

# 軟岩の長期力学的変形挙動研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年1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)  
2003

軟岩の長期力学的変形挙動研究  
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

井上博之\*, 南浩輔\*

要旨

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、現実に忠実な評価が必要な人工バリアの境界条件であるニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を適切に評価することが重要である。

本研究では、長期力学的変形挙動評価の信頼性向上に資する目的で、1) 水理・温度条件をパラメーターとした大久保モデルを用いた幌延堆積岩の評価、2) 内圧が負荷されたニアフィールド岩盤挙動の把握を目的とした模型実験、3) 評価モデルに関する検討を行なった。

1) より、幌延堆積岩は乾湿繰返しに対して強度低下を起こし易く、乾燥後の浸水によって潜在亀裂に沿って割れるなど、小さな含水比の変化に対しても敏感に反応する可能性が示唆された。また、僅かな深度差でバラツキが発生する。このバラツキは一軸圧縮強度および大久保モデルの定数に誤差を与え破壊到達時間に大きく影響を及ぼす。

2) より、掘削の影響等により塑性変形が大きな箇所（トンネル近傍）では、周辺地山の応力状態の変化によって弾塑性領域の変化が理論通りに起こらない可能性が示された。

3) より、モデルでは簡易的に $m=n$ としているが、このことが予測と実際のクリープ時間に差を生じている要因の一つと考えられるため、今後ピーク強度以降のデータを収集し  $m/n$  を把握する必要がある。また、環境変化や応力状態の変化がある箇所のクリープ挙動を検討するには、一連の環境下での  $n$  を条件に合わせて変化できるモデルに改良する必要がある。

---

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

Research of Long-term Mechanical Displaced Behavior of Soft Rock  
(Document Prepared by Other Institute, Based on The Trust Contract)

Hiroyuki Inoue\*, Kosuke Minami\*

Abstract

When it thinks about a stratum disposition system of high-level radioactive waste, it is important to evaluate the long-term mechanical displaced behavior of the near field bedrock which is boundary condition of the engineered barrier that should be evaluated based on the reality.

In this research, three following examination was carried out for reliability improvement of long-term dynamic deformation behavior estimate.

1) We evaluated the sedimentary rock of Horonobe where we used Okubo model as while changing hydraulic condition and temperature condition.

2) We carried out the model experiment that inner pressure acted on in order to grasp a movement of near field bedrock.

3) We examined model to evaluate that.

As a result, the following things were provided.

1) Sedimentary rock of Horonobe is easy to cause strength degradation for being wet and dry cycles. When the rock is saturated after drying, it is broken along potential cracking. The rock reacts for a change of moisture content sensitively. In addition, a variation of the strength occurs in a little depth remainder. This diffuseness gave the strong influence on failure time.

2) Big plastic deformation may not do elasto-plasticity behavior according to theory for stress modification of rock mass.

3) We think with one of the factor that it produces remainder in prediction and real creep hour that there is as " $m = n$  (conatnt of Okubo model)" simply. Therefore we collect data after peak, and it is necessary to grasp " $m/n$ ". In addition, it is necessary to improve " $n$ " in the model which we can change by environment and stress state on the way.

---

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. ボーリングコアを用いた供試体試験	2
2. 1 ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験	3
2. 1. 1 試験の手順	3
2. 1. 2 試験装置	4
2. 1. 3 試験条件	5
2. 1. 4 データの解析方法	6
2. 1. 5 一軸圧縮試験の結果	10
2. 2 クリープ試験	31
2. 2. 1 試験の手順	31
2. 2. 2 試験装置	31
2. 2. 3 試験条件	33
2. 2. 4 データの解析方法	33
2. 2. 5 クリープ試験結果	34
2. 3 結果の考察・検討	42
3. 軟岩試料を用いた模型試験	47
3. 1 試験の手順	47
3. 2 試験装置	48
3. 3 試験条件	50
3. 4 模型実験の結果	51
3. 5 結果の考察・検討	57
4. モデルに関する検討	67
5. おわりに	69
参考文献	75
付 録	

## 表 目 次

表-2. 1	一軸圧縮試験の試験条件等	5
表-2. 2	$\alpha$ と $m/n$ の関係	9
表-2. 3	各試験前の各供試体の寸法および重量等	10
表-2. 4	完全飽和時含水比	11
表-2. 5	真空乾燥日数-含水比関係	11
表-2. 6	一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等	13
表-2. 7	クリープ試験の試験条件等	33
表-2. 8	設定する破壊到達時間の定義	34
表-2. 9	各試験前の各供試体の寸法および重量等	35
表-2. 10	クリープ試験結果一覧	35
表-2. 11	実測の寿命と大久保モデルでの寿命	42
表-2. 12	一軸圧縮試験結果による大久保モデルの定数の算出	43
表-3. 1	模型装置仕様	48
表-3. 2	トンネル掘削前の載荷応力を保持した2期間の単位時間変形量	58
表-3. 3	模型実験終了時側方変位	58

## 目 次

図-2.1	軟岩試料を用いたクリープ試験手順	2
図-2.2	ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験の手順	3
図-2.3	一軸圧縮試験概要図	4
図-2.4	一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の1例	7
図-2.5	応力-ひずみ曲線から $m$ を求めるときの考え方	8
図-2.6	弾性波計測結果	10
図-2.7	稚内層硬質泥岩真空乾燥履歴	12
図-2.8	一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線(飽和条件)	15
図-2.9	一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線(80°C条件)	16
図-2.10	一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線(乾燥条件)	17
図-2.11(a)	応力-ひずみ曲線(No.6)	18
図-2.11(b)	応力-ひずみ曲線(No.7)	19
図-2.11(c)	応力-ひずみ曲線(No.17)	20
図-2.12(a)	応力-ひずみ曲線(No.9)	21
図-2.12(b)	応力-ひずみ曲線(No.10)	22
図-2.12(c)	応力-ひずみ曲線(No.11)	23
図-2.13(a)	応力-ひずみ曲線(No.12)	24
図-2.13(b)	応力-ひずみ曲線(No.14)	25
図-2.13(c)	応力-ひずみ曲線(No.16)	26
図-2.14	応力-ひずみ曲線(飽和条件)	27
図-2.15	応力-ひずみ曲線(80°C条件)	28
図-2.16	応力-ひずみ曲線(乾燥条件)	29
図-2.17	時間依存性の指標 $n$ と延性・ぜい性の指標 $\alpha$ の関係	30
図-2.18	クリープ試験試験手順	31
図-2.19	クリープ試験概要図	32
図-2.20(a)	経過時間-変位曲線(飽和条件)	36
図-2.20(b)	経過時間-荷重曲線(飽和条件)	36
図-2.20(c)	経過時間-ひずみ速度曲線(飽和条件)	37
図-2.20(d)	経過時間-ひずみ速度曲線(飽和条件) <クリープ曲線>	37
図-2.21(a)	経過時間-変位曲線(80°C条件)	38
図-2.21(b)	経過時間-荷重曲線(80°C条件)	38
図-2.21(c)	経過時間-ひずみ速度曲線(80°C条件)	39
図-2.21(d)	経過時間-ひずみ速度曲線(80°C条件) <クリープ曲線:理論値のみ>	39

図-2. 2 2 (a)	経過時間-変位曲線 (乾燥条件)	4 0
図-2. 2 2 (b)	経過時間-荷重曲線 (乾燥条件)	4 0
図-2. 2 2 (c)	経過時間-ひずみ速度曲線 (乾燥条件)	4 1
図-2. 2 2 (d)	経過時間-ひずみ速度曲線 (乾燥条件) <クリープ曲線>	4 1
図-2. 2 3	時間依存性の指標 $n$ と延性・ぜい性の指標 $\alpha$ の関係	4 4
図-3. 1	模型実験フロー図	4 7
図-3. 2	測定項目位置図	4 8
図-3. 3	模型実験概念図	4 9
図-3. 4	試験体含水比経時変化	5 0
図-3. 5	試験体一軸圧縮強度経時変化	5 0
図-3. 6	Kastner の式による内部応力分布図	5 1
図-3. 7	載荷応力経時変化図	5 3
図-3. 8	側方変位量経時変化図	5 4
図-3. 9	内部応力経時変化図 ( $\sigma_r$ )	5 5
図-3. 1 0	内部応力経時変化図 ( $\sigma_\theta$ )	5 6
図-3. 1 1	トンネル掘削中内部応力変化	6 0
図-3. 1 2	静水圧的地山応力のもとでの円形トンネル周囲の弾塑性応力状態 <トンネル掘削時: 内圧=0>	6 1
図-3. 1 3	静水圧的地山応力のもとでの円形トンネル周囲の弾塑性応力状態 <トンネル掘削時: 内圧=1qu>	6 1
図-3. 1 4	エコーチップ測定結果	6 4
図-3. 1 5	針貫入試験および密度試験結果	6 4
図-3. 1 6	平成14年針貫入試験結果	6 5

写 真 目 次

写真-2. 1	一軸圧縮試験試験状況	4
写真-2. 2	真空乾燥2日後浸水	12
写真-2. 3	クリープ試験機	32
写真-3. 1	装置設置状況	49
写真-3. 2	クラック観察	63
写真-3. 3	解体時トンネル表面	63



## 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、現実に忠実な評価が必要な人工バリアの境界条件であるニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動を適切に評価することが重要である。

核燃料サイクル開発機構では、ニアフィールド環境を模擬した条件下での供試体試験をこれまで実施してきた。その結果、温度条件や含水条件はニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動に影響を及ぼすことが推測された。しかし、これらは限られたデータでの結果である。

今後、室内実験、原位置試験、モデル開発を通じ、ニアフィールド環境を模擬した条件が、ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動に与える影響を適切に評価する必要がある。

本研究は、上記目的の遂行のため、幌延地域で採取されたボーリングコアを用いて、供試体試験を実施し、ニアフィールド環境を模擬した条件が長期力学的変形挙動に及ぼす影響について検討するとともに、幌延における原位置試験計画に資する目的で、ニアフィールドの模型実験を実施するものである。

## 2. ボーリングコアを用いた供試体試験

評価手法の信頼性向上，データ蓄積に資するため，ニアフィールド環境を模擬した条件下での供試体試験を実施し，ニアフィールド環境を模擬した条件が，供試体の強度，変形特性およびクリープモデルの定数に及ぼす影響について大久保モデル<sup>1)</sup>を用いた評価を実施する。

供試体は，幌延地域で採取されたボーリングコアを用いる。

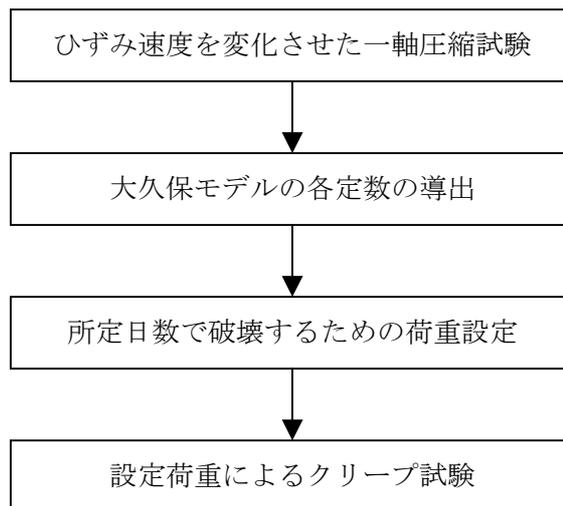
- ・ 供試体 : 幌延地域で採取されたボーリングコア (HDB-1 孔)

- ・ 試験数量 :

一軸圧縮試験	室温，完全飽和条件	3
	80℃，完全飽和条件	3
	室温，乾燥条件	3
一軸クリープ試験	一軸圧縮試験と同じ 3 条件	3
合計		12

ボーリングコア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。



図ー 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。

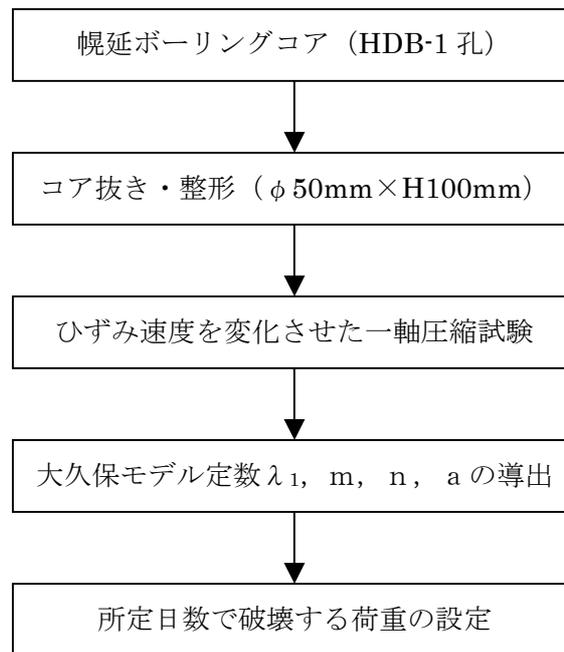


図- 2. 2 ひずみ速度を変化させた一軸圧縮試験の手順

## 2. 1. 2 試験装置

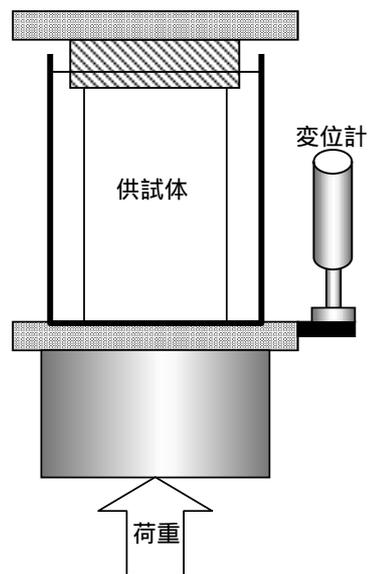
試験装置は、岩石三軸圧縮試験機（サーボコントロール方式）型式 T0-20-3（坂田電機株式会社製造）を用い、ひずみ速度制御方式で実験を行った。

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 5tf, 20tf）

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	幌延堆積岩 (HDB - 1 孔)
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。 ※大久保モデルの定数nを求める目的で実施した。
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、その後、各条件に合わせて供試体を設定した。 室温, 完全飽和条件・・・真空飽和後, 飽和状態を維持 80℃, 完全飽和条件・・・真空飽和後, 24 時間以上の 80℃保温を実施 室温, 乾燥条件・・・真空飽和後, 1 週間の真空乾燥を実施 ※飽和, 試験には純水を使用
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	各条件 3 供試体
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 5tf, 20tf) 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。<sup>1)</sup>

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

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

$\sigma$  : 載荷応力

$\varepsilon$  : 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= $\lambda_1$
- 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 $\sigma$ と $\varepsilon$ 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、 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $a$  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。

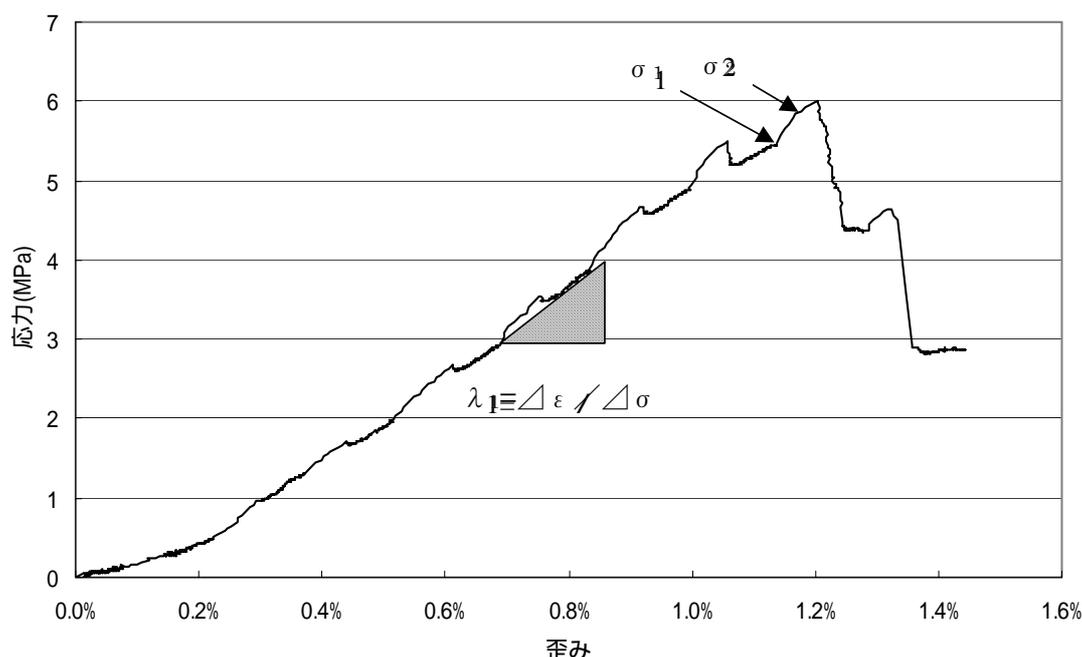


図-2.4 一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の1例

1)初期コンプライアンス ( $\lambda_1$ ) について<sup>2)</sup>

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<sup>3)</sup>

一軸圧縮強度と  $n$  の間には式(4)が成り立つ。

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

ただし、 $\sigma_v$ : 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り、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、 $\sigma_1$ ：ひずみ速度を上げる直前の応力

$\sigma_2$ ：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<sup>2)</sup>

$m$  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 =  $\theta$ ，ピーク強度以降の傾き =  $\alpha'$  として式(6)で表される  $\alpha$  を求める。

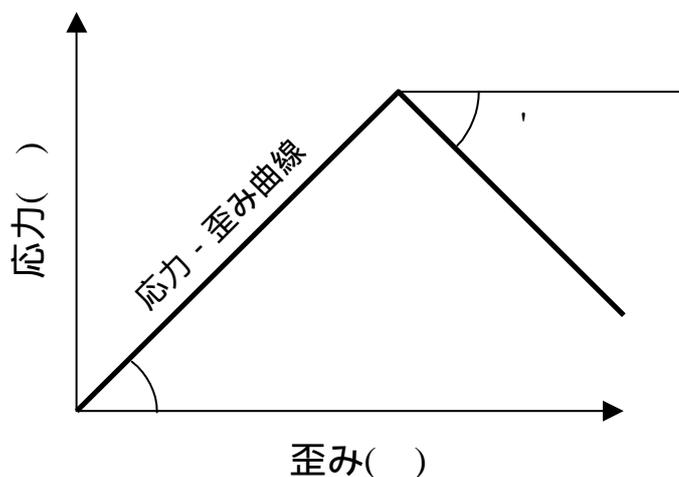


図-2. 5 応力-ひずみ曲線から  $m$  を求めるときの考え方

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

このようにして求めた  $\alpha$  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  $\alpha$  と  $m/n$  の関係

$\alpha$	$m/n$
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、 $\alpha$  は 90 度付近であるため  $m/n=1$  となる。

#### 4)a について<sup>2)</sup>

上記 1)~3) で求めた  $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$  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  $\sigma_v$  より、 $a$  は式(7)で表される。

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

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、破壊到達時間  $t_c$  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、 $a$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\lambda_1$  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、载荷応力  $\sigma_1$  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 1 週間としたときの载荷応力を算定し、設定荷重とした。

2. 1. 5 一軸圧縮試験の結果

(1) 供試体の寸法および重量

試験前の各供試体の寸法および重量等を表-2.3に示す。

また、供試体寸法測定時に実施した弾性波計測結果を図-2.6に示す。幌延深地層研究センターで実施された室内物理・力学試験結果（HDB-1孔）では、深度500m付近においてP波速度は2.0km/sec程度、S波速度は0.8km/sec程度である。

表-2.3 各試験前の各供試体の寸法および重量等

試験条件	供試体番号	深度 [m]	寸法		重量
			直径	高さ	試験前
			[cm]	[cm]	[gf]
飽和	No.6	512.6	4.928	10.569	377.6
	No.7	513.0	4.997	10.595	386.5
	No.17	515.5	4.992	8.938	334.5
80°C	No.9	513.3	5.000	10.660	383.5
	No.10	514.0	4.997	10.247	369.9
	No.11	514.3	4.982	10.797	390.6
乾燥	No.12	514.4	4.977	10.733	328.2
	No.14	515.0	4.973	10.335	328.2
	No.16	515.4	4.975	10.609	337.0

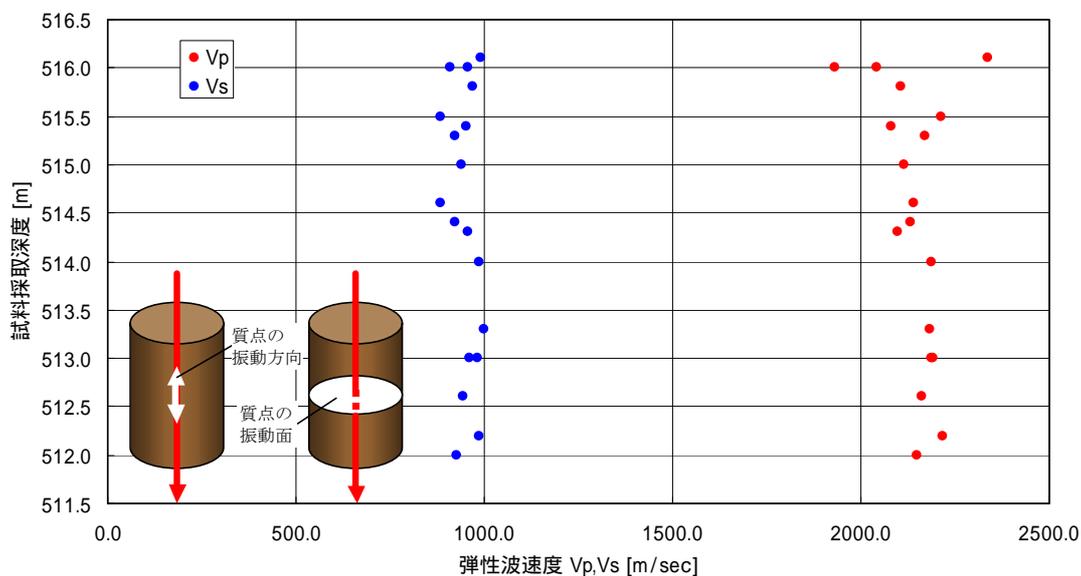


図-2.6 弾性波計測結果

## (2) 供試体の乾燥条件

今回、供試体の乾燥を実施するにあたり、事前に岩片試料を用いて真空乾燥、気中乾燥および乾湿繰返しを実施した。幌延堆積岩の完全飽和時含水比を表-2.4、乾湿繰返しおよび真空乾燥結果を表-2.5、図-2.7に示す。

表-2.5、写真-2.2から分かる通り、幌延堆積岩は乾湿繰返しに対して強度低下を起し易く、乾燥後浸水すると潜在亀裂に沿って割れることが多い。また、小さな含水比の変化に対しても敏感に反応することがわかった。この結果から、真空乾燥が悪影響を及ぼしている可能性を考え恒温室による気中乾燥を実施したが、真空乾燥と同様の結果となった。幌延堆積岩は透水係数は低いが多孔質で非常に乾き易いという性質を持っていると推測される。

本研究では、上記結果を踏まえたうえ供試体が絶乾状態にならないよう乾燥日数を1週間程度として試験を実施した。

表-2.4 完全飽和時含水比

岩片 No.1 含水比 [%]	岩片 No.2 含水比 [%]	岩片 No.3 含水比 [%]
25.913	27.201	25.088
平均値 : 26.067		

表-2.5 真空乾燥日数-含水比関係

乾燥日数 \ 岩片	No.4 含水比 [%]	No.5 含水比 [%]	No.6 含水比 [%]	No.7 含水比 [%]	No.8 含水比 [%]	No.9 含水比 [%]	No.10 含水比 [%]
飽和状態	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1
1day	22.3	22.9	23.3	22.3	23.1	23.3	23.5
2day	19.6	20.8	20.9	19.6	20.8	20.7	20.9
3day	浸水直後 破壊	18.5	18.4	17.1	18.3	17.8	18.1
4day		浸水直後 破壊	16.3	15.4	16.3	15.5	16.0
5day			浸水直後 破壊	—	—	—	—
6day				—	—	—	—
7day		浸水直後 破壊	9.8	10.8	10.5	11.1	
8day			浸水直後 破壊	8.9	8.2	9.2	
9day			8.0	7.1	8.2		

※飽和状態での含水比を 26.1%とした場合の各段階での含水比

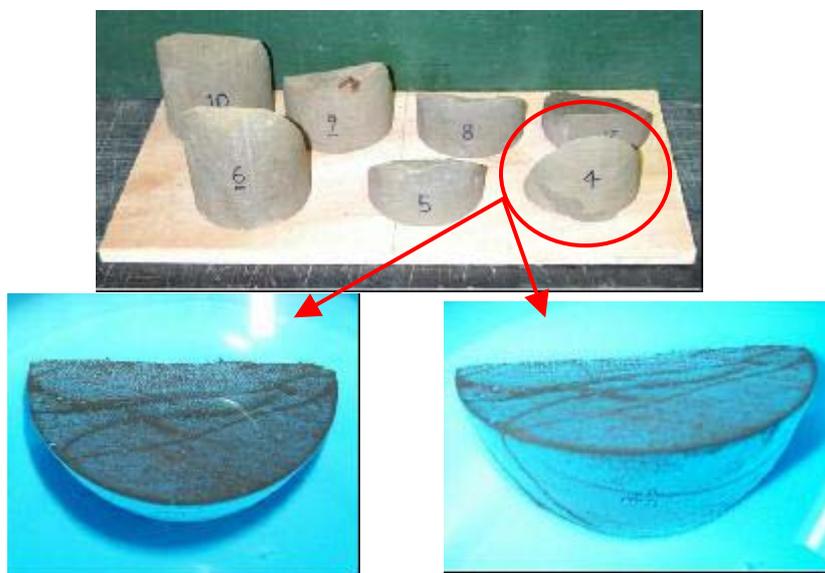


写真- 2. 2 真空乾燥2日後浸水

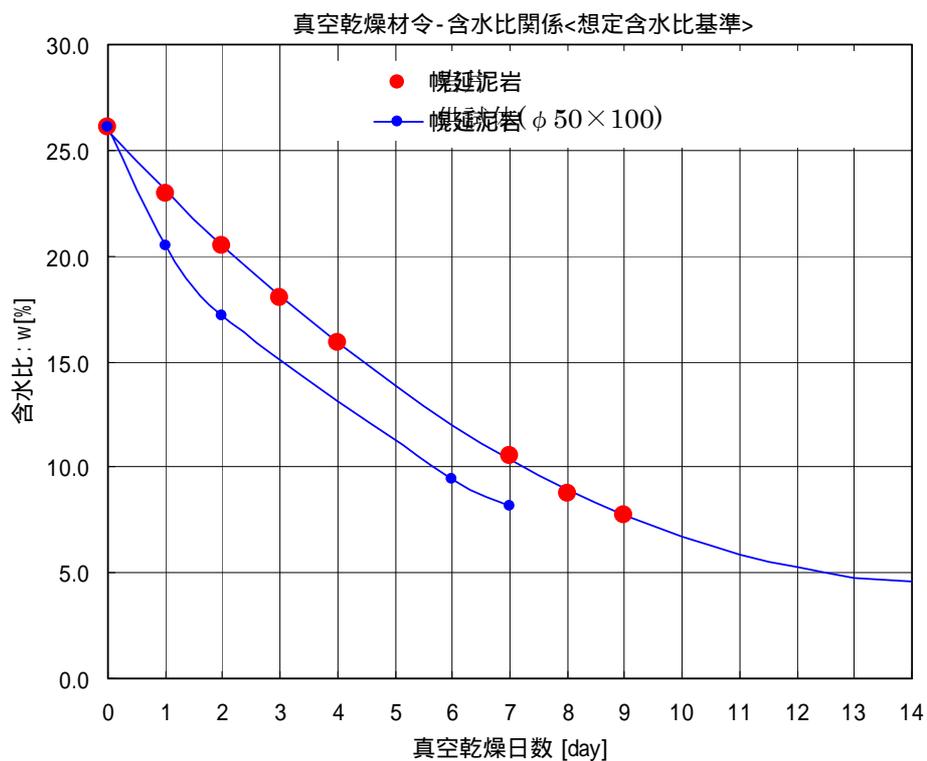


図- 2. 7 幌延堆積岩真空乾燥履歴

## (3) 一軸圧縮試験結果

図-2. 8～10に一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線（飽和条件・80℃条件・乾燥条件）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. 11～13に試験条件毎（飽和条件・80℃条件・乾燥条件）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乖離はあるものの、概略的には整合のとれたものであることがわかる。

図-2. 14～16に、試験条件毎（飽和条件・80℃条件・乾燥条件）の応力ひずみ曲線をまとめたものを示す。初期コンプライアンス $\lambda_1$ は試験条件毎に大別してみるとバラツキ幅はあるものの同様な傾向を示している。しかし、供試体により一軸圧縮強度、破壊ひずみのバラツキが大きいことが分かる。

表-2. 6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 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\sigma_v$ 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 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ で算定している。

表-2. 6 一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等

試験条件	供試体番号	$\lambda_1$ [1/MPa]	$n$ [-]	$m$ [-]	$a$ [MPa·sec]	$\alpha$ [°]	$\sigma_v$ [MPa]
飽和	No.6	0.00066	31	31	$1.02 \times 10^{56}$	88.65	14.524
	No.7	0.00075	25	25	$1.94 \times 10^{45}$	83.94	11.366
	No.17	0.00101	44	44	$4.02 \times 10^{82}$	90.00	9.382
平均		<b>0.00081</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b><math>1.89 \times 10^{60}</math></b>	<b>87.53</b>	<b>11.757</b>
80℃	No.9	0.00063	45	45	$2.17 \times 10^{75}$	87.50	23.881
	No.10	0.00068	41	41	$1.63 \times 10^{72}$	84.87	17.474
	No.11	0.00090	64	64	$7.62 \times 10^{121}$	79.17	10.990
平均		<b>0.00074</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b><math>8.22 \times 10^{87}</math></b>	<b>83.84</b>	<b>17.448</b>
乾燥	No.12	0.00054	50	50	$7.11 \times 10^{92}$	90.00	18.770
	No.14	0.00049	40	40	$8.33 \times 10^{73}$	90.00	19.579
	No.16	0.00052	93	93	$2.74 \times 10^{161}$	86.87	29.657
平均		<b>0.00052</b>	<b>61</b>	<b>61</b>	<b><math>7.74 \times 10^{110}</math></b>	<b>88.96</b>	<b>22.669</b>

$\lambda_1$  : 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 $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$  から算出している）

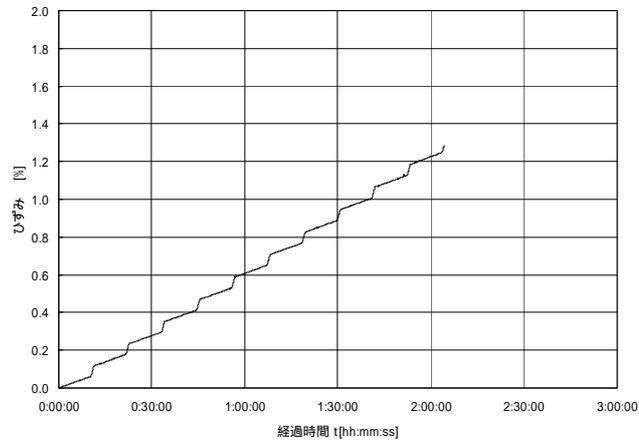
$\sigma_v$  : 一軸圧縮強度

表-2. 6より、大久保定数（ $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $a$ ）および一軸圧縮強度（ $\sigma_v$ ）には大きなバラツキがみられる。この理由として、供試体に含まれる潜在クラックおよび混入物等が影響を及ぼしていると考えられる。このことは、同一試験条件下において1.5倍以上（最大

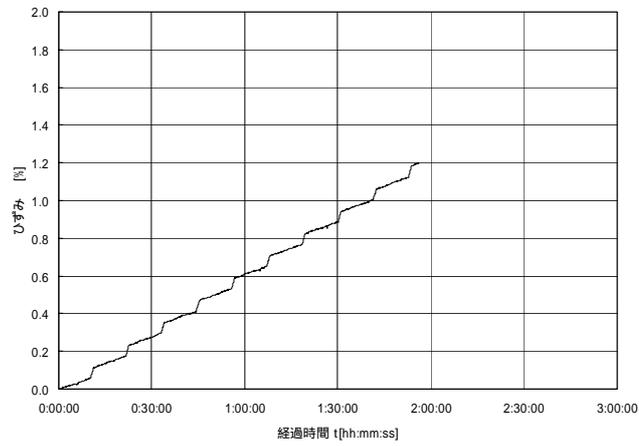
2.2 倍) の一軸圧縮強度差が見られることから分かる。

今回の試験では供試体としてボーリングコアを用いたが、コア抜き・整形時に供試体が破損することが多くみられ、均一な供試体を得るには非常に難しい状態であった。

[No.6 供試体]



[No.7 供試体]



[No.17 供試体]

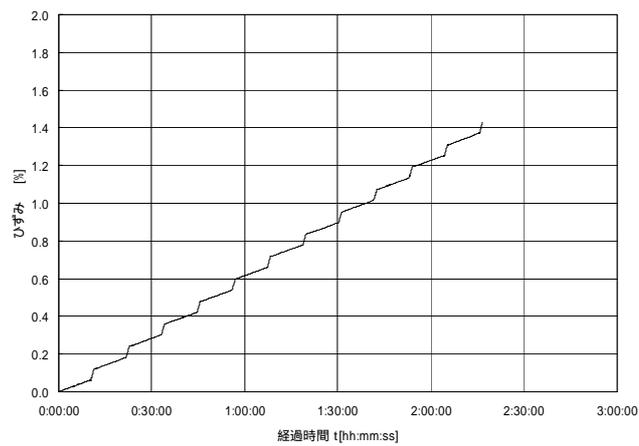
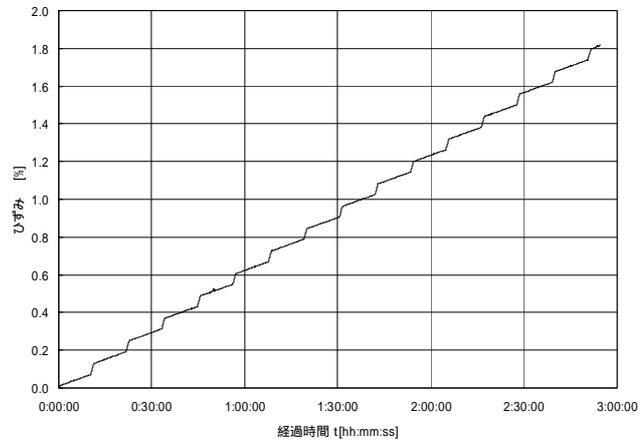
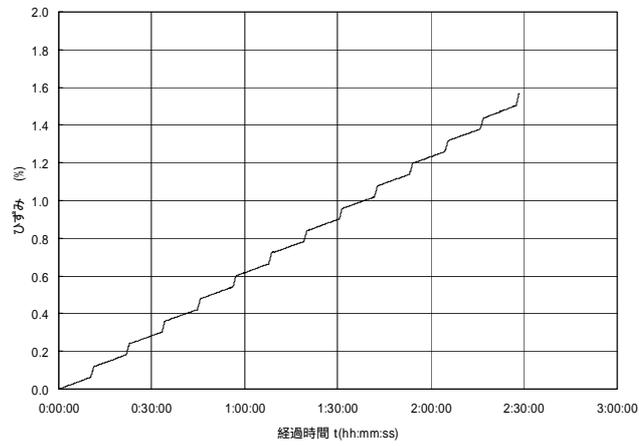


図-2. 8 一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線 (飽和条件)

[No.9 供試体]



[No.10 供試体]



[No.11 供試体]

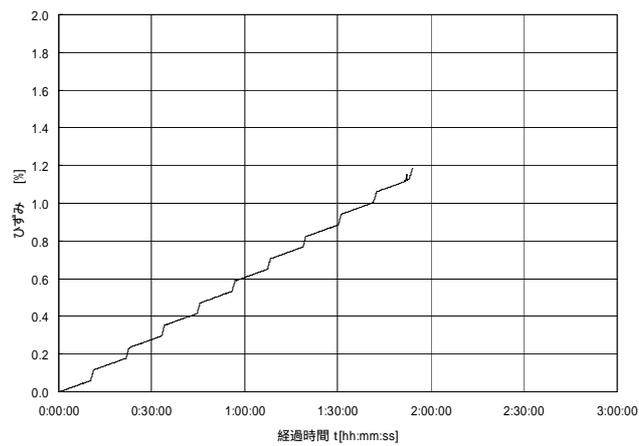
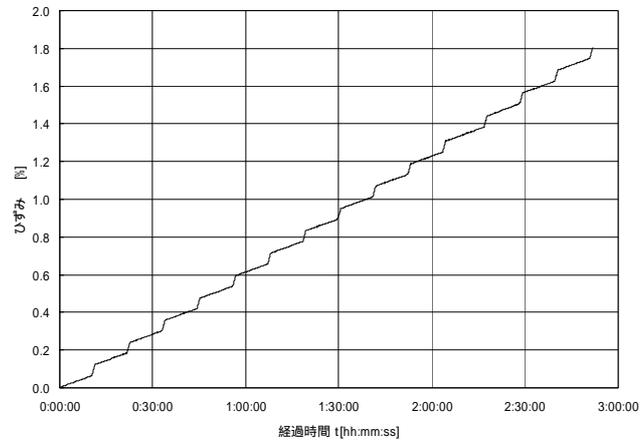
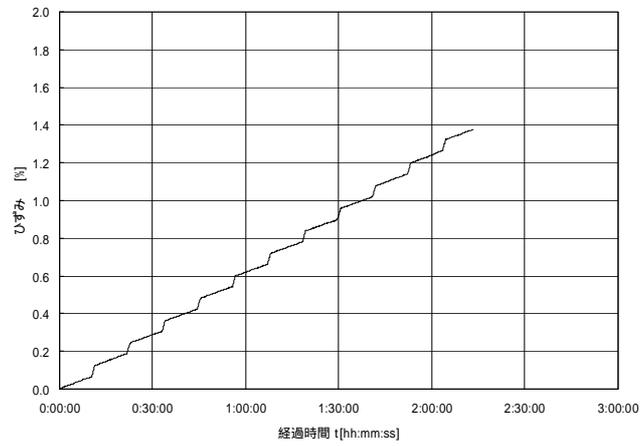


図-2. 9 一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線 (80°C条件)

[No.12 供試体]



[No.14 供試体]



[No.16 供試体]

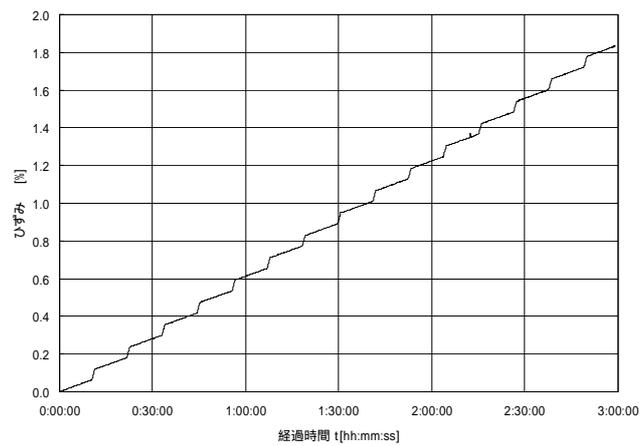


図-2. 10 一軸圧縮試験時の時間-ひずみ曲線 (乾燥条件)

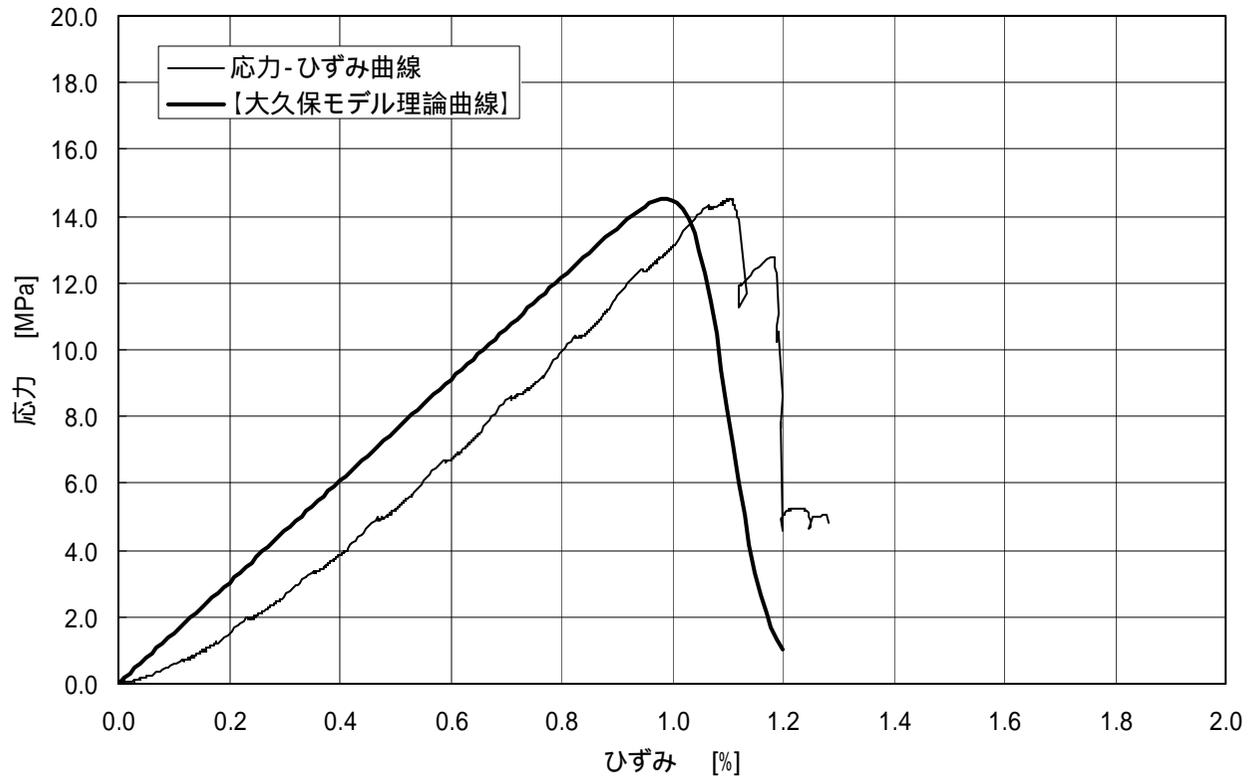


図-2. 1 1 (a) 応力-ひずみ曲線 (No. 6)

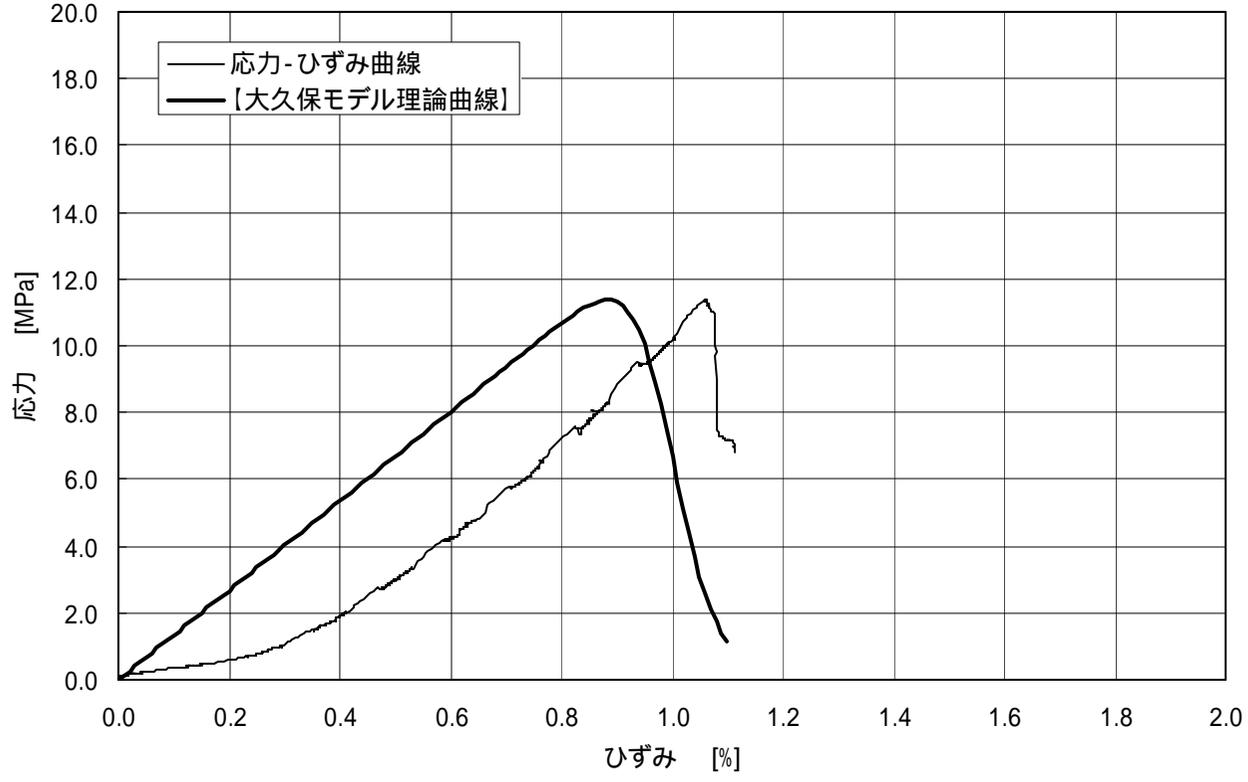


図-2. 1 1 (b) 応力-ひずみ曲線 (No.7)

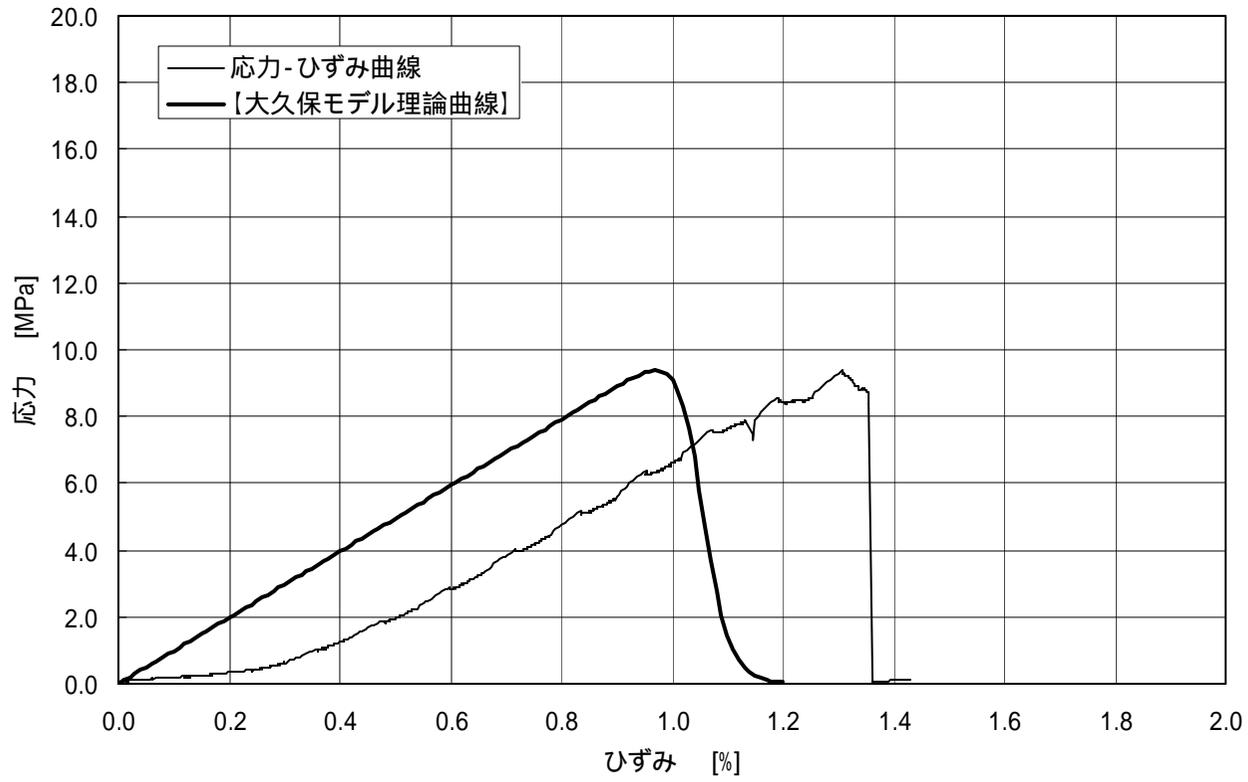


図-2. 1 1 (c) 応力-ひずみ曲線 (No.17)

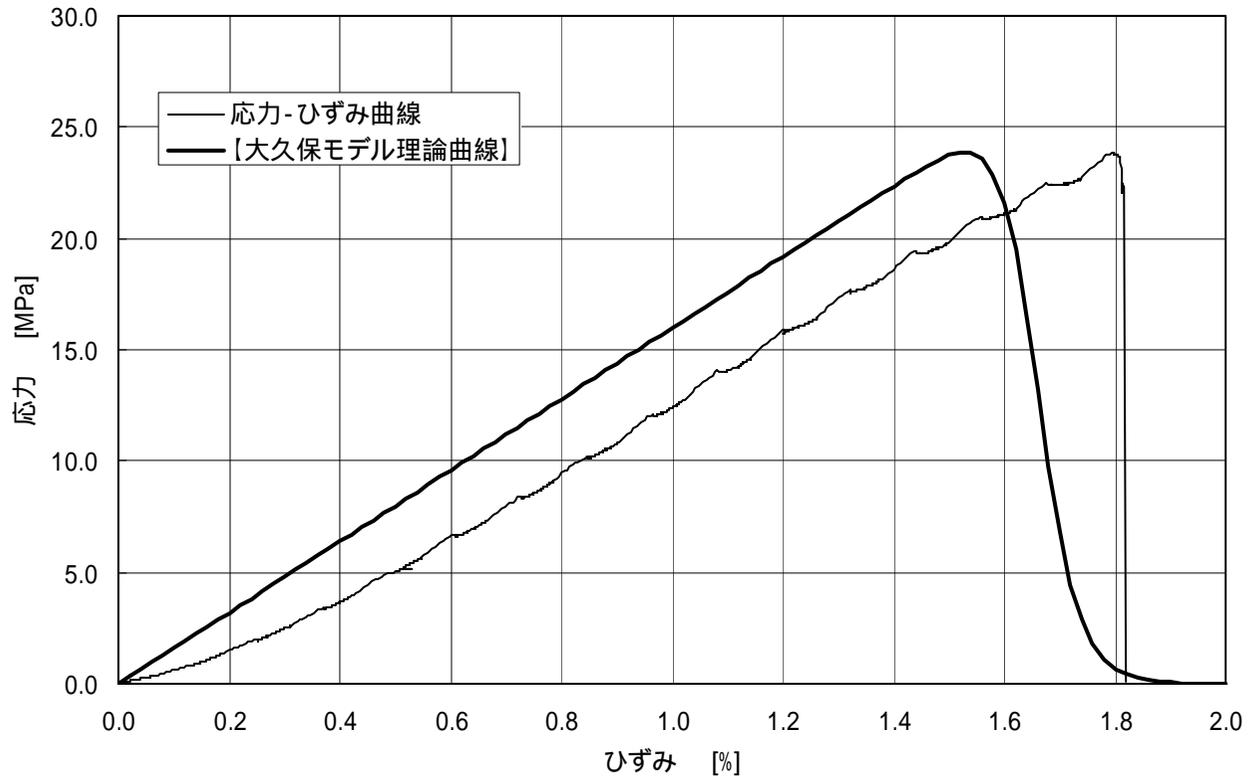


図-2. 1 2 (a) 応力-ひずみ曲線 (No.9)

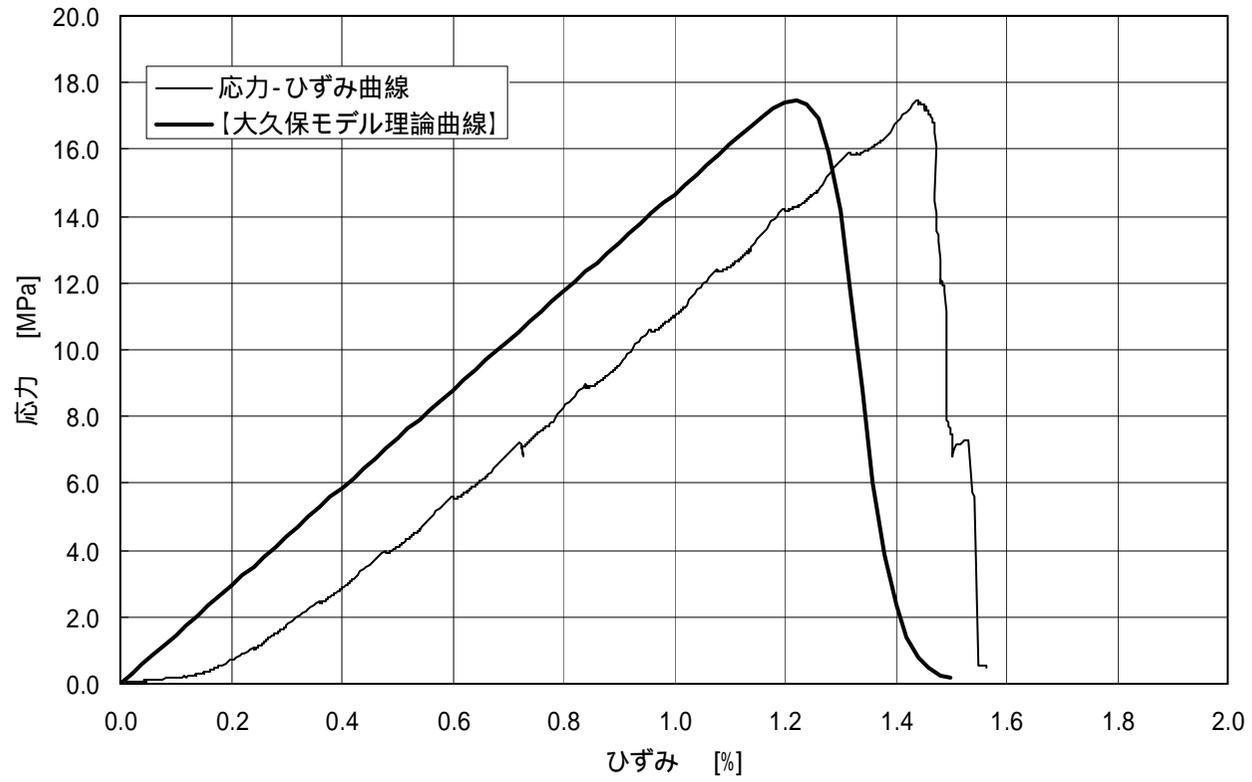


図-2. 1 2 (b) 応力-ひずみ曲線 (No.10)

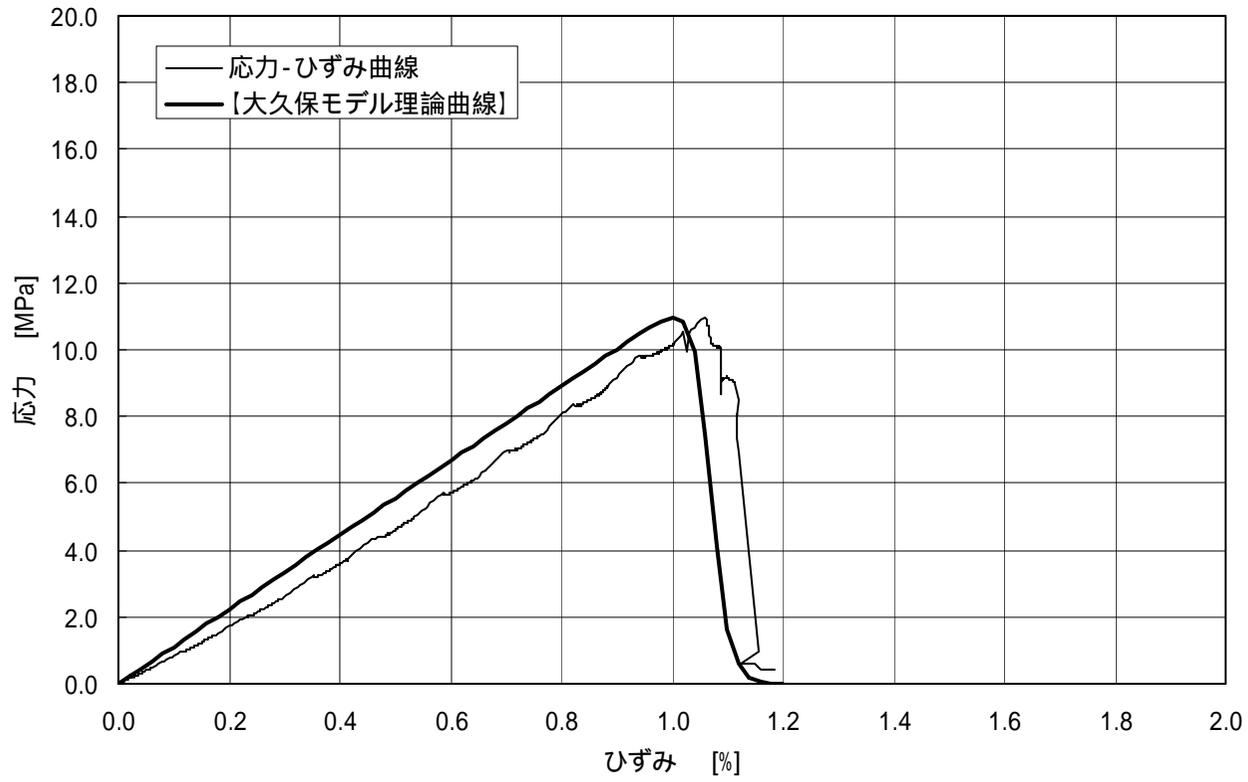


図-2. 1 2 (c) 応力-ひずみ曲線 (No.11)

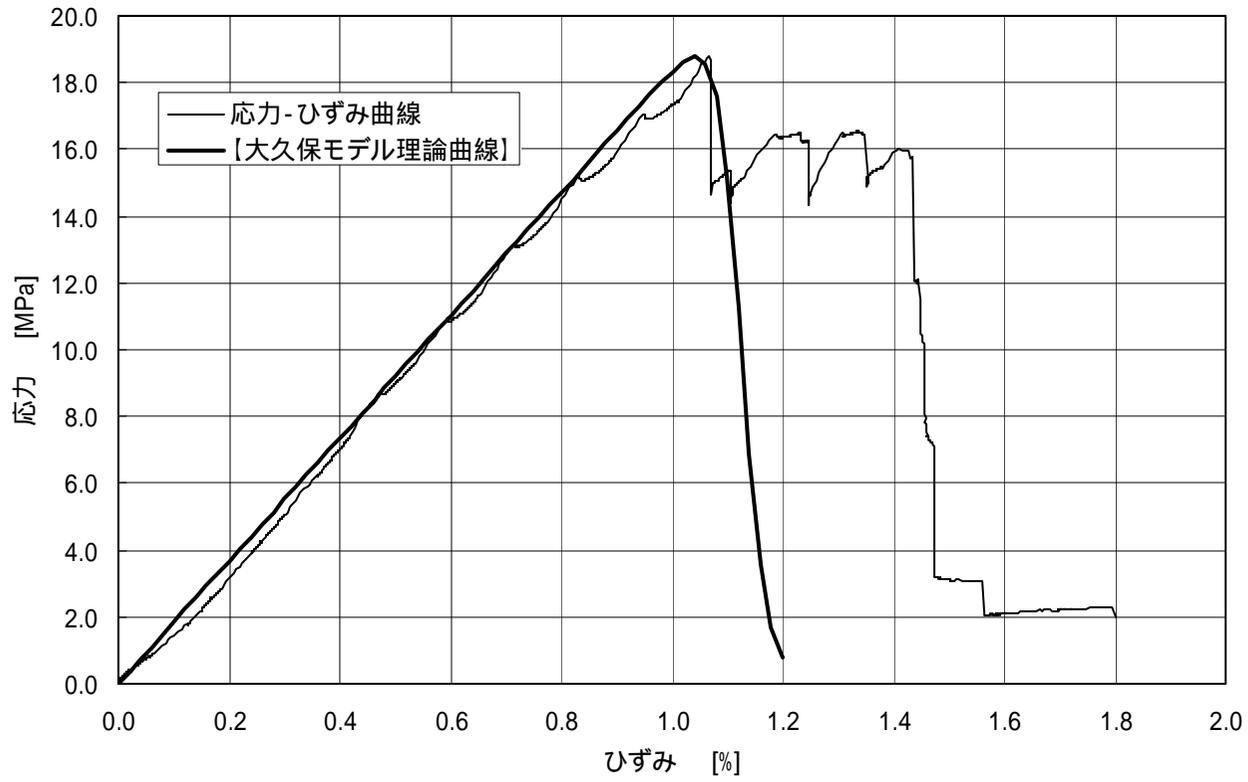


図-2. 13 (a) 応力-ひずみ曲線 (No.12)

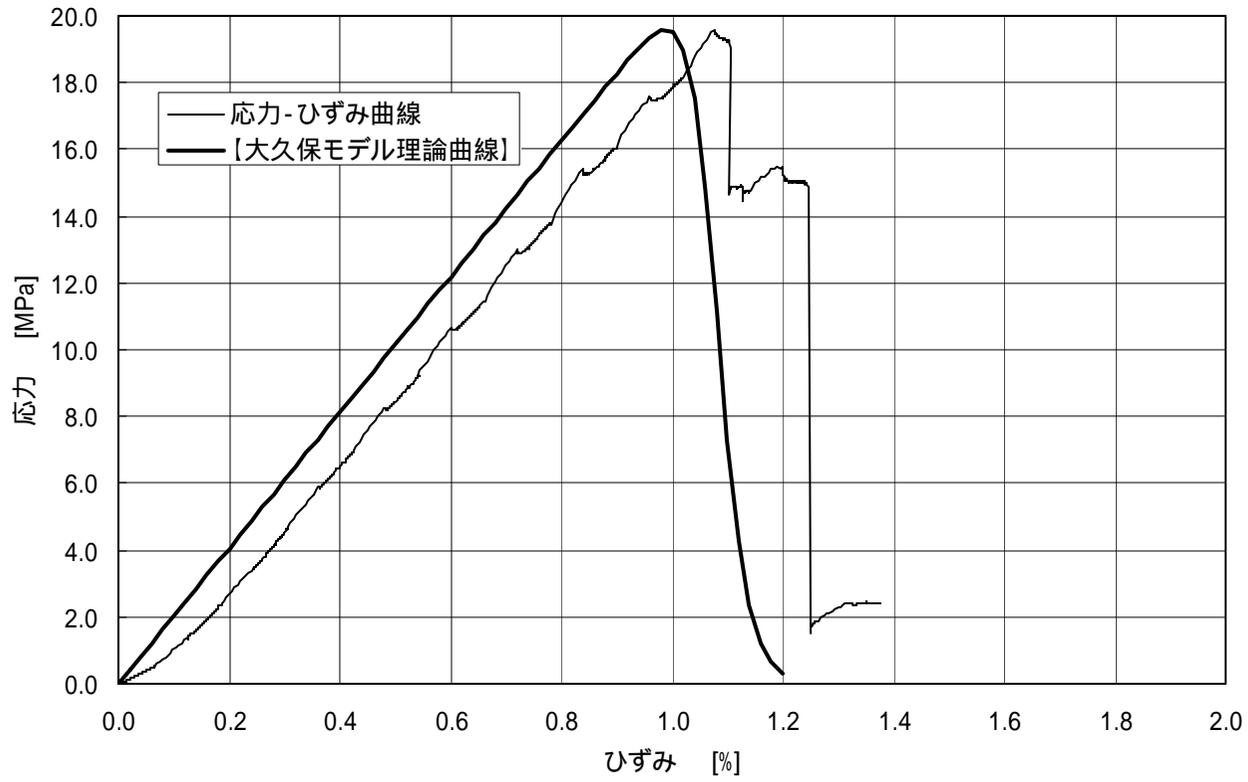


図-2. 13 (b) 応力-ひずみ曲線 (No.14)

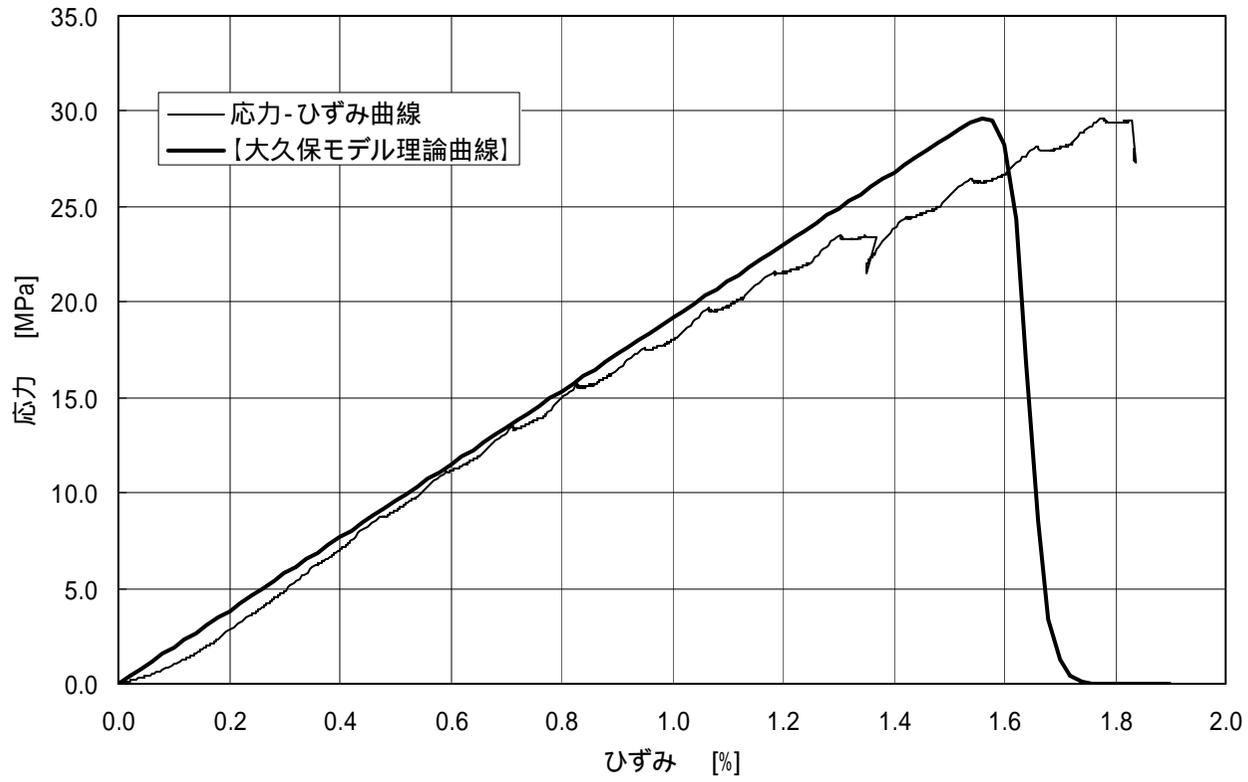


図-2. 13 (c) 応力-ひずみ曲線 (No.16)

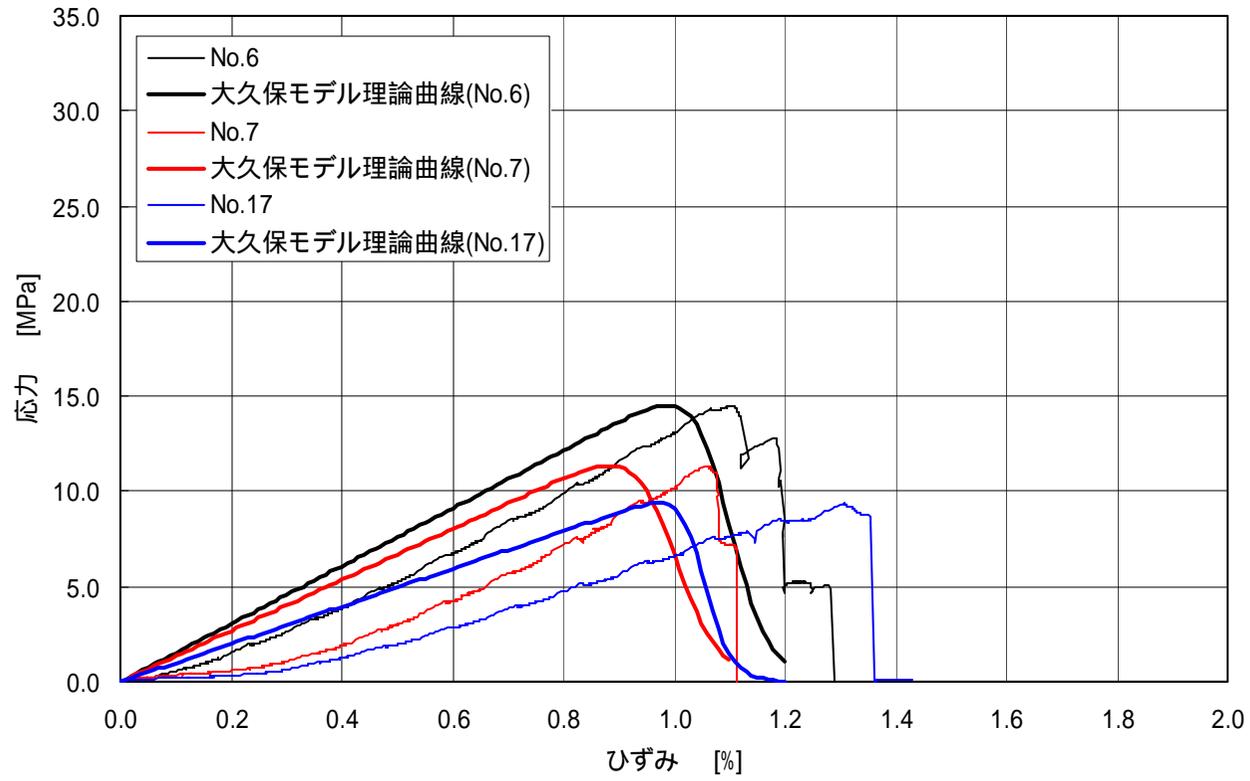


図-2. 14 応力—ひずみ曲線 (飽和条件)

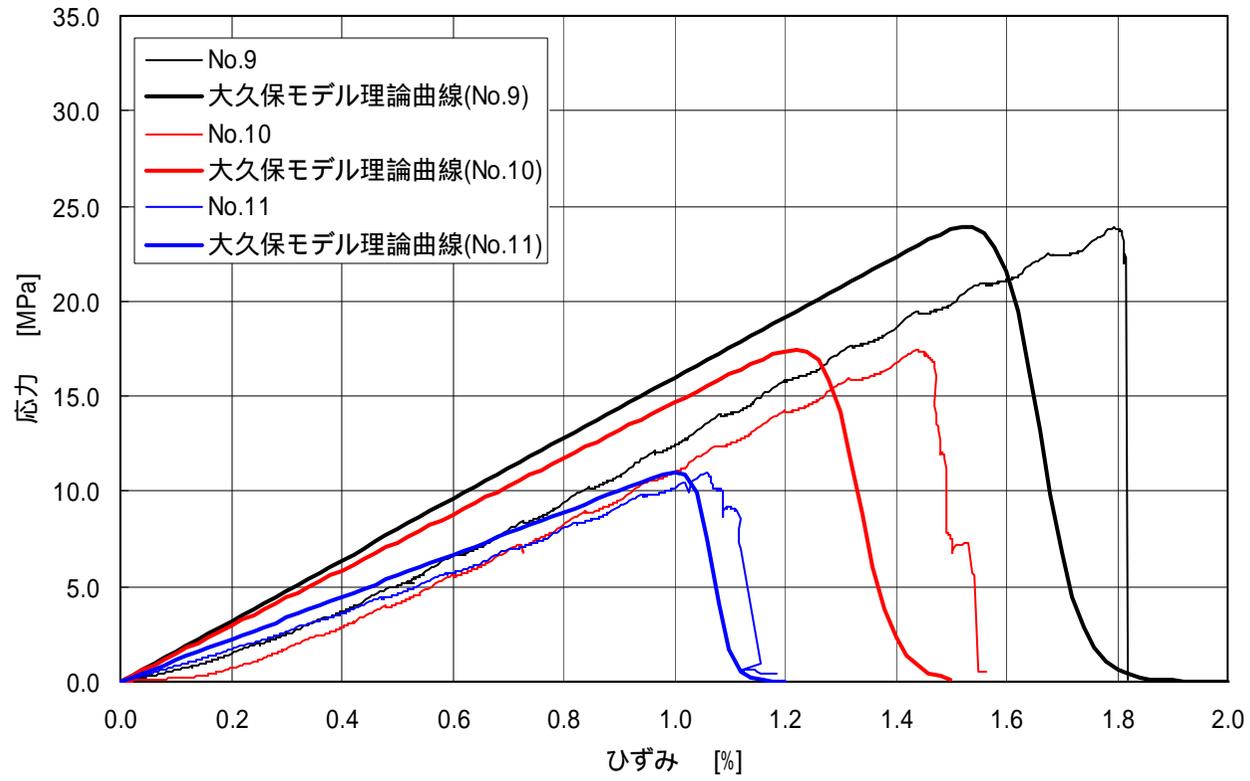


図-2. 15 応力—ひずみ曲線 (80°C条件)

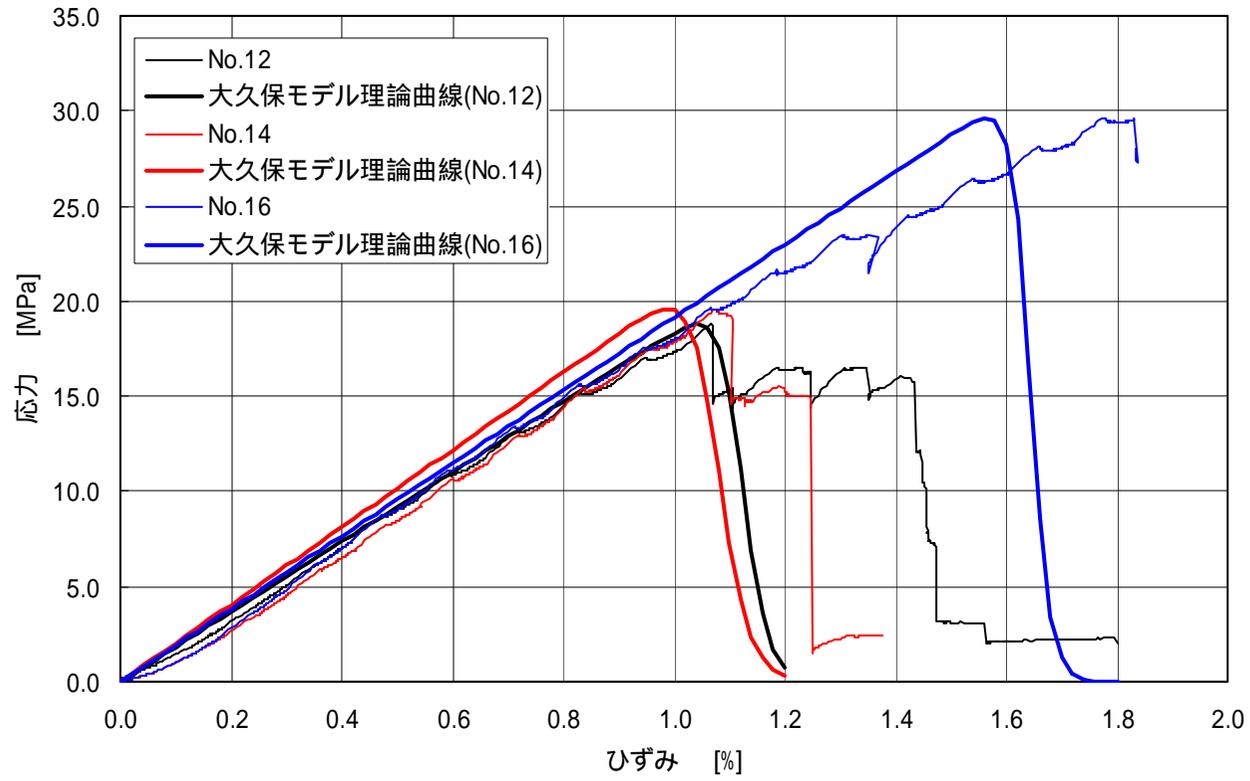


図-2. 16 応力—ひずみ曲線 (乾燥条件)

図-2. 17に時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係を示す。  
各試験条件における大久保定数結果の傾向としては、以下のことが挙げられる。

- $\sigma_v$  : 飽和 < 80°C < 乾燥
- $\lambda_1$  : 飽和 > 80°C > 乾燥
- $n$  : 飽和 (室温) < 80°C . . . 温度の影響  
: 飽和 < 乾燥 . . . 水分の影響

一昨年の研究<sup>8)</sup>や論文等では、温度が上昇すると時間依存性の指標  $n$  は小さくなり、初期コンプライアンス  $\lambda_1$  は大きくなることが示唆されている<sup>3)</sup>が、本研究では逆の結果となった。

前述した通り供試体のバラツキが影響を及ぼしている可能性が高いが、熱に反応する成分が含まれる可能性など複数の要因が考えられるため、データの蓄積を図り今後検討する必要があると思われる。

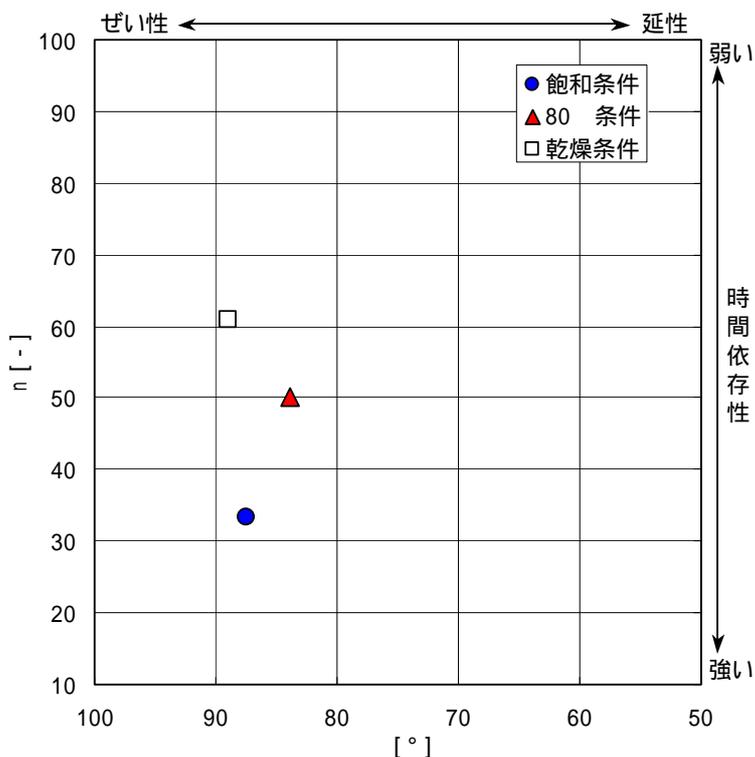


図-2. 17 時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係

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用いる大久保定数は、各試験における平均値を用いることにした。

## 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。

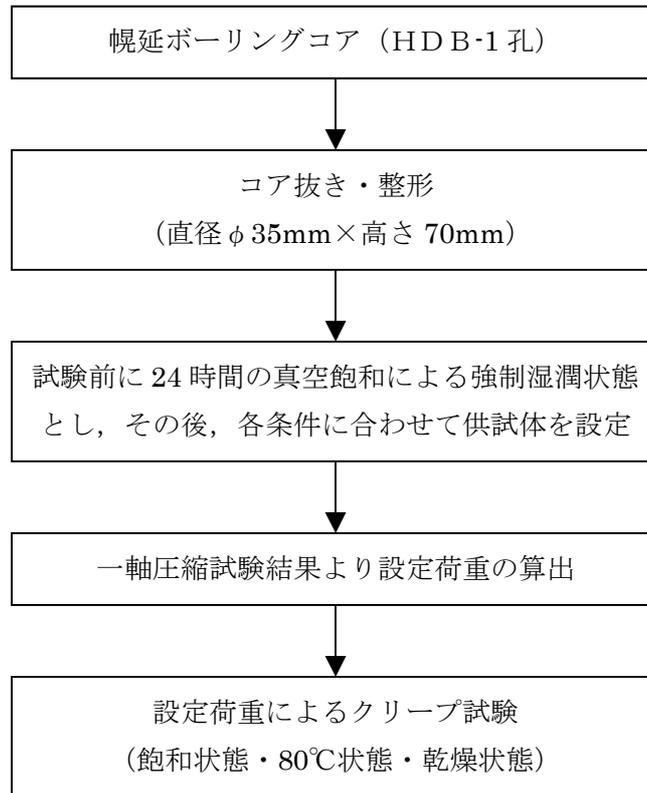


図-2. 18 クリープ試験試験手順

### 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)
- 加熱ヒーター : 100V×300W×1P (坂口電熱株式会社製造)
- 温度制御装置 : 型式 BX-303 (東邦電子株式会社製造) (温度制御 0~399℃)

図-2. 19 にクリープ試験概要図を示す。

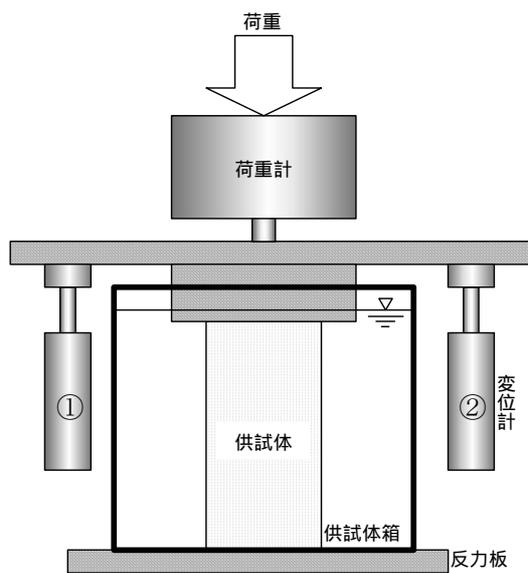


図-2.19 クリープ試験概要図



写真-2.3 クリープ試験機

## 2. 2. 3 試験条件

表-2. 7にクリープ試験の試験条件等を示す。

表-2. 7 クリープ試験の試験条件等

使用岩石	幌延堆積岩 (HDB-1 孔)
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1週間と仮定し設定した。 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、その後、各条件に合わせて供試体を設定した。 室温、完全飽和条件・・・真空飽和後、飽和状態を維持 80℃、完全飽和条件・・・真空飽和後、24時間以上の80℃保温を実施 室温、乾燥条件・・・真空飽和後、1週間の真空乾燥を実施 ※飽和、試験には純水を使用
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	各条件1供試体
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) 加熱ヒータ：100V×300W×1P (坂口電熱株式会社製造) 温度制御装置：型式 BX-303 (東邦電子株式会社製造) (温度 0~399℃)
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。<sup>1)</sup>

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

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

$\sigma$  : 載荷応力

$\varepsilon$  : 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 荷重応力 =  $\sigma_1$
- ② 初期コンプライアンス =  $\lambda_1$
- ③ 初期ひずみ =  $\varepsilon_1$

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  $\varepsilon$  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1週間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. 8のように定義することとした。

なお、荷重応力の設定は、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」に従って荷重応力を設定する。

表-2. 8 設定する破壊到達時間の定義

	想定破壊到達時間
飽和条件	1 週間
80℃条件	
乾燥条件	

実際の荷重に当たっては、上記の目標を満足するように荷重応力を求めたが、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的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-2.9に示す。

表-2.9 各試験前の各供試体の寸法および重量等

試験条件	供試体番号	寸法		重量
		直径	高さ	試験前
		[cm]	[cm]	[gf]
飽和	No.3	3.470	7.730	138.4
80℃	No.2	3.475	7.766	139.5
乾燥	No.4	3.459	7.492	110.2

## (3) クリープ試験結果

表-2.10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、目標破壊時間を1週間として計算した(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。乾燥条件については試験機載荷能力上限を載荷した。

表-2.10 クリープ試験結果一覧

試験条件	供試体番号	目標載荷応力 [MPa]	$\sigma_1 / \sigma_v$ [%]	目標破壊到達時間	載荷応力 [MPa]	想定破壊到達時間	実験結果
飽和	No.3	8.967	76.3	1週間	8.913	8.55日	8sec
80℃	No.2	14.557	83.4		4.544	—	目標載荷応力到達前に破壊
乾燥	No.4	19.449	85.8		10.041	$2.29 \times 10^{18}$ 日	載荷後27日経過、未破壊

※  $\sigma$  : 載荷応力 [MPa],  $t_c$  : 破壊到達時間

図-2.20~図-2.22にそれぞれ各供試体別のクリープ試験結果を示す。ケース毎のクリープ試験結果は、以下の4図を示す。なお、ここでの経過時間とは、設定荷重に到達した直後を起点“0 [sec]”とした補正時間のことである。また、変位計①、変位計②は載荷板の左端、右端の各変位を示している(図-2.19参照)。

- (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)

各試験条件における図-(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の平均値を使用した。

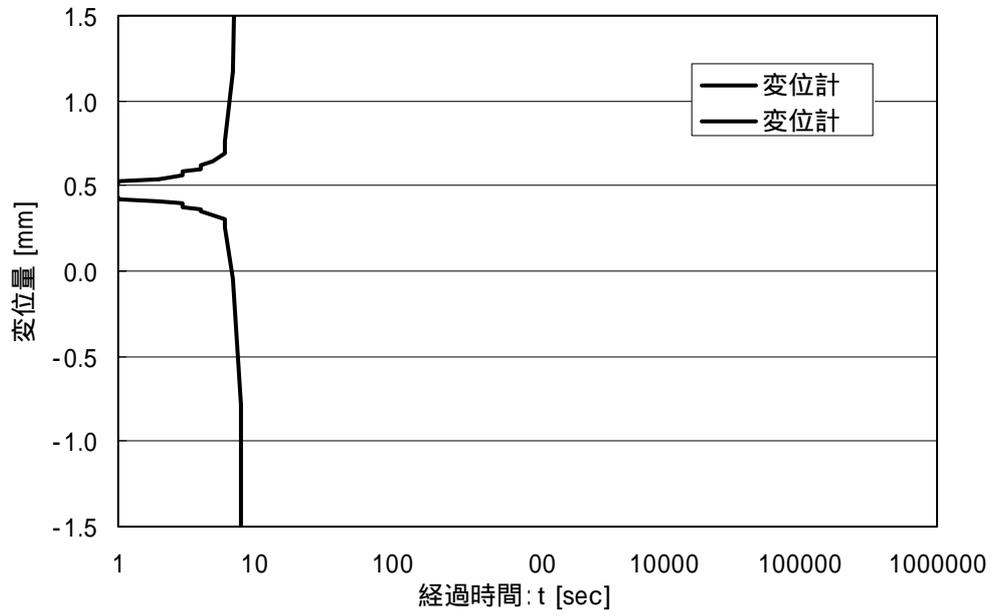


図-2. 20(a) 経過時間-変位曲線 (飽和条件)

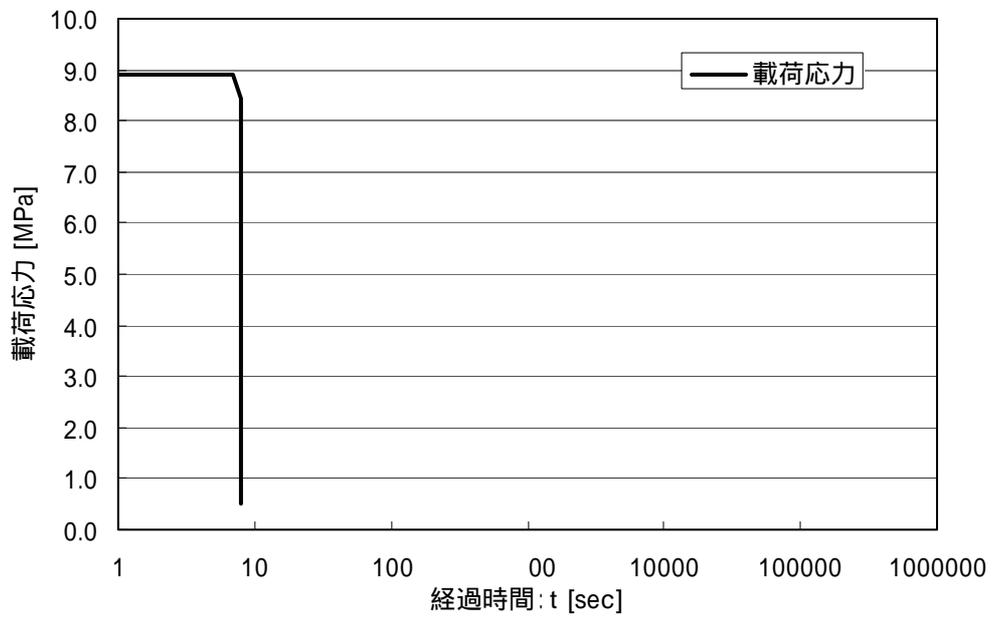


図-2. 20(b) 経過時間-荷重曲線 (飽和条件)

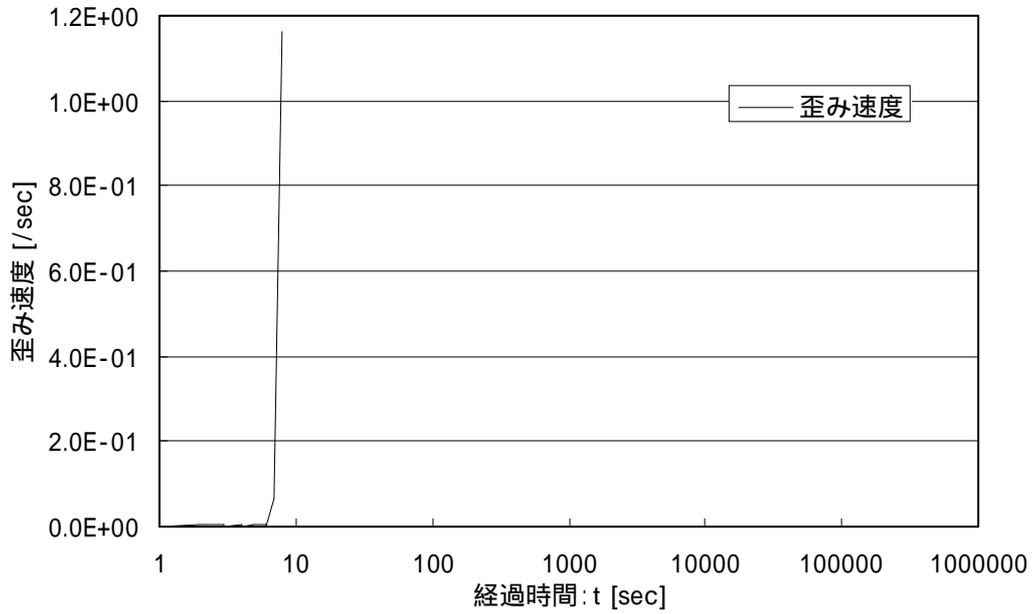


図- 2. 20(c) 経過時間-ひずみ速度曲線 (飽和条件)

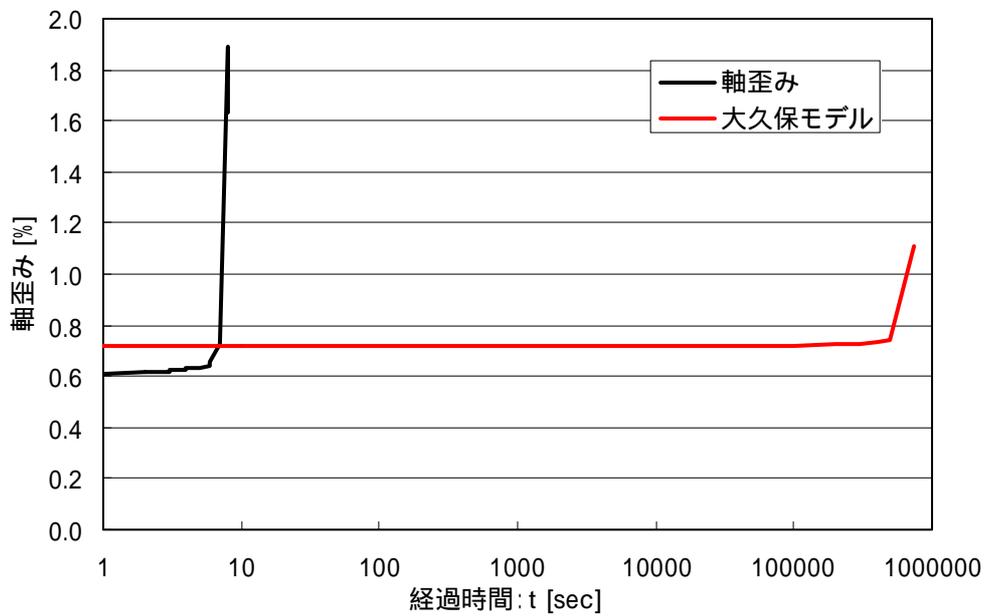


図- 2. 20(d) 経過時間-ひずみ曲線 (飽和条件)

<クリープ曲線>

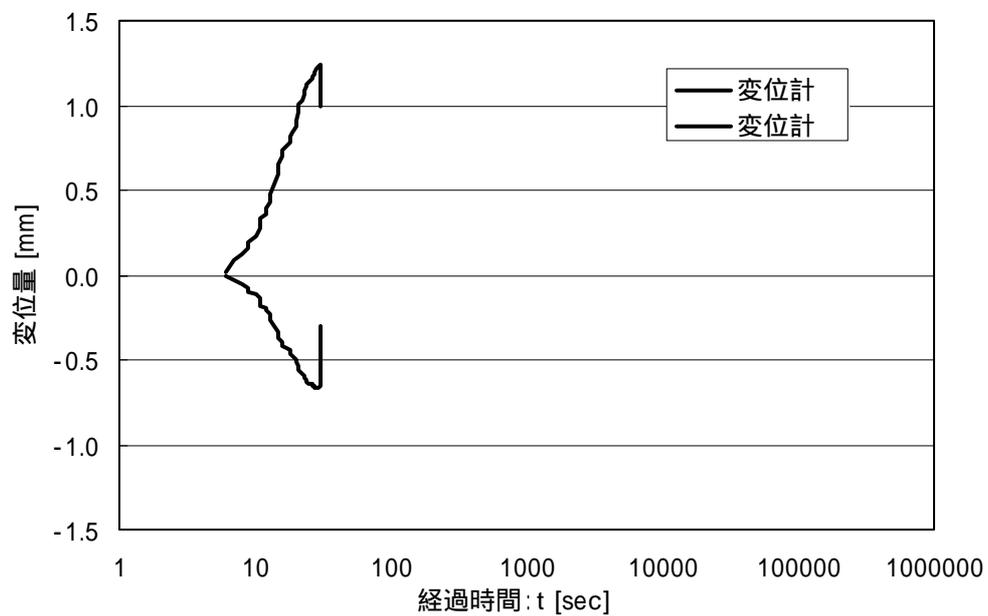


図-2. 2 1 (a) 経過時間-変位曲線 (80°C条件)

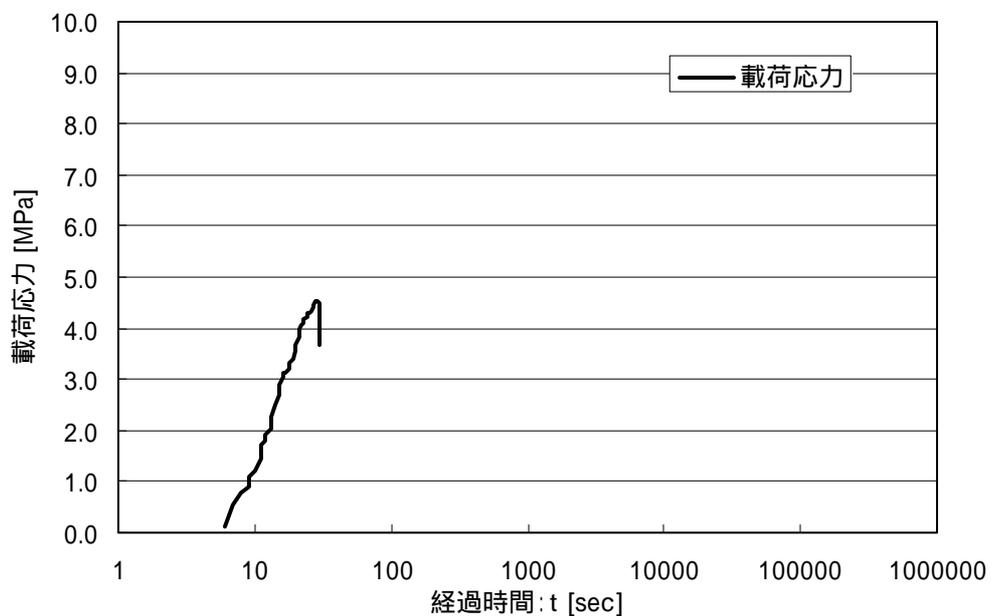


図-2. 2 1 (b) 経過時間-荷重曲線 (80°C条件)

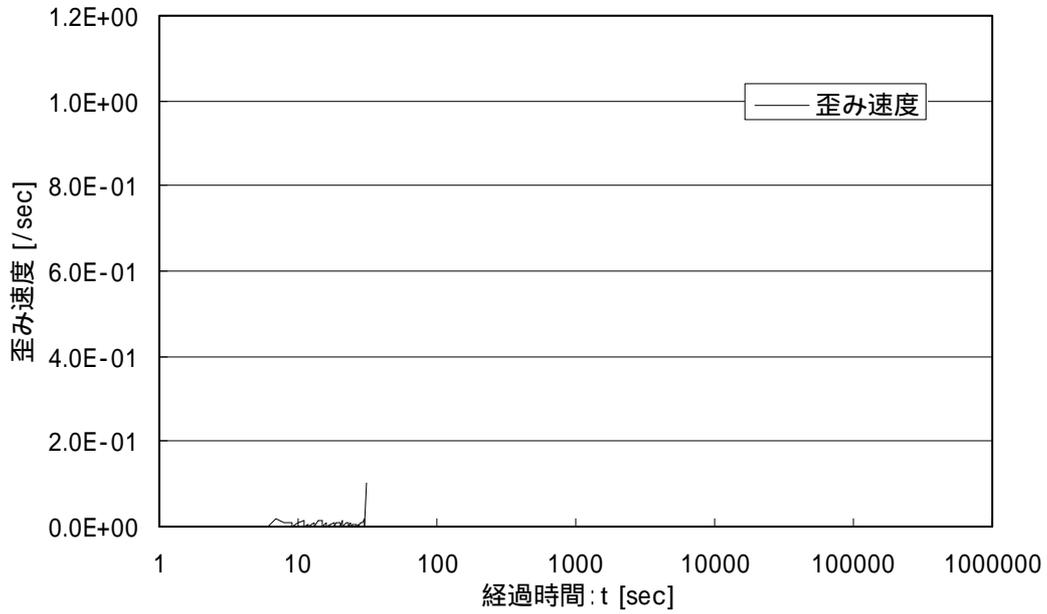


図-2. 21(c) 経過時間-ひずみ速度曲線 (80°C条件)

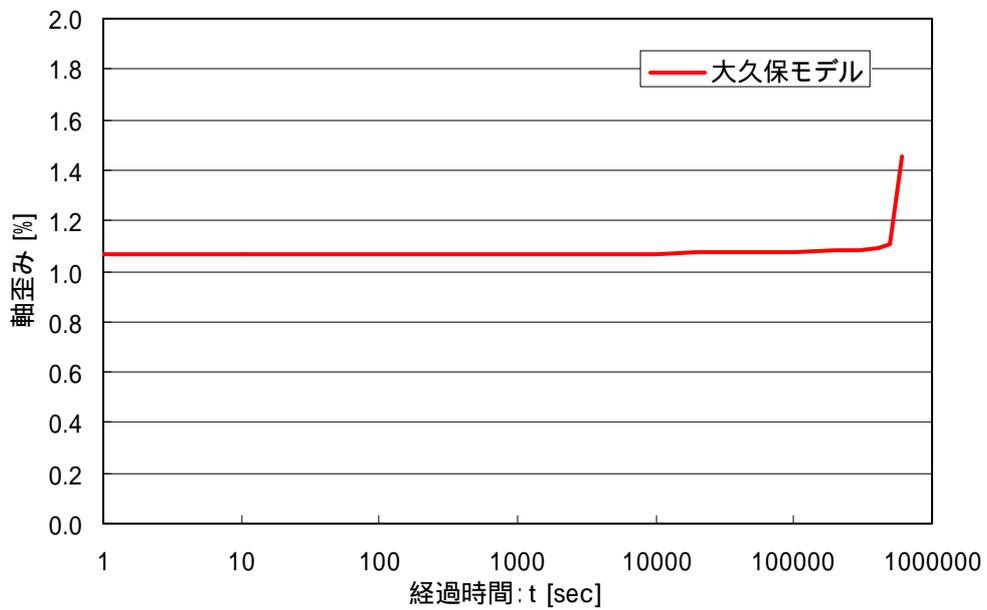


図-2. 21(d) 経過時間-ひずみ曲線 (80°C条件)

<クリープ曲線：理論値のみ>

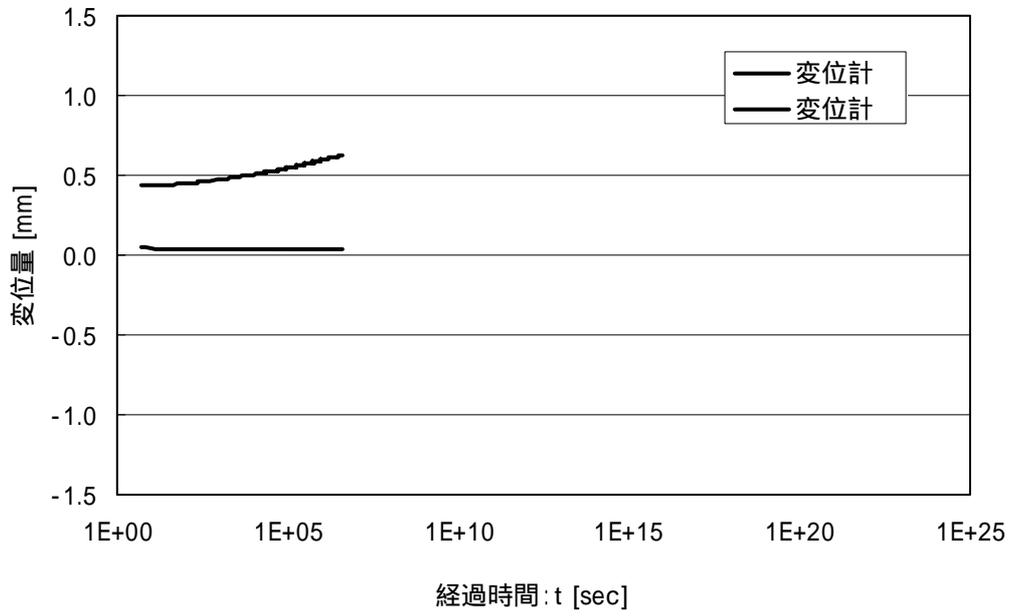


図-2. 2 2(a) 経過時間-変位曲線 (乾燥条件)

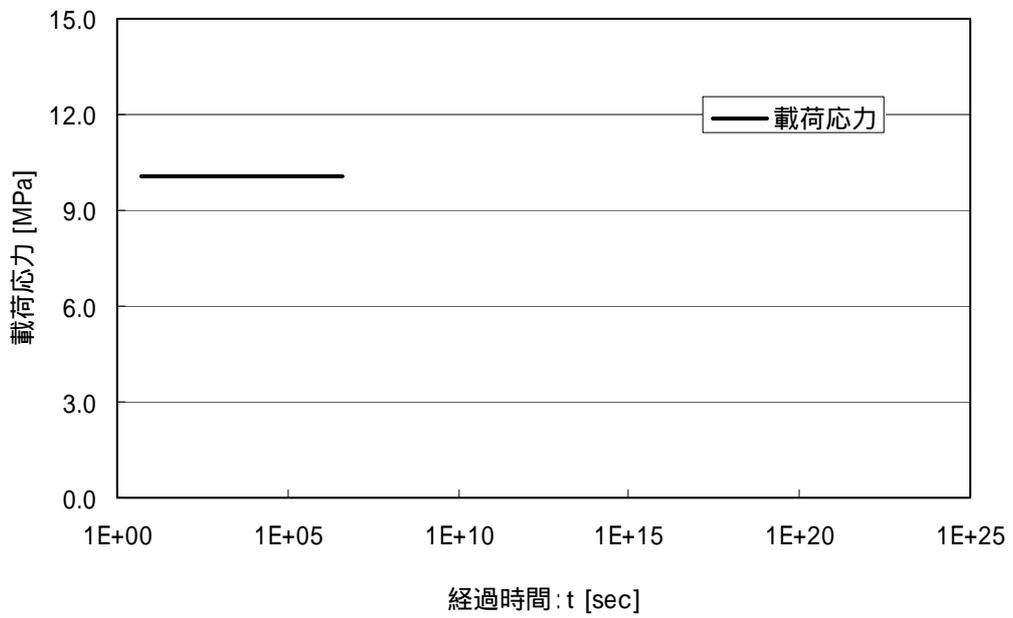


図-2. 2 2(b) 経過時間-荷重曲線 (乾燥条件)

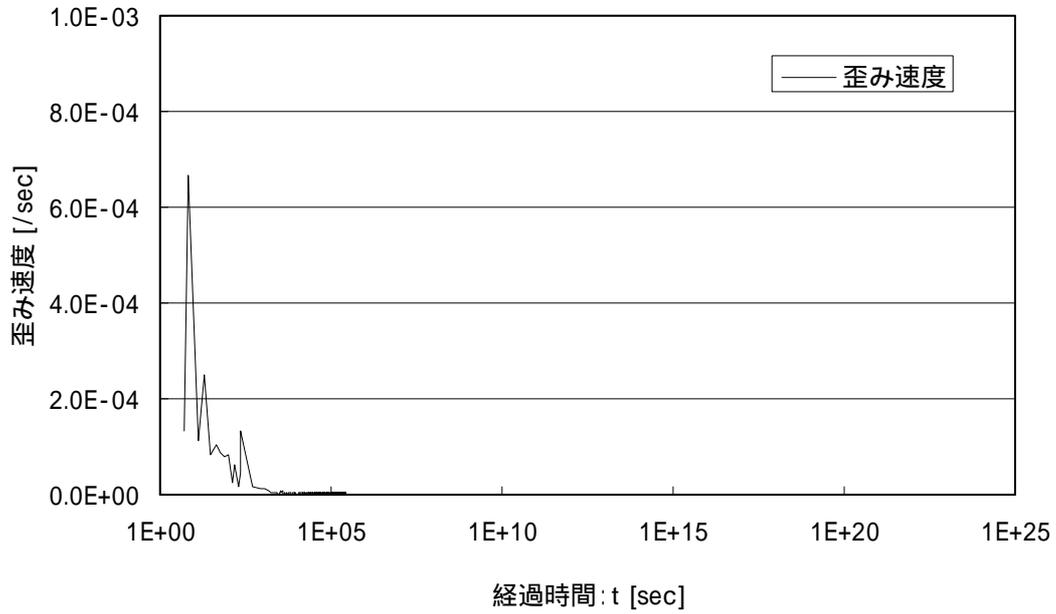


図- 2. 2 2 (c) 経過時間-ひずみ速度曲線 (乾燥条件)

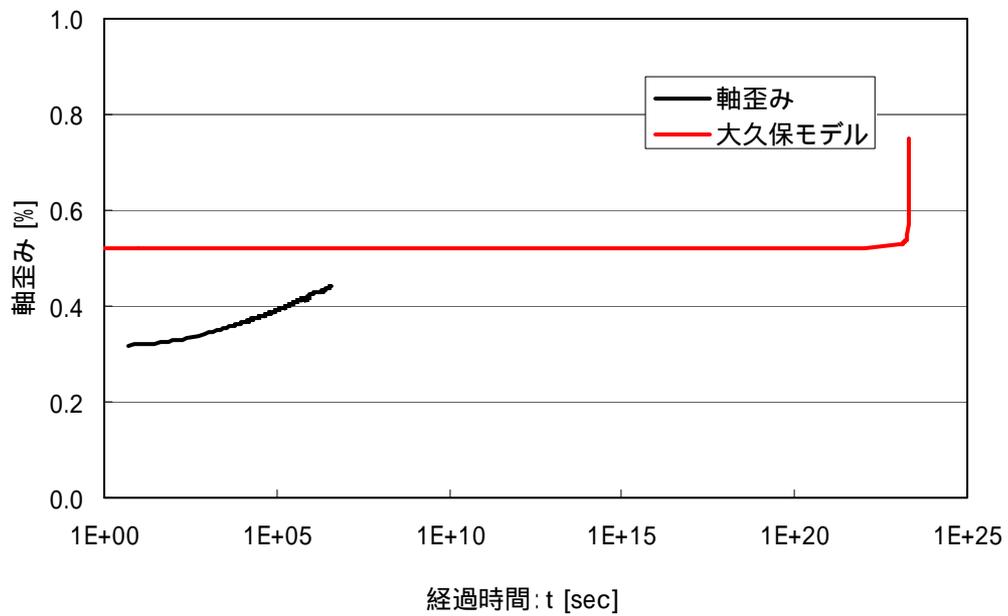


図- 2. 2 2 (d) 経過時間-ひずみ曲線 (乾燥条件)  
<クリープ曲線>

## 2. 3 結果の考察・検討

## (1) 幌延堆積岩の大久保モデルを用いた評価について

2. 1. 4 で示した式(9)で設定される载荷応力は、供試体が有する一軸圧縮強度  $\sigma_v$  の何%かに相当する値である。この一軸圧縮強度は試験の平均値によって求めているが、個々の供試体にはバラツキがある。従って、想定していた強度より実際の強度が高い場合には破壊到達時間は長くなり、強度が低い場合には短くなる。

一軸圧縮強度が想定よりも  $x\%$  小さくなると、想定破壊到達時間  $t_c$  と実際の破壊到達時間  $t_c'$  の比は  $t_c'/t_c = \{1 / (1 - x/100)\}^{-n}$  となる。

今回の実験では一軸圧縮強度のバラツキが大きく 1.5 倍以上の開きがある。仮に一軸圧縮強度が想定よりも 30% 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  $t_c'/t_c = \{1 / (1 - 0.3)\}^{-33} = 7.73 \times 10^{-3}$  となる ( $n$  は飽和条件のものを使用)。これは、想定破壊到達時間が 1 週間であったものが、4.68 [sec] で破壊することを意味する。

上記の通り、一軸圧縮強度および大久保モデルの定数:  $n$  の誤差が破壊到達時間に大きく影響を及ぼすことが分かる。今回の試験のように点のデータであるボーリングコアを用いる場合は、僅かな深度差でバラツキが発生することを十分考慮したうえで評価する必要がある。また、事前に弾性波計測を実施し強度の不均一性等について検討を行ったが、弾性波に顕著な違いはみられず事前予測は困難であった。

供試体の破壊状況としては、1) 目視により確認された潜在亀裂箇所による破壊、2) 载荷によるせん断破壊がみられ、いずれも鋭角な状態で破壊する結果となった。

表-2. 1. 1 実測の寿命と大久保モデルでの寿命

試験条件	供試体番号	载荷応力 [MPa]	破壊到達時間		備考
			大久保モデル	実測値	
飽和	No.3	8.913	738968sec	8sec	
80°C	No.2	4.544	—	—	目標载荷応力到達前に破壊
乾燥	No.4	10.041	$1.98 \times 10^{23}$ sec	—	载荷後 27 日経過, 未破壊

表-2. 1. 2, 図-2. 2. 3 に一軸圧縮試験結果より算出した大久保モデルの定数を再掲する。

表-2. 1 2 一軸圧縮試験結果による大久保モデルの定数の算出

試験条件	供試体番号	$\lambda_1$ [ $\diagup$ MPa]	n [-]	m [-]	a [MPa $\cdot$ sec]	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$\sigma_c$ [MPa]
飽和	No.6	0.00066	31	31	$1.02 \times 10^{56}$	88.65	14.524
	No.7	0.00075	25	25	$1.94 \times 10^{45}$	83.94	11.366
	No.17	0.00101	44	44	$4.02 \times 10^{82}$	90.00	9.382
平均		<b>0.00081</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b><math>1.89 \times 10^{60}</math></b>	<b>87.53</b>	<b>11.757</b>
80 $^\circ$ C	No.9	0.00063	45	45	$2.17 \times 10^{75}$	87.50	23.881
	No.10	0.00068	41	41	$1.63 \times 10^{72}$	84.87	17.474
	No.11	0.00090	64	64	$7.62 \times 10^{121}$	79.17	10.990
平均		<b>0.00074</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b><math>8.22 \times 10^{87}</math></b>	<b>83.84</b>	<b>17.448</b>
乾燥	No.12	0.00054	50	50	$7.11 \times 10^{92}$	90.00	18.770
	No.14	0.00049	40	40	$8.33 \times 10^{73}$	90.00	19.579
	No.16	0.00052	93	93	$2.74 \times 10^{161}$	86.87	29.657
平均		<b>0.00052</b>	<b>61</b>	<b>61</b>	<b><math>7.74 \times 10^{110}</math></b>	<b>88.96</b>	<b>22.669</b>

(2) 幌延堆積岩と水理・温度条件について

各試験条件における大久保定数結果の傾向としては、以下のことが挙げられる。

- $\sigma_v$  : 飽和 < 80°C < 乾燥
- $\lambda_1$  : 飽和 > 80°C > 乾燥
- $n$  : 飽和 (室温) < 80°C . . . 温度の影響  
: 飽和 < 乾燥 . . . 水分の影響

一昨年の研究<sup>8)</sup>や論文等では、温度が上昇すると時間依存性の指標  $n$  は小さくなり (時間依存性が顕著となり)、初期コンプライアンス  $\lambda_1$  は大きくなることが示唆されている<sup>3)</sup>が、本研究では逆の結果となった。

前述した通り供試体のバラツキが試験結果に影響を及ぼしている可能性が高いが、加熱変化<sup>9)</sup>する成分が含まれる可能性 (本研究では加熱温度が低いと関連性の強弱は不明瞭) など複数の要因が考えられるため、データの蓄積を図り今後検討する必要があると思われる。

含水条件では、幌延堆積岩は乾湿繰返しに対して強度低下を起し易く、乾燥後浸水すると潜在亀裂に沿って割れることが多い。また、小さな含水比の変化に対しても敏感に反応することがわかった。

処分場では建設時の掘削の影響による周辺地山の乾燥、その後の最冠水 (乾湿繰返し) および廃棄体から発せられる熱の影響による温度変化が考えられる。地山が有する水理特性により最冠水には時間差が生じると思われるが、実験結果からも分かるように水理・温度条件に対する地山の特性を十分把握する必要がある。

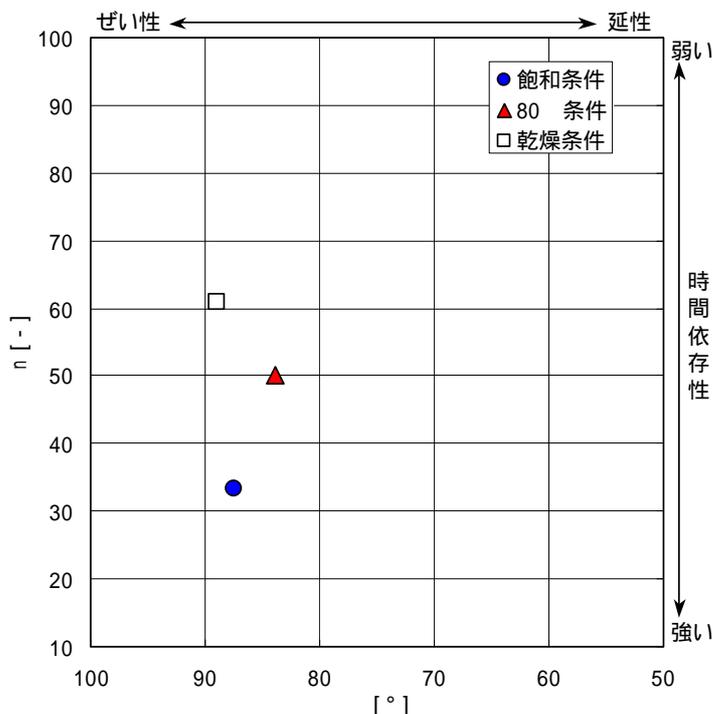


図-2. 2.3 時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係

#### 今後の課題

本研究では、幌延堆積岩は乾湿繰返しに対して強度低下を起こし易く、乾燥後の浸水によって潜在亀裂に沿って割れるなど、小さな含水比の変化に対しても敏感に反応することが分かった。

また、本研究のように点のデータであるボーリングコアを用いる場合は、僅かな深度差で物性のバラツキが発生することを十分考慮したうえで評価する必要がある。このバラツキは一軸圧縮強度および大久保モデルの定数:  $n$  に誤差を与え破壊到達時間に大きく影響を及ぼす。今回、事前に供試体の弾性波計測を実施し強度の不均一性等について検討を行ったが、弾性波に顕著な違いはみられず事前予測は困難であった。

過去の研究結果から、水理・温度条件が変化することにより強度・変形特性が変化することが明らかになっているが、本研究では、供試体のバラツキにより水理・温度条件による理論との整合には至らなかった。昨年の結果<sup>7)</sup>から、供試体のバラツキを低減させる一つの方策として、ブロック塊による試料採取を実施し、同深度・同亀裂を含む供試体を揃えることが挙げられる。また、試験前の供試体に対して透水試験を実施し、潜在クラックなどの有無を把握することが考えられる。これらのことを踏まえ、今後、データの蓄積、現象の解明、精度向上を図る必要性があると思われる。

さらに、安全評価の観点から、これまでの研究成果<sup>4)</sup>より示唆されているクリープ応力下におけるニアフィールド岩盤の透水性の経時変化についてデータを取得する必要がある。この透水性の経時変化に対して、弾性波測定などの非破壊試験を長期に渡って実施することで経年劣化や含水比変化が及ぼす影響を検証していくことが必要だと考える。



### 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、坑道の挙動、坑道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。

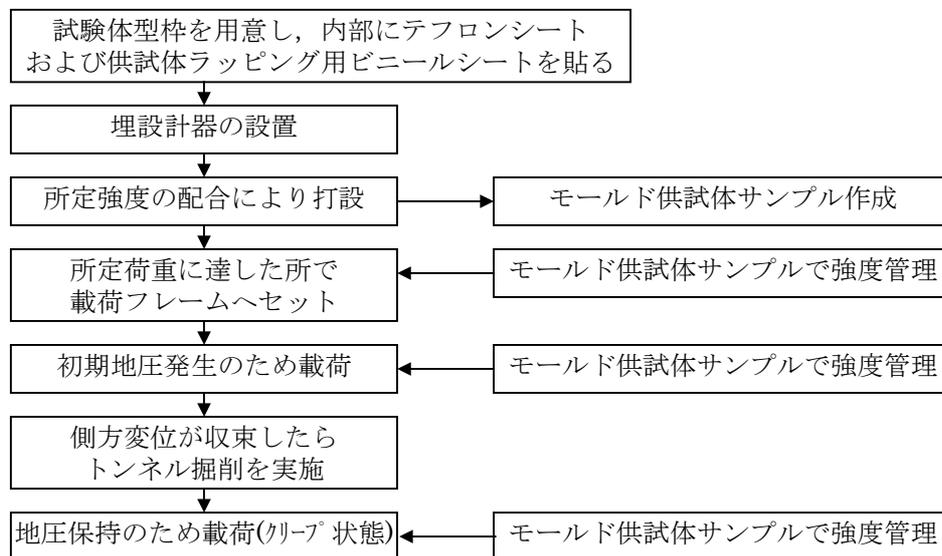


図-3.1 模型実験フロー図

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 軸载荷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を示す。

表-3.1 模型装置仕様

装置寸法	縦 250cm×横 250cm×高 80cm
载荷能力	油圧ジャッキ：1000kN/1台 (1方向2台×2方向：計4台) 最大载荷応力：4.0MPa
加力方向	水平 2 軸 上下拘束板にて垂直ひずみ拘束
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>側方変位量 1面4箇所 計8箇所</li> <li>鉛直方向変位量 上部拘束板を変位計で測定 2箇所</li> <li>外圧 油圧ジャッキのポンプ圧 1箇所</li> <li>内圧 圧力調整盤 アナログ</li> </ul> <p>トンネル掘削後</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>内空変位量 2箇所</li> </ul> <div style="text-align: center;"> </div> <p>図-3.2 測定項目位置図</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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：<math>\sigma_r</math>および<math>\sigma_\theta</math></li> </ul>
試験体寸法	縦 100cm×横 100cm×高さ 50cm

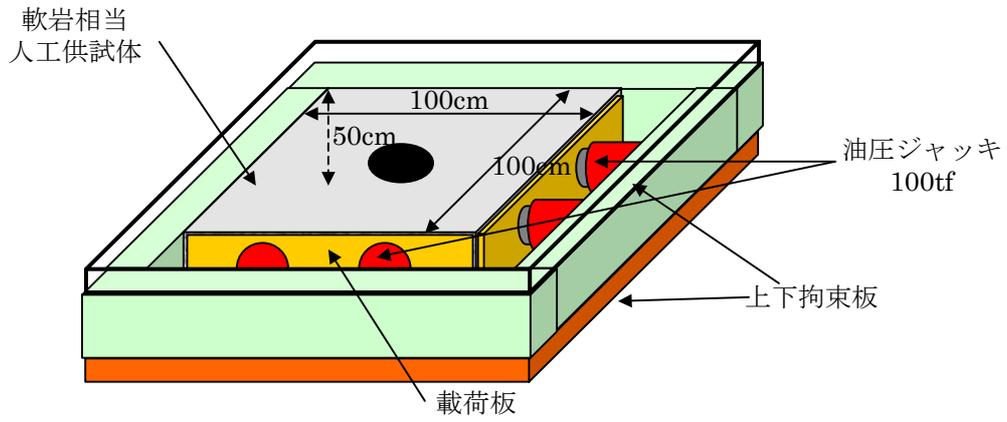


図-3.3 模型実験概念図



写真-3.1 装置設置状況

### 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) 試験体強度および含水比

目標強度を  $\sigma_{28}=0.70\text{MPa}$  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。

また、加圧脱水による含水比低下の防止として、試験体全体をビニールシートで覆うこととした。供試体打設時からのモールド供試体強度および含水比の経時変化を以下に示す。

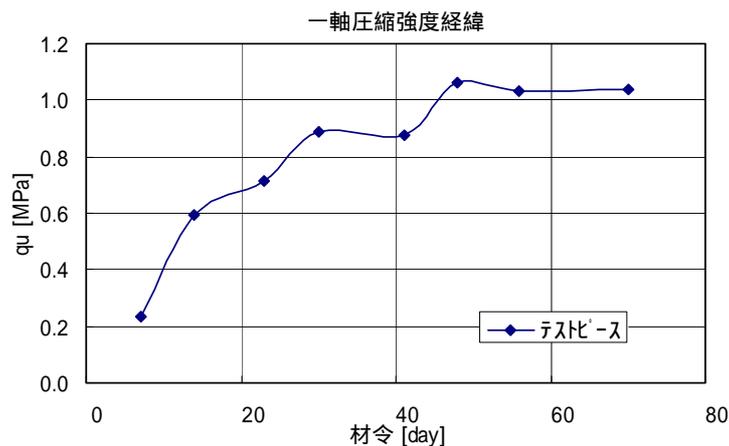


図-3.4 試験体含水比経時変化

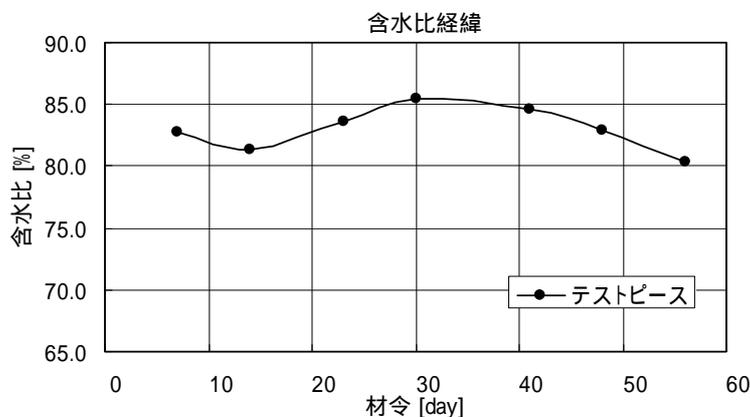


図-3.5 試験体一軸圧縮強度経時変化

(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。

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

$\sigma_u$  : 一軸圧縮強度                      P : 載荷荷重  
 $\gamma$  : 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 相当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、 $q_{u23}=0.72\text{MPa}$  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 ( $q_u=0.72\text{MPa}$ ) 程度となるようにジャッキ荷重を調整して載荷した。試験中は供試体の一軸圧縮強度に合わせて載荷を行ない地山強度比 1.0 となるよう載荷荷重を調整した。

(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、供試体のサイズおよび Kastner の式<sup>5)</sup>を基に 15cm と設定した (坑道の掘削径  $\phi$  を 5.0m と仮定すると 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 (内圧無し、内部摩擦角  $30^\circ$  の場合)。

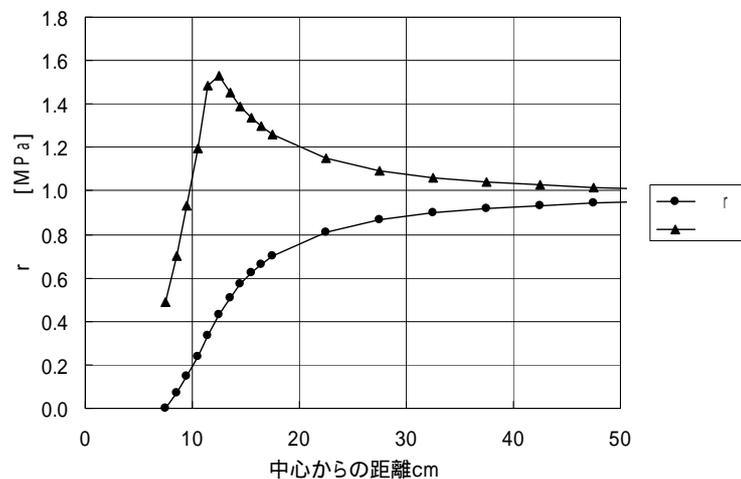


図-3.6 Kastner の式による内部応力分布図

3.4 模型実験の結果

図-3.7~図-3.10に載荷荷重と内空変位の経時変化、側方変位の経時変化、内部応力の経時変化 ( $\sigma_r$ )、内部応力の経時変化 ( $\sigma_\theta$ ) 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。

本研究では、昨年の実績<sup>7)</sup>からトンネル内空変位が約1週間で安定する結果を踏まえ、トンネル掘削1週間後に支保構築を模擬した内圧を負荷した。

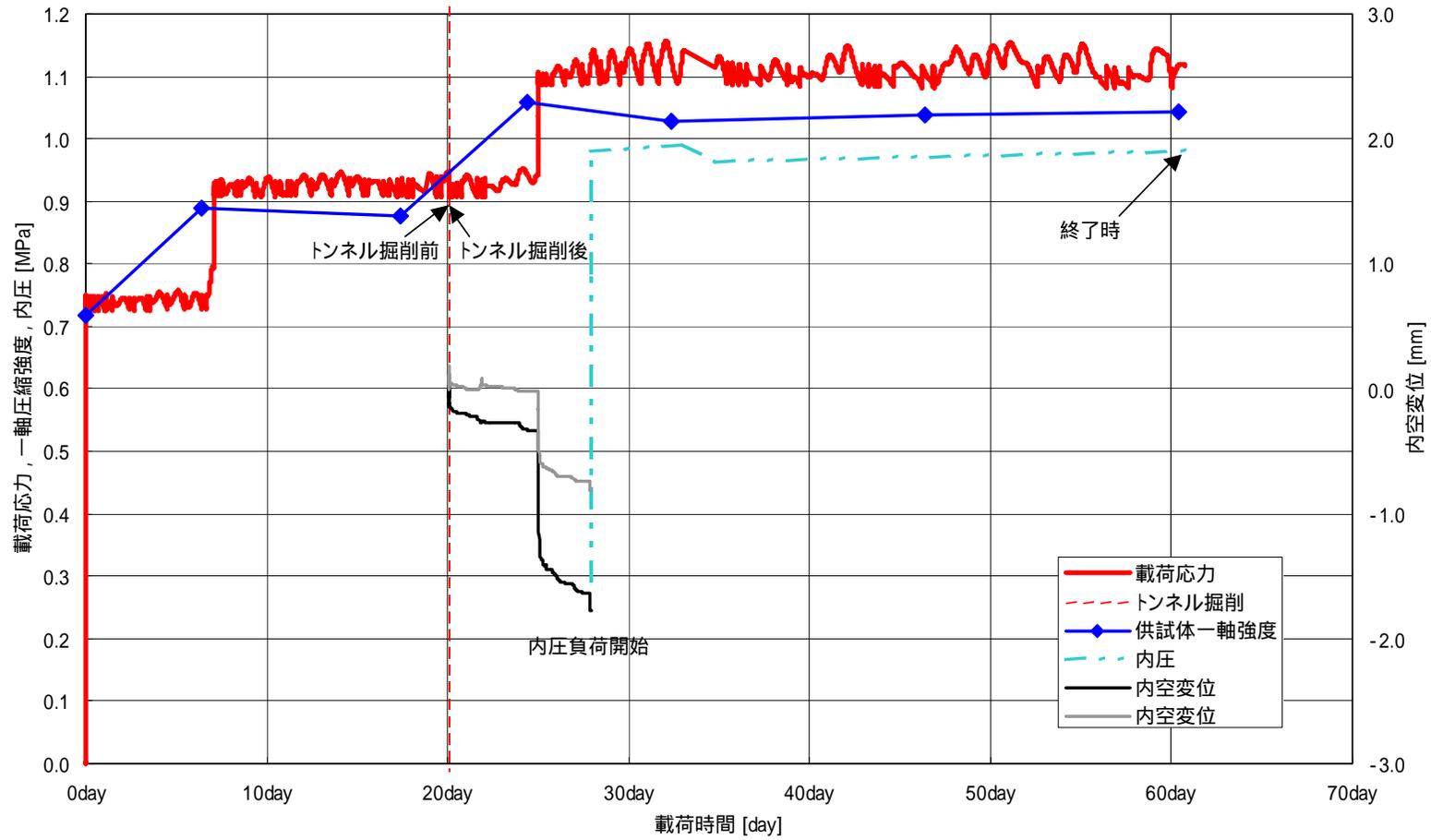


図-3.7 載荷応力経時変化図

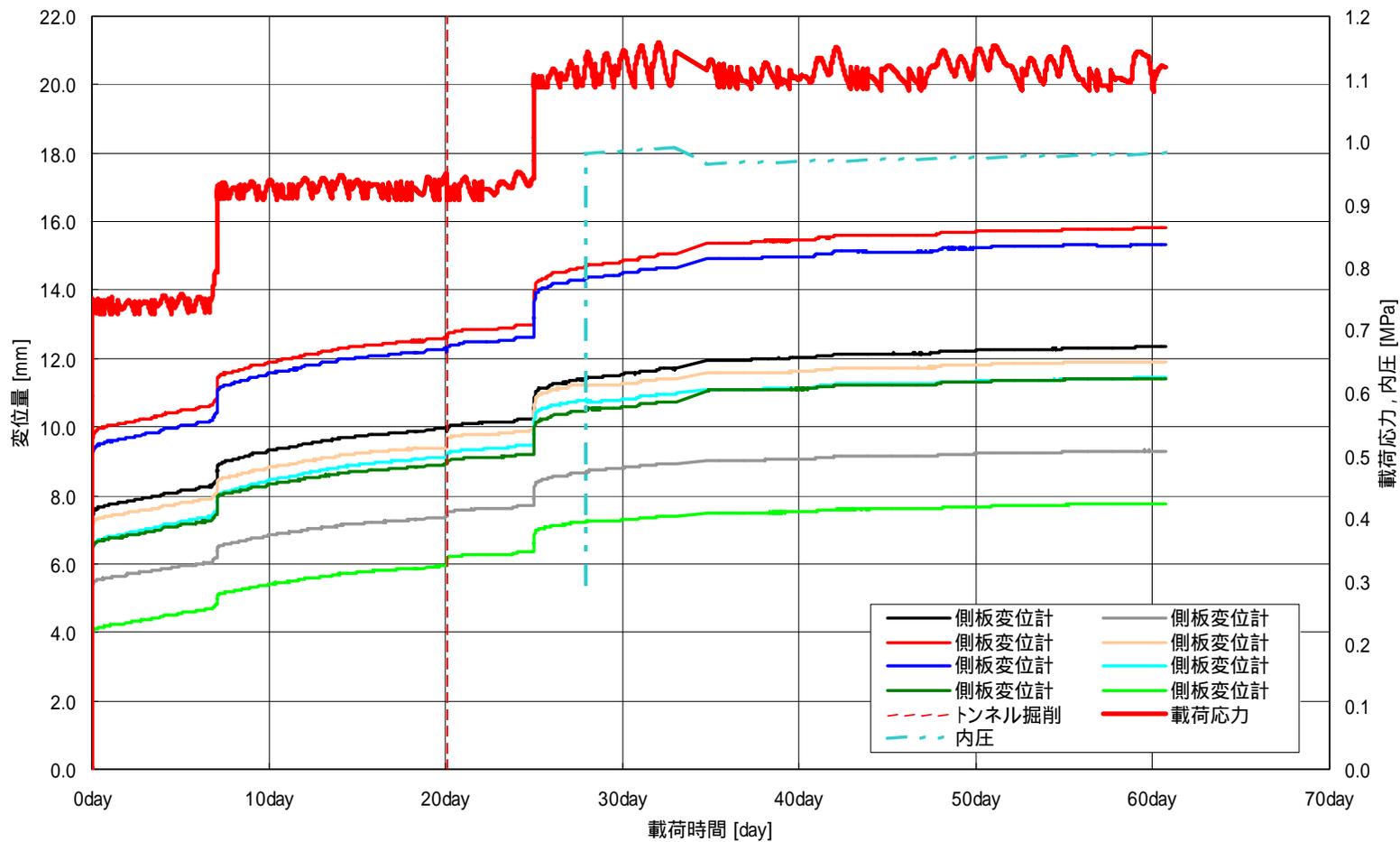


図-3.8 側方変位量経時変化図

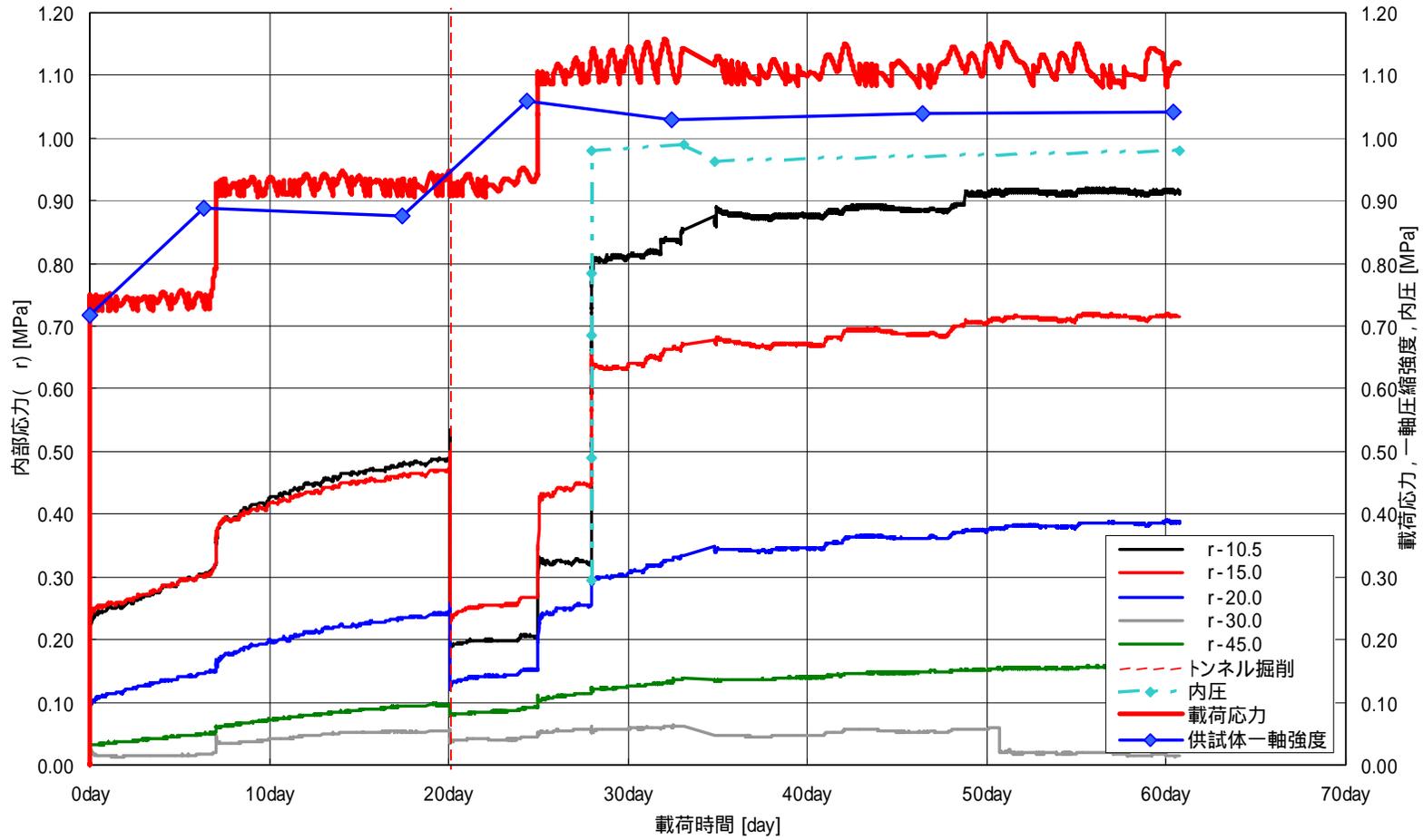


図-3.9 内部応力経時変化図 ( $\sigma_r$ )

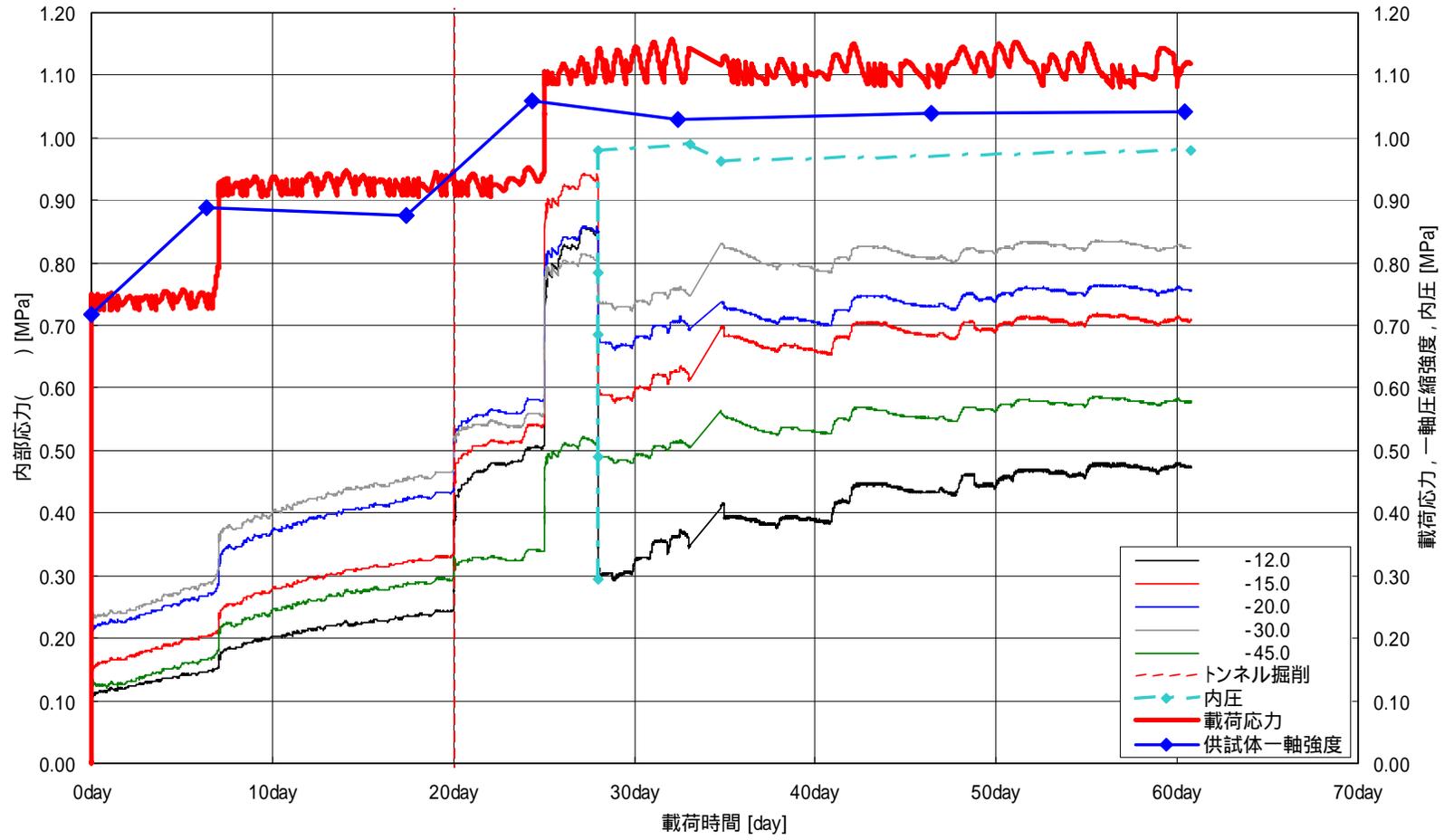


図-3.10 内部応力経時変化図 ( $\sigma \theta$ )

3. 5 結果の考察・検討

(1) 供試体の変形について

試験体のサンプル供試体より、トンネル掘削 5 日後（内空変位計設置後の載荷を実施する直前：載荷後  $\sigma 24$ ）の試験体の弾性係数は約 207.5MPa 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<sup>5)</sup>より、トンネル壁面の変位量を算出すると 0.05mm となる。実際には 0.02~0.33mm 程度(図-3.7 参照)の変形量が出ている。理由として次のことが考えられる、1) 供試体の弾性係数と模型供試体の弾性係数の違い、2) 外圧である油圧ポンプが動的に作用したこと、3) 任意の時点での変形を求めている理論値に対し、実験値は段階的な載荷による変形のトータルを表している、4) 載荷による供試体全体の移動などが考えられる。

< 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

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

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

$\alpha$  : 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

$\nu$  : ポアソン比

$P_i$  : 内圧

P : 外圧

図-3.8 (側方変位の経時変化) よりトンネル掘削前の載荷応力を保持した 2 期間を比較した場合、時間経過に伴い単位時間当たりの側方変位量が小さくなる傾向がみられる(表-3.2 参照)。理由としては、1) 時間経過に伴いクリープ変形が収束傾向を示すこ

と、2) 供試体の弾性係数が時間経過と共に増加していること、3) 圧密等による間隙の減少などが考えられる。

側方変位の絶対値(表-3.3参照)に差が生じた理由としては、1) 初期載荷時のズレ、2) 載荷時に各ジャッキに対して均等に油圧が作用しなかった、3) 載荷フレームと供試体の位置関係による拘束力の違い、4) 摩擦の影響などが考えられる。この点については今後改善を図る必要がある。

表-3.2 トンネル掘削前の載荷応力を保持した2期間の単位時間変形量

保持期間	変位計番号	期間 [dd/hh:mm:ss]	変形量 [mm]	単位時間変形量 [mm/day]	平均 単位時間変形量
1段階目	変位計①	07/01:17:06	2.77	0.392	0.401
	変位計②		1.95	0.276	
	変位計③		3.84	0.544	
	変位計④		2.81	0.398	
	変位計⑤		4.07	0.576	
	変位計⑥		3.39	0.480	
	変位計⑦		2.23	0.315	
	変位計⑧		1.61	0.228	
2段階目	変位計①	07/01:12:44	1.09	0.154	0.146
	変位計②		0.86	0.122	
	変位計③		1.20	0.169	
	変位計④		0.99	0.140	
	変位計⑤		1.25	0.177	
	変位計⑥		1.13	0.160	
	変位計⑦		0.94	0.133	
	変位計⑧		0.79	0.112	

表-3.3 模型実験終了時側方変位

変位計	変位 [mm]	変位計	変位 [mm]	変位計	変位 [mm]	変位計	変位 [mm]
変位計①	12.340	変位計③	15.820	変位計⑤	15.345	変位計⑦	11.410
変位計②	9.310	変位計④	11.915	変位計⑥	11.445	変位計⑧	7.745

## (2) 内部応力について

トンネル掘削中の内部応力の変化を図-3. 11に示す。

図-3. 11から分かる通り、トンネル掘削の影響により坑道半径方向 ( $r$  方向) の内部応力は低下し、トンネル壁面に近いほどその応力低下は大きい。逆に、坑道円周方向 ( $\theta$  方向) の内部応力は増加し、トンネル壁面に近いほど応力増加が大きい。これは、トンネルの掘削によりトンネル壁面が内空側へ変形したため  $r$  方向の応力が開放され、逆に円周方向はリング (トンネル) が縮む方向に変形したことから圧縮応力が作用したことを示している。

また、トンネル掘削後、内空変位の収束に伴い  $r$  方向、 $\theta$  方向とも応力の変動が収束する傾向を示している (図-3. 9~10参照)。これは、トンネルの自立に伴い応力の再配分が収束していることを示していると考えられる。

トンネル掘削後および内圧負荷時の **Kastner** の式から求めた理論値および測定結果を図-3. 12~13に示す。本研究では、地山強度比を一定に保つため、供試体の一軸圧縮強度の増加にあわせ載荷応力を調整している。このことから、各応力状態において一軸圧縮強度の影響を除くため、各内部応力をその時期の一軸圧縮強度で除した値を用いることとした。なお、測定値についてはトンネル掘削前の最終時の各土圧計値を、その時点の載荷応力に原点修正したものをプロットしている。

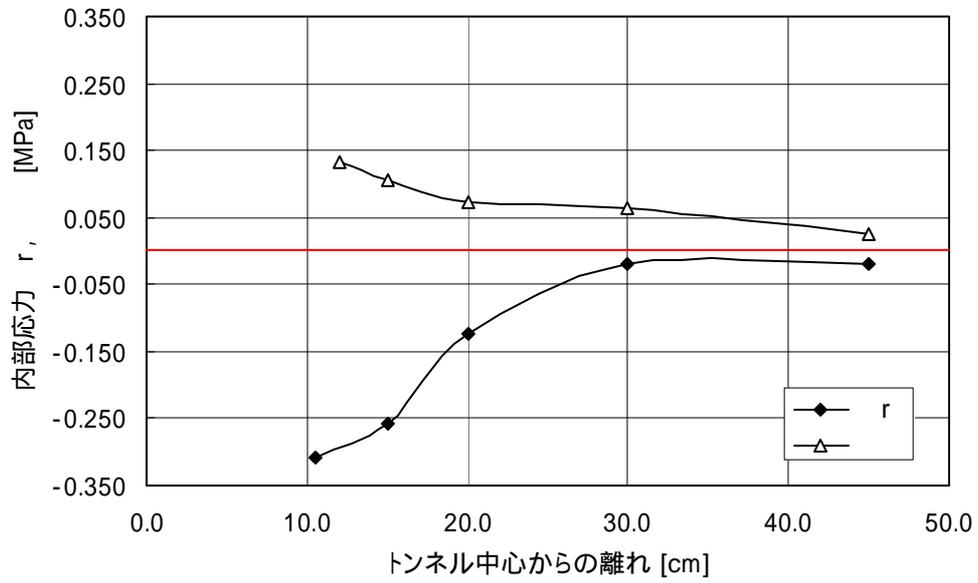
図-3. 12より、時間経過に伴い  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ とも応力が増加し、 $r/a$ の違による応力差が顕著になっている。理論値と測定値の形状を比較した場合、トンネル近傍 ( $r/a \leq 1.4$ ) の測定値は得られてないものの、おおよそ弾塑性境界が  $r/a=1.0 \sim 1.4$ にある可能性が高いと考えられる。**Kastner**の式から計算した弾塑性境界:Cはトンネル中心から9.23cm ( $r/a=1.23$ )の位置にあり、弾塑性境界を上手く表現していると考えられる。

トンネル内空よりバルーンを膨らませ内圧 ( $p_i=1.0q_u$ ) 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。従来、地下空間にトンネルなどの地価構造物を建設した場合、その周辺地山は何らかの損傷を受け、塑性領域・ゆるみ領域が発生すると考えられている。また、ゆるみ領域は時間経過に伴い徐々に拡大し、地下構造物の安定性、周辺地山の透水性能は低下すると考えられてきた。しかしながら、炭坑や深部トンネルでは、掘削後の空洞周辺の地山が掘削当時より硬くなっている或いは圧縮状態になっている現象が確認されている<sup>4)</sup>。

図-3. 13より  $r$  方向および  $\theta$  方向の応力が、 $\sigma_r/q_u$ 、 $\sigma_\theta/q_u=1.0$ に収束する傾向が見られる。 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ は対称形を示し理論曲線と同傾向である。図-3. 12と図-3. 13を比較した場合、トンネル壁面に近いほど応力の変動が大きく、内圧の影響が強いことを示している。**Kastner**の式から計算した理論解では弾塑性境界:Cは発生しない(トンネル中心から5.44cmの位置 ( $r/a=0.73$ )にありトンネル内部に存在することになる)。このことから、供試体の全領域は弾性領域になっていると考えられる。

また、 $r/a \leq 1.4$ の測定値が理論値と若干異なる傾向を示した理由として、1)内圧によるトンネル周辺の過圧密、2)トンネルの掘削影響等により塑性変形が大きな箇所では、内

圧効果による強度回復が完全には起こらない可能性などが考えられる。



< 図中内部応力 = トンネル掘削開始時内部応力 - トンネル掘削完了時内部応力 >

図-3. 1.1 トンネル掘削中内部応力変化

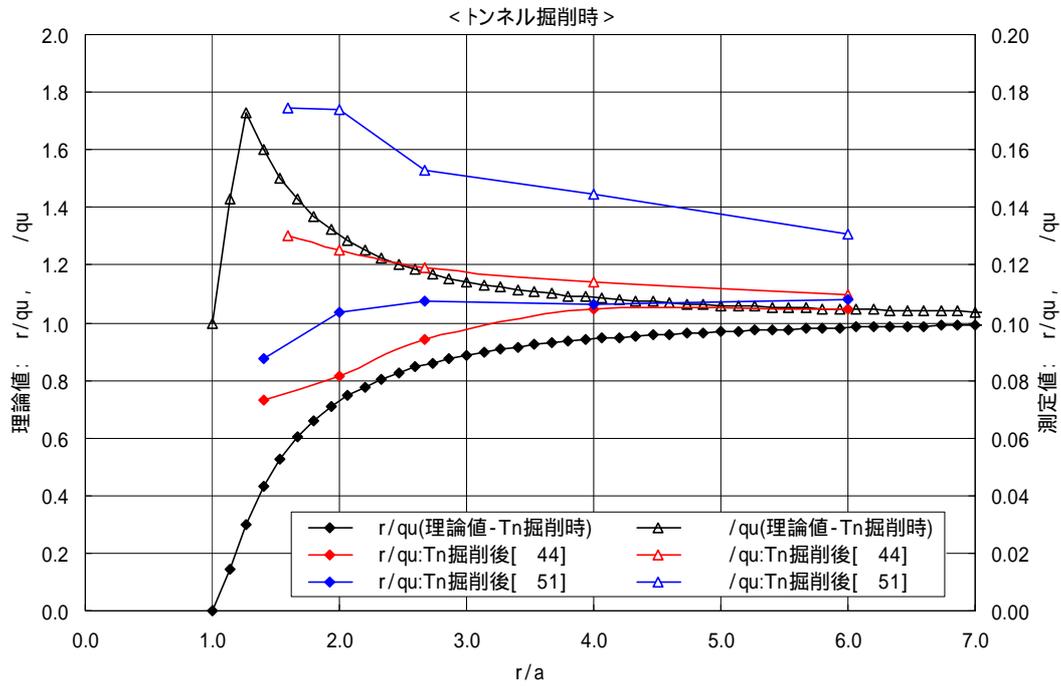


図-3. 1 2 静水圧的地山応力のもとでの円形トンネル周囲の弾塑性応力状態  
<トンネル掘削時：内圧=0>

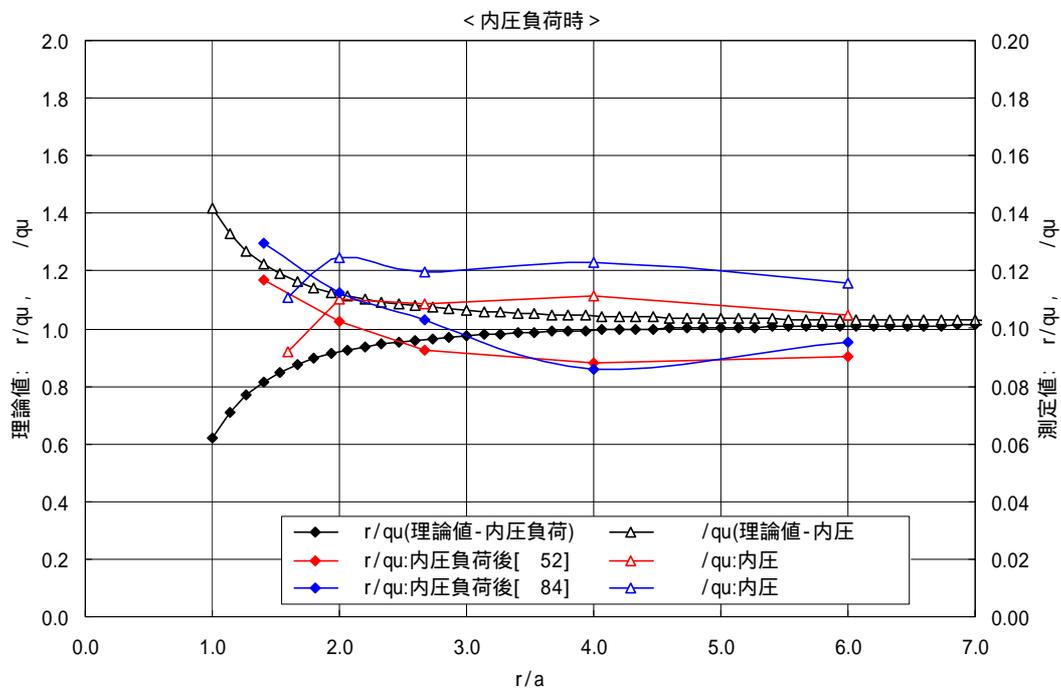


図-3. 1 3 静水圧的地山応力のもとでの円形トンネル周囲の弾塑性応力状態  
<内圧負荷時：内圧=1 $q_u$ >

(3) 供試体の硬度について

写真－3. 2に供試体のクラック観察状況, 写真－3. 3に解体時トンネル表面状況を示す。

試験体解体時にエコーチップ (PROCEQ 社製), 針貫入試験および密度試験を実施した。結果を図－3. 14～15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<sup>6)</sup>。

図－3. 14～15から, 以下の結果が得られた。

- ・トンネル近傍では他の箇所 비해強度低下が起こっている。これは, トンネルの掘削影響等により塑性変形が大きな箇所では, 内圧効果による強度回復が完全には起こらない可能性を示していると考えられる。
- ・トンネル中心より 10～40cm の範囲ではある程度のバラツキ幅を持つが, 強度は安定しており, 全般に渡り平成 14 年報告結果 (図－3. 16 参照) に比べ高い強度を持つ。
- ・局所的に 30～35cm の位置で減少傾向を示す。何らかの理由により応力集中が起こり, 強度が低下した可能性があると考えられる。
- ・トンネル中心より 45～50cm の範囲では強度低下が起こっている。載荷面近傍であり載荷による影響であると考えられる。

本年度の試験結果と平成 14 年の試験結果<sup>7)</sup>を比較した場合, 今年度の測定値は平成 14 年の結果に比べ高い数値位置での変動を示す。理由として, 1) 平成 14 年の模型実験供試体一軸圧縮強度が 0.875MPa と今年度 ( $q_u=1.039\text{MPa}$ ) に比べ若干低い数値であったこと, 2) 内圧を作用させたことで間隙の減少, 圧密作用などが起こり供試体の強度が上昇したなどが考えられる。



写真-3. 2 クラック観察



写真-3. 3 解体時トンネル表面

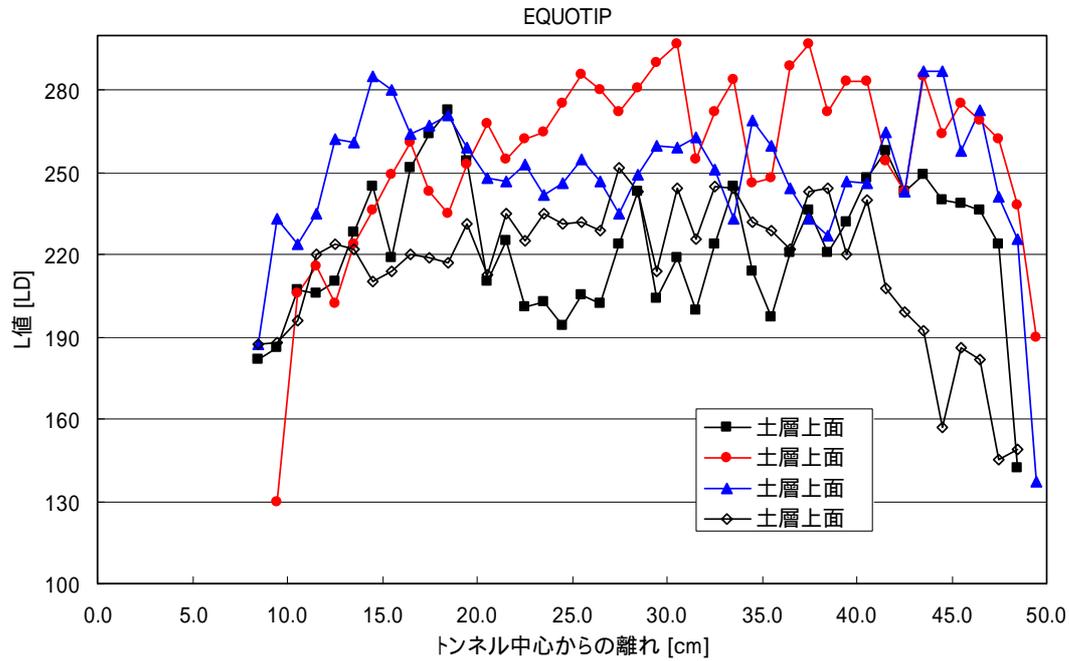


図-3. 14 エコーチップ測定結果

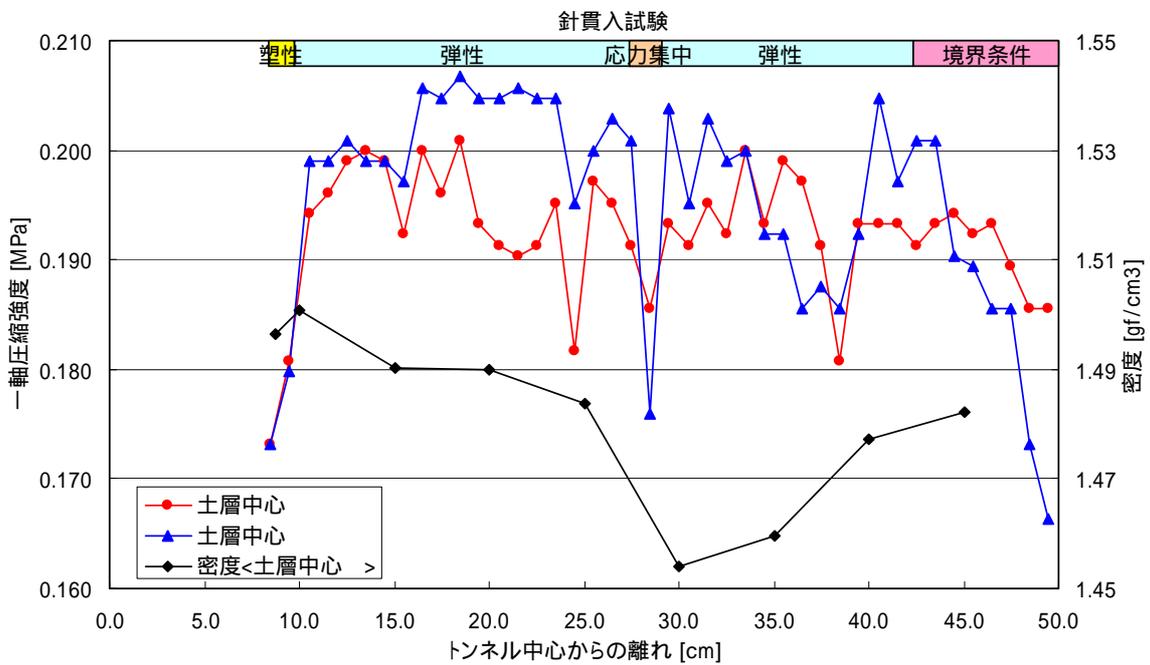


図-3. 15 針貫入試験および密度試験結果

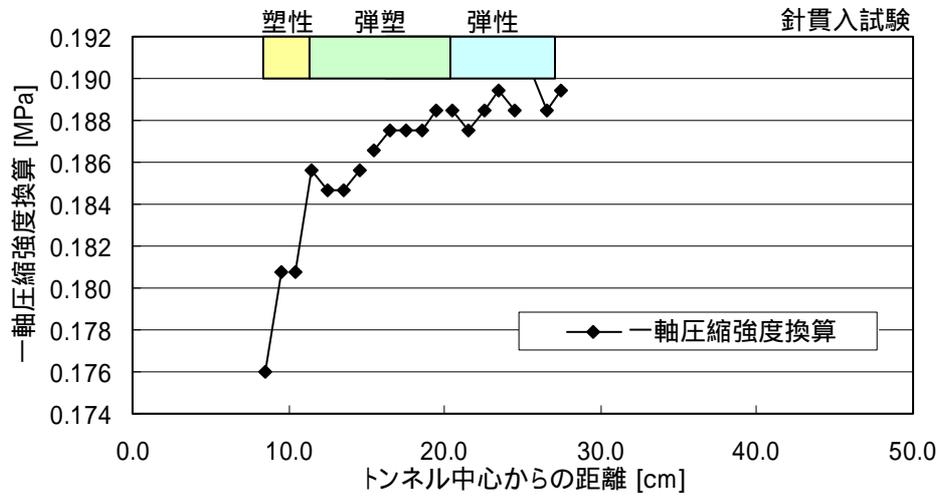


図-3. 16 平成14年針貫入試験結果

今後の課題

模型実験の課題として以下ことが挙げられる。

<実験の実施に伴う課題>

- ・ 载荷に伴う側方変位量のズレの調整。
- ・ 実現象に忠実な評価を行なうため、飽和条件での模型実験の実施。  
(本研究では、供試体をラッピングすることにより含水比の低下を抑制した状態で模型実験を実施)
- ・ 温度条件を加味した模型実験の実施。
- ・ 長期的な模型実験の実施。
- ・ 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～トンネル掘削～クリープ状態における地山内の強度、透水性の把握。

<クリープ挙動評価に伴う課題>

- ・ 動的载荷に対するクリープ挙動の評価。
- ・ 坑道掘削による応力変化に対する挙動評価。
- ・ 坑道掘削後のクリープ挙動の評価。
- ・ 内圧作用時の応力変化に対する挙動評価。
- ・ 構造(強度)劣化の取扱い。

## 4. モデルに関する検討

HDB-1 孔のコアを用いた供試体試験では、幌延堆積岩は、自然状態においては  $10\text{N/mm}^2$  を超える一軸圧縮強度を有するものの、乾湿などの環境条件に対してはかなり敏感で、強度が顕著に低下することが得られた。また、モデルから予想したクリープ状態の挙動予測と実際のクリープ試験結果より、強度のバラツキが顕著であり、バラツキの評価が重要であると考えられる。

人工岩で実施した模型実験では、坑道周辺の岩盤の応力  $\sigma_r$  は空洞掘削直後には初期状態より低下するが、空洞に支保工に相当する内圧を作用させると、応力はある程度回復し、かつその領域が地山深部にまで拡大していく傾向を把握することができた。

これらの結果から、今回用いた大久保モデルを適用するには、下記の 3 点について検討あるいは改良を加える必要があるといえる。

- 1) モデルで用いている  $m$ ,  $n$  はピーク強度後の応力 - ひずみ結果の傾きより簡易的に  $m = n$  をしている。この  $m$  と  $n$  を同じにしていることが予測と実際のクリープ時間に差を生じている要因の一つと考えられる。今度さらにピーク以降のデータを収集し、 $m/n$  を把握することが重要と考える。
- 2) 岩石試験結果に見られるように環境が変化した場合には強度は変化し、また、模型実験で得られたように内圧作用時には、応力状態も変化する。しかし、モデルでは強度は一定として定数を算出し、クリープ時間も計算している。定数  $n$  がこれらの影響を表しているので、環境変化や応力状態の変化がある箇所のクリープ挙動をこのモデルで検討するには、一連の環境下での  $n$  を条件に合わせて変化できるモデルに改良する必要がある。
- 3) モデルでは、地山が必然的に有するバラツキが長期挙動を推定する精度に大きく影響している。これは他の長期挙動モデルでも同様である。試験から算出した定数に確率分布論をあてはめ、その結果を採用してモデルに適用し、長期挙動を想定するなどの予測に関する評価フローを構築することが必要と考える。



## 5. おわりに

## ①幌延堆積岩試料を用いたクリープ試験

(1) 幌延堆積岩の大久保モデルを用いた評価について

- ・今回用いたコアでは大久保モデルの定数<sup>1)</sup>( $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $a$ ) および一軸圧縮強度 ( $\sigma_v$ ) には大きなバラツキが見られる。
- ・コア抜き・整形時に供試体が破損することが多くみられ、均一な供試体を得るには非常に難しい状態であった。
- ・一軸圧縮強度および大久保モデルの定数  $n$  の誤差が破壊到達時間に大きく影響を及ぼす。
- ・点のデータであるボーリングコアは僅かな深度差でバラツキが発生する。

一軸圧縮試験からの大久保モデルの定数等

試験条件	供試体番号	$\lambda_1$ [ $\sqrt{\text{MPa}}$ ]	$n$ [-]	$m$ [-]	$a$ [ $\text{MPa}\cdot\text{sec}$ ]	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$\sigma_v$ [ $\text{MPa}$ ]
飽和	No.6	0.00066	31	31	$1.02 \times 10^{56}$	88.65	14.524
	No.7	0.00075	25	25	$1.94 \times 10^{45}$	83.94	11.366
	No.17	0.00101	44	44	$4.02 \times 10^{82}$	90.00	9.382
平均		<b>0.00081</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b><math>1.89 \times 10^{60}</math></b>	<b>87.53</b>	<b>11.757</b>
80°C	No.9	0.00063	45	45	$2.17 \times 10^{75}$	87.50	23.881
	No.10	0.00068	41	41	$1.63 \times 10^{72}$	84.87	17.474
	No.11	0.00090	64	64	$7.62 \times 10^{121}$	79.17	10.990
平均		<b>0.00074</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b><math>8.22 \times 10^{87}</math></b>	<b>83.84</b>	<b>17.448</b>
乾燥	No.12	0.00054	50	50	$7.11 \times 10^{92}$	90.00	18.770
	No.14	0.00049	40	40	$8.33 \times 10^{73}$	90.00	19.579
	No.16	0.00052	93	93	$2.74 \times 10^{161}$	86.87	29.657
平均		<b>0.00052</b>	<b>61</b>	<b>61</b>	<b><math>7.74 \times 10^{110}</math></b>	<b>88.96</b>	<b>22.669</b>

 $\lambda_1$  : 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  $\lambda_1$ ,  $n$ ,  $m$  から算出している) $\sigma_v$  : 一軸圧縮強度

実測の寿命と大久保モデルでの寿命

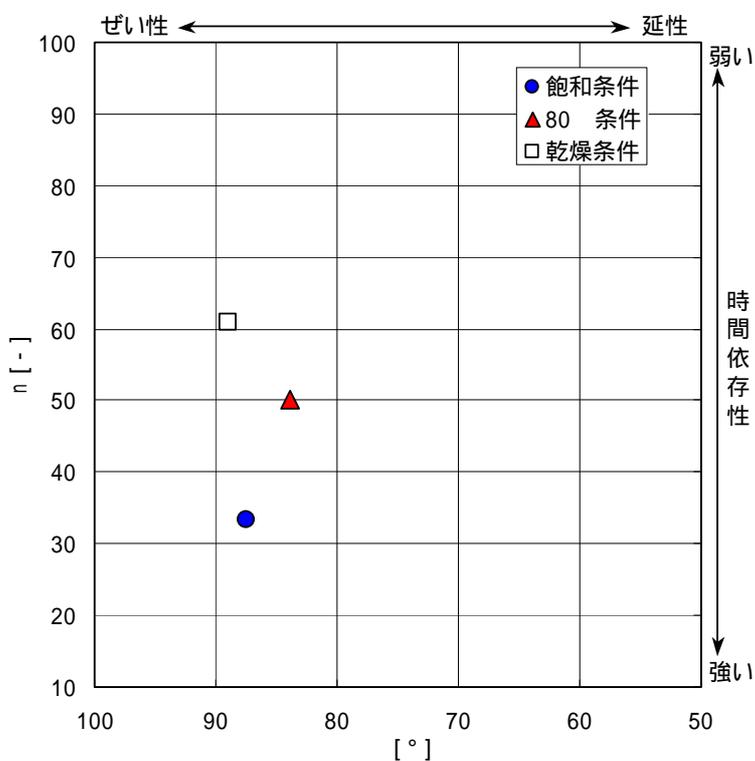
試験条件	供試体番号	载荷応力 [ $\text{MPa}$ ]	破壊到達時間		備考
			大久保モデル	実測値	
飽和	No.3	8.913	738968sec	8sec	
80°C	No.2	4.544	—	—	目標载荷応力到達前に破壊
乾燥	No.4	10.041	$1.98 \times 10^{23}\text{sec}$	—	载荷後 27 日経過, 未破壊

(2) 幌延堆積岩と水理・温度条件について

各試験条件における大久保定数の傾向として、以下のことが挙げられる。

- $\sigma_v$  : 飽和 < 80°C < 乾燥
- $\lambda_1$  : 飽和 > 80°C > 乾燥
- $n$  : 飽和 (室温) < 80°C . . . 温度の影響  
: 飽和 < 乾燥 . . . 水分の影響

- ・ 温度が上昇すると時間依存性の指標  $n$  は小さくなり、初期コンプライアンス  $\lambda_1$  は大きくなること示唆されている<sup>3)</sup>が、本研究では逆の結果となった。
- ・ 供試体のバラツキが影響を及ぼしている可能性が高いが、加熱変化する成分が含まれる可能性など複数の要因が考えられる。



時間依存性の指標  $n$  と延性・ぜい性の指標  $\alpha$  の関係

②軟岩試料を用いた模型実験

(1) 供試体の変形について

- ・ Egger の式<sup>5)</sup>より、トンネル壁面の変位量を算出すると 0.05mm となる。実際には 0.02～0.33mm 程度の変形量が出ている。
- ・ トンネル掘削前の載荷応力を保持した 2 期間を比較した場合、時間経過に伴い単位時間当たりの側方変位量が小さくなる傾向がみられる。

(2) 内部応力について

<内圧負荷前>

- ・ 時間経過に伴い  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ とも応力が増加し、 $r/a$ の違いによる応力差が顕著になっている。
- ・ 理論値と測定値の形状を比較した場合、測定値の弾塑性境界が  $r/a=1.0\sim 1.4$ にある可能性が高いと考えられる。Kastner の式から計算した弾塑性境界:C はトンネル中心から 9.23cm ( $r/a=1.23$ )の位置にあり、結果と整合している。

<内圧負荷後>

- ・ 内圧の負荷により  $r$  方向および  $\theta$  方向の応力が、 $\sigma_r/q_u$ 、 $\sigma_\theta/q_u=1.0$  に収束する傾向が見られる。
- ・ 測定値  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  は対称形を示し理論曲線と同傾向である。
- ・ トンネル壁面に近いほど応力の変動が大きく、内圧の影響が強いことを示している。

(3) 供試体の硬度について

- ・ トンネル近傍では他の箇所 비해強度低下が起こっている。これは、トンネルの掘削影響等により塑性変形が大きな箇所では、内圧効果による強度回復が完全には起こらない可能性を示していると考えられる。
- ・ トンネル中心より 10～40cm の範囲ではある程度のバラツキ幅を持つが、強度は安定しており、全般に渡り平成 14 年報告結果に比べ高い強度を持つ。
- ・ 局所的に 30～35cm の位置で減少傾向を示す。何らかの理由により応力集中が起こり、強度が低下した可能性があると考えられる。
- ・ トンネル中心より 45～50cm の範囲では強度低下が起こっている。載荷面近傍であり、載荷による影響であると考えられる。
- ・ 今年度の測定値は平成 14 年の結果に比べ高い数値位置での変動を示す。

③モデルに関する検討

クリープ試験および模型実験結果から、大久保モデルを適用するには下記の 3 点について検討あるいは改良を加える必要があるといえる。

- ・モデルで用いている  $m$ ,  $n$  はピーク強度後の応力 - ひずみ結果の傾きより簡易的に  $m = n$  をしている。この  $m$  と  $n$  を同じにしていることが予測と実際のクリープ時間に差を生じている要因の一つと考えられる。今度さらにピーク以降のデータを収集し、 $m/n$  を把握することが重要と考える。
- ・岩石試験結果に見られるように環境が変化した場合には強度は変化し、また、模型実験で得られたように内圧作用時には、応力状態も変化する。しかし、モデルでは強度は一定として定数を算出し、クリープ時間も計算している。定数  $n$  がこれらの影響を表しているので、環境変化や応力状態の変化がある箇所のクリープ挙動をこのモデルで検討するには、一連の環境下での  $n$  を条件に合わせて変化できるモデルに改良する必要がある。
- ・モデルでは、地山が必然的に有するバラツキが長期挙動を推定する精度に大きく影響している。これは他の長期挙動モデルでも同様である。試験から算出した定数に確率分布論をあてはめ、その結果を採用してモデルに適用し、長期挙動を想定するなどの予測に関する評価フローを構築することが必要と考える。

今後の課題として、軟岩試料の水理条件・温度条件および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)	目的	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	各試験結果を比較することで、含水条件および温度条件に対する強度特性を把握する	3 期間 ・超短期 ・短期 ・長期	各 5	各 1 5
		飽和状態 加熱 (60, 80 ° C)				
		飽和状態 熱履歴 (常温～高温～常温)				
		乾湿繰り返し 常温				
		乾湿繰り返し 加熱 (60, 80°C)				
		乾湿繰り返し 熱履歴 (常温～高温～常温)				
	乾燥状態 常温					
三軸状態	飽和状態 常温 3封圧		3 期間	3	2 7	
透水試験		飽和状態 常温	各試験結果を比較することで、含水条件および温度条件に対する水理特性を把握する	計画クリープ期間の 30,60,80% 到達時に実施	各 2	各 6
		飽和状態 80 ° C				
		乾湿繰り返し 常温				
		乾湿繰り返し 80 ° C				
模型実験 人工岩	水平二軸 模擬三軸	地山強度比：0.5 常温 (内圧無し)	地山応力、水理条件、温度条件によるニアフィールド岩盤の力学的変形挙動を把握する	3ヶ月～半年	各 1	各 1
		地山強度比：0.5 常温 (内圧有り)				
		地山強度比：0.5～1.0 飽和条件 (内圧有無)				
		地山強度比：0.5～1.0 温度条件 (内圧有無)				
模型実験 自然岩	水平二軸 模擬三軸	地山強度比：0.5～1.0 常温 (内圧無し)	地山応力、水理条件、温度条件による岩種の異なるニアフィールド岩盤の力学的変形挙動を把握する	3ヶ月～半年	各 3	各 3
		地山強度比：0.5～1.0 常温 (内圧有り)				
		地山強度比：0.5～1.0 飽和条件 (内圧有無)				
		地山強度比：0.5～1.0 温度条件 (内圧有無)				



参考文献

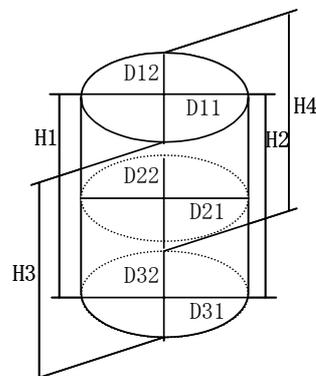
- 1) 大久保誠介他：“一軸圧縮応力下における時間依存性挙動—岩石の Post-failure Region での挙動（第1報）—”，日本鉱業会誌，Vol.103，No.1189，（1987）
- 2) 大久保誠介：“コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討”，資源・素材学会誌，Vol.108，No.8，（1992）
- 3) 大久保誠介他：“コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”，資源と素材，Vol.113，No7，（1997）
- 4) 大久保誠介他：“緩み領域の強度回復に関する基礎研究”，資源と素材，Vol.117，No.8，（2001）
- 5) 土木工学社：NATM 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) 前田建設工業株式会社：“軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究”，JNC TJ8400 2002-011，（2002）
- 8) 前田建設工業株式会社：“軟岩試料を用いたクリープ試験”，（2001）
- 9) 須藤俊男：“粘土鉱物学”，（1974）
- 10) 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）
- 11) 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）
- 12) 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）
- 13) 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）
- 14) 大久保誠介：“岩石のクリープ”資源・素材学会誌，Vol.107，No.5，（1991）
- 15) 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）
- 16) 土質工学会編：岩の調査と試験，（1989）
- 17) (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）



幌延堆積岩供試体データ

供試体No 6 <飽和条件> 採取深度 512.6 m  
 拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>377.50</u> <u>(377.60)</u>
D [cm]	D11	<u>4.935</u>
	D12	<u>4.934</u>
	D21	<u>4.926</u>
	D22	<u>4.922</u>
	D31	<u>4.924</u>
	D32	<u>4.927</u>



$$\bar{D} = \underline{4.928}$$

$$A = \underline{19.074} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>10.569</u>
	H2	<u>10.571</u>
	H3	<u>10.567</u>
	H4	<u>10.569</u>

$$\bar{H} = \underline{10.569} \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>28.01</u>
$T_p$ [ $\mu$ sec]	<u>48.9</u>
$T_s$ [ $\mu$ sec]	<u>111.8</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.369</u>
$q_u$ [MPa]	<u>14.52</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2161.3</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>945.3</u>

$$d [-] = \underline{0.382}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{1.674E+06}$$

$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{4.626E+06}$$

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  788.5[min] 速度 $10^{-5}$  78.8[min]  
 注:変位計5mm使用 < 10分間載荷 > < 1分間載荷 >

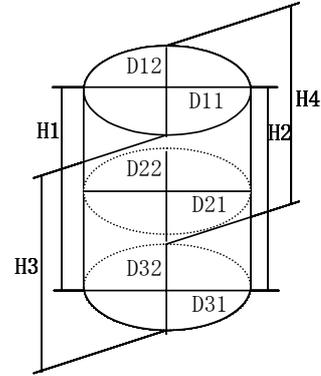
幌延堆積岩供試体データ

供試体No 7 <飽和条件> 採取深度 513.0 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>386.90</u>
		<u>(386.50)</u>
D [cm]	D11	<u>4.996</u>
	D12	<u>4.998</u>
	D21	<u>4.997</u>
	D22	<u>4.997</u>
	D31	<u>4.997</u>
	D32	<u>4.996</u>

H [cm]	H1	<u>10.593</u>
	H2	<u>10.597</u>
	H3	<u>10.599</u>
	H4	<u>10.592</u>



$$\bar{D} = \frac{4.997}{A} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\bar{H} = \frac{10.595}{\text{[cm]}}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>22.53</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>48.3</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>110.2</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.242</u>
$q_u$ [MPa]	<u>11.37</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2193.6</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>961.5</u>

$$d \text{ [-]} = \frac{0.381}{G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{1.720E+06}{E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{4.750E+06}}$$

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  786.5[min] 速度 $10^{-5}$  78.7[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 17 <飽和条件> 採取深度 515.5 m  
 拘束圧 $\sigma_3$  - - -

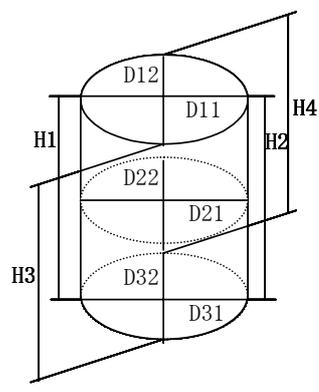
W [gf]		<u>334.70</u> <u>(334.50)</u>
D [cm]	D11	<u>4.995</u>
	D12	<u>4.993</u>
	D21	<u>4.993</u>
	D22	<u>4.990</u>
	D31	<u>4.990</u>
	D32	<u>4.988</u>

H [cm]	H1	<u>8.941</u>
	H2	<u>8.938</u>
	H3	<u>8.937</u>
	H4	<u>8.937</u>

$P_{MAX}$ [kN]	<u>18.60</u>
$T_p$ [ $\mu$ sec]	<u>40.4</u>
$T_s$ [ $\mu$ sec]	<u>100.8</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.755</u>
$q_u$ [MPa] <small>=<math>P(1 - \dots / 100) / A</math></small>	<u>9.38</u>

$V_p$ [m/sec]	<u>2212.4</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>886.7</u>

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  932.3[min] 速度 $10^{-5}$  93.2[min]  
注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>



$$\bar{D} = \frac{4.992}{A} = \underline{\underline{19.568}} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\bar{H} = \underline{\underline{8.938}} \text{ [cm]}$$



$$d [-] = \underline{\underline{0.404}}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{\underline{1.504E+06}}$$

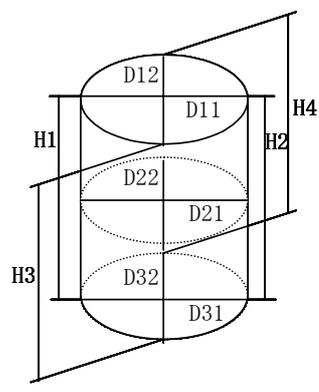
$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{\underline{4.223E+06}}$$

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 9 <80 条件> 採取深度 513.3 m  
 拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>386.60</u> <u>(383.50)</u>
D [cm]	D11	<u>5.002</u>
	D12	<u>5.000</u>
	D21	<u>5.000</u>
	D22	<u>5.000</u>
	D31	<u>4.999</u>
	D32	<u>5.000</u>

H [cm]	H1	<u>10.658</u>
	H2	<u>10.663</u>
	H3	<u>10.664</u>
	H4	<u>10.656</u>



$$\bar{D} = \frac{5.000}{19.636} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\bar{H} = 10.660 \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>47.75</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>48.8</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>106.8</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>17.966</u>
$q_u$ [MPa]	<u>23.88</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2184.5</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>998.2</u>

$$d [-] = \frac{0.368}{1.825E+06}$$

$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{4.994E+06}{1.825E+06}$$

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  781.7[min] 速度 $10^{-5}$  78.2[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 10 <80 条件> 採取深度 514.0 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

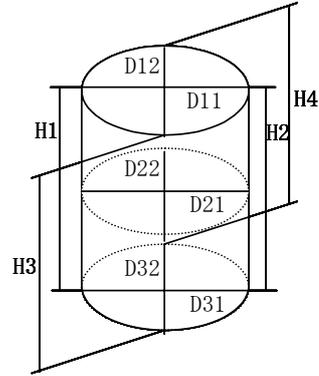
W [gf]		<u>372.70</u> <u>(369.90)</u>
D [cm]	D11	<u>4.997</u>
	D12	<u>4.998</u>
	D21	<u>4.997</u>
	D22	<u>4.996</u>
	D31	<u>4.996</u>
	D32	<u>4.996</u>

H [cm]	H1	<u>10.246</u>
	H2	<u>10.246</u>
	H3	<u>10.247</u>
	H4	<u>10.247</u>

$P_{MAX}$ [kN]	<u>34.77</u>
$T_p$ [ $\mu$ sec]	<u>46.8</u>
$T_s$ [ $\mu$ sec]	<u>104.0</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.054</u>
$q_u$ [MPa] <small>=<math>P(1 - /100)/A</math></small>	<u>17.47</u>

$V_p$ [m/sec]	<u>2189.4</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>985.2</u>

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  813.3[min] 速度 $10^{-5}$  81.3[min]  
注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>



$$\bar{D} = \frac{4.997}{19.609} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\bar{H} = 10.247 \text{ [cm]}$$



$$d [-] = 0.373$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = 1.787\text{E}+06$$

$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = 4.907\text{E}+06$$

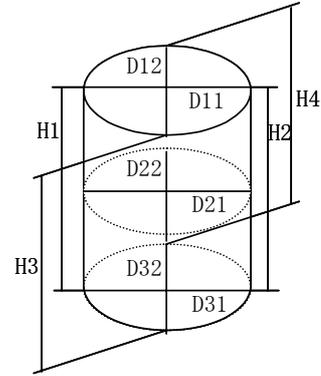
幌延堆積岩供試体データ

供試体No 11 <80 条件> 採取深度 514.3 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>394.10</u> <u>(390.60)</u>
D [cm]	D11	<u>4.983</u>
	D12	<u>4.983</u>
	D21	<u>4.982</u>
	D22	<u>4.983</u>
	D31	<u>4.981</u>
	D32	<u>4.982</u>

H [cm]	H1	<u>10.790</u>
	H2	<u>10.805</u>
	H3	<u>10.792</u>
	H4	<u>10.799</u>



$$\bar{D} = \frac{4.982}{19.496} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\bar{H} = 10.797 \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>21.66</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>51.5</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>112.6</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.198</u>
$q_u$ [MPa]	<u>10.99</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2096.4</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>958.8</u>

$$d [-] = \frac{0.368}{1.706E+06}$$

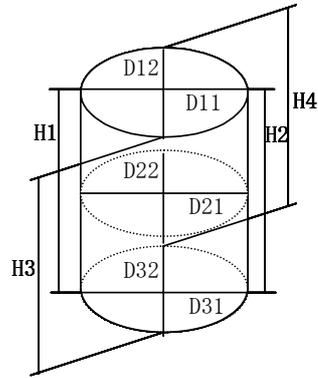
$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{4.667E+06}{1.706E+06}$$

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  771.9[min] 速度 $10^{-5}$  77.2[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 12 <乾燥条件> 採取深度 514.4 m  
 拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>398.50</u> (328.20)
D [cm]	D11	<u>4.986</u> (4.998)
	D12	<u>4.977</u> (4.996)
	D21	<u>4.978</u> (4.997)
	D22	<u>4.970</u> (4.996)
	D31	<u>4.981</u> (4.998)
	D32	<u>4.972</u> (4.996)



$$D = \frac{4.977}{A = 19.457} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>10.736</u> (10.790)
	H2	<u>10.735</u> (10.785)
	H3	<u>10.731</u> (10.784)
	H4	<u>10.730</u> (10.786)

$$H = \underline{10.733} \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>36.92</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>50.6</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>117.0</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>15.412</u>
$q_u$ [MPa]	<u>18.77</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2121.1</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>917.4</u>

$$d [-] = \underline{0.385}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{1.323E+06}$$

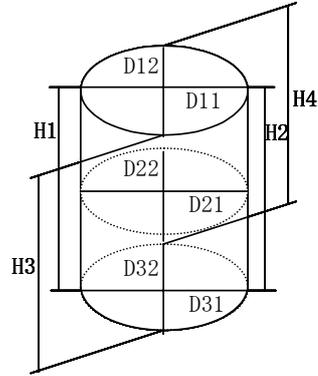
$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{3.663E+06}$$

TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  776.4[min] 速度 $10^{-5}$  77.6[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 14 <乾燥条件> 採取深度 515.0 m  
 拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>386.20</u>	
		(328.20)	
D [cm]	D11	<u>4.972</u>	(4.999)
	D12	<u>4.979</u>	(5.001)
	D21	<u>4.972</u>	(4.999)
	D22	<u>4.980</u>	(5.001)
	D31	<u>4.964</u>	(4.990)
	D32	<u>4.973</u>	(4.992)



$$D = \frac{4.973}{A = 19.426} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>10.328</u>	(10.394)
	H2	<u>10.338</u>	(10.399)
	H3	<u>10.339</u>	(10.400)
	H4	<u>10.336</u>	(10.396)

$$H = 10.335 \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>38.45</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>49.2</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>110.4</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>16.031</u>
$q_u$ [MPa]	<u>19.58</u>



$V_p$ [m/sec]	<u>2100.7</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>936.2</u>

$$d [-] = 0.376$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = 1.433\text{E}+06$$

$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = 3.943\text{E}+06$$

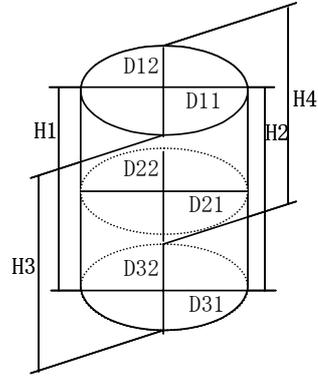
TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  806.3[min] 速度 $10^{-5}$  80.6[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 16 <乾燥条件> 採取深度 515.4 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>395.60</u> (337.00)
D [cm]	D11	<u>4.983</u> (5.001)
	D12	<u>4.969</u> (4.999)
	D21	<u>4.981</u> (4.998)
	D22	<u>4.975</u> (4.999)
	D31	<u>4.979</u> (4.998)
	D32	<u>4.965</u> (4.998)



$$D = \frac{4.975}{A = 19.442} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>10.607</u> (10.680)
	H2	<u>10.608</u> (10.678)
	H3	<u>10.606</u> (10.678)
	H4	<u>10.613</u> (10.684)

$$H = \underline{10.609} \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>58.70</u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>51.3</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>112.2</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>16.024</u>



$q_u$ [MPa]	<u>29.66</u>
$V_p$ [m/sec]	<u>2067.9</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>945.5</u>

$$d \text{ [-]} = \underline{0.368}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{1.461E+06}$$

$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{3.996E+06}$$

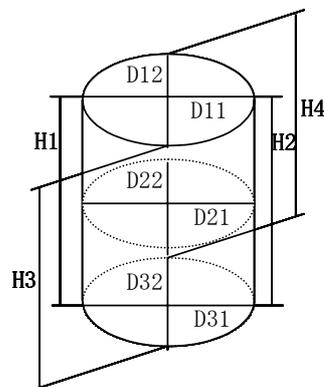
TIMEカウンター入力値 速度 $10^{-6}$  785.5[min] 速度 $10^{-5}$  78.6[min]  
 注:変位計5mm使用 <10分間載荷> <1分間載荷>

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 3 <飽和条件> 採取深度 515.8 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>138.50</u>
		<u>(138.40)</u>
D [cm]	D11	<u>3.472</u>
	D12	<u>3.469</u>
	D21	<u>3.470</u>
	D22	<u>3.466</u>
	D31	<u>3.470</u>
	D32	<u>3.471</u>



$$\bar{D} = \underline{3.470}$$

$$A = \underline{9.455} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>7.731</u>
	H2	<u>7.728</u>
	H3	<u>7.729</u>
	H4	<u>7.730</u>

$$\bar{H} = \underline{7.730} \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>                    </u>
$T_p$ [ $\mu$ sec]	<u>36.7</u>
$T_s$ [ $\mu$ sec]	<u>79.6</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.585</u>
$q_u$ [MPa]	<u>                    </u>
$V_p$ [m/sec]	<u>2106.1</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>971.0</u>
TIMEカウンター入力値	<u>                    </u>



$$v_d \text{ [ - ]} = \underline{0.365}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{1.787E+06}$$

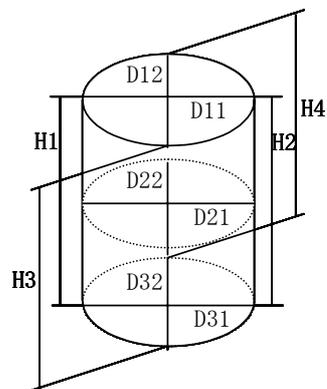
$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{4.878E+06}$$

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 2 <80 条件> 採取深度 512.2 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>139.50</u>
		<u>(139.50)</u>
D [cm]	D11	<u>3.468</u>
	D12	<u>3.468</u>
	D21	<u>3.476</u>
	D22	<u>3.479</u>
	D31	<u>3.479</u>
	D32	<u>3.479</u>



$$\bar{D} = \underline{3.475}$$

$$A = \underline{9.483} \text{ [cm}^2\text{]}$$

H [cm]	H1	<u>7.766</u>
	H2	<u>7.765</u>
	H3	<u>7.765</u>
	H4	<u>7.767</u>

$$\bar{H} = \underline{7.766} \text{ [cm]}$$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>                    </u>
$T_p$ [ $\mu$ sec]	<u>35.0</u>
$T_s$ [ $\mu$ sec]	<u>78.6</u>
[kN/m <sup>3</sup> ]	<u>18.576</u>
$q_u$ [MPa]	<u>                    </u>
$V_p$ [m/sec]	<u>2218.8</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>988.0</u>
TIMEカウンター入力値	<u>                    </u>



$$v_d \text{ [ - ]} = \underline{0.376}$$

$$G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{1.849E+06}$$

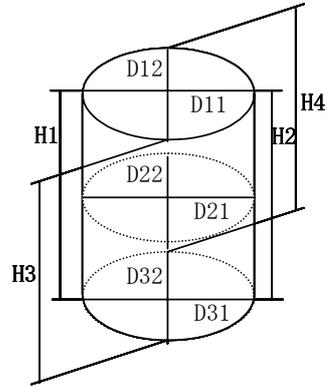
$$E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \underline{5.090E+06}$$

幌延堆積岩供試体データ

供試体No 4 <乾燥条件> 採取深度 516.0 m

拘束圧 $\sigma_3$  - - -

W [gf]		<u>134.00</u>	
		(109.80)	
D [cm]	D11	<u>3.465</u>	(3.471)
	D12	<u>3.458</u>	(3.474)
	D21	<u>3.466</u>	(3.465)
	D22	<u>3.451</u>	(3.468)
	D31	<u>3.460</u>	(3.466)
	D32	<u>3.451</u>	(3.468)



$D = \frac{3.459}{9.394} \text{ [cm}^2\text{]}$

H [cm]	H1	<u>7.493</u>	(7.541)
	H2	<u>7.491</u>	(7.540)
	H3	<u>7.491</u>	(7.541)
	H4	<u>7.492</u>	(7.540)

$H = \frac{7.492}{\text{[cm]}}$

$P_{MAX}$ [kN]	<u>                    </u>
$T_p$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>36.9</u>
$T_s$ [ $\mu\text{sec}$ ]	<u>78.8</u>
[ $\text{kN/m}^3$ ]	<u>18.671</u>
$q_u$ [MPa]	<u>                    </u>
$V_p$ [m/sec]	<u>2030.3</u>
$V_s$ [m/sec]	<u>950.7</u>
TIMEカウンター入力値	<u>                    </u>



$v_d \text{ [-]} = \frac{0.360}{1.721\text{E}+06}$   
 $G_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{1.721\text{E}+06}{4.680\text{E}+06}$   
 $E_d \text{ [kN/m}^2\text{]} = \frac{4.680\text{E}+06}{\text{                    }}$



幌延泥岩供試体状況 (マーブル)



幌延泥岩供試体状況 (異物混入)



弾性波測定器



弾性波測定状況



岩石三軸圧縮試験機



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後（飽和：No.6）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（飽和：No.7）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（飽和：No.17）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（80℃：No.9）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（80℃：No.10）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（80℃：No.11）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（乾燥：No.12）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（乾燥：No.14）



歪み速度繰返し一軸圧縮試験後（乾燥：No.16）



クリープ試験機



クリープ試験機拡大 (80℃条件)



クリープ試験実施後 A (飽和 : No.3)



クリープ試験実施後 B (飽和 : No.3)



クリープ試験実施後 A (80°C : No.2)



クリープ試験実施後 B (80°C : No.2)



クリープ試験実施 A (乾燥 : No.4)

模型実験人工供試体 配合設計

<使用材料>

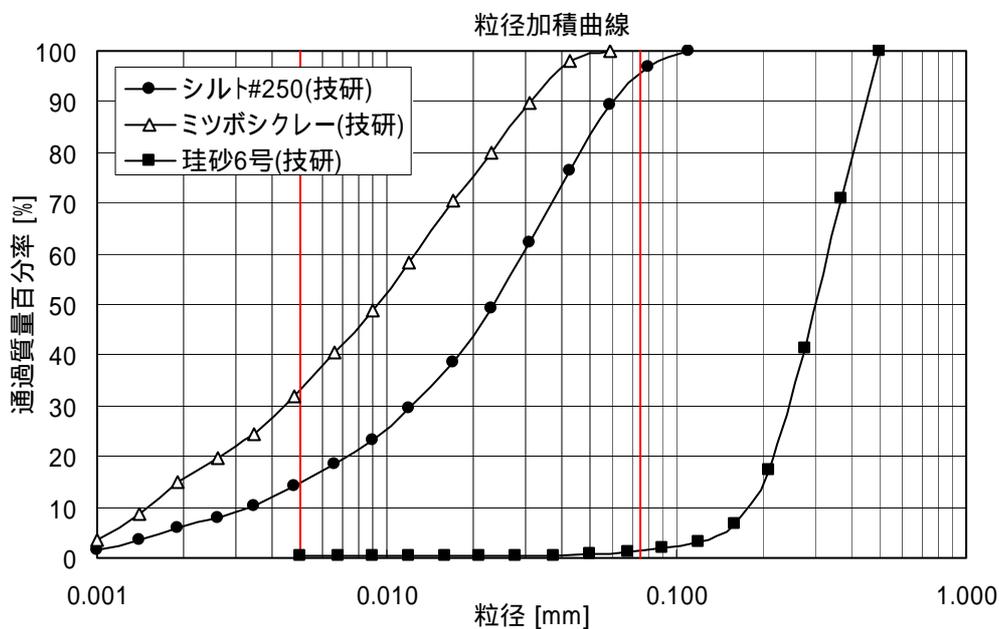
\*ミツボシクレー : 矢橋工業株式会社 製

\*シルト#250 : 丸中白土株式会社 製

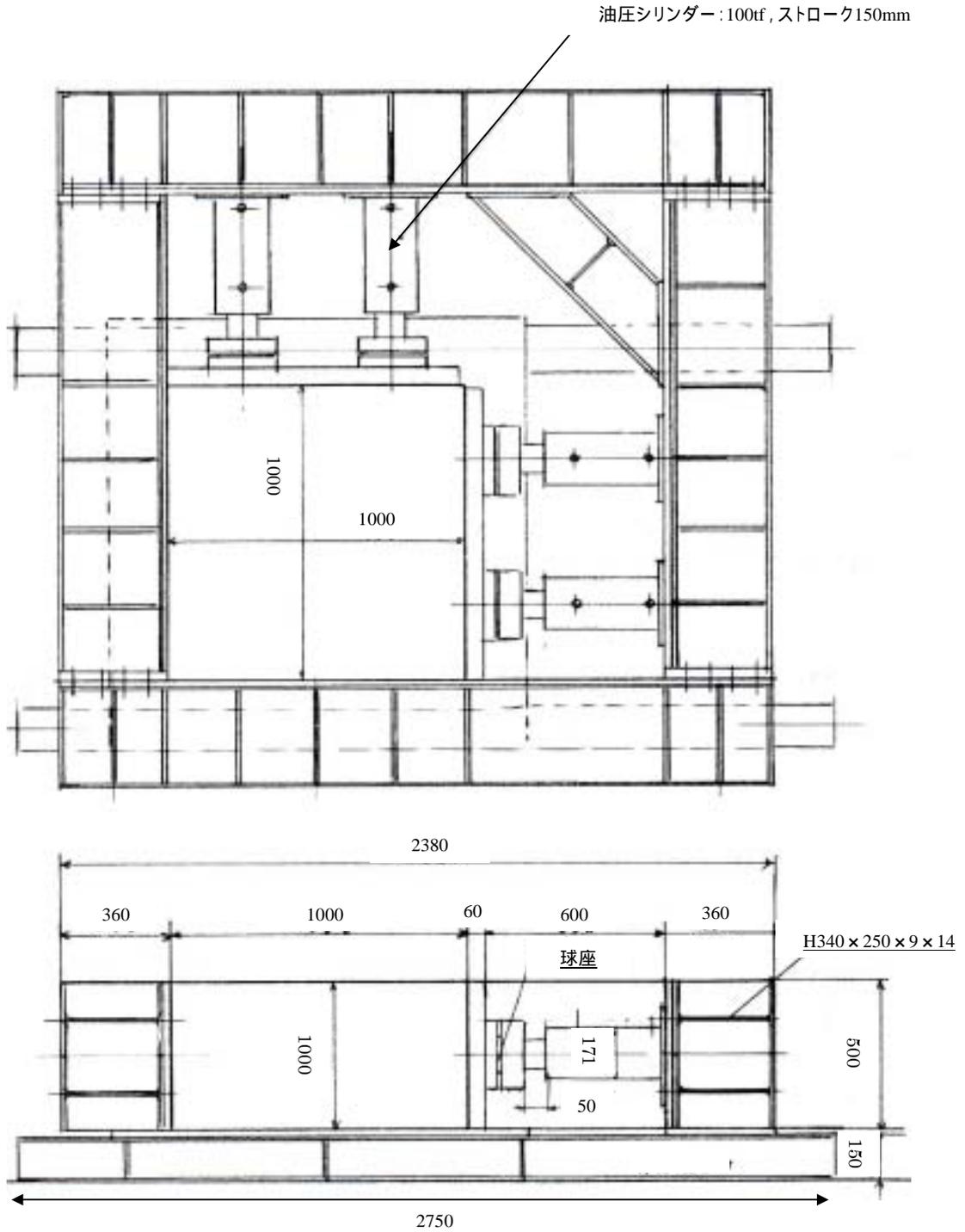
<化学分析結果>

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

<粒度分布>



模型実験载荷装置



<使用計器：高感度変位計>



■仕様

型名	CDP-10	CDP-50
容量 (mm)	10	50
定格出力	5mV/V $\pm$ 0.1% (10000 $\times$ 10 <sup>-6</sup> $\pm$ 0.1%)	5mV/V $\pm$ 0.1% (12500 $\times$ 10 <sup>-6</sup> $\pm$ 0.1%)
感度 ( $\times$ 10 <sup>-6</sup> mm)	1000	200
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	6
零点の温度影響	1 $\times$ 10 <sup>-6</sup> / $^{\circ}$ C (0 $\sim$ +40 $^{\circ}$ C)	1 $\times$ 10 <sup>-6</sup> / $^{\circ}$ 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 $\Omega$	350 $\Omega$
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：超小型圧力計>



■仕様

型名	KDE-2MPA
容量	2MPa (20.4kgf/cm <sup>2</sup> )
定格出力	約 0.5mV/V (1000×10 <sup>-6</sup> )
非直線性	2%RO
許容温度範囲	-20～+60℃
入出力抵抗	350Ω
推奨印加電圧	3V 以下
許容印加電圧	10V
質量	160g

【製品総合カタログ 2001-2002, p.214, 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 油圧ポンプおよび記録装置



模型実験载荷装置 载荷状況



模型実験載荷装置 トンネル掘削状況



模型実験載荷装置 トンネル壁面状況



模型実験載荷装置 内圧装置バルーン



模型実験載荷装置 内圧装置設置状況



模型実験除荷後 供試体解体状況



模型実験載荷装置 密度試験状況



模型実験載荷装置 エコーチップ試験状況①



模型実験載荷装置 エコーチップ試験状況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









