

## 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～

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポート No.	受領日
Σ	J1449 93-003	1994, 4, 5
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

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ください。

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～

(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.Yamamoto<sup>1)</sup> H.Yoshioka<sup>2)</sup>

### 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～

担当者一覧

	大成建設 (株)	(株) 大林組
実施責任者	金谷 聰	村井 喜一
実施担当者	山本 卓也	吉岡 尚也
研究業務担当	杉原 豊 山本 卓也 岩野 政浩 福井 勝則 窪田 茂	吉岡 尚也 三上 哲司 畑 浩二 木梨 秀雄

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～

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 室内試験手法に関する文献調査	2
2.1 文献調査方法	2
2.2 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	3
2.3 長期挙動に関する特性	32
2.4 岩石のカイザー効果に関する基礎特性	42
3. 室内試験	51
3.1 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	51
3.1.1 共通事項	51
3.1.2 応力状態と透水係数の関係	54
3.1.3 飽和度と弾性波伝播特性の関係	92
3.1.4 応力状態と変形特性の関係	118
3.2 長期挙動に関する特性	158
3.2.1 目的	158
3.2.2 試験装置	158
3.2.3 試験方法	158
3.2.4 試験結果と考察	162
3.2.5 まとめ	184
3.3 カイザー効果の時間依存性	185
3.3.1 目的	185
3.3.2 測定装置	186
3.3.3 測定方法	190
3.3.4 測定結果と考察	194

3.3.5	まとめ	206
4.	調査結果のまとめと今後の課題	207
4.1	応力状態と透水係数の関係	207
4.2	飽和度と弾性波伝播特性の関係	208
4.3	応力状態と変形特性の関係	209
4.4	長期挙動に関する特性	210
4.5	カイザー効果に関する基礎特性	211
	参考文献	212



## 目 次

	頁
図-3.1.1.1 サンプリング試料の外観図	51
図-3.1.2.2 試料運搬方法	52
図-3.1.2.1 試験装置の構成図	55
図-3.1.2.2 試験・計測の流れ	56
図-3.1.2.3 計測機器系統図	57
図-3.1.2.4 測定原理	59
写真-3.1.2.1(1) 岩石供試体 (AK1)	65
写真-3.1.2.1(2) 岩石供試体 (BK3)	66
写真-3.1.2.1(3) 岩石供試体 (CK1)	67
写真-3.1.2.2 トランジェントパルス試験装置	68
図-3.1.2.5 透水係数と有効拘束圧の関係	72
図-3.1.2.6(a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-01)	73
図-3.1.2.6(b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-02)	74
図-3.1.2.6(c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-03)	75
図-3.1.2.6(d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-04)	76
図-3.1.2.6(e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-05)	77
図-3.1.2.7(a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-01)	78
図-3.1.2.7(b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-02)	79
図-3.1.2.7(c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-03)	80
図-3.1.2.7(d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-04)	81
図-3.1.2.7(e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-05)	82
図-3.1.2.8(a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-01)	83
図-3.1.2.8(b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-02)	84
図-3.1.2.8(c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-03)	85
図-3.1.2.8(d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-04)	86
図-3.1.2.8(e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-05)	87
図-3.1.3.1 弾性波速度測定装置	94
図-3.1.3.2 弾性波速度測定の手順	95

図-3.1.3.3	供試体内部の飽和度の分布	101
写真-3.1.3.1	弾性波速度測定用供試体の一例 (A断面)	104
写真-3.1.3.2	弾性波速度測定用供試体の一例 (B断面)	105
写真-3.1.3.3	弾性波速度測定用供試体の一例 (C断面)	106
図-3.1.3.4	波形データの一例 (試料番号APS-1,飽和状態)	107
図-3.1.3.5	飽和度と弾性波速度の関係 (A断面供試体)	108
図-3.1.3.6	飽和度と弾性波速度の関係 (B断面供試体)	109
図-3.1.3.7	飽和度と弾性波速度の関係 (C断面供試体)	110
図-3.1.3.8	飽和度とP波速度の関係 (A,B,C断面)	111
図-3.1.3.9	飽和度とS波速度の関係 (A,B,C断面)	112
図-3.1.3.10	飽和度と動ポアソン比の関係 (A,B,C断面)	113
図-3.1.3.11	飽和度と動せん断弾性係数の関係 (A,B,C断面)	114
図-3.1.3.12	飽和度と動弾性係数の関係 (A,B,C断面)	115
図-3.1.4.1	電気-機械サーボ中容量三軸試験装置	119
図-3.1.4.2	圧密打切り時間の決定法	121
図-3.1.4.3	残留強度の決め方	122
図-3.1.4.4	$\alpha = 45^\circ$ 面上の破壊応力	123
図-3.1.4.5	$C', \phi'$ の求め方	123
図-3.1.4.6	二重セルを用いた基本計測システム	124
図-3.1.4.7	ポアソン比算出法	125
図-3.1.4.8	軸差応力~ポアソン比関係概念図	126
写真-3.1.4.1	三軸圧縮試験用供試体の一例 (A断面)	136
写真-3.1.4.2	三軸圧縮試験用供試体の一例 (B断面)	137
写真-3.1.4.3	三軸圧縮試験用供試体の一例 (C断面)	138
図-3.1.4.9	三軸圧縮試験から求めた強度定数	139
図-3.1.4.10(1)	強度と拘束圧の関係 (A断面)	140
図-3.1.4.10(2)	強度と拘束圧の関係 (B断面)	141
図-3.1.4.10(3)	強度と拘束圧の関係 (C断面)	142
図-3.1.4.11(1)	初期変形係数と拘束圧の関係 (A断面)	143
図-3.1.4.11(2)	初期変形係数と拘束圧の関係 (B断面)	144
図-3.1.4.11(3)	初期変形係数と拘束圧の関係 (C断面)	145

図-3.1.4.12	除荷・再載荷時の変形係数 (A断面)	146
図-3.1.4.13	除荷・再載荷時の変形係数 (B断面)	147
図-3.1.4.14	除荷・再載荷時の変形係数 (C断面)	148
図-3.1.4.15	拘束圧とポアソン比の関係 (通常の三軸圧縮試験結果)	149
図-3.1.4.16(1)	拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験結果、A断面)	150
図-3.1.4.16(2)	拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験結果、B断面)	151
図-3.1.4.16(3)	拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸圧縮試験結果、C断面)	152
図-3.1.4.17(1)	ポアソン比と繰り返し回数の関係 (A断面)	153
図-3.1.4.17(2)	ポアソン比と繰り返し回数の関係 (B断面)	154
図-3.1.4.17(3)	ポアソン比と繰り返し回数の関係 (C断面)	155
図-3.2.2.1	5 T F 高容量三軸クリープ試験装置 (改良型)	159
図-3.2.2.2	一軸圧縮強度と弾性波速度 (P波) の関係	161
写真-3.2.4.1	クリープ試験用供試体の一例 (A断面)	167
写真-3.2.4.2	クリープ試験用供試体の一例 (B断面)	168
写真-3.2.4.3	クリープ試験用供試体の一例 (C断面)	169
図-3.2.4.1(1)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.90)	170
図-3.2.4.1(2)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.85)	171
図-3.2.4.1(3)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (A断面; 応力比0.80)	172
図-3.2.4.2(1)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.90)	173
図-3.2.4.2(2)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.85)	174
図-3.2.4.2(3)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係 (B断面; 応力比0.80)	175
図-3.2.4.3(1)	一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係	

(C断面；応力比0.90) . . . . .	176
図-3.2.4.3(2) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係	
(C断面；応力比0.85) . . . . .	177
図-3.2.4.3(3) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係	
(C断面；応力比0.80) . . . . .	178
図-3.2.4.4 クリープひずみ速度～経過時間関係 (A断面) . . . . .	179
図-3.2.4.5 クリープひずみ速度～経過時間関係 (B断面) . . . . .	180
図-3.2.4.6 クリープひずみ速度～経過時間関係 (C断面) . . . . .	181
図-3.2.4.7 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 . . . . .	182
図-3.2.4.8 最小クリープひずみ速度～クリープ応力関係 . . . . .	183
図-3.3.2.1 AE測定器の概略 . . . . .	187
図-3.3.2.2 測定装置の全体状況 . . . . .	187
図-3.3.2.3 トランスデューサの取付け状況 . . . . .	188
図-3.3.2.4 トランスデューサの周波数応答特性 . . . . .	188
図-3.3.2.5 AE信号の処理方法 . . . . .	189
図-3.3.3.1 カイザー効果の存在確認と試験条件決定の作業フロー . . . . .	192
図-3.3.3.2 クリープ試験装置 . . . . .	192
図-3.3.3.3 カイザー効果の時間依存測定の実験フロー . . . . .	193
図-3.3.3.4 初期地圧測定の実験フロー . . . . .	193
図-3.3.4.1 感度と閾値の決定のための試験結果一例 . . . . .	198
図-3.3.4.2 一定軸力載荷時における軸変位と載荷時間の関係 . . . . .	199
図-3.3.4.3 カイザー効果の時間依存測定結果の一例 . . . . .	199
図-3.3.4.4 カイザー効果の時間依存特性 . . . . .	201
図-3.3.4.5 初期地圧測定結果の一例 . . . . .	202
図-3.3.4.6 G.L.-99mの供試体 . . . . .	203
図-3.3.4.7 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 . . . . .	205

## 表 目 次

	頁
表-3.1.1.1 物理試験項目及び試験基準	53
表-3.1.1.2 トランジェントパルス装置の仕様	54
表-3.1.2.2 透水試験条件	69
表-3.1.2.3 透水試験結果 (AK1)	88
表-3.1.2.4 透水試験結果 (BK1)	89
表-3.1.2.5 透水試験結果 (CK1)	90
表-3.1.3.1 飽和度と弾性波速度一覧表	102
表-3.1.3.2 供試体の観察結果一覧	103
表-3.1.4.1(1) 三軸圧縮試験結果一覧 (A断面)	133
表-3.1.4.1(2) 三軸圧縮試験結果一覧 (B断面)	134
表-3.1.4.1(3) 三軸圧縮試験結果一覧 (C断面)	135
表-3.2.4.1 一軸クリープ試験結果 (A断面)	164
表-3.2.4.2 一軸クリープ試験結果 (B断面)	165
表-3.2.4.3 一軸クリープ試験結果 (C断面)	166
表-3.3.4.1 感度と閾値決定のための試験結果一覧	198
表-3.3.4.2 決定されたAE測定条件	198
表-3.3.4.3 カイザー効果時間依存測定結果の一覧	200
表-3.3.4.4 初期地圧測定結果の一覧	204

## 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. 室内試験手法に関する文献調査

### 2.1 文献調査方法

応力状態や飽和度などと岩盤の特性の関係を評価するための試験は、大学などの研究機関で行われているものの、試験手法が確立されているものは少ない。このため、本調査の目的に合致するような試験結果を得るためには、試験手法をよく検討して決定する必要がある。そのために、既存の試験についての文献を調査し、試験手法についての情報を収集・整理し、その結果に基づき試験手法を決定した。

文献は土質、岩盤、資源、地質の各分野での主要な雑誌、論文集等から過去15年を目安に以下のキーワードの検索により収集した。

(応力状態と透水性) : 堆積岩、軟岩、透水性

(飽和度と弾性波伝播特性) : 堆積岩、軟岩、弾性波速度

(応力状態と変形特性) : 堆積岩、軟岩、変形、変形係数

(長期挙動) : 堆積岩、軟岩、クリープ

また、対象とした雑誌、論文を以下に示す。

- ・ 土木学会論文報告集
- ・ 土木学会年次学術講演会
- ・ 土と基礎
- ・ 岩の力学国内シンポジウム
- ・ 岩盤力学に関するシンポジウム
- ・ 土と基礎
- ・ 土質工学研究発表会
- ・ 土木研究所資料
- ・ 資源・素材学会誌
- ・ 物理探鉱
- ・ Thctonophysics
- ・ Journal of Acoustic Emission

## 2.2 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 応力状態と透水性の関係の測定

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

1) 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<sup>1) 2) 4) 5) 9)</sup>。

2) 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<sup>4) 5)</sup>。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。

3) 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<sup>7)</sup>。

#### (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<sup>5) 7)</sup>。

#### (3) 得られた知見

##### 1) 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、 $10^7 \sim 10^{10}$ 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<sup>1) 2) 4)</sup>。

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<sup>2)</sup>。

##### 2) 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 $10^9\text{cm/sec}$ 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<sup>1) 2) 7)</sup>。

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<sup>8)</sup>。

#### (4) 引用文献の目的と抄録

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

##### (目的)

透水性の低い岩石を対象としてトランジェント法による透水試験を実施し、岩種による違いと拘束圧の影響を調べること。

##### (抄録)

(1) 試料：三城目安山岩、小松安山岩、稲田花崗岩の3種類。

(2) 試験手順：各岩種とも同一の岩石ブロックから同じ方向にコアを抜き、直径約5cm、長さ約10cmに整形した後、含水飽和状態とした。ゴムスリーブで覆った試料を三軸室にセットし、拘束圧を加える。その直後、初期間隙水圧を試料両端に加え、試料内部の間隙水圧が一定になるのを待つ。間隙水圧が一定になったのを確認し、一方の貯留槽に圧力パルスを与え、試験を開始する。圧力パルスは初期間隙水圧に $5\text{kg/cm}^2$ 加えるものとした。

不純物がなく気体を除去した方が試験精度が向上するため、イオン交換水を脱気したものを試験用に用いた。

(3) トランジェント法を用いた室内透水試験により、三城目安山岩、小松安山岩、稲田花崗岩の透水係数がそれぞれ $10^{-7}$ 、 $10^{-9}$ 、 $10^{-10}\text{cm/sec}$ のオーダーで測定できた。これより、トランジェント法は透水係数の小さな試料に対して有効な方法であることが確認できた。

(4) 有効応力 $120\text{kg/cm}^2$ 以下では、三城目安山岩と小松安山岩の透水係数は、拘束圧の影響をほとんど受けない。稲田花崗岩では、拘束圧の増加に伴ってわずかに透水係数が低下する傾向が見られた。

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

(目的)

同一条件下で、3種類の試験方法を用いて透水係数の測定を行い、試験方法の比較を行うこと。また、拘束圧が岩石の透水性に及ぼす影響を調べること。

(抄録)

(1) 圧力の測定精度は $\pm 0.2\text{kg/cm}^2$  (差圧計 $\pm 0.05\text{kg/cm}^2$ )、流量の測定精度が $\pm 0.8\text{cc}$ のものを使用した。

(2) 試験手順：ゴムスリーブで覆った含水飽和試料を三軸室内にセットし拘束圧を加える。その後、試料両端に等しい間隙水圧を加える。試料内部の間隙水圧が一定になるのを待って試料端に圧力差を与え、透水試験を開始する。圧力差は $5\text{kg/cm}^2$ とした。試料は、直径約 $5\text{cm}$ 、高さ約 $10\text{cm}$ の三城目安山岩。

(3) 定水位法及び2種類のトランジェント法により、三城目安山岩について $10^{-9}\text{cm/sec}$ のオーダーの透水係数が測定できた。

(4) 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その透水係数を評価できた。

(5) 定水位法と比較して、トランジェント法は透水性の低い岩石で極めて短時間に試験を行うことができる。

(6) 有効応力 $120\text{kg/cm}^2$ 以下では、三城目安山岩の透水性は拘束圧の影響をほとんど受けない。

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

(目的)

主に岩石、岩盤を対象に流れによる空隙閉塞・目詰まりの数学的モデル化に関する基本概念を導入し、既存の実測・実験結果と比較、検討して実際の現象を判断するための基礎に供したものである。

(抄録)

(1) 浸透流が生じることは、水のマスだけでなく溶質、物質の移動を意味する。このような水が土や岩の微小空隙中を流動、浸透すると、長期的には空隙中に浮遊物が閉塞・拘留され、溶解質の付着・吸着も生じる。この原因によって浸透流速は徐々に減少し、流量は低減する。

(2) 目詰まりの原因には、①懸濁物質、②生物、③気泡、④化学反応等がある。目詰まりの機構に対する詳細な現象理解は容易ではなく、さらに定量評価には相当な基礎研究の積重ねが必要である。

(3) 目詰まりや濁質閉塞の水理メカニズムを、濁質閉塞、濁質拘留、表面ろ層形成の3つの形式に分けて考えた。その結果、表面ろ層の場合は、空隙閉塞・拘留とは目詰まり機構が本質的に異なること、拘留の式の方が初期において閉塞の場合よりも流量低下率が大きい、恒常流に近づくと逆に小さくなること、閉塞モデルでは初期低下率は拘留の場合よりも大きい、恒常流量に比較的早期に至ることが分かった。

(4) 目詰まり基本式の支配パラメータである閉塞係数は表面ろ層の場合を除き、 $K_b=0.2\sim 20$ 程度の値を持ち、岩石では大きく、砂では小さい値を持つ傾向がある。

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

(目的)

難透水性岩石の室内透水試験方法について再検討し、これより求められる透水係数の精度を吟味すること。また、試験装置の設計及び試験の実施や試験結果の整理に際して注意すべき事項とその解決方法を示すこと。

(抄録)

(1) 定水位法では、透水係数が低くなると試験時間が長くなるため、 $10^8$ cm/secオーダー程度までが現実的な測定限界となる。

(2) 試験装置の適用に際しては、側面流、透過水量の測定精度および室温変化に伴う試験水の体積変化、漏洩、蒸発等についての検討を必要とする。特に、室温変化に伴う試験水の体積変化については、注意を払わねばならない。

(3) トランジェントパルス法は、本来 $10^{10}$ cm/secオーダー以下の難透水性岩石を対象とした方法であるが、測定範囲を $10^7$ cm/sec程度まで拡大する場合には、解析モデルに起因する誤差、および貯留槽の容積等について十分な事前検討が必要である。

(4) トランジェントパルス法は計測系を閉鎖し、供試体両端に設置した貯留槽の圧力の変動を記録することにより透水係数を求めるため、定水位法以上に温度変化の影響が顕著となる。このため、室温変化に伴う間隙圧力の変動が及ぼす透水係数の評価への影響を最小限にとどめる必要のあることを実験的に検証し、その改善策を示した。

(5) これまでの検討により、本研究で用いた試験装置では以下に示す測定範囲と測定精度が得られた。

測定方法：定水位法およびトランジェントパルス法 (Braceらの方法)

測定範囲：透水係数  $1.5 \times 10^{-4} \sim 3.7 \times 10^{-12}$ cm/sec

測定精度：±10%以内

(6) 実際に、三城目安山岩、土岐花崗岩をサンプルとして、2つの試験方法の妥当性を検証し、定水位法およびトランジェントパルス法でほぼ等しい透水係数の値を得た。

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

(目的)

難透水性岩盤の透水係数をトランジェントパルス法を用いて測定する場合の問題点を検討する。

(抄録)

(1) トランジェントパルス法では、圧力測定により透水係数を求める。圧力を測定する方が透水量を測定するよりも、測定精度がはるかによい。

(2) 圧力測定の場合は、圧力に直接影響を与える因子としてリークや温度の変化に注意しなければならないが、工夫次第でかなりの精度を達成できる。

(3) Walder and Nur(1986)によれば、ダルシー則を成立させるには、パルス圧を設定間隙水圧の10%以下にしなければならない。

(4) 杉本ら (1985) によれば、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。しかしながら、厳密解では計算が複雑で試行錯誤が必要であり、時間がかかるためBraceらの方法は依然として有効である。

(5) 筆者らは孔隙率1%以下の岩石を用いて実験し、1週間程度の期間では試験体の側面を水が流れないことを確認した。

(6) 孔隙率が30%以上の泥岩を用い、測定前の真空処理の有無が圧力減衰曲線に与える影響を調べた。孔隙率の大きい岩石の透水係数を測定する場合は、必ず真空処理が必要なことが明らかとなった。

(7) 室温の影響は、

1) 試験装置全体を恒温槽の中に入れ、温度を一定に制御する

2) 温度変化はあるものとして、両貯留層の圧力差に温度の影響が入らないようにするのいずれかの方法でキャンセルできる。1)の方法は現実的には不可能である。2)の方法としては、両貯留槽の配置を完全に同一にしかも同じ容量になるように配管を工夫し、さらに両貯留槽を水タンク内にセットすることで温度の影響を精度よくキャンセルすることができる。

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

(目的)

岩石の透水性に及ぼす温度及び圧力の効果を調べること。

(抄録)

(1) 供試体は白河凝灰質砂岩(空隙率18%)及び三城目安山岩(空隙率15.2%)である。高温高圧三軸試験装置を用いた。

(2) 試験では、先ず封圧を加えてから、圧気により水タンクに $6\text{kg/cm}^2$ の圧力を、二重管ピュレットに背圧として $1\text{kg/cm}^2$ の圧力を加え、水圧差 $5\text{kg/cm}^2$ として透水させた。透水係数は、流出水量3cc以上の平均値として計算した。

(3) 今回の実験では温度の異なる場合の岩石固有の透水性の変化を調べることを目的としているため、温度による水の粘性効果は除外すべきである。したがって、透水係数は $L^2$ の次元を持つdarcyでまとめた。

(4) 封圧 $20\text{kg/cm}^2$ 時の温度と透水係数の関係について、両岩種とも $20\sim 90^\circ\text{C}$ の範囲で温度による透水係数の変化はほとんどない。

(5) 封圧と透水係数の関係について、両岩種とも封圧の増加に伴い透水係数が小さくなる傾向がある。この傾向は、常温と $90^\circ\text{C}$ で特に有意な差は見られない。また、透水係数の変化はせいぜい $1/2$ であり、比較的小さい。

7) 杉本文男、松木浩二、遠藤 修 (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

(目的)

透水係数に及ぼす封圧及び圧力勾配の影響を検討すること。また、岩石の空隙率および圧縮率を考慮した透水係数を求め、Braceの方法との比較を行った。

(抄録)

(1) 試験条件

岩石試料：来待砂岩(25.4)、和泉砂岩(6.3)、荻野凝灰岩(29.5)、東北大理石(0.8)、秋吉大理石(0.8)、稲田花崗岩(0.6)。( )内は有効空隙率。

封圧：50及び100kg/cm<sup>2</sup>、試験片両端の圧力差 $\Delta P$ ：10,30,50kg/cm<sup>2</sup>、試料は水中に4週間以上浸潤し飽和させた。

(2) 測定は、 $\Delta P$ が2~3kg/cm<sup>2</sup>となるまで、または測定時間が10<sup>4</sup>secとなるまで行った。その後、 $\Delta P$ の収束値 $P_f$ を変化させて指数回帰を行い、相関係数が最もよい値となる $P_f$ から透水係数を算定した。

(3) 初期圧力状態はほぼ静水圧であるが、封圧用流体の試験片内への流入を防ぐために、封圧を $\Delta P$ を与える前の初期圧より5kg/cm<sup>2</sup>ほど低くした。

(4) 岩石試料の透水係数の大きさに応じて、上側タンク圧力 $P_1$ と下側タンク圧力 $P_2$ の変化の仕方が異なる。透水係数が小さい試料は圧力変化が小さく、10<sup>4</sup>secの測定後において依然として $P_1$ と $P_2$ の差が大きい。一方、透水係数の大きいものは、圧力変化が大きく、測定時間が短い。

(5) 透水係数に及ぼす $\Delta P$ の影響は、透水係数が10<sup>9</sup>cm/secより大きい場合に顕著であり、 $\Delta P$ が大きいほど透水係数が大きくなる傾向がある。一方、透水係数が10<sup>9</sup>cm/secより小さい場合には、 $\Delta P$ による透水係数への顕著な影響は見出せない。

(6) 封圧の影響は来待砂岩や稲田花崗岩において見られ、封圧の増加により透水係数が小さくなる傾向がある。透水係数が10<sup>9</sup>cm/secより小さい場合には、封圧による大きな影響は認められない。

(7) 透水係数と封圧の関係、透水係数と間隙水圧の関係を求める場合には、現場の応力状態に対応した圧力条件を設定することが重要である。

(8) Braceらが無視した岩石の空隙率及び圧縮率を考慮した場合の透水係数と、



Braceらの式から算定した透水係数との比較を行った結果、球状空隙を有する岩石では、Braceの式によれば透水係数が過小評価されることが考えられる。

8) 杉本文男、古住光正 (1989) : トランジェントパルス法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

(目的)

異なる方法 (BraceらとHsiehらの方法) で求めた透水係数の値について検討すること。

さらに、封圧と間隙水圧とが透水係数の評価に与える影響、及び封圧下において軸圧が透水係数の評価に与える影響を検討すること。

(抄録)

(1) 試料は比較的孔隙の多い来待砂岩を用いた。

(2) 岩石の孔隙を無視して透水係数を求めると、透水係数の値が過小評価されることが実験的に確かめられた。また、試験片両端の差圧および間隙水圧が大きいと、透水係数の値も大きくなる傾向が見られた。

(3) 間隙水圧が一定の場合、封圧の増加とともに透水係数の値は減少し、同一封圧では間隙水圧の増加とともに透水係数の値は増加する。また、封圧より間隙水圧の増加が透水係数に大きな影響を及ぼすことが認められた。

(4) 1個の岩石試験片から透水係数に関する多くのデータを得る方法として、所定封圧下で間隙水圧を変えて試験を行った後、封圧を増加し、同様に間隙水圧を変えて試験を行った。しかしながら、間隙水圧の履歴が透水係数に影響する場合もあり、注意が必要である。

(5) 封圧下において、軸応力の増加とともに透水係数の値は小さくなるが、さらに軸応力が増すと、透水係数の値が大きくなる傾向が見られた。

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

(目的)

従来の室内透水試験方法について問題となる点の吟味を行い、考えられる改良方法を示すこと。また、低透水性材料の透水試験方法について検討し、従来の方法の改良点や妥当性を明らかにすること。

(抄録)

(1) 岩の室内透水試験について

1) 定水位透水試験や変水位透水試験では、透水係数の測定にきわめて長い時間を要するためパルス試験法が有効である。この方法はきわめて簡単な方法である。

2) 実験上の注意点としては、水の流れる系の中の気泡を完全に取り除くことである。また、この方法はあくまで岩のように変形しにくい物質に対し適用できる。

(2) 粘土の透水試験について

1) 粘性土ではその圧縮性が大きいことにより、圧力の伝播遅れが生じるためその影響を考慮する必要がある。

2) 粘土は小さな載荷重によってでも体積変化を生じるので、どの状態の間隙比に対応した透水係数であるかを測定しなければならない。

## 2.2.2 飽和度と弾性波速度の関係

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

- 1) 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<sup>7)</sup>。
- 2) 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<sup>2) 7)</sup>。
- 3) 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<sup>3) 4) 7)</sup>。
- 4) 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<sup>3)</sup>。

### (2) 結果の評価方法

- 1) 弾性波速度（P波、S波）は、供試体の長さで弾性波の透過時間から求める<sup>7)</sup>。
- 2) 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<sup>7)</sup>。

### (3) 得られた知見

- 1) 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<sup>1) 6)</sup>。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<sup>1)</sup>。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<sup>6)</sup>。
- 2) 飽和度の変化に伴う力学的特性の変化は非可逆的変化であり、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<sup>1)</sup>。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<sup>4)</sup>。

3) 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<sup>9)</sup>。

#### (4) 引用文献の目的と抄録

1) 小島圭二 (1972) : 東京湾口の地盤、土木研究所資料、第730号、P.32

##### (目的)

泥岩の飽和度の変化に伴う物性 (P波速度、S波速度、一軸圧縮強度等) の変化を調べること。

##### (抄録)

(1) 試料：逗子泥岩。

(2) 飽和度が増加すると、P波速度は一旦減少し、飽和度50~60%辺りから増加する。また、飽和度が増加すると、S波速度は減少する。

(3) 飽和度の変化による力学的特性の変化は、単に間隙中に占める水の割合だけでなく、飽和度の低下に伴い岩石中に発生するサクシヨンの作用がある。

飽和度の減少に伴う強度とS波速度の増大は主としてサクシヨンによる変化である。また、飽和度の増加に伴うP波速度の増加は水の割合による現象である。

(4) 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などの粘土鉱物の多い岩石はスレーキングで性質が劣化するのが普通である。

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

(目的)

通常の三軸圧縮試験用のセル内エンドキャップ中にP波及びS波用振動子を組み込むことにより、簡便に種々の応力条件の下で弾性波速度を測定した。測定システムの紹介と弾性波速度の拘束圧依存性について検討することを目的とする。

(抄録)

(1) 試料：北松砂岩、和泉砂岩、多孔質凝灰岩、珪藻質泥岩、北木花崗岩、日南石灰岩。

(2) 拘束圧： $0.5\text{kg/cm}^2$ 。試料は、直径50mm、高さ100mm、端面精度1/100mm以上に成形後、真空脱気後4日間以上水浸させた（以後この飽和供試体で試験を行った）。

(3) 岩石の弾性波速度に及ぼす圧力効果を検討する場合、鉱物組成、粒子配列と結合状態、間隙の割合、節理の頻度及び含有水分量などの内的要素が重要な指標となる。

(4) 供試体は排水用ナイロンメッシュで巻いた後、所定の側圧で等方載荷し、圧密終了を待って非排水条件下で弾性波速度を測定した。

(5) 拘束圧は $0.5\sim 30\text{kg/cm}^2$ の7段階である。側圧段階は $0.5\text{kg/cm}^2$ から $30\text{kg/cm}^2$ までの増圧、および $30\text{kg/cm}^2$ から $0.5\text{kg/cm}^2$ までの減圧の2過程である。

(6) 供試体の高さの圧密による変化の最大値は0.3mm程度（珪藻質泥岩）であったため、速度値は初期高さをを用いて算出した。

(7) P波速度、S波速度の拘束圧依存性は、今回試験を実施したすべての試料で見られた。特に、拘束圧の増加に伴うS波速度の増加が顕著である。

(8) 動ポアソン比 $\nu_d$ は拘束圧の増加とともに減少し、高圧になるほど岩種固有の値に収束する傾向にある。

(9) 剛性率 $G$ は拘束圧の増加に伴って増加する傾向がある。両者の関係を表す実験式中の定数は有効間隙率と対応しているので、剛性率 $G$ は有効間隙率との関係で説明できる可能性がある。

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

(目的)

弾性波速度を拘束圧下で測定するための装置の開発に至るまでの検討結果を示し、拘束圧が弾性波速度に及ぼす影響、および原位置での速度と比較することを目的としたものである。

(抄録)

(1) 試料：泥岩、凝灰岩、片岩、風化安山岩、変質安山岩、安山岩。

(2) 供試体を透過したS波の卓越周波数は、発振子として用いた圧電素子の共振周波数とは異なり、概して低くなっている。

(3) 用いる振動子の種類や供試体との接着方法について検討した結果、泥岩の速度測定については、振動子として環状S型が適しており、実効周波数は50kHz～100kHz程度が適当である。

(4) 供試体と振動子の接触状況の変化による見かけの速度変化を防ぐため、拘束圧下での測定にあたっては、両者を適当な接着剤で接着する必要がある。

(5) 軟岩を中心とする様々な種類の岩石では、弾性波速度に対する拘束圧の影響について以下のような結果が得られた。

1) 拘束圧の増加にともないP波速度、S波速度は増加する。

2) 速度の増加率は、拘束圧が10～20kg/cm<sup>2</sup>以下の範囲で特に著しい。

3) 軟岩等では、無拘束時の供試体の速度が原位置の速度より小さいことがしばしば経験されるが、これは応力解放の影響と考えられる。



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/92 1056、pp.73-78

(目的)

クラックモデル説を基礎に、石英閃緑岩の含水による弾性波速度の増加を定量的に説明する目的で行ったもの。

(抄録)

(1) 試料：石英閃緑岩（茨城県水沼ダム付近産）。有効空隙率：0.35～4.2%のいわゆる新鮮な状態からやや風化の進んだ状態のもの。寸法：直径3.4cm、長さ7cm。特長：鉱物粒子境界や粒子内裂開等、クラック状と考えられる空隙が顕著である。

(2) P波速度の測定：パルス透過法、振動子：直径3cm、厚さ0.5cm、共振周波数200kHzの円板型チタン酸バリウム磁器で、供試体両端面に一定圧力で密着させた。

(3) 石英閃緑岩では、含水過程および乾燥過程でのP波速度のヒステリシス現象は見いだされることが明らかにされているため、ここでは飽和状態から乾燥状態に至る乾燥過程でP波速度の変化を調べた。

(4) 石英閃緑岩の含水によるP波速度の変化について、クラックモデル説による検討を行った結果、以下のような知見が得られた。

1) 新鮮ないしやや風化が進んだ石英閃緑岩の含水による速度変化量は、ペニー型マイクロクラックを持つWalshの岩石モデルを基礎に考究することにより、定量的な説明が可能である。

2) 計算結果は、新鮮ないしやや風化が進んだ石英閃緑岩において、クラック状と考えられる空隙が顕著に存在するという観察結果と適合する。

3) 水分飽和度の変化に伴うP波速度の変化は、乾燥状態と飽和状態の体積弾性率および剛性率の調和平均を用いることで説明が可能である。

5) 齊藤徳美、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

(目的)

岩石組織及び組成の異なる4種類の火成岩を対象に、風化による空隙組織の変化が弾性波速度に及ぼす影響を明らかにすること。

(抄録)

(1) 試料：石英閃緑岩、安山岩、玄武岩、石英安山岩の4種類。

寸法：直径34mm、長さ約70mmの円柱形、コア抜きが困難なものは1辺約150mmの立方体。

(2) 弾性波速度の測定：振動子（直径3cm、厚さ0.5cm、共振周波数200kHzの円板型チタン酸バリウム磁器）を供試体の両端面に密着させて測定した。

(3) 構成鉱物の破壊・変質過程の究明は主として顕微鏡観察およびX線粉末回折によって行い、補助的に示差熱分析を行った。構成鉱物の破壊・変質に伴う空隙組織の変化は、ニグロシン水溶液で着色した薄片の顕微鏡観察により検討した。

(4) 風化に伴うP波速度の変化および含有水分によるP波速度の変化の仕方は、2次的空隙の量とともに空隙の位置や形状に強く依存する。

(5) 深成岩である石英閃緑岩では、主として鉱物粒子間や粒子内部の裂開などクラックの増加・拡大および粒子内部の変質により空隙が増加する。一方、火山岩である安山岩・玄武岩・石英安山岩では、石基の微細鉱物およびガラスの変質により空隙が増加する。

(6) クラックの増加は有効空隙率の増加としてはわずかであるが、石基の変質に起因する空隙よりも急激なP波速度の低下をもたらすものと考えられる。それゆえ、有効空隙率の増加に伴うP波速度の減少は3種類の火山岩より石英閃緑岩で著しい。

(7) クラックに含まれる水分は、石基の変質部に含まれる水分よりもP波速度により大きな影響を及ぼすものと考えられる。そのため、含有水分によるP波速度の変化は3種類の火山岩よりも石英閃緑岩で著しい。

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

#### (目的)

岩石供試体の弾性波速度およびそれらより計算した弾性定数が含水状態の変化によりどのように変化するのか、また、岩石の種類によりその変化に差異があるのかについて検討すること。

#### (抄録)

(1) 岩石試料：熊本県天草産細粒～粗粒砂岩（古第三紀）、グリーンタフ、阿蘇溶結凝灰岩、角閃輝石安山岩および玄武岩。

寸法：円柱供試体（直径5cm、高さは直径の3倍程度）、角柱供試体（一辺5cm、高さは一辺の4～5倍）。

(2) 弾性波速度の測定方法：超音波パルス法および共振法を用いた。S波の測定はP波の測定に比べてかなり精度が低いため、本実験ではP波速度を測定した。

S波の速度については、角柱供試体を使用し、共振法によりねじれ振動から求めた。

(3) 供試体の準備：供試体を1ヶ月以上水中放置し、重量の変化がほとんどなくなったときを飽和含水状態とした。本実験では、飽和含水状態から乾燥させる方向で含水状態を変化させ、弾性波速度の変化を測定した。最後は100～105℃の温度で炉乾燥した。

#### (4) 実験結果および考察

1) 含水状態と弾性波速度の関係：第三紀砂岩では、ある飽和度で最低値を示し、それよりさらに乾燥してもあるいは含水を増加させても速度は増加する。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。

2) 測定方法の違いが測定結果に与える影響：パルス法により求められる弾性波速度と、共振法により求められる弾性波速度は異なる。

3) 風化の程度と弾性波速度の関係：同一の粗粒砂岩層において、風化の程度が異なる試料についてパルス法による縦波伝播速度の測定を行った。風化が進むほど、飽和度の変化に対する速度変化が著しい。

4) 弾性定数と飽和度の関係：ポアソン比と体積弾性率は飽和含水に近づくと大きくなり、剛性率はほとんど一定となる。

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

(目的)

岩石の弾性波速度を測定するための方法や測定にあたっての留意事項を明らかにすること。

(抄録)

(1) 岩石の速度に影響を与える要因は間隙の割合や含水の程度など多くあるが、軟質になるほど影響を受けやすい。軟質な岩石の弾性波速度試験を実施するにあたっては、含水状態の変化、拘束圧の影響を十分に考慮しなければならない。

(2) 含水状態の変化が速度に及ぼす影響を測定する際、一つの供試体の含水比を様々に変え、速度の変化を測定する場合には、特に次の点に留意しなければならない。

1) 供試体内部の含水状態

湿潤した供試体を風乾させる場合、表面に比べ中心部には含水比の高い部分が残るため、含水比と速度のおおのにおおに差が生じる。これを避けるため、供試体をラップ材で包んだり、恒温槽に入れて長時間放置し、含水比の均一化を図る必要がある。

2) 供試体と振動子の接触状態

接触状況が速度に影響を与えることがあるので、供試体と振動子を適切な接着剤で固定したまま含水比を変化させることが必要である。

### 2.2.3 応力状態と変形特性の関係の測定

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

- 1) 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<sup>1) 4) 5)</sup>。
- 2) 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<sup>3) 4) 5)</sup>。

#### (2) 結果の評価方法

- 1) 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<sup>1) 3) 4) 5)</sup>。
- 2) 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<sup>2)</sup>。

#### (3) 得られた知見

- 1) 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<sup>1) 4) 5)</sup>。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。
- 2) 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<sup>5)</sup>。
- 3) 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<sup>4) 5)</sup>。

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

(目的)

排水条件が異なる場合の堆積軟岩の強度定数の違いを検討すること。

(抄録)

(1) 三軸圧縮試験での試験条件

供試体：多孔質凝灰岩（通称船生石）。水中で十分に真空脱気し、4日以上水浸させた。

寸法：直径5cm、高さ10cm。

排水条件：せん断時 $\overline{CU}$ , $UU$ , $UU'$  ( $UU'$ はセット後メンブレンと試料間及び給排水経路中の余分な空気を除き、非圧密非排水でせん断するもの)

有効拘束圧：2.5,5,10,20kg/cm<sup>2</sup>

背圧：8kg/cm<sup>2</sup> ( $\overline{CU}$ , $UU'$ に対し)

ひずみ速度： $\epsilon = 0.1\%/min$

(2) 以上の試験とは別に、B値と飽和度の関係を調べるため、等方応力一定のもとで0~8kg/cm<sup>2</sup>の各背圧段階でB値を測定した。B値は、間隙率、固体相・液体相および個々の固体相が形成する骨格構造の各圧縮率等に関係する係数で、 $B \geq 0.95$ の場合に完全飽和状態がほぼ満足されている。

飽和度は背圧増加による試料への流入水量から、河野らの式を用いて算出した。その結果、飽和度の上昇でB値は増加するが、両者に線形関係はなく、飽和度99.8%程度からB値は急増し、完全飽和時でB値は0.56と低いことが分かった。

(3) 飽和軟岩の非排水時の強度定数を三軸圧縮試験により求める場合には、事前に試料、給排水経路中の気泡を十分に脱気しないと非排水条件は厳密には守れない。

(4) 十分に飽和しても $\overline{CU}$ 試験で大きい体積膨張をしようとする、すなわち負圧を発生する過圧密比の大きい軟岩ではせん断時に不飽和となり、得られる強度定数は体積変化を許した排水強度とみなす方がよい。

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

(目的)

ボアホールジャッキタイプの試験機 (KKT) を用いた孔内載荷試験による測定値と、岩石・岩盤から得られる多くの測定値との相関性を多変量解析により求めることを目的とする。

(抄録)

(1) 対象：新第三紀の堆積岩及び花崗岩類で、4地区、64個のデータを対象。

(2) 調査項目：RQD、吸水率、一軸圧縮強度、静弾性係数、動弾性係数、変形係数 (KKT)、弾性係数 (PS検層) の7項目。

(3) 調査項目の多変量解析：各種データの主成分分析の結果、調査項目の持つ情報を2～3個の総合指標に要約して表した。その結果、以下の事項が示された。

1) 第1、第2主成分を軸としたデータの散布図から、調査地区、構成粒子でのグルーピングが可能であること

2) 調査項目間の位置付けを示すため、1つの地区を対象に上記と同じ軸で散布図を作成したところ、孔内載荷試験と岩石力学試験が同一のグループに属し、両者の間には良好な相関があることが分かった。

(4) 調査項目間の相関性：全般に各種測定法から求めた変形特性、強度特性の間には、地域による差異があるが良好な相関が認められる。しかし、これらと岩石の吸水率やRQDとの相関は低い。

(5) これまでに大きなばらつきを持つとされたデータでも、粒子の大きさや構造の異方性を定量化し、総合的に分析すれば、高い精度で岩盤の物性値を推定できる可能性を見出すことができた。



3) 田中莊一、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

(目的)

軟岩の変形特性を検討するため、2重セル構造の三軸室を開発した。この試験装置を用いたポアソン比の適切な測定方法を検討することを目的とする。

(抄録)

(1) 軟岩のポアソン比測定の基本的条件

- 1) 微小な変形量に追従できる精度の良い検出機構
- 2) ひずみゲージ等による点測定でなく、供試体の体積変化に基づく平均値処理
- 3) 緩急の載荷速度においても測定ができ、試験時の変化を把握できる連続自動記録化

以上の条件を満足する測定手法として、非接触型変位計と浮体との組み合わせにより、2重セル内の供試体の体積変化量を連続測定し、ポアソン比を算定した。

(2) 2重セル構造三軸室の説明：供試体の体積変化量およびキャップの貫入量は非接触型変位計により検出される。

再々の実験の結果、内筒の有効断面積として $20\text{cm}^2$ 弱とし、変位計は測定変位 $4\text{mm}$ 、 $1\mu\text{m}$ の分解能を有するものとした。また、信頼しうるデータを得るため、浮体の形状や寸法の改良、活性剤使用による表面張力の影響の除去、脱気水使用による内筒内の液体自身の圧縮変形の低減化等の測定方法の改善を行った。

(3) 軟岩への適用例：第三紀の均質な海成泥岩を用い、非排水条件下、側圧 $6\text{kg/cm}^2$ で、ピーク強度に至るまでの各応力レベルでのポアソン比を測定した。その結果、ポアソン比は応力レベルによって変化し、ダイラタンシーによると考えられるポアソン比の増加が、降伏前の比較的早い段階から顕著に現れた。

比較のため、ひずみゲージ法によるポアソン比を測定したが、その値は全体に低く、全応力レベルに亘る追従性に欠けることが分かった。

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

(目的)

軟岩のポアソン比を評価するため、新たな2重セル型三軸室を開発し、比較的均質な堆積軟岩に適用することにより、種々の試験条件下での測定を行った。軟岩のポアソン比の適切な評価方法を検討することを目的とする。

(抄録)

(1) 2重セル型三軸室の概要:

1) 微小な変化量に十分追従できる精度を有し、試験時の変化状態を連続的に計測できる体積変化検出機構として、非接触型変位計と浮体とを組み合わせた機構を採用した。

2) 軟岩の力学特性を検討するにも有効応力的な取り扱いが有効であることから、間隙水の挙動を厳密に把握する必要から背圧負荷機構を持つ。

3) 拘束圧の最大値は、低容量の三軸室が $10\text{kg/cm}^2$ で、高容量の三軸室が $100\text{kg/cm}^2$ である。前者は開放型内筒方式を、後者は密閉型内筒方式を採用している。

(2) 測定法の検討

1) 体積変化量の計測: 水位変動量の検出には非接触型変位計を用いた。変位計は測定変位 $4\text{mm}$ 、 $1\mu\text{m}$ の分解能を有するものとした。

2) メンブレンの検討: 軟岩の微小な体積変化を正確に測定するには、メンブレン自身の吸水などによる体積変化の影響を排除する必要がある。そこで、5種類のメンブレンについて時間の経過に伴う吸水性を測定し、最も吸水量の小さい材質のメンブレンを採用した。

3) ラバーサンプルによる測定系の検討: ポアソン比がほぼ0.5と推定されるラバーサンプルを用いて予備検討を行った結果、全応力レベルにわたり約0.49程度の一定値を示し、測定系と測定方法の妥当性を確認できた。

(3) 軟岩への適用例: 均質な第三紀シルト岩を対象とし、UU、 $\overline{\text{CU}}$ 、CDの各試験条件で三軸試験を行った。せん断時には、背圧をかけて飽和状態での試験に つとめ、排水経路は側面排水を採用した。以下にポアソン比測定結果を示す。

1) 応力比 ( $\sigma/\sigma_{max}$ ) が小さなところでは、ポアソン比は大きな値となり、次に応力比が大きくなるにつれポアソン比が一定のフラットな部分が現われ、その後次第に大きくなる傾向がある。

2)  $\overline{CU}$ とCDの試験条件による相違：CD試験では $\nu=0.17$ 付近で直線部が見られ、排水量から求めたポアソン比と良い相関がある。 $\overline{CU}$ 試験ではすべての点で0.4以上となっている。UU試験での値は $\overline{CU}$ とCD両試験結果の間に分布する。

3) 拘束圧依存性：ポアソン比は、一軸強度の1/2の応力レベルにおけるフラットな部分をもって採用した。CD試験では、他の試験条件の結果と比べてかなり低い値を示す。 $\overline{CU}$ 試験では、CD試験とは対照的にかなり大きな値を示す。ポアソン比に与える側圧の影響は、各試験条件ともほとんど見られない。

(4) 以上のように、ポアソン比の値は試験条件によってかなり差が出てくることから、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。

5) 西田和範、大西 昇、板橋利昭 (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

(目的)

軟岩の強度・変形特性について詳細に検討するため、構成粒子の異なる5種類の軟岩及び固結土を試験試料として、種々の拘束圧下で三軸試験を行った。このうち、軟岩の変形特性、特にその拘束圧依存性について検討することを目的とする。

(抄録)

(1) 試験装置：三軸圧縮試験装置（最大軸荷重5tonf、最大拘束圧100kg/cm<sup>2</sup>）。2重セル構造の高圧体積変化計を有する。

(2) 試験条件：供試体は直径5cm、高さ10cmで、拘束圧は0.5～90kg/cm<sup>2</sup>の範囲。ひずみ速度は、CD条件では0.001～0.002%/min、CU条件では0.01%/min、UU条件では0.1%/minとした。

(3) 試料の基本的物性：5種類の試料のうち、4つは第三紀の堆積岩で、1つは洪積世の固結土である。

(4) 試験結果のまとめ

1) 泥岩、固結シルトで線形的な変形挙動を示す拘束圧レベルでは、変形係数、初期変形係数ともに拘束圧依存性はCD条件よりもCU条件の方が顕著である。また、両条件とも、ある拘束圧レベルで非線形的な変形挙動が顕著となる。この時の $\sigma_3/P_c$  ( $\sigma_3$ は拘束圧、 $P_c$ は圧密降伏応力) の値は、CU条件で0.4前後、CD条件で0.1～0.2程度とCU条件の方が大きい。

2) 泥岩のUU条件による初期変形係数の拘束圧依存性はCU条件ほど顕著ではなく、CD条件と同程度である。また、CU条件とCD条件で顕著に認められた非線形的な変形挙動がそれ程顕著ではない点が特徴的である。

3) 今回の拘束圧レベルの範囲では、砂岩の変形係数の拘束圧依存性は、泥岩、固結シルトよりも顕著である。また、CU条件でもCD条件でも泥岩よりも低い拘束圧レベルから非線形的な変形挙動を示す傾向が認められる。

4) ポアソン比には、いずれ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し、CD、UU、CU条件の順に大きくなることが確認された。

## 2.3 長期挙動に関する特性

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<sup>1)</sup>。
- 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<sup>1)</sup>。
- 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<sup>1)</sup>。温度の調整は熱応力の発生が少ないように、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<sup>1)</sup>。
- 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<sup>4)</sup>。

### (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<sup>2) 3) 4) 6)</sup>。

### (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<sup>2) 5)</sup>。
- 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<sup>2) 4)</sup>。
- 3) 大谷石の一軸クリープ試験の結果<sup>3)</sup>
  - ①所定の応力載荷後、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。

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

(目的)

現象論的な立場から岩石のクリープについて述べたもの。対象は比較的強固な岩石とする。

(抄録)

試験方法に関する記述を以下にまとめて示す。

(1) 試験機：おおまかに分ければ、重錘式、ばね式、空圧式、油圧式がある。油圧式はさらに、気体圧増圧式、アキュムレータ式、サーボ制御式に分類できる。

(2) 試験片の形状、整形方法：一軸圧縮クリープ試験の場合、一軸圧縮強度試験に準じて行われることが多く、円柱試験片で長さLと直径の比Dが2程度を使用するのが普通である。

(3) 変位の計測：一軸圧縮クリープ試験の場合、クリープ開始時点よりひずみ速度が最小となるまでのクリープひずみは数 $10^{-4}$ から $10^{-3}$ 程度である。したがって、 $1\mu\text{m}$ 程度の分解能が必要で、これは高さ100mmの試験片で $10^{-5}$ のひずみに相当する。ひずみ(変位)の測定は試験片の両側(対辺)で測るのが望ましい。試験片にひずみゲージを貼りつければ精度良く測定できるが、ひずみゲージの測定値の信頼できるのは1次クリープの段階までである。

(4) 試験室の環境：岩石の線膨張係数は $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 程度とかなり大きいので温度の管理は重要である。また、湿度の変化も影響を及ぼす。試験室はできれば空調をすることが望ましい。温度や湿度の設定範囲は、実験の目的により異なるが、常識的な範囲は、温度 15~25 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 40~70%であろう。

(5) 計測結果の収録：計測結果を計算機に直接収録するのがよい。載荷装置の応答速度等を考えると、サンプリング速度は1 s程度で十分である。筆者は、変位の計測結果がある値をとった最終時刻のみを記録している。この方法は、3次クリープ領域のひずみないしひずみ速度を計測する場合に有効である。

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.521-526

### (目的)

4種類の試料を用いたクリープ試験を行い、三次クリープにおいて、ひずみ速度と残存寿命との間に簡単な法則があるかどうかを検討することが本研究の目的である。

### (抄録)

(1) 試料：多胡砂岩、セメントモルタル、中粒秋芳大理石および稲田花崗岩。寸法：直径2.4cm、高さ5.2cmの円柱形。試験片の両端面は平行度 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内に仕上げ、整形後1ヶ月以上自然乾燥させてから使用した。

(2) 試験装置：試験片には1s以内に所定の応力が加わる。稲田花崗岩については、デジタル制御方式のサーボ試験機を用いた。クリープ試験の載荷時には、ひずみ速度一定 ( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ) で設定荷重まで載荷を行い、その後、荷重を一定としてクリープ試験を実施した。

### (3) 試験結果

1) すべての試料において、一次クリープ領域では、クリープ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) 三次クリープ領域でのひずみの変化を詳しく議論するため、残存寿命 (=破壊寿命 - 試験開始時からの経過時間) という概念を導入した。三次クリープ領域では、寿命、岩種に関係なく残存寿命とひずみ速度は両対数グラフ上で傾きがほぼ-1の直線となった。

3) ひずみ速度と残存寿命の関係式を利用して、ひずみ速度から破壊までの時間を計算できる。しかしながら、実際の岩盤では、応力状態、含水率、温度等の条件が複雑に絡み合っており、このような条件下においても上記の結果が成り立つかどうかを今後調べていく必要がある。



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

(目的)

流紋岩質緑色凝灰岩 (通称、大谷石) の採取場跡地の地下空洞に存在する残柱に着目し、残柱の破壊が地下空洞の破壊に与える影響を、大谷石のクリープ破壊に関する実験により検討することを目的とする。

(抄録)

(1) 試料：地表面下115-120mの深さから採取した大谷石をコアカッターで  $\phi 50 \times h100$ mmの円柱形に整形した後、試験直前まで終始水中で保存した。実験中も水槽内に設置して飽和状態を保つように注意した。これは、乾燥が大谷石の固結度を低下させ、破壊強度の低下を引き起こすためである。

(2) 試験条件：一軸圧縮試験から求めた破壊強度  $q_u$  を利用して、応力比  $\eta$  を0.7, 0.8, 0.9と変化させて破壊に至るまでの経過時間の違いを調べた。所定の応力までは1分間で載荷した。

(3) 実験装置：一軸圧縮試験は変位制御方式 (載荷速度0.05%/min) と応力制御方式 (7.0kg/cm<sup>2</sup>/min) の2種類。クリープ試験では、載荷は空気圧を利用したエアシリンダーにより行った。実験結果の測定はコンピュータを利用し、一定時間ごとに荷重・変位を自動的に記録した。

(4) 実験結果と考察

1) 一軸強度は平均で79.61kg/cm<sup>2</sup>で、載荷方式の違いによる破壊強度のばらつきは通常の一軸圧縮試験の誤差範囲である。大谷石に含まれる細目石 (みそ) 等の含有物の大きさや量が破壊強度を支配しているものと考えられる。

2) 経過時間と軸ひずみの関係：所定の応力載荷後、時間の経過とともに軸ひずみが徐々に増加していき、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。試験時に設定した応力比が同じであっても、真の応力比は異なるため、破壊時間の違いを発生させてしまったと推定できる。

3) 経過時間とひずみ速度の関係：ひずみ速度が所定応力載荷後に急激に減少し、定常状態を経た後に加速されて破壊することが示された。

4) 破壊時間とそのときの最小ひずみ速度の関係：最小ひずみ速度と破壊時間の間には、対数直線的な関係がある。

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

(目的)

流紋岩質緑色凝灰岩 (通称、大谷石) の採取場跡地の地下空洞保持のための空洞内の残柱が、時間依存性の変形・破壊挙動を示すことに起因して陥没が発生している可能性があると考えた。時間依存性の変形・破壊挙動と陥没との関連性を、一軸クリープ試験により明らかにすることを目的とする。

(抄録)

(1) 試験装置：レバー倍率20倍、最大軸荷重3tfのレバー式一軸クリープ試験機と縦ひずみ、横ひずみ、AE測定装置から成る。

(2) 試料：試験時間は最長18日間に及ぶため、試験片の含水比変化を起こさせないように装置全体を恒温・恒湿室に置き、試験片は塩ビラップにより外気と遮断した。試験片は弾性波速度を測定し、ほぼ同一の弾性波速度を有するものを十数本選定した。

(3) 試験条件：クリープ試験に先立ち、一軸圧縮強度を求め、この強度に対する応力率 (クリープ応力率) 約90~60%の応力を約2~5%間隔にかけてそれぞれの挙動を測定した。測定データは数秒~数十秒間隔にパソコンに入力し、解析処理した。

(4) 物理・力学試験結果：自然含水比重1.71、吸水率22.6%、含水率20.8%、空隙率30.4%、一軸強度95.8kg/cm<sup>2</sup>、ヤング率19200kg/cm<sup>2</sup>、ポアソン比0.25、圧裂引張強度11.4kg/cm<sup>2</sup>、三軸試験から求めた強度定数  $c = 34.6\text{kg/cm}^2$ 、 $\phi = 17.4$ 度、P波速度1886m/sec、S波速度846m/sec。

(5) 一軸クリープ試験結果

1) 縦ひずみ・横ひずみー経過時間の関係：縦ひずみと経過時間の関係は、これまで言われてきたように片対数グラフ上で直線になるが、横ひずみと経過時間の関係はほとんど直線にならず、やや右上がりの曲線になる。

2) 体積ひずみー経過時間の関係：一軸圧縮試験での体積ひずみはかなりばらつくが、クリープ試験では応力比にかかわらず载荷直後にほぼ一定の $-2000\mu\text{s}$ の体積ひずみを生ずる。また、応力比70%程度以上のものはすべてダイレイタンシーを示

し、時間の経過とともに体積ひずみは増大し、やがて0を超えて破壊に至る。

3) ポアソン比-経過時間の関係：一軸クリープ試験での载荷直後のポアソン比は0.26~0.30であり、一軸圧縮試験で得られる値よりやや大きい。また、時間の経過とともにポアソン比は増大し、破断前に0.5に近づくか、超えることが特徴である。

4) 今後は低応力率のクリープ試験を実施し、そのクリープ挙動を確認すること、原位置で残柱の体積ひずみの長期モニターを実施すること、経過時間の判明している残柱とその周辺の岩盤サンプルのクリープ試験を含む力学試験を実施することにより、長期破壊時間を予測できるものと考えられる。

5) 西垣好彦、松村真一郎 (1992) : 軟岩のクリープ定数に及ぼす載荷時間の影響、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

(目的)

クリープ定数の時間依存性を検討することを目的とし、数種の軟岩を用いて載荷時間及び載荷条件の異なる試験を実施した。

(抄録)

(1) 試料：凝灰岩、砂岩、まさ土。試験方法：一軸及び三軸応力状態でのクリープ試験、三軸クリープ試験では所定の拘束圧で等方圧密した後、排水または非排水条件で載荷した。背圧は $8\text{kg/cm}^2$ とした。載荷応力は、クリープ破壊しないように強度の約6割とした。

(2) 試験結果

1) 軸ひずみ～時間関係から、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。

また、軸ひずみ速度～時間関係から、一次クリープ域では、岩種、応力条件、排水条件に関係なく広い範囲で対数クリープ則が成立することが分かった。両対数紙上での勾配は岩種に関係なく約1.0である。また、軸ひずみ速度～時間関係の切片の値は、一軸圧縮強度から概略推定できる。

2) 長期変形問題で実務に広く用いられるクリープモデルは、3要素Voigtモデルが一般的である。3要素モデルの遅延係数は、クリープ試験の載荷時間によって異なった値となる。しかし、遅延係数は岩種に関係なく、載荷時間と逆比例の関係にあるようである。したがって、一次クリープ域の範囲では、長期の遅延係数の推定が可能である。

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

### (目的)

岩石のクリープ試験結果を解析、整理し、種々の挙動特性を抽出することにより、それらを合理的に説明する力学モデルを考え、そのモデルが他の現象をも説明できることを示すことを目的とする。

### (抄録)

(1) 試料：凝灰岩。寸法：直径3cm、高さ6cmの円柱形。試料の一軸圧縮強度は、Aグループで735kg/cm<sup>2</sup>、Bグループで527kg/cm<sup>2</sup>。

(2) 試験方法：試料の端面を研磨した後、グリスを塗布したテフロン紙を載荷板との間に挟み、レバー比が1：50のレバー式圧縮クリープ試験機を用いた。恒温恒湿室（19℃～20℃、80～85%）で、自然乾燥状態で試験した。

(2) 載荷応力：一軸圧縮強度の10～90%とした。ひずみはポリエステルゲージにより、軸方向と周方向について測定した。

### (3) 実験結果

1) クリープひずみ（縦ひずみ）は、応力比が高いほど著しく増加した。Aグループでは応力比が0.72の場合に420分で、Bグループでは応力比が0.86の場合に50分でクリープ破壊を起こした。

2) 応力比が高い場合は、クリープひずみ（縦ひずみ）の非線形の度合が経時的に増大する。

3) 円周ひずみは、載荷応力の増加とともに増加する。また、応力比が大きくなると、増加の程度は大きくなる。

4) クリープ試験結果に基づき、非線形レオロジーモデルを提案した。このモデルでは、せん断成分については、連続して発生する材料内部の降伏を1個のVoigt要素のパラメータの変化としてとらえる。体積成分については、破壊前は粘性流動を許し、破壊後はポアソン比の値に応じた大きな剛性を備えたバネのみで表す。

5) 以上のモデルに対し、定応力速度試験、クリープ試験及び定ひずみ速度試験の結果を適用した。その結果、ピーク強度の応力速度依存性、クリープ破壊の応力依存性、さらに、ひずみ軟化現象等を明確に表現することができた。

## 2.4 岩石のカイザー効果に関する基礎特性

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。<sup>1)~8)</sup>
- 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<sup>1)</sup>、スポンジパッドを供試体と載荷板の間に挟む方法<sup>3)4)7)8)</sup>および空間フィルターを利用する方法<sup>5)</sup>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<sup>1)5)6)</sup>、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<sup>2)</sup>および連続的なA Eの発生し始める点に着目する方法<sup>3)4)7)8)</sup>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。<sup>3)4)7)</sup>
- 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。<sup>1)2)5)7)8)</sup>
- 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。<sup>7)</sup>
- 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<sup>1)</sup>もしくは残留ひずみに呼応した値<sup>3)4)7)</sup>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。<sup>4)7)</sup>

#### (4) 引用文献の目的と抄録

- 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

##### (目的)

オーバーコアリングされた岩石コアを用い、カイザー効果から地圧を推定する。

##### (抄録)

(1)試料：凝灰岩。

(2)測定装置：3チャンネルA E計測システム（200kHz共振センサ1個のみ供試体に接着、100kHz共振センサ2個は上下載荷板に接着）。

(3)試験方法：採取されたボーリングコアから8方向の角柱供試体(25×25×75mm)を整形した後、両載荷面にアラルダイトを母材としたハンチを取り付ける。その後、一軸圧縮試験機に設置し、0.2mm/min.の載荷速度で単調載荷しA Eの測定を行う。

(4)成果：

- ・モルタル材料を用いた予備実験から、載荷面からのノイズ発生除去にはアラルダイトを母材とした混合材料によるハンチを取り付けることが有効であった。
- ・A E法で推定した地圧は、オーバーコアリング法で推定した地圧より大きくなった。



- 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

(目的)

繰り返し載荷試験によって、カイザー効果を明確化する。

(抄録)

(1)試料：安山岩。

(2)測定装置：1チャンネルAE計測システム(100~300kHz広帯域センサ1個接着)。

(3)試験方法： $\phi 20 \times 60\text{mm}$ と $\phi 30 \times 90\text{mm}$ に整形した円柱供試体の両載荷面に鋼鉄製載荷板を接着する。その後、一軸圧縮試験機に設置し、 $0.3 \sim 0.5\text{bar/sec.}$ の載荷速度で繰り返し載荷を行いAEを測定する。

(4)成果：

- ・カイザー効果が不明瞭な場合には、繰り返し載荷時におけるAE累積数の差を取ることによって、カイザー効果が明瞭になった。
- ・乾燥・湿潤・加熱の3つの条件を組み合わせた実験から、含水比の変化にもかかわらずカイザー効果が存在することを確認した。

- 3) 村山朔郎、道廣一利、斎藤二郎、吉岡尚也(1985)：載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.364/3-4、pp.107-112

(目的)

カイザー効果が先行応力よりは残留するひずみに影響することを調べる。

カイザー効果には載荷方向の独立性があることを調べる。

(抄録)

(1)試料：花崗岩。

(2)測定装置：1チャンネルAE計測システム(140kHz共振センサ1個接着)。

(3)試験方法： $\phi 30 \times 60$ mmの円柱供試体にひずみが増加しなくなるまで繰り返し先行応力を作用させる。その後、先行応力を越えて9.8MPa/min.の載荷速度で一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。また、 $150 \times 150 \times 150$ mmの立方供試体の3面に大きさの異なる先行応力を繰り返し作用させる。その後、各面で円柱供試体と同様に一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。さらに、先行応力を作用させた立方供試体から $\phi 30 \times 60$ mmの円柱供試体を整形し、一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。載荷面からのノイズ発生除去には、独立気泡を有したスポンジパッドを使用している。

(4)成果：

- ・繰り返し載荷の回数によって、供試体に残留するひずみの程度が異なる。カイザー効果から推定される応力値は、先行応力が同じであるにもかかわらず残留しているひずみの程度によって異なることがわかった。その結果、カイザー効果はひずみ依存性のあることを示した。
- ・立方供試体から切り出した円柱供試体を用いた実験で、載荷方向に作用させた先行応力をその他の方向に作用させた応力とは無関係に推定できた。

- 4) 村山朔郎、道廣一利、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.370/3-5、pp.41-46

(目的)

カイザー効果とクリープによって残留するひずみの関係を調べる。

(抄録)

(1)試料：花崗岩。

(2)測定装置：1チャンネルAE計測システム（140kHz共振センサ1個接着）。

(3)試験方法： $\phi 30 \times 60$ mmの円柱供試体にひずみが増加しなくなるまで一定応力を作用させる。その後、先行応力を越えて9.8MPa/min.の載荷速度で一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。また、一定応力の除荷後、数日間放置することによりひずみの回復を促し、同様な条件の下で一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。さらに、ひずみが増加しなくなるまで一定応力を作用させた後一定応力を減少させ、減じた応力の下で再度ひずみの増減がなくなるまで養生する。除荷後同様な条件の下で一軸圧縮載荷を行いAEを計測する。載荷面からのノイズ発生除去には、独立気泡を有したスポンジパッドを使用している。

(4)成果：

- ・クリープによるひずみの増加が無くなった供試体では、カイザー効果から推定される応力値は先行応力とほぼ等しくなった。
- ・一定応力の除荷後、放置期間が長くなればなるほどひずみの回復量は大きくなり、それに伴ってカイザー効果から推定される応力は小さくなった。ただし、残留ひずみの回復量が20%までは先行応力とカイザー効果から推定される応力はほぼ等しかった。
- ・先行応力を減少させる方法で応力履歴させた場合、カイザー効果から推定される応力は最終的に減じた応力とほぼ等しくなった。
- ・カイザー効果から推定される応力は、応力履歴の最大値にはならない。

- 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

(目的)

カイザー効果と岩石内のマイクロクラッキングの関係を調べる。

(抄録)

(1)試料：砂岩。

(2)測定装置：8チャンネルA E計測システム (500kHz共振センサ8個接着)。

(3)試験方法：30×30×60mmの立方供試体を用いて多段階繰り返し载荷中におけるA Eを計測する。また、同様の供試体に繰り返し载荷によって先行応力を記憶させた後、A Eを計測する。一軸圧縮試験機による载荷は荷重制御で行われ、0.00835MPa/sec.である。载荷面からのノイズ発生除去には、空間フィルター手法を適用している。なお、8個のA Eセンサーを供試体に接着していることから、通常のA Eパラメータの他に震源分布特性についての考察を実施している。

(4)成果：

- ・ 応力履歴によって生じる微小破壊域の形成が不十分な場合には、カイザー効果は不明瞭になった。
- ・ カイザー効果は、先行応力によって形成された微小破壊域からのマイクロクラッキングに起因する。

- 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

(目的)

カイザー効果を用いて、応力～ひずみ関係の全領域にわたる先行応力推定方法を確立する。

(抄録)

- (1)試料：セメントモルタル。
- (2)測定装置：1チャンネル A E 計測システム (140kHz共振センサ 1 個接着)。
- (3)試験方法： $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の円柱供試体を用いて三軸圧縮試験機による多段階繰り返し載荷を行い A E を計測する。側圧は  $0\text{kgf/cm}^2$  から  $10\text{kgf/cm}^2$  まで順次  $2\text{kgf/cm}^2$  単位で増分させ繰り返し載荷を行っている。軸圧は  $0.1\text{mm/min}$  の変位制御で行われる。載荷面からのノイズ発生除去は行っていない。
- (4)成果：
- ・ 応力～ひずみ関係の全領域 (ひずみ軟化域他) にわたる先行応力が、カイザー効果から全応力として推定できる。
  - ・ 三軸圧縮試験を利用した、A E 法による先行応力推定方法手順を提案した。

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

(目的)

岩石におけるカイザー効果がどのようなパラメータに影響を受け、支配されているかを実験的に解明し、A Eを利用した初期応力測定の可能性について調べる。

(抄録)

- (1)試料：花崗岩、花崗斑岩、ひん岩、流紋岩、砂岩、凝灰岩、粘板岩、安山岩、泥岩、結晶片岩、大理石、
- (2)測定装置：1チャンネルA E計測システム（140kHz共振センサ1個接着）。
- (3)試験方法： $\phi 30 \times 60\text{mm}$ 、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体および $50 \times 50 \times 50\text{mm}$ 、 $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ の立方供試体を使用する。カイザー効果の基礎特性把握のための試験では、繰り返し一軸圧縮試験、繰り返し三軸圧縮試験およびクリープ試験の3種類である。それぞれ、載荷方向でひずみの増加が無くなった状態を「ひずみ飽和状態」、増加段階の状態を「ひずみ不飽和状態」と定義し、除荷後の一軸圧縮試験によってA Eを計測する。載荷面からのノイズ発生除去には、独立気泡を有したスポンジパッドを使用している。
- (4)成果：
- ・岩石に適応した閾値と感度を選定することにより、連続的なA Eの発生するポイントをカイザー効果と見なせることがわかった。
  - ・ほとんどの岩石にカイザー効果が存在した。
  - ・カイザー効果は、A E試験時に供試体に残留しているひずみに依存して現れた。
  - ・カイザー効果から推定された応力は、他方向から作用していた応力の影響は受けなかった。
  - ・応力解放後ある経過時間を境に、カイザー効果から推定された応力は小さくなった。

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

(目的)

堆積岩地山でA E法による初期地圧測定を実施し、主応力分布を把握する。

(抄録)

(1)試料：凝灰質砂岩

(2)測定装置：1チャンネルA E計測システム (140kHz共振センサ1個接着)。

(3)試験方法：立坑側面から岩塊を採取し、6つの異なる方向で $\phi 30 \times 60\text{mm}$ の円柱供試体を整形する。供試体数は全部で60本である。その後、一軸圧縮試験機に設置し、 $0.98\text{MPa/min.}$ の載荷速度で単調載荷しA Eの計測を行う。載荷面からのノイズ発生除去には、独立気泡を有したスポンジパッドを使用している。

(4)成果：

- ・凝灰質砂岩にはカイザー効果が存在した。
- ・鉛直方向の地圧成分はほぼ土被り圧 ( $0.8\text{MPa}$ ) に等しくなった。
- ・水平面内において算定した主応力方向と、測量学および地震学から求められている中部地方の主圧縮軸方向との間に良い一致が認められた。

### 3. 室内試験

#### 3.1 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

##### 3.1.1 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、下記の要領に従い、健全な岩石コアを採取した。

サンプリングは所定の深度近傍から以下の要領で選択採取する。

- ①成形のため、余裕長さが十分にあり、試験時の供試体基準長を満足しうるもの。
- ②ヘアークラックや割れ目を含まない均質な試料であること。
- ③同一深度で、2供試体以上を1組とする試験に供する試料については、試料が均質であり、互いに同等なものとなし得るものであること。
- ④試験のため、コア箱から抜き取った試料は乾燥を防ぐため速やかにビニルフィルムでシールし、試料深度および上下方向を明記したラベルを添付した（図-3.1.1.1参照）。ビニルフィルムを巻いた試料は、さらにパラフィンでシールした。なお、サンプリング後に残ったコア試料については、写真撮影を行った。

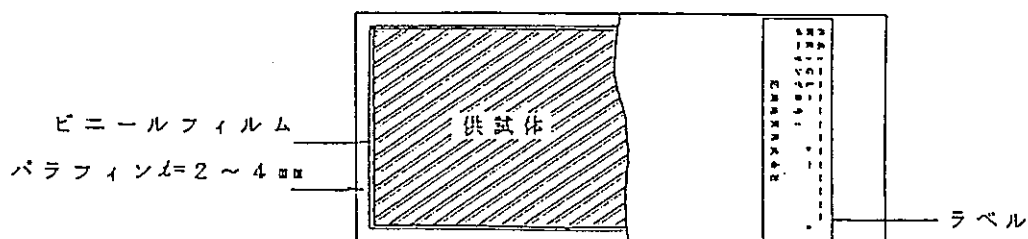


図-3.1.1.1 サンプリング試料の外観図



## 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のコアの保存方法につき、特に注意しておかなければならない点として、次のものを上げることができる。

- 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

これらの問題に対しては、次のような処置を講じた。

### ①運搬時の振動によるコアの破損

採取した試料は、室内岩石試験に供するため試験室に搬入するが、このとき、試料にショックを与え、乱したり、乾燥させたりしないように十分注意しなければならない。まず、この点に留意して、試料の運搬は次に示す方法により行った。

パラフィンでシールしたコア試料は、図-3.1.1.2に示すように、専用の運送箱にクッション材を充填して収めた。

また、輸送の際は、専用の試料運搬車にクッション材を敷き、その上に輸送箱を載せ、慎重に運搬した。

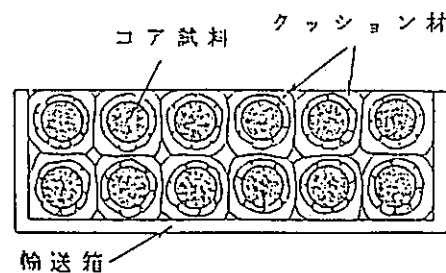


図-3.1.1.2 試料運搬方法

### ②含水比の変化（風乾の防止）

サンプリングしたコアは、乾燥を防ぐためにビニールフィルムで二重に巻き、ビニールテープでフィルムを押えた後、さらにその上をパラフィンでシールして含水比の変化を防いだ。

具体的には、供試体それぞれにつき、図-3.1.1.1に示すような処置をした。

### ③試料の温度変化

試料の保存にあたっては温度変化にも注意しなければならない。前記の①、②の対策が講じられた試料は試験室内のコア保存室に保存した。保存室内は温度20℃、相対湿度95%に保ち、保存期間中における極端な温度変化が試料に生じないようにした。

### (3) 供試体整形

供試体の整形はJIS M0302 (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。

試験項目および準拠した試験規準を表-3.1.1.1に示した。

表-3.1.1.1 物理試験項目および試験基準

試験項目	試験基準	
見掛け比重 有効間隙率 含水率	KDK S 0501-1968	建設省土木試験基準
土粒子の密度	JSF T 111 - 1990	土質工学会基準
湿潤密度	JSF T 191 - 1990	土質工学会基準

### 3.1.2 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) 試験装置

##### 1) 装置の仕様及び構成

2.2.1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仕様を表-3.1.2.1に示す。また、図-3.1.2.1に試験装置の構成図を示す。

表-3.1.2.1 トランジェントパルス装置の仕様

試料寸法	φ 50×H50 mm
軸圧	500 kgf/cm <sup>2</sup>
側圧	500 kgf/cm <sup>2</sup>
間隙水圧	500 kgf/cm <sup>2</sup>
上流側貯留槽	400 cc
下流側貯留槽	400 cc、5 cc
材質	原則としてオールステンレス
動力	手動水圧ポンプ 500 kgf/cm <sup>2</sup>

##### 2) 試験・計測の流れ

図-3.1.2.2に試験・計測の流れを示す。また、図-3.1.2.3に計測機器系統図を示す。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。

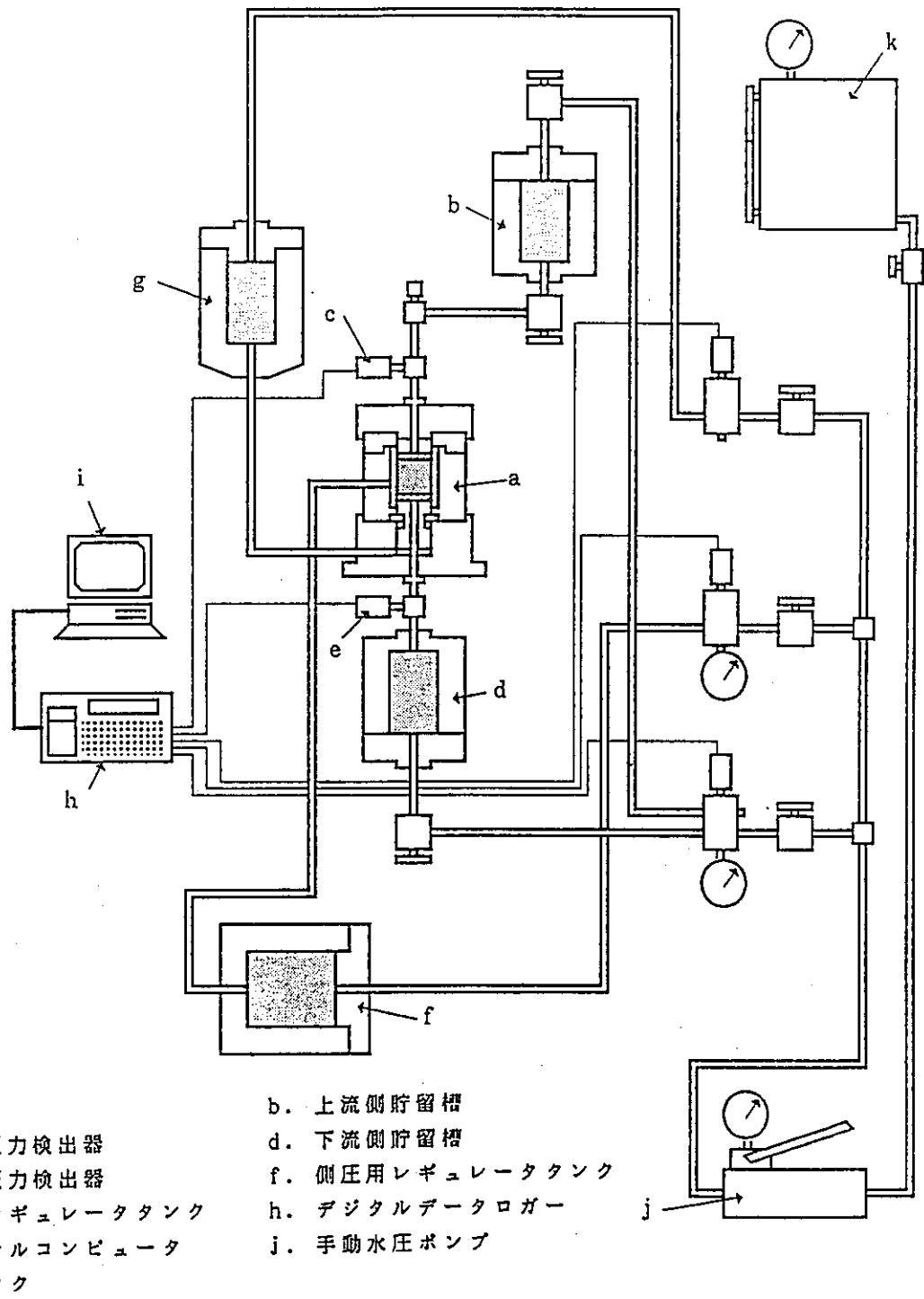


図-3.1.2.1 試験装置の構成図

計測にあたっては、パソコン上で計測プログラムを走らせ、メニューに沿って、初期設定、計測機器の較正值入力、初期値測定を行い、計測を開始する。計測中には、グラフのスケール変更、サンプリング間隔の変更などの他、予め登録した順にサンプリング間隔を順次自動変更するプログラム計測モードがある。今回は、プログラム計測モードを使用し、以下のようなサンプリング間隔、各サンプリング間隔毎の継続時間で計測を実施した。

サンプリング間隔(sec)	継続時間(sec)
1	20
2	30
5	300
20	2000
120	12000
300	—

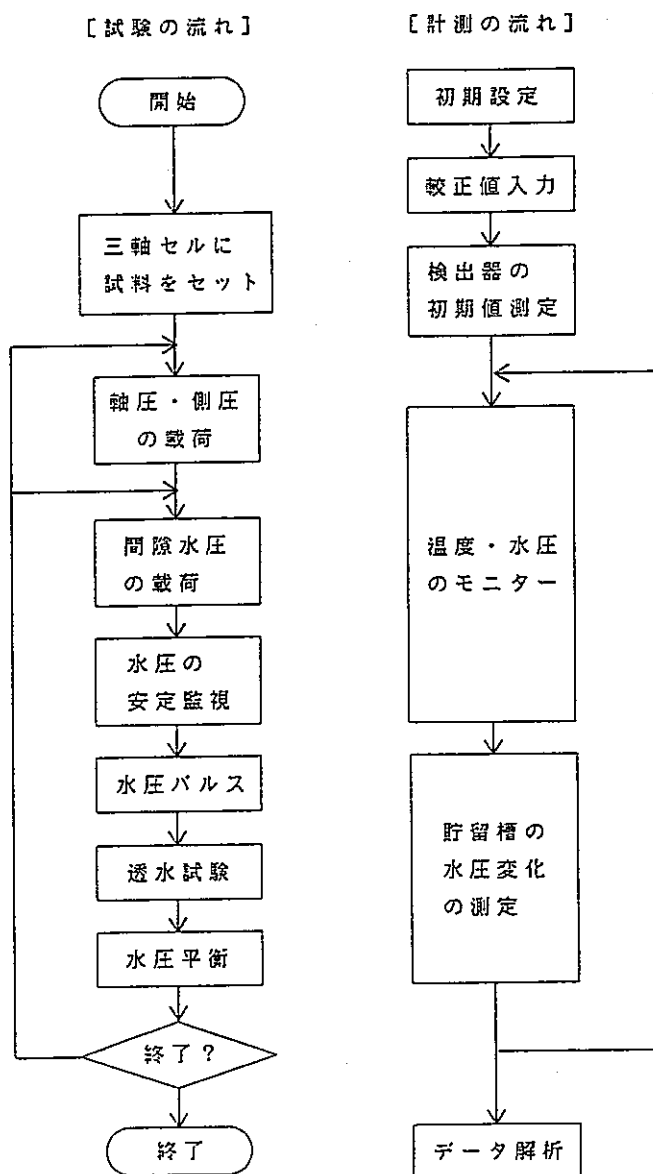


図-3.1.2.2 試験・計測の流れ

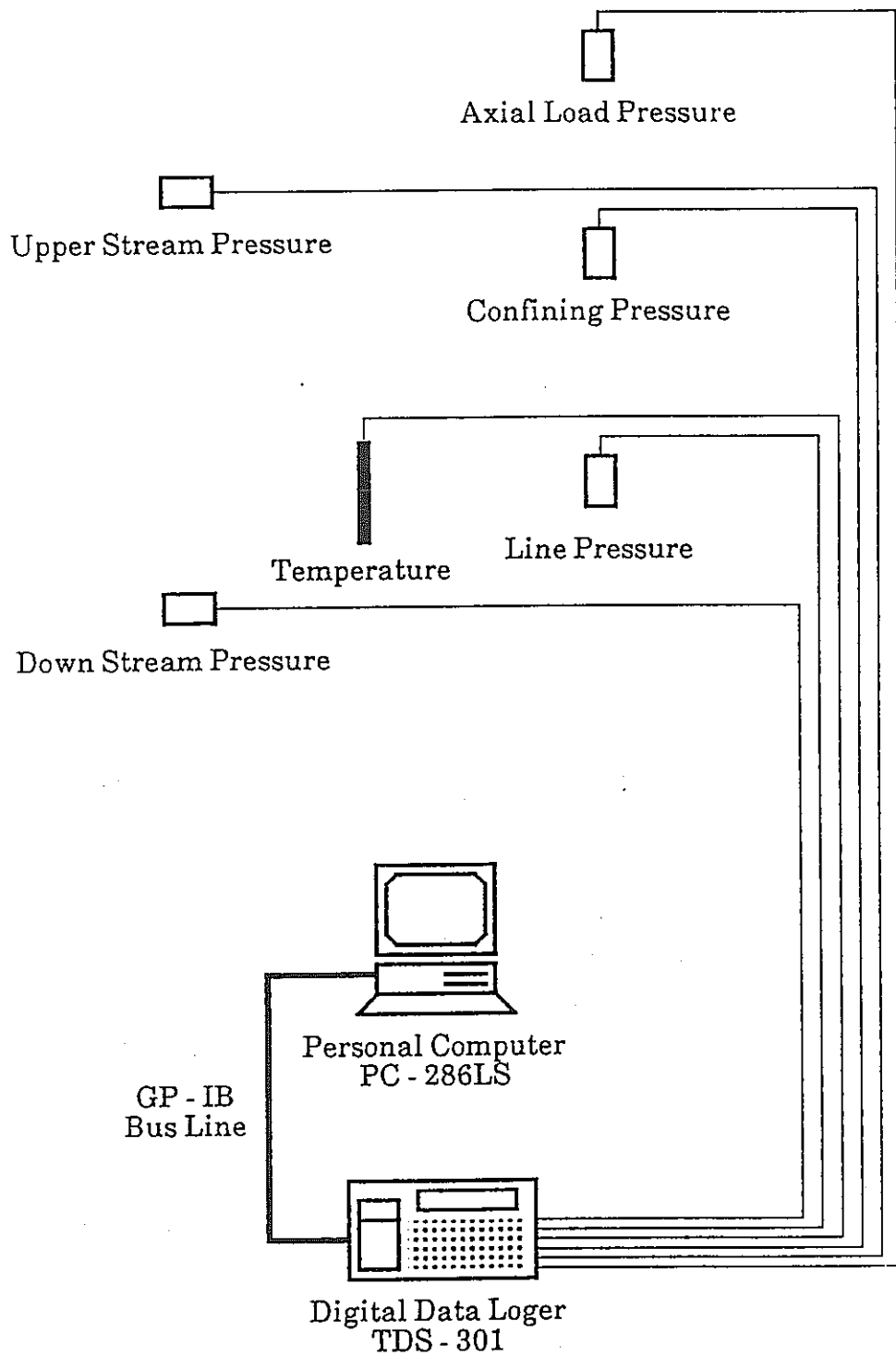


図-3.1.2.3 計測機器系統図

### (3) 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、2.2.1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。本試験に先立って実施した予備試験の結果に基づき、本試験での試験条件を設定した。

予備試験の目的は、対象となる岩石の透水係数の概略値とその拘束圧依存性を調べ、本試験の条件を設定するための情報を得ることである。予備試験に用いた岩石供試体は、明世累層の泥岩（コア採取深度GL-49.3～-49.9m）であり、直径5cm、長さ5cmに試料を整形し、本試験と同様にトランジェントパルス法を用いて透水係数を求めた。

予備試験では、岩石試料の採取深度における応力状態に基づき、有効拘束圧5～25kgf/cm<sup>2</sup>の範囲で3段階で透水係数を調べた。この拘束圧の範囲では透水係数の拘束圧依存性は認められず、代表値として $3.0 \times 10^{-9}$ cm/sec程度の値を考えればよいことが確認された。

予備試験結果より、現状では有効拘束圧5kg/cm<sup>2</sup>の試験結果に、試験後半でシール圧の低さに起因すると思われるリーク現象が見受けられ、精度上の問題があるため、本試験においては有効拘束圧5kg/cm<sup>2</sup>以上で試験を実施することが推奨された。そのため、本試験においては、有効拘束圧は10,20,30kg/cm<sup>2</sup>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/cm<sup>2</sup>を基準に2.0～4.0kg/cm<sup>2</sup>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/cm<sup>2</sup>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。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

### ①測定原理

図-3.1.2.4に測定原理の説明図を示す。側面を止水した岩石試料の両側に水圧変化に対して剛な貯留槽（圧力容器）を配置する。試料に、所定の封圧、間隙水圧を与え、両側の貯留槽内の水圧が平衡した後、ある瞬間にパルス的に上流側貯留槽の水圧をHだけ上昇させる。水は試料中を浸透し、上下流側貯留槽内の水圧は、図のような経時変化をする。このとき、岩石試料内の間隙水圧分布は非線形な分布を取り、次式のような2階の偏微分方程式で表現される。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{S_s}{K} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

- h : 岩石試料内の間隙水圧
- h<sub>1</sub> : 上流側貯留槽の水圧
- h<sub>2</sub> : 下流側貯留槽の水圧
- x : 試料上流側端面からの距離
- t : 経過時間
- S<sub>s</sub> : 岩石試料内の比貯留量
- K : 岩石試料の透水係数

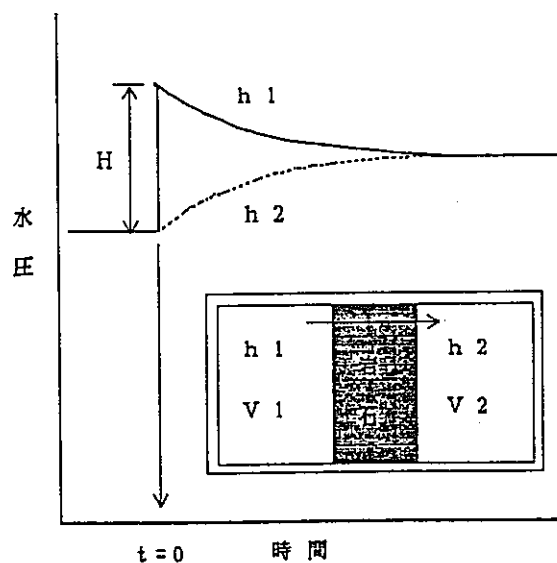


図-3.1.2.4 測定原理



## ○Braceの方法

「岩石試料の空隙率が小さく、圧縮率が水に比べて十分に小さい」という仮定が成り立つとき、岩石試料内の比貯留量  $S_s \rightarrow 0$  として無視できる。このとき、(3.1)式の第2項を無視することができ、間隙水圧分布は線形になる。試料端面での境界条件から、貯留槽内の水圧変化は簡単な次式で表される。

$$\frac{h_1 - h_2}{H} = \exp \left[ - \frac{V_u + V_d}{V_u \cdot V_d} \cdot \frac{K \cdot A \cdot t}{l \cdot C_w \cdot \gamma_w \cdot g} \right] \quad (3.2)$$

- H : パルス幅
- $V_u$  : 上流側貯留槽の容積
- $V_d$  : 下流側貯留槽の容積
- K : 岩石試料の透水係数
- A : 岩石試料の断面積
- t : 経過時間
- l : 岩石試料の長さ
- $C_w$  : 水の圧縮率
- $\gamma_w$  : 水の比重
- g : 重力加速度

したがって、時間軸を対数にとった片対数グラフに上下貯留槽の水圧差をプロットすると直線になり、その傾きから透水係数Kを計算することができる。

## ②Brace法によるデータ解析

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。

ただし、実際の計測では、計測装置の都合上、データのサンプリング時間間隔は、水圧が大きく変化するときには細かく、変化が小さいときには粗いように設定

した。そのため、通常の最小二乗近似を行うと、データが等間隔に取られていないため、データにサンプリング間隔の相違によるバイアスが導入されることになり、細かくサンプリングした部分に重みを置いた回帰分析になってしまう。これを避けるために、最小二乗法を行うに当っては、データが等間隔に取られていないと計測の都合によってデータに重みがつけられてしまう。すなわち、細かく計算した部分に重みを置いた解析になってしまう。これを避けるために、データにサンプリング間隔で重みを付けた最小二乗近似を行った。以下にその計算式を示す。

$n$  個のデータがあって、その内わけはサンプリング間隔が  $l_1, l_2, \dots, l_k$  のデータがそれぞれ  $m_1, m_2, \dots, m_k$  ずつであるとすると、

$$n = m_1 + m_2 + \dots + m_k$$

ここで、次のような重み変数を定義する。

$$w_j = l_j / l_1$$

$$n' = w_1 m_1 + w_2 m_2 + \dots + w_k m_k$$

$n'$  はサンプリング間隔で重みを付けた場合の重みの付いた見かけ上のデータ総数である。いま、データを

$$y = a + bx$$

という一次式に回帰させるとすると、傾き  $b$ 、切片  $a$  及び相関係数  $R$  は次のようになる。

$$b = \left( n' \sum_{i=1}^n w_i x y - \sum_{i=1}^n w_i x \cdot \sum_{i=1}^n w_i y \right) / \left( n' \sum_{i=1}^n w_i x^2 - \left( \sum_{i=1}^n w_i x \right)^2 \right)$$

$$a = \left( \sum_{i=1}^n w_i x^2 \cdot \sum_{i=1}^n w_i y - \sum_{i=1}^n w_i x \cdot \sum_{i=1}^n w_i x y \right) / \left( n' \sum_{i=1}^n w_i x^2 - \left( \sum_{i=1}^n w_i x \right)^2 \right)$$

$$r = \left( \sum_{i=1}^n w_i x^2 \cdot \sum_{i=1}^n w_i y - \sum_{i=1}^n w_i x \cdot \sum_{i=1}^n w_i x y \right)$$

$$/ \sqrt{\left( n' \sum_{i=1}^n w_i x^2 - \left( \sum_{i=1}^n w_i x \right)^2 \right) \cdot \left( n' \sum_{i=1}^n w_i y^2 - \left( \sum_{i=1}^n w_i y \right)^2 \right)}$$

上式で計測データの時間を  $x$  に、パルス圧で正規化した上下流側水圧差の常用対数  $\log_{10}((h_1 - h_2)/H)$  を  $y$  に代入して傾き  $a$  を求め、自然対数に底変換して (3.2) 式に代入することにより、透水係数が求められる。

(3.2) 式で透水係数を計算する際には、水の圧縮率及び比重が必要になるが、これらの値は水圧によって変化する。そこで、本プログラムでは、理科年表の値から次式のような近似式を作成し、これらのパラメータを水圧の関数として与えてい

る。

$$C_w = -8.81 \times 10^{-9}(P-1.0) + 4.41 \times 10^{-5}$$

$$\gamma_w = 0.9982 \times 10^{-3}(1.0 + P \cdot C_w)$$

$C_w$  : 水の圧縮率 [1/(kgf/cm<sup>2</sup>)]

$\gamma_w$  : 水の比重

$P$  : 水圧 [kgf/cm<sup>2</sup>] (0 < P < 500)

ここで、実際の計算では、水圧にはパルスを与える前の上下流側貯留槽の水圧 (= 間隙水圧) を与えている。

水圧として初期間隙水圧を用いた場合と収束水圧を用いた場合とでの透水係数への影響は以下のように算定される。

初期間隙水圧 1.0kgf/cm<sup>2</sup>

$$C_w = -4.41 \times 10^{-5} \text{ (1/kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\gamma_w = 0.998244 \times 10^{-3}$$

収束水圧 2.5kgf/cm<sup>2</sup> (初期間隙水圧 + 1.5kgf/cm<sup>2</sup>)

$$C_w = -4.41132 \times 10^{-5} \text{ (1/kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\gamma_w = 0.998310 \times 10^{-3}$$

式 (3.2) より透水係数への影響は以下の式で評価できる。

$$(C_{w1} \cdot \gamma_{w1}) / (C_{w2} \cdot \gamma_{w2}) = 0.9996374$$

よって、透水係数への影響は、パルス圧3kgf/cm<sup>2</sup>を用いる限り、工学上問題にはならない。

### 3) 試験条件及び試験内容

#### ①岩石供試体の状況

透水試験用のコア採取深度は、明世累層：GL -40.51 ~ 41.56 m、土岐夾炭累層上部層：GL -68.21 ~ 73.06 m、土岐夾炭累層下部層：GL -99.76 ~ 100.12 mである。各コアは直径5cm、長さ5cmの岩石供試体に整形し、明世累層で6本（深度の浅い方からAK1~AK6）、土岐夾炭累層上部層で6本（深度の浅い方からBK1~BK6）、下部層で4本（深度の浅い方からCK1~CK4）の供試体を得られた。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は、以下のものを採用した。

明世累層：AK1 (GL -40.51 ~ 40.56 m)

土岐夾炭累層上部層：BK3 (GL -68.39 ~ 68.44 m)

土岐夾炭累層下部層：CK1 (GL -99.76 ~ 99.81 m)

各供試体の状態を写真-3.1.2.1に示す。

#### ②試験条件及び試験内容

- ・試験は写真-3.1.2.2に示すトランジェントパルス試験装置を用いて実施した。
- ・試験水には10~20mmHgの真空圧で24時間以上脱気したイオン交換水を用い、岩石供試体も同様な方法で処理を施し、充分飽和させて試験に用いた。
- ・トランジェントパルス試験は、水圧計測を基本とした非定常試験であるため、2.2.1の文献調査結果にも示したように、試験中の温度変化による影響をできるだけ小さくして試験を実施する必要がある。そのため、実験室内温度制御はもとより、三軸セル、上・下流側貯留槽を水没させ、試験装置全体を断熱材で被い、間隙水の温度変化をできるだけ小さくして試験は実施した。特に試験時間が1昼夜を越える場合には、このような対策は不可欠である。

今回の一連の試験での温度変化は次に示すように小さく、温度変化の影響は試算によれば水圧変動で最大0.4 kgf/cm<sup>2</sup>程度と考えられる。

実験室内温度 21.0 ~ 21.4 °C

水槽内水温 AK1:17.4 °C (変化なし) BK3:18.0 ~ 18.1 °C

CK1: 19.0 ~ 19.2 °C

- ・本試験に用いる岩石は難透水性堆積岩であるので、試験時間が長時間になり二

次圧密（クリープ的体積変形）の影響が懸念される。そのため所定の応力状態にセットした後、応力状態がほぼ定常になるまで放置し、その後試験を開始した。各試験毎に放置時間は一定とし、今回の試験では12時間とした。

- ・パルス圧は全ての試験で同一となるように留意し、今回は $3\text{ kg f/cm}^2$ を採用した。しかしながら、パルス圧設定には手動ポンプを用いるため細かい制御ができないので、 $3\pm 1\text{ kg f/cm}^2$ の範囲に収まるように設定した。なお、この範囲でのパルス圧の変化による試験結果への影響がほとんど無いことは、予備試験により確認している。
- ・水圧の設定は、供試体採取深度での静水圧（地下水位GL-15mを仮定）とほぼ等しくなるように収束水圧を想定し設定した。その結果、次のような値を収束水圧設定値とし、パルス圧 $3\text{ kg f/cm}^2$ となるように初期上・下流水圧を設定した。

AK1:  $2.5\text{ kg f/cm}^2$       BK3:  $5.3\text{ kg f/cm}^2$       CK1:  $8.5\text{ kg f/cm}^2$

- ・軸圧及び側圧の設定は、収束水圧設定値に基づき、有効拘束圧が $10, 20, 30\text{ kg f/cm}^2$ になるように等方的に設定した。ただし、側圧が軸圧より高くなると、シール上の問題が発生するため、軸圧を側圧より若干（ $1\text{ kg f/cm}^2$ 以下）高めに設定した。
- ・本試験は応力状態と透水係数の関係を調べることを主目的としているため、等方応力状態で有効拘束圧を $10, 20, 30\text{ kg f/cm}^2$ の3段階に上昇させて、透水試験を実施した。また、応力履歴による岩石構造の変化、目づまり等の透水係数への影響を評価するため、有効応力を $30\text{ kg f/cm}^2$ まで上昇させた後、逆に $10\text{ kg f/cm}^2$ まで下降させて同様な実験を行い、各岩石供試体につき計5回の試験を実施した。

以上、今回実施した試験条件・内容をまとめて表-3.1.2.2に示す。

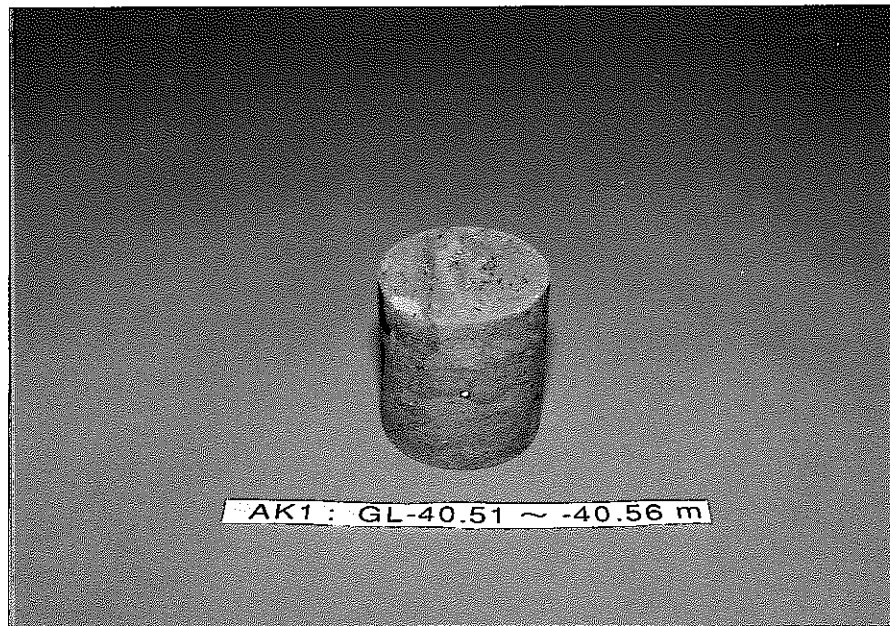
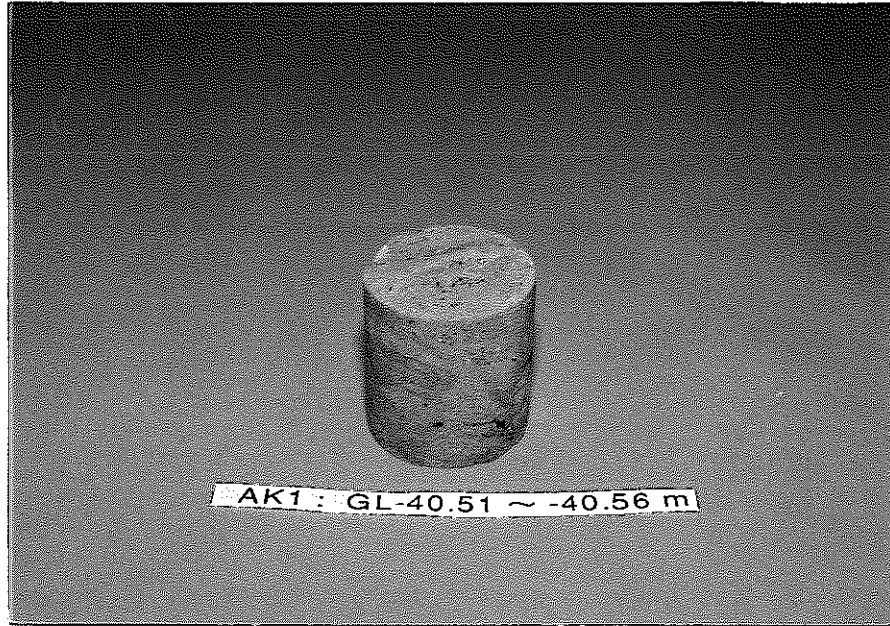


写真- 3.1.2.1 (a) 岩石供試体 (AK1)

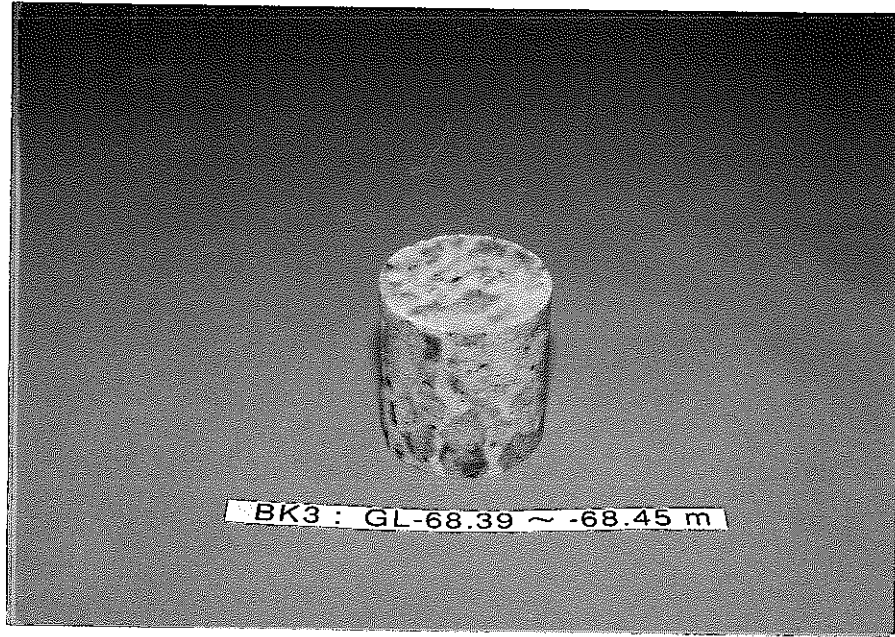


写真-3.1.2.1 (b) 岩石供試体 (BK3)

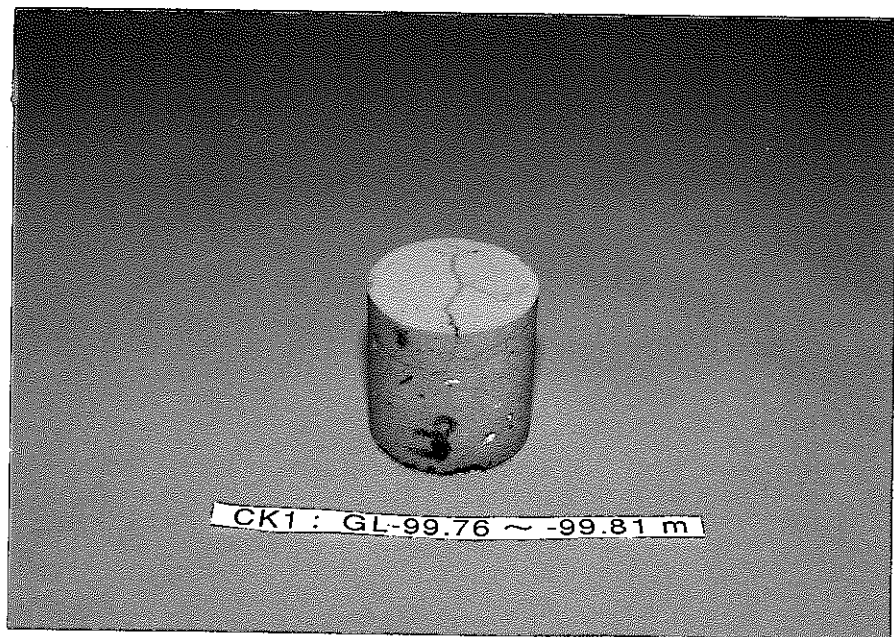
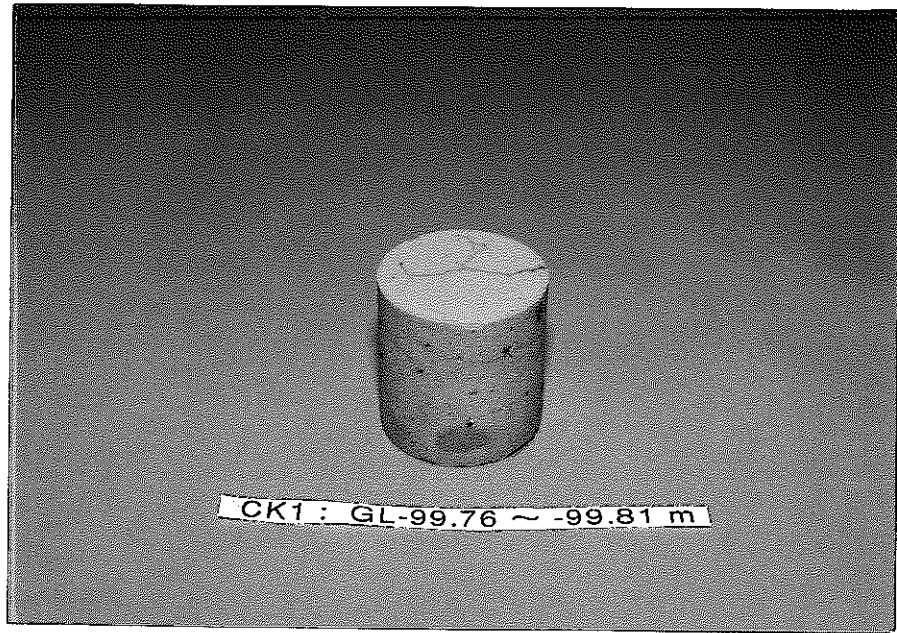
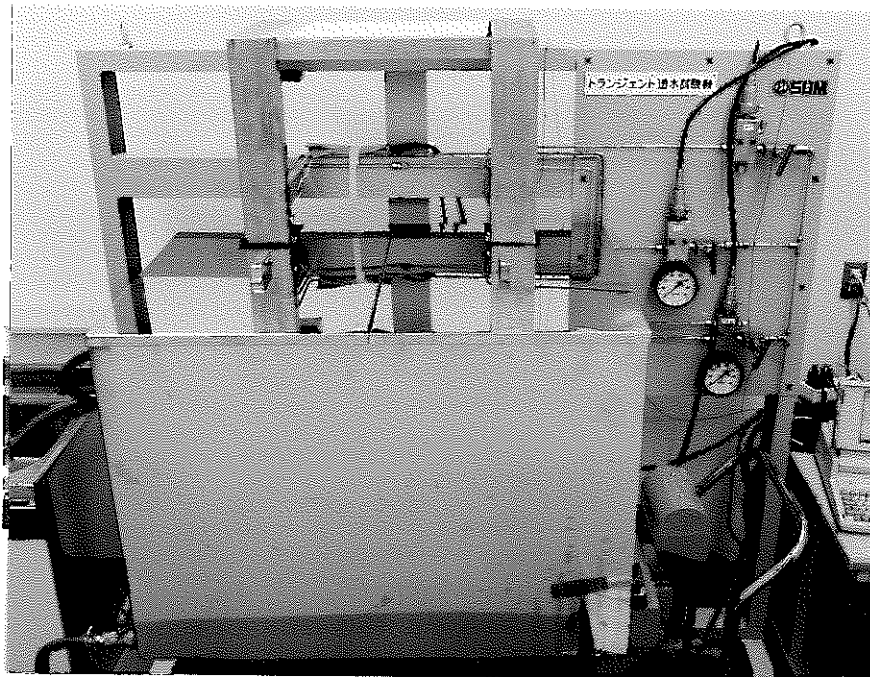


写真-3.1.2.1 (c) 岩石供試体 (CK1)





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-3.1.2.2 トランジェントパルス試験装置

表 - 3.1.2.2 透水試験条件

		軸圧	側圧	拘束圧	初期上流側水圧	初期下流側水圧	パルス圧	収束水圧想定値	有効拘束圧
		(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )
AK1	AK1-01 (上昇時)	12.50	12.50	12.50	1.00	4.00	3.00	2.50	10.00
	AK1-02 (上昇時)	22.50	22.50	22.50	1.00	4.00	3.00	2.50	20.00
	AK1-03 (折り返し時)	32.50	32.50	32.50	1.00	4.00	3.00	2.50	30.00
	AK1-04 (下降時)	22.50	22.50	22.50	1.00	4.00	3.00	2.50	20.00
	AK1-05 (下降時)	12.50	12.50	12.50	1.00	4.00	3.00	2.50	10.00
BK3	BK3-01 (上昇時)	15.30	15.30	15.30	3.80	6.80	3.00	5.30	10.00
	BK3-02 (上昇時)	25.30	25.30	25.30	3.80	6.80	3.00	5.30	20.00
	BK3-03 (折り返し時)	35.30	35.30	35.30	3.80	6.80	3.00	5.30	30.00
	BK3-04 (下降時)	25.30	25.30	25.30	3.80	6.80	3.00	5.30	20.00
	BK3-05 (下降時)	15.30	15.30	15.30	3.80	6.80	3.00	5.30	10.00
CK1	CK1-01 (上昇時)	18.50	18.50	18.50	7.00	10.00	3.00	8.50	10.00
	CK1-02 (上昇時)	28.50	28.50	28.50	7.00	10.00	3.00	8.50	20.00
	CK1-03 (折り返し時)	38.50	38.50	38.50	7.00	10.00	3.00	8.50	30.00
	CK1-04 (下降時)	28.50	28.50	28.50	7.00	10.00	3.00	8.50	20.00
	CK1-05 (下降時)	18.50	18.50	18.50	7.00	10.00	3.00	8.50	10.00

・拘束圧は、3軸応力状態を考慮して、次のように算定した。

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_1)$$

#### (4) 試験結果と考察

得られた測定結果より透水係数を算出する場合、まず縦軸に、パルス圧で正規化して上・下流側水圧差を常用対数で取り、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。計測開始よりパルス圧がおよそ1/10になる範囲でデータを直線近似し、最小二乗法により一次回帰を行って、その直線の傾きより透水係数を算定する。ただし、BK3,CK1の試験においては、試験時間が長時間にわたり、岩石のクリープ変形の影響、温度変化の影響、計器の測定誤差等により試験開始よりパルス圧がおよそ1/10になる時間までにわたって等質のデータが得られなかったため、直線性の良好な区間 [BK3：0～24時間 (86400秒)、CK1：0～12時間 (43200秒)] を用いて透水係数を算定した。

各試験の試験結果を近似直線、相関係数 (R) と併せて図-3.1.2.6～3.1.2.8に示す。

以上より得られた透水係数を試験条件と合わせて、表-3.1.2.3～3.1.2.5に、また、透水係数と有効拘束圧の関係を図-3.1.2.5に示す。なお有効拘束圧は、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。また、得られた透水係数は、測定時の水温が表-3.1.2.3～3.1.2.5に示すように異なるため、水の粘性係数の違いによる補正係数を掛けて水温15℃に対する補正透水係数を算定し、併せて表中に示した。

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 kgf/cm<sup>2</sup>) において、およそ  $1.42 \times 10^{-7}$  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 kgf/cm<sup>2</sup>) において、約  $3.23 \times 10^{-11}$  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 kgf/cm<sup>2</sup>) において、およそ  $8.85 \times 10^{-11}$  cm/sec である。
- 2) 有効拘束圧10～30 kgf/cm<sup>2</sup>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  $1.45 \times 10^{-7}$  cm/sec、 $3.39 \times 10^{-11}$  cm/sec、 $8.38 \times 10^{-11}$  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 ( $2.5 \text{ kg f/cm}^2$ ) 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 ( $5.3 \text{ kg f/cm}^2$ ) 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。

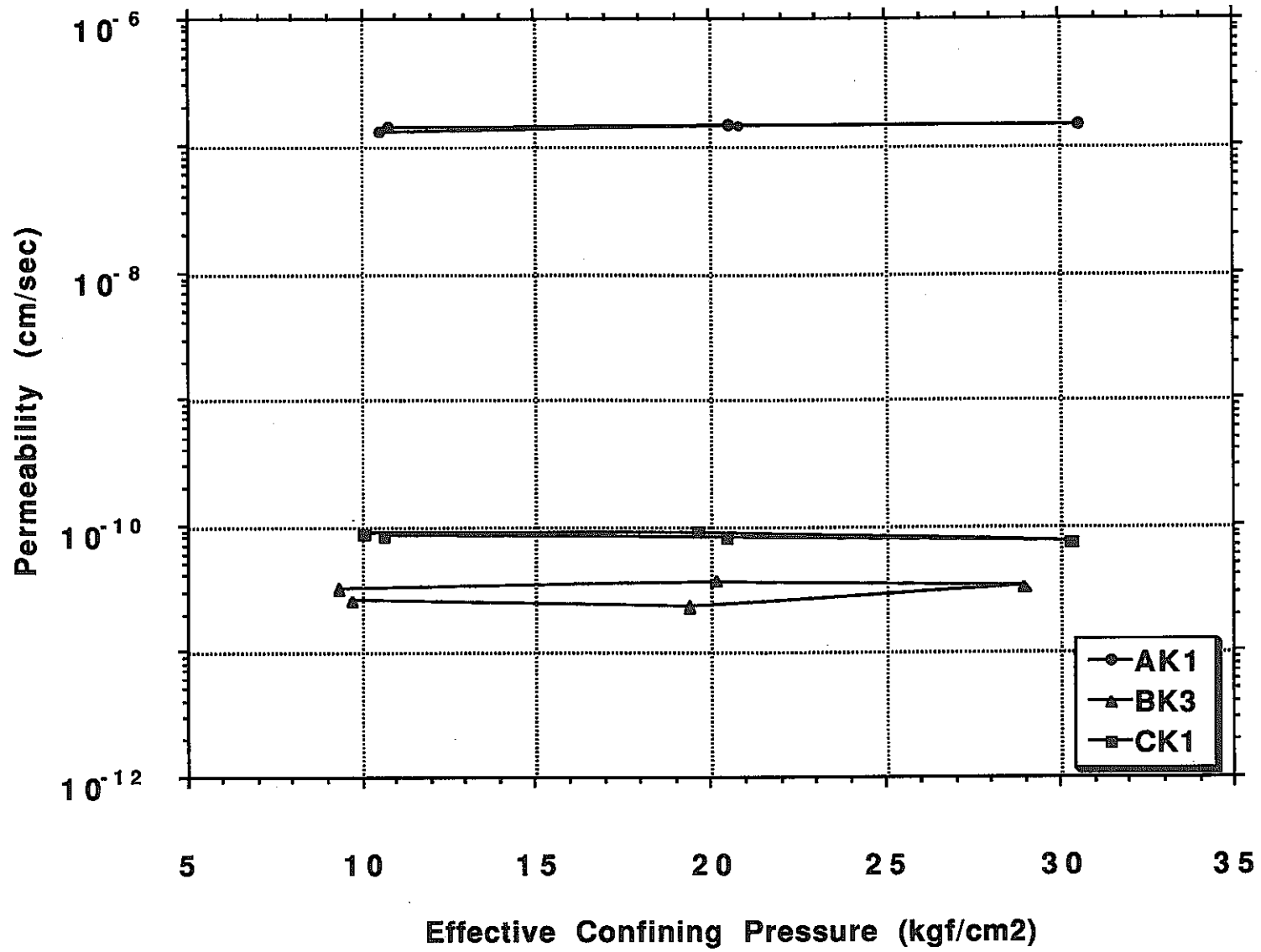
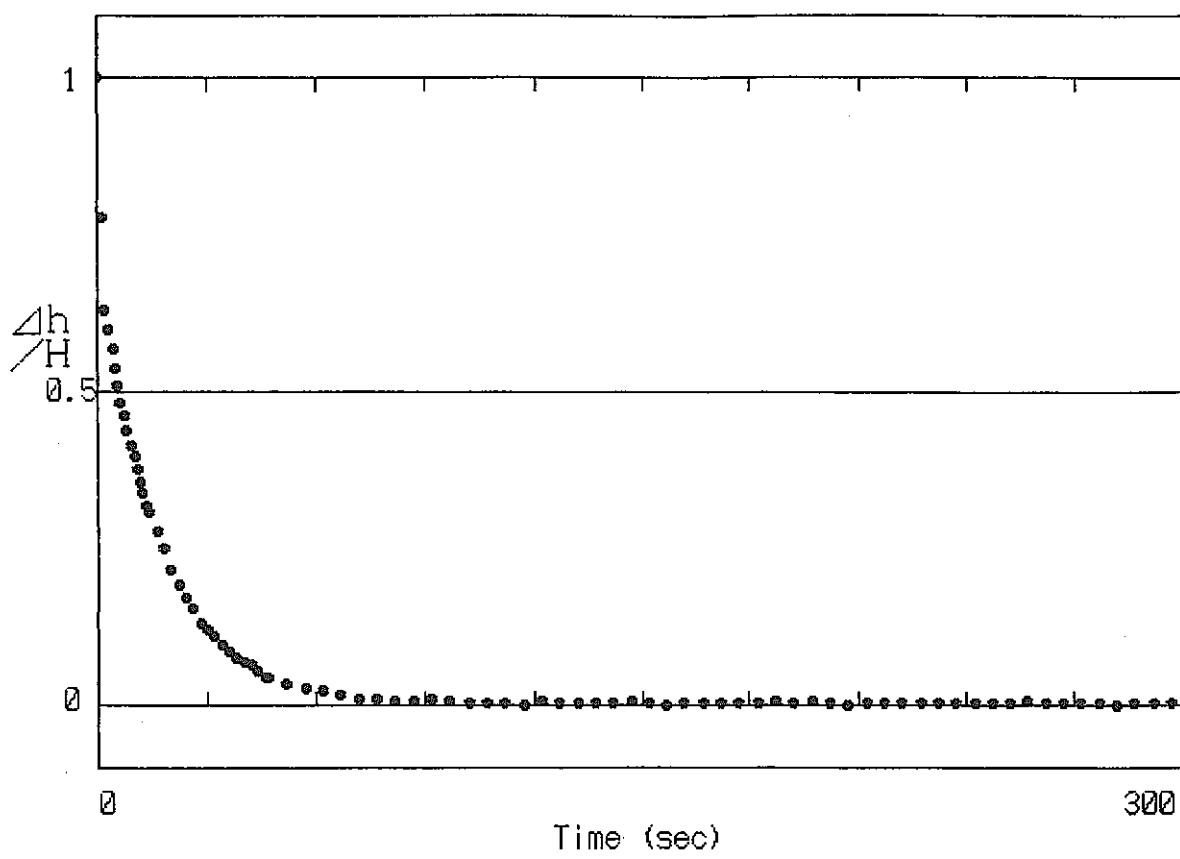
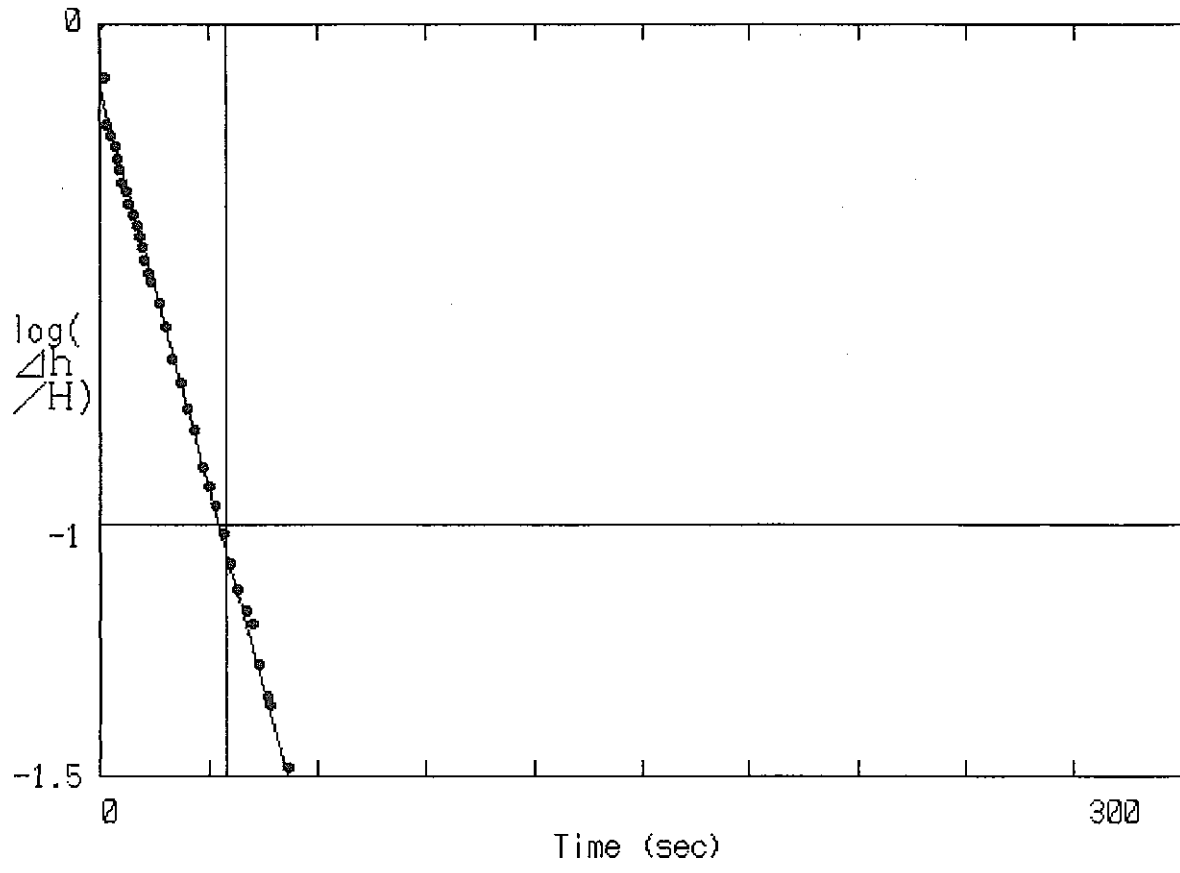


図-3.1.2.5 透水係数と有効拘束圧の関係

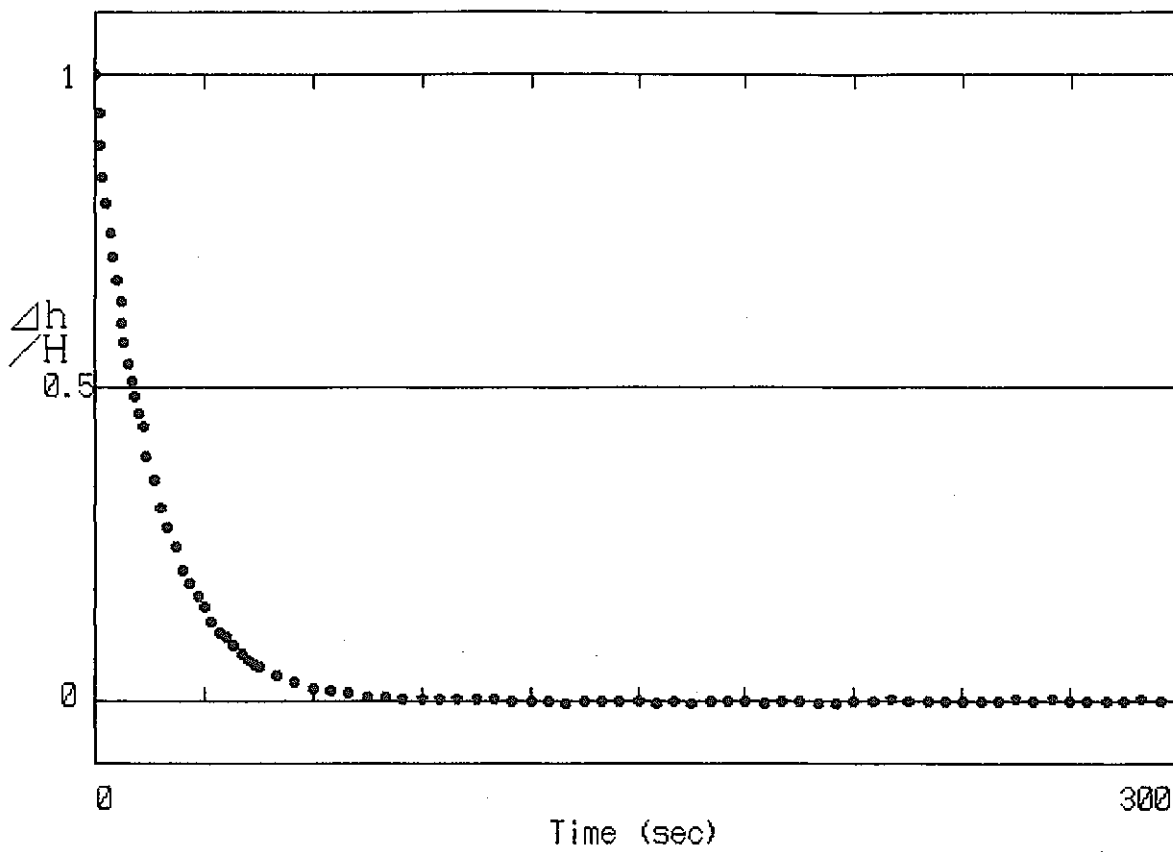


[Data File] #TMDS#AK1-01  
 [Test No.] ak1-01  
 [Specimen] ak1  
 [Condition] 01  
 [Init.Data]  
 H= 2.56752  
 hu= 4.01628  
 hd= 1.44876  
 P.Ax= 12.98  
 P.La= 12.50  
 Temp= 21.40  
 Cut Data After Time ?



[Data File] #TMDS#AK1-01  
 [Test No.] ak1-01  
 [Specimen] ak1  
 [Condition] 01  
 ANALYSIS  
 T= from 0 to 35  
 K (cm/sec) 1.51E-07  
 R=-0.99615

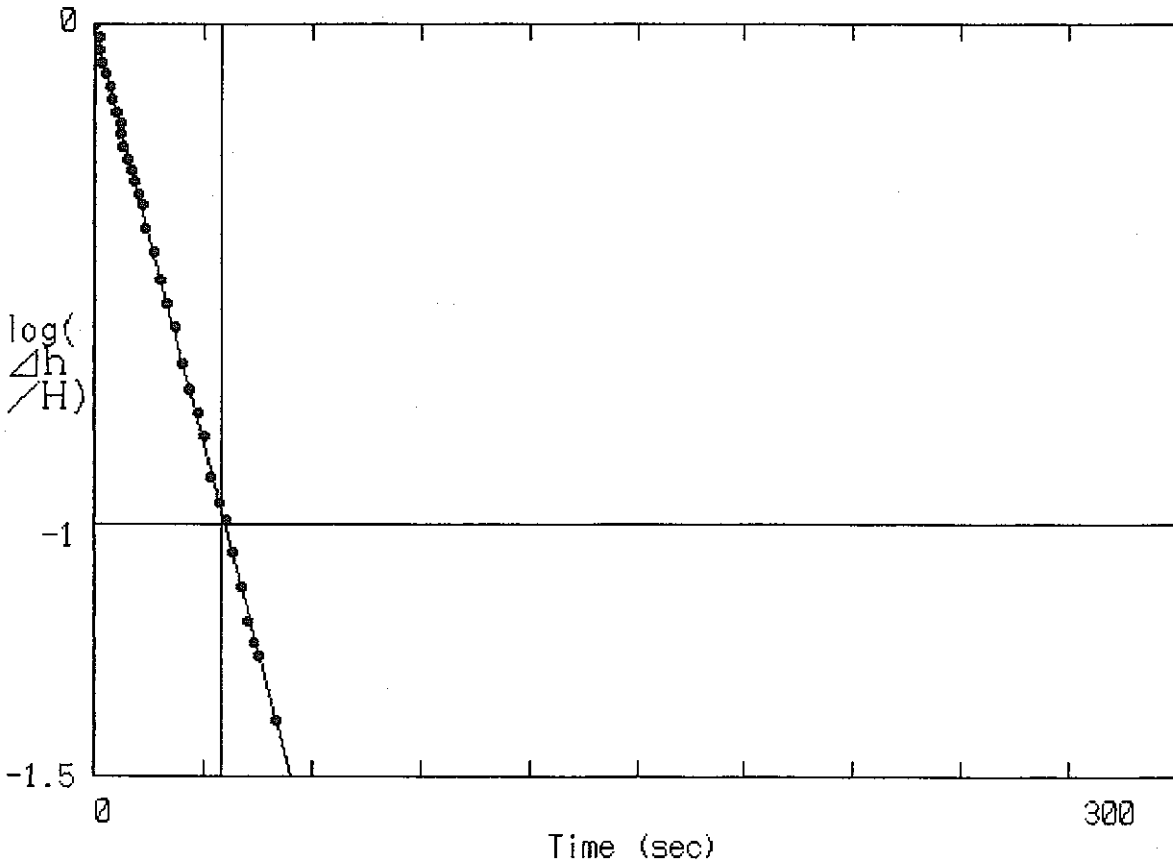
図-3.1.2.6 (a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-01)



[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-02  
 [Test No.]  
 ak1-02  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 02

[Init.Data]  
 H= 2.96998  
 hu= 4.22246  
 hd= 1.25248  
 P.Ax= 22.97  
 P.La= 22.24  
 Temp= 21.30

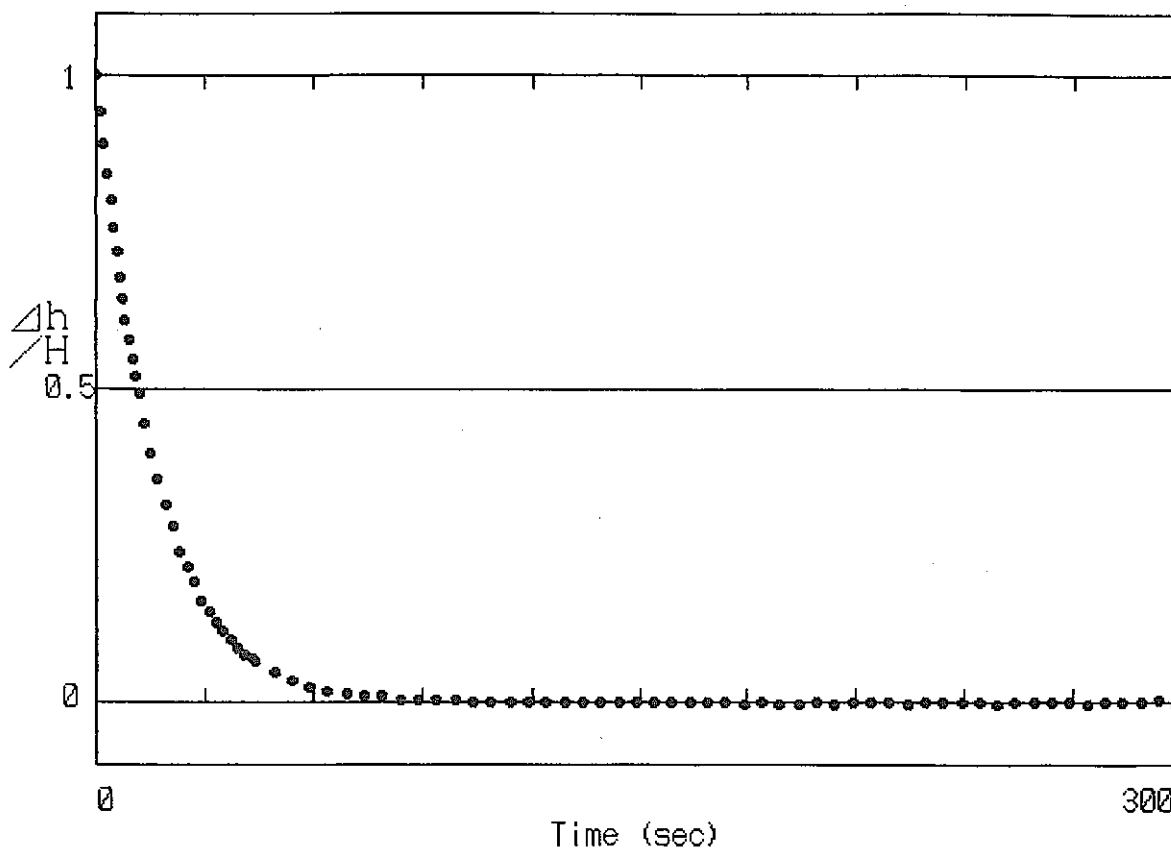
Cut Data  
 After Time  
 ?



[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-02  
 [Test No.]  
 ak1-02  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 02

ANALYSIS  
 T= from  
 0 to  
 35  
 K (cm/sec)  
 1.57E-07  
 R=-0.99964

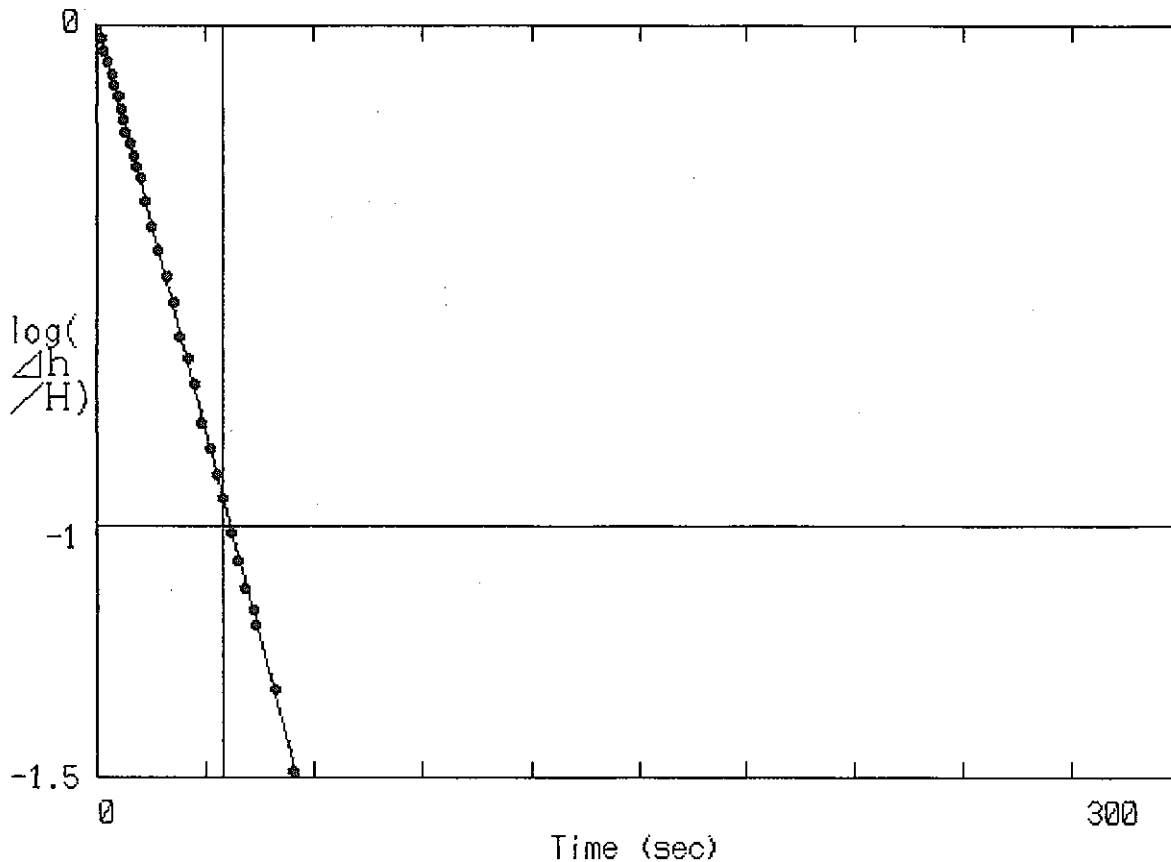
図-3.1.2.6 (b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-02)



[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-03  
 [Test No.]  
 ak1-03  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 03

[Init.Data]  
 H= 3.16676  
 hu= 4.35381  
 hd= 1.18705  
 P.Ax= 32.83  
 P.La= 32.24  
 Temp= 21.10

Cut Data  
 After Time  
 ?

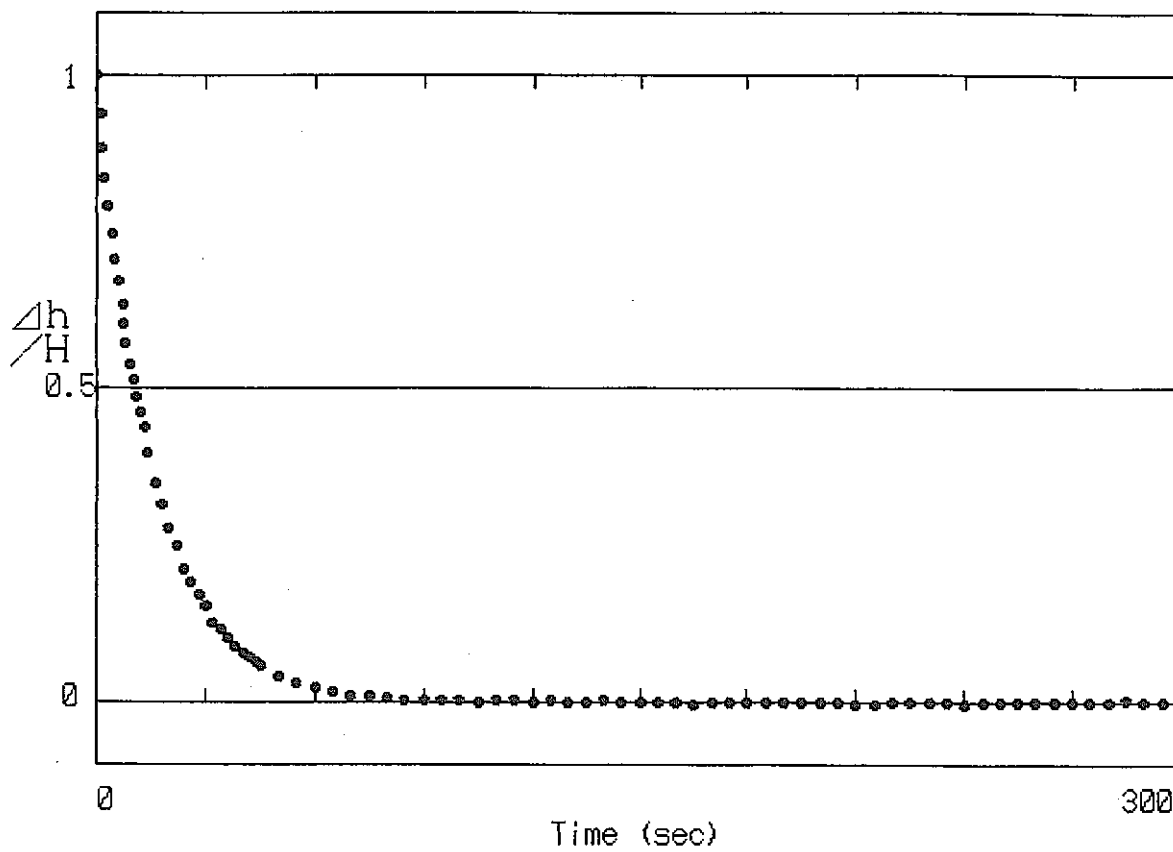


[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-03  
 [Test No.]  
 ak1-03  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 03

ANALYSIS  
 T= from  
 0  
 to  
 35  
 K (cm/sec)  
 1.56E-07  
 R=-0.99968

図-3.1.2.6 (c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-03)

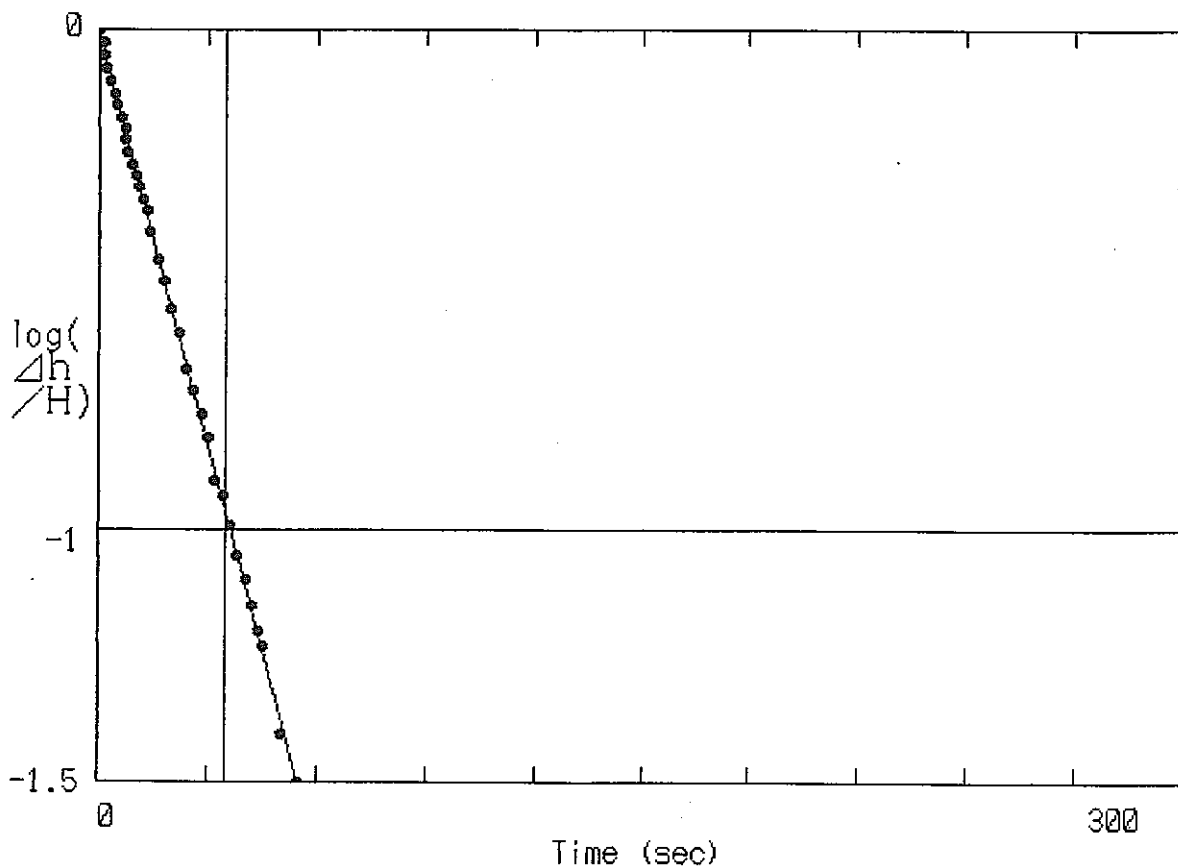




[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-04  
 [Test No.]  
 ak1-04  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 04

[Init.Data]  
 H= 3.11053  
 hu= 4.37235  
 hd= 1.26182  
 P.Ax= 22.85  
 P.La= 22.74  
 Temp= 21.30

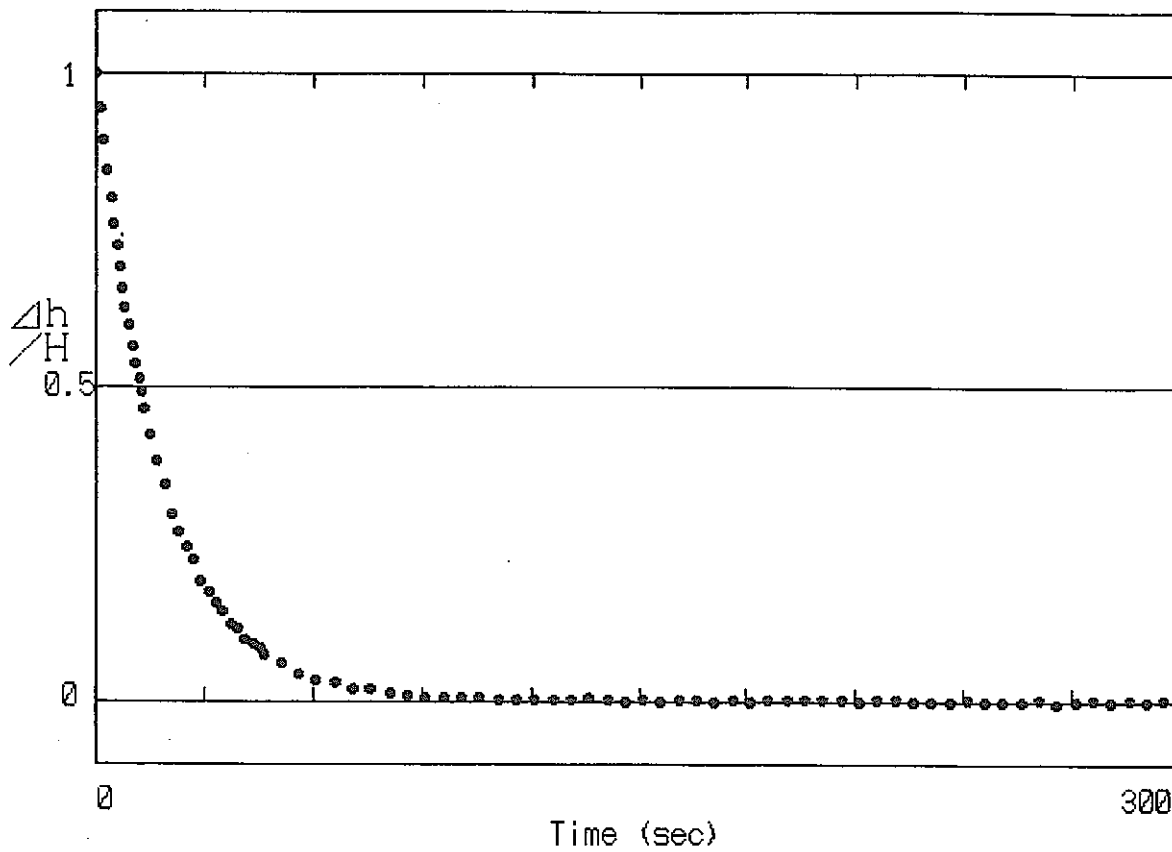
Cut Data  
 After Time  
 ?



[Data File]  
 ¥TMS¥AK1-04  
 [Test No.]  
 ak1-04  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 04

ANALYSIS  
 T= from  
 0 to  
 35  
 K (cm/sec)  
 1.55E-07  
 R=-0.99963

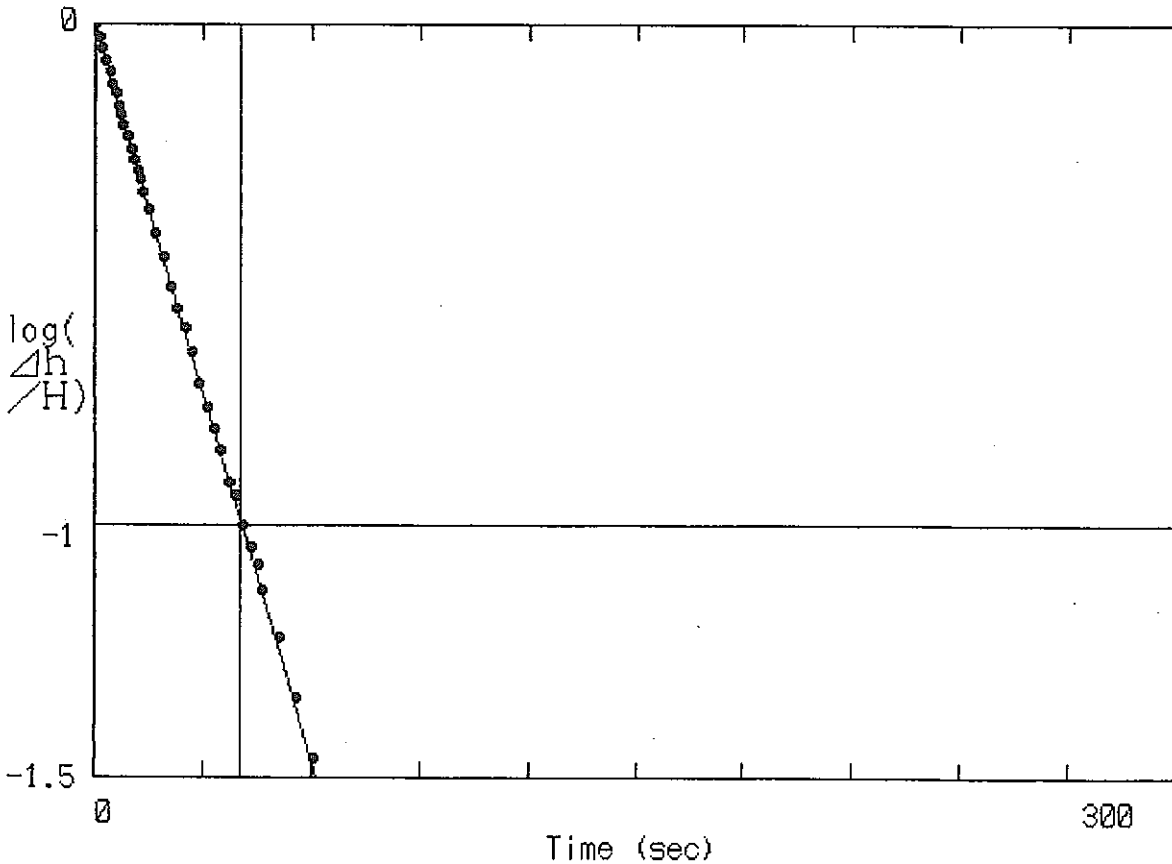
図-3.1.2.6 (d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-04)



[Data File]  
 ¥TMDS¥AK1-05  
 [Test No.]  
 ak1-05  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 05

[Init.Data]  
 H= 2.5719  
 hu= 3.68885  
 hd= 1.11695  
 P.Ax= 13.73  
 P.La= 12.87  
 Temp= 21.00

Cut Data  
 After Time  
 ?



[Data File]  
 ¥TMDS¥AK1-05  
 [Test No.]  
 ak1-05  
 [Specimen]  
 ak1  
 [Condition]  
 05

ANALYSIS  
 T= from  
 0 to  
 40  
 K (cm/sec)  
 1.39E-07  
 R=-0.99978

図-3.1.2.6 (e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (AK1-05)

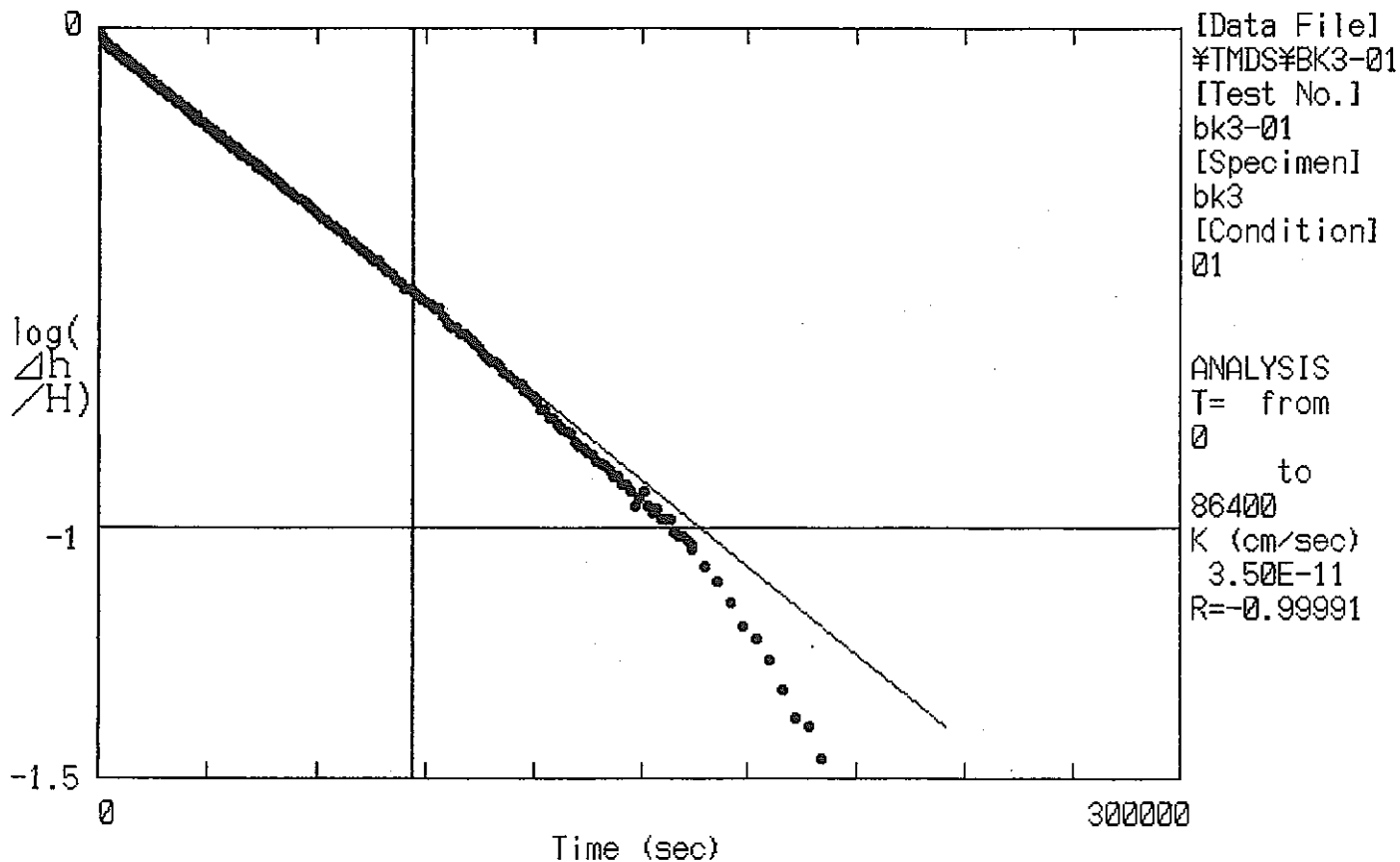
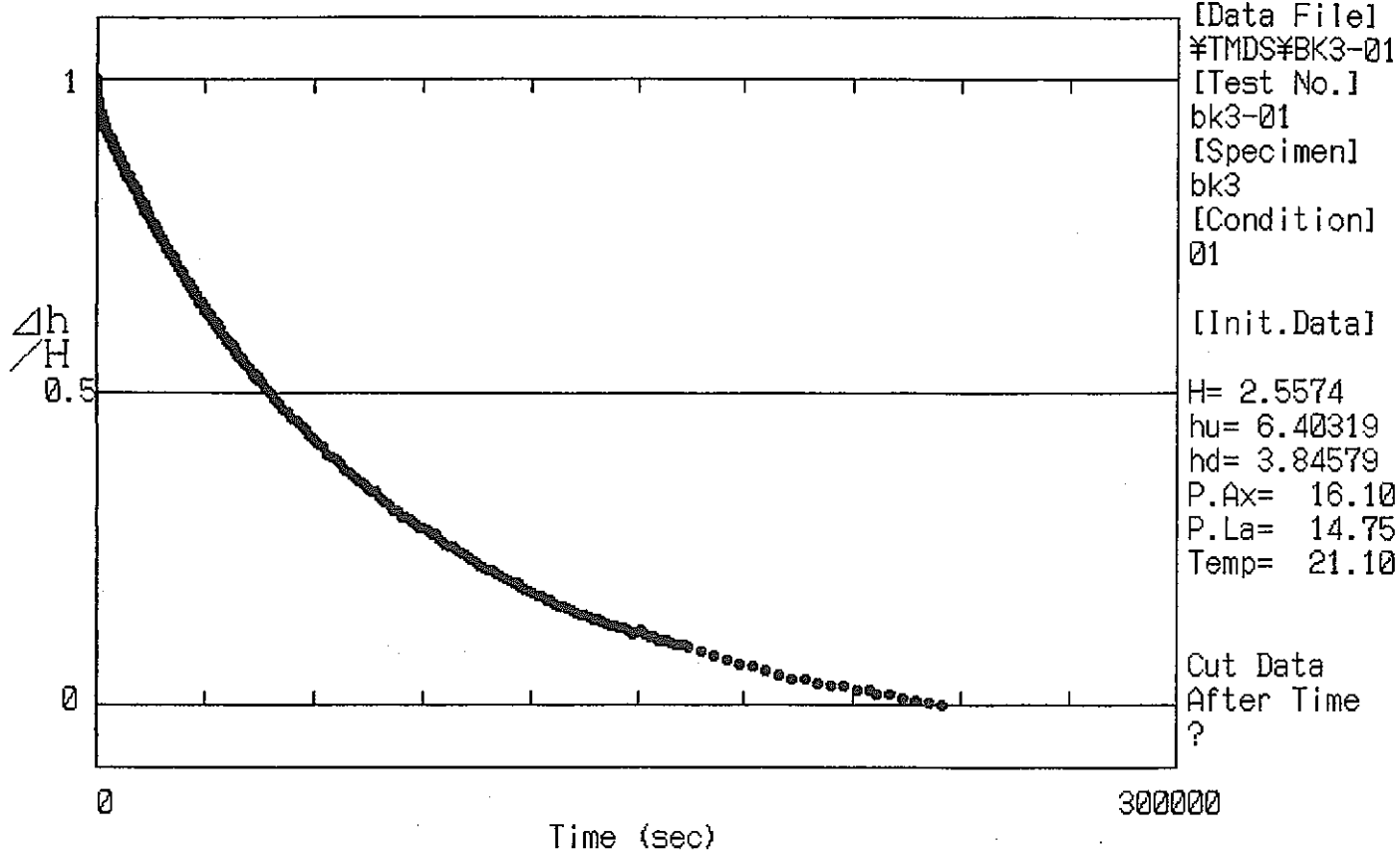


図-3.1.2.7 (a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-01)

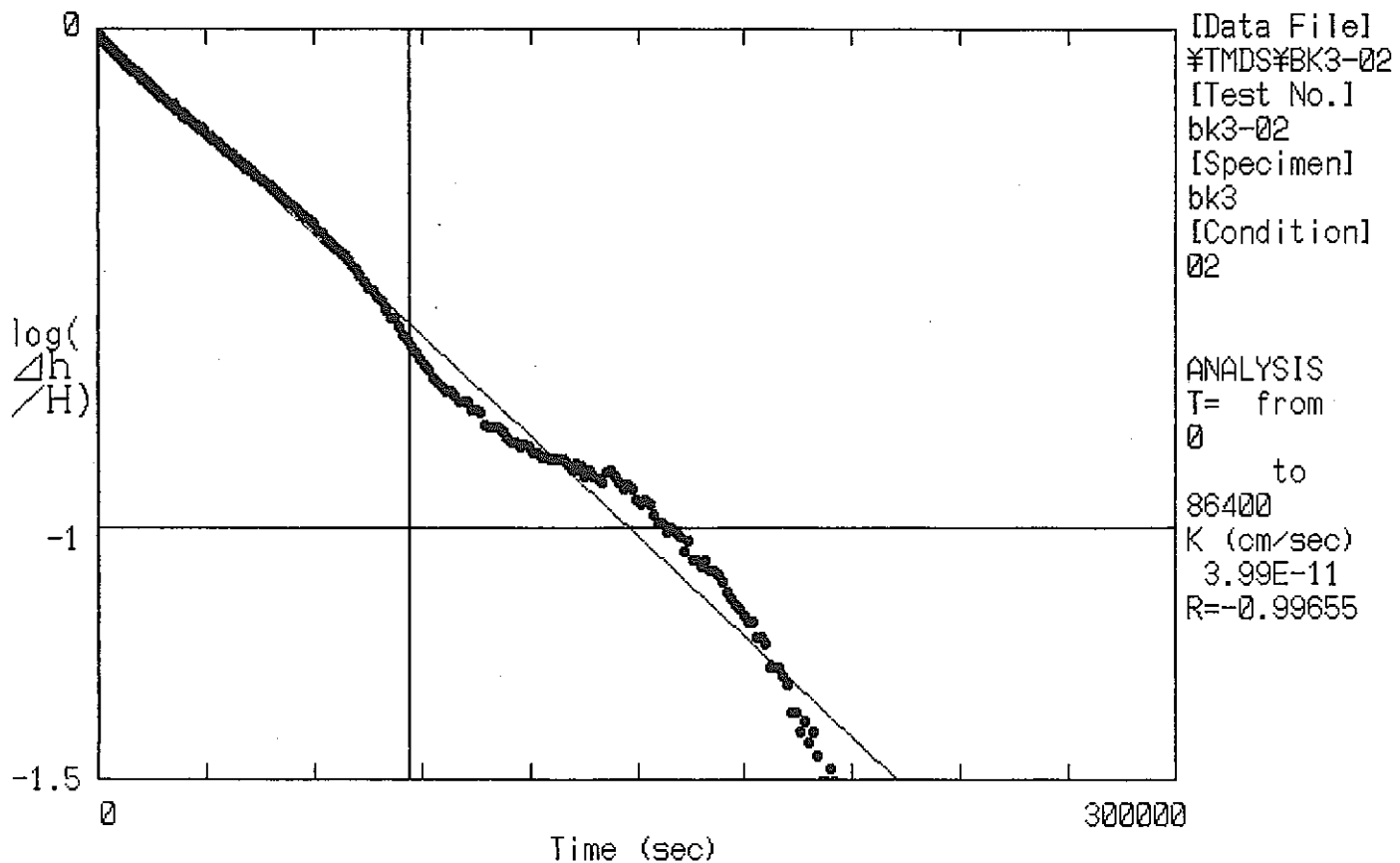
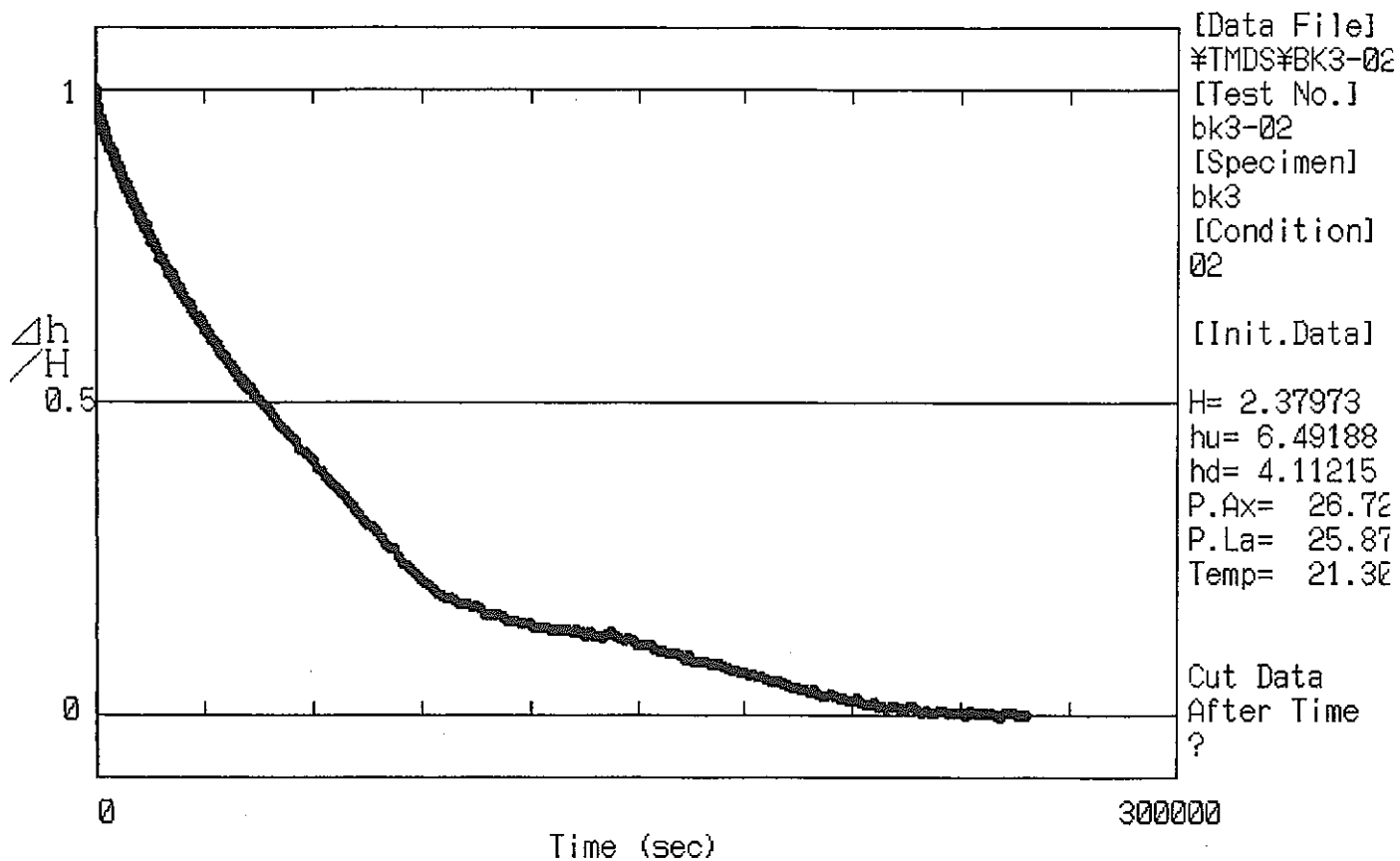


図-3.1.2.7 (b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-02)

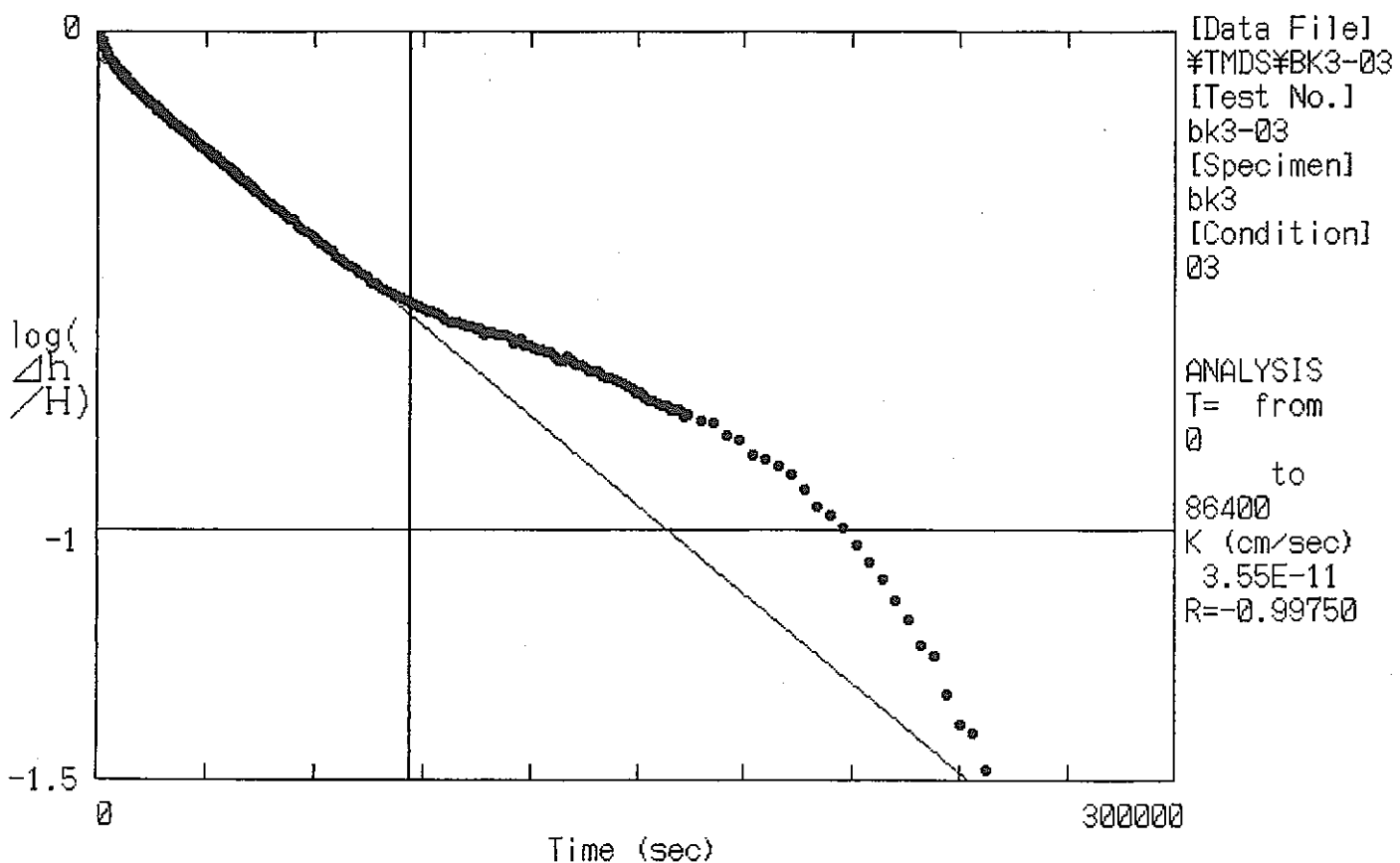
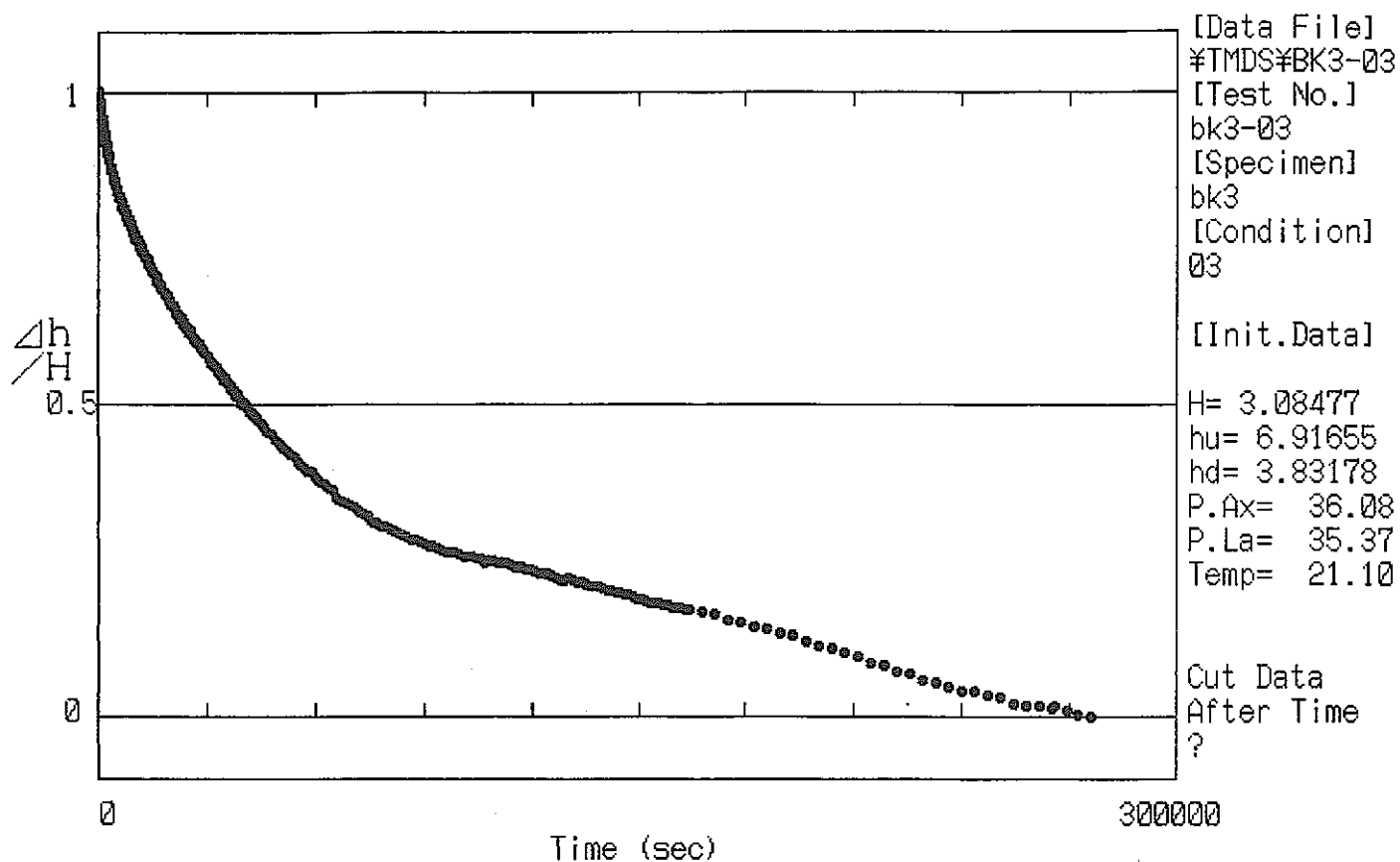


図-3.1.2.7 (c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-03)

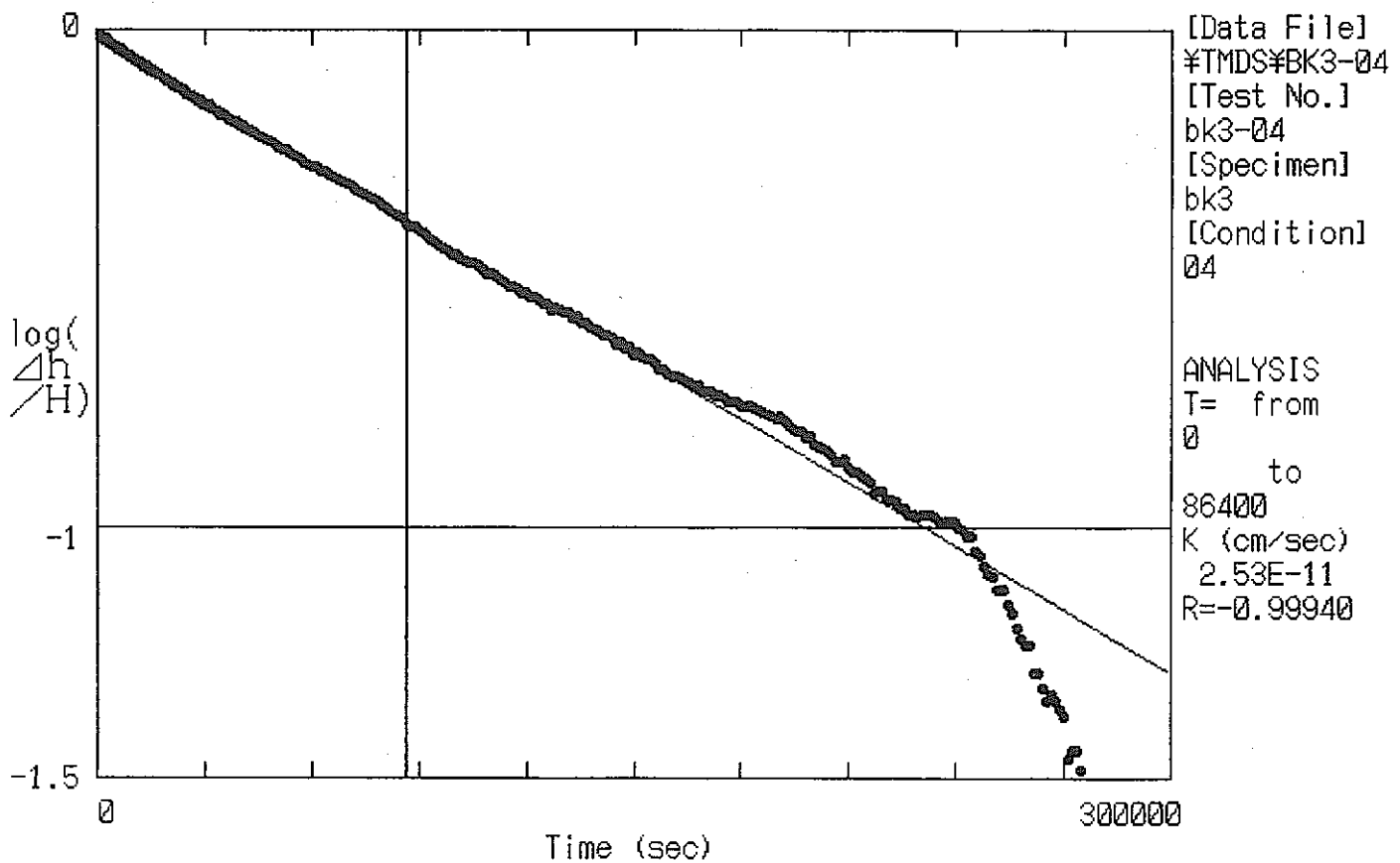
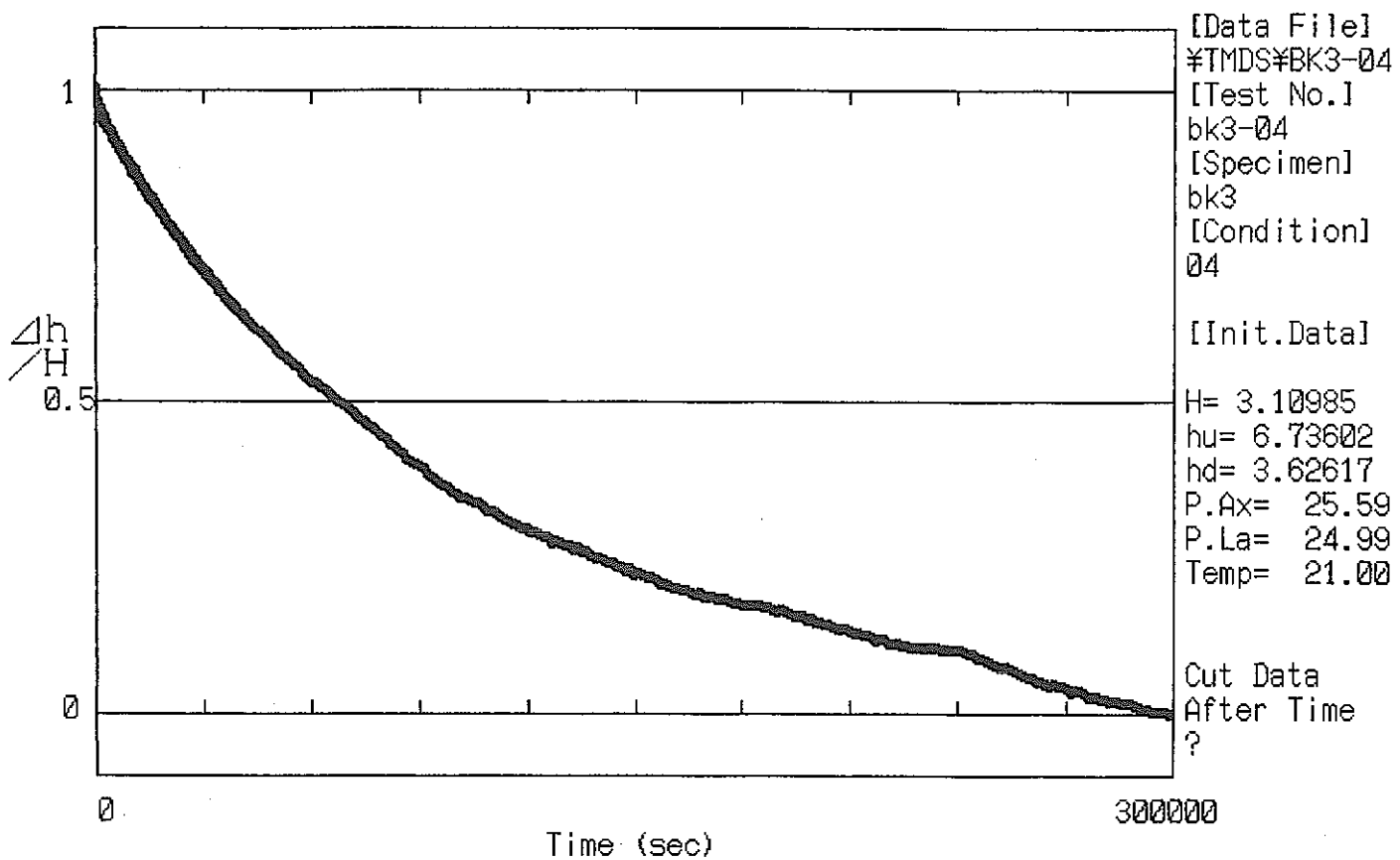


図-3.1.2.7 (d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-04)

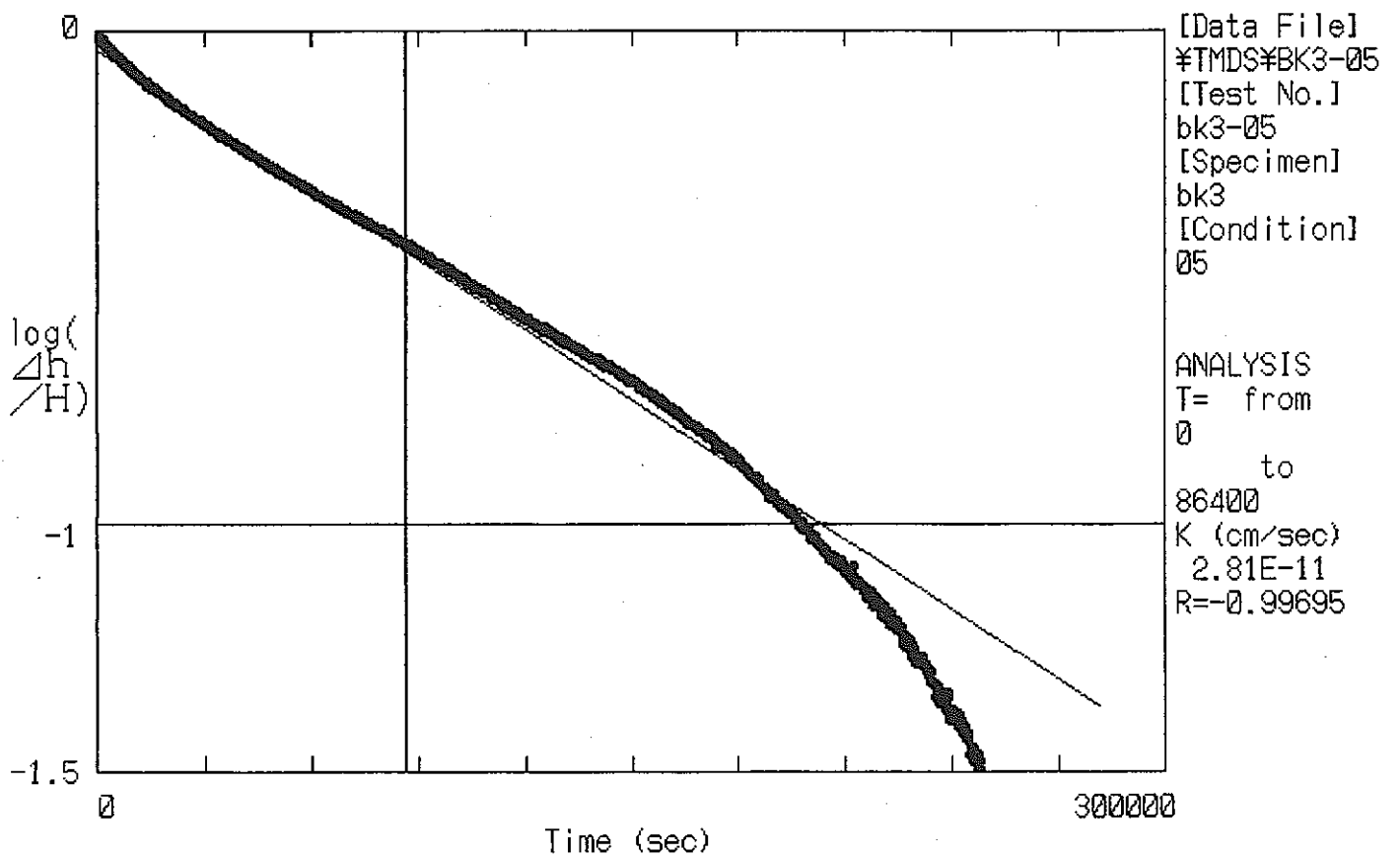
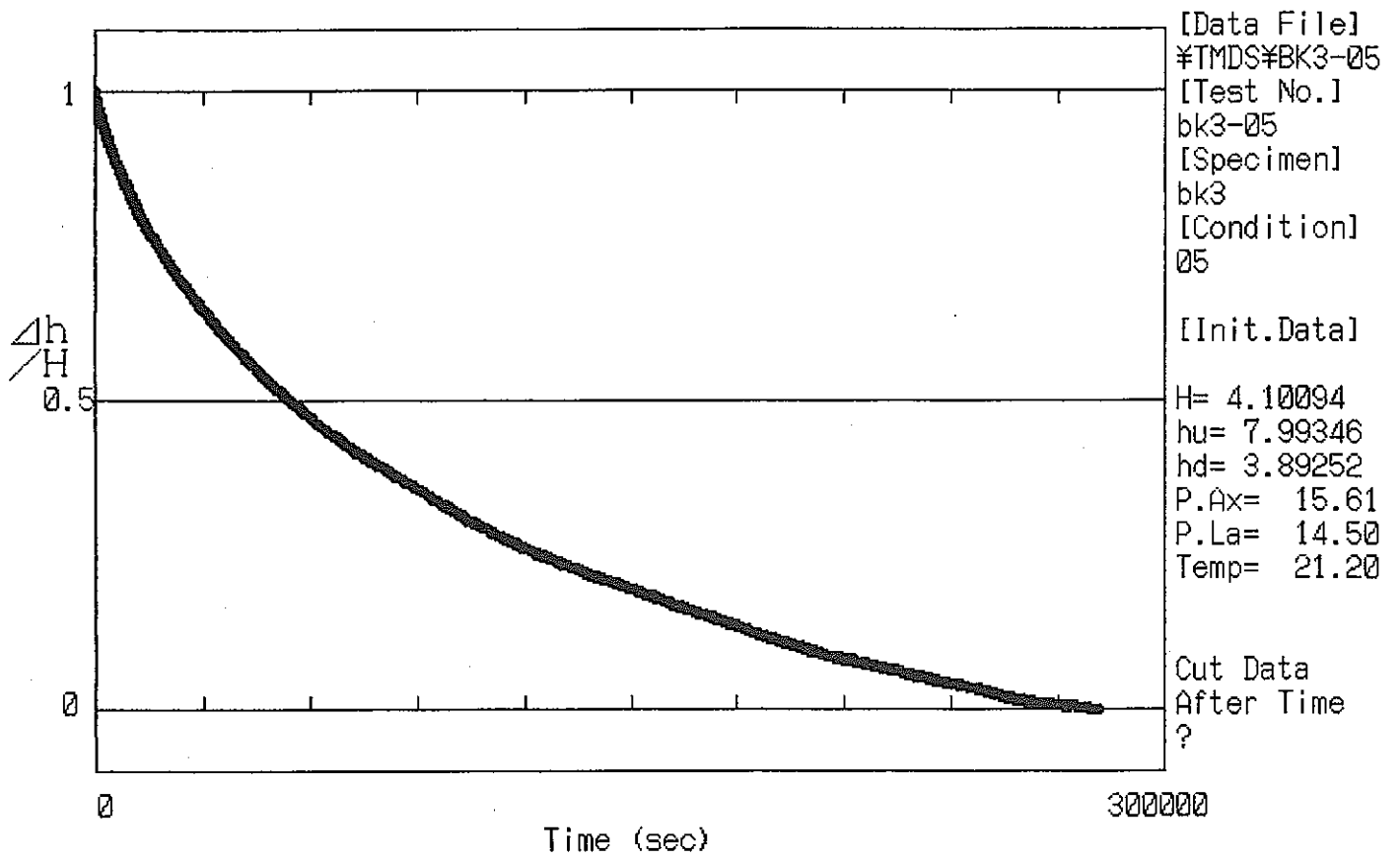


図-3.1.2.7 (e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (BK3-05)

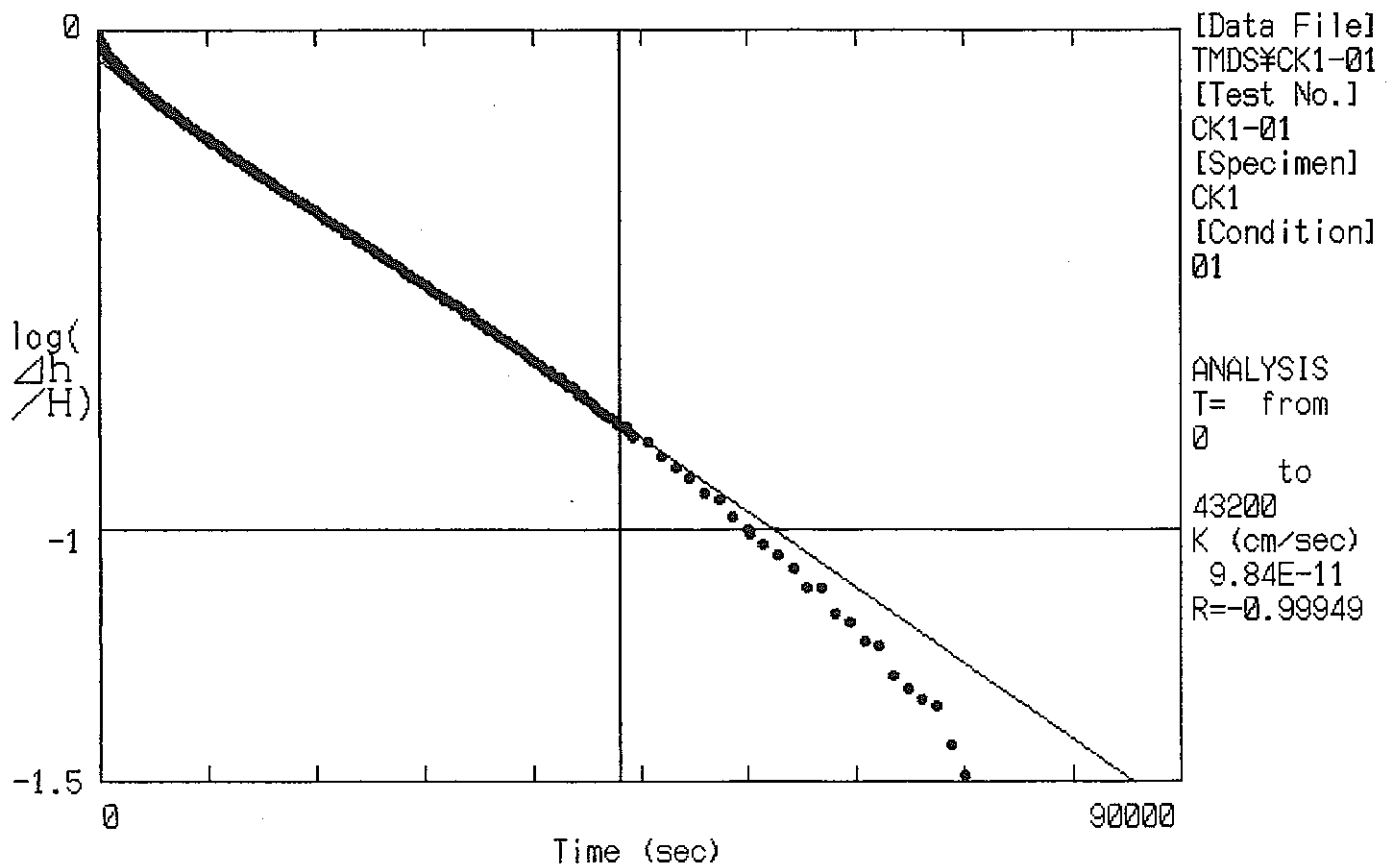
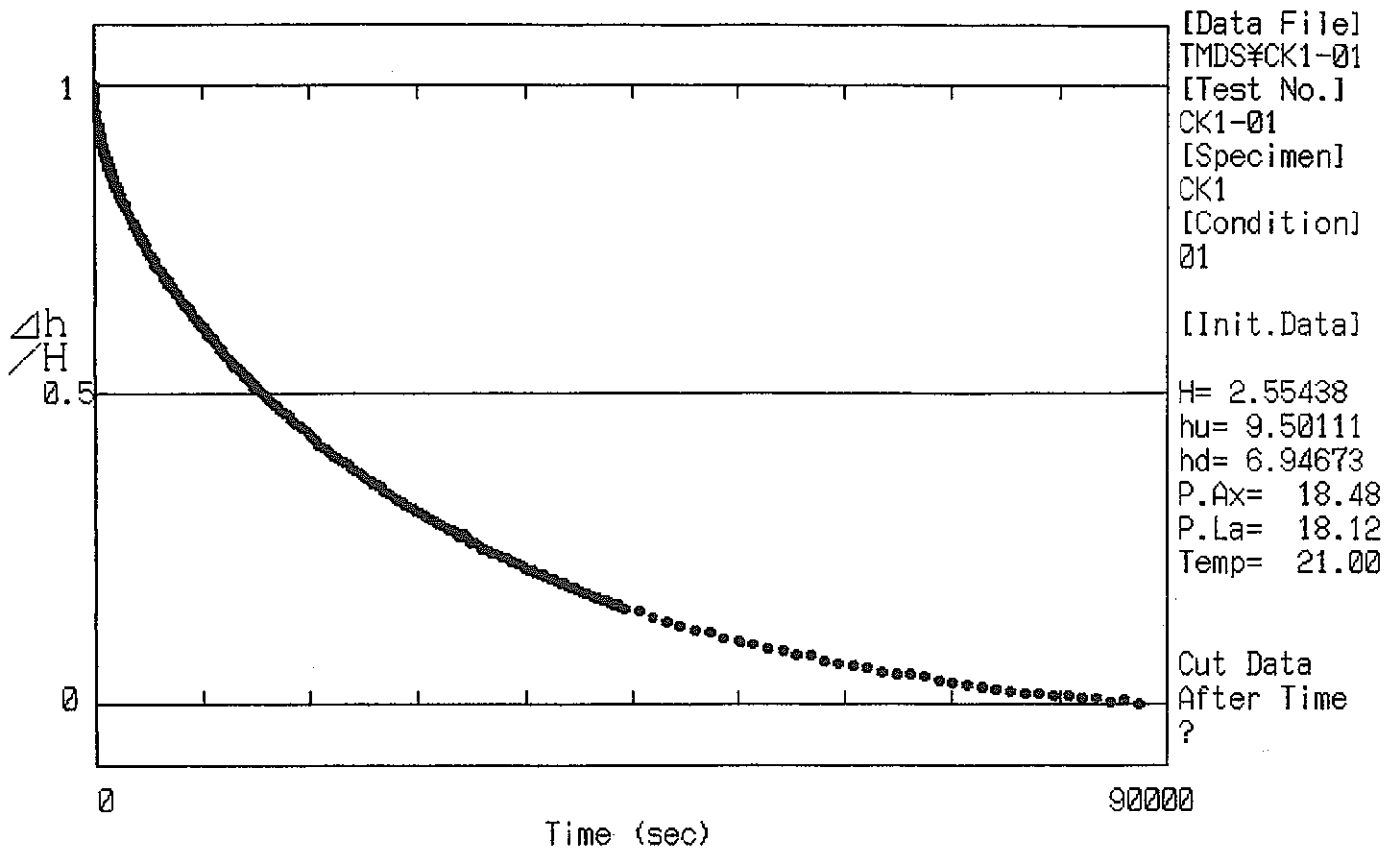
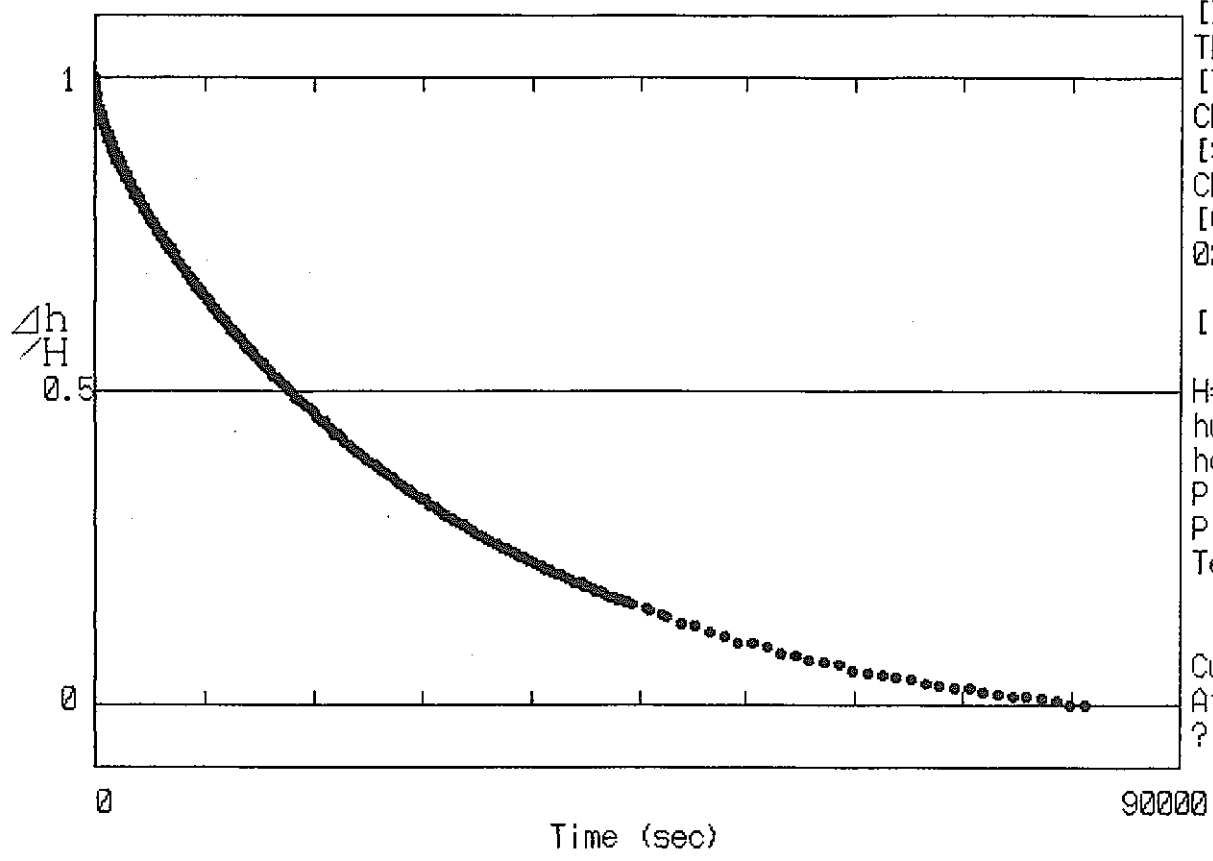
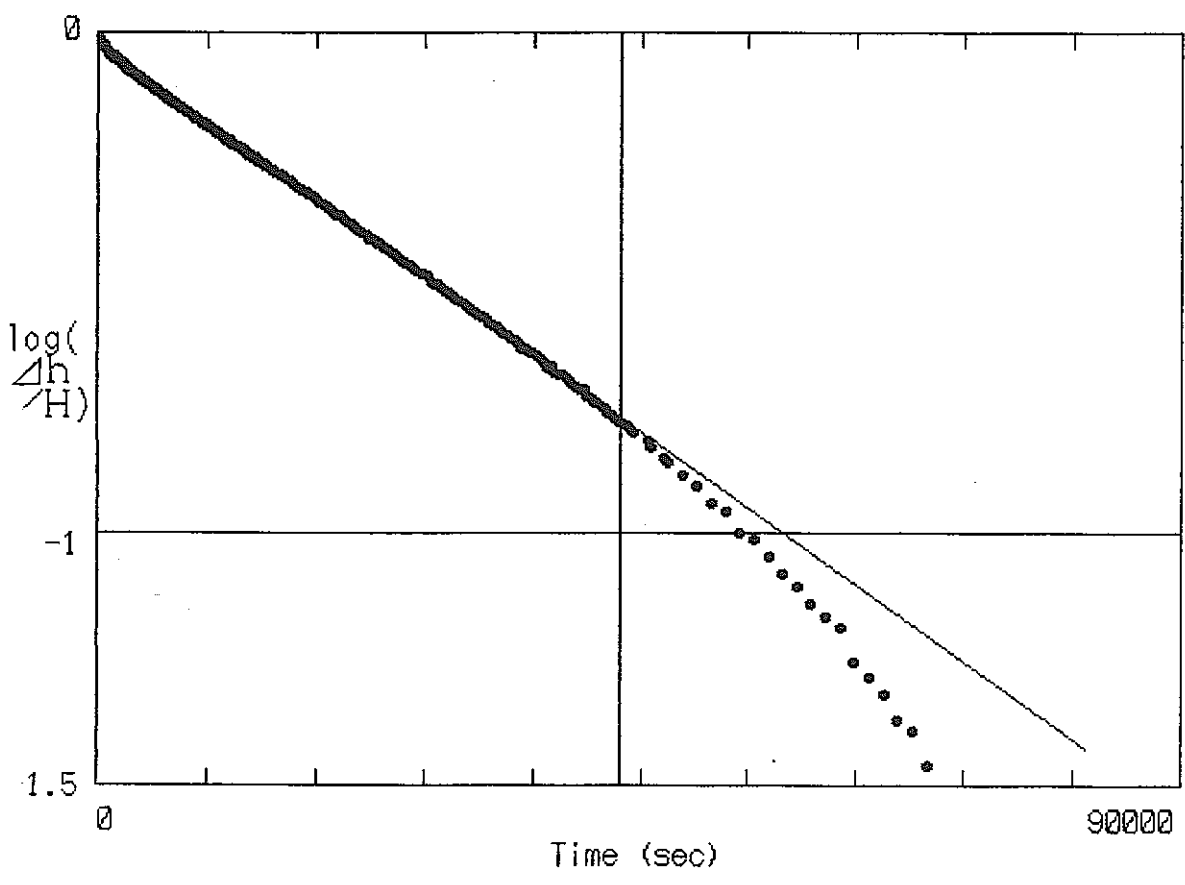


図-3.1.2.8 (a) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-01)





[Data File] TMS¥CK1-02  
 [Test No.] CK1-02  
 [Specimen] CK1  
 [Condition] 02  
 [Init.Data]  
 H= 2.71719  
 hu= 9.91812  
 hd= 7.20093  
 P.Ax= 28.71  
 P.La= 28.12  
 Temp= 20.90  
 Cut Data After Time ?



[Data File] TMS¥CK1-02  
 [Test No.] CK1-02  
 [Specimen] CK1  
 [Condition] 02  
 ANALYSIS  
 T= from 0 to 43200  
 K (cm/sec) 1.00E-10  
 R=-0.99977

図-3.1.2.8 (b) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-02)

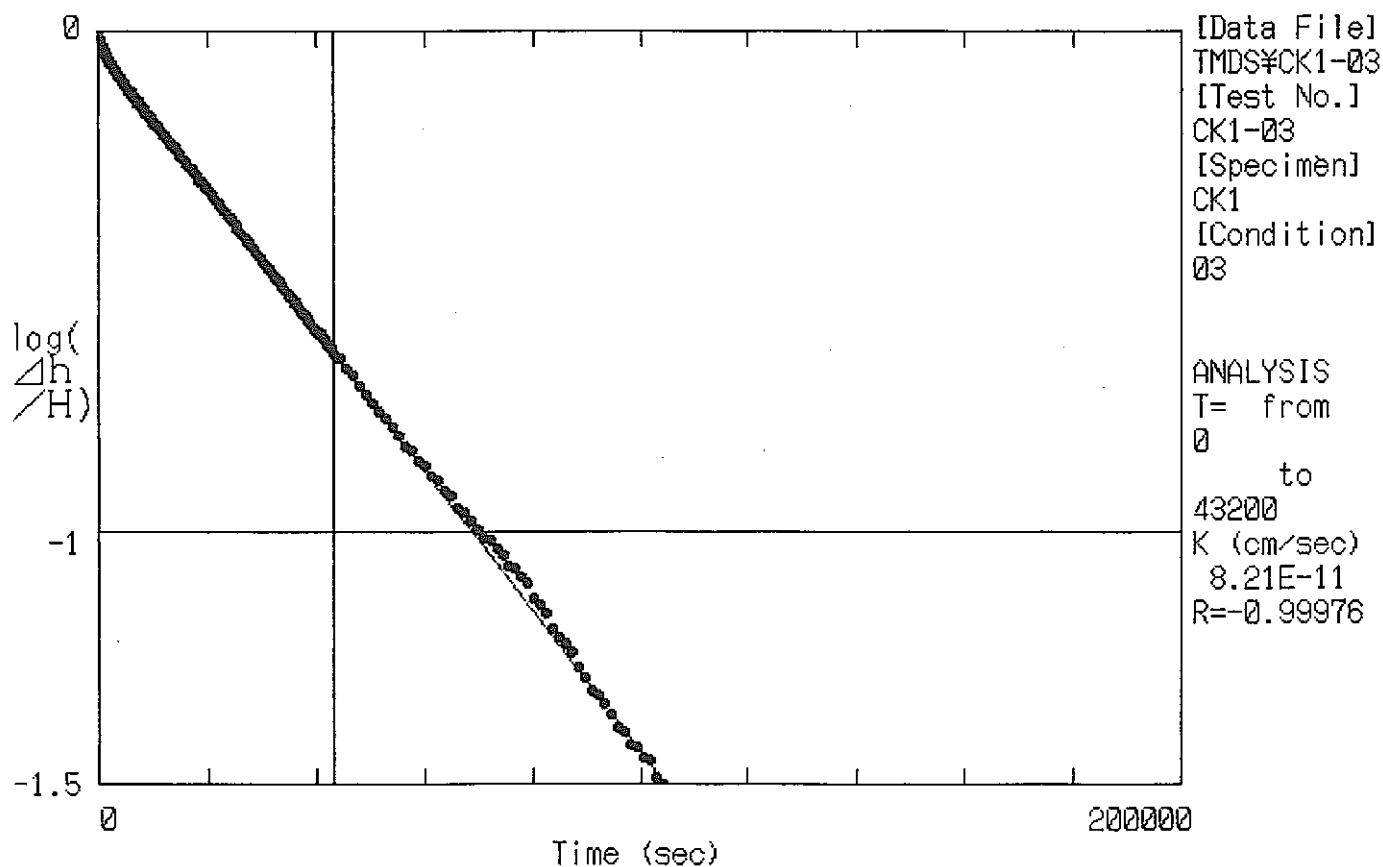
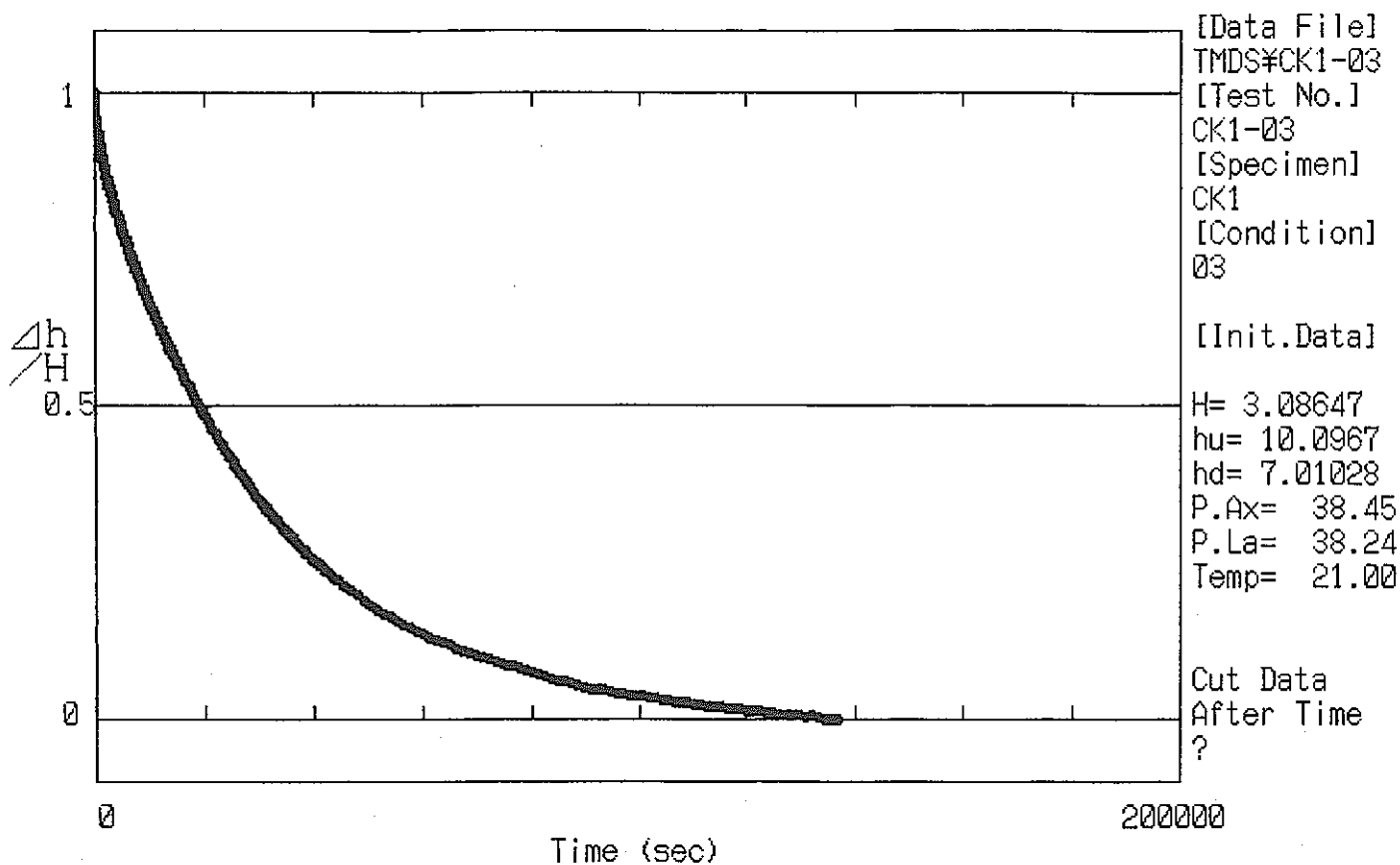


図-3.1.2.8 (c) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-03)

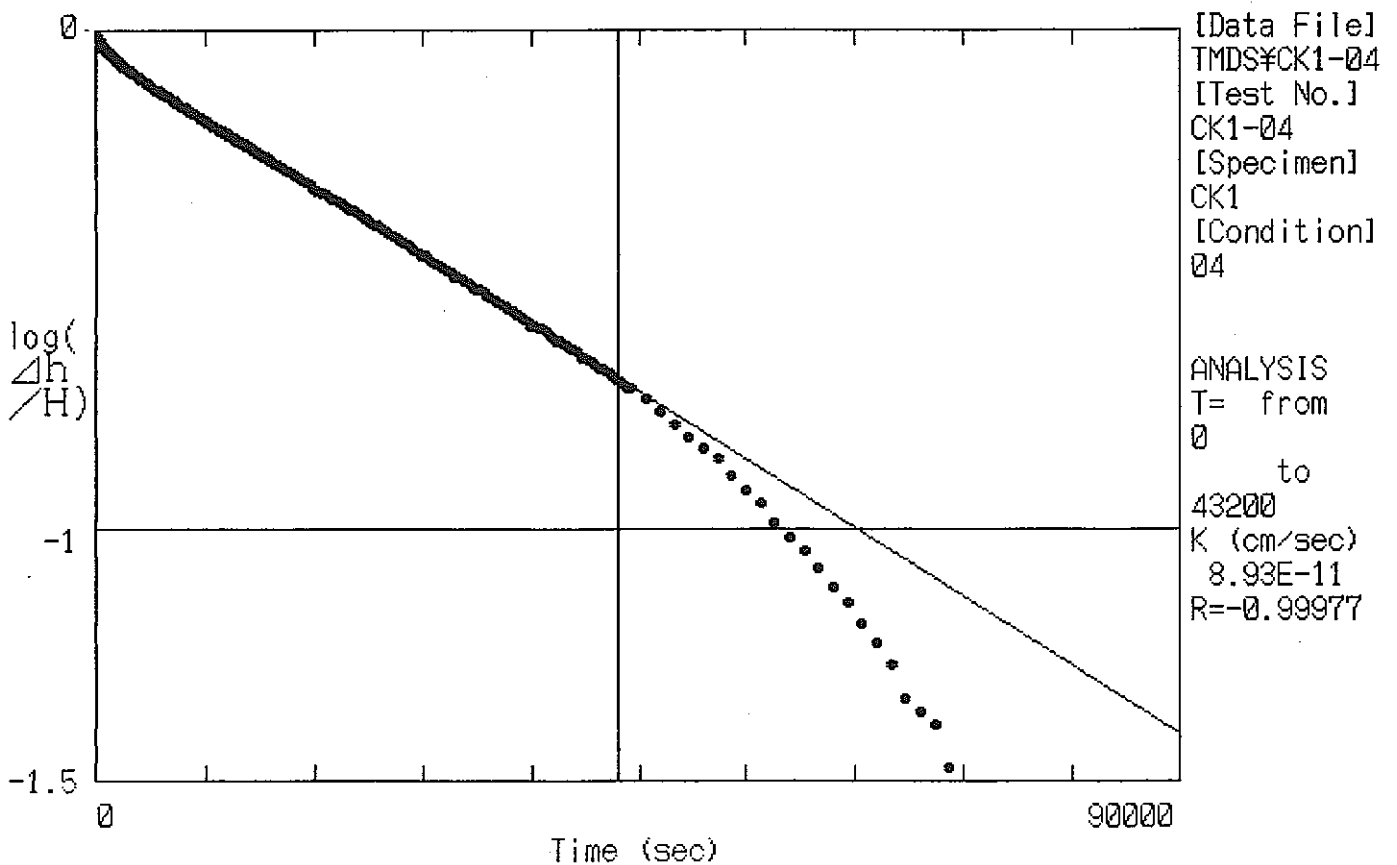
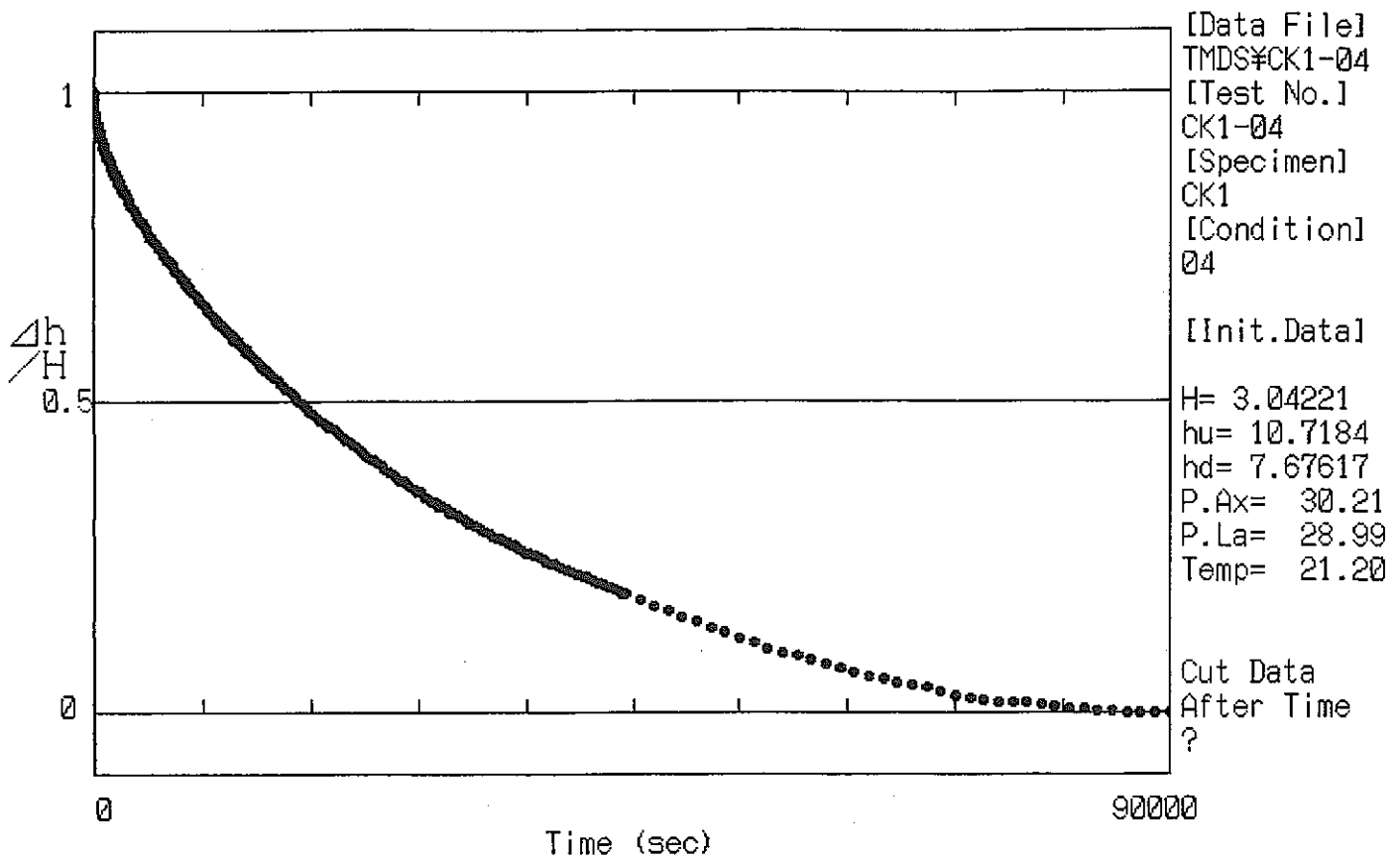


図-3.1.2.8 (d) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-04)

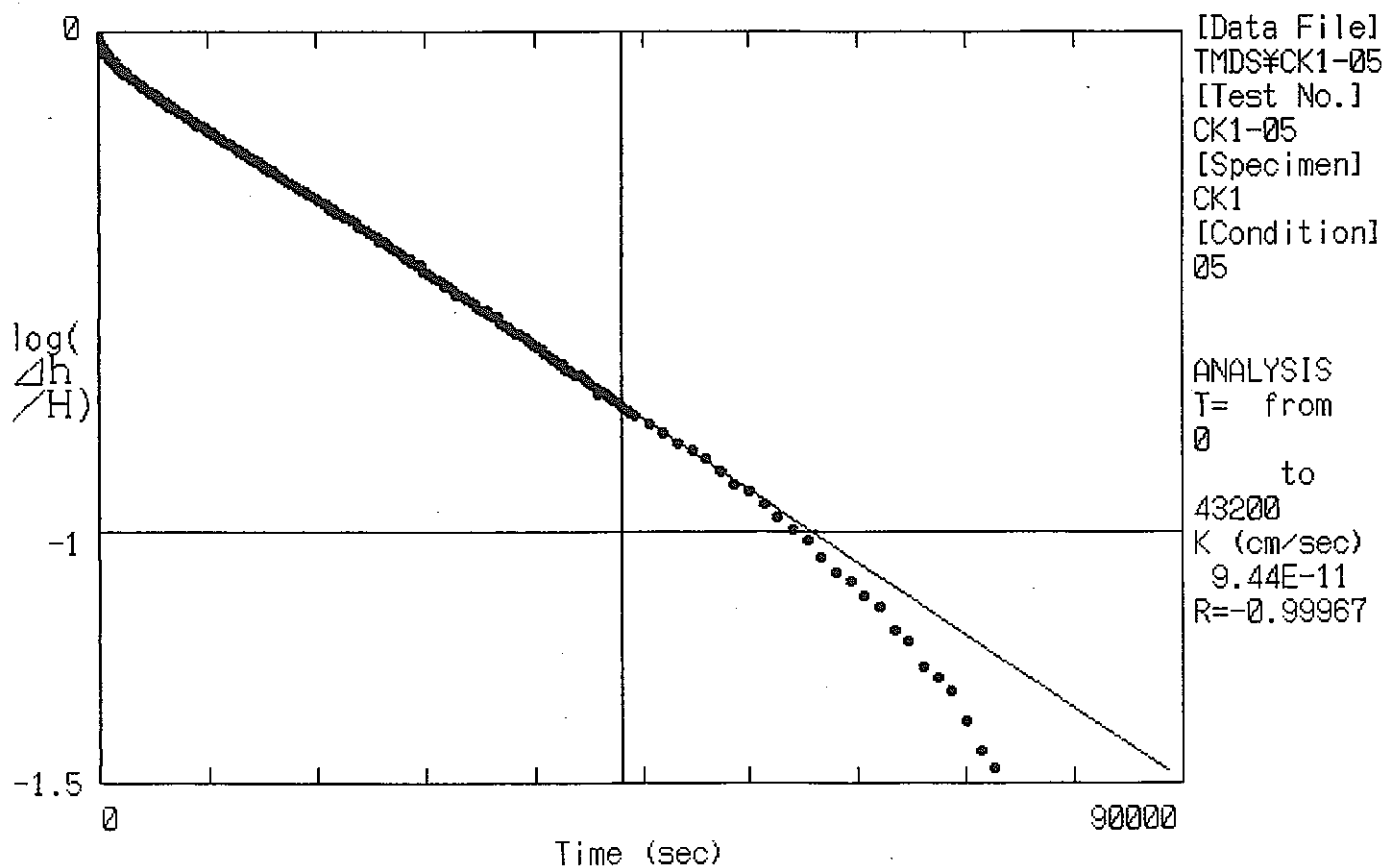
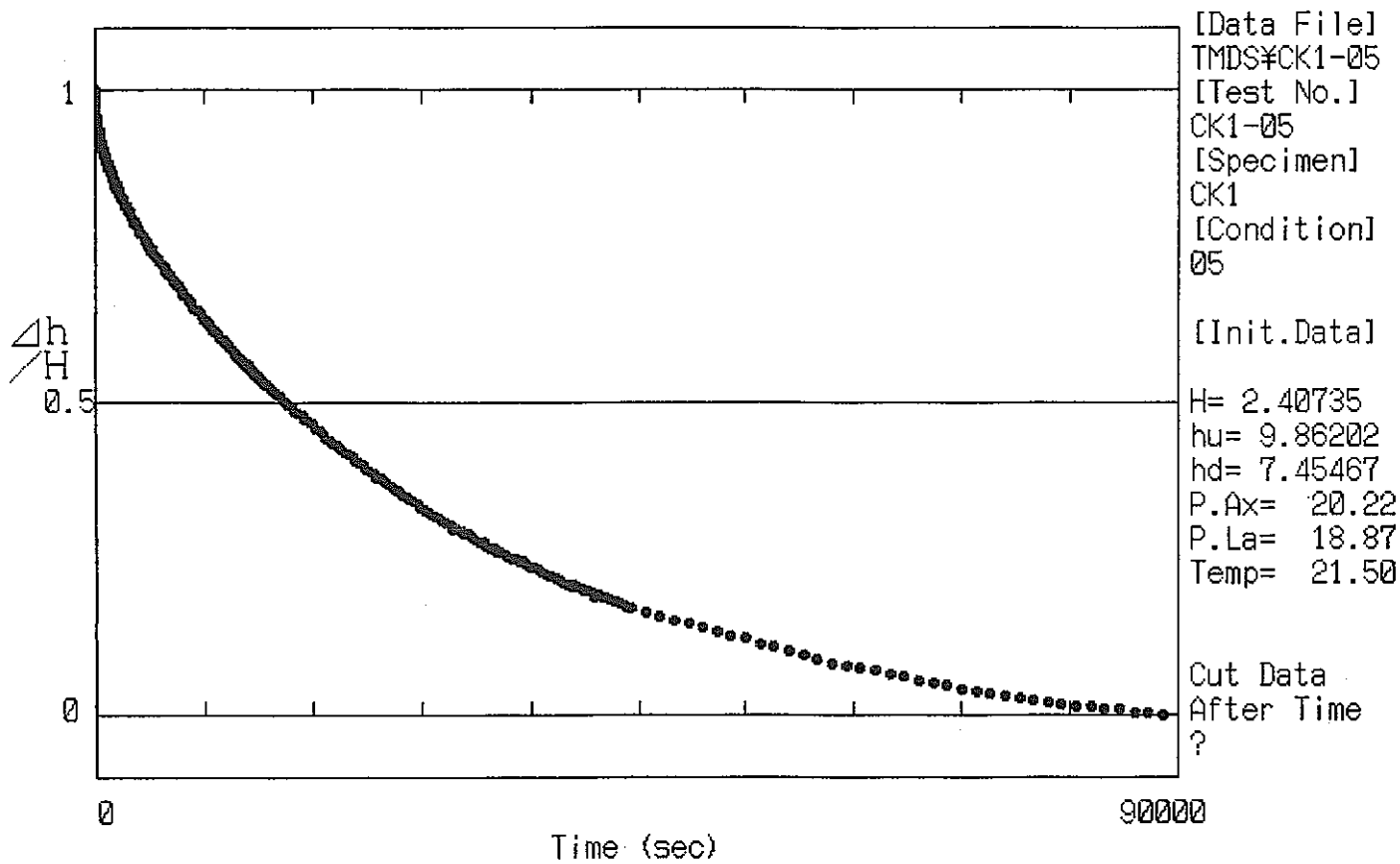


図-3.1.2.8 (e) 水圧の経時変化及びBrace法による解析結果 (CK1-05)

表 - 3.1.2.3 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	パルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(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 10e-7	1.42 x 10e-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 10e-7	1.47 x 10e-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 10e-7	1.46 x 10e-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 10e-7	1.45 x 10e-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 10e-7	1.30 x 10e-7	17.4

・拘束圧は、3軸応力状態を考慮して、以下のように算定した。

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_l)$$

・補正透水係数は水温15°Cに対するものであり、水温T°Cに対する透水係数(実験結果)に水の粘性の違いによる補正係数を掛けて以下のように算定した。

$$k_{15} = k_T \cdot \eta_T / \eta_{15}$$

ここに  $\eta_T$ 、 $\eta_{15}$  は T°C、15°Cにおける水の粘性係数

表 - 3.1.2.4 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	パルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(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	3.50x10e-11	3.23 x 10e-11	18.1
BK3-02 (上昇時)	26.72	25.87	26.15	6.49	4.11	2.38	6.04	20.11	3.99x10e-11	3.68 x 10e-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	3.55x10e-11	3.28 x 10e-11	18.0
BK3-04 (下降時)	25.59	24.99	25.19	6.74	3.63	3.11	5.86	19.33	2.53x10e-11	2.33 x 10e-11	18.1
BK3-05 (下降時)	15.61	14.50	14.87	7.99	3.89	4.10	5.23	9.64	2.81x10e-11	2.60 x 10e-11	18.0

・拘束圧は、3軸応力状態を考慮して、以下のように算定した。

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_l)$$

・補正透水係数は水温15°Cに対するものであり、水温T°Cに対する透水係数(実験結果)に水の粘性の違いによる補正係数を掛けて以下のように算定した。

$$k_{15} = k_T \cdot \eta_T / \eta_{15}$$

ここに  $\eta_T$ 、 $\eta_{15}$  は T°C、15°Cにおける水の粘性係数

表 - 3.1.2.5 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	パルス圧	収束水圧	有効拘束圧	透水係数	補正透水係数	水温
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(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	9.84x10e-11	8.85 x 10e-11	19.1
CK1-02 (上昇時)	28.71	28.12	28.32	9.92	7.20	2.72	8.74	19.60	1.00x10e-10	8.97 x 10e-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	8.21x10e-11	7.41 x 10e-11	19.0
CK1-04 (下降時)	30.21	28.99	29.40	10.72	7.68	3.04	8.97	20.42	8.93x10e-11	8.04 x 10e-11	19.1
CK1-05 (下降時)	20.22	18.87	19.32	9.86	7.45	2.41	8.71	10.61	9.44x10e-11	8.47 x 10e-11	19.2

・拘束圧は、3軸応力状態を考慮して、以下のように算定した。

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_l)$$

・補正透水係数は水温15℃に対するものであり、水温T℃に対する透水係数(実験結果)に水の粘性の違いによる補正係数を掛けて以下のように算定した。

$$k_{15} = k_T \cdot \eta_T / \eta_{15}$$

ここに $\eta_T$ 、 $\eta_{15}$ はT℃、15℃における水の粘性係数

## (5) 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 $1.42 \times 10^{-7}$  cm/sec (有効拘束圧：約 $4.5$  kg f/cm<sup>2</sup>)
- ・土岐夾炭累層上部層 約 $3.23 \times 10^{-11}$  cm/sec (有効拘束圧：約 $6.5$  kg f/cm<sup>2</sup>)
- ・土岐夾炭累層下部層 約 $8.85 \times 10^{-11}$  cm/sec (有効拘束圧：約 $9.5$  kg f/cm<sup>2</sup>)

### 2) 拘束圧と透水係数の関係

- ・有効拘束圧 $10 \sim 30$  kg f/cm<sup>2</sup>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<sup>2</sup>) 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<sup>2</sup>) 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。



### 3.1.3 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) 測定装置

図-3.1.3.1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・ソニックピュアModel-5217A）を用いた。

パルス波形は矩形波で、パルス幅は $200\mu\text{s}$ 以下である。増幅部の周波数は1~80kHzで、カットオフ周波数40kHzのローパスフィルターを有する。P波およびS波の振動子の寸法は $\phi 60\text{mm} \times 32\text{mm}$ で、インピーダンスはそれぞれ $50\Omega$ および $5000\Omega$ である。

#### (3) 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 $0.5\text{kg/cm}^2$ 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-3.1.3.2に示す。

また、2.2.2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 $0.5\text{kg/cm}^2$ 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 $0.1\mu\text{sec}$ 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超音波伝播速度は供試体の高さ $h$ と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)

$\rho_t$  : 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

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。

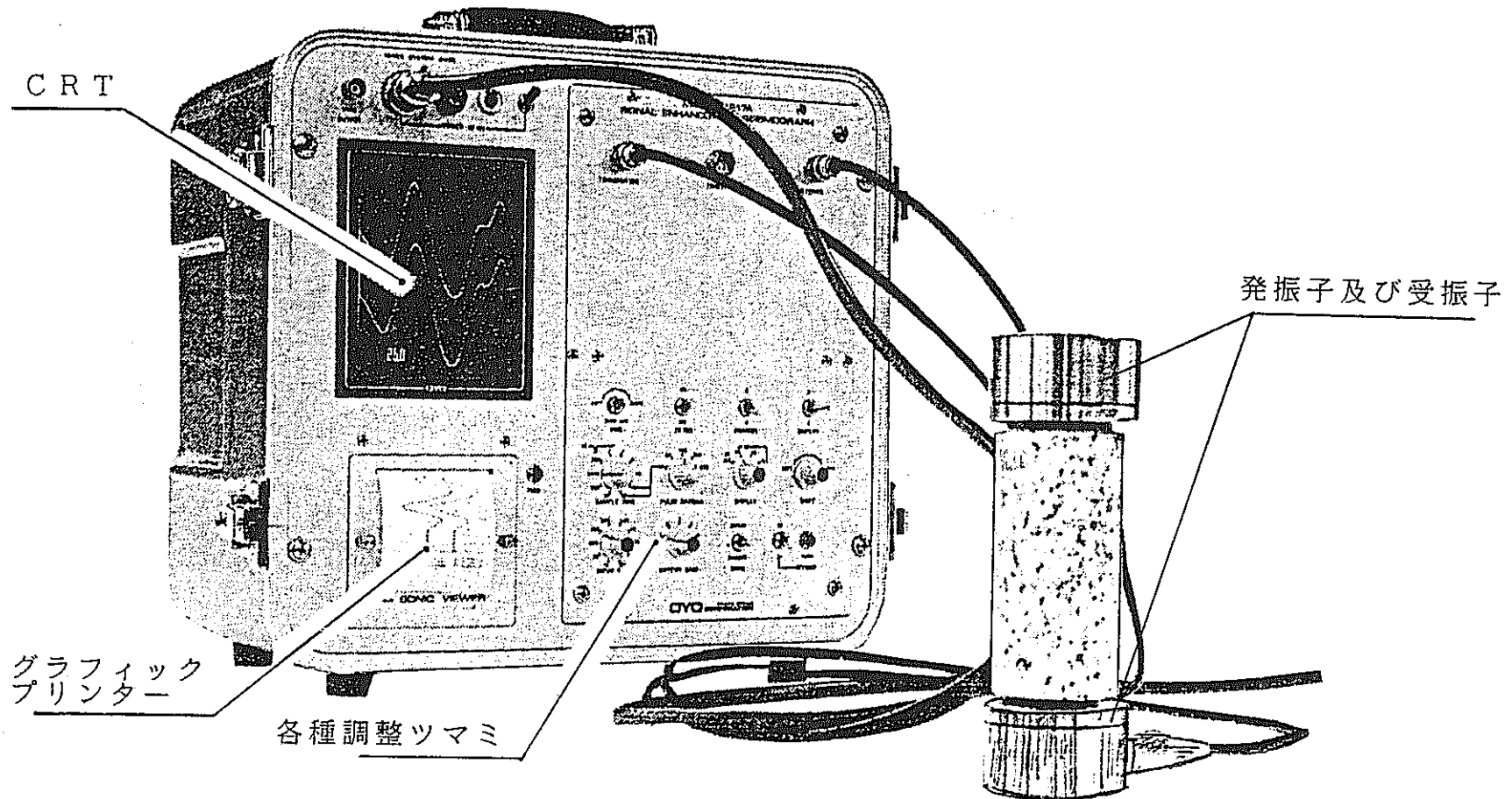


図-3.1.3.1 弾性波速度測定装置

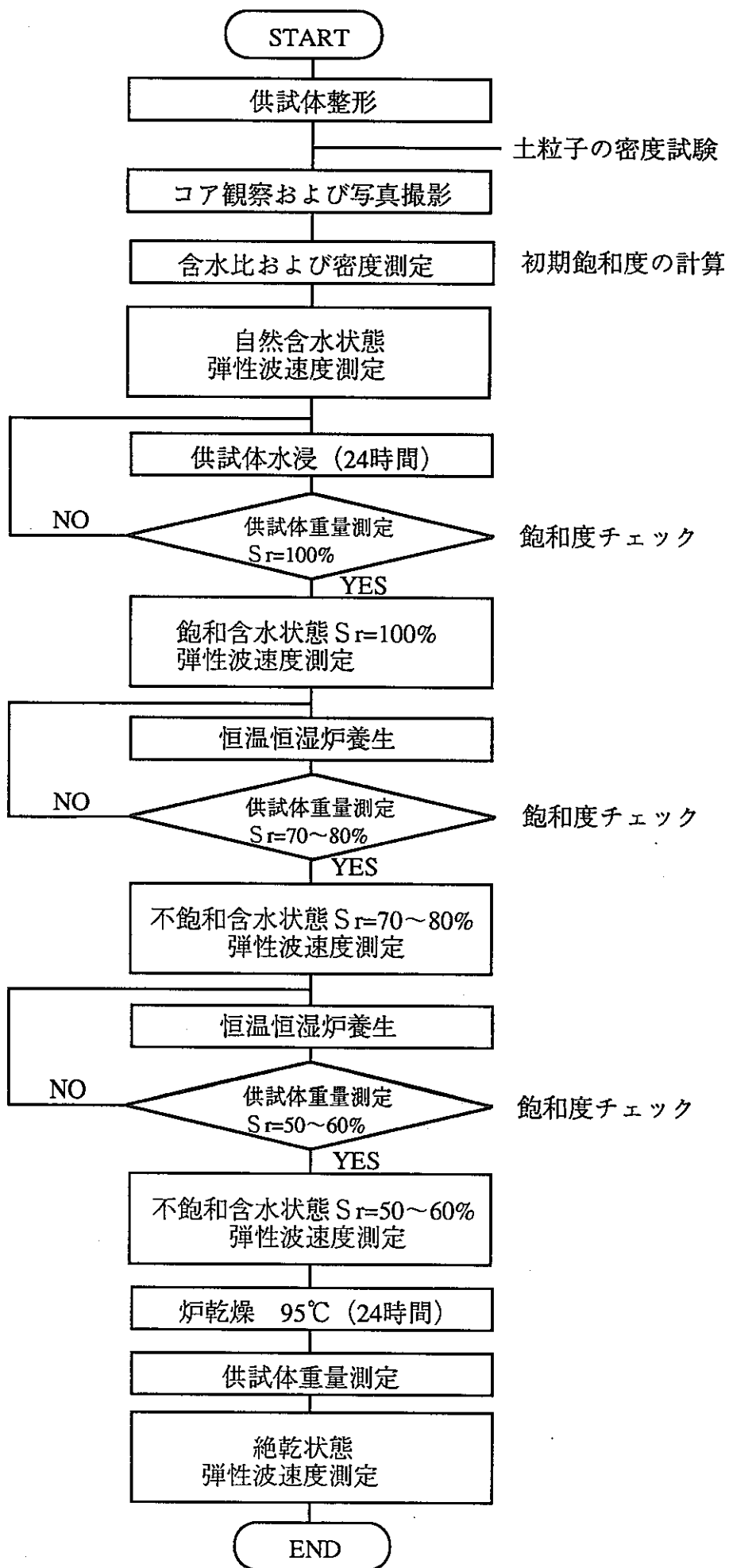


図-3.1.3.2 弾性波速度測定の手順

#### (4) 測定結果と考察

##### 1) 供試体内部の含水状態の確認

弾性波伝播速度の測定に用いる供試体は、乾燥させた後、供試体内部の含水状態が一樣と考えられる状態で測定を行った。ここでは、実際の供試体内部の含水状態を確認するため、A、B、C断面供試体について、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た。また、中部（図-3.1.3.3参照）については、中央部と周辺部分の両方について飽和度を算定した。

飽和度の算定方法は、以下のとおりである。

- ①各部分の自然状態での密度および比重は、供試体全体としての測定値を仮定する。
- ②各部分の含水比を測定し、密度および比重から間隙比を算定する。
- ③間隙比、比重、含水比から飽和度を算定する。

供試体内部の飽和度の分布を図-3.1.3.3に示す。

図-3.1.3.3によれば、A、B断面では、供試体の中部では他の部分よりも飽和度が大きく、また、同じ中部でも中心部（中部2）の方が周辺部（中部1）よりも大きい。飽和度の差は、A、B断面でそれぞれ9.7%、6.6%である。C断面では、供試体の下部の飽和度が他の部分よりも小さい。C断面供試体の飽和度の差は15.4%であり、A、B断面のそれよりも大きい。この原因としては、C断面の供試体が泥岩およびレキから構成される不均質な状態であったことが考えられた。

以上のことから、A、B断面では、供試体内部の含水状態はほぼ一樣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

飽和度と弾性波速度の測定データを表-3.1.3.1に、供試体の自然状態及び乾燥状態の観察結果一覧を表-3.1.3.2に、供試体の自然状態及び乾燥状態の一例を写真-3.1.3.1～写真-3.1.3.3に示す。また、波形データの一例を図-3.1.3.4に示す。

A、B、C断面供試体の飽和度と弾性波速度の関係を、図-3.1.3.5～図-3.1.3.7に示す。図中のVP、VSはそれぞれP波速度、S波速度を示す。たとえば、VP1は供試体1のP波速度を示す。

弾性波の透過時間の測定値、供試体の物理試験結果、供試体の自然状態及び乾燥状態での写真、波形データは資料集にまとめて示す。

#### ①波形データの一例と立上りの読み取り位置

図-3.1.3.4は、A断面供試体の飽和状態でのP波およびS波の波形を示す。供試体1本につき2回の測定を行っているため、P波およびS波でそれぞれ2本の波形が示されている。図中の矢印は、立上りの読み取り位置を示す。

#### ②飽和度と弾性波速度の関係

今回の測定では、飽和度を自然状態→飽和状態→乾燥状態と変化させて弾性波速度を測定しているため、このような飽和度の変化に伴う弾性波速度の変化について考察する。

##### A断面供試体（図-3.1.3.5参照）：

表-3.1.3.2に示した供試体の観察結果及び資料集に示した供試体の写真から判断して、A断面の3本の供試体は自然状態ではほぼ同一の地質状況とみなしてよい。

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、飽和度が50～60%まではいずれの供試体についてもP波速度は減少する。さらに、飽和度が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%程度までの区間の変化は、飽和度が0～50%程度の区間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、飽和状態から乾燥状態までは、VS2のみ飽和度の減少に伴い単調に増加する。この供試体2は物理的な特徴は他と同様であるが、表-3.1.3.2によれば乾燥状態で亀裂が2本見られた点が他と異なる。VS1、VS3は飽和状態から乾燥状態までは、若干の変化はあるものの、ほぼ一定とみなしてよい。また、飽和状態から50%程度までの区間では、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。

##### B断面供試体（図-3.1.3.6参照）：

表-3.1.3.2に示した供試体の観察結果及び資料集に示した供試体の写真から判断して、B断面の3本の供試体は自然状態ではほぼ同一の地質状況とみなしてよい。

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、飽和度が50%程度となるまでは、いずれの供試体についてもP波速度は減少する。さらに、飽和度が0%となるまでは、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%程度までの区間の変化は、飽和度が0~50%程度の区間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、飽和状態から乾燥状態までは、3供試体ごとに異なる傾向を示す。この原因としては、表-3.1.3.2によれば3供試体ごとに亀裂の発生状況が異なる点が考えられる。VS1は飽和度が減少してもほぼ一定値を示す。VS2は飽和度の減少に伴い単調に増加する。VS3は飽和度の減少に伴い、一旦増加し、その後減少する。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。

#### C断面供試体（図-3.1.3.7参照）：

表-3.1.3.2に示した供試体の観察結果及び資料集に示した供試体の写真から判断して、C断面の3本の自然状態での供試体のうち供試体3は、外観や地質状況が明らかに供試体1及び2と異なる。

P波速度は、自然状態から飽和状態になるとVP1、VP3については増加し、VP2については減少する。その後、飽和度が50%程度まではいずれの供試体についてもP波速度は減少する。さらに、飽和度が0%となるまでは、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。

VP1、VS1の値は他の供試体と大きく傾向が異なる結果となった。この供試体1の自然状態での間隙比は1.270で、供試体2（0.843）および供試体3（0.609）と比べて大きな値となっていることが特徴である。測定結果は、供試体の間隙比が大きいことの影響を受けているものと考えられる。表-3.1.3.2に示した供試体の観察結果や資料集に示した供試体の写真の観察によれば、供試体1は供試体2に類似している。

#### A,B,C断面供試体（図-3.1.3.8~図-3.1.3.9参照）：

飽和度の変化に対する弾性波速度値のばらつきについて次のような傾向が見られる。

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。

#### 供試体のクラックの状況、水浸の影響について

A、B、C断面の各供試体では、湿潤状態から乾燥状態に至る過程でクラックが入るものがあった。A断面の供試体では、表-3.1.3.2によれば、供試体1（写真-3.1.3.1参照）及び2のように、供試体の軸方向または軸中心を横切らない斜め方向のクラックであったため、クラックの試験結果に与える影響は少なかったものと考えられる。これに対し、B断面の供試体では軸中心を横切るような斜め方向のクラックとなるもの（写真-3.1.3.2参照）があった。また、C断面の供試体では供試体の直径方向のクラック（写真-3.1.3.3参照）が見られた。特に、B断面、C断面ともに飽和度が50%以下ではクラックの開口が認められたため、試験結果に影響を与え、A断面の供試体とは異なる結果を示したものと考えられる。

供試体の飽和度を自然状態から飽和状態にすると、P波速度、S波速度ともに急激な変化を示すものが多かった。これについては、供試体を飽和状態にする目的で、最大48時間の水浸を行ったため、供試体の内部構造が変化したことが理由の1つとして考えられる。



### 3) 飽和度とその他の物性の関係

飽和度と動ポアソン比の関係を図-3.1.3.10に、飽和度と動せん断弾性係数の関係を図-3.1.3.11に、また、飽和度と動弾性係数の関係を図-3.1.3.12に示す。

#### ①飽和度と動ポアソン比の関係 (図-3.1.3.10参照)

飽和度の変化に対する動ポアソン比の値の分布状況について次のような傾向が見られる。

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-3.1.3.11参照)

動せん断弾性係数の算定式は、

$$G_d = 10 \rho_s V_s^2 / 980 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

で表され、動せん断弾性係数は密度 ( $\rho_s$ ) 及びS波速度 ( $V_s$ ) に依存するが、S波速度は2乗されるため、密度よりもS波速度の影響が大きい。したがって、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。

飽和度の変化に対する動せん断弾性係数の値の分布状況について次のような傾向が見られる。

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-3.1.3.12参照)

飽和度の変化に対する動弾性係数の値の分布状況について次のような傾向が見られる。

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。

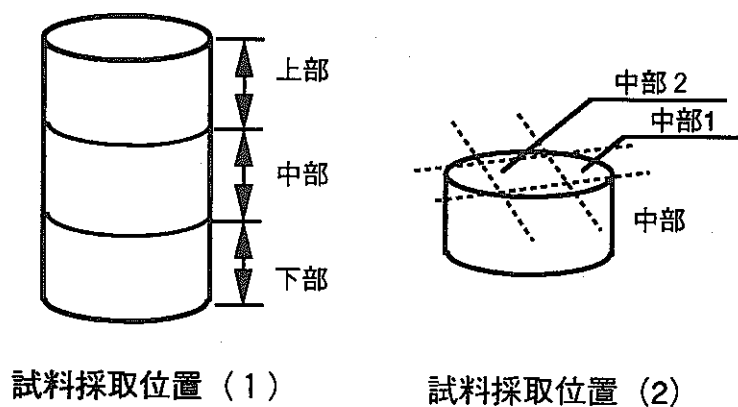
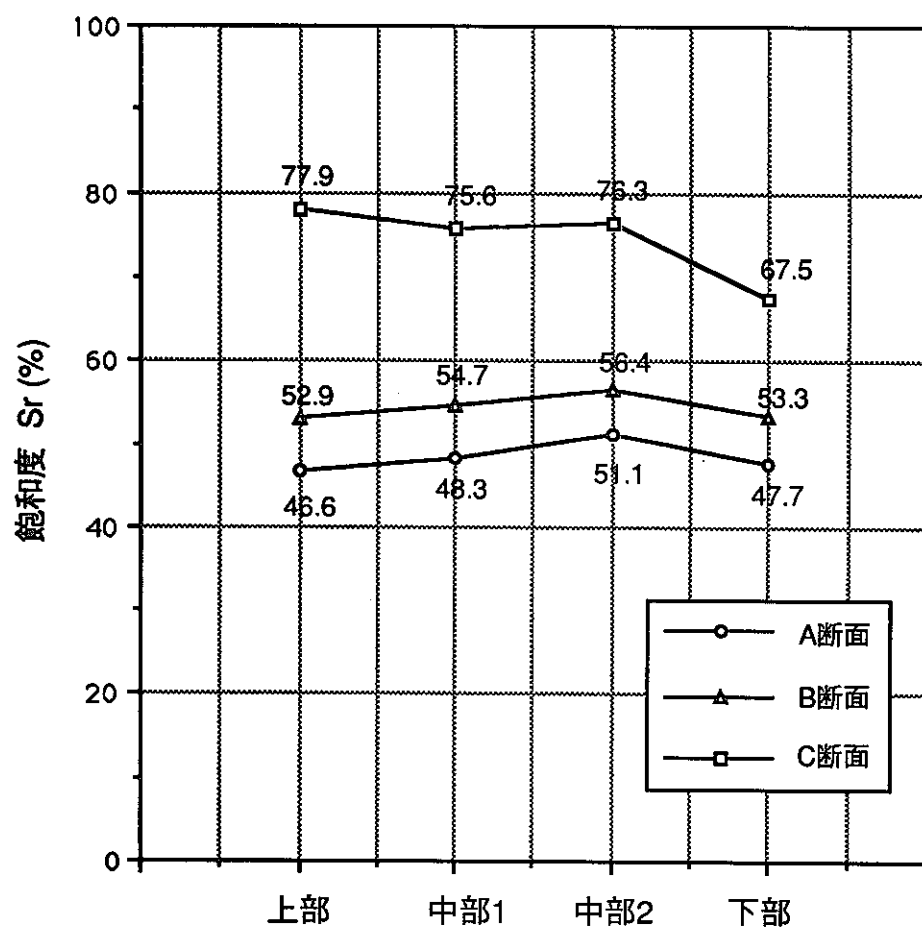


図-3.1.3.3 供試体内部の飽和度の分布

表-3.1.3.1 飽和度と弾性波速度一覧表

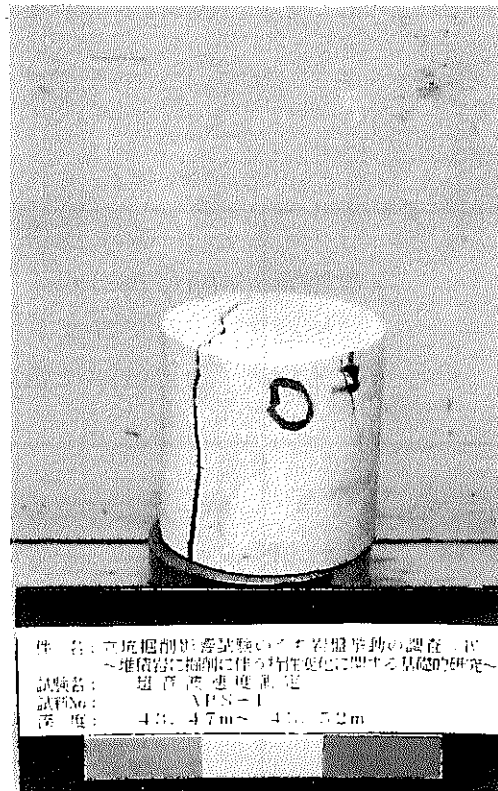
	供試体1			供試体2			供試体3		
	飽和度(%)	P波速度(m/sec)	S波速度(m/sec)	飽和度(%)	P波速度(m/sec)	S波速度(m/sec)	飽和度(%)	P波速度(m/sec)	S波速度(m/sec)
A断面	0.00	1619.21	826.01	0.00	1838.58	1144.61	0.00	1838.46	963.71
	55.20	1616.01	772.66	56.60	1711.23	952.22	52.90	1696.48	933.72
	77.60	1873.11	981.15	79.00	1967.92	937.10	77.30	1958.54	987.30
	95.60	2131.47	922.57	95.70	2270.67	1083.26	96.10	2251.40	1029.49
	98.00	2188.05	876.77	98.60	2207.01	855.62	98.50	2220.28	926.54
B断面	0.00	1391.42	695.71	0.00	1193.75	812.08	0.00	1036.36	556.74
	52.70	1389.72	722.98	51.90	1290.31	790.31	51.70	1204.07	665.74
	78.60	1603.53	722.98	76.20	1478.95	651.80	75.70	1497.92	771.93
	99.30	1993.23	731.43	98.50	1945.38	706.42	100.30	1966.02	735.82
	99.60	1939.15	683.47	99.30	1908.68	622.91	100.30	1906.44	672.86
C断面	0.00	888.46	507.69	0.00	1404.60	848.61	0.00	1014.66	817.36
	51.70	794.93	540.56	46.30	1420.00	788.89	69.20	1806.49	839.18
	78.00	1600.33	640.13	72.90	1972.22	801.61	73.70	2005.51	910.19
	96.40	1737.50	683.29	95.30	2389.42	934.21	89.40	2297.57	1037.94
	97.10	1938.25	675.69	96.40	2228.70	887.50	92.60	2402.54	917.25

表-3.1.3.2 供試体の観察結果一覧

	供試体1		供試体2		供試体3	
	自然状態	乾燥状態	自然状態	乾燥状態	自然状態	乾燥状態
A断面	均質な泥岩 亀裂なし	縦方向の亀裂 1本	均質な泥岩 亀裂なし	縦方向の亀裂 1本および 斜め方向の亀裂 1本	均質な泥岩 亀裂なし	亀裂見られず
B断面	均質な砂岩 亀裂なし	下部に斜め方向 の亀裂2本	ほぼ均質な砂岩 亀裂なし	縦方向の亀裂 1本 端部に欠け	均質な砂岩 亀裂なし	斜め方向の 亀裂2本
C断面	凝灰岩 炭化物あり	縦方向の亀裂 1本および 横方向の亀裂 2本	ほぼ均質な凝灰 岩、亀裂なし	横方向の亀裂 3本および 上部に縦方向の 亀裂1本	パミスを含む 凝灰岩 亀裂なし	端部に欠け 亀裂なし

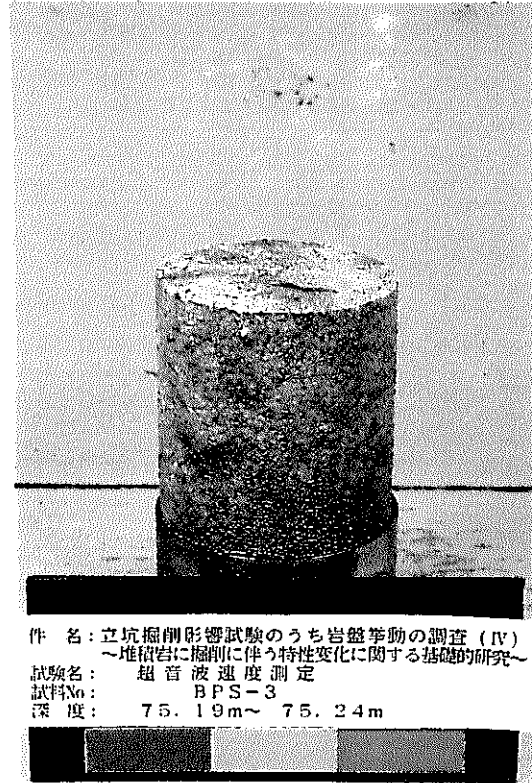


自然状態

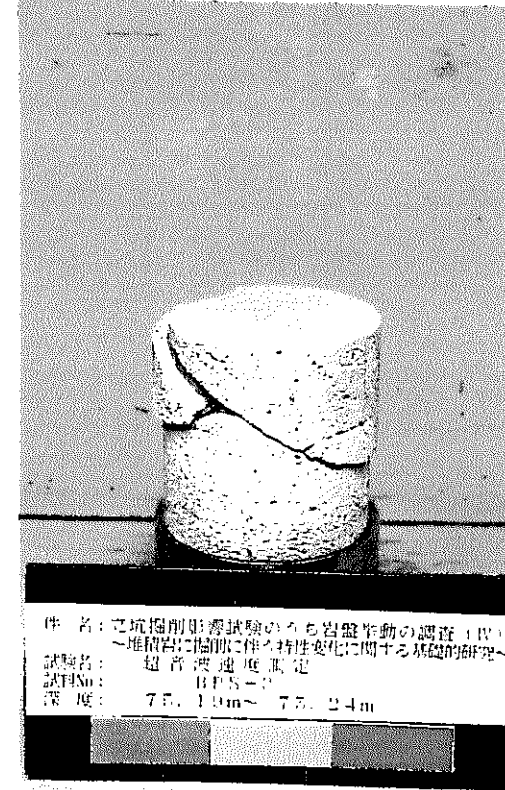


乾燥状態

写真-3.1.3.1 弾性波速度測定用供試体の一例（A断面）

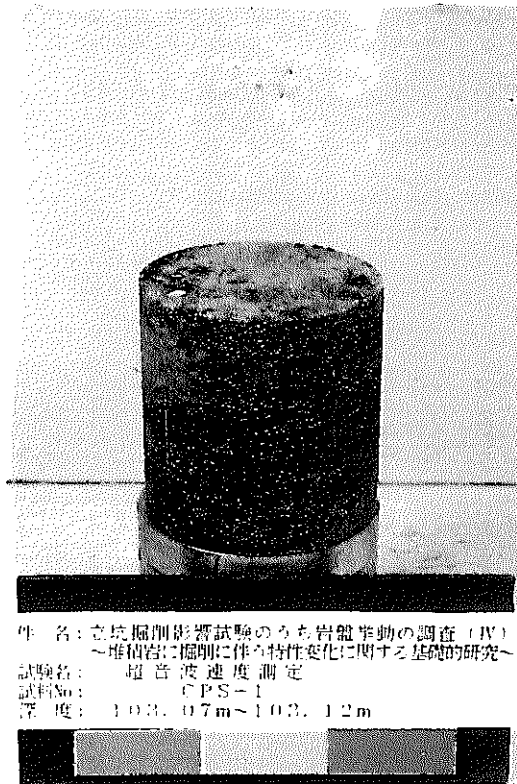


自然状態

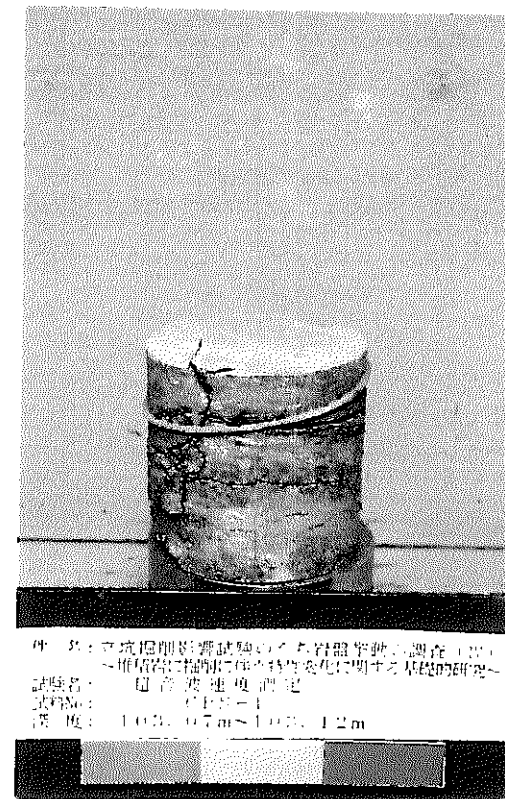


乾燥状態

写真-3.1.3.2 弾性波速度測定用供試体の一例（B断面）

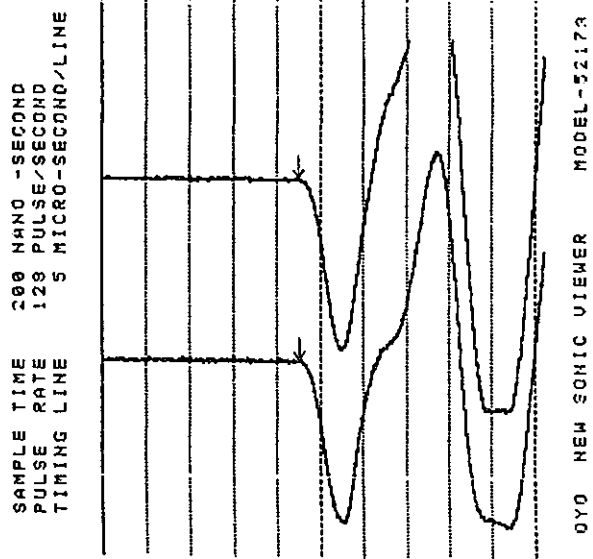


自然状態

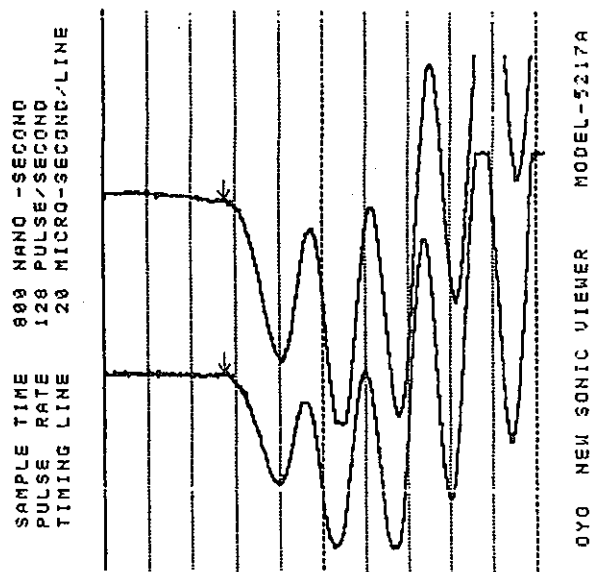


乾燥状態

写真-3.1.3.3 弾性波速度測定用供試体の一例（C断面）



P 波速度



S 波速度

図-3.1.3.4 波形データの一例 (試料番号APS-1、飽和状態)



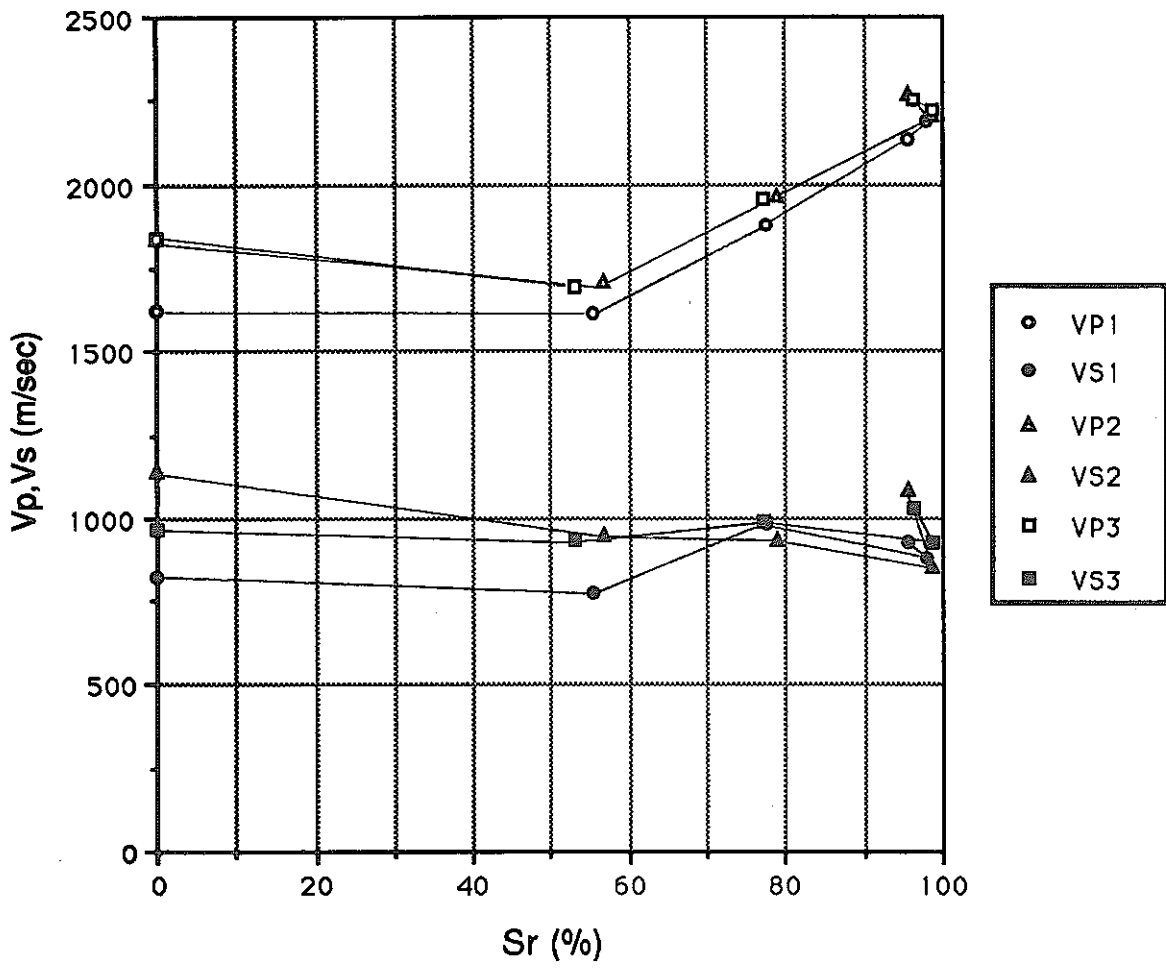


図-3.1.3.5 飽和度と弾性波速度の関係 (A断面供試体)

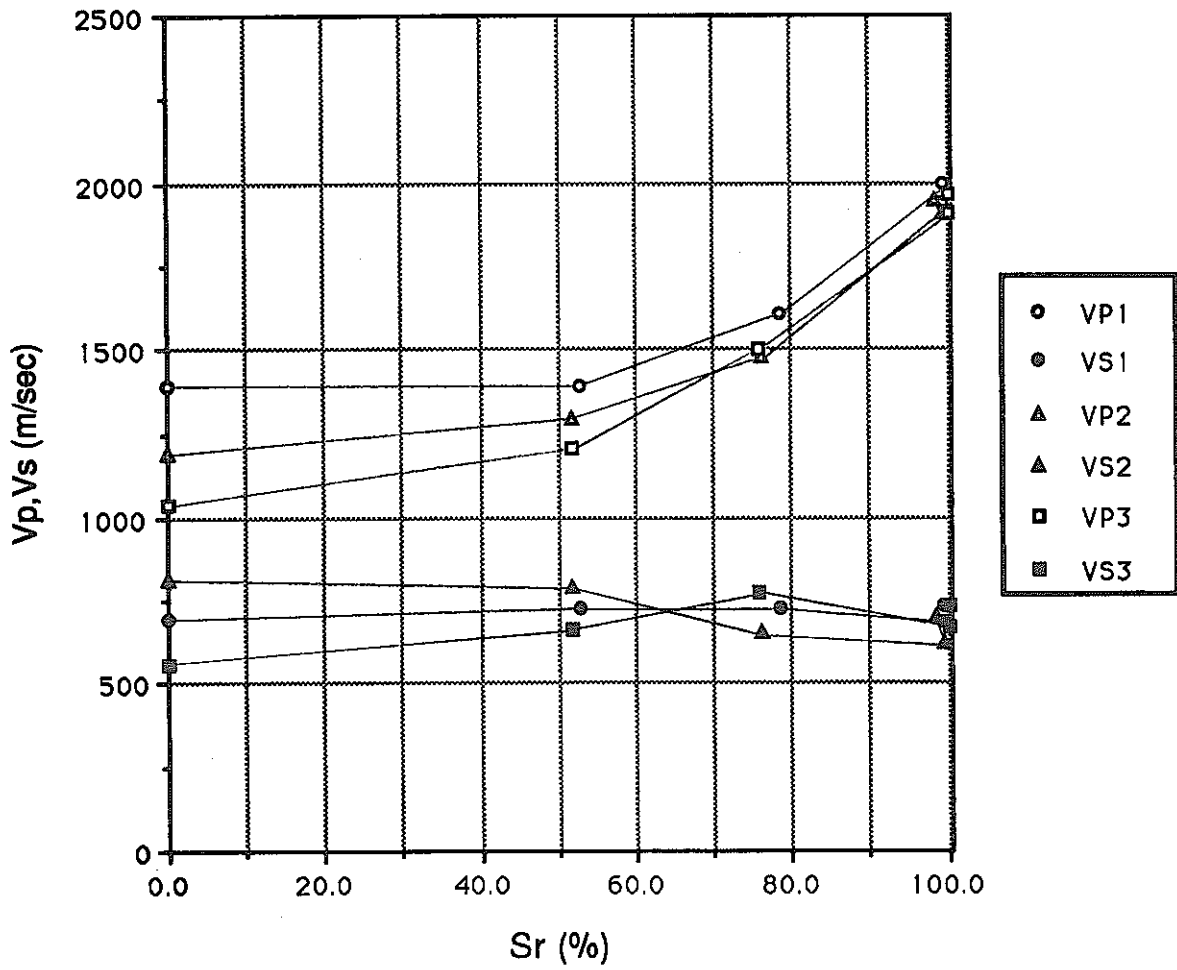


図-3.1.3.6 飽和度と弾性波速度の関係 (B断面供試体)

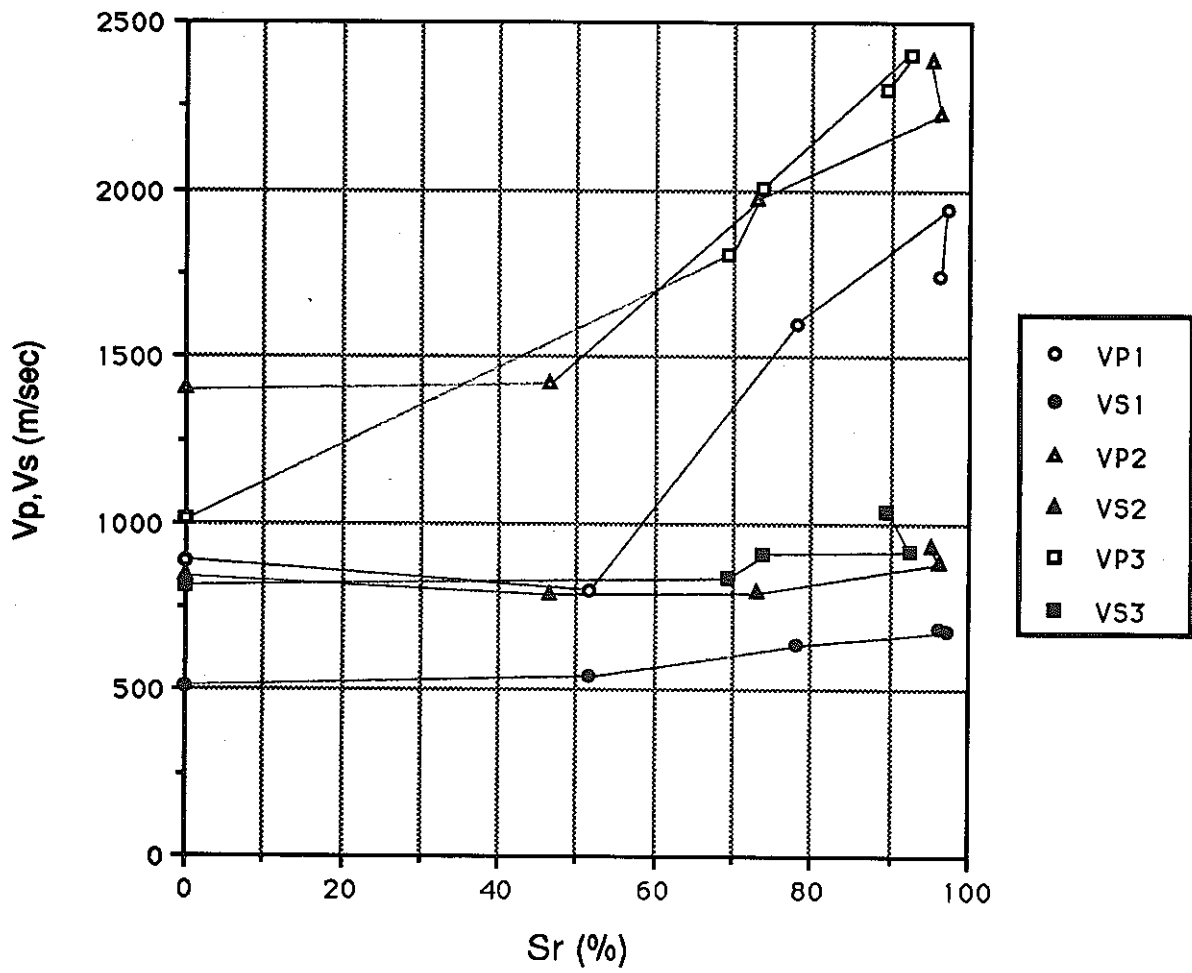


図-3.1.3.7 飽和度と弾性波速度の関係 (C断面供試体)

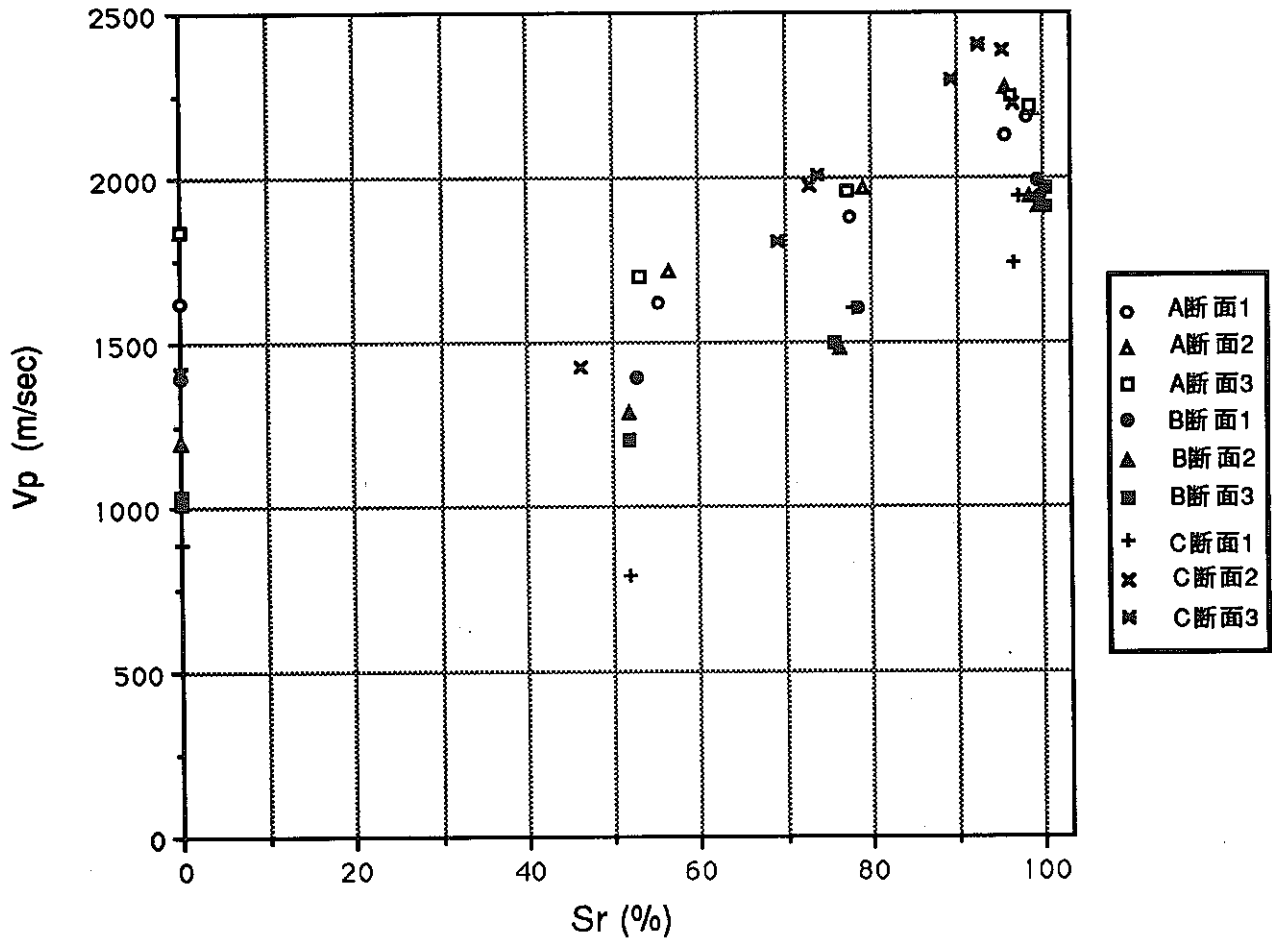


図-3.1.3.8 飽和度とP波速度の関係 (A,B,C断面)

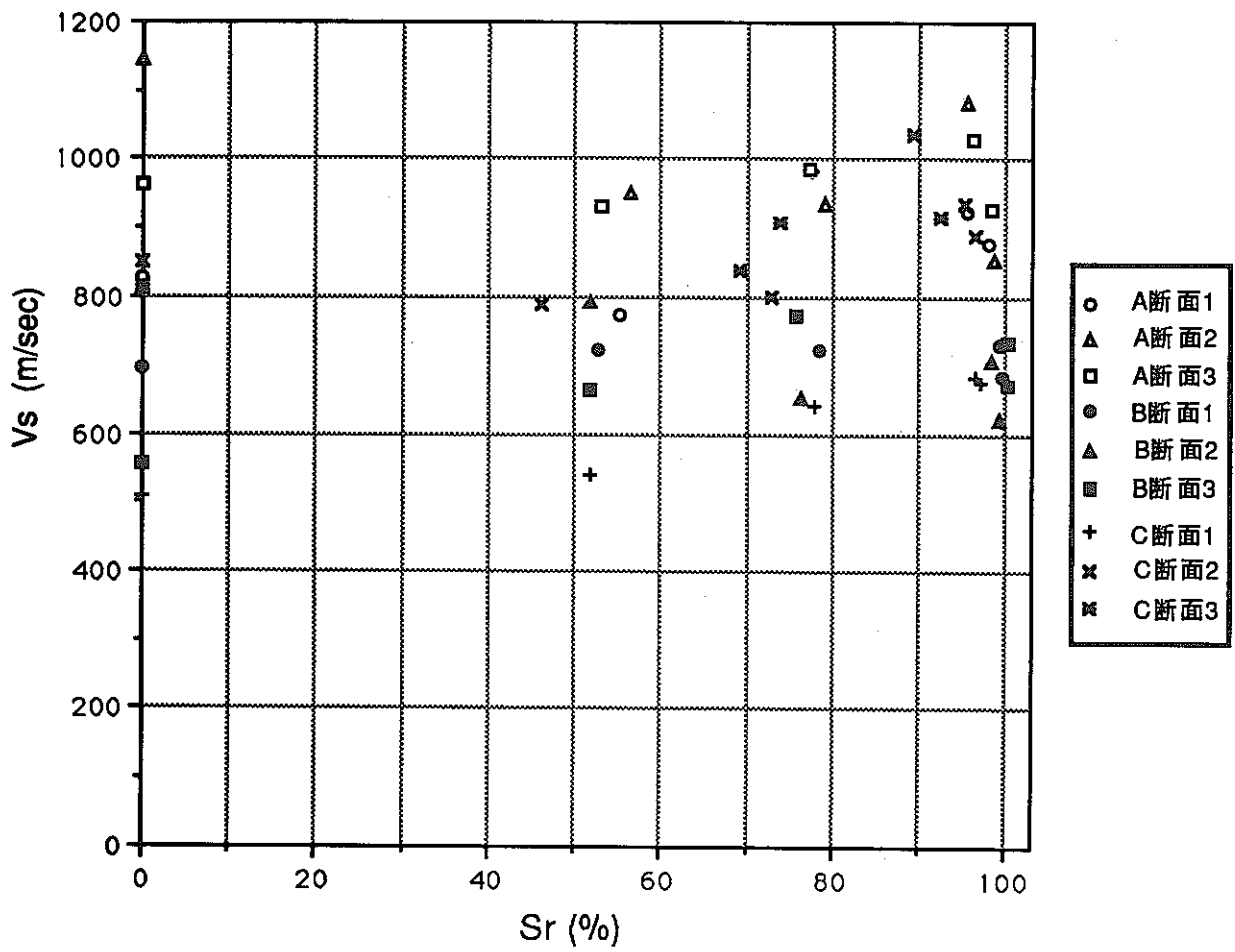


図-3.1.3.9 飽和度とS波速度の関係 (A,B,C断面)

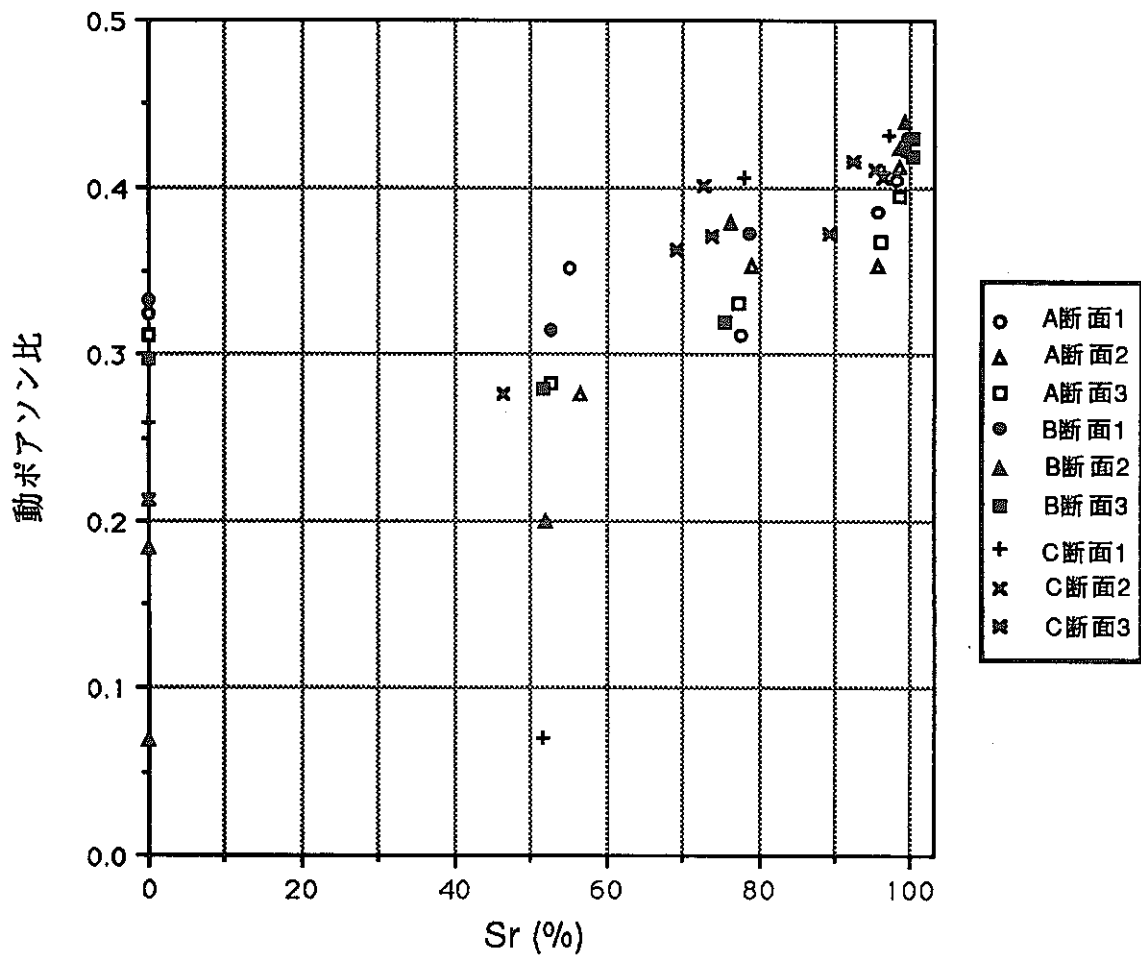


図-3.1.3.10 飽和度と動ポアソン比の関係 (A,B,C断面供試体)

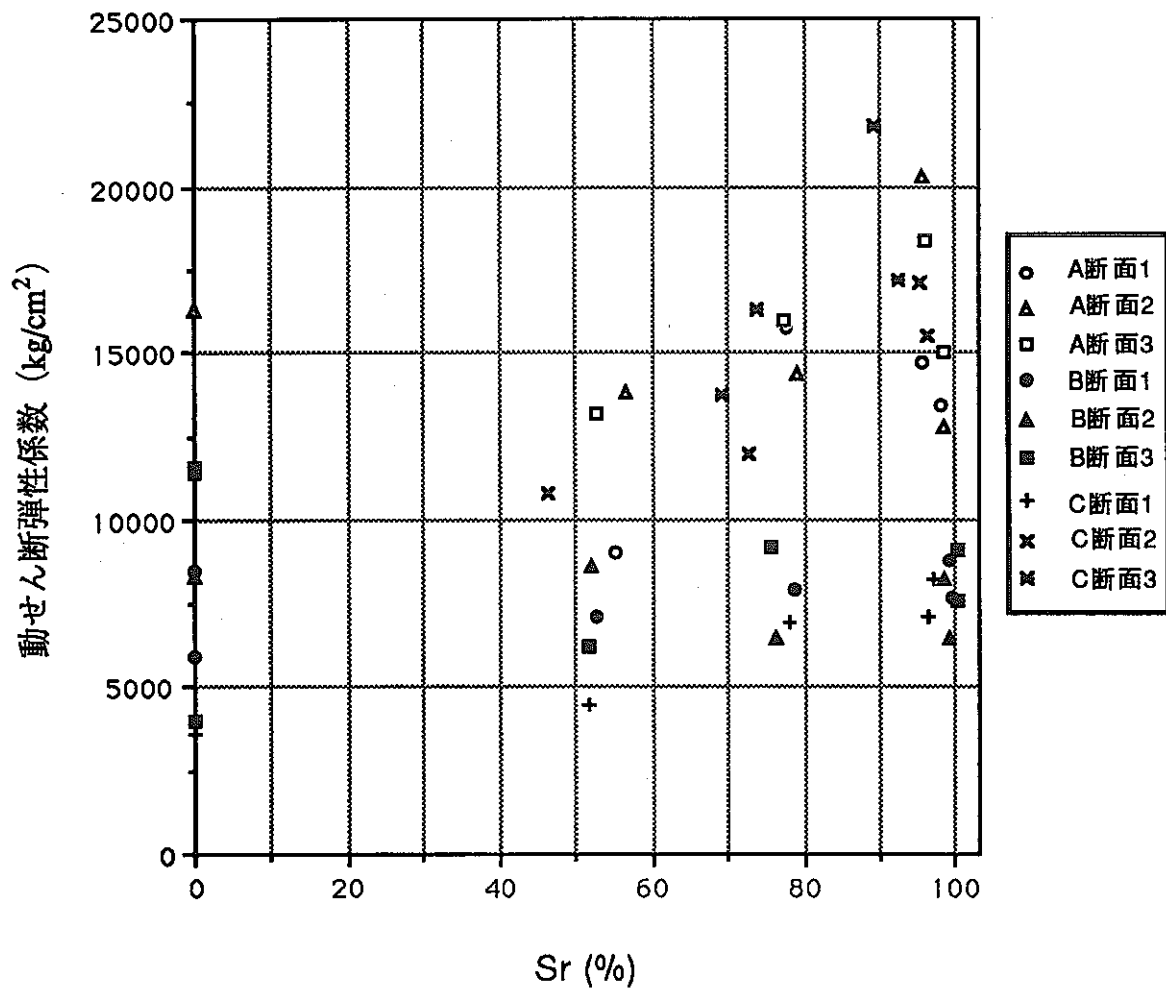


図-3.1.3.11 飽和度と動せん断弾性係数の関係 (A,B,C断面供試体)

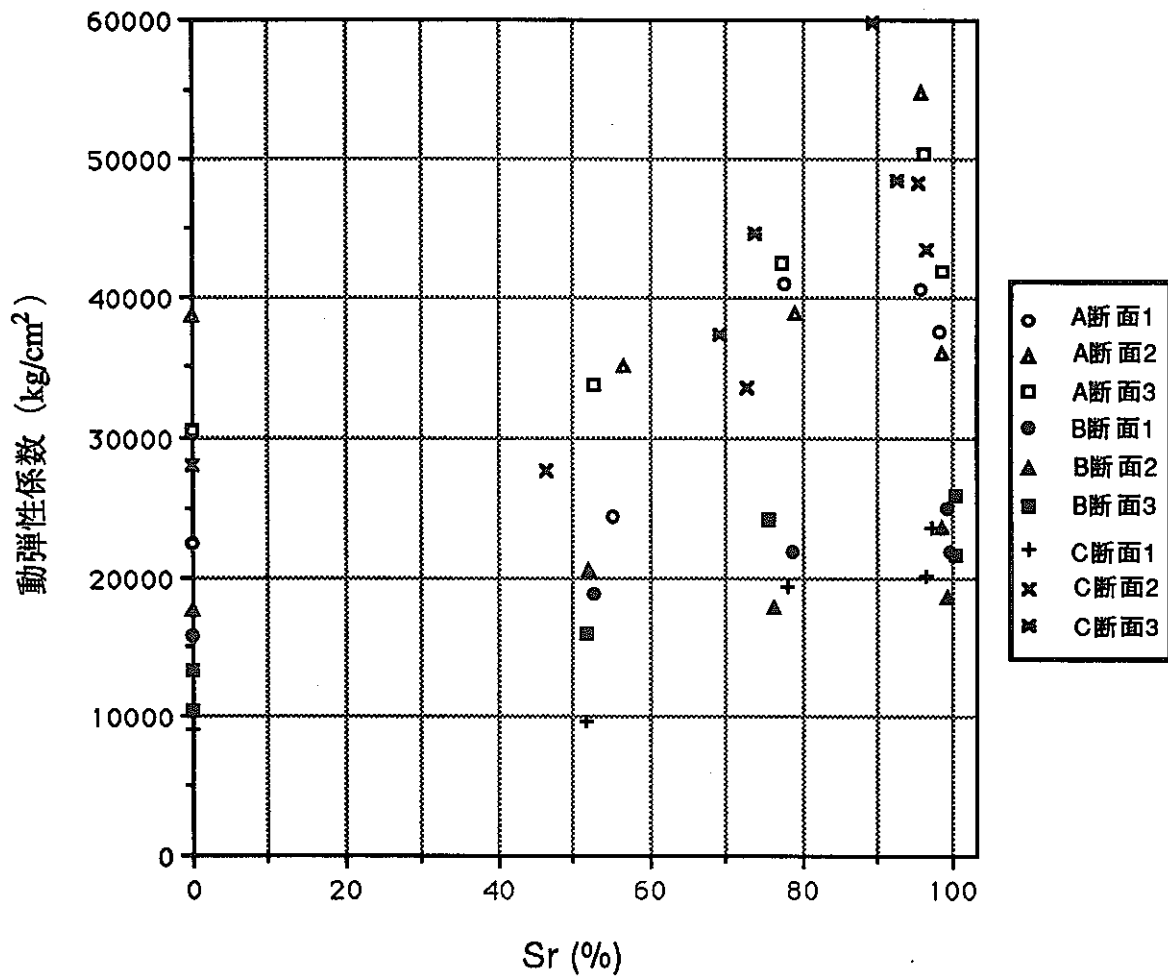


図-3.1.3.12 飽和度と動弾性係数の関係 (A,B,C断面供試体)



## (5) 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。

### 3.1.4 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) 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/cm<sup>2</sup>のものを使用した。試験装置を図-3.1.4.1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。

#### (3) 試験方法

##### 1) 試験内容

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。

今回の試験の対象とする岩石は、いわゆる堆積軟岩に属するものであることから、その力学挙動を考える上では、一般に、岩石内の間隙水の挙動が重要であるとされている。また、2.2.3で実施した文献調査の結果からも、軟岩のように水の影響を受けやすい供試体に対しては、間隙水圧の計測を行うことが望ましいとされている。このため、今回は、試験中の間隙水圧の変化も同時に測定することとした。

3組の供試体のうち2組については、載荷途中で除荷・再載荷を伴わない通常の

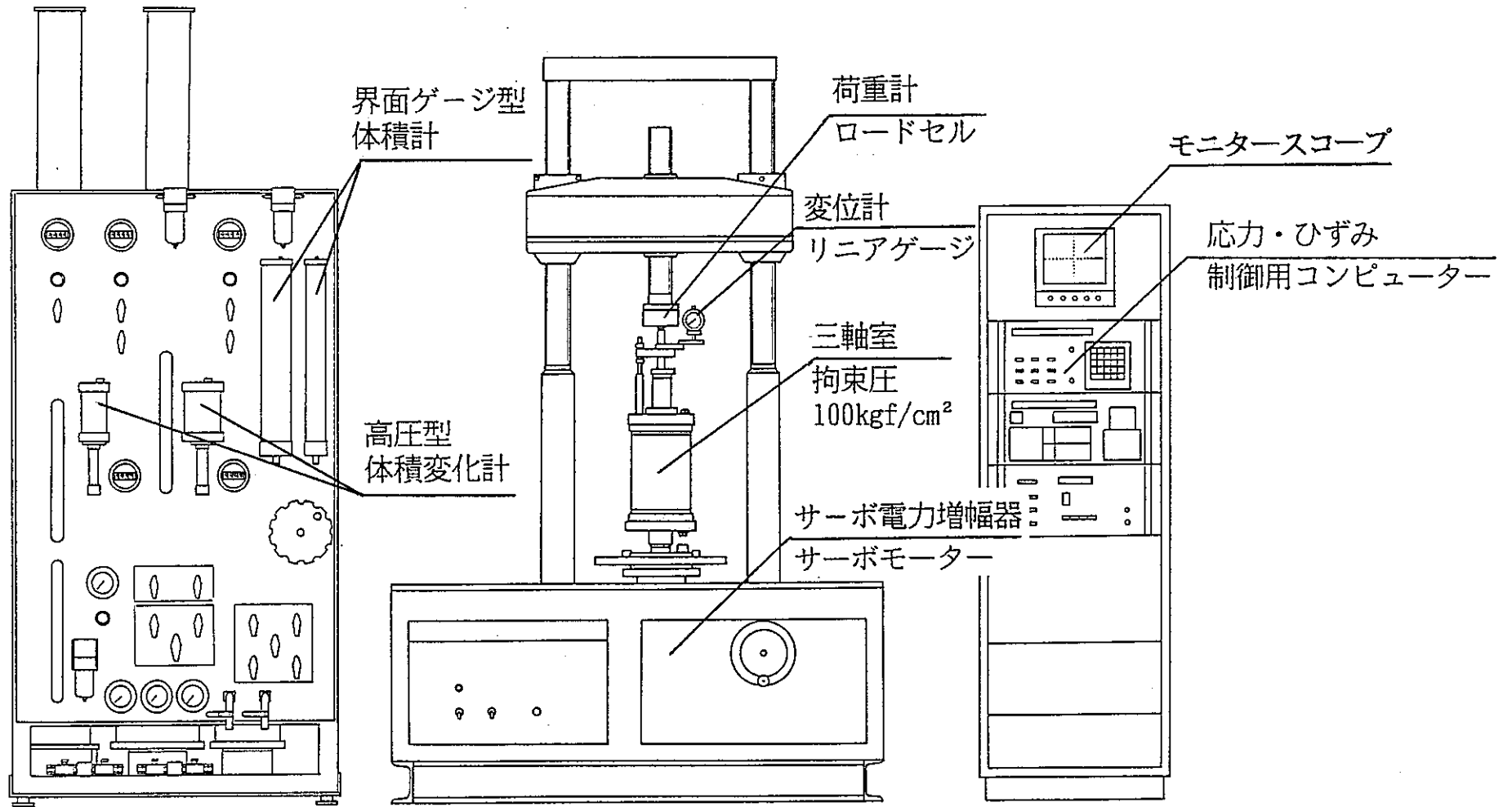


図-3.1.4.1

電気-機械サーボ中容量三軸試験装置

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・再載荷時の応力、ひずみレベルを以下のような方法で設定した。

- ①試験前に供試体の湿潤密度およびP波速度を測定し、他と比較して値が大きくはずれているものは除外して、試験用の供試体を選ぶ。
- ②3組の供試体のうち2組の試験結果から軸差強度と拘束圧の関係を直線近似により求め、拘束圧ごとに軸差強度を推定する。
- ③最大軸差強度到達前は、除荷時の応力は最大強度の1/3および2/3の時点を目標とする。最大軸差強度到達後は、軸ひずみ5%で1回、5～10%間で1回の除荷・再載荷を行う。

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/cm<sup>2</sup>の4とおり

バックプレッシャー：3kgf/cm<sup>2</sup>程度

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

## 2) データの解析方法

### ①強度定数・変形係数の求め方

本試験は、圧密非排水条件（ $\overline{CU}$ 条件）であるため、せん断前に所定の拘束圧で等方圧密させる。この場合の圧密終了の判定は、図-3.1.4.2に示すように、排水量～

方圧密させる。この場合の圧密終了の判定は、図-3.1.4.2に示すように、排水量～時間（対数目盛）曲線の最急勾配を引き、これを時間的に3倍だけ右に平行移動させた線を引いておき、この線と排水量～時間曲線が交わった時点をもって圧密終了とした。

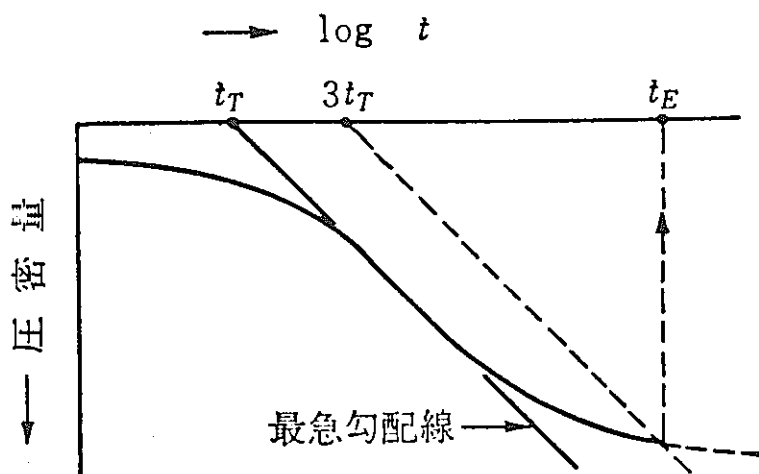


図-3.1.4.2 圧密打ち切り時間の決定法

圧密終了後は、非排水条件でせん断を行い、以下のような物性を求めた。

- ・最大強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  : 軸ひずみ  $\epsilon \leq 15\%$ での応力～ひずみ曲線上の最大軸差強度は、軸差応力が最大の場合と、主応力比が最大の場合の2とおりについて求めた。
- ・残留強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$  : 応力～ひずみ曲線において、最大軸差応力を過ぎた後、一定値に収束した時点の軸差強度とした。収束しない場合は、図-3.1.4.3に示す方法にて残留強度とした。この残留強度は、供試体に破断面が生じた後に、破断面において摩擦により最大強度を過ぎた後の大きな変化に対して保ち得る最小の抵抗力に相当する。
- ・破壊ひずみ  $\epsilon_r$  (%) : 軸差応力が最大の場合と、主応力比が最大の場合の両方について求めた。
- ・初期変形係数  $E_0$  (kg/cm<sup>2</sup>) : 応力～ひずみ曲線で、最大軸差強度までの応力レベルに非線形性が見られる場合、初期接線勾配から求めた。具体的には、次の方法によった。応力～ひずみ関係は、実際には離散的な値であるため、最大強度までの応力～ひずみ関係のデータに対し、スプライン関数による補間を行

う。次に、このようにして得られる関数の原点における勾配をもって初期変形係数  $E_0$  とした。

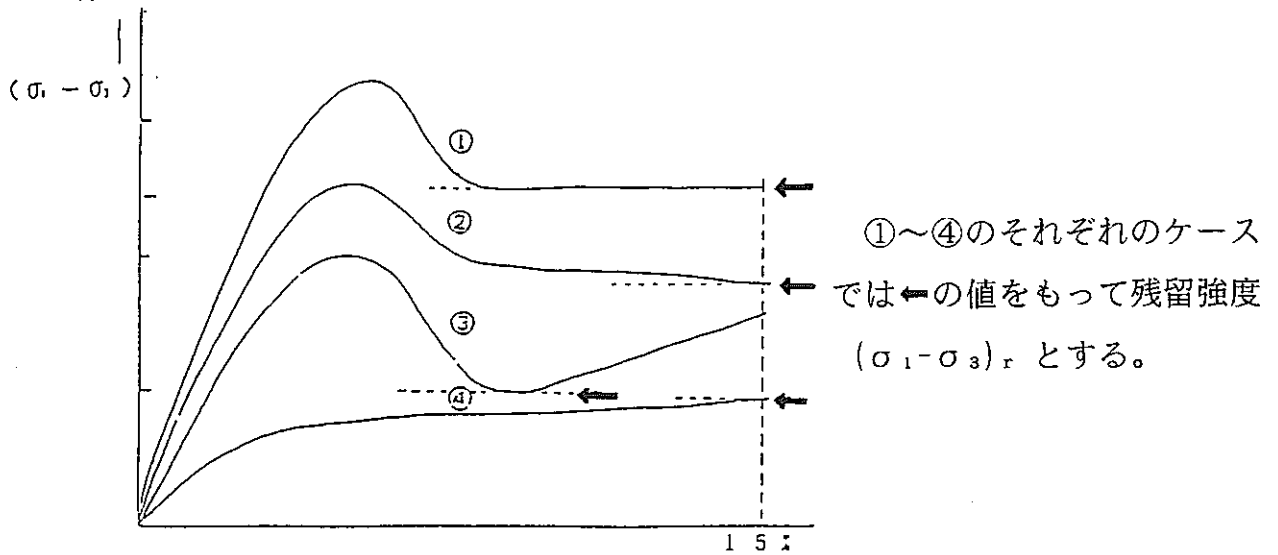


図-3.1.4.3 残留強度の決め方

- ・割線変形係数  $E_{50}$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) : 応力~ひずみ曲線で最大軸差強度の1/2の点と原点との割線勾配で定義する。実際には、応力~ひずみ関係をスプライン関数で補間して得られる関数を利用した。
- ・破壊時の間隙水圧  $u_f$  ( $\text{kg/cm}^2$ ) : 破壊ひずみに対応する間隙水圧。
- ・間隙水圧係数  $A_f$  : 以下の式により求めた。

$$A_f = u_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = u_f / (\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$$

- ・せん断強度定数

$C_{cu}, \phi_{cu}$  : 最大強度に対応した強度定数である。破壊時の供試体内の任意の平面上の応力状態を表すモールの応力円群における包絡線すなわちモール・クーロンの破壊包絡線から求められる強度定数である。モール・クーロンの破壊包絡線は、図-3.1.4.4に示す方法により求めた。図-3.1.4.4に示すように、各拘束圧での応力円の頂点をそれぞれプロットして、最小二乗法により切片  $f_1$  と傾き  $m_1$  を求める。この  $f_1$  と  $m_1$  は、応力円の頂点を通る回帰直線であり、応力円に接する破壊包絡線とは異なるものである。幾何学的には、円の頂点を通る直線と円に接する直線との間には次の関係がある。

$$\begin{aligned} \sin \phi_{cu} &= m_1 \\ C_{cu} &= f_1 / (1 - m_1) \end{aligned} \quad (4.1)$$

ただし、円に接する直線の切片は  $C_{cu}$ 、円に接する直線の傾きは  $\phi_{cu}$  である。したがって、図-3.1.4.4により、 $f_1$  と  $m_1$  を求め、(4.1) 式を用いてせん断強度定数  $C_{cu}$ 、 $\phi_{cu}$  を求めた。

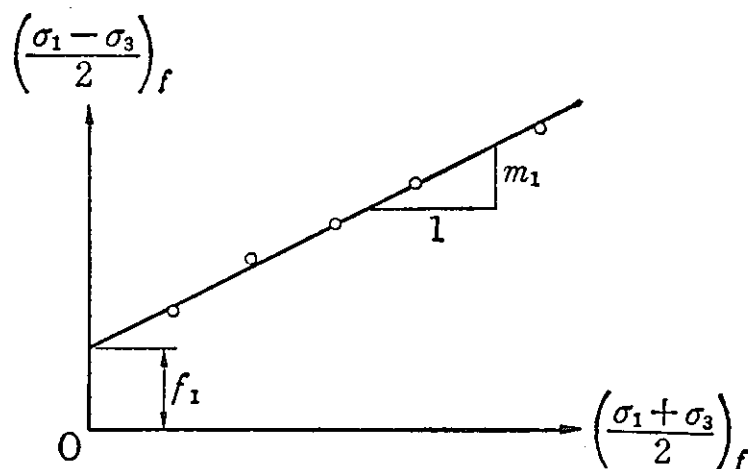


図-3.1.4.4  $\alpha = 45^\circ$  面上の破壊応力

$C'$ 、 $\phi'$  : 有効応力表示の場合のせん断強度定数 ( $C'$ 、 $\phi'$ ) は、図-3.1.4.5のようにして、間隙水圧の分だけそれぞれの応力円を平行移動し、あとは  $C_{cu}$ 、 $\phi_{cu}$  の場合と同様にして求めた。

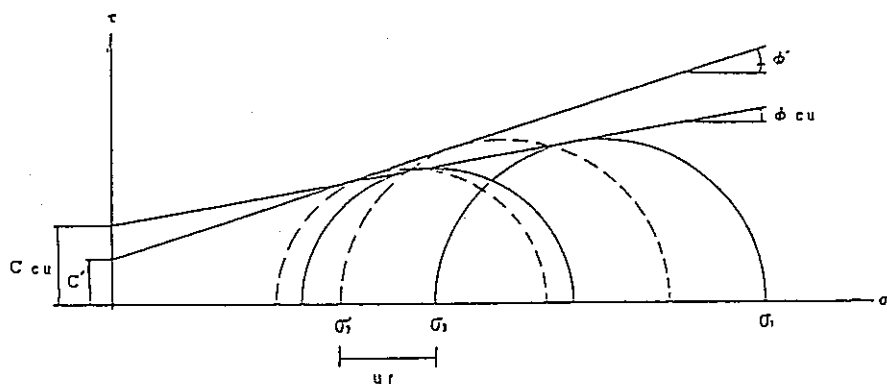


図-3.1.4.5  $C'$ 、 $\phi'$  の求め方

## ②ポアソン比の測定

二重セル法により、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ものである。



### i)測定方法

硬岩を対象としたポアソン比の測定では、供試体に直接ひずみゲージを接着し、供試体を軸方向に圧縮したときの縦ひずみ  $\epsilon_1$  と横ひずみ  $\epsilon_2$  を求め、 $\nu = -\epsilon_2 / \epsilon_1$  より算定している。

しかしながら、2.2.3で実施した文献調査の結果から得られた知見によれば、湿潤状態にある堆積岩に対し、ひずみゲージによる方法を用いると、供試体とひずみゲージの間の接着度の問題、接着剤の変形特性と供試体のそれとの相違、供試体端面のひずみ分布の不均一性等の問題から適切ではないとされている。

現在では、種々の方法でポアソン比を求めることが考えられているが、ここではそのうち二重セル法を用いてポアソン比を算出した。

### ii)試験装置

ポアソン比測定の基本計測システムを図-3.1.4.6に示す。測定にあたっては、荷重、変位、間隙水圧および体積変化自動検出器の出力をデータロガーで記録し、コンピュータシステムによって自動作図させた。

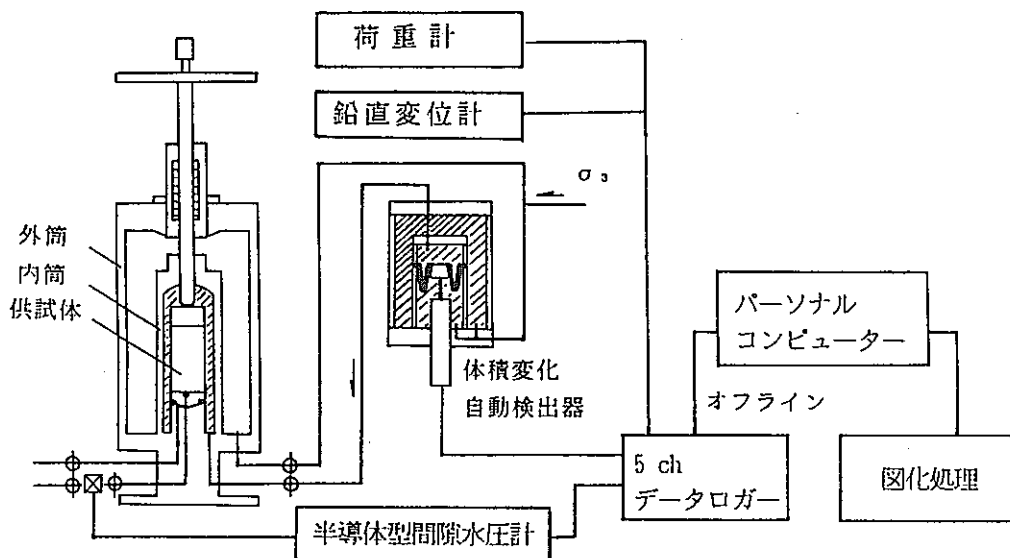


図-3.1.4.6 二重セル法を用いた基本計測システム

### iii)解析方法

試験結果として求められるポアソン比の算出は、以下のようにして行った（図-3.1.4.7参照）。

供試体の圧縮量を  $\Delta l$  とすると、ピストンの貫入量  $\Delta V_p$  は、 $a$  をピストンの直径とすると、

$$\Delta V_p = \frac{\pi}{4} \cdot a^2 \cdot \Delta l$$

である。また、供試体の体積変化量  $\Delta V$  を、 $\Delta V_c$  を内セルから排水される水量として、

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_c - \Delta V_p \\ &= \Delta V_c - \frac{\pi}{4} \cdot a^2 \cdot \Delta l \end{aligned}$$

と表せば、供試体の平均直径は、

$$r + \Delta r = \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi} (A_0 \cdot l + \Delta V)}{l - \Delta l}}$$

である。

ここに、 $l$  : 供試体の初期高さ

$A_0$  : 供試体の初期断面積

である。

ここで、縦ひずみは、

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \times 100$$

横ひずみは、

$$\epsilon_2 = \frac{-\Delta r}{r} \times 100$$

である。

ここに、 $r$  : 供試体の初期直径

$\Delta r$  : 供試体の半径方向のひずみ量

であるから、求められるポアソン比は次のようにして算出される。

$$\nu = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{1}{\Delta l} \cdot \frac{1}{r} \left\{ \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi} (A_0 \cdot l + \Delta V_c - \frac{\pi}{4} a^2 \cdot \Delta l)}{l - \Delta l}} - r \right\}$$

前式よりポアソン比を計算すると、一般に図-3.1.4.8に示すような結果が得られ

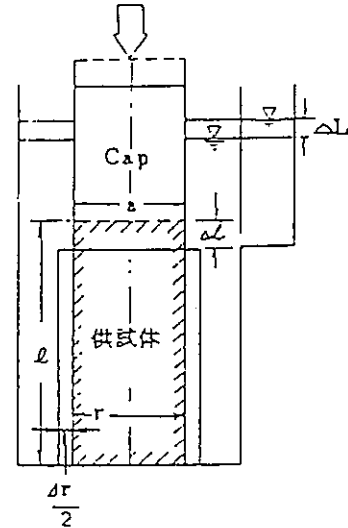


図-3.1.4.7 ポアソン比算出法

る。採用するポアソン比は、 $(\sigma_1 - \sigma_3) f / 2$ 付近の応力レベルでポアソン比が一定を示す値とした。

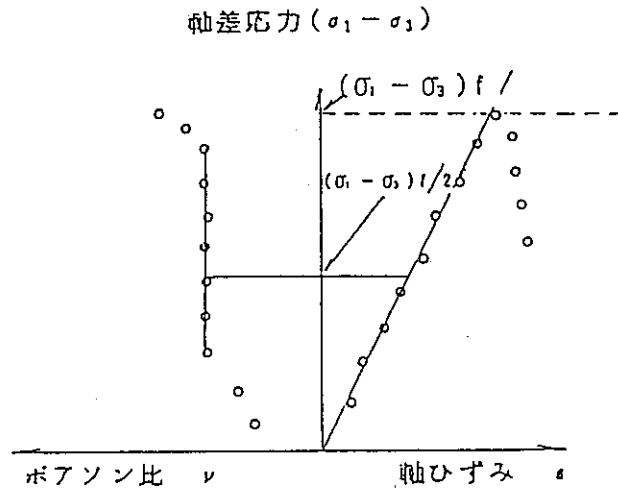


図-3.1.4.8 軸差応力～ポアソン比関係概念図

#### (4) 測定結果と考察

三軸圧縮試験結果をまとめて表-3.1.4.1に示す。表中のAT-3、BT-3、CT-3は、試験中に除荷・再載荷を伴う場合であり、それ以外は、除荷・再載荷を伴わない通常の三軸圧縮試験の結果である。AT-3、BT-3、CT-3については、試験中に除荷・再載荷を伴い、ひずみが伸びている可能性があることから、初期変形係数のみを求め、変形係数の算定は行っていない。

また、供試体の試験前後の状況の一例を写真-3.1.4.1～写真-3.1.4.3に示す。供試体の写真及び試験データは資料集に示す。

##### 1) 物理特性及び地質状況

断面ごとの物理特性及び地質状況を以下に示す。

###### A断面供試体：

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）の比較及び資料集に示した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断面供試体：

B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）の比較及び資料集に示し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 $0.5\text{kg/cm}^2$ の供試体は、湿潤密度が同じグループ（たとえば、BT-1）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断面供試体：

C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）の比較の結果を以下に示す。

CT-1の組では、CT-1-3（拘束圧 $20\text{kg/cm}^2$ ）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 $10\text{kg/cm}^2$ ）及びCT-2-3（拘束圧 $20\text{kg/cm}^2$ ）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。

また、資料集に示し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。特に、CT-1及びCT-2の組の供試体は、比較的均質とみなせるものから、レキ混じりの不均質なもので混在した状態であ

った。

## 2) 強度定数

三軸圧縮試験から求めた強度定数を図-3.1.4.9に示す。(3)の2)のデータの解析方法の中で示したように、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とおりの整理を行い、これらに対応した強度定数 $C'$ 及び $\phi'$ を求めた。

図-3.1.4.9によれば、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 $\phi'$ ともに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 $\phi'$ 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に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(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。

粘着力 $C'$ については、断面ごとに次のような傾向がある。A断面供試体の粘着力は $11\sim 14\text{kg/cm}^2$ の範囲内にあり、試料の違いによるばらつきはC断面と比較すれば小さい。また、算定方法の違いによる強度の違いも小さいと言える。B断面供試体では、試料1のみの結果ではあるが、算定方法の違いによる強度の違いは小さいと言える。C断面供試体では、試料の違いによるばらつきはA断面と比較すれば大きい。また、算定方法の違いによる強度の違いは試料1についてのみ大きくばらつくが、試料2及び試料3については比較的小さいと言える。

せん断抵抗角 $\phi'$ については、断面ごとに次のような傾向がある。A断面供試体のせん断抵抗角は $36\sim 47^\circ$ の範囲内にあり、試料の違いによるばらつきはC断面と比較すれば小さい。また、算定方法の違いによる強度の違いも小さいと言える。B断面供試体では、試料1のみの結果ではあるが、算定方法の違いによる強度の違いは小さいと言える。C断面供試体では、試料の違いによるばらつきはA断面と比較すれば大きい。また、算定方法の違いによる強度の違いは試料1についてのみ大きくばらつくが、試料2及び試料3については比較的小さいと言える。

## 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-3.1.4.10に示す。最大強度及び残留強度はいずれも軸差応力とひずみの関係から求めたものであ

る。

図-3.1.4.10(1)~図-3.1.4.10(3)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。

断面ごとの拘束圧と最大強度、残留強度の関係を以下に示す。

A断面供試体（図-3.1.4.10(1)参照）：

拘束圧と最大強度の関係については、拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ で最小値を示す以外は、3組とも異なった傾向を示す。AT-1については、拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ まで、拘束圧が増加すれば最大強度は増加する。AT-2については、拘束圧が $20\text{kg/cm}^2$ で最大値を示し、その後、拘束圧が増加すれば最大強度は減少する。AT-3については、拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ で最大値を示し、その後、拘束圧が増加すれば最大強度は減少する。

拘束圧と残留強度の関係については、3組ともにほぼ同様の傾向を示す。すなわち、拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ から $10\text{kg/cm}^2$ までは強度が増加し、拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ で最大値を示す。その後、拘束圧が増加すれば残留強度は減少するか、または、ほぼ一定値を示す。

B断面供試体（図-3.1.4.10(2)参照）：

拘束圧と最大強度の関係については、拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ のときに最大値を示し、その後、拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ のとき最小値を示すことについては3組ともに共通している。拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ から $30\text{kg/cm}^2$ の範囲では、BT-2及びBT-3は拘束圧が増加すれば最大強度は増加する。BT-1については拘束圧が $20\text{kg/cm}^2$ で増加し、その後減少する。拘束圧 $0.5\text{kg/cm}^2$ の場合に最大値を示す理由については1)で述べたように拘束圧 $0.5\text{kg/cm}^2$ の試験を行った試料の物理特性が他のものと違うためと考えられる。

拘束圧と残留強度の関係については、3組ともに異なった傾向を示す。BT-1では、拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ から $20\text{kg/cm}^2$ までは、拘束圧の増加とともに強度がわずかに増加し、拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ で最小値を示す。BT-2では、拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ まで拘束圧の増加とともに強度がわずかに増加する。BT-3では、拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ から $10\text{kg/cm}^2$ までは強度が増加し、拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ で最大値を示す。その後、拘束圧が増加すれば残留強度はほぼ一定値を示す。

C断面供試体（図-3.1.4.10(3)参照）：

拘束圧と最大強度の関係については、各拘束圧及び供試体ごとのデータのばらつ

きが大きく、一定の傾向は見いだせない。CT-1では、拘束圧 $0.5\text{kg/cm}^2$ の場合に最大値を示し、その後は拘束圧 $30\text{kg/cm}^2$ まではほぼ一定値を示す。CT-2では、拘束圧 $20\text{kg/cm}^2$ まで拘束圧の増加とともに強度は増加し、その後 $30\text{kg/cm}^2$ で減少する。CT-3では、拘束圧 $0.5\text{kg/cm}^2$ で最大値を示し、その後、 $30\text{kg/cm}^2$ まで減少、増加、減少といった変化を示す。

残留強度については、BT-1、BT-2では、拘束圧 $30\text{kg/cm}^2$ まで拘束圧の増加とともに強度は増加する。BT-3では拘束圧 $30\text{kg/cm}^2$ で最大値を示すが、それに至るまでは増加、減少、増加といった変化を示す。

#### 4) 拘束圧と初期変形係数の関係

図-3.1.4.11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 $10,000\sim 22,500\text{kg/cm}^2$ 、B断面で $10,000\sim 27,500\text{kg/cm}^2$ 、C断面で $15,000\sim 30,000\text{kg/cm}^2$ で、C断面がA、B断面に比べて高めの値となった。

断面ごとの拘束圧と初期変形係数の関係を以下に示す。

A断面供試体（図-3.1.4.11(1)参照）：

AT-1及びAT-2については、拘束圧 $20\text{kg/cm}^2$ まで拘束圧の増加とともに初期変形係数は増加し、その後、 $30\text{kg/cm}^2$ で減少する。AT-3については、拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ まで拘束圧の増加に伴い、初期変形係数も増加する傾向が見られる。

B断面供試体（図-3.1.4.11(2)参照）：

拘束圧 $0.5\text{kg/cm}^2$ の場合に初期変形係数が最大値を示す点については、3供試体に共通しているが、拘束圧が $10\sim 30\text{kg/cm}^2$ の区間ではほぼ同じ傾向を示す。

C断面供試体（図-3.1.4.11(3)参照）：

3供試体毎に異なった傾向を示す。CT-1については、拘束圧が $10\text{kg/cm}^2$ まで減少し、その後、拘束圧の増加に伴って初期変形係数は増加するが、拘束圧の変化に対する初期変形係数の変化は小さい。CT-2については、拘束圧が $20\text{kg/cm}^2$ までは拘束圧の増加に伴って初期変形係数は増加し、その後、 $30\text{kg/cm}^2$ で減少する。CT-3では、拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ まで、拘束圧の増加に伴って初期変形係数は増加する。

#### 5) 除荷・再載荷時の変形係数の変化（図-3.1.4.12～図3.1.4.14参照）

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、応力～ひずみ関係が除荷時と再載荷時とで異なること、すなわち、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、1回目または2回目の除荷時の変形係数、すなわち最大強度に至る前での変形係数が最も大きく、その後3回目または4回目の除荷時、すなわち残留状態では、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。

断面ごとに異なる傾向としては、以下のようである。A断面及びC断面での変形係数の大きさは、概ね、

(除荷時) > (再載荷時) > (中央)

となる傾向がある。また、B断面では、概ね、

(再載荷時) > (除荷時) > (中央)

となる傾向がある。

#### 6) 拘束圧とポアソン比の関係 (図-3.1.4.15、図-3.1.4.16参照)

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-3.1.4.15に示す。A断面及びB断面の供試体では、ともに拘束圧が20kg/cm<sup>2</sup>の場合にポアソン比が0.29まで大きく低下している。これに対し、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を図-3.1.4.16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。これに対し、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-3.1.4.17参照)

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との関係を図-3.1.4.17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-3.1.4.17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。

断面ごとの除荷・再載荷に伴うポアソン比の変化を以下に示す。

A断面供試体 (図-3.1.4.17(1)参照) :

拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ 及び $10\text{kg/cm}^2$ の場合と、 $20\text{kg/cm}^2$ 及び $30\text{kg/cm}^2$ の場合とで傾向が異なる。拘束圧が $0.5\text{kg/cm}^2$ 及び $10\text{kg/cm}^2$ の場合は、除荷・再載荷を行ってもポアソン比の値は0.43のままでほとんど変化がないと言える。拘束圧が $20\text{kg/cm}^2$ の場合は、除荷・再載荷に伴い、ポアソン比の値は1回目再載荷時まで増加し、その後一定値を示す。拘束圧が $30\text{kg/cm}^2$ の場合は、除荷・再載荷に伴い、ポアソン比の値は2回目除荷時まで増加し、その後減少する。拘束圧が $20\text{kg/cm}^2$ 及び $30\text{kg/cm}^2$ の場合のポアソン比の変化は、0.33~0.37の範囲である。

B断面供試体 (図-3.1.4.17(2)参照) :

B断面供試体では、拘束圧ごとに変化のしかたが異なり、一定の傾向は見いだせない。ポアソン比は0.36~0.40の範囲にある。

C断面供試体 (図-3.1.4.17(3)参照) :

C断面供試体では、拘束圧ごとに変化のしかたが異なり、一定の傾向は見いだせない。ポアソン比は0.35~0.38の範囲にある。

表-3.1.4.1(1) 三軸圧縮試験結果一覧 (A断面)

	拘束圧 (kg/cm <sup>2</sup> )				強度定数					
					軸差応力				主応力比	
	0.5	10	20	30	C <sub>cu</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi_{cu}$ (°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)
AT-1(40.17-43.86m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	52.4	67	81.9	84.5						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	20.6	55.1	39.9	41.2						
破壊ひずみ (%)	0.68	1.18	0.70	0.78	18.35	21.53	14.16	35.96	13.81	36.73
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	10200	14200	20000	16800						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	10200	12000	18300	15100						
ポアソン比	0.47	0.41	0.29	0.32						
AT-2(40.3-44.77m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	60.4	69.6	91.5	85.1						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	26.7	48.2	40.5	36.6						
破壊ひずみ (%)	0.53	0.85	0.64	0.78	20.98	20.44	12.93	41.42	11.96	42.99
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	13600	14100	21800	15900						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	13600	13300	20300	15900						
ポアソン比	0.48	0.44	0.29	0.39						
AT-3(44.88-45.36m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	53.81	90.11	83.74	74.88						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	27.1	46.5	32.9	60.2						
破壊ひずみ (%)	0.55	0.67	0.65	0.71	20.93	20.06	10.70	46.94	10.66	47.01
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	12300	18300	20300	22100						
ポアソン比	0.43	0.43	0.33	0.35						

表-3.1.4.1(2) 三軸圧縮試験結果一覧 (B断面)

	拘束圧 (kg/cm <sup>2</sup> )				強度定数					
					軸差応力				主応力比	
	0.5	10	20	30	C <sub>cu</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	φ <sub>cu</sub> (°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	φ'(°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	φ'(°)
BT-1(62.85-74.29m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	97.5	73.8	82.2	75.6						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	36.2	37	39.4	30.2						
破壊ひずみ(%)	0.48	0.71	0.68	0.86	41.14	0.00	7.29	52.12	8.79	49.77
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	24700	13800	15000	11000						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	24700	13500	14100	10400						
ポアソン比	0.45	0.42	0.39	0.39						
BT-2(63.06-74.71m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	135	61.2	63.3	81.1						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	12.5	18.2	20.8	23.5						
破壊ひずみ(%)	0.61	0.80	0.92	0.90	0.00	47.93	算出なし		算出なし	
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	26800	11700	12100	15000						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	26800	9760	10500	12400						
ポアソン比	0.44	0.45	0.41	0.36						
BT-3(63.17-75.13m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	106.4	48.81	68.13	71.02						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	19.8	39.5	29.8	29.9						
破壊ひずみ(%)	0.55	0.68	0.70	0.80	15.18	26.57	算出なし		算出なし	
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	21600	13900	13400	14500						
ポアソン比	0.39	0.39	0.37	0.37						

表-3.1.4.1(3) 三軸圧縮試験結果一覧 (C断面)

	拘束圧 (kg/cm <sup>2</sup> )				強度定数					
					軸差応力				主応力比	
	0.5	10	20	30	C <sub>cu</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	φ <sub>cu</sub> (°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	φ'(°)	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	φ'(°)
CT-1(94.73-135.45m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	118	83	85.4	85.8						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	13.7	45.5	47.4	61.2						
破壊ひずみ(%)	0.65	0.90	0.60	0.75	46.54	0.00	28.32	20.45	7.46	46.65
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	22800	20800	21300	22800						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	21900	18500	20300	22200						
ポアソン比	0.42	0.41	0.29	0.34						
CT-2(99.88-134.39m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	51.1	67.5	123	95.2						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	17.9	26	52.6	53.7						
破壊ひずみ(%)	0.52	0.30	0.60	0.49	12.00	34.23	5.92	48.92	4.80	49.91
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	15000	25800	30800	27600						
変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	15000	25100	30800	25500						
ポアソン比	0.45	0.39	0.29	0.35						
CT-3(100.13-111.34m)										
最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	89.59	68.41	85.81	66.12						
残留強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	18.1	39.2	33.6	43.2*						
破壊ひずみ(%)	0.61	0.62	0.60	0.75	38.74	0.00	35.50	4.11	31.71	7.04
初期変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	16400	18900	21700	22800						
ポアソン比	0.38	0.38	0.37	0.35						

\* 漏水のため最終計測値とした



試験前



試験後

写真-3.1.4.1 三軸圧縮試験用供試体の一例（A断面）

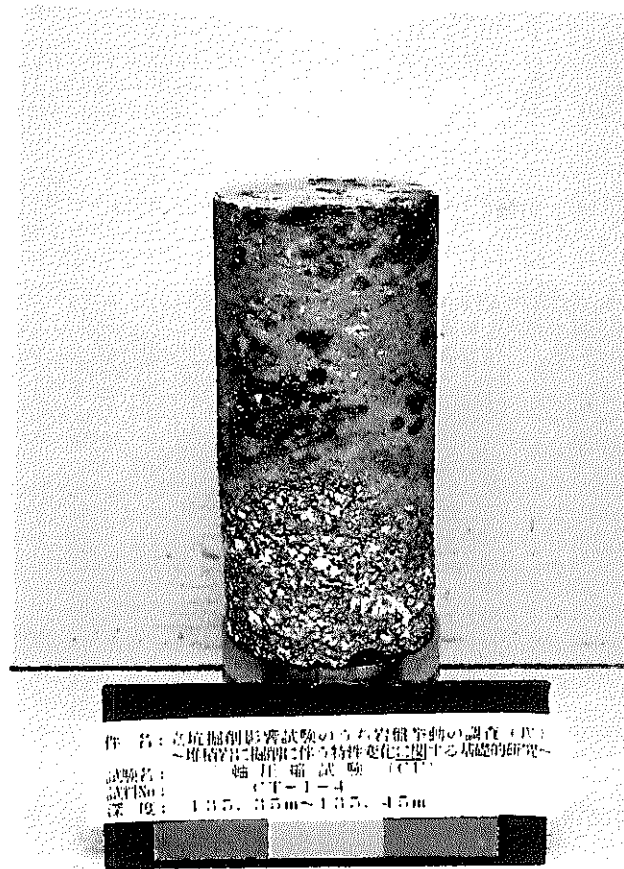


試験前

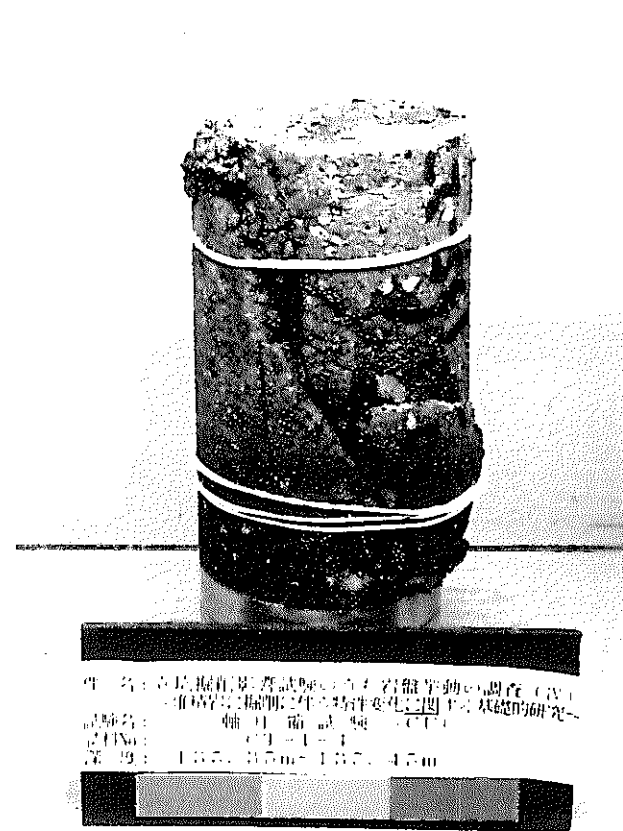


試験後

写真-3.1.4.2 三軸圧縮試験用供試体の一例（B断面）



試験前



試験後

写真-3.1.4.3 三軸圧縮試験用供試体の一例（C断面）

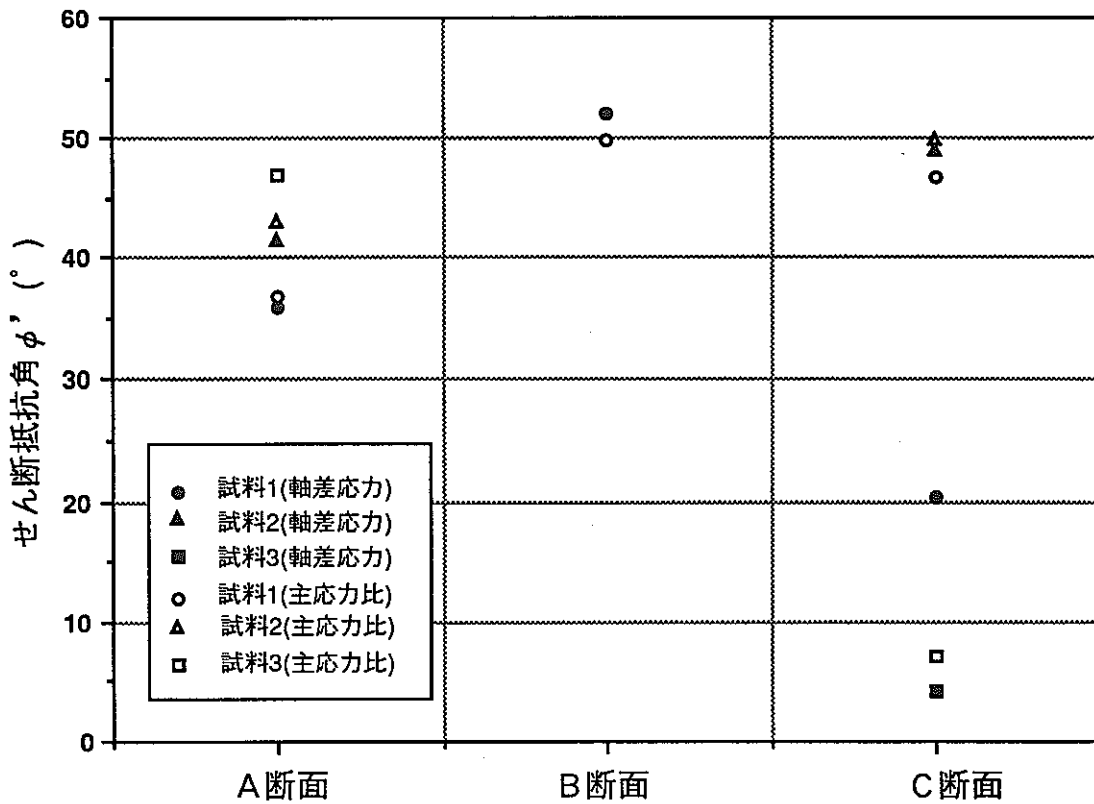
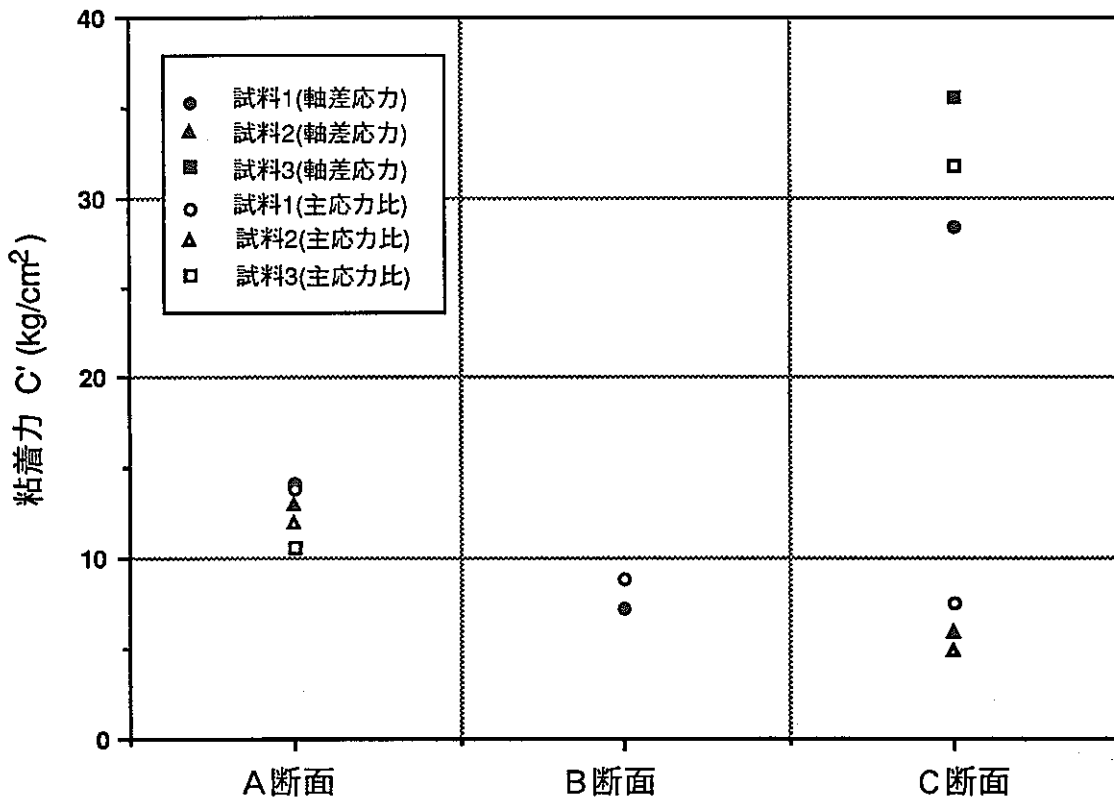


図-3.1.4.9 三軸圧縮試験から求めた強度定数



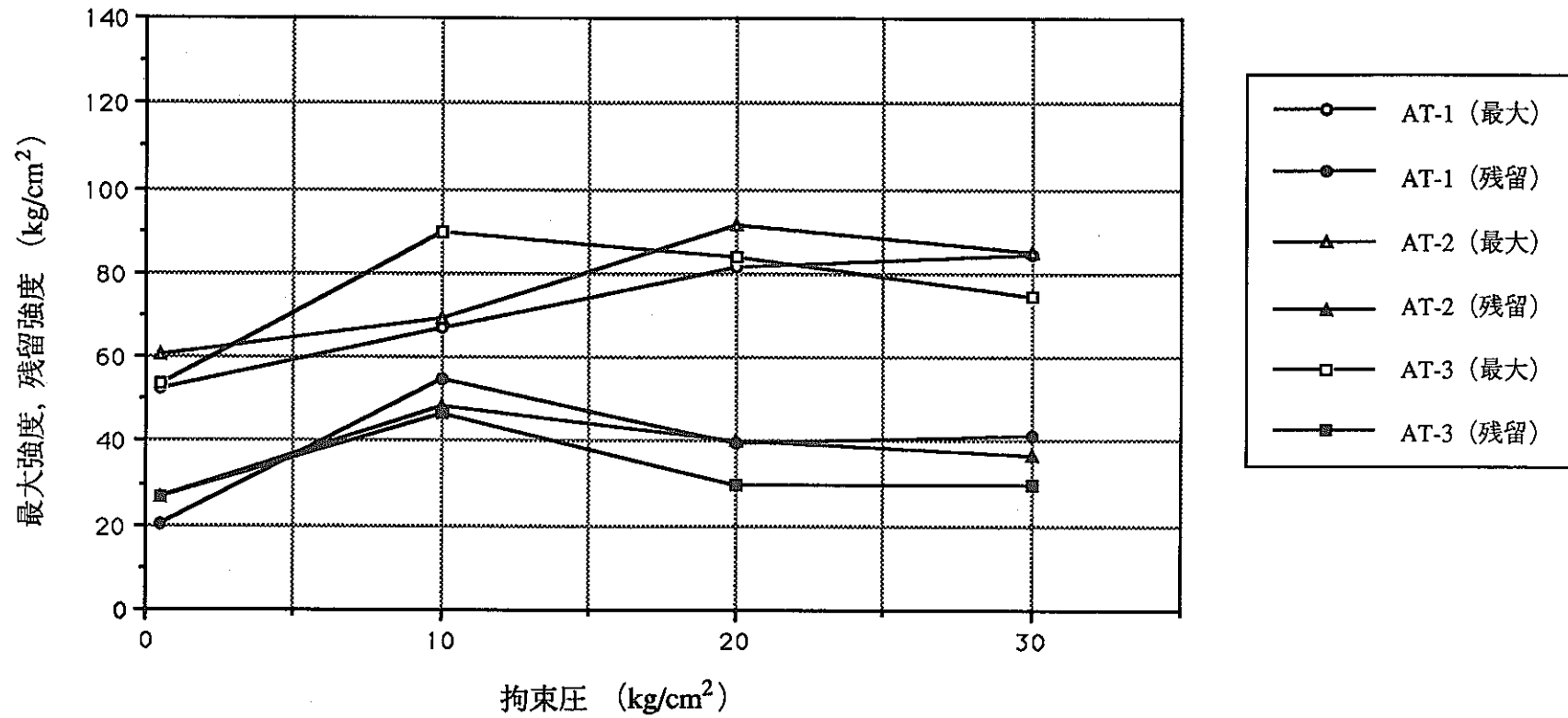


図-3.1.4.10(1) 強度と拘束圧の関係 (A断面)

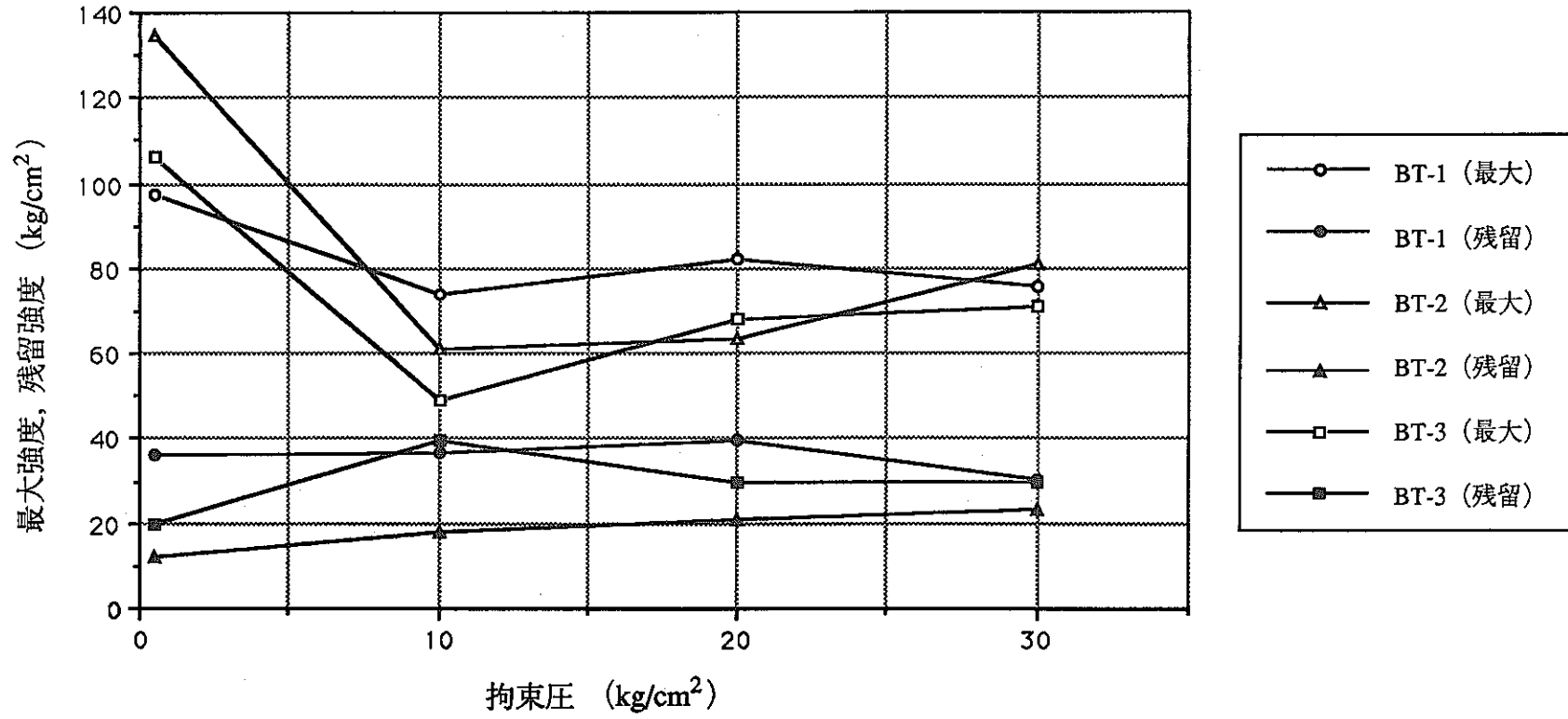


図-3.1.4.10(2) 強度と拘束圧の関係 (B断面)

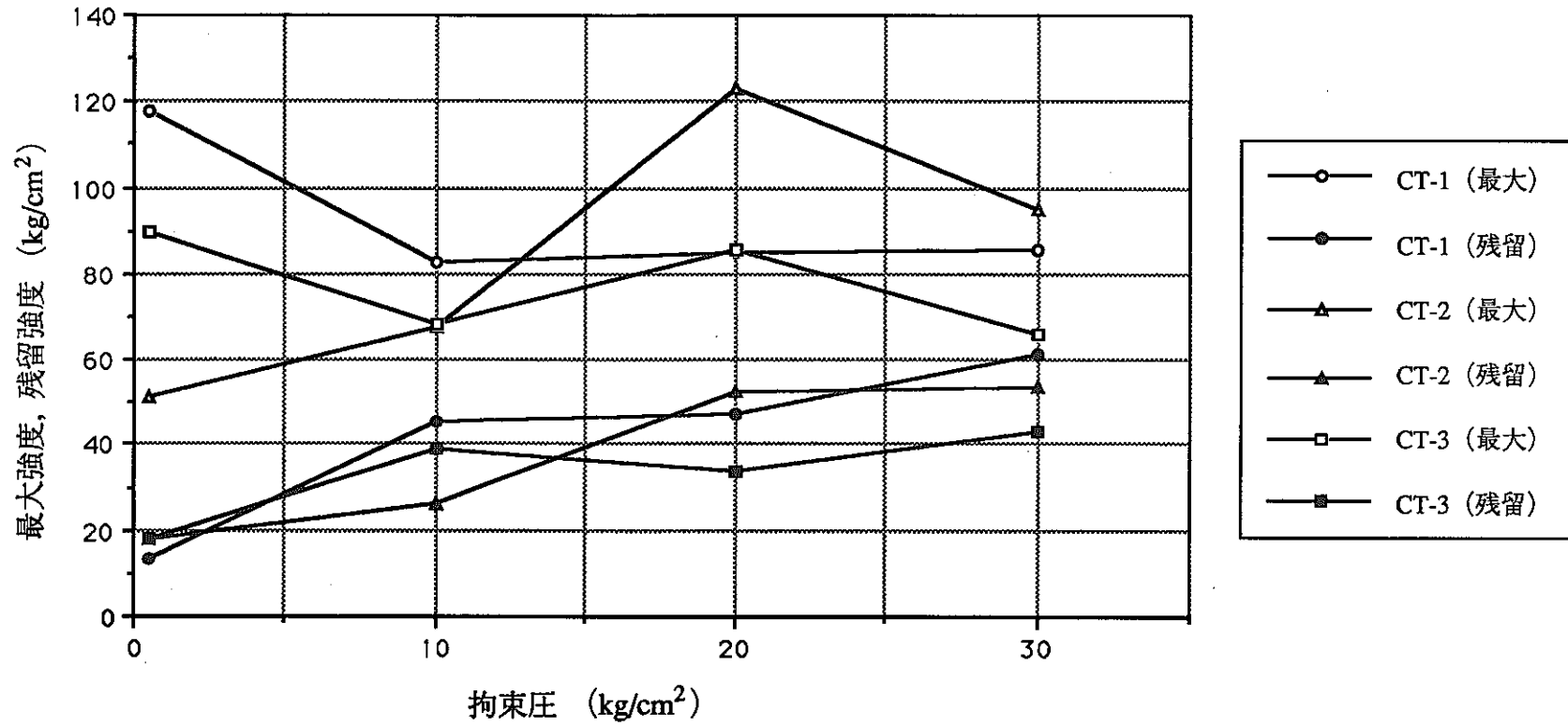


図-3.1.4.10(3) 強度と拘束圧の関係 (C断面)

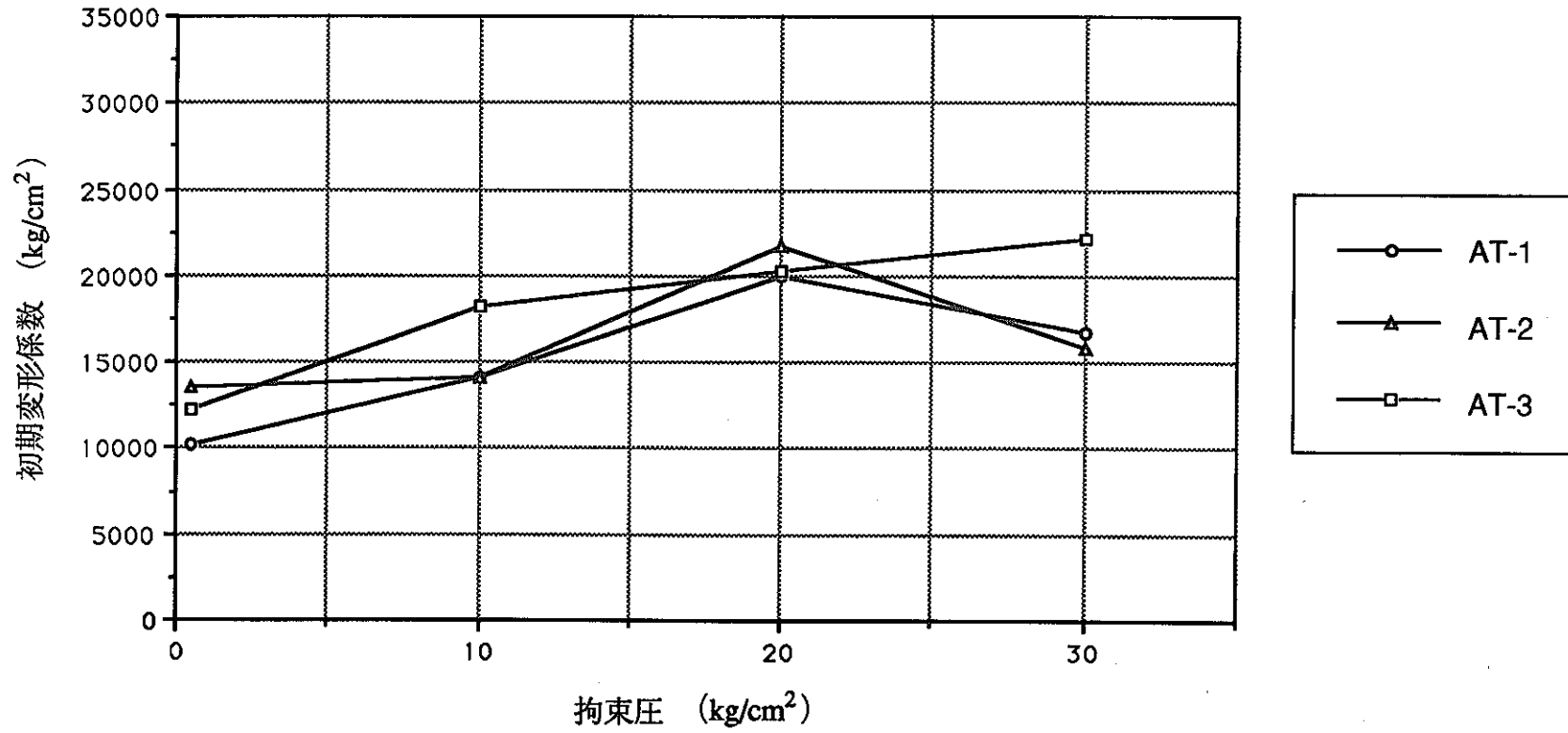


図-3.1.4.11(1) 初期変形係数と拘束圧の関係 (A断面)

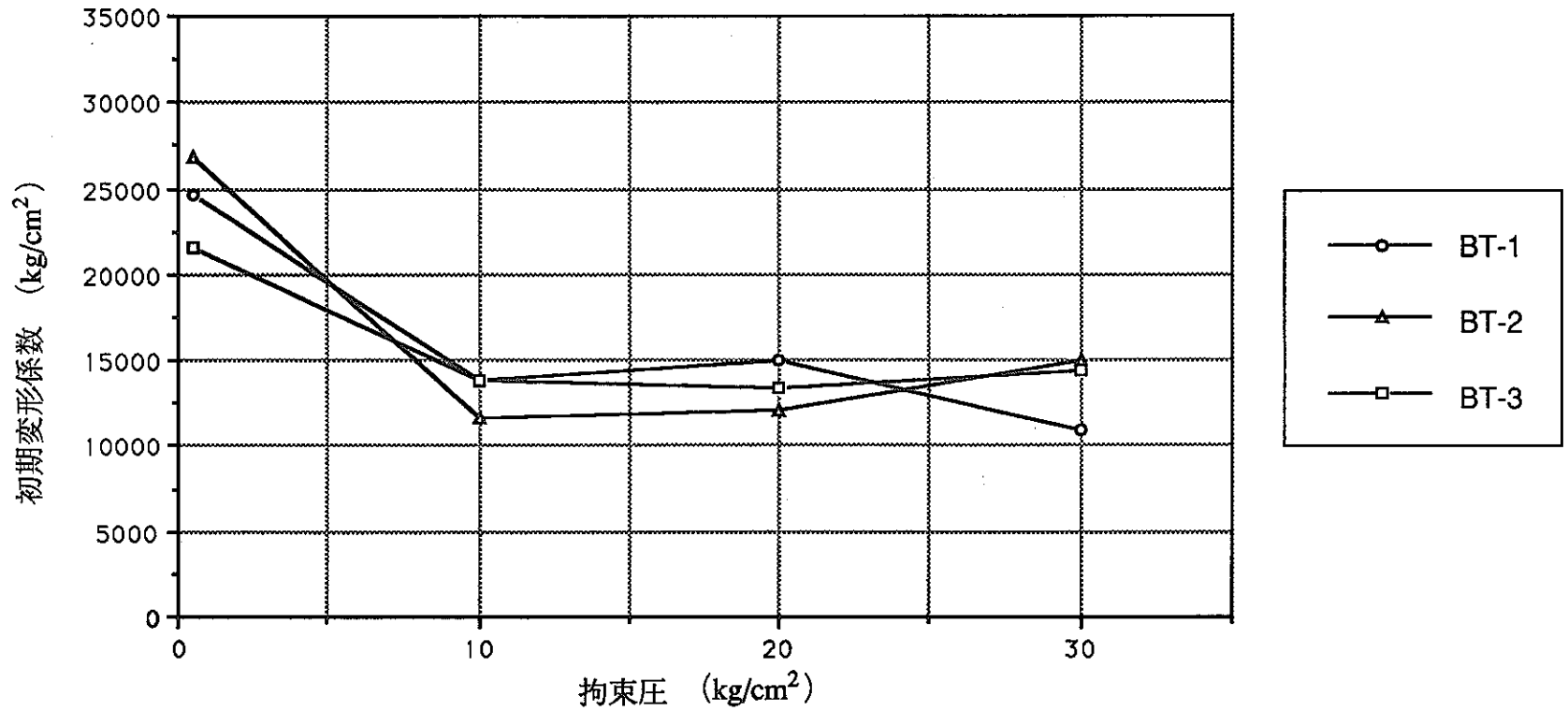


図-3.1.4.11(2) 初期変形係数と拘束圧の関係 (B断面)

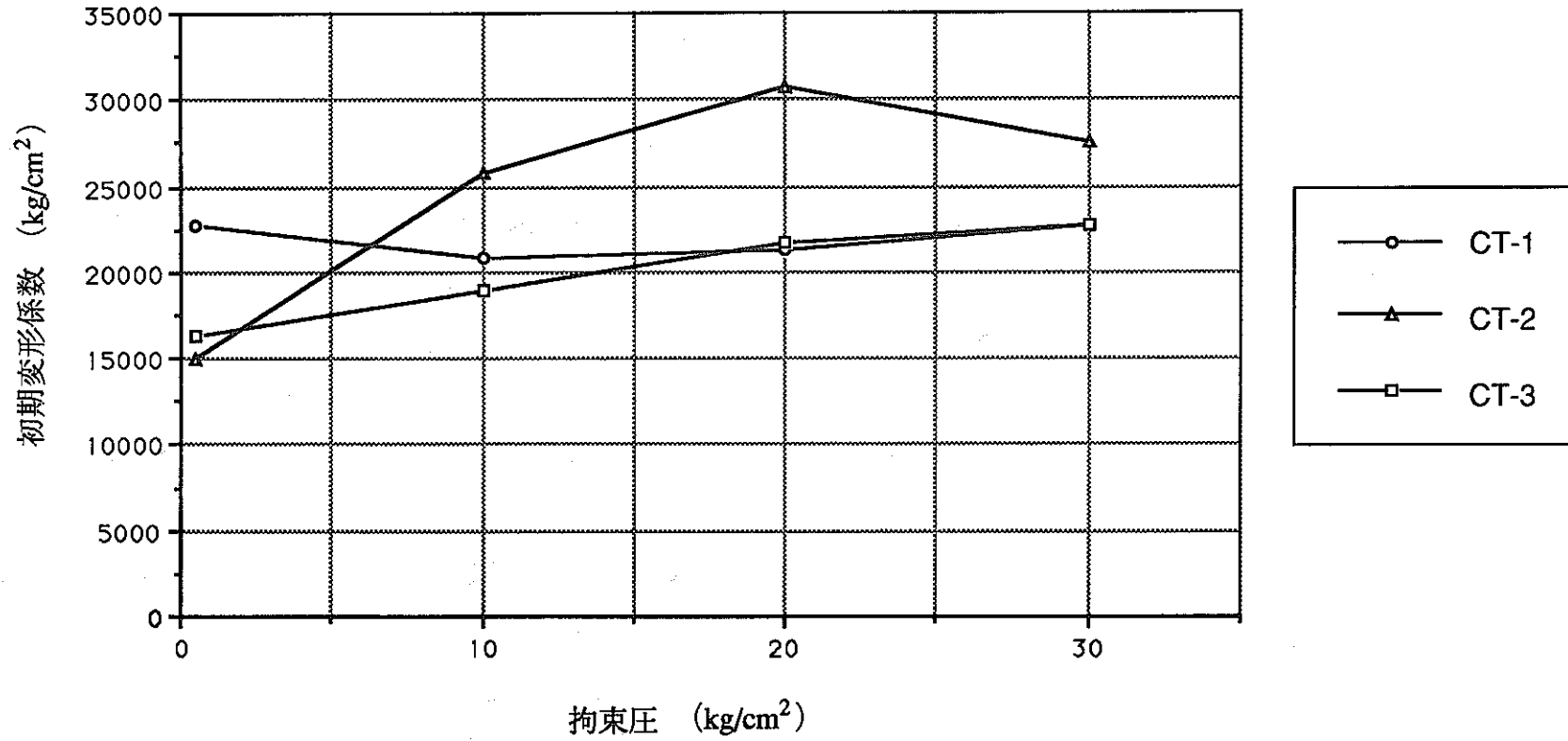


図-3.1.4.11(3) 初期変形係数と拘束圧の関係 (C断面)

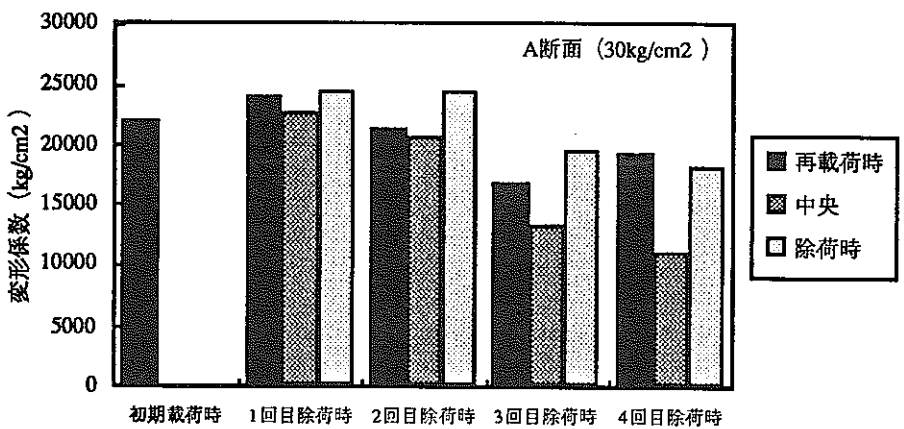
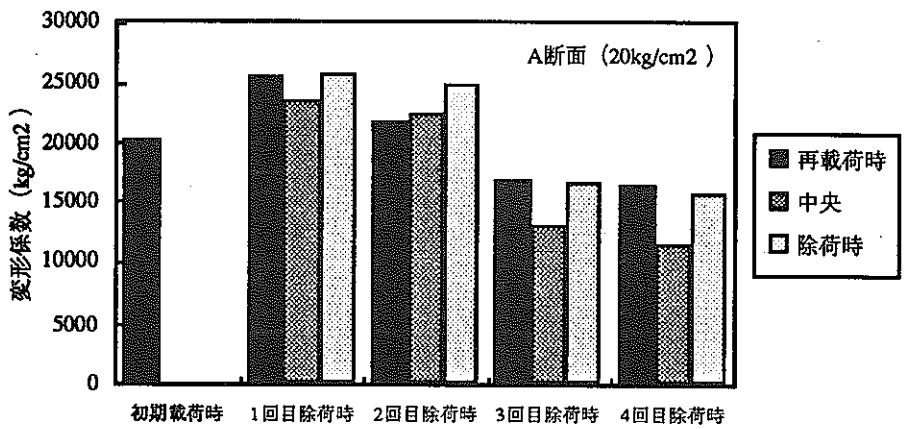
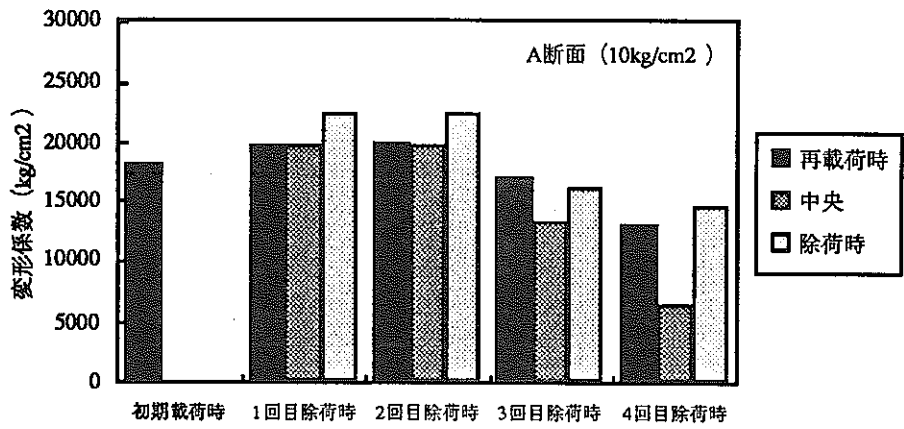
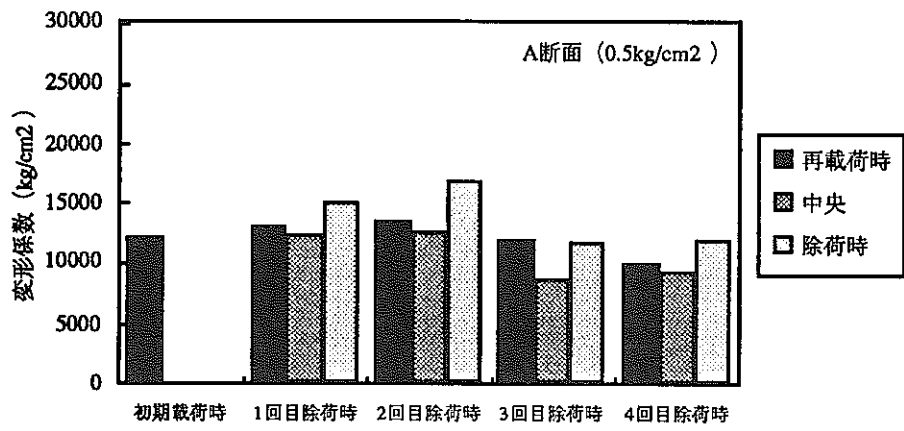


図-3.1.4.12 除荷・再載荷時の変形係数 (A断面)

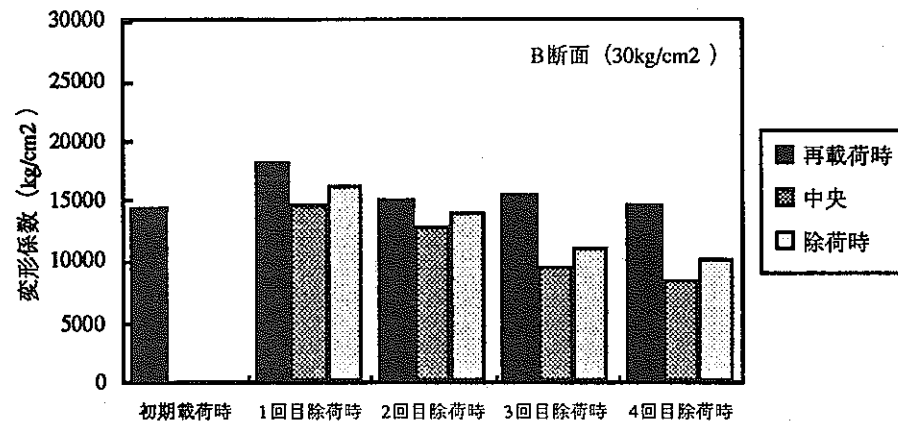
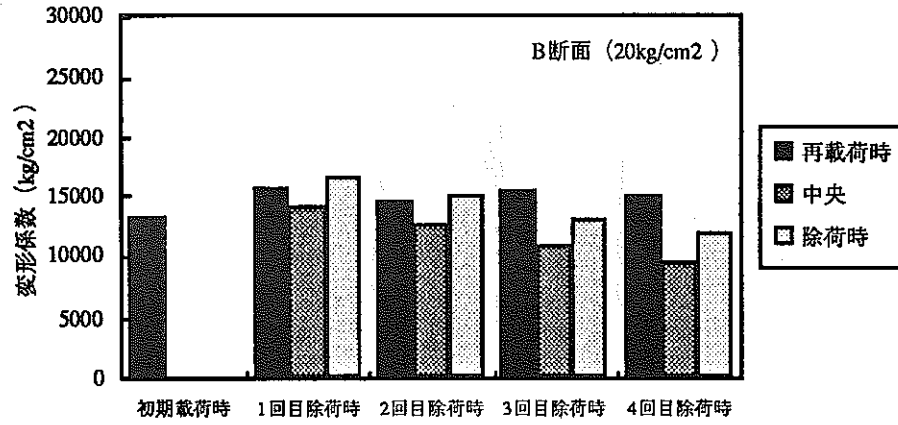
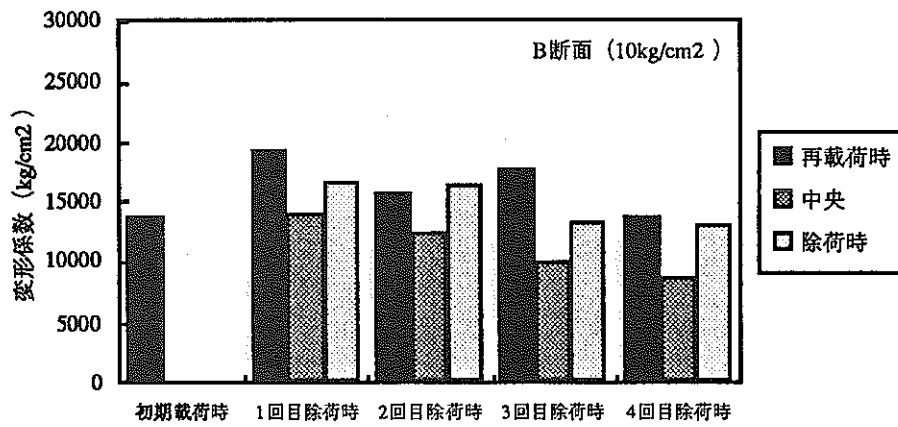
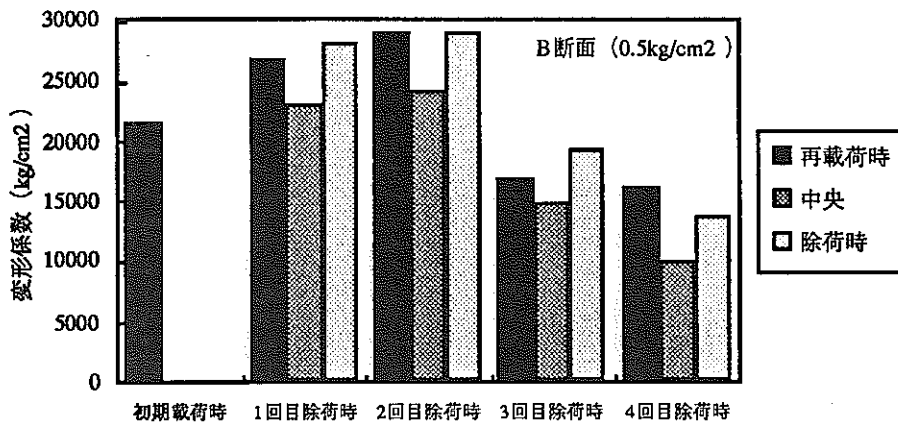


図-3.1.4.13 除荷・再載荷時の変形係数 (B断面)



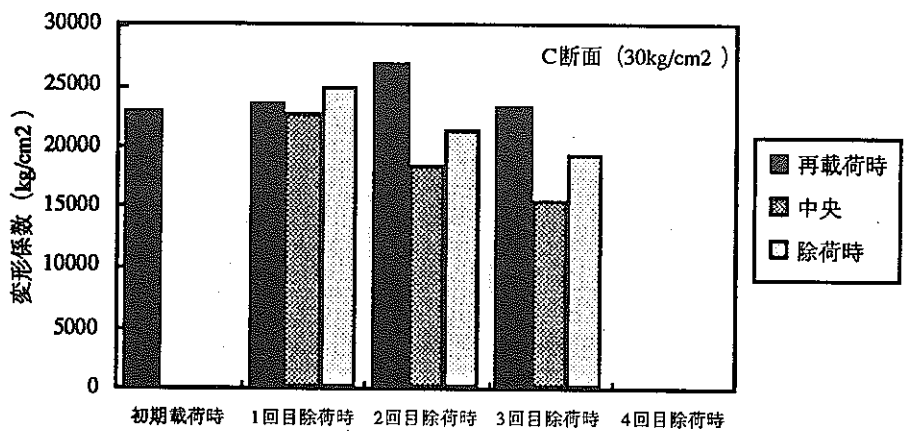
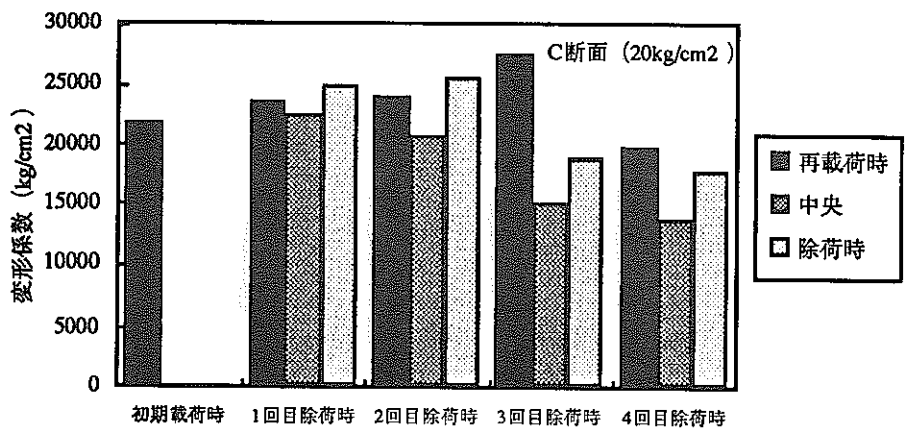
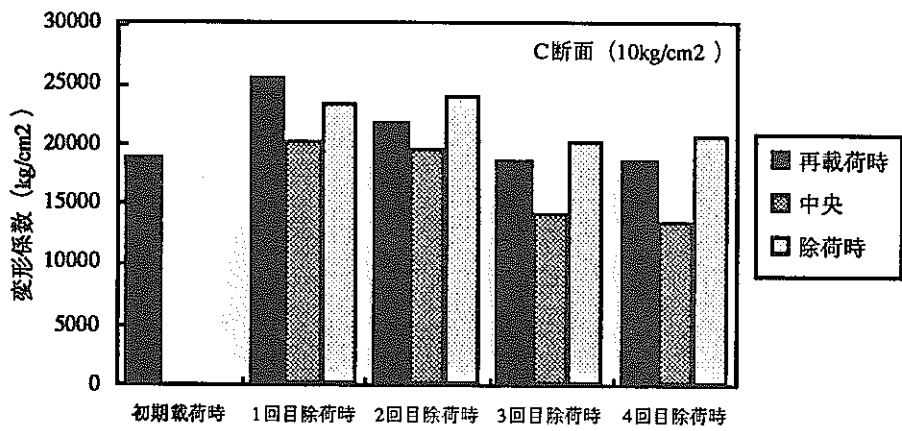
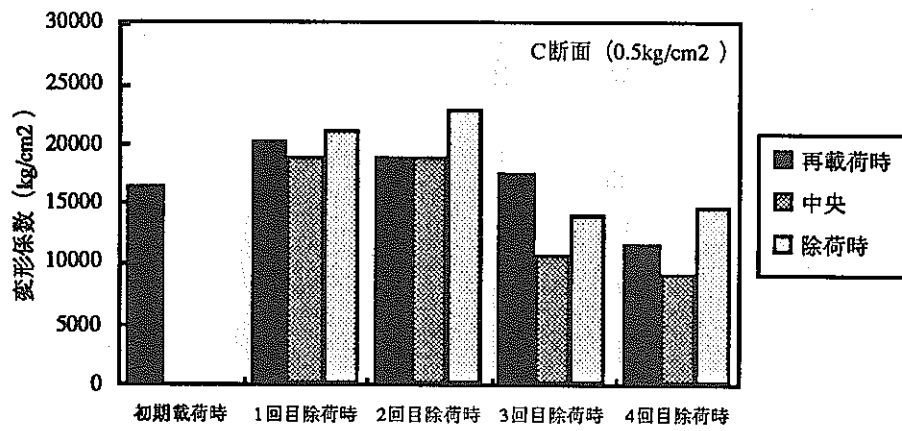


図-3.1.4.14 除荷・再載荷時の変形係数 (C断面)

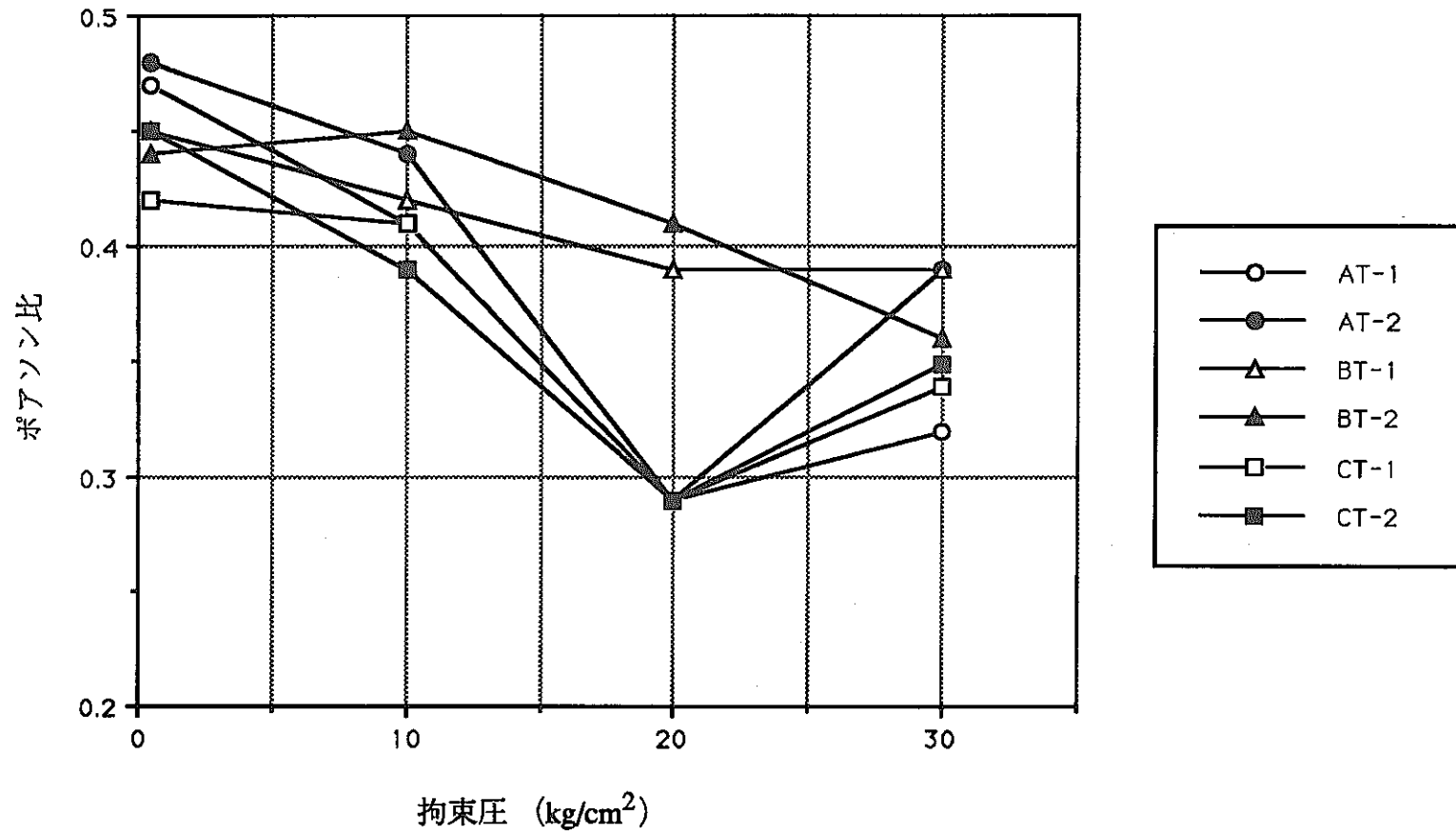


図-3.1.4.15 拘束圧とポアソン比の関係 (通常の三軸試験結果)

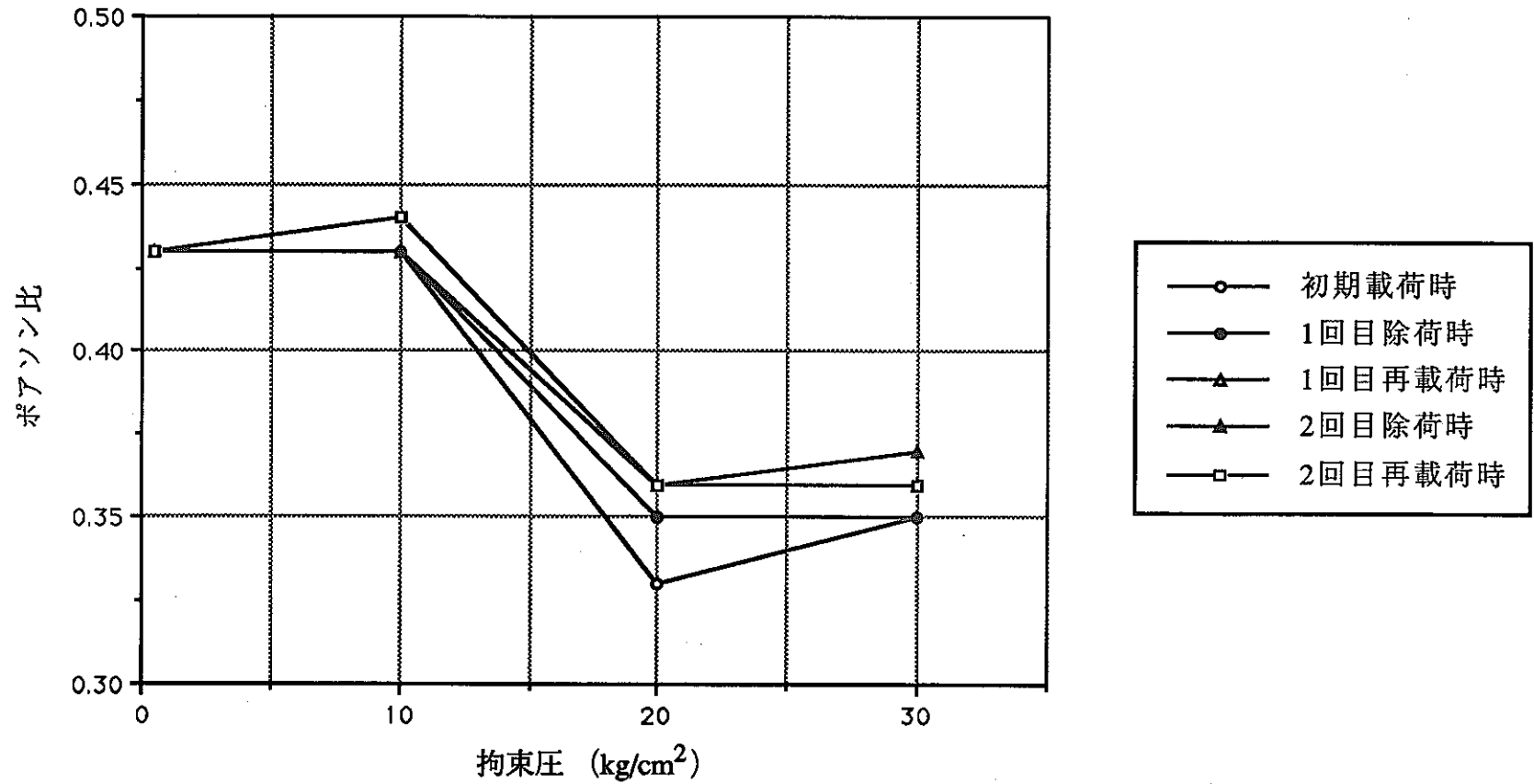


図-3.1.4.16(1) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、A断面)

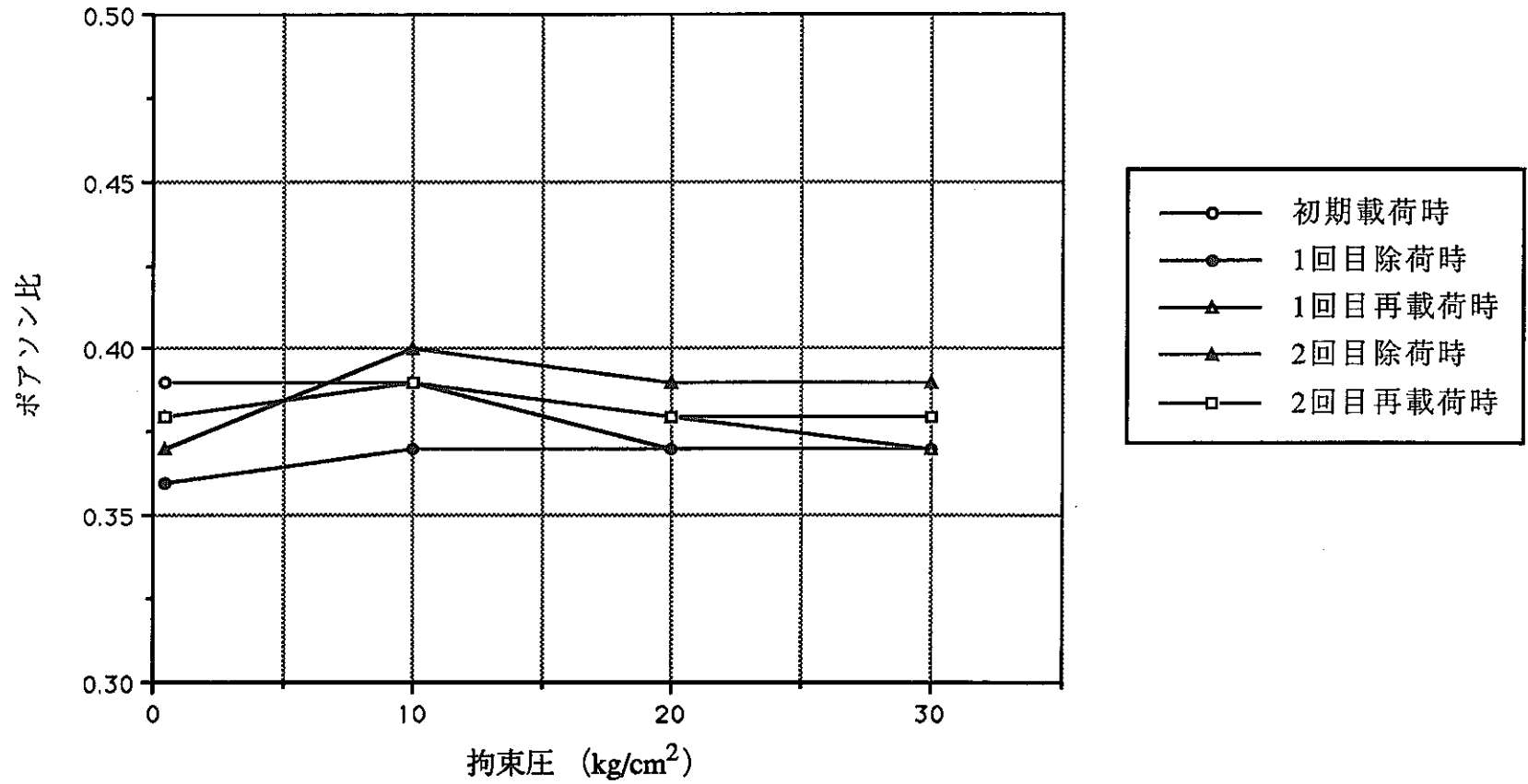


図-3.1.4.16(2) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、B断面)

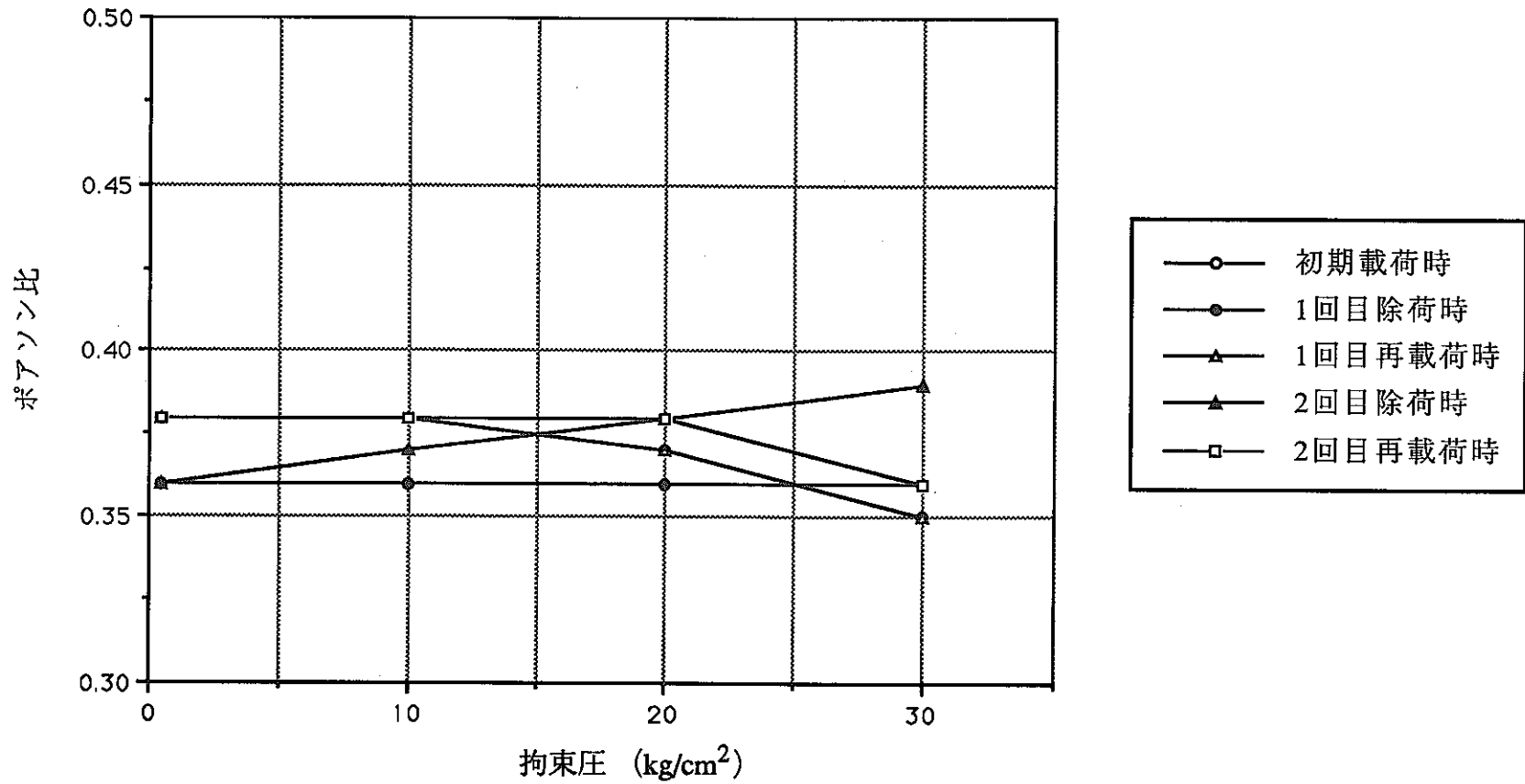


図-3.1.4.16(3) 拘束圧とポアソン比の関係 (除荷・再載荷を伴う三軸試験結果、C断面)

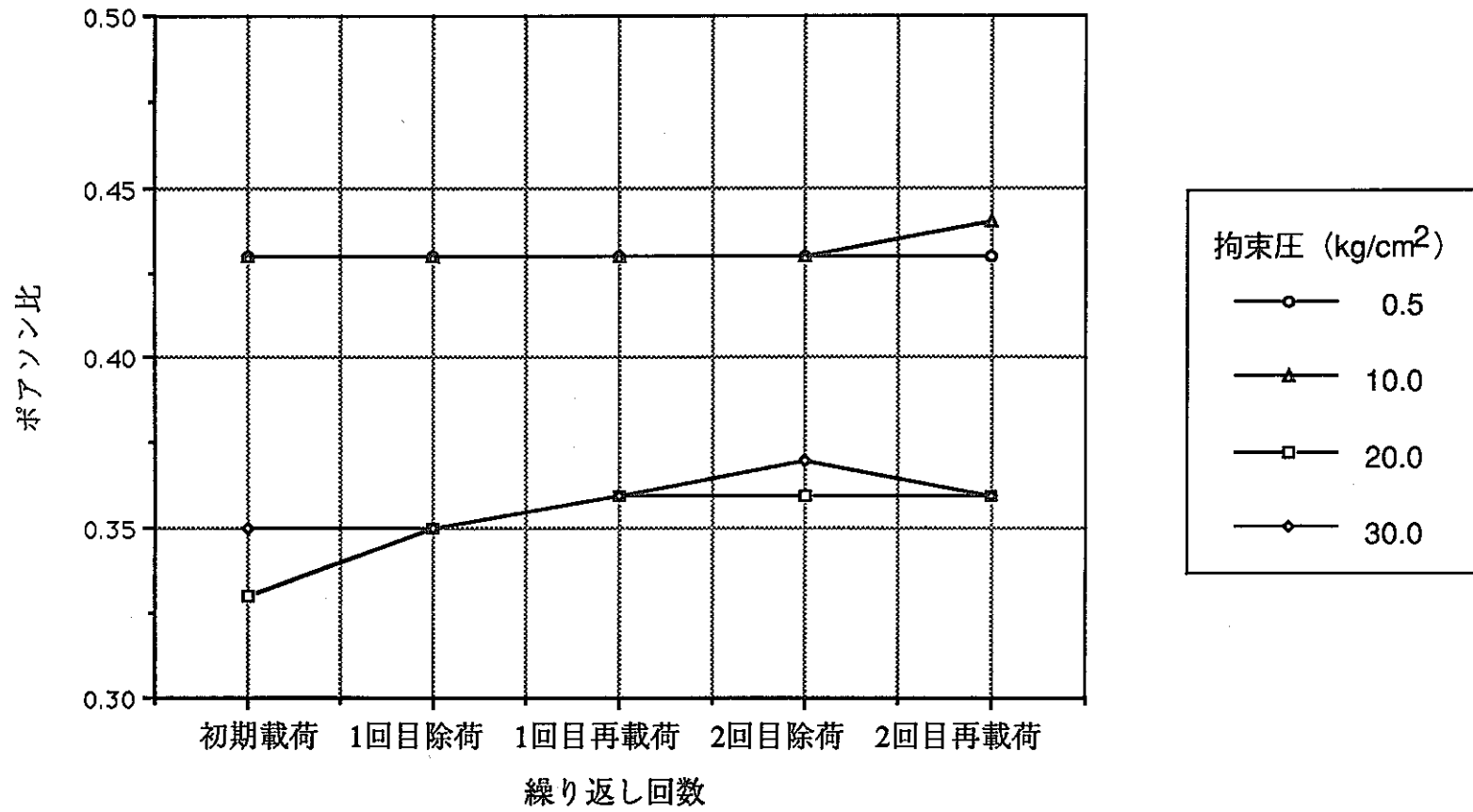


図-3.1.4.17(1) ポアソン比と繰返し回数の関係 (A断面)

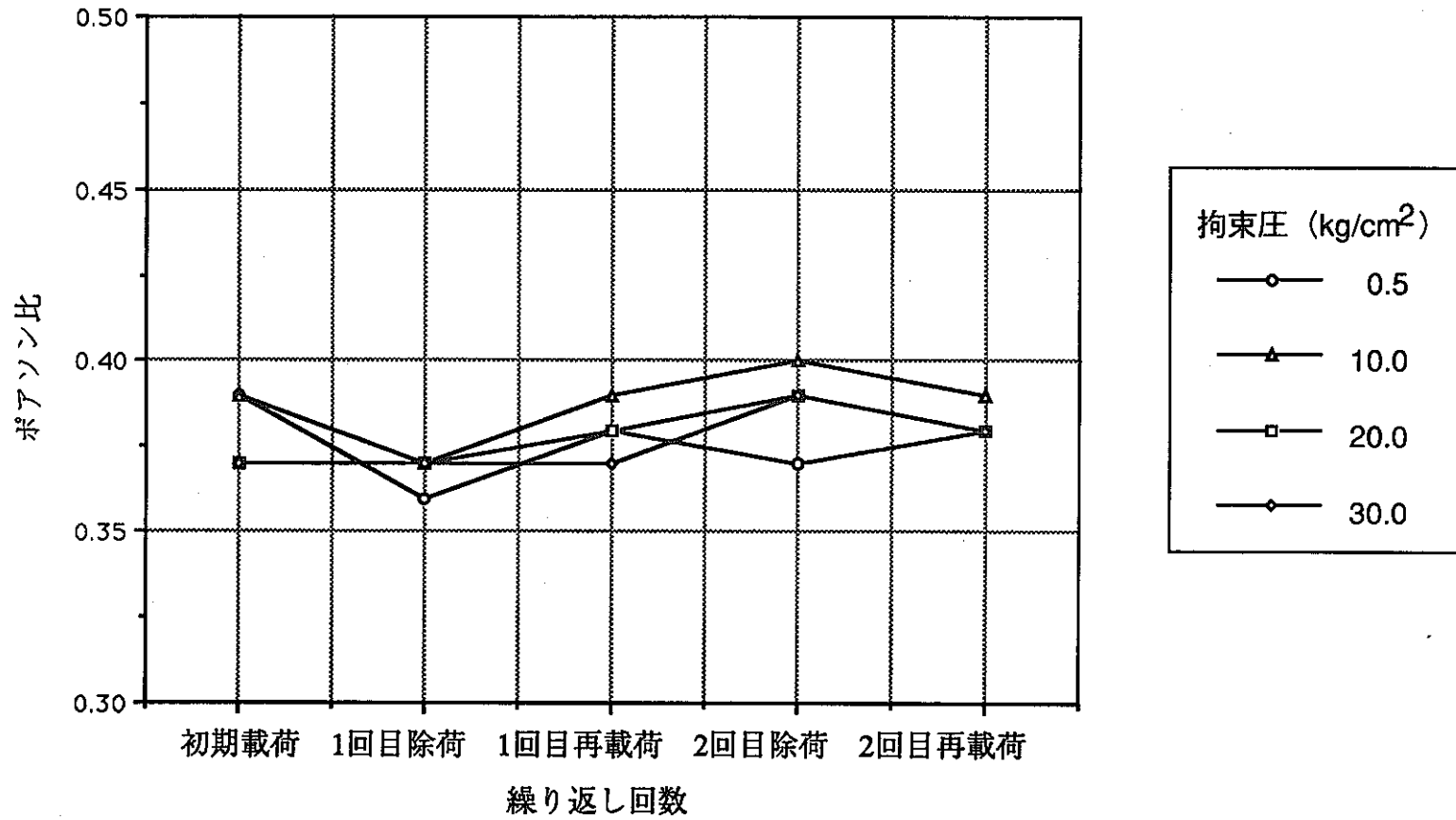


図-3.1.4.17(2) ポアソン比と繰り返し回数の関係 (B断面)

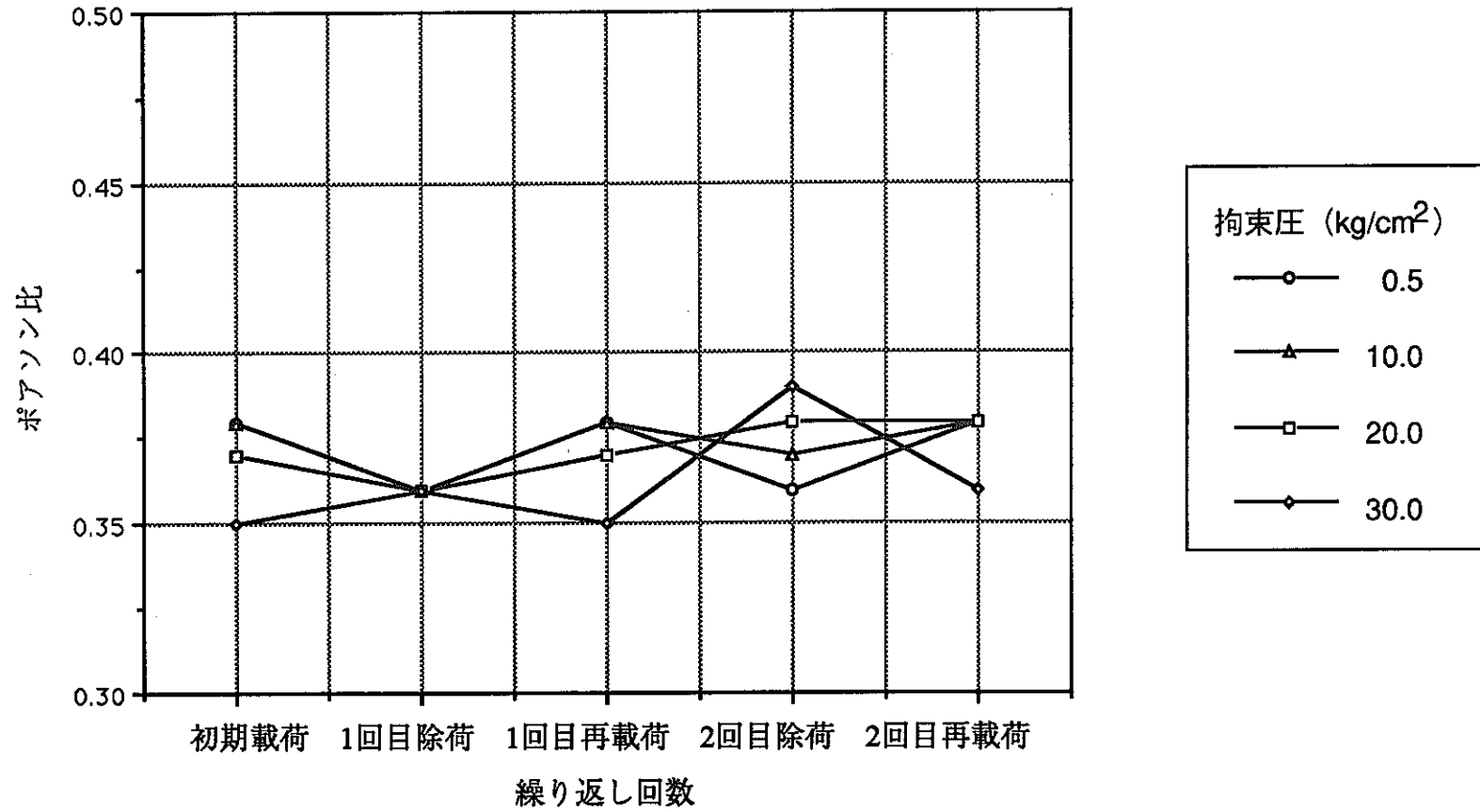


図-3.1.4.17(3) ポアソン比と繰返し回数の関係 (C断面)



## (5) 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 $\phi'$ ともに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 $\phi'$ 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に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 $20\text{kg/cm}^2$ 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。

## 3.2 長期挙動に関する特性

### 3.2.1 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、応力比を高めに設定して、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。

### 3.2.2 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-3.2.2.1に示す。

載荷方式は応力制御法である。荷重は空気圧方式であり、初期の載荷時には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。

### 3.2.3 試験方法

#### (1) 試験方法

試験方法の設定にあたっては、2.3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の供試体を作成した。供試体の整形時には、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。

載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供試体表面の乾燥に伴う物性の変化が懸念されるため、供試体の周辺に濡れタオルを置いて供試体になるべく乾燥しないように留意した。

測定は変位の出力をデータロガーで採録し、試験終了後、コンピュータによって処理した。応力比が0.9~0.8と大きいため、軸荷重の載荷後、比較的短時間で供試体が破壊に至ることが予想されることから、記録は可能な限り密なサンプリング時間とした。供試体の破壊状況はビデオテープに記録した。

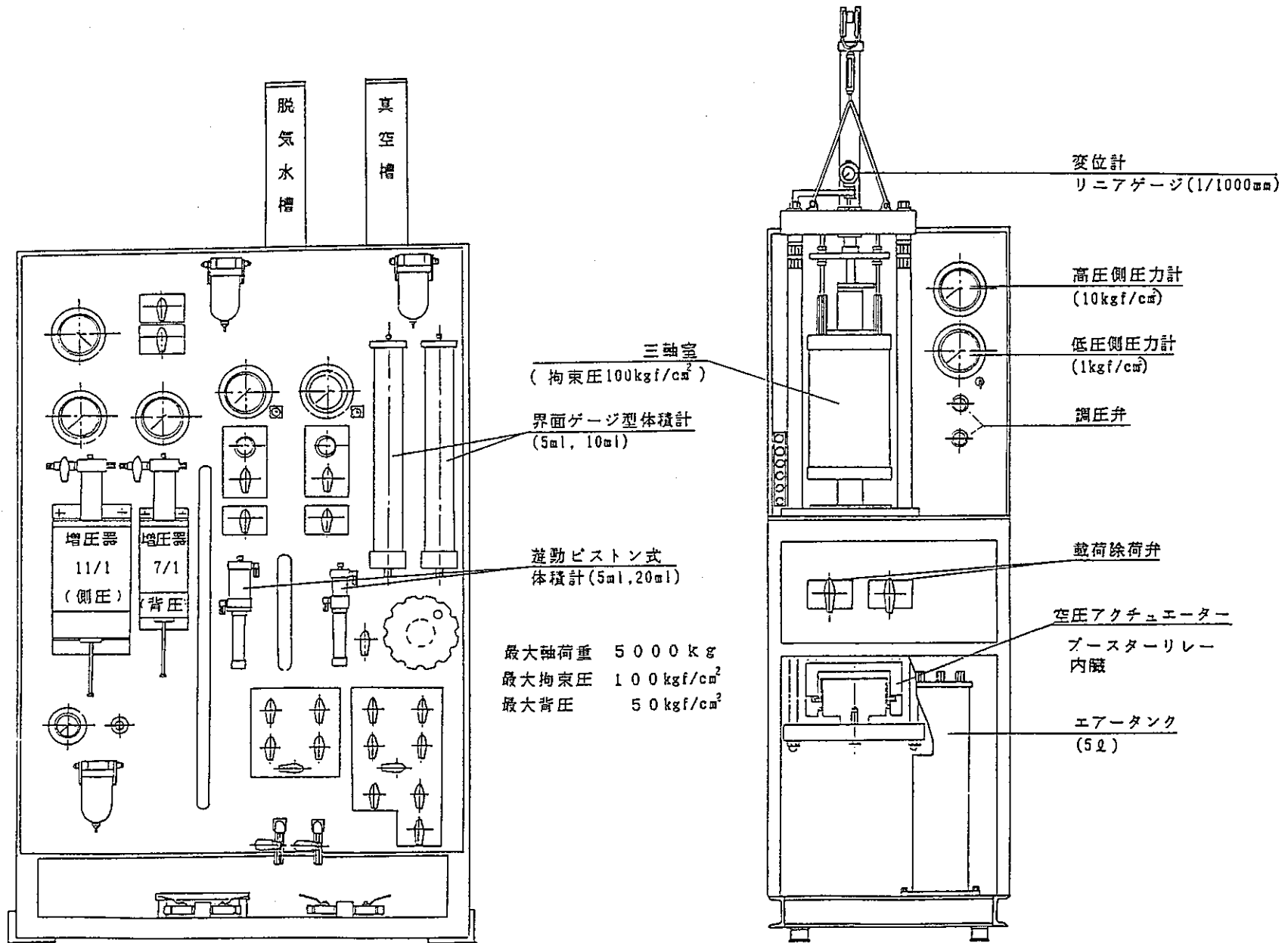


図-3.2.2.1 5TF高容量三軸クリープ試験装置 (改良型)

## (2) 試験時の荷重の設定

試験時の載荷重の設定は、2.3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-3.2.2.2に示す。

出典：i)「立坑掘削影響試験のうち岩盤挙動の調査（Ⅱ）」PNC ZJ 7449 91-002  
(1991.5)

ii)「立坑設計のための岩盤特性試験報告書」（1989.6）

- 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、載荷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載荷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。

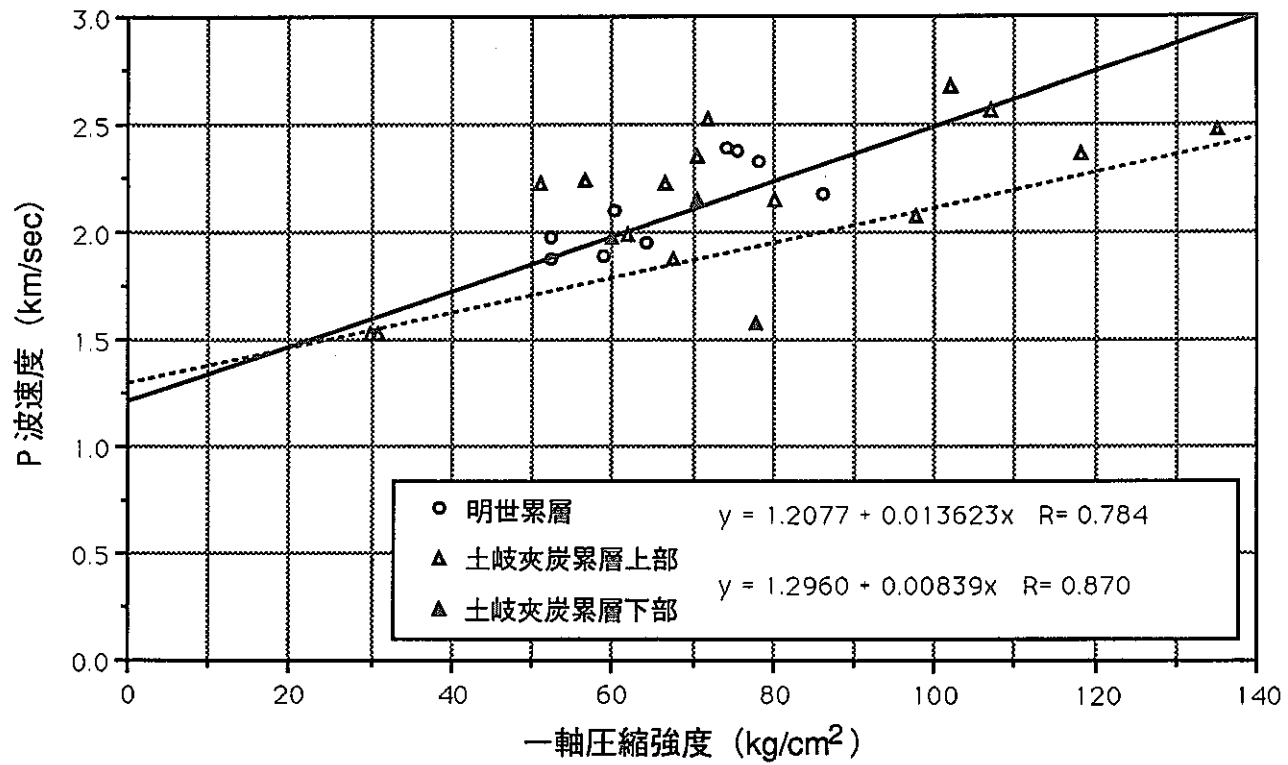


図-3.2.2.2 一軸圧縮強度と弾性波速度 (P波) の関係

### (3) 解析方法

本試験では、応力比が0.8~0.9と比較的大きいことから、載荷後、供試体が破壊することが予想された。このため、収束クリープを前提として実施する3要素、5要素などの力学モデルによるクリープ係数の算定は不可能となる。

ここでは、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。

#### 3.2.4 測定結果と考察

##### (1) 試験結果の一覧

試験結果の一覧を表-3.2.4.1~表-3.2.4.3に示す。また、試験前後の供試体の状況の例を写真-3.2.4.1~写真-3.2.4.3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-3.2.4.1~図-3.2.4.3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-3.2.4.1(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-3.2.4.1(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-3.2.4.2(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-3.2.4.1～図-3.2.4.3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-3.2.4.4～図-3.2.4.6に示す。

図-3.2.4.4～図-3.2.4.6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-3.2.4.7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-3.2.4.8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-3.2.4.1 一車由クリープ試験結果 (A断面)

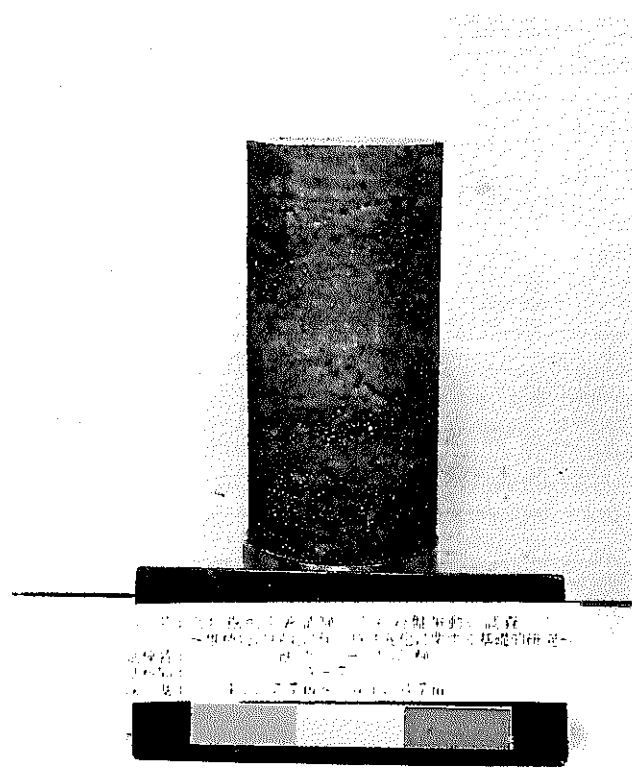
試料No	深 度 (m)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
A-7	41.57~41.67	10.025	4.699	1.719	0.886	2.133	68.0	0.90	61.2	破 壊	19s	—
A-8	41.70~41.80	10.120	4.716	1.694	0.900	2.190	72.2	0.90	65.0	破 壊	2 <sub>M</sub> 32s	—
A-9	42.27~42.37	9.980	4.714	1.692	0.854	2.088	64.7	0.90	58.2	破 壊	2 <sub>M</sub> 50s	—
A-9	42.38~42.48	9.995	4.718	1.694	0.912	2.211	73.8	0.90	66.4	破 壊	2 <sub>H</sub> 54 <sub>M</sub> 42s	—
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	23 <sub>M</sub> 03s	—
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	9 <sub>H</sub> 00 <sub>M</sub> 32s	—
A-24	44.30~44.38	7.440	4.710	1.724	0.959	2.195	72.6	0.80	58.1	破 壊	1 <sub>M</sub> 44s	—

表-3.2.4.2 一車由クリープ試験結果 (B断面)

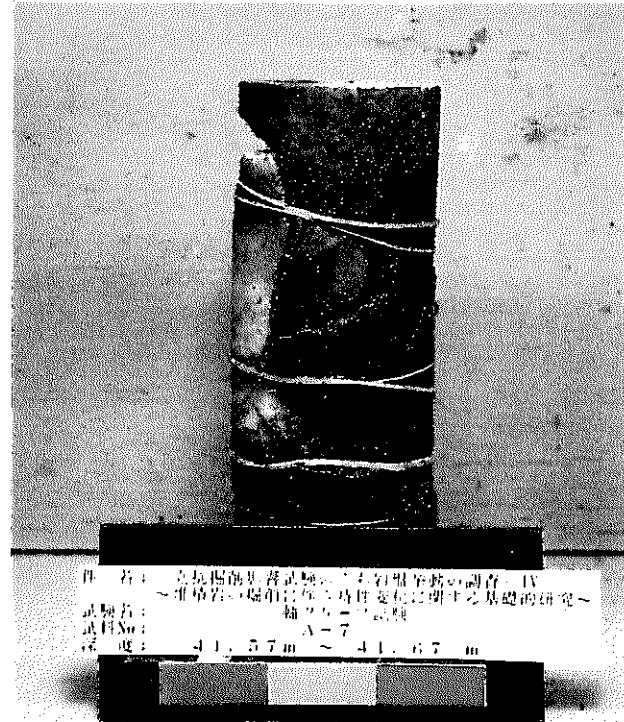
試料No	深 度 (m)	高 さ (cm)	直 径 (cm)	密 度 (g/cm <sup>3</sup> )	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
B-3	63.32~63.42	10.130	4.725	1.766	0.967	2.212	79.9	0.90	71.9	破 壊	0.21s	—
B-4	63.47~63.57	10.045	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	3 <sub>H</sub> 04 <sub>M</sub> 23 <sub>S</sub>	—
B-7	68.52~68.62	10.145	4.726	1.712	0.988	2.205	108.3	0.85	92.1	破 壊	42 <sub>M</sub> 24 <sub>S</sub>	—
B-8	68.70~68.80	10.050	4.725	1.725	0.948	2.223	110.5	0.85	93.9	破 壊	1 <sub>M</sub> 39 <sub>S</sub>	—
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-3.2.4.3 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 <sup>3</sup> )	S 波 (km/sec)	P 波 (km/sec)	推定一軸 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 応力比	クリープ 載荷応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ 破壊有無	破 壊 時 間	試験後の 一軸圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
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	11 <sub>M</sub> 55 <sub>s</sub>	—
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	0.27 <sub>s</sub>	—
C-22	135.51~135.61	10.010	4.718	2.087	1.258	2.503	143.9	0.90	129.5	破壊	0.25 <sub>s</sub>	—
C-9	103.36~103.46	10.075	4.721	1.879	0.956	2.181	105.5	0.85	89.7	破壊	2 <sub>H</sub> 09 <sub>M</sub> 53 <sub>s</sub>	—
C-10	108.37~108.47	9.995	4.716	1.943	0.961	2.231	111.4	0.85	94.7	破壊	0.18 <sub>s</sub>	—
C-11	108.63~108.73	10.070	4.710	1.989	0.983	2.289	118.4	0.85	100.6	破壊	0.21 <sub>s</sub>	—
C-12	110.35~110.45	9.955	4.730	1.872	0.796	2.065	91.7	0.80	73.4	破壊	0.31 <sub>s</sub>	—
C-13	110.68~110.78	10.080	4.735	1.905	0.900	2.182	105.6	0.80	84.5	破壊	1.61 <sub>s</sub>	—
C-23	137.32~137.42	9.908	4.733	2.003	0.902	2.192	106.8	0.80	85.4	破壊	0.29 <sub>s</sub>	—



試験前

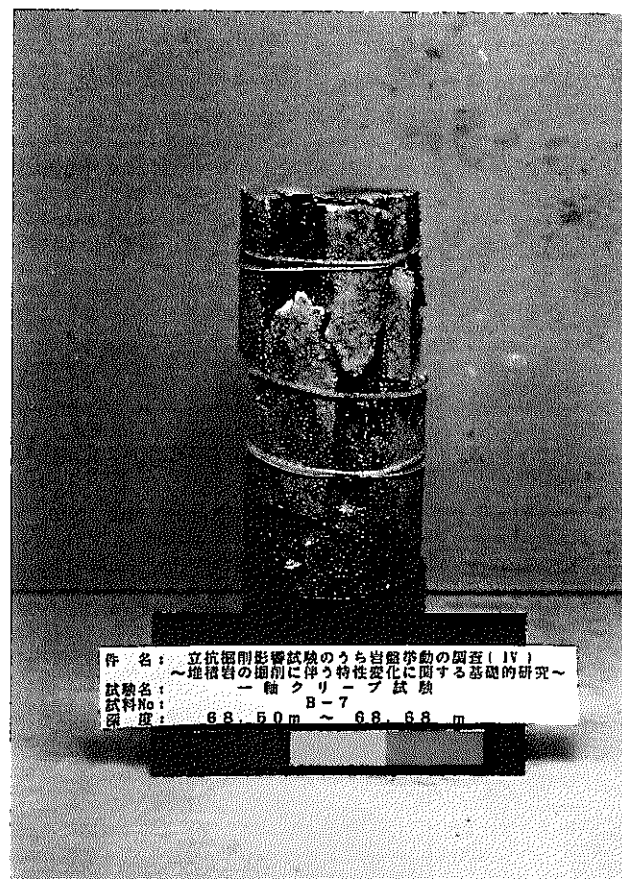


試験後

写真-3.2.4.1 クリープ試験用供試体の一例 (A断面)

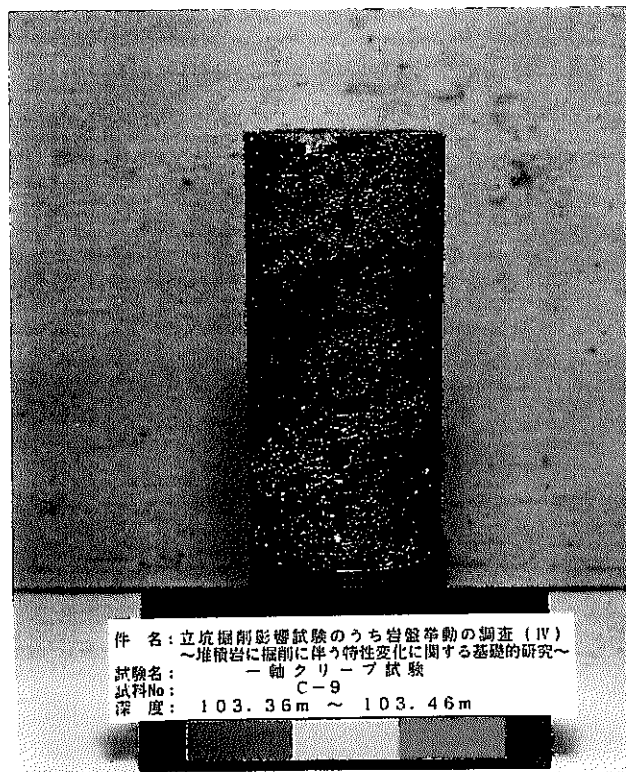


試験前



試験後

写真-3.2.4.2 クリープ試験用供試体の一例（B断面）



試験前



試験後

写真-3.2.4.3 クリープ試験用供試体の一例（C断面）

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	A-7	41.57~41.67	0.90
△	A-8	41.70~41.80	
□	A-9	42.27~42.37	
◇	A-9	42.38~42.48	
x	A-10	42.54~42.64	

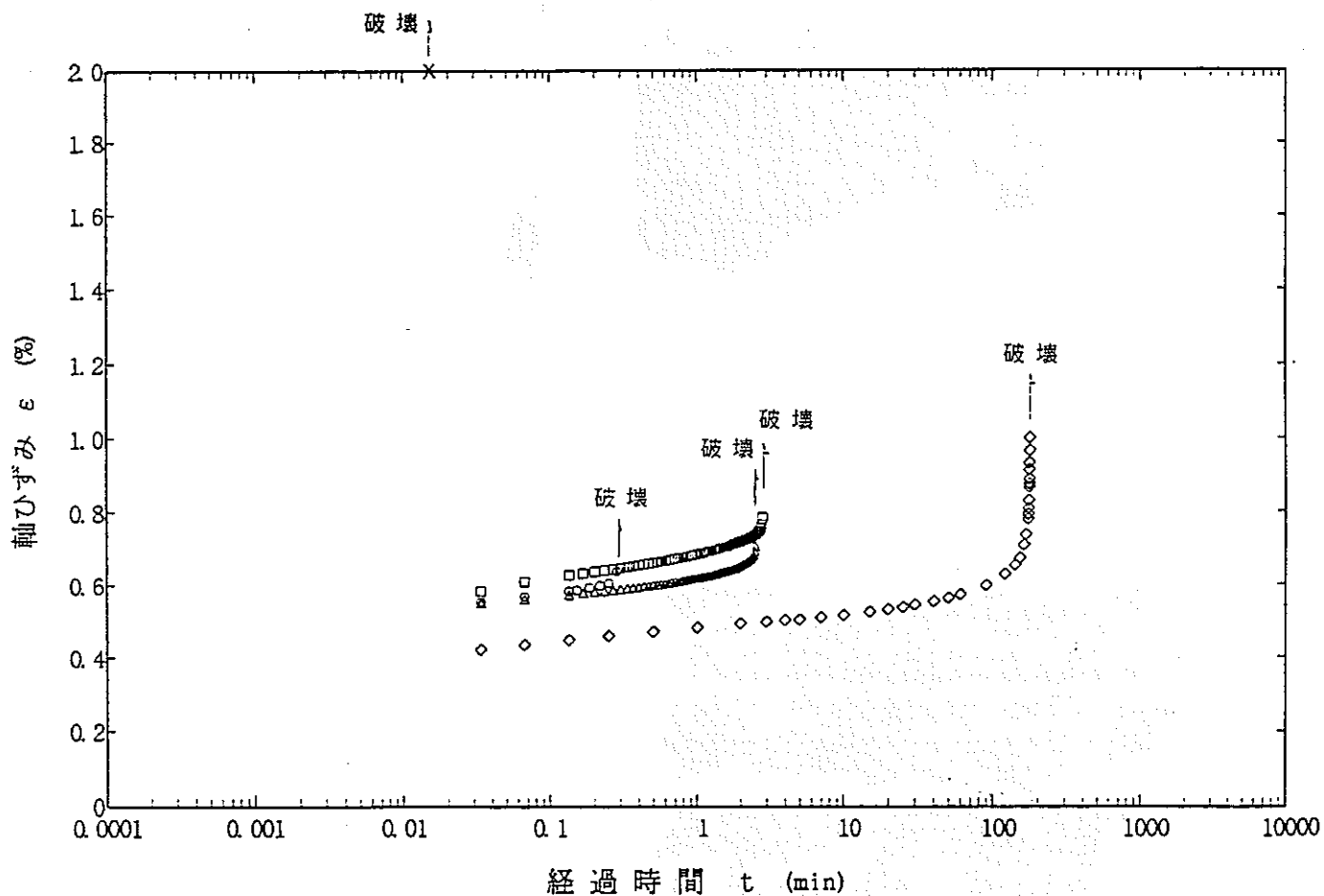


図-3.2.4.1(1) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( A断面； 応力比 0.90 )

凡 例

記号	試料No.	深度 (m)	応力比
○	A-4	40.77~40.87	0.85
△	A-4	40.87~40.97	
□	A-5	41.08~41.18	

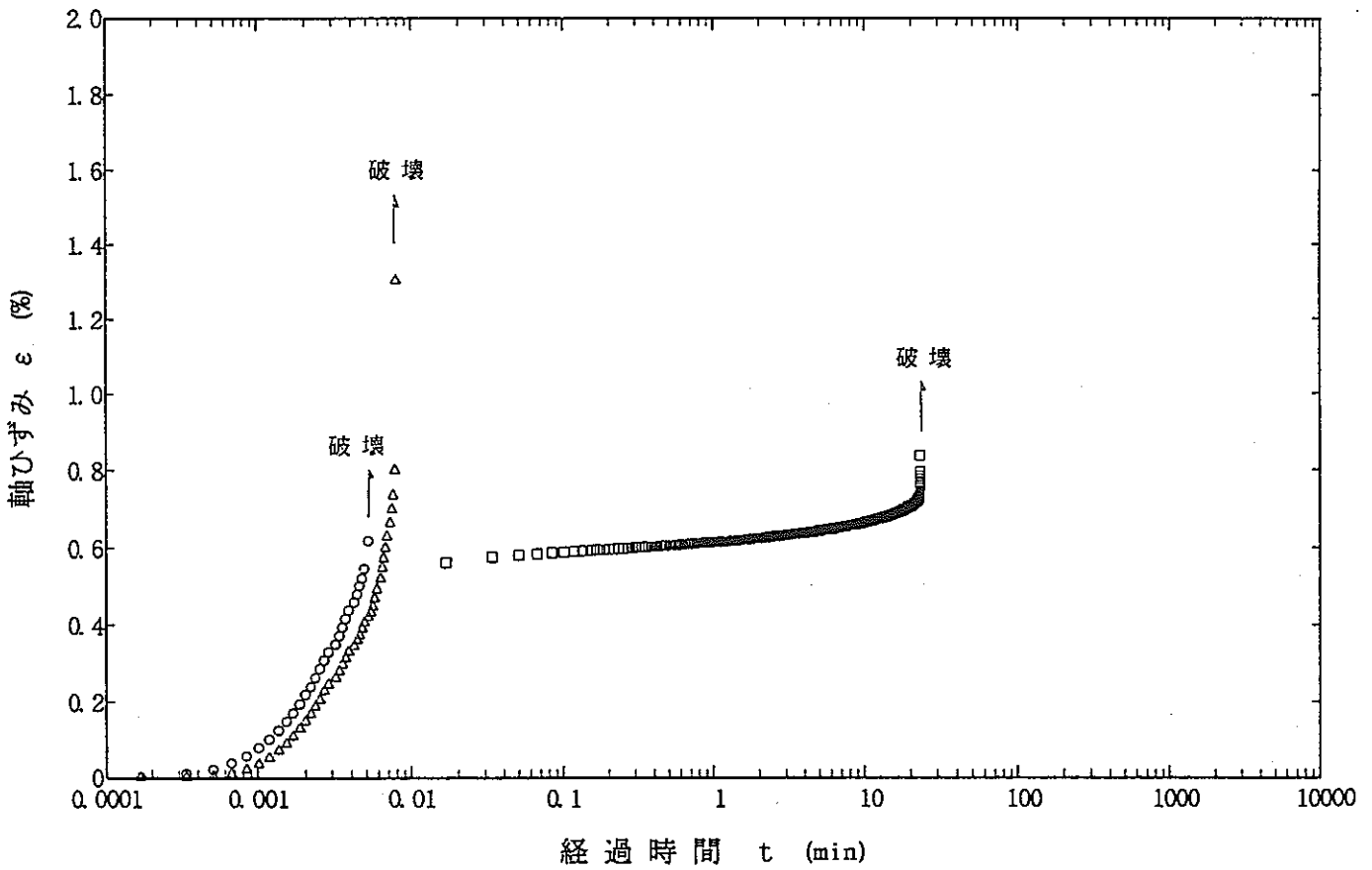


図-3.2.4.1(2) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( A断面 ; 応力比 0.85 )



凡 例

記号	試料No.	深度 (m)	応力比
○	A-6	41.27~41.37	0.80
△	A-10	42.64~42.74	
□	A-24	44.30~44.38	

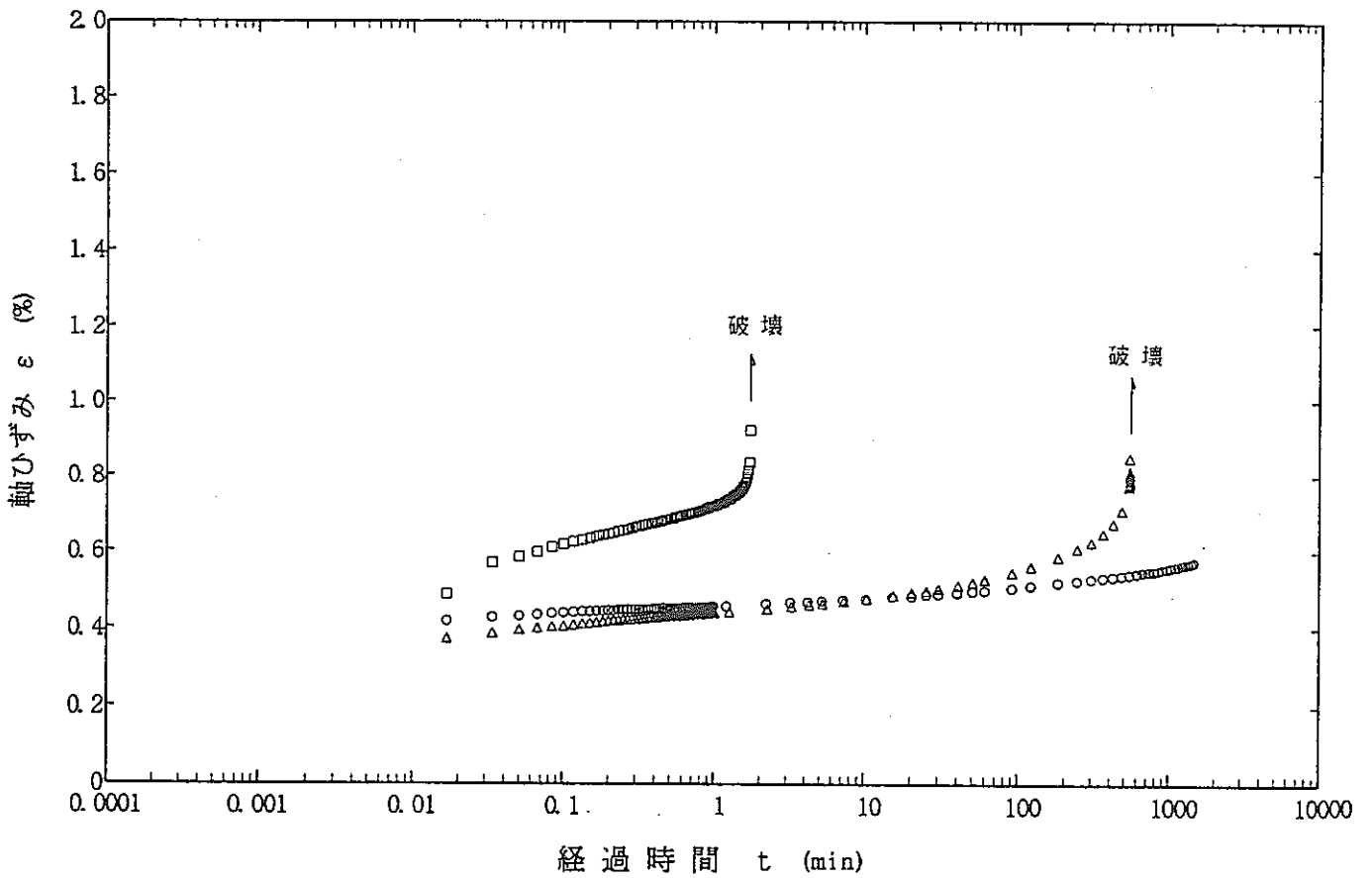


図-3.2.4.1(3) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( A断面； 応力比 0.80 )

凡 例

記号	試料No.	深度 (m)	応力比
○	B-3	63.32~63.42	0.90
△	B-4	63.47~63.57	
□	B-4	63.58~63.68	
◇	B-11	72.74~72.83	
×	B-11	72.83~72.93	

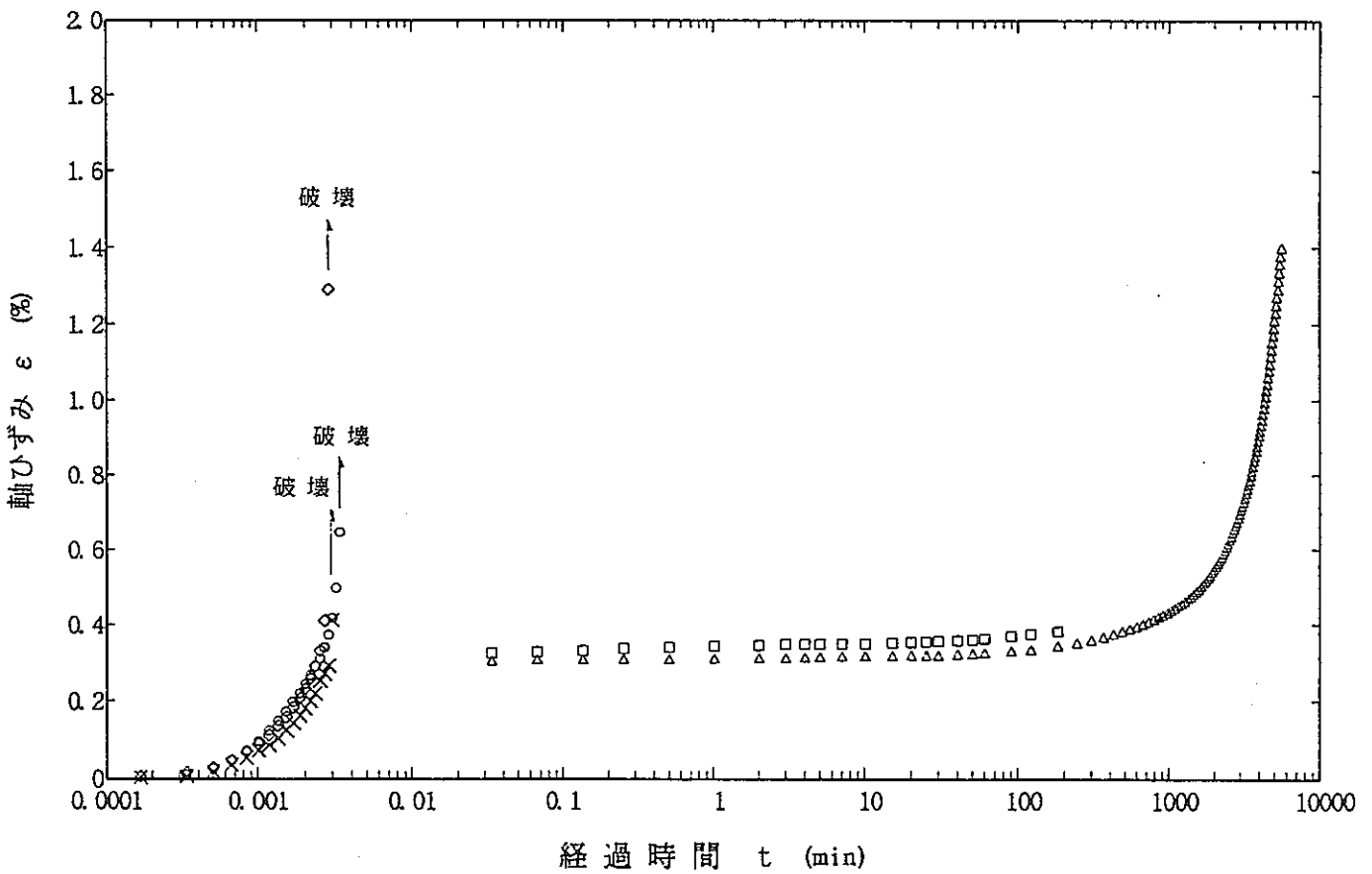


図-3.2.4.2(1) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
 ( B断面； 応力比 0.90 )

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	B-4	63.71~63.81	0.85
△	B-7	68.52~68.62	
□	B-8	68.70~68.80	

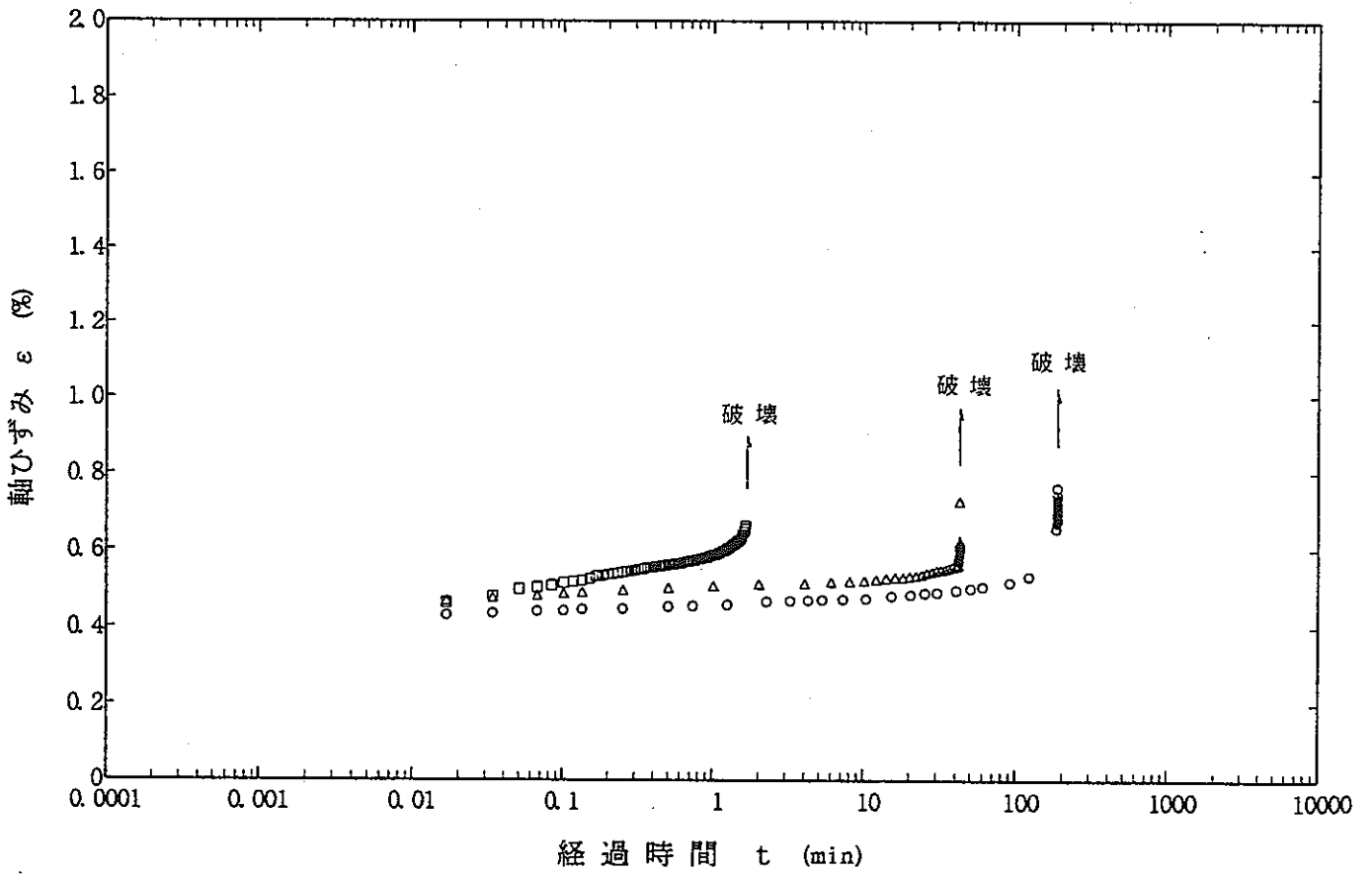


図-3.2.4.2(2) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( B断面； 応力比 0.85 )

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	B-9	72.37~72.47	0.80
△	B-10	72.51~72.61	
□	B-10	72.61~72.71	

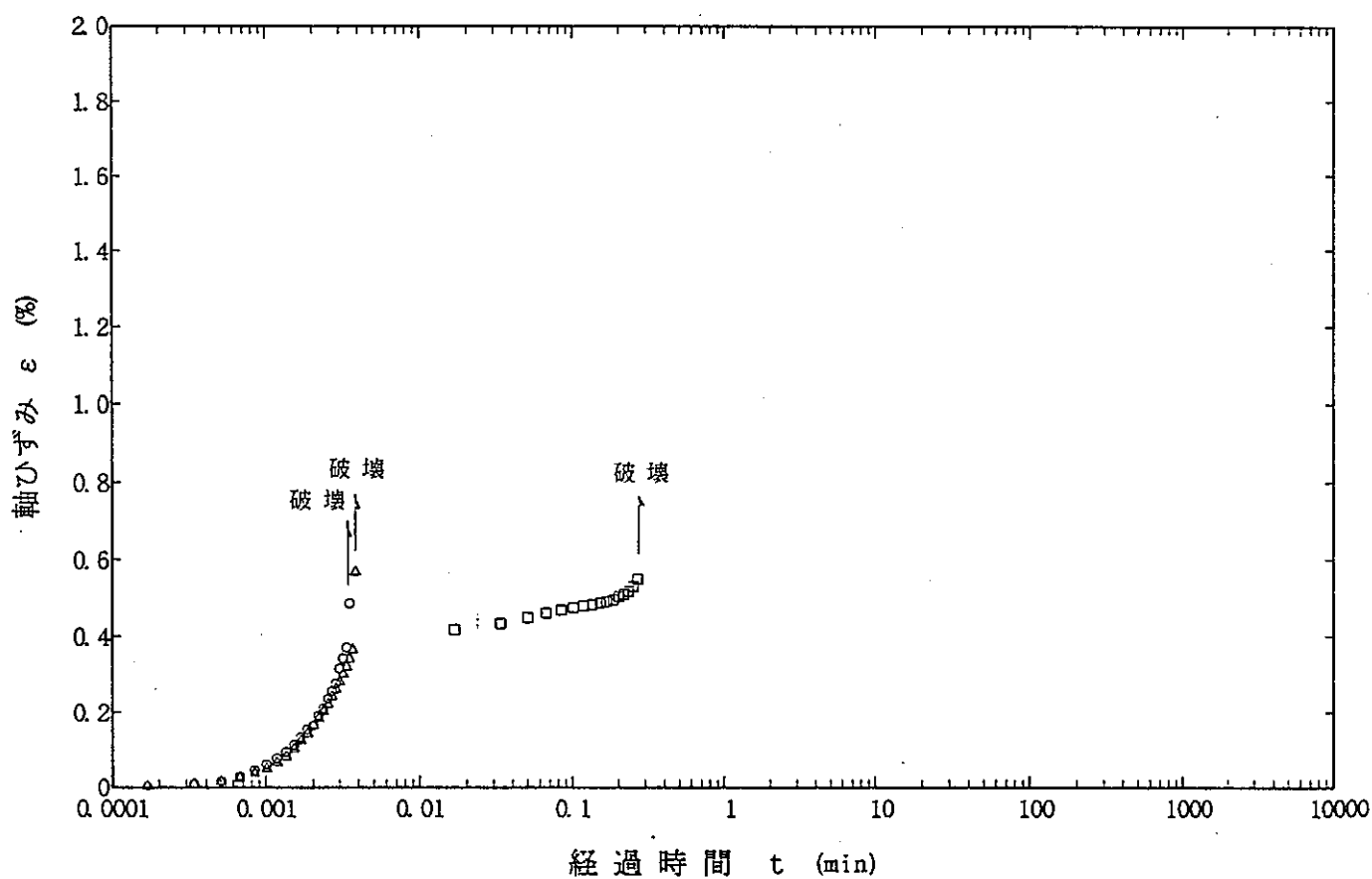


図-3.2.4.2(3) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( B断面； 応力比 0.80 )

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	C-4	100.27~100.37	0.90
△	C-5	100.45~100.55	
□	C-6	102.02~103.02	
◇	C-18	132.97~133.07	
x	C-22	135.51~135.61	

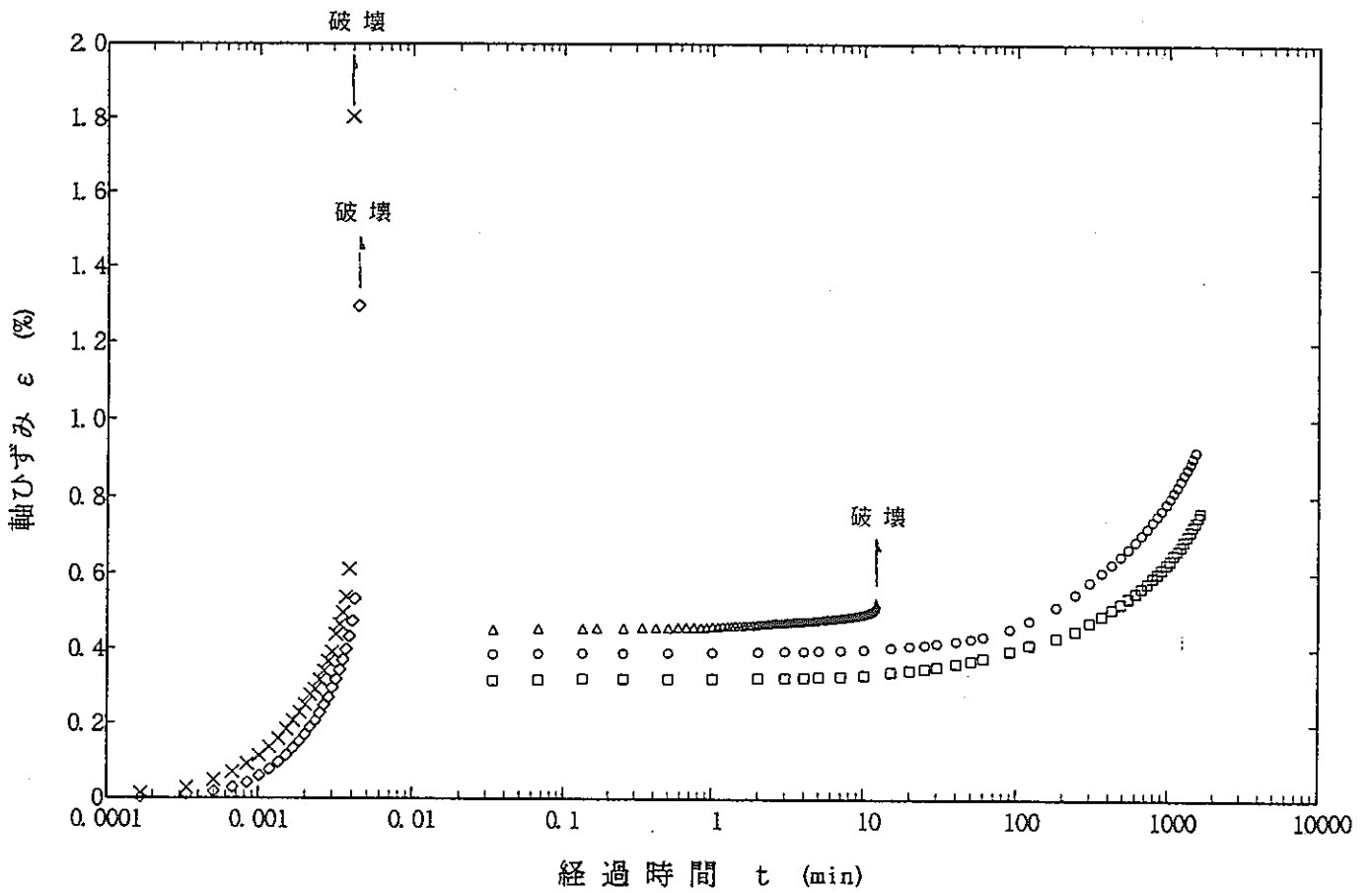


図-3.2.4.3(1) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( C断面； 応力比 0.90 )

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	C-9	103.36~103.46	0.85
△	C-10	108.37~108.47	
□	C-11	108.63~108.73	

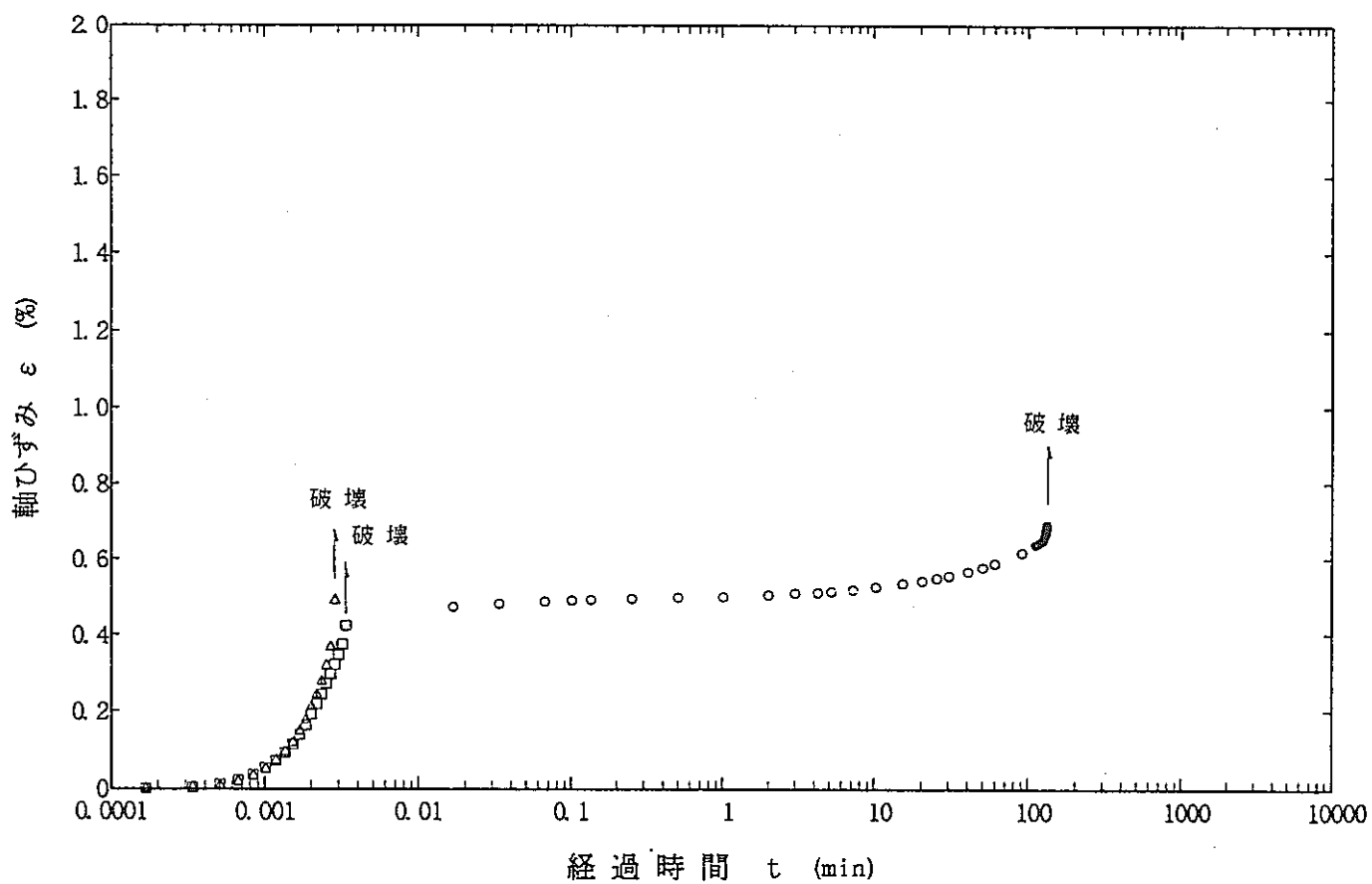


図-3.2.4.3(2) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( C断面； 応力比 0.85 )

凡 例

記号	試料No.	深 度 (m)	応力比
○	C-12	110.35~110.45	0.80
△	C-13	110.68~110.78	
□	C-23	137.32~137.42	

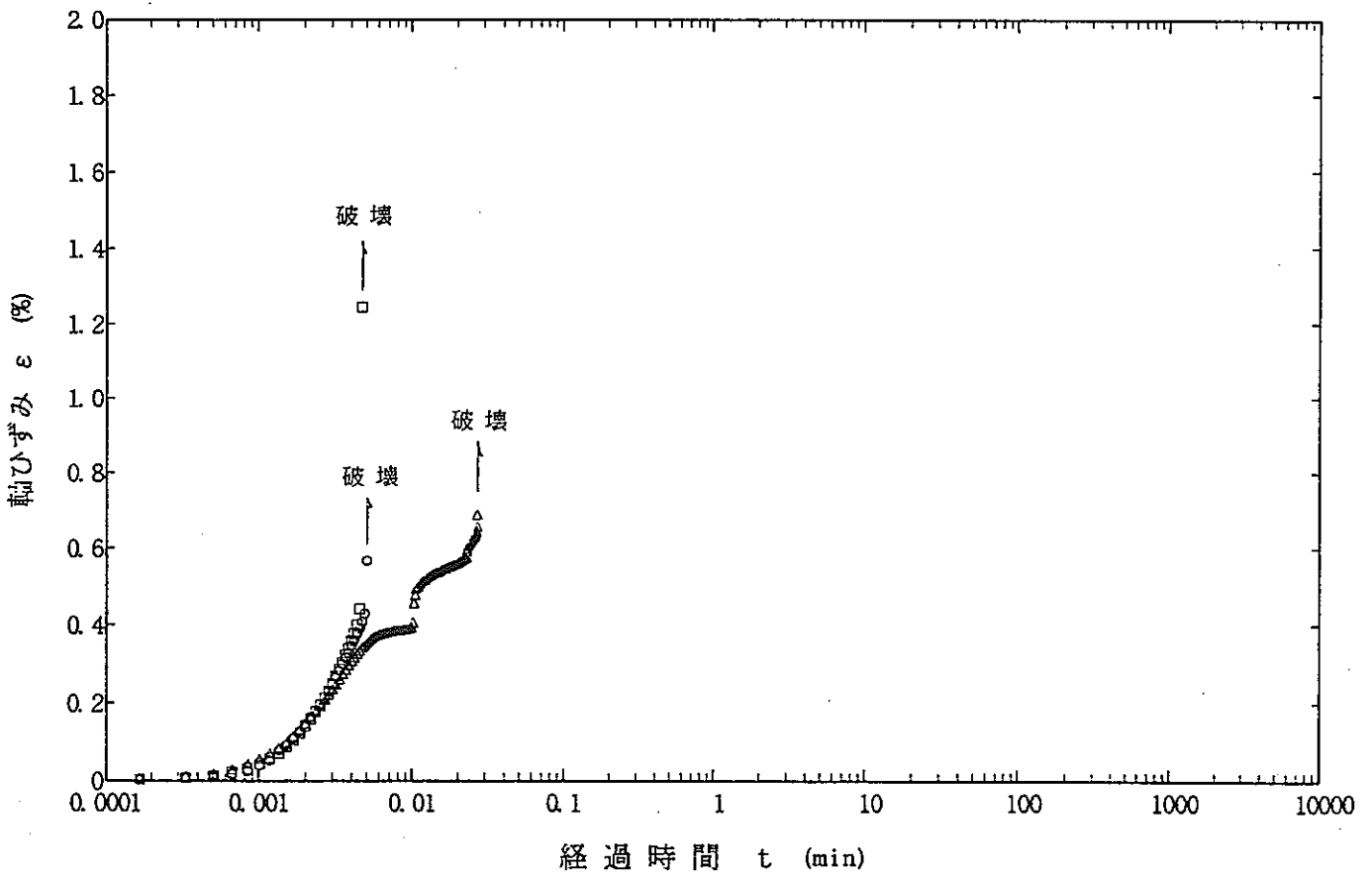


図-3.2.4.3(3) 一軸クリープ試験の軸ひずみと時間の関係  
( C断面 ; 応力比 0.80 )

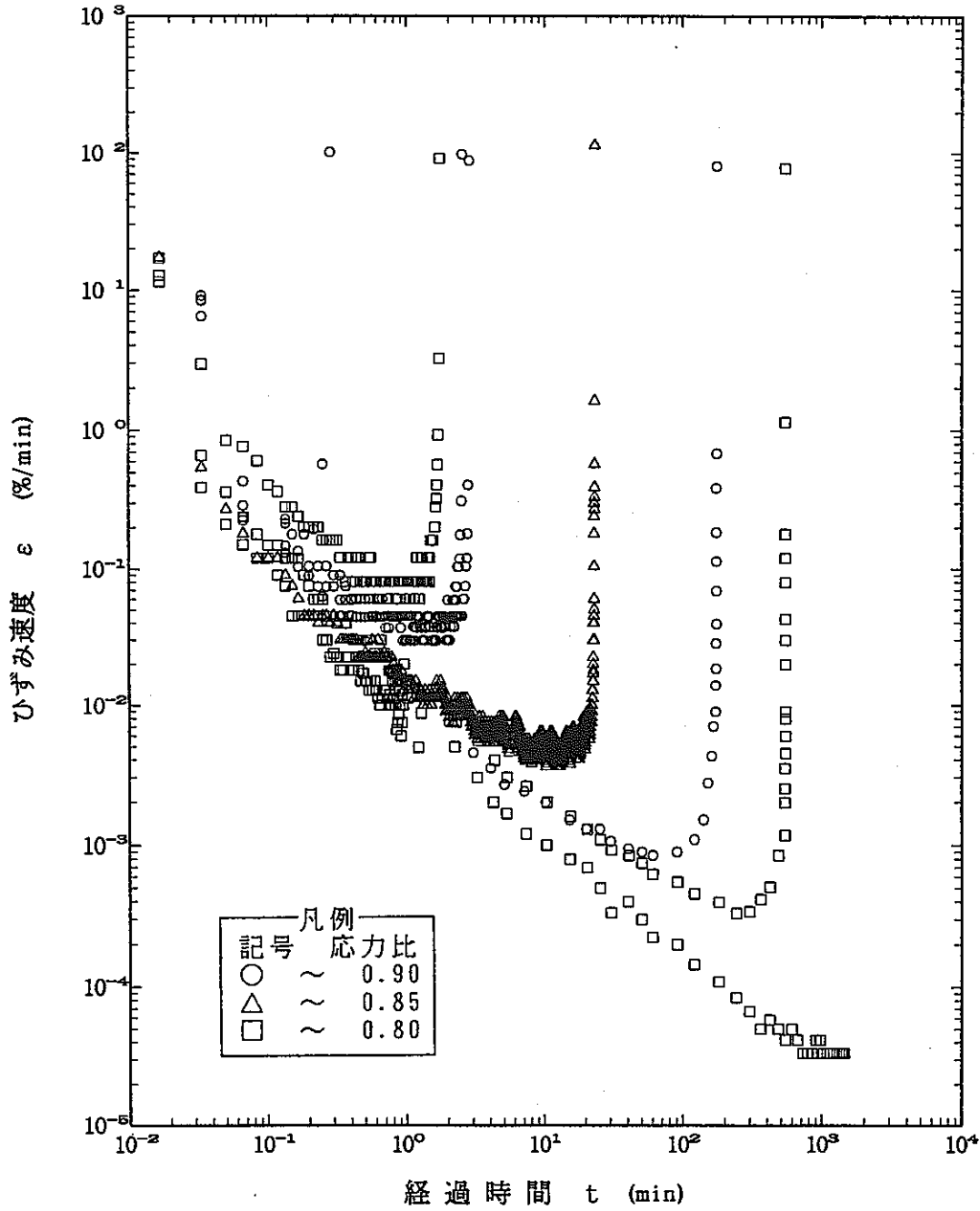


図-3.2.4.4 クリープひずみ速度～経過時間関係 (A断面)



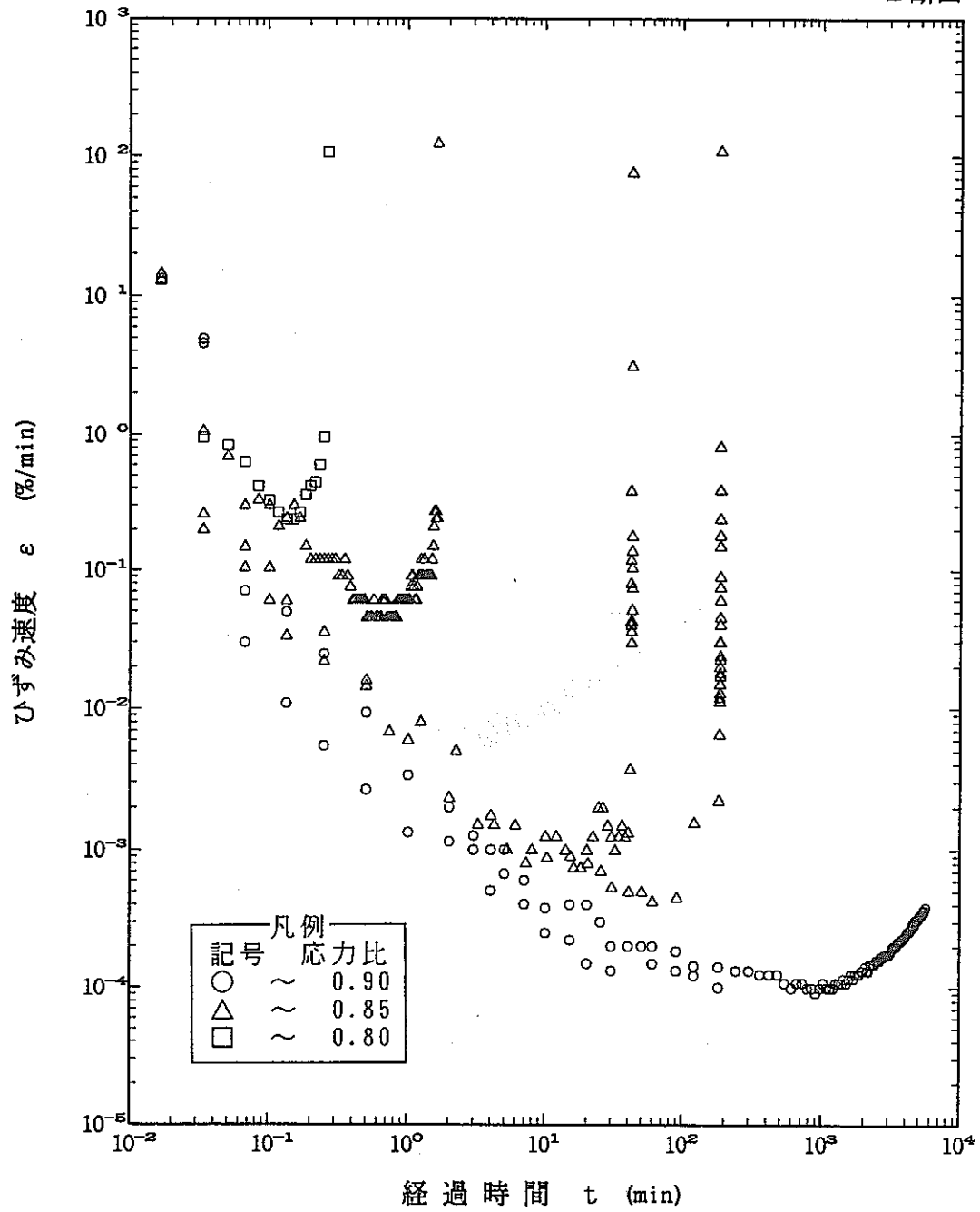


図-3.2.4.5 クリープひずみ速度～経過時間関係 (B断面)

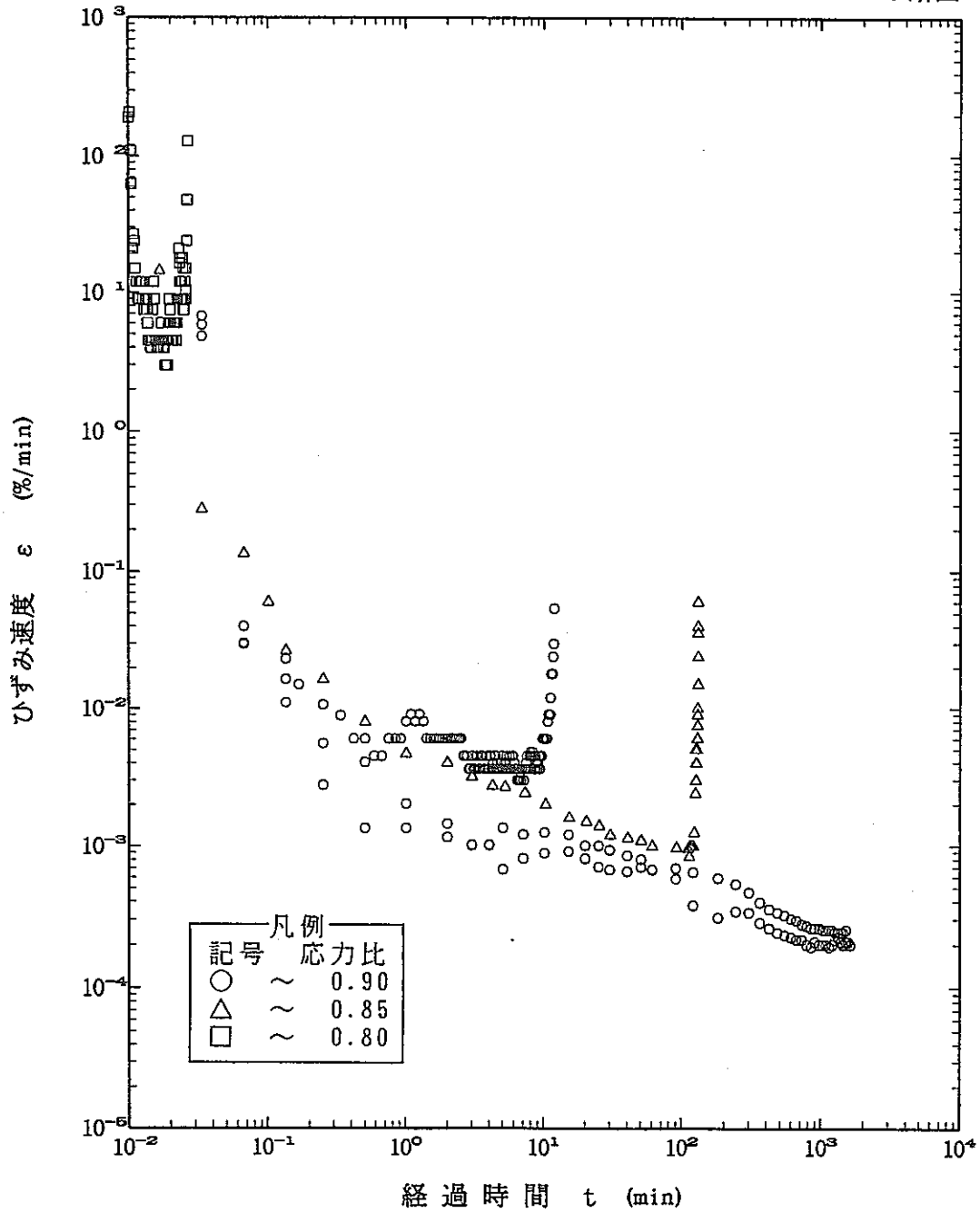


図-3.2.4.6 クリープひずみ速度～経過時間関係 (C断面)

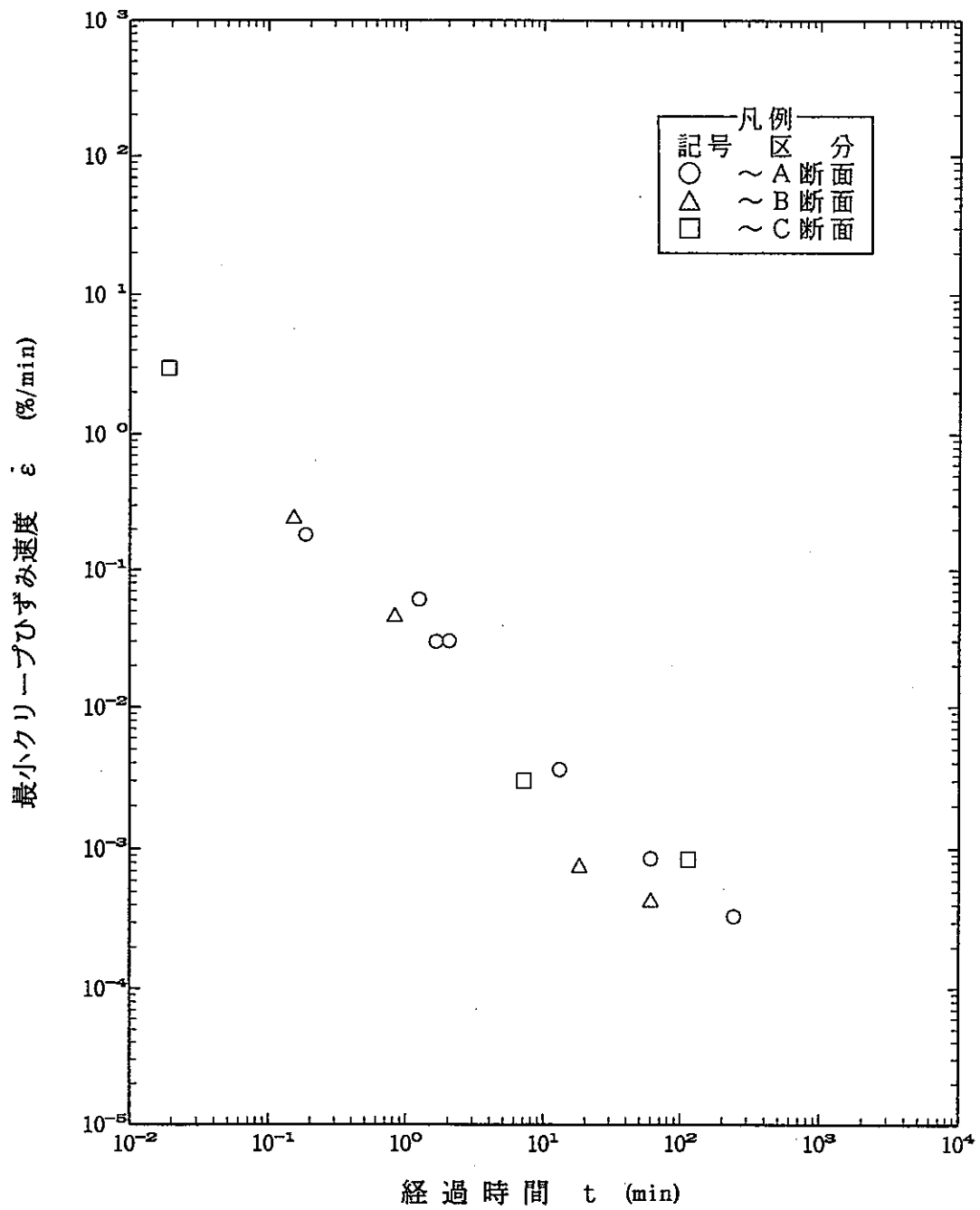


図-3.2.4.7 最小クリープひずみ速度～最小クリープひずみ速度確認時間関係

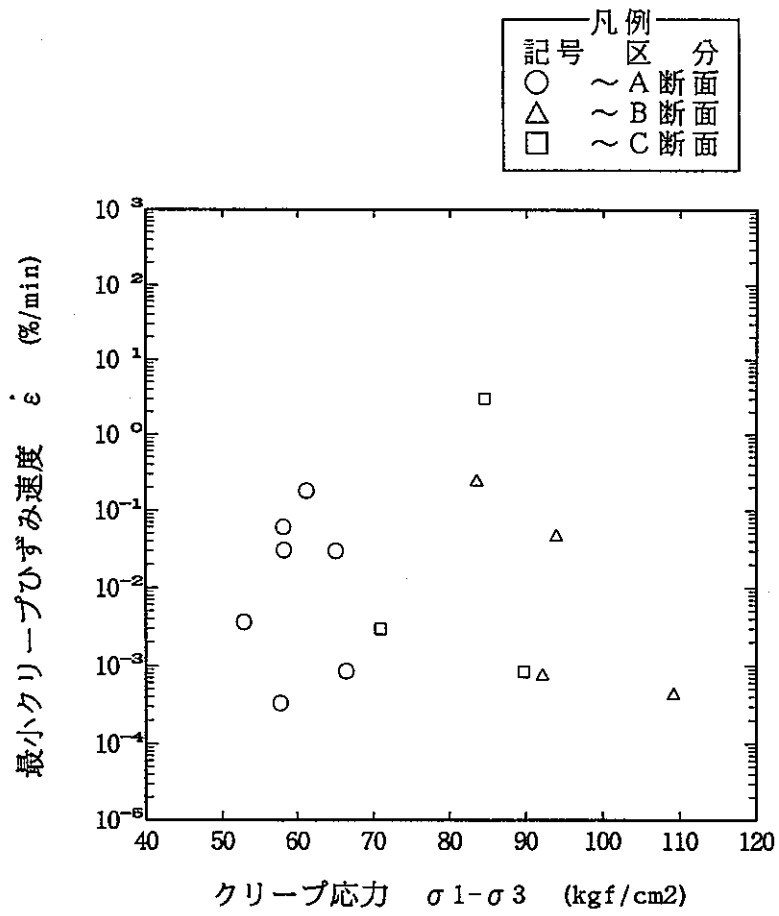


図-3.2.4.8 最小クリープひずみ速度～クリープ応力関係

### 3.2.5 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。

### 3.3 カイザー効果の時間依存性

#### 3.3.1 目的

AE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AE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試験を行った。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、AE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AE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AE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、AE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。

### 3.3.2 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載荷試験機からなる。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-3.3.2.1にA E計測器の概略を、図-3.3.2.2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、図-3.3.2.3に示すように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(図-3.3.2.4参照)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。A E信号の処理方法を図-3.3.2.5に示す。

荷重は載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。ただし、この場合は載荷板間の変形を測定することになり、供試体の直接的な変形を測定していることにはならない。A E法では、結果として応力-ひずみ(もしくは変位)-A E累積数曲線が出力されるが、応力とA E累積数の関係からのみ初期地圧を推定することになる。そのため、供試体の変形については、ひずみゲージによる直接変位であれ高感度変位計による間接変位であれ何ら問題ない。

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、載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載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-3.3.2.3参考)。

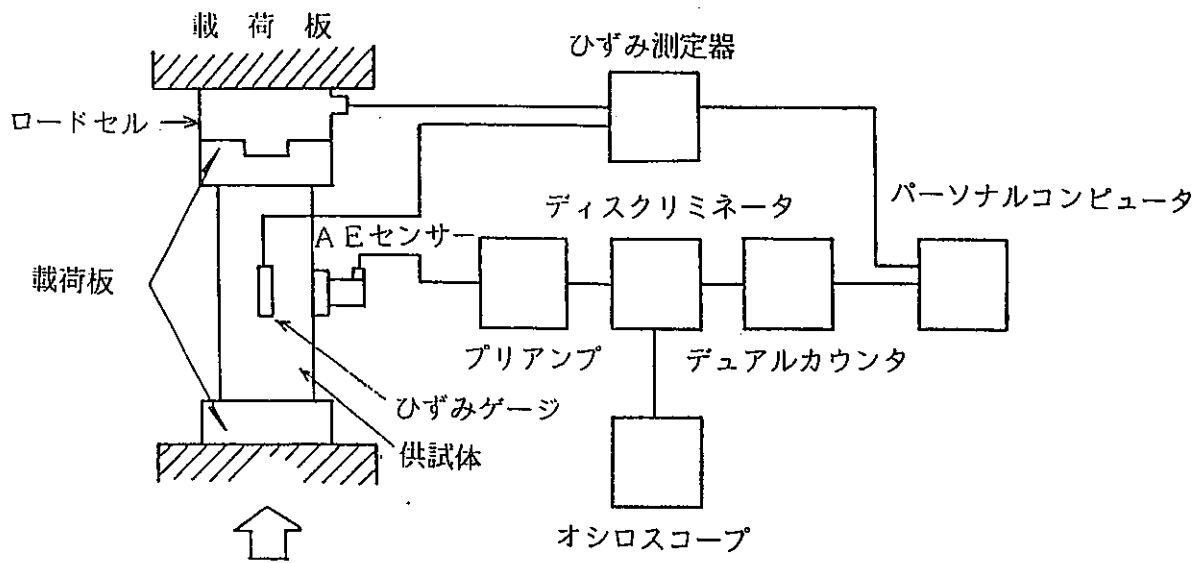


図-3.3.2.1 AE測定器の概略

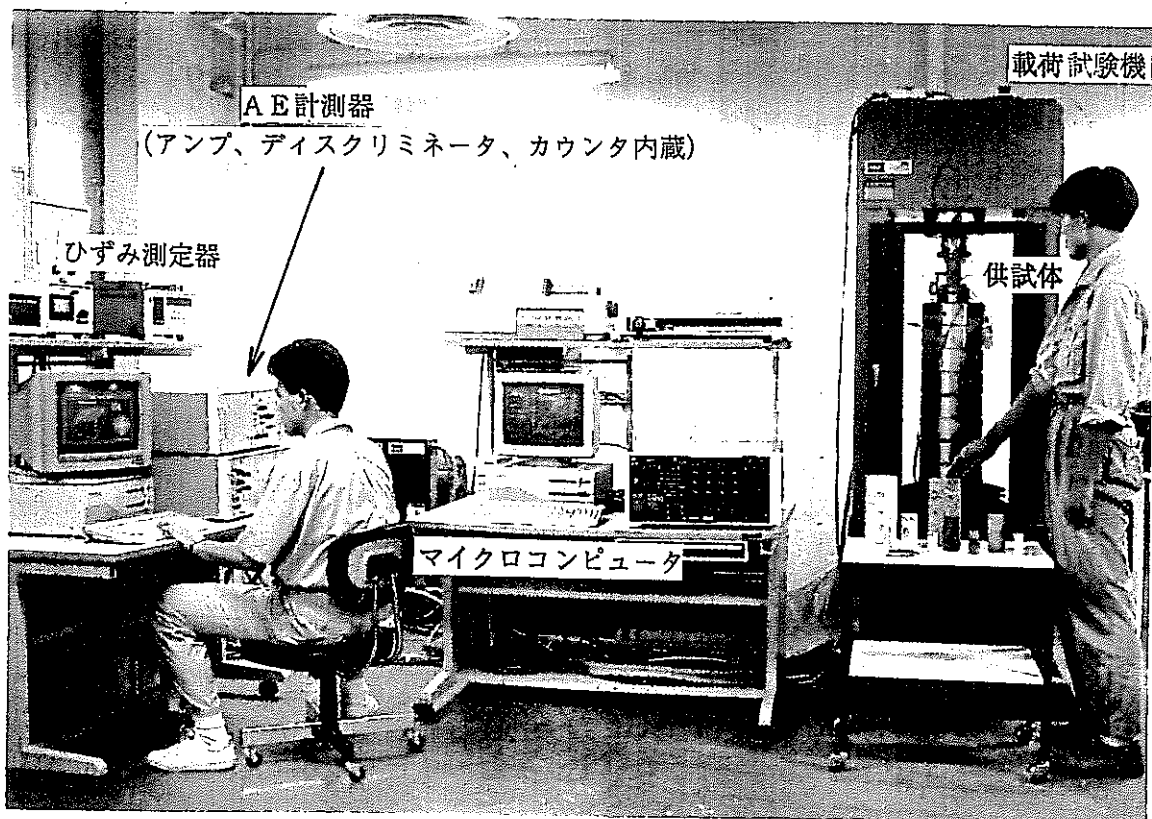


図-3.3.2.2 測定装置の全体状況



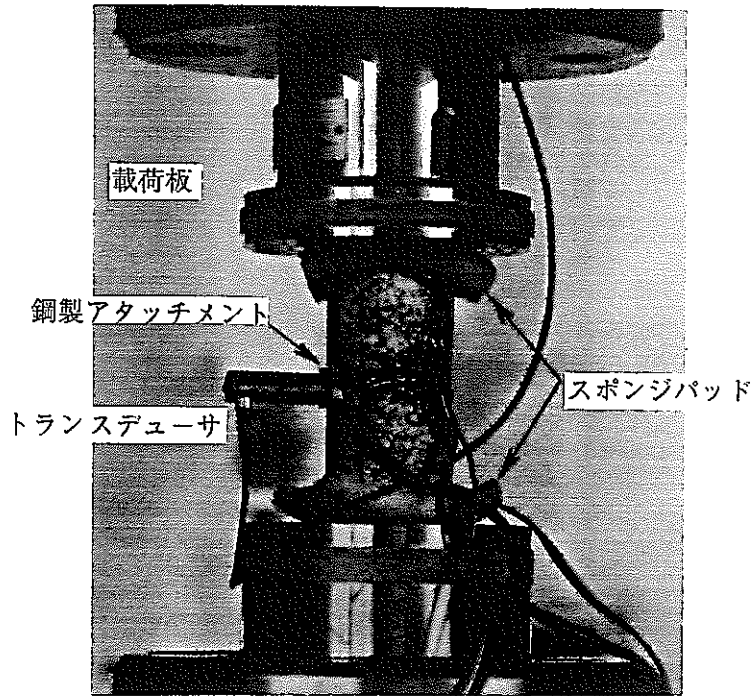


図-3.3.2.3 トランスデューサの取付け状況

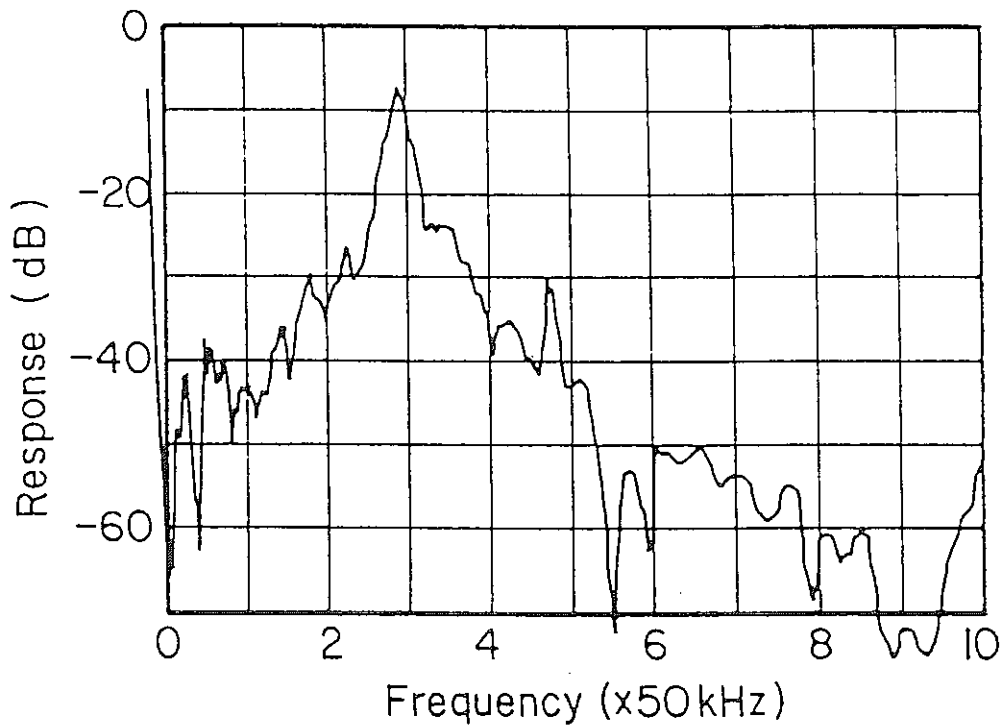


図-3.3.2.4 トランスデューサの周波数応答特性

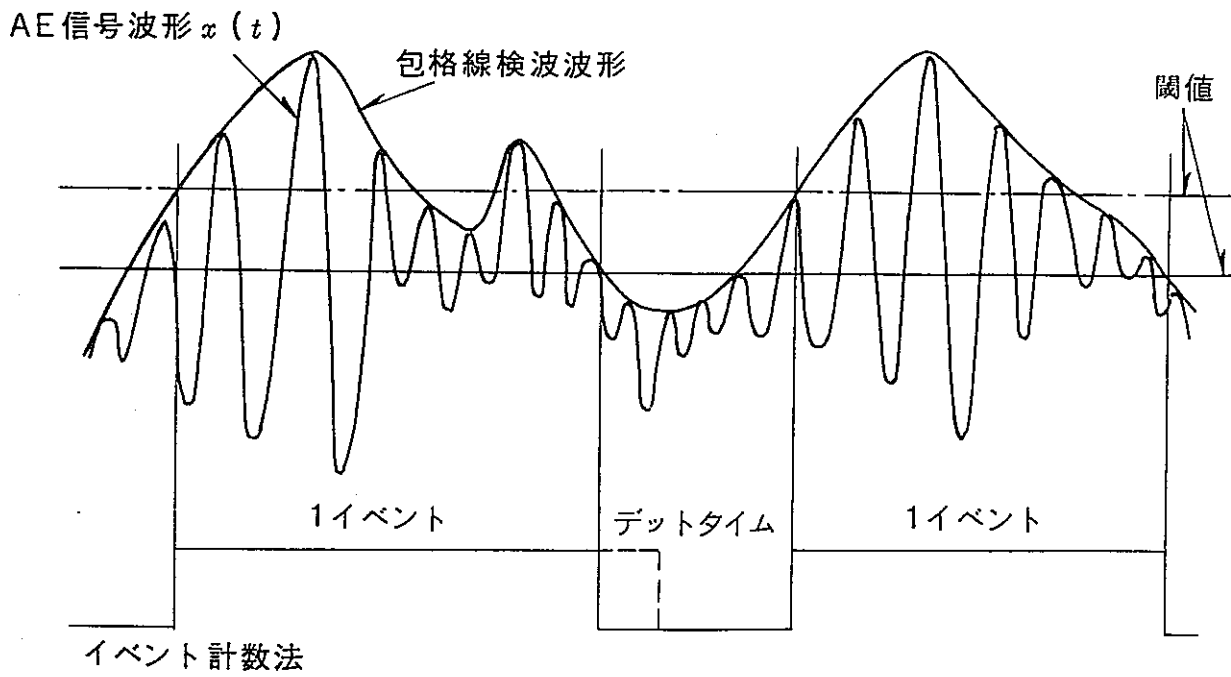


図-3.3.2.5 AE 信号の処理方法

### 3.3.3 測定方法

#### (1) カイザー効果の存在確認と試験条件決定

カイザー効果の存在確認と対象岩石に適する閾値と感度の条件決定を同時に実施した。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。まず、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。その後、感度と閾値の組み合わせ条件を種々変え、載荷速度0.98MPa/min.の荷重制御の下に先行応力を越えて単調載荷し、荷重と変形とAE発生数を記録した。供試体変形量の測定には1/1000mm高感度変位計を使用した。供試体は直径30mm、細長比1：2程度の円柱体とした。測定のフローを図-3.3.3.1に示す。

#### (2) カイザー効果の時間依存測定

岩石用クリープ試験装置（図-3.3.3.2参照）を用いて、供試体に先行荷重を記憶させた。本試験に使用する供試体は、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。対象岩石は一軸圧縮強度が約5MPa程度の明世累層の泥岩であり、土被り圧は約0.6MPa（ $\gamma H \doteq 1.6\text{g/cm}^3 \times 40\text{m} = 0.63\text{MPa}$ ）である。ところで、破壊に至る一軸圧縮過程において、一軸圧縮強度の70～80%の応力レベルから不安定クラックの発生や成長が要因となりAEが頻発する。これは、供試体の構造が乱されるためである。本試験では、供試体の構造を攪乱することなく新たな荷重を記憶させるため、土被り圧以上かつ不安定クラックを生じさせる応力以下の先行荷重を選定する必要がある、一定軸力として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。カイザー効果は残留しているひずみ状態に依存していることから、軸ひずみが増加しない状態を確認した後、除荷した。一定軸力載荷の期間は1週間を基準としている。一定軸力の載荷期間が長く、含水比変化の恐れがあることから、載荷中は供試体表面をサランラップで覆った。軸力除荷後は恒温恒湿の養生箱に入れて管理し、所定の時間経過した後AE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。各経過時間につき供試体は1本とした。一定軸力載荷およびその後のAE試験では、1/1000mm高感度変位計で供試体の変形量を測定した。また、軸力除荷後のAE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AE発生数を記録した。載荷速度はJIS M 0302に準拠し、破壊するまでの時間が5分程度になるよう定めた。測定のプロローを図-3.3.3.3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。ここでは、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。AE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AE発生数を記録した。載荷速度の選定理由は上述2)と同様である。測定のプロローを図-3.3.3.4に示す。

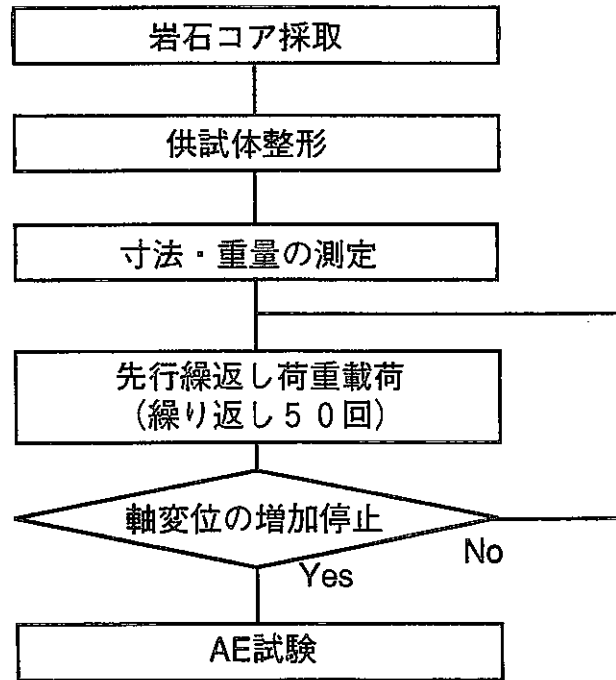


図-3.3.3.1 カイザー効果の存在確認と試験条件決定の作業フロー

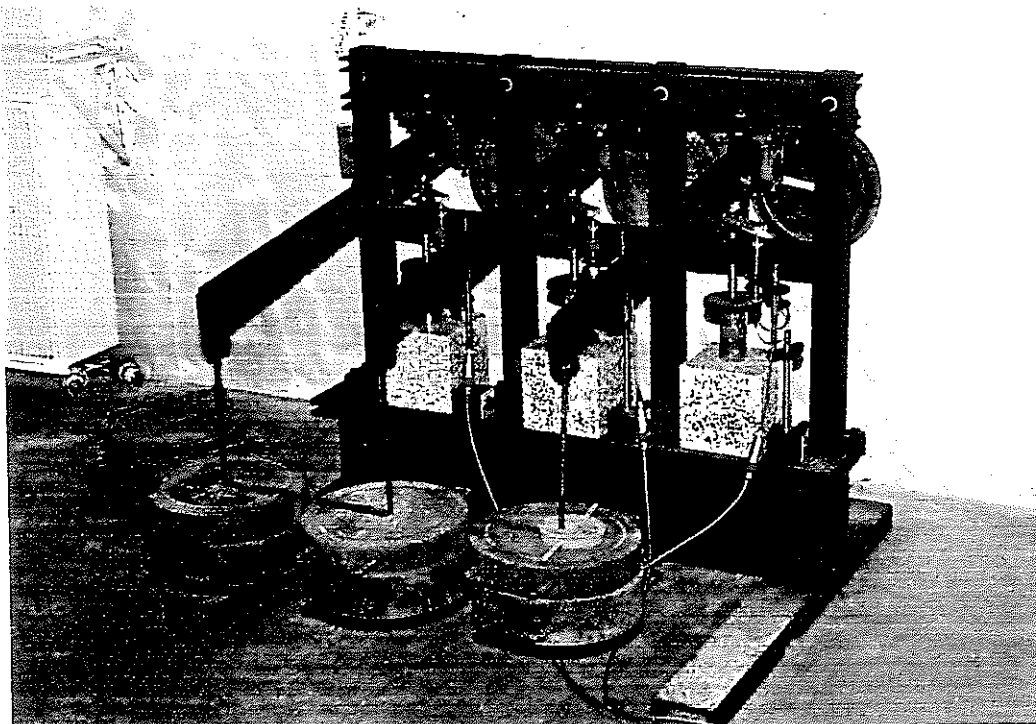


図-3.3.3.2 クリープ試験装置

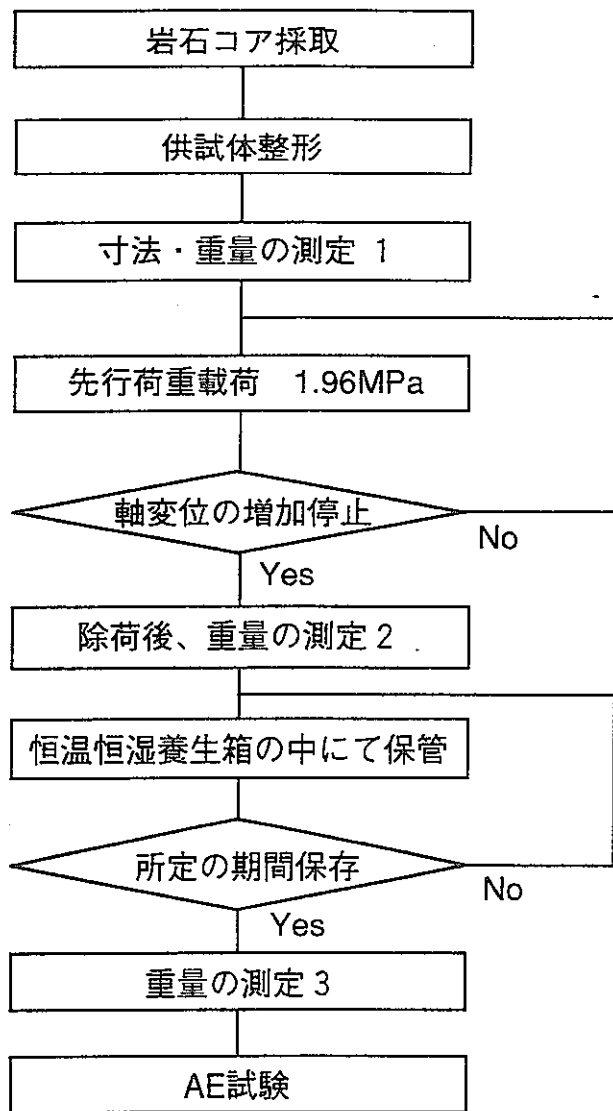


図-3.3.3.3 カイザー効果の時間依存測定の実作業フロー

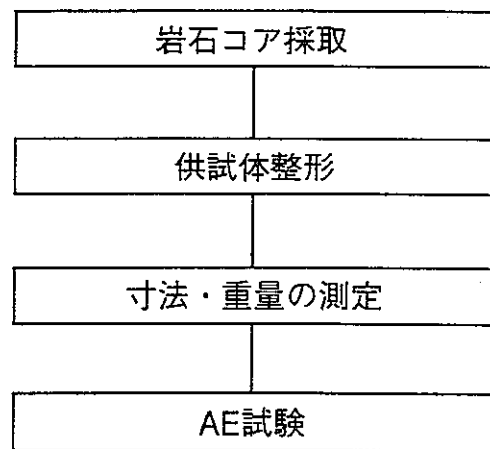


図-3.3.3.4 初期地圧測定の実作業フロー

### 3.3.4 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。試験結果をまとめたものが、表-3.3.4.1である。すべての結果において、先行繰返し応力の近傍でA Eが発生することから対象岩石にはカイザー効果の存在することが判明した。これら試験結果の内一例を図-3.3.4.1に示す。図(a)は総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定した場合、図(b)は総合感度を90dB、閾値を270mVと250mVに設定した場合の試験結果で、両図共に単調載荷時の応力と変位とA E累積数の関係である。図中、実線で応力-変位曲線を、o-o印で発生したA E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。先行応力は両試験共に0.98MPaである。ここでは連続的なA E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。両図共に先行応力近傍で連続的なA Eが発生しているが、総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定した場合には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。一方、総合感度を90dB、閾値を270mVと250mVに設定した場合には、先行応力とカイザー効果から推定される応力の間約30%の誤差があった。表-3.3.4.1において、繰返し先行応力と連続的なA Eの発生するポイントがほぼ等しくなるのは、総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定した場合のみであった。言い換えれば、本試験で対象となる岩石では総合感度を90dB、閾値を230mVと210mVに設定することによって、先行応力を精度良く求めることが可能である。

以下に示すカイザー効果の時間依存測定と初期地圧測定については表-3.3.4.2に示す測定条件を用いることとした。

#### (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。一定軸力載荷中における供試体軸変位の測定結果の一例を図-3.3.4.2に示す。載荷後2日以内には軸変位の増加がほぼ止まっており、載荷1週間ともなると軸変位に変化が認められないことから、先行応力1.96MPaの下で安定した状態を人工的に作り出せたものと考えられる。カイザー効果の時間依存測定試験

では、このように先行応力の下で安定した（軸変位の増加が止まった）状態の供試体を利用した。

軸力除荷後のA E試験における測定結果の一例を図-3.3.4.3に示す。図(a)は一定軸力除荷後1日放置した場合、図(b)は一定軸力除荷後10日放置した場合の試験結果である。両図共、図中の印は図-3.3.4.1と同様である。1日放置した場合、一定軸力により作用させた先行応力(1.96MPa)と、カイザー効果から推定される応力(1.96MPa)は等しくなり、応力解放後の経過時間によるカイザー効果への影響はないものと考えられる。一方、10日放置した場合、カイザー効果から推定される応力は0.79MPaとなり、先行応力の約半分の大きさになった。図(b)中、先行応力付近でA E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。全供試体の測定結果をまとめたものが表-3.3.4.3である。表中では、一定軸力除荷後の経過日数、カイザー効果から推定される応力値ならびに供試体重量変化を示している。使用した岩石の含水比はおおむね40%と比較的高いものであるため、試験中を通して含水比を極力変化させないようにしている。ただし、保管期間が長くなることから、供試体作製後、一定軸力除荷直後、A E試験直前の3段階で供試体重量を測定し、含水比の変化を調べた。供試体作製後からA E試験直前の間には、12供試体の内2本で約6g、その他は3g以下の重量変化が認められた。含水比に換算すると、最大で約4%の変化があったことになる。上述(1)カイザー効果の存在確認と試験条件決定では、50回の先行繰返し载荷を行っている。この場合、試験中に含水比は最大で約5%変化していることになるが、試験結果から判断するとカイザー効果は成立している。現時点では、含水比の変化がカイザー効果に及ぼす影響を詳しく論じることはできないが、この試験における含水比の変化は、カイザー効果に影響を及ぼしていないものと判断した。

表-3.3.4.3に示す結果の内、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-3.3.4.4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.-75m・-154m・-195mの3深度についてAE測定結果の一例を図-3.3.4.5に示す。図中の印は矢印を除いて図-3.3.4.1と同様である。図(a)はG.L.-75mから採取した試料の測定結果であり、カイザー効果から地圧成分を0.78MPaと推定した。土被り圧(約1.5MPa)と比較すると、半分程度の大きさになっている。この場合、岩石採取からAE試験までに約150日のタイムラグがある。前項「カイザー効果の時間依存測定」で、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小さくなることが判明していることから、推定された地圧成分0.78MPaは真の鉛直方向初期地圧成分とは考えにくい。図(b)はG.L.-154mから採取した試料の測定結果であり、カイザー効果から地圧成分を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。この場合、原位置から試料を採取して3日目までにAE試験を完了していることから、推定された応力値2.76MPaはG.L.-154m地点における鉛直方向初期地圧成分と評価できる。一方、図(c)はG.L.-199mから採取した試料の測定結果である。この場合、载荷初期の段階からAEが頻発した。供試体は強風化の花崗岩であったため、試料内部に微視的ならびに巨視的なき裂が多数存在していた。载荷初期の段階からAEが頻発することと発生規模が格段に大きいことから、測定されたAEはき裂の滑りに起因したものである。そのため、推定された地圧成分0.1MPaは鉛直方向初期地圧成分とは考えられない。

8深度の全測定結果をまとめたものが表-3.3.4.4である。測定結果の内、G.L.-99m・-102mの採取岩石についてはAE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。供試体に発生したき裂状況を図-3.3.4.6に示す。コア採取後3日以内にAE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。この内、G.L.-199mは図-3.3.4.5(c)に示すようにカイザー効果の評価が不可能であった。他の4深度の岩石については、岩石採取後AE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る。以上8深度の岩石のうち鉛直方向の初期地圧成分を評価できるのはG.L.-154mの結果のみである。ところで、第2立坑掘削時に

において、G.L.-50m (M1断面) の壁面から採取した岩石でAEによる初期地圧測定を実施している。AE試験は岩石採取後3日以内に完了している。試験結果のうち、鉛直方向初期地圧成分の平均値(供試体9本・変動係数29%)を合わせて示す。

表-3.3.4.4に示す結果の内、カイザー効果から推定される応力値を岩石採取深度で整理したものが図-3.3.4.7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M1断面で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AE試験自体ができなかったので「×」印で示す。全測定結果の内、鉛直方向の初期地圧を評価できるのはG.L.-154mとM1断面(G.L.-50m)の2結果である。これらの結果に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 $\sigma_v$ (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-3.3.4.1 感度と閾値の決定のための試験結果一覧

供試体 No.	供試体寸法 (cm)		単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> )	カイザー効果から推定される応力 (MPa)	先行繰返し応力 (MPa)	試験条件		
	直径	高さ				感度 (dB)	しきい値(mV)	
							V <sub>H</sub>	V <sub>L</sub>
Calib.A	2.98	5.78	1.71	1.27	0.98	90	270	250
Calib.B				1.53	1.96	90	150	130
Calib.C				2.71	2.94	90	200	180
Calib.D	2.98	6.00	1.73	0.99	0.98	90	230	210
Calib.E				2.02	1.96	90	250	230
Calib.F				1.55	2.94	90	180	160
Calib.G	2.98	5.81	1.72	1.13	0.98	90	250	230
Calib.H				1.85	1.96	90	230	210
Calib.I				2.83	2.94	90	230	210

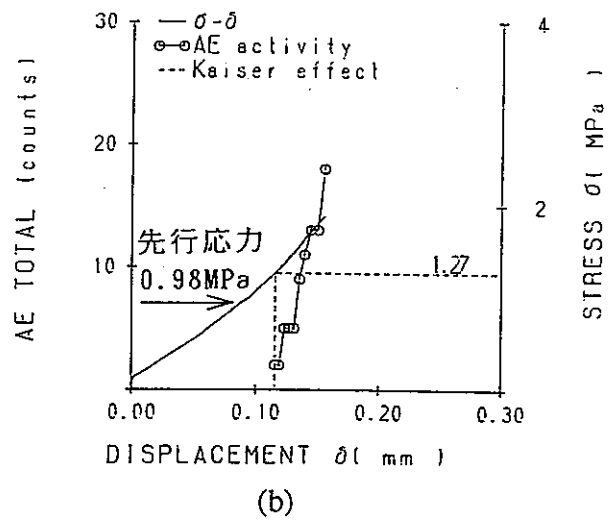
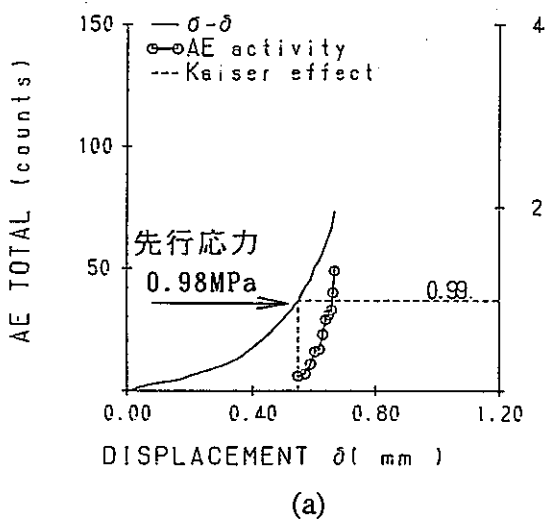


図-3.3.4.1 感度と閾値の決定のための試験結果一例

(a)総合感度90dB、閾値230mV、210mV、(b)総合感度90dB、閾値270mV、250mV

表-3.3.4.2 決定されたAE測定条件

項目		条件
トランスデューサ		140kHz共振型
感度	Main	50dB
	Pre	40dB
しきい値	High	230mV
	Low	210mV
バンドパスフィルター		100~200kHz
AE計数方法		イベント計数法

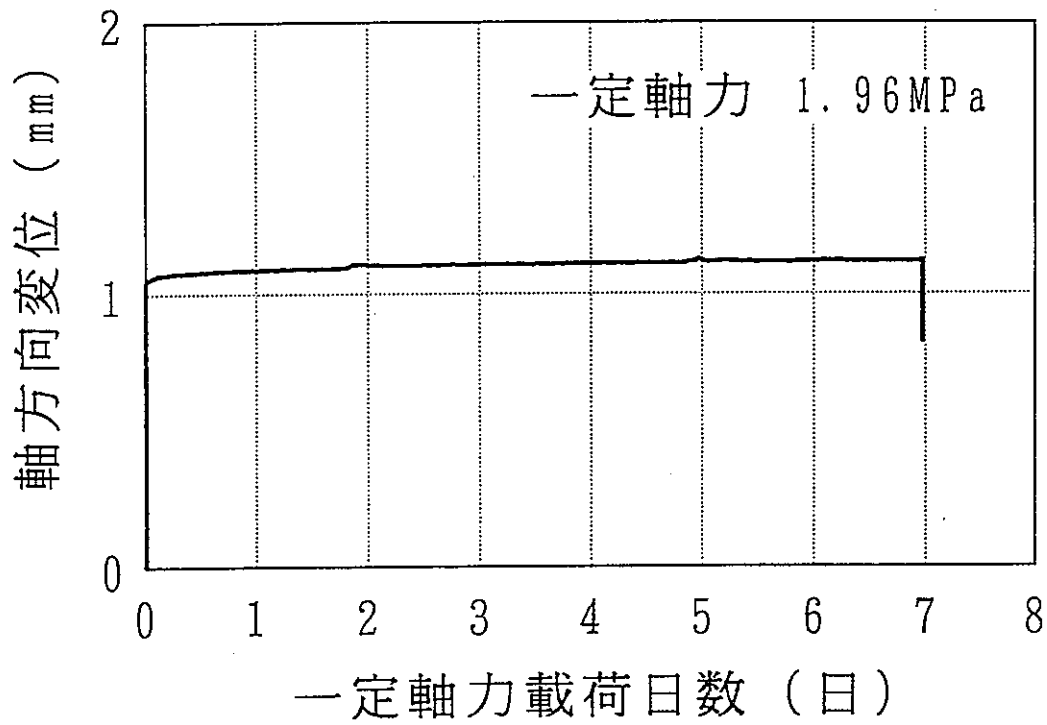


図-3.3.4.2 一定軸力载荷時における軸変位と载荷時間の関係

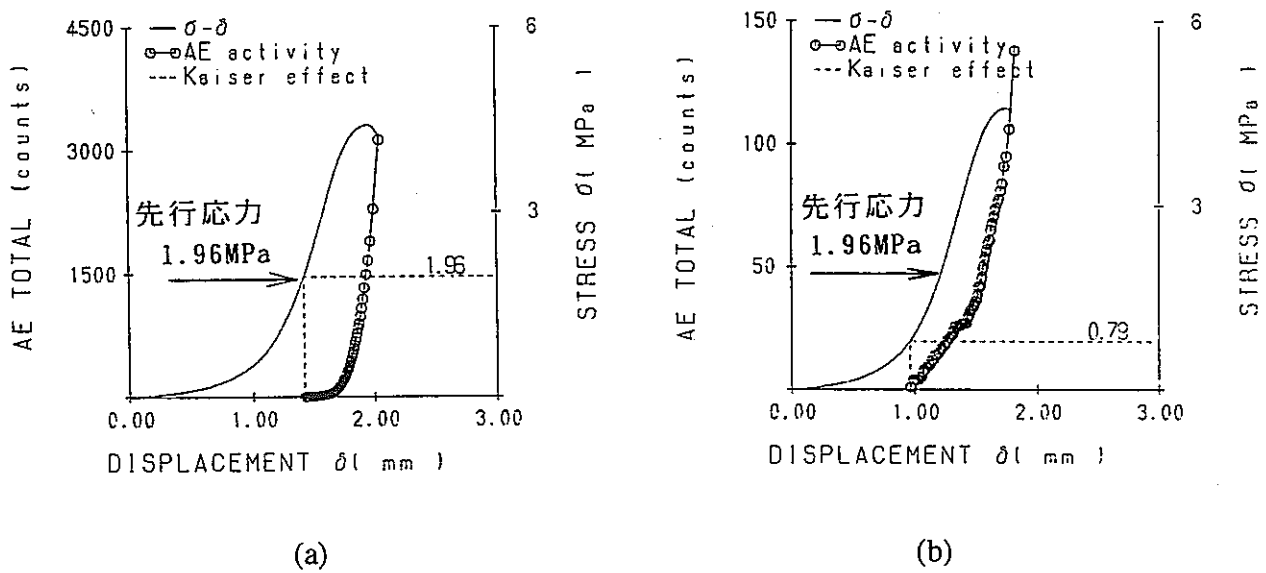


図-3.3.4.3 カイザー効果の時間依存測定結果の一例

(a)応力除荷後1日放置、(b)応力除荷後10日放置

表-3.3.4.3 カイザー効果時間依存測定結果の一覧

供試体 No.	初期状態				除荷直後	AE試験直 前	一定軸 力除荷 後の経 過日数 (日)	カイザー 効果から 推定され る応力 (MPa)
	寸法 (cm)		重さ (g)	単位体積重 量 (g/cm <sup>3</sup> )	重さ (g)	重さ (g)		
	直径	高さ						
CREEP.1	4.73	10.09	281.6	1.59	281.6	280.7	1	1.96
CREEP.2	4.73	10.19	286.0	1.60	286.0	284.9	2	2.07
CREEP.3	4.73	9.43	263.4	1.59	261.7	260.9	3	1.94
CREEP.4	4.73	9.57	267.8	1.59	267.8	267.4	4	1.59
CREEP.5	4.73	9.79	273.3	1.59	273.3	272.8	5	0.88
CREEP.7	4.73	10.14	286.8	1.61	286.4	285.2	7	0.31
CREEP.10	4.73	9.86	274.4	1.58	274.0	272.7	10	0.79
CREEP.15	4.73	9.91	272.3	1.56	272.3	272.0	15	0.68
CREEP.20	4.73	9.54	266.0	1.59	265.6	263.3	20	0.54
CREEP.30	4.73	9.78	274.5	1.60	274.3	271.9	30	0.39
CREEP.46	4.73	9.57	277.5	1.65	277.0	271.3	46	0.15
CREEP.66	4.73	10.27	289.5	1.61	289.2	283.0	66	0.51

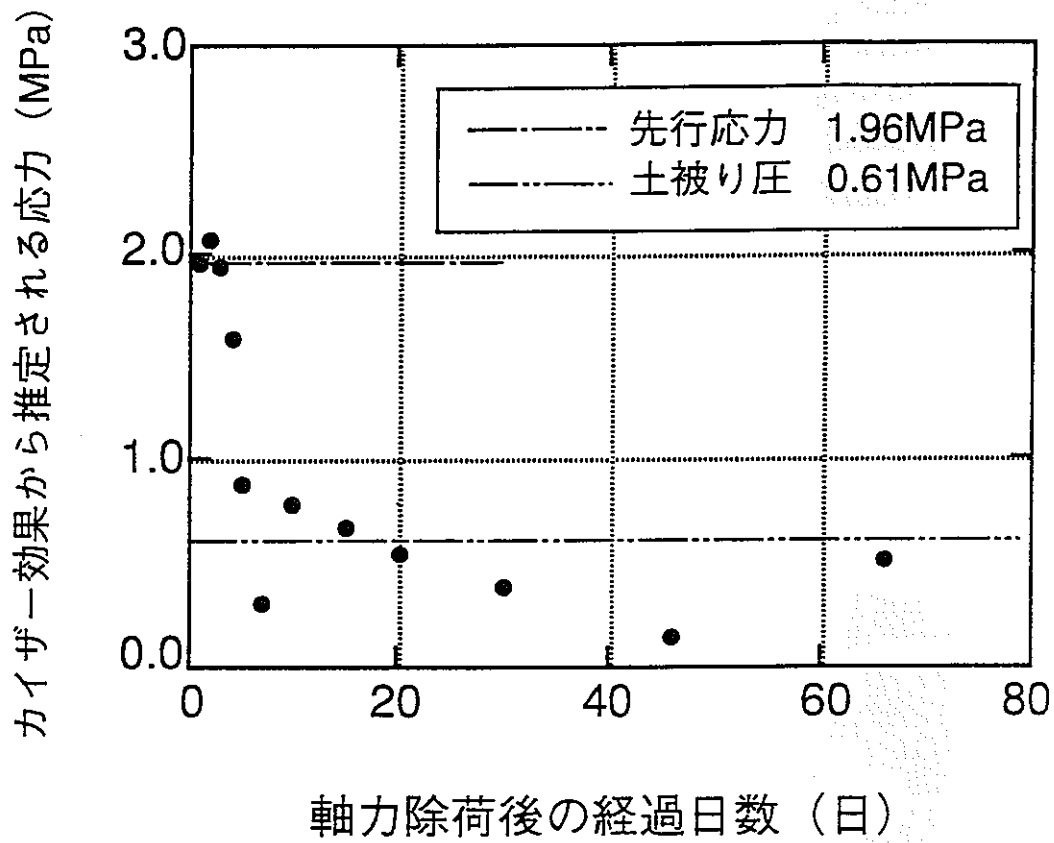
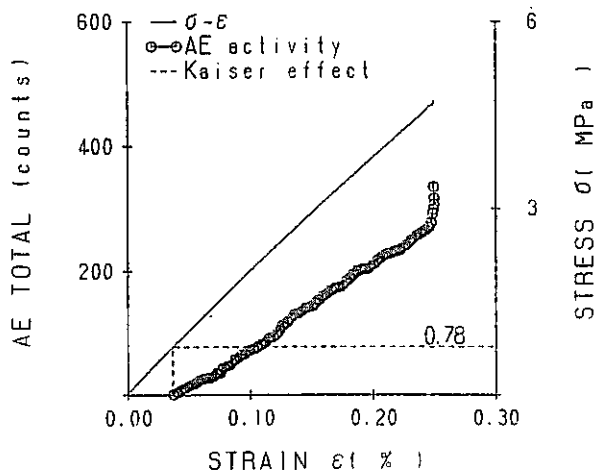


図-3.3.4.4 カイザー効果の時間依存特性



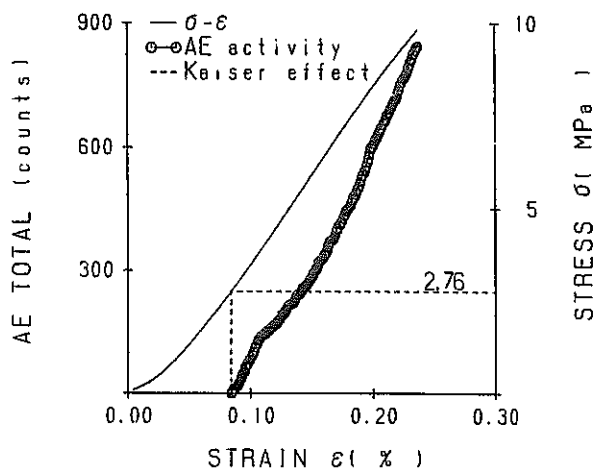
東濃鉦山 岩石資料  
G. L. -75.65~75.75 m  
初期地圧測定



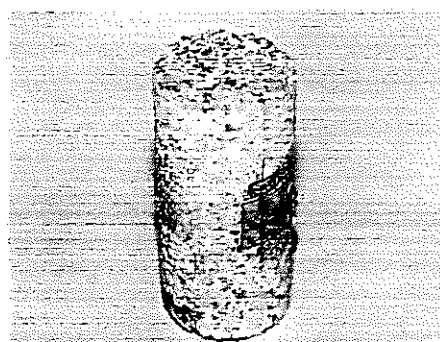
(a)



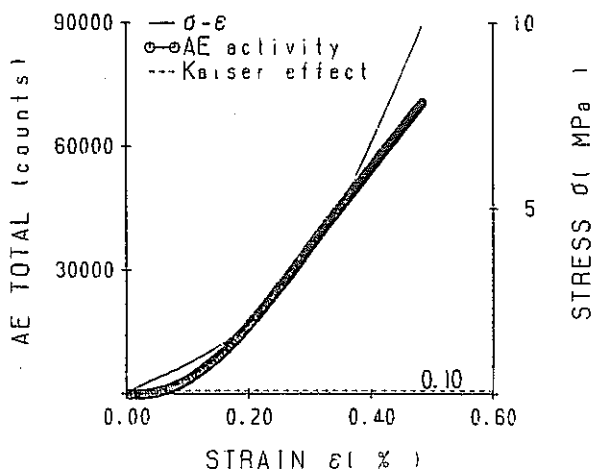
東濃鉦山 岩石資料  
G. L. -154m 付近 No. 1  
初期地圧測定



(b)



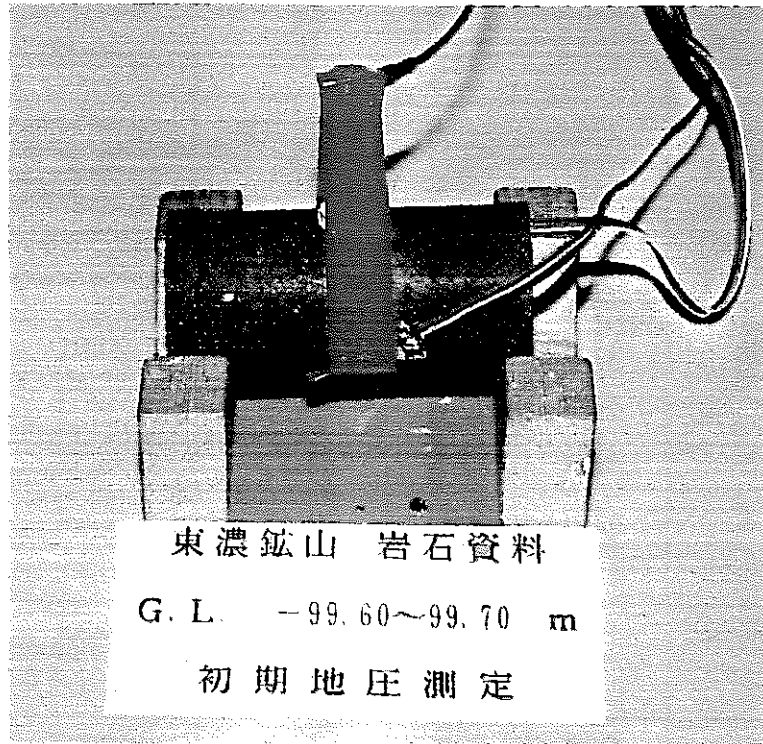
東濃鉦山 岩石資料  
G. L. -199m 付近 No. 1  
初期地圧測定



(c)

図-3.3.4.5 初期地圧測定結果の一例

(a)G.L.-75m、(b)G.L.-154m、(c)G.L.-199m



(a)



(b)

図-3.3.4.6 G.L.-99mの供試体

(a) A E試験準備状況、(b)供試体破断状況



表-3.3.4.4 初期地圧測定結果の一覧

供試体 No.	岩石採取 深度 G.L.(m)	供試体寸法(cm)		単位体積 重量 (g/cm <sup>3</sup> )	カイザー効果 から推定され る応力成分 (MP a)	岩石採取から A E試験まで のタイムラグ (日)
		直径	高さ			
JIATU.1	-50	4.73	10.99	1.80	0.01	125
JIATU.2	〃	4.73	10.50	1.83	0.03	125
JIATU.3	〃	4.73	10.71	1.79	0.03	125
JIATU.4	-70	4.70	9.80	1.68	0.54	180
JIATU.5	〃	4.70	9.60	1.69	0.41	180
JIATU.6	〃	4.70	9.82	1.68	0.35	180
JIATU.7	〃	4.70	9.39	1.69	0.18	180
JIATU.8	〃	4.70	9.66	1.67	0.17	180
JIATU.9	-75	4.73	9.32	1.68	0.78	160
JIATU.10	〃	4.73	9.88	1.78	0.55	160
JIATU.11	〃	4.73	9.84	1.74	0.64	160
JIATU.12	-99	4.73	10.06	1.90	-*	145
JIATU.13	-102	4.73	9.36	1.76	-*	145
JIATU.14	-154	4.73	8.66	2.16	2.76	3
JIATU.15	〃	4.73	10.13	2.26	2.45	3
JIATU.16	〃	4.73	9.50	2.28	3.22	3
JIATU.17	-195	4.76	9.89	2.55	0.54	100
JIATU.18	〃	4.76	10.11	2.55	0.28	100
JIATU.19	〃	4.76	9.70	2.55	0.44	100
JIATU.20	〃	4.76	10.20	2.55	0.16	100
JIATU.21	〃	4.76	10.20	2.55	0.19	100
JIATU.22	-199	4.73	10.50	2.54	0.10	3
JIATU.23	〃	4.73	10.43	2.53	0.01	3
JIATU.24	〃	4.73	10.41	2.53	0.16	3
JIATU.25	-50 M1 断面	2.98	7.00	1.75	0.74**	3

\*試験の準備段階で供試体にき裂が発生し、A E試験そのものが実施不可

\*\*G.L.-50m (M1断面) で実施したA Eによる初期地圧測定結果の平均値

カイザー効果から推定される鉛直方向初期地圧  $\sigma_v$  (MPa)

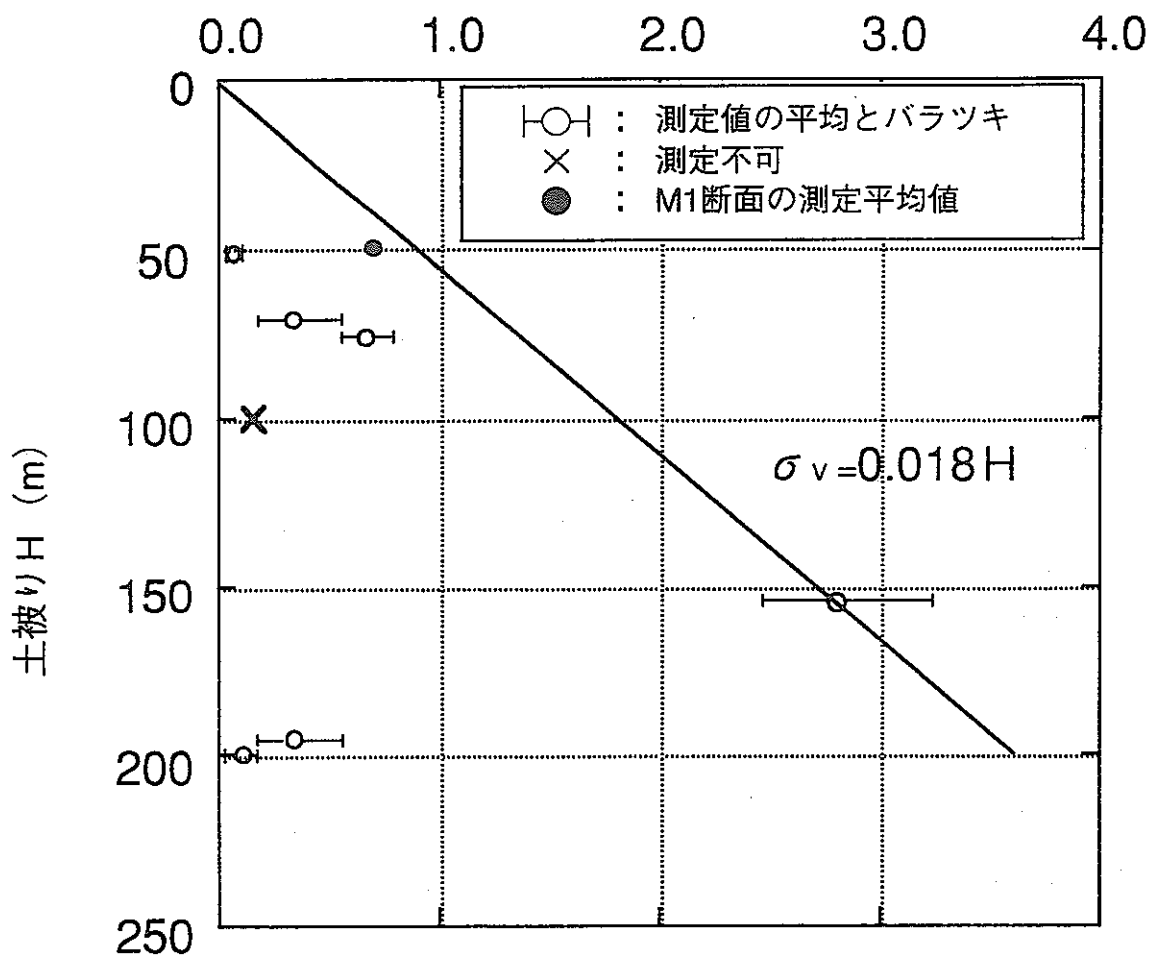


図-3.3.4.7 カイザー効果から推定された鉛直方向初期地圧と土被りとの関係

### 3.3.5 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 $\sigma_v$ (MPa)と土被りH(m)の関係は、次式で表すことができる。

$$\sigma_v = 0.018 \times H$$

## 4. 調査結果のまとめと今後の課題

### 4.1 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

## 4.2 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変化させた場合の弾性波速度の変化を測定した。

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波速度の変化は、飽和度50~0%の区間の変化よりも大きい傾向が見られた。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、飽和度の変化に加えて、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

### 4.3 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

#### 4.4 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

#### 4.5 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

### 2.2 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 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

#### 2.2.2 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、荘司泰敬、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

#### 2.2.4 応力状態と変形特性の関係

- 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

#### 2.3 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荷重時間の影響、

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

## 2.4 AEに関する基礎特性

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)：載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AE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AE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 MICHIHIRO, 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)：AE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

### 3.1.4 応力状態と変形特性の関係

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