

立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査(Ⅳ)

～堆積岩の掘削に伴う特性変化に関する基礎的研究～

概要報告書

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年 3 月

大成建設株式会社
株式会社 大林組

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

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒509-51

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31

動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所

技術開発課

立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査(Ⅳ)

～堆積岩の掘削に伴う特性変化に関する基礎的研究～

概要報告書

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年3月

大成建設株式会社
株式会社 大林組

立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査 (IV)
～堆積岩の掘削に伴う特性変化に関する基礎的研究～

山本 卓也* 吉岡 尚也**

要 旨

岩盤における立坑などの坑道の掘削は、岩盤本来の力学的・水理学的特性に影響を与え、また、坑道周辺の水理環境の変化を促し地下水流動へ影響を与える。立坑掘削影響試験では、これらの現象を定量的に把握・評価することを目的としている。このうちの岩盤挙動の調査では、立坑周囲の岩盤の力学的・水理学的特性に対する影響評価を目的として、岩盤の変位・応力・特性の計測・解析を実施してきた。この結果、特性変化に対して、応力状態の変化や不飽和領域の発生が深く関係していることが明らかになりつつある。

本調査では、立坑掘削影響試験の結果をより定量的に評価するために、

- (1) 応力状態や飽和度と物性の関係に関する基礎的データを取得すること
- (2) 岩盤の長期挙動の評価や解析のために必要な岩盤の条件を明らかにすることを目的とし、室内試験を行った。

応力状態や飽和度などの条件と特性の関係を評価するための試験については、試験手法が確立されたものは少ない。このため、既存の試験についての文献を調査し、試験手法を決定した。

室内試験結果を整理・分析し、応力状態や飽和度と物性の関係、岩盤の長期挙動の評価や解析のために必要な岩盤の条件について考察した。そして、今回の室内試験で明らかとなった問題点を今後の課題として示した。

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

契約番号：040D0270

事業団担当部課室および担当者：中部事業所 環境地質課 課長 湯佐泰久

* 大成建設株式会社エンジニアリング本部エネルギー部

** 株式会社大林組技術研究所土木第四研究室

Investigation of Rock Mass Behavior During Shaft Excavation (Phase IV)

T.Yamamoto¹⁾ H.Yoshioka²⁾

ABSTRACT

When excavating a shaft and a drift in a rock mass, mechanical and hydraulic properties of the rock mass may be significantly affected. "Shaft Excavation Effects" project targets on the quantitative evaluation of these phenomena. Objective of the investigation of rock mass behavior is to evaluate the effects of shaft excavation on mechanical and hydrological characteristics of the rock mass around the shaft. Measurements and data analysis of displacement, stress condition and properties of the rock mass around the shaft have been performed. Through the analysis of these data set it is implied that the stress state may be changed and the unsaturated region will be created.

This report involves the results and data analysis of laboratory tests on the following issues :

- the relationship between the stress state and rock properties
- the relationship between the saturation and rock properties
- the evaluation of a long-term behaviour of a rock mass
- the estimation of input data such as initial stress for numerical analysis of rock mass behavior

Very few laboratory tests were performed under well established standard procedure in order to evaluate the relationship between the stress state and the properties of a rock mass. Hence literature on the previous tests were surveyed and the test procedure for this research was discussed.

The results of labo tests were discussed and analyzed with the topics to be discussed at the next project.

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

PNC Liaison : Waste Isolation Research Section, Chubu Works Yasuhisa Yusa

1) Taisei Corporation, Engineering Division

2) Obayashi Corporation, Technical Research Institute

立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査 (IV)
～堆積岩の掘削に伴う特性変化に関する基礎的研究～

概要報告書

目次

	頁
1. はじめに	1
2. 室内試験	2
2.1 応力状態・飽和度と変形性・透水性・弾性波速度の関係の測定	2
2.1.1 共通事項	2
2.1.2 応力状態と透水係数の関係	3
(1)目的	3
(2)文献調査結果	3
(3)試験装置	4
(4)試験方法	7
(5)試験結果と考察	8
(6)まとめ	11
2.1.3 飽和度と弾性波伝播特性の関係	12
(1)目的	12
(2)文献調査結果	12
(3)測定装置	13
(4)測定方法	14
(5)測定結果と考察	16
(6)まとめ	21
2.1.4 応力状態と変形特性の関係	22
(1)目的	22
(2)文献調査結果	22
(3)試験装置	23
(4)試験方法	23
(5)試験結果と考察	25
(6)まとめ	36

2.2	長期挙動に関する特性	38
2.2.1	目的	38
2.2.2	文献調査結果	38
2.2.3	試験装置	39
2.2.4	試験方法	39
2.2.5	試験結果と考察	42
2.2.6	まとめ	50
2.3	カイザー効果の時間依存性	51
2.3.1	目的	51
2.3.2	文献調査結果	52
2.3.3	測定装置	53
2.3.4	測定方法	54
2.3.5	測定結果と考察	56
2.3.6	まとめ	59
3.	調査結果のまとめと今後の課題	60
3.1	応力状態と透水係数の関係	60
3.2	飽和度と弾性波伝播特性の関係	61
3.3	応力状態と変形特性の関係	62
3.4	長期挙動に関する特性	63
3.5	カイザー効果に関する基礎特性	64
	参考文献	65

1. はじめに

岩盤における立坑などの坑道の掘削は、岩盤本来の力学的・水理学的特性に影響を与え、また、坑道周辺の水理環境の変化を促し地下水流動へ影響を与える。立坑掘削影響試験は、これらの現象を定量的に把握・評価することを目的としている。このうちの岩盤挙動の調査では、立坑周囲の岩盤の力学的・水理学的特性に対する影響評価を目的として、岩盤の変位・応力・特性の計測・解析を実施してきた。この結果、特性変化に対して、応力状態の変化や不飽和領域の発生が深く関係していることが推定された。しかし、応力状態の変化や不飽和領域の発生といった現象と岩盤の特性変化の関係に関する情報が少なく、推定の域を出ないのが現状である。

また、岩盤挙動の調査の結果をより詳細に評価するためには、岩盤の長期的な力学特性に関する情報を得ることや、解析のために必要な初期応力場を明らかにすることが必要となった。

以上のことから、本調査では、立坑掘削影響試験の結果をより定量的に評価するために、

- (1) 応力状態や飽和度と物性の関係に関する基礎的データを取得すること
- (2) 岩盤の長期挙動の評価や解析のために必要な岩盤の条件を明らかにすることを目的とし、室内試験を行う。

2. 室内試験

2.1 応力状態・飽和度と変形性・透水性・弾性波速度の測定の関係の測定

2.1.1 共通事項

(1) 試錐および検層

動燃事業団が実施したボーリング（ $\phi 76\text{mm}$ ）により採取された岩石コアを用いて室内試験を実施した。ボーリングは第二立坑から東へ20mの位置で行い、深度は200mである。事業団から、検層データ、ボアホールTVデータの提供を受けた。

(2) ボーリングコアの採取、運搬

1) 試料採取

立坑掘削影響試験において、掘削に伴う岩盤物性の変化を計測した地点の深度と対応させ、明世累層（A断面相当深度）、土岐夾炭累層の上部（B断面相当深度）、土岐夾炭累層の下部（C断面相当深度）の3地点から健全な岩石コアを採取した。

2) 試料の運搬・保存

サンプリング終了時から試験に供するまでの間、

- ①運搬時の振動によるコアの破損
- ②含水比の変化（風乾の防止）
- ③試料の温度変化

に注意してコアを運搬・保存した。

(3) 供試体整形

供試体の整形はJIS M 0302 (1975)に準じた。

(4) コア観察、物理試験

室内試験実施前後に、コア観察および写真撮影を行った。また、各供試体について整形時の残片を用いて物理試験を実施した。

物理試験項目は、見かけ比重測定、有効間隙率、含水率、土粒子の密度、湿潤密度である。

2.1.2 応力状態と透水係数の関係

(1) 目的

立坑掘削影響試験では、掘削により発生したと考えられる影響領域が把握された。この掘削影響領域内では、掘削前後に行った透水試験の結果から、掘削の前後で透水係数が変化していることが計測された。

透水係数の変化の要因については、掘削前後での応力状態の変化、亀裂状態の変化、飽和度の変化等が考えられた。ここでは、特に、掘削前後での応力状態の変化に着目し、岩石の透水係数に対する応力状態の影響を定量的に把握・評価するために下記に示す室内試験を実施した。

(2) 文献調査結果

応力状態と透水性の関係の測定に関する文献調査を行い、試験手法についての情報を収集し、整理した。その結果を以下に示す。

1) 測定方法および条件

(i)定水位法では試験時間の長期化に伴い、 10^{-8} cm/secオーダーまでが現実的な測定限界と考えられる。低透水性試料には、測定精度や試験時間の点から、圧力測定によるトランジェントパルス法が有効である^{1) 2) 4) 5) 9)}。

(ii)試験装置の適用に際し、側面流、透過水量等の測定精度や室温変化の影響についての検討を必要とする^{4) 5)}。特に、室温変化に伴う試験水の体積変化に注意を払う必要がある。温度変化の影響は、2つの貯留槽の完全に同一で同容量になるように配管を工夫し、さらに貯留槽を水タンク内にセットすることでキャンセルできる。

(iii)透水係数に及ぼす試験片両端の圧力差の影響は、透水係数が 10^{-9} cm/secより小さい場合は顕著でない⁷⁾。

2) 結果の評価方法

Braceらの方法で求めた透水係数は厳密解を用いた場合よりも過小評価した結果となるが、厳密解では計算が複雑で試行錯誤が必要なため、Braceらの方法は依然として有効である^{5) 7)}。

3) 得られた知見

(i)トランジェントパルス法の有効性について

①トランジェントパルス法では、 $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{cm/sec}$ のオーダーの透水係数が測定でき、透水係数の小さな試料に対する有効性が示された^{1) 2) 4)}。

②定水位法では透過水量の増加に伴い、透水性の低下する現象が見られた。これに対し、トランジェントパルス法では試験中の透過水量が極めて少ないため、透水性を低下させずに透水係数を評価できた²⁾。

(ii)拘束圧と透水係数の関係 (砂岩、花崗岩および安山岩を対象)

①いずれも拘束圧の増加に伴い透水係数が小さくなる傾向がある。透水係数が 10^9cm/sec より小さい場合は拘束圧による大きな影響は認められない^{1) 2) 7)}。

②拘束圧が一定の場合、間隙水圧の増加とともに透水係数は増加する。また、拘束圧よりも間隙水圧の増加が透水係数に大きな影響を及ぼす⁸⁾。

(3) 試験装置

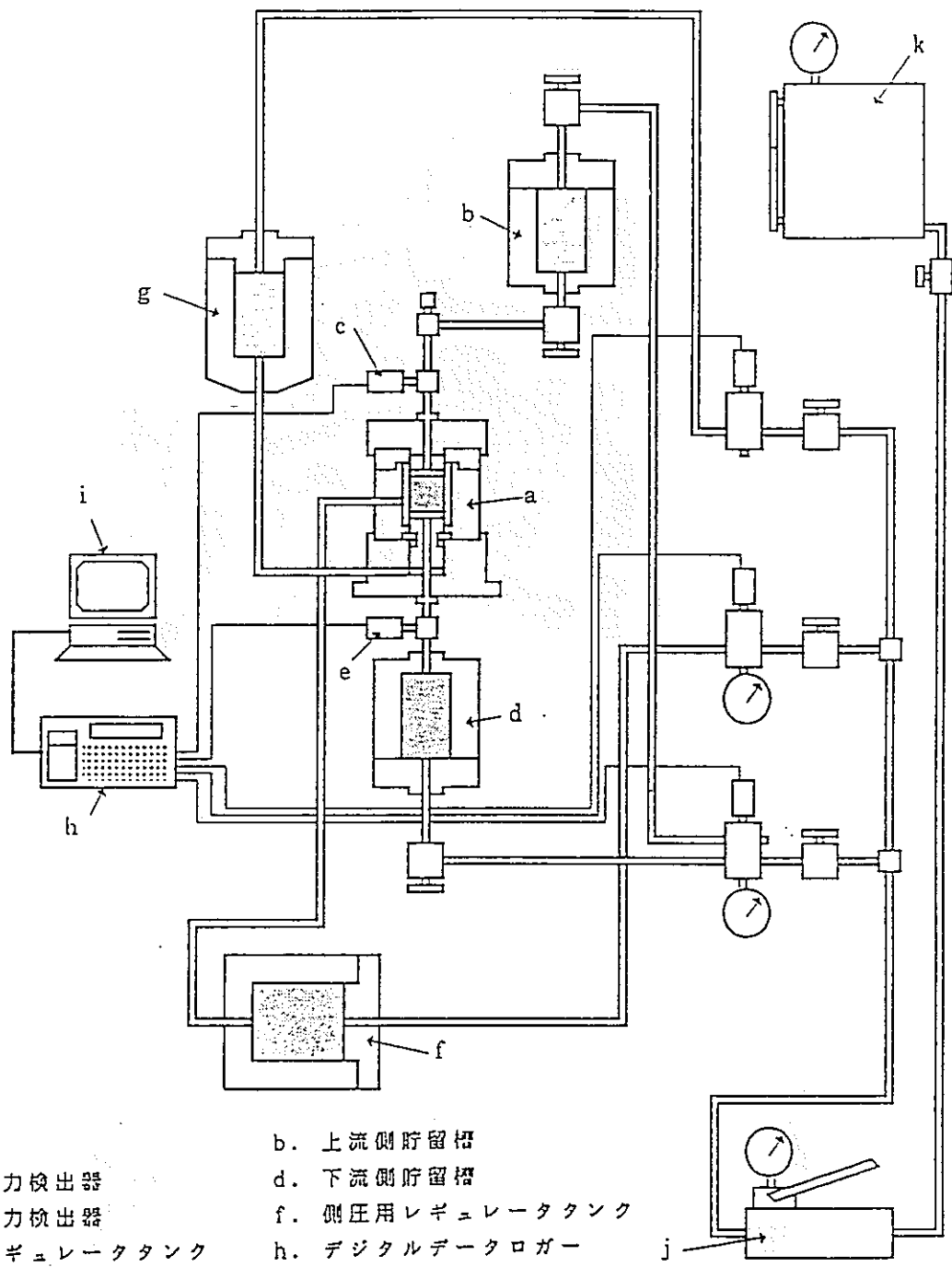
1) 装置の仕様及び構成

(2)で行った応力状態と透水性の関係の測定に関する文献調査の結果に基づき、今回のような低透水性の試料の透水係数を測定するには、測定精度や試験時間の点から、定水位法よりもトランジェントパルス法が望ましいと考えた。今回使用したトランジェントパルス装置の構成図を図-3.1.2.1に示す。

また、今回用いた試験装置を写真-2.1.2.1に示す。

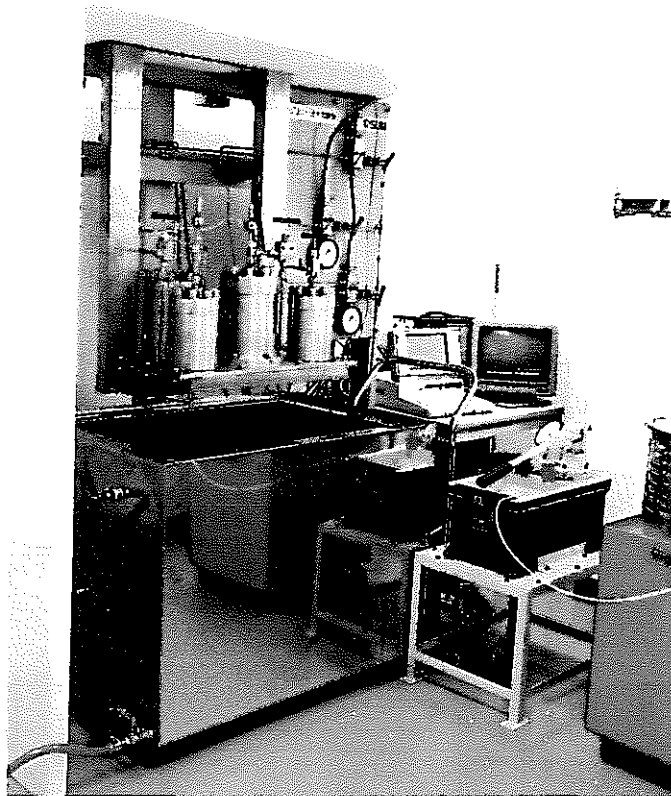
2) 試験・計測の流れ

計測系統は、圧力検出器、データロガー及びパーソナルコンピュータから成っており、測定は全てプログラムにより自動計測されて、データはフロッピーディスクに記録される。

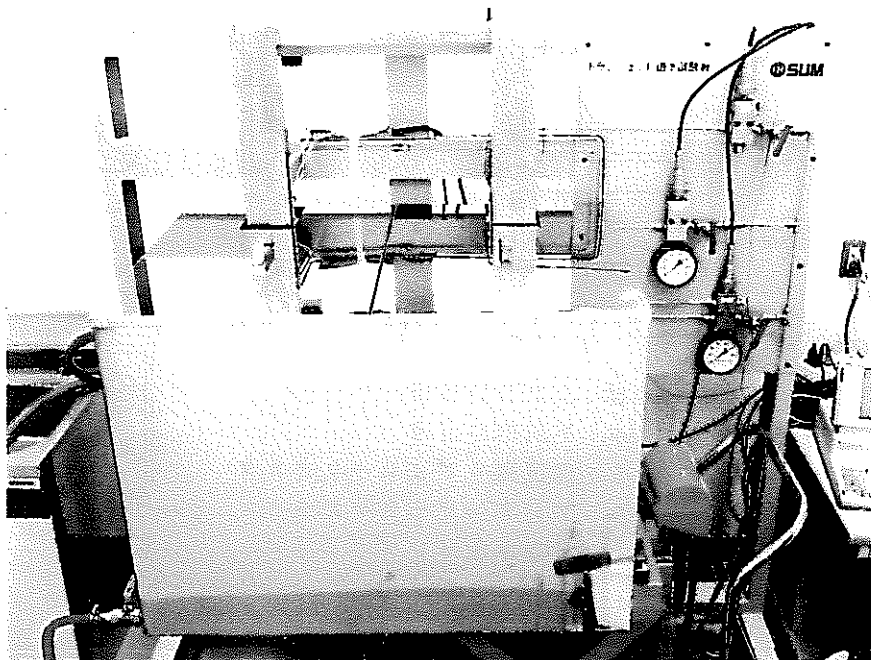


- | | |
|-----------------|-----------------|
| a. 三軸セル | b. 上流側貯留槽 |
| c. 上流側圧力検出器 | d. 下流側貯留槽 |
| e. 下流側圧力検出器 | f. 側圧用レギュレータタンク |
| g. 軸圧用レギュレータタンク | h. デジタルデータロガー |
| i. パーソナルコンピュータ | j. 手動水圧ポンプ |
| k. 脱気タンク | |

図-2.1.2.1 試験装置の構成図



トランジェントパルス試験装置全形



水没後試験実施状態

写真-2.1.2.1 トランジェントパルス試験装置

(4) 試験方法

1) 試験条件

供試体は、高さ50mm、直径50mmを基準とした。透水試験開始前に、弾性波速度、比重、吸水率、含水比、有効間隙率の測定を自然状態と飽和状態について行った。

今回、対象とする岩石コアは 10^{-10} cm/sec程度以下の極めて微小な透水係数であることが予想されたため、(2)で行った文献調査の結果に基づき、試験方法としてトランジェントパルス法を用いた。本試験での試験条件は、本試験に先立って実施した予備試験の結果に基づき設定した。

本試験においては、有効拘束圧は10,20,30kg/cm²の3段階とした。収束水圧は深度位置での静水圧（地下水位GL-15mを仮定）と等しく設定し、各有効拘束圧に対応するように軸圧及び側圧を設定した。パルス圧は3.0kg/cm²を基準に2.0～4.0kg/cm²の範囲で設定した。計測は設定したパルス圧が収束するまで行った。

透水係数への拘束圧変化および拘束圧の履歴の影響を調べるため、同一の供試体について拘束圧を10→20→30→20→10kg/cm²のように変え、合計5回の測定を行った。この試験では、初期状態を設定する時期が重要であるため、試料のセット後一定時間後に試験を開始した。供試体は、A,B,C断面に相当する深度から採取した。

各コアは直径5cm、長さ5cmの岩石供試体に整形し、整形後の状態の良好なもので、亀裂の少ないものを選び透水試験用の試料として採用した。試験ケース数は、5拘束圧×3岩種=15ケースである。

2) データの解析方法

縦軸にパルス幅Hで正規化した上下流側貯留槽の水圧差 ($h_1 - h_2$) / Hを常用対数軸で取り、横軸に経過時間を取ったグラフにデータをプロットする。

正常な試験が行われた場合は、プロットされたデータにきれいな直線部分が現れ、その直線の傾きから透水係数を算定する。ただし、水圧が平衡に近づくと圧力計の分解能が原因でデータがばらつく。

直線の近似度を定量的に確認するため、計測後半部分に現れる分解能に起因するデータのばらつき部分を除いた計測前半の直線部分に対して、最小二乗法により一次回帰分析を行い、相関係数の値より直線近似の程度を評価した。

(5) 試験結果と考察

透水係数と有効拘束圧の関係を図-2.1.2.2に示す。また、試験の結果得られた透水係数を試験条件と合わせて、表-2.1.2.2~2.1.2.4に示す。有効拘束圧は、実際には試験中に変化するため、拘束圧（全応力）より収束水圧を差し引いて算定した。

試験結果より、次のような結論が得られる。

- 1) 今回の透水試験で用いた明世累層の泥岩の透水係数は、試料採取深度での応力状態（有効拘束圧：約 4.5 kg f/cm^2 ）において、およそ $1.42 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ である。土岐夾炭累層上部層の透水係数は、試料採取深度での応力状態（有効拘束圧：約 6.5 kg f/cm^2 ）において、約 $3.23 \times 10^{-11} \text{ cm/sec}$ である。また、土岐夾炭累層下部層の透水係数は、試料採取深度での応力状態（有効拘束圧：約 9.5 kg f/cm^2 ）において、およそ $8.85 \times 10^{-11} \text{ cm/sec}$ である。
- 2) 有効拘束圧 $10 \sim 30 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲では、透水係数の拘束圧依存性はほとんど認められず、上昇時の3段階の透水係数の幾何平均を代表値として、明世累層、土岐夾炭累層上部層、下部層各々 $1.45 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 、 $3.39 \times 10^{-11} \text{ cm/sec}$ 、 $8.38 \times 10^{-11} \text{ cm/sec}$ 程度の値を考えればよい。
- 3) 下降時の透水係数は、上昇時のものより若干低く、これは応力履歴による岩石構造の変化、目づまり等の影響によるものと考えられるが、透水係数のオーダーが変化するほどではない。低下の度合は、BK3が大きく、これは試験時間が長時間にわたったことによる目づまりのためなのか、岩石のクリープ的構造変化によるものなのか、現状では明確な結論を得ることはできない。
- 4) 収束水圧が、AK1では想定値（ 2.5 kg f/cm^2 ）より小さいのは、岩石の貯留効果によるものであり、BK3で逆に想定値（ 5.3 kg f/cm^2 ）より大きいのは、岩石の二次圧密により岩石内の間隙水が試験中に絞りだされ上・下流側とも間隙水圧がその分だけ上昇したためと考えられる。
- 5) BK3に対する試験結果では、有効拘束圧下降時には上昇時に比べ良好な差圧減衰カーブが得られ、透水係数近似直線の近似度合も高い。これは、拘束圧下降時の岩石のクリープ的変形が上昇時に比べ小さく、また岩石の構造変化が弾性的ではないことを示しているものと考えられる。AK1,CK1ではこの傾向は顕著ではない。

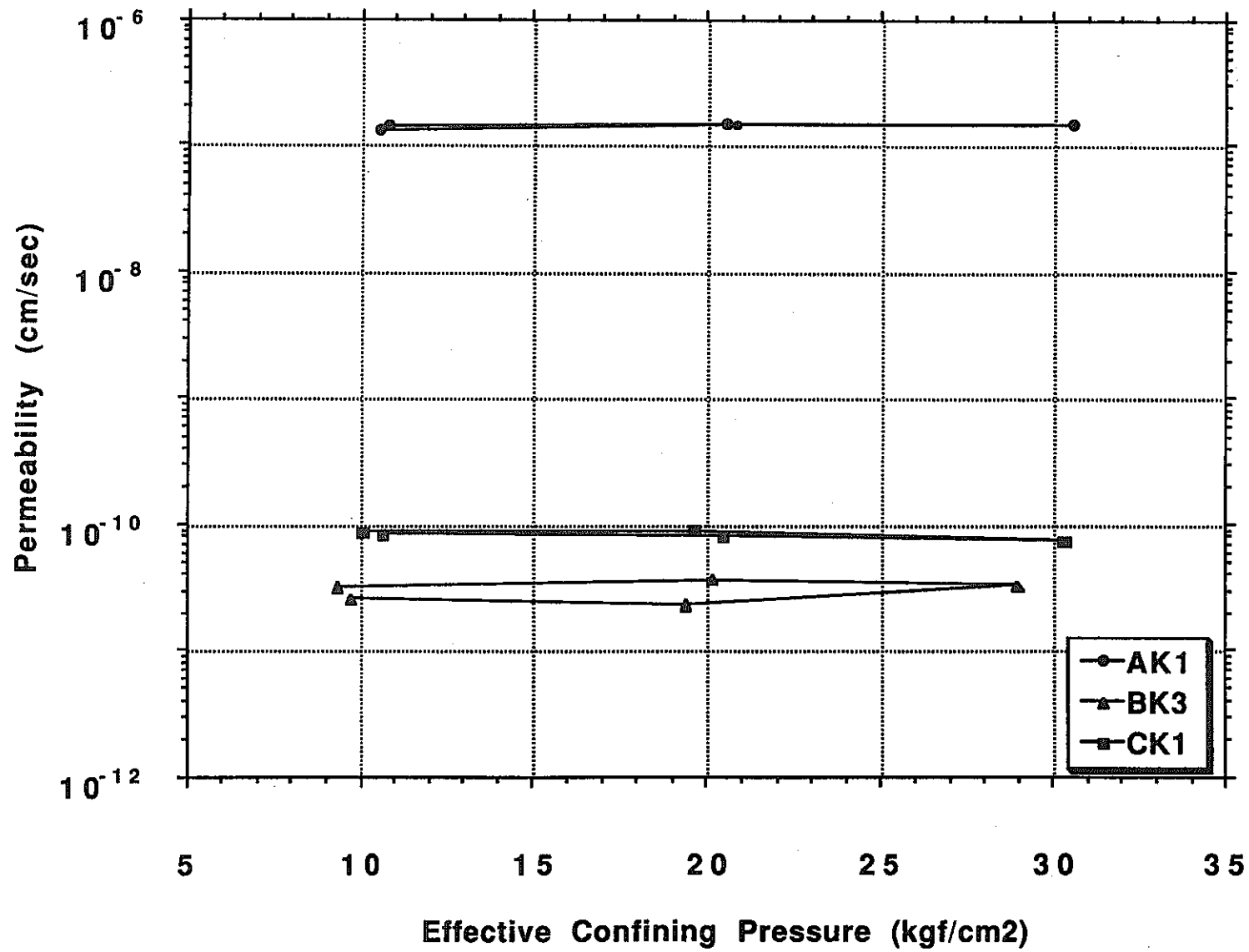


図-2.1.2.2 透水係数と有効拘束圧の関係

表-2.1.2.2 透水試験結果 (AK1)

	軸圧	側圧	拘束圧	初期上流側水圧	初期下流側水圧	バルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(cm/sec)	(cm/sec)	(°C)
AK1-01 (上昇時)	12.98	12.50	12.66	4.01	1.45	2.56	1.90	10.76	1.51 x 10 ⁻⁷	1.42 x 10 ⁻⁷	17.4
AK1-02 (上昇時)	22.97	22.24	22.48	4.22	1.25	2.97	1.92	20.56	1.57 x 10 ⁻⁷	1.47 x 10 ⁻⁷	17.4
AK1-03 (折り返し時)	32.83	32.24	32.44	4.35	1.19	3.16	1.89	30.55	1.56 x 10 ⁻⁷	1.46 x 10 ⁻⁷	17.4
AK1-04 (下降時)	22.85	22.74	22.78	4.37	1.26	3.11	1.96	20.82	1.55 x 10 ⁻⁷	1.45 x 10 ⁻⁷	17.4
AK1-05 (下降時)	13.73	12.87	13.16	3.68	1.12	2.56	1.76	10.50	1.39 x 10 ⁻⁷	1.30 x 10 ⁻⁷	17.4

表-2.1.2.3 透水試験結果 (BK3)

	軸圧	側圧	拘束圧	初期上流側水圧	初期下流側水圧	バルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(cm/sec)	(cm/sec)	(°C)
BK3-01 (上昇時)	16.10	14.75	15.20	6.40	3.85	2.56	5.92	9.28	3.50x10 ⁻¹¹	3.23 x 10 ⁻¹¹	18.1
BK3-02 (上昇時)	26.72	25.87	26.15	6.49	4.11	2.38	6.04	20.11	3.99x10 ⁻¹¹	3.68 x 10 ⁻¹¹	18.1
BK3-03 (折り返し時)	36.08	35.37	35.61	6.92	3.83	3.08	6.67	28.94	3.55x10 ⁻¹¹	3.28 x 10 ⁻¹¹	18.0
BK3-04 (下降時)	25.59	24.99	25.19	6.74	3.63	3.11	5.86	19.33	2.53x10 ⁻¹¹	2.33 x 10 ⁻¹¹	18.1
BK3-05 (下降時)	15.61	14.50	14.87	7.99	3.89	4.10	5.23	9.64	2.81x10 ⁻¹¹	2.60 x 10 ⁻¹¹	18.0

表-2.1.2.4 透水試験結果 (CK1)

	軸圧	側圧	拘束圧	初期上流側水圧	初期下流側水圧	バルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(cm/sec)	(cm/sec)	(°C)
CK1-01 (上昇時)	18.48	18.12	18.24	9.50	6.95	2.55	8.23	10.01	9.84x10 ⁻¹¹	8.85 x 10 ⁻¹¹	19.1
CK1-02 (上昇時)	28.71	28.12	28.32	9.92	7.20	2.72	8.74	19.60	1.00x10 ⁻¹⁰	8.97 x 10 ⁻¹¹	19.2
CK1-03 (折り返し時)	38.45	38.24	38.31	10.10	7.01	3.09	8.02	30.29	8.21x10 ⁻¹¹	7.41 x 10 ⁻¹¹	19.0
CK1-04 (下降時)	30.21	28.99	29.40	10.72	7.68	3.04	8.97	20.42	8.93x10 ⁻¹¹	8.04 x 10 ⁻¹¹	19.1
CK1-05 (下降時)	20.22	18.87	19.32	9.86	7.45	2.41	8.71	10.61	9.44x10 ⁻¹¹	8.47 x 10 ⁻¹¹	19.2

(6) まとめ

応力状態と透水係数の関係を室内試験にて確認することを目的とし、トランジェントパルス法による透水試験を行った。得られた知見を以下に示す。

1) 断面ごとの透水係数の概略値

今回の透水試験で得られた断面ごとの透水係数の概略値を以下に示す。

- ・明世累層の泥岩 約 1.42×10^{-7} cm/sec (有効拘束圧：約 4.5 kg f/cm^2)
- ・土岐夾炭累層上部層 約 3.23×10^{-11} cm/sec (有効拘束圧：約 6.5 kg f/cm^2)
- ・土岐夾炭累層下部層 約 8.85×10^{-11} cm/sec (有効拘束圧：約 9.5 kg f/cm^2)

2) 拘束圧と透水係数の関係

- ・有効拘束圧 $10 \sim 30 \text{ kg f/cm}^2$ の範囲では、透水係数の拘束圧依存性はほとんど認められない。
- ・下降時の透水係数は、上昇時のものより若干低く、これは応力履歴による岩石構造の変化、目づまり等の影響によるものと考えられる。しかし、透水係数のオーダーが変化するほどではない。
- ・上記の低下の度合は、BK3が大きく、これは試験時間が長時間にわたったことによる目づまりのためなのか、岩石のクリープ的構造変化によるものなのか、現状では明確な結論を得ることはできない。

3) 収束水圧

- ・収束水圧が、AK1では想定値 (2.5 kg f/cm^2) より小さいのは、岩石の貯留効果によるものであり、BK3で逆に想定値 (5.3 kg f/cm^2) より大きいのは、岩石の二次圧密により岩石内の間隙水が試験中に絞りだされ上・下流側とも間隙水圧がその分だけ上昇したためと考えられる。
- ・BK3に対する試験結果では、有効拘束圧下降時には上昇時に比べ良好な差圧減衰カーブが得られ、透水係数近似直線の近似度合も高い。これは、拘束圧下降時の岩石のクリープ的変形が上昇時に比べ小さく、また岩石の構造変化が弾性的ではないことを示しているものと考えられる。AK1,CK1ではこの傾向は顕著ではない。

2.1.3 飽和度と弾性波伝播特性の関係

(1) 目的

立坑掘削影響試験の一環として行った孔間弾性波試験では、立坑の掘削前後で弾性波速度の低下が見られた。このような低下は掘削に伴う応力の再配分だけでは説明することができず、速度低下領域の形状から、飽和度の低下が原因である可能性が高いと考えられた。

以上のことから、立坑掘削影響試験の結果をより定量的に評価するためには、岩石の飽和度と弾性波速度の関係を室内試験で確認する必要があると考えられた。ここでは、同一の供試体の飽和度を、飽和状態から乾燥状態まで順次変化させて、供試体の軸方向の弾性波速度 (V_p, V_s) を測定し、飽和度と弾性波速度との関係を求めることを目的とする。

(2) 文献調査結果

飽和度と弾性波速度の関係の測定に関する文献調査から得られた知見を以下にまとめて示す。

1) 測定方法および条件

(i) 岩石供試体、測定装置および測定手順は、『土質工学会編の岩の調査と試験、第47章 超音波速度試験』を参考にする。弾性波速度の測定は、パルスの波長に比べて十分に長い岩石試料を透過する超音波によって速度を決定する方法が一般的である⁷⁾。

(ii) 軟質な岩石の弾性波速度を測定するにあたり、含水状態の変化や拘束圧の影響を十分に考慮しなければならない^{2) 7)}。

(iii) 一つの供試体の含水比を変えながら速度変化を測定する場合は、供試体内部の含水状態を均一にすること、および供試体と振動子の接触状態を一定に保つことが必要である^{3) 4) 7)}。

(iv) 泥岩の弾性波速度を測定するには、振動子の実効周波数は、50kHz～100kHz程度が適当である³⁾。

2) 結果の評価方法

(i) 弾性波速度 (P波、S波) は、供試体の長さ L と弾性波の透過時間 t から求める⁷⁾。

(ii) 岩石の採取方法、供試体の作成方法、供試体の形状と寸法、測定方法、供試体の

状況、岩石の物理的性質、拘束条件についても記載する⁷⁾。

3) 得られた知見

(i)第三紀砂岩、逗子泥岩では、ある飽和度で最低値を示し、それより乾燥しても、含水を増加させても速度は増加する^{1) 6)}。また、逗子泥岩では飽和度が増加すると、S波速度は減少する¹⁾。安山岩では砂岩の場合と異なり、飽和度の変化に対する速度の変化はわずかである⁶⁾。

(ii)飽和度の変化に伴う力学的特性の変化は非可逆的变化であり、飽和度が再び増加すると泥岩のような岩石はスレーキングで性質が劣化するのが普通である¹⁾。

石英閃緑岩では、P波速度のヒステリシス現象はないとされている⁴⁾。

(iii)含有水分によるP波速度の変化のしかたは、空隙の量、位置や形状に強く依存する⁹⁾。

(3) 測定装置

図-2.1.3.1に示すようなP波速度、S波速度振動子を備えた透過式弾性波速度測定装置（応用地質株式会社製のニュー・ソニックビューアModel-5217A）を用いた。

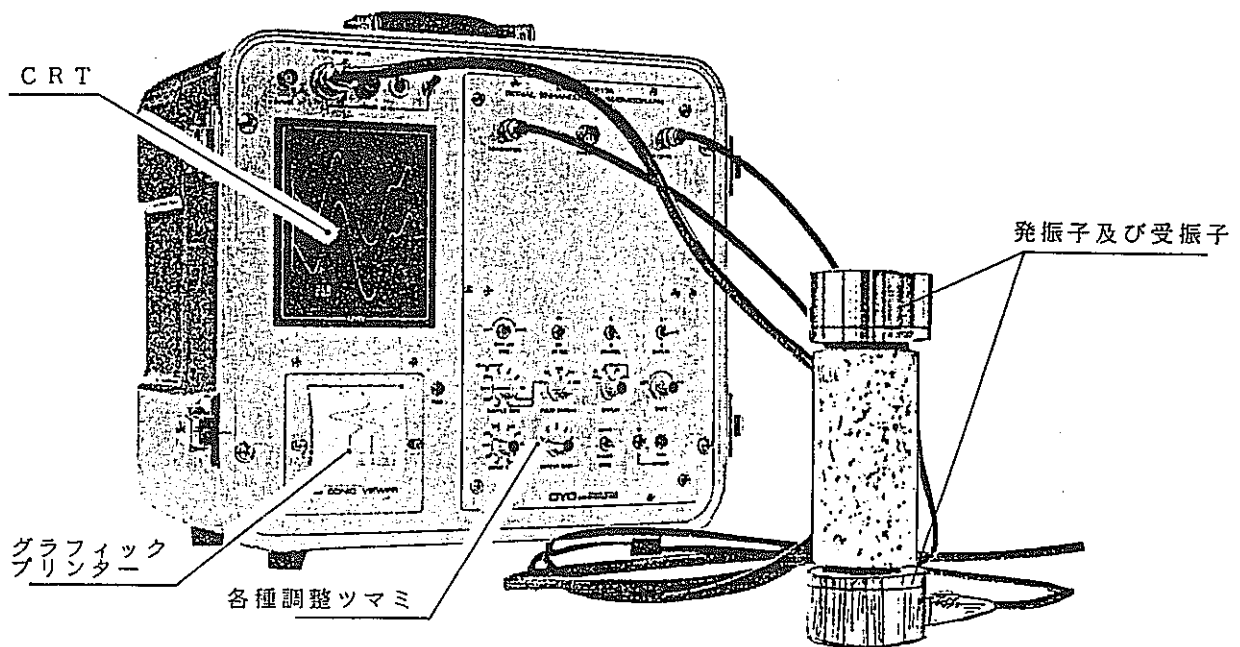


図-2.1.3.1 弾性波速度測定装置

(4) 測定方法

試験基準は、物理探鉱技術協会「岩石試料の速度測定要項」に準拠した。

供試体は高さ50mm、直径50mmとする。試験前に、整形した供試体の高さ、直径、質量を測定し、密度を求めた。供試体の高さ、直径はノギスを用いて0.05mmまで読み取った。

供試体の飽和度は100%（飽和状態）、0%（乾燥状態）、その中間の2とおり（飽和度50～70%程度）及び自然状態の合計5とおりとした。

供試体の上端には測定装置が載せられるため、約0.5kg/cm²程度の圧力が作用することとなる。供試体にはこれ以外の载荷は行わなかった。

供試体数は各岩種から3供試体とし、全部で9供試体を用いた。

測定のプロローを図-2.1.3.2に示す。

また、(2)の文献調査の結果から得られた弾性波速度の測定上の注意事項を以下に示す。

- ①供試体の両端面に超音波発振子と受振子を圧着する。接着圧は0.5kg/cm²以下とする。測定にあたり、P波速度測定時に供試体端面に少量のグリースを塗布し、発振子および受振子の密着を良くする。
- ②透過時間は0.1μsecまで計測する。測定は各供試体で、発振子または受振子と供試体端面との接触状態を変えるため、上下反転して2回測定する。2回の計測値の差が5%以上の場合は再度測定を行う。
- ③弾性波速度は供試体の高さで透過に要した時間より求める。また、動弾性係数および動ポアソン比は以下の式により求める。

$$\text{動弾性係数} \quad E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{動せん断弾性係数} \quad G_d = 10 \rho_t V_s^2 / 980 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{動ポアソン比} \quad \nu_d = \{(V_p / V_s)^2 - 2\} / 2 \{(V_p / V_s)^2 - 1\}$$

ここで、 V_p ：P波速度 (m/sec)、 V_s ：S波速度 (m/sec)、 ρ_t ：密度 (g/cm³) である。

- ④飽和度を最も高く設定する場合は、水中に放置して吸水させる。吸水させる時間は、最大48時間とする。
- ⑤飽和度を変化させた後、弾性波速度の測定前に供試体をラップで包み、供試体の表面と内部で含水状態の差ができる限り小さくなるようにした上で弾性波伝播速度を測定する。

⑥測定にあたり、試料の養生期間、振動子の圧着状態、試料の端面整形状態、トリガーの取り方等を正確かつ詳細に記録する。また、波形データも出力する。

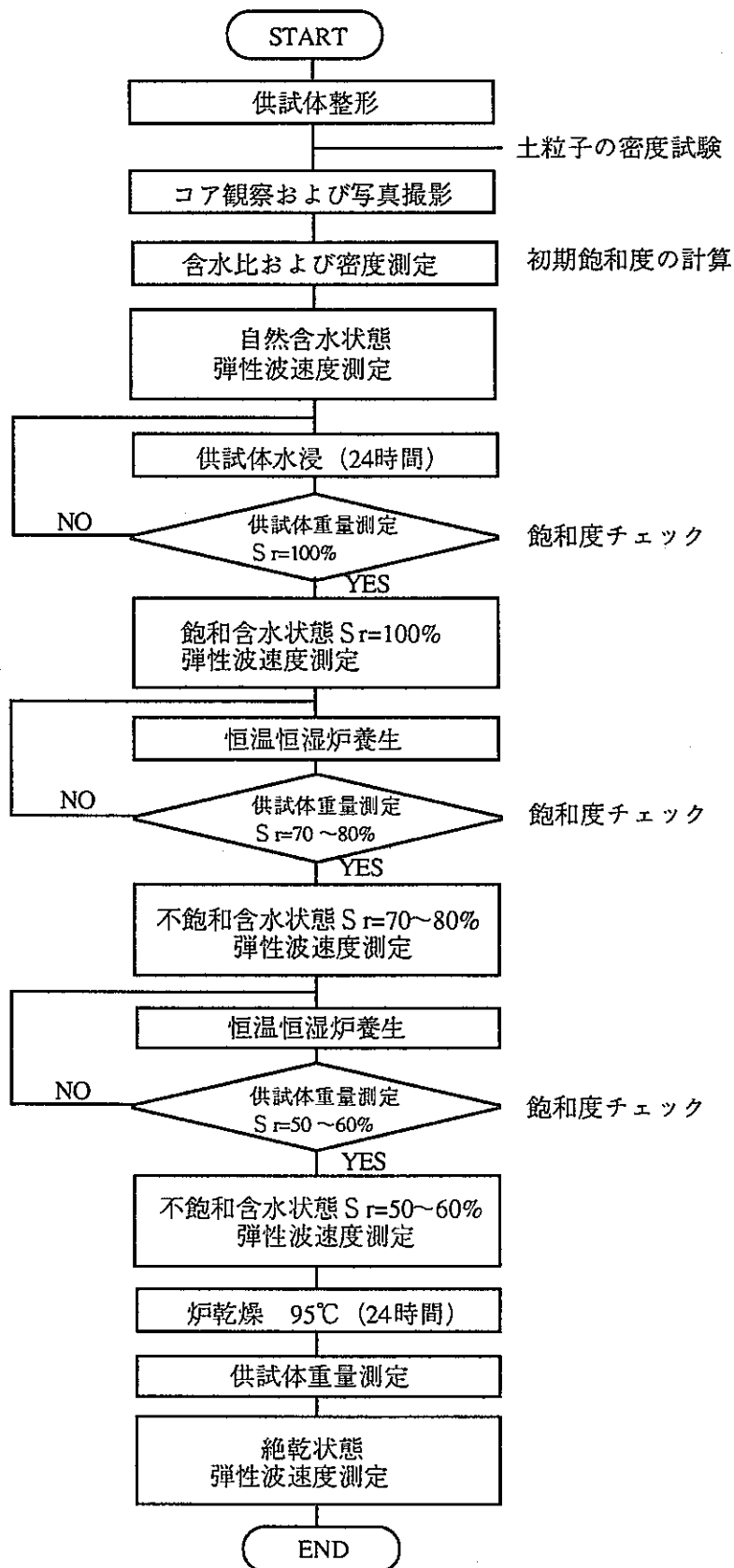


図-2.1.3.2 弾性波速度測定の手順

(5) 測定結果と考察

1) 供試体内部の含水状態の確認

供試体内部の実際の含水状態を確認するため、各断面の供試体のうち、それぞれ1本を3つの部分に分け、各部分での飽和度を算定し、図-2.1.3.3に示す。

同図によれば、A、B断面では、供試体内部の含水状態はほぼ同様であるとみなしても差し支えないと考えられる。また、C断面では弾性波速度を評価する際に、供試体内部の不均質性を考慮することが必要である。

2) 飽和度と弾性波速度の関係

A断面供試体 (図-2.1.3.4参照) : P波速度は、自然状態から飽和状態になるとVP1では増加し、VP2、VP3では減少する。その後、飽和度50~60%まではいずれもP波速度は減少する。さらに、飽和度0%となるまでは、P波速度はほぼ一定か、わずかに増加する。また、飽和状態から50%程度までの変化は、飽和度0~50%程度の変化よりも大きい。

S波速度は、自然状態から飽和状態になるとすべての供試体で減少する。その後、乾燥状態までは、VS2のみ飽和度の減少に伴い単調に増加する。VS1、VS3は飽和状態から乾燥状態までは、ほぼ一定とみなしてよい。また、飽和状態から50%程度までは、S波速度はP波速度に比べて飽和度の変化に対する影響が小さい。

B断面供試体 (図-2.1.3.5参照) : P波速度は、自然状態から飽和状態になるとすべての供試体について減少する。その後、飽和度50%程度までは、いずれもP波速度は減少する。さらに、飽和度0%までは、P波速度はほぼ一定か、わずかに減少する。また、飽和状態から50%程度までの変化は、飽和度0~50%程度の変化よりも大きい。

S波速度は、自然状態から飽和状態になるとすべての供試体で減少する。その後、乾燥状態までは、供試体ごとに異なる傾向を示す。この原因としては、供試体ごとに亀裂の発生状況が異なる点が考えられる。飽和度100~50%の区間では、S波速度はP波速度と比較して飽和度の変化に対する影響が小さい。

C断面供試体 (図-2.1.3.6参照) : P波速度は、自然状態から飽和状態になるとVP1、VP3では増加し、VP2では減少する。その後、飽和度50%程度まではいずれの供試体もP波速度は減少する。さらに、飽和度0%までは、VP1、VP2のP波速度はほぼ一定か、わずかに増加する。VP3は飽和状態から0%となるまで単調に減少する。

S波速度は、自然状態から飽和状態になるとすべての供試体で減少する。その後、飽和状態から乾燥状態までは、VS1、VS3は飽和度の減少に伴い単調に増加する。VS2は飽和度の減少に伴い、一旦減少し、その後わずかに増加する。飽和度が100~50%の区間では、S波速度はP波速度と比較して飽和度の変化に対する影響が小さい。

A,B,C断面供試体 (図-2.1.3.7~図-2.1.3.8参照) : P波速度については、C断面の供試体の速度値のばらつきは、A断面およびB断面と比べて大きいことを示している。また、S波速度についても、C断面の供試体の速度値のばらつきは、A断面およびB断面の供試体と比べて大きいことを示している。

3) 飽和度とその他の物性の関係

①飽和度と動ポアソン比の関係 (図-2.1.3.9参照)

飽和度が100~50%の区間では、飽和度が減少すれば動ポアソン比も小さくなる傾向が見られる。また、飽和度が小さくなるにつれて、動ポアソン比の値のばらつきが大きくなる傾向が見られる。断面ごとの傾向の違いは顕著ではない。

②飽和度と動せん断弾性係数の関係 (図-2.1.3.10参照)

B断面の供試体はすべての区間で飽和度の変化に対し、動せん断弾性係数の顕著な変化は見られない。これに対し、A断面及びC断面の供試体では、飽和度が100~50%の区間での変化は、飽和度が50~0%の区間での変化よりも大きい傾向がある。

③飽和度と動弾性係数の関係 (図-2.1.3.11参照)

B断面の供試体はすべての区間で飽和度の変化に対し、動せん断弾性係数の顕著な変化は見られない。これに対し、A断面及びC断面の供試体では、飽和度が100~50%の区間での変化は、飽和度が50~0%の区間での変化よりも大きい傾向がある。

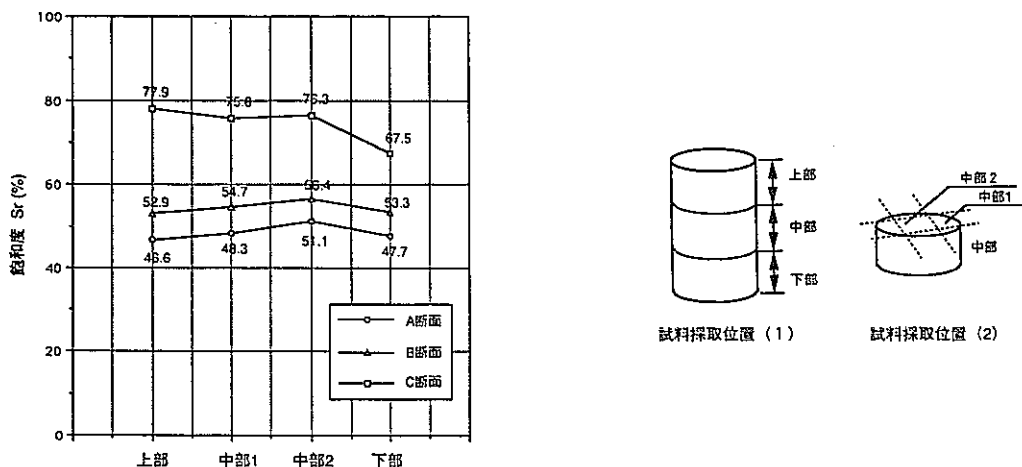


図-2.1.3.3 供試体内部の飽和度の分布

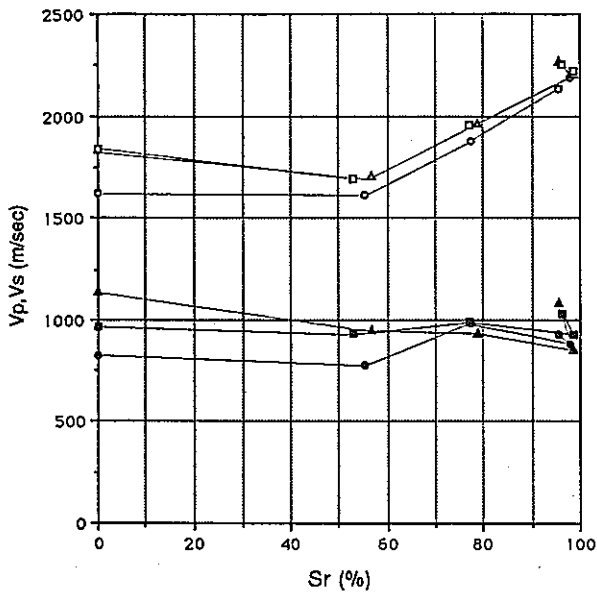


図-2.1.3.4 飽和度と弾性波速度の関係 (A断面)

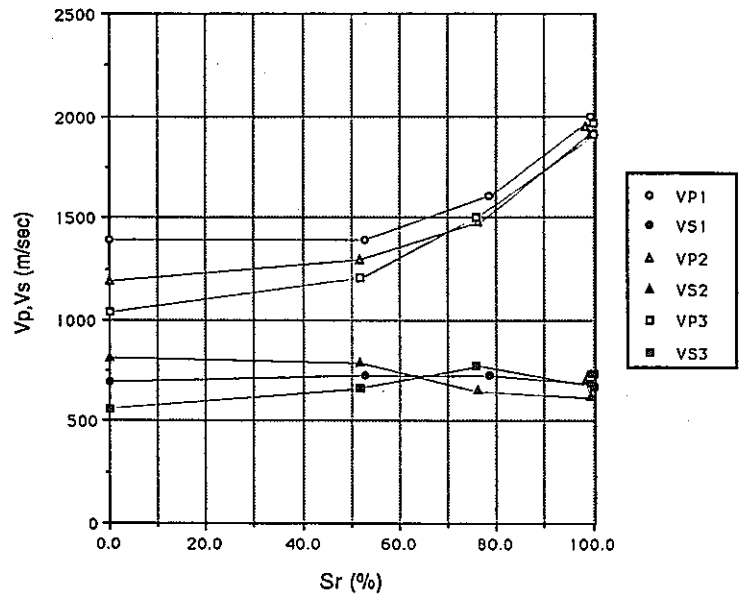


図-2.1.3.5 飽和度と弾性波速度の関係 (B断面)

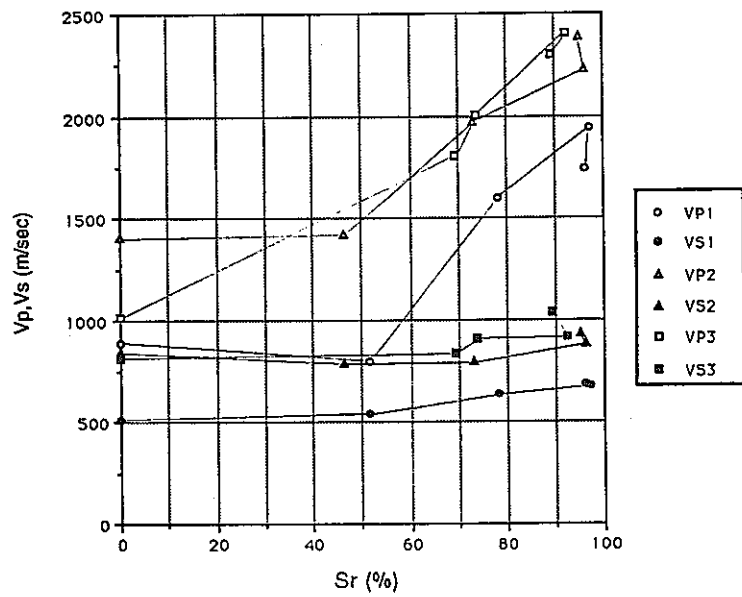


図-2.1.3.6 飽和度と弾性波速度の関係 (C断面)

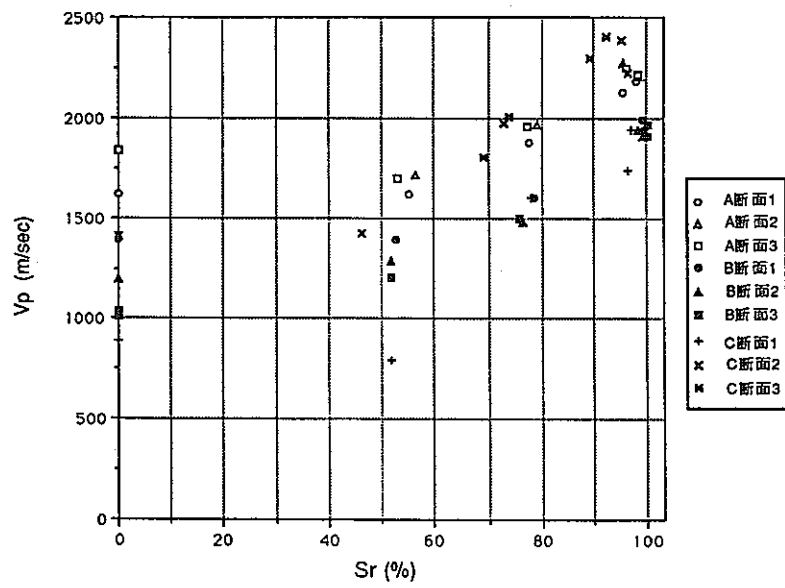


図-2.1.3.7 飽和度とP波速度の関係 (A,B,C断面)

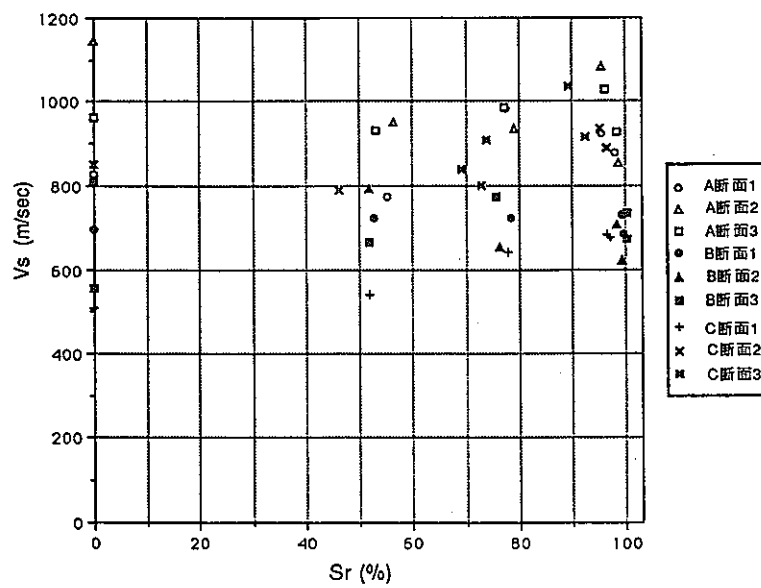


図-2.1.3.8 飽和度とS波速度の関係 (A,B,C断面)

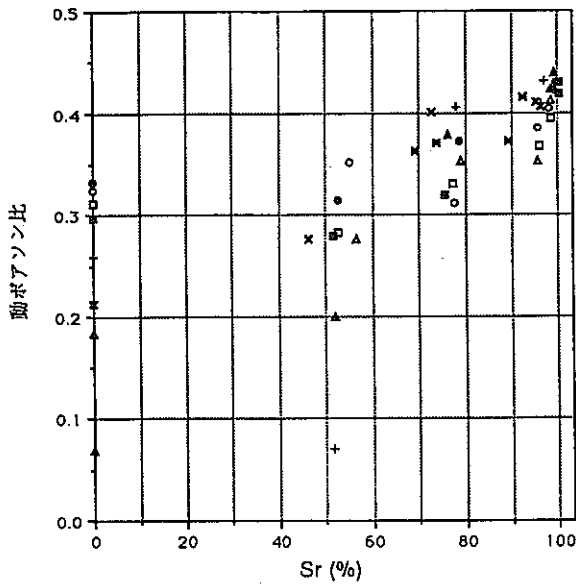


図-2.1.3.9 飽和度と動ポアソン比
の関係 (A,B,C断面)

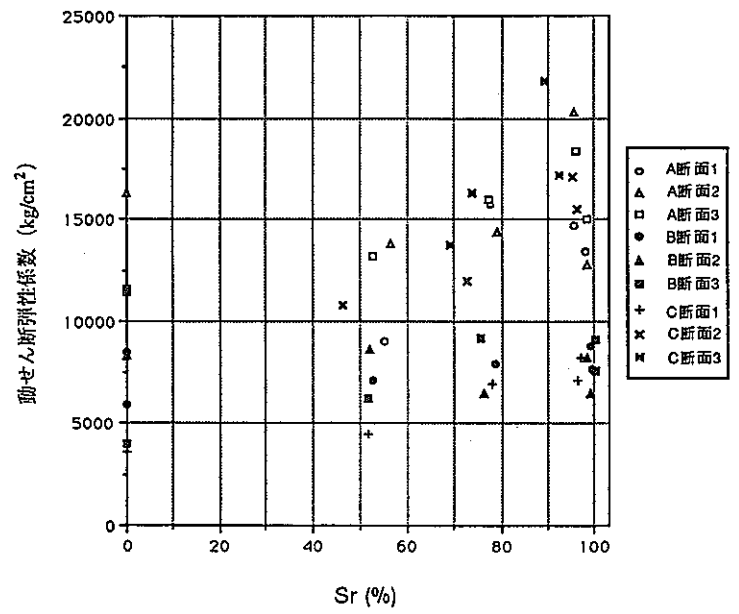


図-2.1.3.10 飽和度と動せん断弾性
係数の関係 (A,B,C断面)

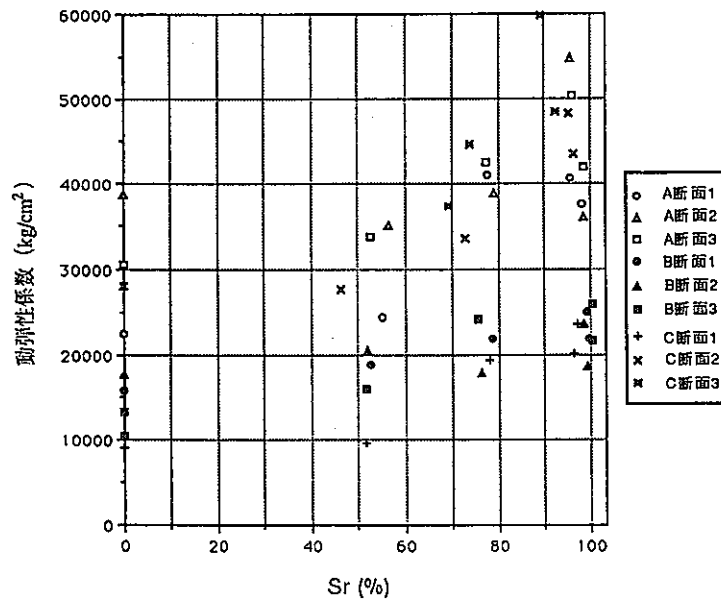


図-2.1.3.11 飽和度と動弾性係数の関係 (A,B,C断面)

(6) まとめ

飽和度と弾性波速度との関係を求めることを目的とし、同一の供試体の飽和度を、飽和状態から乾燥状態まで順次変化させて、供試体の軸方向の弾性波速度を測定した。その結果得られた知見を以下にまとめて示す。

1) 供試体内部の含水状態

供試体内部の含水状態を詳細に調べた結果、A断面及びB断面では供試体内部の含水状態はほぼ一様であるとみなしても差し支えないと考えられる。C断面では、含水状態は一様とは言えず、弾性波速度を評価する際に、供試体内部の不均質性を考慮する必要がある。

2) 飽和度と弾性波速度の関係

P波速度は、飽和度が100~50%の区間では、飽和度が低下するに伴いP波速度も低下する傾向が見られるが、飽和度50%~0%の区間ではP波速度の変化は小さい傾向がある。S波速度は、飽和度の変化に対し若干の変化は見られるが、P波速度に比べればその変化は小さい。

A断面及びB断面では各3本の供試体は、ほぼ同一の地質状況とみなしてよいが、C断面の供試体のうち1本は、物理特性や地質状況が明らかに他と異なる結果となった。

C断面供試体では、速度値のばらつきが、A断面及びB断面の供試体のそれと比べて大きい結果となった。C断面では、岩相が複雑であるため供試体ごと、あるいは供試体の内部に不均質性があるため、速度値のばらつきが大きいと考えられる。

3) 飽和度とその他の物性の関係

弾性波速度から求めた動ポアソン比と飽和度との関係については、飽和度が100~50%の区間では、飽和度が減少すれば動ポアソン比も小さくなる傾向が見られる。また、飽和度が小さくなるにつれて、動ポアソン比の値のばらつきが大きくなる傾向が見られる。断面ごとの傾向の違いは顕著ではない。

また、動せん断弾性係数の変化はS波速度の変化にほぼ対応している。動せん断弾性係数、動弾性係数と飽和度との関係については、次のような傾向がある。B断面の供試体はすべての区間で飽和度の変化に対し、動せん断弾性係数の顕著な変化は見られない。これに対し、A断面及びC断面の供試体では、飽和度が100~50%の区間での動せん断弾性係数の減少の程度は、飽和度が50~0%の区間での変化よりも大きい傾向がある。

2.1.4 応力状態と変形特性の関係

(1) 目的

立坑掘削影響試験では、掘削により発生したと考えられる影響領域が把握された。この掘削影響領域内では、掘削前後に行った孔内載荷試験の結果から、弾性係数が変化していることが計測された。

弾性係数の変化の要因については、掘削前後での応力状態の変化、亀裂状況の変化、飽和度の変化等が考えられる。ここでは、掘削前後での応力状態の変化に着目し、応力状態と岩石の変形特性の関係を室内試験によりを把握することを目的とする。

また、試験中に単調載荷のみを行う通常の三軸圧縮試験に加え、試験途中で除荷および再載荷を伴う三軸圧縮試験についても併せて実施した。この試験は、原位置での応力集中や応力解放に伴う岩盤の変形特性の変化を評価するための基礎情報として、除荷・再載荷時の岩石の変形特性を調べることを目的とするものである。

(2) 文献調査結果

応力状態と変形特性の関係の測定に関する文献調査を行い、試験手法についての情報を収集し、整理した。その結果を以下にまとめて示す。

1) 測定方法および条件

- (i)計測は軸荷重、側圧、変位に対して行われるが、軟岩のように水の影響を受けやすい供試体に対しては、この他に間隙水圧の計測が行われる^{1) 4) 5)}。
- (ii)ポアソン比の測定は、軟岩の場合、ひずみゲージ等による点測定よりも供試体の体積変化に基づく方法（たとえば2重セル法）が適している^{3) 4) 5)}。

2) 結果の評価方法

- (i)主応力差～軸ひずみ関係、間隙水圧～軸ひずみ関係、せん断応力～拘束圧関係、強度・変形特性、破壊状況等を求める^{1) 3) 4) 5)}。
- (ii)大きなばらつきを有するデータの場合、岩石を構成する粒子の大きさや構造の異方性等を定量化して分析する方法も有効である²⁾。

3) 得られた知見

- (i)水で飽和した軟岩では、土質材料と同様に排水の条件により強度や変形特性に差

異が認められる^{1) 4) 5)}。このような場合には、対象とする力学現象に近い形での条件下で試験を実施することが必要である。

(ii)変形係数の拘束圧依存性は排水条件により異なる。また、ある拘束圧レベルで非線形的な変形挙動が顕著となる⁵⁾。

(iii)ポアソン比は応力レベルによって変化する。また、どの試験条件でも明瞭な拘束圧依存性は認められないが、その値は試験条件により大きく変化する。このため、実際の施工条件に応じた目的に合わせ、十分に吟味する必要がある^{4) 5)}。

(3) 試験装置

三軸圧縮試験装置は軟岩用高剛性タイプで、最大5ton、三軸室内の最大拘束圧が100kg/cm²のものを使用した。試験装置を図-2.1.4.1に示す。測定は、荷重、変位、間隙水圧検出器の出力をデータロガーにて記録し、応力～ひずみ曲線、間隙水圧～ひずみ曲線をコンピュータシステムによって自動作図させた。

(4) 試験方法

各岩種について、1組4本の試料を合計3組選定し、直径50mm、高さ100mmの供試体を作成した。供試体の整形時には、湿潤密度、含水比の測定を行った。また、供試体の写真撮影は試験前後に実施した。

3組の供試体のうち2組については、載荷途中に除荷・再載荷を伴わない通常の三軸圧縮試験を行った。応力～ひずみ関係から、最大軸差強度、残留強度、ポアソン比、変形係数 E_0, E_{50} を求めた。なお、軸圧縮過程で間隙水圧が負圧となるのを防ぐため、事前にバックプレッシャーを作用させた。

3組の供試体のうち、残りの1組については、最大強度に至るまでに2回、残留状態で2回の除荷・再載荷を行った。除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験の場合についても、応力～ひずみ関係から最大軸差強度、残留強度、ポアソン比、変形係数 E_0 および除荷・再載荷時の変形係数も併せて求めた。

試験方法は、土質工学会基準JSF T 523-1990に準じた。

試験条件は以下のとおりである。

排水条件：圧密非排水条件 (\overline{CU} 条件)

載荷方式：ひずみ制御法

載荷速度：0.05%/min

拘束圧：0.5, 10, 20, 30kgf/cm²の4とおり

バックプレッシャー：3kgf/cm²程度

ポアソン比の測定：二重セル法（図-2.1.4.2）により、せん断時の供試体の微小な体積変化を測定し、軸ひずみと体積変化の関係からポアソン比を求める
 記録の範囲：破壊後、残留強度が一定値に収束した時点とするが、原則として最大軸ひずみは15%とする

供試体数：3 供試体 × 4 拘束圧 × 3 岩種 = 36 供試体

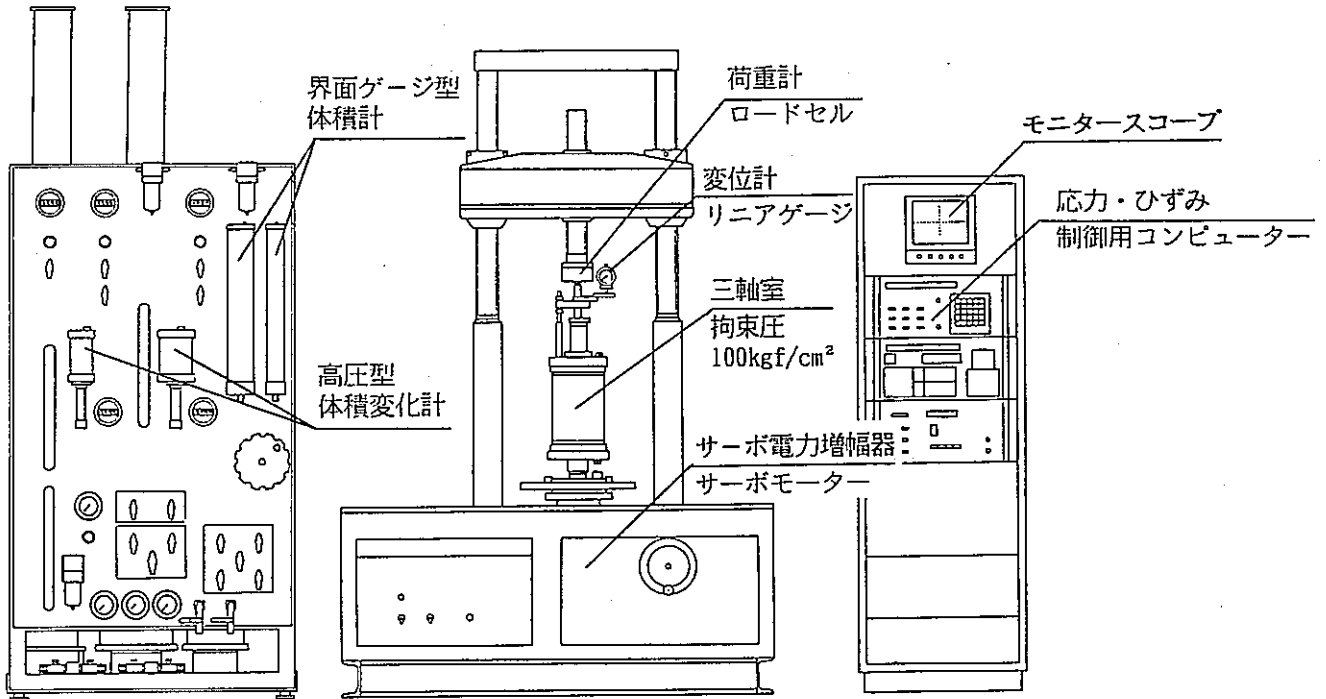


図-2.1.4.1 電気-機械サーボ中容量三軸試験装置

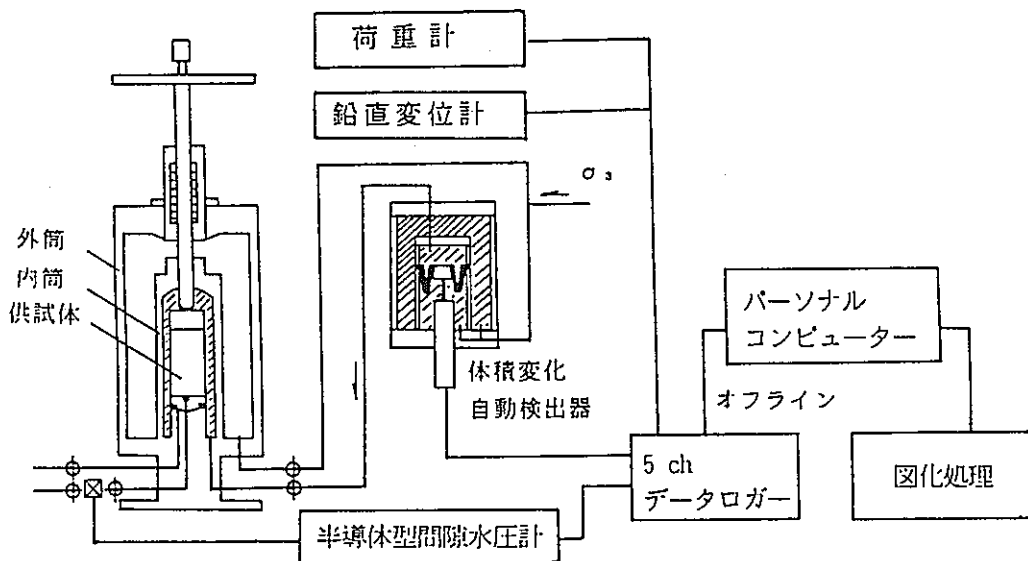


図-2.1.4.2 二重セル法を用いた基本計測システム

(5) 試験結果と考察

1) 物理特性及び地質状況

A断面の12本の供試体の物理特性（湿潤密度、含水比、間隙比、飽和度）は、特に他と大きく異なる性質または外観を示すものは見られなかった。

B断面の12本の供試体の物理特性は、供試体の外観や地質状況が他と比べて大きく異なるものはなかった。しかしながら、拘束圧が 0.5kg/cm^2 の供試体は、湿潤密度が同じグループで他と比較して大きく、また、含水比及び間隙比は他と比較して小さい値を示した。

C断面の12本の供試体の物理特性の比較の結果、CT-1の組では、CT-1-3（拘束圧 20kg/cm^2 ）の供試体の物理特性が他と比べて大きく異なる。CT-2の組では、CT-2-3（拘束圧 10kg/cm^2 ）及びCT-2-3（拘束圧 20kg/cm^2 ）の供試体の物理特性が他と比べて大きく異なる。また、CT-3の組では、物理特性が他と比べて大きく異なるものは見られなかった。

2) 強度定数

三軸圧縮試験から求めた強度定数を図-2.1.4.3に示す。ここでは軸差応力が最大の場合と、主応力比が最大の場合の2とおりの整理を行った。

同図によれば、A断面供試体では、粘着力 C' 及びせん断抵抗角 ϕ' ともにばらつきが小さい結果となった。C断面供試体では C' 及び ϕ' ともに大きくばらついた。また、B断面供試体では3本のうち2本は、最も低い拘束圧時の強度が他と比べて大きいために強度定数の算定が不可能であった。A断面供試体（明世累層）では、B及びC断面供試体（土岐夾炭累層）に比べれば、均質な状態にあったと考えられる。

3) 拘束圧と最大強度、残留強度の関係

三軸圧縮試験から求めた拘束圧と最大強度、残留強度の関係を図-2.1.4.4に示す。同図から、3組の供試体から得られる試験結果については、A断面の供試体の最大強度は、B断面やC断面と比べて値のばらつきが小さいと言える。残留強度については、特に3つの断面で顕著なばらつきの差はないと言える。

4) 拘束圧と初期変形係数の関係

図-2.1.4.5から、3本の供試体から得られる試験結果については、A断面及びB断面の供試体の初期変形係数は、C断面と比べて値のばらつきが小さい。また、初期

変形係数の値の範囲は、A断面で10,000～22,500kg/cm²、B断面で10,000～27500kg/cm²、C断面で15,000～30,000kg/cm²で、C断面がA、B断面に比べて高めの値となった。

5) 除荷・再載荷時の変形係数の変化 (図-2.1.4.6～図-2.1.4.8参照)

除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験の結果の整理にあたり、変形係数の変化を詳細に分析するため、①除荷時の直線部分の勾配、②再載荷時の直線部分の勾配、③応力～ひずみ関係の交点と再載荷時点を結ぶ直線の勾配の合計3種類の変形係数を算定した。

3つの断面で共通しているのは、定義のしかたにより変形係数の大きさが異なることである。この理由については、除荷時と再載荷時では応力～ひずみ関係が非可逆的な関係にあることが考えられる。次に、最大強度に至る前での変形係数が最も大きく、残留状態では変形係数が次第に小さくなる傾向がある。残留状態では最大強度以前の状態に比べて、供試体の内部構造が少なくとも変化していることが予想されることから、変形特性に関しても、残留状態は最大強度以前の状態よりもさらに変形しやすい状態となっていることが考えられる。

6) 拘束圧とポアソン比の関係 (図-2.1.4.7、図-2.1.4.8参照)

通常の三軸圧縮試験から得られた拘束圧とポアソン比の関係を図-2.1.4.7に示す。A、B断面供試体では、拘束圧が20kg/cm²の場合にポアソン比が0.29まで大きく低下しているが、C断面供試体ではポアソン比の大きな低下は見られない。

また、除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験から得られた拘束圧とポアソン比の関係を図-2.1.4.8に示す。A断面供試体は、拘束圧の増加に伴いポアソン比が大きく変化する傾向が見られるが、B、C断面供試体のポアソン比は、拘束圧が増加しても顕著な変化は示さない。

7) 除荷・再載荷に伴うポアソン比の変化 (図-2.1.4.9参照)

除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験から得られたポアソン比と繰り返し回数の関係を図-2.1.4.9に示す。二重セル法では、供試体の最大強度到達後のポアソン比は精度良く測定できないため、測定はすべて供試体の最大強度到達時よりも前のものである。

図-2.1.4.9から、3本の供試体から得られる試験結果については、除荷・再載荷に伴うポアソン比の変化は認められるが、3つの断面で一定の傾向は見いだせない。

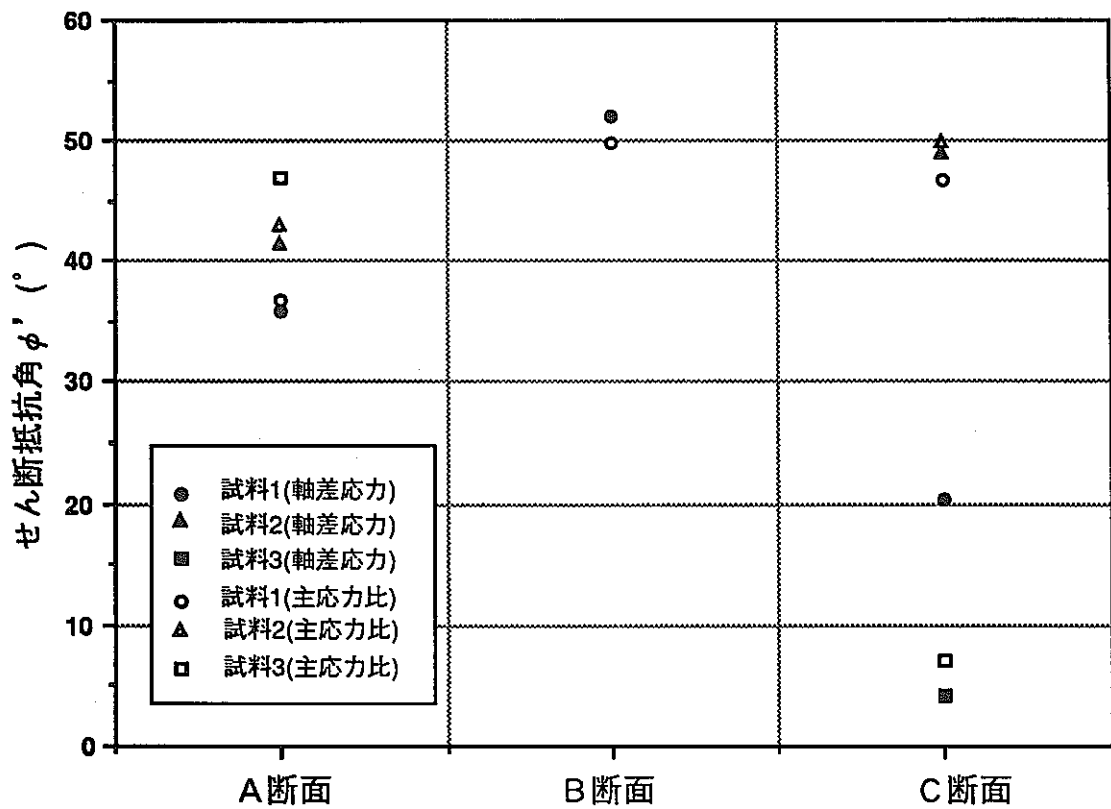
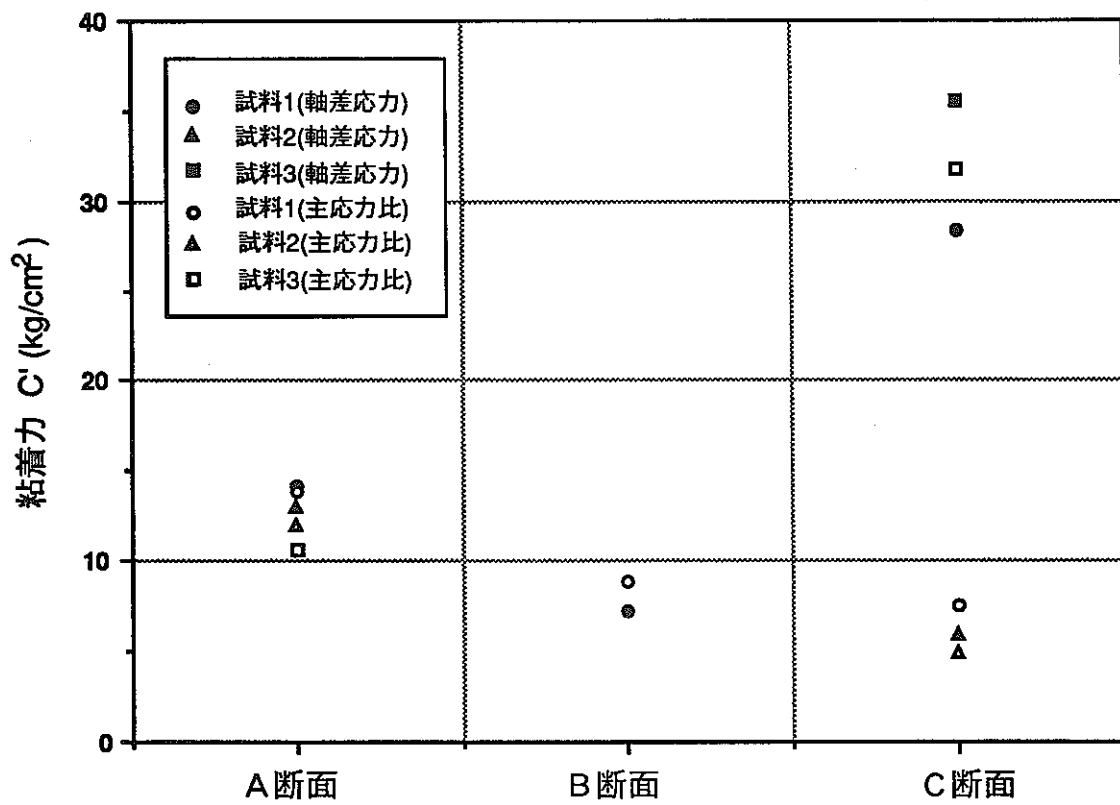


図-2.1.4.3 三軸圧縮試験から求めた強度定数

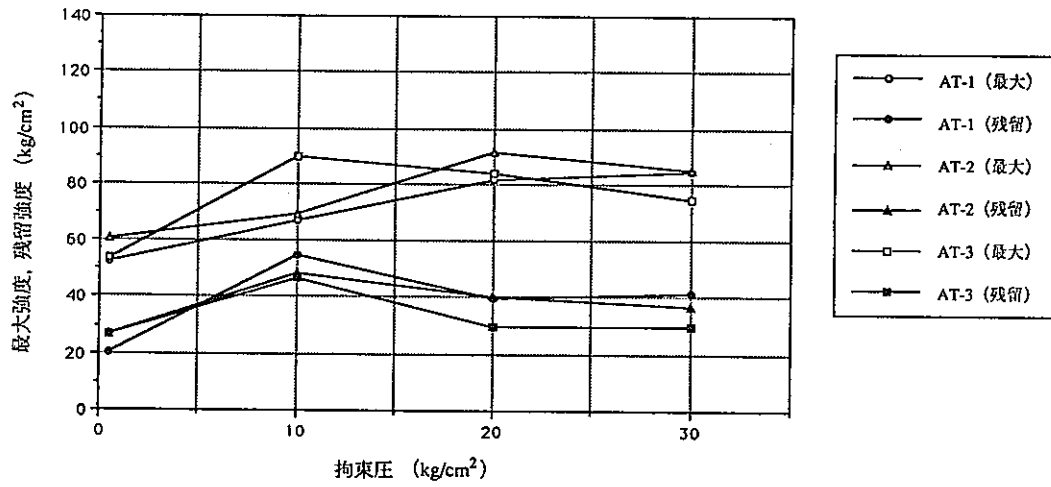


図-2.1.4.4(1) 強度と拘束圧の関係 (A断面)

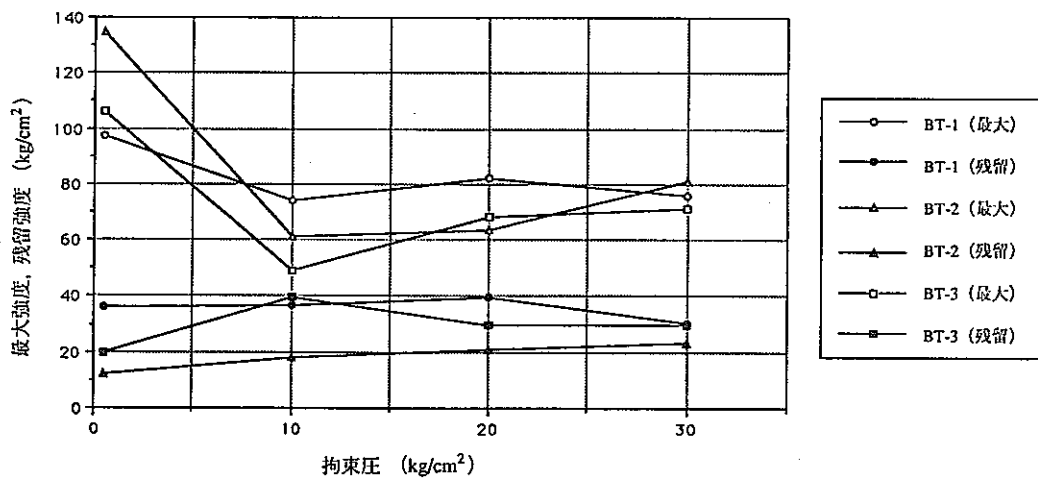


図-2.1.4.4(2) 強度と拘束圧の関係 (B断面)

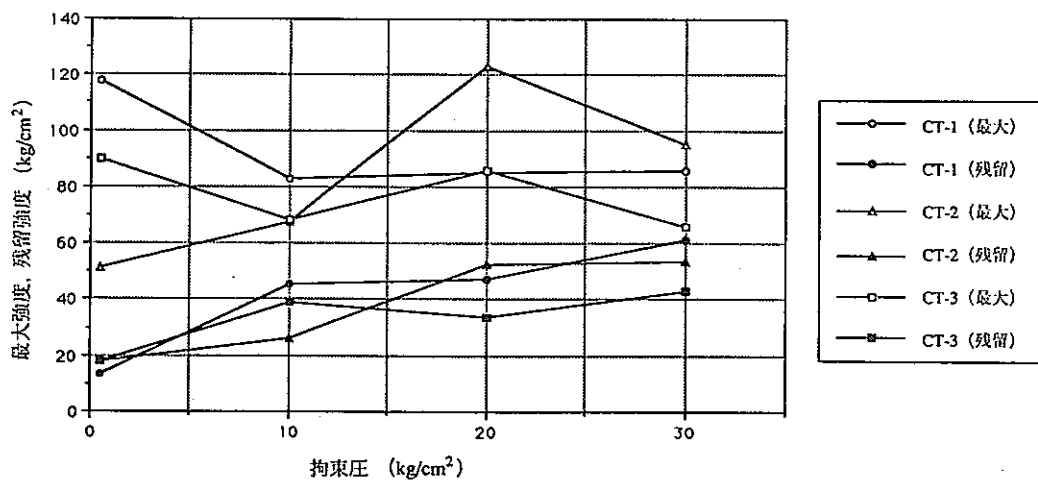


図-2.1.4.4(3) 強度と拘束圧の関係 (C断面)

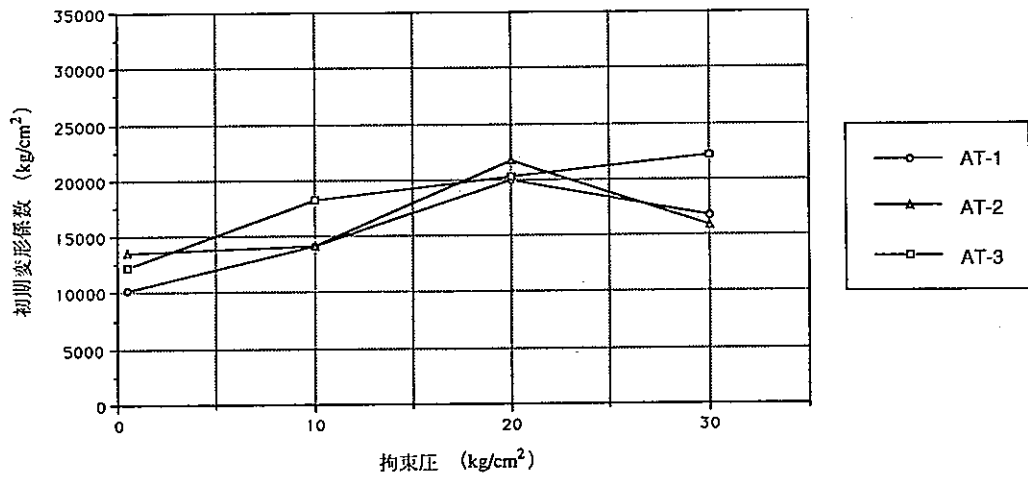


図-2.1.4.5(1) 初期変形係数と拘束圧の関係 (A断面)

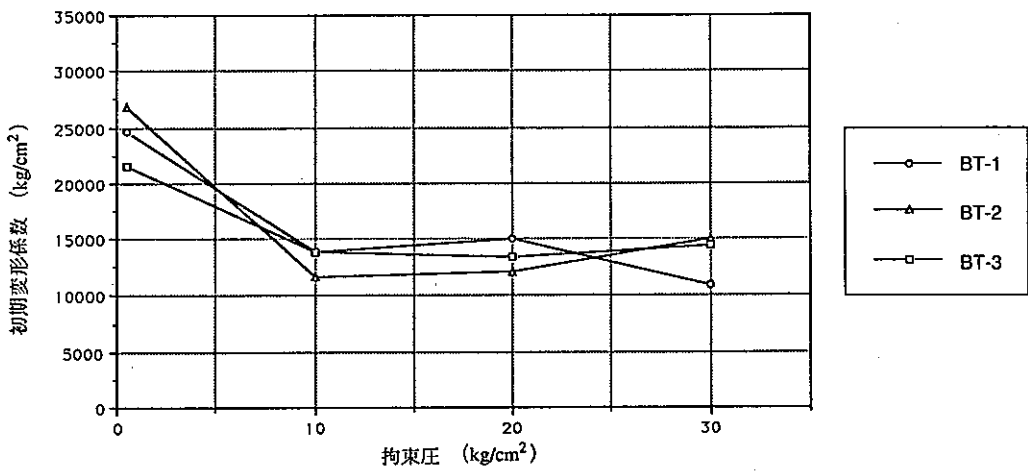


図-2.1.4.5(2) 初期変形係数と拘束圧の関係 (B断面)

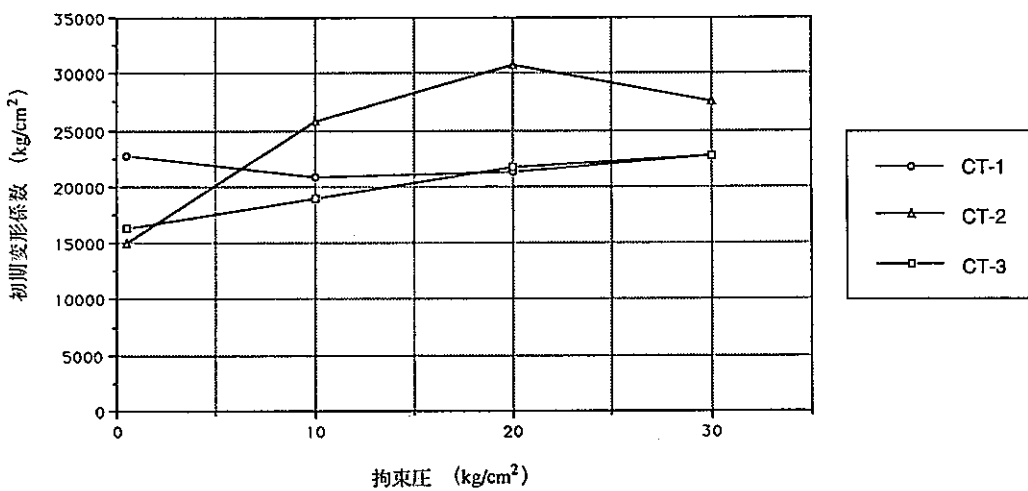


図-2.1.4.5(3) 初期変形係数と拘束圧の関係 (C断面)

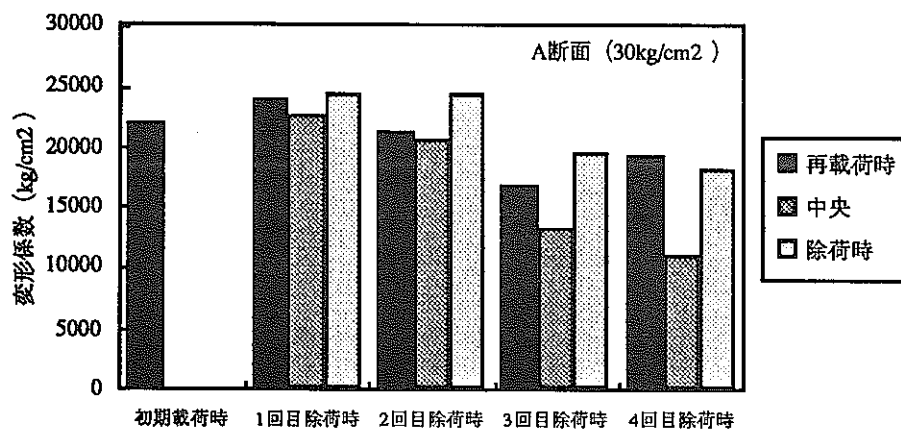
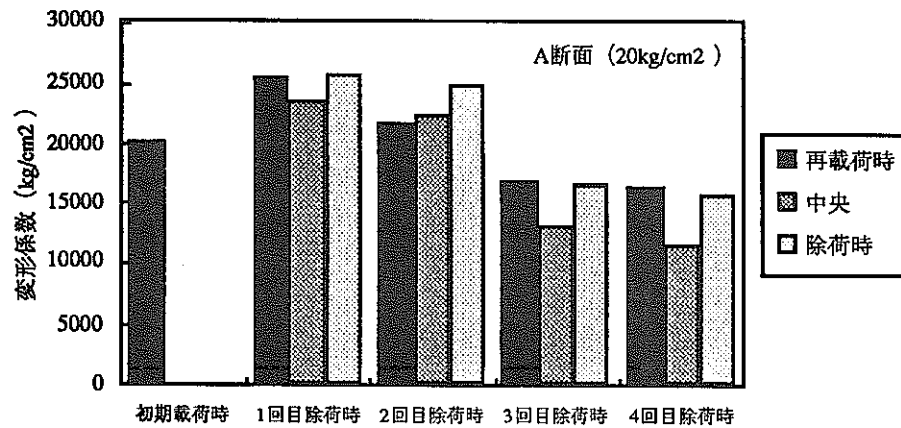
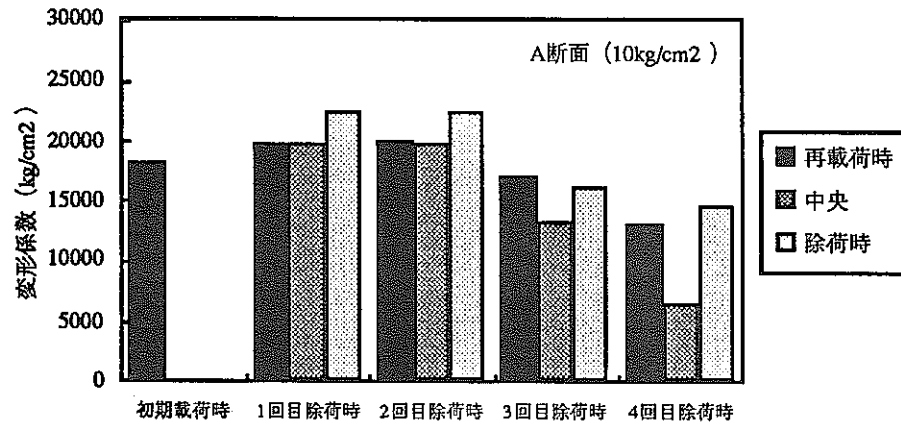
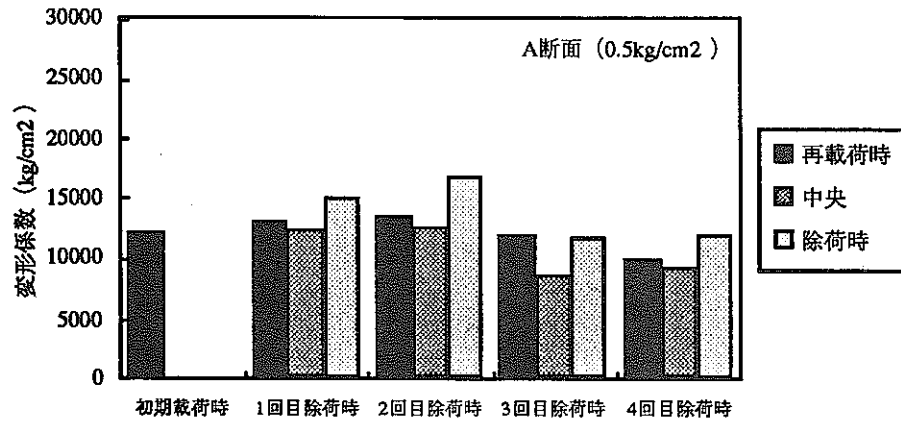


図-2.1.4.6(1) 除荷・再載荷時の変形係数 (A断面)

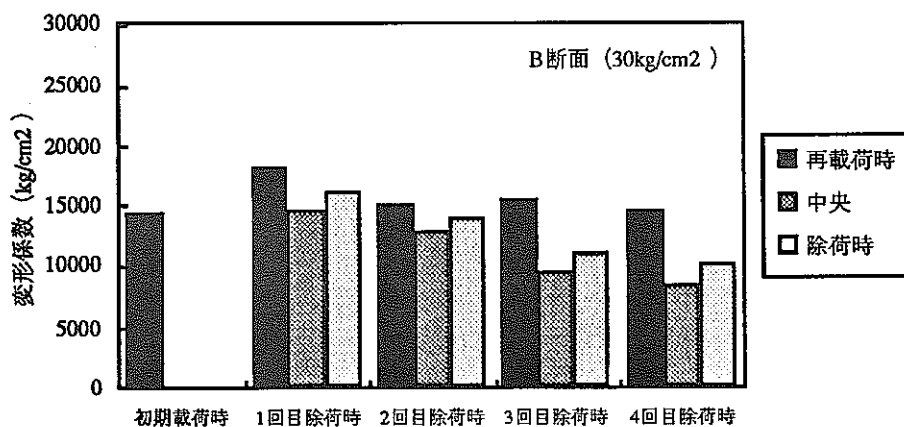
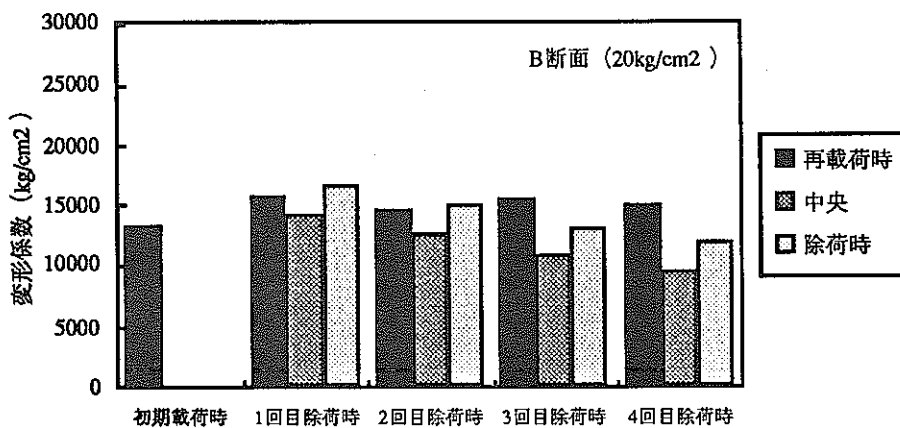
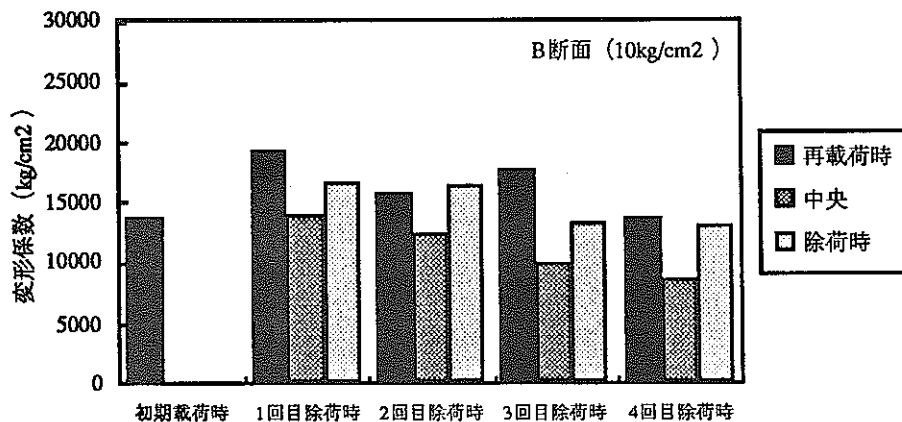
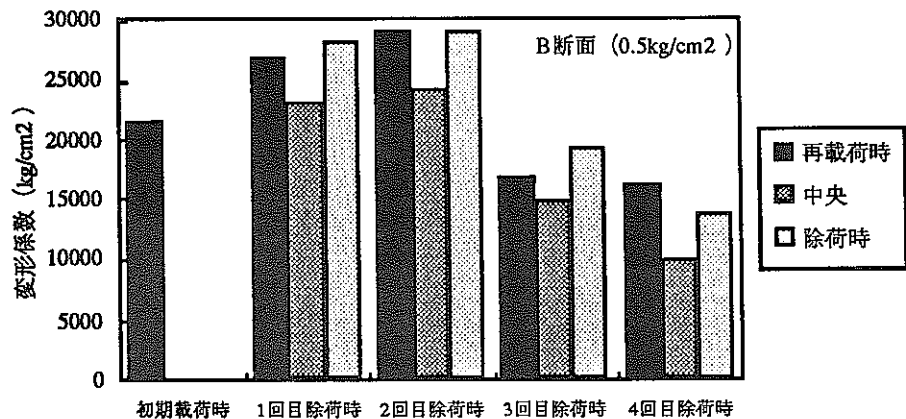


図-2.1.4.6(2) 除荷・再載荷時の変形係数 (B断面)

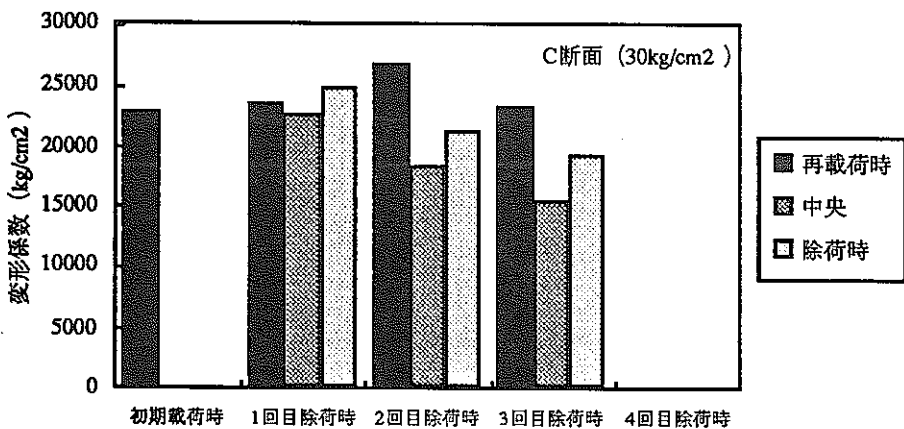
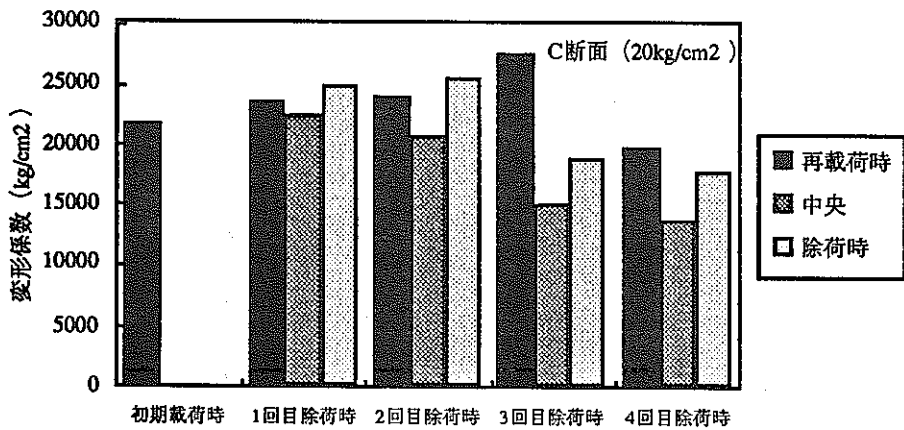
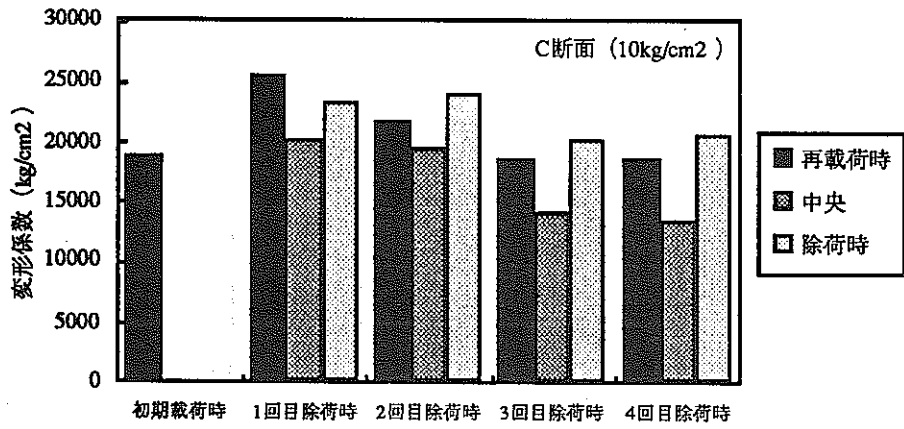
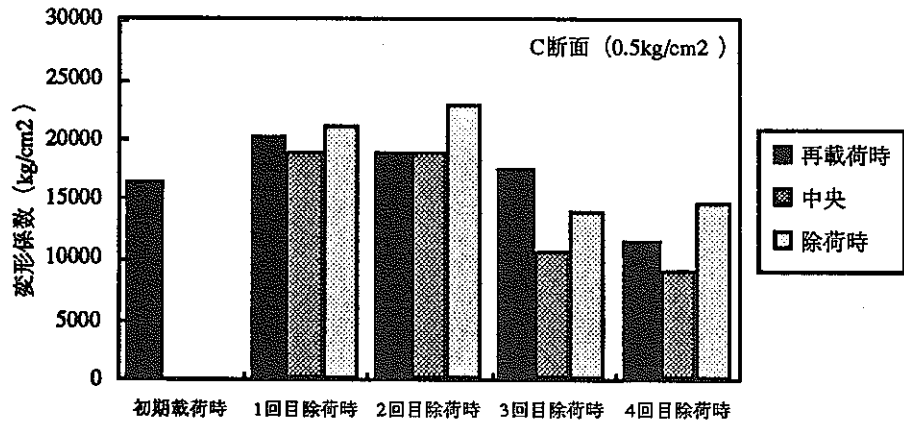


図-2.1.4.6(3) 除荷・再載荷時の変形係数 (C断面)

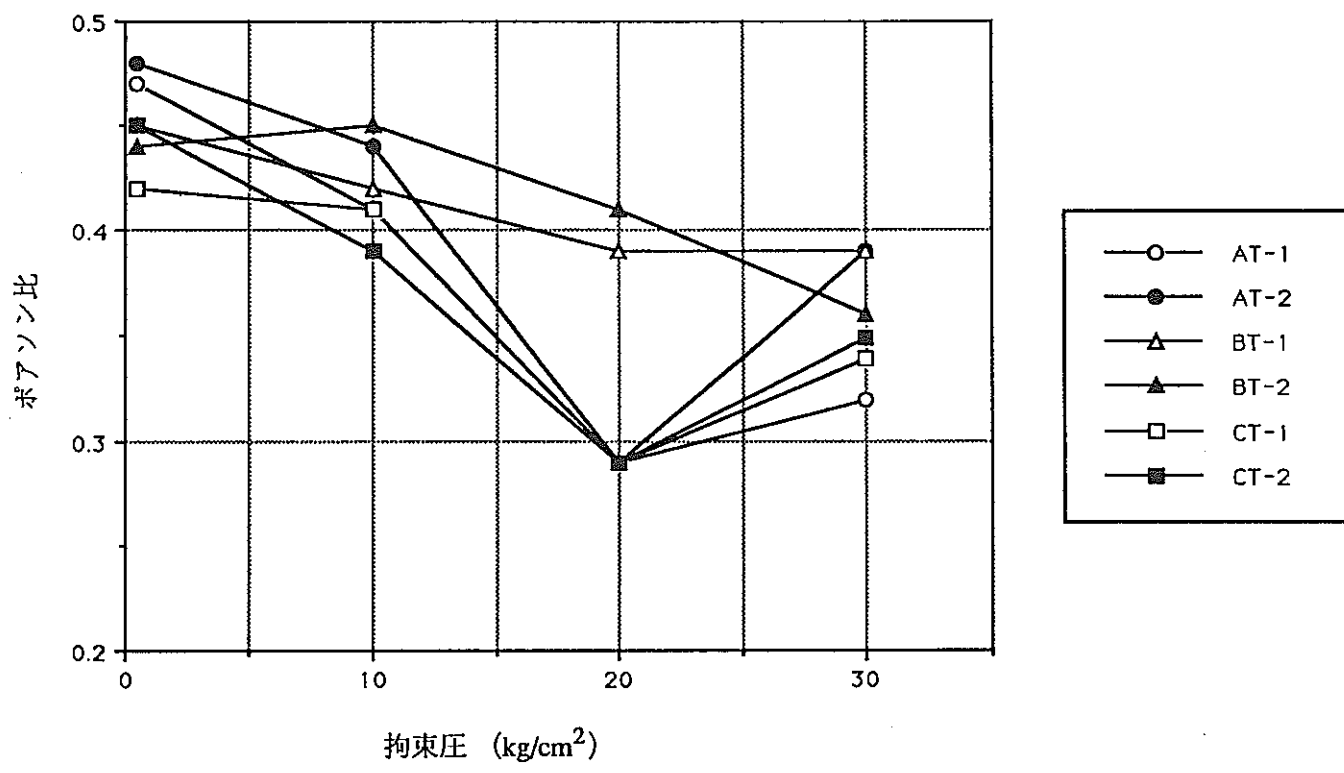


図-2.1.4.7 拘束圧とポアソン比の関係 (通常の三軸試験結果)

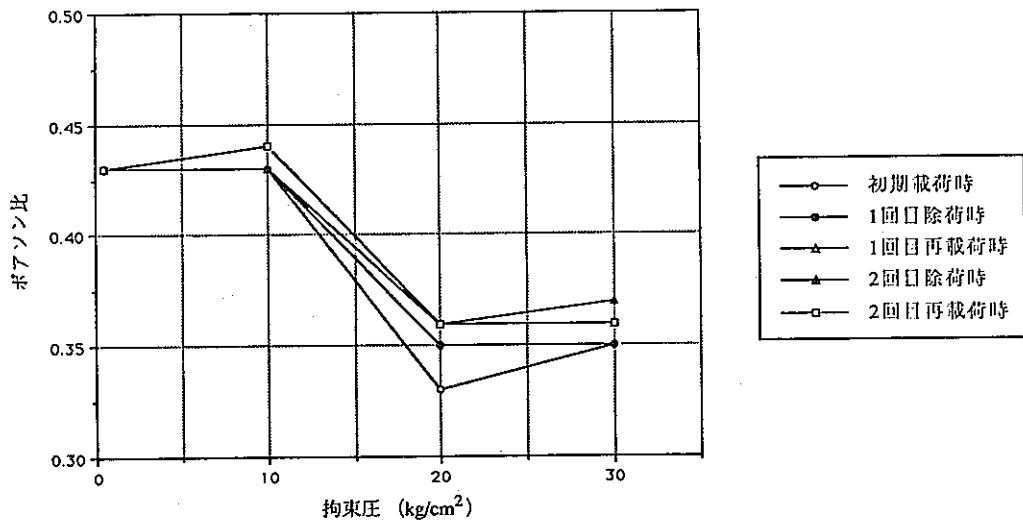


図-2.1.4.8(1) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、A断面)

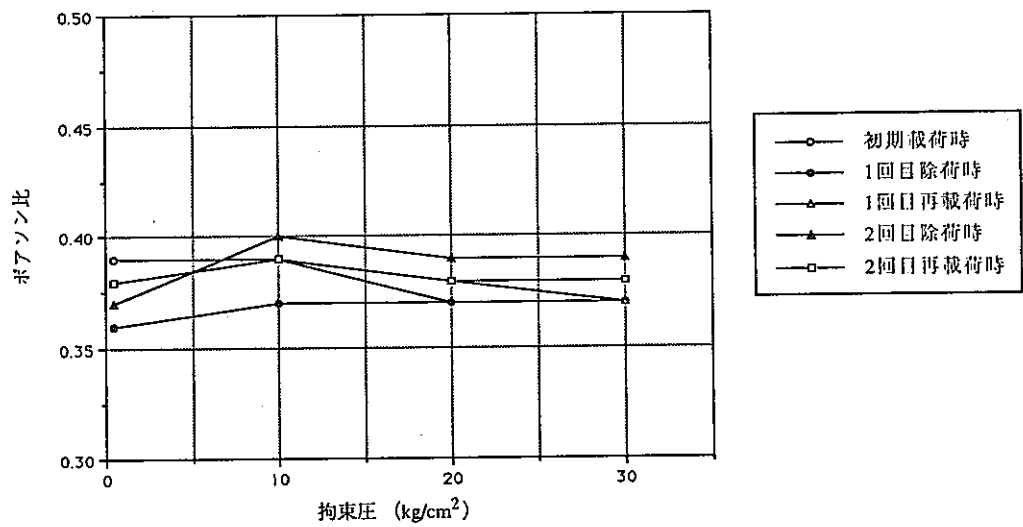


図-2.1.4.8(2) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、B断面)

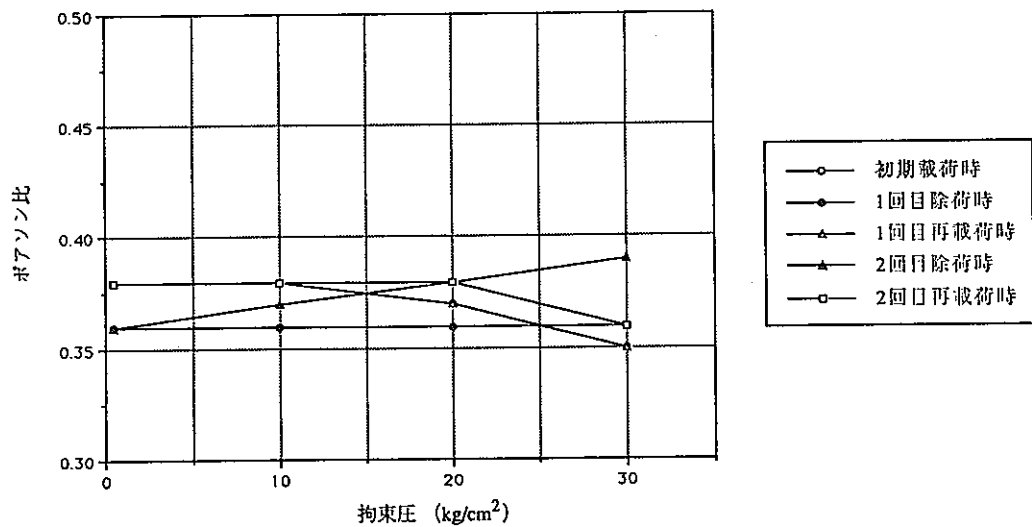


図-2.1.4.8(3) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、C断面)

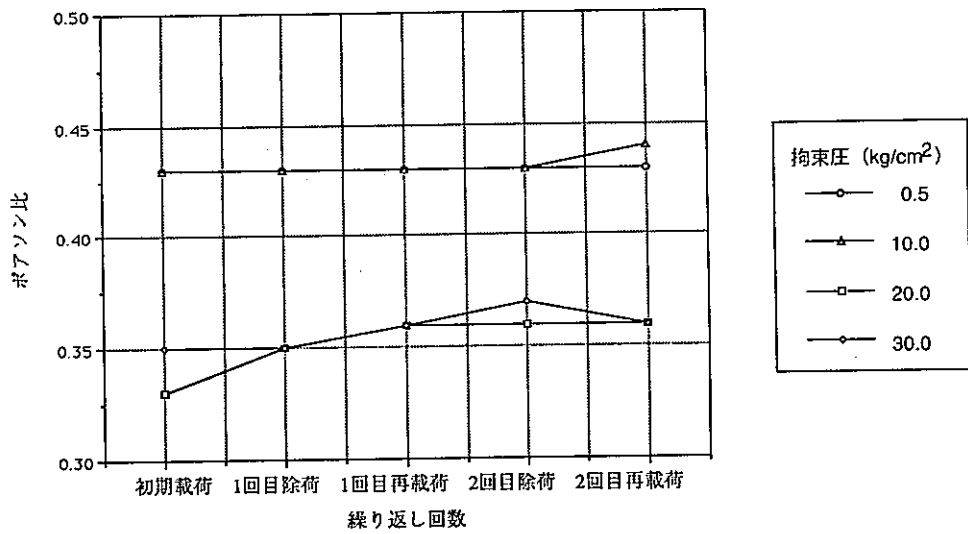


図-2.1.4.9(1) ポアソン比と繰返し回数の関係 (A断面)

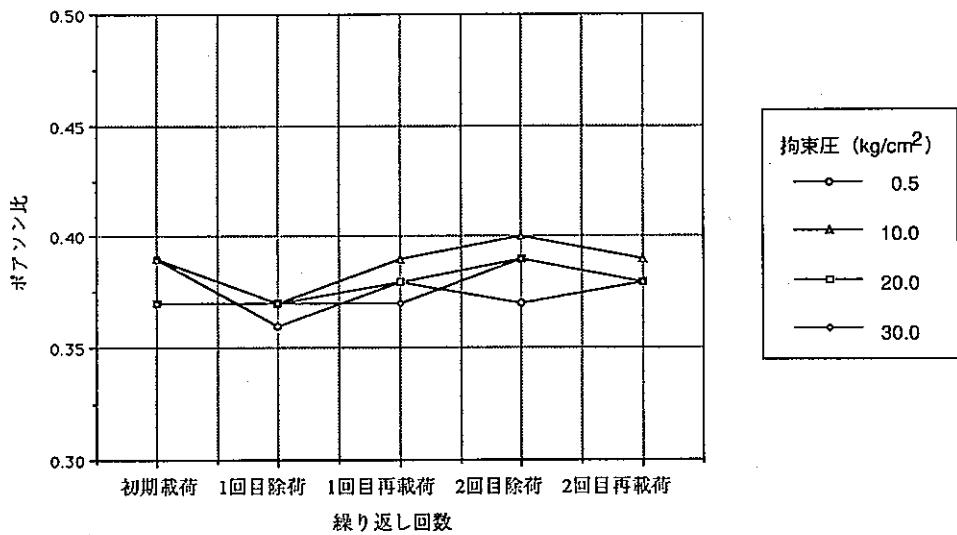


図-2.1.4.9(2) ポアソン比と繰返し回数の関係 (B断面)

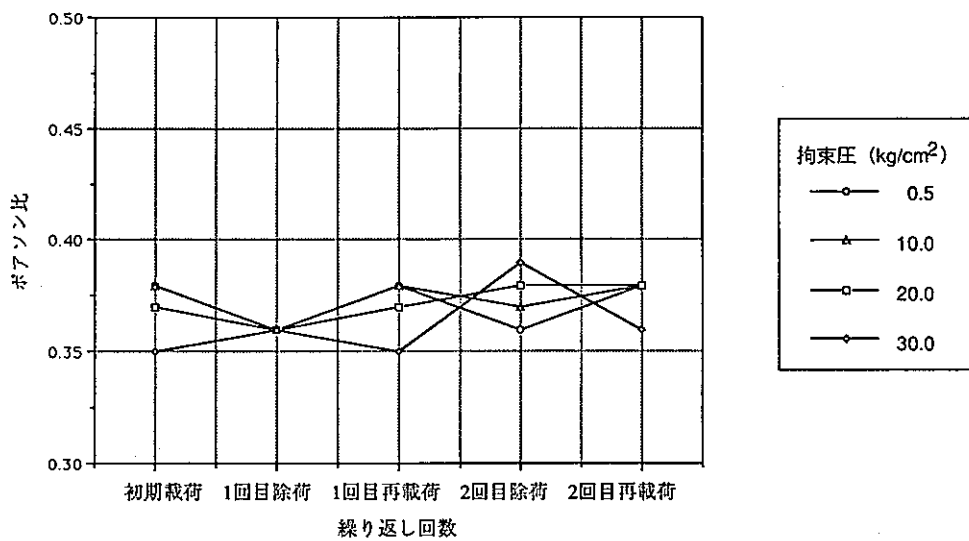


図-2.1.4.9(3) ポアソン比と繰返し回数の関係 (C断面)

(6) まとめ

3つの深度から採取した岩石の応力状態と変形特性の関係を調べることを目的とし、三軸圧縮試験を実施した。その結果得られた知見を以下にまとめて示す。

1) 物理特性及び地質状況

A断面では、供試体の物理特性（湿潤密度、含水比、間隙比、飽和度）の比較及び供試体の観察結果の比較によれば、特に他と大きく異なる性質または外観を示すものは見られなかった。

B断面では、供試体の物理特性の比較及び供試体の観察結果の比較によれば、供試体の外観や地質状況が他と比べて大きく異なるものはなかった。しかしながら、湿潤密度、含水比、間隙比が他と比較して明らかに異なるものがあった。

C断面では、物理特性が他と比べて大きく異なるものが見られた。また、供試体の観察結果の比較によれば、供試体の外観や地質状況は各組で同等とみなせるものはなかった。

2) 強度定数

全体的な傾向として、A断面供試体では、粘着力 C' 及びせん断抵抗角 ϕ' ともにはばらつきが小さい結果となった。これに対し、C断面供試体では、粘着力 C' 及びせん断抵抗角 ϕ' ともに大きなばらつきが認められた。また、B断面供試体では、3本の供試体のうち2本について、最も低い拘束圧の場合の強度が他と比べて大きいため強度定数の算定が不可能であった。これらのことから、A断面供試体（明世累層）では、B断面及びC断面供試体（ともに土岐夾炭累層）に比べれば、均質な状態にあったものと考えられる。

3) 拘束圧と最大強度、残留強度の関係

3本の供試体から得られる試験結果については、A断面の供試体の最大強度は、B断面やC断面と比べて値のばらつきが小さい。残留強度については、特に3つの断面で顕著なばらつきの差はないと言える。

断面ごとの関係については、どの断面の供試体についても、拘束圧と最大強度、残留強度の関係は単調な増加または減少の関係では表されない。

4) 拘束圧と初期変形係数の関係

3本の供試体から得られる試験結果については、A断面及びB断面の供試体の初期

変形係数は、C断面と比べて値のばらつきが小さい。

断面ごとの関係については、どの断面の供試体についても、拘束圧と初期変形係数の関係は単調な増加または減少の関係では表されない。

5) 除荷・再載荷時の変形係数の変化

3つの断面で共通しているのは次の2点である。まず、定義のしかたにより変形係数の大きさが異なることである。この理由については、除荷時と再載荷時では応力～ひずみ関係が非可逆的な関係にあることが考えられる。

次に、最大強度に至る前での変形係数が最も大きく、残留状態では、変形係数が次第に小さくなる傾向があることである。この理由として、以下のことが考えられる。三軸圧縮試験の過程でも観察されたように、残留状態になると供試体の表面にはクラックが無数に見られ、明瞭なせん断面が形成されることもある。このように、残留状態では最大強度以前の状態に比べて、供試体の内部構造が少なくとも変化していることが予想される。したがって、変形特性に関しても、残留状態は最大強度以前の状態よりもさらに変形しやすい状態となっていることが考えられる。

6) 拘束圧とポアソン比の関係

通常の三軸圧縮試験から得られた拘束圧とポアソン比の関係については、A断面及びB断面の供試体では、ともに拘束圧が 20kg/cm^2 の場合にポアソン比が大きく低下するが、C断面の供試体ではポアソン比の大きな低下は見られない。

また、除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験から得られた拘束圧とポアソン比の関係については、A断面供試体では、拘束圧の増加に伴いポアソン比が大きく変化する傾向が見られるが、B、C断面供試体のポアソン比は、拘束圧が増加しても顕著な変化は示さない。

7) 除荷・再載荷時のポアソン比の変化

3本の供試体から得られる試験結果については、除荷・再載荷に伴うポアソン比の変化は認められるが、3つの断面で一定の傾向は見いだせない。

2.2 長期挙動に関する特性

2.2.1 目的

岩石の長期的な力学特性を知ることは、深部岩盤の長期的な安定性を検討するうえで重要である。これまで、明世累層および土岐夾炭累層の岩石について、荷重が短期間で作用する場合の力学特性を主として調べてきた。

本試験では、試験条件が簡単なケースとして一軸圧縮状態を考え、応力比を高め設定して、供試体が短期間で破壊するような場合の岩石の時間依存性挙動を調べた。これにより、明世累層および土岐夾炭累層の基本的な長期的力学特性についての情報が得られると考えられる。

2.2.2 文献調査結果

長期挙動に関する特性の測定に関する文献調査を行い、試験手法についての情報を収集し、整理した。その結果を以下にまとめて示す。

(1) 測定方法および条件

1) クリープ試験に関する規準等はまだ整備されていない。一軸圧縮応力下でのクリープ試験の場合、試験片の形状、整形方法は一軸圧縮試験に準じて行われることが多い。応力を一定に保つこと、微小変位を精度良く計測することが重要である¹⁾。

2) ひずみの測定には、ひずみゲージによる方法と供試体両端間の変位を測定する方法がある。通常は後者の方法が多く行われるようである。ミクロン単位の測定をするにはセンサーの取り付けに十分な注意が必要である¹⁾。

3) 温度変化により供試体の寸法が変化し、ひずみの測定に支障をきたすので試験室はできれば空調することが望ましい¹⁾。温度の調整は熱応力の発生の少ないように、温度の変化率をできる限り小さくすることが必要である¹⁾。

4) 試験条件を統一するため、供試体の弾性波速度を測定し、ほぼ同一の速度を有するものを選定した例もある⁴⁾。

(2) 結果の評価方法

経過時間と軸ひずみの関係、経過時間と軸ひずみ速度の関係、破壊時間と最小ひずみ速度の関係で試験結果を整理する^{2) 3) 4) 6)}。

(3) 得られた知見

1) 経過時間と軸ひずみの関係から、軸ひずみの増加傾向は岩種により様々であることが分かった^{2) 5)}。

2) 経過時間と軸ひずみ速度の関係から、一次クリープ領域では、岩種、応力条件、排水条件に関係なく、軸ひずみが経過時間の対数に比例するという対数クリープ則が成り立つ^{2) 4)}。

3) 大谷石の一軸クリープ試験の結果³⁾

①所定の応力载荷後、時間の経過とともに軸ひずみが徐々に増加し、やがてひずみが急激に増加して破壊に至るクリープ挙動が確認された。しかし、みそと呼ばれる含有物の影響で試料ごとの破壊強度が異なるため、同じ応力比であっても破壊時間の違いが生じた。

②経過時間とひずみ速度の関係は、ひずみ速度が応力载荷後急激に減少し、定常状態を経た後に加速されて破壊する。

③破壊時間と最小ひずみ速度の間には、対数直線的な関係がある。

2.2.3 試験装置

今回の試験で使用する三軸クリープ試験装置を図-2.2.3.1に示す。

载荷方式は応力制御法である。荷重は空気圧方式であり、初期の载荷時には0.5秒程度の短時間で、設定圧の90%以上の荷重を作用させることが可能である。

2.2.4 試験方法

(1) 試験方法

試験方法の設定にあたっては、2.2.2で実施した文献調査の結果から得られた知見を参考とした。各岩種から1組3本の試料を選定し、直径50mm、高さ100mmの供試体を作成し、湿潤密度の測定を併せて実施した。供試体数は、3供試体×3応力比×3岩種=27本とした。

载荷重が一軸圧縮強度の90,85,80%となるように荷重を設定し、試験終了まで一定荷重を保持した。供試体は自然状態で試験を行ったが、試験が長時間にわたる場合は、供試体ができるべく乾燥しないように留意した。

(2) 試験時の荷重の設定

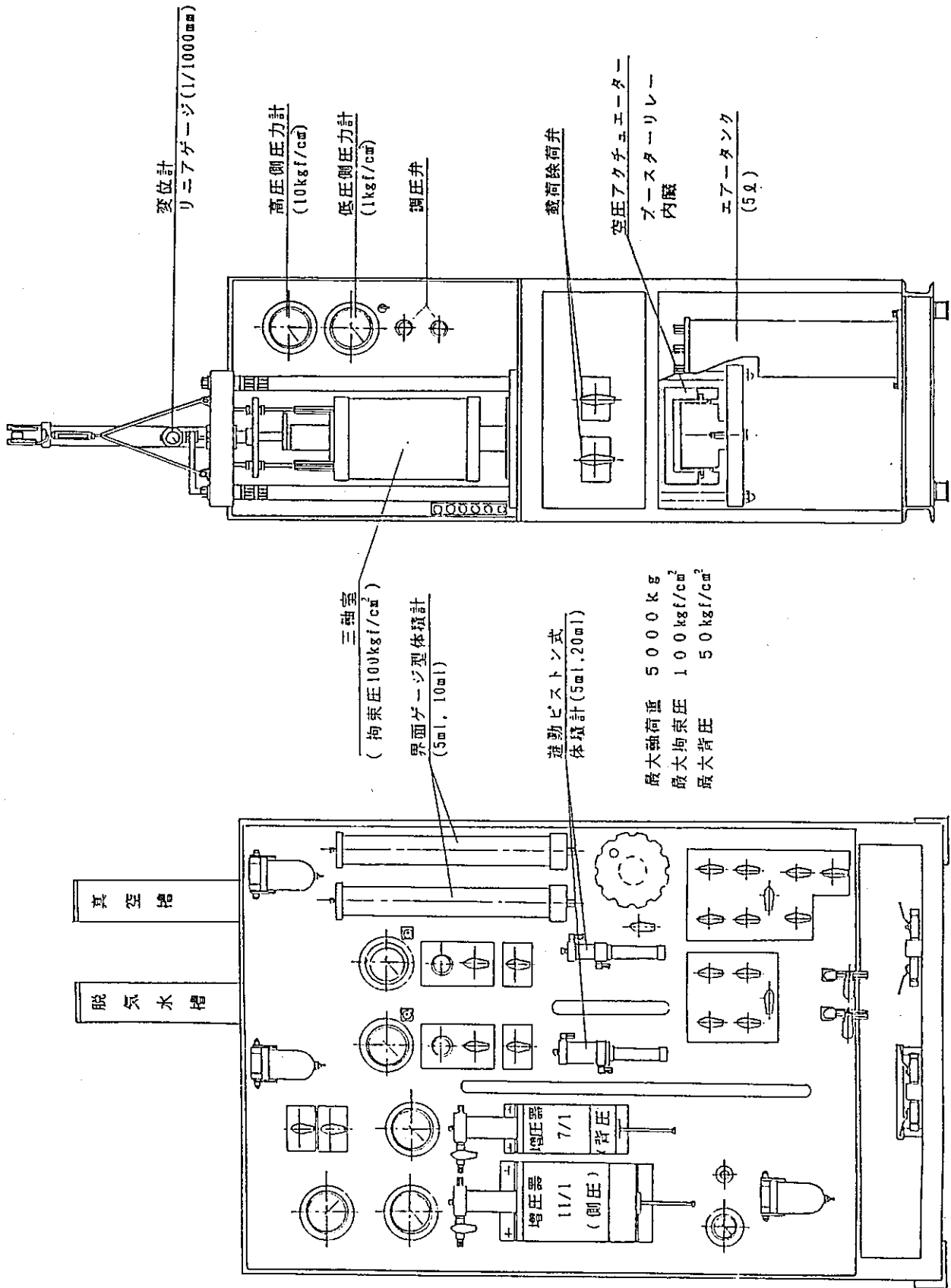


図-2.2.3.1 5TF高容量三軸クリープ試験装置

試験時の荷重の設定は、2.2.2で実施した文献調査の結果から得られた知見を参考として以下の手順で行った。

- ①当地点で実施された過去の試験結果から一軸圧縮強度と弾性波速度の回帰式を求めた。一軸圧縮強度と弾性波速度（P波）の関係および回帰式を図-2.2.3.2に示す。
- ②クリープ試験前に供試体の弾性波速度を測定する。
- ③②で得られた弾性波速度から、①の回帰式を用いて供試体の一軸圧縮強度を推定する。
- ④③で推定した一軸圧縮強度と応力比から、荷重する荷重を設定する。
- ⑤④で設定した荷重によりクリープ試験を実施し、目安として数時間程度の荷重でも破壊に至らなかった供試体については、一軸圧縮試験を行い、事前に推定した一軸圧縮強度との比較を行う。

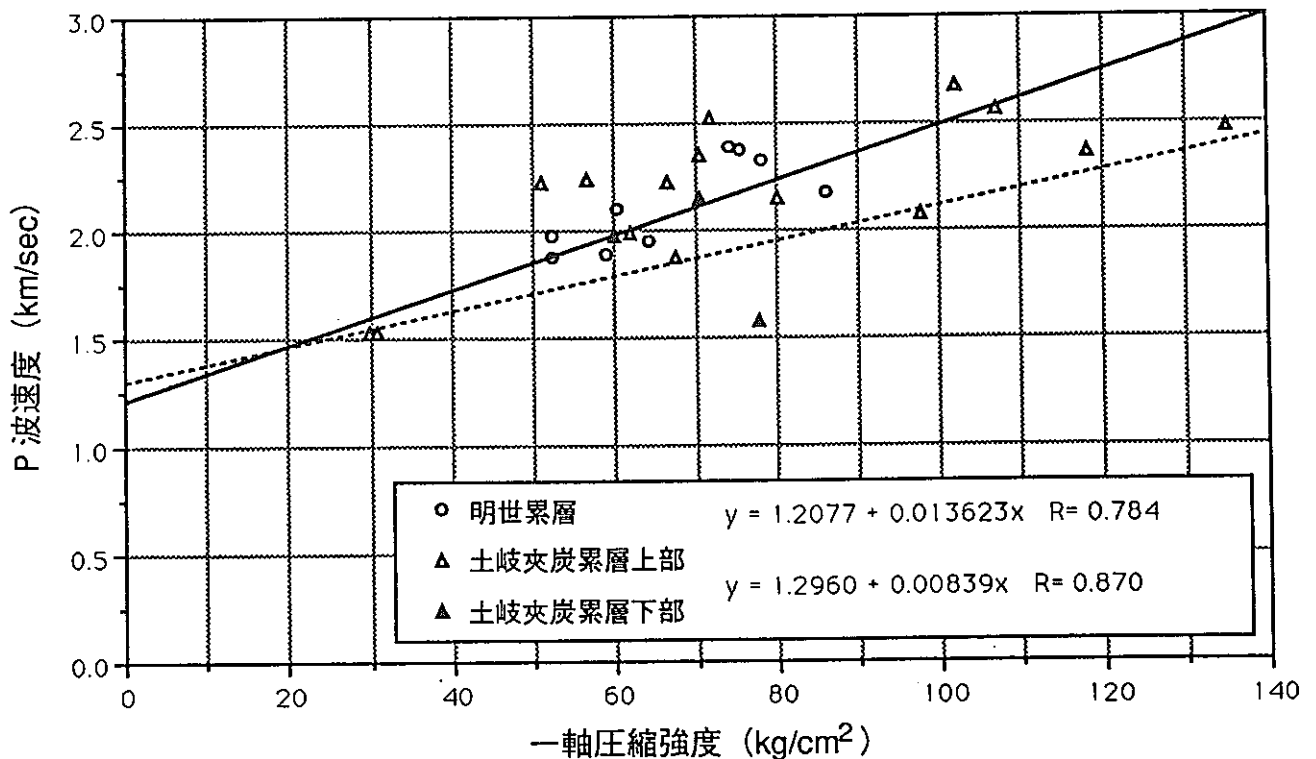


図-2.2.3.2 一軸圧縮強度と弾性波速度（P波）の関係

(3) 解析方法

土質工学会編『岩の調査と試験：第61章 クリープ試験』を参考として、試験結果の整理を行う。試験結果は、軸ひずみ～経過時間、ひずみ速度～経過時間の関係で整理した。

2.2.5 試験結果と考察

(1) 試験結果の一覧

試験結果の一覧を表-2.2.5.1～表-2.2.5.3に示す。

A断面の供試体で破壊に至らなかったはA-6のみであった。試験後の一軸圧縮強度は事前の推定値の10%増であった。一軸圧縮強度の推定に用いた回帰式は概ね妥当な精度であったと言える。同様に、B断面ではB-4の2本が破壊に至らず、試験後の一軸圧縮強度は事前の推定値のそれぞれ4%減、54%増であった。C断面ではC-4及びC-6の2本が破壊に至らず、試験後の一軸圧縮強度は事前の推定値のそれぞれ35%増、33%増であった。

以上のことから、一軸圧縮強度の推定式の精度はA断面（明世累層）の方が、B断面及びC断面（土岐夾炭累層）に比べて良好であったと言える。

(2) 軸ひずみと経過時間の関係

軸ひずみと経過時間の関係を図-2.2.5.1～図-2.2.5.3に示す。

供試体が破壊に至る場合の軸ひずみと経過時間の関係には、大きく分けて以下の3つのパターンがある。

パターン1：軸ひずみと経過時間の対数の関係が最初はほぼ線形関係を示し、ある特定の時点から軸ひずみが急激に増加し破壊に至る。破壊までの時間は最大9時間の長時間にわたる（たとえば、図-2.2.5.1(1)のA-9の供試体）。破壊を伴う場合の大半がこのパターンに属する。すなわち、対数クリープ則が成り立つ。

パターン2：軸ひずみと経過時間の対数の関係が非線形関係を示し、特定の時点での軸ひずみの急激な増加は見られないまま破壊に至る。破壊までの時間はすべて1秒以下の短時間である。（たとえば、図-2.2.5.1(2)のA-4の供試体）

供試体が破壊に至らない場合の軸ひずみと経過時間の関係は、上記のパターン2の状況が長い時間にわたって継続する以下のようなパターンである。

パターン3：軸ひずみと経過時間の対数の関係が非線形関係を示し、特定の時点での軸ひずみの急激な増加は見られないままこの関係が継続する。（たとえば、図

－2.2.5.2(1)のB-4の供試体)

(3) 軸ひずみ速度と経過時間の関係

1) 軸ひずみ速度と経過時間の関係

図－2.2.5.1～図－5.2.5.3で示した関係をさらに詳細に検討するため、軸ひずみ速度と経過時間の関係を、図－2.2.5.4～図－2.2.5.6に示す。

図－2.2.5.4～図－2.2.5.6から、破壊を伴う場合は、ひずみ速度は次第に減少してゆき、最小値を示した後は増大していく状況を示している。破壊を伴わない場合は、ひずみ速度が時間の経過とともに減少してゆくか、または、ひずみ速度が次第に減少してゆき、その後、明瞭な最小値を示さないまま増大していく。また、A、B、C断面のいずれについても、ひずみ速度が最小値を示す時間と応力比の間に特定の関係は認められない。

2) 最小クリープひずみ速度と最小クリープひずみ速度を確認した時間の関係

図－2.2.5.7に、最小クリープひずみ速度と最小クリープひずみ速度を確認した時間の関係を示す。A、B、C断面のすべての結果をプロットすれば、最小クリープひずみ速度と最小クリープひずみ速度を確認した時間の対数との関係は、逆比例の関係にある。また、断面の違いによる差異は認められない。

3) 最小クリープひずみ速度とクリープ応力の関係

図－2.2.5.8に、最小クリープひずみ速度とクリープ応力の関係を示す。最小クリープひずみ速度とクリープ応力の関係については、特定の傾向は見いだせない。また、断面の違いによる差異は認められない。

表-2.2.5.1 一軸クリープ試験結果 (A断面)

試料No	深 度 (m)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	密 度 (g/cm ³)	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm ²)	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm ²)	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)
A-7	41.57~41.67	10.025	4.699	1.719	0.886	2.133	68.0	0.90	61.2	破 壊	19s	—
A-8	41.70~41.80	10.120	4.716	1.694	0.900	2.190	72.2	0.90	65.0	破 壊	2s32s	—
A-9	42.27~42.37	9.980	4.714	1.692	0.854	2.088	64.7	0.90	58.2	破 壊	2s50s	—
A-9	42.38~42.48	9.995	4.718	1.694	0.912	2.211	73.8	0.90	66.4	破 壊	2s51s12s	—
A-10	42.54~42.64	9.995	4.708	1.703	0.892	2.202	73.1	0.90	65.8	破 壊	1s以下	—
A-4	40.77~40.87	10.010	4.704	1.692	0.939	2.224	74.7	0.85	63.5	破 壊	0.32s	—
A-4	40.87~40.97	10.025	4.692	1.698	0.867	2.151	62.0	0.85	52.7	破 壊	0.49s	—
A-5	41.08~41.18	9.980	4.694	1.688	0.911	2.053	62.1	0.85	52.8	破 壊	23s03s	—
A-6	41.27~41.37	10.000	4.706	1.693	0.862	1.901	51.0	0.80	40.8	非破壊	—	56.1
A-10	42.64~42.74	10.025	4.715	1.752	0.908	2.189	72.1	0.80	57.7	破 壊	9s00s32s	—
A-24	44.30~44.38	7.410	4.710	1.724	0.959	2.195	72.6	0.80	58.1	破 壊	1s44s	—

表-2.2.5.2 一軸クリープ試験結果 (B断面)

試料No	深 度 (m)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	密 度 (g/cm ³)	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm ²)	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm ²)	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)
B-3	63.32~63.42	10.130	4.725	1.766	0.967	2.212	79.9	0.90	71.9	破 壊	0.21s	—
B-4	63.47~63.57	10.045	4.724	1.782	0.966	2.222	81.1	0.90	73.0	非破壊	—	77.6
B-4	63.58~63.68	9.980	4.725	1.789	0.952	2.228	81.8	0.90	73.6	非破壊	—	125.7
B-11	72.74~72.83	8.823	4.725	1.609	0.802	2.204	86.8	0.90	78.1	破 壊	0.19s	—
B-11	72.83~72.93	9.770	4.724	1.602	0.828	2.027	87.1	0.90	78.4	破 壊	0.19s	—
B-4	63.71~63.81	10.085	4.722	1.882	1.029	2.373	128.4	0.85	109.1	破 壊	3s04s23s	—
B-7	68.52~68.62	10.145	4.726	1.712	0.988	2.205	108.3	0.85	92.1	破 壊	42s24s	—
B-8	68.70~68.80	10.050	4.725	1.725	0.948	2.223	110.5	0.85	93.9	破 壊	1s39s	—
B-9	72.37~72.47	10.175	4.725	1.700	1.038	2.261	115.0	0.80	92.0	破 壊	0.22s	—
B-10	72.51~72.61	9.990	4.726	1.627	0.881	2.043	89.0	0.80	71.2	破 壊	0.24s	—
B-10	72.61~72.71	10.120	4.728	1.642	0.930	2.172	104.4	0.80	83.5	破 壊	17s	—

表-2.2.5.3 一軸クリープ試験結果 (C断面)

試料No	深 度 (m)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	密 度 (g/cm ³)	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm ²)	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm ²)	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)
C-4	100.27~100.37	9.925	4.735	1.850	0.878	2.158	73.4	0.90	66.1	非破壊	—	99.0
C-5	100.45~100.55	10.045	4.730	1.903	0.889	2.203	78.8	0.90	70.9	破 壊	11s55s	—
C-6	102.92~103.02	9.995	4.730	1.906	0.976	2.292	89.5	0.90	80.6	非破壊	—	118.7
C-18	132.97~133.07	10.060	4.733	2.169	1.367	2.891	190.1	0.90	171.1	破 壊	0.27s	—
C-22	135.51~135.61	10.010	4.718	2.087	1.258	2.503	143.9	0.90	129.5	破 壊	0.25s	—
C-9	103.36~103.46	10.075	4.721	1.879	0.956	2.181	105.5	0.85	89.7	破 壊	2s09s53s	—
C-10	108.37~108.47	9.995	4.716	1.943	0.961	2.231	111.4	0.85	94.7	破 壊	0.18s	—
C-11	108.63~108.73	10.070	4.710	1.989	0.983	2.289	118.4	0.85	100.6	破 壊	0.21s	—
C-12	110.35~110.45	9.955	4.730	1.872	0.796	2.065	91.7	0.80	73.4	破 壊	0.31s	—
C-13	110.68~110.78	10.080	4.735	1.905	0.900	2.182	105.6	0.80	84.5	破 壊	1.61s	—
C-23	137.32~137.42	9.908	4.733	2.003	0.902	2.192	106.8	0.80	85.4	破 壊	0.29s	—

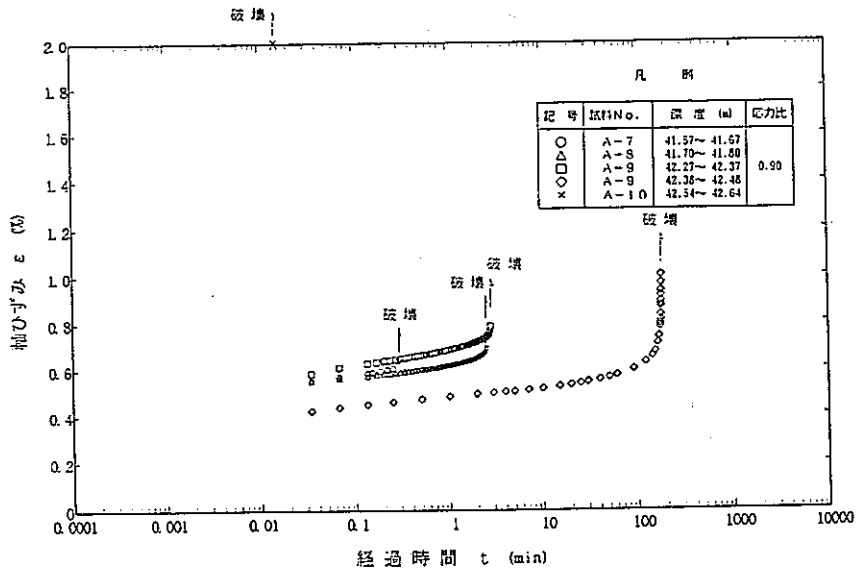


図-2.2.5.1(1) 軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.90)

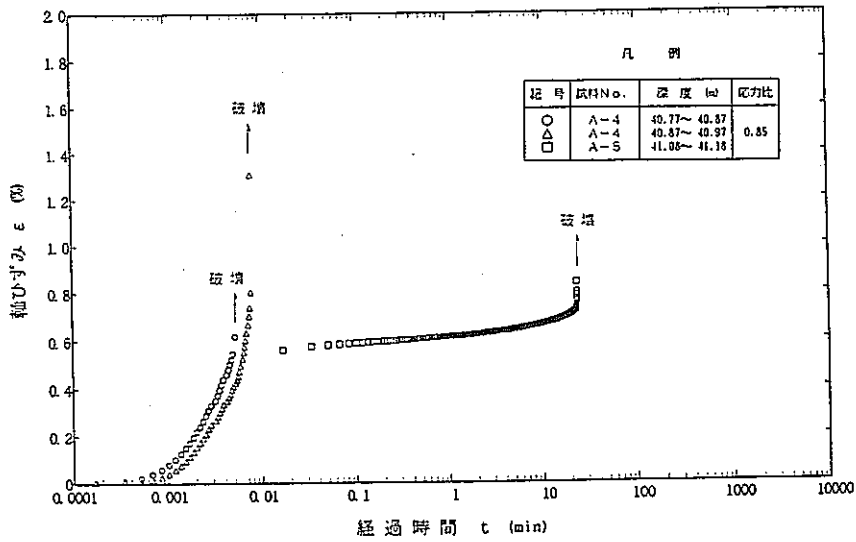


図-2.2.5.1(2) 軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.85)

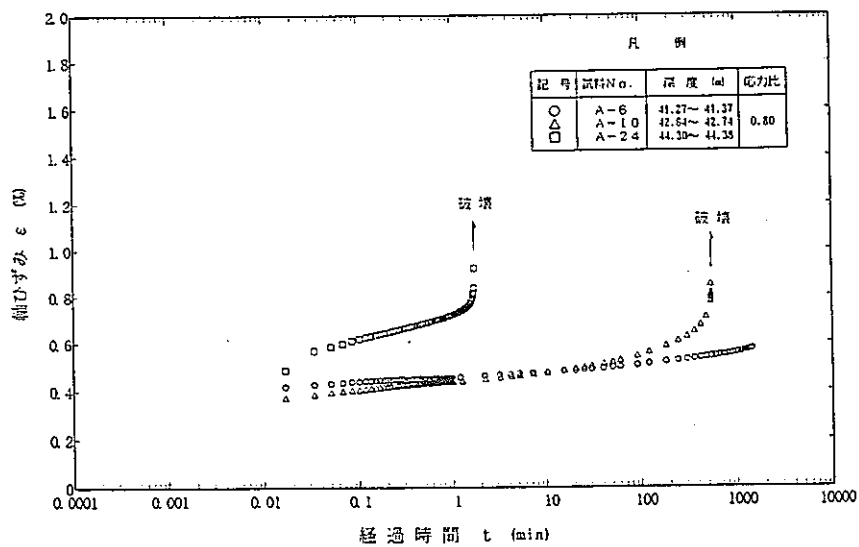


図-2.2.5.1(3) 軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.80)

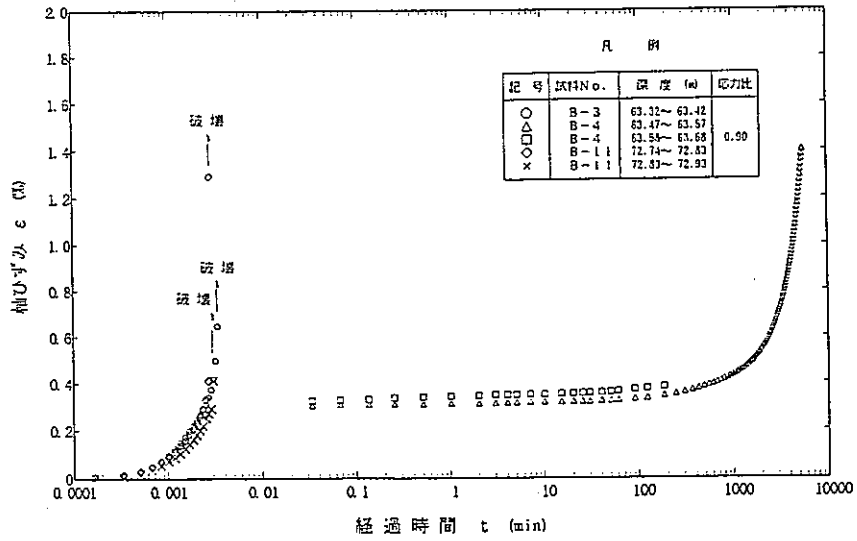


図-2.2.5.2(1) 軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.90)

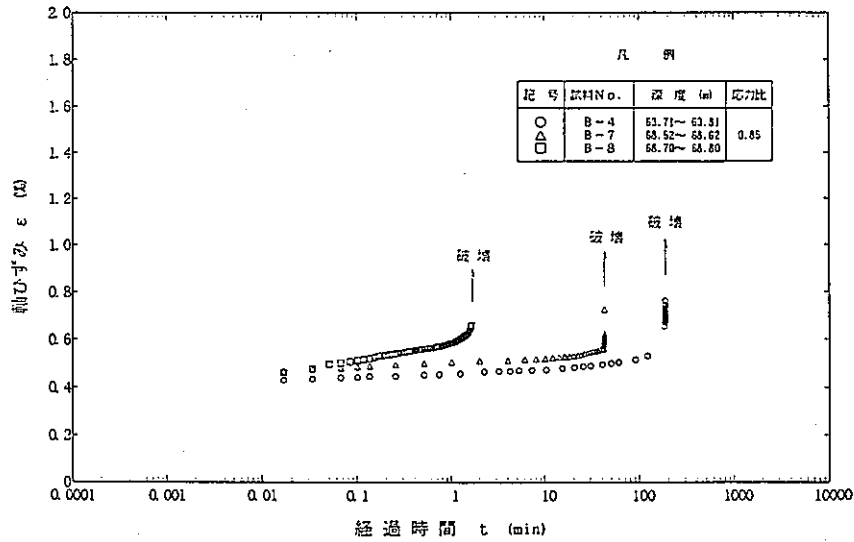


図-2.2.5.2(2) 軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.85)

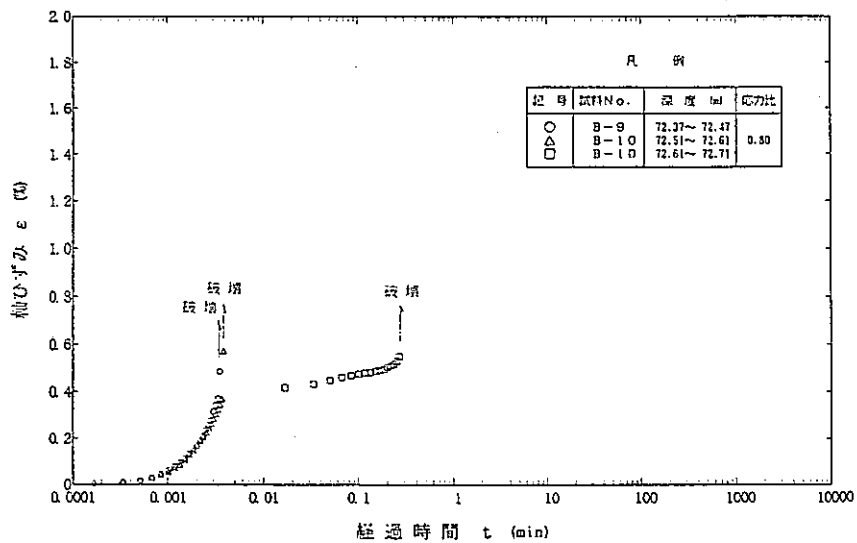


図-2.2.5.2(3) 軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.80)

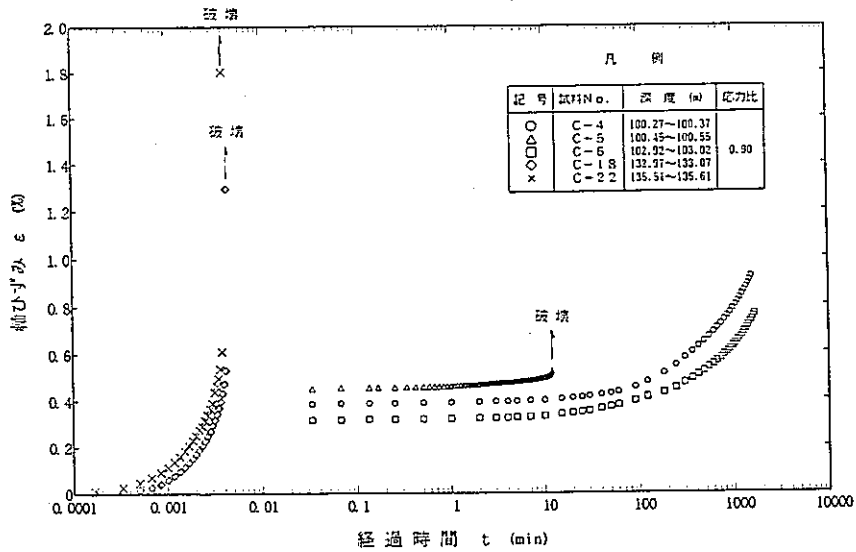


図-2.2.5.3(1) 軸ひずみと時間の関係 (C断面; 応力比0.90)

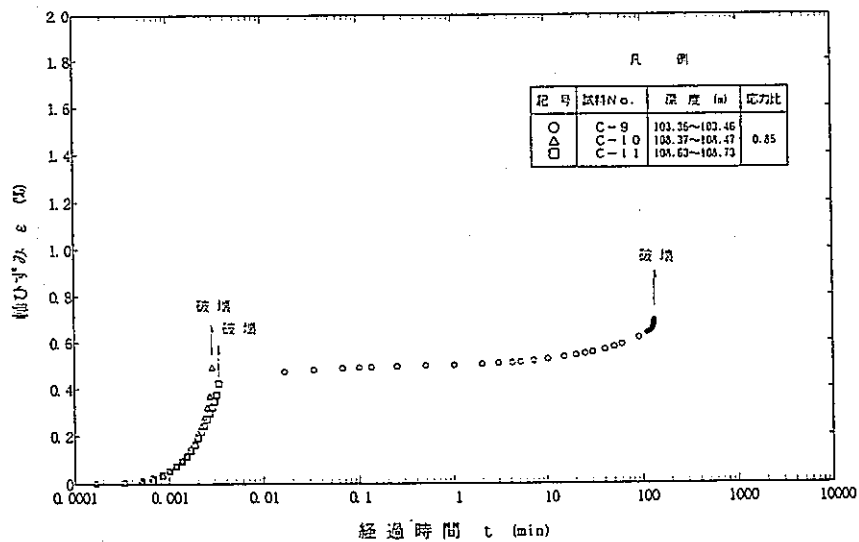


図-2.2.5.3(2) 軸ひずみと時間の関係 (C断面; 応力比0.85)

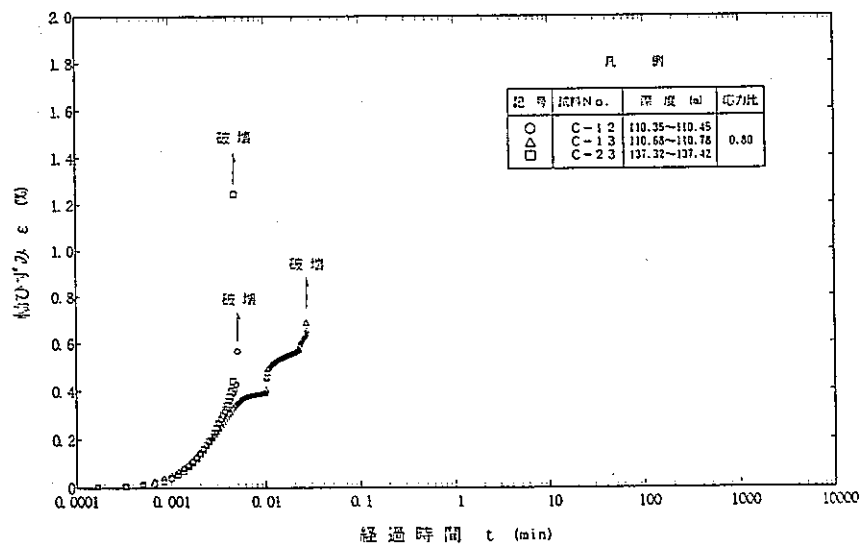


図-2.2.5.3(3) 軸ひずみと時間の関係 (C断面; 応力比0.80)

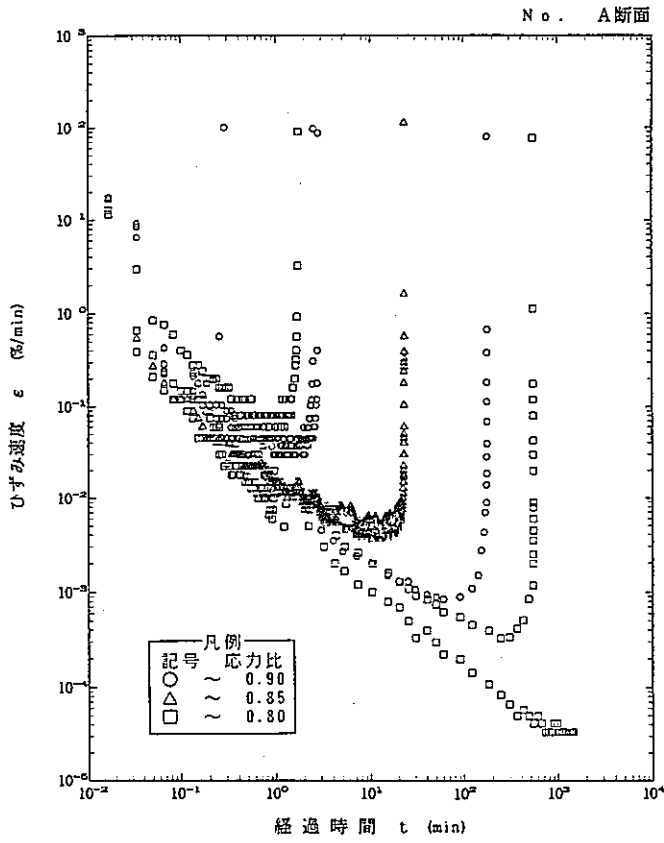


図-2.2.5.4 クリープひずみ速度と経過時間の関係 (A断面)

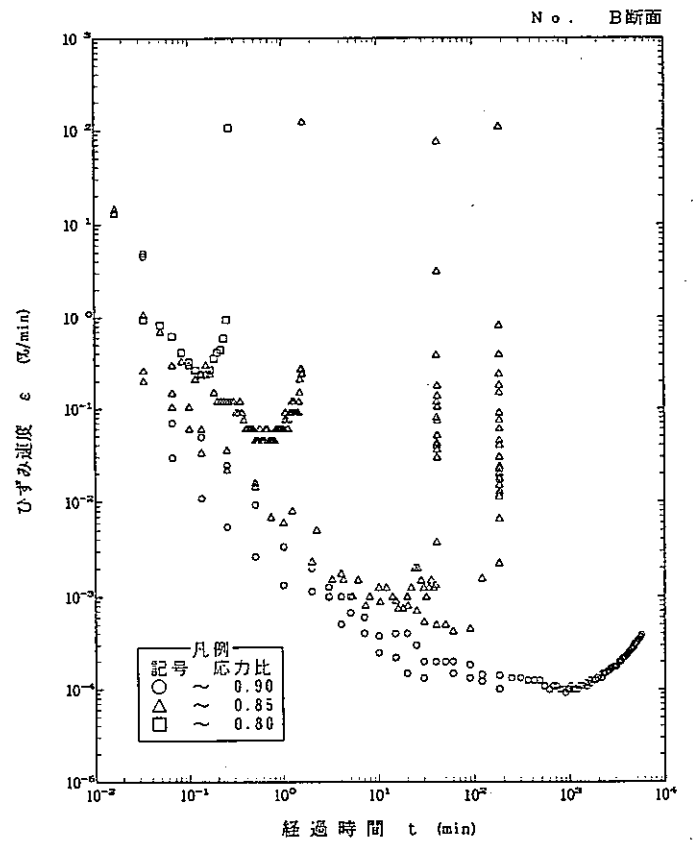


図-2.2.5.5 クリープひずみ速度と経過時間の関係 (B断面)

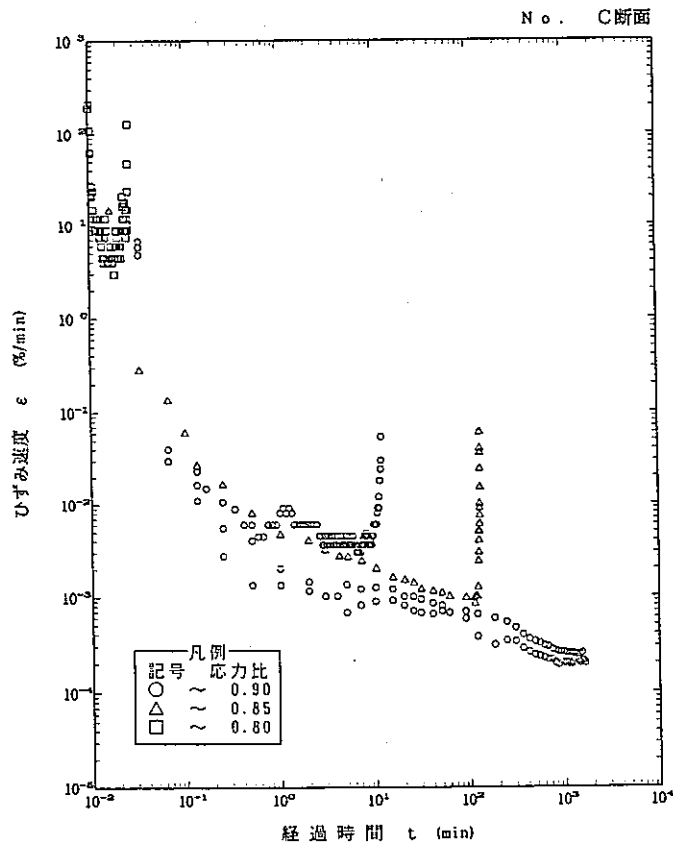


図-2.2.5.6 クリープひずみ速度と経過時間の関係 (C断面)

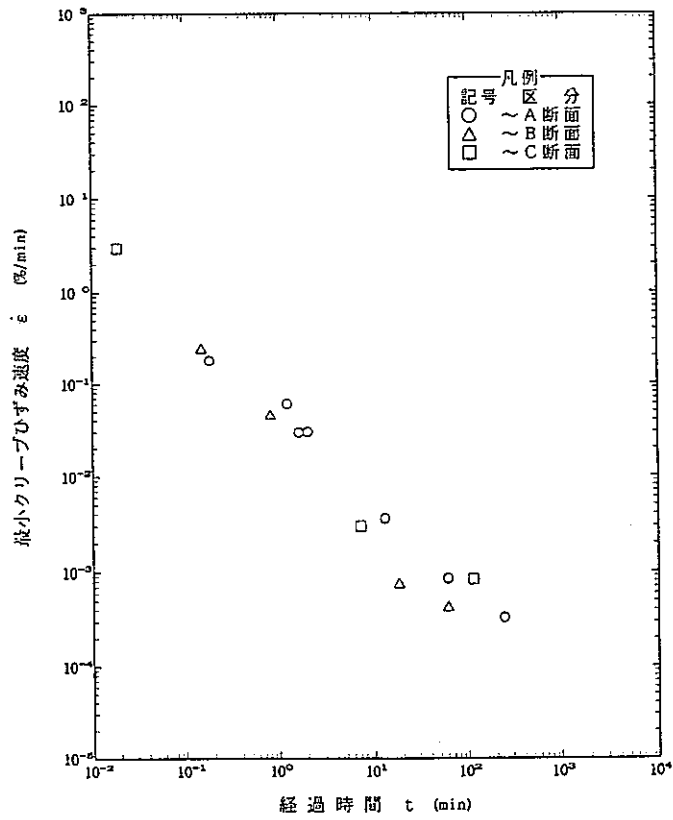


図-2.2.5.7 最小クリープひずみ速度～最小クリープひずみ速度確認時間関係

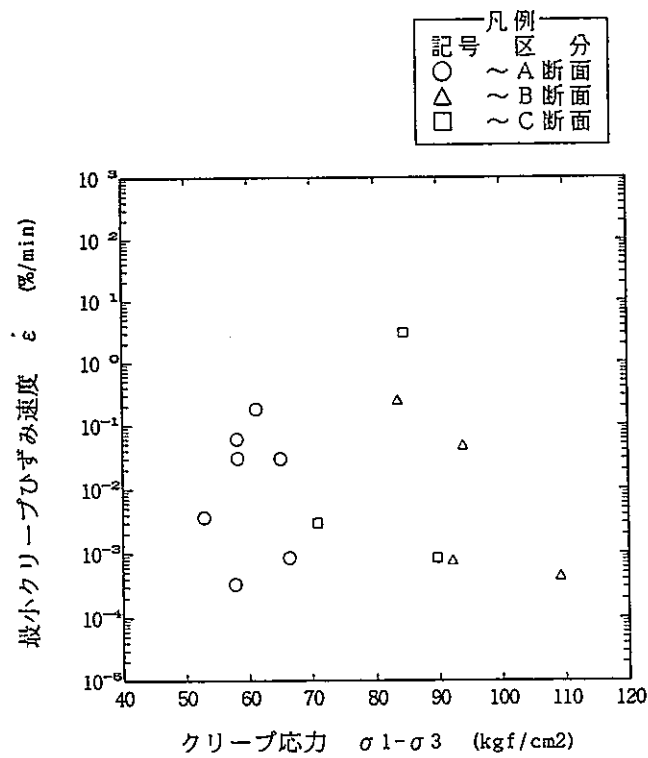


図-2.2.5.8 最小クリープひずみ速度～クリープ応力関係

2.2.6 まとめ

岩盤の長期挙動に関する特性についての基礎的情報を取得することを目的としてクリープ試験を実施した。今回は、試験条件が簡単なケースとして一軸圧縮状態を考え、応力比を高め設定して、供試体が短期間で破壊するような場合の岩石の時間依存性挙動を調べることにした。その結果得られた知見を以下に示す。

1) 軸ひずみと経過時間の関係

供試体が破壊に至る場合の軸ひずみと経過時間の関係には、大きく分けて以下の3つのパターンがある。

パターン1：軸ひずみと経過時間の対数の関係が最初はほぼ線形関係を示し、ある特定の時点から軸ひずみが急激に増加し破壊に至る。破壊までの時間は最大9時間の長時間にわたる。破壊を伴う場合の大半がこのパターンに属する。すなわち、対数クリープ則が成り立つ。

パターン2：軸ひずみと経過時間の対数の関係が非線形関係を示し、特定の時点での軸ひずみの急激な増加は見られないまま破壊に至る。破壊までの時間はすべて1秒以下の短時間である。

供試体が破壊に至らない場合の軸ひずみと経過時間の関係は、上記のパターン2の状況が長い時間にわたって継続する以下のようなパターンである。

パターン3：軸ひずみと経過時間の対数の関係が非線形関係を示し、特定の時点での軸ひずみの急激な増加は見られないままこの関係が継続する。

2) 軸ひずみ速度と経過時間の関係

破壊を伴う場合の軸ひずみ速度と経過時間の関係は、ひずみ速度は次第に減少してゆき、最小値を示した後は増大していく状況を示している。破壊を伴わない場合は、ひずみ速度が時間の経過とともに減少してゆくか、または、ひずみ速度が次第に減少してゆき、その後、明瞭な最小値を示さないまま増大していく。

また、A、B、C断面のいずれについても、ひずみ速度が最小値を示す時間と応力比の間に特定の関係は認められない。

2.3 カイザー効果の時間依存性

2.3.1 目的

A E法を利用して初期地圧を測定するためには、カイザー効果と呼ばれる「履歴荷重を受けた材料に載荷する場合、先行荷重値を越えるまでほとんどA Eは発生しない」現象を利用することになる。従来、カイザー効果は先行応力依存型の現象といわれてきたが、近年の研究から供試体に残留しているひずみ状態に依存していることが判明してきた。原位置からの試料採取ならびに試験までの保管作業は、供試体に在留しているひずみを回復させることにほかならない。そこで、本調査では、応力解放後の経過時間に伴ってカイザー効果から推定される応力の変化（以下カイザー効果の時間依存と称す）を把握し、この成果を利用して本サイトにおける採取深度と初期地圧の関係を明らかにすることを目的とする。

ほとんどの岩石で、カイザー効果は存在することが確認されているが、中には明瞭なカイザー効果の存在しない岩石が存在することも報告されている。そこで、カイザー効果の時間依存測定試験と初期地圧測定試験に先立ち、対象岩石にカイザー効果が存在するか否かを確認する必要がある。さらに、カイザー効果が存在する場合には、カイザー効果の評価方法が問題となる。従来の研究では、A E累積数の急増点からカイザー効果を確認し、先行荷重値を推定してきたが、急増点の見方によって人為的誤差の含まれる欠点が指摘されている。そこで、カイザー効果をより明瞭に確認する方法として、対象岩石に適した閾値と感度の条件を適用し初期地圧測定を行う方法が提案された。この方法では、連続的なA Eの発生するポイントまでをカイザー効果と評価できる。すなわち、連続的なA Eの発生しはじめた荷重値が初期地圧に対応することになり、A E累積数の急増点で評価することに比べれば人為的な誤差は含まれにくいと言えよう。

2.3.2 文献調査結果

岩石のカイザー効果に関する既往の文献調査から、得られた情報について以下に示す。

(1) 測定方法および条件

- 1) 載荷方法は、J I S規格に定める岩石の一軸試験法に準拠している。^{1)~8)}
- 2) 供試体端面と載荷板の接触部から発生するノイズの除去には、アラルダイトを母材とした混合材料を供試体両端面に取り付ける方法¹⁾、スポンジパッドを供試体と載荷板の間に挟む方法³⁾⁴⁾⁷⁾⁸⁾および空間フィルターを利用する方法⁵⁾が利用された。

(2) 結果の評価方法

先行応力を推定するためのカイザー効果の評価方法には、A E累積数曲線の変曲点に着目する方法¹⁾⁵⁾⁶⁾、繰り返し載荷でA E累積数曲線の変曲点を際立たせる方法²⁾および連続的なA Eの発生し始める点に着目する方法³⁾⁴⁾⁷⁾⁸⁾がある。

(3) 得られた知見

- 1) 火成岩のうち花崗岩、花崗斑岩、ひん岩、流紋岩にはカイザー効果が存在した。³⁾⁴⁾⁷⁾
- 2) 堆積岩のうち砂岩、凝灰岩、粘板岩、安山岩、泥岩にはカイザー効果が存在した。¹⁾²⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾
- 3) 変成岩のうち結晶片岩にはカイザー効果が存在したが、大理石にはカイザー効果が存在しなかった。⁷⁾
- 4) カイザー効果から推定される応力は、地質年代的な応力履歴の最大値¹⁾もしくは残留ひずみに呼応した値³⁾⁴⁾⁷⁾になるものと解釈されている。
- 5) 花崗岩におけるカイザー効果には、応力除荷後の時間依存性がある。⁴⁾⁷⁾

2.3.3 測定装置

初期地圧測定のための装置はA E計測器、マイクロコンピュータおよび载荷試験機からなる。A E計測器はトランスデューサ、アンプ、ディスクリミネータおよびカウンタから成る。図-2.3.3.1にA E計測器の概略を、図-2.3.3.2に測定装置の全体状況をそれぞれ示す。トランスデューサは140kHzの共振周波数を有したPZT(ジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子)であり、供試体中央部に鋼製アタッチメントを介して接着する。トランスデューサの周波数応答特性に対して100kHz~200kHzのバンドパスフィルタを構成している。A E信号波形の計数方法には、1つのA E信号波形を包絡線検波し計数するイベント計数法を用いている。通常、1つの閾値でイベントの判定を行っているが、ここでは、反射波などの影響を少なくするために2つの閾値を用いる。

荷重は载荷試験機に組み込んだ5tロードセルで測定する。供試体の変形は、通常供試体表面に貼付するひずみゲージで測定する。しかし、含水比が高いなどの条件によってひずみゲージを貼付することができない場合には、1/1000mm高感度変位計によって供試体の変形を測定する。

A E計測を実施するうえで注意しなければならない事柄の一つとして、雑音の除去の問題がある。特に、载荷板と供試体の接触部から発生する雑音には注意が必要である。この測定では、独立気泡を有したスポンジパッドを载荷板と供試体端面の間に挿入することにより雑音を除去している。

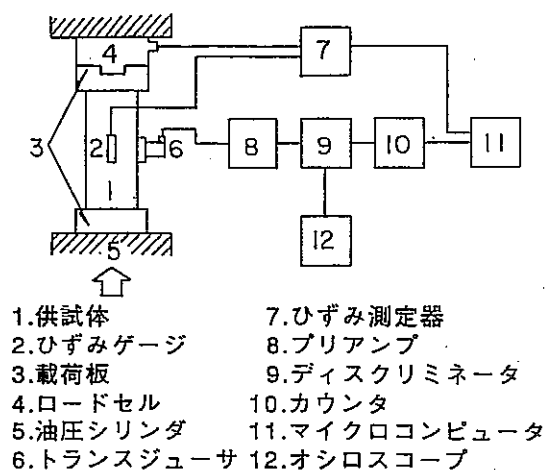


図-2.3.3.1 A E測定器の概略

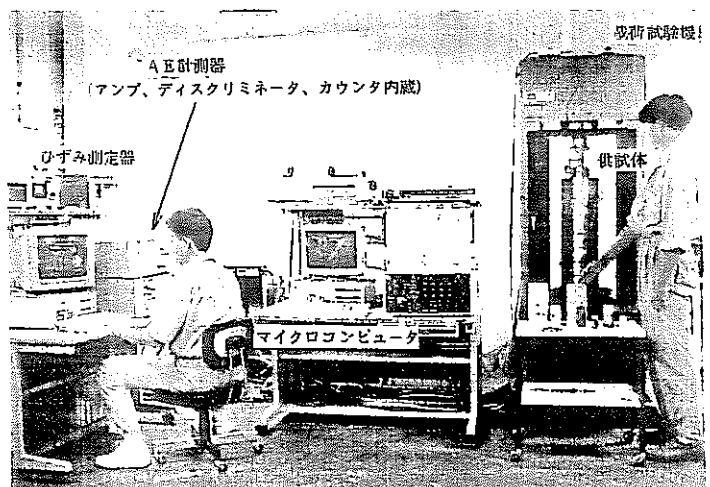


図-2.3.3.2 測定装置の全体状況

2.3.4 測定方法

1)カイザー効果の存在確認と試験条件決定

繰返し載荷条件（繰返し回数50回）下で供試体に先行応力を記憶させた後、感度と閾値の組み合わせ条件を種々変えA E試験を実施した。本試験に使用する供試体は、第2立坑掘削時のG.L.-50m付近で採取した岩塊から整形したものである。供試体は直径30mm、細長比1：2程度の円柱体とした。A E試験では、載荷速度0.98MPa/min.の荷重制御で単調載荷し、荷重と変形とA E発生数を記録した。測定のプロローを図-2.3.4.1に示す。

2)カイザー効果の時間依存測定

岩石用クリーブ試験装置を用いて供試体に先行荷重を記憶させた後、除荷後の経過時間をパラメータとしてA E試験を実施した。軸力除荷後の経過時間は1・2・3・4・5・7・10・15・20・30・46・66日の12種類である。本試験に使用した供試体は、採取されたTM-1ボーリングコアの内G.L.-40m付近のものである。先行荷重は、供試体の組織構造を攪乱することなく新たな荷重を記憶させるため、土被り圧と一軸圧縮強度(約5MPa)を勘案し1.96MPaを採択した。供試体は直径50mm、細長比1：2程度の円柱体とした。A E試験では、載荷速度0.98MPa/min.の荷重制御で単調載荷し、荷重と変形とA E発生数を記録した。測定のプロローを図-2.3.4.2に示す。

3)初期地圧の測定

採取されたTM-1ボーリングコアを用いて、G.L.-50m・-70m・-75m・-99m・-102m・-154m・-195m・-199mの8深度における初期地圧の測定を行った。TM-1ボーリングコアの寸法制約から、鉛直方向初期地圧成分についてのみ測定した。使用する供試体は直径50mm、細長比1：2程度の円柱体である。A E試験では、載荷速度0.98MPa/min.の荷重制御で単調載荷し、荷重と変形とA E発生数を記録した。測定のプロローを図-2.3.4.3に示す。

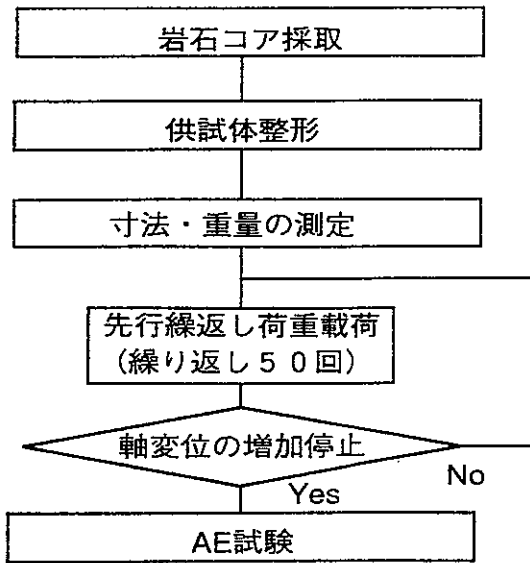


図-2.3.4.1 カイザー効果の存在確認と試験条件決定の作業フロー

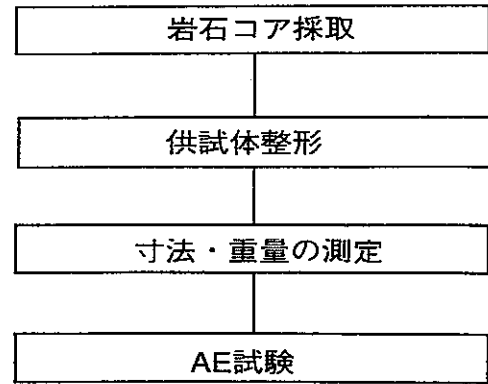


図-2.3.4.2 カイザー効果の時間依存測定 of 作業フロー

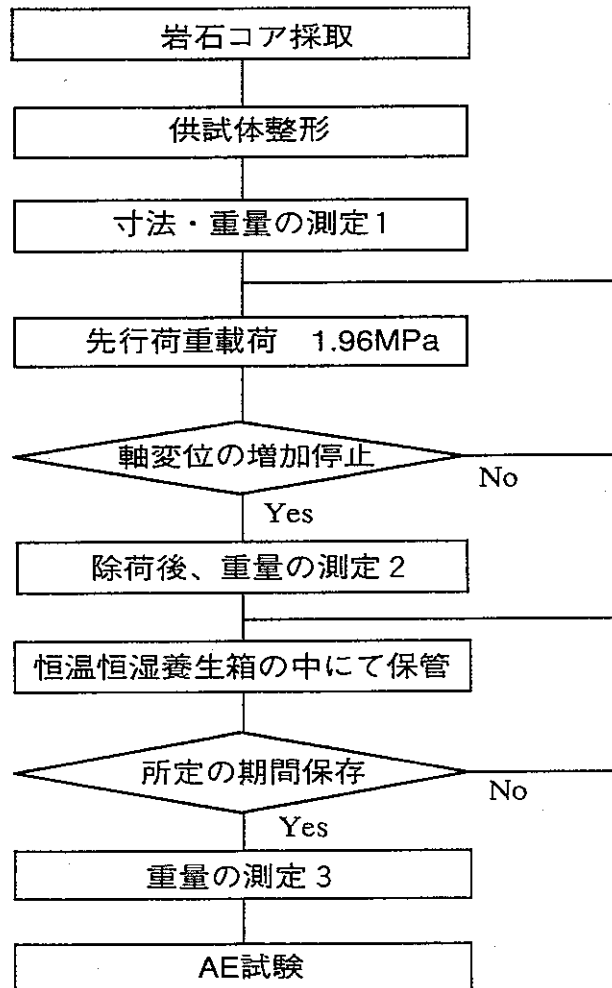


図-2.3.4.3 初期地圧測定の作業フロー

2.3.5 測定結果と考察

1)カイザー効果の存在確認と試験条件決定結果

試験は3本の供試体につきそれぞれ3種類の先行応力を作用させた。閾値と感度の組み合わせは試行錯誤的に6パターンとした。総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定した結果の一例を図-2.3.5.1に示す。図は単調載荷時の応力と変位とAE累積数の関係である。図中、実線で応力-変位曲線を、 $\circ-\circ$ 印で発生したAEの累積数を、矢印で繰返し載荷により作用させた先行応力をそれぞれ示す。先行応力は0.98MPaである。ここでは連続的なAEの発生し始めるところまでをカイザー効果と見なしており、点線でカイザー効果から推定される応力値を示している。この場合、先行応力とカイザー効果から推定される応力がほぼ等しくなった。

予備試験の結果、以下の試験では表-2.3.5.1.に示す測定条件を用いる。

2)カイザー効果の時間依存測定結果

12供試体について、軸力除荷後の経過時間を種々変えカイザー効果の時間依存測定を行った。軸力除荷後、10日放置した場合の試験結果を図-2.3.5.2に示す。図は、図中の印は図-2.3.5.1と同様である。この場合、カイザー効果から推定される応力は0.79MPaとなり、先行応力(1.96MPa)の約半分の大ささになった。先行応力付近でAE累積数曲線に急増点が認められないことから、先行応力の記憶は消失したものと考えられ、カイザー効果の時間依存性が確認された。

カイザー効果から推定される応力値を、一定軸力除荷後の経過日数で整理したものが図-2.3.5.3である。カイザー効果から推定される応力は、応力解放後3日目までは先行応力とほぼ等しくなっているが、4日目以降になると漸次小さくなっていく。さらに、応力解放後15日目を過ぎるころから、土被り圧(0.61MPa)よりも小さくなっていくことが明らかになった。以上のことから、カイザー効果は応力解放後3日目までは存在しているが、4日目以降になると急激に消失していくことが判明した。

3)初期地圧測定結果

採取されたTM-1ボーリングコアの内、G.L.-50m・-70m・-75m・-99m・-102m・-154m・-195m・-199mの8深度について鉛直方向の初期地圧測定を行う。ここでは、G.L.-154mの測定結果の一例を図-2.3.5.4に示す。図中の印は矢印を除いて図-

2.3.5.1と同様である。この試料において、カイザー効果から初期地圧成分を2.76MPaと推定した。得られた結果は、土被り圧（約2.9MPa）とほぼ等しくなった。

8深度の測定結果の内、G.L.-99m・-102mの採取岩石についてはA E試験の直前に供試体にき裂が発生し、試験自体ができなかった。コア採取後3日以内にA E試験を実施できたのは、G.L.-154m・-199mの2深度の供試体であるが、G.L.-199mは載荷初期の段階からA Eが頻発することから初期地圧の評価はできなかった。他の4深度の岩石については、岩石採取後A E試験を実施するまでに数十日から数百日のタイムラグがあったため、初期地圧とは認識しなかった。

得られた結果を、岩石採取深度で整理したものが図-2.3.5.5である。各深度における測定結果について、平均値とバラツキを「○」印で示す。合わせて、G.L.-50m(M1断面)の壁面から採取した岩石で、A Eによる初期地圧測定を実施した結果の平均値を●印で示す。ただし、G.L.-99m・-102mについてはA E試験自体ができなかったので×印で示す。全測定結果の内、G.L.-154mとM1断面(G.L.-50m)の2結果において、最小自乗法による直線近似をあてはめると、鉛直方向の初期地圧 σ_v (MPa)と土被りH(m)の間には図中実線で示す $\sigma_v=0.018 \times H$ の関係が成り立った。

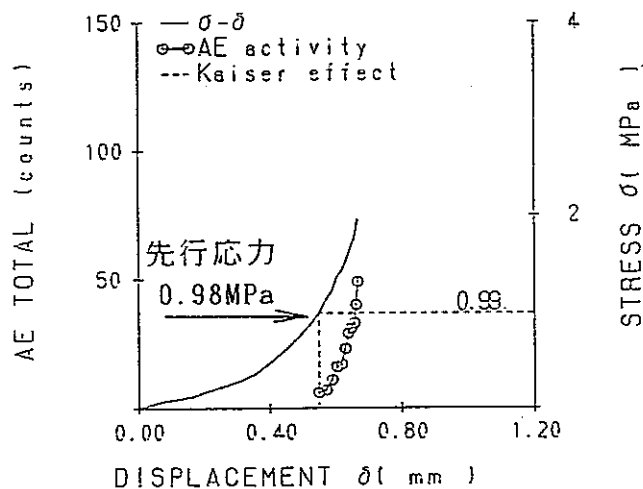


表-2.3.5.1 A E測定条件

項目		条件
トランスデューサ		140kHz共振型
感度	メイン	50dB
	プリ	40dB
閾値	ハイ	230mV
	ロー	210mV
バンドパスフィルタ		100~200kHz
A E計数方法		イベント計数法
制御方法		荷重制御
載荷方法		0.98MPa/min.

図-2.3.5.1 予備試験結果の一例

(総合感度90dB、閾値230mV、210mV)

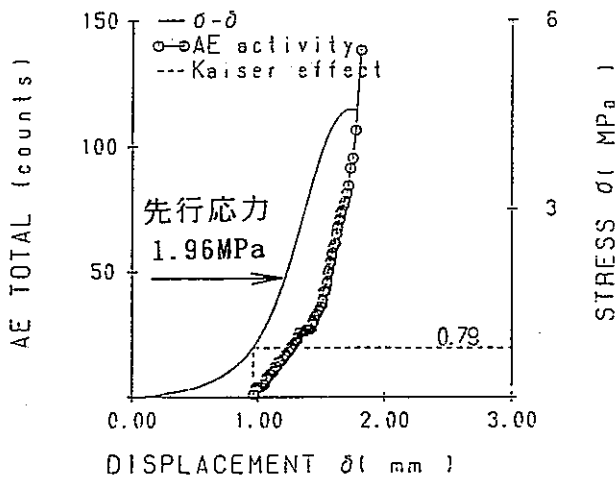


図-2.3.5.2 測定結果の一例
(応力除荷後10日放置)

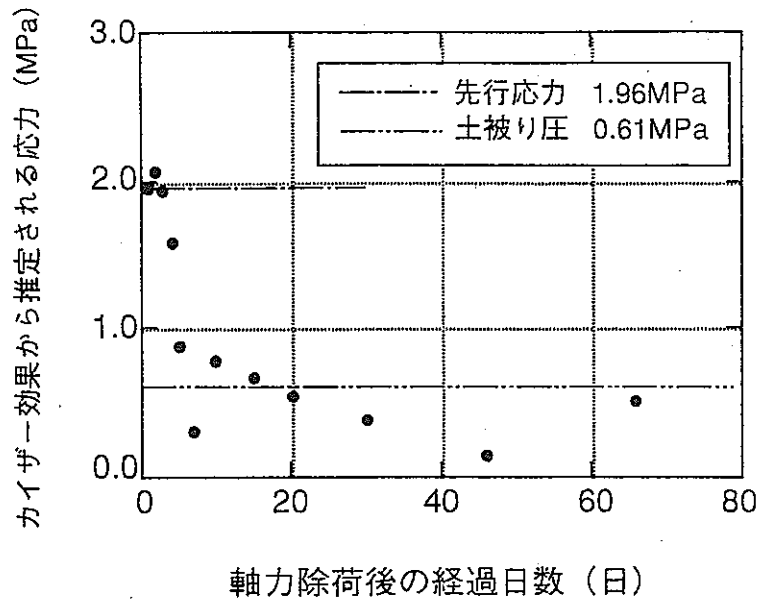


図-2.3.5.3 カイザー効果の時間依存特性

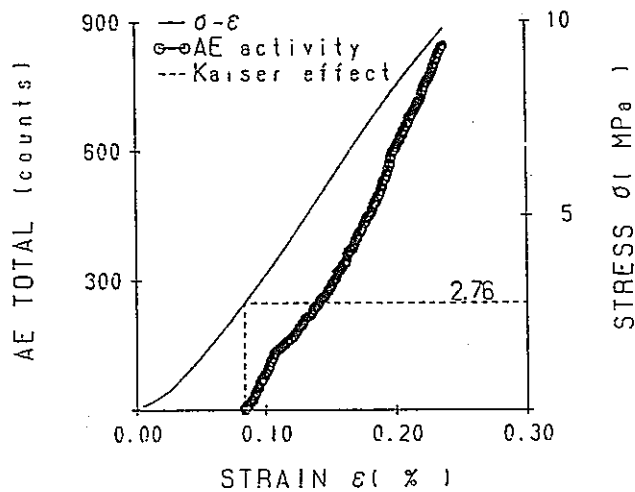


図-2.3.5.4 初期地圧測定結果一例
(G.L.-154m)

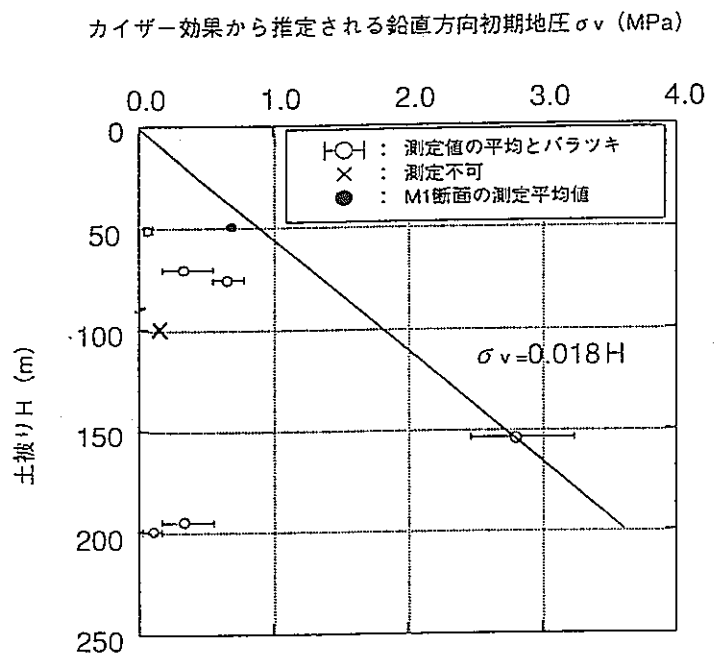


図-2.3.5.5 カイザー効果から推定された鉛直方向初期地圧と土被りとの関係

2.3.6 まとめ

A E法を利用して初期地圧を測定するため、カイザー効果の基礎的特性である応力解放後の時間依存性について検討し、この成果から初期地圧の評価を実施した。得られた知見を以下に示す。

1)カイザー効果の有無

- ・瑞浪層群の凝灰質砂岩にはカイザー効果が存在する。
- ・総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定すれば、連続的なA Eの発生するポイントでの載荷圧力と先行応力が精度良く一致する。

2)カイザー効果の時間依存性

- ・応力解放後3日目以内では先行応力とカイザー効果から推定される応力が一致する。
- ・応力解放後4日目以降ではカイザー効果から推定される応力は、応力解放後の経過日数に伴って急激に小さくなっていく。
- ・他の岩種（火成岩や変成岩）についても、経過時間の度合いは異なるもののカイザー効果の時間依存性が認められていることから、岩種を問わずカイザー効果の時間依存性は成り立つ。
- ・瑞浪層群でカイザー効果を利用して初期地圧を推定する場合は、岩石採取後3日以内にA E試験を実施しなければならない。

3)鉛直方向の初期地圧成分

- ・供試体中にき裂が存在する場合は、A E試験が実施できない。
- ・試料採取後数十日～数百日経過した後A E試験を実施した場合は、土被り圧よりも小さい応力値を算出した。
- ・試料採取後3日以内にA E試験を完了した場合は、土被り圧にほぼ等しい応力値を算出した。
- ・対象地域の鉛直方向初期地圧成分 σ_v (MPa)と土被りH(m)の関係は、次式で表すことができる。

$$\sigma_v = 0.018 \times H$$

3. 調査結果のまとめと今後の課題

3.1 応力状態と透水係数の関係

応力状態と透水特性の関係に関する基礎的データを取得する目的で、今年度は岩石供試体を用いたトランジェントパルス試験を実施した。3.1.2に示したように、明世累層、土岐夾炭累層上部層、土岐夾炭累層下部層の各岩石について、供試体レベルのスケールでは、また今回実施した有効拘束圧の範囲では、透水係数の応力依存性は非常に小さいことが理解できた。また、応力履歴により岩石の透水係数が低下する現象の要因としては、二次圧密的体積変形による岩石構造の変化、目づまり効果等が考えられるが、いずれにしろ応力履歴の透水特性への影響は不可逆的であるといえよう。

今回実施した試験内容は、試験本数も少なく、その結果より現段階で最終的結論を導くことはできないが、原位置の坑道周辺の水理特性を考える場合、この結果はあくまで良好にサンプリングされた試料に対して、非常に明瞭な応力条件の下で実施されたものであることを充分認識しておく必要がある。言い替えれば、坑道掘削を受けた坑道周辺岩盤は、その影響により複雑な応力状態にあり、また岩盤構造そのものが損傷を受けたり、不飽和状態になっていることも懸念されるため、本試験の条件が実際の坑道周辺の水理・応力環境を忠実に反映しているとは言い難いということである。

以上のような状況を念頭に置き、今回実施した試験を通して坑道周辺の水理学的特性の影響評価を行う上で、今後検討を加えるべき課題としては、現実の坑道周辺の応力状態を考慮した以下のような項目が考えられる。つまり、坑道周辺の応力分布は坑道からの距離によって空間的に変化し、その応力分布は坑道周辺の応力集中によって異方応力状態となっていることを検討することが必要である。また、堆積岩特有の堆積構造に起因する水理特性の異方性を考慮した検討も必要である。

以上の結果を踏まえて、今後検討すべき課題を以下に示す。

- 1)掘削影響を受けた坑道周辺の岩石供試体による坑道周辺の透水係数分布の把握
- 2)坑道周辺岩石サンプルの透水係数の異方特性の把握
- 3)異方応力状態下での透水係数の応力依存性の検討

3.2 飽和度と弾性波伝播特性の関係

岩石の飽和度と弾性波速度の間の基礎的な関係を室内試験により求めることを目的とし、同一の供試体で飽和度を变化させた場合の弾性波速度の变化を測定した。

その結果、A断面及びB断面では、飽和状態から飽和度50%程度までの区間のP波速度の变化は、飽和度50~0%の区間の变化よりも大きい傾向が見られた。S波速度は飽和度の变化に対し若干の变化は見られるが、P波速度に比べればその变化は小さくなった。また、データのばらつきについては、A断面供試体に比べて、B、C断面供試体のばらつきが大きいことが示された。

測定上の問題点として、供試体の乾燥に伴って明瞭なクラックが発生するものがあり、飽和度の变化に加えて、このクラックの発生が弾性波速度に影響している可能性があることも考えられた。このため、クラックの発生を防止する方法を検討することが必要である。また、供試体の乾燥に伴う供試体の高さ・直径の変化をノギスを用いて測定する際に、供試体にクラックが入っている場合は供試体が欠けやすくなる。このような場合は、供試体に直接接触しない方法での測定が必要である。

また、今回は一軸状態での試験を実施したが、原位置の応力状態での弾性波速度の変化を検討するためには、今後、拘束圧を考慮した場合の測定についても実施する必要がある。

以上の結果を踏まえて、今後検討すべき課題を以下に示す。

- 1)供試体の乾燥に伴い発生するクラックを防止する方法の検討
- 2)供試体の高さ、直径を非接触で測定する方法の検討
- 3)拘束圧下での飽和度と弾性波速度の関係把握

3.3 応力状態と変形特性の関係

3つの深度から採取した岩石の応力状態と変形特性の関係を調べることを目的とし、三軸圧縮試験を実施した。また、試験途中に除荷および再載荷を行い、除荷・再載荷時の変形特性の変化を調べることを目的とした試験も併せて実施した。

その結果、A断面供試体では、比較的強度定数のばらつきが小さい結果となった。B断面供試体では強度定数の算定が不可能であったり、C断面供試体ではデータのばらつきが大きい結果となった。この原因の1つとして、B断面及びC断面供試体を採取した土岐夾炭累層の地質状況の不均質性が考えられた。

また、拘束圧と最大強度・残留強度、拘束圧と初期変形係数の関係等については、3つの断面それぞれについての特徴的な傾向は見いだせなかった。得られたデータの分布状況から判断して、特にばらついている、すなわち他と異なった傾向を示すと判断されたデータについては、その供試体が採取された地点の物理特性を参照したが、ばらつきの原因を特定するには至らなかった。

今後、このような不均質な岩石供試体の強度・変形特性をできるだけ正確に測定できるような試験方法として次のようなことが考えられる。まず、不均質な岩石を構成するそれぞれの層の強度・変形特性を正確に把握することである。また、たとえば、同一の供試体を用いて、複数の拘束圧の下で試験を行うことが可能な多段階三軸圧縮試験の適用が考えられる。

今回の試験の対象とした堆積岩はほぼ成層状態にあり、堆積面に直角な方向に採取した岩石の強度・変形特性が得られた。対象とする岩盤の力学特性を正確に理解するためには、今後、堆積面に水平な方向についても強度・変形特性を測定し、岩盤の強度・変形特性の異方性の有無を確認することが必要である。

以上の結果を踏まえて、今後検討すべき課題を以下に示す。

- 1)不均質な岩石供試体を構成するそれぞれの層の強度・変形特性の把握
- 2)不均質な岩石供試体の強度・変形特性を正確に測定できる試験方法の検討
- 3)対象とする岩石の強度・変形特性の異方性の検討

3.4 長期挙動に関する特性

岩盤の長期挙動に関する特性についての基礎的情報を取得することを目的としてクリープ試験を実施した。今回は、試験条件が簡単なケースとして一軸圧縮状態を考え、応力比を高め設定して、供試体が短期間で破壊するような場合の岩石の時間依存性挙動を調べることにした。

その結果、軸ひずみと経過時間の関係は、3つのパターンに分類できることが分かった。また、破壊を伴う場合の大半は、最初、軸ひずみと経過時間の対数関係はほぼ線形関係、すなわち、対数クリープ則が成り立つことが示された。

破壊を伴う場合の軸ひずみ速度と経過時間の関係は、ひずみ速度は次第に減少してゆき、最小値を示した後は増大していく状況を示した。また、A、B、C断面のいずれについても、ひずみ速度が最小値を示す時間と応力比の間に特定の関係は認められなかった。

今回のような試験では、試験時のクリープ荷重をいかに正確に設定するかが最も重要である。このため、供試体の一軸圧縮強度を同じ供試体のP波速度から推定し、クリープ荷重を設定する方法を採用した。しかしながら、推定した一軸圧縮強度の妥当性を証明できるデータが限られていたため、この方法が適切であったか否かの判断は容易ではない。P波速度から推定する方法以外にも、一軸圧縮強度を精度良く推定するための試験方法の検討が必要である。

今後、さらに明世累層及び土岐夾炭累層という特定の層を構成する岩盤の長期的な力学特性を評価していくためには、同一条件、すなわち同一深度での塊状の試料を採取しできるだけ多くの供試体の試験を実施することが必要である。したがって、このような場合には、深度方向のボーリングよりも、横坑を利用したブロックサンプリング等により試料を採取するのが望ましいと考える。

以上の結果を踏まえて、今後検討すべき課題を以下に示す。

- 1)試験荷重を精度良く設定するための試験方法の検討
- 2)ブロックサンプリング等による同一条件での多くの試験の実施

3.5 カイザー効果に関する基礎特性

A E法を利用した初期地圧測定方法は、試料を入手さえすれば原位置試験に比較して手軽に実施できる利点を有している。しかし、G.L.-99m・-102mの供試体のように試験準備中に供試体にき裂が入った場合には測定自体ができないことになる。き裂の生じる原因としては乾燥やモンモリロナイトのような膨張性鉱物の影響が考えられる。また、G.L.-199mの供試体のように、マクロな亀裂を内在している場合にはカイザー効果の評価ができないことになる。供試体作製時には供試体状況の観察が必要になる。さらに、カイザー効果から推定される応力は、応力解放後の経過時間に伴って漸次小さくなることから、試料採取後は速やかにA E試験を実施する必要がある。今回、初期地圧を測定した8深度の内応力成分を算出できたのは5深度である。さらにこの内、4深度は岩石採取後A E試験を実施するまでに数十日～数百日が経過していたので、鉛直方向の初期地圧成分はG.L.-154mのみで評価した。現段階では、応力解放後の経過時間とカイザー効果から推定される応力との関係を表す適切な関数式は不明である。応力解放後の経過時間に伴う先行応力の低下率が明らかになれば、4深度（G.L.-50m・-70m・-75m・-195m）の結果から初期地圧を推定することも可能である。例えば、先行応力の低下に指数関数が当てはまれば、経過時間の異なる2つの測定値さえあれば初期地圧を推定することが可能となる。以上の事柄を踏まえ、今後の課題を以下に列挙する。

- 1) 応力解放後の経過時間と先行応力の低下率の関係把握
- 2) 先行応力レベルと応力解放後の経過時間の関係
- 3) 他試験による初期地圧測定結果との比較

参考文献

2.1 応力状態・飽和度と変形性・透水性・弾性波速度の関係の測定

2.1.2 応力状態と透水係数の関係の測定

- 1)奥野哲夫、斎藤 章 (1986) : トランジェント法による岩石の透水係数測定結果、第41回土木学会年次学術講演会、pp.685-686
- 2)奥野哲夫、斎藤 章 (1986) : 透水性の低い岩石の室内透水試験方法、第18回岩盤力学に関するシンポジウム、土木学会、pp.381-385
- 3)佐藤邦明、伊藤 洋 (1988) : 岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構、土と基礎、36巻4号、pp.21-25
- 4)中野勝志、斎藤 章、西垣 誠 (1991) : 難透水性岩石を対象とした室内透水試験、土質工学会論文報告集、第31巻3号、pp.164-174
- 5)高橋 学、薛 自求 (1989) : パルス法を用いて岩石の透水係数を測定する場合の問題点について、地質ニュース、421号、pp.46-54
- 6)青木智幸、下茂道人、田中重明 (1987) : 岩石の透水性に及ぼす温度と圧力の効果、第42回土木学会年次学術講演会、pp.368-369
- 7)杉本、松本、遠藤 (1985) : トランジェントパルス法による岩石の透水係数測定について、応用地質、26巻3号、pp.11-18
- 8)杉本文男、古住光正 (1989) : トランジェントパルスを用いた岩石の透水試験、資源・素材学会誌、Vol.105, No.10, pp.19-23
- 9)西垣 誠 (1985) : 室内透水試験法の改良 (その2)、地下水と井戸とポンプ、第27巻第8号、pp.13-23

2.1.3 飽和度と弾性波速度の関係

- 1)小島圭二 : 東京湾口の地盤、土木研究所資料、第730号、p.32、1972
- 2)松村真一郎、三木 茂、西垣好彦 (1986) : 岩石の超音波伝播速度に及ぼす圧力効果について、第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.296-300
- 3)船戸明雄、莊司泰敬、大橋武一郎 (1987) : 拘束圧下での岩石の超音波速度測定、第7回岩の力学国内シンポジウム、pp.211-216
- 4)阿部 司、斎藤徳美 (1976) : クラック状空隙に含まれる水分が岩石の弾性波速度に及ぼす影響、日本鉱業会誌、Vol.92、pp.73-78

- 5) 斎藤徳美、阿部 司、九里尚一 (1975) : 火成岩の風化による空隙組織の変化と弾性波速度との関係、物理探鉱、第28巻3号、pp.11-21
- 6) 大見美智人、井上正康、鈴木恵三 (1973) : 岩石の含水状態の変化にともなう弾性波速度および弾性定数の変化について、第4回岩の力学国内シンポジウム講演集、pp.91-96
- 7) 土質工学会 (1988) : 岩の調査と試験、第6編 室内物理試験、第47章 超音波速度試験、pp.388-395

2.1.4 応力状態と変形特性の関係

(2) 文献調査結果

- 1) 西垣好彦、松村真一郎、室伏信明 (1987) : 岩石試験の排水条件と強度定数、第22回土質工学研究発表会、pp.899-900
- 2) 三木幸蔵、森島和之、森 邦夫 (1982) : 孔内載荷試験と岩石・岩盤試験との相関性について、第17回土質工学研究発表会、pp.577-580
(ポアソン比測定)
- 3) 田中荘一、西田和範、満 弘之 (1979) : 軟岩の体積変化によるポアソン比測定方法とその実施例、土木学会関西支部昭和54年講演会、pp.139-140
- 4) 満 弘之、西田和範、板橋利昭、石井洋一 (1980) : 軟岩のポアソン比測定方法とその結果について、第15回土質工学研究発表会、pp.1381-1384
- 5) 西田、大西他 (1987) : 三軸圧縮試験による軟岩の変形挙動、第7回岩の力学国内シンポジウム、pp.55-60

(4) 試験方法

- 1) 土質工学会編：土質試験の方法と解説
- 2) 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー30
『堆積軟岩の工学的性質とその応用』
- 3) 土質工学会編：岩の調査と試験
- 4) 土木学会編：軟岩の調査・試験の指針（案）1991年版

2.2 長期挙動に関する特性

- 1) 大久保誠介 (1991) : 総説 岩石のクリープ、資源・素材学会誌、Vol.107、No.5、pp.245-252
- 2) 福井勝則、大久保誠介、西松裕一 (1989) : 一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ

特性、資源・素材学会誌、Vol.105、No.7、pp.521-531

3)横山幸満、岡田宏樹、上野勝利 (1992) : 大谷石のクリープ破壊に関する実験、第27回土質工学研究発表会、pp.1237-1238

4)三室俊昭、山内 優、山下 秀、長尾真宏、柴田和広 (1992) : 大谷石の時間依存性強度特性について、第27回土質工学研究発表会、pp.1235-1236

5)西垣好彦、松村真一郎 (1992) : 軟岩のクリープ定数に及ぼす载荷時間の影響、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.231-235

6)赤木知之、川本眺万 (1984) : 岩石のクリープ特性と構成法則、第6回岩の力学シンポジウム、pp.73-78

7)土質工学会編：岩の調査と試験、第61章 クリープ試験、pp.472-477

2.3 カイザー効果の時間依存性

1)金川 忠、林 正夫、仲佐博裕 (1977) : 岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み、土木学会論文報告集、第258号、pp.63-75

2)Sumio Yoshikawa and Kiyoo Mogi (1981) : A New Method for Estimation of the Crustal Stress from Cored Rock Samples : Laboratory Study in the Case of Uniaxial Compression, Tectonophysics 74, pp.323-339

3)村山朔郎、道広一利、斎藤二郎、吉岡尚也 (1985) : 载荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響、土木学会論文集、No.364/Ⅲ-4、pp.107-112

4)村山朔郎、道広一利、藤原紀夫、畑 浩二 (1986) : 花崗岩のクリープひずみとカイザー効果の関係、土木学会論文集、No.370/Ⅲ-5、pp.41-46

5)瀬戸政宏、歌川 学、勝山邦久 (1992) : 岩石のカイザー効果とA E震源分布との関係、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.371-375

6)石橋孝治 (1992) : 三軸圧縮試験を利用したA E法による先行応力推定、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.376-380

7)Kazutoshi MICHIIHIRO, Koji HATA, Hisaya YOSHIOKA and Toshio FUJIWARA(1992) : Determination of the Initial Stresses on Rock Mass using Acoustic Emission Method, Journal of Acoustic Emission, s63-76

8)畑 浩二、木梨秀雄、杉原弘造、吉岡尚也 (1992) : A E法を利用した堆積岩地山での初期地圧測定、第27回土質工学研究発表会、pp.1291-1292