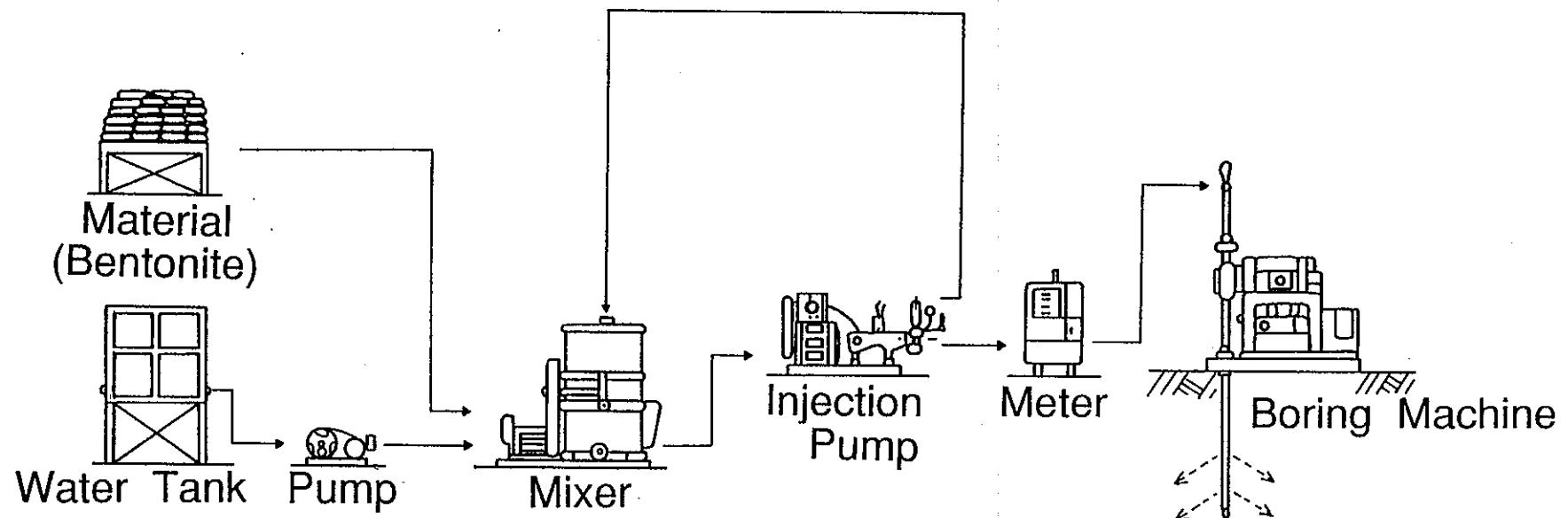
	KBG-3		KBG-6	
	Max. Pressure (MPa)	Coefficient of Permeability (cm/s)	Max. Pressure (MPa)	Coefficient of Permeability (cm/s)
Before grouts	0.1172	$9.6 \times 10^{-8}$	0.1108	$4.2 \times 10^{-6}$
After grouts	0.1171	$2.5 \times 10^{-9}$	0.1108	$1.1 \times 10^{-8}$
After grouts (After 1 year)	0.1170	$7.0 \times 10^{-10}$	0.1106	$2.3 \times 10^{-9}$

## **Results of the Clay Grouts Experiment**

- (1) The hydraulic conductivities by permeability test after a year from clay grouts are  $7.0 \times 10^{-10}$  to  $2.3 \times 10^{-9}$ (cm/s).**
- (2) The improvement of hydraulic conductivity by clay grouts is effectively durable.**

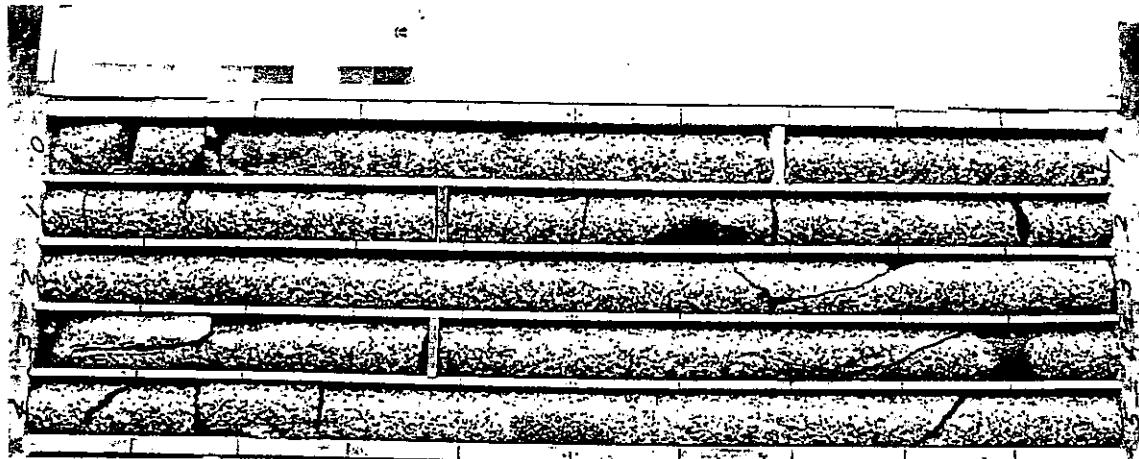
## **Future Plan of the Clay Grouts Experiment**

- (1) Permeability tests of injection boreholes (KBG-3,6) and observation boreholes (KBG -1,2,4,5)**  
⇒ Longevity of clay grouts (after 2 years)
- (2) Careful excavation of the floor of the room around injection boreholes**  
⇒ Visual identification of the clay grouts

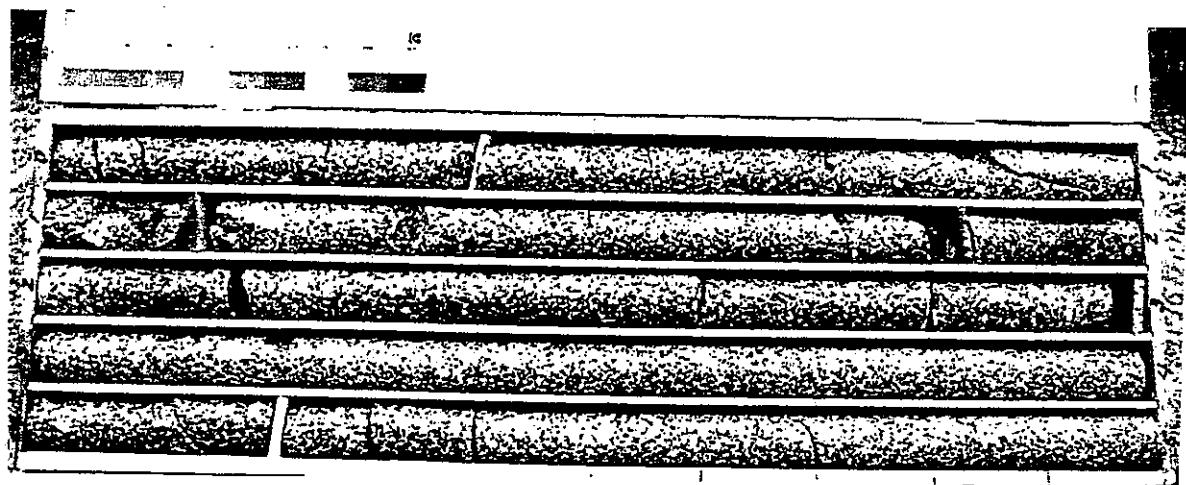


## Outline of Clay Grouting

### **KBG-3 (Injection Borehole)**



### **KBG-6 (Injection Borehole)**

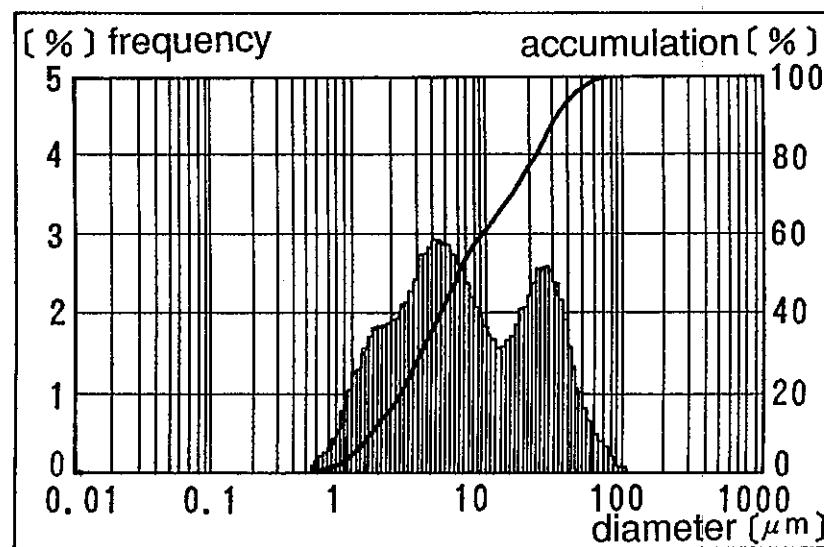


## **Core Samples (Injection Borehole)**

## Properties

Diameter( $\mu\text{m}$ )			Viscosity
Max.	Avg.	Min.	
1.5	6.29	33.1	53

## Diameter-Accumulation Curve



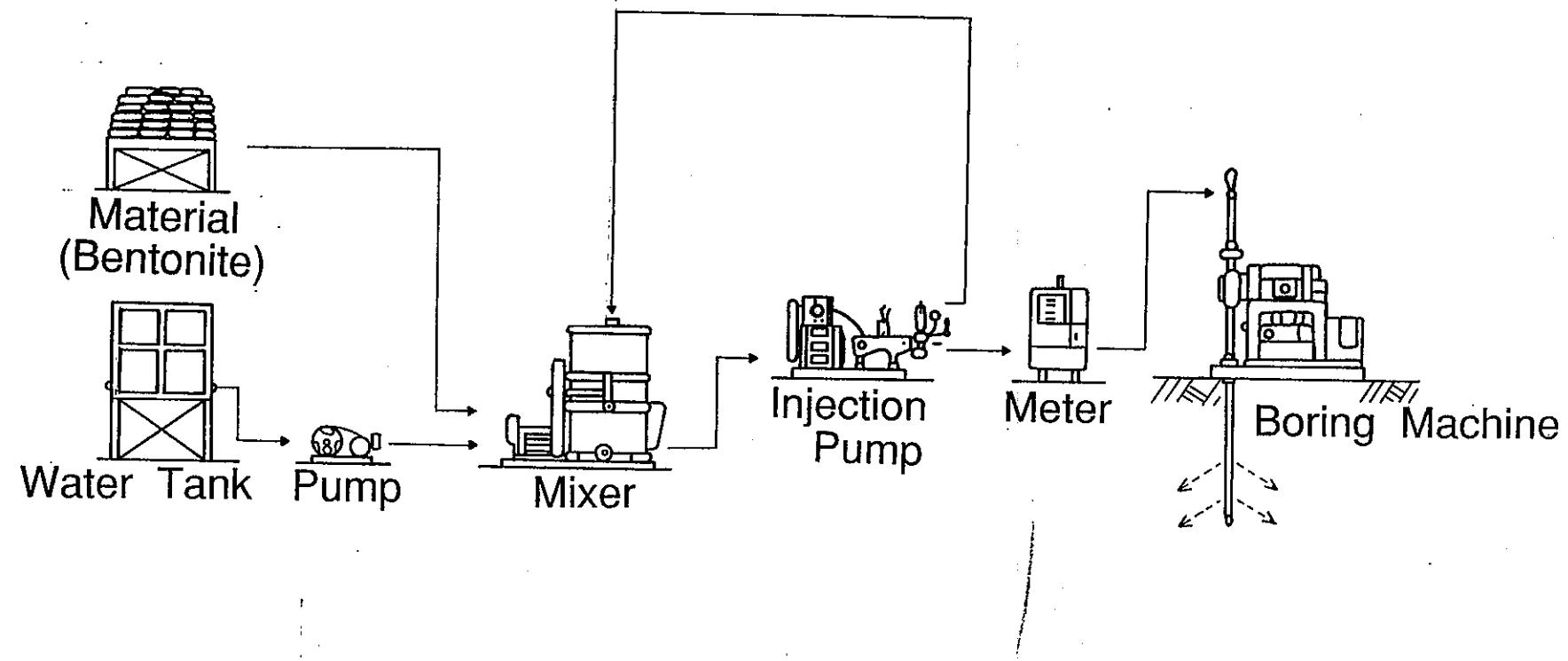
Properties of Grouting Material (Kunigel VA)

■ Material : Kunigel VA

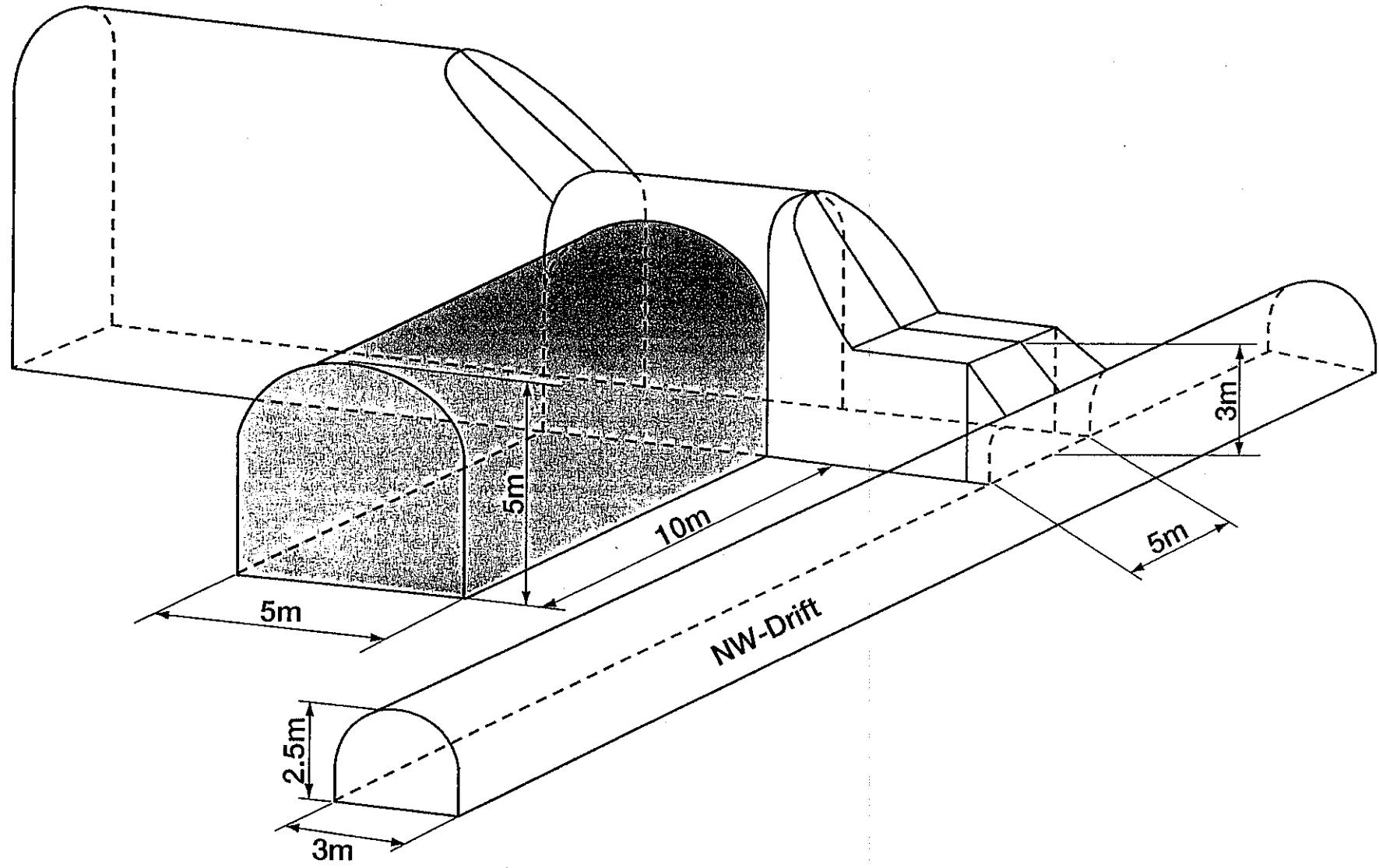
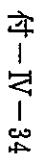
■ W/B (%) of grouting slurry

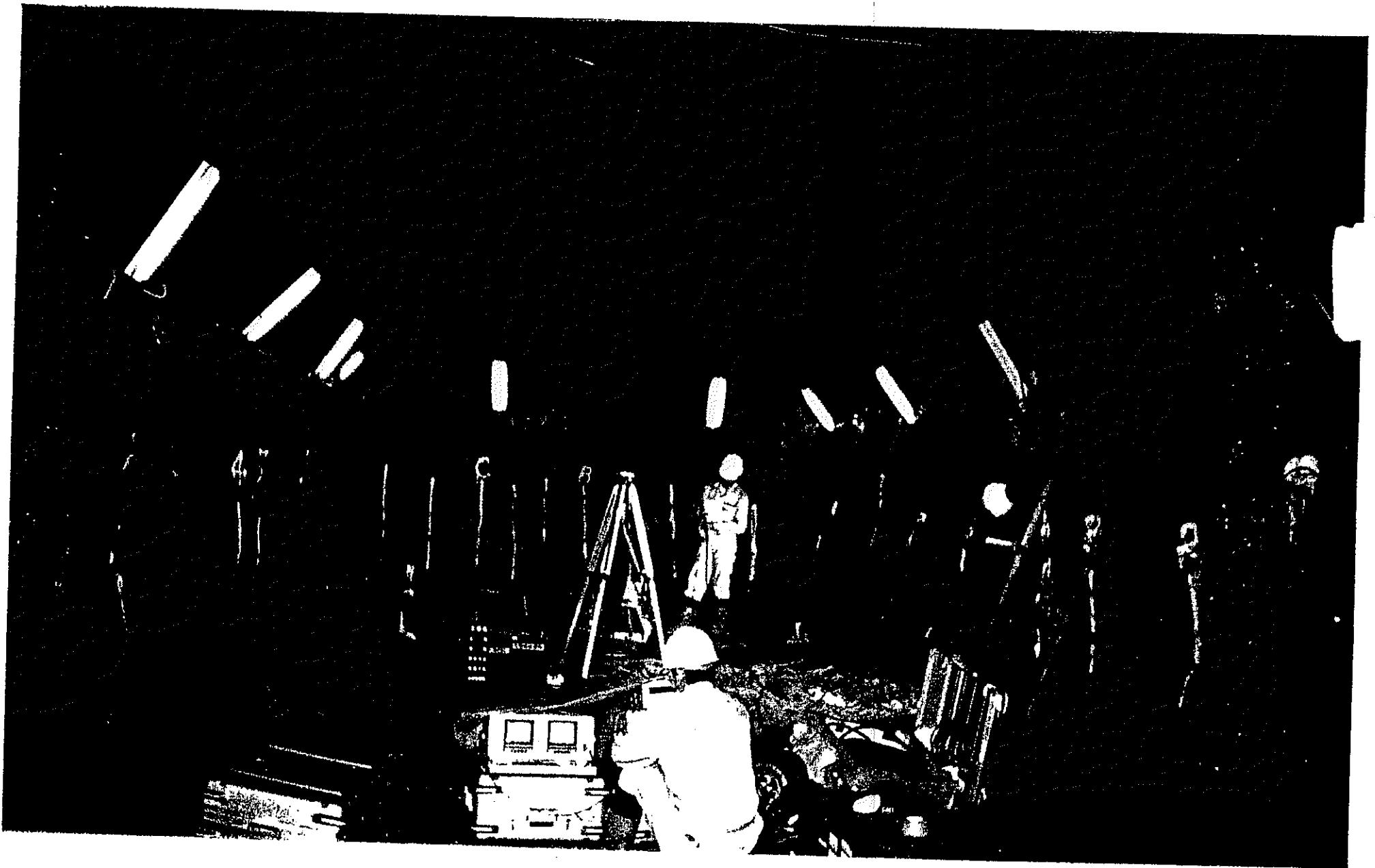
0.2% → 0.5% → 1.0%  
→ 2.0% → 4.0% → 8.0%

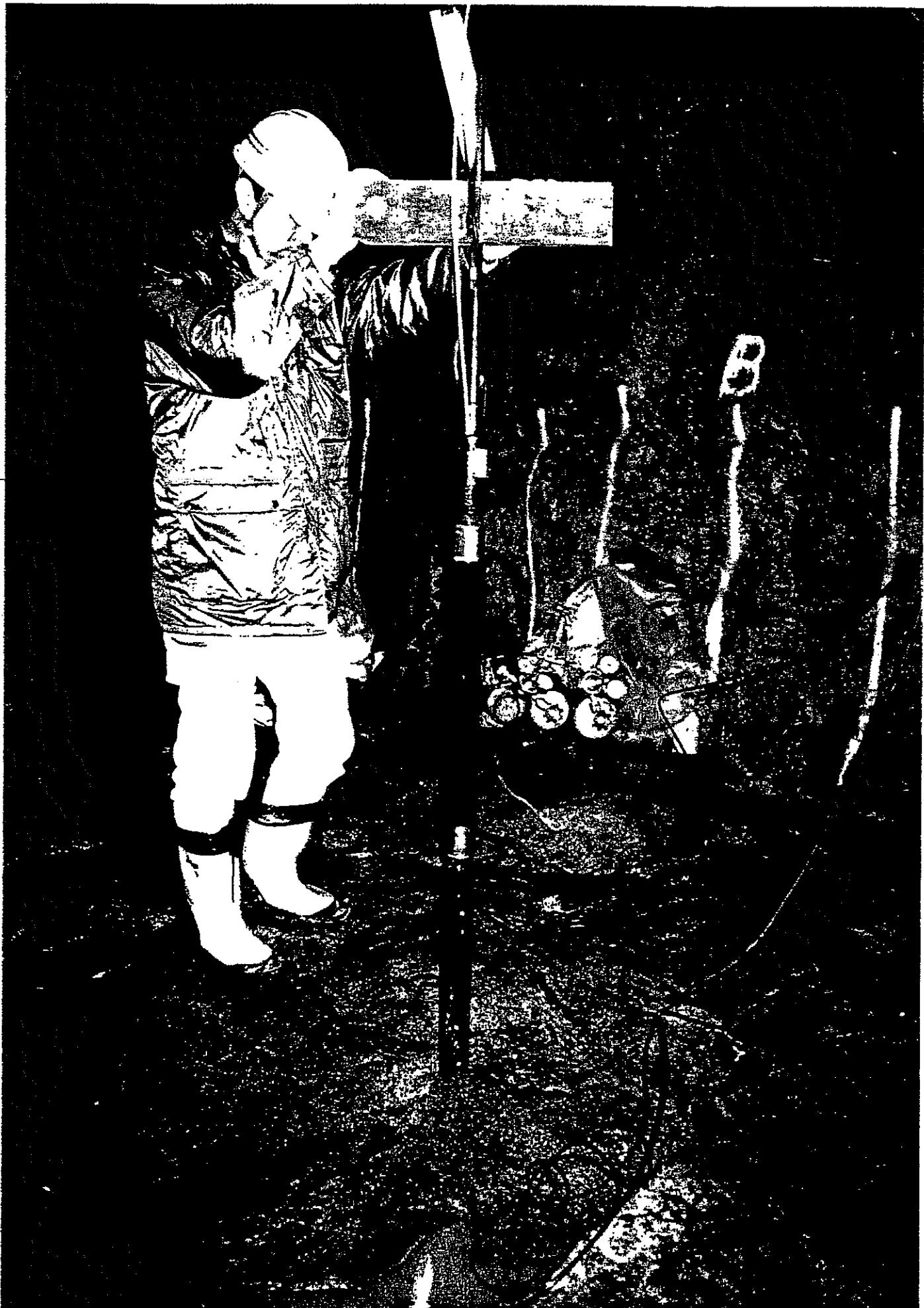
## Procedure of Injection



## Outline of Injection of Groute







付-IV-36

Appendix-V 1997/12/2~3 の  
プレゼンテーション資料

# Plan of Water Flow Simulation

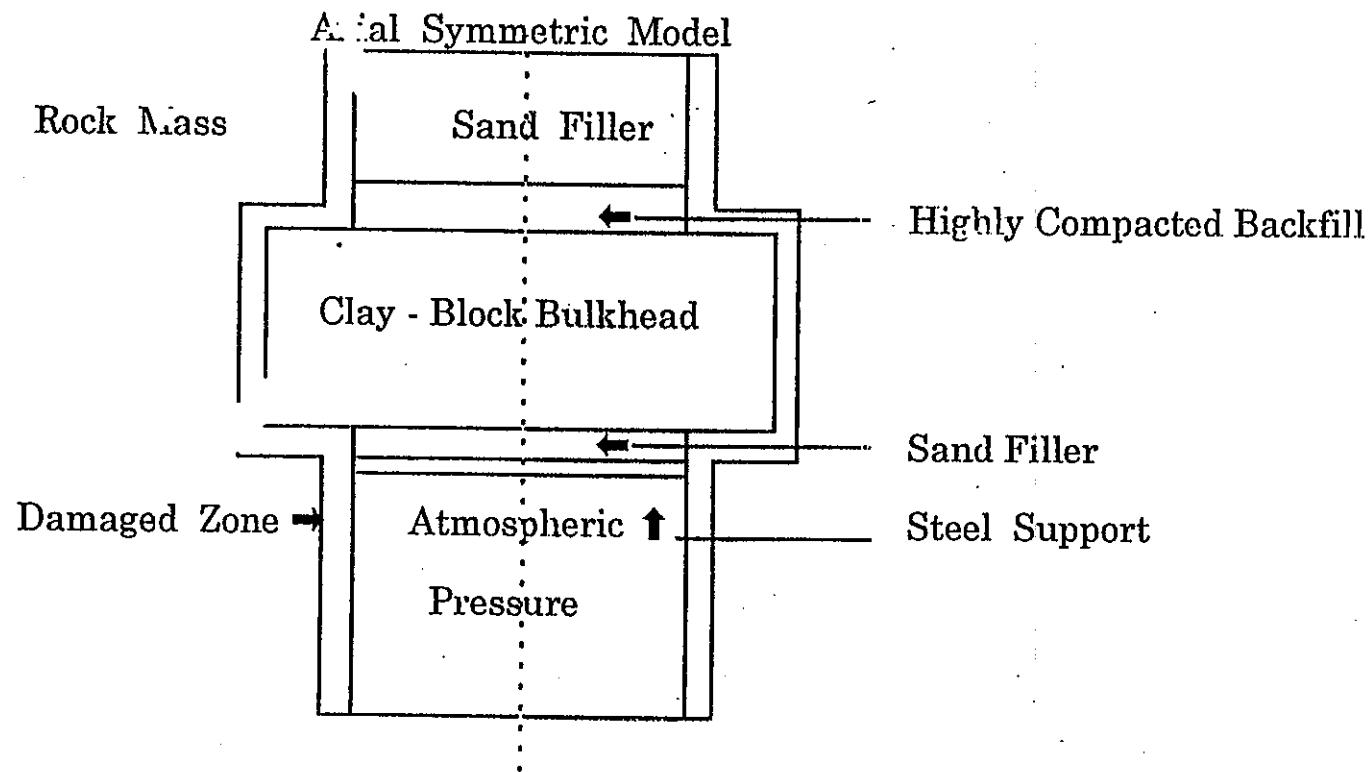
1997.12.2

PNC / Kajima

## Objective

- To evaluate the outline of the water flow through the clay bulkhead and rock mass
  - water flow through the bentonite plug  
( in the case of the saturated bentonite )
  - water flow through the excavation damaged zone

# Model of Simulation



地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法 (JGS T 542-1995)

土の動的変形定数試験方法基準化委員会

目 次

1. まえがき .....	69
1.1 本試験の目的と結果の利用 .....	69
1.2 繰返し載荷試験と動的試験、単調載荷試験との関連 .....	69
1.3 測定ひずみ範囲 .....	69
1.4 対象となる地盤材料 .....	70
1.5 排水条件 .....	70
1.6 試験結果の用い方 .....	70
2. 地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を 求めるための繰返し三軸試験方法」(T 542) .....	71
3. 基準の解説 .....	81
3.1 総則 .....	81
3.2 試験用具 .....	81
3.3 供試体の設置 .....	85
3.4 試験方法 .....	85
3.5 試験結果の整理 .....	91
3.6 試験結果の利用 .....	91
参考文献 .....	94
データシート記入例① .....	97
データシート記入例② .....	98
データシート記入例③ .....	99
Designation: JGS T 542-1995 "Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials" .....	100

る。したがって、以下のように試験方法を基準化して、結果の利用法は詳細には記述しなかった。すなわち、個々の繰返し載荷レベルでは11回繰返し載荷を行い、繰返し載荷回数5回目と10回目のデータ整理をすることにした。等価線形化法による地盤応答解析では、10回目の結果を用いる場合が多い。もし、繰返し載荷回数による剛性・減衰の変化が激しい場合は、適宜このことを考慮して結果を利用する必要がある。

本基準による試験方法で得られた等価剛性・減衰率～ひずみ振幅関係は、有効応力の時刻歴変化を考慮する非線形解析で用いる非線形応力・ひずみ関係の履歴モデルの基本（骨格曲線）となるものである。また、このような有効応力解析では、剛性（場合により減衰率も）を有効応力の関数にする。その場合は、繰返し載荷中の有効応力の変化を測定し、その剛性・減衰～ひずみ振幅関係への影響を検討して、その結果を取り入れる必要がある。

また、ひずみレベルが小さくても、排水状態での減衰率は、繰返し載荷回数が大きくなるにつれて低下する傾向が、繰返し載荷回数10回を越えても継続する。したがって、機械振動、交通荷重のように、類似な繰返し載荷レベルで非常に多くの繰返し載荷が加わる場合は、別途考慮が必要であろう。

一方、地盤掘削・構造物荷重の付加等の場合のように、繰返し載荷回数が10回よりも小さい繰返し載荷問題が存在する。その場合に対しては、本基準による試験で得られる10回より小さい繰返し載荷回数でのデータを利用できる。

最後に、JGS T 542-1995「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」とJGS T 543-1995「土の変形特性を求めるための繰返し中空ねじり試験方法」は、我国における長年の経験と全国一斉試験の結果と教訓を基礎にして作成されたことを付記しておく。

## 2 地盤工学会基準「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」

### 地盤工学会基準(JGS T 542-1995)

#### 地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法

Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials

### 1. 総 則

#### 1.1 試験の目的

この試験は、等方あるいは異方応力状態にある地盤材料に対して、三軸試験装置を用いて排水または非排水条件のもとで繰返し載荷中の変形特性を求ることを目的とする。

#### 1.2 適用範囲

砂質土、粘性土、礫、軟岩、改良土等の地盤材料を対象とする。

#### 1.3 用語の定義

変形特性を求めるための繰返し三軸試験とは、等方あるいは異方応力状態にある供試体に、一定セル圧で排水あるいは非排水条件のもとで、一定振幅かつ対称な繰返し軸荷重あるいは繰返し軸変位を一定の周期で加える試験をいう。

変形特性とは、繰返し軸差応力振幅と繰返し軸ひずみ振幅から求める等価ヤング率と軸差応力と軸ひずみの履歴曲線から求める履歴減衰率である。

#### 1.4 必要関連基準

この試験の供試体は、主として次の基準によって作製する。

JGS T 520-1990 「土の三軸試験の供試体作製方法」

JGS T 530-1990 「粗粒材料の三軸試験の供試体作製方法」

### 【付帯条項】

1. 本基準と部分的に異なる方法を用いた場合には、その内容を報告事項に明記しなければならない。
- 1.2a. 本試験方法の対象土質には、基本的に制限がない。
  - b. 改良土とは、セメント等化学物質で土質特性を改良した地盤材料をいう。
  - c. 飽和・空気乾燥状態および不飽和状態の供試体を対象とする。
- 1.4a. 室内で作製した礫質土の供試体の直径は、最大粒径の10倍以上を標準とするが、均等係数が5以上の粒度分布が比較的良い場合は5倍程度までとしてよい。砂質土では50mm以上、粘性土では35mm以上とする。
- b. 供試体の高さは直径の1.5～2.5倍とする。
- c. この試験を実施する場合、本基準に記述されていない事項については、次の基準を参照する。  
JGS T 522-1990 「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試

## 験方法」

JGS T 523-1990 「土の圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験方法」

JGS T 524-1990 「土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験方法」

JGS T 531-1990 「粗粒材料の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験方法」

JGS T 541-1990 「土の繰返し非排水三軸試験方法」

## 2. 試験用具

### 2.1 繰返し三軸試験装置

試験装置は三軸圧力室、セル圧・背圧の供給装置、軸荷重載荷装置あるいは軸変位負荷装置、および荷重・変位・排水量・間隙水圧の測定・記録装置から構成され、次に示す条件を満たすものとする。

- (1) 最大セル圧、背圧および供試体の最大圧縮軸荷重と最大引張り軸荷重に対して、十分な耐荷容量と負荷能力を有すること。
- (2) 供試体をキャップ、ペデスタルおよびゴムスリーブで覆い、これに所定のセル圧、背圧および軸荷重を加えることができ、供試体の上下端から給排水が可能であること。また、飽和供試体の繰返し載荷試験を非排水状態で行う場合は、間隙水圧測定経路の水圧変化による体積変化が十分に小さいこと。
- (3) 等方あるいは異方圧密中、所定のセル圧、背圧、軸方向圧力を200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 未満では±2kPa {±0.02kgf/cm<sup>2</sup>}、200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 以上では±1.0%の圧力変動の範囲内で連続して加え得ること。また、圧密中の供試体の軸変位量と排水量は、供試体の高さと体積の±0.05%の許容差で測定できること。
- (4) 等方あるいは異方圧密後に排水あるいは非排水状態で、一載荷周期中の5.3で定義する片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.001%以下から0.1%以上の一定振幅の繰返し軸荷重あるいは繰返し軸変位を連続して載荷できること。波形は正弦波あるいは三角波で、周波数は0.05~1.0Hzであることを標準とする。  
繰返し軸荷重を制御して加える試験では、次の条件を常に満足すること。
  - (i) 繰返し載荷開始時の応力状態から定義した圧縮荷重の片振幅P<sub>c</sub>と伸張荷重の片振幅P<sub>e</sub>の和(P<sub>c</sub>+P<sub>e</sub>)の変動が10%以下

$$(ii) 0.8 \leq P_c/P_e \leq 1.2$$

繰返し軸変位を制御して加える試験では、次の条件を常に満足すること。

- (i) 繰返し載荷開始から定義した圧縮変位の片振幅△L<sub>c</sub>と伸張変位の片振幅△L<sub>e</sub>の和(△L<sub>c</sub>+△L<sub>e</sub>)の変動が10%以下

$$(ii) 0.8 \leq \Delta L_c / \Delta L_e \leq 1.2$$

- (5) 繰返し載荷中は所定のセル圧を、200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 未満では±2kPa {±0.02kgf/cm<sup>2</sup>}、200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 以上では±1.0%の圧力変動の範囲内で連続して加え得ること。

- (6) 繰返し載荷中は、セル圧を（および飽和供試体の非排水繰返し載荷試験を行う場合は間隙水圧も）200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 未満では±2kPa {±0.02kgf/cm<sup>2</sup>}、200kPa {2.0kgf/cm<sup>2</sup>} 以上では±1.0%の許容差で連続的に測定できること。

- (7) 片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%以上の繰返し載荷の場合に、供試体に作用する繰返し軸荷重を、三軸圧力室内に設置した履歴特性が無視できる荷重計を用いて、所定の荷重の両振幅の±1.0%の許容差で連続的に測定できること。

- (8) 片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%以上の繰返し載荷の場合に、供試体軸変位量を、履歴特性が無視できる変位計を用いて、所定の軸変位の両振幅の±1.0%の許容差で連続的に測定できること。ただし、0.1%未満の片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>を測定する場合は、三軸圧力室内に設置した変位計でキャップの軸変位を直接測定すること。0.1%以上の片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>を測定する場合は、三軸圧力室外部に設置した変位計で測定できること。ただし、供試体の平均軸ひずみとキャップあるいは載荷ピストンの軸変位から求めた軸ひずみとの差が5%以上で、かつ5.3で定義する履歴減衰率hの誤差が測定される値の5%以上であると予想される場合は、供試体の軸変位量を適切な方法で供試体側面で測定すること。

- (9) 繰返し載荷中の繰返し軸荷重および繰返し軸変位量を連続的にかつ同時に記録できること。必要に応じて、間隙水圧の連続的記録できること。

## 2.2 その他の用具

- (1) ゴムスリーブ
- (2) Oリングまたはゴムひも

【付帯条項】

2.1 繰返し三軸試験機の例を図-1に示す。

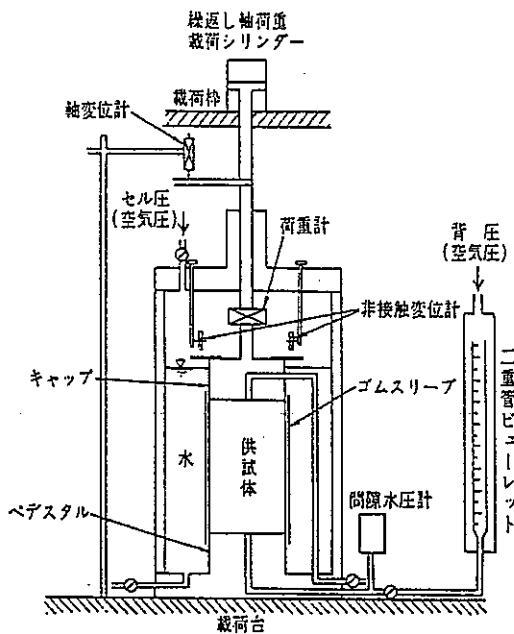


図-1 標準的繰返し三軸試験装置の構成例

- (1) a. 三軸圧力室、セル圧・背圧供給装置および圧力供給配管の耐圧容量は約500~1000kPa (5~10kgf/cm<sup>2</sup>)とする。  
 b. 最大引張り軸荷重作用時に三軸圧力室が浮き上がるがないように、三軸圧力室を載荷台などに固定する。  
 c. 繰返し載荷中は三軸伸張応力状態を作り出せ、かつ載荷ピストンとキャップの間に遊びがないように、供試体を三軸圧力室にセットする前に載荷ピストンとキャップが結合された形式 (JGS T 522-1990「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験方法」の図-2aおよびJGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の図-1参照) を用いる。
- (2) a. キャップ、ペデスタルの直径は供試体の直径と同一であることを標準とする。キャップとペデスタルの両面は平面で互いに平行であり、載荷ピストンと直交しているものとする。  
 b. 排水面には十分大きい透水性を有する多孔板を行い、必要に応じて適切なろ紙を敷く。ただし、硬い試料にろ紙を敷いた場合は、変位の測定に注意すること。

c. 間隙水圧測定経路の水圧変化による体積変化特性の測定法は、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項2.1(2)a. による。

- (3) 等方あるいは異方圧密中の供試体の体積変化は、ピューレットまたはこれと同等以上の性能を有する測定装置ではかる。ピューレットは背圧を加え得る構造を有し、背圧の変化によってピューレット内の水位が変化しない構造であることが望ましい。
- (4) a. 圧縮荷重の片振幅 $P_c$ と伸張荷重の片振幅 $P_E$ は、図-2に示すように繰返し載荷前の応力状態から定義する。いずれも正の値とする。 $\Delta P (=P_c + P_E)$ は繰返し軸荷重の両振幅である。図-2において、 $P_0$ は繰返し載荷前の応力状態のときに供試体に加わっている軸差荷重(軸差応力と供試体断面積の積)である。

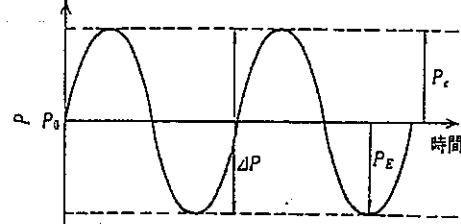


図-2 正弦波繰返し軸荷重に対する圧縮荷重の片振幅 $P_c$ と伸張荷重の片振幅 $P_E$ の定義。

- b. 圧縮軸変位の片振幅 $\Delta L_c$ と伸張軸変位の片振幅 $\Delta L_E$ は図-3に示すように繰返し載荷前の状態から定義する。いずれも正の値である。 $\Delta L (= \Delta L_c + \Delta L_E)$ は繰返し軸変位の両振幅である。

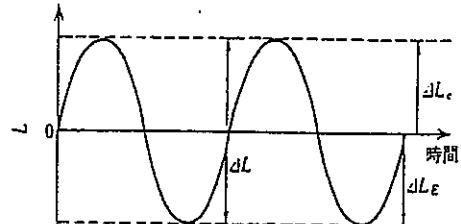


図-3 正弦波繰返し軸変位に対する圧縮軸変位の片振幅 $\Delta L_c$ と伸張軸変位の片振幅 $\Delta L_E$ の定義。

- c. 載荷周波数は、本基準に示す測定精度が満足できることを確認した場合は、0.05~1.0Hzの範囲でなくてもよい。
- d. 繰返し軸荷重あるいは繰返し軸変位の載荷波形として、正弦波と三角波以外の矩形波や台形波は用い

てはならない。

- 線返し軸荷重の測定には、三軸圧力室内に設置した圧縮力と引張り力が測定できる電気式荷重計を用いる。
- 荷重計の出力は、セル圧の変化により変化しないこと。また、軸荷重の偏心によるモーメントや水平力に影響されないこと。さらに、それぞれ一波ごとの線返し載荷中に、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%の線返し載荷の時の測定値の1.0%以上のドリフトと1.0%以上の較正値の変化がないこと。
- 荷重計の出力に対する実荷重の関係を静的な載荷・除荷に対して求め、図-4に示す方法で求めた線返し載荷に対する履歴特性 $h_{LC}$ を求める。 $h_{LC}$ の値は、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%の時の供試体の履歴減衰率 $h$ の5%以下であることを確認する。荷重計に加える荷重の最大値は実際の試験で加える荷重の最大値とする。

$$\text{荷重計履歴特性 } h_{LC} = (1/2\pi) \cdot \Delta X/X$$

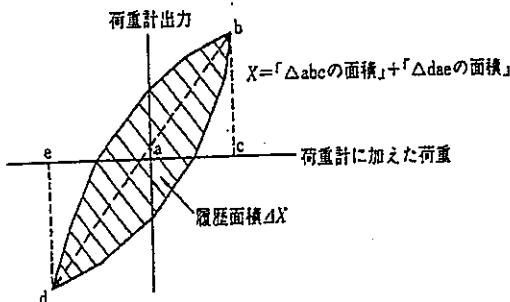


図-4 荷重計の履歴特性の定義

- 線返し載荷中の軸変位量の測定を、三軸圧力室の外部に設置した電気式の変位計で測定する場合は、軸変位計と供試体の間に位置する載荷ピストン、荷重計などの変形、軸変位計の固定位置の変形などが、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.1%の時の供試体の軸変位量の1.0%以下であるものとする。
- 供試体の軸変位をキャップの軸変位から求める場合は、非接触型変位計を用いるのを原則とする。
- 供試体上下端とキャップ・ペデスタルとのなじみが不完全なことや、ろ紙などの供試体上下端付近の緩みによる軸変位の測定誤差が5%以上であることかが予想される場合は、供試体の軸変位量を適切な方法で供試体側面で測定する。その場合、図-5を参考にして供試体の直径方向の両端位置で、供試体軸に平行なゴムスリーブ上の線上の2点間での軸変位量 $\Delta L_{local,1}$ を測定する。 $\Delta L_{local,1}$ は供試体高さの50%

～80%程度を測定長とする。この場合、ゴムスリーブと供試体の間のすべりが軸変位の測定値に対して影響が無いこと。また、測定器が供試体の変形に影響を与えないこと。



図-5 供試体側面での供試体軸変位量の測定例

- 変位計の出力は、セル圧の変化により変化しないこと。また、それの一一波ごとの線返し載荷中に、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%の時の線返し載荷時の測定値の1.0%以上のドリフトと1.0%以上の較正値の変化がないこと。
- 供試体側面で軸変位を測定する場合も含み、軸変位計の出力とマイクロメーターで測定した軸変位計に加えた変位の関係を静的な変位の増加・減少に対して求め、図-6に示す方法で線返し載荷に対する履歴特性 $h_{DT}$ を求める。 $h_{DT}$ の値は、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>SA</sub>が0.01%の時の供試体の履歴減衰率 $h$ の5%以下であることを確認する。加える変位の最大値は、実際の試験で加える軸変位の最大値とする。

$$\text{変位計履歴特性 } h_{DT} = (1/2\pi) \cdot \Delta Y/Y$$

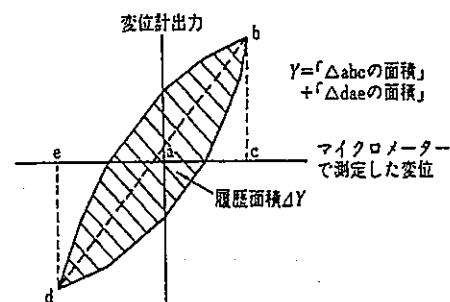


図-6 軸変位計の履歴特性の定義

- 線返し載荷中の軸荷重、軸変位、および必要に応じて計測するセル圧と間隙水圧の測定値は、デジタルデータレコーダなどの電気式記録装置を用いて連続的に記録すること。ただし、連続する二つのデジタル測定値の間の値が十分に内挿できるように、一周期のデータポイント数を40以上とする。
- 周波数の増加に伴って履歴減衰率が線形に増加

(減少)する場合は、荷重Pと変位ΔDの記録の間に時間遅れ(進み)があることになる(図-7)。軸荷重と軸変位の測定結果の間の位相のずれによる履歴減衰率の誤差が、片振幅軸ひずみ( $\varepsilon_a$ )<sub>sA</sub>が0.01%の時の供試体の履歴減衰率の5%以下であることを確認する。

## 2.2 必要に応じて、Oリング拡大器、ゴムスリーブ拡大器、ろ紙を用いる。

- (1) ゴムスリーブはラテックスラバー製が望ましい。ゴムスリーブの厚さは、供試体の直径が10cm以下の場合は0.15~0.30mm程度、供試体の直径が20~30cm程度の場合は1~2mm程度であり、応力が作用していないときの内径は供試体直径の95%程度のものとする。

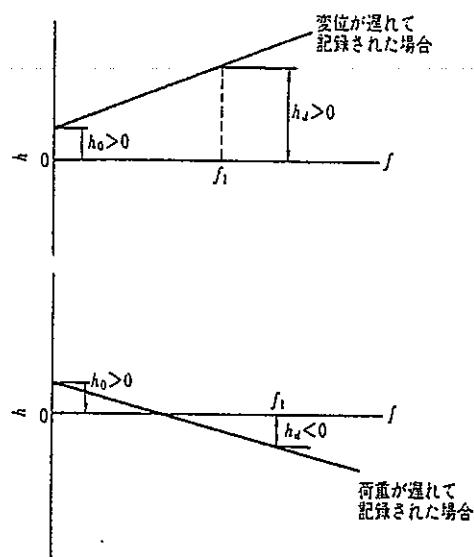


図-7  $h$ に周波数依存性がない場合の荷重と変位の測定結果の間の位相ずれにより測定された履歴減衰率の見かけの載荷周波数依存性( $h_0$ は正しい値、 $h_d$ は $f_1$ の時の見かけの値)

### 3. 供試体の設置

#### 3.1 供試体上下端面

供試体の上下端面は乱れが少なく、十分平滑で平面性が高く、相互の平行度が高いこと。

#### 3.2 供試体の設置

供試体の設置は供試体の作製方法に応じて次の三つの場合に分けられる。

- (1) JGS T 520-1990「土の三軸試験の供試体作製方法」のトリミング法による供試体

- ① 供試体をペデスタルの上に置き、ゴムスリ

ーブをかぶせ、ゴムスリーブをペデスタルとキャップにOリングなどで締め付ける。

- ② 三軸圧力室を組み立て、圧力室内に水を入れ排水状態で10kPa[0.1kgf/cm<sup>2</sup>]程度の等方圧力を供試体に加える。

- (2) JGS T 520-1990「土の三軸試験の供試体作製方法」の負圧法およびJGS T 530-1990「粗粒材料の三軸試験の供試体作製方法」による供試体

- ① 三軸圧力室を組み立て、圧力室内に水を入れる。  
② セル圧、負圧、および軸荷重を制御して供試体の有効拘束圧を変化させないで負圧をセル圧に置き換える。

#### (3) 凍結した供試体

- ① 供試体をペデスタルの上に置き、ゴムスリーブをかぶせ、ゴムスリーブをペデスタルとキャップにOリングなどで締め付ける。  
② 次のいずれかの方法で解凍する。

##### (1) 負圧のもとで解凍する方法

供試体に適切な負圧を与えながら解凍し、解凍後の供試体の高さ $H_0$ (cm)と直径 $D_0$ (cm)をはかる。三軸圧力室を組み立て、圧力室内に水を入れ、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.1(2)②の方法で負圧をセル圧に置き換える。

##### (2) セル圧のもとで解凍する方法

凍結した供試体の高さ $H_0$ (cm)と直径 $D_0$ (cm)をはかる。三軸圧力室を組み立て、圧力室内に水を入れ、セル圧を加え適切な等方圧力のもとで供試体を解凍する。

#### 3.3 供試体の飽和

必要に応じて、適切な方法を組み合わせ供試体の飽和度を高める。

#### 【付帯条項】

- 3.1a. 供試体の上下端面の平滑度、平面性度、相互の平行度は、以下の数値を満足すること。

- (i) 供試体の下端面を基準とする上端面の任意の点の高さの差が供試体の高さの0.5%以内であること。

- (ii) ペデスタル上にセットされた供試体の上端面とキャップの下端面とのなす角度が0.5度以下であること。

- (iii) 供試体の上下端面の中心は載荷軸の中心から供

- 試体の高さの1.0%以内であること。
- b. JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.1bによる。
- c. JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.1cによる。
- i. 2 (2) JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.1(2)による。
- (3) JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.1(3)による。
- i. 3 必要に応じて供試体の飽和度を高める場合は、供試体の土質の種類、供試体の状態に応じて、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項3.2に示す方法を適切に組み合わせて用いる。

#### 4. 試験方法

##### 4.1 飽和度の確認

必要に応じて、圧密前あるいは圧密後に間隙水圧係数B値を求める。

##### 4.2 圧密過程

試験目的に応じて、等方圧密あるいは異方圧密を行う。圧密による供試体の軸変位量 $\Delta H$ 。 $(\text{cm})$ と、飽和供試体の場合は圧密による供試体からの排水量 $\Delta V$ 。 $(\text{cm}^3)$ をはかる。

##### (1) 等方圧密過程

- ① 一定の背圧を加えたままで、三軸圧力室に所定の等方応力を作用させて圧密する。
- ② 少なくとも一次圧密が終了するまで圧密を続ける。

##### (2) 異方圧密過程

- ① 最終圧密応力状態での側方向有効応力 $\sigma'_{\text{r}}$ まで、上記の等方圧密過程と同様な方法で等方圧密する。
- ② 側方向有効応力 $\sigma'_{\text{r}}$ を一定に保ったまま、軸方向有効応力を最終圧密応力状態での軸方向有効応力 $\sigma'_{\text{a}}$ まで増加する。この際、載荷速度は供試体内の過剰間隙水圧 $\Delta u$ が常に $\sigma'_{\text{r}}$ の10%以下であること。少なくとも、一次圧密が終了するまで圧密を続ける。

##### 4.3 繰返し載荷過程

- (1) 所定の等方あるいは異方応力状態であることを確認する。
- (2) 以下の要領で繰返し軸荷重あるいは繰返し軸変位を加える。

- ① 第1回載荷

- (1) 非排水試験の場合は、排水バルブを閉じる。
- (2) 片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\text{SA}}$ が0.001%程度以下となるように、一定振幅で0.05~1.0 Hzの間の一定の周波数で、正弦波あるいは三角波の繰返し軸荷重あるいは繰返し軸変位を11波載荷する。載荷中の軸荷重および軸変位と、必要に応じて間隙水圧を連続的に記録する。
- (3) 繰返し載荷による供試体の高さ変化を（飽和供試体の場合は、体積変化も）はかる。繰返し載荷中、非排水状態にした場合は、繰返し載荷終了後、排水状態とし、排水状態にすることによる供試体の高さ変化と体積変化をはかる。

##### ② 第2回載荷

- (1) 非排水試験の場合は、軸ひずみの変化率が0.01%/min以下になったことを確認してから、排水バルブを閉じる。
- (2) 第1回載荷での片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\text{SA}}$ の2倍程度になるように、第1回載荷と同様な繰返し載荷を行う。
- (3) 繰返し載荷による供試体の高さ変化を（飽和供試体の排水試験の場合は体積変化も）はかる。繰返し載荷中、非排水状態にした場合は繰返し載荷終了後、水状態とし、排水状態にすることによる供試体の高さ変化と体積変化をはかる。

##### ③ 第3回以降の載荷

- 第2回載荷と同様に載荷する。載荷が可能な限り、この繰返し載荷段階を繰返す。
- 4.4 供試体の変形状況などを観察し、記録する。
- 4.5 供試体の炉乾燥質量 $m_s$ 。 $(\text{g})$ をはかる。

#### 【付帯条項】

4. 側方向応力 $\sigma_r$  (=セル圧 $\sigma_c$ )、間隙水圧 $u$ 、軸方向応力 $\sigma_a$ は、供試体高さの中央の位置における値で定義する。
  - 4.1 間隙水圧係数B値を求める場合は、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項4.1に示す方法で求める。ただし、異方圧密の場合には、異方圧密開始直前に求める。
  - 4.2 (1) 等方圧密の場合の供試体の一次圧密の終了は、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項4.2(2)に示す方法で確認する。

- (2) 异方圧密は、次の方法で行うことを標準とする。
- 最終圧密応力状態での軸方向有効応力 $\sigma'_{\text{ax}}$ と側方向有効応力 $\sigma'_{\text{rx}}$ の差を5等分して、 $\Delta q$ とする。
  - 供試体を排水状態にして、軸荷重を $\Delta q$ だけ増加する。
  - 軸ひずみの変化率が $0.1\%/\text{min}$ 以下になったことを確認する。
  - 最終圧密応力状態になるまで、上記ii)とiii)の操作を繰り返す。最終圧密応力状態での供試体の一次圧密の終了は、JGS T 541-1990「土の繰返し非排水三軸試験方法」の付帯条項4.2(2)示す方法で確認する。
- 4.3 (2) a. 飽和供試体では排水または非排水条件で、不飽和・空気乾燥供試体では排水あるいは排気条件で実施する。
- b. 最大繰返し軸荷重振幅あるいは軸変位振幅は、供試体の状態と試験の目的によって適宜決めて良い。
- c. 排水試験では、三軸伸張応力状態におけるピーク応力状態での軸方向有効応力が負にならない範囲で繰返し載荷を行う。
- 飽和供試体の非排水試験では、三軸伸張応力状態におけるピーク応力状態での軸方向全応力が負にならない範囲で繰返し載荷を行う。供試体に加えられる繰返し載荷振幅の範囲を大きくする目的で、背圧を大きくすることができる。
- d. 繰返し三軸試験の記録例を図-8に示す。

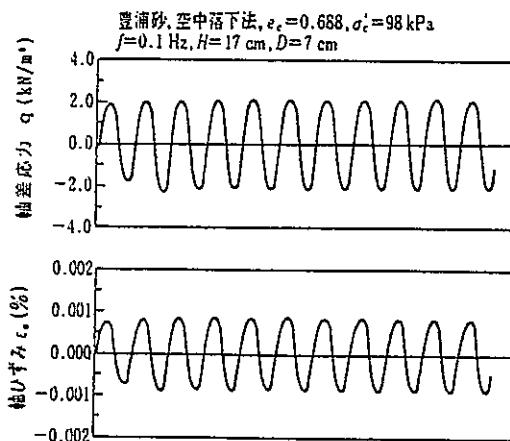


図-8 繰返し軸荷重の振幅が一定で、波形が正弦波である繰返し三軸試験の記録例

## 5. 試験結果の整理

### 5.1 供試体の初期状態

圧密前の供試体体積 $V_0$  ( $\text{cm}^3$ ) を次式で算定す

る。

$$V_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 H_0$$

ここに、

$D_0$ : 圧密前の供試体直径 ( $\text{cm}$ )

$H_0$ : 圧密前の供試体高さ ( $\text{cm}$ )

### 5.2 圧密過程

- (1) 圧密後の供試体体積 $V_e$  ( $\text{cm}^3$ ) を次式で算定する。

$$V_e = V_0 - \Delta V_e$$

ここに、

$\Delta V_e$ : 圧密による供試体の体積圧縮量 ( $\text{cm}^3$ )

(供試体が飽和している場合は排水量)

- (2) 圧密後の供試体高さ $H_e$  ( $\text{cm}$ ) を次式で算定する

$$H_e = H_0 - \Delta H_e$$

ここに、

$\Delta H_e$ : 圧密による軸変位量 ( $\text{cm}$ )

- (3) 圧密後の供試体断面積 $A_e$  ( $\text{cm}^2$ ) を次式で算定する。

$$A_e = \frac{V_e}{H_e}$$

- (4) 圧密後の供試体の乾燥密度 $\rho_d$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) を次式で算定する。

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_e}$$

ここに、

$m_d$ : 供試体の炉乾燥質量 (g)

### 5.3 繰返し載荷過程

- (1) 一定振幅の繰返し軸荷重あるいは軸変位で行った各載荷段階の開始時の供試体の体積、高さ、断面積を算定する。

- ① 各載荷段階開始時の供試体体積 $V_i$  ( $\text{cm}^3$ ) を次式で算定する。

$$V_i = V_e - \Delta V_L$$

ここに、

$\Delta V_L$ : 圧密終了時から各載荷段階開始時までの供試体の体積収縮量 ( $\text{cm}^3$ )

(供試体が飽和している場合は排水量)

- ② 各載荷段階開始時の供試体高さ $H_i$  ( $\text{cm}$ ) を次式で算定する。

$$H_i = H_0 - \Delta H_L$$

ここに、

$\Delta H_L$ : 圧密終了時から各載荷段階開始時までの軸変位量 ( $\text{cm}$ )

- ③ 各載荷段階開始時の供試体断面積 $A_i$  ( $\text{cm}^2$ ) を次式で算定する。

$$A_i = \frac{V_i}{H_i}$$

- (2) 一定振幅の繰返し軸荷重あるいは軸変位で行った各繰返し載荷段階での載荷回数5回目と10回目の繰返しサイクルでの軸差応力の片振幅、軸ひずみの片振幅、等価ヤング率、履歴減衰率を算定する。

- ① 繰返し軸差応力の片振幅 $\sigma_d$  ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) ( $\text{kgt}/\text{cm}^2$ ) を次式で算定する。

$$\sigma_d = \frac{P_c + P_e}{2A_i} \times 10 (\text{kN}/\text{m}^2)$$

$$\left\{ \sigma_d = \frac{P_c + P_e}{2A_i} \right\} (\text{kgt}/\text{cm}^2)$$

ここに、

$P_c, P_e$ : その繰返しサイクルでの圧縮側および伸張側の繰返し軸荷重片振幅 ( $\text{N}$ ) ( $\text{kgt}$ ) (いずれも正の値)

$A_i$ : その繰返し載荷段階開始時の供試体断面積 ( $\text{cm}^2$ )

- ② 軸ひずみの片振幅 $(\varepsilon_a)_{SA}$  (%) を次式で算定する。

$$(\varepsilon_a)_{SA} = \frac{\Delta L}{2H_i} \times 100$$

ここに、

$\Delta L$ : その繰返しサイクルでの供試体の軸変位 $\Delta H$ の両振幅 ( $\text{cm}$ )

$H_i$ : その繰返し載荷段階開始時の供試体高さ ( $\text{cm}$ )

- ③ 等価ヤング率 $E_{eq}$  ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) ( $\text{kgt}/\text{cm}^2$ ) を次式で算定する。

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{(\varepsilon_a)_{SA}} \times 100$$

- ④ 履歴減衰率 $h$  (%) を次式で算定する。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100$$

ここに、

$\Delta W$ : その繰返し載荷サイクルでの減衰エネルギーで、軸差荷重 $P$ と供試体の軸変位 $\Delta H$ が作る履歴曲線の面積 ( $\text{N}\cdot\text{cm}$ ) ( $\text{kgt}\cdot\text{cm}$ )

$W$ : その繰返し載荷サイクルでの等価弾性エネルギーで、次式で算定する。

$$W = \frac{(P_c + P_e) \Delta L}{4} (\text{N}\cdot\text{cm}) (\text{kgt}\cdot\text{cm})$$

### 【付帯条項】

- 5.3 凍結した供試体をセル圧のもとで解凍した場合は、解凍による高さ変化 $\Delta H_f$ と体積変化 $\Delta V_f$ を、それぞれ $\Delta H_c, \Delta V_c$ に含める。

- (1) a. 供試体が飽和していない場合、等方圧密による供試体の体積変化 $\Delta V_c$  ( $\text{cm}^3$ ) を次式で算定する。

$$\Delta V_c = \frac{3\Delta H_c}{H_0} V_0$$

ここに、

$\Delta H_c$ : 圧密による軸変位量 ( $\text{cm}$ )

$V_0$ : 圧密前の供試体体積 ( $\text{cm}^3$ )

$H_0$ : 圧密前の供試体高さ ( $\text{cm}$ )

- b. 供試体が飽和していない場合、異方圧密による供試体の体積変化は、適切な方法で算定する。

- (4) 必要に応じて、各載荷段階開始時の間隙比 $e_i$ を次式で算定する。

$$e_i = \frac{V_i \rho_s}{m_s} - 1$$

ここに、

$m_s$ : 供試体の炉乾燥質量 ( $\text{g}$ )

$\rho_s$ : 土粒子の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

ただし、最初の繰返し載荷段階開始時の間隙比 $e_i$ は圧密後の間隙比 $e_c$ と等しい。

- 5.3 供試体の軸ひずみが1%以下の場合は、 $\sigma_d$ のゴムスリーブに作用している力に対する補正是、通常は必要がない。

- (1) ①a. 供試体が飽和していない場合で供試体を等方圧密した場合は、繰返し載荷による供試体の体積変化 $\Delta V_L$ を次式で算定する。

$$\Delta V_L = \frac{3\Delta H_L}{H_c} V_c$$

ここに、

$\Delta H_L$ : 圧密終了時から各載荷段階開始時までの軸変位量 ( $\text{cm}$ )

$V_c, H_c$ : 圧密終了時の供試体の体積 ( $\text{cm}^3$ ) と高さ ( $\text{cm}$ )

- b. 供試体が飽和していない場合で供試体を異方圧密した場合、繰返し載荷による供試体の体積変化 $\Delta V_L$ は、適切な方法で算定する。

- (2) a. 繰返し軸荷重振幅が一定の試験において、連続する2回の繰返しサイクルの間での供試体の軸変位量 $\Delta H$ が図-9のようにずれて、ずれ量 $\alpha$ が軸変位両振

幅 $\Delta L$ の2%以上の場合には、次の方法で $\Delta L$ を補正する。

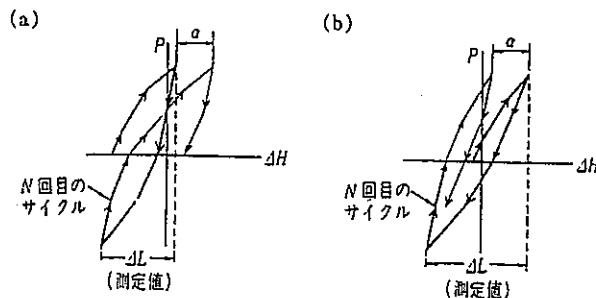


図-9 連続する2回の繰返しサイクルにおける軸変位のずれ量 $\alpha$ の説明

(i) 連続する繰返しサイクルにより供試体が圧縮していく場合(図-9(a))

$$\begin{aligned} \text{「N回目の繰返しサイクルでの補正された}\Delta L\text{」} \\ = \text{「N回目の繰返しサイクルで測定された}\Delta L\text{」} \\ + \alpha/2 \end{aligned}$$

(ii) 連続する繰返しサイクルにより供試体が伸張していく場合(図-9(b))

$$\begin{aligned} \text{「N回目の繰返しサイクルでの補正された}\Delta L\text{」} \\ = \text{「N回目の繰返しサイクルで測定された}\Delta L\text{」} \\ - \alpha/2 \end{aligned}$$

b. 繰返し軸変位振幅が一定の試験において、連続する2回の繰返しサイクルの間での供試体の繰返し軸荷重 $P$ が図-10のようすれて、ずれ量 $\beta$ が軸荷重両振幅 $\Delta P$ の2%以上の場合は、次の方法で $\Delta P$ を補正する。

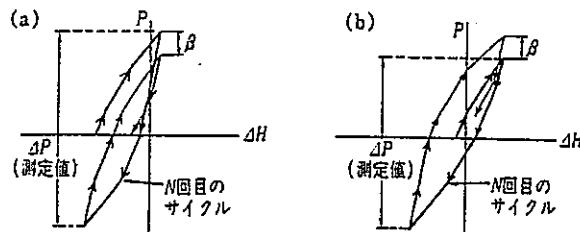


図-10 連続する2回の繰返しサイクルにおける軸荷重のずれ量 $\beta$ の説明

(i) 連続する繰返しサイクルにより供試体軸荷重が増加する場合(図-10(a))

$$\begin{aligned} \text{「N回目の繰返しサイクルでの補正された}\Delta P\text{」} \\ = \text{「N回目の繰返しサイクルで測定された}\Delta P\text{」} \end{aligned}$$

$$- \beta/2$$

(ii) 連続する繰返しサイクルにより供試体軸荷重が減少する場合(図-10(b))

$$\begin{aligned} \text{「N回目の繰返しサイクルでの補正された}\Delta P\text{」} \\ = \text{「N回目の繰返しサイクルで測定された}\Delta P\text{」} \\ + \beta/2 \end{aligned}$$

c. 試験の目的に応じて、載荷回数5回目と10回目以外での等価ヤング率および履歴減衰率を算定する。

② a. 供試体のキャップの軸変位を複数の非接触変位計で測定した場合は、その平均値から $\Delta L$ の値を求める。

b. 供試体の直径の対角線位置で、ゴムスリーブ上の供試体軸に平行な線上の2点間の軸圧縮量 $\Delta L_{local1}$ および $\Delta L_{local2}$ を測定した場合(図-5)は、供試体の軸変位 $\Delta H$ の両振幅 $\Delta L$ (cm)は、次式で算定する。

$$\Delta L = (((\Delta L_{local1})/L_{1i} \\ + (\Delta L_{local2})/L_{2i})/2) \times H_i$$

ここに、

$L_{1i}, L_{2i}$ : それぞれ、供試体対角位置の供試体側面での2点間のその繰返し載荷段階開始時の平均的距離

③ 図-11は、履歴曲線をその繰返し載荷開始時の供試体の高さと体積を用いて求めた軸差応力と軸ひずみから描いた履歴曲線の例であり、等価ヤング率 $E_{eq}$ ( $kN/m^2$ )( $kgf/cm^2$ )の説明図である。

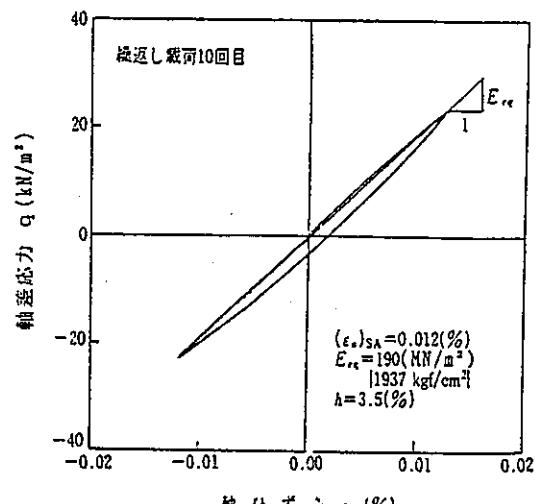


図-11 典型的な履歴曲線の例

④ a. 図-12は、履歴減衰率 $h = (1/2\pi) \cdot \Delta W/W$ の説明図である。

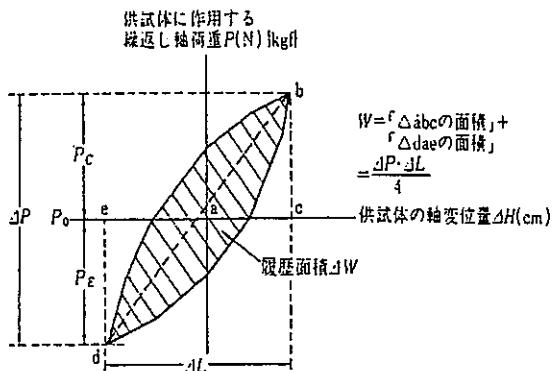


図-12 履歴減衰率 $h$ の説明図  
( $P_c$ と $P_e$ が等しい場合の図)

b. 図-13に例示するように、履歴曲線が閉じない場合は、圧縮側の履歴曲線 $g\ b\ h$ の面積と伸張側の履歴曲線 $h\ d\ f$ の面積の和を $\Delta W$ とする。また、 $W$ の値は、次の方法で求める。

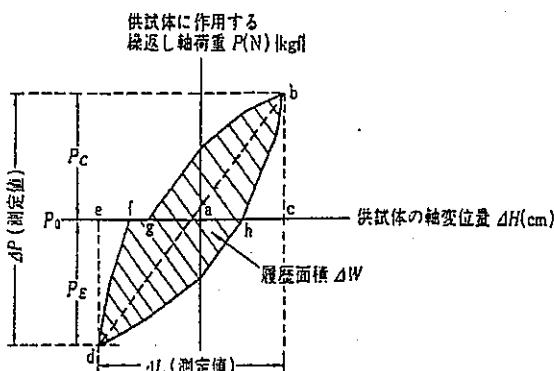


図-13 履歴曲線が閉じない場合の履歴減衰率 $h$ の説明図  
( $P_c$ と $P_e$ が等しい場合の図)

(i) 繰返し軸荷重振幅が一定の試験の場合

$$W = \frac{1}{4} \Delta P \cdot \Delta L$$

ここに、 $\Delta P$ は測定値であり、 $\Delta L$ は付帯条項 5.3 (2) a. (i), (ii) に示す方法で補正された値

(ii) 繰返し軸変位振幅が一定の試験の場合

$$W = \frac{1}{4} \Delta P \cdot \Delta L$$

ここに、 $\Delta L$ は測定値であり、 $\Delta P$ は付帯条項 5.3 (2) b. (i), (ii) に示す方法で補正された値

## 6. 報告事項

試験結果について次の事項を報告する。

(1) 供試体の作製方法

- (2) 試験前の供試体寸法
- (3) 飽和供試体で非排水繰返し載荷試験を行った場合は、背圧の大きさ、B値およびその測定方法
- (4) 圧密による排水量および軸変位量
- (5) 供試体の炉乾燥質量および圧密後の乾燥密度
- (6) 供試体の粒度分布
- (7) 圧密軸方向応力と側方向応力
- (8) 載荷周波数および載荷波形、繰返し載荷中の排水条件
- (9) 繰返し載荷中の軸荷重と軸変位量の測定方法
- (10) 第2回～最終繰返し載荷のそれぞれの開始時の供試体寸法
- (11) それぞれの繰返し載荷段階での軸荷重と軸変位の時刻歴と5, 10回目の繰返しサイクルにおける軸荷重と軸変位の履歴曲線
- (12) それぞれの繰返し載荷段階での5, 10回目の繰返しサイクルにおける等価ヤング率 $E_{eq}$  ( $kN/m^2$ ) ( $kgf/cm^2$ )、履歴減衰率 $h$  (%) とそれに対応する片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{SA}$  (%)
- (13) 5, 10回目の繰返しサイクルにおける等価ヤング率 $E_{eq}$  ( $kN/m^2$ ) ( $kgf/cm^2$ ) および履歴減衰率 $h$  (%) と片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{SA}$  (%) の対数との関係
- (14) 基準と部分的に異なる方法を用いた場合はその内容
- (15) その他特記すべき事項

## 【付帯条項】

- (5) 必要に応じて、圧密後の間隙比を報告する。
- (6) 軟岩、セメント改良土など通常の方法で粒度分布を求めるのが困難な場合は、粒度分布を求めなくてよい。
- (9) 三軸圧力室内における荷重計と変位計の位置を報告する。供試体側面で軸変位量を測定した場合は、その方法を報告する。
- (11) 軸応力と軸ひずみの時刻歴と履歴曲線を報告してもよい。繰返し載荷10回目を代表値とし、5回目を参考値とすることができます。
- (12) 必要に応じて、2～10回目の繰返しサイクル全てにおける等価ヤング率 $E_{eq}$ 、履歴減衰率 $h$ とそれに対応する片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{SA}$ の値を報告する。
- (13) 一連の実験結果をまとめた標準的な例を図-14に示す。
- (15) a. 試験装置の概要、供試体の飽和方法、荷重計と

変位計の履歴特性、軸荷重と軸変位の記録の同時性、ゴムスリーブの材質と厚さについて報告する。

b. 供試体の互層状態、ネッキングなどの変形状況などを報告する。

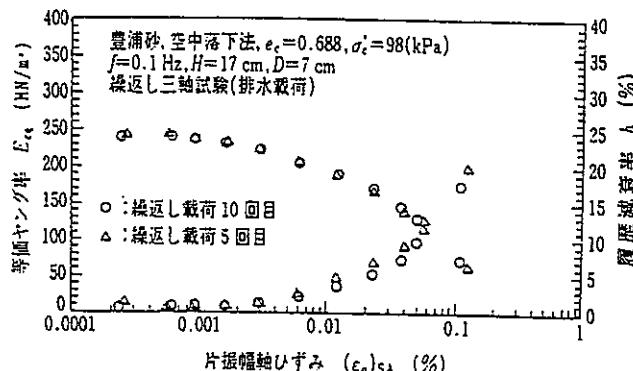
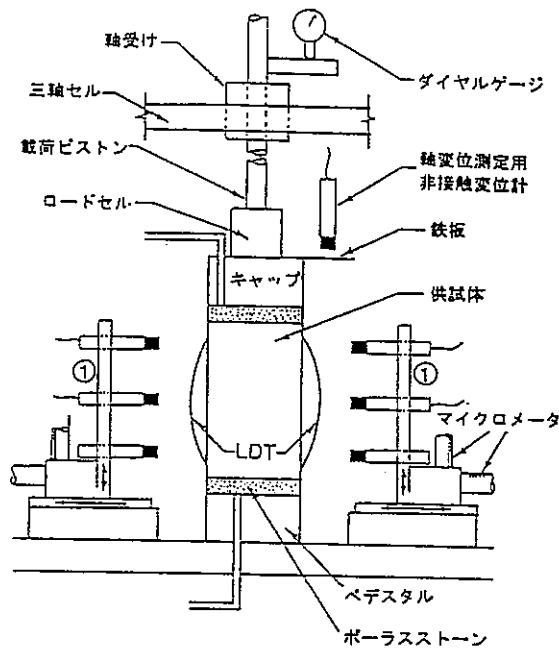


図-14 一連の実験結果をまとめた例



① 側方ひずみの測定方法の例<sup>5)</sup>

### 3 基準の解説

#### 3.1 総則

本試験法の目的、基準の位置づけ等は「1 まえがき」で述べた。

繰返し三軸試験中に測定される軸差応力と軸ひずみから直接求められるのは、軸ひずみ振幅 ( $\varepsilon_0$ )<sub>DA</sub>、等価ヤング率  $E_{0A}$ 、履歴減衰率  $r_0$  である。

i) 飽和試料の非排水試験では、体積ひずみ  $\varepsilon_v = 0.0$  ので、軸ひずみ  $\varepsilon_a$  からせん断ひずみ  $\gamma$  が、

$$\gamma = \varepsilon_a - \varepsilon_v = \varepsilon_a - (\varepsilon_v - \varepsilon_0)/2 = (3/2) \cdot \varepsilon_0 \quad (1)$$

から求まる。したがって、等価ヤング率  $E_{0A}$  からせん断剛性率  $G_{0A}$  が、

$$G_{0A} = E_{0A}/3 \quad (2)$$

から求まる。

ii) 排水試験でも、体積ひずみ  $\varepsilon_v$  あるいは側方ひずみ  $\varepsilon_s$  が測定できれば (1) 式からせん断ひずみ  $\gamma$  が求まる。しかし、小ひずみレベルでは、軸ひずみと同程度の精度で体積ひずみを測定することは非常に困難である。したがって、排水繰返し載荷中に体積ひずみを測定する方法を基準化しなかった。

一方、側方ひずみを直接精度良く測定できれば、排水繰返し三軸試験でも精度良くせん断ひずみを求めることができる。図-1に示す繰返し三軸試験の例<sup>5)</sup>では、供試体の直径変化を直径対角位置の供試体表面で水平変位を測定することにより求めている。また、クリップゲイジを用いる方法もある。しかし、これらの方法はまだ普及していない。したがって、本基準では側方ひずみの直接

測定に触れないことにした。

以上のことから、排水・非排水試験に共通して、等価ヤング率とそれに対応する履歴減衰率を求める方法だけを基準化した。

#### 3.2 試験用具

##### (1) 繰返し三軸試験装置

i) 繰返し載荷装置 一般に、繰返し載荷試験での載荷制御方法として次の2種類の方法がある。

① 変位制御：一定のセル圧のもとで軸変位を強制的に変化させる方法で、通常、軸変位の時間変化率を一定にして軸変位振幅が一定になるように制御する。この方法を用いる場合には、微小ひずみ領域での繰返し載荷時に、載荷の反転に対してギア等の遊び (backlash) がなく正確な変位制御・繰返し載荷ができるなければならない。さらに、軸ひずみ速度が速い場合にも対応できる必要がある。載荷システム構成例の一つに載荷装置として高分解能のデジタルサーボモーターを用いる方法などが報告されている<sup>5)</sup>。

② 荷重制御：一定のセル圧のもとで軸荷重を強制的に変化させる方法で、通常、軸荷重の時間変化率を一定にして軸荷重振幅が一定になるように制御する。繰返し排水三軸試験装置を準備すれば容易に実施可能である。この場合、ファンクションジェネレータあるいはD/Aボードを用いて電-空変換器に所定の信号を送ることによってペロラムシリンダに圧力を供給する載荷システ