

軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2002年2月

前田建設工業株式会社

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下さい。

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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

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

軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

井上博之*, 野田兼司*

要旨

地層処分システムを考えるにあたり、人工バリアの境界条件となるニアフィールド岩盤の長期力学挙動を適切に評価することが重要である。

本研究では、その評価の信頼性の向上に資する目的で、以下3つの事項を実施した。

①大久保モデルによるクリープ問題の評価手法の信頼性向上を目的としてクリープ試験を実施した。実岩石を用いてひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験より大久保モデル定数を算定し、その定数を使用して破壊時間を推定したクリープ試験を行った。その結果、大久保モデルによる破壊時間の推定は、供試体のバラツキが影響するものの、ほぼ推定通りとなった。

②ニアフィールド岩盤挙動を把握する目的でトンネル模型装置を製作し実験を行った。試験は1m×1m×0.5mの模擬岩盤試験体を使用し、初期応力下で直径15cmのトンネルを掘削した。内空変位量等を計測し、また解体後に硬さ試験を行うことによりゆるみ域を定量的に求めた。その結果、約17.5cmまでがゆるみ域と推定できた。

③深地層研究所における試験方法を検討し、長期的な岩盤挙動の把握を目的とした試験項目として岩石コア試験・ボーリング孔を利用した試験・原位置試験(坑道内を利用、坑道そのもの利用)を示した。また、長期挙動に関する様々な試験を3深度で実施する深地層研究所のレイアウトを示した。

本報告書は、前田建設工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

サイクル機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
システム解析グループ

*前田建設工業株式会社

Long-term bedrock behavior research for soft rock
(Document Prepared by Other Institute, Based on The Trust Contract)

Hiroyuki Inoue*, Kenji Noda*

Abstract

When a formation disposal system is thought about, it is important to evaluate long-term dynamics behavior of boundary condition and near field bedrock of an artificial barrier adequately.

In this study, three matters were executed for improvement of a dependability of the evaluation as follows.

① Creep test was executed as purpose by dependability improvement of evaluation technique of creep problem by Okubo model. Okubo model constant was calculated than the unconfined compression test which let strain rate change with true rock, and the creep test which the constant was used, and estimated breaking time was done. As a result, the estimation of breaking time by Okubo model almost suffered according to the estimation although a variation of test piece influenced it.

② A tunnel model apparatus was produced in the purpose which grasped near field bedrock behavior, and it was tested. Simulation rock test body of 1m *1m *0.5m was used for a test, and 15cm tunnel excavation was carried out in an initial stress bottom. Quantities of inner space displacement were measured in a test, and a hardness test was done after dismantlement, and looseness area was grasped quantitatively. As a result, the looseness area was able to be estimated with about 17.5cm than tunnel center position.

③ A test approach in deep underground laboratory was examined, and examination / the in situ test which took advantage of rock core analysis / borehole as purpose and done examination item by grip of long-term bedrock behavior (a bord is taken advantage of, and bord itself is used) was shown. In addition, layout of the deep underground laboratory which carried out various tests about long-term behavior in 3 depth was shown.

Work performed by Maeda Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

*Maeda Corporation

目次

| | |
|------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 軟岩試料を用いたクリープ試験 | 3 |
| 2. 1 ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験 | 4 |
| 2. 1. 1 試験の手順 | 4 |
| 2. 1. 2 試験装置 | 5 |
| 2. 1. 3 試験条件 | 6 |
| 2. 1. 4 データの解析方法 | 7 |
| 2. 1. 5 一軸圧縮試験の結果 | 11 |
| 2. 2 クリープ試験 | 17 |
| 2. 2. 1 試験の手順 | 17 |
| 2. 2. 2 試験装置 | 17 |
| 2. 2. 3 試験条件 | 19 |
| 2. 2. 4 データの解析方法 | 19 |
| 2. 2. 5 クリープ試験の結果 | 20 |
| 2. 3 結果の考察・検討 | 28 |
| 3. 軟岩試料を用いた模型実験 | 33 |
| 3. 1 試験の手順 | 33 |
| 3. 2 試験装置 | 33 |
| 3. 3 試験条件 | 35 |
| 3. 4 模型実験の結果 | 36 |
| 3. 5 結果の考察・検討 | 39 |
| 4. 深地層研究所における試験方法検討 | 45 |
| 4. 1 試験項目 | 45 |
| 4. 1. 1 岩石コア試験 | 45 |
| 4. 1. 2 ボーリング孔を利用した試験 | 49 |
| 4. 1. 3 原位置試験 | 54 |
| 4. 2 試験レイアウト | 57 |
| 5. おわりに | 62 |
| 参考文献 | 64 |
| 付録 | |

表 目 次

| | | |
|---------|----------------------|----|
| 表-2. 1 | 一軸圧縮試験の試験条件等 | 6 |
| 表-2. 2 | α と m/n の関係 | 10 |
| 表-2. 3 | 各試験前の各供試体寸法および重量等 | 11 |
| 表-2. 4 | 一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等 | 11 |
| 表-2. 5 | クリープ試験の試験条件等 | 19 |
| 表-2. 6 | 設定する破壊到達時間の定義 | 20 |
| 表-2. 7 | 各試験前の各供試体寸法および重量等 | 21 |
| 表-2. 8 | クリープ試験結果一覧 | 21 |
| 表-2. 9 | 実測の寿命と大久保モデルでの寿命 | 28 |
| 表-2. 10 | 一軸圧縮試験結果による大久保定数の算出 | 28 |
| 表-2. 11 | 大久保定数のバラツキ | 29 |
| 表-2. 12 | 破壊到達時間のバラツキ | 29 |
| 表-3. 1 | 模型装置仕様 | 34 |
| 表-3. 2 | エコーチップ測定結果 | 41 |
| 表-3. 3 | 針貫入試験測定結果 | 41 |
| 表-4. 1 | 岩石試験項目 | 45 |
| 表-4. 2 | ボーリング孔を利用した長期挙動把握試験 | 49 |
| 表-4. 3 | 原位置での長期挙動把握試験 | 54 |

目 次

| | | |
|-------------|---------------------------|----|
| 図-2. 1 | 軟岩試料を用いたクリープ試験手順 | 3 |
| 図-2. 2 | ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験の手順 | 4 |
| 図-2. 3 | 一軸圧縮試験概要図 | 5 |
| 図-2. 4 | 一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の1例 | 8 |
| 図-2. 5 | 応力-ひずみ曲線から m を求めるときの考え方 | 9 |
| 図-2. 6 | 一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線 | 12 |
| 図-2. 7 (a) | 応力-ひずみ曲線 (Y-5) | 13 |
| 図-2. 7 (b) | 応力-ひずみ曲線 (Y-6) | 14 |
| 図-2. 7 (c) | 応力-ひずみ曲線 (Y-8) | 15 |
| 図-2. 8 | 応力-ひずみ曲線 (全岩石) | 16 |
| 図-2. 9 | クリープ試験試験手順 | 17 |
| 図-2. 10 | クリープ試験概要図 | 18 |
| 図-2. 11 (a) | 超短期 経過時間-変位曲線 | 22 |
| 図-2. 11 (b) | 超短期 経過時間-荷重曲線 | 22 |
| 図-2. 11 (c) | 超短期 経過時間-ひずみ速度曲線 | 23 |
| 図-2. 11 (d) | 超短期 経過時間-ひずみ曲線 (クリープ曲線) | 23 |
| 図-2. 12 (a) | 短期 経過時間-変位曲線 | 24 |
| 図-2. 12 (b) | 短期 経過時間-荷重曲線 | 24 |
| 図-2. 12 (c) | 短期 経過時間-ひずみ速度曲線 | 25 |
| 図-2. 12 (d) | 短期 経過時間-ひずみ曲線 (クリープ曲線) | 25 |
| 図-2. 13 (a) | 長期 経過時間-変位曲線 | 26 |
| 図-2. 13 (b) | 長期 経過時間-荷重曲線 | 26 |
| 図-2. 13 (c) | 長期 経過時間-ひずみ速度曲線 | 27 |
| 図-2. 13 (d) | 長期 経過時間-ひずみ曲線 (クリープ曲線) | 27 |
| 図-2. 14 | 超短期 破壊到達時間推定 | 29 |
| 図-2. 15 | 短期 破壊到達時間推定 | 30 |
| 図-2. 16 | 長期 破壊到達時間推定 | 30 |
| 図-3. 1 | 模型実験フロー図 | 33 |
| 図-3. 2 | 模型実験概念図 | 33 |
| 図-3. 3 | 測定位置図 | 34 |
| 図-3. 4 | 試験体強度経時変化 | 35 |
| 図-3. 5 | Kastnerの式による内部応力分布図 | 36 |
| 図-3. 6 | 載荷応力経時変化図 | 37 |
| 図-3. 7 | 側方・上方変位量経時変化図 | 37 |

| | | |
|---------|---|----|
| 図-3. 8 | 内空変位量経時変化図 | 38 |
| 図-3. 9 | トンネル掘削時内部応力経時変化図 | 38 |
| 図-3. 10 | 内圧負荷時内部応力経時変化図 | 38 |
| 図-3. 11 | 内圧を負荷した場合と無負荷の場合の 内部応力の違い(Kastnerの式より) | 38 |
| 図-3. 12 | エコーチップおよび針貫入試験測線 | 41 |
| 図-3. 13 | エコーチップ測定結果 | 41 |
| 図-3. 14 | 針貫入試験結果 | 41 |
| 図-4. 1 | 地層処分過程で周辺岩盤が被る環境変化 | 46 |
| 図-4. 2 | 孔内クリープ試験測定概念図 | 50 |
| 図-4. 3 | 孔内載荷試験によるクリープ荷重設定方法 | 51 |
| 図-4. 4 | 孔内クリープ試験概要図 | 51 |
| 図-4. 5 | 孔内弾性波検層装置の例 | 52 |
| 図-4. 6 | 透水試験装置の例(動燃式JFT) | 52 |
| 図-4. 7 | 弾性波トモグラフィ測定パターン及び波形記録例 | 53 |
| 図-4. 8 | パルステスト測定模式図 | 53 |
| 図-4. 9 | パルス発信装置の概要 | 53 |
| 図-4. 10 | 岩石三軸試験装置及び長期載荷パターン例 | 55 |
| 図-4. 11 | 模擬トンネル掘削試験概要図 | 55 |
| 図-4. 12 | 坑道周辺の変形状態、応力状態測定模式図 | 56 |
| 図-4. 13 | 施工条件を変えた場合のトンネル状況の模式図 | 56 |
| 図-4. 14 | 長期挙動測定試験場全体概要図 | 57 |
| 図-4. 15 | 長期挙動測定試験レイアウト平面図(1) | 58 |
| 図-4. 15 | 長期挙動測定試験レイアウト平面図(2) | 59 |

写 真 目 次

| | | |
|---------|------------|----|
| 写真-2. 1 | 一軸圧縮試験試験状況 | 5 |
| 写真-2. 2 | クリープ試験機 | 18 |
| 写真-3. 1 | 装置設置状況 | 34 |

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムを考えるにあたり、人工バリアの境界条件となるニアフィールド周辺岩盤の長期力学的安定性を適切に評価できることが重要となる。

サイクル機構では、第2次とりまとめにおいて、非線形粘弾性モデルの一つである大久保モデルを用いて例示的に坑道の長期力学的安定性の評価を実施している。今後、室内実験や国際共同研究、深地層研究所の建設等を通して、評価手法の信頼性の向上、実現象の解明を実施することが望まれている。

本研究は、大久保モデルによる評価手法の信頼性向上のための基礎データ取得、実現象の解明のための基礎データ取得を主目的として、当社現場より採取された実岩石を用いてクリープ試験を行いデータの蓄積を図るとともに、大久保モデルを用いて模擬できるような結果が得られるかどうかを確認する。また、トンネル模型装置を用いニアフィールド岩盤挙動を模擬した試験を実施する。さらに、クリープ試験、模型実験より得られた結果を通じ、原位置における試験法についても考察を行った。

This is a blank page.

2. 軟岩試料を用いたクリープ試験

評価手法の信頼性向上，データ蓄積に資するため，軟岩試料を用いたクリープ試験を実施し，岩盤の長期力学的評価手法の一つである大久保モデル¹⁾を用いた評価を実施する。

軟岩試料を用いたクリープ試験は，ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験を行い，その結果を用い大久保モデルにおける諸定数を設定する。実験により決定した定数を基に，所定日数にて破壊するクリープ荷重を大久保モデルより設定し，クリープ試験を実施し，モデルによる予測結果との比較検討を行う。

以下に試験のフロー図を示す。

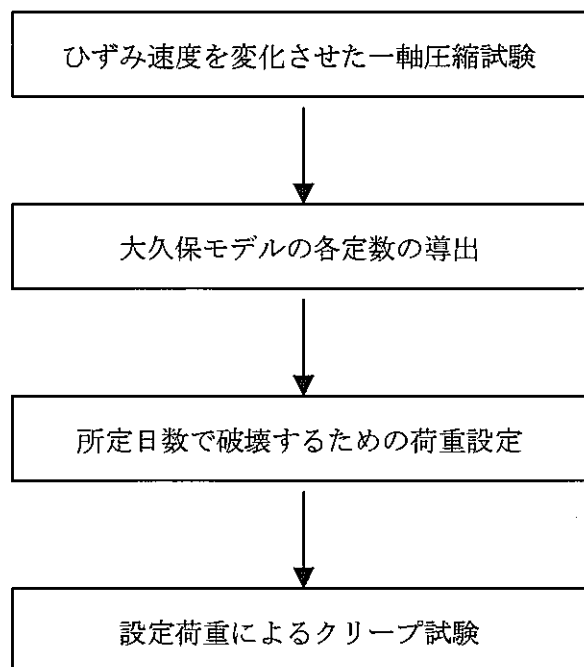


図-2. 1 軟岩試料を用いたクリープ試験手順

2. 1 ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験

2. 1. 1 試験の手順

ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験（以下、一軸圧縮試験とする）の試験手順を以下のフロー図に示す。

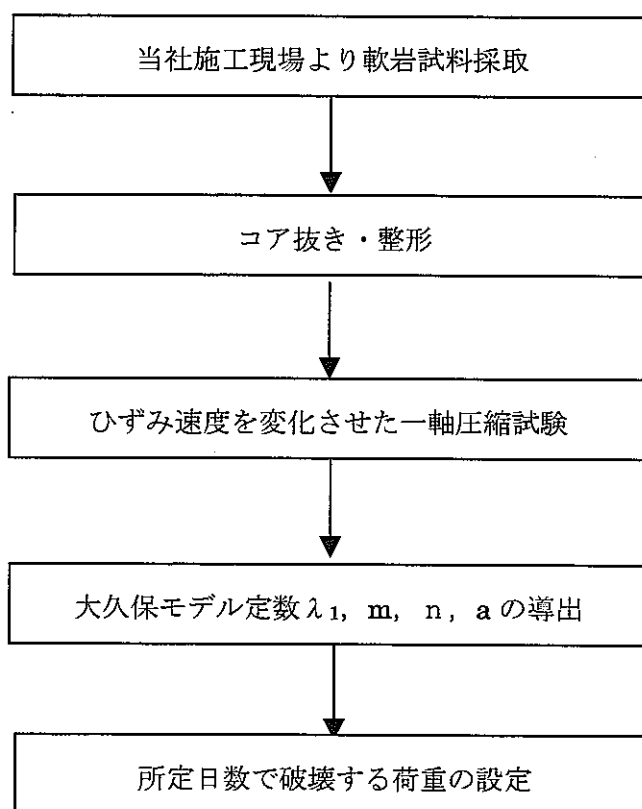


図-2. 2 ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験の手順

2. 1. 2 試験装置

試験装置は、岩石三軸圧縮試験機（サーボコントロール方式）型式 T0-20-3（坂田電機株式会社製造）を用い、ひずみ速度制御方式で実験を行った。

計測器は、以下のものを使用した。

変位計：型式 LV-51（坂田電機株式会社製造）（容量 5mm）

荷重計：型式 PV-200SL（坂田電機株式会社製造）（容量 5t）

図-2. 3に一軸圧縮試験概要図を示す。

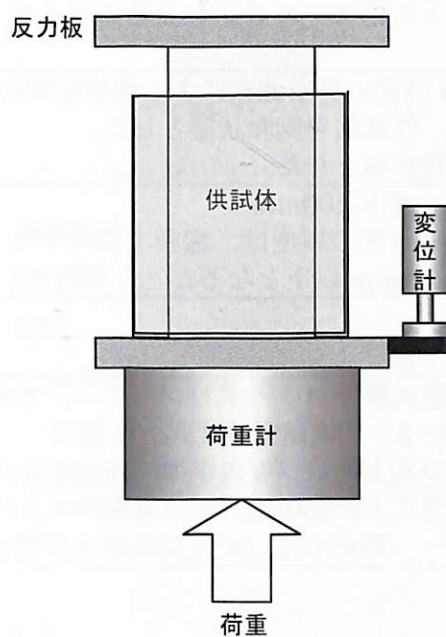


図-2. 3 一軸圧縮試験概要図



写真-2. 1 一軸圧縮試験試験状況

2. 1. 3 試験条件

表-2. 1に一軸圧縮試験の試験条件等を示す。

表-2. 1 一軸圧縮試験の試験条件等

| | |
|--------|---|
| 使用岩石 | 当社施工現場より採取した軟岩試料 |
| 載荷方法 | ひずみ速度を繰り返し変化させた。 設定ひずみ速度 継続時間 ① $1.0 \times 10^{-6}/\text{sec}$: 10min ② $1.0 \times 10^{-5}/\text{sec}$: 1min 上記の①と②を交互に繰り返して試験を実施した。 ※これは、大久保モデルの定数を求め易くするために行ったものである。 |
| 供試体の状態 | 試験前に24時間の真空飽和による強制湿潤状態とし、試験直前までラッピングし、供試体を飽和状態とした。 試験中は湿潤状態とした。 |
| 供試体寸法 | 直径50mm×高さ100mm ※供試体の平行度の精度は、端面で直行する4点の高さの最小値と最大値の差が0.1mm以下となることを目標とした。 |
| 試験数量 | 3供試体 |
| 供試体名 | Y-5, Y-6, Y-8 |
| 試験機の仕様 | 岩石三軸圧縮試験機 (サーボコントロール方式) 型式 T0-20-3 (坂田電機株式会社製造) ・変位計: 型式 LV-51 (坂田電機株式会社製造) (容量5mm) ・荷重計: 型式 PV-200SL (坂田電機株式会社製造) (容量5t) データロガー TDS-602 (東京測器研究所製造) |

2. 1. 4 データの解析方法

ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験において得られた結果を大久保モデルの理論曲線と比較し、大久保モデルの各定数を導出する。ここでは、大久保モデルの定数と理論曲線について、以下の3点について説明する。

- ①一軸圧縮試験とクリープ試験における大久保モデルの理論曲線の構成式
- ②大久保モデル各定数の導出
- ③クリープ時における破壊到達時間の推定

(1) 一軸圧縮試験における大久保モデルの理論曲線の構成式

大久保モデルの構成則の基本式は式(1)で表される。¹⁾

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m \sigma^n \quad (1)$$

ただし、 $\lambda (= \varepsilon / \sigma)$: コンプライアンス

σ : 載荷応力

ε : ひずみ

t : 時間

a, m, n : 大久保モデルの定数

一軸圧縮試験（定ひずみ速度試験）の場合、初期条件として以下の値を設定することができる。

- ①ひずみ速度=C
- ②初期コンプライアンス= λ_1
- ③初期ひずみ=0

上記の初期条件のもと、式(1)を解くと式(2)が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma^* &= (1 + \beta t^*)^{\frac{1}{\beta}} \\ \sigma^* &= \sigma / (\varepsilon / \lambda_1) \\ t^* &= -\frac{aC^n t^{n+1}}{(n+1)\lambda_1^{n-m+1}} \\ \beta &= m - n - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし式(2)の適用範囲は $\beta \neq 0, m > 0, m \neq n+1$ である。

式(2)を σ と ε の関係の式に書き直すと式(3)となる。

$$\sigma = \frac{\varepsilon^{n-m+1}}{\varepsilon^{n+1} + \lambda_1^{n-m+1} C \left(\frac{n+1}{a(n-m+1)} \right)} \quad (3)$$

本研究では、一軸圧縮試験での大久保モデルの理論曲線は式(3)を用いて描くこととした。

(2) 大久保モデル各定数の導出

式(3)からわかるように、大久保モデルの各定数とは、 λ_1 、 n 、 m 、 a のことである。以下に、一軸圧縮試験の結果である応力-ひずみ曲線から大久保モデルの定数を導出する方法について示す。なお、図-2.4に応力-ひずみ曲線の一例を示し、同図を使用して大久保モデルの各定数の導出方法について示す。

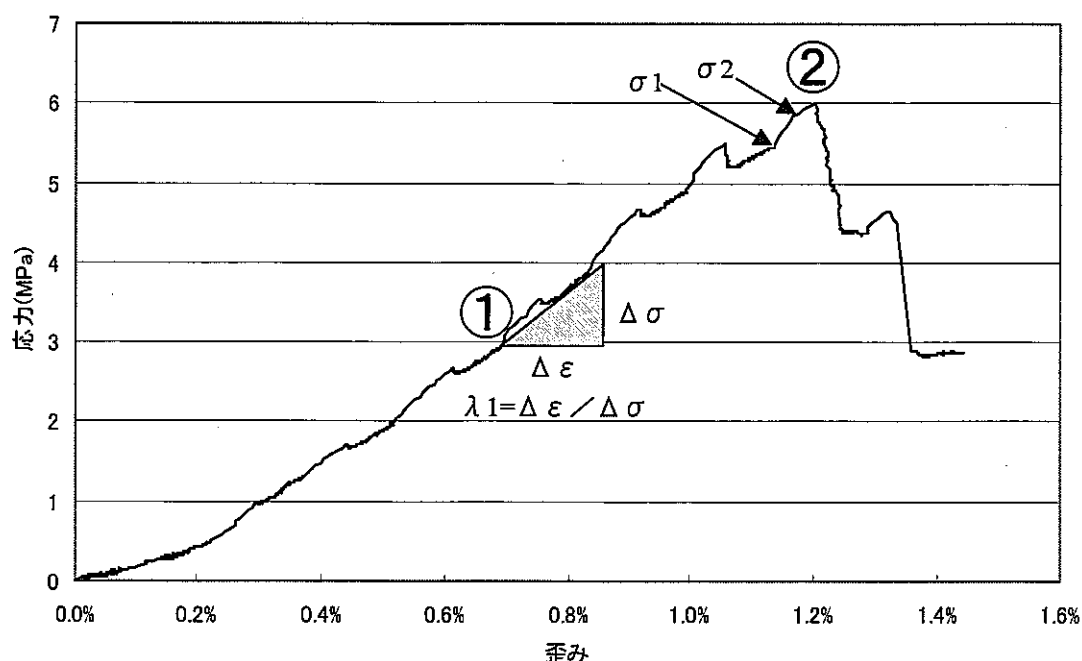


図-2.4 一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の1例

1)初期コンプライアンス (λ_1) について²⁾

初期コンプライアンスはピーク強度の50%の位置で得られる接線ヤング率の逆数から求める。図-2.4では①にあたる。

2)n について³⁾

一軸圧縮強度と n の間には式(4)が成り立つ。

$$\sigma_c \propto C^{\frac{1}{n+1}} \quad (4)$$

ただし、 σ_c : 一軸圧縮強度

C : 定ひずみ速度

厳密に n を求める場合には、ひずみ速度を幾段階にも変えた定ひずみ速度試験を実施し、そのときの破壊強度の変化をみていくことが必要となる。しかし、そのためには、特性の揃った供試体を多数用意する必要があるが、容易ではない。そこで今回の試験では、東京大学大久保教授殿に意見を賜り、以下に示すような方法での試験を実施した。

式(6)は、強度破壊点すなわち応力-ひずみ曲線の傾きが 0 となったときの応力に対して成り立つ。強度破壊点以前でも、応力-ひずみ曲線の傾きが同じときの応力に対して、同様な関係が近似的に成り立つのではないかと考えられる。すなわち、低ひずみ速度と高ひずみ速度（低ひずみ速度の 10 倍のひずみ速度）を交互に設定した定ひずみ速度試験を実施し、破壊点付近において式(5)により n を求めるのである。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 10^{\frac{1}{n+1}} \quad (5)$$

ただし、 σ_1 ：ひずみ速度を上げる直前の応力

σ_2 ：ひずみ速度を上げた後、接線ヤング率がひずみ速度を上げる直前と一致したときの応力

図-2. 4 では②にあたる。

3)m について 2)

m はピーク強度以降の挙動から求める。ここでも東京大学大久保教授殿から意見を賜り、以下に示すような方法での算出方法を採用した。

図-2. 5 に示すように応力-ひずみ曲線図中で初期勾配 = θ 、ピーク強度以降の傾き = α' として式(6)で表される α を求める。

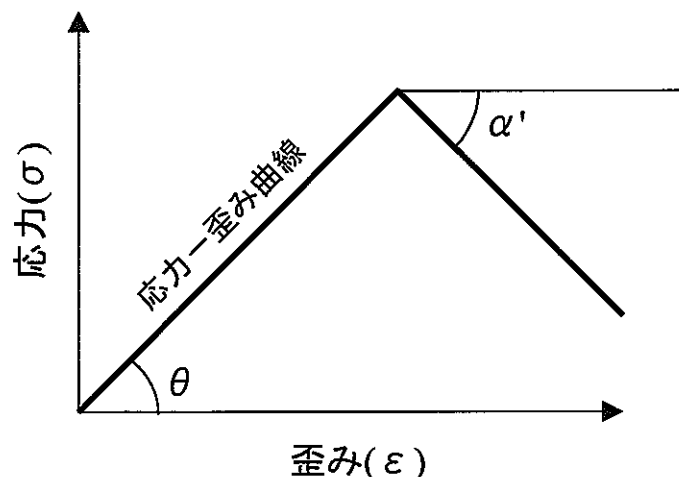


図-2. 5 応力-ひずみ曲線から m を求めるときの考え方

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \alpha'}{\tan \theta}\right) \quad (6)$$

このようにして求めた α と m/n の間には相関があり、大まかには表-2. 2 のようになる。

表-2. 2 α と m/n の関係

| α | m/n |
|----------|-------|
| 90度付近 | 1 |
| 60度付近 | 0.75 |
| 45度付近 | 0.5 |
| 30度付近 | 0.25 |
| 0度付近 | 0 |

本研究では、表-2. 2に従い、 m を求めることにした。図-2. 5ではピーク強度以降の傾きより、 α は90度付近であるため $m/n=1$ となる。

4)a について²⁾

上記1)~3)で求めた λ_1 , n , m と、一軸圧縮強度時の定ひずみ速度 C および一軸圧縮強度 σ_c より、 a は式(7)で表される。

$$a = \left(\frac{m}{n+1} \right)^{\frac{m}{n-m+1}} \lambda_1^{-m} \sigma_c^{-(n+1)} C \quad (7)$$

ただし式(7)の適用範囲は $m > 0, m \neq n+1$ である。

(3) クリープ試験における破壊到達時間の推定

クリープ状態での大久保モデルの定数 a に関する式は、式(8)で表される。

$$a = \left(\frac{1}{m-1} \right) \lambda_1^{1-m} \sigma_1^{-n} \cdot t_c^{-1} \quad (8)$$

$$m > 1$$

式(8)より、 t_c を求めると、 t_c は式(9)で表される。

$$t_c = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{m-1} \right) \lambda_1^{1-m} \sigma_1^{-n} \quad (9)$$

ここで、 a , m , n , λ_1 という大久保モデルの各定数については、一軸圧縮試験から求めた値を用いることとすれば、載荷応力 σ_1 を設定することにより、破壊時間を推定することが出来る。

本研究では、この数式を用い、破壊時間を5分、1日、30日としたときの載荷応力を算定し、設定荷重とした。

2. 1. 5 一軸圧縮試験の結果

(1) 各試験前の各供試体の寸法および重量

各試験前の各供試体の寸法および重量等を表-2. 3に示す。

表-2. 3 各試験前の各供試体の寸法および重量等

| 供試体 番号 | 寸法 | | 重量 |
|-----------|-------|--------|-------|
| | 直径 | 高さ | 試験前 |
| | cm | cm | N |
| Y-5 | 4.928 | 10.131 | 3.674 |
| Y-6 | 4.923 | 10.089 | 3.654 |
| Y-8 | 4.897 | 10.045 | 3.605 |

(2) 一軸圧縮試験結果

図-2. 6に各ケースでの一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線を示す。同図より、低ひずみ速度と高ひずみ速度の設定が良好になされていることがわかる。

図-2. 7に各ケースでの応力-ひずみ曲線を示す。図中には、大久保モデルでの理論曲線を併記している。同図より、理論曲線と実測の曲線との間には多少のかい離はあるものの、概略的には整合のとれたものであることがわかる。

図-2. 8には、各ケースの比較のため、応力ひずみ曲線をまとめたものを示す。Y-5とY-8では良く似ている曲線を示しており、大久保定数を比較してもほぼ同じと考えられる。Y-6では初期コンプライアンスが若干異なることが分かる。

表-2. 4に一軸圧縮試験から得られる大久保モデルの定数等を示す。a は λ_1 , n, m, σ_c の値から算出されるものである。なお、平均のaは、そのときの λ_1 , n, mで算定している。

表-2. 4 一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等

| | λ_1 /MPa | n | m | a /(MPa·sec) | σ_c MPa |
|-----|---------------------|----|----|-----------------------|-------------------|
| Y-5 | 0.00357 | 21 | 21 | 7.42×10^{41} | 1.536 |
| Y-6 | 0.00445 | 27 | 27 | 2.88×10^{51} | 1.720 |
| Y-8 | 0.00360 | 22 | 22 | 8.12×10^{43} | 1.559 |
| 平均 | 0.00387 | 23 | 23 | 1.31×10^{45} | 1.605 |

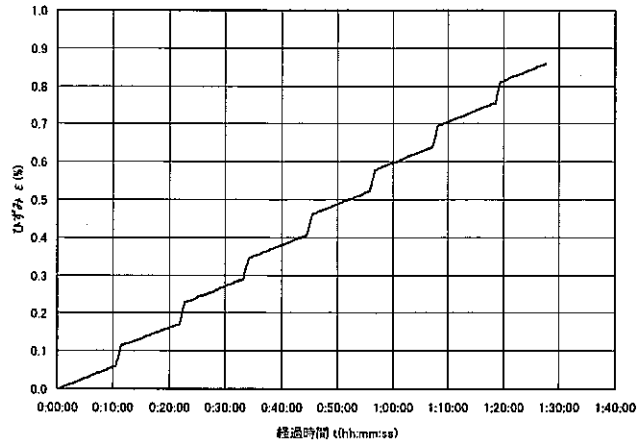
λ_1 : 初期コンプライアンス

n, m, a: 大久保モデルの定数 (ただし, aは λ_1 , n, mから算出している)

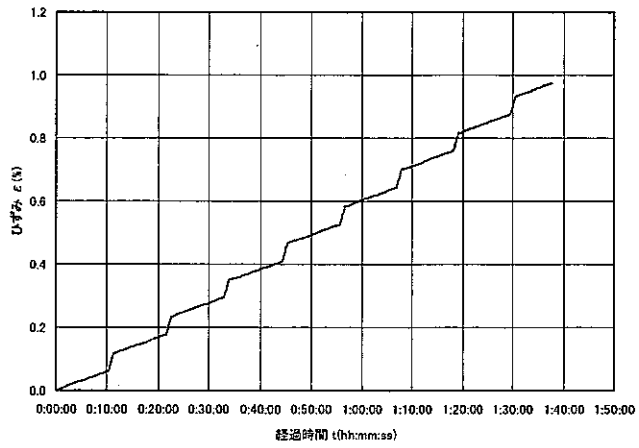
σ_c : 一軸圧縮強度

表-2. 4より、 λ_1 は0.00357~0.00445/(MPa)となり、ばらつきがみられる、 σ_c は1.60~1.79(MPa)となり比較的バラツキのない結果となった。初期コンプライアンスにばらつきが見られるが、本研究では、クリープ試験での大久保モデルの理論曲線を表す際には、便宜上、上表の平均を用いることにした。

Y-5



Y-6



Y-8

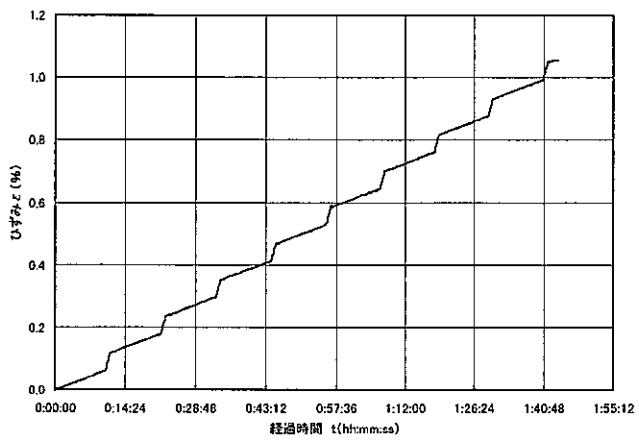


図-2. 6 一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線
(上よりY-5, Y-6, Y-8)

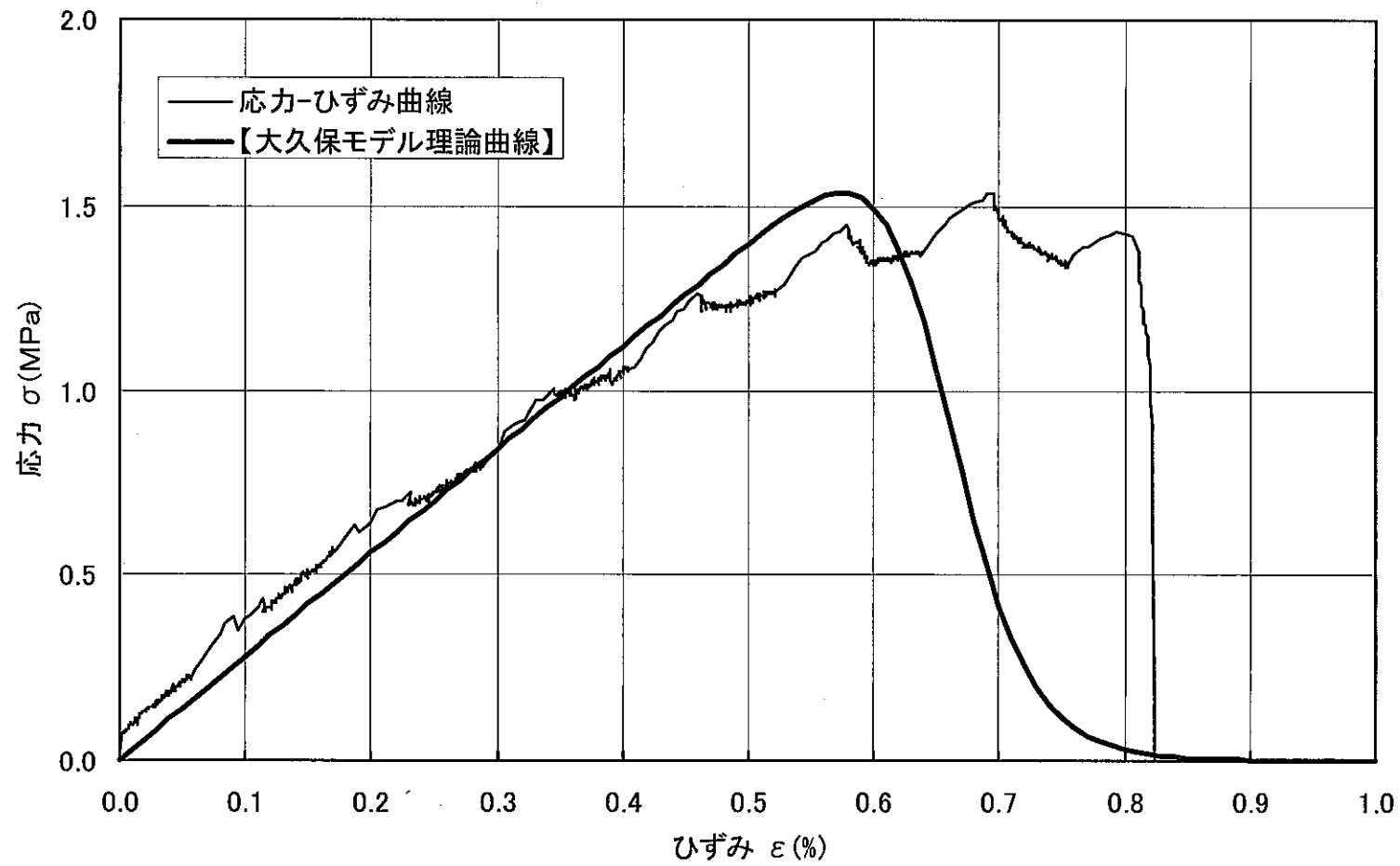


図-2.7 (a) 応力-ひずみ曲線 (Y-5)

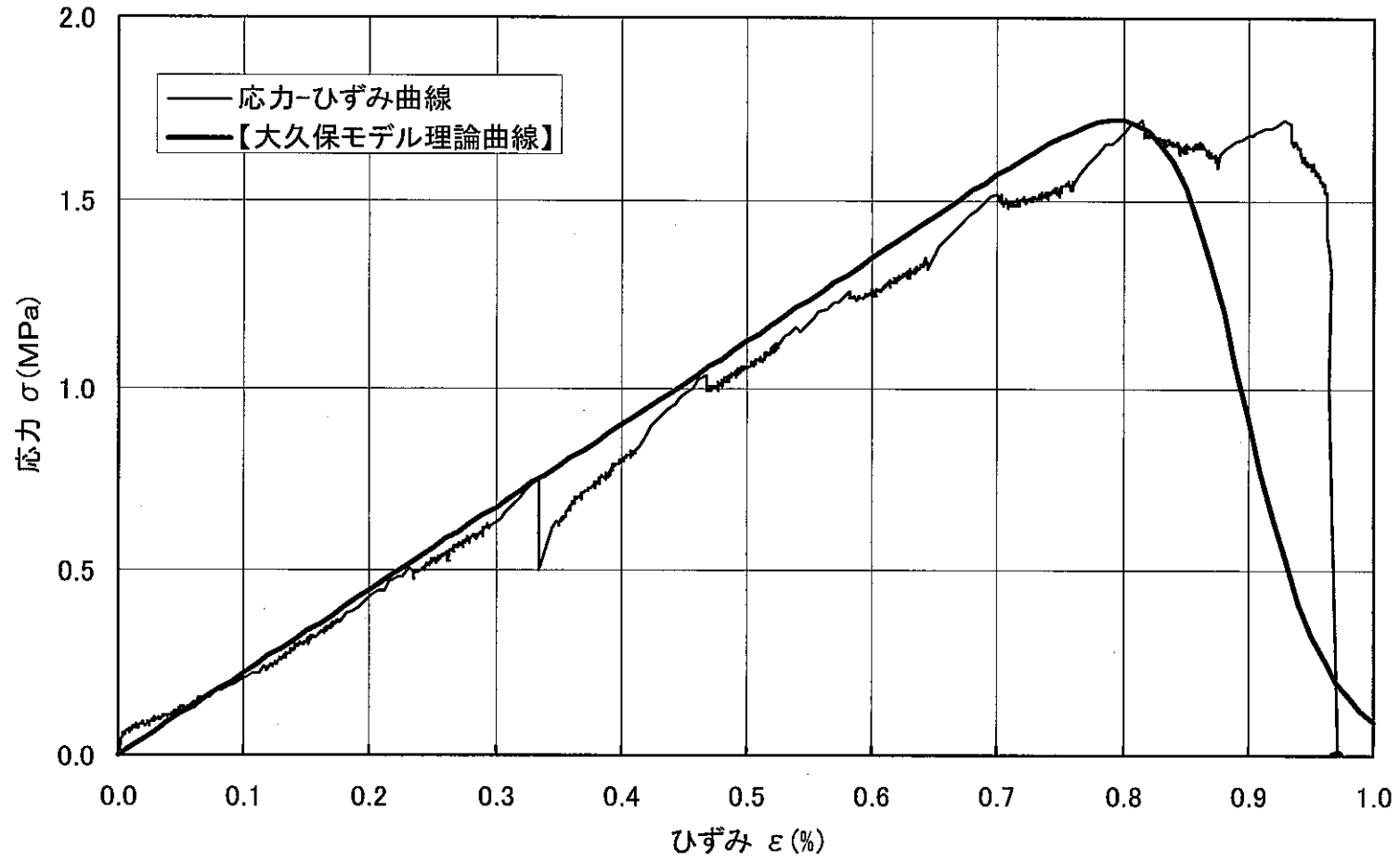


図-2.7 (b) 応力-ひずみ曲線 (Y-6)

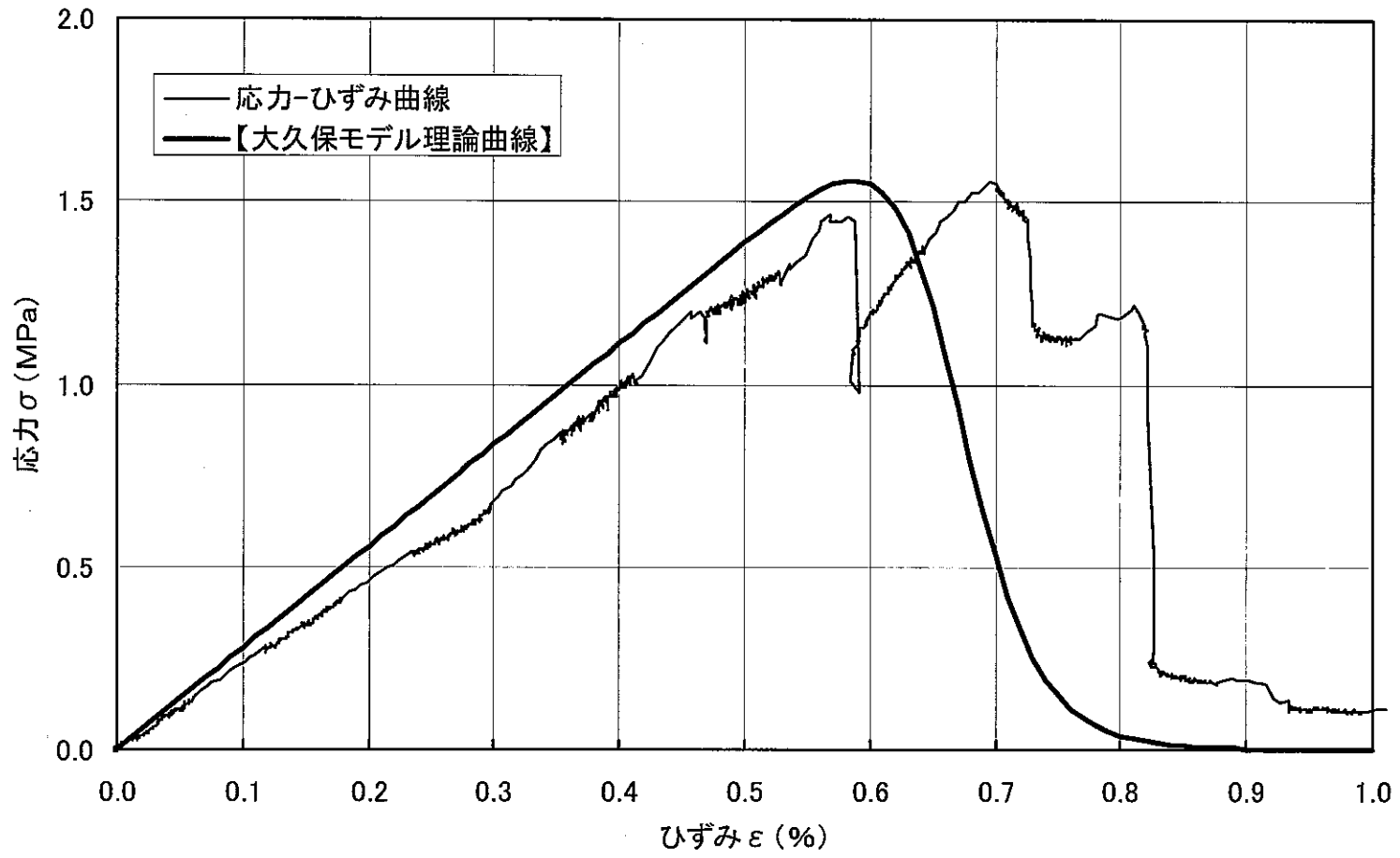


図-2.7(c) 応力-ひずみ曲線 (Y-8)

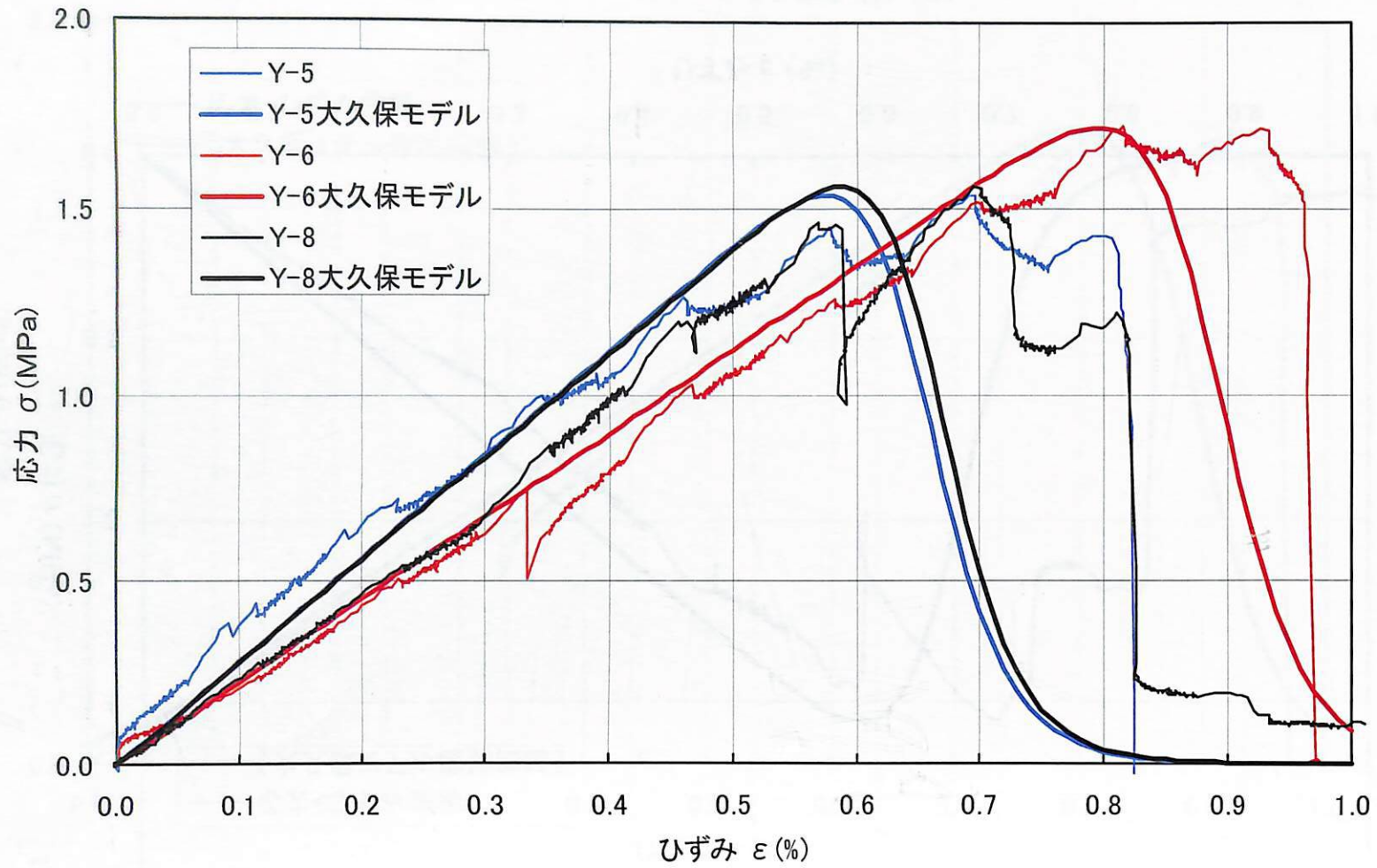


図-2.8 応力-ひずみ曲線 (全岩石)

2. 2 クリープ試験

2. 2. 1 試験の手順

クリープ試験の試験手順を以下のフロー図に示す。

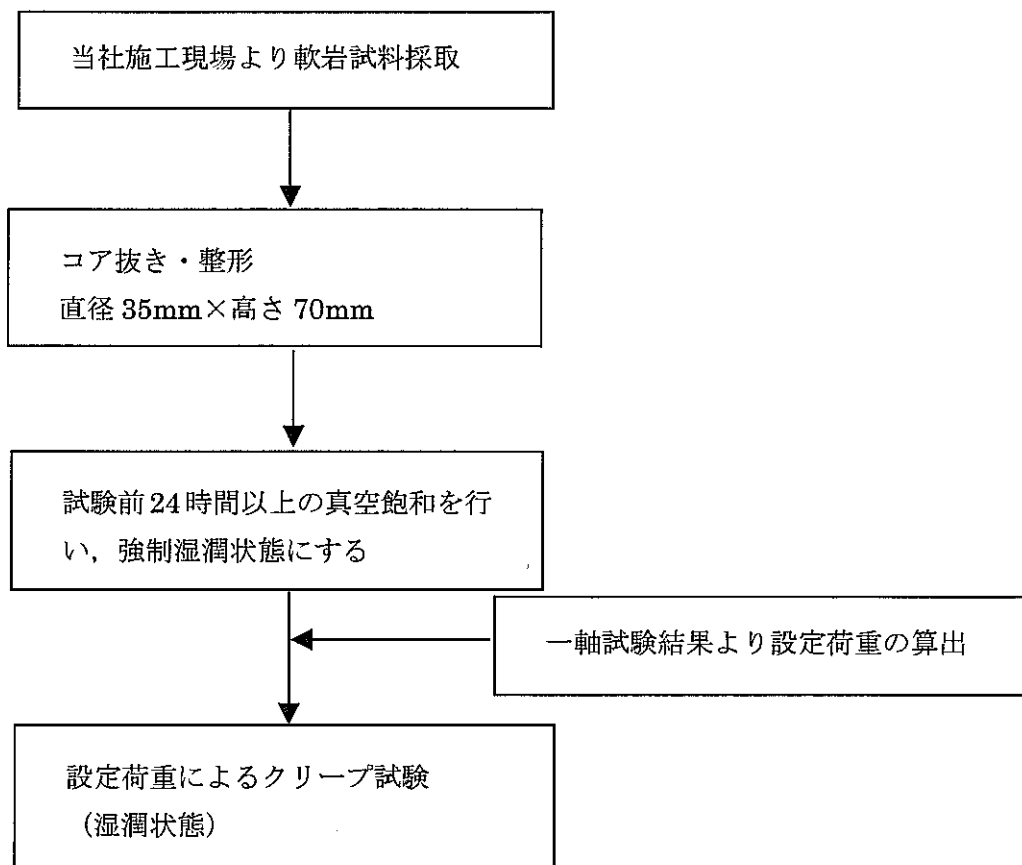


図-2.9 クリープ試験試験手順

2. 2. 2 試験装置

試験装置は、重錘式載荷方式クリープ試験機（株式会社協同精機製造）を用いて行った。

計測器は、以下のものを使用した。

変位計：型式 CDP-10（東京測器研究所製造）（容量 10mm）

荷重計：型式 CLA20KNA（東京測器研究所製造）（容量 20kN）

図-2.10にクリープ試験概要図を示す。

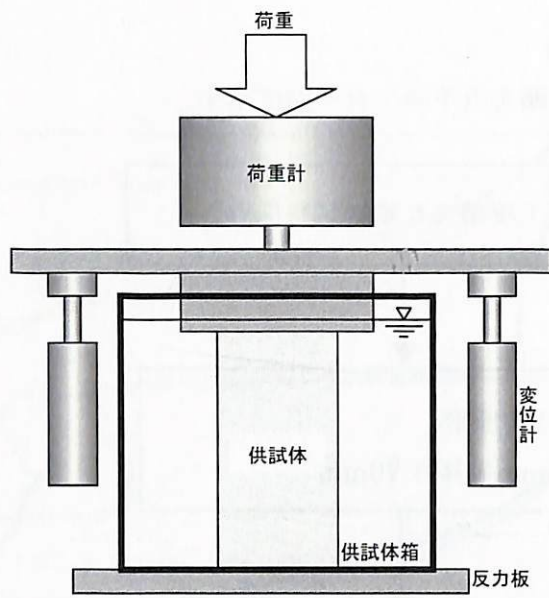


図-2. 10 クリープ試験概要図



写真-2. 2 クリープ試験機

2. 2. 3 試験条件

表-2. 5にクリープ試験の試験条件等を示す。

表-2. 5 クリープ試験の試験条件等

| | |
|--------|---|
| 使用岩石 | 当社施工現場より採取した軟岩試料 |
| 載荷方法 | 載荷荷重は一軸圧縮試験から求めた大久保モデルの定数を用いて、破壊到達時間を数分、1日、1ヶ月と仮定し設定した。 載荷は、設定応力に達するまで衝撃を与えることなく、速やかに載荷した。 |
| 供試体の状態 | 試験前に24時間の真空飽和による強制湿潤状態とし、試験直前までラッピングし、供試体を飽和状態とした。 試験中は浸水状態とした。 |
| 供試体寸法 | 直径 35mm×高さ 70mm ※供試体の平行度の精度は、端面で直行する4点の高さの最小値と最大値の差が 0.1mm 以下となることを目標とした。 |
| 試験数量 | 3 供試体 (1 供試体/1 条件) 超短期 (数分), 短期 (1日), 長期 (1ヶ月) |
| 供試体名 | Y-5', Y-4', Y-1 |
| 試験機の仕様 | 重錐式載荷方式クリープ試験機 (株式会社協同精機製造) ・変位計: 型式 CDP-10 (東京測器株式会社製造) (容量 10mm) ・荷重計: 型式 CLA20KNA (東京測器株式会社製造) (容量 20kN) |
| 試験室の状態 | 温度: 20度 湿度: 60% 空調設備が整った恒温室で試験を実施した。 |

2. 2. 4 データの解析方法

ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験の結果を用い、大久保モデルの理論曲線と比較し、大久保モデルの各定数を導出した。ここでは、クリープ試験における大久保モデルの理論曲線について説明する。

(1) クリープ試験における大久保モデルの理論曲線の構成式

大久保モデルの構成則の基本式は式(1)で表される。1)

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m\sigma^n \quad (1)$$

ただし、 $\lambda (= \varepsilon / \sigma)$: コンプライアンス

σ : 載荷応力

ε : ひずみ

t : 時間

a, m, n : 大久保モデルの定数

クリープ試験の場合、初期条件として以下の値を設定することができる。

- ① 載荷応力 = σ_1
- ② 初期コンプライアンス = λ_1
- ③ 初期ひずみ = ε_1

上記の初期条件のもと、式(1)を解くと式(2)が得られる。

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= (1 + \beta t^*)^{\frac{1}{\beta}} \\ \varepsilon^* &= \varepsilon / \varepsilon_1 \\ t^* &= -a \lambda_1^{m-1} \sigma_1^n t \\ \beta &= 1 - m \end{aligned} \quad (2)$$

ただし式(2)の適用範囲は $\beta \neq 0, m > 1$ である。

式(2)を ε と t の関係の式に書き直すと式(3)となる。

$$\varepsilon = \sigma_1 \left((-m+1) a \sigma_1^n t + \lambda_1^{-m+1} \right)^{\frac{1}{-m+1}} \quad (3)$$

本研究では、一軸圧縮試験での大久保モデルの理論曲線は式(3)を用いて描くこととした。

2. 2. 5 クリープ試験結果

(1) クリープ時間についての定義

本研究では、クリープ時間を「超短期」「短期」「長期」の3段階に設定して試験を行った。

ここで、それぞれの時間について表-2. 6のように定義することとした。

なお、載荷応力の設定は、2. 1. 4で述べた「データの解析方法」の(3)「クリープ試験における破壊到達時間の推定」従って載荷応力を設定する。

表-2. 6 設定する破壊到達時間の定義

| | 想定破壊到達時間 |
|-----|----------|
| 超短期 | 5分 |
| 短期 | 1日 |
| 長期 | 30日 |

実際の載荷に当たっては、上記の目標を満足するように載荷応力を求めたが、大久保モデルを適用して、目標とする破壊到達時間が一致する応力を与えることは試験機の能力上困難な場合もあったため、試験ケースによって想定破壊到達時間は多少異なる場合もある。

(2) 各試験前の各供試体の寸法および重量

各試験前の各供試体の寸法および重量等を表-2.7に示す。

表-2.7 各試験前の各供試体の寸法および重量等

| 供試体 番号 | 寸法 | | 重量 |
|-----------|-------|-------|-------|
| | 直径 | 高さ | 試験前 |
| | cm | cm | N |
| Y-5' | 3.501 | 7.895 | 1.301 |
| Y-4' | 3.516 | 6.889 | 1.251 |
| Y-1 | 3.514 | 7.089 | 1.307 |

(3) クリープ試験結果

表-2.8に本研究で実施したクリープ試験結果をまとめて示す。なお、表中の目標載荷応力は、一軸圧縮試験で得られた大久保モデルの各定数を用いて、想定時間を5分、1日、30日として計算した(式(3)参照)。また、想定破壊到達時間は、実際に載荷した載荷応力を用いて、再計算し直した値を示す。

表-2.8 クリープ試験結果一覧

| 供試体番号 | 目標載荷 応力 [MPa] | 想定破壊 到達時間 | 載荷応力 [MPa] | 想定破壊 到達時間 | 実験結果 |
|------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|------------------|
| Y-5' (超短期) | 1.60 | 5分 | 1.509 | 310sec 5.2分 | 1710sec 28.5分 |
| Y-4' (短期) | 1.27 | 1日 | 1.161 | 40hr | 324hr |
| Y-1 (長期) | 1.10 | 30日 | 1.019 | 31日 | 未破壊(120日) |

※ σ : 載荷応力[MPa], t_c : 破壊到達時間

図-2.11~図-2.12にそれぞれ各供試体別のクリープ試験結果を示す。各ケース毎のクリープ試験結果としては、以下の4図を示している。なお、ここでの経過時間とは、設定荷重に到達した直後を0(sec)とした補正時間のことである。

- (a)経過時間—変位曲線
- (b)経過時間—荷重曲線
- (c)経過時間—ひずみ速度曲線
- (d)経過時間—ひずみ曲線 (クリープ曲線)

それぞれの図の(d) 経過時間—ひずみ曲線 (クリープ曲線) には、一軸圧縮試験の結果から想定される大久保モデルでの理論曲線もあわせて示す。大久保モデルでの各定数は一軸圧縮試験の結果から得られた平均的な値を使用した。

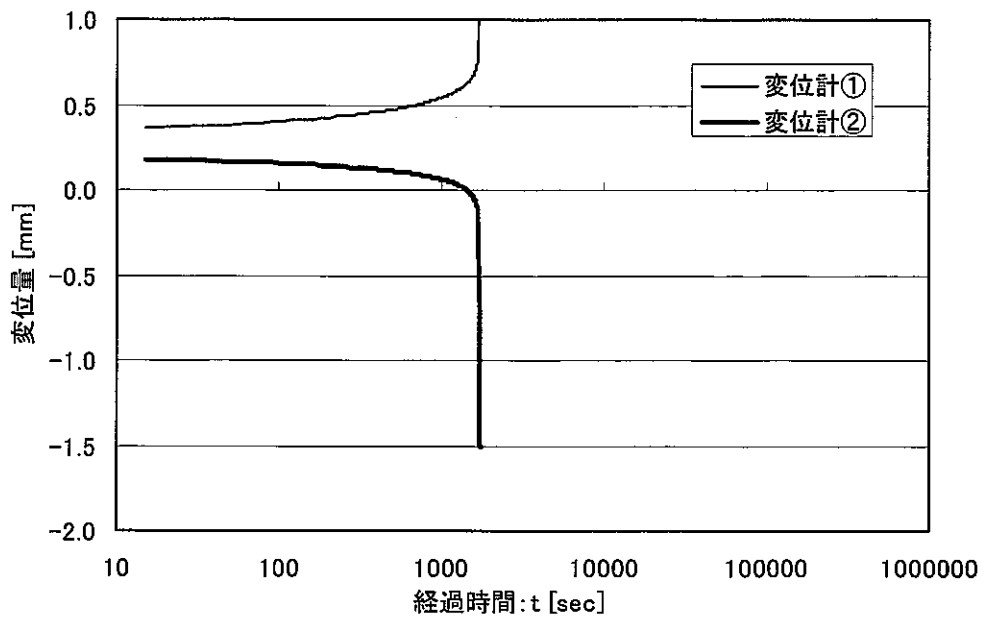


図-2. 11 (a) 超短期 経過時間—変位曲線

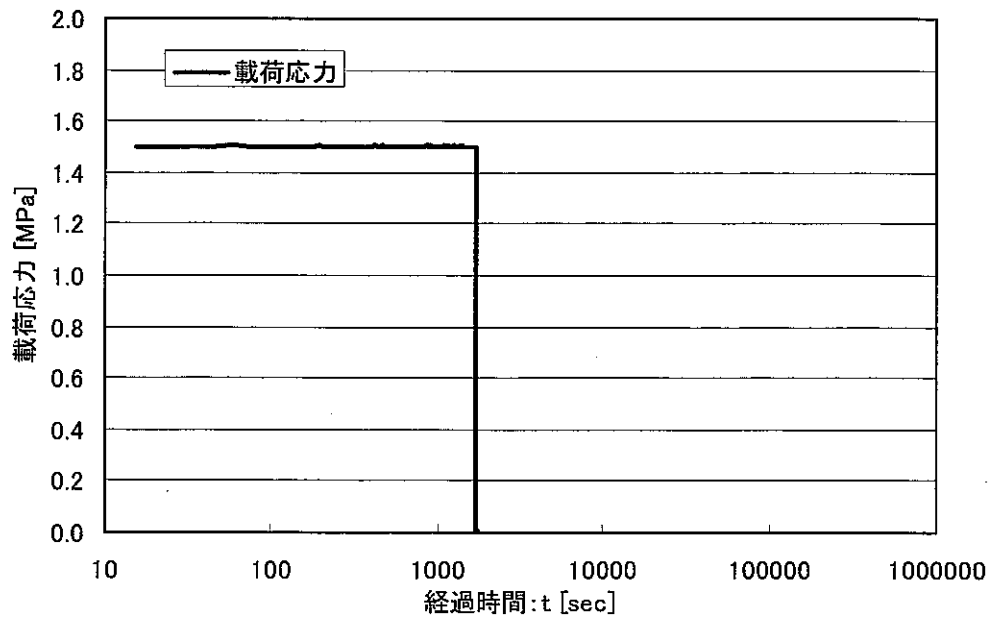


図-2. 11 (b) 超短期 経過時間—荷重曲線

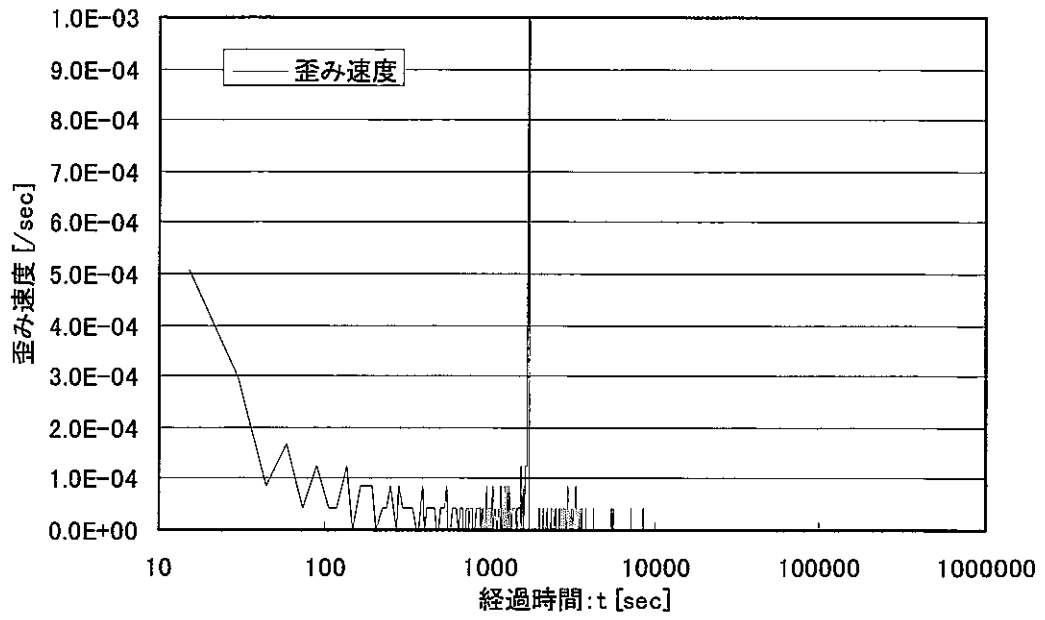


図-2. 11(c) 超短期 経過時間—ひずみ速度曲線

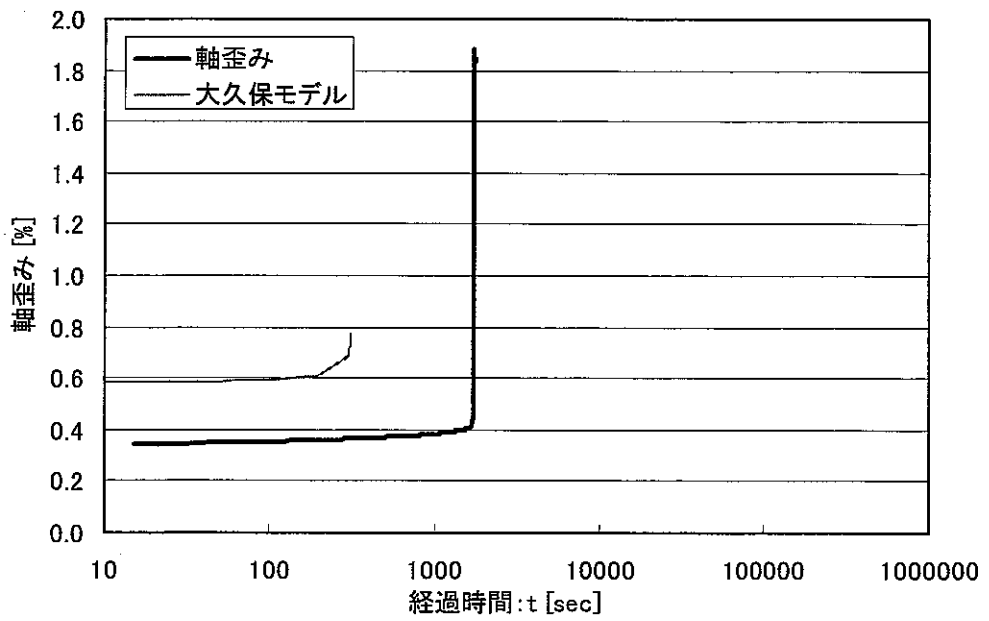


図-2. 11(d) 超短期 経過時間—ひずみ曲線 (クリープ曲線)

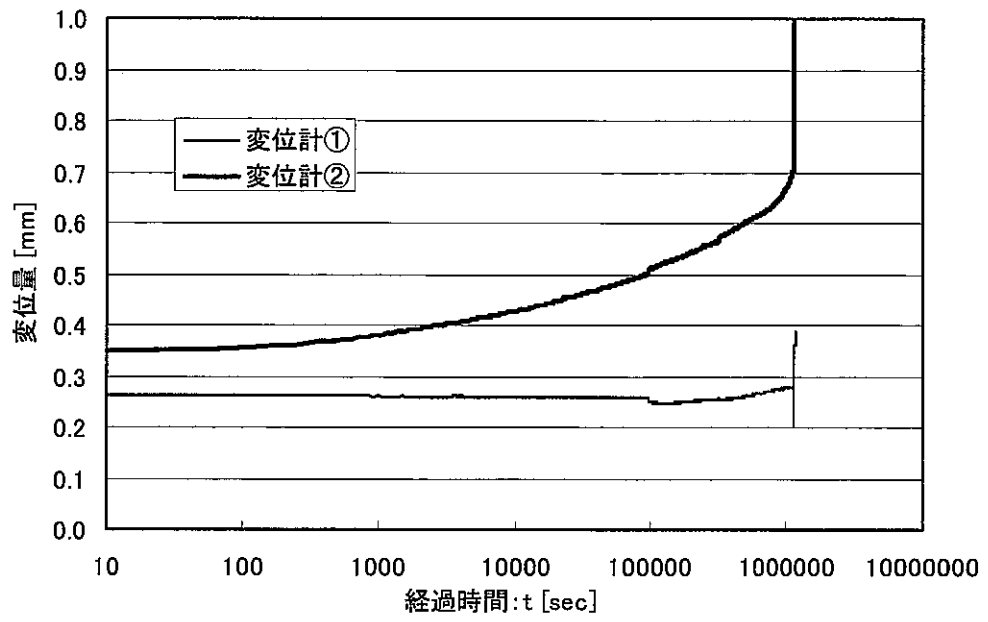


図-2. 1 2(a) 短期 経過時間—変位曲線

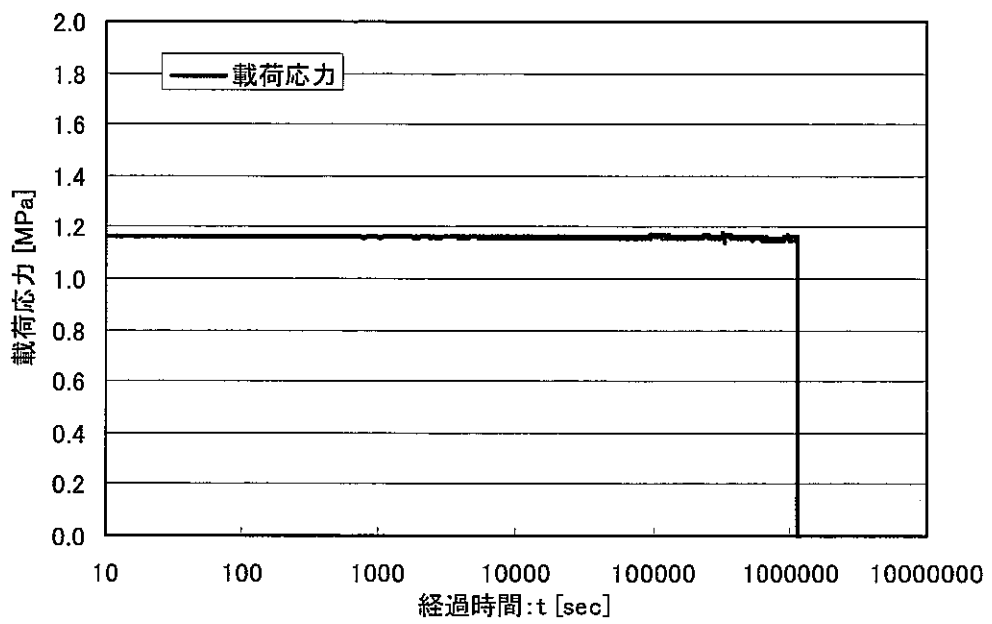


図-2. 1 2(b) 短期 経過時間—荷重曲線

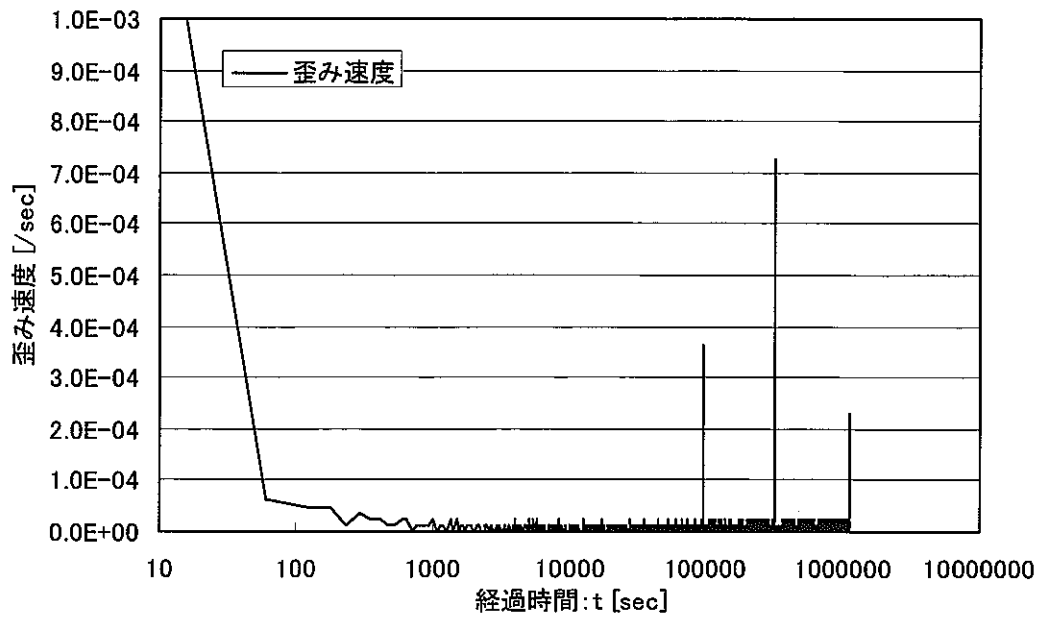


図-2. 12(c) 短期 経過時間—ひずみ速度曲線

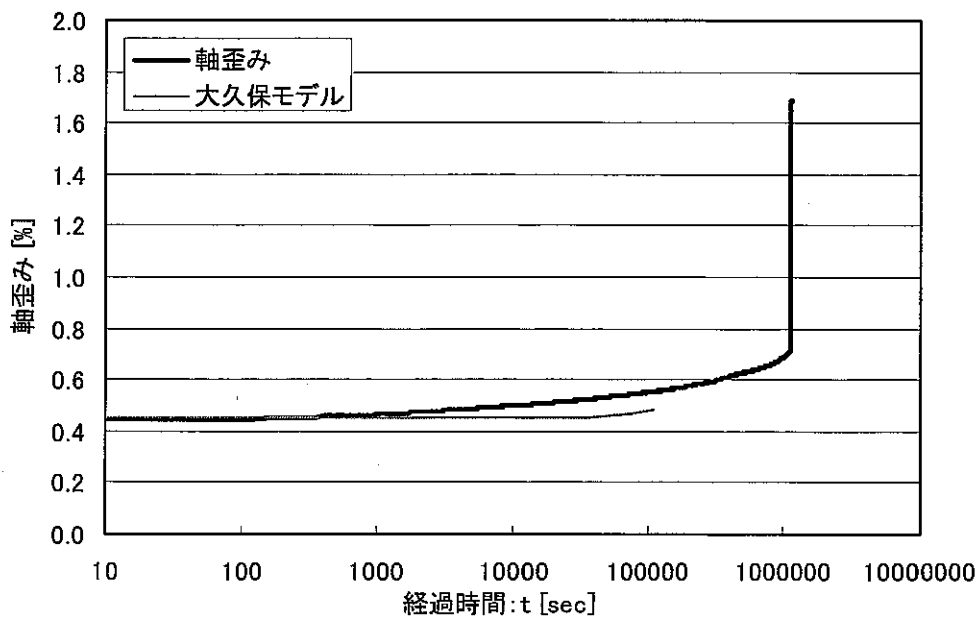


図-2. 12(d) 短期 経過時間—ひずみ曲線 (クリープ曲線)

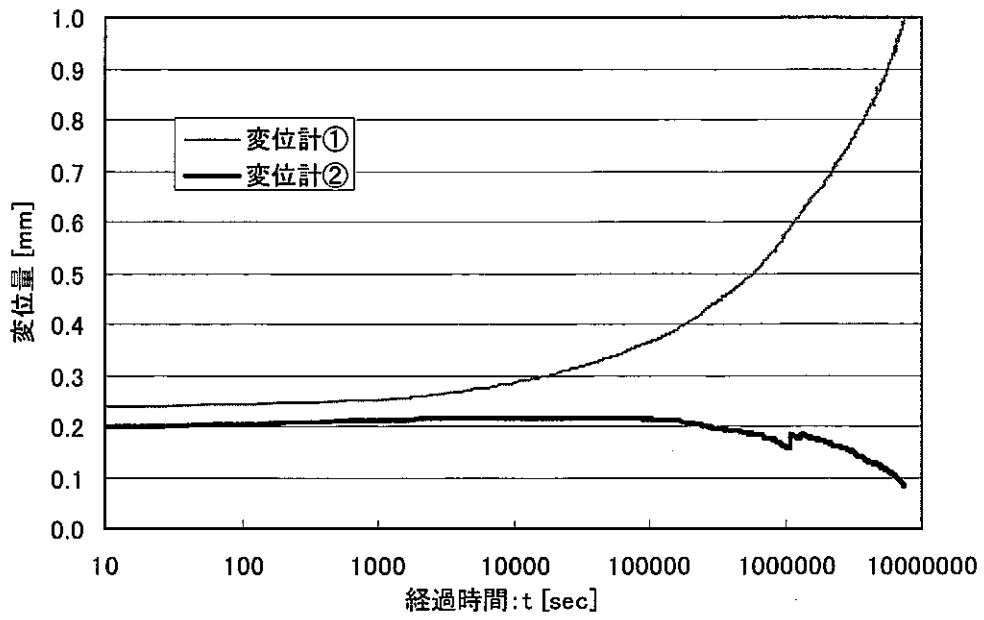


図-2. 13(a) 長期 経過時間—変位曲線

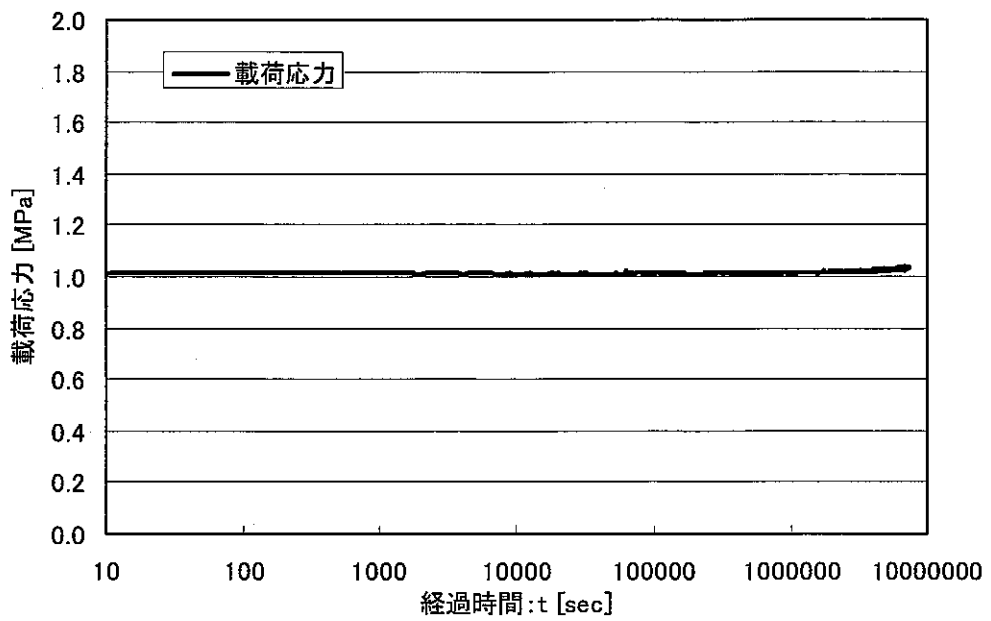


図-2. 13(b) 長期 経過時間—荷重曲線

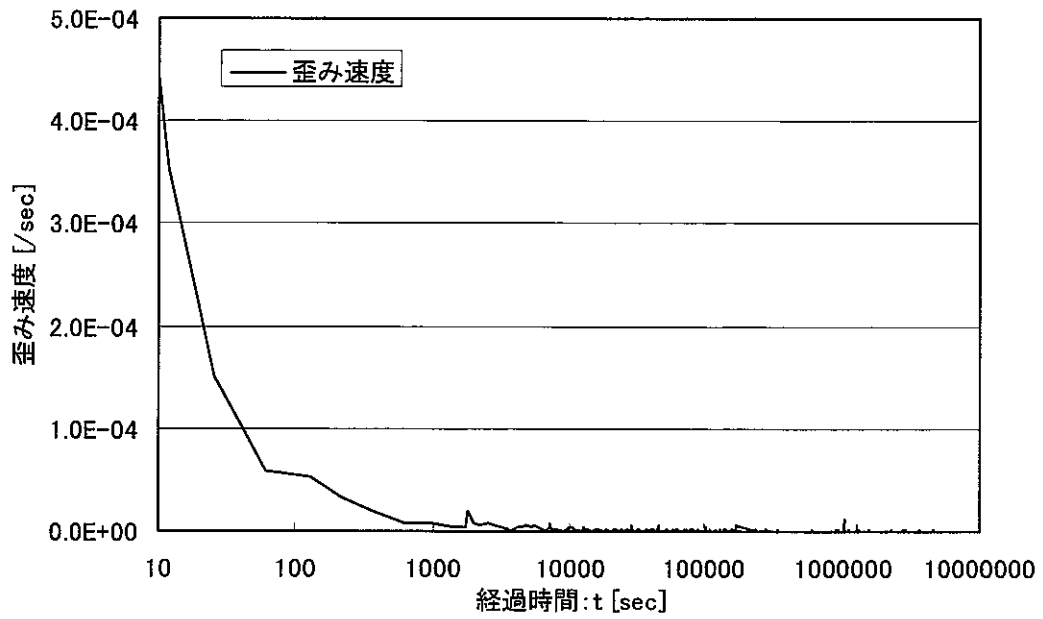


図-2. 13(c) 長期 経過時間—ひずみ速度曲線

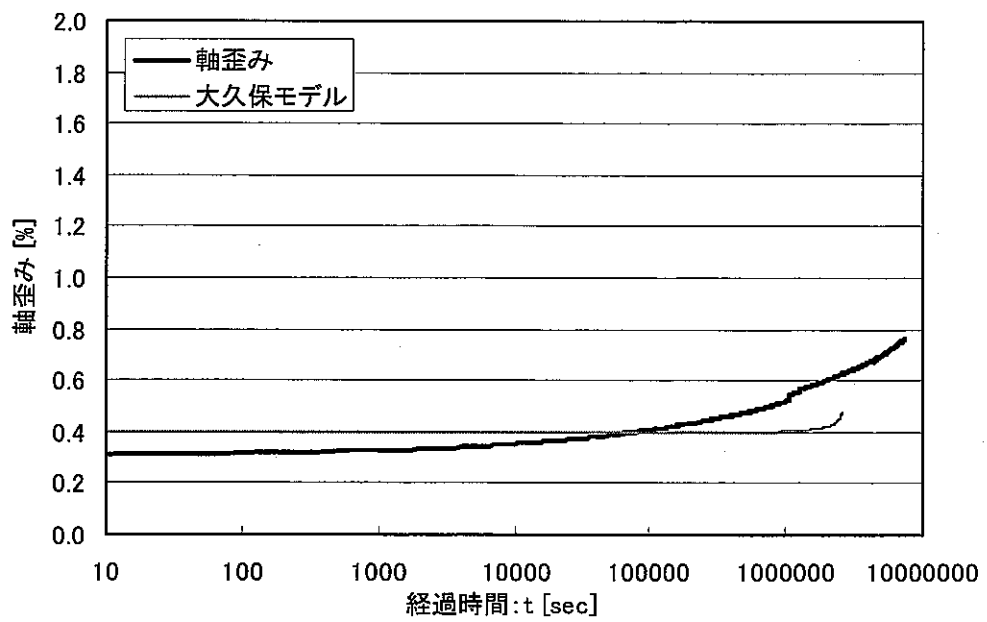


図-2. 13(d) 長期 経過時間—ひずみ曲線 (クリープ曲線)

2. 3 結果の考察・検討

表に、昨年度実施した各供試体の実測破壊到達時間と大久保モデルでの想定破壊到達時間と今回の実験結果をまとめたものを示す。昨年の報告書より「完全飽和 常温」条件の場合、一軸圧縮強度が想定よりも5%小さくなると、想定破壊到達時間と実際の破壊到達時間の比は $(1/0.95)^{23}=0.238$ となる。これは、想定 of 破壊到達時間が3日であったものが、17時間で破壊してしまうことを意味するものである。昨年の結果では、一軸圧縮強度にバラツキがあり大久保モデルと実測値に隔たりがあるが、今回の実験ではバラツキが小さくなっているため隔たりも小さくなっているようである。大久保モデルにおける想定一軸圧縮強度と実際の一軸圧縮強度の僅かな誤差が破壊到達時間に大きく影響しているためと考えられる。

表-2. 9 実測の寿命と大久保モデルでの寿命

| 供試体 No. | | 載荷応力 MPa | 破壊到達時間 | |
|---------|--|-------------|--------|---------|
| | | | 大久保モデル | 実測値 |
| Y-5' | $\lambda_1=0.00387$ $n=23$ $m=23$ $a=1.31 \times 10^{45}$ $\sigma_c=1.605$ | 1.509 | 5.2分 | 28.5分 |
| Y-4' | | 1.161 | 40hr | 324hr |
| Y-1 | | 1.019 | 31日 | 120日未破壊 |

参考 昨年度の完全飽和・常温条件での大久保定数

| 供試体 No. | | 載荷応力 MPa | 破壊到達時間 | |
|---------|---|-------------|---------|-------|
| | | | 大久保モデル | 実測値 |
| C-1 | $\lambda_1=0.00205$ $n=28$ $m=28$ $a=7.721 \times 10^{57}$ $\sigma_c=2.584$ | 2.048 | 11.84時間 | 70.6分 |
| C-2 | | 1.942 | 3.00日 | 2.3分 |
| C-3 | | 1.834 | 9.96日 | 43.9分 |

表-2. 10に一軸圧縮試験結果により大久保定数を算出した表を再掲する。

表-2. 10 一軸圧縮試験結果による大久保定数の算出

| | λ_1 /MPa | n | m | a /(MPa·sec) | σ_c MPa |
|-----|---------------------|----|----|-----------------------|-------------------|
| Y-5 | 0.00357 | 21 | 21 | 7.42×10^{41} | 1.536 |
| Y-6 | 0.00445 | 27 | 27 | 2.88×10^{51} | 1.720 |
| Y-8 | 0.00360 | 22 | 22 | 8.12×10^{43} | 1.559 |
| 平均 | 0.00387 | 23 | 23 | 1.31×10^{45} | 1.605 |

この表より95%信頼区間を計算して大久保定数の上限値および下限値を求めると次の表のようになる。

表-2.11 大久保定数のバラツキ

| | λ_1 /MPa | n | m | a /(MPa·sec) | σ_c MPa |
|------|---------------------|----|----|-----------------------|-------------------|
| 信頼上限 | 0.00450 | 27 | 27 | 1.89×10^{51} | 1.730 |
| 信頼下限 | 0.00325 | 19 | 19 | 2.80×10^{38} | 1.481 |
| 平均 | 0.00387 | 23 | 23 | 1.31×10^{45} | 1.605 |

これらをもとに、破壊到達時間を推定すると以下のようなになる。

表-2.12 破壊到達時間のバラツキ

| 載荷応力 MPa | 破壊到達時間 | |
|-------------|----------------|---------|
| | 大久保モデル | 実測値 |
| 1.509 | 1分~53分 | 28.5分 |
| 1.161 | 2.0時間~1049.5時間 | 324時間 |
| 1.019 | 1日~1480.9日 | 120日未破壊 |

図-2.14~図-2.16に95%信頼限界を用いて破壊到達時間を推定したグラフを示す。図中網掛けの部分が95%信頼上限値、95%信頼下限値を用いて推定された範囲である。

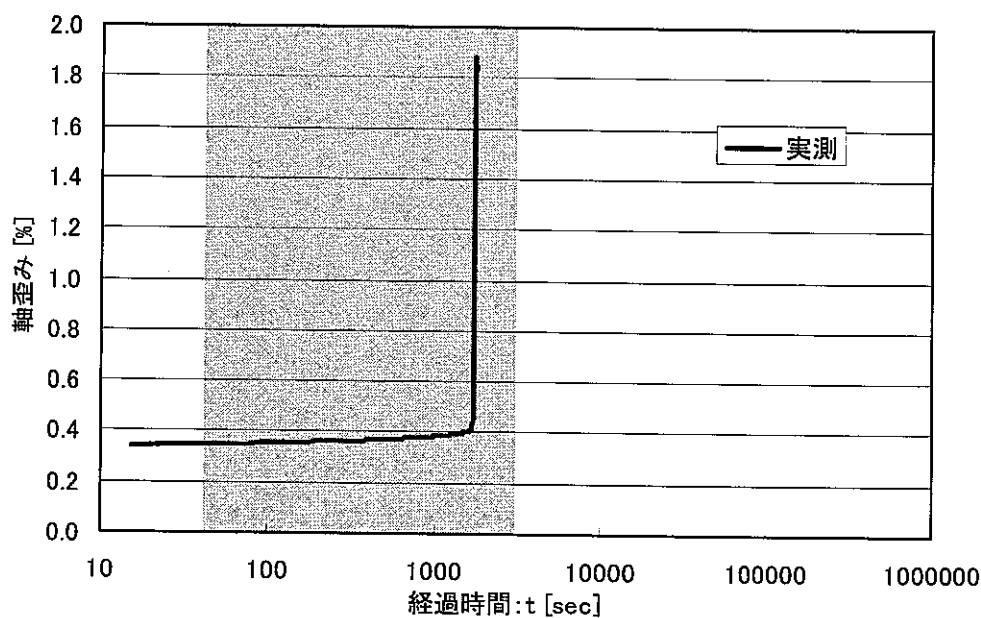


図-2.14 超短期 破壊到達時間推定

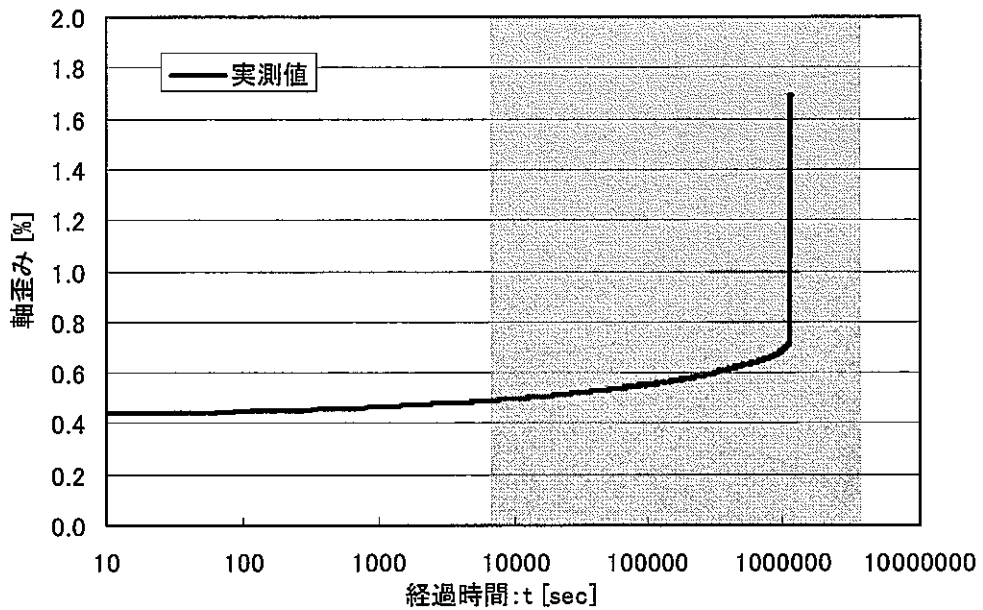


図-2. 15 短期 破壊到達時間推定

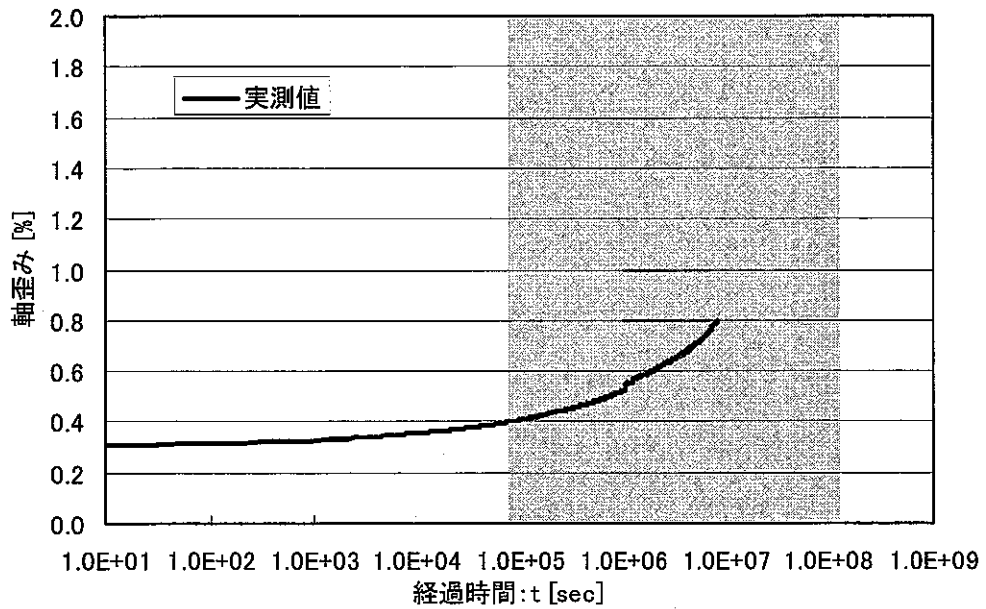


図-2. 16 長期 破壊到達時間推定

95%信頼限界を用いて推定を行うと、実測値は推定破壊到達時間内で破壊がみられ、破壊到達時間のバラツキには約3オーダーのバラツキがみられる。

今後の課題

昨年度の結果より、水理・温度条件が変わることにより強度・変形特性が変化することが明らかになっている。今後、種々の岩石において水理・温度条件変化による強度・変形特性を把握する必要がある。また、これまでの研究成果⁴⁾よりクリープ応力下にて岩石の透水性が経時変化することが示唆されている。地層処分システムを考えるにあたり、安全評価の観点から、ニアフィールド岩盤の透水性を把握することは重要である。よって今後、クリープ応力下における透水性についてデータを取得する必要がある。

さらに、大久保モデルを用いて長期安定性を評価する際、地山が持つばらつきが推定精度に大きく影響することが改めて確認された。このことから地山物性のばらつきを考慮して破壊到達時間の範囲を想定していくことが、今後の処分場建設における長期安定性を評価していく上では重要であると考えられる。

また、超音波速度試験などの非破壊試験により強度を推定し、実測値との比較を行うなどの試験を追加していき、長期安定性に関する推定精度を向上させていくことが必要である。

This is a blank page.

3. 軟岩試料を用いた模型試験

ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を評価するに際し、基本物性の把握、過去類似事項の集積、解析コードの整備等の色々な技術を保有しておく必要がある。模型実験もその中の重要な技術であり、解析では表現できない条件下での岩盤挙動把握や長期的な安定性の把握などの重要な情報を得ることができる。本試験では、空洞の挙動、空洞掘削時の岩盤内部の応力挙動およびクリープ状態での岩盤内部応力状態の把握等、実現象の解明のための基礎データ取得を目的とする。

3. 1 試験の手順

模型実験の手順を図-3. 1にフロー図で示す。

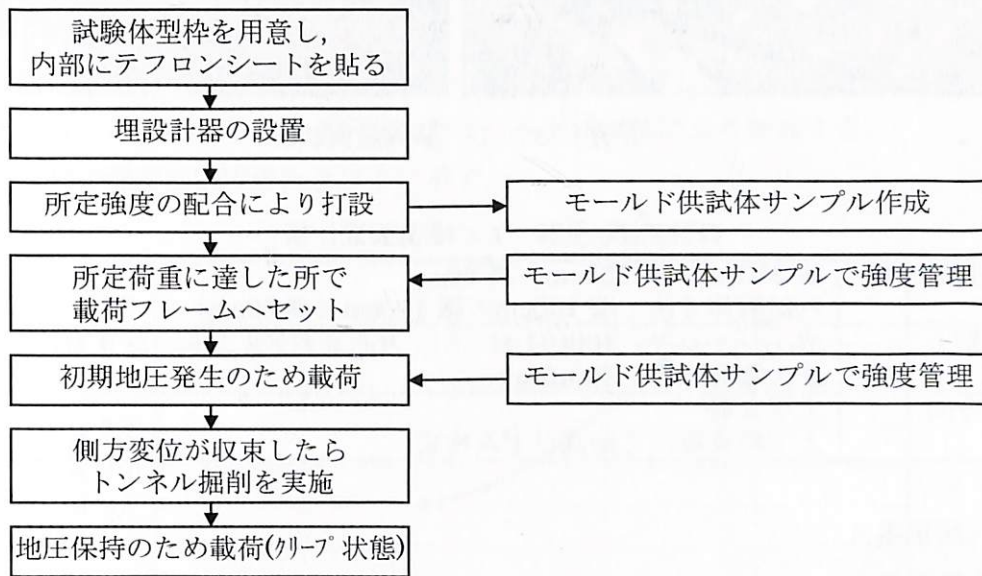


図-3. 1 模型実験フロー図

3. 2 試験装置

(1) 装置概要

今回用いた試験装置は、上下拘束板で鉛直方向変位を拘束し、水平方向から2軸荷重を実施することにより擬似的な三軸状態を再現できる試験装置である。

以下に試験装置の概要図を示す。

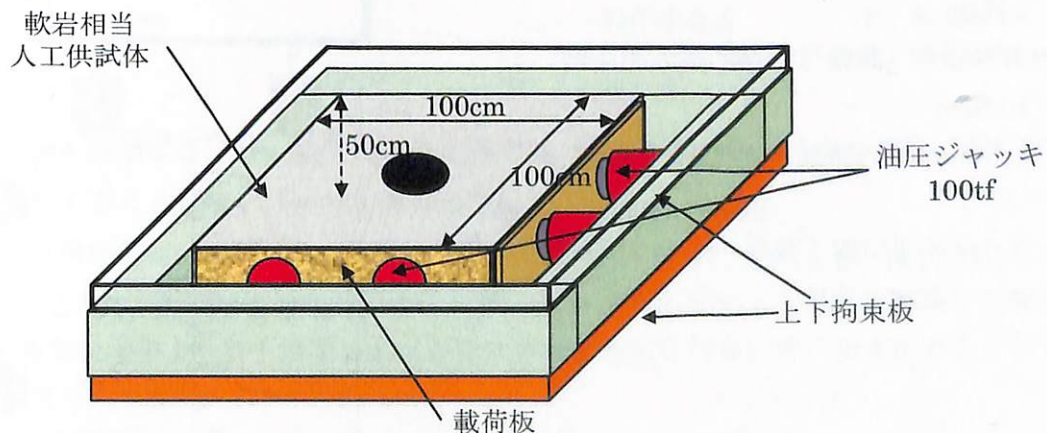


図-3. 2 模型実験概念図



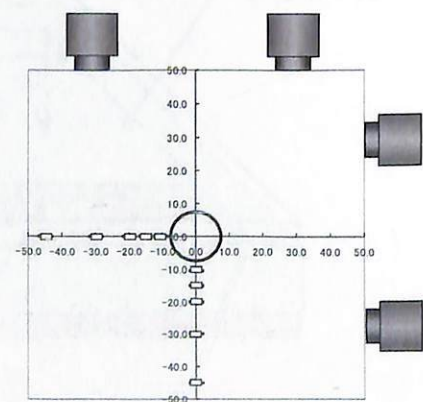
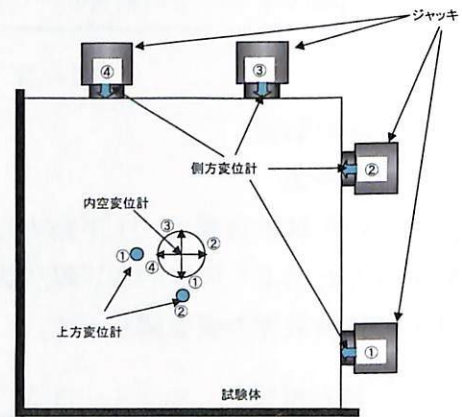
写真-3.1 装置設置状況

表-3.1 模型装置仕様

| | |
|--------|--|
| 試験装置寸法 | 縦 250cm×横 250cm×高 80cm (試験体寸法：縦 100cm×横 100cm×高 50cm) |
| 载荷能力 | 油圧ジャッキ 100tf/1台 (1方向2台×2方向：計4台) 最大载荷応力 400tf/m ² |
| 加力方向 | 水平2軸 上下拘束板にて鉛直ひずみ拘束 |

(2) 測定項目

- ・側方変位量
 载荷面1面4箇所 計8箇所
- ・鉛直方向変位量
 上部拘束板を変位計で測定 2箇所
- ・载荷荷重
 油圧ジャッキのポンプ圧 1箇所
- ・トンネル掘削後内空変位量
 2箇所
- ・地山内応力 (試験体内埋め込み土圧計)
 10箇所
 中心からの距離：10.5cm, 15cm,
 20cm, 30cm, 45cm
 応力方向： σ_r および σ_θ



3. 3 試験条件

(1) 使用試験体

使用する岩体は、坑道掘削時の坑道周辺の地山内部応力を測定するために地山内に地圧計を設置できる人工岩体を使用する。

事前に配合試験を実施し、目標強度でのシルト、粘土およびセメントの配合を決定した。試験体の一軸圧縮強度はサンプリング供試体により把握した。以下にサンプリング供試体の一軸圧縮強度の経時変化を示す。

試験体寸法は 100cm×100cm×50cm の直方体の試験体を使用した。

(2) 試験体強度

目標強度を 0.50MPa として、粘土・シルト・セメントを混合して人工試験体を作成した。試験体の強度は、打設時にサンプリングしたモールド供試体により把握する。モールド供試体の強度の経時変化を以下に示す。

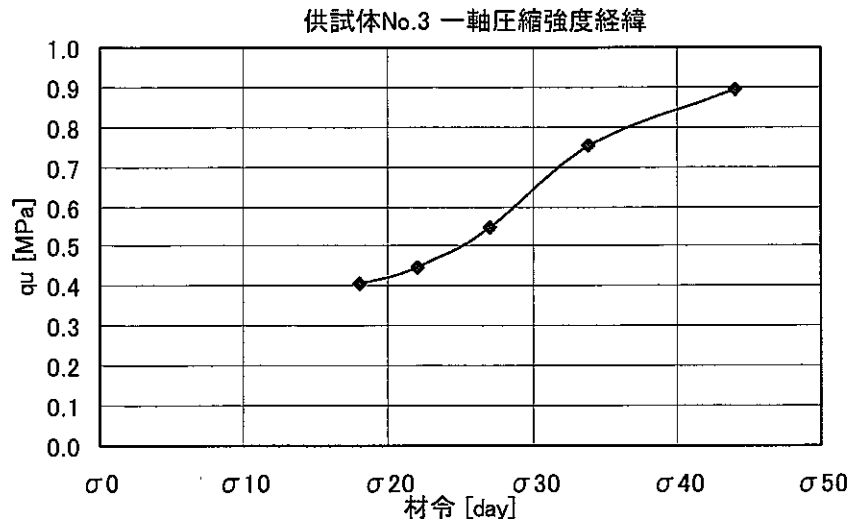


図-3.4 試験体強度経時変化

(3) 載荷荷重 (初期地圧条件)

初期地圧条件は地山強度比により規定する。今回の実験では地山強度比 1.0 を目標に載荷を行った。

$$\text{地山強度比 } G_n = \frac{\sigma_u}{\gamma \cdot H} \quad \frac{P}{A} = \gamma \cdot H$$

σ_u : 一軸圧縮強度 P : 載荷荷重
 γ : 単位体積重量 A : 載荷面積
H : 土被り厚

【仮に一軸圧縮強度 5.0MPa 程度の軟岩地層では、地山強度比 $G_n=1.0$ の場合、地下 200m 付近を模擬することとなる ($\gamma=25.0\text{kN/m}^3$)】

今回の試験体では、 $qu_{22}=0.45\text{MPa}$ の時点で載荷フレームへ設置し載荷を開始した。載荷応力は、一軸圧縮強度 ($qu=0.45\text{MPa}$) 程度となるようにジャッキ荷重を調整して載荷した。約 1 週間後途中より若干強度が上がったため再度載荷を行ない地山強度比 0.7 となるよう載荷荷重を 0.70MPa まで与えた。

(4) トンネル径の設定

トンネル径は塑性領域をなるべく大きく取ることを考慮し、Kastner の式⁵⁾を基に 15cm と設定した。(処分研究施設の $\phi 5.0\text{m}$ を考えると 1/33 モデルになる)

Kastner の式より、トンネル周辺の応力分布は以下のように推定できる (内部摩擦角 30° の場合)。

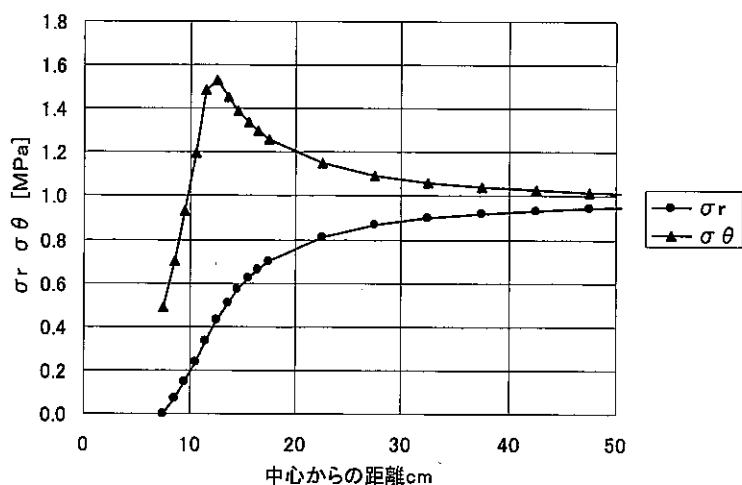


図-3.5 Kastner の式による内部応力分布図

上記グラフより、トンネル中心から約 12 cm の位置に弾塑性境界が表れると思われる。

3.4 模型実験の結果

図-3.6～図-3.8に載荷荷重の経時変化、側方変位の経時変化、内空変位の経時変化を示す。

トンネル掘削前の初期地山応力状態は、地山強度比で 1.0 程度となるようにサンプル供試体の圧縮試験より一軸圧縮強度を求め、載荷荷重を調整した。載荷中の側板変位【図-3.7】をみると初期載荷時に変位量にずれが生じており、4本のジャッキを同時に等量動かすには工夫を施す必要がある。また、載荷応力を保持した期間では、側方変位量にほとんど変化はみられなかった。

トンネル掘削後の内空変位量【図-3.8】は、掘削後 5 日程度までトンネル径が小さくなる傾向があり、その後安定状態になる。今回はトンネル掘削の影響による内部応力変化を見るため、載荷直後にトンネル掘削を実施した。

内空変位が安定した後、内空変位測定を終了し、トンネル掘削後の支保構築を模擬して内圧発生装置を取り付けた。トンネル掘削中から直後の内部応力の変化を図-3.9に半径方向応力 (σ_r) と円周方向応力 (σ_θ) を別々に示す。また内圧を負荷した際の内部応力変化を σ_r 、 σ_θ 別に図-3.10に示す。

内部応力の変化は掘削開始時および内空圧力負荷開始時を“0”とした変化量を示す。

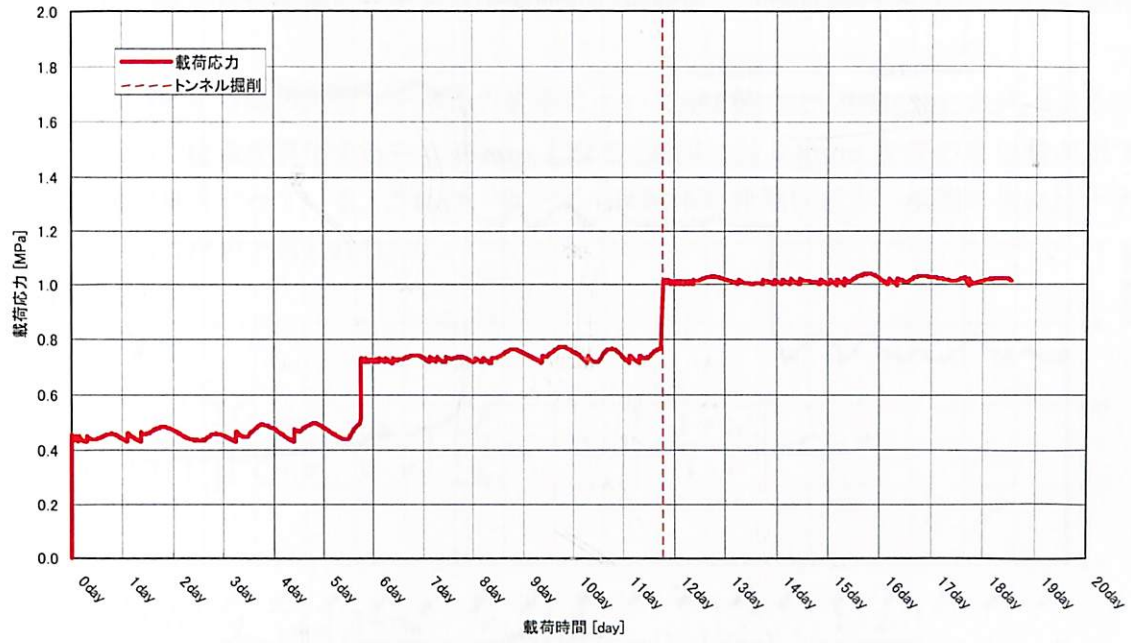


図-3.6 載荷応力経時変化図

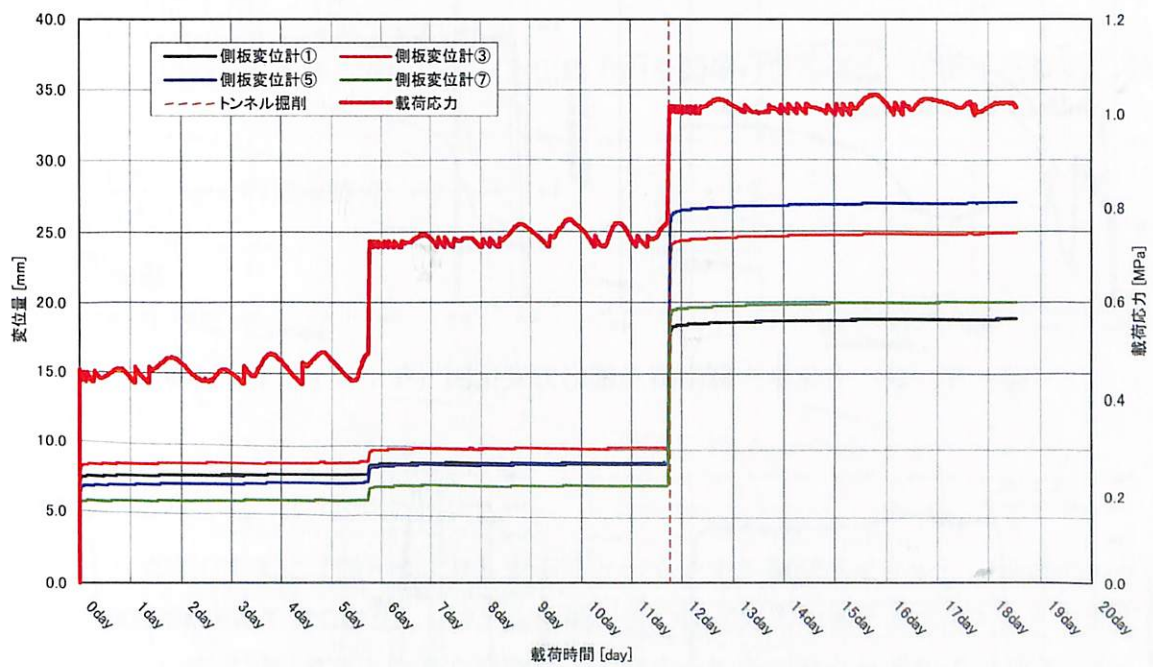


図-3.7 側方変位量経時変化図

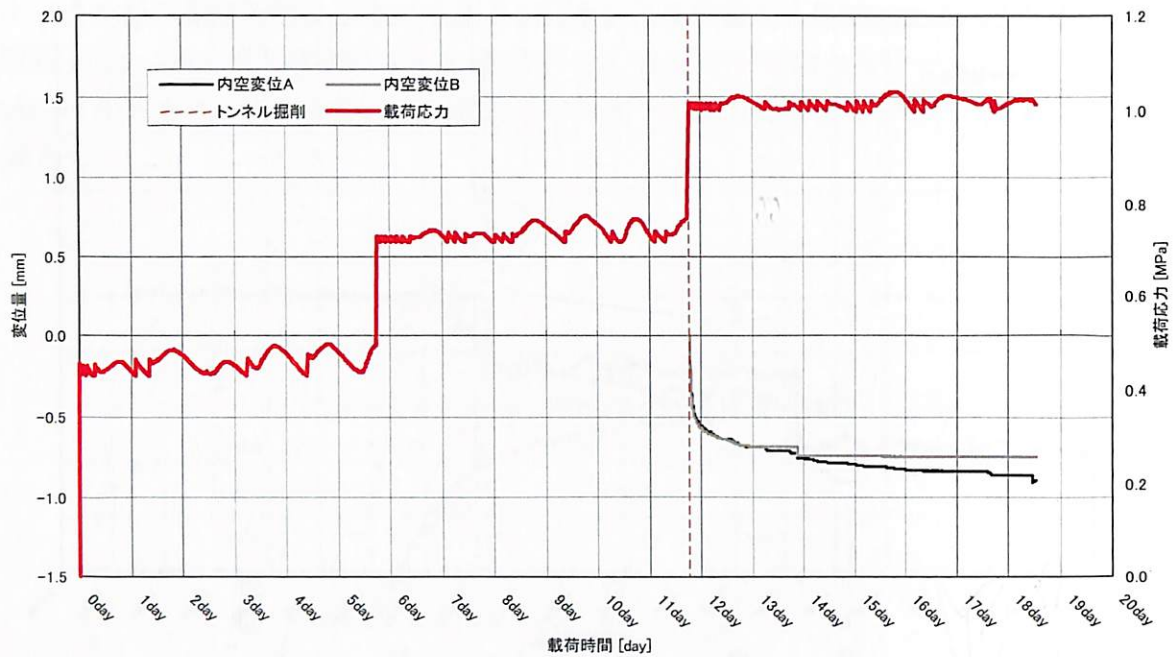


図-3.8 内空変位量経時変化図

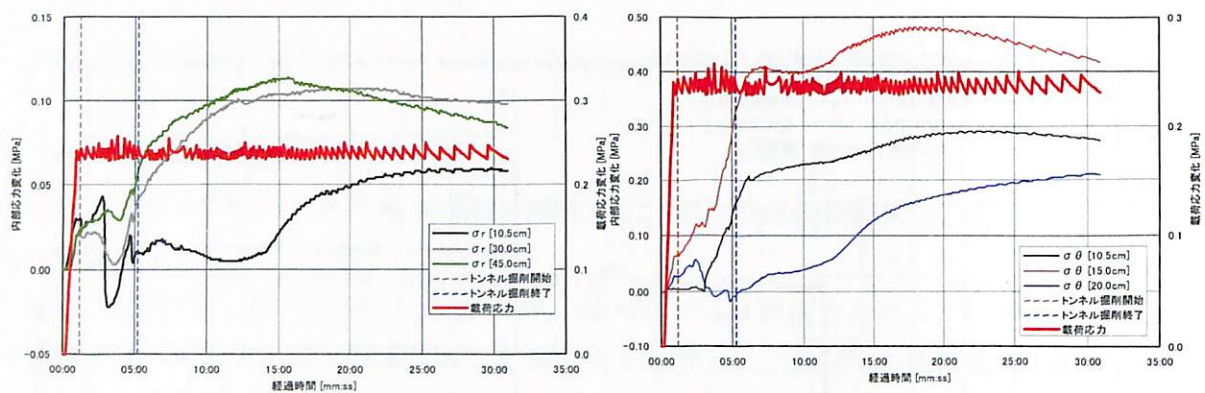


図-3.9 トンネル掘削時内部応力変化図 (左: σ_r , 右: σ_θ)

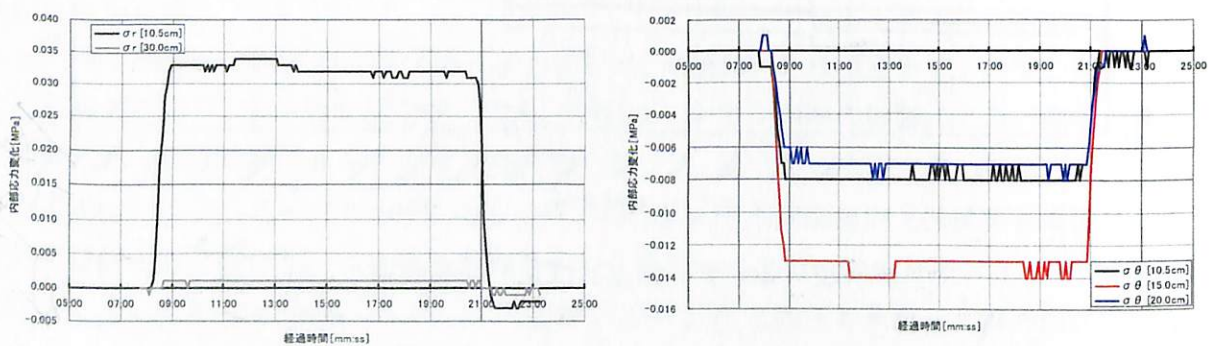


図-3.10 内圧負荷時内部応力変化図 (左: σ_r , 右: σ_θ)

3. 5 結果の考察・検討

試験体のサンプル供試体よりトンネル掘削前の試験体の弾性係数は約 287.3MPa と推定される。

塑性領域が生ずる際の円形トンネルの変形について解かれている Egger の式⁵⁾より、トンネル壁面の変位量を算出すると 0.43mm となる。実際には 0.8mm 程度の変位量が出ており大きな変位量となっている。これは、サンプル供試体の弾性係数が、模型岩体に比べ大きな可能性があるためと思われる。

Egger の式

$\phi > 0$ の場合

$$u_a = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{q_u}{\zeta-1} a \left[\left(\frac{1+\alpha\zeta}{\zeta+\alpha} - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \cdot \left\{ \frac{P_i}{q_u} (\zeta-1) + 1 \right\} - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right] + C_o a^{-\alpha}$$

ただし

$$C_o = u_c C^\alpha - \frac{1-\nu^2}{E} \frac{q_u}{\zeta-1} C^{\alpha+1} \left[\left(\frac{1+\alpha\zeta}{\zeta+\alpha} - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \cdot \left\{ \frac{P_i}{q_u} (\zeta-1) + 1 \right\} \left(\frac{C}{a} \right)^{\zeta-1} - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right]$$

$$C = a \left\{ \frac{2}{\zeta+1} \frac{q_u + P(\zeta-1)}{q_u + P_i(\zeta-1)} \right\}^{\frac{1}{\zeta-1}}$$

α : 塑性領域における半径方向のひずみと円周方向を関係付ける係数。体積変化が生じない場合 $\alpha = 1$

$$\zeta = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \phi : \text{内部摩擦角}$$

E : 弾性係数

q_u : 一軸圧縮強度

ν : ボアソン比

P_i : 内圧

P : 外圧

また、内部応力の変化【図-3.9】をみると、トンネル掘削（ビット）の通過により r 方向の内部応力が低下しており、トンネル壁面に近いほど応力の低下が大きい。θ 方向では 20cm 位置での圧力計以外はトンネル通過による応力の低下がみられず応力は増加した。これはトンネルの掘削によりトンネル壁面が内空方向へ変位したため r 方向の応力が低下し、逆に円周方向はリングが縮む方向になり圧縮されたものと思われる。その後トンネルは自立したので r 方向の応力も周りからの力を受け上昇したと思われる。また、Kastner のグラフ【図-3.11】にみられるように σ_r よりも σ_θ の方が大きくなるという現象がみられた。

図-3. 1 1 より、 σ_{θ} の 10.5cm 地点に比べ 15cm 地点の応力が大きく、20cm 地点より 15cm 地点の方が大きな値を示しているのが分かる。この現象は本実験でも同様な傾向を示している。このことより Kastner の式から導かれる弾塑性境界がトンネル中心から 12.5cm 程度にある可能性が高いと考えられる。

次にトンネル内空より風船を膨らませ内圧(0.25MPa)を負荷した。これはトンネル掘削後の支保を模擬している。この際の内部応力の変化をみると図-3. 1 0 より r 方向の応力増分は、トンネル内空に一番近いものが大きく反応し、30cm 離れるとほとんど反応しなかった。 θ 方向の応力増分はマイナス方向に反応している。これは図-3. 1 1 に示すような Kastner のグラフをみると内圧をかけた場合 (グラフでは白抜き表示)、中心から 12cm 以遠の弾性領域では θ 方向の応力は減少する傾向にあり、r 方向の応力は増加する傾向を示し、その現象を示しているものと考えられる。また Kastner のグラフで σ_{θ} の 15cm と 20cm を比較した場合トンネルに近い方が応力の減少量が大きく今回の実験でも同様な傾向を示した。

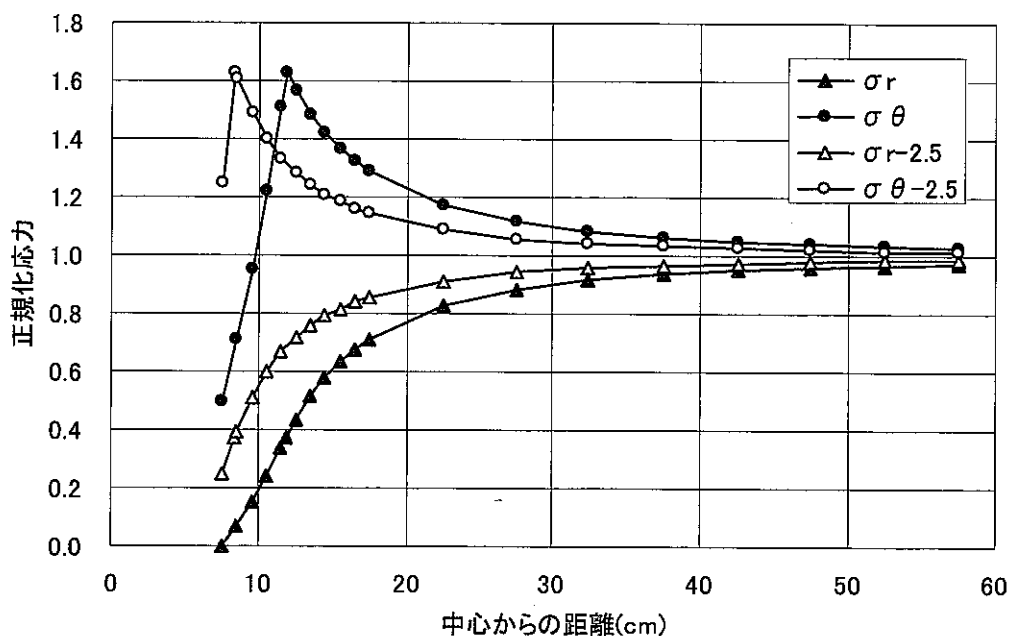


図-3. 1 1 内圧を負荷した場合と無負荷の場合の内部応力の違い (Kastner の式より)

同程度の圧縮強度の試験体で同じような載荷条件で最終的に載荷応力を約 1.38MPa までかけ、トンネルの変形が顕著に出るまで実験を行ったものについて、試験体を解体してエコーチップ (PROCEQ 社製) および針貫入試験を実施した。結果を次表に示す。エコーチップは硬さ試験機で、テストチップで供試体の表面を打撃し同時に反発する。その際に発生させる電気信号を読みとることにより硬さ L 値として表示する機械である⁶⁾。

エコーチップの測定結果を図示する。

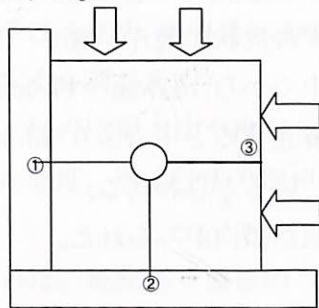


図-3. 12 エコーチップおよび針貫入試験側線

表-3. 2 エコーチップ測定結果

| 中心からの距離 | 結果 (L 値) | | 平均 |
|---------|----------|-----|-------|
| | ① | ② | |
| 12.5 | 259 | 260 | 259.5 |
| 17.5 | 261 | 269 | 265.0 |
| 22.5 | 252 | 320 | 286.0 |
| 27.5 | 293 | 297 | 295.0 |
| 32.5 | 242 | 280 | 261.0 |
| 37.5 | 295 | 310 | 302.5 |
| 42.5 | 311 | 302 | 306.5 |
| 47.5 | 290 | 238 | 264.0 |

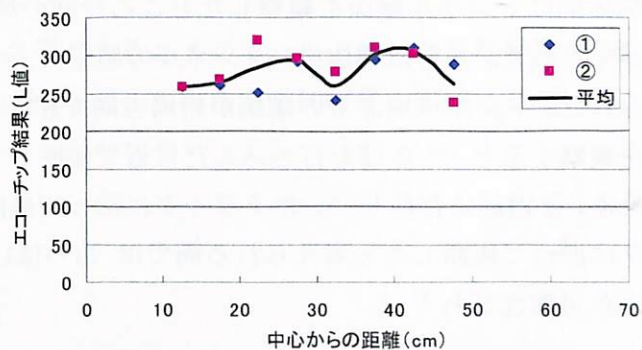


図-3. 13 エコーチップ測定結果

表-3. 3 針貫入試験測定結果

| 中心からの距離 | 一軸圧縮強度換算側線③ [MPa] |
|---------|-------------------|
| 10.5 | 0.181 |
| 15.5 | 0.187 |
| 20.5 | 0.188 |
| 25.5 | 0.190 |
| 30.0 | 0.181 |
| 35.0 | 0.180 |
| 40.0 | 0.182 |
| 45.0 | 0.181 |

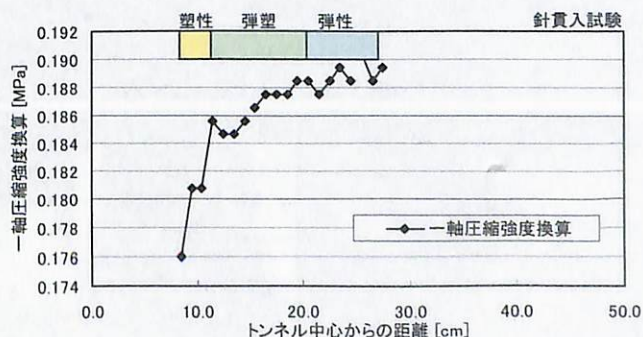


図-3. 14 針貫入試験結果

(測定位置は図-3. 12 ③測線の底板から高さ 20cm 程度の位置)

図-3. 13より結果を相対的に比較するとトンネル周辺(～17.5cm)ではL値は小さく、それより遠くなるとL値が大きくなる。32.5cm付近にL値の小さい部分があるが、これは亀裂の直上など局所的に起きている可能性が高いと考えられる。また荷重フレーム近傍の供試体部分では、L値が小さくなっている。L値の小さい場所を硬さの柔い場所、すなわち強度の小さい場所として判断すると、トンネル周辺17.5cm付近まで強度の低い部分(塑性・弾塑性領域)があり、その外側に強度の高い部分(弾性領域)が存在していると考えられる。最外側で強度が低下しているのは試験装置との接触面で破壊が生じているからと推定される。解体状況を観察してもタマネギの皮状に破片が残り、その幅を測定すると約5.0cmであった。このことより塑性領域は中心から12.5cm～17.5cmの間にあると推察される。

Kastnerの式により塑性範囲を算定すると中心より13.42cmの位置に塑性境界が表れると想定され、ほぼ近い結果となっていると思われる。

針貫入試験の結果についても、似た傾向がみられた。

参考までに、この実験に先駆けて実施した珪藻泥岩(40cm×40cm×20cm)での実験を示す。この実験では試験終了後、珪藻泥岩供試体にくさびを打ち込むことにより解体した。

解体前にトンネル壁面を観察したところ今回の試験と同様なめくれ上がるような破壊状況がみられた。さらに解体後、トンネルの周辺に、タマネギの皮状に破片が残っているのが見られた。トンネル周辺での破壊が円周方向で起きていることを示唆している。また、破断面を観察すると、くさびを打ち込んだ付近で破断している面(引っ張りによる破断面と考えられる)と内部に存在していたクラックに沿って破断したと思われる面を比較すると、クラックに沿って破断したと考えられる面では、白っぽい破断面が見られせん断的な破壊が生じていた可能性がある。



参考写真 珪藻泥岩を用いたトンネル掘削実験

模型実験の課題として以下のような改善を行っていく必要がある。

- ・ 加圧脱水による含水比低下の防止
⇒ 試験体全体をビニールシートで覆い、そのまま載荷装置で載荷する。
- ・ 側方変位量を合わせるように載荷時に調整を行う。
- ・ 内部応力測定結果をみると、内部応力の測定結果には傾向がみられず、測定自体がうまくいっていない可能性がある。内部に埋設したため反力がとれずに応力が上がらないのか、また土圧計が両側から圧力を受けるため、本来受圧面でない面が変形している可能性もあり、今後測定方法を再度検討する必要がある。
- ・ 非破壊検査方法による強度、透水性の把握方法を検討し、初期地山条件からトンネル掘削、クリープ状態における地山内の強度、透水性を把握する。

さらに第2次取りまとめ⁷⁾によれば、廃棄体定置後のニアフィールド岩盤は80℃程度になることが予想される。

これまでの研究成果⁸⁾より、岩石のクリープ特性は温度の影響を顕著に受けることが示唆されている。

よって、今後、実現象に忠実な評価が必要であるニアフィールド岩盤の長期挙動評価に資するため、熱源を設置した模型実験等を通じ、起こり得る力学的現象を明確にしていく必要がある。

This is a blank page.

4. 深地層研究所における試験法検討

深地層研究所における岩盤の長期力学的変形挙動を把握するための試験について検討した。岩石試験では、ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験でクリープモデルとして用いる大久保モデルの定数を算出し、実際のクリープ試験でその精度を確認した。その結果、大久保モデルで算出したクリープ破壊時間と実際の試験での破壊時間には差違があった。

軟岩試料を用いた模型試験では、クリープ時の変形や破壊時の地山状況が得られた。

これらの結果を参考にし、かつ過去の検討結果を基に深地層研究所における試験法について検討した。なお、ここに示したのは長期的な挙動の把握を目的としたものだけである。

4. 1 試験項目

試験する条件は、基本的には図-4. 1に示すようなニアフィールド岩盤が処分過程で被る色々な環境変化を出来る限り再現した状態で行う必要があり、以下に示す試験はこれを念頭に置いて設定した。また、試験は深地層研究所から採取した岩石コアによる岩石試験、ボーリング孔を利用した試験、及び原位置試験である。

4. 1. 1 岩石コア試験

岩石コアによる長期挙動把握試験は、他の試験と同様に模型実験や原位置試験を行い、その結果を評価するために基本となるものである。また、各種提案されているクリープモデル¹⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾の検証に利用できる結果が得られることが望ましい。さらに、処分施設の安全性を評価するためには、岩石の透水性の変化も把握しておく必要がある。

試験としては、クリープ試験（一軸、三軸状態）及び透水試験である。

また、載荷時間は、モデル検証のためと超長期にわたる挙動把握のための2ケースを考える必要があり、それに応じて載荷荷重を設定しなければならない。

表-4. 1には、岩石コア試験項目及び試験条件を示す。それぞれの条件での試験数量は3～5供試体とする。供試体は、深地層研究所原位置でボーリングにより採取し、研究所内で試験に供するものとする。

表-4. 1 岩石試験項目

| 試験項目 | | 試験ケース | | |
|---------------|------|--------|--------|--------|
| クリープ試験 | | | | |
| 荷重条件 | | 一軸 | 三軸 | |
| 環境条件 | 含水状態 | 完全飽和 | 乾湿繰り返し | |
| | 熱状態 | 常温 | 80℃ | |
| 載荷時間（短期） | | 1ヶ月 | 半年 | 1年 |
| 載荷時間（長期） | | 1年 | 3年 | 10年 |
| 透水試験 | | | | |
| 試験時期（長期載荷に対し） | | 30%経過時 | 60%経過時 | 80%経過時 |
| 環境条件 | 含水状態 | 完全飽和 | 乾湿繰り返し | |
| | 熱状態 | 常温 | 80℃ | |

地層処分での処分過程と岩盤の状態

| 処分過程 岩盤状態 | 初期 | 建設時 | 操業期間 | 閉鎖時 | 腐食膨張開始 | 腐食膨張終了 | 数万年後 |
|----------------------|----|--------------------|---------------------|-------------------------------------|--------|---------|-----------------|
| 荷重状態の 時間依存性 | | ← クリープ → | | | | | クリープ 地殻応力の変化 |
| 荷重状態の施 工による変化 | | 掘削による応力解放・変位 | | 膨潤圧発生 | | | |
| 含水状態 | 飽和 | 掘削、支保工により 含水比低下 | | 地下水の浸潤による含水状態の回復 | | | |
| 温度状態 (地温勾配・地域差あり) | 初期 | 温度変化の 可能性あり | 安定 | 高温に上昇 | | 緩やかに安定化 | |
| 岩の強さ (物性) | | 応力再配分 による低下 | クリープによる 変位の進行 | クリープによる外圧と 膨潤圧による内圧で 強度回復の可能性 | | | |
| 岩の透水性 (物性) | | 強度低下による 透水性の低下 | クリープ進行に よる透水性の変化 | 強度回復すれば透水性の回復 | | | |

図-4. 1 地層処分過程で周辺岩盤が被る環境変化

岩石コアでのクリープ試験で得られた各種条件下における時間—変位曲線結果を以下に示すようなクリープモデル¹⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾に適用し、各クリープ段階（1次クリープ、2次クリープ、クリープ破壊）との適合性の判定や解析コードへの発展性等の検討を行う。

・大久保の構成式¹⁾：

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m\sigma^n$$

ただし、 λ ($= \varepsilon / \sigma$) : コンプライアンス

σ : 載荷応力

ε : ひずみ

t : 時間

a, m, n : 大久保モデルの定数

・佐野の構成式⁹⁾：

岩石の破壊はクラックの生成と拡大および集積によるとする。

時間に依存する岩石の劣化作用を応力腐食の概念で表現。

$$C = f(\varepsilon) K \sigma^n$$

$$\sigma^n (n+1) = t * \sigma_{max}^n$$

ここで C : クラック進展速度

K : 応力拡大係数

$f(\varepsilon)$: 環境条件の関数

$t *$: 一定ひずみ速度下での破壊時間

σ_{max} : 一軸圧縮強度

・堀井の構成式¹⁰⁾：

硬岩におけるクリープ現象を

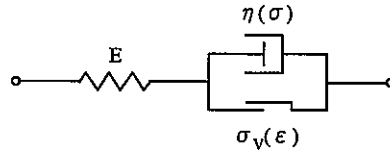
・マイクロクラックは主応力方向と平行に引張りクラックにより発生する。

・マイクロクラックの進展は応力腐食割れに起因しその進展速度は応力拡大係数の n 乗に比例する。

$$\frac{dl}{dt} = V_0 \left(\frac{K_I}{K_0} \right)^n$$

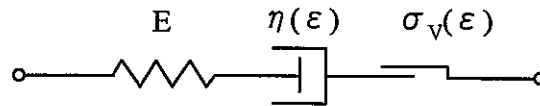
- 山富モデル¹¹⁾ :

バネ要素, 粘性要素, 拡張スライダを用いた粘弾性モデルでスライダは歪硬化と歪軟化を共に考慮した要素。増分形の構成方程式を導き, FEMを開発。



- Dragon モデル¹¹⁾ :

弾性ひずみと非弾性ひずみ（時間に依存しないひずみと時間依存ひずみ）を用いたモデルクリープでは, 微小クラックが時間の経過と共に徐々に延び, その進展速度は応力と降伏応力の差に比例する。



- 赤木モデル¹²⁾ : 最小ひずみ速度と破壊時間の両対数グラフ上での相関を利用。

$$\left(\frac{t_f}{t}\right)^P - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon}\right)^n = 1$$

4. 1. 2 ボーリング孔を利用した試験

ボーリング孔を利用した試験は、原位置での力学条件や水理条件下で行えるため、長期挙動特性を把握するには非常に有効な試験である。長期岩盤挙動を把握するための試験としては、表—4. 2に示すような孔内の長期クリープ試験、及び長期間にわたり同一範囲を測定する孔内弾性波検層と透水試験或いは孔間弾性波探査やパルステストを行う。しかしながら、現状の孔内用の各種測定器は短期間で、且つ浅い深度を対象に開発されたものが多く、深地層で適用するには耐圧性及び耐水性を改良しなければならない。上記の改良が行われる前提で、試験概要を示す。

表—4. 2 ボーリング孔を利用した長期挙動把握試験

| 試験項目 | | 試験装置 | 測定頻度 | 目的 |
|------------|---------|-------------|-------------------|---------------------------|
| 孔内長期クリープ試験 | | 原位置クリープ試験装置 | 3年程度 | 原位置でのクリープ特性を把握する |
| 単一孔利用 | 孔内弾性波検層 | 弾性波測定器 | 2回/年測定, 10年間程度 | P波速度の経時的な変化を測定し、強度変化を把握する |
| | 透水試験 | 改良式透水試験装置 | 2回/年測定, 10年間程度 | 孔周辺の透水状態の経時的な変化を把握する |
| 複数孔利用 | 孔間弾性波探査 | 弾性波トモグラフィ装置 | 2回/年測定, 10年間程度 | 経時的な地山の強度変化状態を面的に把握する |
| | 透水試験 | パルステスト装置 | 2回/年測定, 10年間程度 | 経時的な地山の透水係数の変化を面的に把握する |

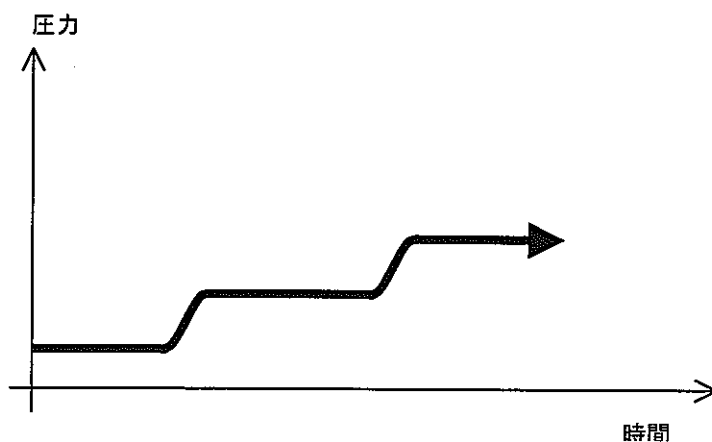
1) 孔内長期クリープ試験

原位置試験で使用する試験機は、一般にボーリング孔内に挿入する小型ジャッキ部分と油圧源で構成されている。試験機の油圧源は設定した圧力を一定に保持することが可能な機能を有している。つまり、ボーリング孔に挿入された小型ジャッキからボーリング孔壁に伝達される圧力を一定に長期間保持することが可能である。また、小型ジャッキには高精度の変位計が内蔵されており、ボーリング孔径変化を精度良く測定することができる。したがって、一定に圧力を保持した状態でボーリング孔径の変化を長期間測定することにより周辺地山のクリープ特性を把握する試験である。試験は下記のような手順で実施する。

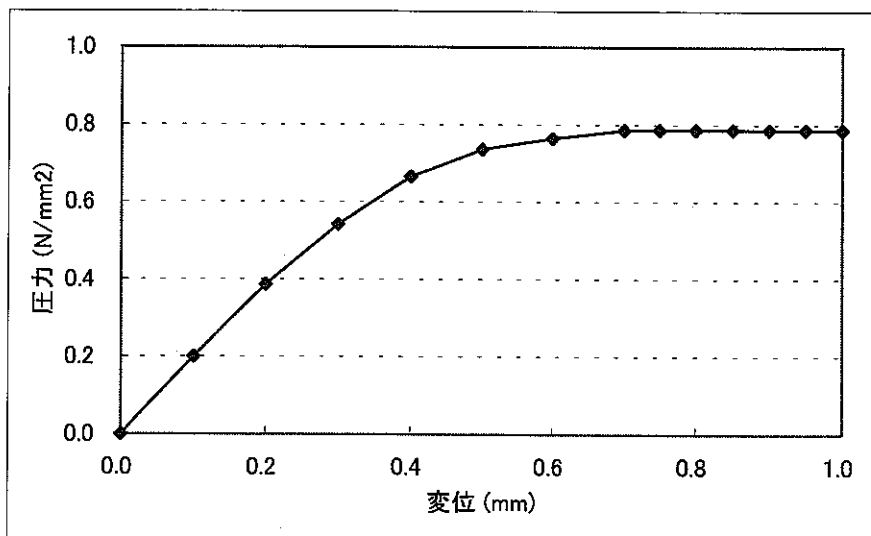
- ①小型ジャッキを所定の深さまでボーリング孔に挿入する。
- ②小型ジャッキの圧力を図—4. 2に示すように段階的に増加させ、一定圧力を保持している間の孔径の変化を測定する。なお、圧力を保持する期間は孔内載荷試験結果を基に決定するが、直径の変化が急激に増加する場合はクリープ破壊に至ったものとし、その時点で試験を終了する。
- ③載荷する圧力は、孔壁周辺の地山にクラック等の損傷が発生しない範囲とする。

クリープ試験を実施する載荷荷重を決定するため、クリープ試験前に孔内載荷実験を実施する。孔内載荷実験では、クリープ試験に用いる小型ジャッキをボーリング孔内に挿入し、孔内周辺地山に荷重を載荷する。孔内載荷実験では、図—4. 3に示すように載荷荷

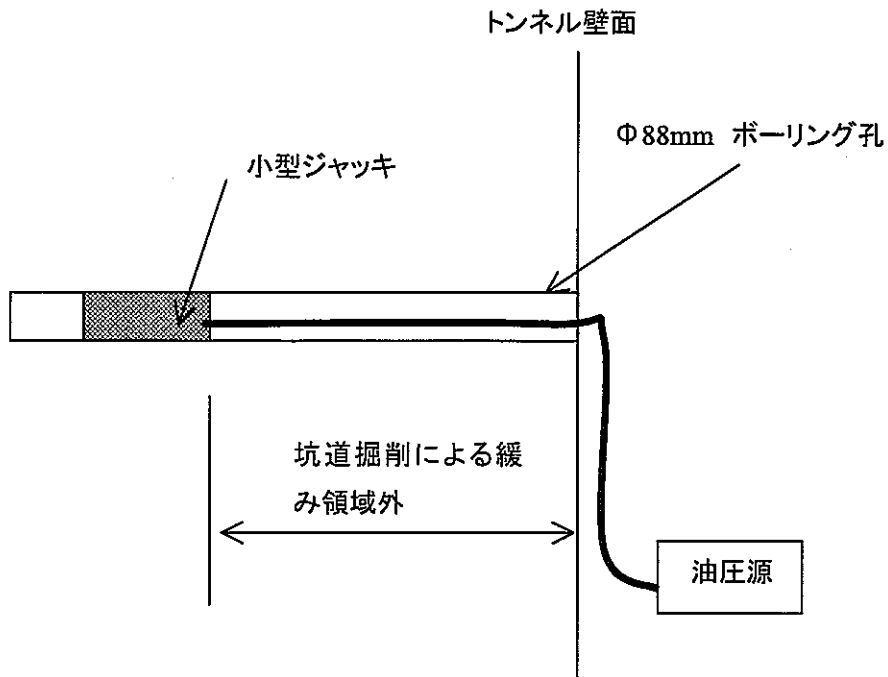
重とボーリング孔径の変化を測定し、図に示すように変位が急激に変化する点を確認する。この変曲点を周辺地山の降伏荷重とし、この降伏荷重に基づいてクリープ試験の載荷荷重を決定する。



図一4. 2 孔内クリープ試験測定概念図



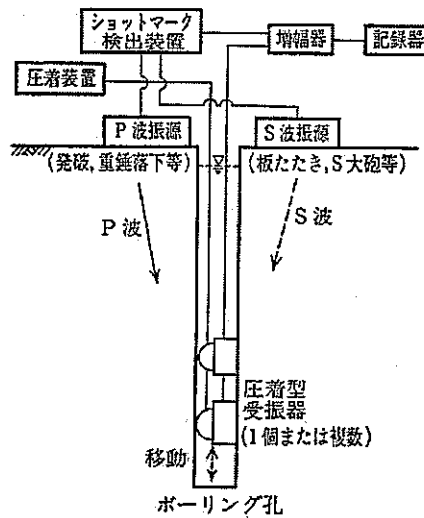
図一4. 3 孔内載荷試験によるクリープ荷重設定方法
(荷重—変位曲線の変曲点を降伏点としクリープ荷重を設定)



図—4. 4 孔内クリープ試験概要図

2) 孔内弾性波検層

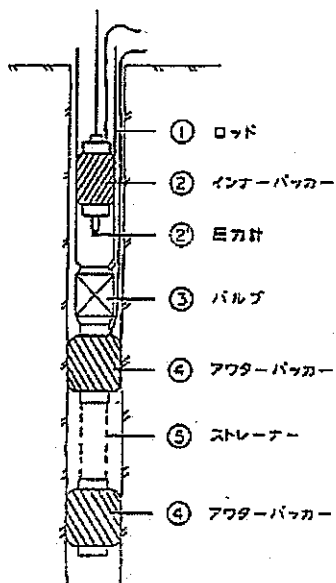
図—4. 5に示すような圧着型受振器をボーリング孔に沿って移動させ、孔深度にそつた弾性波速度を測定する¹³⁾。この測定を長期間にわたり定期的に行い、弾性波速度の变化から地山強度の状態を把握する。また、この結果は孔間弾性波探査の結果を補正するためにも用いる。



図—4. 5 孔内弾性波検層装置の例¹³⁾

3) 孔内透水係数測定

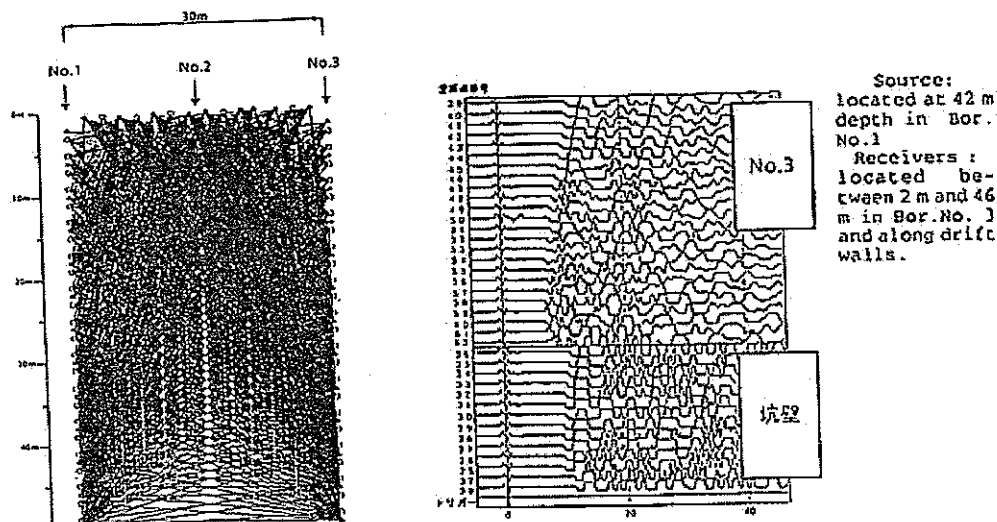
図—4. 6に示すような透水試験装置を用い、ボーリング孔深度に沿った透水係数を測定する¹⁴⁾。この測定を長期間にわたり定期的に行い、孔周辺の透水状態の変化を把握する。



図—4. 6 透水試験装置の例 (動燃式 J F T) ¹⁴⁾

4) 孔間弾性波探査

複数のボーリング孔に弾性波の送受振器をセットし、弾性波トモグラフィー測定を行う。得られた弾性波速度分布図の変化より、坑道周辺の緩み域の進展などを把握する。図—4. 7に弾性波トモグラフィーの測定パターン及び波形記録例を示す。



図—4. 7 弾性波トモグラフィー測定パターン及び波形記録例 ¹⁴⁾

5) 孔間透水係数測定

複数の孔を利用してパルステストを行い、孔間の面的な透水係数の分布を把握する。坑道掘削で生じた緩み領域では、当然透水係数は大きくなる。この透水係数の大きくなった領域が長期にわたりどのように変化していくかを把握する。

図-4.8にパルステスト測定模式図を図-4.9にパルステスト発信装置の概要を示す。

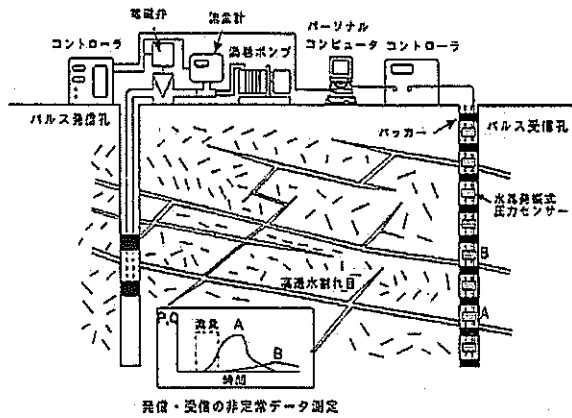


図-4.8 パルステスト測定模式図 14)

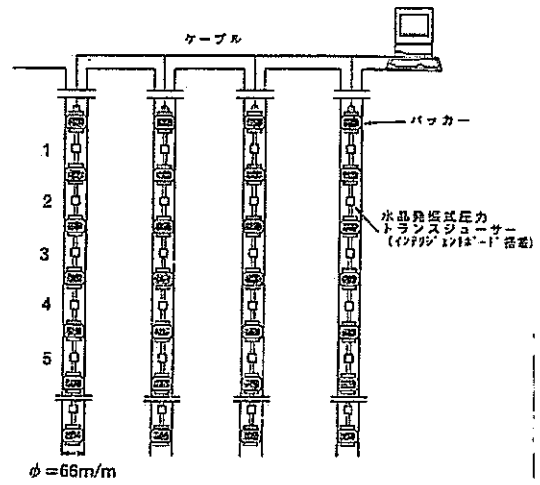


図-4.9 パルス発信装置の概要 14)

4. 1. 3 原位置試験

深地層研究所では、坑道内を利用して行う試験と研究坑道そのものを利用した長期挙動観測を行う。原位置試験でもボーリング孔での試験と同様に各種の測定器は耐久性、耐水性の改良が必要である。この改良が行われる前提で試験概要を示す。

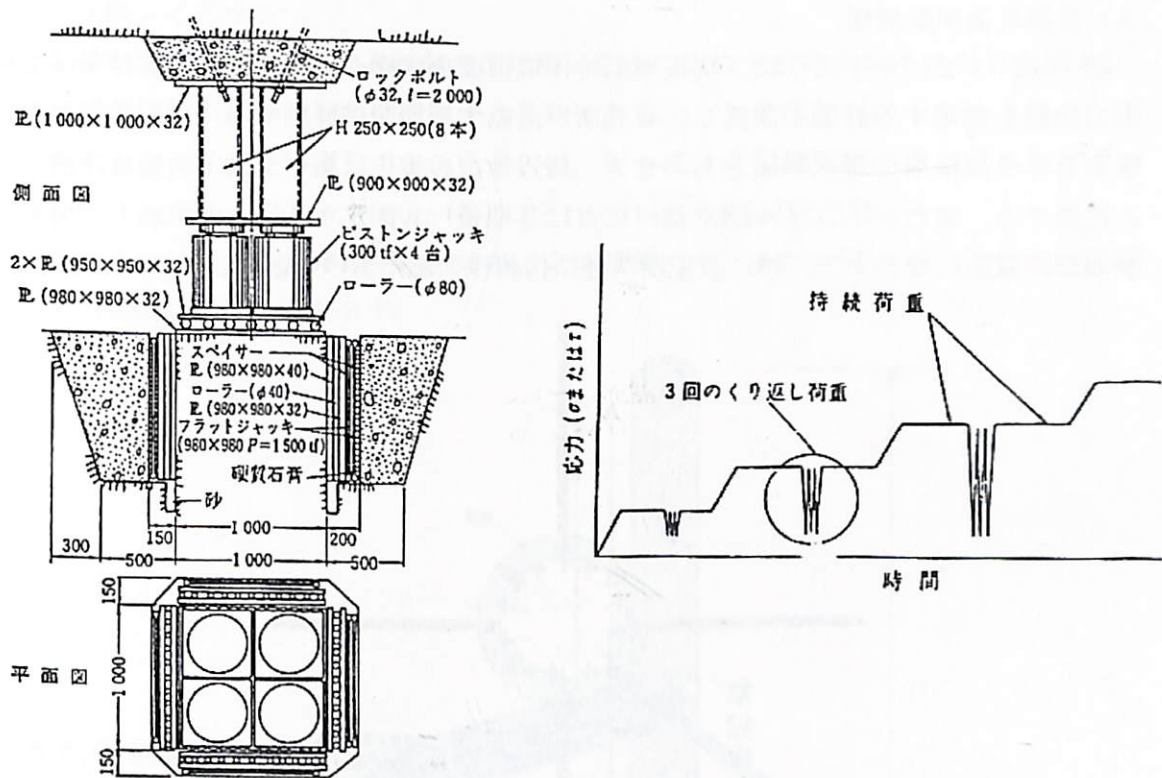
表一4. 3に原位置試験項目を示すが、坑道を利用した試験は、岩盤ブロックサイズでの長期的な変形特性の把握と、岩盤ブロックに模擬トンネルを形成し各種条件下での模擬トンネルや周辺岩盤の挙動把握であり、実規模や実条件に近い環境でのデータを得るものである。また、坑道そのものを利用した試験は、坑道建設時からの支保、地山の変形、応力状態の測定と、支保工ランクと排水条件を変化させた試験坑道を新たに建設し、それぞれの条件での周辺地山の応力状態や透水状態を長期間測定し、実規模での岩盤挙動を把握する。

表一4. 3 原位置での長期挙動把握試験

| 試験項目 | 試験条件 | 試験ケース | | | 測定期間 | 目的 |
|------------|-----------|--------------------------------|-----|-----|----------------|-------------------------|
| 岩盤三軸クリープ試験 | 三軸状態 | 上載荷重(初期地圧)の 30%,60%,90% | | | 半年から5年程度 | 原位置でのクリープ特性を把握する |
| 模擬トンネル掘削試験 | 土圧(地山強度比) | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 半年から1年 | 各種環境下での周辺地山の挙動を把握する |
| | 内圧 | 支保剛性 | | なし | | |
| | 熱変化 | 常温 | | 80℃ | | |
| 長期坑道挙動把握 | — | 建設直後から坑道変形、支保工応力、地山応力、漏水量などを測定 | | | 研究所活動期間中。定期的実施 | 坑道周辺の状態を把握する |
| 試験坑道挙動把握 | 支保ランク | 剛 | 柔 | | 5年程度 | 施工条件を変えた場合の周辺地山の性状を把握する |
| | 排水条件 | 排水 | 非排水 | | | |

1) 岩盤三軸クリープ試験

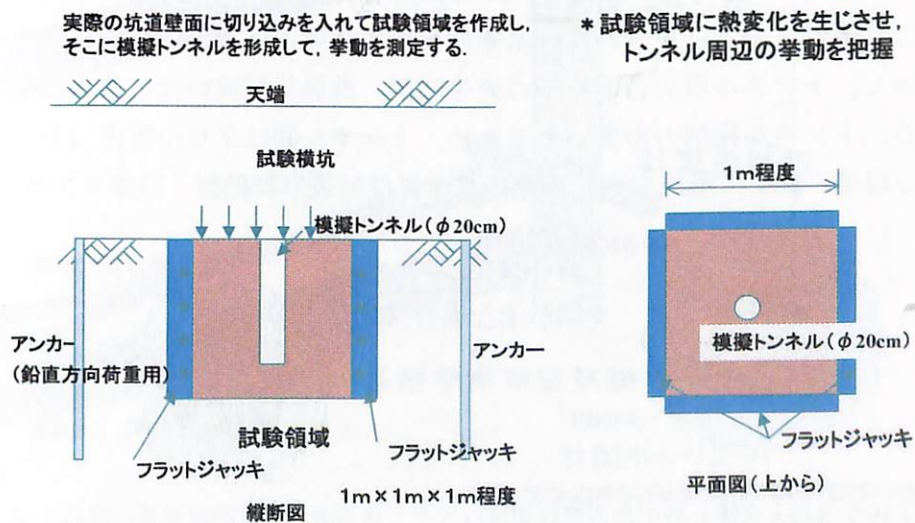
図一4. 10に示すような三軸試験機を用い、上載圧と側圧を保持して、クリープ試験を行う。岩盤としてのクリープ特性を把握する。岩石クリープ試験結果と比較し、クリープ特性やモデル定数が供試体レベルとどの程度差違があるかも把握する。



図—4. 10 岩石三軸試験装置及び長期載荷パターン例¹⁴⁾

2) 模擬トンネル掘削試験

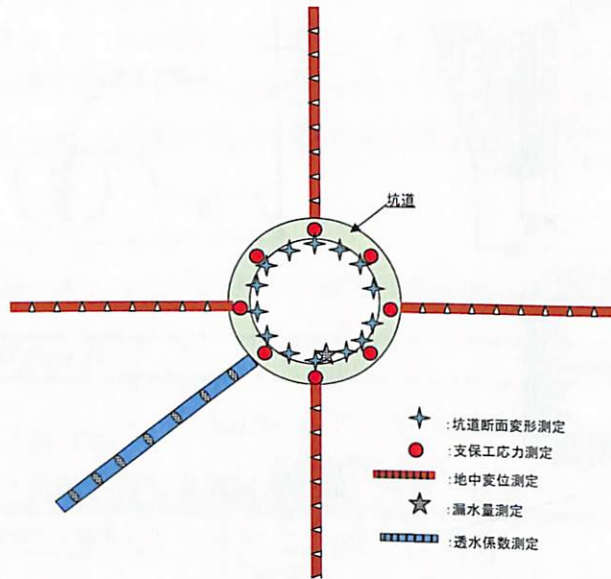
坑道基盤に図—4. 11に示すような岩盤を切りだし整形する。そのブロックを三軸応力状態にした後、模擬トンネルを形成し、そのトンネルに内圧や熱変化等の条件を与える。一定期間状態を保持した後、模擬トンネル周辺地山の強度、透水特性を把握する。



図—4. 11 模擬トンネル掘削試験概要図

3) 長期坑道挙動把握

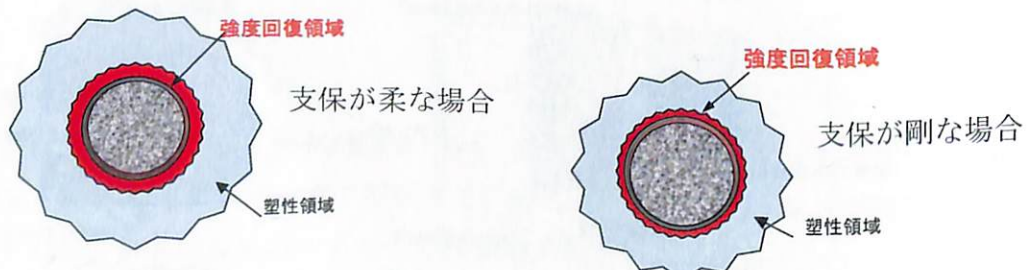
図一4. 12に示すように、坑道掘削時に坑道変形状態や地中変位測定及び支保工発生応力状態を測定する計器を設置し、研究所が活動する期間中計測する。ボーリング孔で試験する弾性波検層や透水試験とあわせて、周辺地山の劣化状態や支保工状態及び透水係数を把握する。また、トンネル漏水量（または蒸発量）も測定する。この試験で使用する計測器は設置型になるので、特に長期耐久性に信頼性のあるものを選定しなければならない。



図一4. 12 坑道周辺の変形状態，応力状態測定模式図

4) 試験坑道挙動把握

同一地山条件領域の中に、支保工ランクを変えて変形を押さえた場合、変形を許した場合（いなした場合）やトンネル内に排水条件を変えた等の坑道を新たに掘削する。条件の違いによって、トンネル周辺の緩み域の発生状況、進展状況或いは、透水領域の変化状況を把握する。トンネル掘削の影響があるため、トンネル間は20m程度（トンネル径3mとして7D程度）離して形成する。測定項目は長期坑道挙動把握と同様とする。



支保が柔だと変形を許すため塑性領域は大きくなるが、強度回復領域は幅広くなる。支保が剛だと塑性領域は小さくなるが、強度回復領域も小さくなる。

図一4. 13 施工条件を変えた場合のトンネル状況の模式図

4. 2 試験レイアウト

前述の長期挙動に関する色々な試験を深地層研究所で実施する時のレイアウトを示す。深地層研究所は地下深部の挙動を把握する目的であるから、最深部だけでなく、色々な深度での測定を行えるようにすることが望ましい。従って、最深部深度が例えば500mとした場合には、100m, 300m, 500m 深度にそれぞれ設けるものとする。

図-4. 14には、長期挙動測定試験場の全体概要図を、また、図-4. 15には長期挙動試験の試験レイアウトを示す。

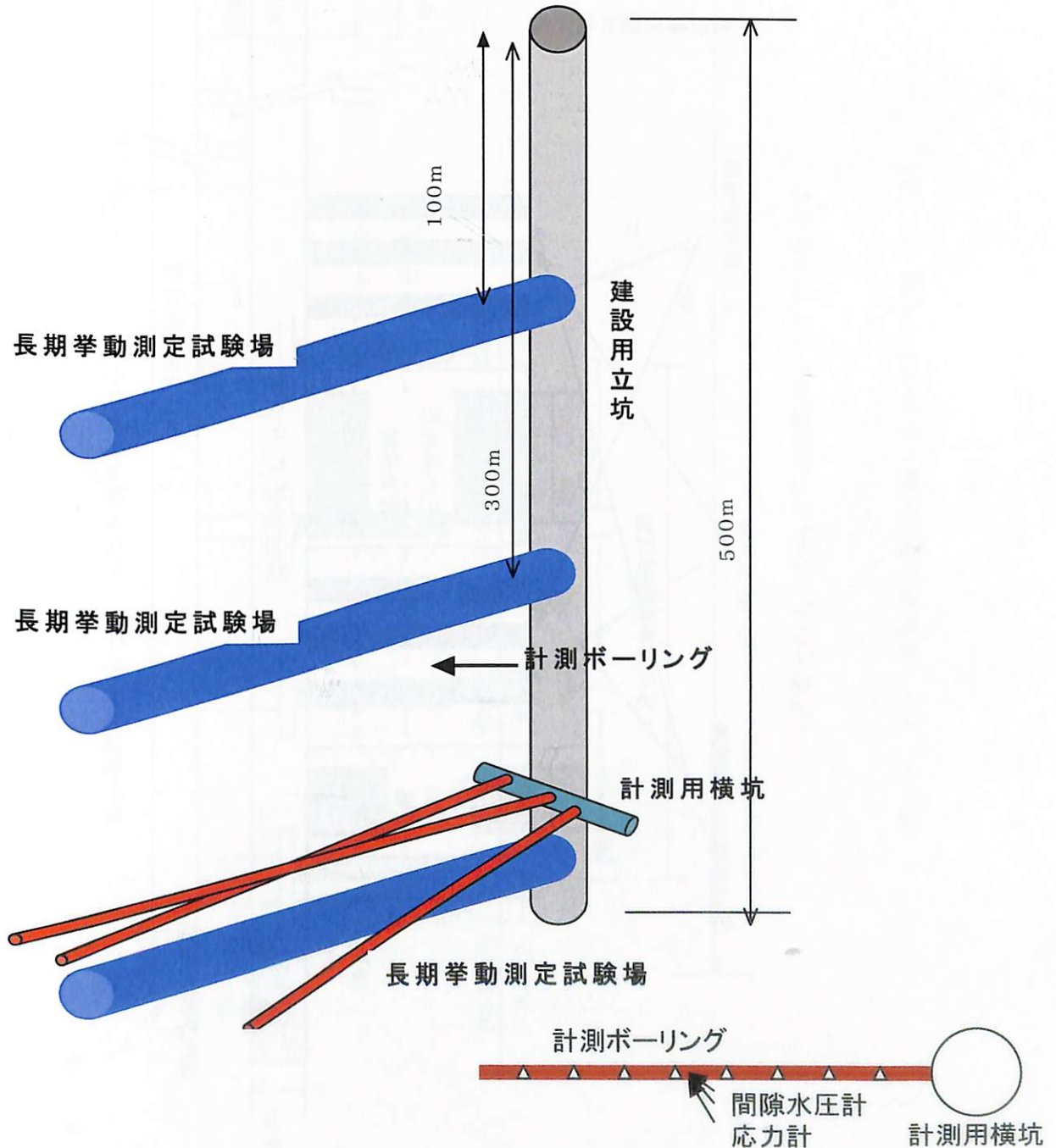


図-4. 14 長期挙動測定試験場全体概要図

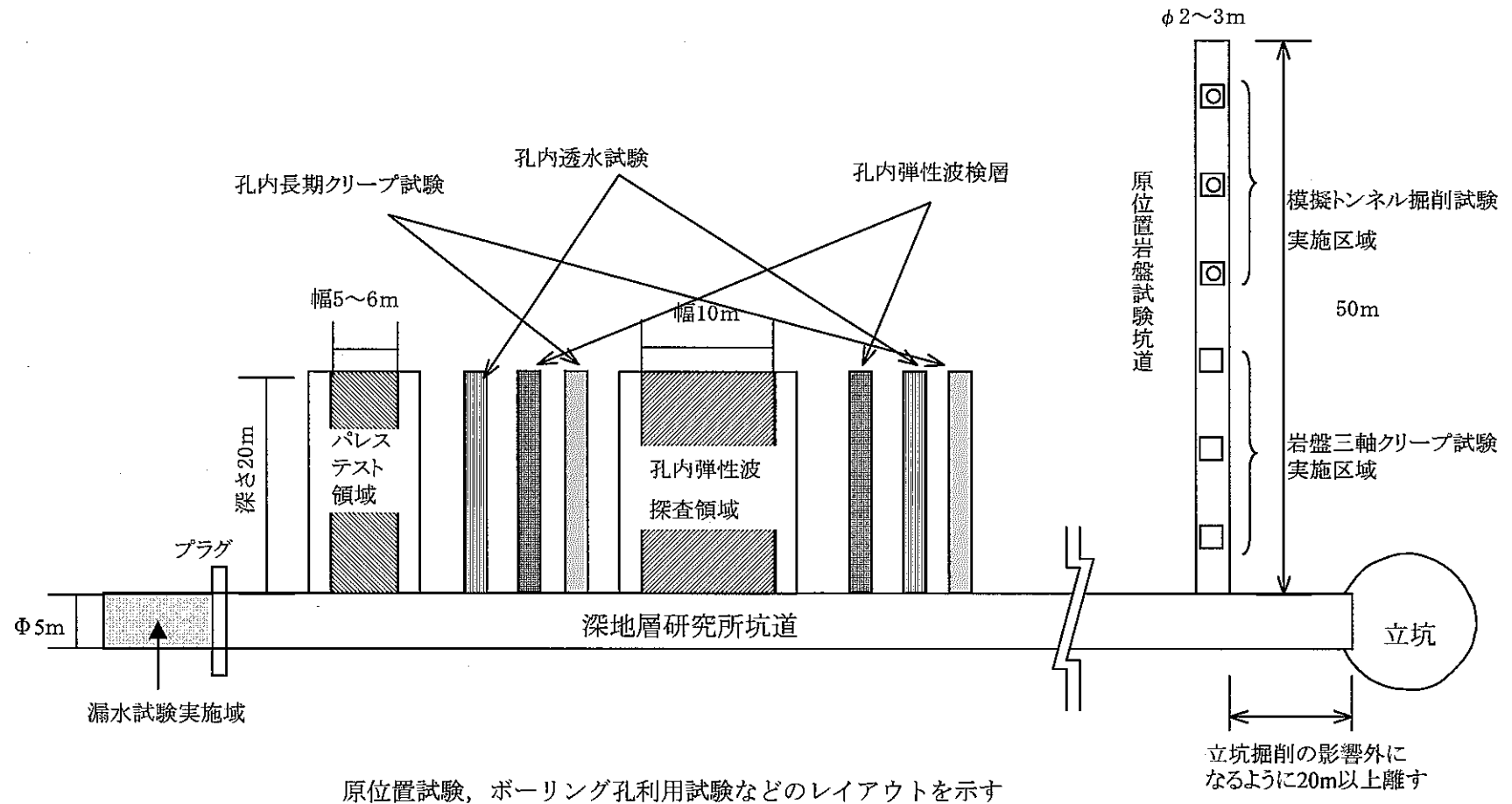
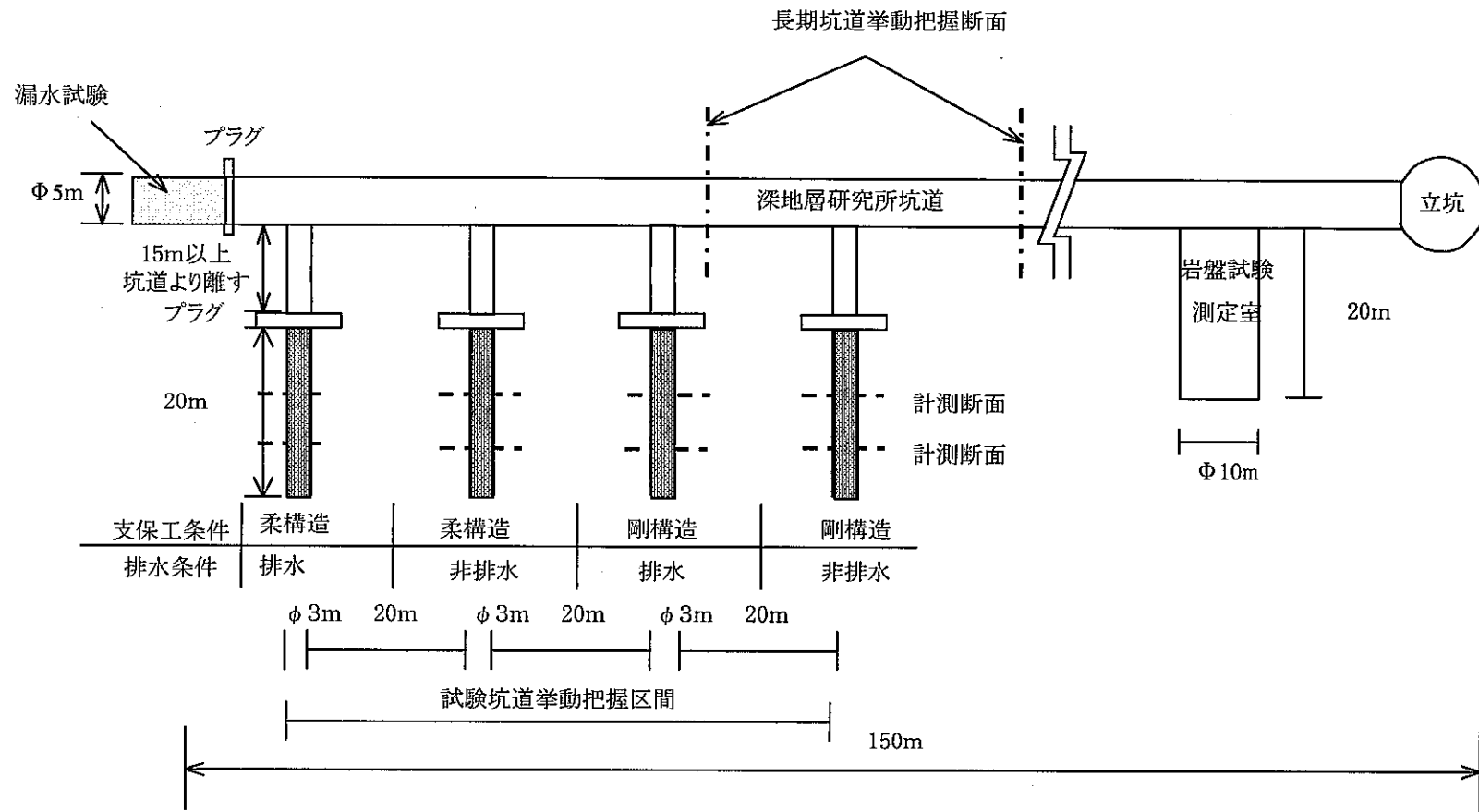


図-4. 15 長期挙動測定試験レイアウト平面図 (1)



坑道そのものを利用する試験のレイアウトを示す

図一4. 15 長期挙動測定試験レイアウト平面図 (2)

This is a blank page.

5. おわりに

①軟岩試料を用いたクリープ試験

一軸圧縮試験

- ・大久保モデルの定数 n は、各供試体毎に異なり、その値は3供試体の平均的な値として以下の値を設定しクリープ試験の破壊到達時間を推定して実験を行った。

一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等

| | λ_1 /MPa | n | m | a /(MPa·sec) | σ_c MPa |
|-----|---------------------|----|----|-----------------------|-------------------|
| Y-5 | 0.00357 | 21 | 21 | 7.42×10^{41} | 1.536 |
| Y-6 | 0.00445 | 27 | 27 | 2.88×10^{51} | 1.720 |
| Y-8 | 0.00360 | 22 | 22 | 8.12×10^{43} | 1.559 |
| 平均 | 0.00387 | 23 | 23 | 1.31×10^{45} | 1.605 |

λ_1 : 初期コンプライアンス

n, m, a: 大久保モデルの定数 (ただし, a は λ_1 , n, m から算出している)

σ_c : 一軸圧縮強度

クリープ試験

- ・本研究で用いた試料が、昨年度に比べ一軸圧縮強度のばらつきが少なく、破壊到達時間の想定と実測が昨年度用いた供試体よりも誤差の少ないものとなった。
- ・一軸圧縮強度の僅かなばらつきが、大久保モデルでの破壊到達時間に大きく影響することが明らかとなった。
- ・大久保定数のバラツキを用いて解析を行うと破壊したケースでは推定時間内で破壊が発生している。
- ・推定された破壊到達時間は約3オーダーの開きがある。

大久保定数のバラツキ

| | λ_1 /MPa | n | m | a /(MPa·sec) | σ_c MPa |
|------|---------------------|----|----|-----------------------|-------------------|
| 信頼上限 | 0.00450 | 27 | 27 | 1.89×10^{51} | 1.730 |
| 信頼下限 | 0.00325 | 19 | 19 | 2.80×10^{38} | 1.481 |
| 平均 | 0.00387 | 23 | 23 | 1.31×10^{45} | 1.605 |

これらをもとに、破壊到達時間を推定すると以下のようになる。

破壊到達時間のバラツキ

| 載荷応力 MPa | 破壊到達時間 | |
|-------------|----------------|---------|
| | 大久保モデル | 実測値 |
| 1.509 | 1分~53分 | 28.5分 |
| 1.161 | 2.0時間~1049.5時間 | 324時間 |
| 1.019 | 1日~1480.9日 | 120日未破壊 |

②軟岩試料を用いた模型実験

- ・初期地山応力状態を保持する機構を持つ大型実験装置（試験体サイズ 1m×1m×0.5m）を製作した。
- ・トンネルの破壊が発生した場合、トンネル壁面にうろこ状の破壊がみられ、たまねぎの皮状に破片が残ることより、トンネルの周辺での破壊が円周方向で起きていることを示唆している。
- ・エコーチップ硬さ試験機を用いた試験や解体状況の観察より、塑性領域境界は約 12.5cm～17.5cm 程度の所にあり、Kastner の式⁵⁾より計算した値（13.42cm）と近い値を示した。

③深地層研究における試験方法検討

- ・深地層研究所における試験法について長期的な挙動の把握を目的とした試験項目を示し、

(1) 岩石コア試験

(2) ボーリング孔を利用した試験

(3) 原位置試験

坑道内を利用

坑道そのもの利用

のそれぞれについて試験を示した。

- ・長期挙動に関する様々な試験を深地層研究所で実施する時のレイアウトを示し、3 深度での試験場レイアウトを考えた。

さらに今後の課題として、昨年度の実験では、軟岩試料の水理条件・温度条件が変わることによって強度・変形特性が変化すると考えられる結果を得ており、今回の軟岩試料においても同様な現象が起こるのか、また岩種によりどの程度の変化がみられるかなどのデータを蓄積していく必要があると考えられる。

例えば次に示すような条件を与えた各種試験が考えられる。

今後試験が必要と思われる試験の項目と数量

| 試験項目 | 試験状態 | 供試体条件 (環境変化等) | 試験期間 | 供試体 数 | 計 |
|------------|------|-------------------|------------------------------|----------|----|
| クリープ 試験 | 一軸状態 | 飽和状態 常温 | 3期間 超短期, 短期, 長期 | 5 | 15 |
| | | 乾湿 1 回繰り返し 常温 | 2期間 短期, 長期 | 5 | 10 |
| | | 飽和 加熱 (60, 80 °C) | 2期間 | 5 | 20 |
| | | 飽和 熱履歴 (常温~高温~常温) | 2期間 | 5 | 10 |
| | | 乾湿 1 回 80 °C | 2期間 | 3 | 6 |
| | 三軸状態 | 飽和状態 常温 3封圧 | 3期間 | 3 | 27 |
| 透水試験 | | 飽和状態 常温 | 計画クリープ期間の 30,60,80%到達時に実施 | 2 | 6 |
| | | 乾湿 1 回繰り返し 常温 | 計画クリープ期間の 30,60,80%到達時に実施 | 2 | 6 |
| | | 飽和状態 80 °C | 計画クリープ期間の 30,60,80%到達時に実施 | 2 | 6 |
| | | 乾湿 1 回 80 °C | 計画クリープ期間の 30,60,80%到達時に実施 | 2 | 6 |

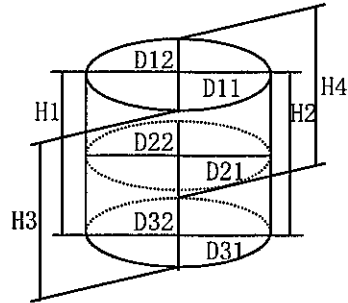
また、トンネル周辺の緩み域における強度・透水性の変化を把握するため、模型実験などを実施し、原位置試験における計測方法などを含めた検討を行う必要があると思われる。

参考文献

- 1) 大久保誠介他：“一軸圧縮応力下における時間依存性挙動—岩石の **Post-failure Region** での挙動（第1報）—”，日本鉱業会誌，Vol.103, No.1189, (1987)
- 2) 大久保誠介：“コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討”，資源・素材学会誌，Vol.108, No.8, (1992)
- 3) 大久保誠介他：“コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”，資源と素材，Vol.113, No7, (1997)
- 4) 大久保誠介他：“緩み領域の強度回復に関する基礎研究”，資源と素材，Vol.117, No.8, (2001)
- 5) 土木工学社：NATM の理論と実際，(1983)
- 6) 富士物産株式会社：“EQUOTIP エコーチップ 取扱説明書”
- 7) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 —地層処分研究開発第2次取りまとめ—”，JNC TN1400 99-022, (1999)
- 8) 山辺 正他：“温度場を考慮した軟岩の時間依存性挙動とその変形予測に関する実験的研究”，土木学会第 56 回年次学術講演会，(2001)
- 9) 佐野 修他：“岩石の破壊挙動の時間依存性に関する統一的解釈”，第 21 回岩盤力学シンポジウム論文集，(1989)
- 10) 三浦一彦他：“高レベル放射性廃棄物処分場における硬岩クリープ破壊の検討” 土木学会第 55 回年次学術講演会，(2000)
- 11) 大久保誠介：“岩石のクリープ” 資源・素材学会誌，Vol.107, No.5, (1991)
- 12) 伊東 孝他：“クリープ破壊挙動とその予測について”，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，(2001)
- 13) 土質工学会編：岩の調査と試験，(1989)
- 14) (社)土木学会 岩盤力学委員会 試験・計測小委員会：地下深部開発に関する調査・試験法の現状と技術的課題，(1996)

一軸圧縮強度試験データシート

| | | |
|----------------|------------|----|
| 試験日 | 2002/01/15 | |
| 供試体No. | Y-5 | 位置 |
| 拘束圧 σ_3 | --- | |



| | | |
|--------------------------------|-----|-------------------|
| W (gf) | | <u>374.900</u> |
| D (cm) | D11 | <u>4.940</u> |
| | D12 | <u>4.924</u> |
| | D21 | <u>4.923</u> |
| | D22 | <u>4.915</u> |
| | D31 | <u>4.942</u> |
| | D32 | <u>4.923</u> |
| H (cm) | H1 | <u>10.125</u> |
| | H2 | <u>10.139</u> |
| | H3 | <u>10.135</u> |
| | H4 | <u>10.124</u> |
| P_{MAX} (kgf) | | <u>300.802</u> |
| T_p (μs) | | <u>---</u> |
| T_s (μs) | | <u>---</u> |
| γ (gf/cm ³) | | <u>1.940</u> |
| q_u (kgf/cm ²) | | <u>15.663</u> |
| V_p (m/sec) | | <u>---</u> |
| V_s (m/sec) | | <u>---</u> |
| TIMEカウンター入力値 | | <u>833&83</u> |

$$\bar{D} = \frac{4.928}{1} \text{ (cm)}$$

$$A = \frac{19.072}{1} \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\bar{H} = \frac{10.131}{1} \text{ (cm)}$$

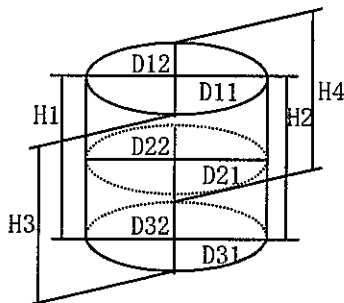
$$V = \frac{193.216}{1} \text{ (cm}^3\text{)}$$

一軸圧縮強度試験データシート

試験日 2002/01/15

供試体No. Y-6 位置

拘束圧 σ_3 ---



W (gf) 372.900

D (cm)

| | |
|-----|-------|
| D11 | 4.929 |
| D12 | 4.929 |
| D21 | 4.918 |
| D22 | 4.914 |
| D31 | 4.934 |
| D32 | 4.913 |

$\bar{D} = 4.923$ (cm)
 $A = 19.034$ (cm²)

H (cm)

| | |
|----|--------|
| H1 | 10.099 |
| H2 | 10.097 |
| H3 | 10.072 |
| H4 | 10.087 |

$\bar{H} = 10.089$ (cm)
 $V = 192.025$ (cm³)

P_{MAX} (kgf) 336.816

T_p (μ s) ---

T_s (μ s) ---

γ (gf/cm³) 1.942

qu (kgf/cm²) 17.541

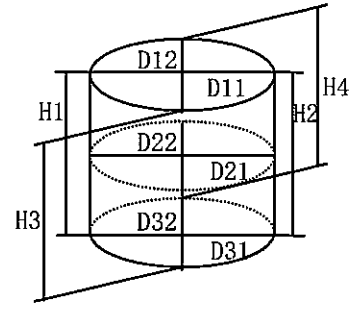
V_p (m/sec) ---

V_s (m/sec) ---

TIMEカウンター入力値 833&83

一軸圧縮強度試験データシート

| | | |
|----------------|------------|----|
| 試験日 | 2002/01/18 | |
| 供試体No. | Y-8 | 位置 |
| 拘束圧 σ_3 | --- | |



| | | |
|--------------------------------|-----|-------------------|
| W (gf) | | <u>367.900</u> |
| D (cm) | D11 | <u>4.897</u> |
| | D12 | <u>4.872</u> |
| | D21 | <u>4.900</u> |
| | D22 | <u>4.883</u> |
| | D31 | <u>4.921</u> |
| | D32 | <u>4.909</u> |
| H (cm) | H1 | <u>10.050</u> |
| | H2 | <u>10.045</u> |
| | H3 | <u>10.041</u> |
| | H4 | <u>10.045</u> |
| P_{MAX} (kgf) | | <u>301.550</u> |
| T_p (μ s) | | <u>---</u> |
| T_s (μ s) | | <u>---</u> |
| γ (gf/cm ³) | | <u>1.945</u> |
| qu (kgf/cm ²) | | <u>15.899</u> |
| V_p (m/sec) | | <u>---</u> |
| V_s (m/sec) | | <u>---</u> |
| TIMEカウンター入力値 | | <u>833&83</u> |

$$\bar{D} = \frac{4.897}{6} \text{ (cm)}$$

$$A = \frac{18.834}{6} \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\bar{H} = \frac{10.045}{4} \text{ (cm)}$$

$$V = \frac{189.196}{4} \text{ (cm}^3\text{)}$$

クリープ試験データシート

試験日 2002年2月5日

試験名: 超短期クリープ試験<想定破壊時間=5分>-No.4
 供試体名 Y-5'

重量: W [gf] 132.718

直径: D [cm]

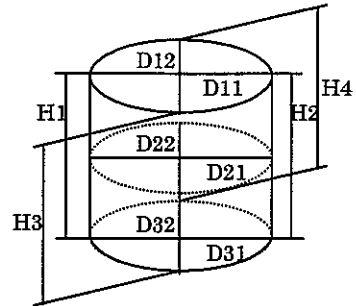
| | |
|-------|--------------|
| D11 = | <u>3.502</u> |
| D12 = | <u>3.500</u> |
| D21 = | <u>3.502</u> |
| D22 = | <u>3.501</u> |
| D31 = | <u>3.501</u> |
| D32 = | <u>3.500</u> |

高さ: H [cm]

| | |
|------|--------------|
| H1 = | <u>7.880</u> |
| H2 = | <u>7.880</u> |
| H3 = | <u>7.910</u> |
| H4 = | <u>7.910</u> |

単位体積重量: γ [gf/cm³] 1.746

含水比: w [%] 29.869



$D_o =$ 3.501 [cm]

$A_o =$ 9.627 [cm²]

$H_o =$ 7.895 [cm]

クリープ試験データシート

試験日 2002年2月1日

試験名: 短期クリープ試験<想定破壊時間=1日>-No.1
 供試体名 Y-4

重量: W [gf] 127.627

直径: D [cm]

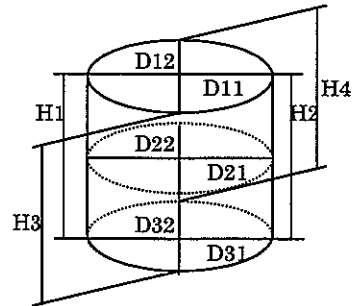
| | |
|-------|--------------|
| D11 = | <u>3.515</u> |
| D12 = | <u>3.516</u> |
| D21 = | <u>3.516</u> |
| D22 = | <u>3.516</u> |
| D31 = | <u>3.515</u> |
| D32 = | <u>3.516</u> |

高さ: H [cm]

| | |
|------|--------------|
| H1 = | <u>6.888</u> |
| H2 = | <u>6.889</u> |
| H3 = | <u>6.887</u> |
| H4 = | <u>6.890</u> |

単位体積重量: γ [gf/cm³] 1.909

含水比: w [%] 32.670



$D_o =$ 3.516 [cm]

$A_o =$ 9.707 [cm²]

$H_o =$ 6.889 [cm]

クリープ試験データシート

試験日 2002年1月21日

試験名: 長期クリープ試験<想定破壊時間=30日>-No.1
 供試体名 Y-1

重量: W [gf] 133.400

直径: D [cm]

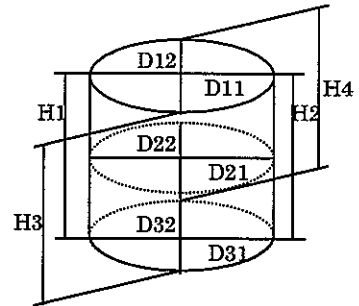
| | |
|-------|--------------|
| D11 = | <u>3.515</u> |
| D12 = | <u>3.502</u> |
| D21 = | <u>3.516</u> |
| D22 = | <u>3.516</u> |
| D31 = | <u>3.519</u> |
| D32 = | <u>3.518</u> |

高さ: H [cm]

| | |
|------|--------------|
| H1 = | <u>7.082</u> |
| H2 = | <u>7.093</u> |
| H3 = | <u>7.094</u> |
| H4 = | <u>7.085</u> |

単位体積重量: γ [gf/cm³] 1.930

含水比: w [%] _____



$D_o =$ 3.514 [cm]

$A_o =$ 9.700 [cm²]

$H_o =$ 7.089 [cm]



歪み速度繰返し一軸圧縮試験 セット状況



歪み速度繰返し一軸圧縮試験 載荷状況



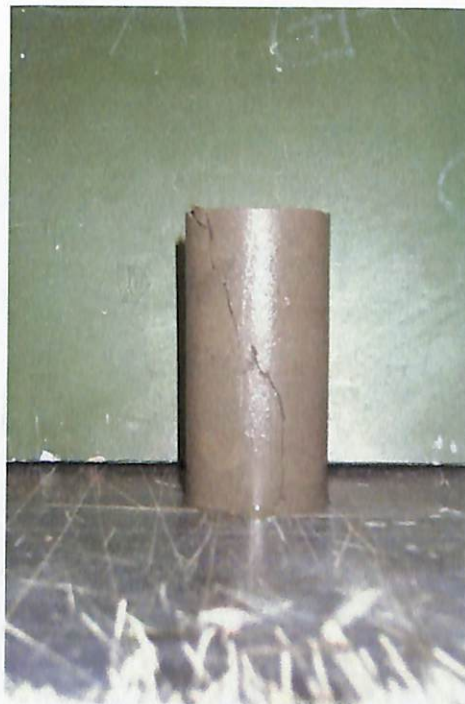
歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-5 供試体破壊状況①



歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-5 供試体破壊状況②



歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-6 供試体破壊状況①



歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-6 供試体破壊状況②



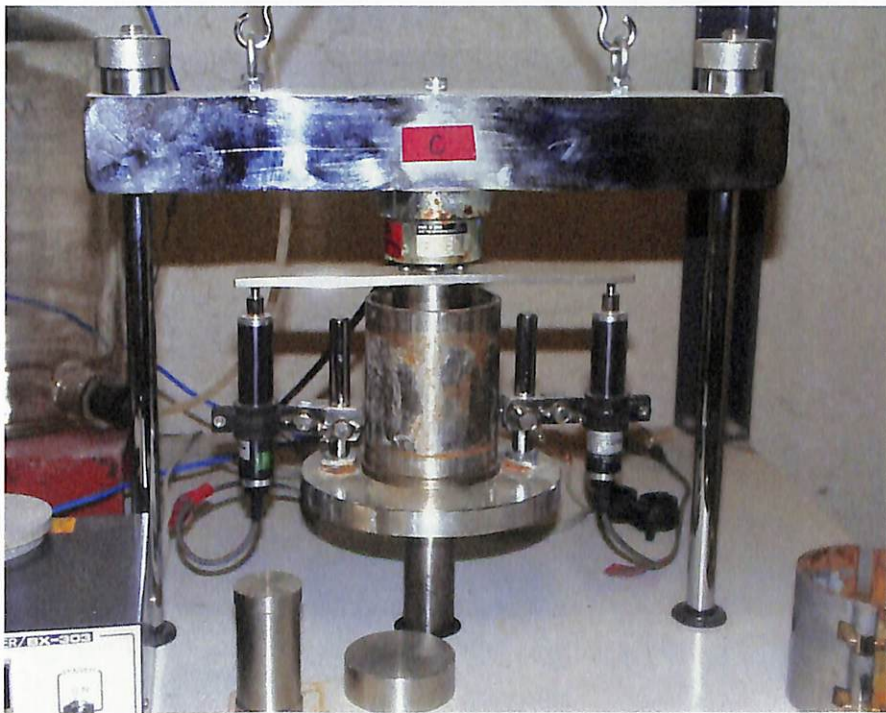
歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-8 供試体破壊状況①



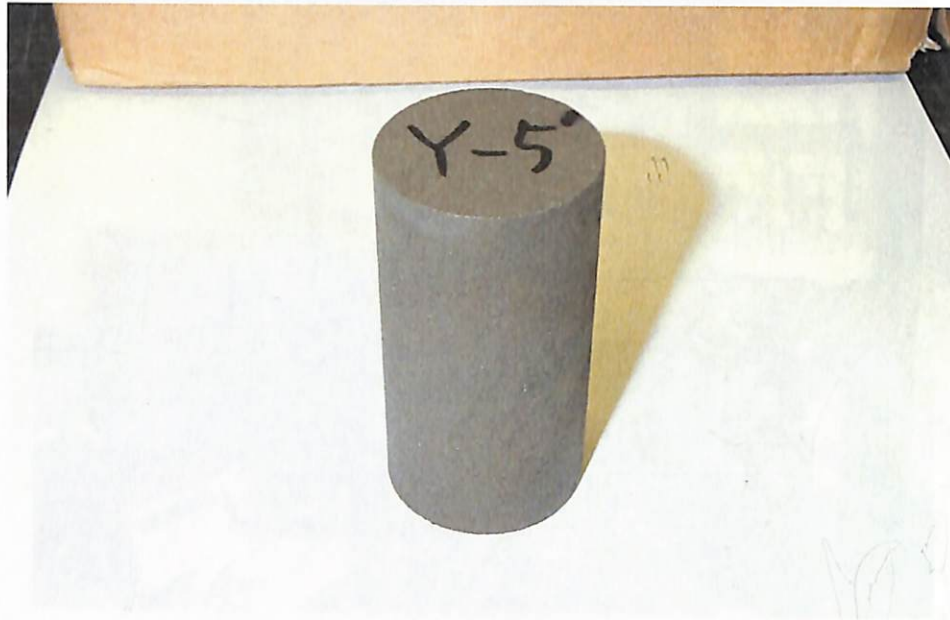
歪み速度繰返し一軸圧縮試験
Y-8 供試体破壊状況②



クリープ試験機



クリープ試験機拡大



クリープ試験（超短期：想定破壊時間 5 分）
Y-5'供試体載荷前状況



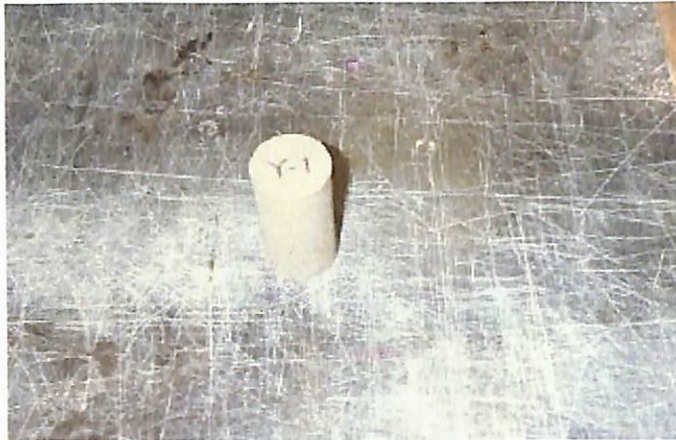
クリープ試験（超短期：想定破壊時間 5 分）
Y-5'供試体破壊状況



クリープ試験（短期：想定破壊時間 1 日）
Y-4'供試体載荷前状況



クリープ試験（短期：想定破壊時間 1 日）
Y-4'供試体破壊状況



クリープ試験（長期：想定破壊時間 30 日）

Y-1 供試体載荷前状況

載荷中

クリープ試験（長期：想定破壊時間 30 日）

Y-1 供試体破壊状況

付録 珪藻泥岩実験

条件：地山強度比=0.5

拘束圧=3.0MPa

ホップ荷重=152.8kgf/cm²

珪藻土：40cm×40cm×20cm（前回同様）

実験方法

- ①所定の地山強度比（0.5）になるまで、拘束圧 3.0MPa（ホップ荷重：152.8kgf/cm²）まで載荷する。
- ②荷重がかかった状態で模擬トンネル削孔（トンネル径φ6cm）。
- ③削孔後、直ちに内空変位測定用ひずみゲージを建て込む。
- ④トンネルが破壊するまで荷重、内空変位をモニタリングする。

載荷方法

載荷ステップ1ステップ0.2～0.6MPa（ホップ圧10～30kgf/cm²）程度

一段回目荷重0.9MPa（ホップ荷重46kgf/cm²）

| 載荷ステップ | ホップ荷重 |
|--------|--------------------------|
| 1 | 46kgf/cm ² |
| 2 | 56kgf/cm ² |
| 3 | 66kgf/cm ² |
| 4 | 86kgf/cm ² |
| 5 | 106kgf/cm ² |
| 6 | 126kgf/cm ² |
| 7 | 136kgf/cm ² |
| 8 | 146kgf/cm ² |
| 9 | 152.8kgf/cm ² |

- ・ステップ基準：2時間で2kgf/cm²以上低下しなくなったら次のステップへ
- ・鉛直方向変位は随時モニタリングし、浮き上がりが確認されれば増し締めして拘束する。

珪藻土予備実験結果

一軸圧縮強度 kgf/cm²（含水比%）

①15.961kgf/cm²（126.7%）

②12.922 kgf/cm²（125.1%）

③16.110 kgf/cm²（125.5%）

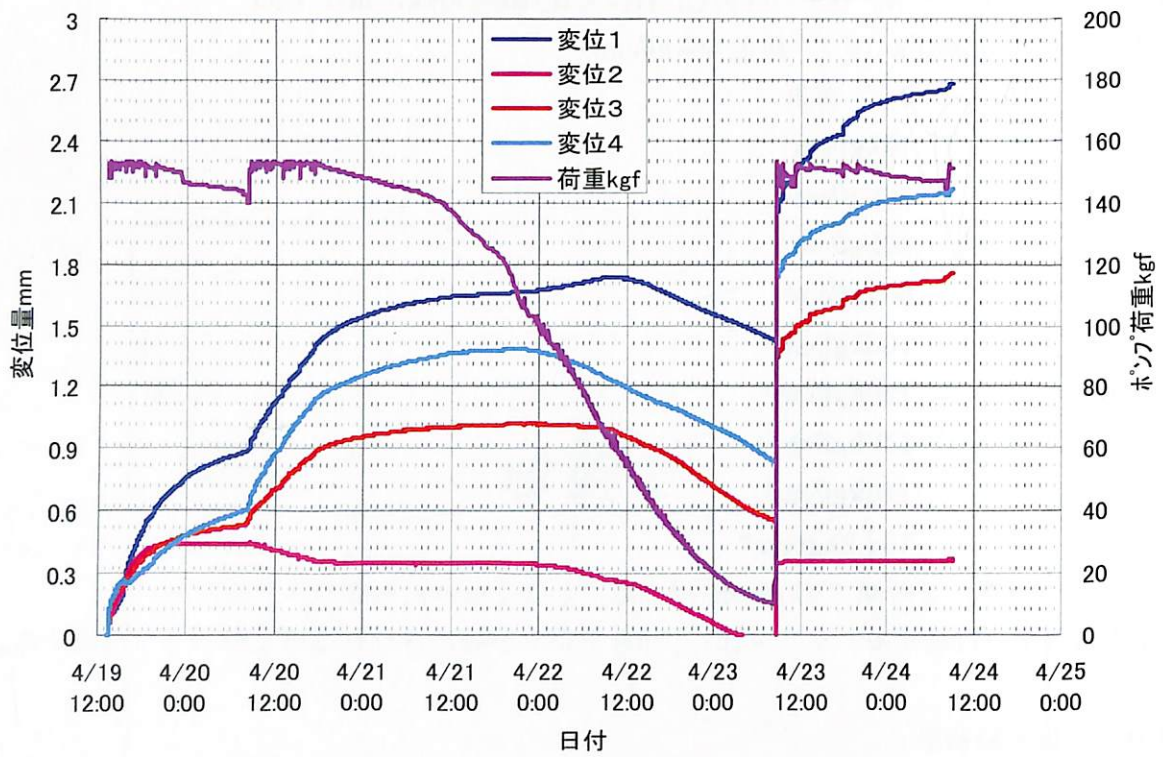
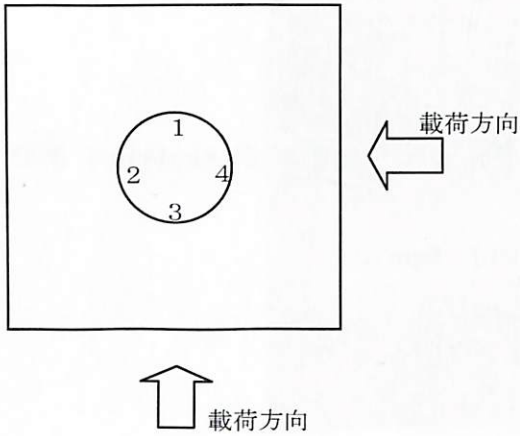
平均 14.998 kgf/cm²（125.8%）

珪藻土 気中乾燥後の一軸圧縮強度

①24.352kgf/cm²（9.1%）

実験結果

トンネル削孔後、内空変位計を設置した時点からの内空変位量の経時変化およびポンプ荷重の経時変化を併せて示す。4/20の夜から4/23の朝にかけては土日を含んでいるため、荷重の調整を実施していない。そのため荷重が低下している。



4/24 朝まで載荷を続け、一旦、トンネル内部を観察することとした。

その時の壁面状況は以下の通りであり、破壊していることが判明した。写真の番号は上記に示すように、載荷方向に対する壁面の位置を示す。



壁面 1



壁面 2



壁面 3



壁面 4

試験終了後、供試体をくさびを打ち込むことにより解体した状況を以下の写真に示す。

トンネルの周辺に、たまねぎの皮状に破片が残っているのが見られた。トンネル周辺での破壊が円周方向で起きていることを示唆している。また、破断面を観察すると、くさびを打ち込んだ付近で破断している面（引っ張りによる破断面と考えられる）と内部に存在していたクラックに沿って破断したと思われる面を比較すると、クラックに沿って破断したと考えられる面では、白っぽい破断面が見られ、せん断的な破壊が生じていた可能性がある。



模型実験人工供試体 配合設計

<使用材料>

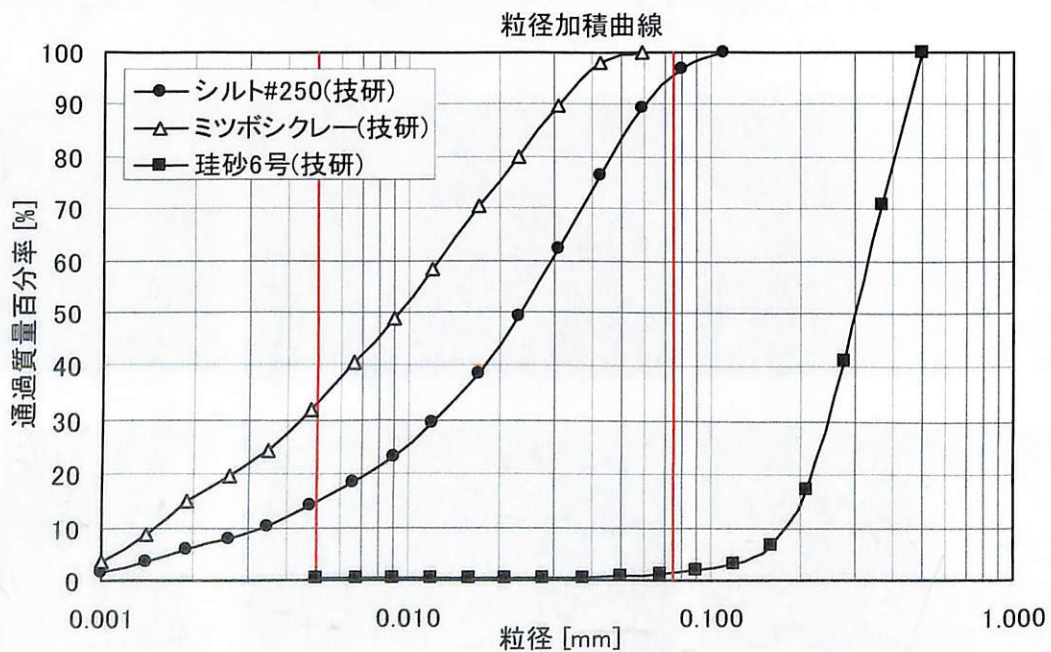
*ミツボシクレー : 矢橋工業株式会社 製

*シルト#250 : 丸中白土株式会社 製

<化学分析結果>

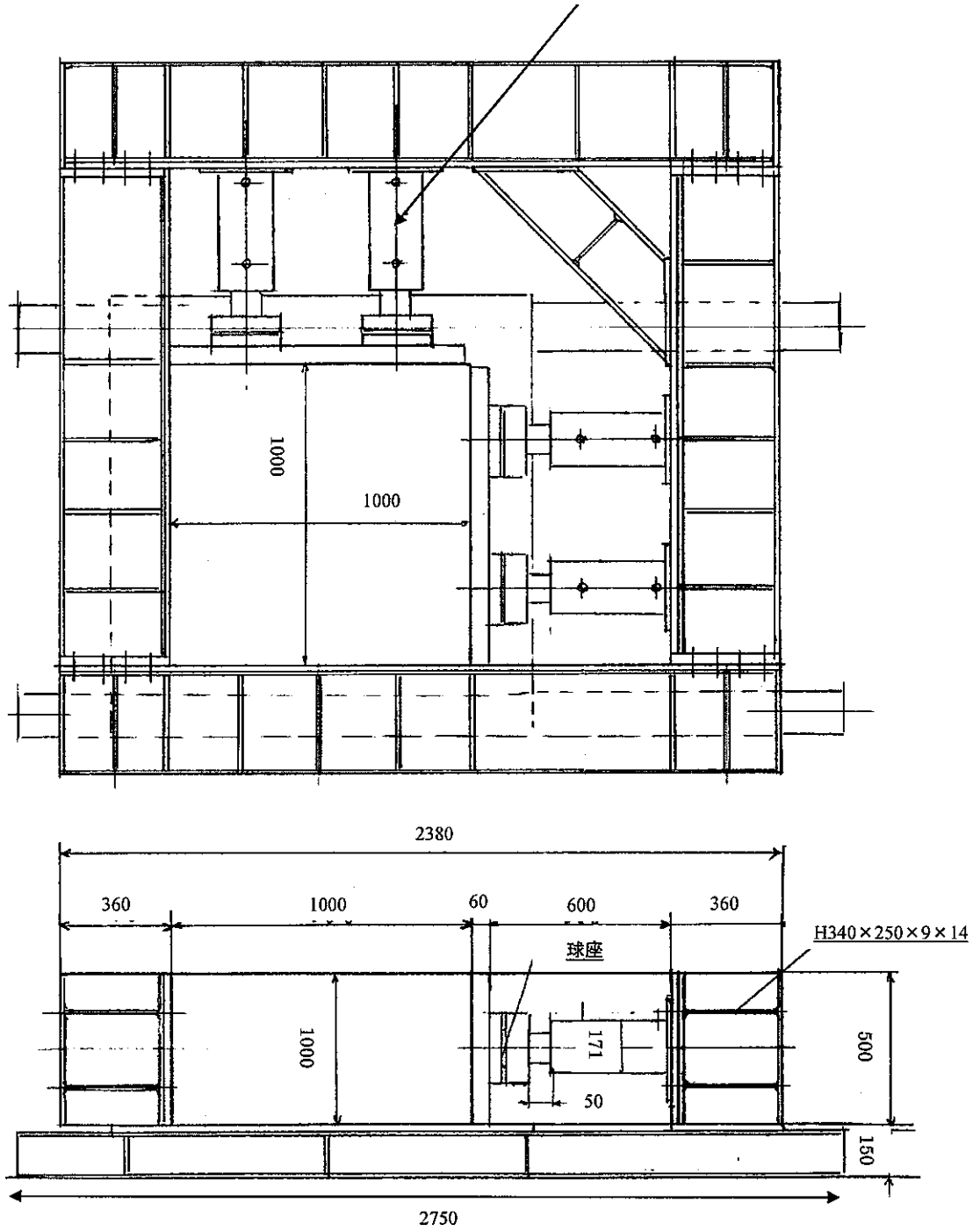
| 成分/品名 | ミツボシクレー (wt%) | シルト#250 (wt%) |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| SiO ₂ | 7.63 | 73.1 |
| Al ₂ O ₃ | 6.91 | 12.9 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.554 | 1.4 |
| CaO | 42.428 | 1.4 |
| MgO | 0.73 | 0.1 |
| K ₂ | — | 1.5 |
| Na ₂ O | — | 2.8 |
| SO ₃ | 0.002 | — |
| P ₂ O ₃ | 0.043 | — |
| Ig-loss | 38.357 | 6.8 |

<粒度分布>



模型実験載荷装置

油圧シリンダー: 100tf, ストローク150mm



<使用計器：高感度変位計>

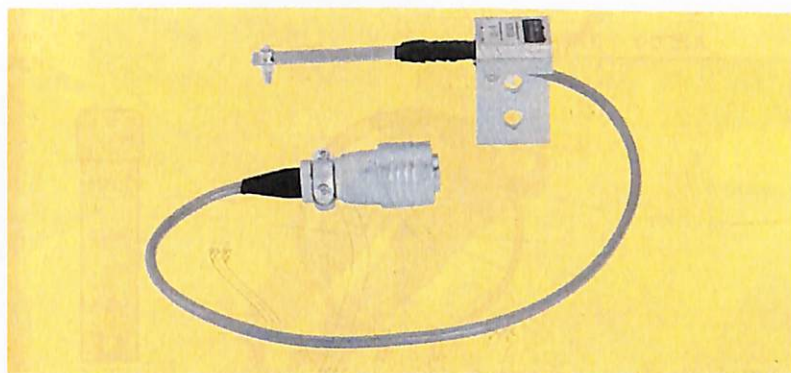


■仕様

| 型名 | CDP-10 | CDP-25 |
|------------------------------------|--|--|
| 容量 (mm) | 10 | 25 |
| 定格出力 | 5mV/V \pm 0.1% (10000 \times 10 ⁻⁶ \pm 0.1%) | 6.25mV/V \pm 0.1% (12500 \times 10 ⁻⁶ \pm 0.1%) |
| 感度 (\times 10 ⁻⁶ mm) | 1000 | 500 |
| 非直線性 | 0.1%RO | 0.1%RO |
| 測定力 | 3.4N (350gf) | 3.4N (350gf) |
| 応答周波数 (Hz) | 12 | 8 |
| 零点の温度影響 | 1 \times 10 ⁻⁶ / $^{\circ}$ C (0 \sim +40 $^{\circ}$ C) | 1 \times 10 ⁻⁶ / $^{\circ}$ C (0 \sim +40 $^{\circ}$ C) |
| 許容温度範囲 | 0 \sim +60 $^{\circ}$ C | 0 \sim +60 $^{\circ}$ C |
| 入出力抵抗 | 350 Ω | 350 Ω |
| 推奨印加電圧 | 2V 以下 | 2V 以下 |
| 許容印加電圧 | 10V | 10V |

【製品総合カタログ 2001-2002, p.148, 東京測器研究所 抜粋】

<使用計器：カンチレバ型変位計>



■仕様

| | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 型名 | CE-10 |
| 容量 (mm) | 10 |
| 定格出力 | 約 2.5mV/V (5000×10 ⁻⁶) |
| 感度 (×10 ⁻⁶ mm) | 約 500 |
| 非直線性 | 1%RO |
| 測定力 | 3.2N (330gf) |
| 応答周波数 (Hz) | 25 |
| 許容温度範囲 | 0～+40℃ |
| 入出力抵抗 | 350Ω |
| 推奨印加電圧 | 2V以下 |
| 許容印加電圧 | 10V |

【製品総合カタログ 2001-2002, p.157, 東京測器研究所 抜粋】

<使用計器：超小型圧力計>



■仕様

| | |
|--------|-------------------------------------|
| 型名 | PDA-1MPA |
| 容量 | 1MPa (10.2kgf/cm ²) |
| 定格出力 | 約 1mV/V (2000×10 ⁻⁶) |
| 非直線性 | 1%RO |
| ヒステリシス | 1%RO |
| 許容温度範囲 | -20～+70℃ (凍結の除く) |
| 入出力抵抗 | 350Ω |
| 推奨印加電圧 | 2V 以下 |
| 質量 | 約 0.1g |

【製品総合カタログ 2001-2002, p.216, 東京測器研究所 抜粋】



模型実験載荷装置 土圧計設置状況



模型実験載荷装置 供試体整形状況



模型実験载荷装置 供試体セット状況



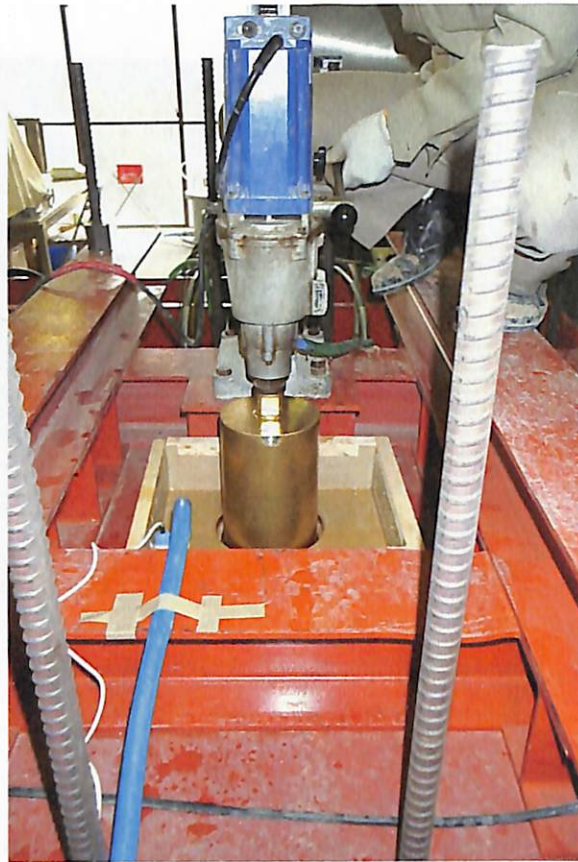
模型実験载荷装置 供試体設置状況



模型実験載荷装置 油圧ポンプおよび記録装置



模型実験載荷装置 載荷状況



模型実験載荷装置 トンネル掘削状況



模型実験載荷装置 トンネル壁面圧座状況



模型実験載荷装置 最終載荷・供試体破壊後



模型実験載荷装置 最終載荷・トンネル破壊状況



模型実験載荷装置 最終載荷・供試体破壊後（側面 A）



模型実験載荷装置 最終載荷・供試体破壊後（側面 B）



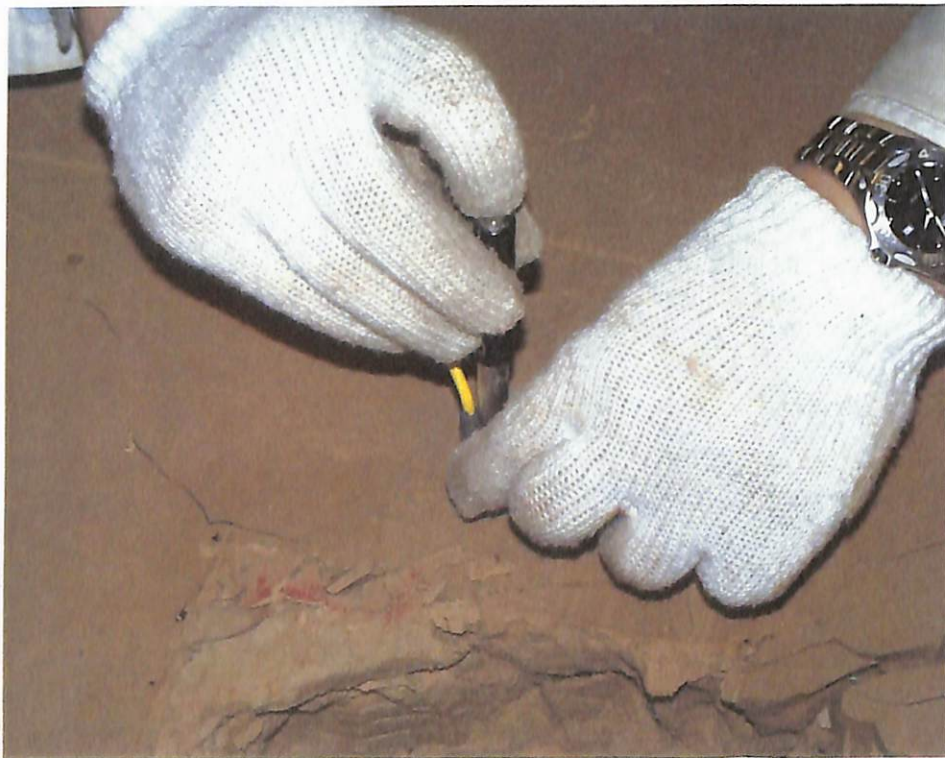
模型実験載荷装置 供試体解体状況



模型実験載荷装置 トンネル壁面状況



模型実験載荷装置 エコチップ試験状況①



模型実験載荷装置 エコチップ試験状況②



模型実験載荷装置 針貫入試験状況①



模型実験載荷装置 針貫入試験状況②