

本資料は2001年10月04日付で

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（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

概 要

1993年2月

鹿島建設株式会社

地層処分システムにおけるシーリング研究（II）

概要集

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1993年2月

鹿島建設株式会社

この資料は、動燃事
従って、その取扱には
は事業団の承認が必要
さい。

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松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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

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

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

, ものです。
及、引用等に
注意してください

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to a 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

1993年3月

区分変更

公開資料

地層処分システムにおけるシーリング研究（II）

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 吉田 宏 | 西 謙治 | 磯辺 隆寿 | 坂野 且典 |
| 沢内 至武 | 清水 保明 | 塩崎 信久 | |
| 田中 協一 | 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する圧縮固化体の物性値（強度、圧密特性、膨潤特性、透水性、熱物性）をまとめ、粘土のせん断圧密拳動を記述する構成式に必要な土質パラメータを整備する観点から、今後行うべき試験の検討を行った。また、透水係数の温度依存性や熱伝導率モデルに関する評価を行った。
- 2) 基本的な地下水拳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）で埋め戻す場合の地下水位低下及び再冠水現象を解析的に検討した。
- 3) 従来のダムグラウトの経験に基づいて、原位置でのグラウト試験計画を立て、室内試験においてベントナイトスラリーによる粘土系グラウトの注入試験を行った。

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：040D0190



Investigation of Sealing in Geological Disposal

H.Yoshida K.Nishi T.Isobe K.Banno
Y.Sawauchi Y.Shimizu N.Shiozaki
K.Tanaka 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 passages (disposal pits, disposal tunnels, liaison tunnel and construction tunnels) that were excavated for the purpose of the disposal, with one of the engineered barriers, such as, backfill materials, plugs or grout. It is important to ensure the isolation preservation of the disposed materials in such a way.

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

- 1) Based on the compilation of data for the compacted bentonite, which includes strength, consolidation characteristics, swelling properties, hydraulic conductivity and thermal properties, future experiments to be executed are evaluated for preparation of soil parameters used in a constitutive equation.
- 2) Groundwater lowering and recharge process after backfilling by bentonite and sand mixture is simulated analytically, which serves to understand the basic groundwater behavior .
- 3) In-situ grouting experiments are planned in the light of experiences during dam constructions. Laboratory-scale grouting experiments are conducted using a material of bentonite slurry.

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.
Contract No. 040D0190

目次

| | |
|------------------------------------|------|
| 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 圧縮固化ペントナイトの作成 | 2-4 |
| 2.3 試験データの整理 | 2-6 |
| 2.3.1 強度試験 ((一軸、三軸)、引張り試験、弾性波速度測定) | 2-7 |
| 2.3.2 圧密試験 | 2-22 |
| 2.3.3 膨潤圧・膨潤量測定 | 2-25 |
| 2.3.4 透水試験 | 2-34 |
| 2.3.5 热物性 (热伝導率、比熱) | 2-38 |
| 2.4 データの吟味および評価 | |
| 2.4.1 圧密せん断特性について | 2-47 |
| 2.4.1.1 構成式 | 2-47 |
| 2.4.1.2 土質パラメータ | 2-49 |
| 2.4.2 透水係数について | 2-56 |
| 2.4.2.1 透水係数の温度依存性 | 2-56 |
| 2.4.2.2 低透水性媒体の透水試験 | 2-58 |
| 2.4.3 热伝導率モデルについて | 2-60 |
| 参考文献 | 2-66 |

| | |
|---------------------------|------|
| 3. シーリング手法の評価手法の検討 | |
| 3.1 目的 | 3-1 |
| 3.2 解析モデル | 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 |
| 3.3 解析手法 | 3-5 |
| 3.4 解析結果 | 3-6 |
| 3.5 まとめ及び今後の課題 | 3-15 |
| 3.5.1 まとめ | 3-15 |
| 3.5.2 今後の課題 | 3-15 |
| 参考文献 | 3-17 |
| 4. 試験設計 | |
| 4.1 原位置試験設計 | 4-1 |
| 4.2 室内グラウト試験 | 4-3 |
| 参考文献 | |
| 資料 ボーリング・グラウト工施工計画書 | |

図一覧

- 図2.1 圧縮成型方法の違い
- 図2.2(1) 一軸圧縮試験装置
- 図2.2(2) 三軸圧縮試験装置
- 図2.2(3) 弾性波速度測定装置
- 図2.3 圧縮固化ペントナイトの一軸圧縮強度と密度との関係
- 図2.4 圧縮固化ペントナイトの引張り強度と密度との関係
- 図2.5 圧縮固化ペントナイトの弾性波速度(v_p)と密度との関係 (23°C)
- 図2.6 弹性波速度(v_p)の温度依存性
- 図2.7 クニゲルVAを主材とする試料の弾性係数
- 図2.8 一軸圧縮強度の密度依存性
- 図2.9 一軸圧縮強度と飽和度との関係
- 図2.10 一軸圧縮強度と温度との関係
- 図2.11 三軸圧縮試験の結果（非排水強度）[飽和度100%]
- 図2.12 三軸圧縮試験の結果（せん断摩擦角）[飽和度100%]
- 図2.13 非排水強度の飽和度依存性（乾燥密度1.8）
- 図2.14 せん断摩擦角の飽和度依存性（乾燥密度1.8）
- 図2.15 弹性係数と間隙比との関係
- 図2.16 $e - \log p$ 曲線の例（試験番号H3-1）
- 図2.17 $\log p - \log m_v$ 曲線
- 図2.18 膨潤圧測定装置
- 図2.19(1) クニゲルVAの膨潤圧の時間変化
- 図2.19(2) クニゲルV1の膨潤圧の時間変化
- 図2.20(1) 圧縮固化ペントナイトの乾燥密度と膨潤圧との関係（クニゲルVA）
- 図2.20(2) 圧縮固化ペントナイトの乾燥密度と膨潤圧との関係（クニゲルV1）
- 図2.21 膨潤圧の温度依存性
- 図2.22 膨潤量測定試験の様子
- 図2.23 圧縮固化ペントナイトの膨潤量の測定
- 図2.24 膨潤量の時間変化

- 図2.25 長期透水試験装置
- 図2.26 透水係数と試料の乾燥密度、間隙比との関係
- 図2.27 透水係数の温度依存性
- 図2.28 圧縮固化ペントナイトの透水係数と測定時の動水勾配との関係
- 図2.29 热伝導率測定装置
- 図2.30 圧縮固化ペントナイトの熱伝導率
- 図2.31 圧縮固化ペントナイトの熱伝導率の温度依存性
- 図2.32 クニゲルV1の熱伝導率と密度との関係
- 図2.33(1) 热伝導率の温度依存性（クニゲルV1、平成2年度）
- 図2.33(2) 热伝導率の温度依存性（クニゲルV1、平成3年度）
- 図2.34 比熱測定系
- 図2.35 比熱の温度依存性（クニゲルV1）
- 図2.36 半径方向の応力測定可能なセル
- 図2.37 段階的に荷重を変化させたときの間隙比と軸方向および半径方向の応力との関係
- 図2.38 圧縮固化ペントナイトの膨潤圧と間隙比との関係
- 図2.39(1) 限界状態線（UU試験結果のプロット）[ケイ砂0%]
- 図2.39(2) 限界状態線（UU試験結果のプロット）[ケイ砂30%]
- 図2.40 限界状態線（ひずみ速度1%/hour）
- 図2.41 各試験装置の概念図
- 図2.42 热伝導率モデル
- 図2.43(1) 热伝導率モデルの比較（乾燥密度によるまとめ）
- 図2.43(2) 热伝導率モデルの比較（飽和度によるまとめ）
- 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 水頭コンター図（10年後・立坑掘削終了時）
- 図-3.7 水頭コンター図（30年後・処分場掘削終了時）

- 図-3.8 水頭センター図（50年後・処分場埋戻し終了時）
図-3.9 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4.1 粘土グラウト概念図
図4.2 注入装置配管系統図
図4.3 試験容器断面図
図4.4 試験材料の粒径加積曲線
図4.5 供試体及び三軸セル
図4.6 花崗岩コアの写真
図4.7 グラウト材の写真

表一覧

- 表2.1 ベントナイトの分類
表2.2 ベントナイトの特性比較
表2.3 現在までに行った物性試験と使用したベントナイト
表2.4 弹性係数と乾燥密度との関係式における係数
表2.5 圧密試験結果（圧密指数および圧密降伏応力）
表2.6 各圧密応力の下での体積圧縮指数
表2.7 構成モデル計算に使用するパラメータとそれを求めるための試験
表2.8 土質パラメータのまとめ
表2.9 透水係数と試料の温度
表2.10 水、空気の熱伝導率
表2.11 各熱伝導率モデルの計算値
表-3.1 透水係数及び空隙率
表-3.2 掘削・埋戻し工程
表4.1 注入試験前後の透水係数
表4.2 注入試験結果
表4.3 グラウト試験に関するパラメータ

1.研究の目的及び範囲

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め戻し材、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、シーリングにかか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、これまでの粘土系材料などの基本物性試験で得られたデータを基に材料特性の評価、構成式の検討を行うとともに、シーリング性能の評価手法の検討を行う。また、今後必要な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) 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

長期のシーリング性能を評価するためには、信頼性の高い物性データに基づいて材料特性を評価し、長期の性能評価に耐えうる構成式、モデル開発が必要になる。本年度は以下の項目を実施する。

a) 基本物性データの整理

昭和58年度以降に行われた室内試験で得られたデータについて、密度、温度そして水分状態を考慮して以下の括弧内の項目について整理を行う。(強度特性(圧縮試験、引張り試験、弾性波速度測定、圧密試験)、膨潤圧及び膨潤量、透水係数、熱物性値(熱伝導率、比熱))

b) データの吟味、評価

a) でまとめられた試験データについて、既存モデルへの適用性及び新たに開発すべきモデルの検討を行う。また、検討結果よりさらに測定すべき項目あるいは測定手法の検討を含めた今後の課題や問題点の抽出を行う。

(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事象シナリオに関する検討を行ってきた。本年度はこれらの検討の成果を基に、下記事象に対し予備的な検討を実施する。

- ・処分場建設に伴う地下水挙動(地下水位低下・再冠水)の評価
- ・立坑埋め戻し部の長期的沈下挙動の評価

(3) 試験設計

昨年度までに、シーリングシステムの基本概念の検討及び必要な室内試験及び原位置試験の基本設計を行ってきた。本年度はこれらの成果を受け、以下の項目を検討する。

a) シーリング試験の詳細検討

シーリングの内、特にグラウトにつき、原位置試験項目、計測項目、詳細検討を実施する。

b) 原位置試験に当たってのグラウト材の事前検討

グラウトは岩盤の透水性を低く押さえるために用いられるシーリング材の一種であり、原位置試験を行ってその機能評価を行わなければならない。そのためには、事前にグラウト材の性能を十分に把握しなければならない。よって、本年度は粘土系グラウトの性能把握のために、岩盤の開口幅、粘土の種類や濃度、注入圧力の因子がグラウト結果に与える影響を調べるために、文献調査及び室内試験を実施する。

2.材料の特性評価

ベントナイトはその長期的な安定性や自己シーリング性などから放射性廃棄物処分場のシーリング材として有望視されており、それを圧縮固化したものやあるいは他の構造材と混合したものは緩衝材や埋め戻し材に使用する目的で数々の評価研究が行われている。この章では、圧縮固化ベントナイトについて昭和58年以降に動燃委託研究の中で行われてきた物性値取得試験についてまとめを行い、今後の評価などに有効に使用できるデータベースとなるものを作成し、既存モデルへのデータの適用性や新たに開発すべきモデルの検討を行う。

2.1 使用材料

ベントナイトは粘土鉱物であるモンモリロナイトを主成分とし、石英、 α -クリストバライト、長石、雲母などの珪酸および珪酸塩鉱物や、方解石、ドロマイト、石膏などのアルカリ土類金属炭酸塩や硫酸塩鉱物を随伴する弱アルカリ性の粘土岩の名称で、商業的には一般に微粉体として市販されている。また、ベントナイトにはNaイオンに富み、多量の水を吸収して高い膨潤性を示すNaベントナイトとCaイオンやMgイオンに富み、膨潤性の低いCaベントナイトがあるが、さらに低膨潤性のCaベントナイトをソーダ処理して人工的にNa型に転換し、膨潤活性を付与した活性化ベントナイトの3種類がある。表2.1にベントナイトを交換性陽イオンや膨潤性の観点から分類した。

この章において以下にまとめる内容は、ベントナイトとしてクニミネ工業(株)のクニゲルV1（商品名）とクニゲルVA（商品名）の2種類を用いている。ベントナイトには多種多様の種類があるが、シーリング材として求められる条件として止水性及び自己シール性が重要であることを考えてNaベントナイトを選択、そして、粒径が小さく緻密な締固めができる、あるいは国産であるなどの理由からこれらのベントナイトを最終的に選択した。（実際の処分場建設を考えるときには、このほかに、経済的な因子や資源の確保が必要になる）この2つのベントナイトにに関する特性値を表2.2にまとめる。

| | 分類 | 特徴・用途など |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 交換性陽イオンに基づく分類 | Naペントナイト (ウェスタンペントナイト) | 交換性陽イオンとしてNaイオンを主とする天然のペントナイトで、水中で高い膨潤性を示し、容易に分散して安定なコロイド分散液となる。山形県月布産、米国ワイオミング産ペントナイトが代表的Naペントナイトである。鋳物用鋳型の粘結剤、ボーリング泥水、その他広い用途がある。 |
| | Caペントナイト (サルーンペントナイト) | 交換性陽イオンとしてCaイオンやMgイオンを主とする天然のペントナイトで、水中で低膨潤性である。水と共に練和すると膨潤するが、分散しない。鋳物の生型用粘結剤として用いられる。宮城県蔵王産や米国ミシシッピ産ペントナイトが代表的。また、ヨーロッパ、イギリスのフライアースは典型的Caペントナイトである。 |
| | 活性化ペントナイト (Na交換ペントナイト) | Caペントナイトを人工的にNa交換したペントナイトで、水中で高い膨潤性を示し、容易に分散するが、フロキュレート系を生じる。主に鋳物生型用粘結剤として用いられ、優れた性質を示す。 |
| 膨潤性に基づく分類 | 高膨潤性ペントナイト | 水中でペントナイト2gが20ml以上の膨潤容量を示すもの。モンモリロナイト分の多いNaペントナイト。活性ペントナイト。 |
| | 中膨潤性ペントナイト | 水中でペントナイト2gが20~10mlの膨潤容量を示すもの。NaペントナイトとCaペントナイトの中間的な陽イオン組成のペントナイトやモンモリロナイト分の比較的少ないNaペントナイト。 |
| | 低膨潤性ペントナイト | 水中でペントナイト2gが10ml以下の膨潤容量を示すもの。Caペントナイト。 |

表2.1 ペントナイトの分類

| | クニゲルVA | クニゲルV1 |
|-----------------------------|----------|---------|
| 含水比 % | 7 | 6.4 |
| 見かけ比重 g/cm ³ | 0.69 | 0.66 |
| -200mesh % | 99.9 | 98.7 |
| -250mesh % | 99.9 | 95 |
| +325mesh % | 0.7 | 8.6 |
| 膨潤力 ml/2g | 28 | 20 |
| pH | 10.1 | 10 |
| 導電率 $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 355 | 315 |
| M.B.吸着量 mmol/100g | 91 | 72 |
| C.E.C. meq/100g | 77.4 | 70.3 |
| 浸出cation | | |
| Na+ | 63.7 | 61.1 |
| K+ | 1.8 | 1.5 |
| Mg++ | 5.8 | 12.2 |
| Ca++ | 57.9 | 23.4 |
| total | meq/100g | 98.2 |
| 鉱物組成 | | |
| モンモリロナイト | ◎ | ◎ |
| クリストバライト | -- | -- |
| 石英 | ○ | ○ |
| 長石 | ± | ○ |
| その他 | calcite | calcite |
| 示差熱分析 | | |
| 脱水温度 °C | 114 | 113 |
| 脱OH温度 °C | 685 | 689 |

◎：30%以上、○：10~30%、△：2~10%、±：2%以下

表2.2 ベントナイトの特性比較

混合する材料としては、結晶質系および堆積岩系の観点からそれぞれケイ砂と泥岩粉を選び、また核種の吸着性が高いと言われるゼオライトについてもその混合材のいくつかの物性値について若干の測定を行っている。

ケイ砂は珪酸分に富んだ石英砂の総称であり、今回の試験で用いたものは愛知県産5号ケイ砂で真比重2.6、自然含水比1%以下である。

試験に用いた泥岩粉は真比重2.6、自然含水比29%、単位体積重量1.9g/cm³、弾性波速度Vp=1.8km/sec, Vs=0.88km/secである。また、X線回折の結果モンモリナイト等が同定され、膨潤圧を促す要因を含んでいると考えられる。

以下の項では、それぞれの測定について測定方法を示し、データのまとめを行う。

2.2 圧縮固化ペントナイトの作成

ペントナイトは通常、粉体で市販されているため、シーリング材料または構造材として使用するためには圧縮成型する必要がある。均質な圧縮固化体を作製するためには等方的に圧縮されることが好ましいが、装置が大掛かりになるため、鋼製のモールドに、粉体のペントナイトを適量入れて、一次元的に締固める方式を採用した。昭和58年度から昭和62年度までと、平成23年度で採用した方法ではモールドの構造が図2.1に示されるように異なっている。出来上がりの均質性は後者の方が前者より若干よくなっている。

混合する材料として、ケイ砂と泥岩粉を用いた。これらの材料は炉で乾燥された後にミキサーでペントナイトと十分に攪拌混合された後、上記の方法で圧縮固化されている。なお、混合する時、ペントナイトは自然乾燥状態（含水比：6~10%、データを整理する際には代表値として7%を採用した）のものを用いた。

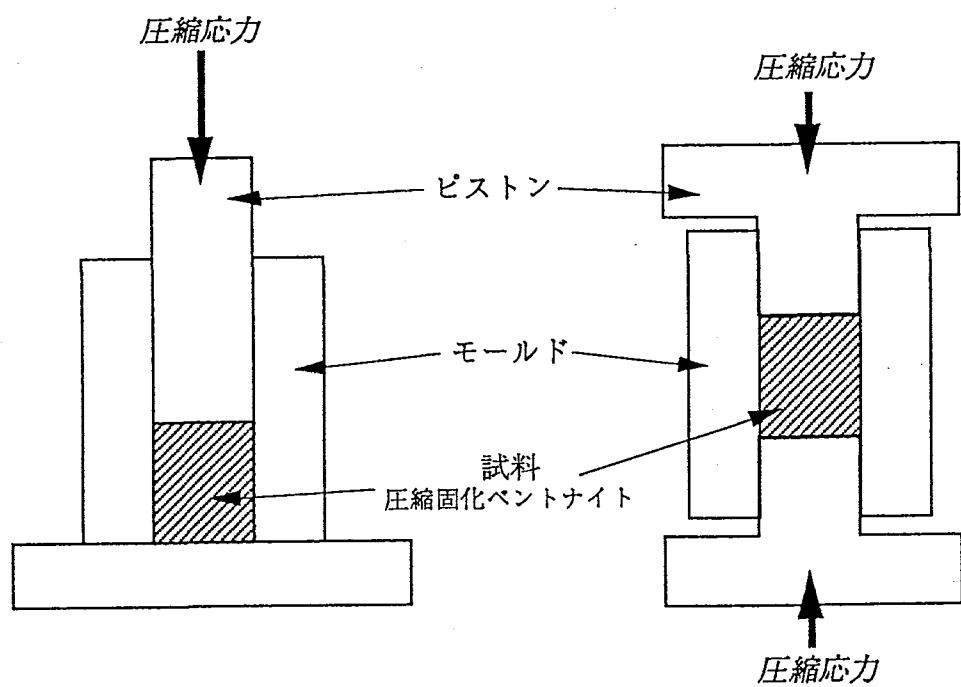


図2.1 圧縮成型方法の違い

以下に両者の成型方法について記述する。

方法A

円筒セルは2種類準備した。一軸及び三軸圧縮試験、引張り試験の試料作成のために内径50mm、高さ200mm、厚さ25mmのセルを、熱伝導率測定、弾性波速度測定そして、膨潤圧測定のためには内径100mm、高さ200mm、厚さ25mmのセルを用いた（後に熱伝導率用の試料の作成には内径110mmのモールドを用いた）。圧縮応力は固化後のペントナイトの密度を変化させるために、10,30,50,70MPaなどに変化させた。圧縮されたペントナイトの脱型は、円筒セルの下部に中空の鋼円盤を設置してピストンで押し抜いて行った。なお、この時の押し抜き力は0.1~0.5ton程度であった。

方法B

円筒セルの上下からピストンを挿入して押し固める方法。方法Aでは上からピストンで押し固めを行ったため、試料の上部が下部と比較すると密度が大きくなつた。それを解消するために、上下から押し固めて出来るだけ試料の密度が均一になるようにした。それぞれの試験に対するモールドの大きさは方法Aと同じである。

2.3 試験データの整理

表2.3に昭和59年度から平成3年度にかけて実施した試験項目をまとめる。なおこの表のなかで示されている報告書の番号は以下のとおりである。

- [1]昭和59年度：人工バリアのためのシールおよびプラグに関する研究
- [2]昭和60年度：人工バリアのためのシールおよびプラグに関する研究(II)
- [3]昭和61年度：地層処分における人工バリアの研究
- [4]昭和62年度：処分場の閉鎖技術に関する調査・試験研究
- [5]平成元年度：地層処分におけるバックフィル候補材料に関する調査
- [6]平成2年度：地層処分におけるバックフィル材料に関する研究
- [7]平成3年度：地層処分システムにおけるシーリング研究
- [8]平成2年度：緩衝材の力学的物性値取得のための試験
- [9]平成3年度：緩衝材の力学的物性値取得のための試験(II)

以下の項で各種の試験データについてその試験方法と結果についてまとめる。

| 報告書 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 透水係数 長期透水試験 | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ● | | |
| 膨潤圧 膨潤量 | ○ | ○ | ○ | | | | | ● | ● |
| 熱伝導率 比熱 熱膨張率 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ● | | ● |
| 一軸圧縮試験 三軸圧縮試験 | ○ | ○ | ○ | | | | | ● | ● |
| 引張り試験 弾性波速度 | ○ | ○ | ○ | | | | ● | ● | ● |
| 圧密試験 クリープ試験 長期クリープ試験 | | | | | ○ | ○ | ● | ● | ● |
| x線回折 リーチング試験 | | | | ○ | | | | | |

○：クニゲルVA、●：クニゲルV1

表2.3 現在までに行った物性試験と使用したベントナイト

2.3.1 強度試験（一軸、三軸圧縮試験、引張り試験、弾性波速度）

1) 試験方法

一軸及び三軸圧縮試験（UU試験）及び引張り（圧裂）試験、弾性波速度測定は土質試験法または日本国有鉄道編地質調査標準示方書に則て行った。それぞれの試験装置又は実施状況を図2.2(1)～(3)に示す。

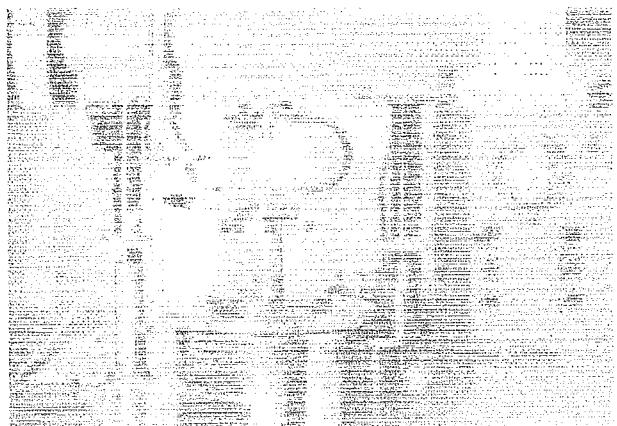


図2.2(1) 一軸圧縮試験装置

(株)マルイ製

最大荷重:5ton

載荷速度制御範囲:0.05～1.0t/min

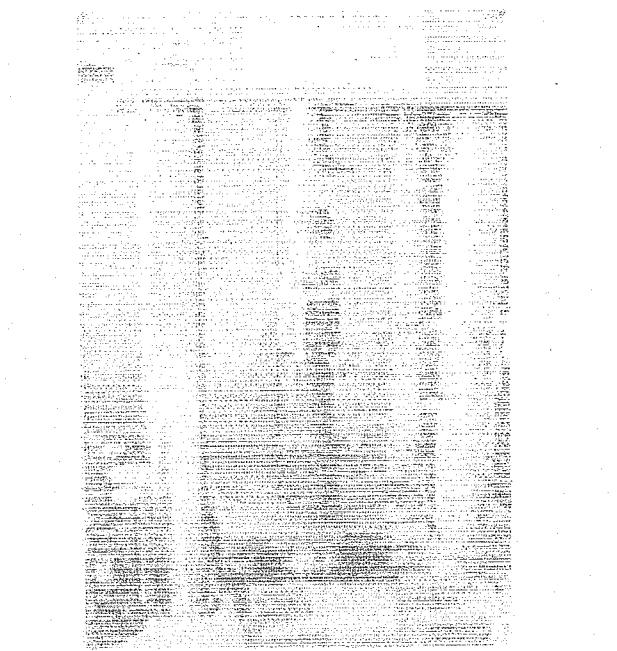


図2.2(2) 三軸圧縮試験装置

(株)マルイ製

最大軸荷重:100ton

最大拘束圧:100MPa

ひずみ、応力制御

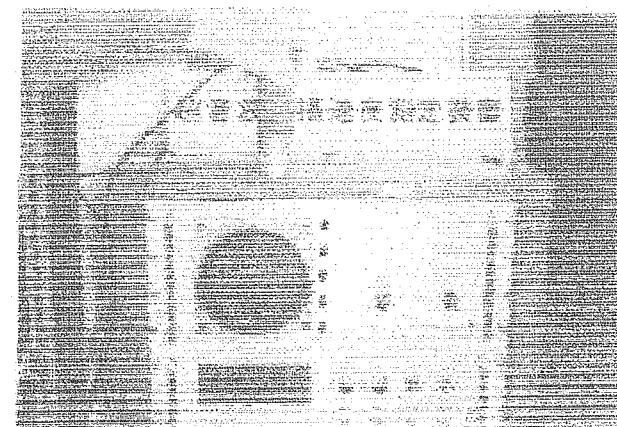


図2.2(3) 弾性波速度測定装置

(株)開発電子製

センサー周波数:200kHz

2) 試験結果

使用したペントナイトは、昭和58年度から平成元年度ではクニミネ工業(株)のクニゲルVA、またそれ以降は同社のクニゲルV1と年度によって異なるため、それぞれで試験結果をまとめる。

《クニゲルVA》

図2.3、図2.4は報告書[2]のデータをもとに試料の密度と一軸圧縮強度との関係、試料密度と引張り強度との関係を示している。図2.5、図2.6は同じく報告書[2]のデータをもとにして、23℃における試料密度と弾性波速度(p波)との関係、そして試料の温度と弾性波速度の関係を示している。また、図2.7(1)には一軸圧縮試験で求めた E_{50} の結果を試料の乾燥密度でまとめたものであり、図2.7(2)はポアソン比を0.4と仮定して求めた弾性係数(*)を図2.7(1)と比較できるようにまとめたものである。混ぜた材料や密度に関する弾性係数の傾向は、下の②に示すような一軸圧縮強度や引張り強度の傾向とほぼ同じであるが、ケイ砂が多く混ぜられた材料は、密度を大きくしても、弾性係数があまり変化していない。なお、図2.7(1)と図2.7(2)を比較してみると、前者の値はおおよそ後者の1/2になっている。仮定したポアソン比を0.46にするとおおよそ2つの図の上で弾性係数は同じ値となる。

クニゲルVAを試料として用いた圧縮固化体の強度物性について以下のことことがわかる。

①一軸圧縮強度 σ_c 、引張り強度 σ_t 、弾性波速度は試料の密度が大きくなるにしたがって増加する。室温における σ_c 、 σ_t と試料密度との関係を図2.4、2.5から最小二乗近似で読み取ると、以下の式で表すことができる。なお、式中の ρ_t は試料密度（湿潤）である。

$$\sigma_c [\text{MPa}] = 2.7 \times 10^{-3} \exp(3.9 \rho_t)$$

$$\sigma_t [\text{MPa}] = 5.7 \times 10^{-4} \exp(3.5 \rho_t)$$

②ペントナイトに混合する材料により、強度物性の変化の傾向が異なる。ケイ砂を混合すると、一軸圧縮強度、引張り強度ともにその混合割合が大きくなるにしたがって小さく

(*) 弹性波速度(v_p)と弾性係数 E およびポアソン比 ν との間には以下の式が成立つ。

$$E = \frac{v_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

なってゆくのに対し、泥岩粉を混合すると逆に強度が大きくなっている。

これは混合する材料のお互いの粒度特性や鉱物学的な性質、圧縮固化方法に左右されているためと思われるが、今後さらに影響因子を明らかにするための試験が必要であると思われる。

③圧縮固化体の弾性波速度は温度条件から大きな影響を受けない。

④弾性係数は試料の密度が大きくなるに従って増加し、ベントナイトに混ぜる材料によって②で示した様な傾向を示す。また、ケイ砂の混合割合が大きい場合は、試料の密度を大きくしても弾性係数はほとんど変化しない。表2.4に図2.7(1)をもとにして弾性係数が試料の乾燥密度 ρ_{dry} と linear の関係があるとして求めた式の係数をまとめた。

| | a | b |
|------------|------|-------|
| VA+sand10% | 580 | -690 |
| VA+sand30% | 430 | -600 |
| VA+sand50% | 260 | -390 |
| VA+mud10% | 1440 | -2130 |
| VA+mud30% | 1870 | -2760 |
| VA+mud50% | 1080 | -1270 |

表2.4 弾性係数と乾燥密度との関係式における係数 ($E=a \cdot \rho_{dry} + b$)

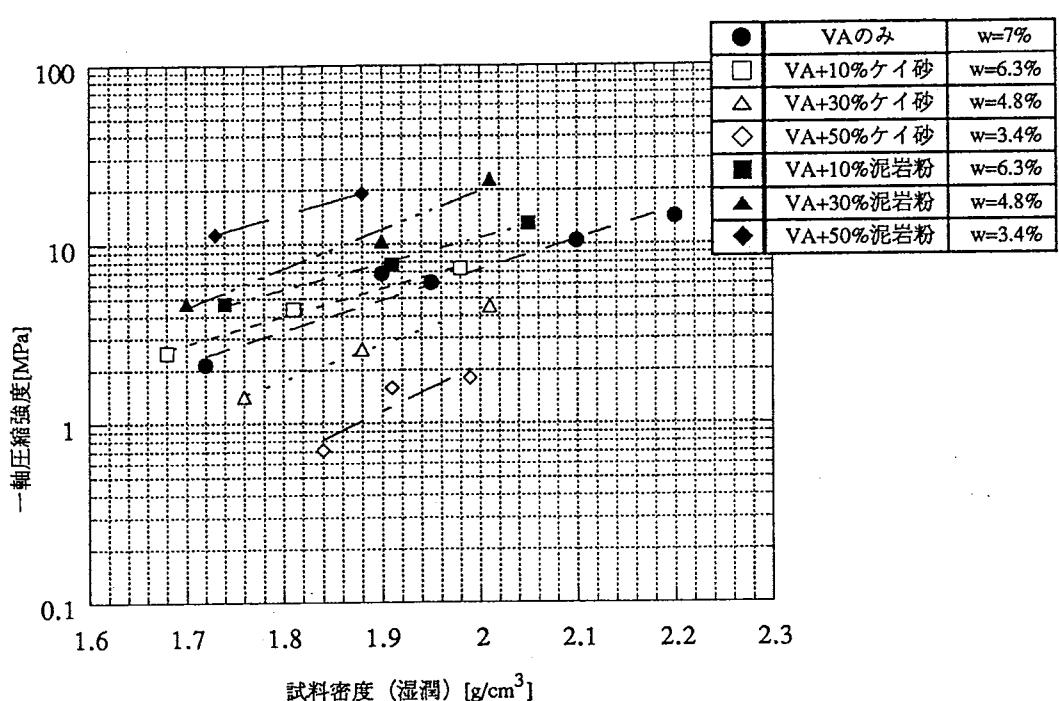


図2.3 圧縮固化ペントナイトの一軸圧縮強度と密度との関係

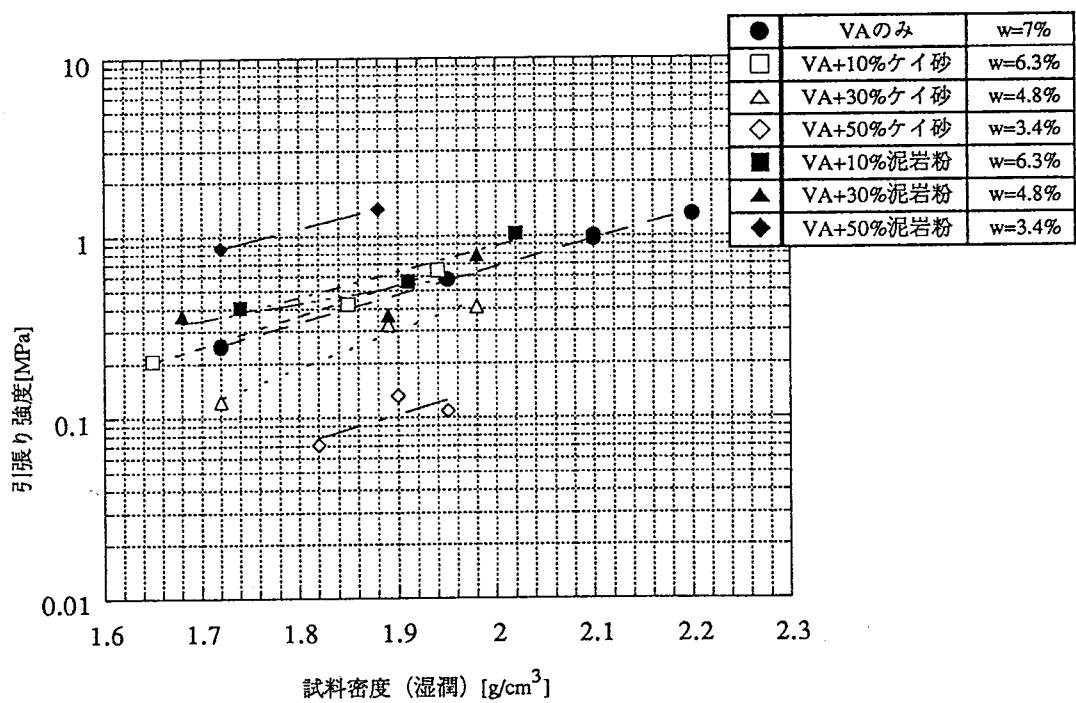


図2.4 圧縮固化ペントナイトの引張り強度と密度との関係

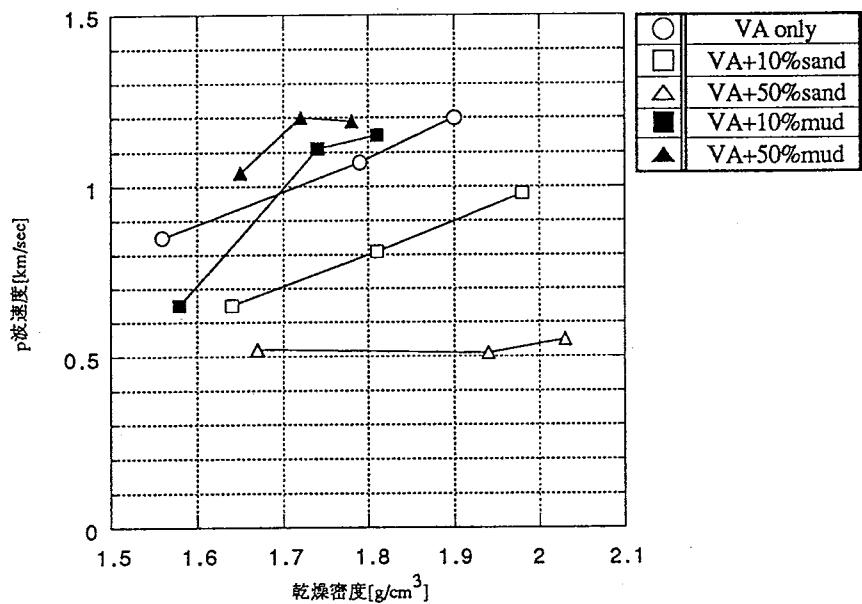


図2.5 圧縮固化ベントナイトの弾性波速度(v_p)と密度との関係 (23°C)

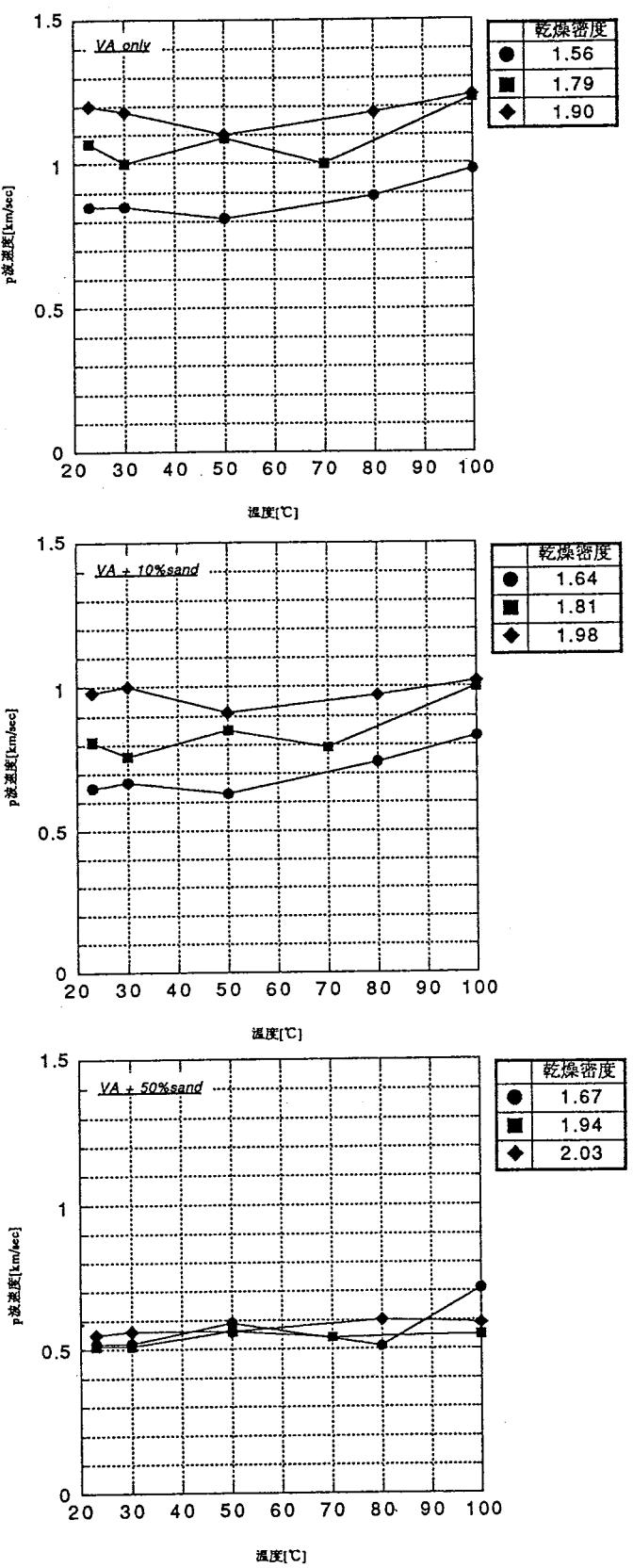


図2.6(1) 弾性波速度(v_p)の温度依存性

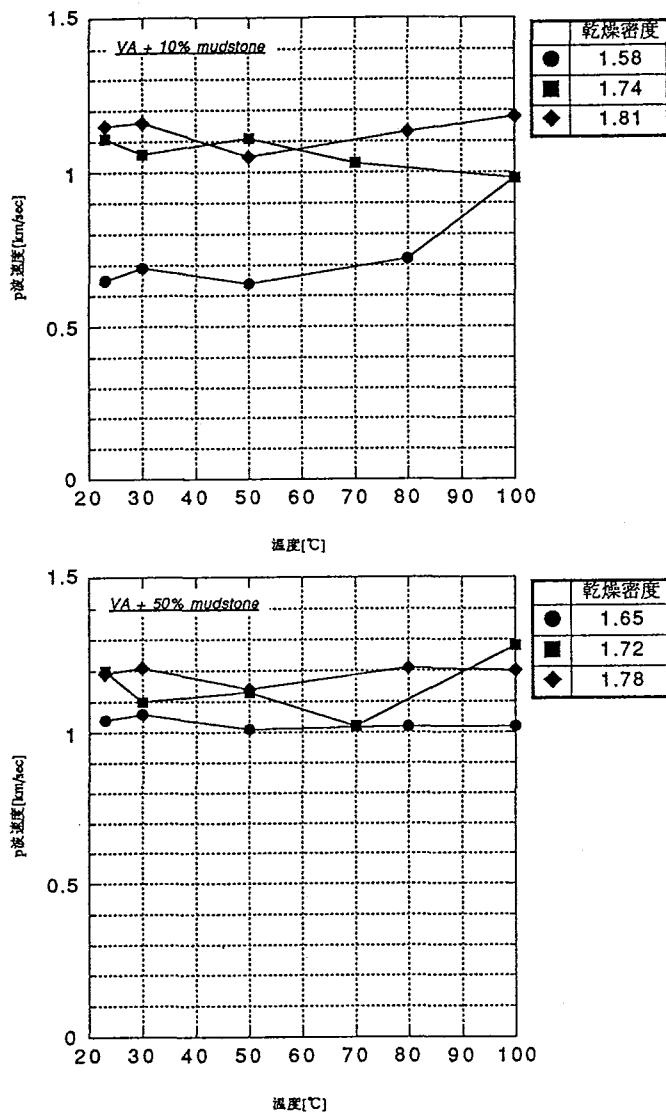


図2.6(2) 弾性波速度(v_p)の温度依存性

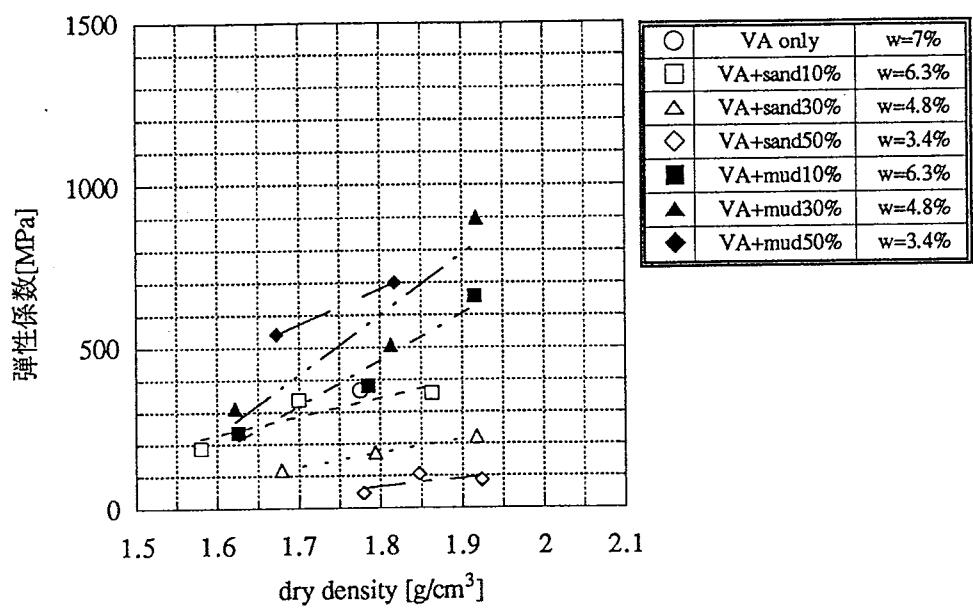


図.7(1) クニゲルVAを主材とする試料の弾性係数（一軸圧縮試験結果より）

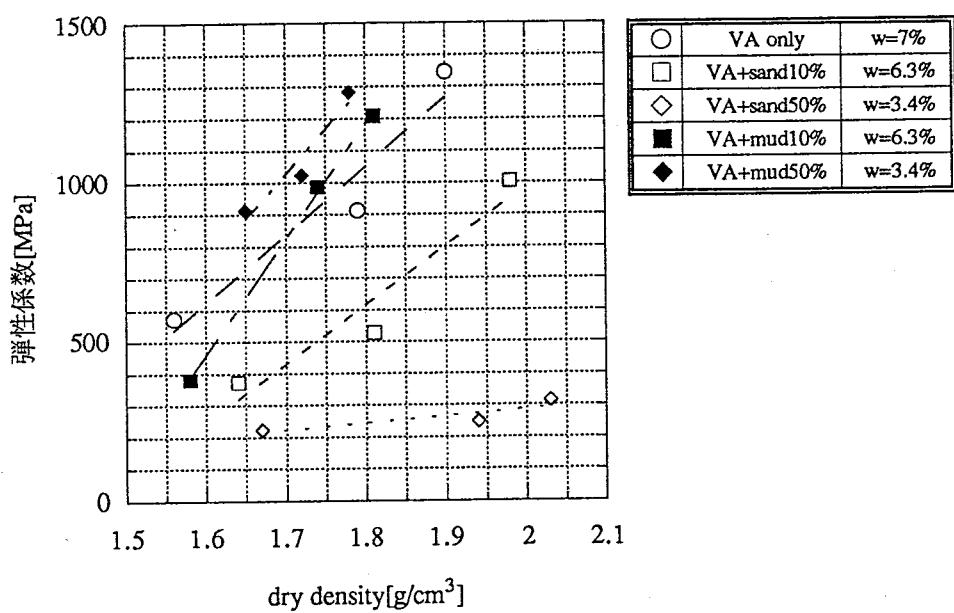


図2.7(2) クニゲルVAを主材とする試料の弾性係数（弾性波速度からの計算値）

《クニゲルV1》

平成2、3年度においては高圧三軸実験装置を用いて、クニゲルV1（乾燥密度1.6,1.8,2.0、ケイ砂混合率0,30%、飽和度と温度を変化）の三軸圧縮試験を行った。試験は土質試験法に準拠して行い、温度の設定はセルに取付けたヒーターで行った。また、試験における軸方向のひずみ速度は1%/minとした。

図2.8、図2.9、図2.10はそれぞれ一軸圧縮強度と試料密度、試料飽和度、試料温度との関係を示している。図2.11および図2.12は三軸圧縮試験の結果である非排水せん断強度とせん断摩擦角の密度依存性を調べるために飽和度100%のデータに関してまとめたもの、また、図2.13と図2.14は飽和度の依存性を調べるために乾燥密度1.8のデータに関してまとめたものである。

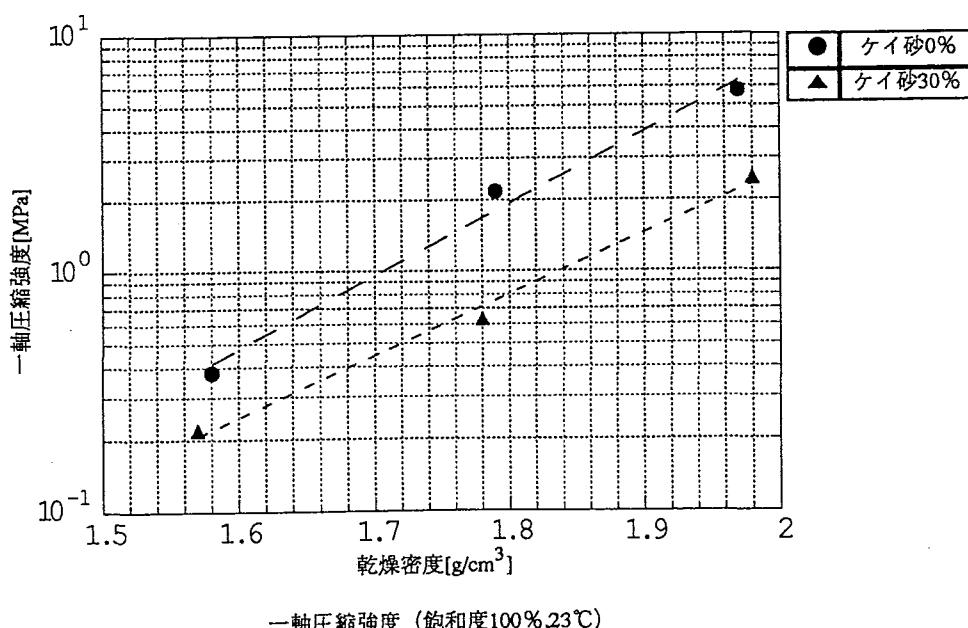


図2.8 一軸圧縮強度の密度依存性

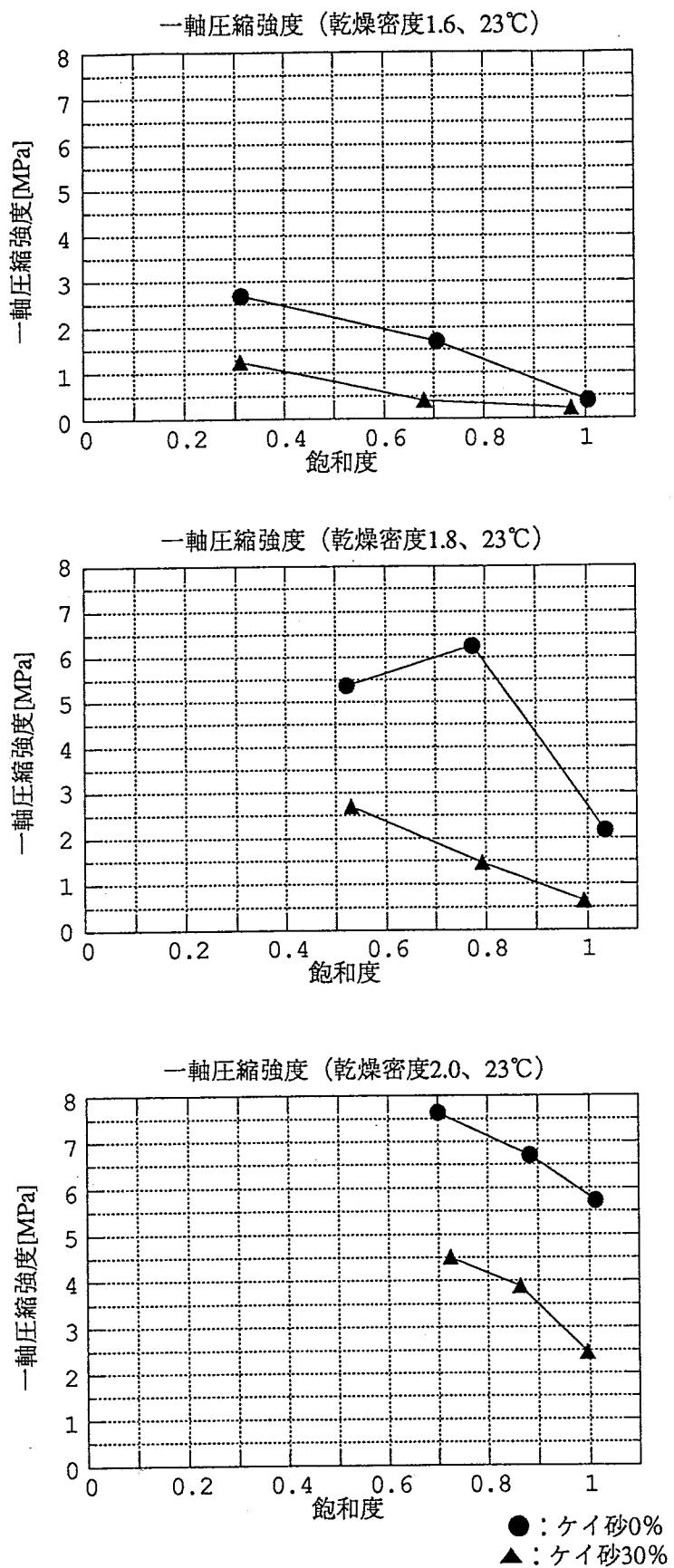


図2.9 一軸圧縮強度と飽和度との関係

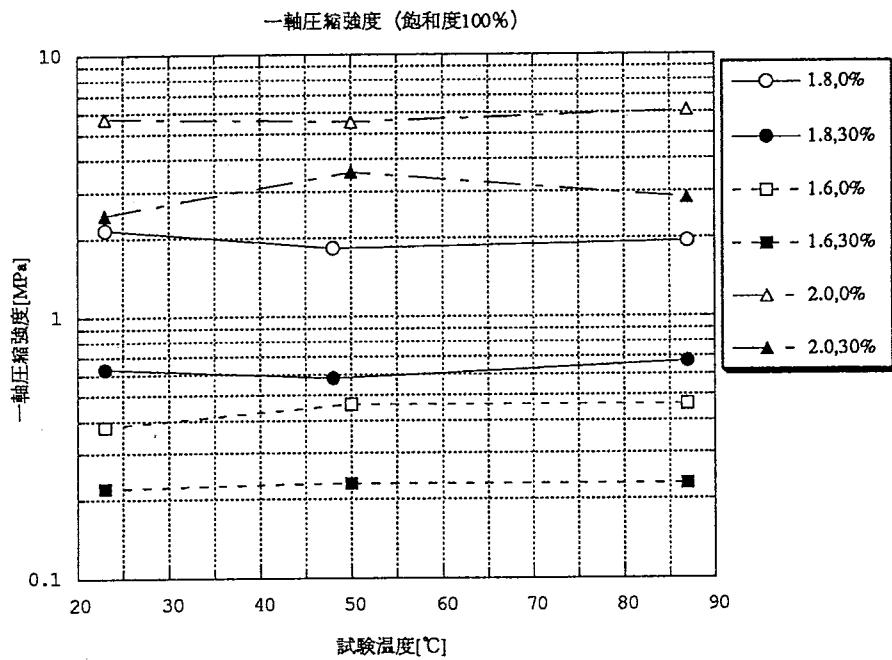


図2.10 一軸圧縮強度と温度との関係

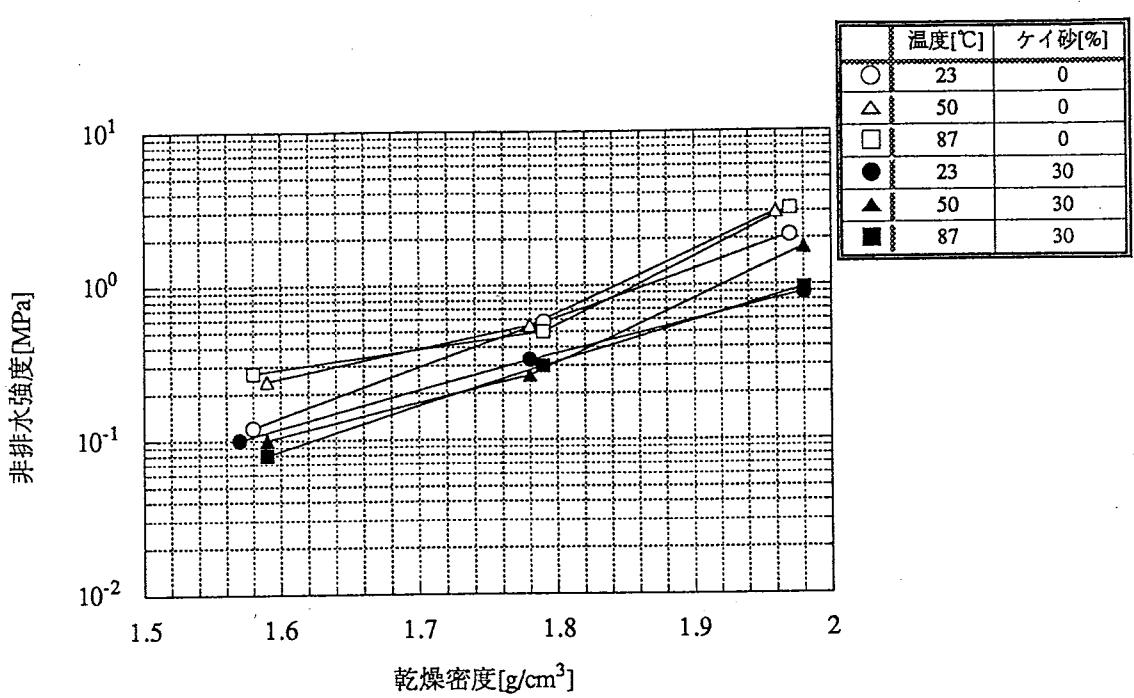


図2.11 三軸圧縮試験の結果（非排水強度）[飽和度100%]

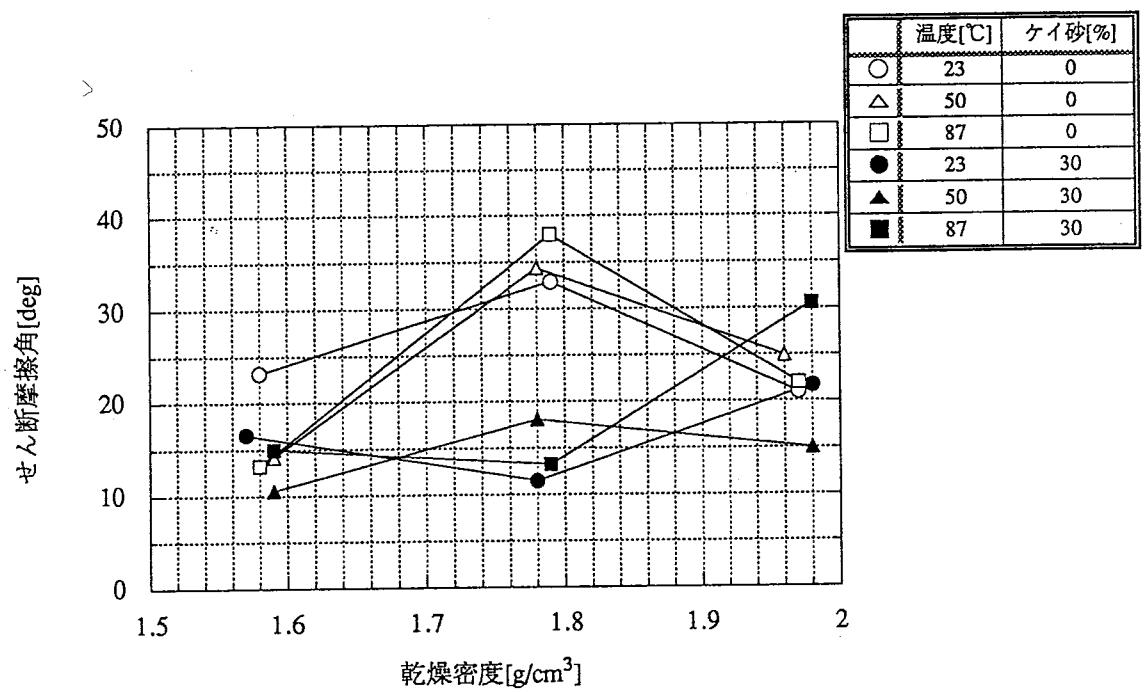


図2.12 三軸圧縮試験の結果（せん断摩擦角）[飽和度100%]

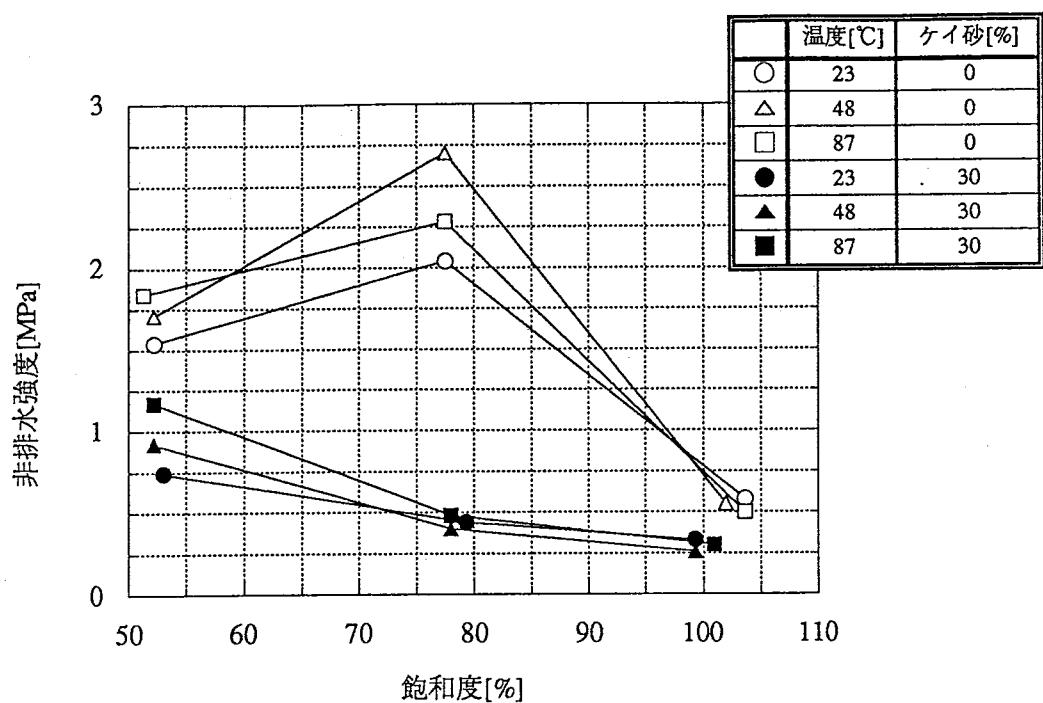


図2.13 非排水強度の飽和度依存性（乾燥密度1.8）

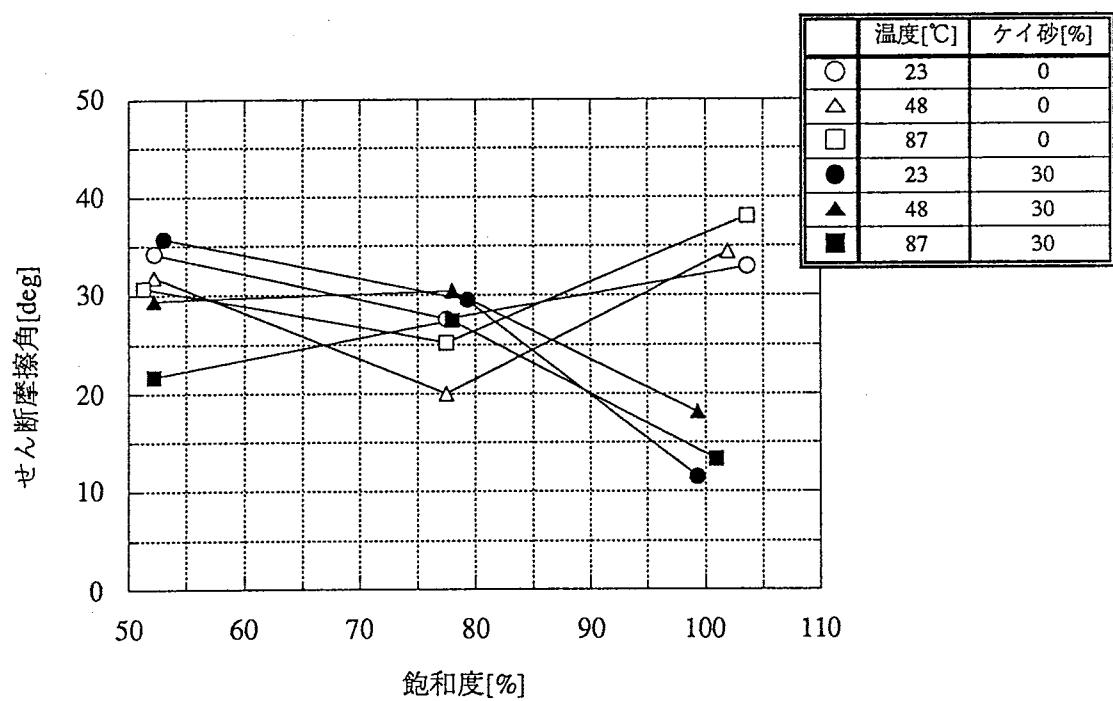


図2.14 せん断摩擦角の飽和度依存性（乾燥密度1.8）

また、飽和した圧縮固化ペントナイトの弾性係数に関して間隙比と拘束圧の依存性を図2.15に示す。この図は報告書[8],[9]のデータをもとにしている。なお、試料温度によって測定データはほとんど変化していないので図では室温の結果を示す。

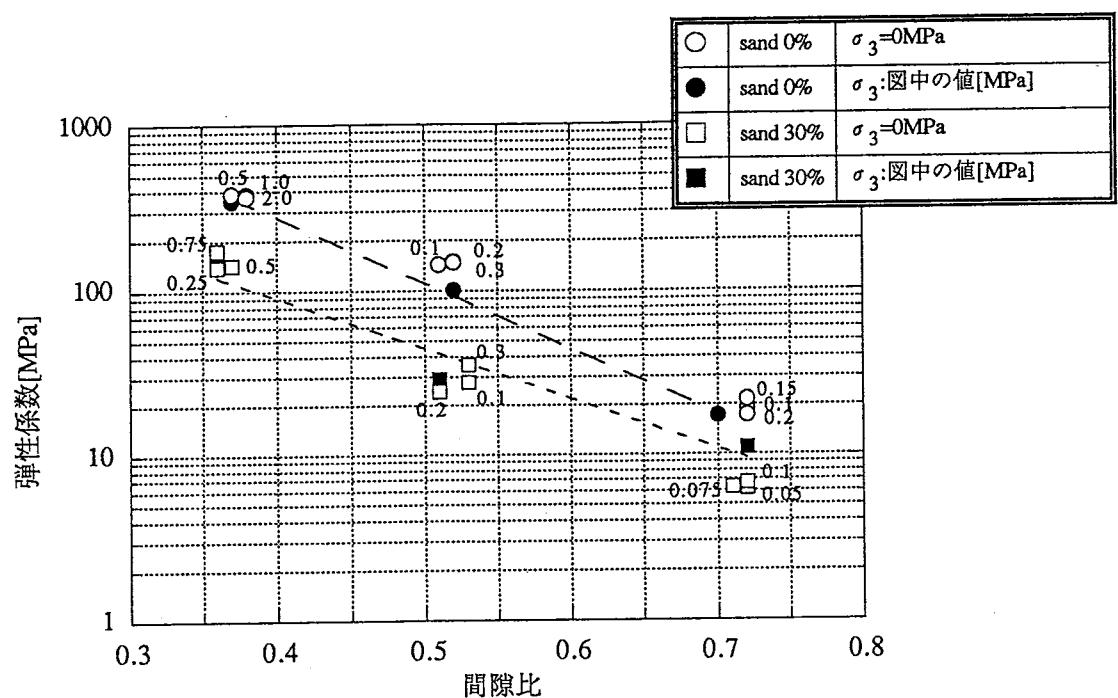


図2.15 弾性係数と間隙比との関係

拘束圧が0MPaのデータについて、実験式を求めるとき以下のようになる。

$$E = 1.1 \times 10^4 \cdot \exp(-9.1 e) \quad (\text{ケイ砂} 0\%)$$

$$E = 1.6 \times 10^3 \cdot \exp(-7.1 e) \quad (\text{ケイ砂} 30\%)$$

なお、一般的には弾性係数は拘束圧が大きくなるに従って大きくなるが、測定データからは明らかにその傾向を読むことはできない。

クニゲルV1またはそれとケイ砂30%の混合体を試料として行った三軸圧縮試験の結果、以下のことが言える。

- ①クニゲルVA同様、一軸圧縮強度を試料の乾燥密度で整理すると、片対数グラフ上でほぼ直線にのる。また、ケイ砂を重量比で30%混ぜた試料の強度はそうでない試料と比べて約50%の強度を持つ。
- ②一軸圧縮強度は試料の飽和度が大きくなるに従って小さくなる。
- ③一軸圧縮強度は温度によってほとんど変化しない。
- ④三軸試験から得られた非排水強度は試料の乾燥密度が大きくなるに従って、片対数グラフ上で直線関係を示す。また、試料の密度を固定して、飽和度の依存性を調べたが、全体として負の傾向が見られるものの、ケイ砂0%の試料で飽和度が80%のところにピーク値を持つなど、今後詳細に調べる必要がある部分があった。
- ⑤試料乾燥密度および試料飽和度のせん断摩擦角への影響は今回の試験結果からは判断できない。

2.3.2 圧密試験

平成2年度と3年度に圧密試験を行った。試験方法は土質試験法に準拠して行ったが、圧縮固化ペントナイトは密度が大きくなると、水と接触することにより大きな膨潤圧を発生するため従来の圧密試験でかける圧密荷重では圧密せず、体積膨張を起こし試験結果が得られない。平成2年度では、乾燥密度 1.6から2.0の試料に対して、圧密応力としてその膨潤圧よりも小さい0.1, 0.2, 0.4, …, 6.4kgf/cm²をかけたため、評価に使用できる圧密試験結果を得ることができなかった。平成3年度では、この経験を踏まえて乾燥密度1.2, 1.4 の試料に対して0.4, 0.8, 1.6, …, 51.2kgf/cm²の圧密荷重を与えた。この項では平成3年度の試験結果についてまとめる。

図2.16に乾燥密度1.2、ケイ砂0%、室温での圧密試験結果（e-log p曲線）の一例を示す。（すべてのe-log p 曲線は報告書[9]を参照）この図から求められる圧縮係数Ccと圧密降伏応力を表2.5にまとめる。なお、圧密降伏応力は「土質試験の方法と解説」[11]のJSF T 411の方法2に従って求めた。

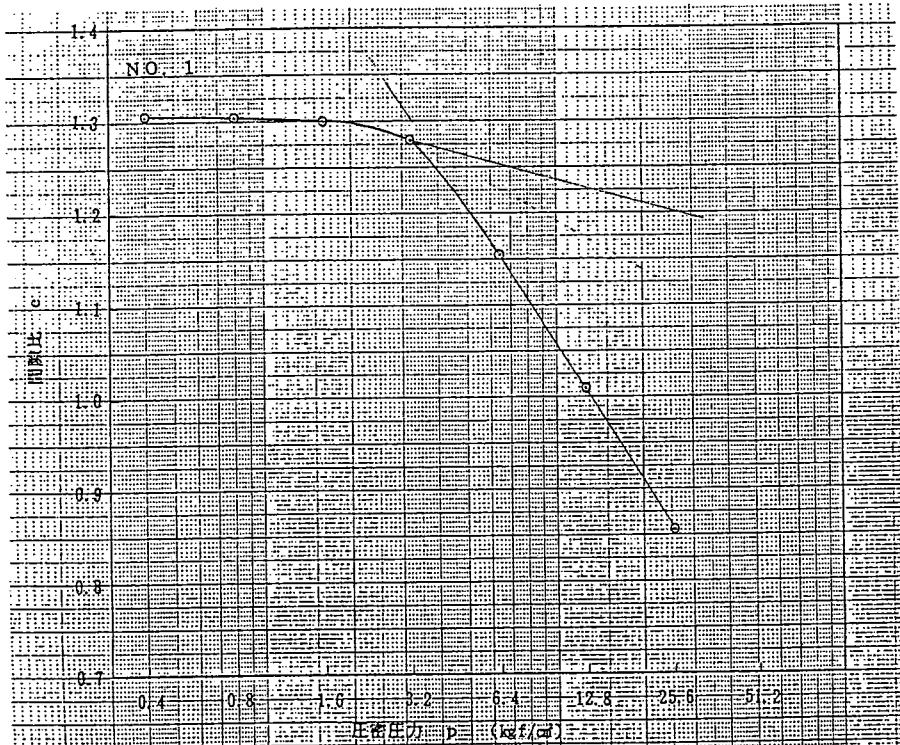


図2.16 e - log p 曲線の例（試験番号H3-1）

| 試験番号 | 乾燥密度 g/cm ³ | 含水比 % | 間隙比 % | 飽和度 % | ケイ砂 % | 温度 ℃ | 圧縮指数Cc | 圧密降伏応力 kgf/cm ² |
|-------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|-------------------------------|
| H3-1 | 1.2 | 47.1 | 125.0 | 101.7 | 0 | 20 | 0.49 | 3.7 |
| H3-2 | 1.2 | 47.1 | 125.0 | 101.7 | 0 | 40 | 0.51 | 4.2 |
| H3-3 | 1.2 | 47.1 | 125.0 | 101.7 | 0 | 60 | 0.61 | 4.8 |
| H3-4 | 1.2 | 46.6 | 125.0 | 100.7 | 30 | 20 | 0.68 | 3.3 |
| H3-5 | 1.2 | 46.6 | 125.0 | 100.7 | 30 | 40 | 0.64 | 2.6 |
| H3-6 | 1.2 | 46.6 | 125.0 | 100.7 | 30 | 60 | 0.66 | 2.9 |
| H3-7 | 1.4 | 35.3 | 92.9 | 102.6 | 0 | 20 | 0.40 | 12.3 |
| H3-8 | 1.4 | 35.3 | 92.9 | 102.6 | 0 | 40 | 0.35 | 8.3 |
| H3-9 | 1.4 | 35.3 | 92.9 | 102.6 | 0 | 60 | 0.32 | 10.0 |
| H3-10 | 1.4 | 34.8 | 92.9 | 101.2 | 30 | 20 | 0.43 | 4.1 |
| H3-11 | 1.4 | 34.8 | 92.9 | 101.2 | 30 | 40 | 0.41 | 3.5 |
| H3-12 | 1.4 | 34.8 | 92.9 | 101.2 | 30 | 60 | 0.40 | 3.8 |

表2.5 圧密試験結果（圧密指数および圧密降伏応力）

試験データから体積圧縮係数 m_v を求めた結果を表2.6に示す。なお、この値に水の比重と圧密係数 C_v を乗ずると試料の透水係数を求めることができるが、測定装置の都合で C_v を求めることができなかった。図2.17に圧密応力 p と m_v の関係を図示する。

| 平均圧密応力 [kgf/cm ²] | 体積圧縮指数 (x10 ²) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | H3-1 | H3-2 | H3-3 | H3-4 | H3-5 | H3-6 | H3-7 | H3-8 | H3-9 | H3-10 | H3-11 | H3-12 |
| 0.2 | | | | 0.25 | 0.38 | 0.38 | | | | | | |
| 0.6 | 0.25 | 0.38 | 0.25 | 0.88 | 1.00 | 0.63 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |
| 1.2 | 0.25 | 0.13 | 0.31 | 0.89 | 0.25 | 0.75 | 0.31 | 0.31 | 0.31 | 0.50 | 0.19 | 0.31 |
| 2.4 | 0.60 | 0.63 | 0.38 | 1.80 | 3.20 | 2.30 | 0.50 | 0.41 | 0.25 | 0.98 | 1.20 | 0.85 |
| 4.8 | 1.70 | 1.50 | 1.70 | 2.90 | 2.10 | 2.80 | 0.33 | 0.19 | 0.40 | 1.60 | 1.70 | 1.60 |
| 9.6 | 1.10 | 1.10 | 1.00 | 1.70 | 1.60 | 1.60 | 0.38 | 0.53 | 0.41 | 1.20 | 1.10 | 1.10 |
| 19.2 | 0.62 | 0.74 | 0.74 | 0.86 | 0.80 | 0.79 | 0.47 | 0.46 | 0.40 | 0.51 | 0.49 | 0.59 |
| 38.4 | | | | | | | 0.20 | 0.20 | 0.23 | | | |

表2.6 各圧密応力の下での体積圧縮指数

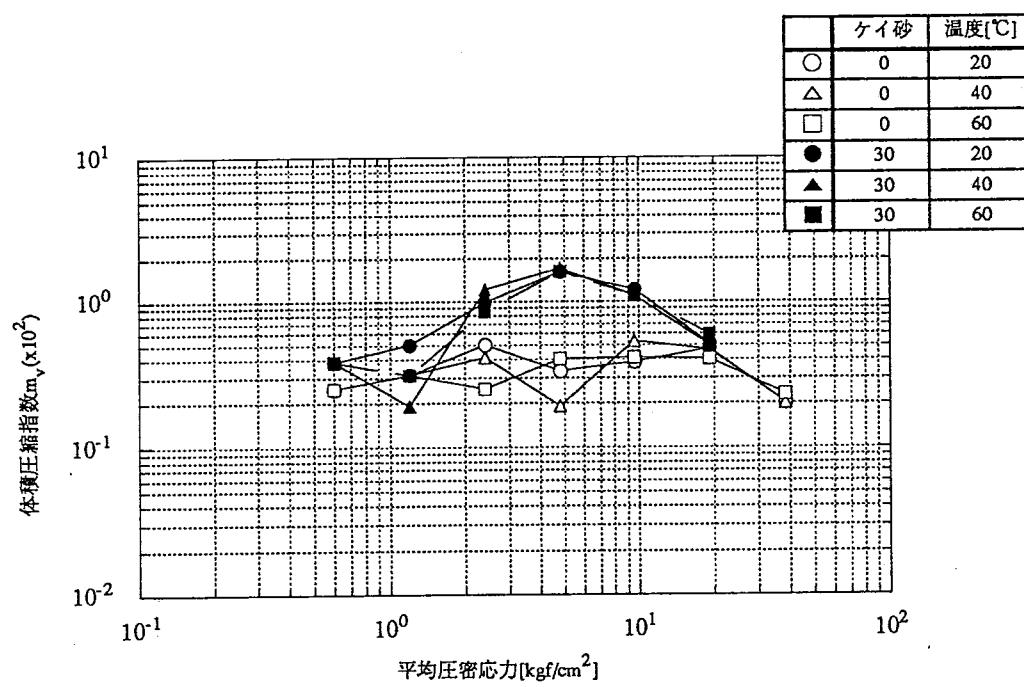
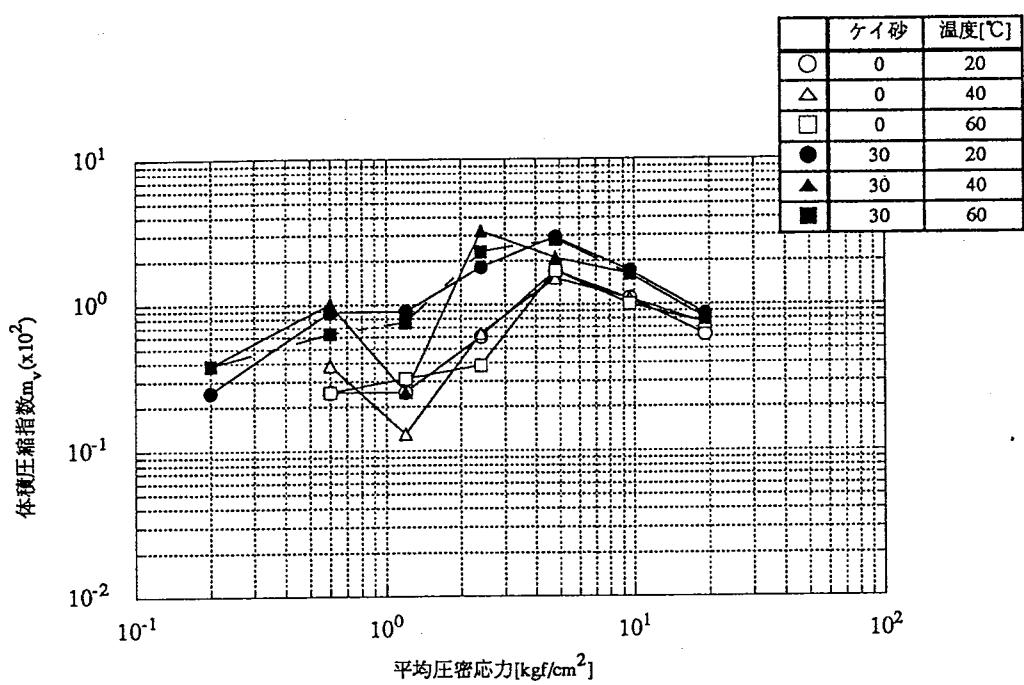


図2.17 log p - log m_v 曲線
(上: 乾燥密度1.2、下: 乾燥密度1.4)

2.3.3 膨潤圧・膨潤量測定

1) 膨潤圧の測定方法

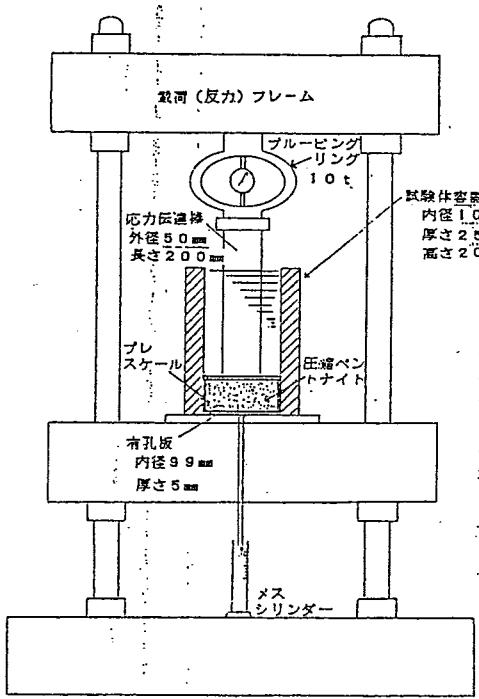
膨潤圧測定のための試験装置は次節に述べる透水係数の測定のための試験装置と同じであり、図2.18に示すような構造をしている。すなわち、円筒のモールド内に試験体が多孔質体を介して完全に体積変化できないように設置され、上または下から水を供給し、ピストンと固定枠の間にいれたロードセルで圧力を測るものである。なお、平成2年度以降の試験装置とそれ以前の試験装置は試験体の大きさや構造が異なっているが基本的な構造は同じものと考えられる。基本的な試験手順は以下のとおり。

- a) 円筒のモールドの中にベントナイトを適量入れる。
- b) ピストンで一軸的に圧縮固化する。
- c) 一旦、圧縮応力を開放した後に試験体の割れなどをチェックし、セルを枠に固定する。
- d) 水を供給する。

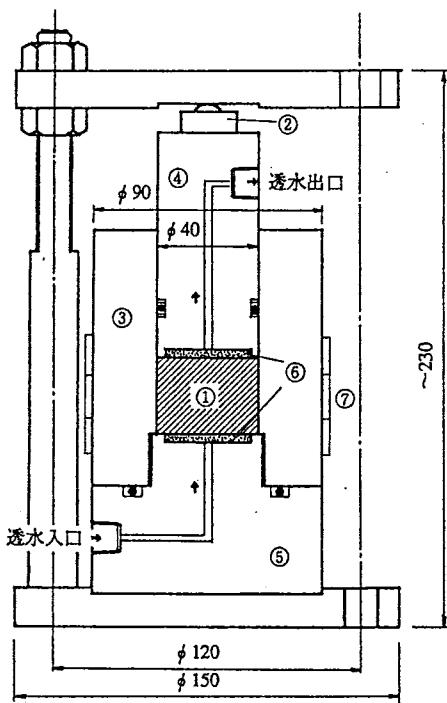
膨潤圧は水が供給された後、ただちに発生し開始後1～2日してピークを経た後、一定の値に落ち着いてゆく。一定値に達するまでにかかる時間は試験体の密度が大きければ長くなるが、概して1～3週間程度である。クニゲルVAを用いた試験では試験開始後10日後に、到達する膨潤圧の90%に及んでいるといった結果が得られている。

2) 圧縮固化ベントナイトの膨潤圧

図2.19(1)、(2)はクニゲルVAおよびV1の膨潤圧の時間変化を表したもののが代表例、図2.20(1),(2)はそれぞれのベントナイトの膨潤圧を乾燥密度でまとめたもの、図2.21は平成2年度に行った温度依存性の確認試験の結果をまとめたものである。なお、このデータで白抜きのプロットは試料が飽和した後にヒーターで温度条件を設定したものであり、黒塗りは試料の温度が設定された後に水を供給したものである。



No.1



No.2

図2.18 膨潤圧測定装置

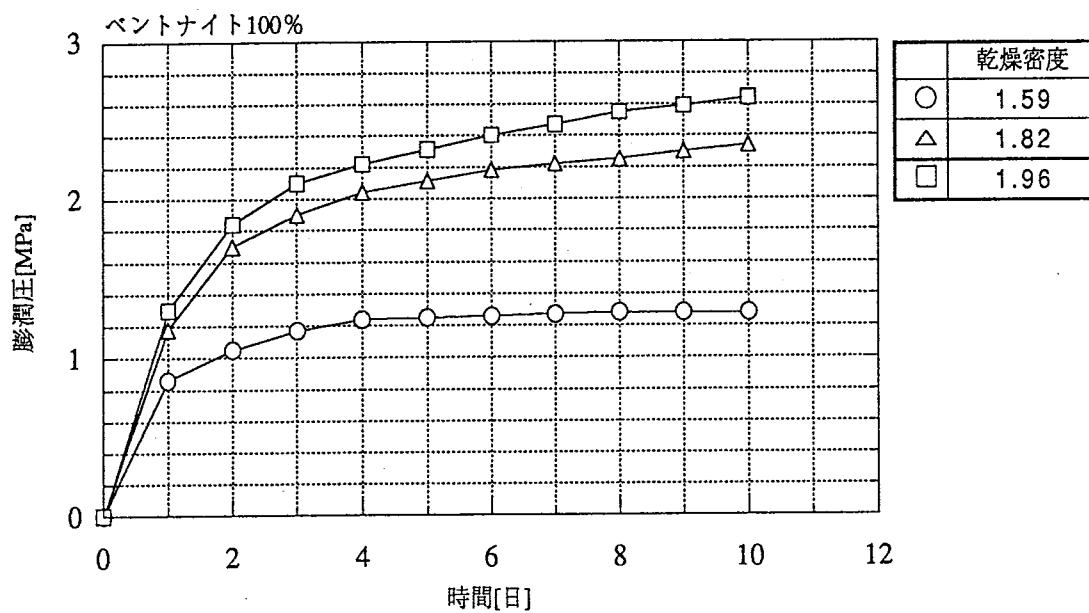


図2.19(1) クニゲルVAの膨潤圧の時間変化

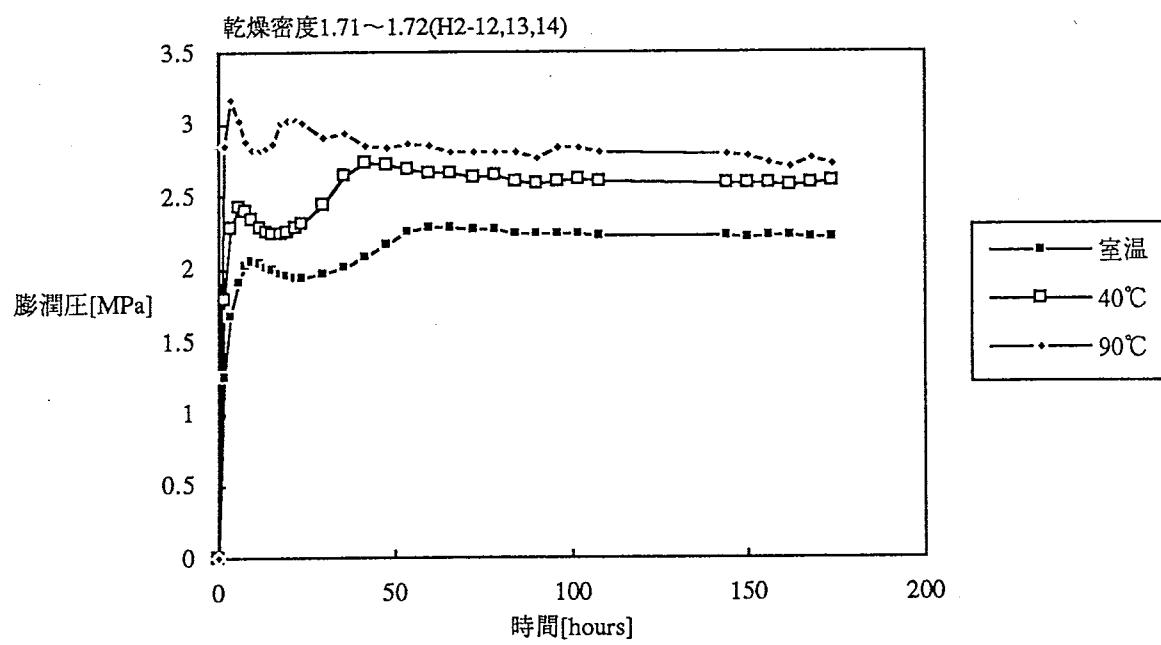


図2.19(2) クニゲルV1の膨潤圧の時間変化

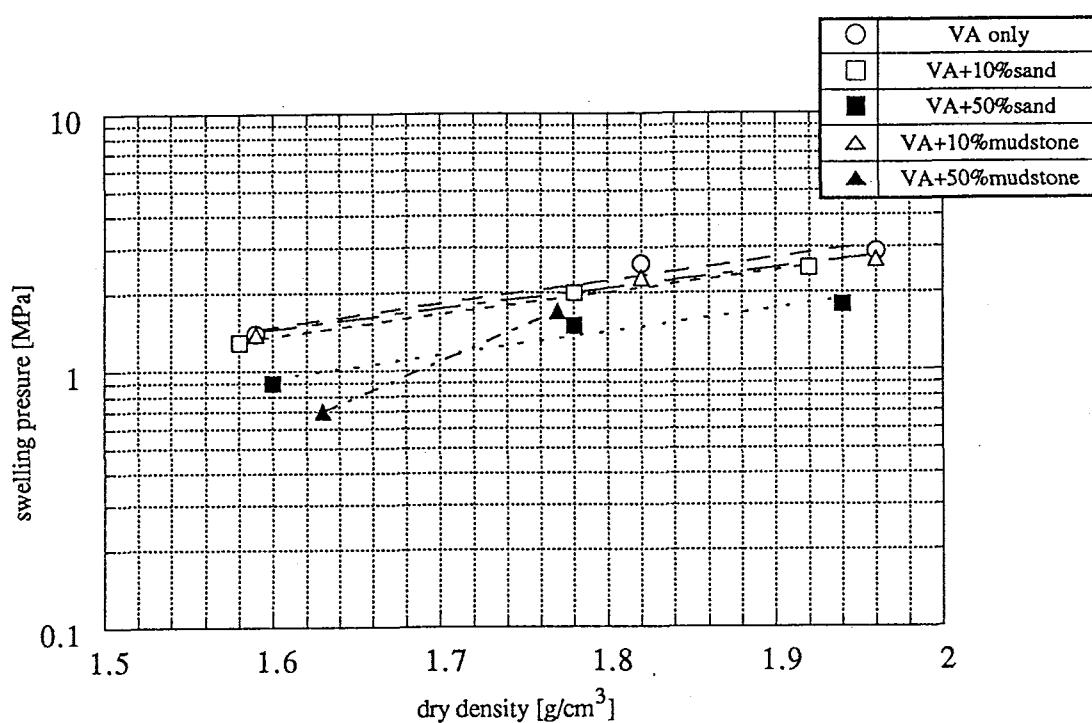


図2.20(1) 圧縮固化ペントナイトの乾燥密度と膨潤圧との関係（クニゲルVA）

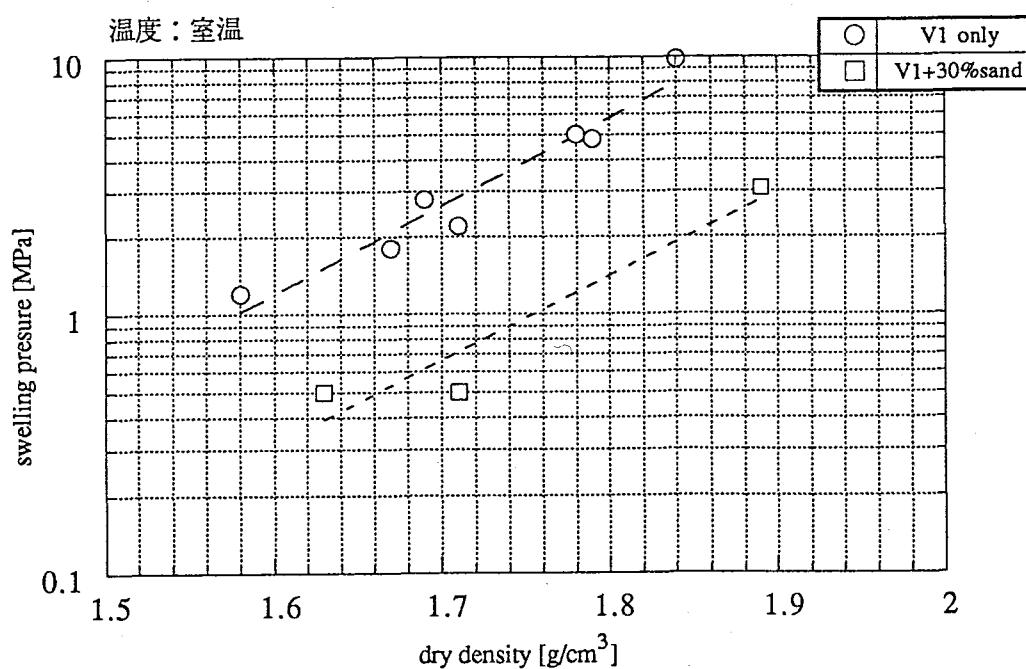


図2.20(2) 圧縮固化ペントナイトの乾燥密度と膨潤圧との関係（クニゲルV1）

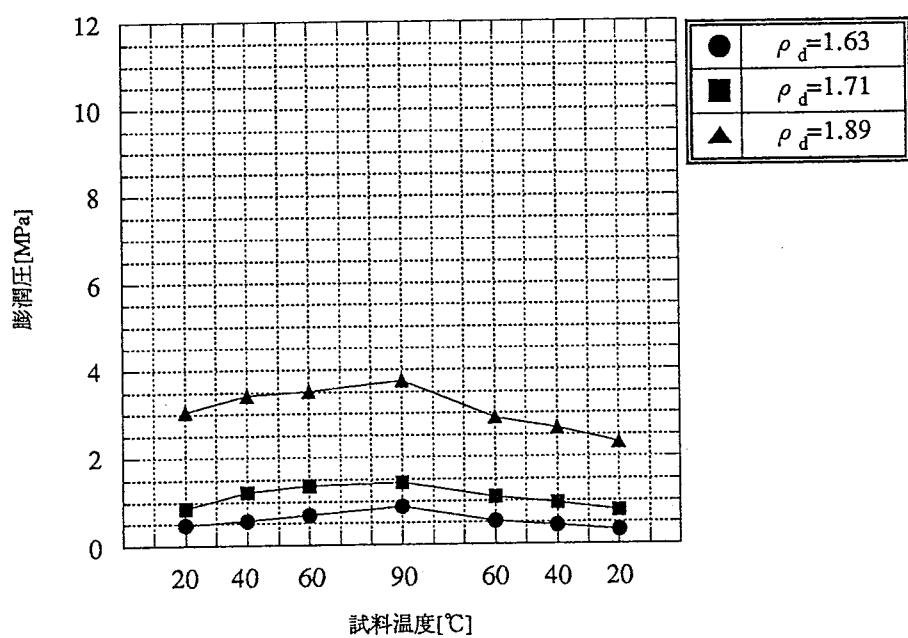
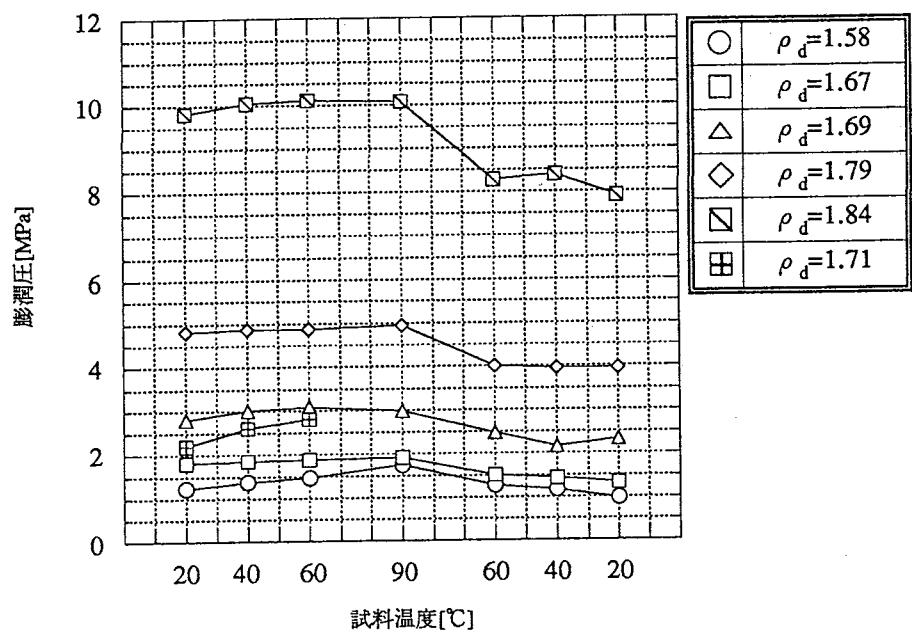


図2.21 膨潤圧の温度依存性
(上: ベントナイト100%、下: ベントナイト70%+ケイ砂30%)

3) 測定結果

圧縮固化ペントナイトの膨潤圧の測定結果から以下のことがわかった。

①膨潤圧 p_s は試料の密度が大きくなるにしたがって増加し、片対数グラフ上で直線関係を示す。

$$p_s = 5.7 \times 10^{-2} \exp(2.0 \rho_d) \quad VA\text{のみ}$$

$$p_s = 3.8 \times 10^{-6} \exp(7.9 \rho_d) \quad V1\text{のみ}$$

$$p_s = 1.8 \times 10^{-6} \exp(7.5 \rho_d) \quad V1+30\%ケイ砂$$

②測定中の温度条件を室温から90°C程度まで変化させると、測定される膨潤圧は大きくなる。また、試料の密度が小さいほど、温度上昇による膨潤圧の測定データは大きくなっている。もっとも大きい場合で50%増加（乾燥密度1.58）である。同様の測定系を用いたPuschらの研究[12]では、飽和密度1.8g/cm³の試料では20°Cから90°Cの温度上昇に対しておよそ50%の膨潤圧上昇があり、密度が高くなるのに従ってその傾向は見られなくなっている。しかし、飽和密度2.06g/cm³の測定では、逆に膨潤圧が減少する結果も得られている。

膨潤圧は層状体と水分子の間に作用する分子間力や層間の溶質による浸透圧などから構成されており[13]、化学ポテンシャルによって説明することができる。Campbellら[14]はサイクロメータを用いて、いくつかの土壤のポテンシャルの温度依存性を測定し、温度上昇にしたがってポテンシャルの低下（膨潤圧の低下）が起こることを実験的に示している。

膨潤圧の温度依存性に関しては、測定方法や測定条件も含め、今後さらに検討する必要がある。

③ケイ砂混合材料の膨潤圧は、その混合割合が大きくなるにしたがって小さくなる。ケニゲルVAでは、膨潤圧が小さくなる割合は混合材の種類（ケイ砂、泥岩粉）によって差ではなく、50%混合した場合どちらもなにも加えないときの6割から7割の大きさになっている。従って、混合材の種類による膨潤圧低下の影響は小さい。

4) 膨潤量測定

膨潤量試験は昭和59年度と平成2年度に行っており、それぞれ使用したペントナイトはVA, V1である。前者では花崗岩中にボアホールを切削し、その内部に圧縮固化ペントナイトを設置し、上部から水を浸透させて膨潤量の測定を行い、かつ、室内試験において図2.22に示す様な試験装置で測定を行った。後者の試験では、膨潤量と浸透する水の量の関係を明確にするために試料の下部から水を浸透させたが、膨潤が不均一に発生し、試料上部にひびわれや不陸が起こり、膨潤量の測定を正確に評価することができなかった。

図2.23,2.24に昭和59年度の試験結果を示す。

以上の結果から以下のことが言える。



図2.22 膨潤量測定試験の様子（昭和59年度）
(適当な高さ毎に着色しそれぞれの部分の膨潤量の評価を行う)

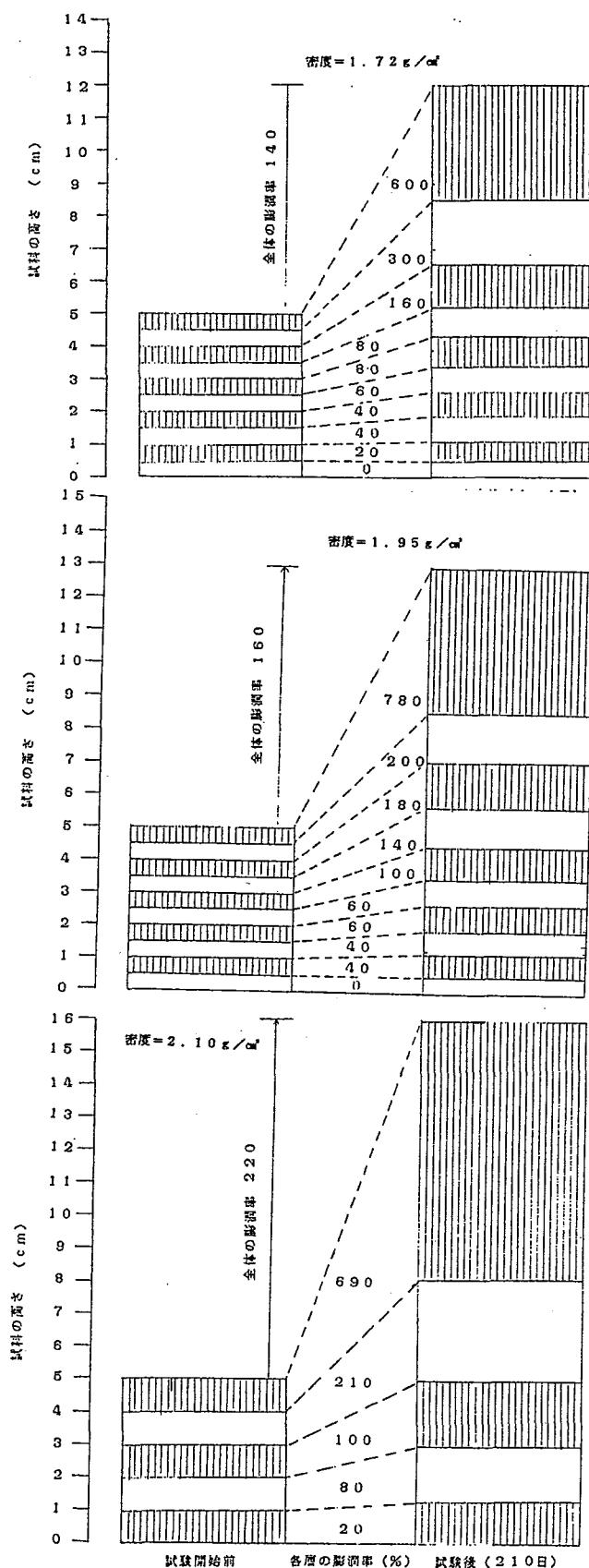


図2.23 圧縮固化ペントナイトの膨潤量の測定
(上から試験開始前の密度1.72, 1.95, 2.10 g/cm³)

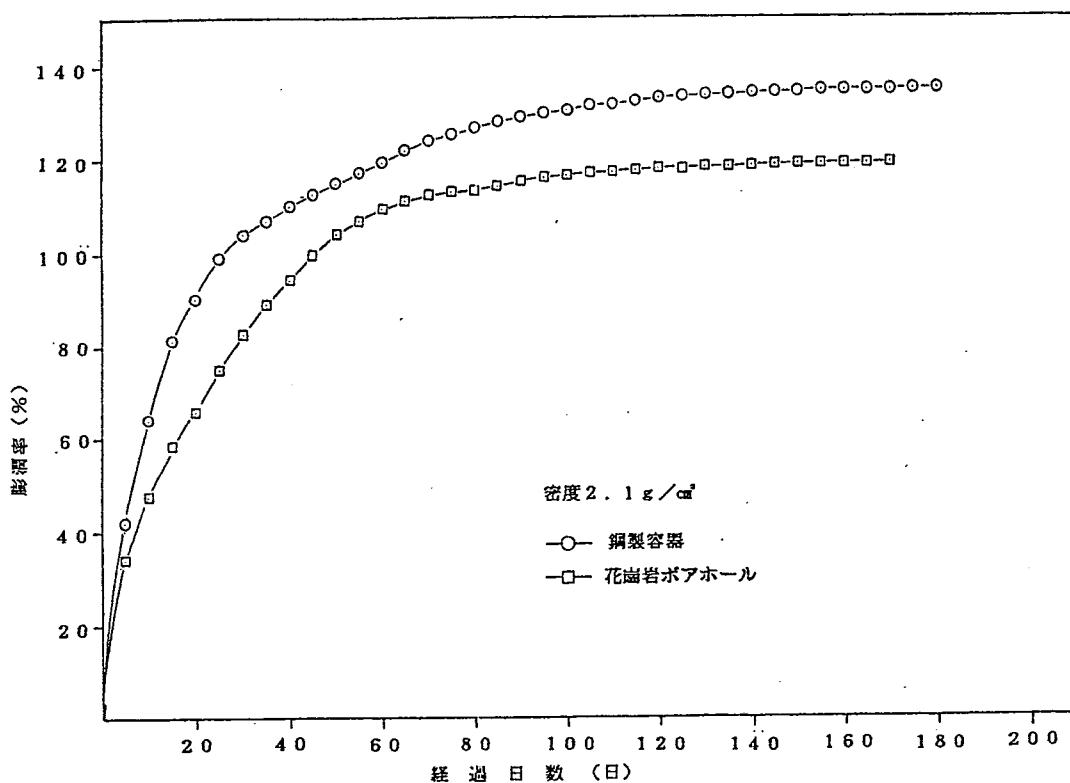


図2.24 膨潤量の時間変化

- ①圧縮固化ペントナイトは水に接すると、急激に膨潤を始め、40日目頃まではその変化率が大きい。膨潤量が100～120%程度になると、その変化率は鈍化する。
- ②経過日数180日でも膨潤は進行するが、膨潤量は非常に少なく、0.01mm/day程度である。
- ③膨潤は浸水面（この試験では試料上端面）より始まり、ゆっくりと進行してゆく。浸水面に近い部分での膨潤量は7～9倍であり、そこでのペントナイトの強度は全く期待できない。
- ④図2.24における膨潤量のデータの差はペントナイトが設置された孔の壁面摩擦の影響と考えられる。

2.3.4 透水係数

1) 試験方法

透水係数の測定は圧縮固化した試料を拘束した状態で水を浸透させ、適当な動水勾配を与えて、試料を透過した水の流量を測って行う。圧縮固化したペントナイトの中をながれる水は基本的にDarcyの法則に従うと仮定して透水係数を求める。すなわち、透過する流量Q [L^3T^{-1}]、与える動水勾配i、試料の断面積A [L^2] とすると透水係数k [LT^{-1}] は次式で与えられる。

$$Q = kiA$$

一連の測定で用いた試験装置は前項の膨潤圧測定装置と同じもの（図2.18参照）であるが、平成2年度の測定では長期の透水係数変化を測定する目的で膨潤圧の測定で用いなかった試験装置を使っている（図2.25参照）。また、平成3年度は透水係数の温度依存性について測定を行った。なお、試験によって動水勾配は異なっている。また、試料はペントナイト100%についてのみ測定を行っており、混合材の種類及び割合についてのまとめは今後の課題である。

2) 測定結果

図2.26は測定結果を乾燥密度でまとめたもの、図2.27は透水係数の温度依存性をまとめたものである。

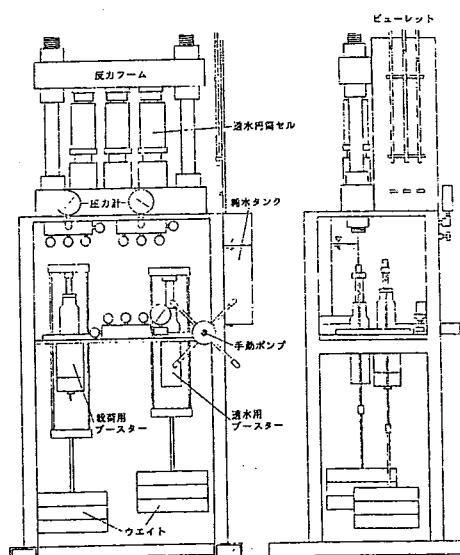


図2.25 長期透水試験装置（平成2年度）

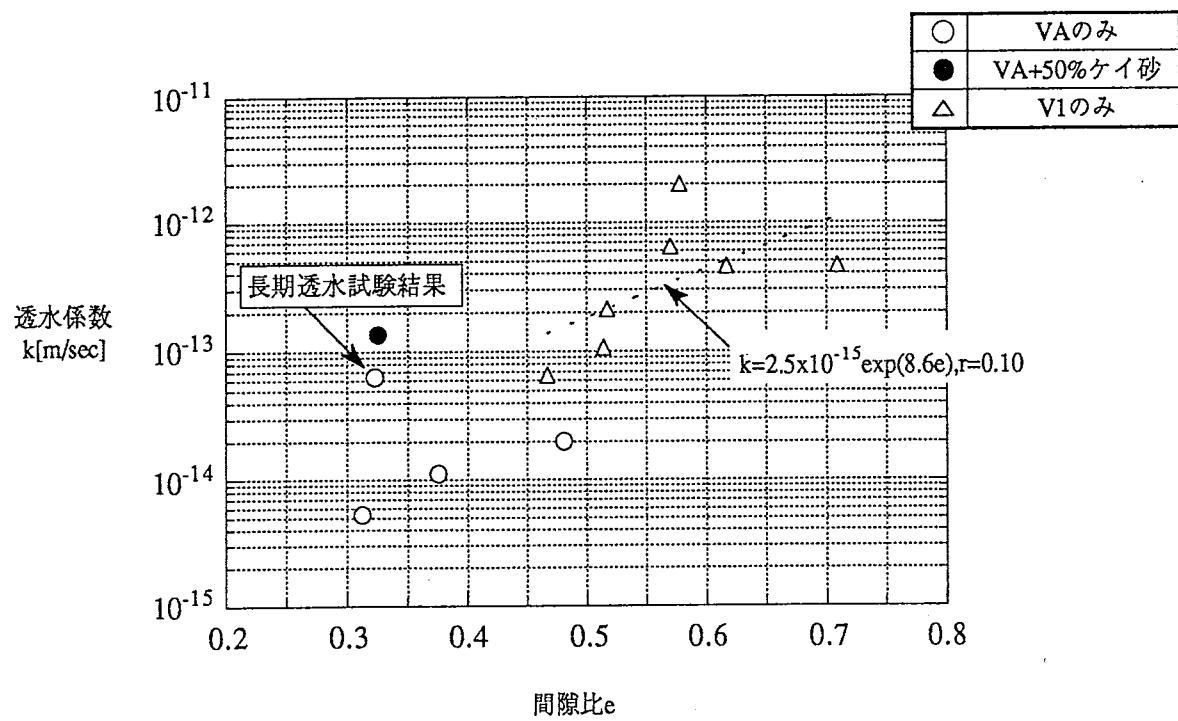
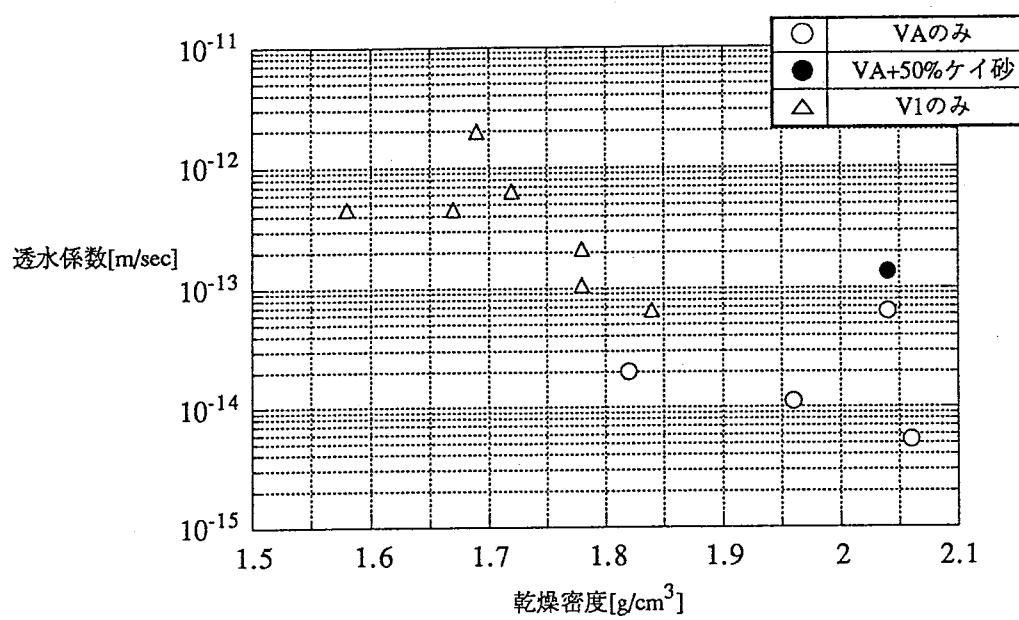


図2.26 透水係数と試料の乾燥密度（上）および間隙比（下）との関係

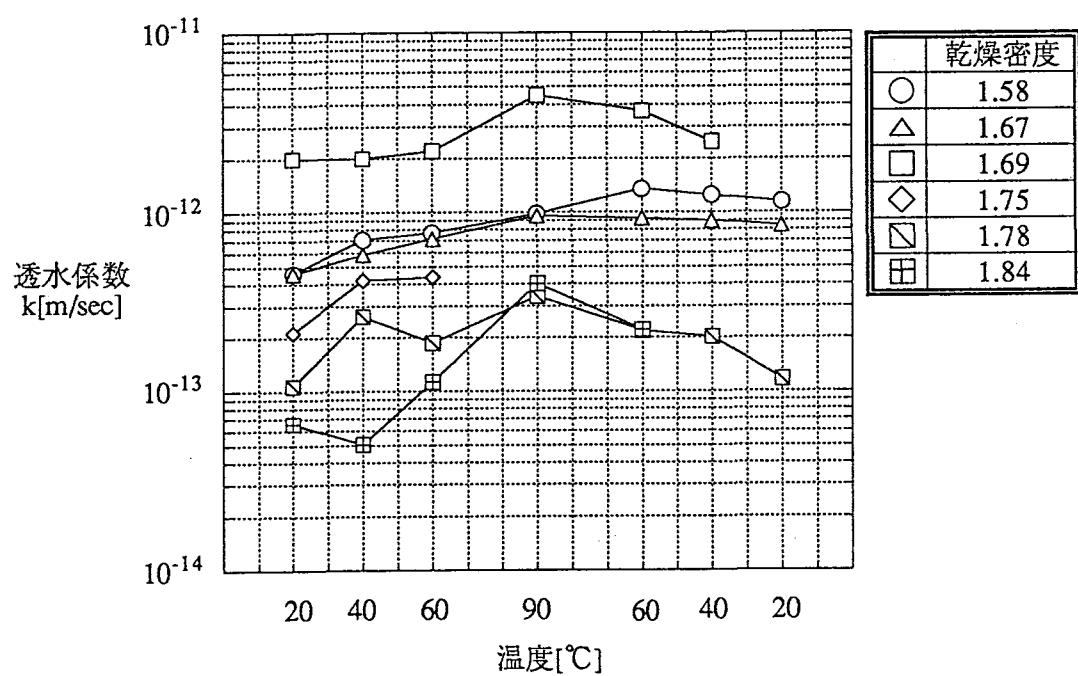


図2.27 透水係数の温度依存性

以上の測定結果から以下の傾向がわかった。

- ①圧縮固化ペントナイトの透水係数は試料の密度が大きくなるにしたがって小さくなる。
- ②透水係数は試料の温度が高くなると大きくなるが、それは温度上昇にともなって水の粘性が低下することが要因と考えられる。
- ③ケイ砂を50%混合した試料の透水係数は、混合しないものより1オーダー程度透水係数が大きい。

圧縮固化ペントナイトの透水係数はDarcy則が成立すると仮定して評価している。しかし、図2.26からわかるようにVAのみを試料として用いた試験でもその動水勾配が異なっていると結果として1オーダー異なる値が得られている（長期透水試験では動水勾配は 5×10^3 、そのほかのVAの測定では 2×10^4 ）。実際に圧縮固化ペントナイトの透水係数が動水勾配に依存する測定結果も得られており（図2.28）[15]、今後、評価する材料について実験的に確認する必要がある。

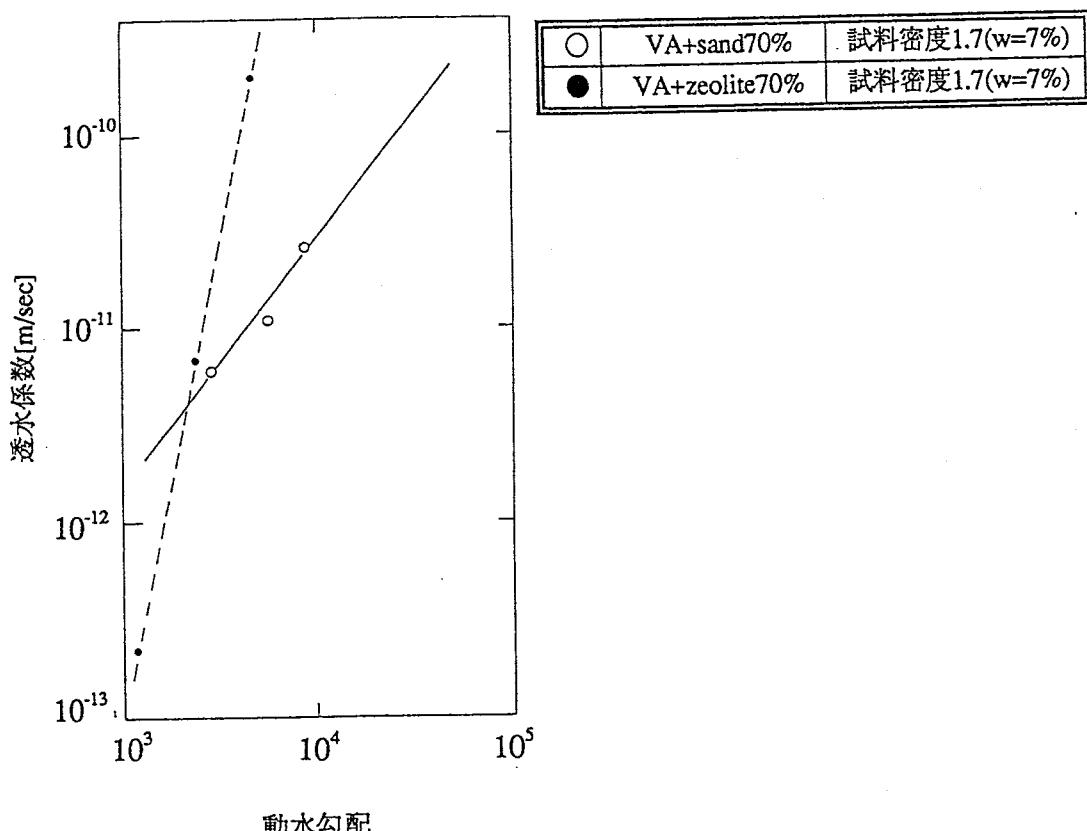


図2.28 圧縮固化ペントナイトの透水係数と測定時の動水勾配との関係

2.3.5 热物性（热伝導率、比熱）

《热伝導率》

1) 測定方法

热伝導率の測定は2種類の方法で行った。QTM迅速热伝導率測定装置を用いた測定とヒートプローブを用いた測定である。前者は簡易に热伝導率が測定できるのに対し、後者は水分状態を変化させた圧縮固化ベントナイトの热伝導率を測定するのに適しているといった利点を持っている。図2.29にそれぞれの試験装置の写真を示す。

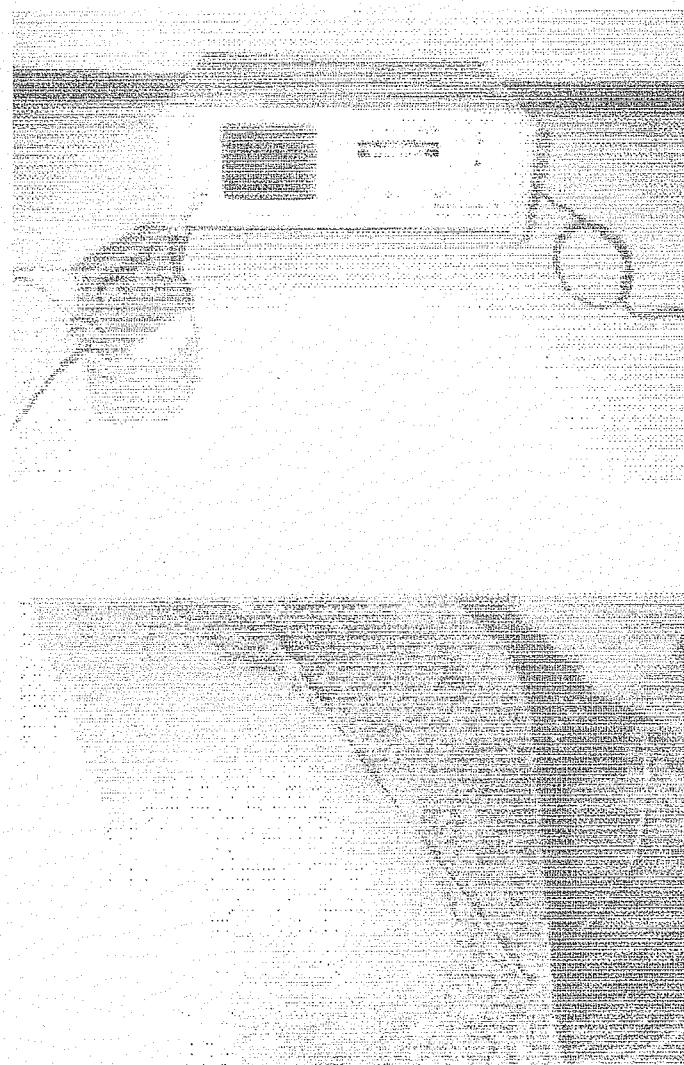


図2.29 热伝導率測定装置
--QTM迅速热伝導率測定装置--
(株)昭和電工製

--非定常法（プローブ法）--
東北大学工学部資源工学科

2) 測定結果

図2.30はクニゲルVAの熱伝導率の密度依存性（試料はすべて含水比7%）、図2.31は同じペントナイト固化体の温度依存性を、そして図2.32にはクニゲルV1の熱伝導率と乾燥密度との関係を示す。図2.33はその温度依存性である。なお、各試験法で温度条件の設定は異なっており、QTM法では試料をそのままラップに包んで温度条件の整った恒温室に入れ、十分時間が経過した後に速やかに測定を行い、プローブ法では試料を缶内に置き、伝導性の高いシリコン系のシーラントで隙間を充填したものを恒温槽に入れて行っている。また、プローブ法では測定にかかる時間は数分であるため、その間に試料内の水分の移動はないものと考えられる。

圧縮固化ペントナイトの熱伝導率は試料の密度と含水比、言い換えると試料の空隙率と飽和度に依存し、温度条件や試料中に含まれるケイ砂の量によって値が変化する。QTM迅速測定装置とプローブ法を用いて測定を行い、以下の結果を得た。

- ①熱伝導率は試料の密度が大きくなるに従って大きくなる。
- ②同じ密度の試料において、飽和度が大きくなるに従って熱伝導率は大きくなる。
- ③熱伝導率を試料の温度が90°C以下の範囲で測定した結果、QTM法で測定した場合、測定にかかる時間は短いものの温度を設定するために電気炉を使用したため、試料表面が乾燥し温度が大きくなるとともに熱伝導率が小さくなつたのに対し、プローブ法ではほとんど温度に依存しないことがわかった。（厳密に見ると、1°Cの上昇に対して、熱伝導率はおよそ $1 \times 10^{-3} \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 上昇あるいは下降している）これは、この温度範囲では土粒子や水の状態が大きく変化しないことが理由として考えられる。
- ④図2.33(2)において含有ケイ砂の影響を知ることができるが、乾燥密度が1.6の試料ではケイ砂の混合によって熱伝導率が低下し、乾燥密度1.8では逆に大きくなっている。ケイ砂自身は粘土粒子に比べて大きな熱伝導率を持つためこのように傾向が異なるのはなんらかの要因が作用したと考えられる。今後の測定でこの点について確認してゆく必要がある。

2.4.3項において既存の熱伝導率モデルとの比較検討を行う。

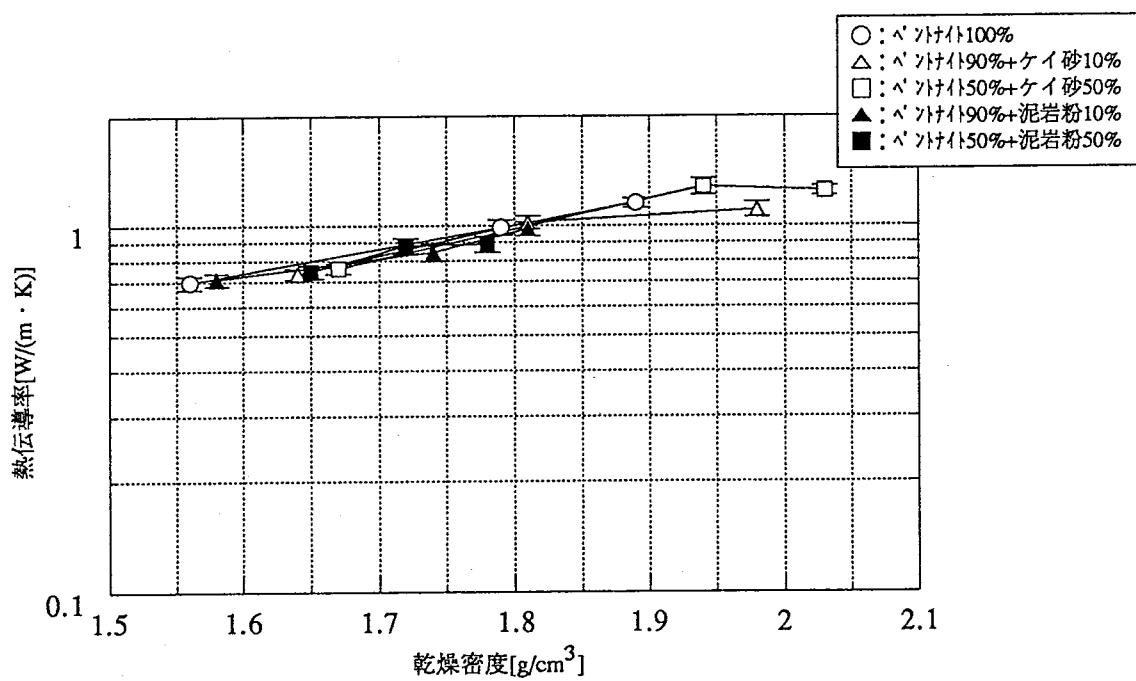
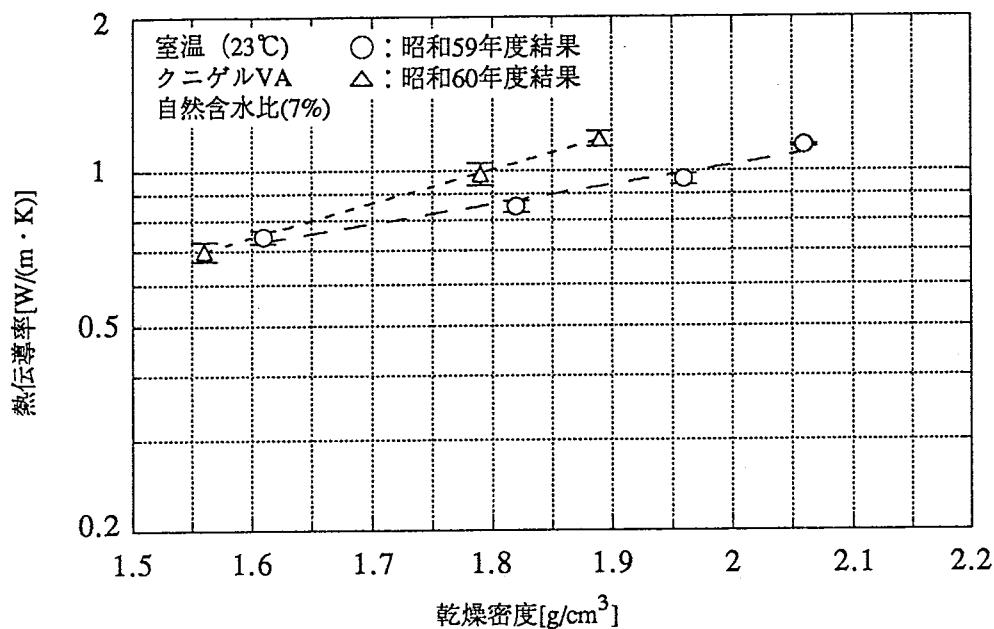


図2.30 圧縮固化ベントナイトの熱伝導率
(上) 昭和59年度、60年度におけるVAのみのデータの比較
(下) クニゲルVA混合材料の熱伝導率

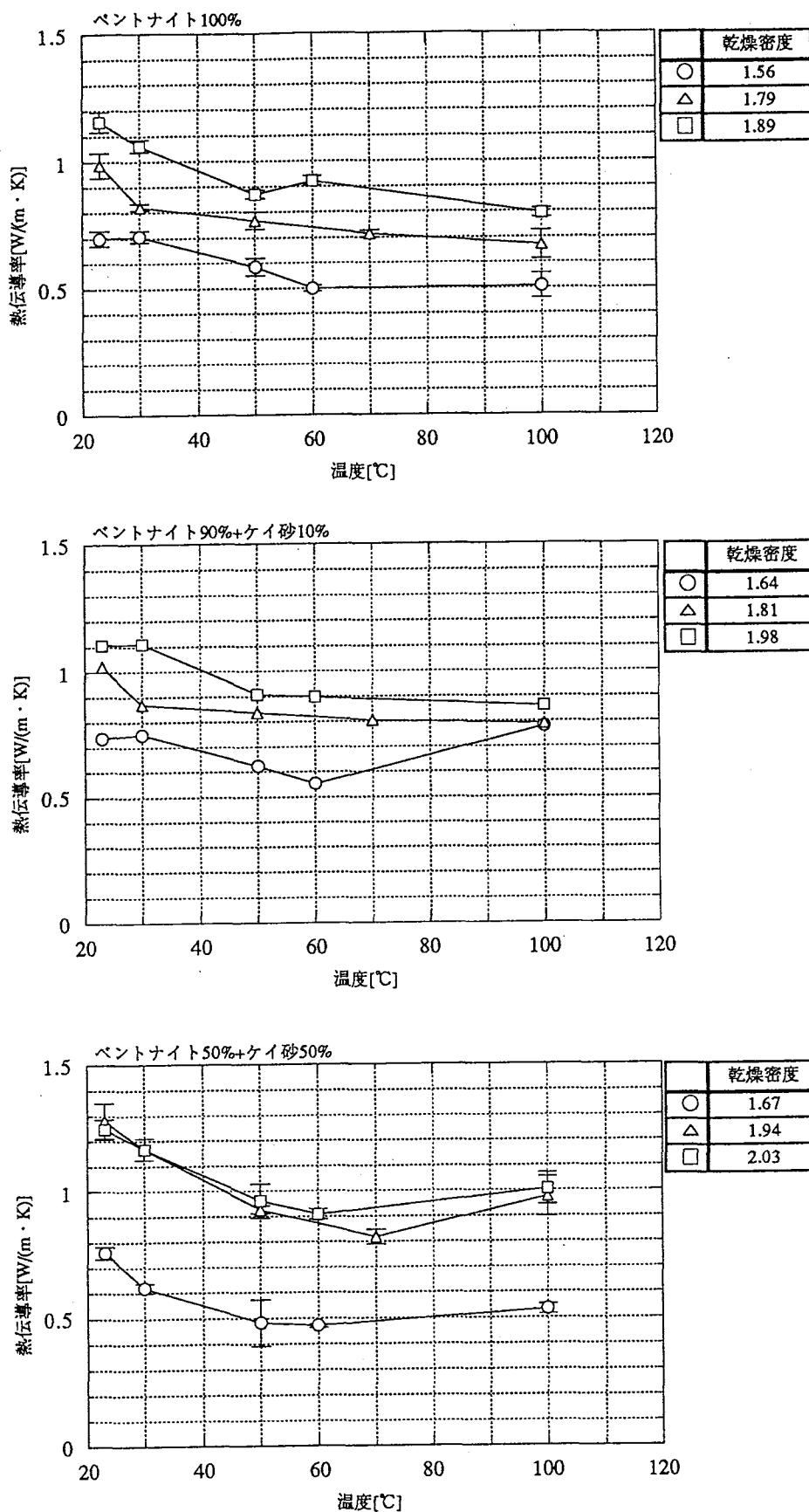


図2.31(1) 圧縮固化ベントナイトの熱伝導率の温度依存性

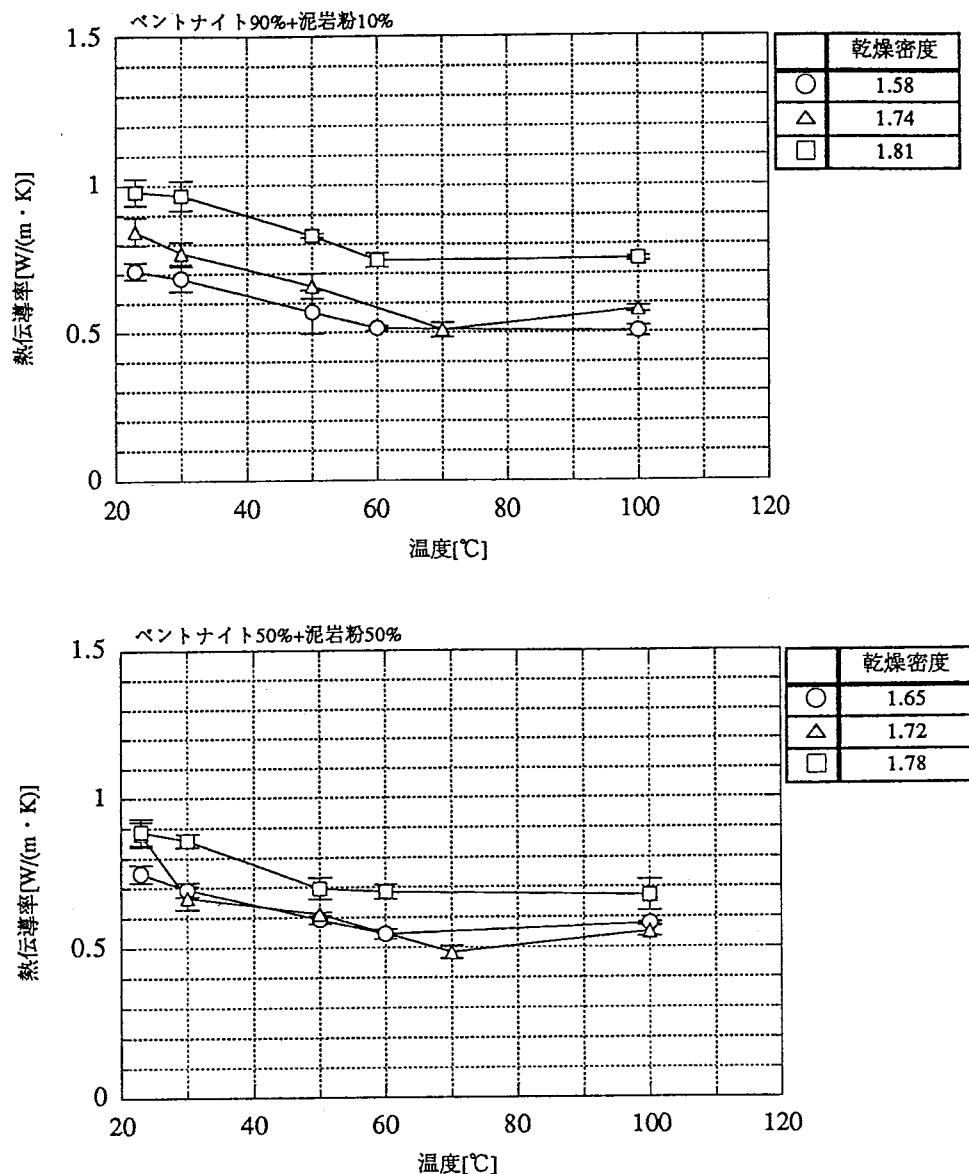


図2.31(2) 圧縮固化ペントナイトの熱伝導率の温度依存性

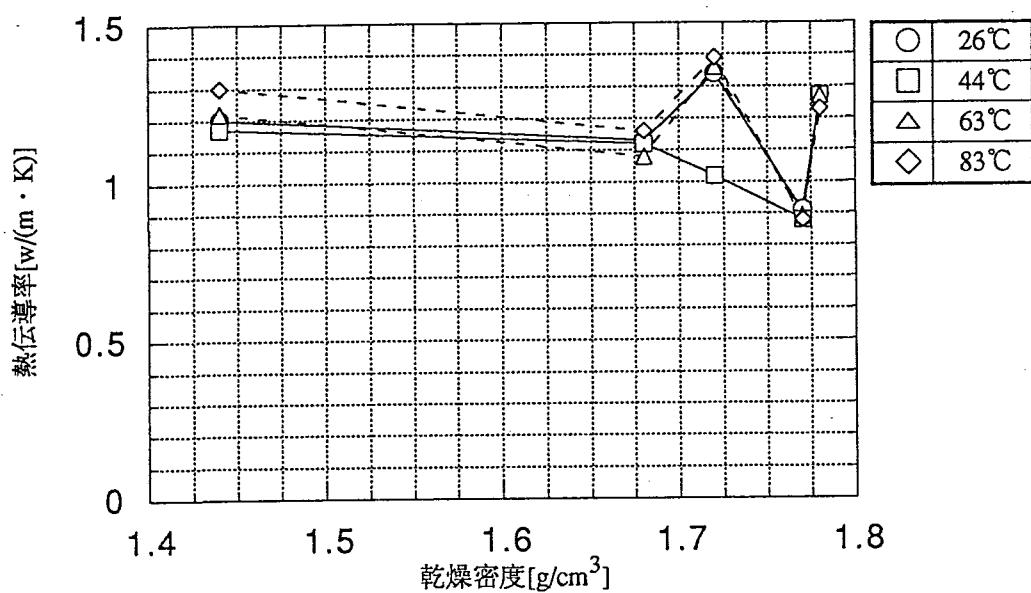


図2.32 クニゲルV1の熱伝導率と密度との関係

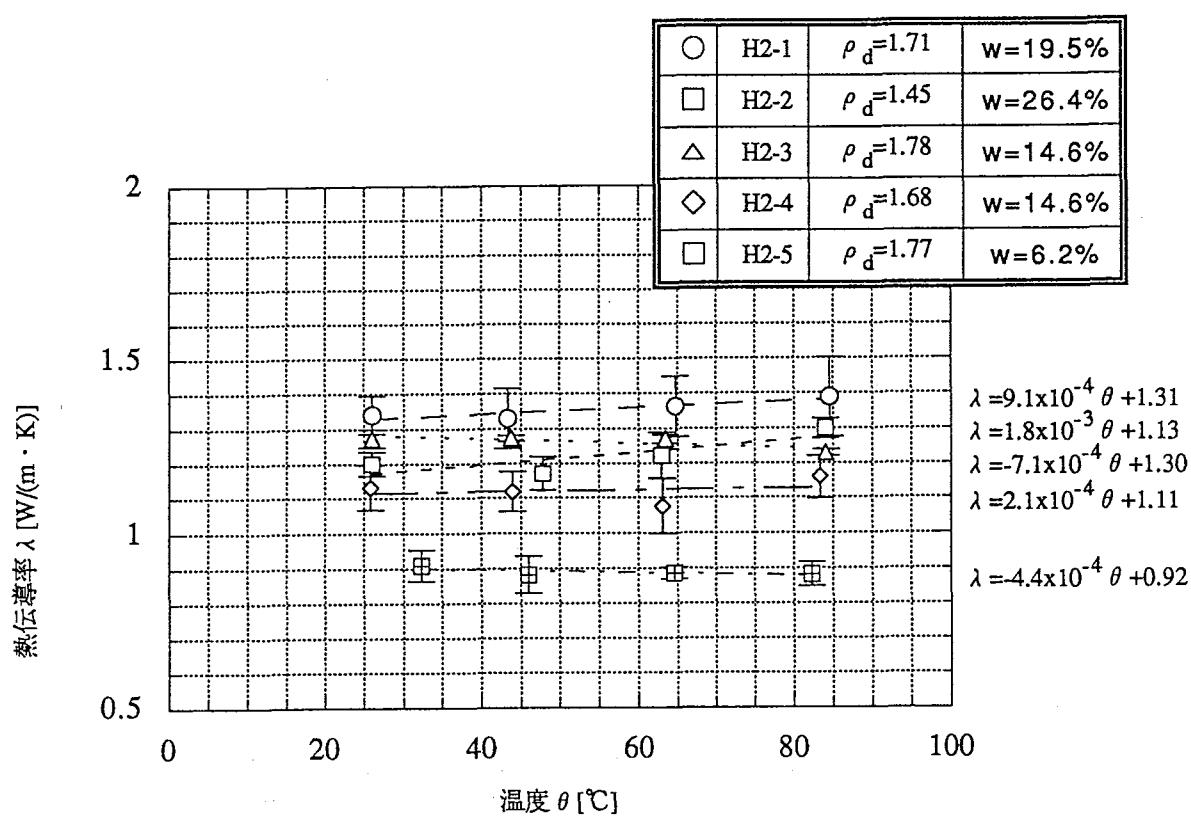


図2.33(1) 热伝導率の温度依存性（クニゲルV1、平成2年度）

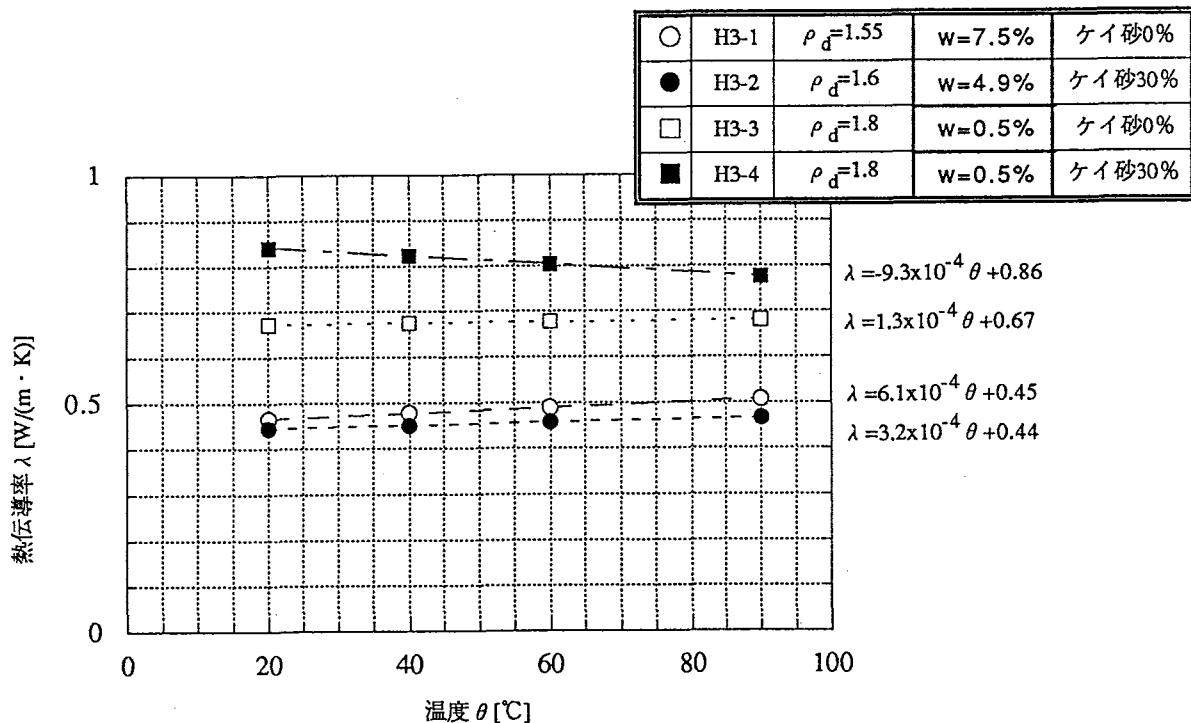


図2.33(2) 热伝導率の温度依存性（クニゲルV1、平成3年度）
[データは比熱：表2.17参照]

〈比熱〉

1) 測定方法

比熱の測定は、試料の水分条件を確保するために直接測定ではなく間接的に測定した。すなわち、比熱 c は以下の式で表されるように、試料の密度 ρ と熱伝導率 λ 及び温度伝導率 α から求められ、熱伝導率は前出のプローブ法で、温度伝導率は試料の周囲の温度を一定速度で変化したときの、試料中の半径方向上の2点の温度差変化から計算で求める方法で決定される。

$$c = \lambda / (\alpha \rho)$$

温度伝導率 α の測定は図2.34のような測定系を用いる。原則としては熱伝導率の測定で使用したものに準じているが、試料の中心軸から適当な距離はなれた2点（半径 r_1, r_2 [m]）に挿入された2本の熱電対（その読みを $\theta_{r_1}, \theta_{r_2}$ [°C]）と恒温槽の温度変化（一定となったときの温度勾配を P [°C/sec]）を測定し、次式から計算する。

$$\alpha = \frac{P \left\{ \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} + r_1^2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right\}}{2(\theta_{r_2} - \theta_{r_1})}$$

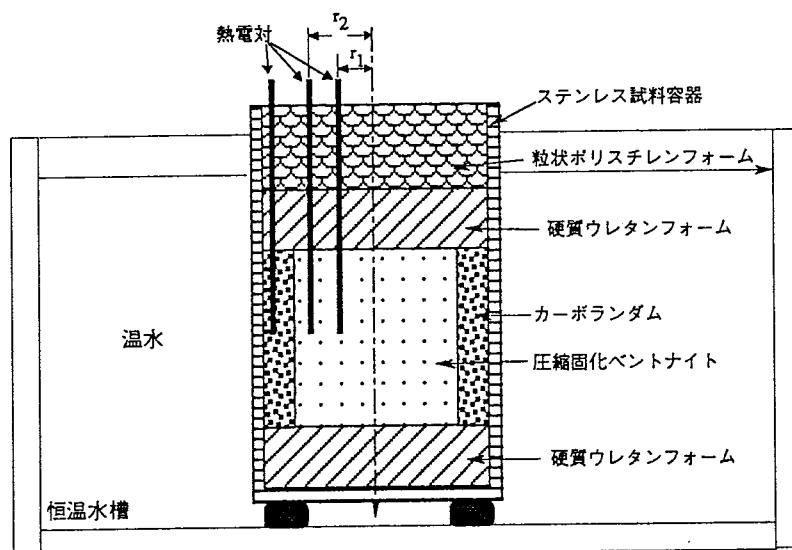


図2.34 比熱測定系

2) 測定結果

図2.35は比熱と試料温度との関係を示す。

圧縮固化ペントナイトの比熱 c はペントナイト土粒子の比熱を c_s ,水の比熱を c_w とすれば、含水比 w を用いると次の式のように与えられる。

$$c = \frac{1}{1+w} c_s + \frac{w}{1-w} c_w$$

水の比熱は4.2kJ/(kg · K)であり、報告書[9]の値を用いるとペントナイト土粒子の比熱は0.17～0.46 kJ/(kg · K)と求めることができる。この値は文献値における粘土の比熱に比べると1/5～1/10であるため測定精度に問題があったことが考えられる。熱伝導率の測定方法及びそれによる測定値はほぼ文献値などとの比較から理解できる範囲にあるため、今回の測定で温度伝導率の測定方法にさらなる改良を考慮する必要がある。

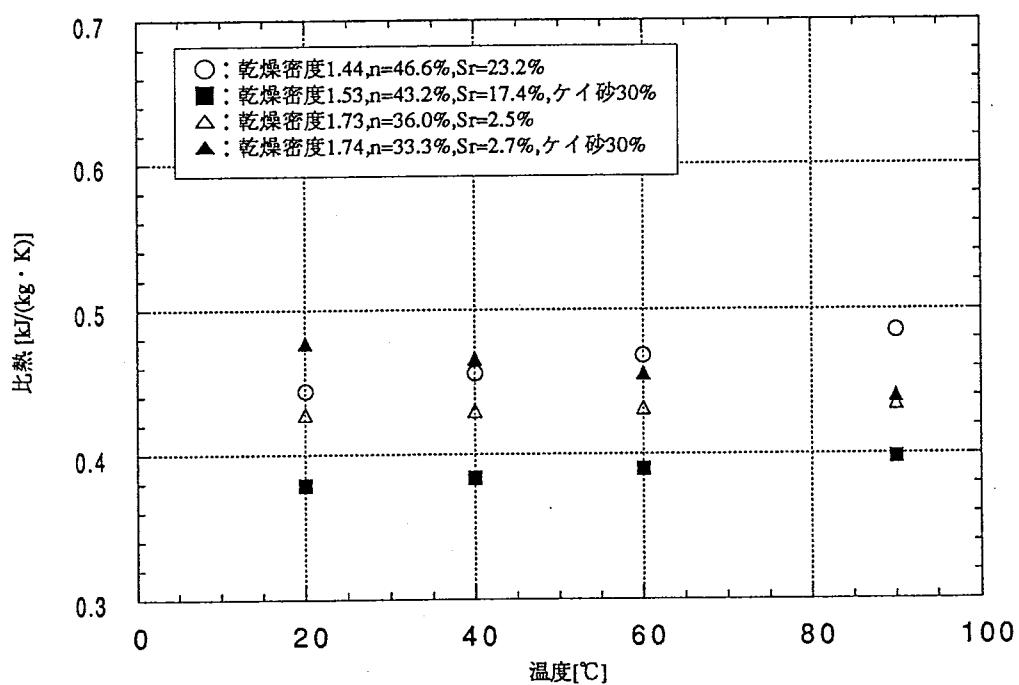


図2.35 比熱の温度依存性（クニゲルV1）

2.4 データの吟味および評価

2.4.1 圧密せん断特性について

現在までに取得してきたデータは、ベントナイトの圧縮固化体やその混合材料に対して、土質試験法などの従来の土質分野で行われている試験方法あるいはその応用を適用して求めてきている。これらのデータは、緩衝材や廃棄物が処分孔に設置された後のオーバーパックの沈下挙動等の弾粘塑性解析のために利用することを目的としているが、モデルが必要とするデータといった観点からまとめられていない。この項では、粘土の圧密せん断挙動を記述する構成式のために必要な物性値をこれまでの試験から、求めることができるかどうか、また、今後取得すべき物性値はなにかについて検討を行う。

2.4.1.1 構成式

土の構成式とは、「粒状体の理論とか流動則といったことばで示される土の力学モデル」[16]のこと、「土にかかる応力と土の変形との関係」を表している。代表的な粘土の弾塑性構成モデルとしてRoscoeらによって発表されたCam-clay model[17]があり、これまでにクリープの効果などを考慮するなど、より厳密なモデルの発展展開が試みられている。これらのモデルを評価に適用するためには、適切な方法で行われた土質試験のデータが必要である。先に述べたCam-clay modelや太田、関口によって提案されたモデル[18]また、三村、関口、柴田によるモデル[19]のために必要な土質定数はほぼ共通している。表2.7にモデルのために必要な土質パラメータおよび初期応力に依存する諸係数、そして、それを求めるために必要な試験方法などをまとめる[19]。なお、この表のなかで、右の行の式中に現われるCc,Csは標準圧密試験から求められる圧縮係数および膨潤係数であり、e-log p曲線の載荷時、除荷時の直線部分の傾きを表している。 ϕ' は有効内部摩擦角である。また、地盤の初期応力は計算に先だって設定するパラメータである。

| | | | | |
|--------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 土質パラメータ | λ | 圧縮指数 | 標準圧密試験 | $\lambda = 0.434 C_c$ |
| | κ | 膨潤指数 | | $\kappa = 0.434 C_s$ |
| | M | 限界状態における有効応力比 | 圧密非排水三軸圧縮試験 | $\sin \phi' = \frac{3M}{6+M}$ |
| | α | 二次圧縮指数 | 長期圧密試験 | $\alpha = \frac{dv}{d \ln(t)}$ |
| | v_0 | 基準体積ひずみ速度 | " | $\dot{v}_0 = \alpha / t_{100}$ |
| | k | 透水係数 | 透水試験または標準圧密試験 | $k = k_0 \exp\left(\frac{e - e_0}{\lambda_k}\right)$ |
| | λ_k | 透水性変化指数 | | |
| 初期応力に依存する諸係数 | $\sigma'_v v_0$ | 地盤の初期応力 | given | |
| | $\sigma'_v c$ | 圧密降伏応力 | 標準圧密試験 | $K_{0(NC)} = \frac{2 - \kappa / \lambda - \sin \phi'}{2 - \kappa / \lambda + \sin \phi'}$ |
| | $K_{0(NC)}$ | 静止土圧係数 | (三軸圧縮試験) | $\nu' = \frac{K_{0(NC)}}{1 + K_{0(NC)}}$ |
| | ν' | ポアソン比 | | |
| | G_0 | せん断弾性係数 | | $G_0 = \frac{1 + 2\nu'}{2(1 - \nu')} \cdot \frac{1 + e_0}{\kappa} \cdot \sigma'_w$ |

表2.7 構成モデル計算に使用するパラメータとそれを求めるための試験

2.4.1.2 土質パラメータ

本報告書に示した試験結果から、あるいはそれらを書き直したりして土質パラメータを決める。

1) 圧縮指数 λ

乾燥密度1.2,1.4の試料に対する圧密試験結果（表2.5）から、乾燥密度1.4で室温のデータから、圧縮係数Ccは0.40、従って、 $\lambda=0.17$ 。なお、乾燥密度1.4の圧縮固化ベントナイトが飽和したときの密度は約1.9g/cm³であり、本項のデータのまとめに対してこの密度を基準とする。

2) 膨潤指数 κ

本来、膨潤指数は標準圧密試験の除荷過程から求める。Börgessonは図2.36に示すような膨潤圧セルで軸方向の荷重を変化させながら、軸方向と半径方向の応力を測定し圧密膨潤試験を行っている[10]。その結果は図2.37のようになり、軸方向および半径方向の応力は間隙比が小さくなるに従って大きくなること、軸方向の応力と間隙比の関係はヒステリシスを示すが、半径方向のデータは示さないこと、また、半径方向の応力と間隙比との関係は試料を完全に拘束したときの膨潤圧と間隙比の関係とほぼ一致することが結果として示されている。従って、完全に拘束した膨潤圧の測定値とそのときの試料の間隙比との関係は、圧密試験での除荷時のe-log pの関係と傾向が同じと考え、図2.20(2)をこの関係に合うように図2.38に書き直して膨潤指数を求める。この図から最小二乗近似で傾きを求めると、 $\kappa=0.11$ 。

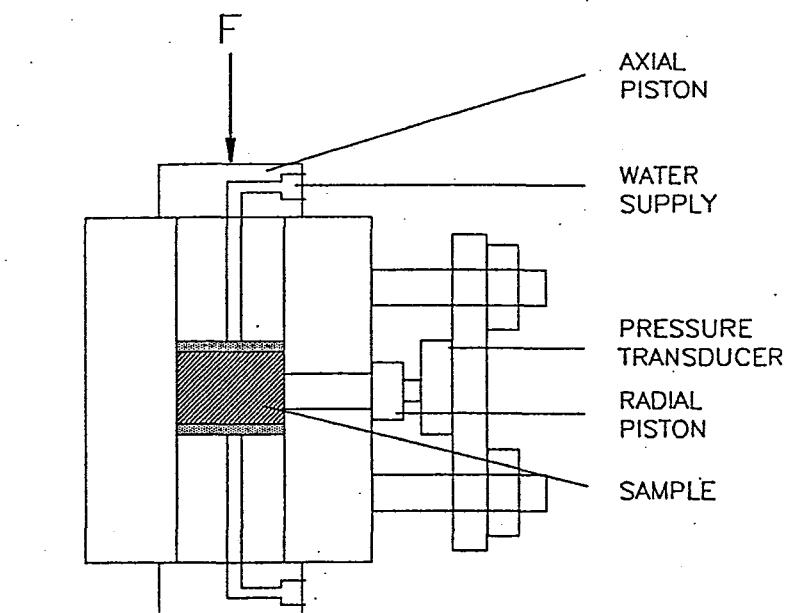


図2.36 半径方向の応力測定可能なセル[10]

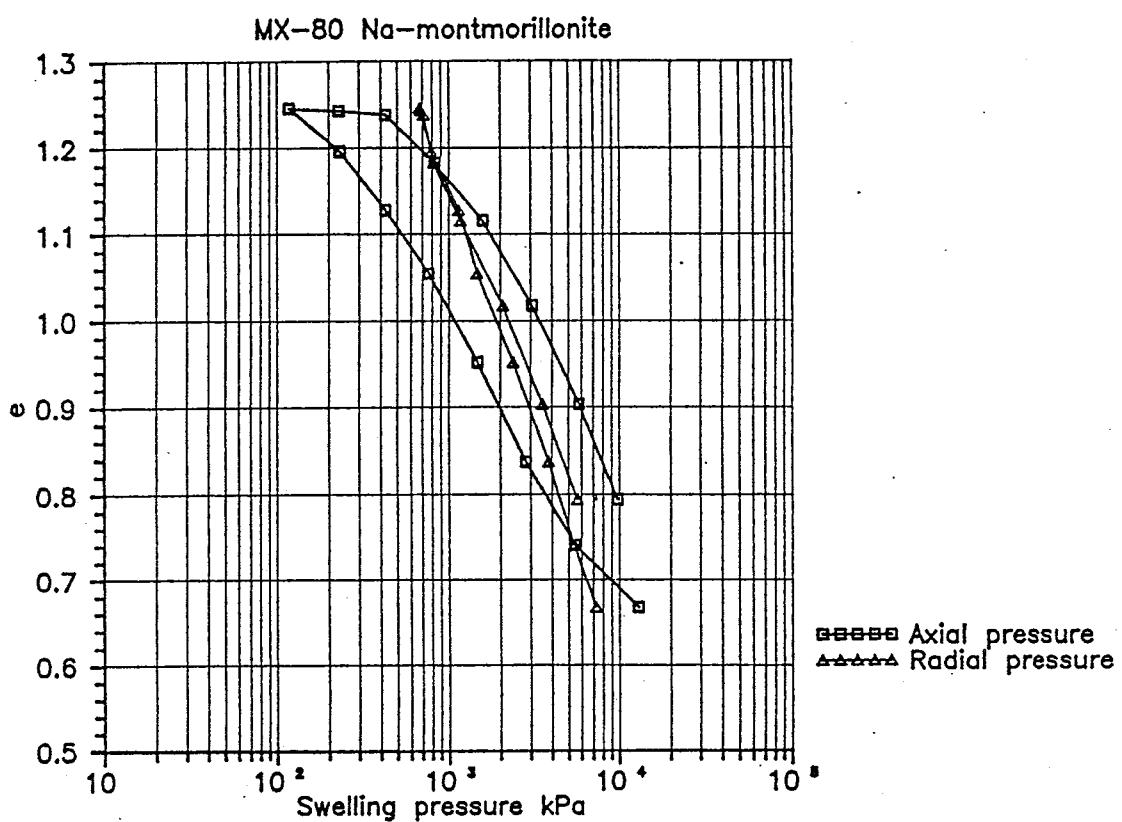


図2.37 段階的に荷重を変化させたときの間隙比と
軸方向および半径方向の応力との関係[10]

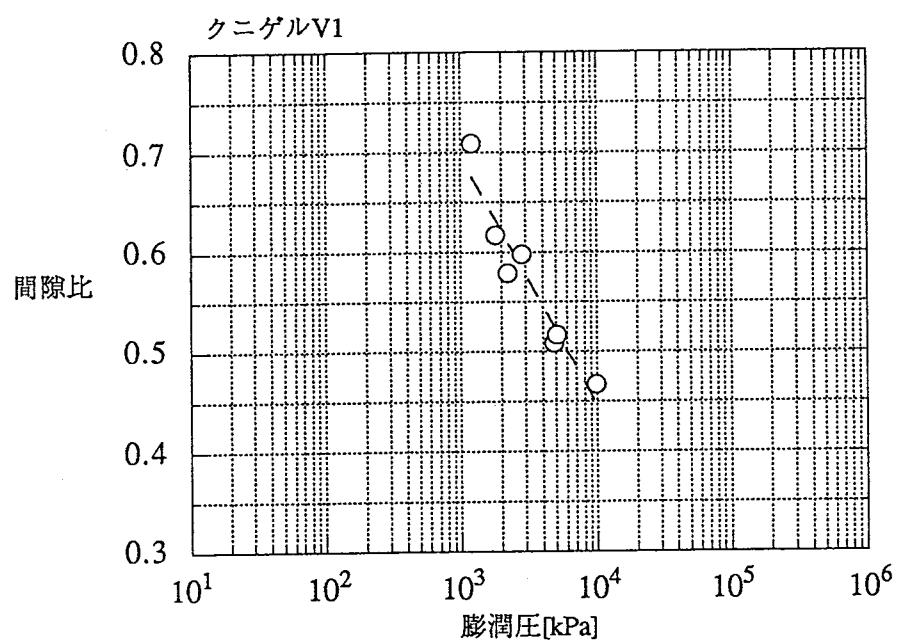


図2.38 圧縮固化ペントナイトの膨潤圧と間隙比との関係

3) 限界状態における有効応力比 M

Mは三軸圧縮試験において、破壊時の平均主応力と主応力差 q_f との関係をプロットしたときの傾きである。 $(M=q_f/p_f)$ 表2.18に示したように、この関係は圧密非排水試験から求めることが原則であるが、本報告書にまとめた三軸圧縮試験(UU)からMを求めてみる。図2.39にプロットを示す。図はケイ砂0%と30%の試験結果である。なお、温度による傾向の差をケイ砂0%の図で調べたが、大きな違いはないようである。この図から読み取れるMの値は2.1となり、BörgessonのMX-80を用いた試験から得た値M=0.37[10]とかなり差がある。これは、本報告書での三軸試験がひずみ速度1%毎分で行われているのに対して、Börgessonの行った試験ではひずみ速度が0.012~0.1%毎時であることが原因である。なお、平成3年度「地層処分におけるシーリング研究」の中で行った三軸圧縮試験はひずみ速度を1%毎時で行っており、この結果から p_f-q_f の関係を求めるところ2.40のようになり、M=0.54が得られる。なお、この図では試験中の応力履歴が表されている。この値を暫定的に用いることとし、以下のパラメータを求める。なお、 $\sin \phi'$ は以下の式から求められる。

$$\sin \phi' = \frac{3M}{6+M}$$

従って、 $\sin \phi' = 0.25$ 。

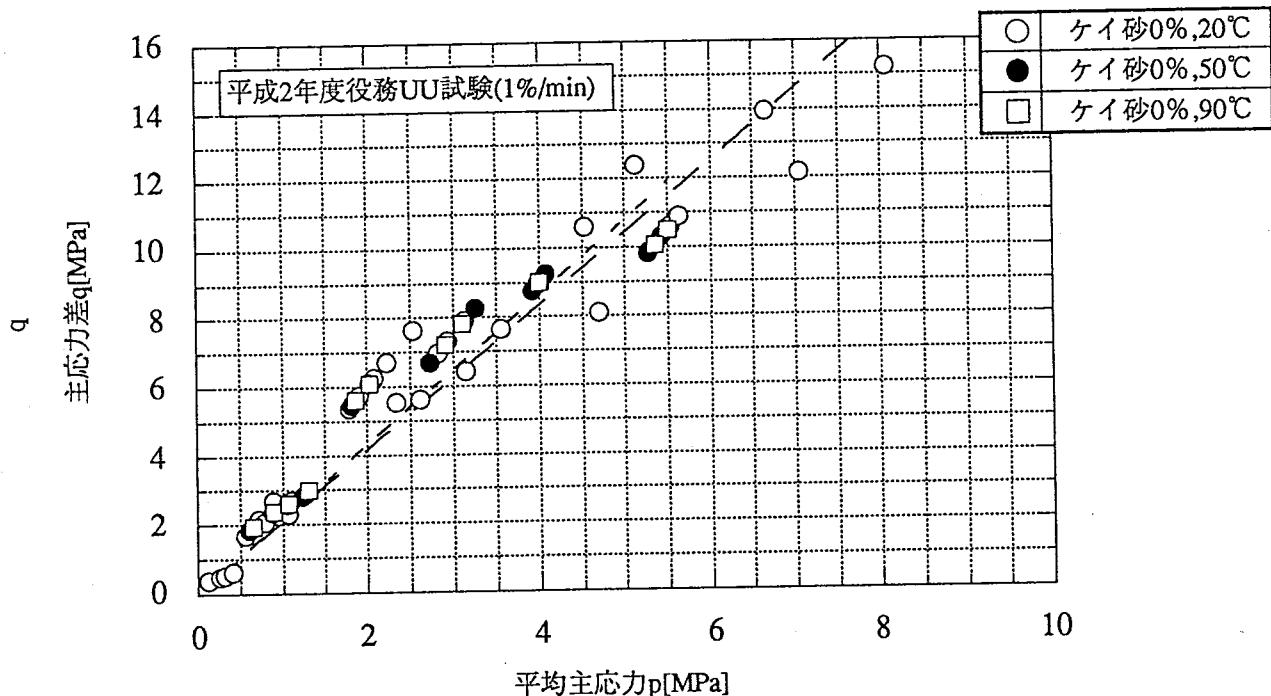


図2.39(1) 限界状態線 (UU試験結果のプロット) [ケイ砂0%]

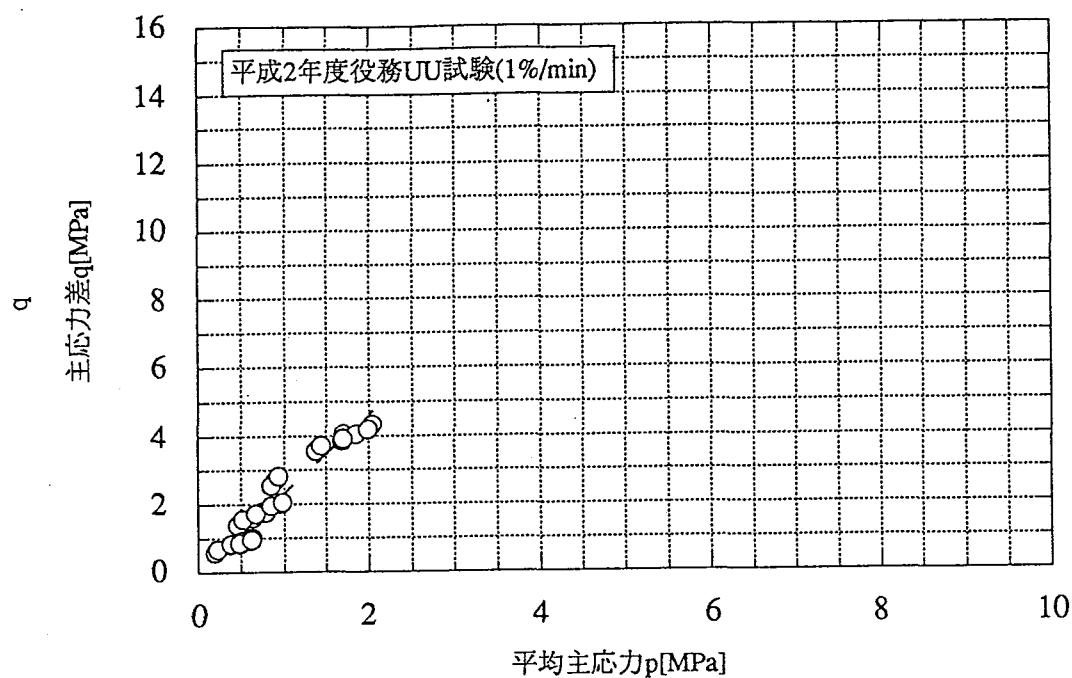


図2.39(2) 限界状態線 (UU試験結果のプロット) [ケイ砂30%]

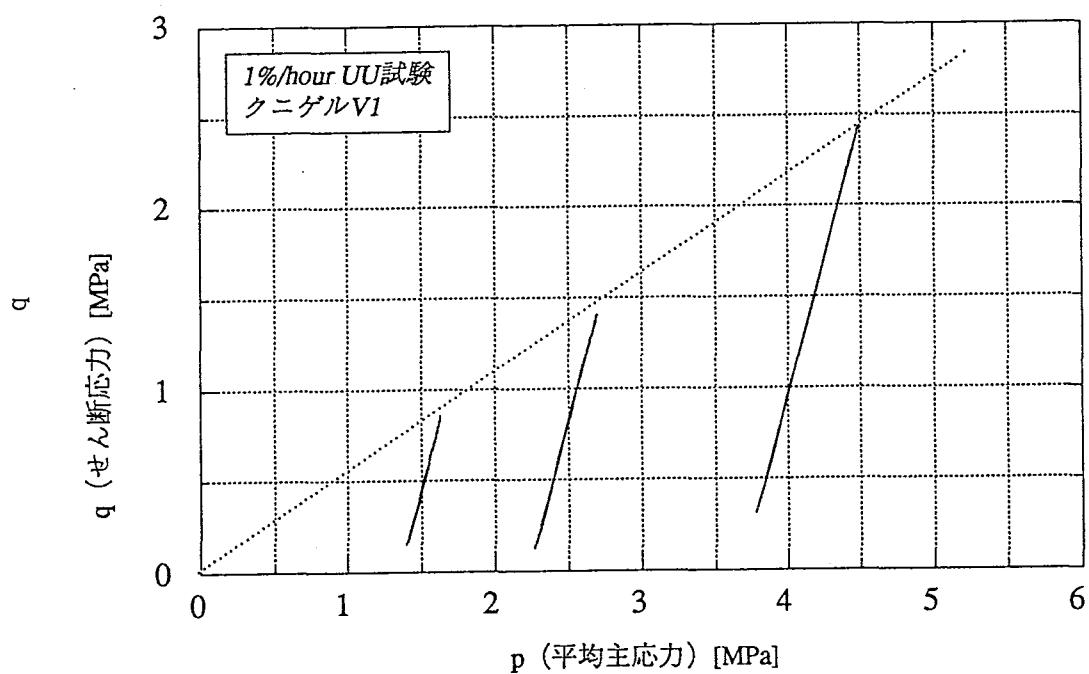


図2.40 限界状態線 (ひずみ速度1%/hour)

4) 二次圧縮係数 α 、基準体積ひずみ速度 v_0

これらの値は長期圧密試験から求められるが、相当する試験を行っていないため、今後取得する必要がある。

5) 透水係数 k 、透水性変化指数 λ_k

図2.26の透水試験結果より、乾燥密度1.4として、 $k=5.5 \times 10^{-12} \text{m/sec}$ 、また、 $\lambda_k=0.12$ 。なお、透水係数は乾燥密度1.6~2.0g/cm³の範囲の値を外挿で求めているため、他の文献[20]と比較して大きな値となっている。

6) 初期応力に依存する諸係数

文献[19]によれば、表2.7に示した式から静止土圧係数、ポアソン比、そしてせん断弾性係数は求められる。なお、圧密降伏応力は圧縮指数と同じく表2.5の値から1.23MPaとなる。

以上の結果を表2.8にまとめた。

| | | | |
|--------------|--------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 土質パラメータ | λ | $\rho_{\text{sat}}=1.89, 20^{\circ}\text{C}$ で $C_c=0.40$ | $\lambda=0.17$ |
| | κ | 膨潤圧と試料の間隙比との関係から | $\kappa=0.11$ |
| | M | 1%/hourで行ったUU試験より | $M=0.54$ |
| | α | | *** |
| | v_0 | | *** |
| | k | 透水試験結果（飽和密度1.9のとき） | $k=5.5 \times 10^{-12} \text{m/sec}$ |
| | λ_k | 〃 | $\lambda_k=0.12$ |
| 初期応力に依存する諸係数 | $\sigma' v_0$ | given | |
| | $\sigma' v_c$ | $\rho_{\text{sat}}=1.89, 20^{\circ}\text{C}$ のとき | $\sigma' v_c=1.23 \text{MPa}$ |
| | $K_{0(\text{NC})}$ | 上記の Mを適用すると | $K_{0(\text{NC})}=0.25$ |
| | ν' | 〃 | $\nu'=0.41$ |
| | G_0 | 〃 $\rho_{\text{sat}}=1.9$ 、土粒子の密度2.7として | $G_0=8.9 \text{MPa}$ |

表2.8 土質パラメータのまとめ（乾燥密度1.4と仮定）

処分場での緩衝材の長期的な挙動を記述するためには、適当な構造モデルを用いて、できるかぎり正確な実験データを基に評価することが望ましい。これまでの測定データから、直接的あるいは間接的に土質パラメータを表2.8のようにまとめたが、より信頼できるデータに取得のために以下の試験を行う必要がある。

- ①長期圧密試験
- ②圧密試験（試験の温度や試料の密度を変化させる）
- ③ひずみ速度の小さい三軸圧縮試験

また、透水係数の密度依存性について乾燥密度で1.5以下の範囲をデータ取得してゆく必要がある。

2.4.2 透水係数測定について

2.4.2.1 透水係数の温度依存性

圧縮固化ペントナイトの透水係数は図2.27に示されるように、試験体の置かれる温度によって変化する。今回の測定や他の文献[10]による測定でも、試料の温度が上昇すると透水係数は大きくなる。また、同じ温度の透水係数でもいったん高温（100°C以下）を経た試料はもとの値よりも大きい。図2.27のデータをもとに、温度が室温から90°Cまで上昇したときの透水係数の変化の割合と、同じ室温で温度履歴を受ける前と後の透水係数の変化の割合を表2.9にまとめた。

| 乾燥密度 | 20°C | 90°C | *20°C | 90°C/20°C | *20°C/20°C |
|------|---------|---------|---------|-----------|------------|
| 1.58 | 4.6E-13 | 9.8E-13 | 1.2E-12 | 2.1 | 2.5 |
| 1.67 | 4.6E-13 | 9.6E-13 | 8.4E-13 | 2.1 | 1.9 |
| 1.69 | 2.0E-12 | 4.5E-12 | | 2.2 | |
| 1.75 | 2.1E-13 | 4.4E-13 | | 2.0 | |
| 1.78 | 1.1E-13 | 3.4E-13 | 1.2E-13 | 3.2 | 1.1 |
| 1.84 | 6.6E-14 | 4.0E-13 | | 6.1 | |

表2.9 透水係数と試料の温度

●20°C→90°C

透水係数が温度の上昇と共に大きくなる理由は、透過する水の粘性が小さくなることが考えられる。多孔質媒体を流れる水の透水係数kは水の粘性係数 μ や水の密度 ρ_w 、多孔質媒体の性質によって決まる係数（透過度）Kを用いると以下の式で表すことができる。

$$k = \frac{K \rho_w g}{\mu}$$

ここで、gは重力加速度である。温度上昇による媒体の変化が透水係数に及ぼす影響を明らかにするために、上の式を次式のように書き換え、透過度で実験データをまとめなおす（図2.41）。

$$K = \frac{\mu}{\rho_w g} \cdot k$$

また、図2.41から以下のことことがわかる。

・温度上昇による水の粘性や密度の変化を差し引いた透過度で、20°Cと90°Cの値を比較すると、乾燥密度が 1.75g/cm^3 以下では温度上昇により透過度は小さくなり、以上では大きくなっている。

この点についてBorgesson[10]は、温度の上昇によってベントナイトの微細構造に変化が起こったのではないかとしている。今後は、微細構造の観点も含めて検討を行ってゆく必要がある。

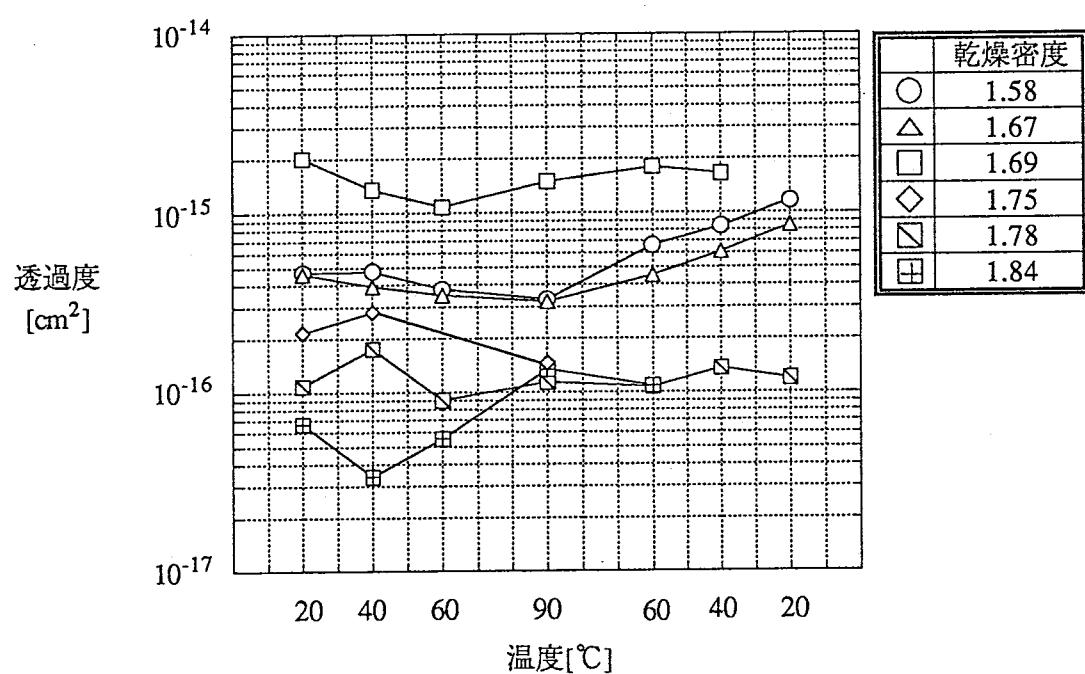


図2.41 圧縮固化ベントナイトを透過する水の透過度の温度依存性

● $20^{\circ}\text{C} \rightarrow *20^{\circ}\text{C}$

これまでの測定データでは、試料は温度履歴を経ると透水係数が大きくなっている。また、この傾向は試料の密度が小さいほど顕著である。測定中に試料の微細構造が変化した、あるいは、試験が長期にわたるゆえに間隙を占めていた粒子が装置の外に出てしまつたなどの理由が考えられるが、今回の測定では確認していない。なお、同じクニゲルV1を用いて行った同様の試験では温度履歴の後の方が透水係数が小さくなっている[21]。この試験で用いた透水セルは、水の入口と出口にそれぞれ水圧を負荷することができるといった構造上の差があるが、明らかではない。

2.4.2.2 低透水性媒体の透水試験

圧縮固化ペントナイトの透水係数は乾燥密度1.8の試料に対しておよそ 10^{-13}m/sec と極めて小さく、測定に時間がかかるため測定に細心の注意を払ってもデータの精度を確保することは難しい。中野ら[22]は難透水性岩石の室内試験方法について検討し、透水係数の精度の吟味を行っており、定水位法による透水係数測定の精度に影響する因子として、側面流、透過水量の測定精度および室温変化に伴う試験水の体積変化、漏洩、蒸発などがあるとし、特に、室温変化に伴う試験水の体積変化が重要であるとしている。過去の測定結果[7]を見ると、試料の乾燥密度が1.8よりも大きい場合、透水量の時間変化は室内の空調によって影響を受けている。この問題は、同論文[22]にもあるように測定系を恒温室に設置することや配管系を極力短くすることで解決できると考える。

ここ数年、低透水性岩盤中をながれる水の透水性や包括的な挙動（どのようなみず道をどのように通ってくるのか）を解明するためにいくつかの試験方法が研究されている。たとえば、transient pulse法のように、平衡状態に達した供試体の一端にパルス状の間隙水圧を与え間隙水圧の時間に対する減衰曲線から透水係数を求める方法、また、与える圧力をサイン波状に変化させて、特定化されたみず道に対する透水状態を知るために行われるsinusoidal (oscillation) 試験[23]、供試体の一端に一定速度で水を注入し、定常状態に至ったときの供試体の両端に水頭差から透水係数を求めるflow pump法[24]がある。また、transient pulse法などより簡易に測定できる方法として、水蒸気を供試体内に通過させ、透過抵抗性から透水係数を測定する水蒸気拡散法[25]も開発されつつある。それぞれの特徴は、transient pulse法は定水位法に比べて、測定に要する時間が短いこと[22]、水蒸気拡散法は装置が簡易であることなどであり、測定限界は透水係数で考

えて transient pulse 法は $1.5 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ ~ $3.7 \times 10^{-14} \text{m/sec}$ [22]、水蒸気拡散法は $\sim 10^{-12} \text{m/sec}$ であり圧縮固化ペントナイトの透水係数の測定に適用することは可能な数字となっている。しかしながら、これらの方針を採用するためには、試料が水と接触すると膨潤することを考慮して、試料の拘束やフィルターを工夫する必要がある。

定水位法で圧縮固化ペントナイトの透水係数を評価するためには、測定が長時間にわたるが故の不安定要因を極力取り除く必要がある。しかし、この方法は物質のマクロの透水係数を知るにはもっとも直接的な方法でありわかりやすい。得られるデータの精度としてオーダー程度で十分であればこの方法で問題はないと考えるが、さらに精度を要求される場合、そのほかの方法を検討する意味はある。

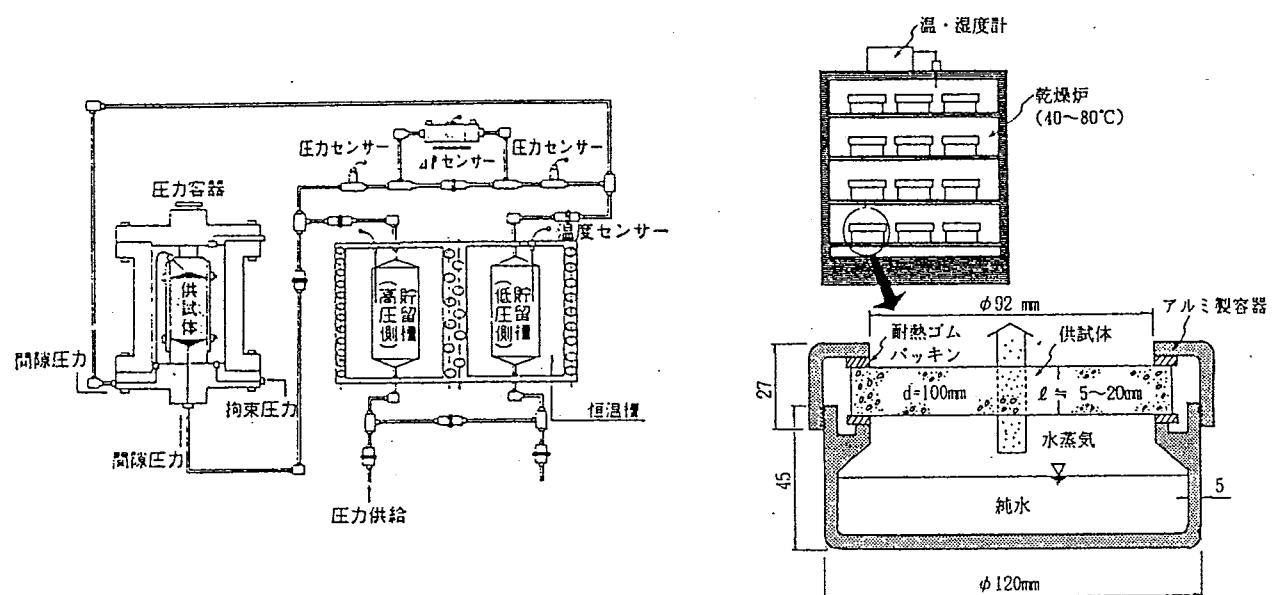


図2.41 各試験装置の概念図
(左: transient pulse 試験[22]、右: 水蒸気拡散法[25])

2.4.3 热伝導率モデルについて

土壤の热伝導率は構成物質である土粒子、水分、空気の热伝導率そしてその含有割合また、幾何学的配置状態および水分状態に左右される[26]。このような三相系の物質の热伝導率を表現するモデルとしてこれまでに提案されているモデルを図2.42に示す。それぞれのモデルに対する有効热伝導率 λ_{eff} は以下の式から求めることができる。なお、以下の式で n, Sr は試料の空隙率および饱和度を、 $\lambda_s, \lambda_w, \lambda_a$ はそれぞれ土粒子、水、空気の热伝導率である。

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{\frac{1-n}{\lambda_s} + \frac{nSr}{\lambda_w} + \frac{(1-Sr)n}{\lambda_a}} \quad \text{《直列モデル》}$$

$$\lambda_{eff} = (1-n)\lambda_s + nSr\lambda_w + (1-Sr)n\lambda_a \quad \text{《並列モデル》}$$

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \frac{1-2(A+B)}{1+A+B} \quad \text{《分散モデル》}$$

ただし $A = \frac{nSr(\lambda_s - \lambda_w)}{2\lambda_s + \lambda_w}$
 $B = \frac{(1-n)(\lambda_s - \lambda_a)}{2\lambda_s + \lambda_a}$

$$\frac{n(1-Sr)(\lambda_s - \lambda_a)}{2\lambda_s + \lambda_a}$$

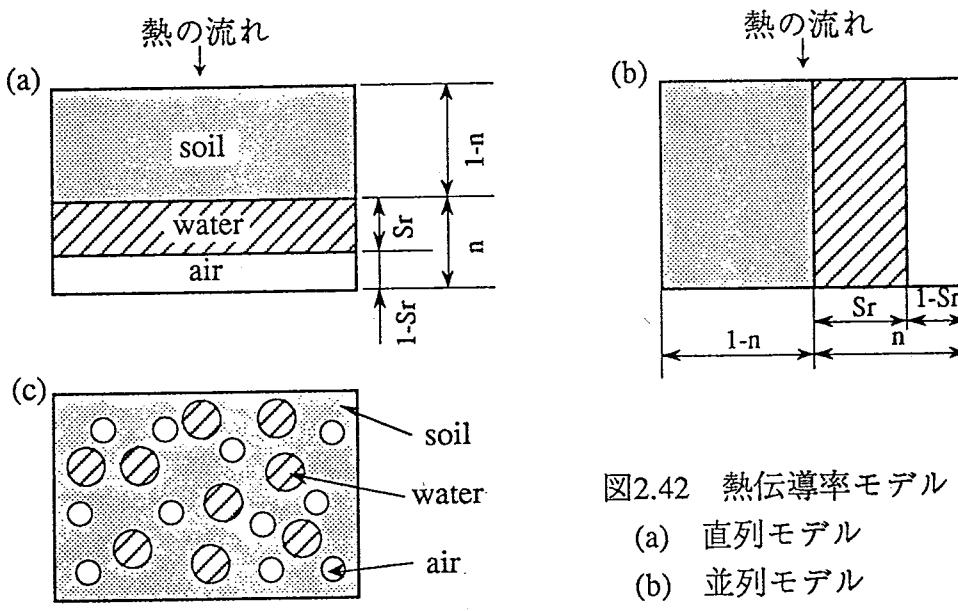


図2.42 热伝導率モデル

- (a) 直列モデル
- (b) 並列モデル
- (c) 分散モデル

実際にはこれらのモデルを適当に組み合わせたり、他のモデルを考案して実際の熱伝導率測定データを解釈する研究が多く、たとえば、直列-並列モデルをもとに実験データをまとめた研究[27]や、砂岩やゼオライト岩などを対象にして測定した熱伝導率のデータを加重相乗平均モデルによって精度よくまとめた研究[28]などがある。ここでは、図に挙げた3つのモデルと上記の[28]の研究で検討された加重相乗平均モデルを用いて測定されたデータとの比較を行い、圧縮固化ベントナイトの熱伝導率に使用できるモデルを評価する。

加重相乗平均モデルは以下の式で表される。

$$\lambda_{eff} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^{nSr} \cdot \lambda_a^{n(1-Sr)}$$

また、固相である土粒子の内部にも水分が分布していることを考慮して実験データを含めた考察から、この関係を以下の式のように書き直す。

$$\lambda_{eff} = \left(\frac{1}{n}\right)^{1-Sr} [n\lambda_s + (1-n)\lambda_w]^{1-n} \cdot \lambda_w^{nSr} \cdot \lambda_a^{n(1-Sr)}$$

水及び空気の熱伝導率は、温度 θ によって表2.10のように変化する。

| 温度[K] | 熱伝導率[W/(m · K)] | |
|--------|-----------------|-------|
| | 水 | 空気 |
| 273.15 | 0.562 | 0.024 |
| 300 | 0.610 | 0.026 |
| 340 | 0.657 | 0.029 |
| 400 | 0.684 | 0.033 |

表2.10 水、空気の熱伝導率[29]

空気の熱伝導率は気圧が0.1MPaの時の値であるが、これが1MPaの状況下でも1%程度値が大きくなるだけなので試料中に閉じ込められた空気の熱伝導率もこの表の値で問題ないと考える。なお、土粒子であるベントナイトの熱伝導率はその構成材料であるモンモリロナイトや石英の含有割り合いや混合状況に左右されるため一意に決めることはできない。それぞれのモデルの性質を調べるために仮にベントナイト土粒子の熱伝導率を温度によって変化しない2W/(m · K)として計算をしてみる（表2.11）。また、それぞれのモデルの値を乾燥密度と飽和度を基準にしてグラフに表す（図2.43）。

| 乾燥密度 g/cm ³ | 空隙率 | 飽和度 | 直列 model | 並列 model | 分散 model | 加重相乗平均 model |
|---------------------------|------|-----|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 1.4 | 0.48 | 0.1 | 0.06 | 1.08 | 0.74 | 0.44 |
| 1.4 | 0.48 | 0.3 | 0.07 | 1.13 | 0.65 | 0.52 |
| 1.4 | 0.48 | 0.5 | 0.10 | 1.19 | 0.56 | 0.60 |
| 1.4 | 0.48 | 0.7 | 0.16 | 1.25 | 0.47 | 0.71 |
| 1.4 | 0.48 | 0.9 | 0.35 | 1.30 | 0.39 | 0.83 |
| 1.4 | 0.48 | 1.0 | 0.95 | 1.33 | 0.35 | 0.90 |
| 1.6 | 0.41 | 0.1 | 0.07 | 1.22 | 0.62 | 0.64 |
| 1.6 | 0.41 | 0.3 | 0.09 | 1.27 | 0.54 | 0.69 |
| 1.6 | 0.41 | 0.5 | 0.12 | 1.31 | 0.47 | 0.74 |
| 1.6 | 0.41 | 0.7 | 0.16 | 1.35 | 0.41 | 0.79 |
| 1.6 | 0.41 | 0.9 | 0.41 | 1.41 | 0.33 | 0.87 |
| 1.6 | 0.41 | 1.0 | 1.04 | 1.43 | 0.30 | 0.90 |
| 1.8 | 0.33 | 0.1 | 0.08 | 1.36 | 0.50 | 0.93 |
| 1.8 | 0.33 | 0.3 | 0.11 | 1.40 | 0.44 | 0.92 |
| 1.8 | 0.33 | 0.5 | 0.14 | 1.44 | 0.38 | 0.91 |
| 1.8 | 0.33 | 0.7 | 0.22 | 1.48 | 0.33 | 0.90 |
| 1.8 | 0.33 | 0.9 | 0.47 | 1.52 | 0.27 | 0.89 |
| 1.8 | 0.33 | 1.0 | 1.14 | 1.54 | 0.25 | 0.89 |

単位:W/(m · K)

表2.11 各熱伝導率モデルの計算値
(ペントナイト土粒子の熱伝導率を2W/(m · K)と仮定)

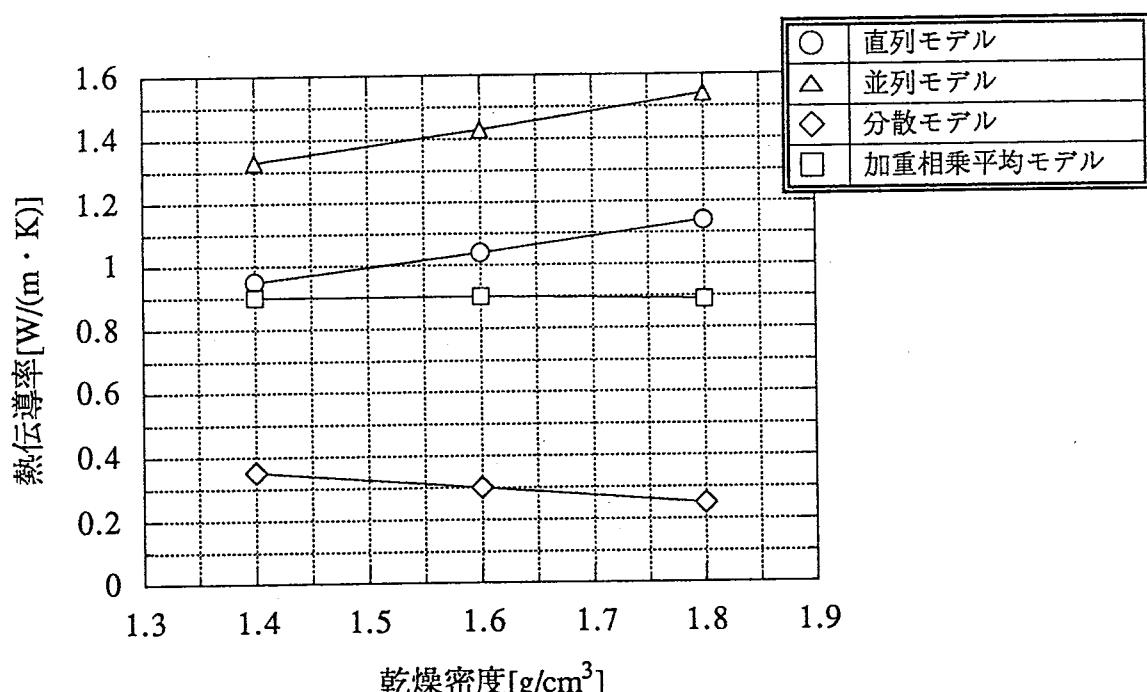


図2.43(1) 热伝導率モデルの比較 (乾燥密度によるまとめ)

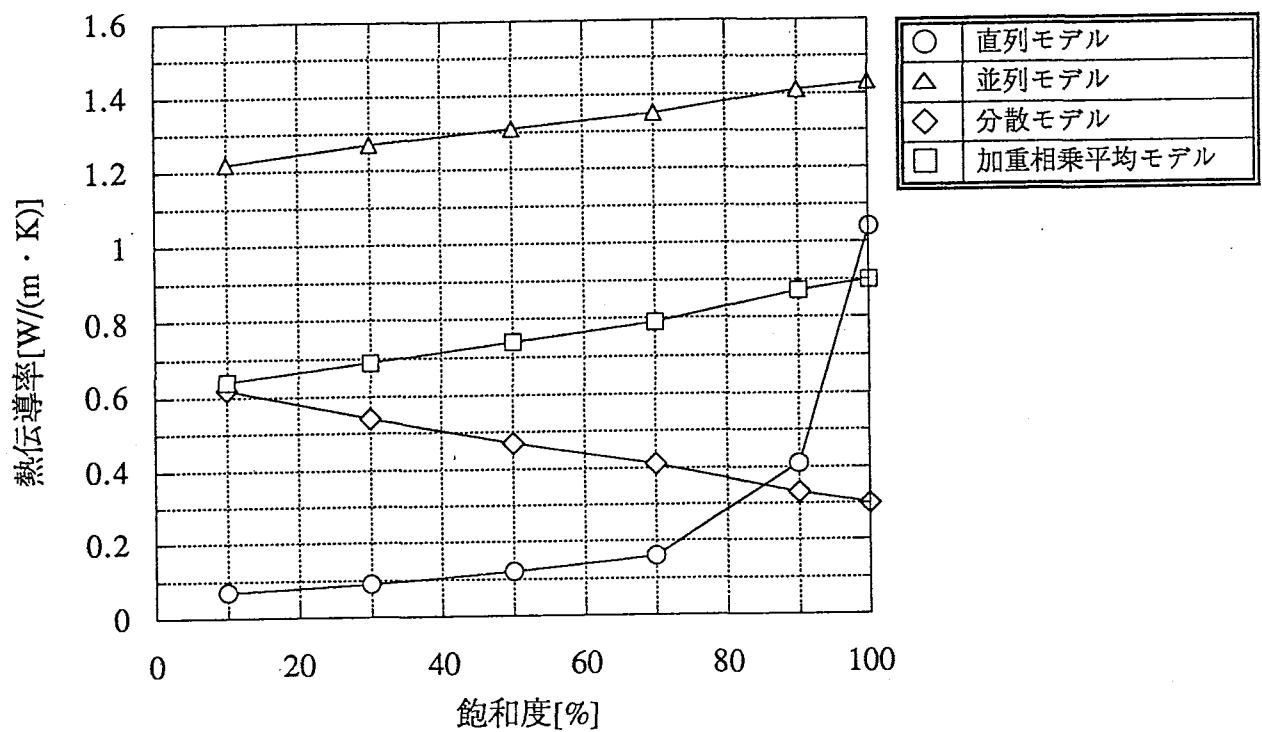


図2.43(2) 热伝導率モデルの比較（饱和度によるまとめ）

表2.11から、それぞれのモデルの試料密度や饱和度に対する応答を図に示して考えてみる。図2.43(1)は饱和度100%の試料において密度依存性を示したもの、また、図2.43(2)は乾燥密度1.6の試料に対して饱和度を変化させて、各モデルの計算結果をまとめたものである。モデルを実際の測定値と比較する際に基準となるのは、図2.30や図2.32の考察から、

- ①試料の密度が大きくなると熱伝導率は大きくなる。
 - ②試料の饱和度が大きくなるにしたがって、熱伝導率は大きくなる。
- の2点である。分散モデルはこのどちらも満たしていないので適当なモデルといえない。また、直列モデルは試料の饱和度が100%になるときに大きく変化し、実際の測定データの傾向と一致しない。図2.43(1)(2)から判断して、測定値の傾向を比較的よく表しているのは並列モデルと加重相乗平均モデルと言える。なお、これら2つのモデルで温度が変化したときの応答を表2.22の値を用いて調べると、並列モデルのほうが加重相乗平均モデルと比較してより小さな変化となる。（乾燥密度1.72、饱和度92%の試料では、並列モデル:1.48→1.49W/(m · K)、加重相乗平均モデル:1.27→1.33W/(m · K)）実際

の測定結果からはどちらのモデルが良いか判断できないが、より簡易な並列モデルでも問題ないと思われる。

また、つぎの作業として2つのモデルにおいてペントナイト土粒子の熱伝導率を変化させて、データに合わせることがあるが、これまでの測定データでは密度や飽和度の条件が適切に設定されていなかったため、求めることができない。

【参考文献】

- [1] 昭和59年度：人工バリアのためのシールおよびプラグに関する研究
- [2] 昭和60年度：人工バリアのためのシールおよびプラグに関する研究(II)
- [3] 昭和61年度：地層処分における人工バリアの研究
- [4] 昭和62年度：処分場の閉鎖技術に関する調査・試験研究
- [5] 平成元年度：地層処分におけるバックフィル候補材料に関する調査
- [6] 平成2年度：地層処分におけるバックフィル材料に関する研究
- [7] 平成3年度：地層処分システムにおけるシーリング研究
- [8] 平成2年度：緩衝材の力学的物性値取得のための試験
- [9] 平成3年度：緩衝材の力学的物性値取得のための試験(II)
- [10] L.Börgesson, Interim report on the laboratory and theoretical work in modeling the drained and undrained behavior of buffer materials, SKB technical report 90-45(1990)
- [11] 土質工学会：土質試験の方法と解説、(1990)
- [12] R.Pusch,O.Karnland, H.Hökmark; GMM -- A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays, SKB technical report 90-43 , pp.83-85 (1990)
- [13] 中野：土の物質移動学：東京大学出版会発行(1991)
- [14] G.S.Campbell, Walter H.Gardner; Psychrometric measurement of soil water potential: Temperature and bulk density effects; Soil Sci.Soc. Amer. Proc., vol.35, pp.8-12(1971)
- [15] 鹿島建設：固化ペントナイトの作成方法とこれを利用した廃棄施設の止水に係る技術の開発（内部資料）(1988)
- [16] 太田：構成式の誕生・成長そして成熟：土と基礎 vol.38, No.7, pp.5-11 (1990)
- [17] Roscoe,K.H, Schofield, A.N. and Thurairajah,A.; Yielding of clays in states wetter than critical ;Geotechnique, vol.13,No.3, pp.211-240 (1963)
- [18] H.Sekiguchi,H.Ohta; Induced anisotropy and time dependency in clays; Proc.Speciality Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.229-239 (1977)
- [19] 三村、関口、柴田：海底地盤の変形解析---弾粘塑性構成式の適用例---：土と基礎 vol.38, No.7, pp.13-18 (1990)
- [20] 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.3-27 (1992)

- [21] Pusch,R. Börgesson, L. and Karnland, O. ; Internal report No.3 (内部資料) ;(1991)
- [22] 中野、齊藤、西垣：難透水性岩石を対象とした室内透水試験：土質工学会論文報告集 vol.31,No.3 pp.164-174 (1991)
- [23] 高橋：Oscillation Test について：
- [24] Olson et al.; Flow pump application in triaxial testing ASTM STP 977,"Advanced triaxial testing of soil and rock", Donaghe et als. eds, ASTM Philadelphia,pp.68-81 (1988)
- [25] 伊藤、前村、坂口：水蒸気拡散法による透水性評価試験について：第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.11-15(1992)
- [26] 稲葉：土壤の熱物性：熱物性学会誌 vol.3, No.1 ,pp.31-39 (1989)
- [27] たとえば土壤物理研究会編：土の物理学：pp.285 森北出版 (1979)
- [28] M.Deguchi, H.Kiyohashi, S.Suzuki and H.Enomoto; Evaluation of thermal conductivity of porous rocks by means of a new three phase model; 13th Japan Symp. on Thermophysical Properties, pp.109-112 (1992)
- [29] 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第4版：(1986)

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を行ってきた。本年度は、これらの検討の成果を基に、シーリング性能を評価するのに必要なモデル化の検討を行うとともに、想定されるシナリオに対して予備的な影響評価を行う。

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。本年度は、基本的な地下水挙動の把握を目的として、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について解析的に検討する。

3.2 解析モデル

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し埋戻材（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。

本解析では、地層処分場の形状を考慮して、軸対称モデルを採用した。また、処分場の掘削、埋戻しを考慮して解析するため、非定常不飽和解析を行った。

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、下方を不透水境界、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、処分場の端より側方に4000m、下方に3000mの範囲とした¹⁾、²⁾。

岩盤の諸特性については、現時点では処分サイト及び処分地層が確定していないので、結晶質岩系を想定した。

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-1000mとした。

解析モデルに対する要素分割図を図-3.2に示す。

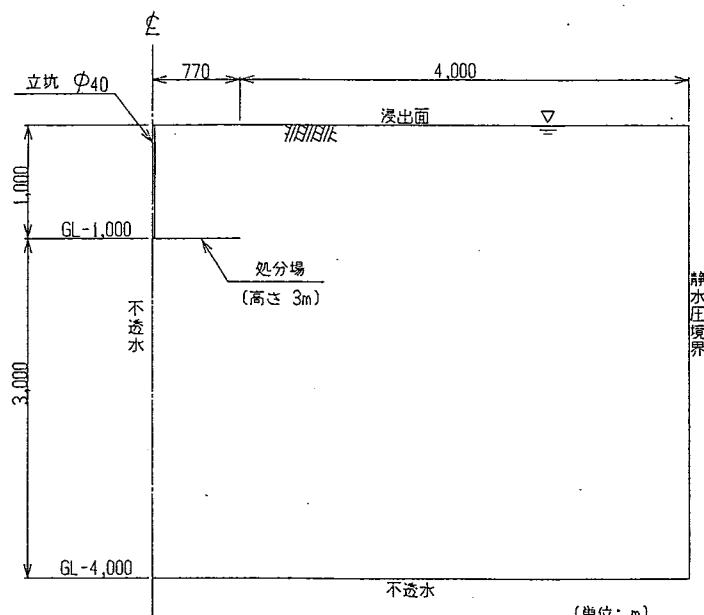


図-3.1 解析モデル

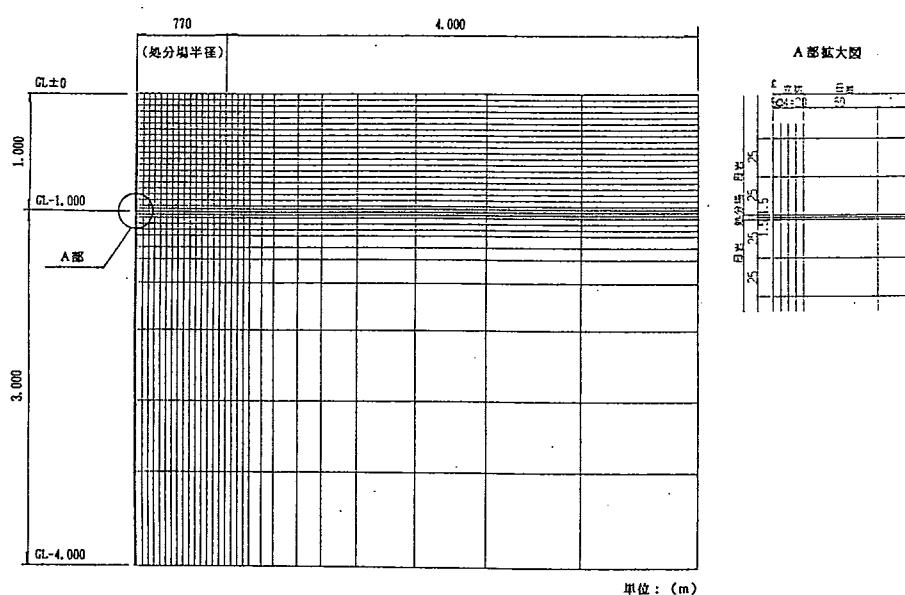


図-3.2 要素分割図

3.2.3 水理定数

(1) 飽和透水係数及び空隙率

結晶質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} | 1 |
| 埋戻し材 | 立坑 | 1.0×10^{-6} |
| | 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

本解析では石油公団が建設した岩盤内原油備蓄タンク、菊間実証プラント（花崗岩質）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、 $\theta \sim h_p$ 関係を設定した（図-3.3）。

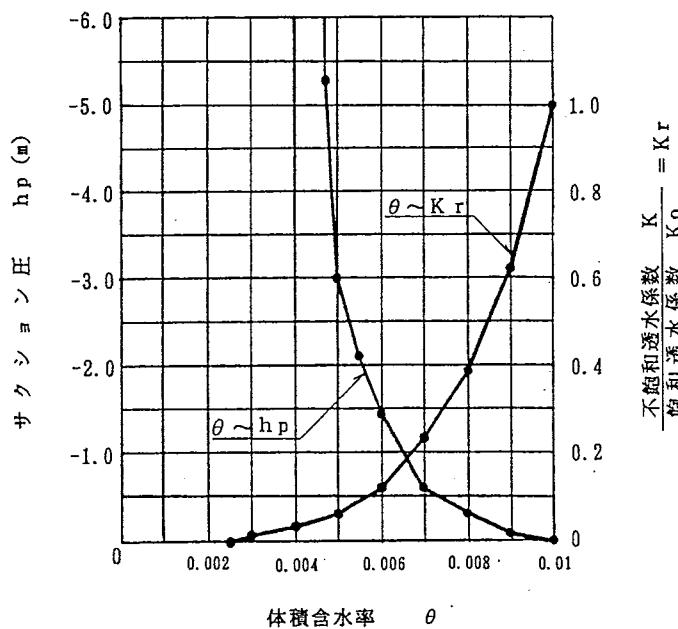


図-3.3 岩盤の不飽和浸透特性

(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実験により求まっており、図-3.5に示す実験結果を採用した。

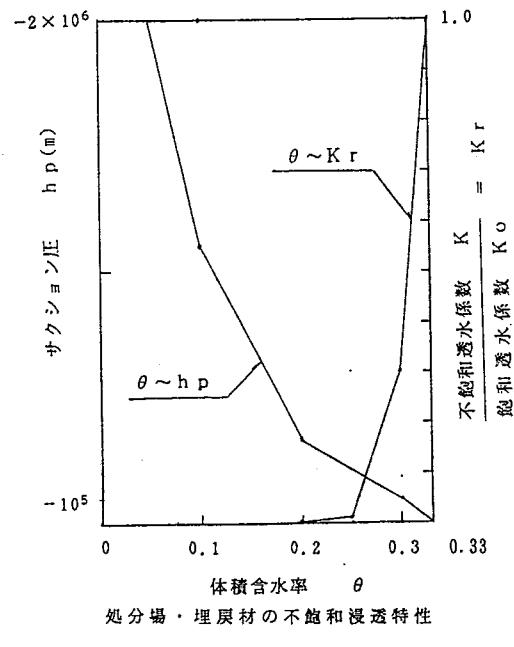
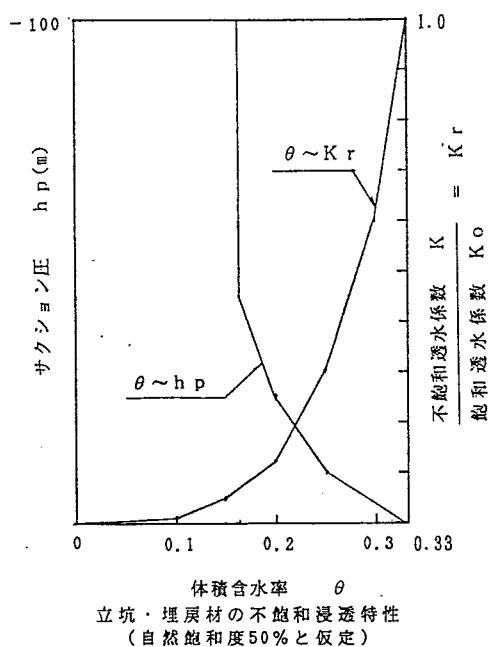


図-3.4 立坑・埋戻し材の不飽和浸透特性

図-3.5 処分場・埋戻し材の不飽和浸透特性

(3) 涵養量

涵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。

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

3.2.4 掘削・埋戻し工程

結晶質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-3.3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。

3.3 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。

3.4 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の結果を示す。

(1) 水頭センター図

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 ほどの範囲で水頭セ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は現れていない。また、立坑埋戻しと同時に水頭セ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 $Q = 976 \text{ m}^3/\text{day}$ 、処分場掘削終了時に $Q = 7376 \text{ m}^3/\text{day}$ 、処分場埋戻し時に $Q = 839 \text{ m}^3/\text{day}$ の湧水量が確認できる。

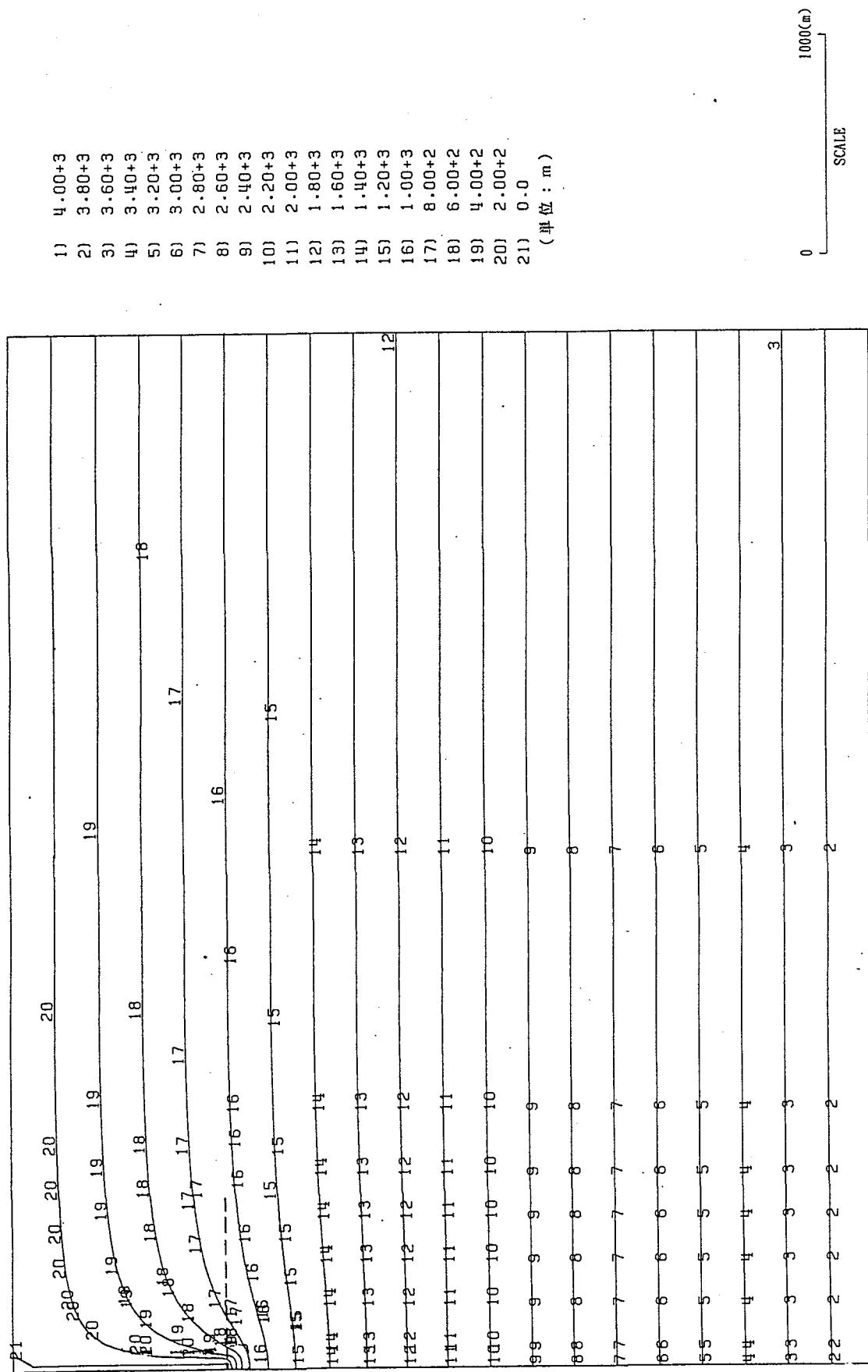


図-3.6 水頭コントラ一図 (10年後・立坑掘削終了時)

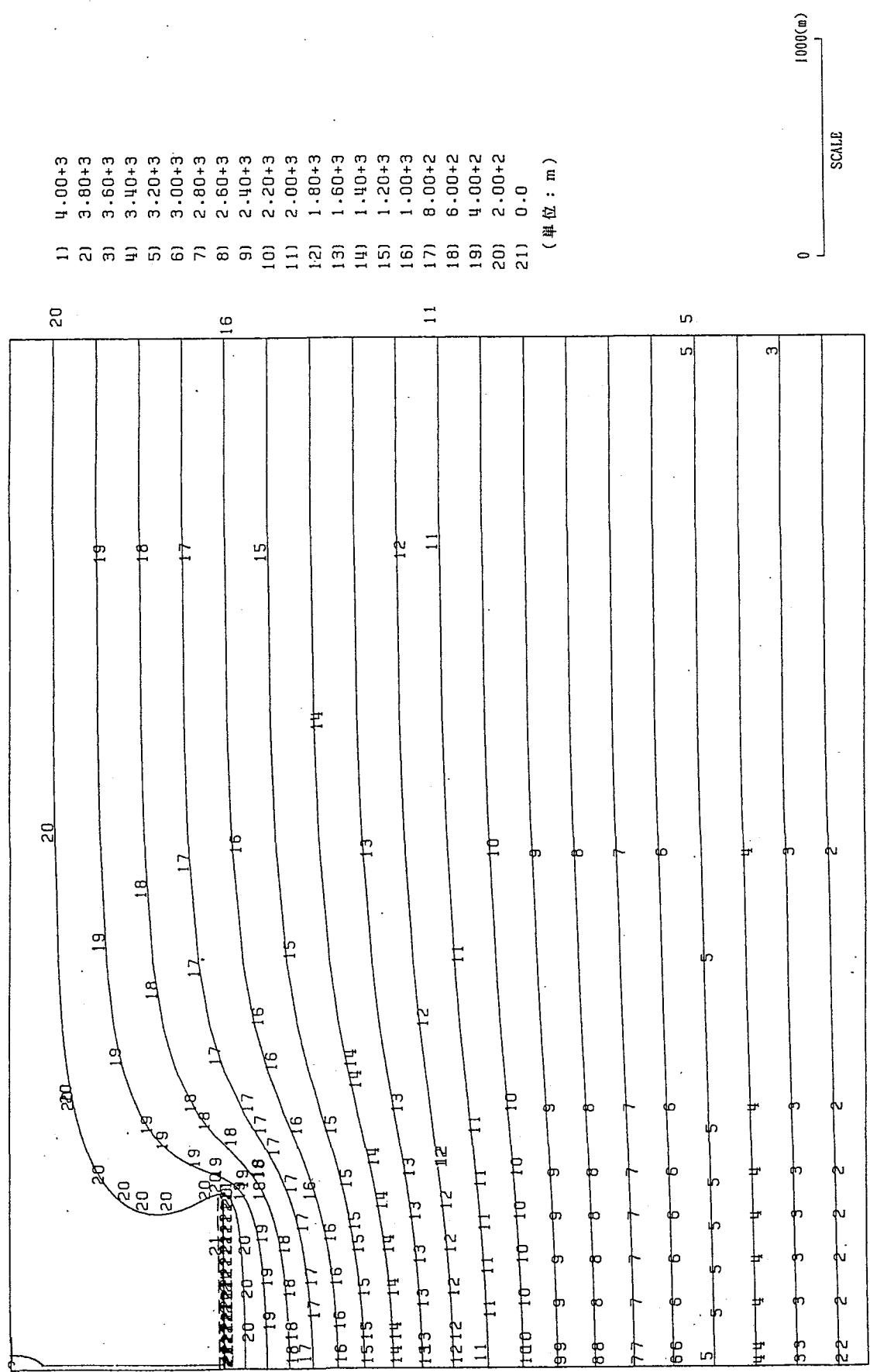


図-3.7 水頭コンター図（30年後・処分場掘削終了時）

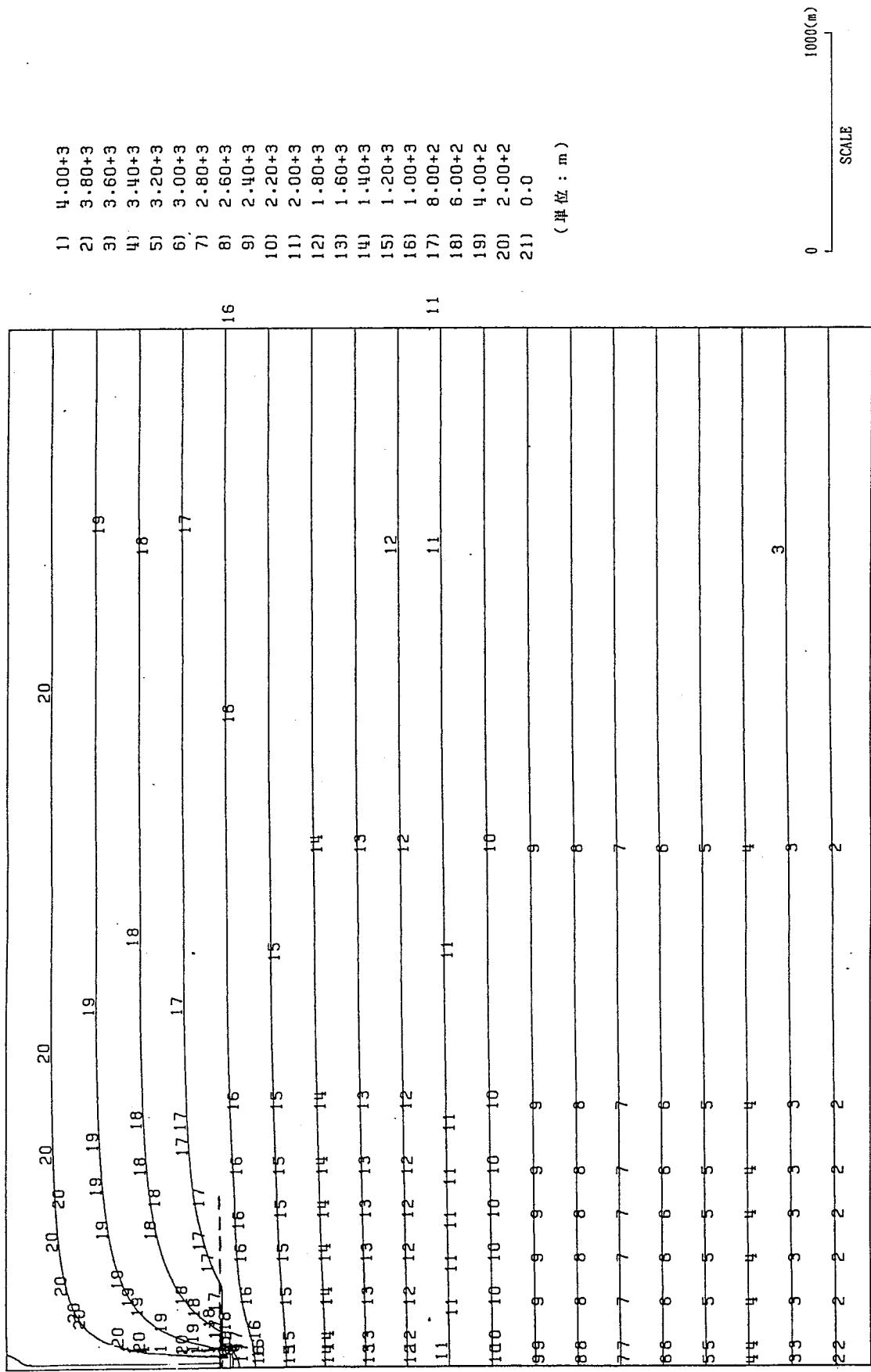


図-3.8 水頭コンター図（50年後・処分場埋戻し終了時）

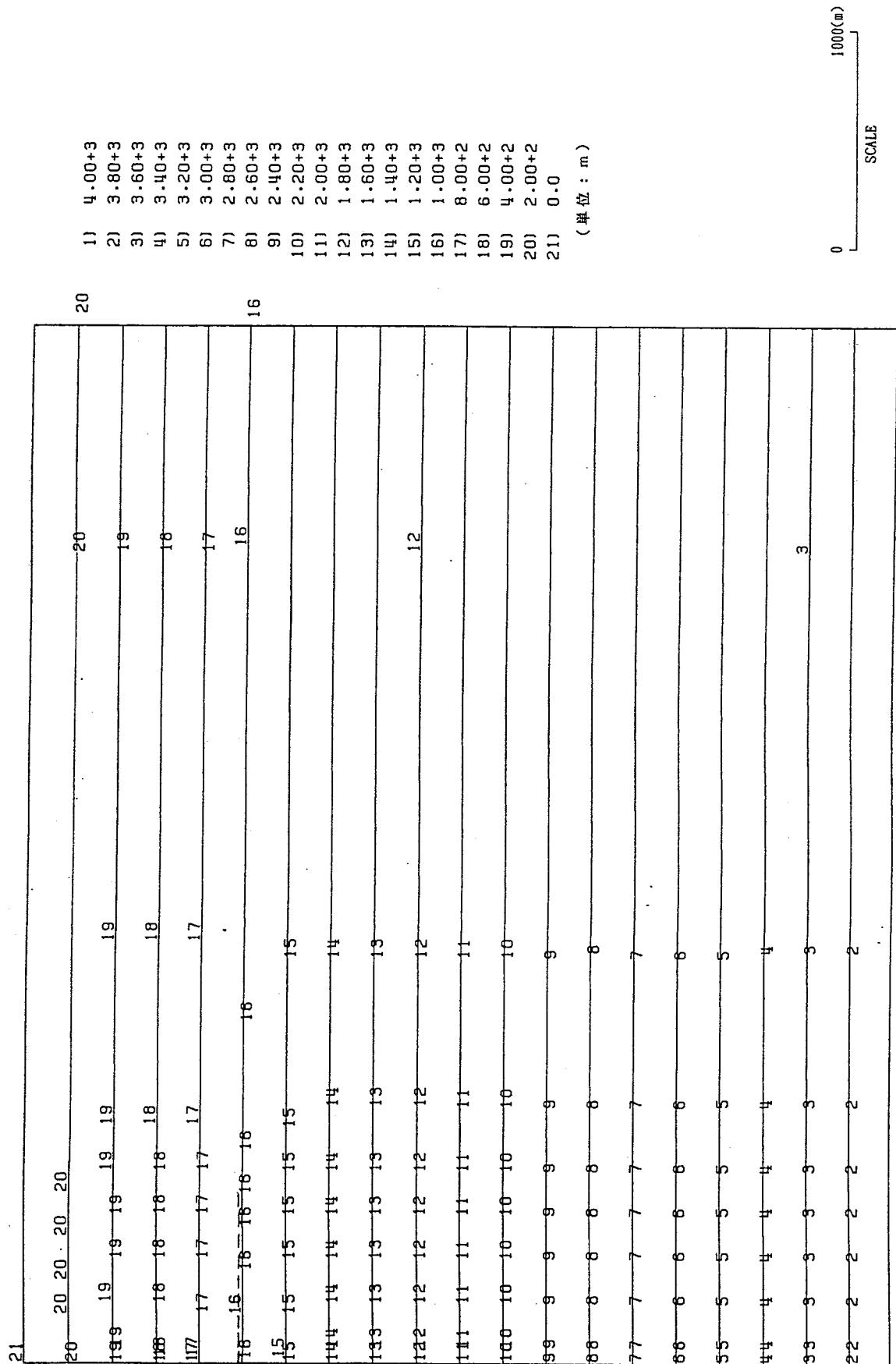


図-3.9 水頭コンター図（60年後・立坑埋戻し終了時）

図-3.9 水頭コンター図（60年後・立坑埋戻し終了時）

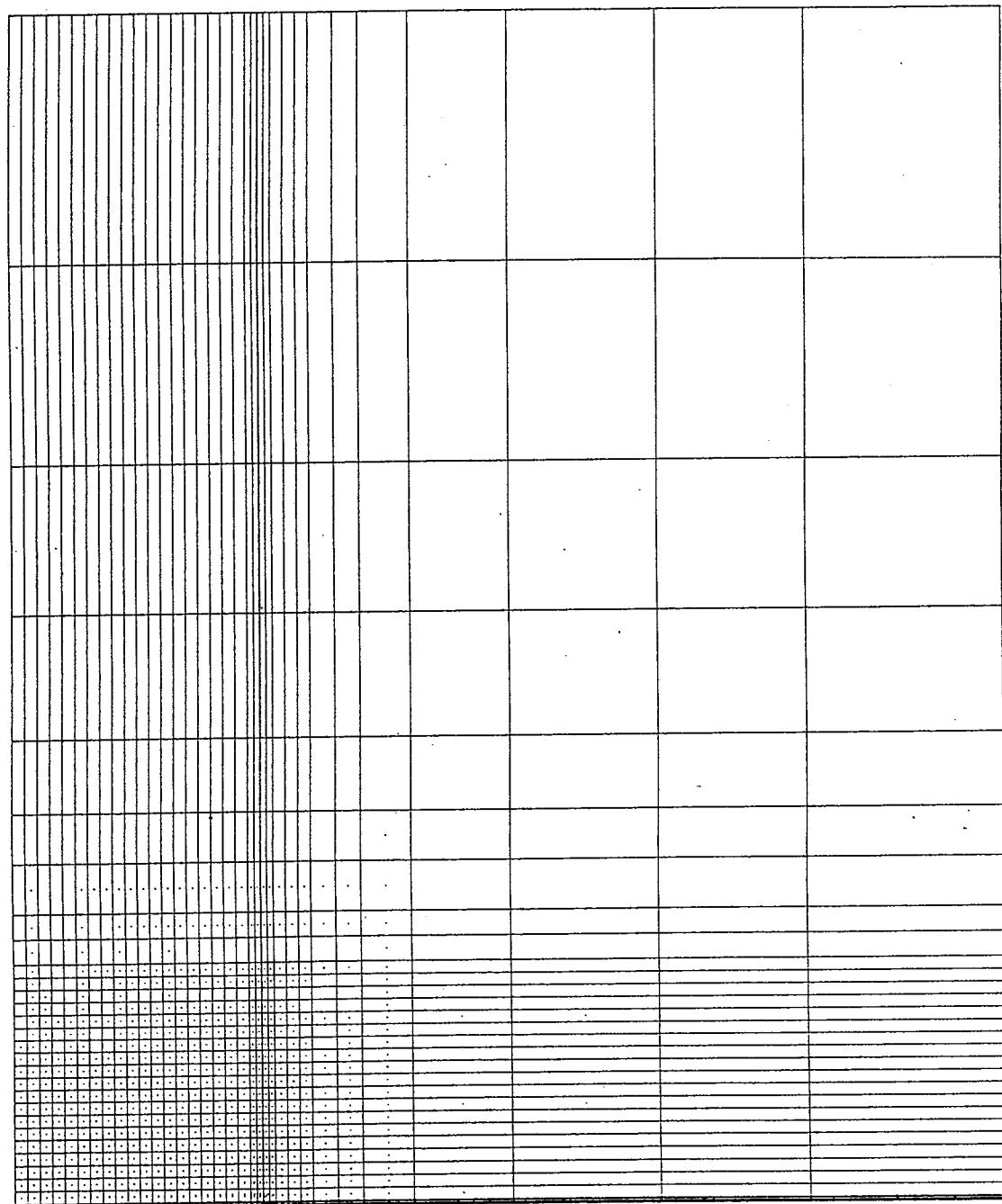


図-3.10 流速ベクトル図（10年後・立坑掘削終了時）

図-3.11 流速ベクトル図（30年後・処分場掘削終了時）

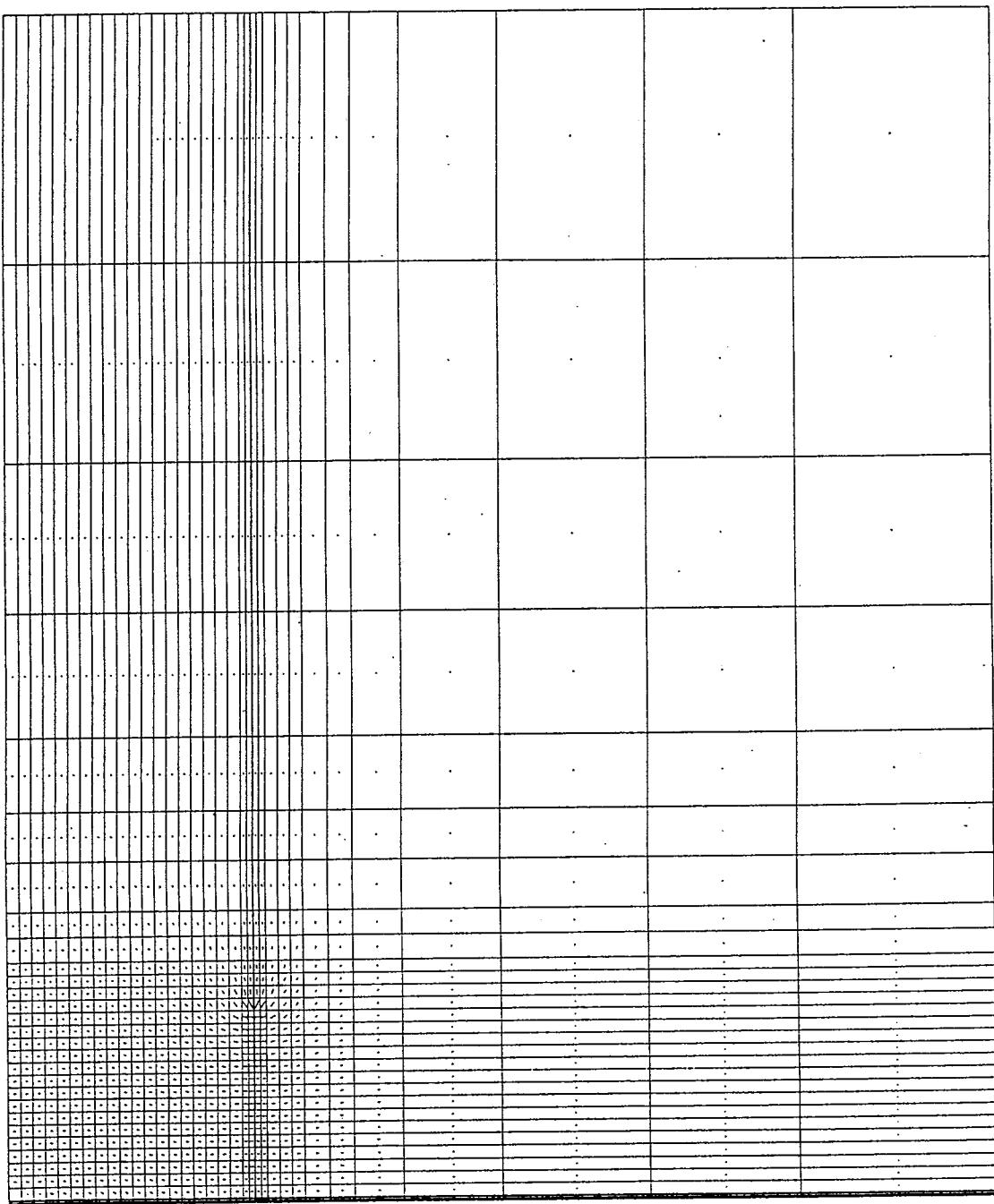


図-3.11 流速ベクトル図（30年後・処分場掘削終了時）

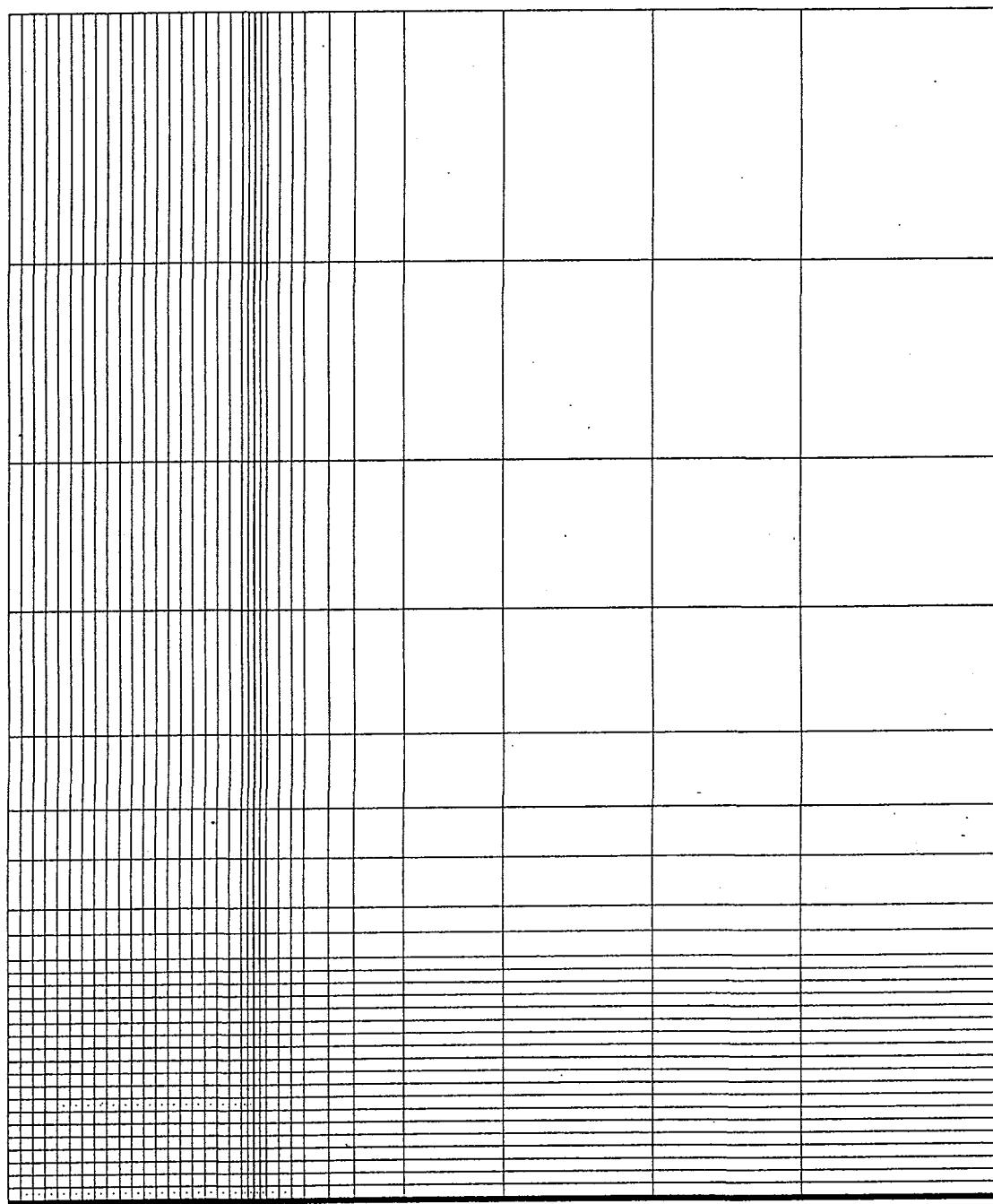


図-3.12 流速ベクトル図（50年後・処分場埋戻し終了時）

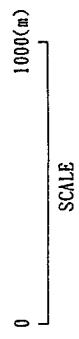
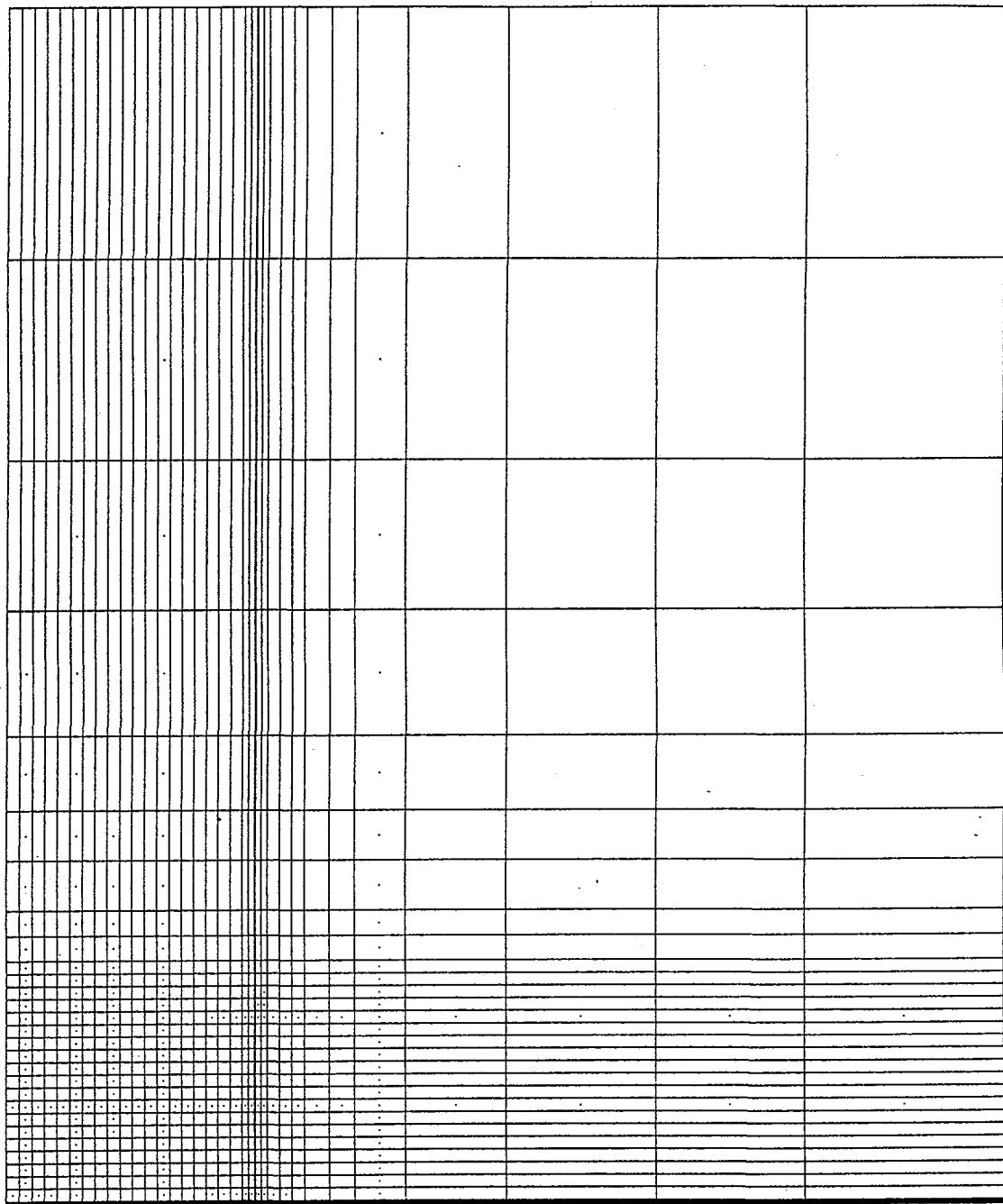


図-3.13 流速ベクトル図（60年後・立坑埋戻し終了時）



3.5まとめ及び今後の課題

本年度は、基本的な地下水挙動の把握を目的として、処分場を掘削し、埋戻し材（ベントナイト、砂）で埋め戻す場合の地下水位低下及び再冠水現象を解析的に検討した。

以下に、その結果をまとめるとともに今後の課題を示す。

3.5.1 まとめ

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。

人工バリアの健全性は掘削、埋戻しの間は十分に保たれると考えられることから、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。

涵養量は、日本の平均的な値として $Q = 1.0 \text{mm/day}$ を採用した。久慈石油備蓄基地における浸透流解析では、涵養量をパラメータとして実測地下水位を再現できる値を設定した。その結果、妥当な涵養量として、 $Q = 0.8 \text{mm/day}$ を浸透流解析に採用している。本検討で用いた涵養量の値はそれと同程度である。

湧水量は処分場掘削終了時に最大となり、 $Q = 7000 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度である。これは久慈石油備蓄基地における浸透流解析の湧水量と同程度である。

3.5.2 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

本解析では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、これらを考慮した詳細な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

流動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

岩種として結晶質岩を想定して、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石油公団が建設した岩盤内原油備蓄タンク、菊間実証プロジェクト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た。今後、実際の岩盤を想定した水理定数の設定が必要である。

本検討で用いた涵養量は、日本の平均的涵養量として $Q = 1.0\text{mm/day}$ を採用した。この値についても対象地域を想定した適切な値を設定する必要がある。

(3) 解析手法

本解析では、ファーフィールドの浸透流を扱った。後述するように、立坑及び処分場のニアフィールドの厳密な解析も必要である。その場合、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。

(4) ニアフィールドの検討

人工バリアの長期的な健全性を詳細に検討する際、不飽和状態となる期間が人工バリアの腐食に影響をあたえることから、立坑及び処分場のニアフィールドの厳密な解析が必要である。

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. 8.
- 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) 百田博宣他；降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討、土木学会論文集、第379号、VI-6、1987. 3、pp. 74～82.
- 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.

試験設計

廃棄物処分におけるシーリング概念では、掘削によって開口した部分あるいはその影響を受けた部分の環境は、乱されていない部分と同等レベルに改良することになっている。そのため技術的な方策として、埋め戻し、プラグそしてグラウトに関する技術研究が原位置レベルあるいは室内レベルで行われてきている。

本年度は、シーリング技術のうち、グラウトについて原位置試験計画を作成し、グラウト材料の検証として粘土系材料のうち、膨潤性粘土の基本特性を室内試験で調べる。

4.1 原位置試験設計

ダムの施工において岩盤の透水性を改良するためにグラウトを行う。施工の流れは、レジオンテストなどによる岩盤透水性の評価、グラウト注入孔からグラウト材を注入、そして再度単孔あるいは複数孔を用いての透水試験からなる。

4.1.1 グラウト施工計画

ボーリング・グラウト工施工計画書を添付資料1として本章末に載せる。これは従来のダムグラウトをもとに長さ12m、断面3m×3mを持つ坑道の壁面から8m程度の深さまでグラウトを施工する手順を示している。なお、注入前後の透水性を評価するために、ルジオンテスト以外にジオトモグラフィーを行う。また、より詳細に透水性のマッピングを行うためにパッカーを50cm間隔に取付けて、水押しを行う。

この試験計画はセメント系材料をグラウト材として用いている。処分場の性能を良い状態に保持するためには、粘土系材料を用いたほうが好ましいと言われている。岩盤石油備蓄基地の工事では湧水量を低減させるために低配合比の粘土スラリーを地下水の流动にのせて目詰まりさせる工法を用いている[1,2]（図4.1）。久慈備蓄で用いた粘土は現地付近で発生するものでカオリナイト系の膨潤性がなく、50%粒径が $3\mu\text{m}$ とグラウティングに適したものである[2]。注入時にはこの粘土を1/600～1/200の濃度に調節している。

処分場の建設において、坑道から周囲の岩盤に対して、流入する地下水を止めるために行うグラウトは、基本的には従来のセメント系材料を用いたグラウト施工法によつて、粘土系材料を用いて行うことになる。しかし、久慈の例とは異なり、狭い範囲を効果的に止水しなければならないため、スラリーの濃度を高くする必要がある。そのため

の材料物性の把握や施工上の問題点の克服が今後の課題である。

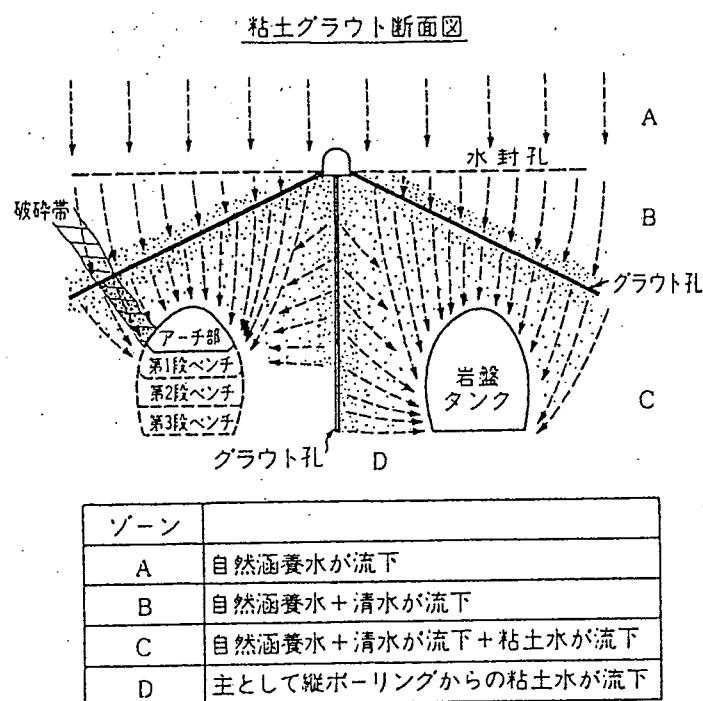


図4.1 粘土グラウト説明図[2]

4.2 室内グラウト試験

粘土系材料によるグラウトに関する室内試験の目的は

- ①注入材料の種類（粒径分布、膨潤性など）
- ②注入スラリーの特性（調整濃度、沈降に対する安定性など）
- ③注入圧力

が注入効果に及ぼす影響を明らかにし、原位置試験で採用するspecを決定することである。

4.2.1 室内基礎試験結果のまとめ

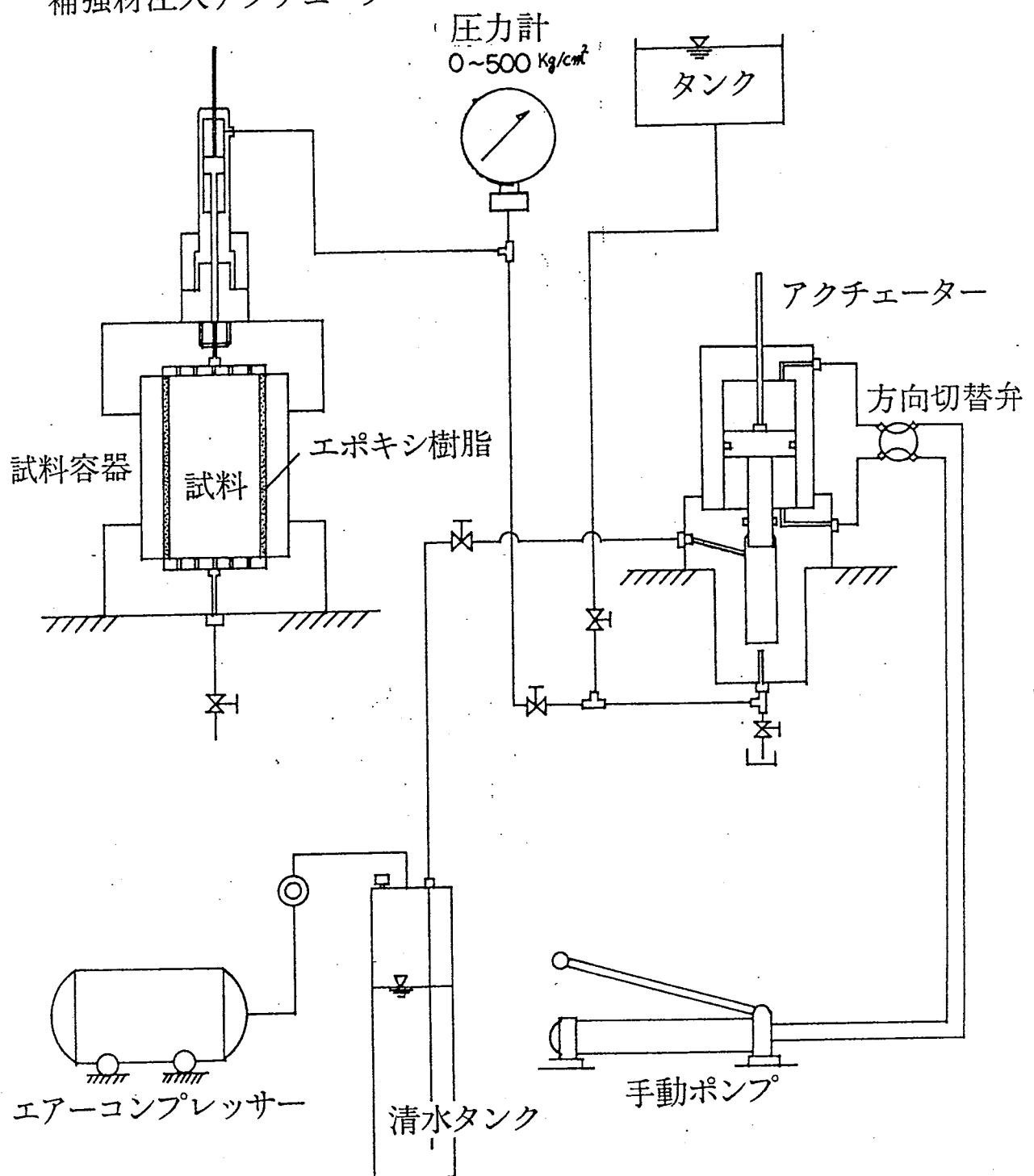
被注入媒体の特性（岩の種類、亀裂のジオメトリー）をパラメータとして試験を行う場合、室内試験は理想的な条件で行なわれていること、原位置試験での未知数が多いことなど、両試験の関連性を明確にすることは難しいが、昭和55年度の動燃受託研究において基本的なデータを取得するために花崗岩コアを用いて亀裂のジオメトリーを極力拾いだして室内グラウト試験を行った[3]。

この試験では、円柱に切り出した花崗岩コア（ $\phi 80\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）に圧縮又は切断で模擬クラックを作成し、粘土やセメントを注入材料としてグラウトを行っている。試験で使用した装置を図4.2、4.3に示す。また、注入材料として使用したセメントは小野田セメント(株)の微粒子セメントアロフィックスMC、また、粘土系材料は群馬県産ベントナイト豊順穂高印300メッシュである。それぞれの粒径加積曲線を図4.4に示す。この試験の結果は、注入試験前後の透水係数で比較され、表4.1のようになった。

| 亀裂発生方法 | 透水係数[m/sec] | | 改善比 |
|-------------|------------------------------|----------------|---------|
| | 注入前 | 注入後 | |
| 圧縮 端面での幅 | 5.6e-5～1.1e-1 0.06～0.97mm | 3.0e-6～5.5e-11 | 1e4～1e5 |
| 切断 端面での幅 | 2.1e-1～6.4e-1 2.8～4.0mm | 1.1e-7～4.5e-7 | 1e5～1e6 |

表4.1 注入試験前後の透水係数

補強材注入アクチュエーター



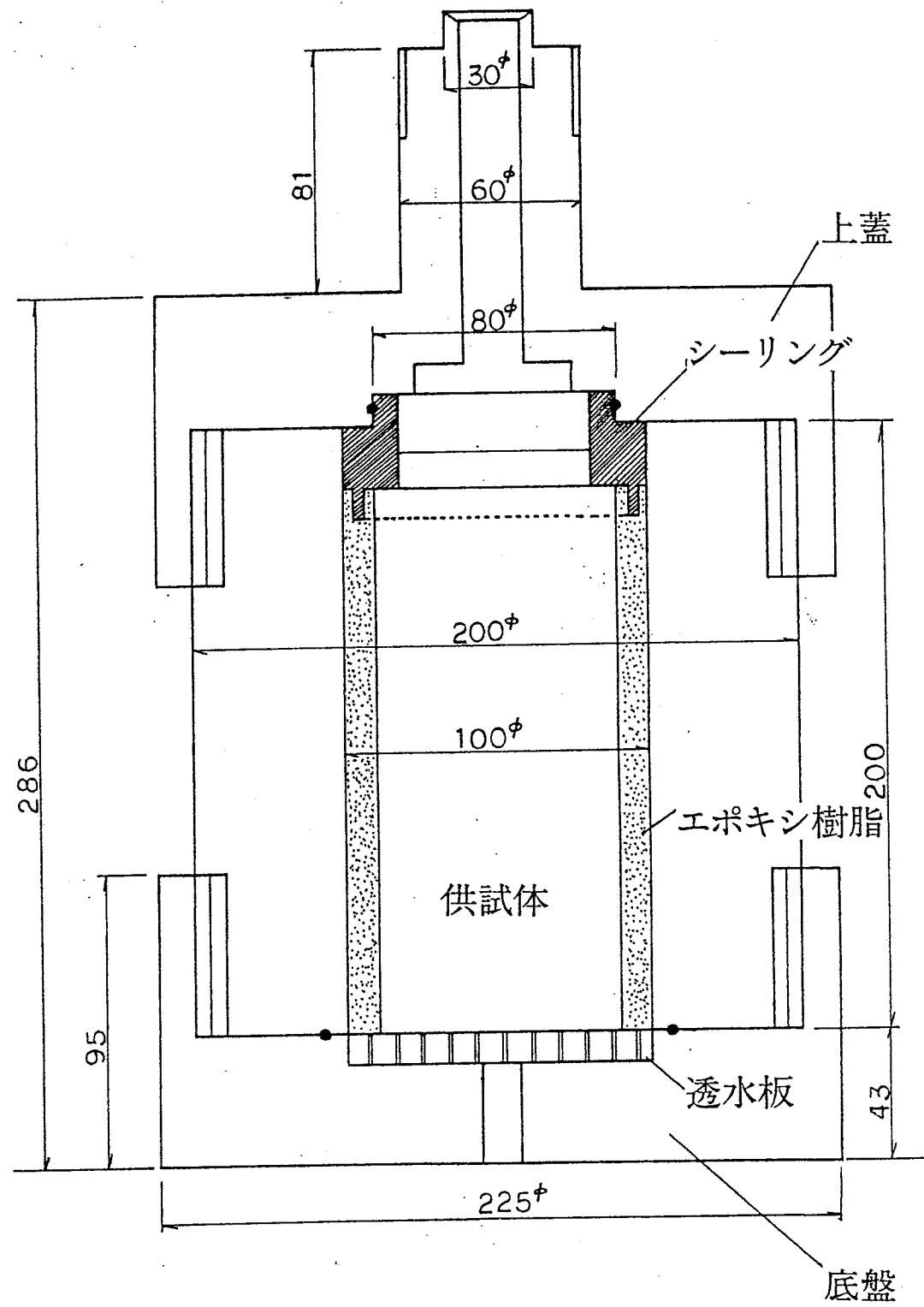


図4.3 試験容器断面図

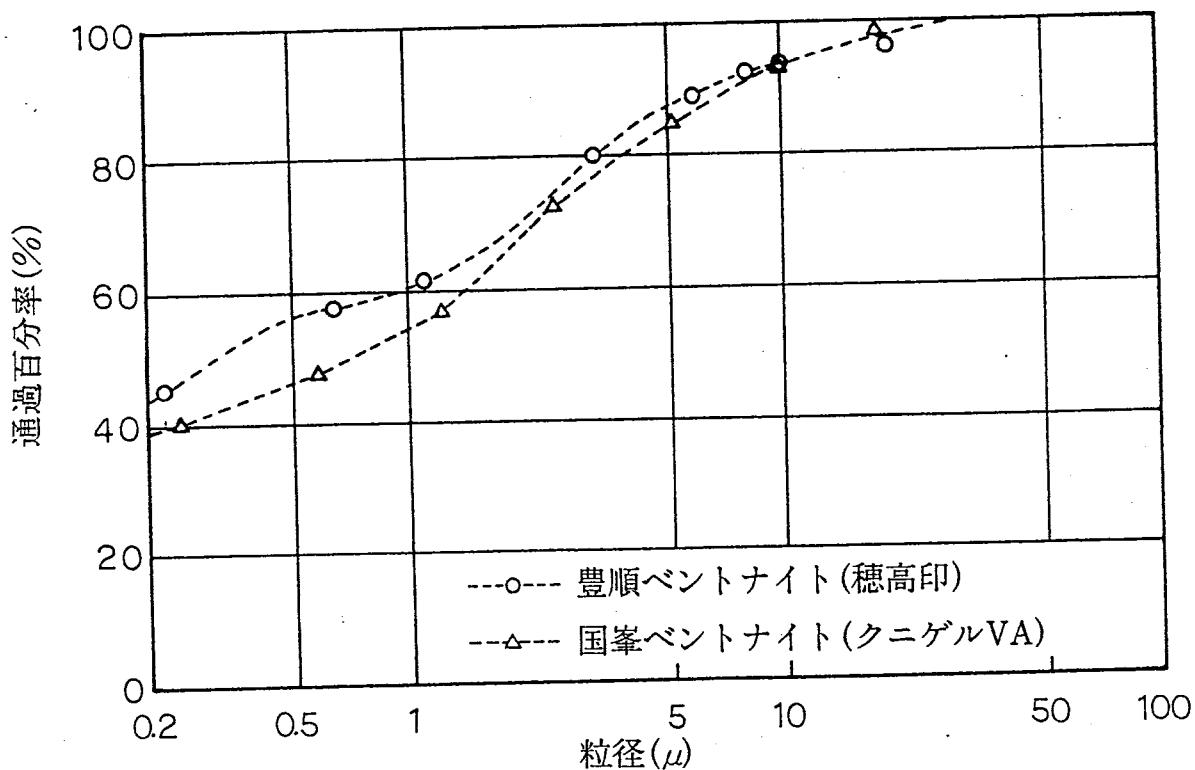
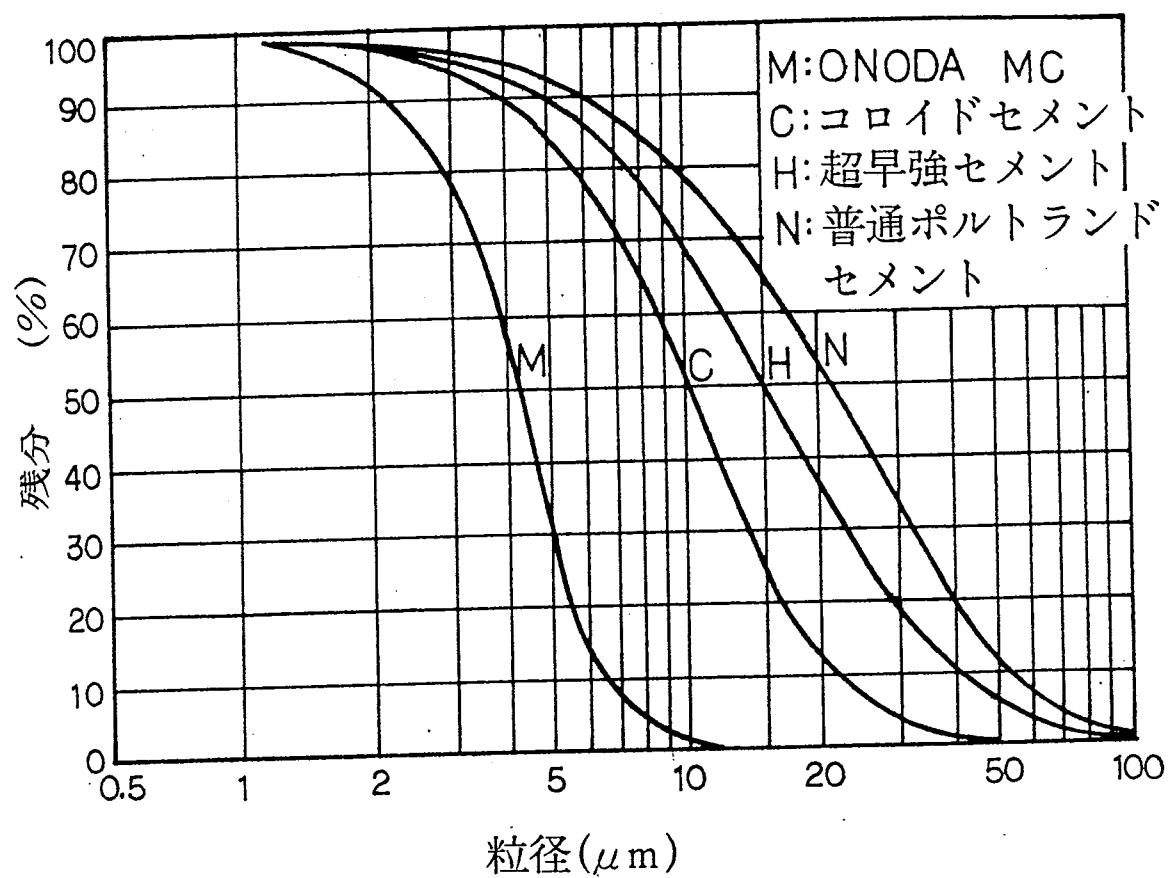


図4.4 試験材料の粒径加積曲線
(上: セメント系材料、下: 粘土系材料)

また、この試験では注入圧力や試料にかかる有効応力とグラウト性能との関係についても検討しており、注入圧力が1MPaから5MPaに変化すると透水係数は1/10に、また、有効応力を5MPaから10MPaに変化させると透水係数が0.58倍になるといった結果を得ている。また、注入材料に関しては、ペントナイトの方がセメントよりも小さなクラックに入りやすことを確認している。

つぎに今年度行った実験結果について述べる。実験で用いた試験容器は図4.2に示した容器と異なり、中圧三軸試験装置を用いた。また、実験の手順などは昭和55年の実験とほぼ同じである。具体的には以下の手順で行った。

- ① 花崗岩コアを圧裂して作成した供試体に対して注入前の透水係数を測定
- ② 注入材料に適当な静水圧（一定）を与えて、亀裂に対して注入を行い、透過流量から注入材料の透過係数を求める。
- ③ 注入後、一定時間をおいて再度、透水係数を測定し、注入前の値と比較する。

以上の試験から注入材料の評価を行う。供試体は直径50mm高さ100mmの亀裂を抱有したコアする（図4.5に三軸セルの概要図、図4.6に花崗岩コアの写真を示す）。注入材料はクニミネ工業のクニゲルV1を選定した。注入材の粘土／水比は久慈の石油備蓄基地工事で行われた粘土グラウトの実績にしたがって1/400とした。図4.7にグラウト材として準備したスラリーの写真を示す。花崗岩試料の拘束圧は地下数百mを模擬するために20MPaとし、グラウトの注入圧力は中圧三軸試験装置でかけられる背圧が最大0.3MPaであることから0.3MPaとした。また、注入前後の透水試験では背圧として0.1MPaを与えた。グラウトと水の浸透方向は一致している。透水係数は試料を多孔質媒体と仮定し、透過した流量と与えた背圧からDarcy則にしたがって求めた。実験の結果は表4.2のとおり。

今回の試験では注入前後において、透水係数が 10^3 ほど改善されており、粘土系材料によるグラウトの効果があったことを示している。しかしながら、粘土系材料によるグラウトは注入後に一定以上の静水圧が作用した場合、流出してしまうことが考えられ、この対策を検討する必要がある。

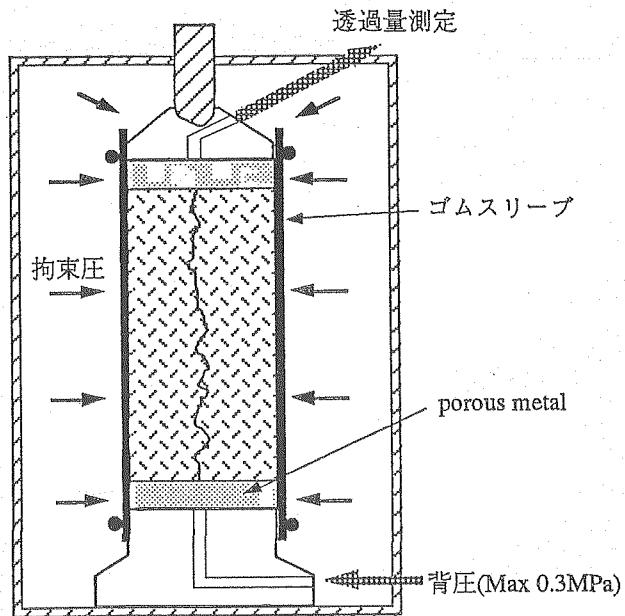


図4.5 供試体及び三軸セル

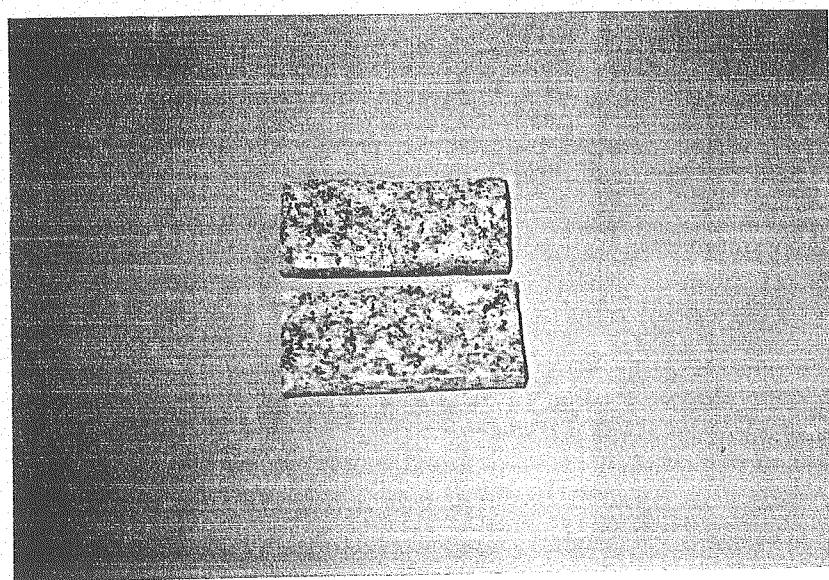


図4.6 花崗岩コアの写真

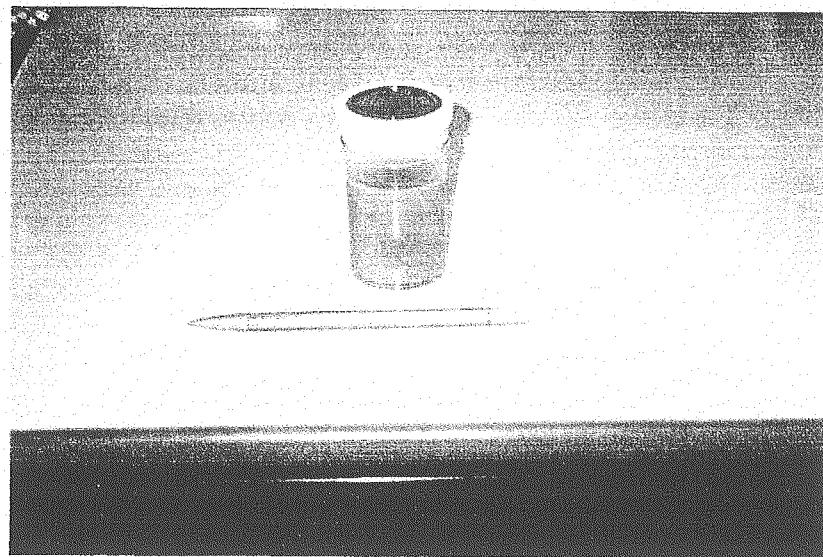


図4.7 グラウト材の写真

| | |
|-----------|----------------------------------|
| 材料 | クニゲルV1 |
| 注入材の粘土/水比 | 1/400 |
| 試料拘束圧 | 20MPa |
| 注入材背圧 | 0.3MPa |
| 水背圧 | 0.1MPa |
| 注入前の透水係数 | $3.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ |
| 注入後の透水係数 | $6.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ |

表4.2 注入試験結果

4.2.2 室内試験設計

今年度の試験では膨潤粘土を材料として注入試験を行い、一つの実験結果を得ることができた。しかし、粘土系材料によるグラウトを考える場合、粘土粒子が水を構造内に取り込んで膨潤すると、粒子自身の見掛け上の径を大きくし、またスラリーの流動特性を変化させるなどグラウト性能の観点から好ましくない。今後は、非膨潤性粘土（たとえばカオリナイト）を用いて試験評価を行ってゆく必要がある。そのときの試験パラメータとして、表4.3のようなパラメータ設定を考えることができる。

| | |
|-----------|----------------------|
| 材料 | カオリン粘土 |
| 注入材の粘土/水比 | 1/50, 1/100, 1/400% |
| 試料拘束圧(Ko) | 10, 30 MPa |
| グラウト注入圧力 | 0.1, 0.3 MPa |
| 浸透水背圧 | 0.05, 0.1 MPa |
| 注入方向 | グラウト→；水← グラウト→；水→ |

表4.3 グラウト試験に関するパラメータ

【参考文献】

- [1] 「粘土グラウトで地下水を利用」日経コンストラクション1992.2.28, pp.84-89
- [2] 蒔田、宮永；粘土グラウトによる地下水の制御、土木施工vol.33, No.12 (1992)
pp.29-38
- [3] 鹿島建設技術研究所；高温高圧下における岩石等の物性試験(1981)；動燃事業団報
告書SJ176 81-02

高レベル放射性廃棄物処理原位置試験

ボーリング・グラウト工

施工計画書

平成5年1月29日

I. 工事概要

1. 施工の目的

①. ジオトモグラフィー計測工

施工の目的および回数は以下のとおりである。

- ・ジオトモグラフィー (1) ………………自然地盤の把握。
- ・ジオトモグラフィー (2) ………………水みち（クラック）の推定。
- ・ジオトモグラフィー (3) ………………グラウト効果の把握。
時系列によるグラウト材の導電率、
誘導率の変化の確認。
- ・ジオトモグラフィー (4) ………………水みちの閉塞の確認。

②. 透水試験、水押試験

施工の目的は以下のとおりである。

- 透水試験 (1) ………………自然地盤（注入範囲外）の透水性の把握。
- 透水試験 (2) ………………自然地盤（注入範囲内）の透水性の把握。
- 水押試験 (1) ………………注入効果の推移の確認。
- 透水試験 (3) ………………最終注入効果の確認。

③. 計測器の設置

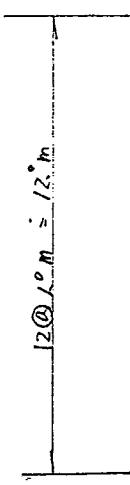
2. 工事数量

表-1 工事数量表

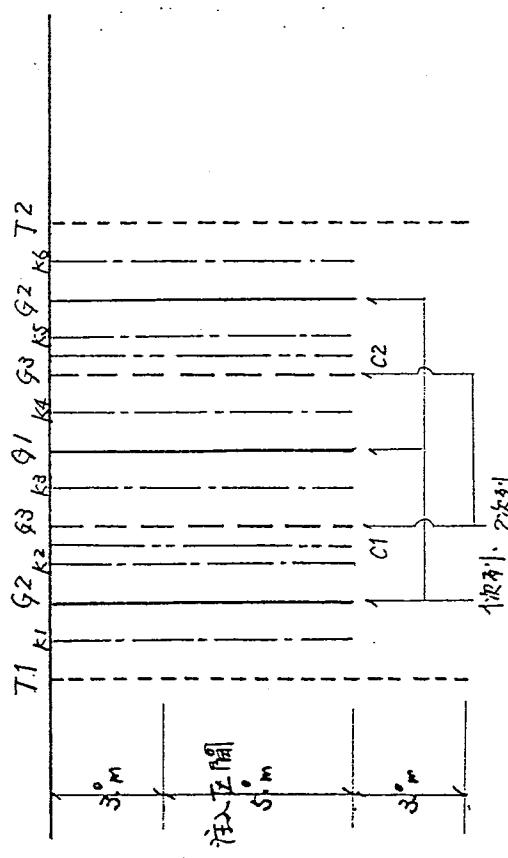
| 孔の種類 | 孔径 (mm) | コア採取 の有無 | 孔数 | 1孔の 深度 (m) | 削孔長 (m) |
|--------------|------------|-------------|----|------------------|------------|
| ジオトモグラフィー計測孔 | φ 6 6 | 有 | 2 | 11.0 | 22.0 |
| 計測孔 | φ 6 6 | 有 | 6 | 8.0 | 48.0 |
| グラウト孔 | φ 4 6 | 無 | 23 | 8.0 | 184.0 |
| チェック孔 | φ 6 6 | 有 | 2 | 8.0 | 16.0 |
| 合 計 | | | 33 | | 270.0 |

3. 施工パラメータ図(図-1)

平面図



断面図



T1, T2
K1~K6
G1~G3
C1~C2
K2, K5
C1, K2

ジオメトリーホール
計測孔
グラウト孔
ドレーフ孔
地下水注入孔

$$\begin{aligned} 11m \times 2 JL &= 22 m \\ 8m \times 6 JL &= 48 m \\ (8m \times 5 JL) \times 3 JL + (8m \times 4 JL) \times 2 JL &= 184 m \\ 8m \times 2 JL &= 16 m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ① 1 JL &= 270 m \\ ② 5 JL &= 270 m \\ ③ 3 JL &= 270 m \end{aligned}$$

Ⅱ. 工事工程表

工事名称 ブルク工・掘削量試験工程

工 程 表

片側施工

| 工事種別 | 工事期間 | 数量 | 単位 | 施工日 | | | | | | | | | | | | 備考 |
|-------------|--------|--------|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|--|----|
| | | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | | |
| 1. 仮設 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2. 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ① T1.T2 施工 | 22° m | | | ○ | 11 | ○ | 12 | ○ | | | | | | | | |
| ② 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ③ 運搬装置 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ④ K2.K3 施工 | 16° m | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⑤ 通水屋入 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⑥ T1.T2 洗浄 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⑦ 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⑧ 運搬装置 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3. 施工機器設置 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ① 上3.4.6 施工 | 32° m | | | | | | | | | | | | | | | |
| ② 放置 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ③ 引き | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ④ 施用 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4. 施工工 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ボート・トラック | 186° m | 233L | | | | | | | | | | | | | | |
| 5. 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ① T1.T2 施工 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ② 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6. 施工 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ① 施工 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ② 通水屋入 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ③ 施工モニター | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ④ 運搬装置 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7. 掘込 | 計 | 270° m | | | | | | | | | | | | | | |

記事

III. 施工順序

1. 仮設

2. ジオトモグラフィー計測

- ① T 1、T 2 削孔
- ② ジオトモグラフィー (1)
- ③ 透水試験 (1)
- ④ 計測孔 K 2, K 5 削孔
- ⑤ 塩水注入
- ⑥ T 1、T 2 洗浄 (塩水の除去)
- ⑦ ジオトモグラフィー (2)
- ⑧ 透水試験 (2)

3. 計測器設置

- ① 計測孔 K 1, K 3, K 4, K 6 削孔
- ② 計測器設置 K 1, K 2, K 3, K 4, K 5, K 6 孔
- ③ 孔埋
- ④ 計測

4. グラウト工

ボーリング・グラウト 1 次列 → 1 次孔 → 水押試験 (1) → 注入
 2 次孔 → 水押試験 (1) → 注入
 ↓ 3 次孔 → 水押試験 (1) → 注入

 2 次列 → 1 次孔 → 水押試験 (1) → 注入
 2 次孔 → 水押試験 (1) → 注入
 3 次孔 → 水押試験 (1) → 注入

5. ジオトモグラフィー計測

3 日, 8 日, 28 日経過後に計測する。

- ① T 1、T 2 再削孔
- ② ジオトモグラフィー (3)

6. チェック孔

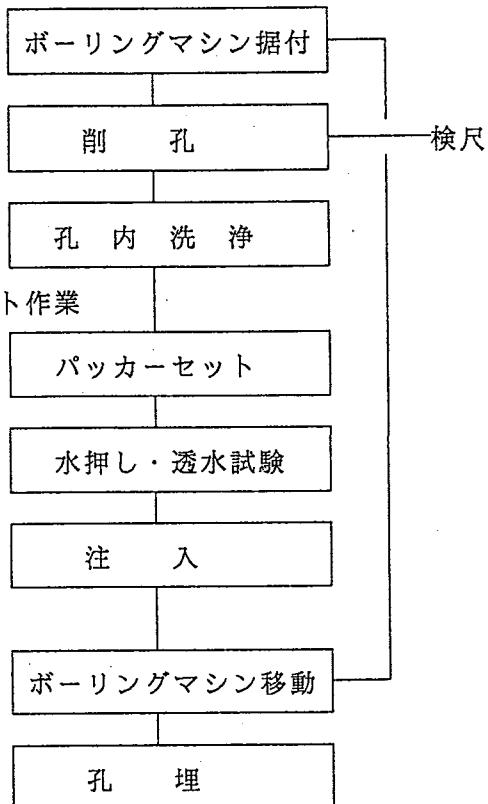
- ① C 1、C 2 削孔
- ② 塩水注入
- ③ ジオトモグラフィー (4)
- ④ 透水試験 (3)

7. 撤去工

IV. 施工方法

1. 施工フロー

▼ボーリング作業



2. ボーリング工 一般

①. ボーリング機種 及び 孔径

削孔には、全てロータリーボーリングマシンを使用し、清水掘りとする。孔径は、計測孔、チェック孔を $\phi 66\text{mm}$ 、グラウト孔を $\phi 46\text{mm}$ とする。

②. コア採取孔

計測孔、チェック孔は、コア採取孔とし、できる限りコア採取率を高める様に努める。採取したコアは、正確かつ丁寧にコア箱に整理し、地質柱状図及びカラー写真を添えて、指定の場所に納入する。

③. 孔内の洗浄 及び 検査（検尺）

所定の深度まで削孔したら、圧力水によりスライム等を排除した後、監督職員の検査（検尺）を受ける。

④. 削孔中の異常処置

削孔中に多量の漏水や湧水、及び 孔崩壊等の異常を認めた時は、監督職員の指示を受ける。

3. グラウト工 一般

①. グラウチング工法

グラウチング工法は、原則として、中央内挿法 及び ステージ工法とする。ステージ長は、5 mをとする。

②. プラント方式 及び 流量・圧力の測定

セメントミルクの混合・圧送は、分散プラント方式とし、注入孔近くに プラントを設置する。

流量・圧力の測定は、透水試験または水押しの開始から、注入完了まで連続して、電磁式流量圧力自記記録計により行う。

③. 最大注入速度

透水試験・水押し 及び グラウトの最大注入速度は、4 l/min/m程度とする。

④. 透水試験 及び 水押し

計測孔・チェック孔は、透水試験とし、一般孔は、水押しとする。

⑤. 透水試験方法

イ. 注入圧力パターン

注入圧力の昇降は、段階的に行う。原則として各段階毎に昇（降）圧5分、調整 5分、測定 5分の計15分を1サイクルとする。

ロ. 注入量の測定

注入量の測定時間は、上記の様に、原則として5分間とするが、その間の変動が小さくなるまで（10%又は 1l未満）とする。

ハ. 有効注入圧力

有効注入圧力は、口元圧力を試験区間の中央から圧力計までの静水圧、地下水位 及び 管内抵抗による損失水頭により補正して求める。

地下水位は、当該孔を注入前に測定したものを使用する。管内抵抗による損失水頭（ h_3 ）は、次式により求める。

$$h_3 = \alpha Q^2 L$$

$\alpha : 7 \times 10^{-5} (\text{min}^2/\text{l}^2)$

Q : 注入量 (l/min)

L : 注入区間長 (m)

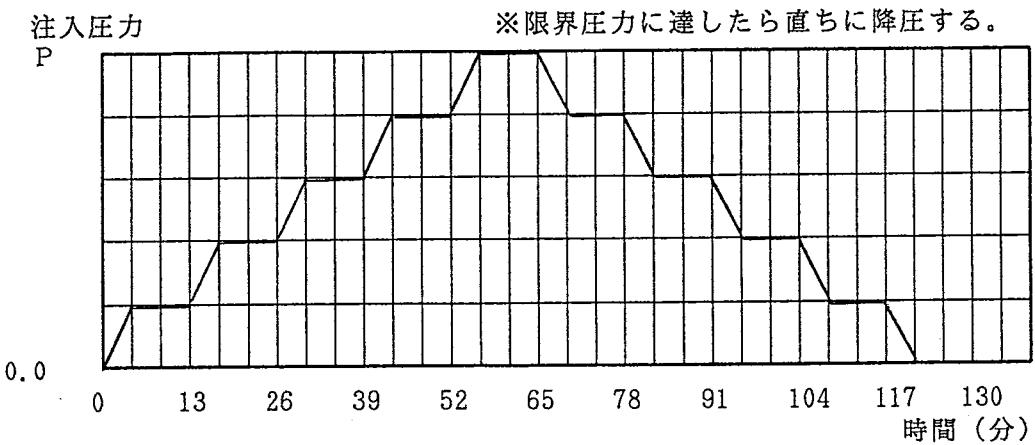


図-2 標準的な注入圧力パターン

二. ルジオン値の算出式

$$L_u = \frac{(10-P_1)(Q_2-Q_1)}{(P_2-P_1) \cdot L} + \frac{Q_1}{L}$$

P₁, P₂ : 注入圧力 (kg / cm²)
 Q₁, Q₂ : 注入量 (ml / min)
 L : 注入区間長 (m)

⑥. 水押し方法

注水圧力の昇圧は、原則として 3 段階で行う。ただし、限界圧力に達したら直ちに降圧する。水押し時間は、30分間とする。

⑦. パッカーポジション

原則として、注入区間の直上部にセットする。

⑧. グラウト開始配合 及び 配合切替え基準

グラウト開始配合は、算出したルジオン値により決定する。

表-2 グラウト開始配合 及び 配合切替え基準

| 配合 L _u (C:W) | 1:10 | 1:8 | 1:6 | 1:4 | 1:2 | 1:1 | 合計 (ml) |
|-------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|---------|
| 5 Lu以下 | 800 | 800 | 800 | 600 | 600 | 400 | 4,000 |
| 5 ~ 10 | -- | 800 | 800 | 600 | 600 | 1,200 | 4,000 |
| 10 ~ 30 | -- | -- | 800 | 600 | 600 | 2,000 | 4,000 |
| 30 Lu以上 | -- | -- | -- | 600 | 600 | 2,800 | 4,000 |

配合切替え補足

- 1). 規定圧力に達するまでは、上表の注入量を注入し、その後一段濃い配合に切替える。
- 2). 規定圧力に達した場合は、配合切替えは行わない。

⑨. 注入中断 及び 再注入

イ. 注入中断をする場合

- ・ 1:1 の配合で規定量注入しても、注入完了基準に近づかない場合。
- ・ リークが止まらない場合。

ロ. 再注入

注入中断をし、2時間以上硬化待ちした後、水押し・再注入を行う。
水押しへ、規定圧力とし、 L_u を算出する。
グラウト開始配合及び配合切替え基準は、上表の⑧項に準じる。

⑩. 注入完了基準

規定圧力に達し、注入速度が 1.0 溶/分・St (0.2 溶/分・m)
以下となってから更に 30分間注入し、注入量・注入圧力に特別の変化
がなければ、注入完了とする。

⑪. 孔埋方法

注入完了した孔は、C:W=1:1 のセメントミルクで、孔底より ロッド
又は ホースを使用し注入・充填する。孔口部分は、硬練りミルクで仕
上げる。

⑫. 注入材料 及び 配合表

イ. 注入材料

セメント - - - - 三菱高炉セメントB種
比重 3.04

混和剤 - - - - ベントナイト浅間 #300
(C × 0.05) 比重 2.58

分散剤 - - - - ポゾリス No.8
(C × 0.0025)

ロ. 配合表

表-3 配合表

| 配合 (C:W) | セメント (Kg) | 水 (Kg) | ベントナイト (Kg) | ポゾリスNo.8 (Kg) | 練上り量 (溶) |
|-------------|--------------|-----------|----------------|------------------|-------------|
| 1:10 | 18.0 | 193.7 | 0.90 | 0.045 | 200.0 |
| 1: 8 | 23.0 | 192.0 | 1.15 | 0.058 | 200.0 |
| 1: 6 | 30.0 | 189.5 | 1.50 | 0.075 | 200.0 |
| 1: 4 | 44.0 | 184.6 | 2.20 | 0.110 | 200.0 |
| 1: 2 | 82.0 | 171.4 | 4.10 | 0.205 | 200.0 |
| 1: 1 | 143.0 | 150.2 | 7.15 | 0.358 | 200.0 |

⑬. 水押し圧力・透水試験圧力 及び 注入圧力

表-4 水押し圧力・透水試験圧力 及び 注入圧力

| ステージ | 透水試験圧力 (Kg/cm ²) | 水押し圧力 | 注入圧力 |
|------|------------------------------|---------------|------|
| 1 | 0.1— 0.5— 1.0— 1.5— 2.0— 2.5 | 1.5— 2.0— 2.5 | 3.0 |
| | | | |

4. 主要使用機械

表-5 主要使用機械一覧表

| 機械名 | 型式 メーカー | 能力・仕様 | 重量 (Kg) | 動力 (Kw) | 投入 セット数 |
|--------------|--------------------|--------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| ボーリング マシン | V B M 吉田鉄工所 | 掘進能力 180m ストローク 300mm 回転数 125~1000rpm | 440 | 5.5 | 1 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| ミキサー | M V M - 5 鉱研工業 | 攪拌容量 200L × 2槽 | 230 | 2.2 | 1 |
| グラウト ポンプ | T O S G 10 東都電機 | 吐出量 0~130 L/min 吐出圧力 0~40 KGf/cm ² | 360 | 7.5 | 1 |
| 電磁流量計 | F P C - 100-50 | 圧力流量制御自記記録計 流量 60 L/min 圧力 30 KG/cm ² | 60 | 1.0 | 1 |
| 日報作成 装置 | N E C 5200 | グラウチング管理表 グラウチング日報 ボーリング 日報 作成 | 50 | 1.0 | 1 |
| 解析資料 作成装置 | | グラウチング月報、ボーリング 月報 ルジオンマップ、セメントマップ 超過確率図、相関図作成 | | | |
| | | | | | |

V. 施工管理

1. 品質管理

- ・流量圧力記録紙
- ・グラウト管理表
- ・グラウト日報
- ・ボーリング日報
- ・グラウト月報
- ・ボーリング月報
- ・ルジオンマップ、セメントマップ

2. 出来形管理

- ・ボーリング延長（ボーリング日報、ボーリング月報）
- ・グラウト時間（グラウト日報、グラウト月報）
- ・使用材料（グラウト日報、グラウト月報）

3. 写真管理

- ・使用機械、仮設備
- ・監督職員立会状況
- ・施工状況