

本資料は2001年10月04日付けて
登録区分変更する。 [東海事業所技術情報室]

地層処分システムにおけるシーリング研究（Ⅲ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

概 要

1994年2月

鹿島建設株式会社

この資料は、動燃
従って、その取扱い
は事業団の承認が必
要です。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒319-11

茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術管理室

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

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

電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

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

るものです。
載、引用等に
注意してくだ

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

1994年2月



地層処分システムにおけるシーリング研究（III）

青木 謙治　　日比谷 啓介　　塩釜 幸弘　　戸井田 克　　山本 拓治
 吉田 宏　　坂野 且典
 久保田 翼　　清水 保明　　奥津 一夫　　酒井 学　　塩崎 信久
 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、処分のために掘削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、グラウト材等により閉鎖し（以下「シーリング」と呼ぶ）、廃棄体の隔離性能を長期にわたって確保する必要がある。本年度の研究成果を以下に示す。

- 1) ベントナイトを主材とし、最大粒径4mm程度のケイ砂を混合した材料の基礎的な物性（締固め特性、一軸圧縮強度、透水特性）を、その混合比を変化させて取得し、既存の知見と共に、ベントナイト系混合材料の諸物性を検討した。
- 2) 基本的な地下水挙動を把握するために、処分場を掘削し、埋戻し材（ベントナイト、砂）で埋戻す場合の地下水位低下及び再冠水現象を広域及び処分坑道レベルのスケールで解析的に検討した。
- 3) 原位置におけるグラウト試験試験に関して、試験坑道のレイアウト、試験位置、試験項目、試験の具体的手順および試験工程の設計を行った。

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：050D0184

FEBRUARY, 1994



Investigation on Sealing in Geological Disposal

K.Aoki K.Hibiya Y.Shiogama K.Toida T.Yamamoto
 H.Yoshida K.Banno
 T.Kubota Y.Shimizu K.Okutsu M.Sakai N.Shozaki
 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 the 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) Comprehensive data of mixed geological material which is composed of bentonite clay and sand, whose maximum diameter is up to 4 mm, are collected to evaluate basic characteristics such as compaction , unconfined compressive strength and permeation. With some relevant knowledge, these characteristics under varying mixing rate of sand with bentonite clay are discussed.
- 2) Groundwater level lowering and recharge process during construction works in scale of a disposal site as well as a tunnel openings is simulated analytically, which serves to understand the basic groundwater behavior .
- 3) In-situ grouting experiments are planned. The items on in-situ experiments are determined, which are described as follows;
 - layout of adits for in-situ experiments,
 - location of grouting,
 - applicable grouting methods, and
 - period for the grouting experiments.

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

Contract No. 050D0184

目 次

	PAGE
1. 研究の目的及び範囲	
1.1 目的	1-1
1.2 研究の範囲	1-1
1.3 研究の内容	1-2
2. 材料の特性評価	
2.1 使用材料	2-1
2.2 締固め試験	2-2
2.2.1 試験方法	2-2
2.2.2 試験結果	2-3
2.3 一軸圧縮試験	2-8
2.3.1 試験方法	2-8
2.3.2 試験結果	2-9
2.4 透水試験	2-13
2.4.1 測定方法	2-13
2.4.2 測定結果	2-15
2.5 まとめ	2-21
参考文献	2-22
3. シーリング性能の評価手法の検討	3-1
3.1 目的	3-1
3.2 ファーフィールドの解析	3-1
3.2.1 解析条件	3-1
3.2.2 解析モデル	3-2
3.2.3 水理定数	3-3
3.2.4 掘削・埋戻し工程	3-5
3.2.5 解析ケース	3-5
3.2.6 解析手法	3-5
3.2.7 解析結果	3-6
3.3 処分場内部の解析	3-15
3.3.1 解析条件	3-15
3.3.2 解析モデル	3-15

3.3.3 水理定数	-----	3-16
3.3.4 解析ケース	-----	3-16
3.3.5 解析手法	-----	3-16
3.3.6 解析結果	-----	3-17
3.4 まとめ及び今後の課題	-----	3-18
3.4.1 まとめ	-----	3-18
3.4.2 今後の課題	-----	3-18
参考文献	-----	3-20
4. 原位置試験設計		
4.1 原位置試験設計のための条件整理	-----	4-1
4.2 原位置試験の概念	-----	4-1
4.3 原位置試験設計	-----	4-1

図一覧

- 図2.1 使用材料の粒径分布
- 図2.2 ミキサー
- 図2.3 締固め試験装置
- 図2.4(1) 締固め曲線（ベントナイト100%）
- 図2.4(2) 締固め曲線（ベントナイト80%+ケイ砂20%）
- 図2.4(3) 締固め曲線（ベントナイト60%+ケイ砂40%）
- 図2.4(4) 締固め曲線（ベントナイト40%+ケイ砂60%）
- 図2.4(5) 締固め曲線（ベントナイト20%+ケイ砂80%）
- 図2.5 各ケイ砂混合率における3層×100回の締固め曲線
- 図2.6 各ケイ砂混合率における最大乾燥密度と最適含水比
- 図2.7 一軸圧縮試験供試体の切り出し
- 図2.8 一軸圧縮試験装置と供試体
- 図2.9 ベントナイト100%供試体の一軸圧縮強度（密度依存性）
- 図2.10 締固めエネルギー：各層100回での供試体一軸圧縮強度
- 図2.11 締固めた土の乾燥密度および一軸圧縮強度と含水比との関係
- 図2.12 締固め曲線と一軸圧縮強度（ベントナイト100%）
- 図2.13 膨潤圧、透水係数測定セル
- 図2.14 恒温室
- 図2.15 膨潤圧の時間変化
- 図2.16 各ケイ砂混合率における膨潤圧
- 図2.17 試料を透過した水の累積量
- 図2.18 各ケイ砂混合率における試料の透水係数
- 図-3.1 解析モデル
- 図-3.2 要素分割図
- 図-3.3 岩盤の不飽和浸透特性
- 図-3.4 立坑・埋戻し材の不飽和浸透特性
- 図-3.5 処分場・埋戻し材の不飽和浸透特性
- 図-3.6 圧力水頭センター図（10年後・立坑掘削終了時）
- 図-3.7 圧力水頭センター図（30年後・処分場掘削終了時）
- 図-3.8 圧力水頭センター図（50年後・処分場埋戻し終了時）
- 図-3.9 圧力水頭センター図（60年後・立坑埋戻し終了時）
- 図-3.10 流速ベクトル図（10年後・立坑掘削終了時）

- 図-3.11 流速ベクトル図（30年後・処分場掘削終了時）
- 図-3.12 流速ベクトル図（50年後・処分場埋戻し終了時）
- 図-3.13 流速ベクトル図（60年後・立坑埋戻し終了時）
- 図-3.14 解析領域
- 図-3.15 処分場の解析モデル
- 図-4.1 周辺地形図
- 図-4.2 坑道配置図
- 図-4.3 処分坑道縦置方式の概要
- 写真-4.1 250mレベル坑道にの壁面状況

表一覧

- 表2.1 各ケイ砂混合率における最大乾燥密度、最適含水比及びその時の飽和度
- 表2.2 一軸圧縮試験の結果
- 表2.3 透水試験試料
- 表2.4 膨潤圧及び透水試験データのまとめ
- 表-3.1 透水係数及び空隙率
- 表-3.2 堀削・埋戻し工程
- 表-3.3 解析ケース
- 表-3.4 解析結果
- 表-4.1 試験項目と要評価項目
- 表-4.2 試験場が具備すべき条件
- 表-4.3-(1) 評価項目に対する試験方法の評価
- 表-4.3-(2) 評価項目に対する試験方法の評価
- 表-4.4 処分孔縦置試験工程（堀削影響試験）
- 表-4.5 グラウト試験工程

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、処分のために掘削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、グラウト材等により閉鎖し(以下「シーリング」と呼ぶ)、廃棄体の隔離性能を長期にわたって確保する必要がある。

シーリング研究開発としては、候補材料の基本特性に関する試験や、シーリングに係わる現象シナリオについての検討を行ってきた。今後は前年度までの成果を踏まえ、我が国の地質環境条件に適応しうるシーリングシステムの確立に資するため、材料特性の詳細な評価検討を行うとともに、シーリングシステムに関する工学規模の室内試験及び、原位置試験を実施してシーリング性能に係わる現象をモデル化し長期挙動を予測する解析評価手法の開発及び、設計・施工技術の開発を実施する必要がある。

本年度は、粘土系材料に岩盤掘削ずり等を混入した複合材料の特性評価を実施するとともに、シーリング性能の評価手法の検討を継続する。また、今後必要なシーリングに関する原位置試験の設計検討を行う。

1.2 研究の範囲

- (1) 材料の特性評価
- (2) シーリング性能の評価手法の検討
- (3) 原位置試験設計
- (4) 報告書の作成

1.3 研究の内容

(1) 材料の特性評価

昨年度までに、シーリング材料の基本となる粘土系材料(ベントナイト、クニゲルV1)の物性試験を実施し、データの蓄積及び構成式やモデル化の検討を行ってきた。本年度はこれらの成果を受け、埋め戻し部分などのシーリング材料として考えられるベントナイト(クニゲルV1)とケイ砂の混合材料について以下の試験を行い、シーリング材料の適否等について評価を実施する。また、混合する材料が異なる場合、各物性の影響について知見をまとめることとする。なお、使用するケイ砂は、市販のもので、最大粒径が数mm程度のものを用いる。

(2) シーリング性能の評価手法の検討

昨年度までに、シーリング概念の構築のための研究課題を抽出・整理するとともに想定される各種のシナリオに関する検討及び予備的な影響評価を行ってきた。

処分場の性能評価上、基本シナリオとなる地下水挙動を把握することは、処分システムの構築上重要な課題の1つである。昨年度は対象岩盤を結晶質岩系岩盤としたが、本年度は対象岩盤を堆積岩系岩盤とし、昨年度と本年度の浸透流解析の結果を比較検討するとともに、処分場を掘削し埋戻材(ベントナイト、砂)で埋戻した場合、処分場内の浸透流が時間的にどの様に変化するかを詳細に検討する。

(3) 原位置試験設計

グラウトは空洞掘削時の湧水対策や人工バリア、立坑等の周辺岩盤の透水性を低く抑えるために用いられる重要なシーリング材の一種であり、室内試験や原位置試験を行って、十分にその機能評価を行わなければならぬ。

本年度は、グラウトをシーリング材として適用するに当つての課題の整理及び人工バリア周辺岩盤を対象とした原位置におけるグラウト試験の設計・検討を行う。

2. 材料の特性評価

2.1 使用材料

試験で用いる材料は粘土系材料としてクニケルV1（クニミネ工業）、碎石材として市販のケイ砂を用いた。それぞれの粒径分布を図2.1に示す。碎石材の最大粒径は約4mmである。また、試験に用いる前に両材料は図2.2に示すミキサーで1時間程度よく攪拌混合される。このとき同時に、水分の調整を霧吹き等を用いて行う。

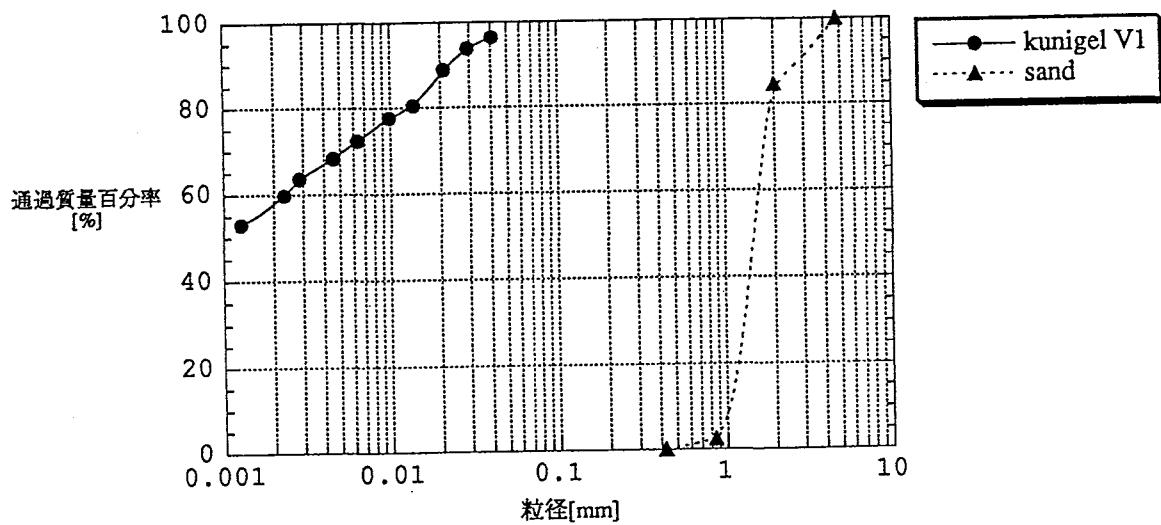


図2.1 使用材料の粒径分布

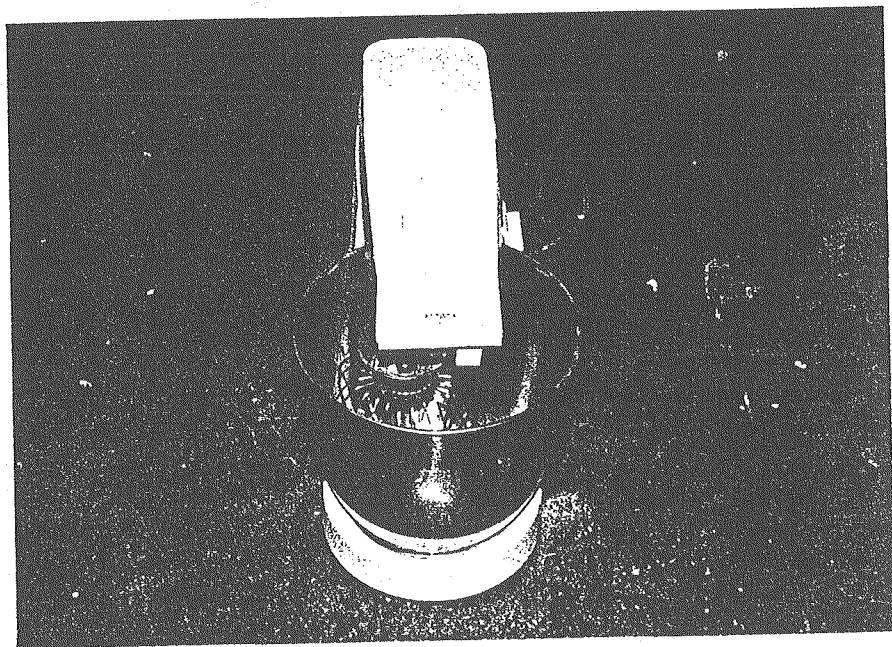


図2.2 ミキサー

2.2 締固め試験

ベントナイトを粘土系材料とする混合材料の乾燥密度-含水比曲線、最大乾燥密度及び最適含水比を求め、締固め後に所定の乾燥密度を達成するために必要な条件を検討する。

2.2.1 試験方法

試験はJIS A1210「突固めによる土の締固め試験方法」[1]に則て行う。

突固めに用いるモールドの内径は10cm、また、ランマーの重量は2.5kgで、これを30cmの高さから落下させる（図2.3に締固め試験装置の写真を示す）。試料の含水比は、自然含水比（7～10%）から加水によって調整し、最適含水条件の前後にデータがとれるように全部で5条件とする。突固めは、ベントナイト100%および80%については、3層に分けて、25回、50回、100回、すなわち、仕事量に換算して、5.6、11.3、22.5 $\text{cm} \cdot \text{kgt/cm}^3$ で行った。また、ベントナイト60、40、20%のケースについては重締固め（仕事量：25.3 $\text{cm} \cdot \text{kgt/cm}^3$ ）に近い3層それぞれ100回の締固めを行った。なお、締固めた材料は切り出し加工して2.3節の一軸圧縮試験に用いることとする。

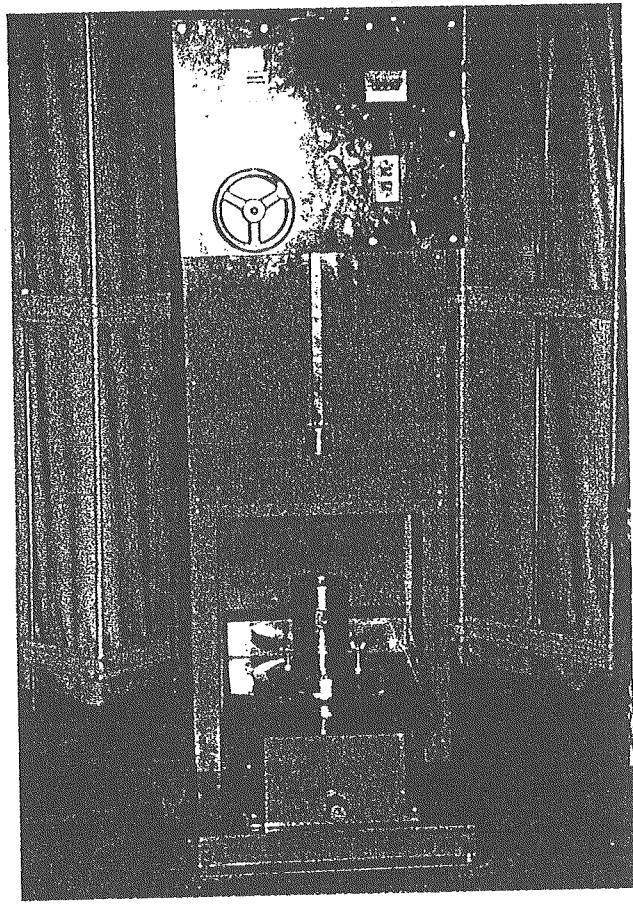


図2.3 締固め試験装置

2.2.2 試験結果

ケイ砂の混合率を変化させたときの締固め曲線をそれぞれ図2.4(1)～(5)に示す。

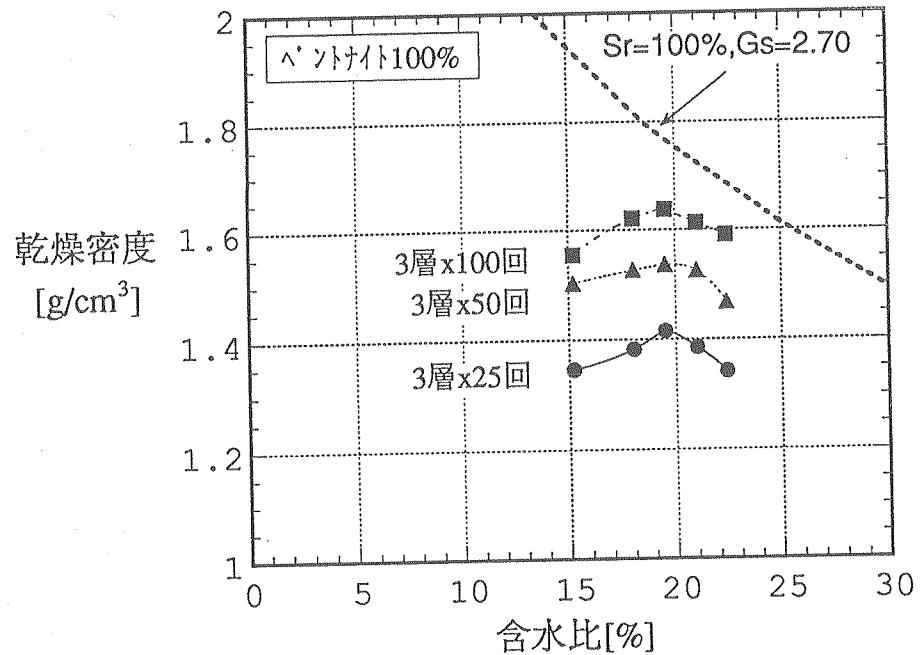


図2.4(1) 締固め曲線（ペントナイト100%）

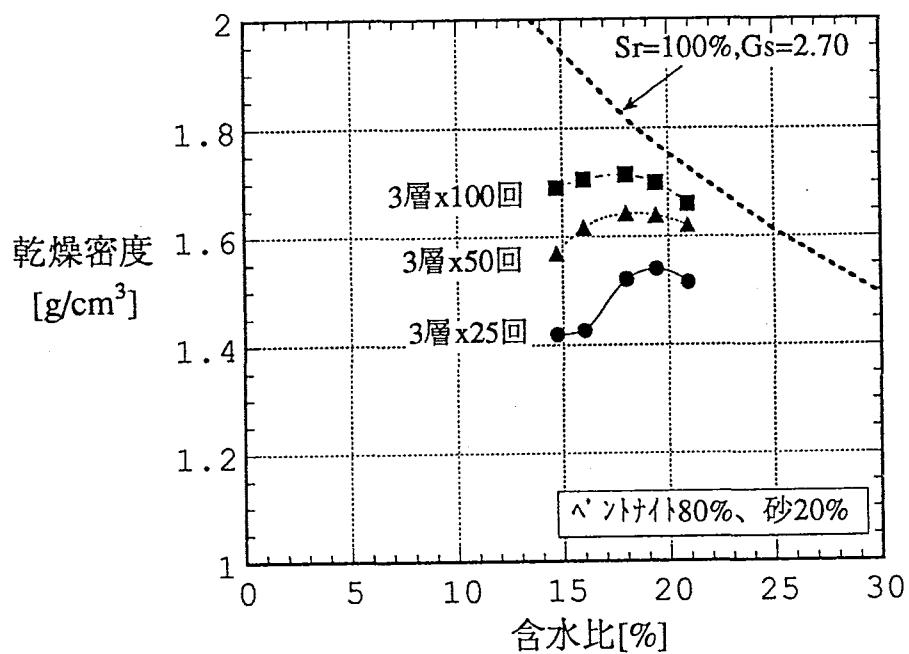


図2.4(2) 締固め曲線 (ペントナイト80%+ケイ砂20%)

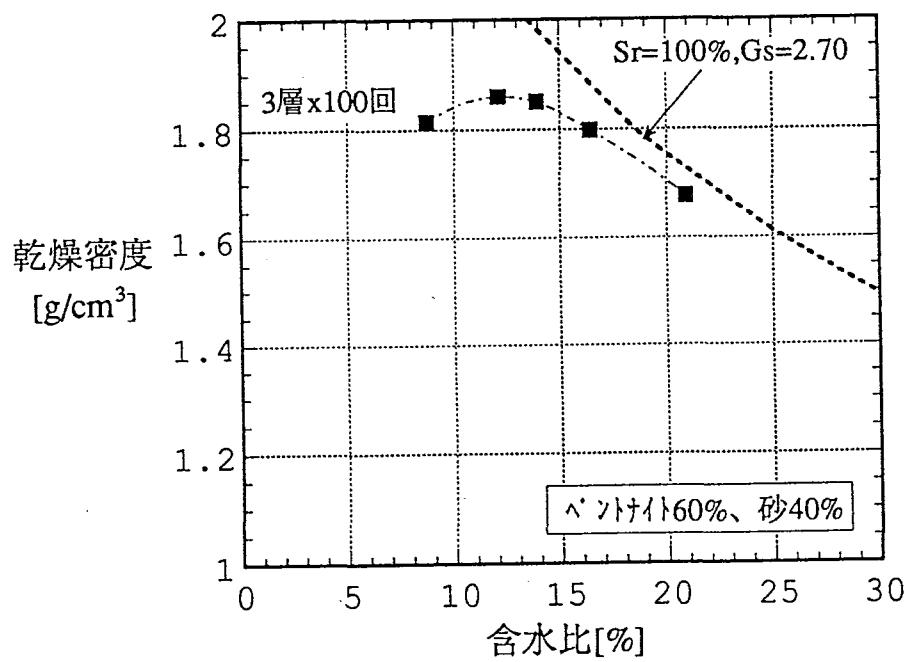


図2.4(3) 締固め曲線 (ペントナイト60%+ケイ砂40%)

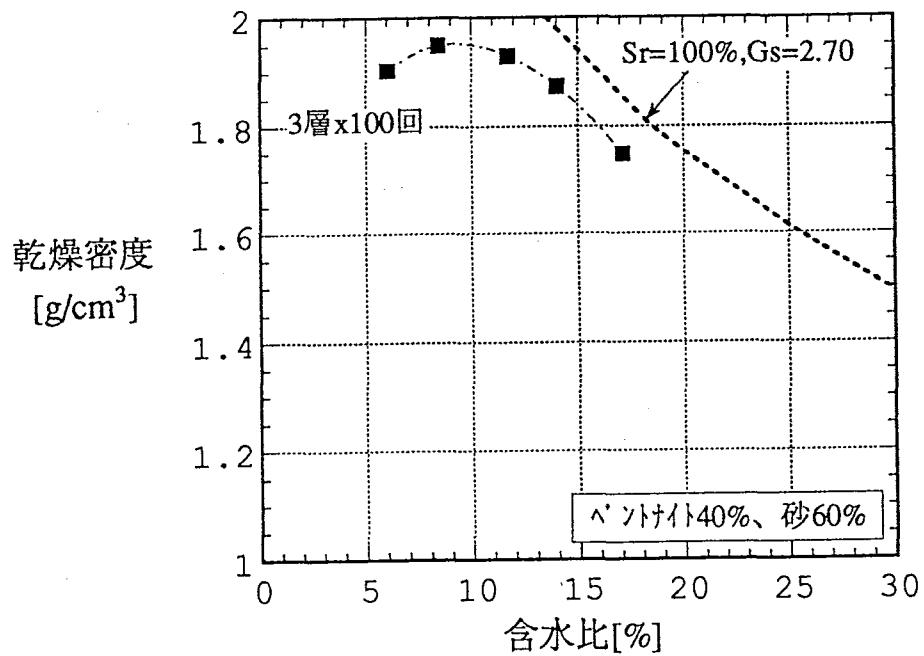


図2.4(4) 締固め曲線（ペントナイト40%+ケイ砂60%）

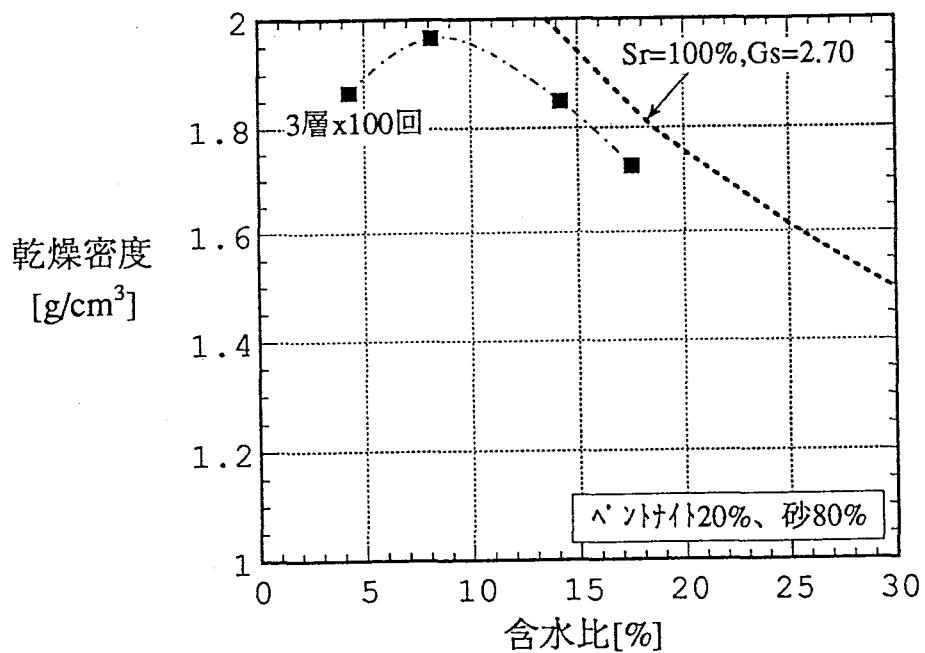


図2.4(5) 締固め曲線（ペントナイト20%-ケイ砂80%）

高レベル放射性廃棄物処分において埋戻し部分では、ベントナイトを粘土系材料とし、現地で発生する岩ずりなどを適切に加工したものを混合して、振動ローラー等により締固めを行うことが考えられる。実際には、埋戻し部分に対する要求される密度や含水状態は決まっていないが、より高い安定性を期待して充分な締固めを行うことが望ましい。充分な締固めを各混合率に対して行った結果として、図2.5に各層に対して100回の締固めを行って得られた締固め曲線をまとめる。また、それぞれのケイ砂混合率に対応する最大乾燥密度および最適含水比を図2.6に示す。図2.6に必要なパラメータを表2.1にまとめる。

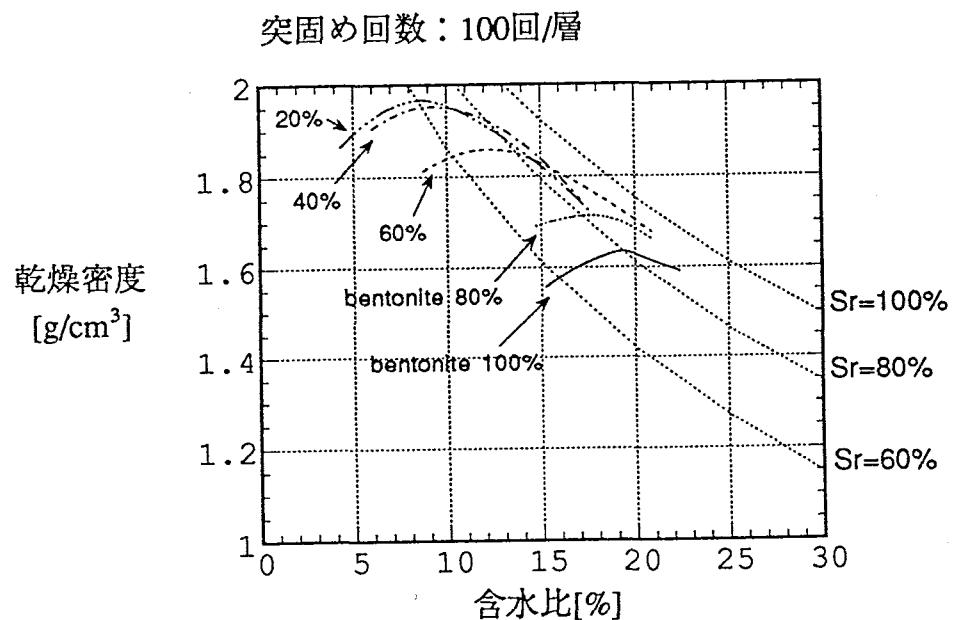


図2.5 各ケイ砂混合率における3層×100回の締固め曲線

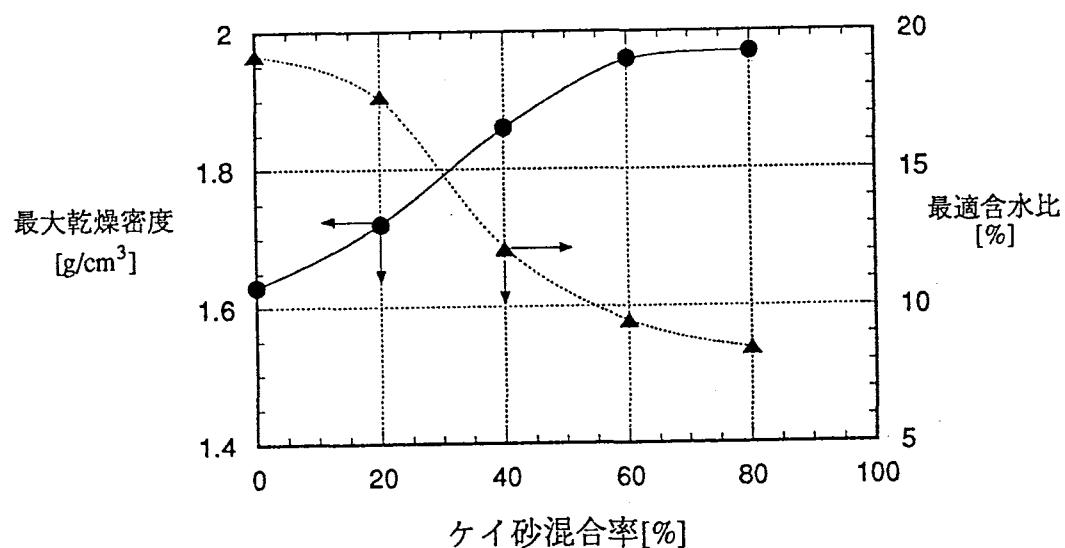


図2.6 各ケイ砂混合率における最大乾燥密度と最適含水比

ケイ砂混合比 %	締固め仕事量 cm · kgf/cm ³	最大乾燥密度 g/cm ³	最適含水比 %	飽和度 %
0	5.6	1.42	19.6	58.8
0	11.3	1.54	19.9	71.3
0	22.5	1.63	19.2	78.8
20	5.6	1.54	19.3	69.3
20	11.3	1.64	18.4	76.8
20	22.5	1.72	17.7	83.6
40	22.5	1.86	12.1	72.3
60	22.5	1.96	9.5	67.6
80	22.5	1.97	8.5	61.6

表2.1 各ケイ砂混合率における最大乾燥密度、最適含水比及びそのときの飽和度

一般に、埋戻し工事ではJIS締固め試験の最大乾燥密度の90~95%以上に締固めれば大きな沈下はなく、安定した埋戻しができるとされている。すなわち、各ケイ砂混合率におけるそれぞれの目標となる締固め後の乾燥密度は、95%を達成するとして、1.55（ペントナイト100%）、1.63（ペントナイト80%+ケイ砂20%）、1.77（ペントナイト60%+ケイ砂40%）、1.86（ペントナイト40%+ケイ砂60%）そして1.87（ペントナイト20%+ケイ砂80%）となる。また、その時に施工含水比はそれぞれの最適含水比あるいは、再冠水後の埋め戻し材の軟弱化や沈下を抑えるためにそれより若干大きい値で行なうことが望ましい。それぞれの混合率における最適含水比は、混合率が大きくなるにつれて小さくなり、ケイ砂が60%を越えると、ほぼペントナイト自身の自然含水比に近くなる。これは、現場において締固め材料の水分調整を行う作業を最小限にすることを意味するが、実際には、透水係数、膨潤特性及び埋戻し後の岩盤空洞との力学的挙動を考慮する必要があり、施工性だけでは決められない。今後は経済性を検討因子に含めて、より実際の施工条件（施工場所、施工材料など）に近い条件で検討が行われる必要がある。なお、今回の試験のケイ砂材料によって得られた結果は他のケイ砂材料にそのまま当てはまるものではなく、砂及びペントナイトの種類によっても異なることが報告されている[2]。

2.3 一軸圧縮試験

2.2の締固め試験で作成した試料の一軸圧縮強さを求める。

2.3.1 試験方法

試験は土質工学会基準「土の一軸圧縮試験方法」[1]に則って行う。

データのばらつきを考慮するために、締固め試験体1体から $3.5\text{cm} \times 8\text{cm}$ の供試体を3体切り出す（図2.7）。なお、土質工学会の基準によれば、供試体の直径は3.5cm、または5cmを標準とし、高さは直径の1.8~2.5倍とするとあり、今回準備した供試体はその範囲内にある。試験装置及び供試体の写真を図2.8に示す。試験は圧縮ひずみ速度毎分1%（0.8mm／分）、また、室温において行う。

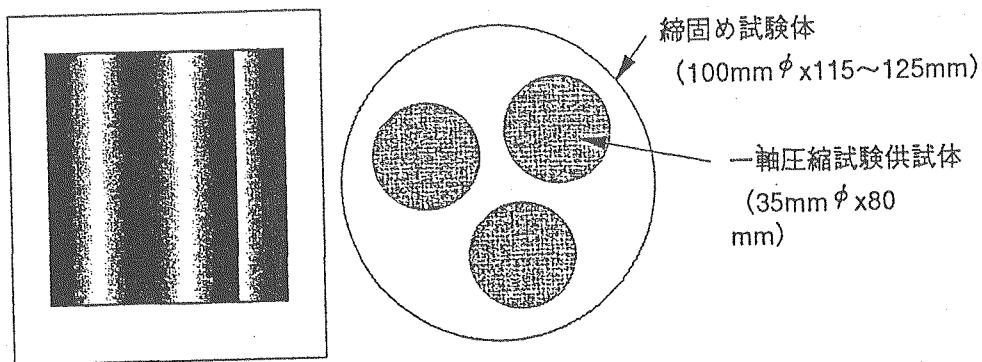


図2.7 一軸圧縮試験供試体の切り出し

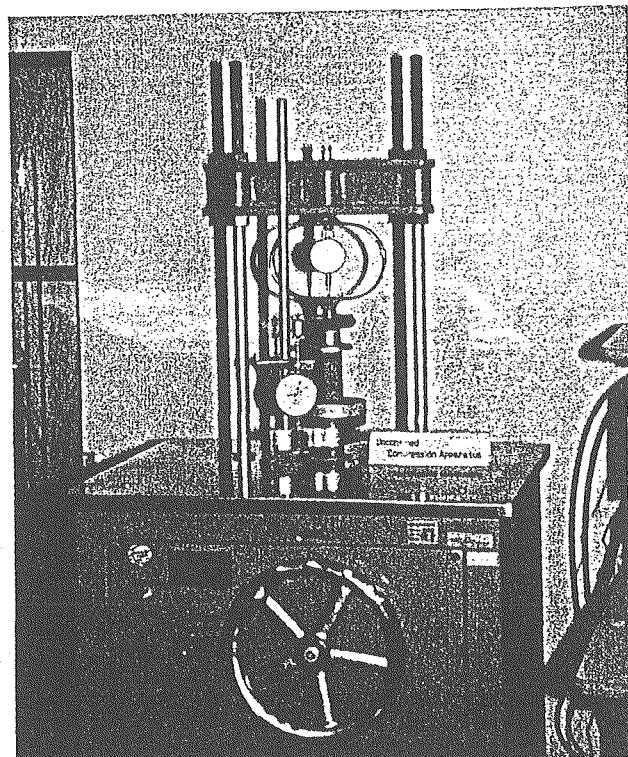


図2.8 一軸圧縮試験装置と供試体

2.3.2 試験結果

一軸圧縮強度 q_u 、破壊時のひずみ ϵ_f 及び変形係数 E_{50} を表2.2にまとめた。この表に示される試験番号は各締固め試験に対応しており、CPの次の数字は供試体内のケイ砂の混合率を示している。また、締固め試験で作成した試験体の密度は一様ではなく、ばらついているので、一軸圧縮試験用の供試体の密度は改めて測定し直した。なお、締固め試験では3層に分けて締固めを行ったため、その部分で亀裂が入りやすく、いくつかの供試体が測定できなかった。表2.2でデータが欠番しているのはこの理由による。

番号	含水比 %	締固め試料密度 g/cm ³	湿潤密度 g/cm ³	圧縮強度 MPa	圧縮時歪 %	E ₅₀ MPa
CP-0-1	15.2	1.55	①	1.61	0.48	1.8
			②	1.61	0.52	1.7
			③	1.67	0.65	54.2
CP-0-2	15.2	1.73	①	1.76	0.90	2.3
			②	1.81	0.80	1.7
			③	1.80	0.95	69.0
CP-0-4	18	1.63	①	1.69	0.56	3.4
			②	1.72	0.53	2.8
			③	1.70	0.52	32.5
CP-0-5	18	1.82	①	1.81	0.69	2.8
			②	1.84	0.75	2.6
			③	1.86	0.80	55.6
CP-0-6	18	1.91	①	1.96	1.10	4.5
			②	1.93	1.02	4.5
			③	1.95	1.11	73.3
CP-0-7	19.5	1.69	①	1.72	0.31	---
			②	1.76	0.30	---
			③	1.82	0.53	2.8
CP-0-8	19.5	1.84	①	1.90	0.62	3.4
			②	1.90	0.62	44.3
CP-0-9	19.5	1.96	①	1.99	0.82	4.1
			②	1.98	0.83	4.2
			③	2.00	0.85	45.7
CP-0-10	22.4	1.64	①	1.69	0.34	3.2
			②	1.71	0.40	32.3
CP-0-11	22.4	1.8	①	1.84	0.58	3.3
						46.0

表2.2(1) 一軸圧縮試験の結果（その1）

番号	含水比 %	締固め試料密度 g/cm ³		湿潤密度 g/cm ³	圧縮強度 MPa	圧縮時歪 %	E50 MPa
CP-20-3	14.7	1.97	①	1.84	0.69	1.2	90.8
			②	1.95	1.07	2.5	74.3
			③	1.90	0.89	1.9	54.3
CP-20-6	16.0	1.96	①	1.89	0.65	1.7	65.0
			②	1.94	0.66	1.9	67.3
			③	1.93	0.49	8.6	12.3
CP-40-2	12.1	2.09	①	1.97	0.91	3.4	58.3
			②	1.98	0.85	2.4	54.5
			③	2.01	0.94	2.1	94.0
CP-40-3	13.9	2.11	①	2.04	0.65	4.8	28.3
CP-40-4	16.4	2.08	①	2.00	0.46	6.0	19.5
			②	1.95	0.47	8.3	13.7
			③	2.05	0.49	7.4	14.2
CP-60-3	11.7	2.16	①	2.03	0.37	3.8	26.4
			②	1.99	0.40	7.3	12.3
			③	2.00	0.36	6.0	12.9
CP-60-4	14.0	2.14	①	2.00	0.25	11.0	6.6
			②	2.03	0.24	9.0	6.3
			③	2.00	0.23	8.0	8.2
CP-80-3	14.2	2.12	①	1.94	0.10	7.5	1.8
			②	1.95	0.16	11.0	2.0
CP-80-4	17.5	2.03	①	1.90	0.13	10.5	2.4

表2.2(2) 一軸圧縮試験の結果（その2）

上記の一軸圧縮試験の結果から、図2.9にペントナイト100%での締固め供試体の一軸圧縮強度の密度依存性、また、図2.10に各層100回のエネルギーで締固めた各供試体の一軸圧縮強度の密度依存性を平成2年度にクニゲルを用いて室温で行った試験結果[3]（供試体は大型三軸試験装置で静的に圧縮固化した）と共に示す。なお、平成2年度のデータは供試体の飽和度が締固め供試体に近い70~80%のものを選んだ。

図2.9では、各条件において密度の大きいデータが最大乾燥密度且つ最適含水比の条件を満たすものであるが、この条件の供試体が最大の強度を持つとは限らないことが示されている。これは、最適含水比よりも乾燥側で締固めた試料は飽和度が小さいため、一軸圧縮強度が大きくなることが理由と考えられる。また、砂質粘土を用いた試験で、最大強度を示す曲線の頂点が乾燥密度-含水比曲線よりやや乾燥側に見られる結果が得られている（図2.11）[4]。同様の図を、今回の試験結果に対して示す（図2.12）。

図2.10からは、ケイ砂混合率が大きくなるにしたがって一軸圧縮強度が低下すること

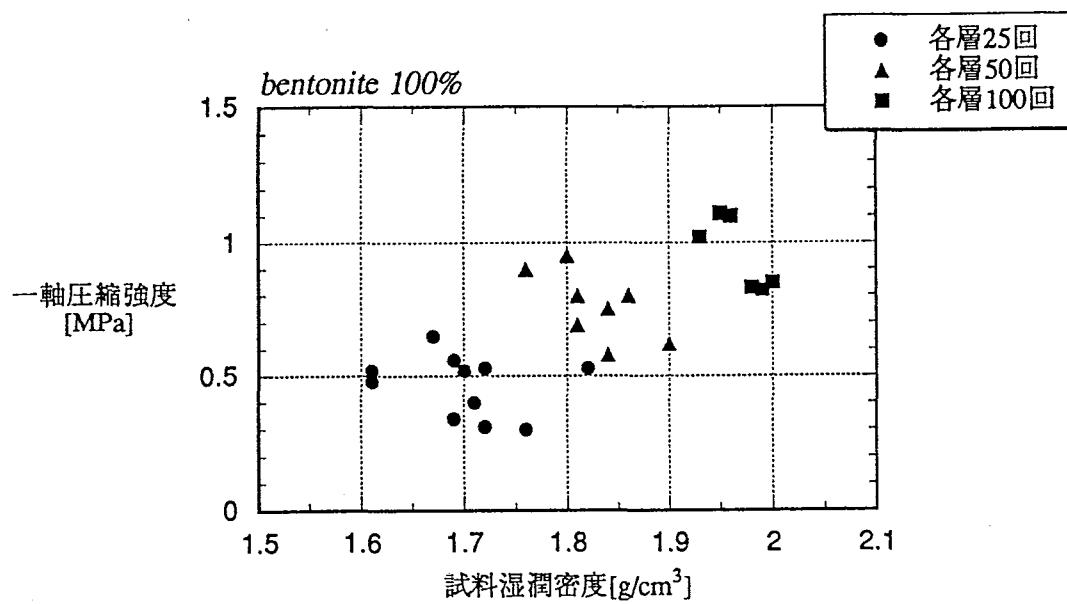


図2.9 ベントナイト100%供試体の一軸圧縮強度（密度依存性）

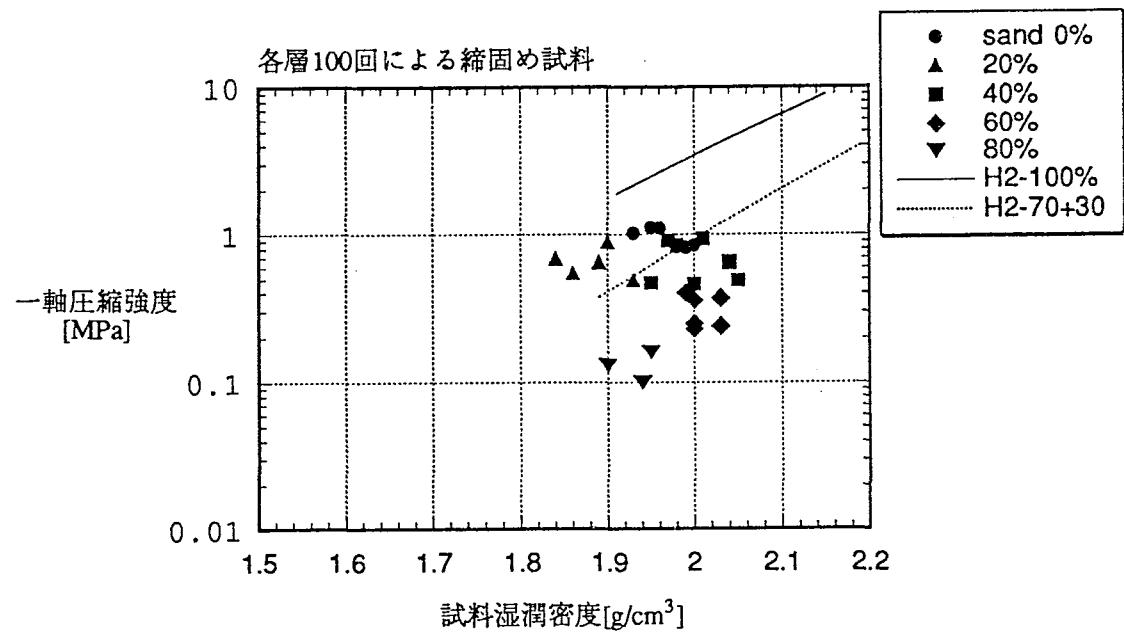


図2.10 締固めエネルギー：各層100回での供試体一軸圧縮強度

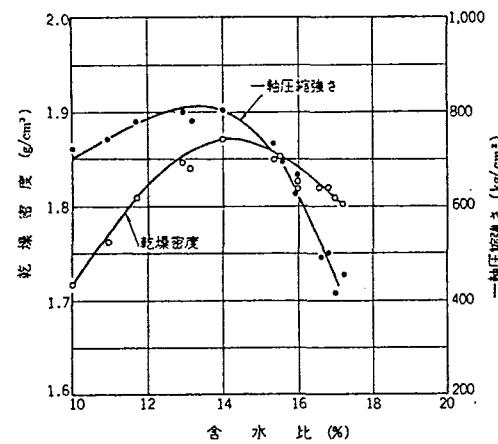


図2.11 締固めた土の乾燥密度および一軸圧縮強度と含水比との関係[4]

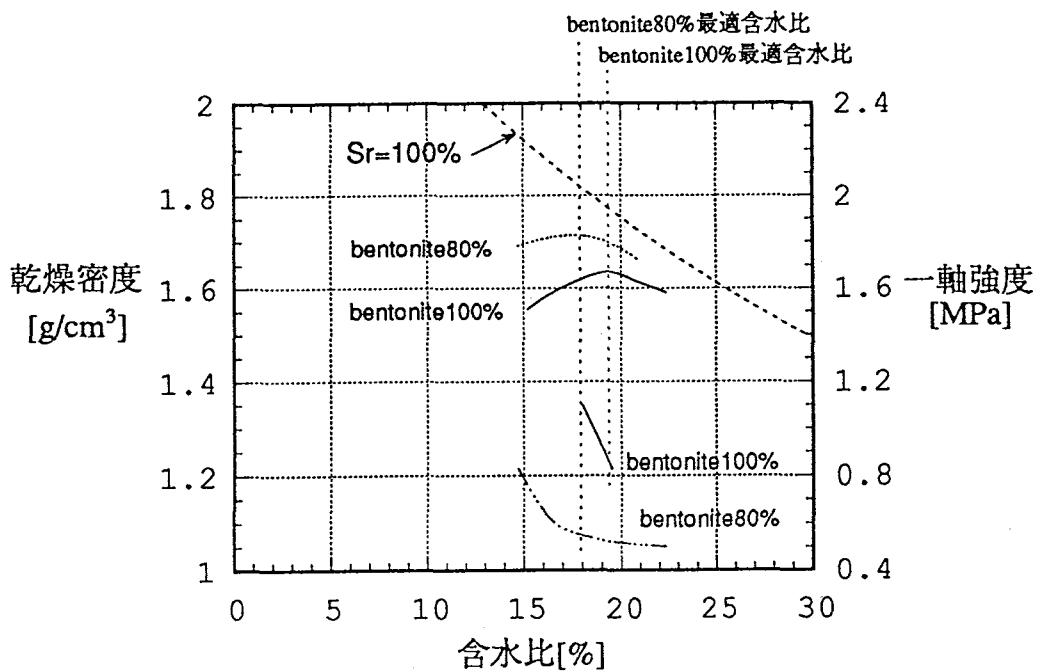


図2.12 鳴固め曲線と一軸圧縮強度（ペントナイト100%）

がわかる。三笠ら[5]によれば、粗粒分と細粒分を含む土質材料の強度は「粗粒分同士が接触した状態でその間隙を細粒分が埋めてゆくと強度が上がるが、細粒分が多くなって粗粒分同士の接触が断たれてくると強度低下をまねく」。本研究でのデータはこの傾向と異なるが、これは使用した粗粒分であるケイ砂の粒径が充分大きくないため強度を負担するマトリックスとして働く、応力を負担する機構が異なっているためと考えられる。

同じ図において、静的に締固めた供試体の一軸圧縮強度と締固めた材料の強度とを比較すると、100%ペントナイトでは、締固めた供試体の方が若干小さな値を示しているが、ペントナイト70%+ケイ砂30%の線は、締固めた供試体のケイ砂20%と40%の境界付近、すなわちケイ砂30%付近を通っており、圧縮の方法による強度の影響は小さい。30%ケイ砂以外の混合率における圧縮強度の比較は、静的な締固めによるデータがないためできなかった。

一軸圧縮試験から得られる結果は、埋戻し施工中の重機の搬送可能性や一時的な上載物の配置を検討する場合など短期の安定問題に対して利用することが考えられる。しかし、閉鎖後の岩盤との相互作用などの長期にわたる問題は各種三軸試験によってデータを取得して検討することが必要である。

2.4 透水試験

ベントナイト（クニゲルV1）に市販のケイ砂を混合して、静的に圧縮固化した試料を用いてその膨潤圧と透水係数を測定し、混合材料の処分場への適用性を透水性の観点から検討する。

2.4.1 測定方法

測定試料は、40mm⁴×20mmの大きさで、測定セルの中で直接静的に圧縮固化される（試料の含水比や密度などを表2.3に示す）。この時のベントナイト及びケイ砂は自然含水比状態である。測定セルは厚さ20mmのステンレス製でベントナイトの膨潤圧に充分耐える構造になっている。膨潤圧、透水係数測定セルの写真を図2.13に示す。なお、透水係数は試料を通過した水の量及び負荷した水圧からDarcy則に従って求めるが、装置の置かれる室温の変動が透過水量測定用のマノメータおよびそれにつながる配管内の水の容積に影響を与えることがないよう、装置全体を25℃の恒温室（図2.14に写真）に設置した。

測定は、試料をセル内にセットした後に配管系内の空気を真空ポンプで吸引し、その後、水を供給した時点で開始となる。通常、膨潤圧は水の浸透開始直後から上昇はじめ、いったんピークを示した後に、ある一定の値へ収束する。この間の現象は、試料が徐々に飽和し、セル内の摩擦や圧縮固化による残留応力を均質化する過程と考え、一定値に収束した時点で試料が飽和したと考えた。したがって、透水係数を求めるために用いた単位時間あたりの透水量は、膨潤圧が一定になり数十時間が経過した後からのデータをもとにしている。なお、透水係数等測定がすべて終了した後に、試料を取り出し、その含水比を測定した結果、土粒子の密度を2.7と仮定するとほぼ試料は100%飽和していることを確認した。

試験番号	bentonite %	sand %	含水比 %	試料高さ cm	試料重量 g	湿潤密度 g/cm ³	乾燥密度 g/cm ³
K-1	80	20	22.6	2.00	51.0	2.03	1.66
K-2	70	30	23.9	1.95	50.3	2.06	1.66
K-3	60	40	23.0	2.00	51.3	2.04	1.66
K-4	50	50	22.3	1.95	50.5	2.06	1.69
K-5	40	60	23.9	2.05	51.8	2.01	1.62
K-6	30	70	21.6	1.94	50.2	2.06	1.70

表2.3 透水試験試料

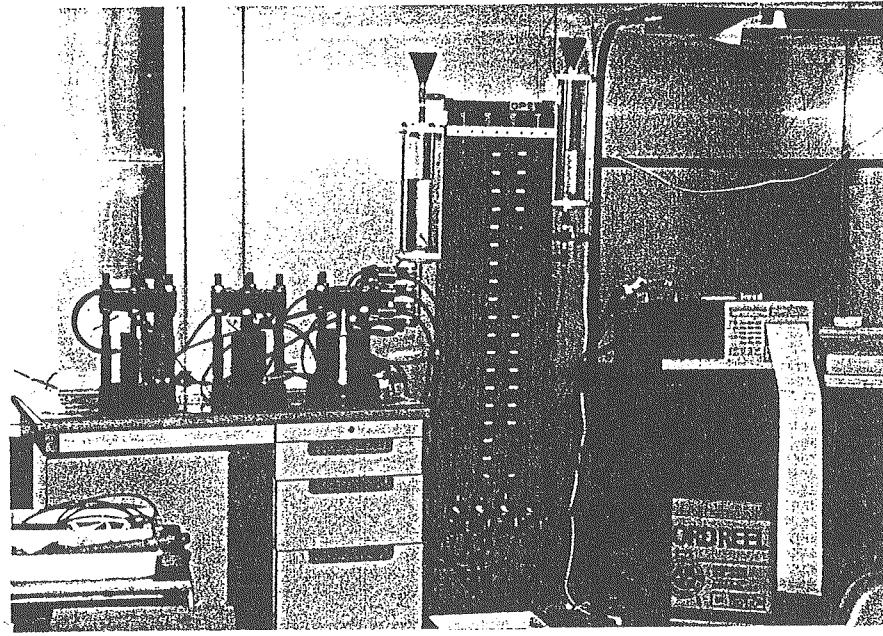


図2.13 膨潤圧、透水係数測定セル

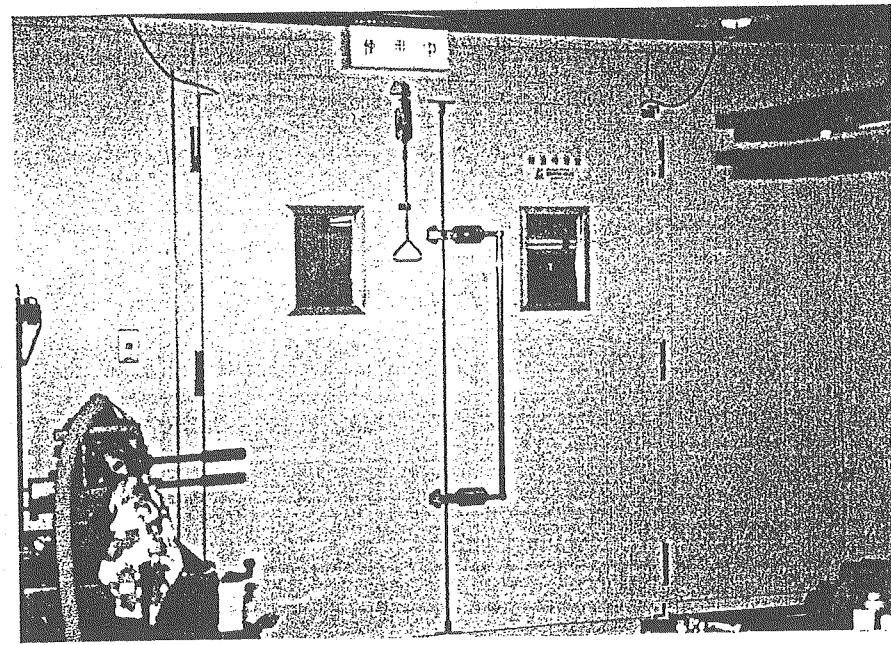


図2.14 恒温室

2.4.2 測定結果

2.4.2.1 膨潤圧

図2.15に各ケイ砂混合率における試料の膨潤圧の時間変化を示す。図中の20、30、…、70は試料のケイ砂混合率を示している。膨潤圧はいったんピークを経て100時間程度経過した後にある一定の値に落ち着く傾向を示している。一番目のピークに相当する膨潤圧と安定した後の膨潤圧を比較すると、ケイ砂の混合率が大きくなるに従って後者が大きくなるようである。これは、ペントナイトの割合の大きい材料を用いる場合、短期的な安定性を考慮しなければならないことを意味する。図2.16に安定した後の膨潤圧を各ケイ砂混合率でまとめる。なお、図中には今回の測定値と、過去に動燃委託研究の中で行った試験の結果を示している。なお、図中には過去の試験結果[6]（混合材料として愛知県産7号ケイ砂）、小峯ら[7]によって得られた乾燥密度が1.7～1.8程度のペントナイト砂混合試料の膨潤圧も示した。また、図中に示される数字は測定後の試料の乾燥密度である。今回の測定のうち、ケイ砂が30%の試料が示す膨潤圧が他の測定値と比較してかなり小さかったため、荷重計などをチェックしてみたが原因はわからなかつた。

図中の線は粘土の膨潤圧が粘土間隙水の塩濃度と2つの粘土粒子の中間における陽イオン密度で表すことができるとしたGrayら[8]の検討にしたがったものである。すなわち、膨潤圧は以下の式で表現できる。

$$p_s = RT(C_c - 2C_0)$$

ここで、 R : 気体定数、 T : 絶対温度、 C_0 : 間隙水の塩濃度、 C_c : 2つの粘土粒子の中間における陽イオン濃度。また、 C_c は以下の式で表される。

$$C_c = \frac{\pi^2}{z^2 B (d + x_0)^2 10^{-16}}$$

ここで、 z : 交換陽イオンの価数、 x_0 : 補正項、 B : 間隙水の化学的性質に関する系係数、 d : 粘土層間の距離。また、 d は粘土の比表面積 S と含水比 w を用いると以下の式で表すことができる。

$$d = \frac{100w}{S}$$

Grayらは、膨潤圧を整理するために有効粘土乾燥密度 γ_e （粘土の重量/粘土と間隙の体積和）でまとめている。これをケイ砂混合率 α 、試料の乾燥密度 ρ_d 、および土粒子の比重 G_s で表すと、

$$\gamma_c = \frac{G_s \cdot \rho_d (1 - \alpha)}{G_s - \rho_d \cdot \alpha}$$

なお、含水比と有効粘土乾燥密度との間には以下の関係が成り立つ。

$$w = 100 \left(\frac{1}{\gamma_c} - \frac{1}{G_s} \right)$$

以上の関係に、

$$C_0 = 0, \quad z = 1, \quad x_0 = 0$$

$$B = 10^{15} \text{ cm/mmol}$$

$$T = 293 K$$

$$G_s = 2.7, \quad \rho_d = 1.65 g/cm^3$$

を代入し、クニゲルV1の50%が粘土分であることを考慮すると以下の式を得る。

$$p_s = \frac{241}{\left(\frac{10^4}{S} \left(\frac{2}{\gamma_c} - \frac{1}{G_s} \right) \right)^2}$$

なお、この式を導くにあたり、測定データに沿うようにクニゲルV1の比表面積を560m²/gと仮定したが、MX-80ペントナイトが比表面積として800m²/gの値をもつことから考えると小さい。実際のデータ取得にあたっては、粘土分のうちその100%が膨潤に寄与していないことも考えられる。

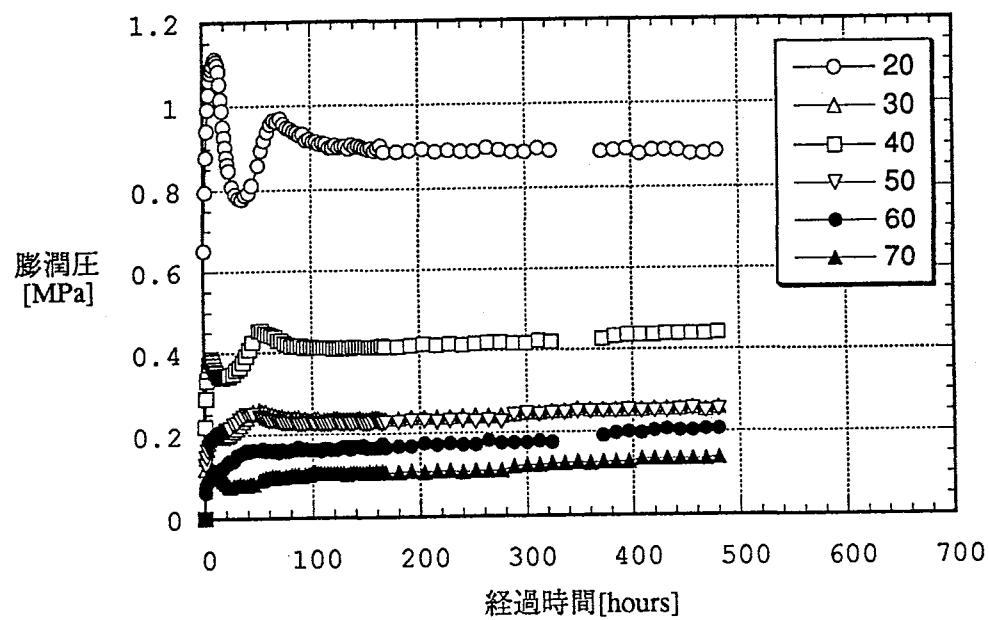


図2.15 膨潤圧の時間変化

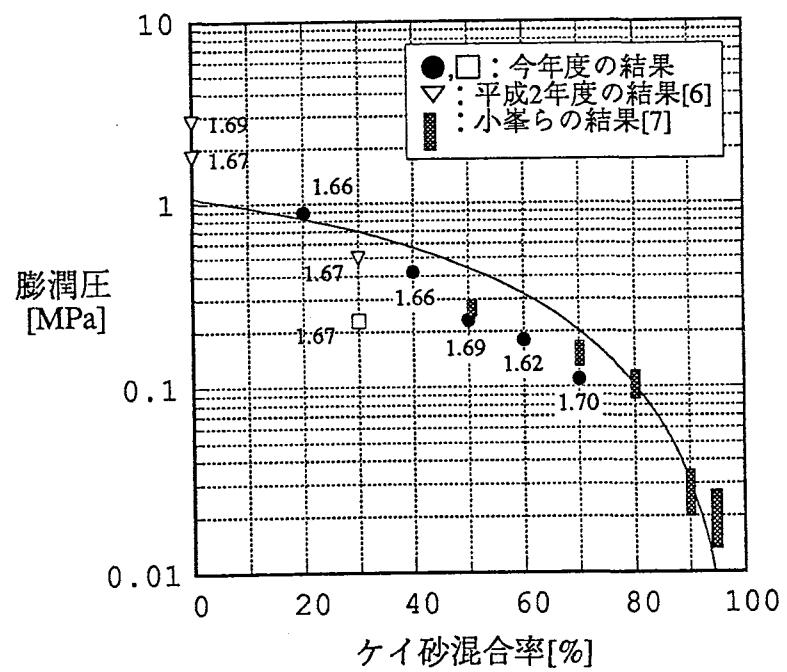


図2.16 各ケイ砂混合率における膨潤圧

2.4.2.2 透水性

膨潤圧の測定を行っている間、試料に対してほとんど透水圧を負荷しない。膨潤圧が安定してから数十時間の後（実際には浸透開始から372時間経過後）、膨潤圧よりも小さい0.05MPaを浸透圧として負荷した。その時間をt=0として透過してきた水の累積量の時間変化を図2.17(1)、(2)に示す。この図の中で、ケイ砂混合率が20,40,60%のデータにt=120時間でピークが見られているが、これは恒温室の点検があったため温度環境が変化したことが理由である。この図から単位時間あたりの透水量を内挿し、試験終了後の試料の高さおよび動水勾配（250）の条件のもとで、Darcy則から透水係数を求めた。以上の結果を表2.4にまとめる。

各ケイ砂混合率における透水係数を図2.18にまとめる。図に過去の試験結果および他の文献からのデータを合わせて示す。また、図中の数字は各試験が行なわれた時の動水勾配の値である。三谷らの文献では試料の動水方向の長さがわからなかった。

図から、試料に混合されるケイ砂の量が大きくなるにしたがって透水係数は大きくなること、特にケイ砂混合率が80%を越えると急激に大きくなること、動水勾配の透水係数に対する影響はそれほど大きくないこと、ケイ砂混合率が70%以下であれば 10^{-11} m/sec以下の透水係数が得られることがわかる。これらの結果は、同様に「ベントナイト混合土の透水特性は、骨材などの条件よりもベントナイトの配合率に対して、大きな影響を受ける」[10]「透水係数はベントナイト混入率の増加により小さくなる傾向を示し、12%程度以下では傾向が顕著であるが、12%以上ではその傾向は小さい」[12]等他の試験研究結果とも一致する。

試験番号	bentonite %	sand %	含水比 %	乾燥密度 g/cm ³	膨潤圧 MPa	透水係数 m/sec
K-1	80	20	22.6	1.66	0.89	1.06E-12
K-2	70	30	23.9	1.66	0.23	9.26E-13
K-3	60	40	23.0	1.66	0.42	1.54E-12
K-4	50	50	22.3	1.69	0.23	1.63E-12
K-5	40	60	23.9	1.62	0.18	8.30E-12
K-6	30	70	21.6	1.70	0.11	4.62E-12

表2.4 膨潤圧及び透水試験データのまとめ

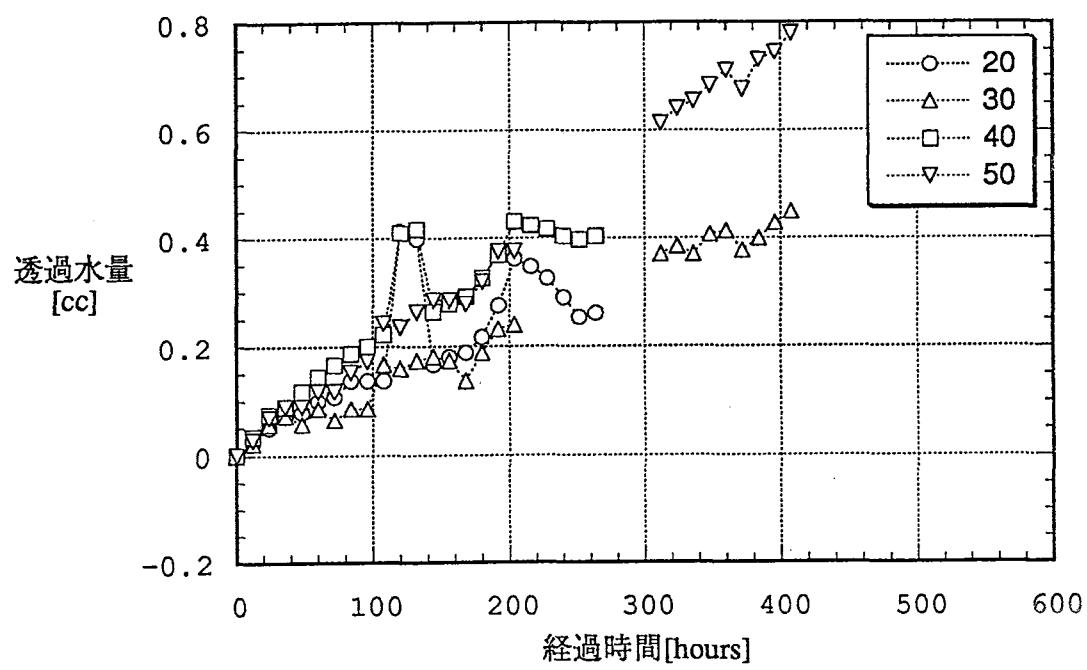


図2.17(1) 試料を透過した水の累積量（その1）

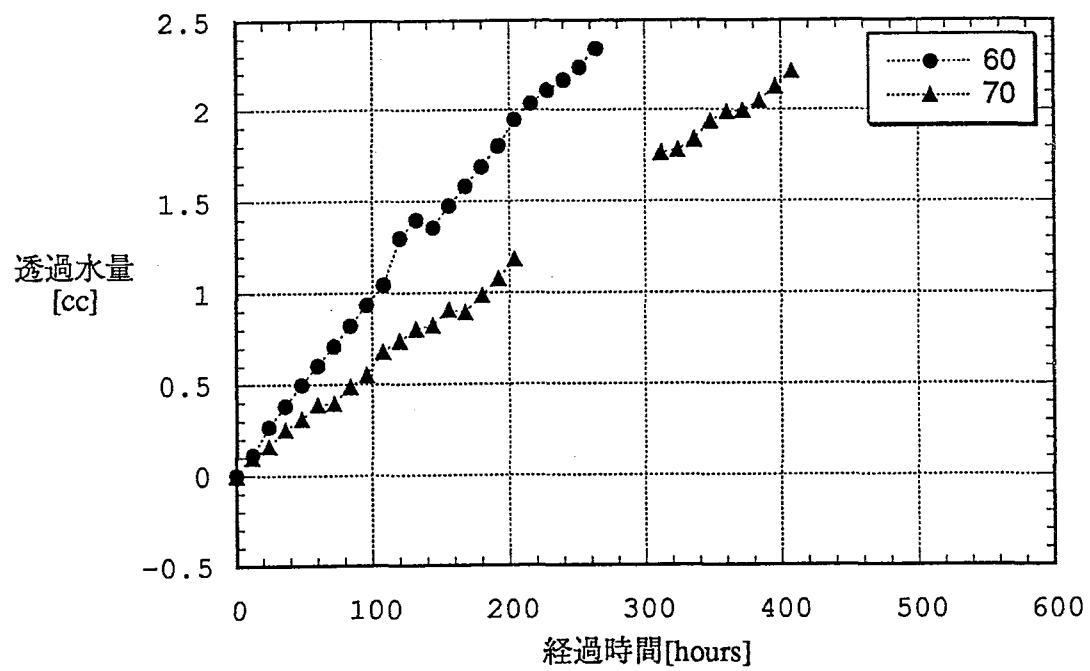


図2.17(2) 試料を透過した水の累積量（その2）

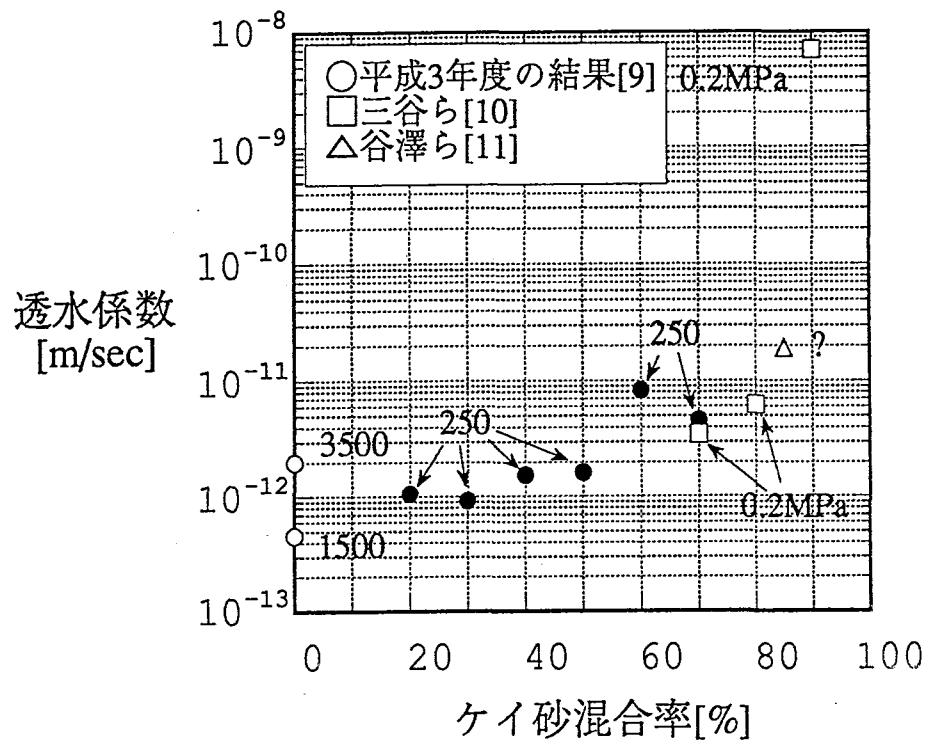


図2.18 各ケイ砂混合率における試料の透水係数

2.5 まとめ

処分場に於て、豊坑やトンネル部分を埋戻しする適切な材料を選択する際に考慮しなければならないことは、

- 低透水性であること
- 緩衝材やプラグなどに使用する高圧縮ペントナイトの膨潤圧による変形を最小限にするための低圧縮性をもつこと
- 緩衝材部分のペントナイトが流失しないように小さな間隙をもつこと
- 空隙部分を埋めるために適当な膨潤特性をもつこと

等である[13]。今回の締固め試験、一軸圧縮試験及び透水試験の結果から、透水性に関しては、試料中のケイ砂の混合率が70%以下であれば 10^{-11}m/sec よりも小さな透水係数を得ることができること、締固め後の密度に関しては、たとえば乾燥密度に関して 1.8g/cm^3 以上を締固めで達成する必要がある場合には、ケイ砂混合率が40%以上必要であること、さらに、充分に締固めすることにより一軸圧縮強度で数 kgt/cm^2 の値を期待できることができた。

実際の工事にあたっては、施工材料（どのペントナイトにどのような材料を混合するのか）や施工環境（どのような締固め方法が適用できるか）を考慮し、事前の施工試験を踏まえて条件を設定する必要がある。今回の試験では、試験装置の都合上、最大粒径4mm程度のケイ砂を用いたが、これによる結果は一つの目安として用い、試験規模を大きくしたりして確認して行くことが必要である。

〈参考文献〉

- [1] 土質試験の方法と解説：土質工学会(1990)
- [2] 谷澤ら：ペントナイト・砂混合土の締固め特性：土木学会第48回年次学術講演会 III-160(1993.9)
- [3] 緩衝材の力学的物性値取得のための試験：鹿島建設㈱ (1991)
- [4] 河上、柳澤：土の締固め：鹿島出版会 土質工学基礎叢書10 (1975)
- [5] 三笠、高田、西垣：cとφを考える、5. レキおよびロック材：土と基礎4月号(1975)
- [6] 緩衝材の力学的物性値取得のための試験(II)：鹿島建設㈱ (1992)
- [7] 小峯、緒方、菅原、伊藤：砂とペントナイト混合材料の膨潤特性に関する一考察：土木学会第48回年次学術講演会III-155 (1993.9)
- [8] M.N.Gray, S.C.H.Cheung and D.A.Dixon: Swelling Pressures of Compacted Bentonite/Sand Mixtures: Mat.Res.Soc.Symp.Proc.Vol.44.pp.523-530 (1985)
- [9] PNC PJ1100 92-001：地層処分システムにおけるシーリング研究 (1992)
- [10] 三谷ら：ペントナイト混合土の透水性と骨材との関係について：土木学会第48回年次学術講演会 III-513(1993.9)
- [11] 谷澤ら：ペントナイト-砂混合土の透水特性：土木学会第48回年次学術講演会 III-514(1993.9)
- [12] 八鉄ら：止水材料としての礫混入ペントナイト混合土に関する室内試験：第38回 土質工学シンポジウム--建設工事と地下水に関する諸問題--(1993)
- [13] J.Nilsson: Field Compaction of Bentonite-Based Backfilling : Engineering Geology, 21 (1985) pp.367-376

3. シーリング性能の評価手法の検討

3.1 目的

昨年度までに、シーリング概念の構築のための研究課題を抽出・整理するとともに想定される各種のシナリオに関する検討及び予備的な影響評価を行ってきた。

処分場の性能評価上、基本シナリオとなる地下水挙動を把握することは、処分システムの構築上重要な課題の1つである。昨年度は対象岩盤を結晶質岩系岩盤としたが、本年度は対象岩盤を堆積岩系岩盤とし、昨年度と本年度の浸透流解析の結果を比較検討するとともに、処分場を掘削し埋戻材（ベントナイト、砂）で埋戻した場合、処分場内の浸透流が時間的にどの様に変化するかを詳細に検討する。

3.2 ファーフィールドの解析

3.2.1 解析条件

本解析では、処分場の掘削及び埋戻材（ベントナイト、砂）による埋戻しが地下水流动に与える影響を明確にするために、地形勾配と地表の起伏の地下水流动への影響は考慮しないこととし、地表面は平坦とした。

地層処分場の立坑及び処分坑の掘削及び埋戻材（ベントナイト、砂）による埋戻しが地下水流动に与える影響を明確に検討するためには、できるだけ単純なモデルを用いて解析を行うのが良いと考えられる。すなわち、岩盤及び埋戻材は一様な材料とし、地層処分場の形状を考慮して、軸対称モデルを採用した。

本解析では、処分場の掘削、埋戻しを考慮して解析するため、非定常不飽和解析とした。

境界条件は、地下水流动解析に大きく影響する重要な要因である。本解析では、側方を静水圧境界、下方を圧力境界、地表面を流入境界、立坑掘削面及び横坑掘削面を浸出境界とした。また、対称軸上の岩盤は不透水境界とした。

3.2.2 解析モデル

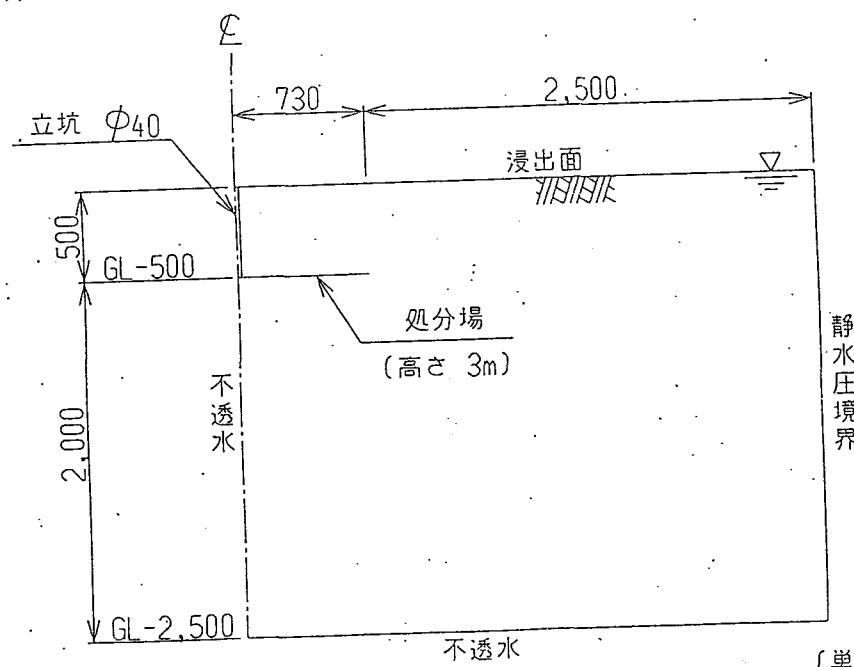
解析領域は、境界の影響が解析結果に影響しないように、昨年度の解析モデルを参考に決定し、処分場の端より側方に2500m、下方に2000mの範囲とした^{1)、2)}。

岩盤の諸特性については、堆積岩系岩盤を想定し、地層構成は一様な岩盤とした。

解析モデルを図-3.1に示す。

ここで処分場の設置深度はGL-500mとした。

解析モデルに対する要素分割図を図-3.2に示す。



(単位: m)

図-3.1 解析モデル

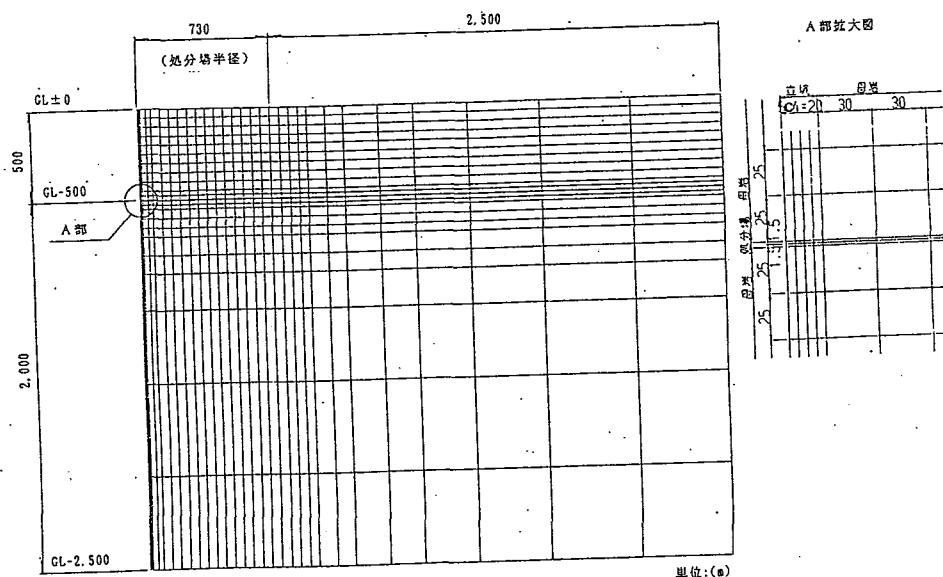


図-3.2 要素分割図

3.2.3 水理定数

(1) 飽和透水係数及び空隙率

堆積岩系岩盤及び埋戻し材の水理定数を表-3.1に示す。

表-3.1 透水係数及び空隙率

	透水係数 k (cm/s)	空隙率 n (%)
岩盤	1.0×10^{-6}	20
埋戻し材	立坑	1.0×10^{-5}
	処分場	1.0×10^{-11}

(2) 不飽和浸透特性

(i) 岩盤の不飽和浸透特性

本解析では東濃ウラン鉱山試験立坑における非定常地下水挙動解析で用いられた不飽和浸透特性³⁾を参考として $\theta \sim K_r$ 関係、 $\theta \sim h_p$ 関係（図-3.3）を設定した。

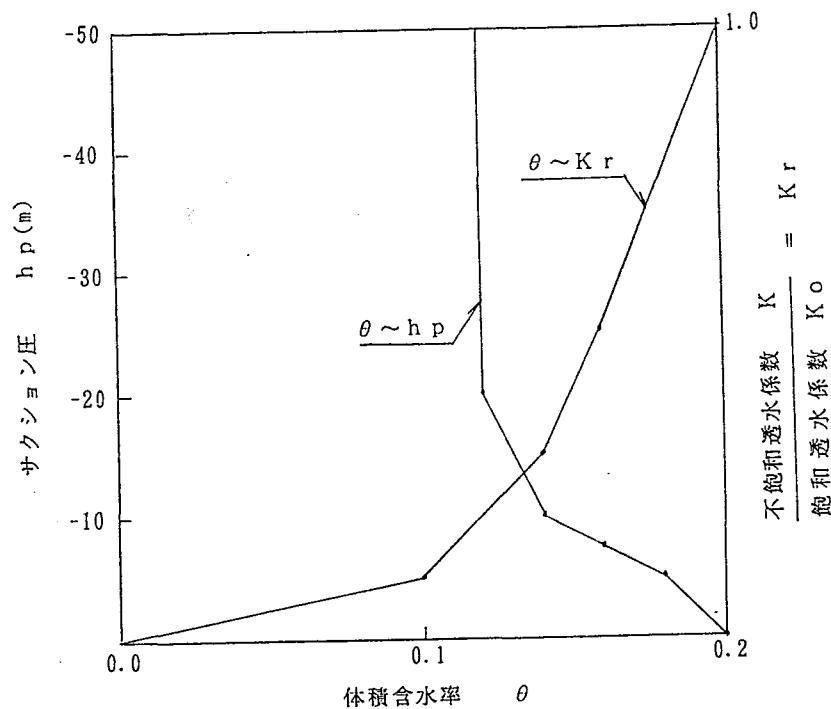


図-3.3 岩盤の不飽和浸透特性

(ii) 埋戻材の不飽和浸透特性

立坑の埋戻材の不飽和浸透特性 $\theta \sim K_r$ 関係、 $\theta \sim h_p$ 関係は駒田による方法⁴⁾により推定する。本解析では、透水係数が同程度である粘土の不飽和浸透特性を参考にして、駒田の方法により $\theta \sim k_r$ 関係、 $\theta \sim h_p$ 関係を設定した。自然飽和度は50%と仮定した（図-3.4）。

処分場の埋戻材の不飽和浸透特性は図-3.5に示す実験結果を採用した。

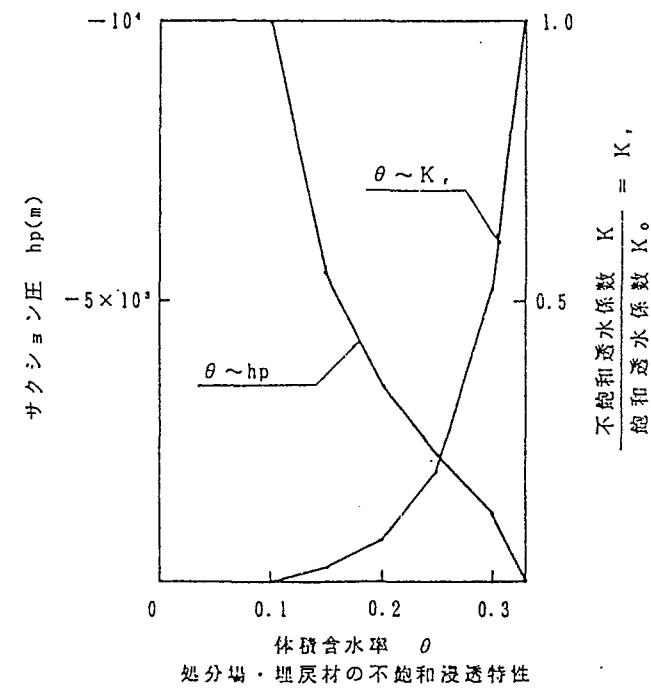
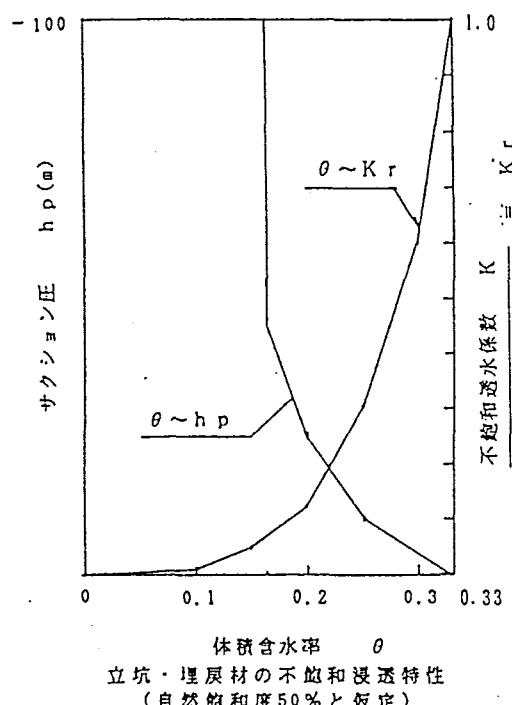


図-3.4 立坑・埋戻し材の不飽和浸透特性

図-3.5 処分場・埋戻し材の不飽和浸透特性

(3) 潜養量

潜養量は流域内の降水量から、蒸発散量、河川流出量を差し引いたものである。

日本の最大潜養量（河川流出量を0とする）の分布⁵⁾より本解析では最大潜養量を1000mm/年（=2.7mm/day）とし、河川流出量を考慮して潜養量を1.0mm/dayとした。

3.2.4 掘削・埋戻し工程

堆積岩系岩盤の場合の立坑及び処分場の掘削・埋戻し工程は全体工程⁶⁾を参考に以下のようにモデル化した。

表-3.2 掘削・埋戻し工程

	10年	20年	30年	40年	50年	60年
立坑掘削						
処分場掘削						
処分場埋戻し						
立坑埋戻し						

処分場を8区画と想定しているので、各区画の掘削、埋戻しは表-3.2の掘削、埋戻しの期間をほぼ8等分し、掘削は中心から外側へ、埋戻しは最外周から中心へ向かって順次実施するものと仮定した。

3.2.5 解析ケース

(1) 立坑・処分場の建設（掘削）：0～30年

立坑・処分場を建設した場合の地下水の挙動を解析する。

(2) 埋戻し：30～70年

立坑・処分場の埋戻しを埋戻材（ベントナイト、砂）で行う場合の地下水の挙動を解析する。

3.2.6 解析手法

解析は通常の非圧縮条件下の浸透流解析とし、有限要素法を用いて定式化する。

3.2.7 解析結果

立坑掘削終了時、処分場掘削終了時、処分場埋戻し終了時、立坑埋戻し終了時の解析結果を示す。

(1) 圧力水頭コンター図

処分場掘削終了時（30年後）において、立坑の周辺約2000m、処分場から下方へ約1500mほどの範囲で水頭コンターの変化が現れている。

掘削・埋戻し過程において、自由水面の変化が顕著に表れている。また、処分場及び立坑埋戻しと同時に、水頭コンターは回復している。

(2) 流速ベクトル図

掘削、埋戻し過程において、立坑及び処分場の掘削面近傍の半径200m程度の範囲内の掘削面への流入が顕著に認められる。また、境界条件を不透水境界から浸出境界に変更した直後の掘削面付近の流速が最も大きい。

立坑埋戻しと同時に全域において流速ベクトルは0になる。

(3) 湧水量

立坑掘削終了時に $Q = 304\text{m}^3/\text{day}$ 、処分場掘削終了時に $Q = 4235\text{m}^3/\text{day}$ 、処分場埋戻し時に $Q = 280\text{m}^3/\text{day}$ の湧水量が確認できる。

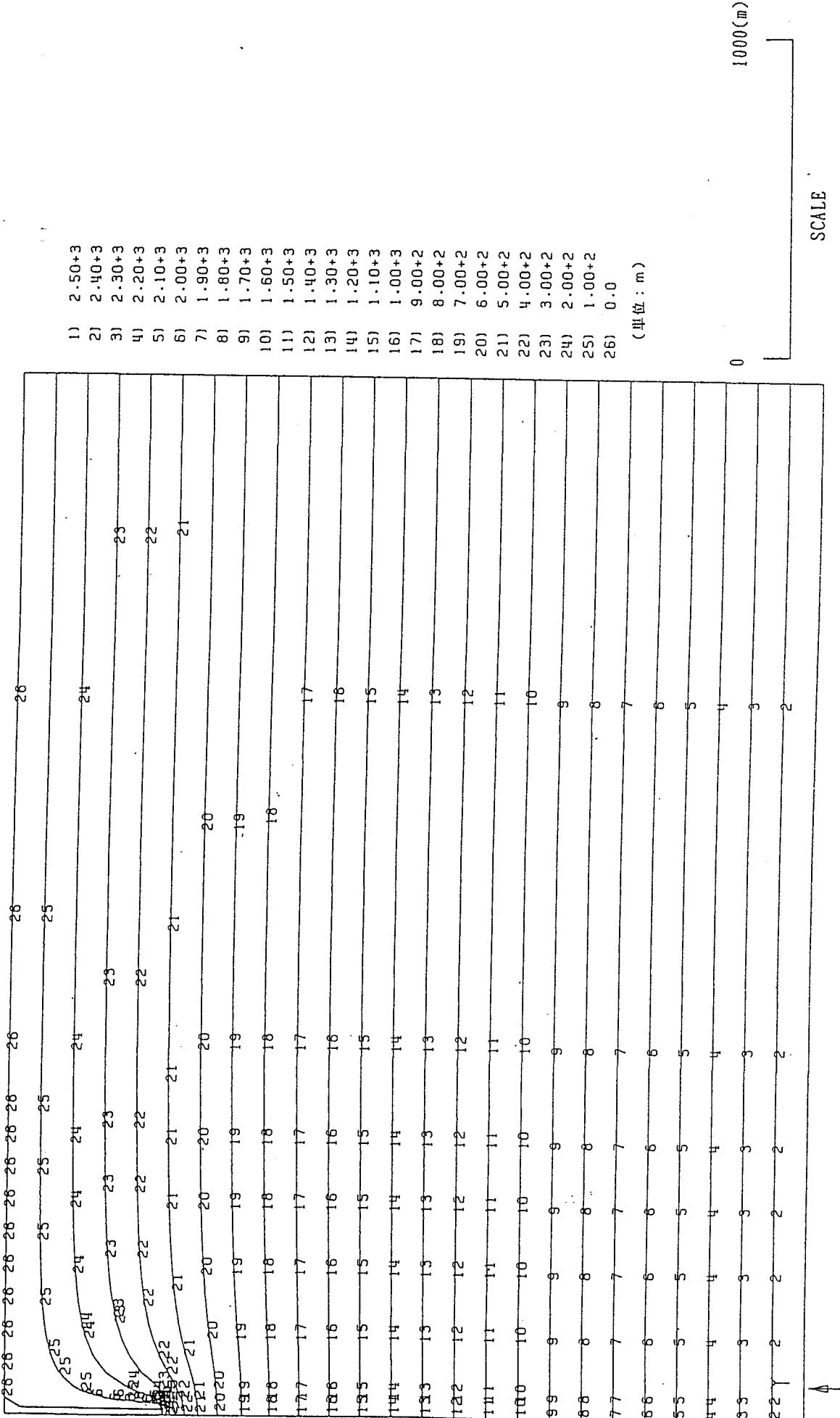
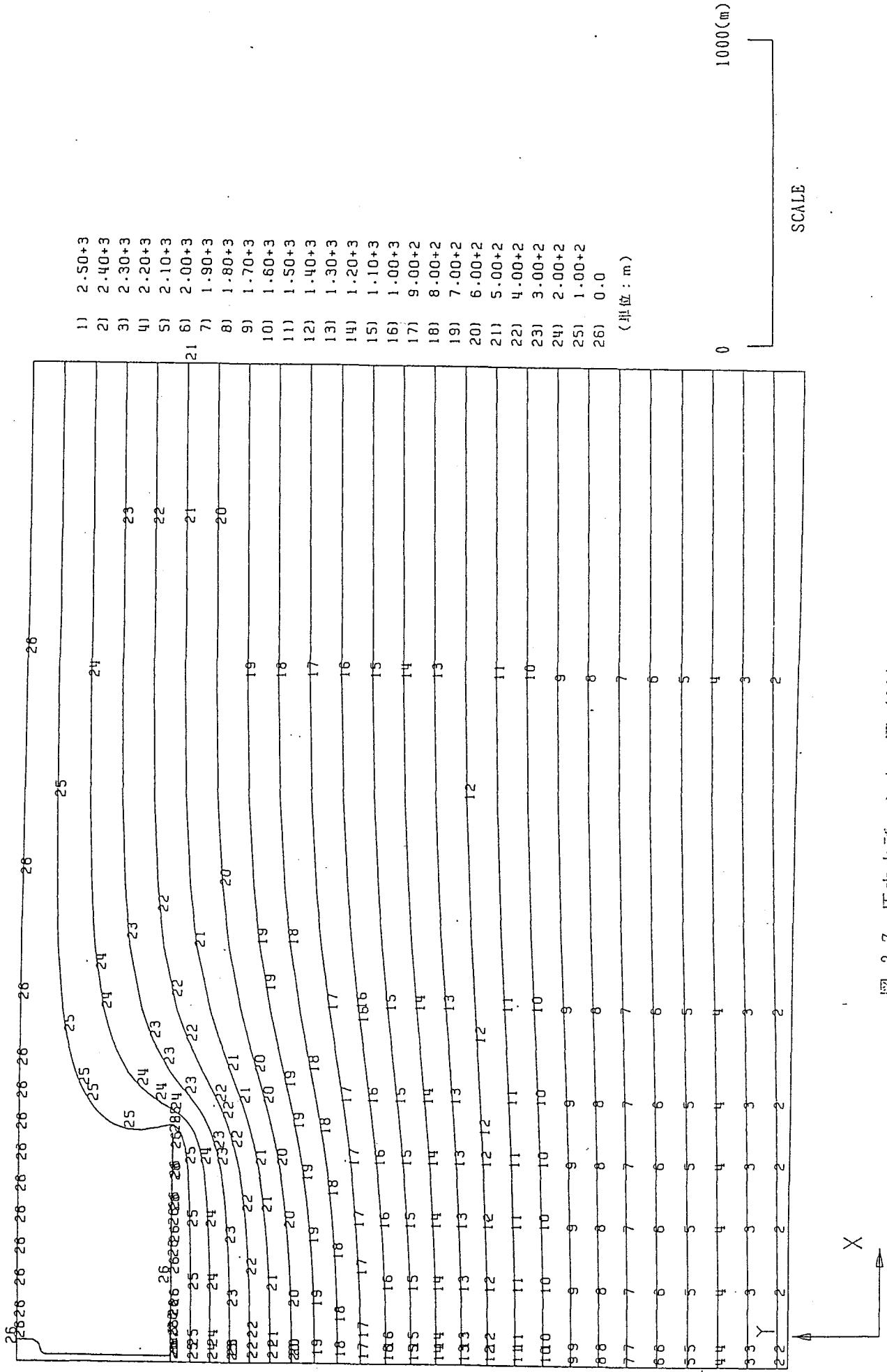


図-3.6 圧力水頭コントラ一図（10年後・立坑掘削終了時）

図-3.7 圧力水頭コンター図(30年後・処分場掘削終了時)



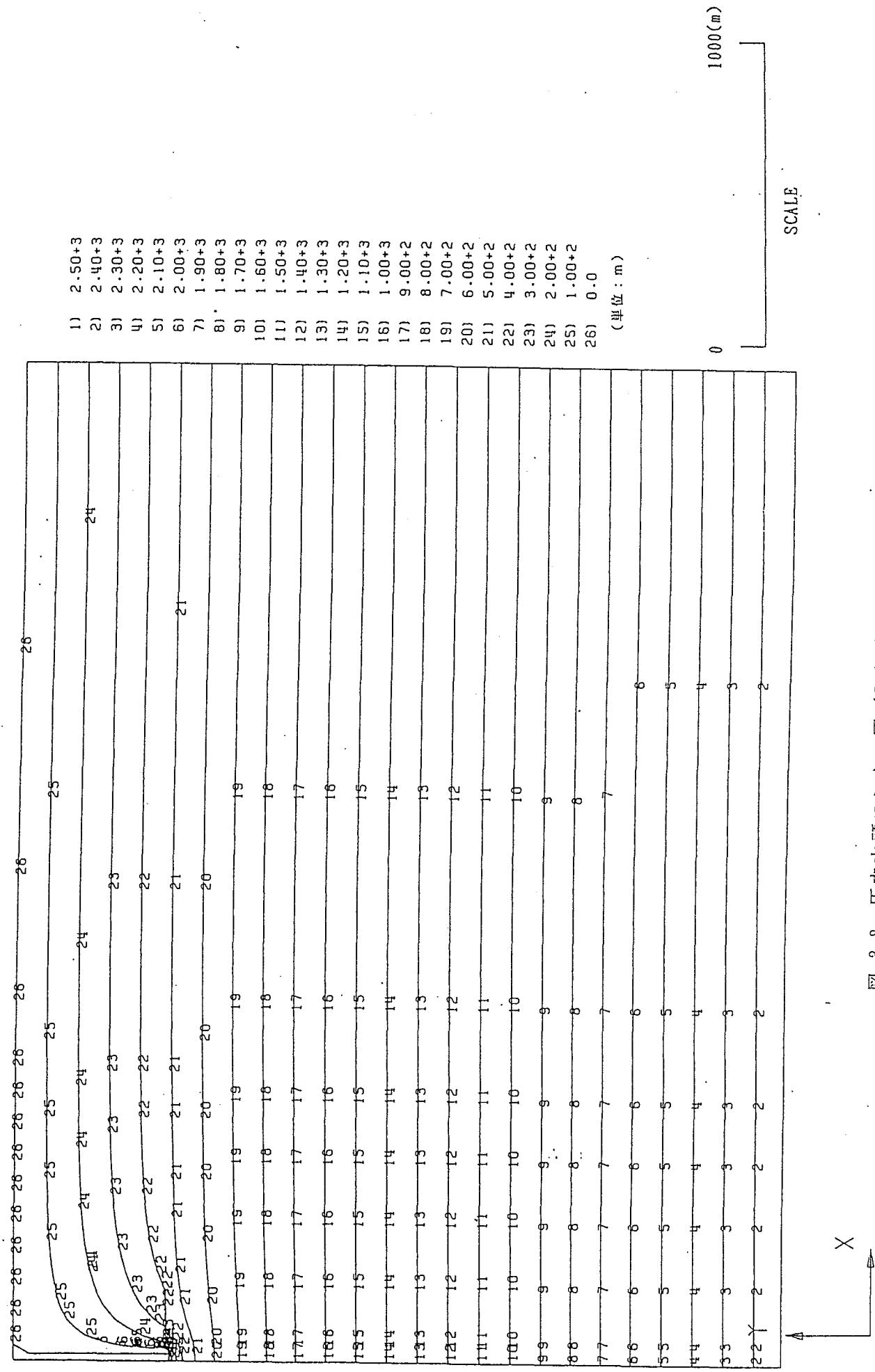


図-3.8 圧力水頭コンターノ (50年後・処分場埋戻し終了時)

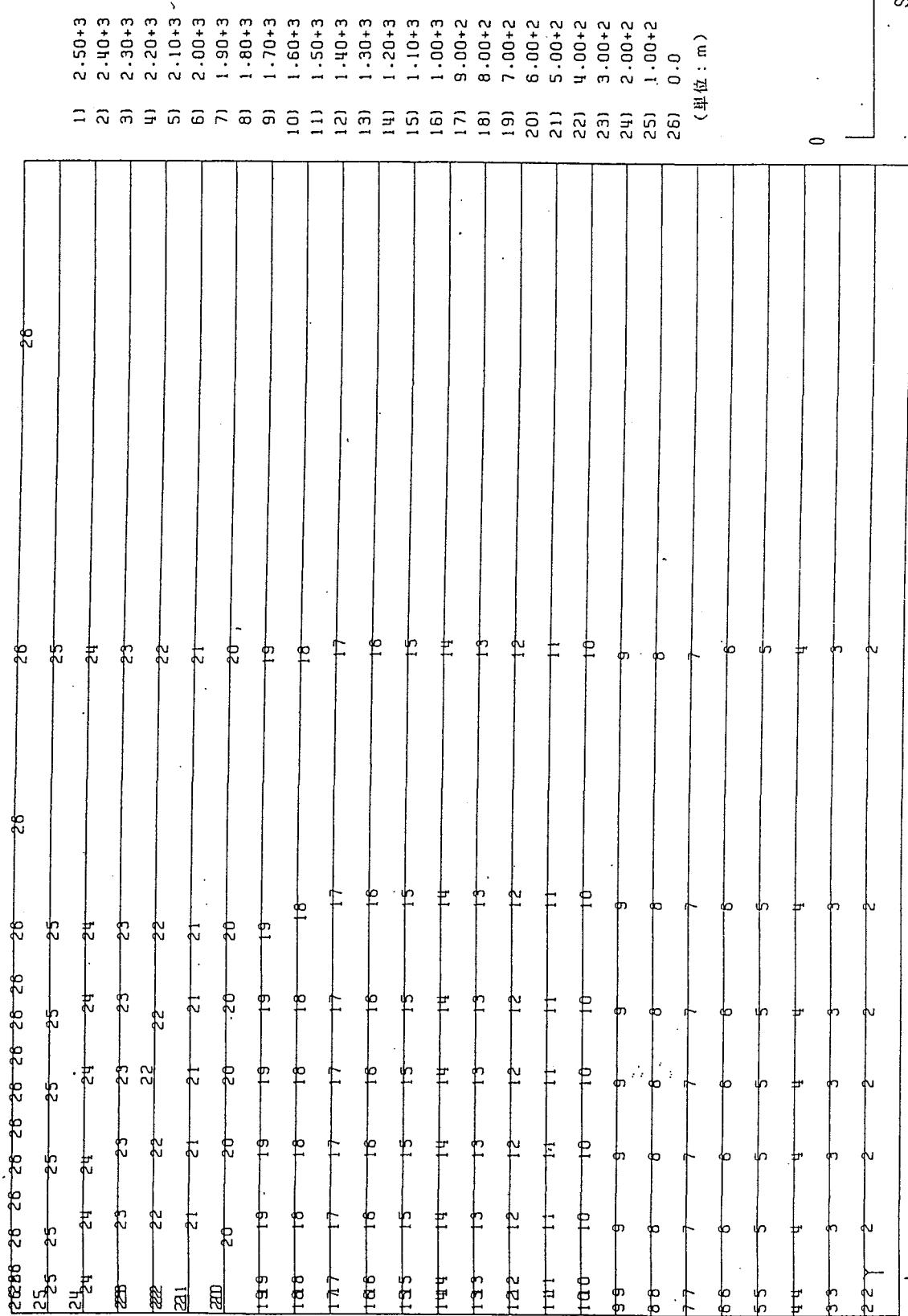
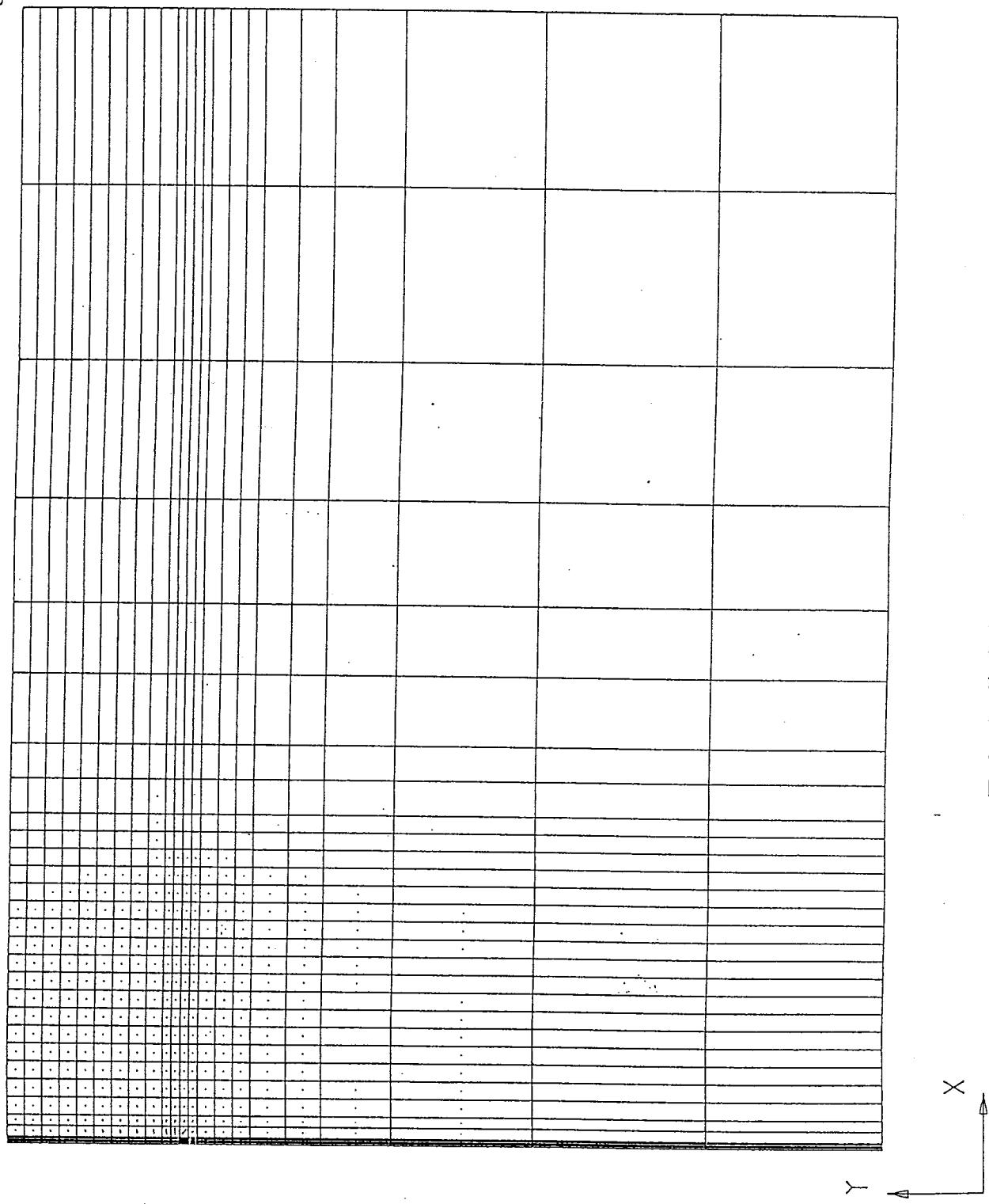


図-3.9 圧力水頭コンター図（60年後・立坑壁廻し終了時）

図-3.10 流速ベクトル図（10年後・立坑掘削終了時）



0 1000(m)

SCALE

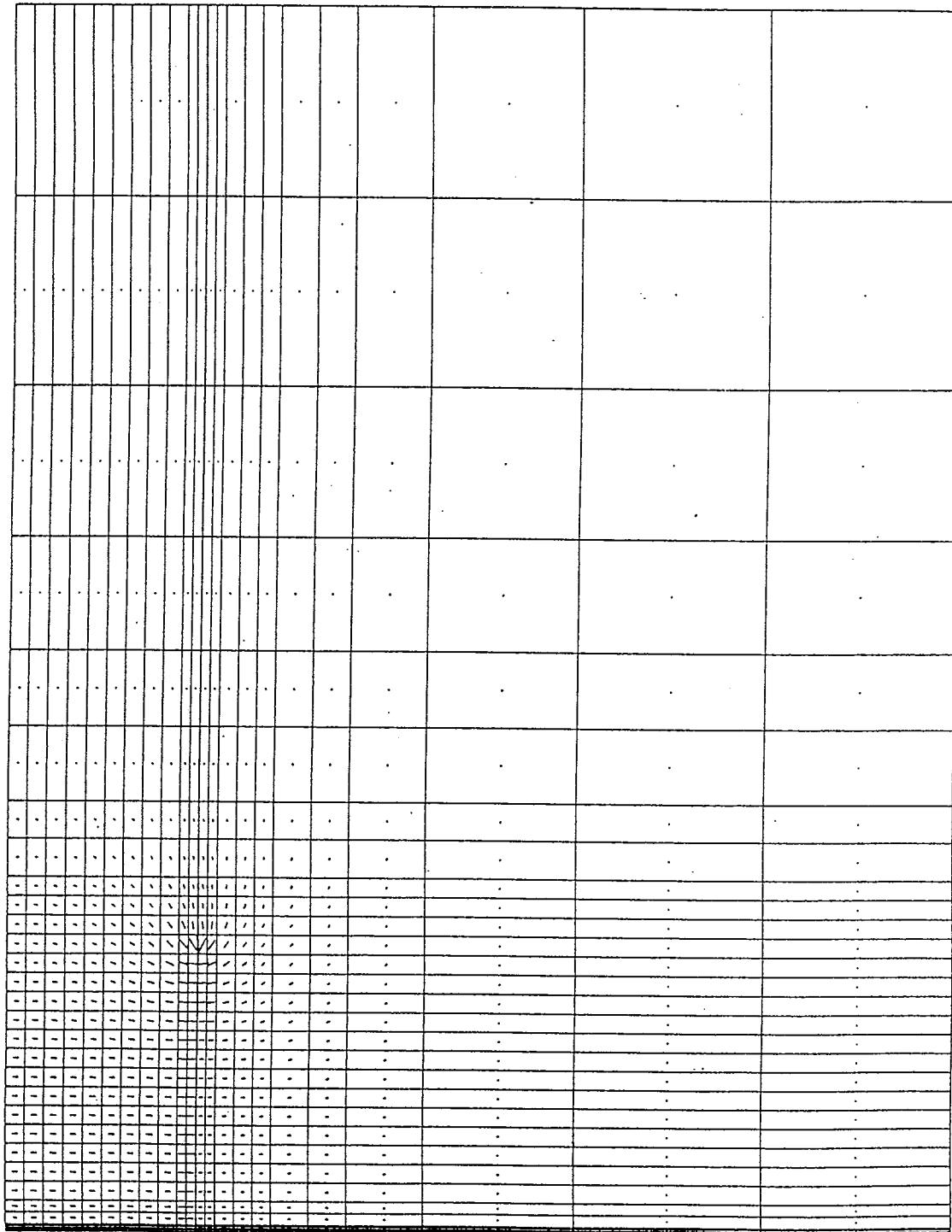


図-3.11 流速ベクトル図（30年後・処分場掘削終了時）

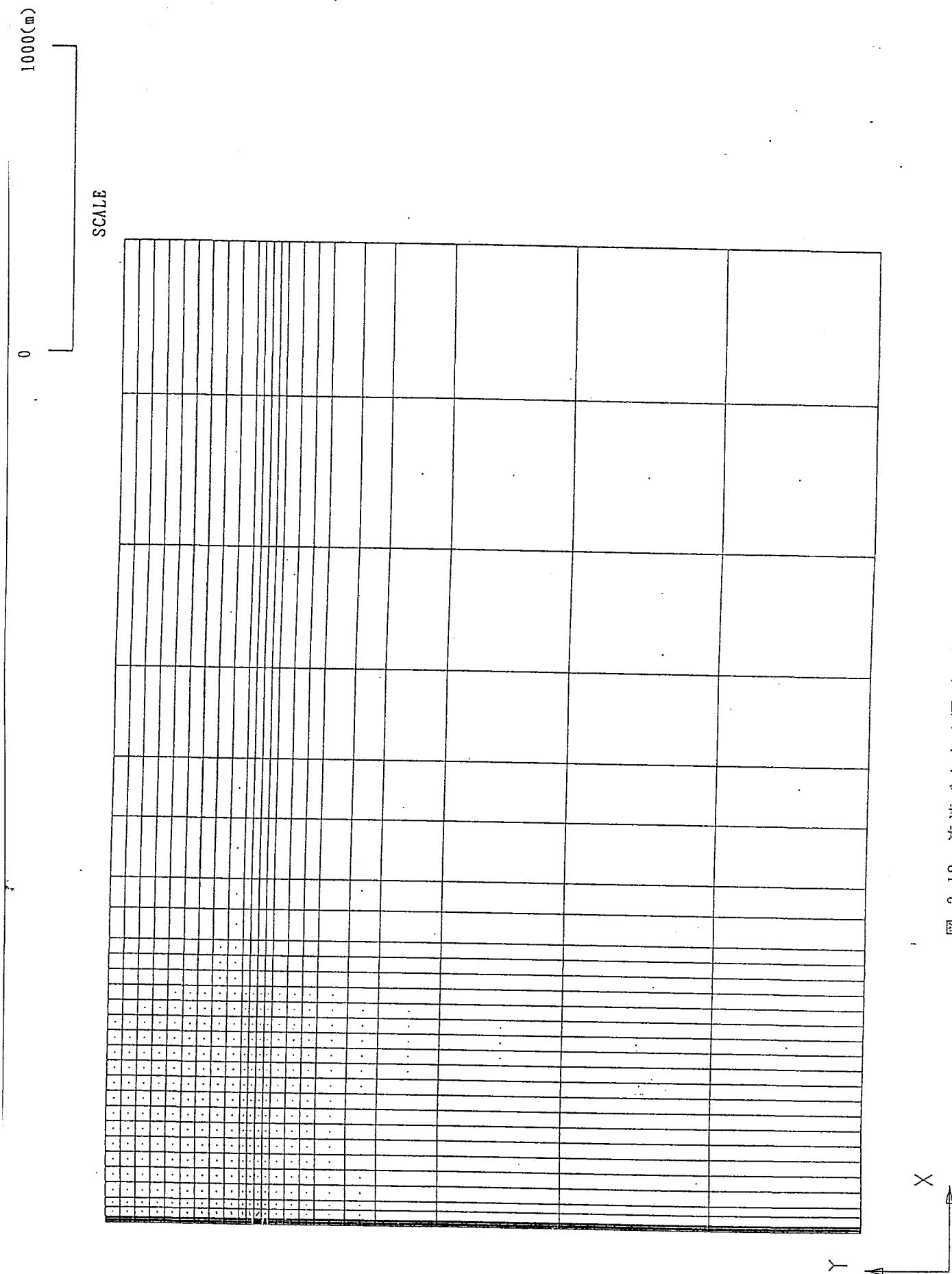


図-3.12 流速ベクトル図(50年後・処分場埋戻し終了時)

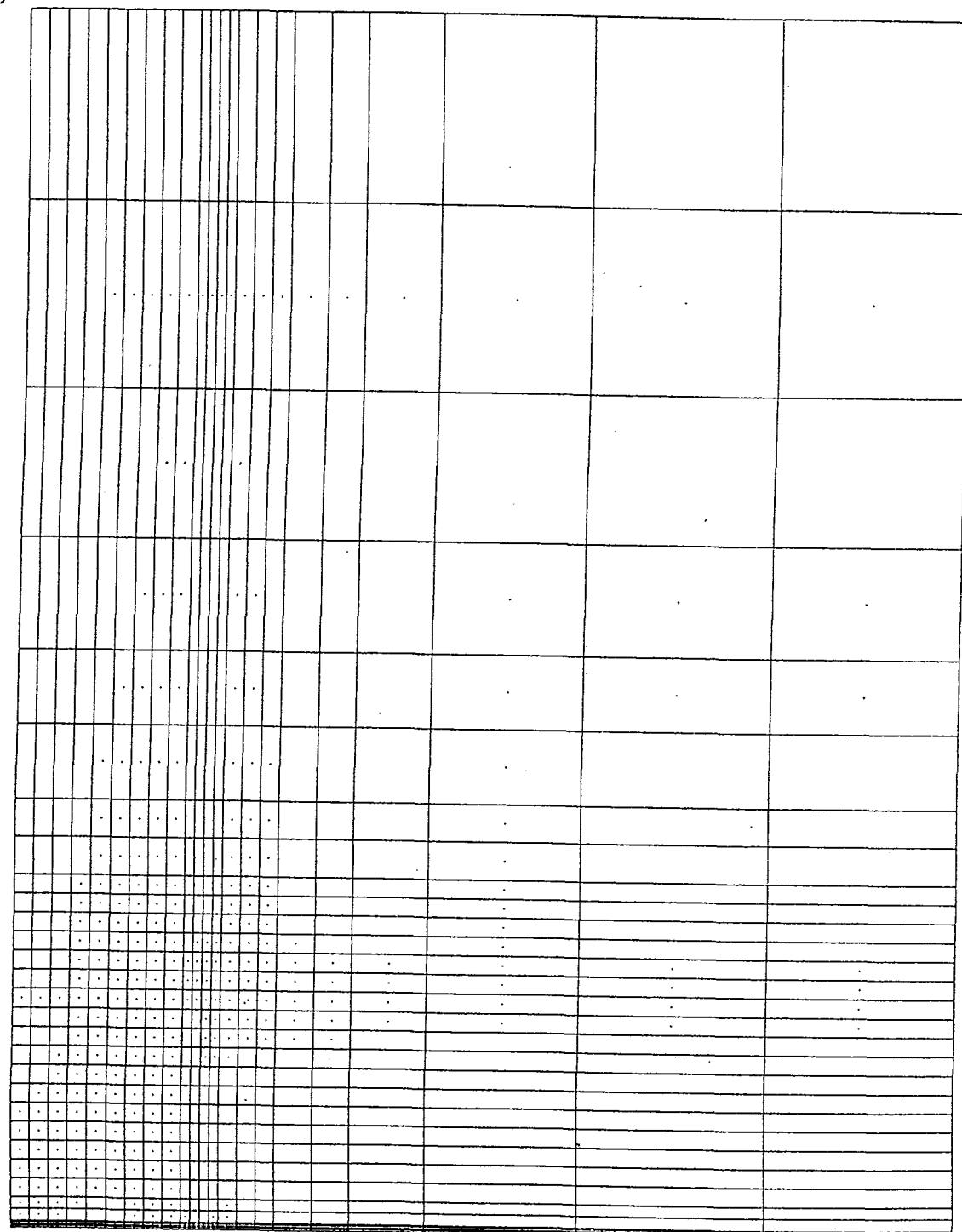


図-3.13 流速ベクトル図(60年後・立坑壁戻し終了時)

3.3 処分場内部の解析

3.3.1 解析条件

処分場を埋戻し材（ベントナイト、砂）により埋戻した時、処分場の内部の浸透流を明確にするために、処分場付近を詳細にモデル化するのが良いと考えられる。

本解析では処分場付近の浸透流を考慮して1次元モデルを採用する。また時間経過を考慮して解析するため、非定常不飽和解析を行う。

境界条件は、地下水水流動解析に大きく影響する重要な要因である。本解析では、境界条件を圧力境界とする。圧力境界（動水勾配）はファーフィールドの解析結果を基に設定する。

3.3.2 解析モデル

解析領域は処分場付近の解析ができるだけ詳細に行えるように決定する（図-3.14）。処分場を地下水の流れが1方向となるようにモデル化する。解析モデルを図-3.15に示す。

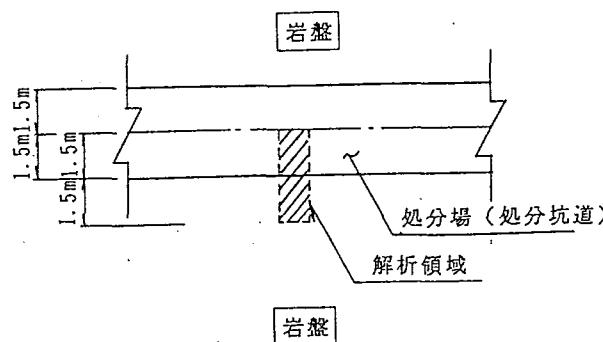


図-3.14 解析領域

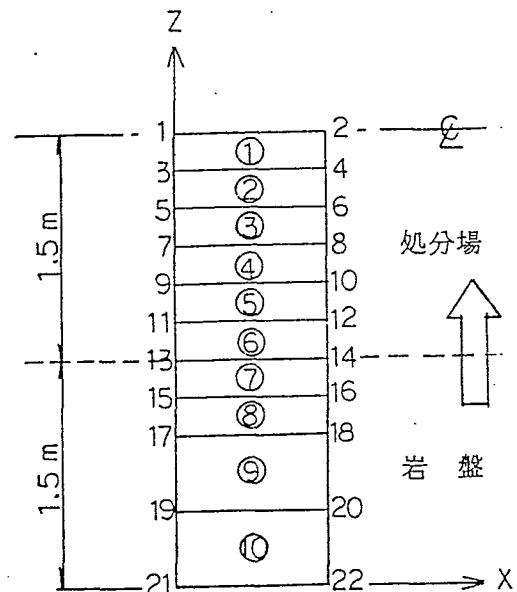


図-3.15 処分場の解析モデル

3.3.3 水理定数

水理定数はファーフィールドの解析で用いた水理定数を用いるものとした。

3.3.4 解析ケース

処分場を埋戻し材（ベントナイト、砂）で埋戻した後の地下水の挙動を解析する。

解析に用いる動水勾配は昨年度の結晶質岩系岩盤、本年度の堆積岩系岩盤のファーフィールドの解析結果をもとに設定する。ファーフィールドの解析結果では処分場の周辺岩盤の動水勾配は埋戻し段階により大きく変化する。動力炉・核燃料開発事業団で実施された地下水流动解析⁷⁾を参考にすれば地表面下1000m付近で生じる鉛直方向の動水勾配は0.01程度であり、本解析でもこれを参考にして表-3.3の値で検討した。

解析ケースを表-3.3に示す。

表-3.3 解析ケース

ケース	埋戻し材の透水係数 k (cm/s)	動水勾配 (上向き)
①	1.0×10^{-11}	0.01
②		0.1
③	1.0×10^{-10}	0.01
④		0.1

3.3.5 解析手法

ファーフィールドの解析手法と同様とする。

3.3.6 解析結果

ケース①～④について処分場が飽和するまでに要する日数を表-3.4 に示す。

表-3.4 解析結果

ケース	埋戻し材の透水係数 k (cm/s)	動水勾配 (上向き)	処分場が飽和するまでに要する日数
①	1.0×10^{-11}	0.01	1800 日
②		0.1	500 日
③	1.0×10^{-10}	0.01	130 日
④		0.1	30 日

解析結果より、埋戻し材の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-11}$ (cm/s) の場合 (ファーフィールドの解析で用いた透水係数) 、処分場が飽和するまでに要する日数は 1800 日 (約 5 年) である。

透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-11}$ (cm/s) から $k = 1.0 \times 10^{-10}$ (cm/s) と 1 オーダー大きくなれば、飽和するまでに要する日数は 1800 日から 130 日と 1/10 以下になる。処分場の埋戻し材の透水係数は飽和するまでに要する時間に大きく影響することがわかる。

本解析では、透水係数は $k = 1.0 \times 10^{-11}$ (cm/s) から $k = 1.0 \times 10^{-10}$ (cm/s) と変化させ、不飽和浸透特性は同じものを用いている。本来、不飽和浸透特性は透水係数により異なるので、解析結果に影響することが予測される。

動水勾配が $i = 0.01$ から $i = 0.1$ と大きくなれば飽和するまでに要する日数は 1/4 程度になる。本解析では動水勾配は一定としているが、実際の掘削、埋戻しの過程における動水勾配は変化していると考えられる。

3.4 まとめ及び今後の課題

本年度は、対象岩盤を堆積岩系岩盤とし、昨年度と本年度の浸透流解析の結果を比較した。また、処分場を掘削し、埋戻し材（ベントナイト、砂）で埋め戻した場合、処分場内の浸透流が時間的にどの様に変化するかを検討した。

3.4.1 まとめ

岩盤の不飽和浸透特性及び処分場の掘削深度が異なっても、掘削、埋戻しに伴う地下水流动の影響は、立坑近傍の地表面付近に限定される。また、掘削した後の埋戻し過程において自由水面は、すぐに回復する。

掘削、埋戻し（60年）の間は地下水流动の変動が認められるが、掘削、埋戻し終了後には、地下水位は速やかに元の状態に回復する。このことより、掘削、埋戻しの間は、地下水流动に伴う核種移行に対する立坑、処分場の掘削、埋戻しの影響は無視できるものと考えられる。

湧水量は処分場掘削終了時に最大となり、 $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度である。

処分場の内部の解析においては、不飽和浸透特性が変化すると、飽和するまでに要する時間に大きく影響する。これより、処分場の埋戻し材の透水係数は人工バリアとしての機能上においても非常に重要な事項であると判断できる。

処分初期に不飽和状態の緩衝材であるベントナイトが地下水の浸潤により飽和状態になる現象は拡散と浸透流の中間的な現象であることが予想される。緩衝材の再冠水を解析する場合、地下水の流れが拡散であるか浸透流であるかを仮定する必要があり、解析を支配するパラメータが適当な値に設定できれば拡散解析と飽和不飽和浸透流解析のどちらも妥当な解析方法であるといえる。

3.4.2 今後の課題

今後の課題について以下に述べる。

(1) 立坑、処分場のモデル

本解析においても昨年度と同様に、対象岩盤を一様な健全母岩と想定した。実際には、掘削に伴い発生する掘削面周辺のゆるみ域や岩盤中のシームなどが存在する。ゆるみ域やシームの存在は、地下水の流动に大きく影響することから、これらを考慮した解析が必要であると考えられる。

また、立坑、処分場のモデルとして軸対称モデルを設定した。より正確な地下水流动を評価するためには、立坑、処分場の3次元的な形状の影響を考慮した解析が必要になる。

(2) 水理定数

ファーフィールドの浸透流解析では、岩種として堆積岩を想定して、飽和透水係数、空隙率に関しては代表値、不飽和浸透特性に関しては東濃ウラン鉱山試験立坑における非定常地下水挙動解析で用いられた値を採用し、岩盤についての不飽和浸透特性のデータは非常に少なく、実際データを数多く収集することが望まれる。また、対象サイトが決定すれば実際の岩盤を想定した水理定数の設定が必要である。

(3) 解析手法

本解析では、ファーフィールド及びニアフィールドの浸透流を扱った。地下水の挙動は、熱と応力の影響を受けることが予想されるため、より現実に近い解析を行うには、熱－水－応力の連成解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 鹿島建設(株)、大成建設(株)、(株)大林組、清水建設(株)、(株)間組；地層処分システムの設計研究、PNC SJ4449-90-002(3)、p. 286、1990. 3.
- 2) 鹿島建設(株)、大成建設(株)、(株)大林組、清水建設(株)、(株)間組；地層処分システムの設計研究、PNC SJ4449-90-002(3)、p. 337、1990. 3.
- 3) 柳澤孝一他；立坑掘削に伴う地下水水流動影響調査研究－東濃ウラン鉱山試験立坑を例として－応用地質33巻号5号、pp. 32～49、1992.
- 4) 電力中央研究所、土木技術研究所；電力中央研究所報告、水封式燃料地下貯蔵の技術開発に関する研究－燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討－pp. 6～10、1979. 4.
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団；高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－、pp. 2-44～2-45、1992. 9.
- 6) 大成建設(株)、(株)大林組、鹿島建設(株)、清水建設(株)、(株)間組；地層処分システムの設計研究(Ⅱ) PNC PJ1449-91-001、pp. 1081～1085、1991. 3.

4. 原位置試験設計

グラウトは空洞掘削時の湧水対策や人工バリア、立坑等の周辺岩盤の湧水性を低く抑えるために用いられる重要なシーリング材の一種であり、室内試験や原位置試験を行って、十分にその機能評価を行わなければならない。

本年度は、人工バリア周辺岩盤を対象とした原位置における掘削影響試験及びグラウト試験の設計・検討を行なった。

検討フローは以下に示すとおりである。

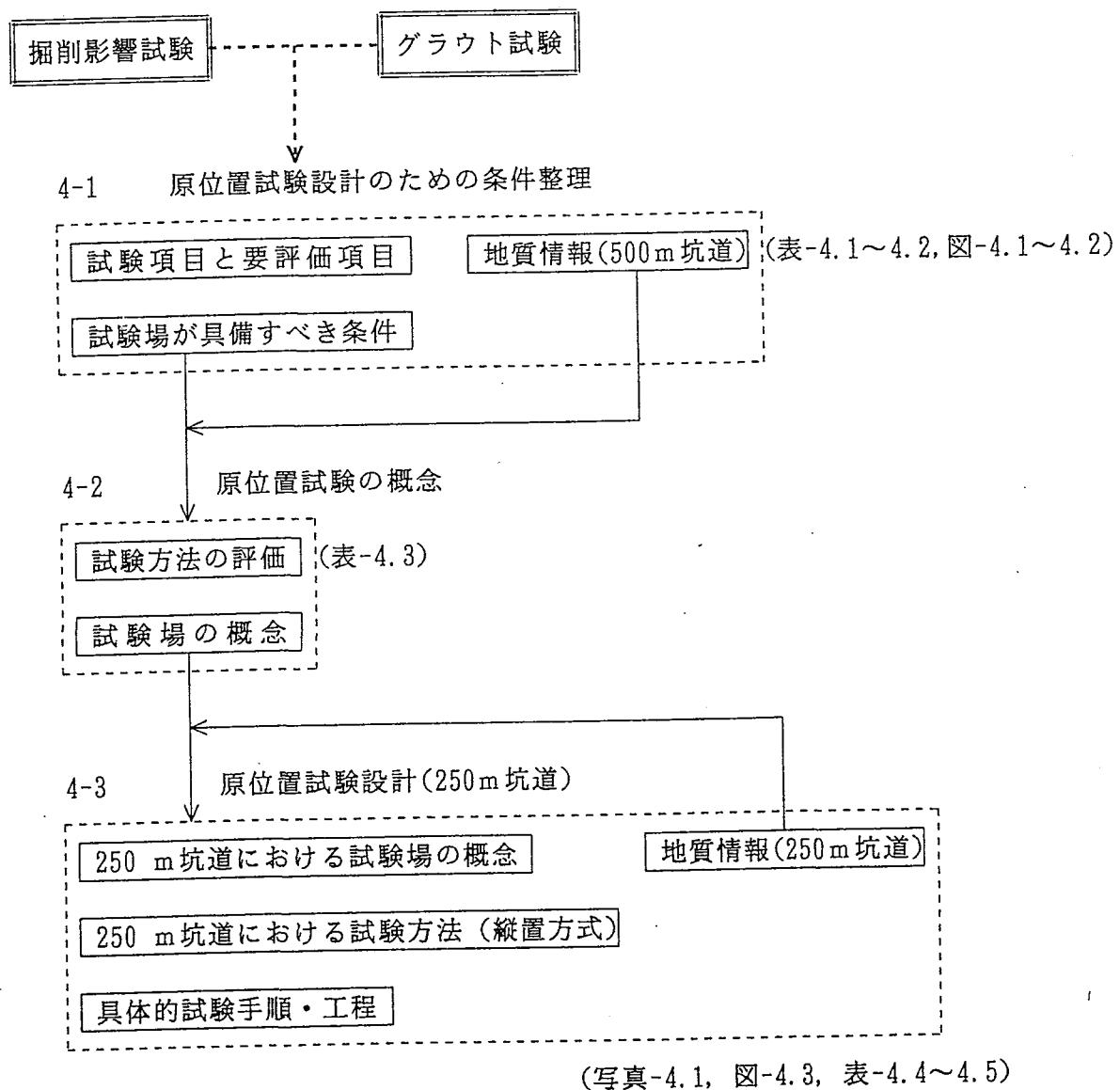


表-4.1 試験項目と要評価項目

試験項目	掘削影響評価	グラウト効果の確認
目的	処分孔の掘削施工性と周辺岩盤への影響を調査する。	粘土系グラウト技術の基本性能を把握する。
要評価項目	<ul style="list-style-type: none"> ○ゆるみの進展状況（評価） ○機械掘削工法でのゆるみ域 	<ul style="list-style-type: none"> ○湧水量低減効果 ○処分孔周辺への注入工法
具体的検討内容	<ul style="list-style-type: none"> ○岩盤のゆるみ評価 <ul style="list-style-type: none"> ・力学特性の変化 ・水理学的特性の変化 ○施工性能評価 <ul style="list-style-type: none"> ・掘削性能 	<ul style="list-style-type: none"> ○亀裂の性状（主として亀裂幅）、施工条件（注入圧、濃度）と湧水量の対比 ○大口径ボアホール注入装置の試作と性能確認

表-4.2 試験場が具備すべき条件

試験項目 サイト特性	サイト A, B 試験		(サイト C 試験)
	掘削挙動評価		グラウト効果の評価
水理特性	湧水量	—	湧水量低減によってもグラウト効果を確認するため、湧水が存在する、あるいは人工的に作り得る〔ただし、自然に湧水が存在する場合は過大湧水でなく、粘土グラウトが可能な程度の湧水量が望ましい〕
	水みち	—	—
力学特性	不連続性	中部(事)掘削影響試験と同等	—
	応力	ゆるみ発生に対し危険な方向にする〔試験坑坑道の方向を最大主応力と直角方向とするか、不連続面の最大卓越方向と平行方向にする〕 中部(事)掘削影響試験と同方向	—
	物性 強度、変形	中部(事)掘削影響試験と同等	—
総合評価	不連続面の幾何学性状が評価可能で湧水が比較的少ない岩盤において、卓越する不連続面と直角方向に坑道を掘削する	粘土グラウトが可能な程度の湧水がある、あるいは湧水状況を作り得る岩盤	

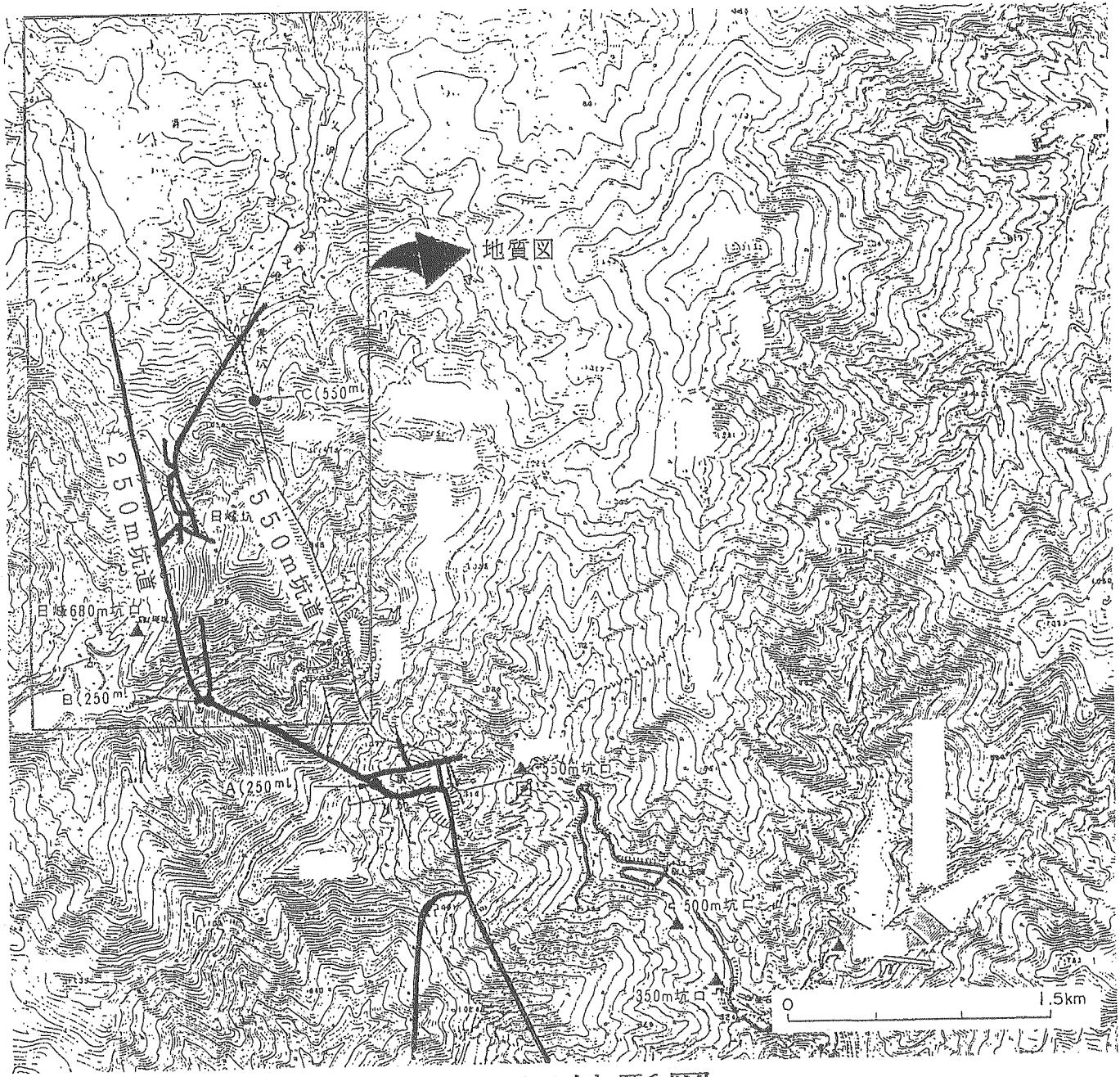


図-4.1 周辺地形図

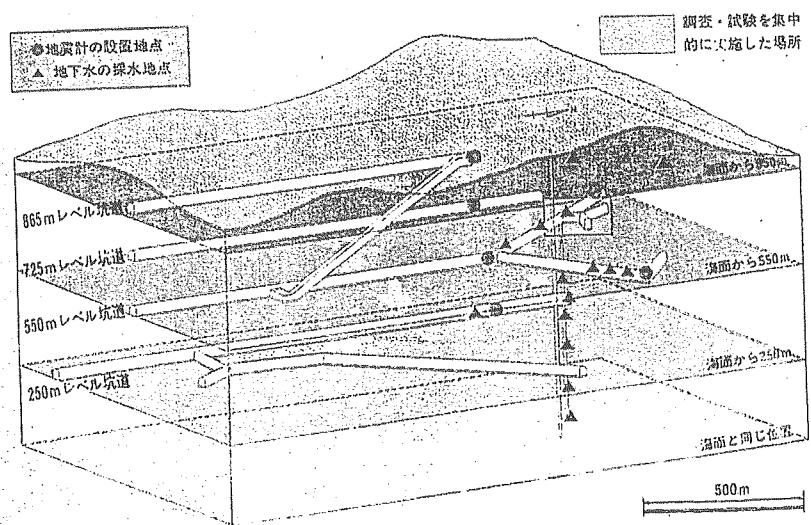


図-4.2 坑道配置図

表-4.3-(1) 評価項目に対する試験方法の評価

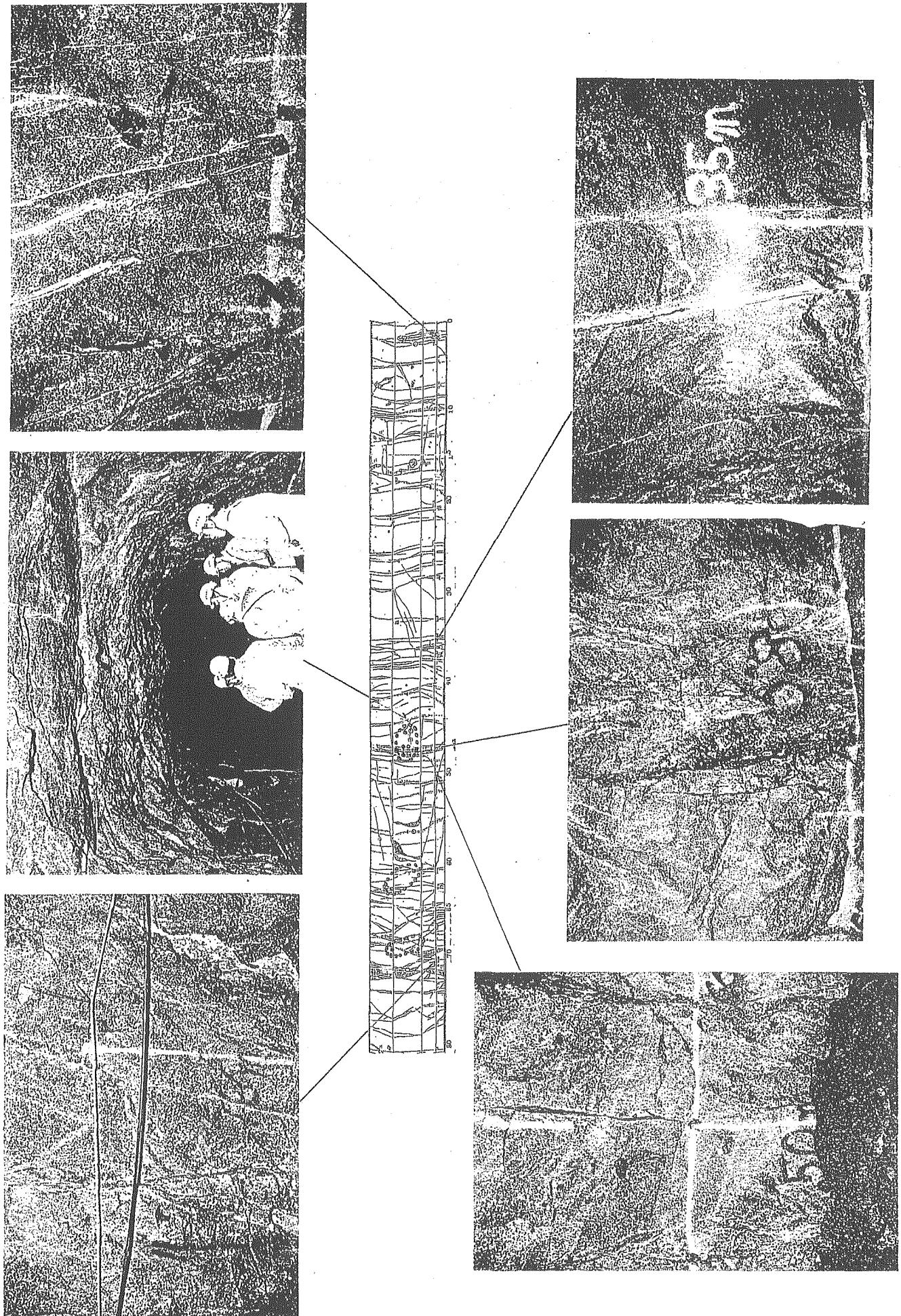
評価項目		評価手法(試験方法)	評価される内容	動燃基本計画	評価項目に対する重要度	備考
サ イ ト 特 性 の 評 価	亜裂性状	断面観察 孔内壁面観察(ボアホール・スキャナー) ボーリングコア観察 ボアホールレーダー(反射法)	危陥位置、方向(走向傾斜)、充填物 危陥位置、方向(走向傾斜)、閉口幅、充填物 危険位置、方向(傾斜角)、充填物 反射パターンによる孔位置、連続性	○ ○ ○ ○	A A A C	
	岩盤の力学特性(初期地圧)	オーバーコアリング法 水圧破碎法	初期地圧	○	A	
	岩盤の力学特性(強変特性)	一軸試験 三軸試験 せん断試験 引張試験(引裂試験)	一軸圧縮強度 σ_c 粘着力、内部摩擦角(ピーカ、残留) " " 引張強度	○ ○ ○ ○	A A B B	
	岩盤の力学特性(変形特性)	一軸試験 三軸試験 クリープ試験 孔内載荷試験 平板載荷試験	弾性係数 " " クリープ係数 弾性係数(載荷時、除荷時)、変形係数 弾性係数(載荷時、除荷時)、変形係数、クリープ係数	○ ○ ○ ○	A A A B	
	力学特性の変化	孔内壁面観察(ボアホール・スキャナー) 孔内載荷試験 岩盤応力測定(オーバーコアリング) " (振動弦地圧計)	既存危険の閉口幅の増加量、新規危険の形成 弾性係数、変形係数 三次元応力変化	○ ○ ○	A B C	
		弾性波測定(トモグラフィー、屈折法) ボアホールレーダートモグラフィー 比抵抗トモグラフィー 岩盤変位測定 内空変位測定 AE測定	速度、振幅減衰 電磁波速度、振幅減衰 比抵抗 変位 内空変位 AE	○ ○ ○ ○ ○	A A C A B	継続方式では適用が難しい、
	み 評 価	水理学的特性の変化	透水係数 " " " "	○ ○ ○	B B C	
		低正ルジョン試験 パルス試験 クロスホール透水試験				

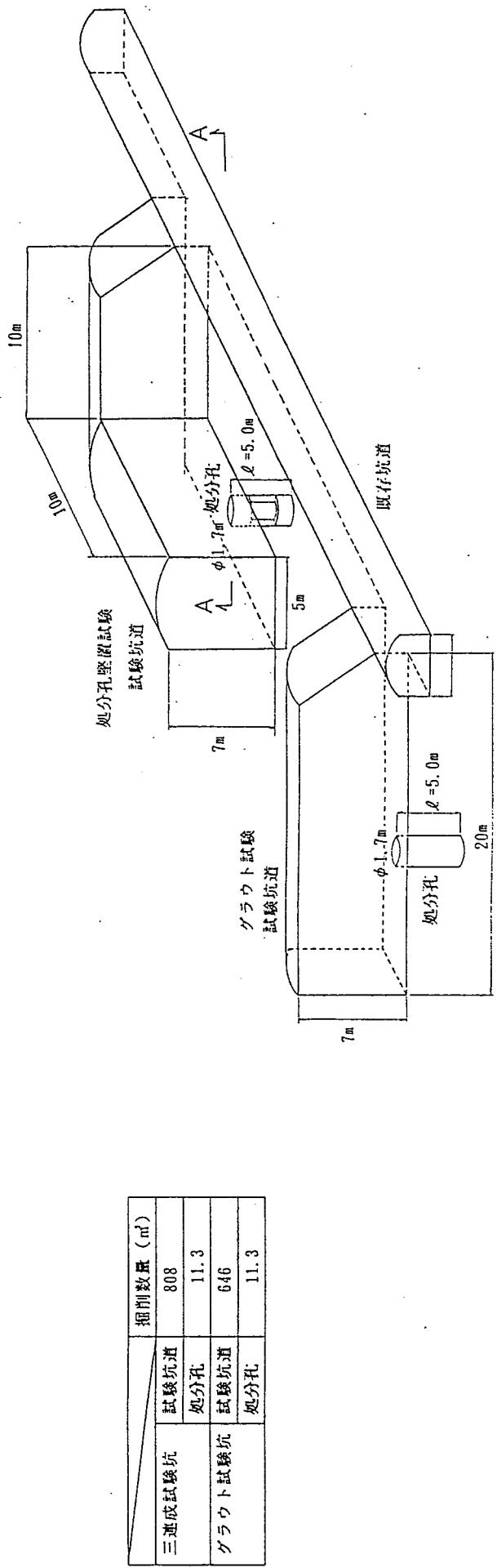
表-4.3-(2) 評価項目に対する試験方法の評価

	評価項目	評価手法(試験方法)	評価される内容	動燃評価項目 に対する 重要度	備考
グ ラ ウ ト ト ラ ウ ト	粘土グラウト工法の止水効果	注入孔の孔内破裂観察(ボアホールスキャナ) 注入完了時チエック孔のコア観察 注入完了時チエック孔の孔内破裂観察 区间透水量 ルジオング試験 バルス試験 クロスホール透水試験	開口角度の有無 " " " 透水性 透水係数(ルジオング値) " " 透水係数(ルジオング値) 開口角度への粘土粒子の吸着状況	○ A A A A A B ○ A	
	粘土粒子の吸着安定性	計測孔の孔内破裂観察(ボアホールスキャナ) クロスホール透水試験 ルジオング試験	透水係数(ルジオング値)	○ A A	
	改変範囲	ボアホールレーダートモグラフィー 弾性波モグラフィー 共振応答モグラフィー 注入完了時チエック孔のコア観察 注入完了時チエック孔の孔内破裂観察 (ボアホールスキャナ)	電磁波速度、振幅減衰 弹性波速度、振幅減衰 比抵抗値 開口角度への粘土充填度 " "	○ B ○ B A A	
効果の確認記					

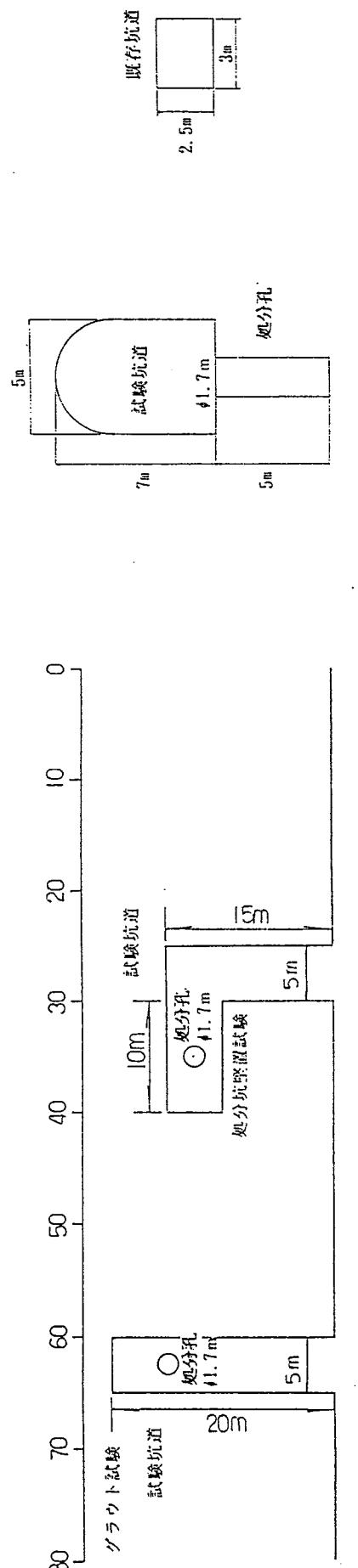
250m レベル坑道の壁面状況

写真-4.1





△-△断面図



△-△断面図

図-4.3 処分坑道縦置方式の概要

坑道堅置人工バリア試験

1) 試験坑道掘削

スムースプラスティング工法を用いて、幅5m、高さ8m、長さ45m（計測坑道：幅5m、高さ8m、長さ15m、グラウト試験坑道：幅5m、高さ8m、長さ15m、掘削影響、連成試験坑道：幅5m、高さ8m、長さ15m）の試験坑道を掘削する。

2) 坑道壁面亀裂観察

試験坑道壁面の亀裂観察を行なう。

幅5m、高さ8m、長さ45m（計測坑道15m、グラウト試験坑道15m、掘削影響、連成試験坑道15m）

3) 計測ボーリングの削孔

試験坑道より計測ボーリング削孔を行う。

掘削影響試験

○ 孔内載荷試験 : $\phi 66\text{mm} \times 6$ 孔 ($L = 5\text{ m}$)

○ 孔間透水試験 : $\phi 66\text{mm} \times 9$ 孔 ($L = 7\text{ m}$)

○ 弹性波トモグラフィー : $\phi 66\text{mm} \times 9$ 孔 ($L = 5\text{ m}$)

なお、孔内載荷試験孔、孔間透水試験孔は、「処分孔を対象とした粘土グラウト技術の適用試験（グラウト試験2）」のサイトに掘削する。

4) 計測孔内壁面亀裂観察

ボアホールスキャナーにより計測ボーリング孔内（上記3）の24孔）の壁面観察を行う。

5) 初期応力測定

オーバーコアリングによる応力解放法で初期応力測定を行なう。

6) 孔内載荷試験

ボアホールジャッキを用いた孔内載荷試験を、「処分孔を対象とした粘土グラウト技術の適用試験（グラウト試験2）」のサイトにおける以下の地点で行なう。

掘削影響試験用ボーリング孔 3地点×6孔=18地点

7) 岩盤中の計器の設置

岩盤中に掘削影響試験用計測機器を設置する。

○ 弹性波受信器 : 3地点×5孔=15地点

○ 弹性波発信器 : 3地点×4孔=12地点

8) 孔間透水試験

試験処分孔掘削予定位置中心に削孔したボーリング孔を注水孔とし、周辺に配置した8孔を観測孔とした定流量注水試験を行う。なお、試験は、「処分孔を対象とした粘土グラウト技術の適用試験（グラウト試験2）」のサイトで行う。

9) トモグラフィー

処分孔掘削前に、8)で埋設した計器を利用して弹性波トモグラフィーの計測を行う。

10) 孔間透水試験

試験処分孔掘削の影響を知るため、8)で行った同じ位置で定流量注水試験を行う。
[処分孔を対象とした粘土グラウト技術の適用試験（グラウト試験2）と共に用]

11) 孔内載荷試験

処分孔の掘削影響を把握するため、試験処分孔掘削前に行った同じ地点で6)と同様の孔内載荷試験を行う。

12) トモグラフィー

処分孔掘削の影響を把握・確認するため、処分孔掘削後に10)と同じ弾性波トモグラフィーおよび弾性波探査屈折法の計測を行なう（50cmピッチ）。

13) トモグラフィー

加熱後、9)、12)と同様のトモグラフィーの測定を行なう。

グラウト試験

(1) 粘土系グラウト技術の基礎試験（グラウト試験1）

1) 透水試験孔の削孔およびコア観察

$\phi 66\text{mm} \times 4$ 孔 ($L = 7\text{ m}$)

2) 注入孔の削孔およびコア観察

$\phi 66\text{mm} \times 23$ 孔 ($L = 5\text{ m}$)

3) 孔内壁面亀裂観察

注入前に、ボアホールスキャナーにより透水試験孔内（4孔）、注入孔内（23孔）の壁面観察を行う。

4) 湧水量、湧水圧測定

削孔した全孔（27孔）について、注入前に湧水量・湧水圧を測定する。

5) 低圧ルジオン試験

削孔した全孔（27孔）について、注入前に低圧ルジオン試験を行う。

6) 孔間透水試験

注入前に1), 3)に示した4孔での孔間透水試験を行う。

7) グラウト注入

1次孔から4次孔まで段階的に、注入圧、濃度をパラメータとしてグラウト注入を行う。

$\phi 66\text{mm} \times 23$ 孔 (注入区間 $L = 4\text{ m}$)

8) 孔間透水試験

注入の各段階において、注入圧をパラメータとした孔間透水試験を行う。

9) 孔内壁面亀裂観察

注入後に、ボアホールスキャナーにより注入孔（23孔）の壁面観察を行う。

10) 低圧ルジオン試験

注入した全孔（23孔）について、注入後の低圧ルジオン試験を行う。

(2) 処分孔を対象とした粘土グラウト技術の適用試験（グラウト試験2）

- 1) 計測孔の削孔
孔間透水試験孔 $\phi 66\text{mm} \times 9$ 孔 ($L = 7\text{ m}$)
- 2) 孔内壁面亀裂観察
ボアホールスキャナーにより、処分孔掘削前の透水試験孔内の壁面観察を行う。
- 3) 淌水量、湧水圧測定
透水試験孔の湧水量、湧水圧を測定する。
- 4) 透水試験孔の低圧ルジオン試験
削孔した全孔（9孔）について、注入前に低圧ルジオン試験を行う。
- 5) 処分孔の掘削
大口径岩盤掘削機を用いて、直径1.7m、深さ5mの試験処分孔を掘削する。
- 6) 処分孔壁面亀裂観察
目視、クラックスケールにより、処分孔内の亀裂状況を詳細に調査する。
- 7) 淌水量測定
注入前、注入中、注入後の各段階において、処分孔内の湧水量を測定する。
- 8) 処分孔の低圧ルジオン試験
注入前、注入中、注入後の各段階において、処分孔の低圧ルジオン試験を行う。
- 9) 処分孔と透水試験孔の孔間透水試験
注入前、注入後の各段階において、処分孔と透水試験孔の孔間透水試験を行う。
(注入前は掘削影響試験と共に)
- 10) グラウト注入
1stステージと2ndステージに分けて、低注入圧、低濃度から高注入圧、高濃度までグラウト注入を行う。
- 11) 処分孔壁面亀裂観察
注入後の亀裂への目づまり状況を調査する。
- 12) 透水試験孔内壁面亀裂観察
ボアホールスキャナーにより、注入後の透水試験孔内の壁面観察を行う。
- 13) 透水試験孔の低圧ルジオン試験
グラウト注入後に、処分孔と重複しない周辺の透水試験孔（8孔）の低圧ルジオン試験を行う。

- 14) チェック孔の削孔およびコア観察
 $\phi 66\text{mm} \times 10$ 孔 ($L = 7\text{ m}$)
- 15) チェック孔壁面亀裂観察
ボアホールスキャナーにより、チェック孔内 (10孔) の壁面観察を行う。
- 16) チェック孔の低圧ルジオン試験
チェック孔 (10孔) の低圧ルジオン試験を行う。
- 17) 計測孔およびチェック孔の注入
計測孔 (8孔) およびチェック孔 (10孔) の注入を行う。

表-4.4 処分孔設置試験工事（掘削影響試験）

項目	年度		
	平成5年度	平成6年度	平成7年度
①試験坑道掘削、坑道壁面亀裂観察	○→○		
②計測ボーリング削孔、孔内壁面亀裂観察（掘削影響）	○→○	○→○	
③初期応力測定	○→○	○→○	
④室内岩石試験	○→○	○→○	
⑤孔内載荷試験	○…○○→○	○…○○→○	
⑥岩盤内計器の設置（掘削影響）	○→○	○→○	
⑦孔間透水試験	○…○	○…○	
⑧トモグラフィー	○→○	○→○	
⑨処分孔掘削、孔内亀裂観察	○→○	○→○	
⑩、⑪原位置人工バリア試験の総まとめ	○→○	○→○	

* 工程は、隣接試験の影響を受けないものと仮定する。

- ① : 処分坑道および処分孔の掘削
 ② : 処分孔の掘削影響試験

表-4.5 グラウト試験工程

項目	年度		
	平成5年度	平成6年度	平成7年度
1. 予備調査および計画			
2. グラウト試験1 (基礎試験)			
(1)透水試験孔削孔			
(2)グラウト孔削孔、注入	○→○	○→○	
(3)定流量孔開通透水試験	○→○	○→○	
(4)低圧ルジオノ試験	○→○	○→○	
(5)孔内壁面観察観察	○→○	○→○	
3. グラウト試験2 (適用試験)			
(1)計測孔削孔	○→○	○→○	
(2)処分孔削削、壁面観察観察			
(3)チェック孔削孔		○→○	
(4)グラウト注入		○→○	
(5)低圧ルジオノ試験		○→○	
(6)定流量孔開通透水試験		○→○	
(7)孔内壁面観察観察		○→○	
4. 仮設・撤去			
(1)搬入	○→○		
(2)搬出		○→○	
5. 壁面観察、湧水量測定、試験管型		○→○	
6. グラウト試験結果のまとめ		○→○	

* 工程は、隣接試験の影響を受けないものと仮定する。