

JNC TY7400 2001-001

公開資料

資源環境技術総合研究所／サイクル機構 共同研究報告書

－岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討－

平成12年度共同研究報告書

2001年3月

資源環境技術総合研究所

核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194, Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2001

資源環境技術総合研究所／サイクル機構 共同研究報告書
－岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討（平成12年度）－

瀬戸政宏*、前田信行**、松井裕哉**

要旨

資源環境技術総合研究所とサイクル機構は、岩盤の力学的安定性に関する調査方法や評価方法をテーマとして、平成元年度より共同研究を実施している。平成10年度から第4フェーズとして、岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討というテーマで、主として掘削影響領域を評価するための基礎データとなる初期応力状態や二次応力状態の計測・評価手法などについて検討することとした。本年度は、三軸応力下でAE法、DRAによる初期応力測定を行うことができる手法を開発し、その手法の適用性について評価した。

それらの結果について、以下に述べる。

- 1)一軸載荷試験によるAE法とDRAでは、先行応力値の応力レベルが高い場合は、応力値の推定精度が低下することがわかった。
- 2)封圧を作用させるための圧力容器を製作し、三軸応力下でのAE法、DRAによる初期応力測定手法を開発した。
- 3)東濃鉾山の堆積岩（明世累層）を用いて実施した三軸応力下でのAE法およびDRAによる応力値の推定の結果、比較的精度良く先行応力値を推定できることが示され、開発した手法の有効性が確認された。

本報告書は、資源環境技術総合研究所と核燃料サイクル開発機構の共同研究により実施した研究の成果である。

契約番号：124F047

サイクル機構担当グループおよび担当者：東濃地科学センター地質環境特性研究グループ 武田精悦

*：資源環境技術総合研究所 安全工学部構造安全研究室 室長

**：核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター地質環境特性研究グループ

Report of collaborative research by
National Institute for Resources and Environment (NIRE)
And Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)

— Study of an evaluation method for rock cavern stability (H12) —

Masahiro Seto*, Nobuyuki Maeda**, Hiroya Matsui**

Abstract

NIRE and JNC have been in collaborative research since 1989 to develop the techniques and methods for evaluating rock mass behavior. In 1998, Phase 4, a study of an evaluation method for rock cavern stability, was started to investigate methods to determine initial stress state and stress state around the drift to obtain basic information about the excavation disturbed zone. In 2000, in-situ stress measurement method using both AE (Acoustic Emission) method and DRA (Deformation Rate Analysis) under tri-axial stress condition was developed and evaluated to assess the applicability of the methods to estimate in-situ stress states. The main conclusions are as follows:

- 1) In the case of the stress level close to uni-axial compressive strength, accuracy of the estimated pre-stress was decreased by both the AE method and DRA in uni-axial compression test.
- 2) A special vessel was made in order to measure the AE under tri-axial stress condition, and in-situ stress measurement method using both the AE and DRA method under tri-axial stress condition was developed.
- 3) The developed method was confirmed to be able to estimate pre-stress with high accuracy by laboratory test using sedimentary rock (Akeyo Formation) in Tono mine. The method may be applicable to the in-situ stress measurement in the case of the stress level close to uni-axial compressive strength.

Work performed by National Institute for Resources and Environment (NIRE) and Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) under contract.

Agreement No. : 124F047

JNC Liaison : Tono Geoscience Center, Geoscience Research Group, Group Leader, Seietsu Takeda.

* : National Institute for Resources and Environment, Safety engineering department, Fracture mechanics and explosives division.

** : Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tono Geoscience Center, Geoscience Research Group.

目次

1. はじめに	1
2. 研究概要	2
2.1 目的	2
2.2 研究内容	2
2.3 研究分担	2
3. 岩石コアを用いた既存の初期応力測定手法の問題点について	3
3.1 概要	3
3.2 岩石の変形特性の把握	3
3.2.1 目的	3
3.2.2 試験方法	3
3.2.3 試験結果	4
3.3 先行応力値の応力レベルが推定される応力値に与える影響	4
3.3.1 目的	4
3.3.2 試験方法	4
3.3.3 試験結果	5
3.3.4 考察	5
4. 岩石コアを用いた三軸応力下における初期応力測定手法の開発	11
4.1 試験システムの開発	11
4.1.1 圧力容器の製作	11
4.1.1.1 概要	11
4.1.1.2 圧力容器の設計・製作	11
4.1.1.3 使用方法	13
4.1.2 圧力容器の性能確認試験	17
4.1.2.1 概要	17
4.1.2.2 目的	17
4.1.2.3 試験片の作成	17
4.1.2.4 試験方法	17
4.1.2.5 試験結果	20
4.2 三軸応力下における初期応力測定手法に関する基礎的検討	21
4.2.1 概要	21
4.2.2 岩石の変形特性の把握	21
4.2.2.1 目的	21
4.2.2.2 岩石試料	21
4.2.2.3 試験方法	21
4.2.2.4 試験結果	21
4.3 三軸応力下における初期応力測定手法の適用性の評価	23
4.3.1 目的	23
4.3.2 岩石試料	23

4.3.3 試験方法	23
4.3.4 試験結果	24
4.4 三軸応力下における初期応力測定手法の適用試験のまとめ	27
5. まとめ	28

図表の一覧

第1章

表 1.1 共同研究の経緯	1
---------------	---

第2章

表 2.3.1 共同研究分担表	2
-----------------	---

第3章

図 3.2.1 応力-ひずみ関係 (田下凝灰岩)	4
表 3.3.1 先行応力値と載荷応力値	5
図 3.3.1 累積 AE カウント数-応力の関係 (弾性領域: 応力レベル約 43%)	7
図 3.3.2 ひずみ差-応力の関係 (弾性領域: 応力レベル約 43%)	7
図 3.3.3 累積 AE カウント数-応力の関係 (ダイラタンシー開始後の領域: 応力レベル約 60%)	8
図 3.3.4 ひずみ差-応力の関係 (ダイラタンシー開始後の領域: 応力レベル約 60%)	8
図 3.3.5 累積 AE カウント数-応力の関係 (破壊近傍領域: 応力レベル約 74%)	9
図 3.3.6 ひずみ差-応力の関係 (破壊近傍領域: 応力レベル約 74%)	9
図 3.3.7 先行応力値の推定精度-応力レベルの関係	10

第4章

図 4.1.1 圧力容器の全体組み立て図	12
図 4.1.2 圧力容器の容器部分の部品図	12
図 4.1.3 試験片 (田下凝灰岩)	14
図 4.1.4 容器内部への試験片の設置状況	14
図 4.1.5 試験片をセットした圧力容器と加圧用ポンプ	15
図 4.1.6 上部ピストンと AE センサー	15
図 4.1.7 試験片の設置が完了した圧力容器	16
図 4.1.8 圧力容器の設置状況	16
図 4.1.9 性能確認試験の載荷パターン	18
図 4.1.10 AE センサとプリアンプ	19
図 4.1.11 AE 計測装置と計測用パソコン	19
図 4.1.12 性能試験結果	20
図 4.2.1 応力-ひずみ線図	22
図 4.2.2 荷重と累積 AE カウントの時間変化	22
図 4.3.1 三軸応力下における試験用の試験片	23
図 4.3.2 三軸応力下における繰返し載荷試験の載荷パターン	24
図 4.3.3 三軸応力下での荷重とひずみの時間変化	25
図 4.3.4 三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果	

	(载荷 1 回目 : 先行応力 3MPa) -----	25
図 4.3.5	三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果	
	(载荷 2 回目 : 先行応力 3MPa) -----	26
図 4.3.6	三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果	
	(载荷 3 回目 : 先行応力 3MPa) -----	26
図 4.3.7	三軸応力下での DRA による先行応力値の推定結果	
	(载荷 5 回目と 1 回目、先行応力 3MPa) -----	27

1. はじめに

大規模地下空洞や大深度地下構造物の建設にあたり、岩盤の力学的な安定性を評価し、空洞のレイアウトや支保などの合理的な設計を行うために、建設地点の初期応力状態を定量的に把握することは重要である。

このような観点から、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構と呼ぶ）東濃地科学センターでは、工業技術院資源環境技術総合研究所（以下、資環研と呼ぶ）と、岩盤の力学的安定性に関する調査方法や評価方法をテーマとして、平成元年度より共同研究を実施している。表 1.1 に示すように、これまでに本共同研究では、フェーズ 1（H元～H3）として、AE（Acoustic Emission）の原位置計測や AE および比抵抗トモグラフィに関する室内基礎試験を実施した。フェーズ 2（H4～H7）として、弾性波および比抵抗トモグラフィの評価手法に関する基礎的な研究を実施するとともに、初期応力測定を実施したり。また、坑道掘削影響試験の事前調査として、原位置比抵抗トモグラフィ調査を実施した²⁾。フェーズ 3（H8～H9）として、堆積軟岩の湿潤環境下での応力腐食割れの研究や破壊過程での AE 発生挙動調査、坑道掘削後の原位置比抵抗トモグラフィ調査を実施した²⁾。フェーズ 4（H10～H12）として、岩盤の初期応力測定や坑道周辺の二次応力測定などを実施している。

平成 10 年度は、AE 法、DRA（Deformation Rate Analysis）および埋設型ひずみ計を用いた応力解放法により、坑道周辺の二次応力測定を実施した³⁾。平成 11 年度は、東濃鉱山敷地内で掘削した深度約 200m の鉛直ボーリング孔において、AE 法、DRA、AE 法と水圧破碎法を組み合わせた方法の初期応力状態の評価手法としての適用性について検討した⁴⁾。今年度は、三軸応力状態で AE 法、DRA による初期応力測定を行うことができる手法を開発し、その手法の適用性について検討した。

表 1.1 共同研究の経緯

	H元	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
フェーズ 1	← AE原位置計測 AE・比抵抗トモグラフィ室内試験 →											
フェーズ 2				← AE・比抵抗トモグラフィの評価手法の研究 初期応力測定 掘削影響試験の事前比抵抗トモグラフィ調査 →								
フェーズ 3								← 応力腐食割れの研究 破壊過程における AE 発生挙動調査 掘削影響試験の事後比抵抗トモグラフィ調査 →				
フェーズ 4										← 二次応力測定 初期応力測定 →		

2. 研究概要

2.1 目的

(1)共同研究の目的

掘削影響領域を評価するための基礎データとなる初期応力状態や坑道掘削に伴う周辺岩盤の物性変化の範囲やその程度を定量的に評価することができる計測・評価手法の開発を目的とする。

(2)本フェーズの目的

これまでの共同研究では、主として原位置試験により掘削に伴い発生する岩盤の物性変化や湿潤環境下における岩盤の破壊特性などについて評価してきた。これらを踏まえ、本フェーズでは、掘削影響領域を評価するための基礎データとなる初期応力状態や二次応力状態の計測・評価手法の適用性について評価することを主目的とする。

(3)本年度の目的

本年度は、堆積岩において岩盤の一軸圧縮強度と同程度の初期応力状態が想定される地下深部の初期応力測定手法を開発し、それらの適用性について評価を行うことを目的とする。

2.2 研究内容

①三軸応力下における初期応力測定手法の開発（AE 法、DRA）

封圧を作用させることができる圧力容器を作成し、性能確認試験を行い、三軸応力下においても AE とひずみの計測が実施でき、先行応力値を精度良く推定できる可能性があることを確認する。岩石試料としては、田下凝灰岩を用いる。

②開発した手法の適用性の評価

東濃鉱山の鉛直ボーリング孔（00SE-03 孔）で得られた岩石試料から試験片を作成し、人工的に先行応力を載荷した試験片を用いて、三軸応力下における繰返し載荷試験を行い、AE 法と DRA により先行応力値を推定する。そして、この方法の初期応力測定手法としての適用性について評価する。

2.3 研究分担

資環研とサイクル機構の共同研究の分担を表 2.3.1 に示す。

表 2.3.1 共同研究分担表

①三軸応力下における初期応力測定手法の開発（AE 法、DRA）	資環研	サイクル機構
● 圧力容器の設計・製作	○（設計）	○（製作）
● 性能試験	○	
● 結果の評価	○	○
②開発した手法の適用性の評価		
● 岩石試料の採取		○
● 室内試験	○	
● 結果の評価	○	○

3. 岩石コアを用いた既存の初期応力測定手法の問題点について

3.1 概要

地下深部では、岩盤の自重や地殻運動の影響などにより、高い初期応力が作用していることが考えられ、その岩盤の一軸圧縮強度と同程度の応力状態になっている場合も考えられる。そのような地点の初期応力の測定に岩石コアを用いる方法を適用する場合は、岩石コア採取時および一軸載荷試験時に下記のようなことが生じ、応力値の推定が困難となる場合が考えられる。

①岩石コア採取時の問題

- ・岩石コアの採取時の応力解放により、岩石コアにき裂が発生し、強度が低下する。
- ・採取された岩石コアの乾燥劣化により、岩石コアにき裂が発生し、強度が低下する。
- ・強度が低下した岩石コアでは、試験片の作成が不可能となることがある。

②一軸載荷試験時の問題

- ・原位置での応力状態を再現するために、試験時に載荷される応力値が高く、試験片での微小き裂の発生や進展などの破壊につながる現象が発生し、応力値の推定精度が著しく低下する。
- ・試験時に載荷される応力が高いため、試験片が破壊し、載荷試験そのものが不可能となる。

岩石コア採取時の問題については、コアの採取方法や保管方法などを工夫し、岩石コアを良好な状態に保つことが必要である。このことは、試験手法とは別の問題であるため、別途検討することとする。一軸載荷試験時の問題については、封圧を作用させた状態で一軸載荷試験を行なうことができれば、その封圧により試験片の見掛けの強度が上昇し、き裂の進展や試験片の破壊を抑制することができると考えられる。そこで、封圧を作用させるための圧力容器を製作し、三軸応力下における初期応力測定手法の開発を行った。

まず、試験を実施する岩石の変形挙動を把握し、岩石の強度に対する先行応力値の割合（以下、応力レベルと称す）が推定される応力値に与える影響を調査し、一軸載荷試験により推定できる応力レベルについて検討した。具体的には、一軸圧縮試験を行ない、応力-体積ひずみの関係から、試験片のダイラタンシー発生状況などの変形特性を把握し、試験片が破壊に至るまでの過程を3つの領域に分けた。そして、定めた3つの領域に相当する応力レベルを先行応力値として設定し、その先行応力値をそれぞれの試験片に与え、一軸繰返し載荷試験を行ない、AE法およびDRAにより応力値を推定した。そして、先行応力値と推定した応力値を比較し、応力値の推定精度について検討した。

3.2 岩石の変形特性の把握

3.2.1 目的

岩石のダイラタンシー（圧縮応力下でのき裂発生・集積に伴う体積膨張特性）などの変形挙動を明らかにするために、一軸圧縮試験を実施した。

3.2.2 試験方法

試料は田下凝灰岩を用い、試験片は、直径30mm、高さ60mmの円柱状であり、端面の平行度は1/500以内に仕上げた。試験片には、単軸型ひずみゲージ（ゲージ長20mm）を軸方向と周方向にそれぞれ2枚ずつ貼り付け、AEセンサー（NF社製、AE904-DM）を、エレクトロンワックスを用いて2個取り付けた。試験片への局所的な応力集中を避けるために、試験片の両端にエンドピースを取り付けた。

載荷は、MTS 製 810 型材料試験機により変位制御 (120 $\mu\text{m}/\text{min}$) で行なった。試験片が均等に載荷されるように、試験片の下に球座を設置し、試験片の側面に貼ったひずみゲージの載荷軸方向のひずみ量がほぼ等しくなるように載荷板を調整した。載荷は、試験片が破壊するまで行った。

3.2.3 試験結果

一軸載荷試験により得られた応力-ひずみ関係を図 3.2.1 に示す。一軸圧縮強度は約 20MPa であり、体積ひずみは約 9MPa (一軸圧縮強度の約 45%) まで線形であり、その後ダイラタンシーが始まり非線形挙動が現れた。体積ひずみは、約 14MPa (一軸圧縮強度の約 70%) 付近から膨張側へ移行し、約 20MPa で試験片は破壊した。これらのことから、田下凝灰岩は、一軸圧縮強度の 0~45% の応力レベルでは弾性領域、45~70% の応力レベルではダイラタンシー開始後の領域、70~100% の応力レベルでは破壊近傍領域にあると考えられる。

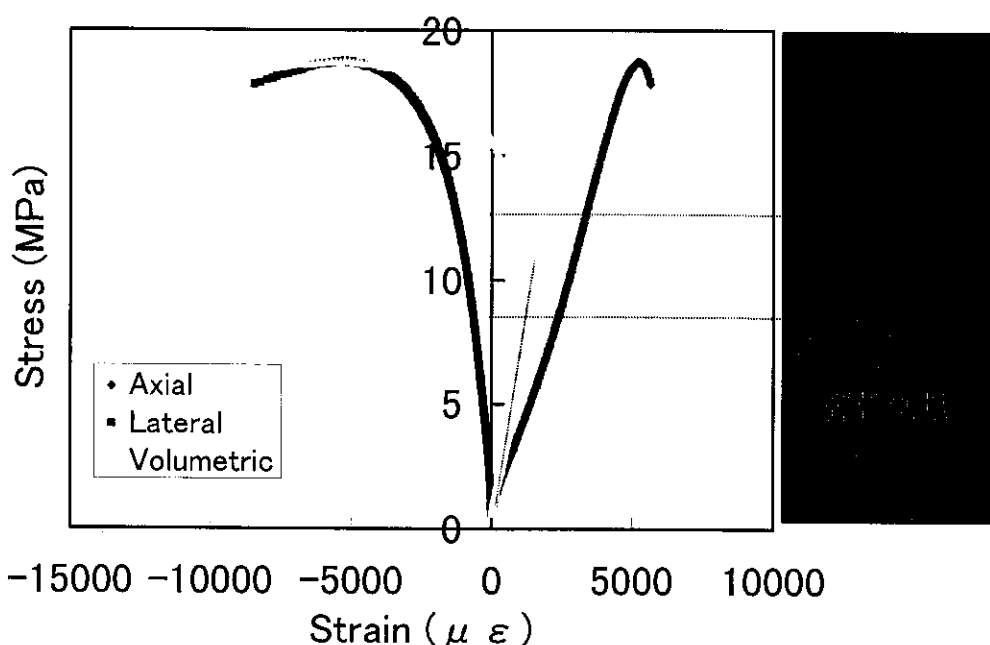


図 3.2.1 応力-ひずみ関係 (田下凝灰岩)

3.3 先行応力値の応力レベルが推定される応力値に与える影響

3.3.1 目的

一軸圧縮試験結果に基づいて区分した 3 つの領域において、先行応力値の応力レベルが AE 法や DRA により推定される応力値に与える影響について把握する。

3.3.2 試験方法

試験片は前述と同じ方法で作成した。一軸圧縮試験結果に基づいて区分した 3 つの領域において、それぞれ任意の先行応力値を設定し、それらを試験片の軸方向の先行応力としてそれぞれの試験片に約 3 時間作用させた。そして、設定した繰返し載荷値まで一軸繰返し載荷試験を行ない、AE 法および DRA によって先行応力値の推定を行った。AE やひずみの計測方法は、前述の一軸圧縮試験と同様である。各領域における先行応力値および繰返し載荷の応力値を表 3.3.1 に示す。測定した AE

とひずみから先行応力値を推定した。

表 3.3.1 先行応力値と載荷応力値

	先行応力値 (応力レベル)	載荷応力値
(1)弾性領域	8.6MPa (応力レベル約 43%)	17.4MPa
(2)ダイラタンシー開始後の領域	11.9MPa (応力レベル約 60%)	14.9MPa
(3)破壊近傍領域	14.8MPa (応力レベル約 74%)	17.0MPa

3.3.3 試験結果

(1)弾性領域 (一軸圧縮強度の 0~45%の応力レベル)

累積 AE カウント数-応力の関係を図 3.3.1 に示す。AE 法により推定された応力値は 8.9MPa(推定誤差 3.5%)であった。また、DRA によるひずみ差-応力の関係を図 3.3.2 に示す。DRA により推定された応力値は 9.4MPa (推定誤差 9.3%)であった。AE 法と DRA によって推定された応力値は先行応力値と概ね等しいことから、弾性領域においては、一軸繰返し載荷試験による AE 法と DRA により、先行応力値を精度良く推定することができるといえる。

(2)ダイラタンシー開始後の領域 (一軸圧縮強度の 45~70%の応力レベル)

累積 AE カウント数-応力の関係を図 3.3.3 に示す。AE 法により推定された応力値は 12.0MPa (推定誤差 0.8%)であった。また、DRA によるひずみ差-応力の関係を図 3.3.4 に示す。DRA により推定された応力値は 11.9MPa (推定誤差 0.8%)であった。AE 法と DRA によって推定された応力値は先行応力値と概ね等しいことから、ダイラタンシー開始後の領域においても、一軸繰返し載荷試験による AE 法と DRA により、先行応力値を精度良く推定することができるといえる。

(3)破壊近傍領域 (一軸圧縮強度の 70~100%の応力レベル)

累積 AE カウント数-応力の関係を図 3.3.5 に示す。AE 法により推定された応力値は 11.4MPa (推定誤差 23%)であった。また、ひずみ差-応力の関係を図 3.3.6 に示す。DRA により推定された応力値は 11.2MPa (推定誤差 22%)であった。AE 法と DRA によって推定された応力値は、実際に与えた先行応力値 (14.8MPa) よりも 20%以上低い値であった。このため、破壊近傍領域においては、一軸繰返し載荷試験による AE 法および DRA では、先行応力値を精度良く推定することができないといえる。

3.3.4 考察

それらの試験の結果をまとめたものを図 3.3.7 に示す。弾性領域とダイラタンシー開始後の領域では、先行応力値を精度良く推定できたが、破壊近傍領域では、推定された値は先行応力値の 70~80%程度であり、推定精度がかなり低下した。一軸繰返し載荷試験時の載荷応力値は先行応力値より高い値に設定されるため、先行応力値が高いと載荷応力値も高くなり、それに伴い試験片の内部でき裂の発生や進展が生じていると考えられる。田下凝灰岩は一軸圧縮強度の約 50%付近の応力レベルからダイラタンシーが始まり、岩盤の破壊現象に起因するき裂の発生や進展による AE やひずみが発生し、計測データにはそれらによるものと先行応力に起因するものと両方が含まれている。このため、先行応力に起因する AE やひずみが卓越する場合は、先行応力値を精度良く推定することが可能であるが、き裂の発生や進展に起因する AE やひずみが卓越する場合は、推定精度は著しく低下すると考えられる。

すなわち、先行応力値の推定精度は、先行応力値とダイラタンシーが始まる応力値との大小関係に依存すると考えられ、先行応力値の方が高い場合は、載荷応力が先行応力値に達する前にダイラタンシーに伴う AE やひずみが発生するために、AE 法と DRA によって推定される応力値は先行応力

値より小さくなったと考えられる。これらのことから、一軸荷重試験による AE 法と DRA では、先行応力値の応力レベルが高い場合（田下凝灰岩：一軸圧縮強度の約 70%以上）は、応力値の推定精度が低下することがわかった。

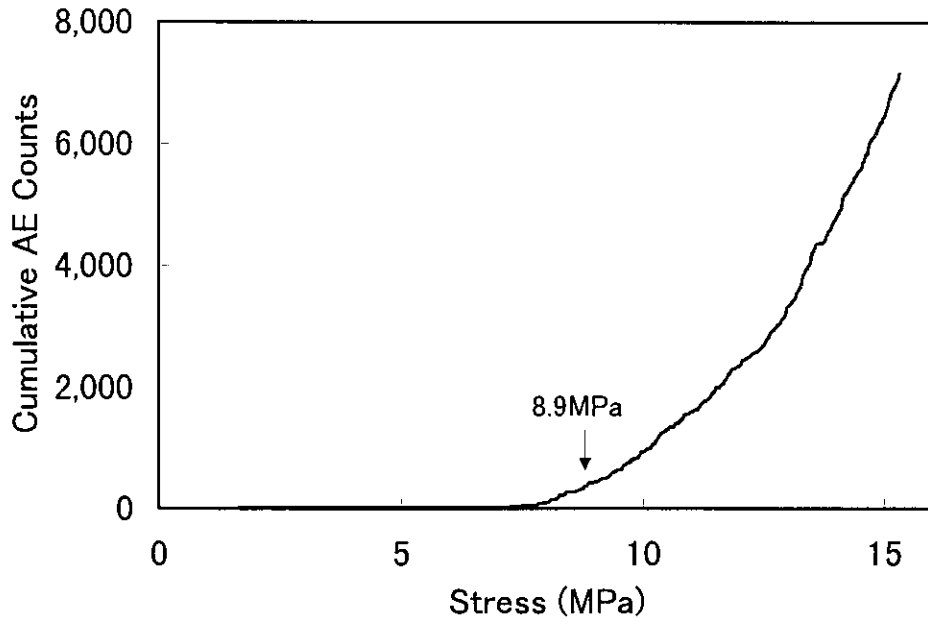


図 3.3.1 累積 AE カウント数－応力の関係（弾性領域：応力レベル約 43%）

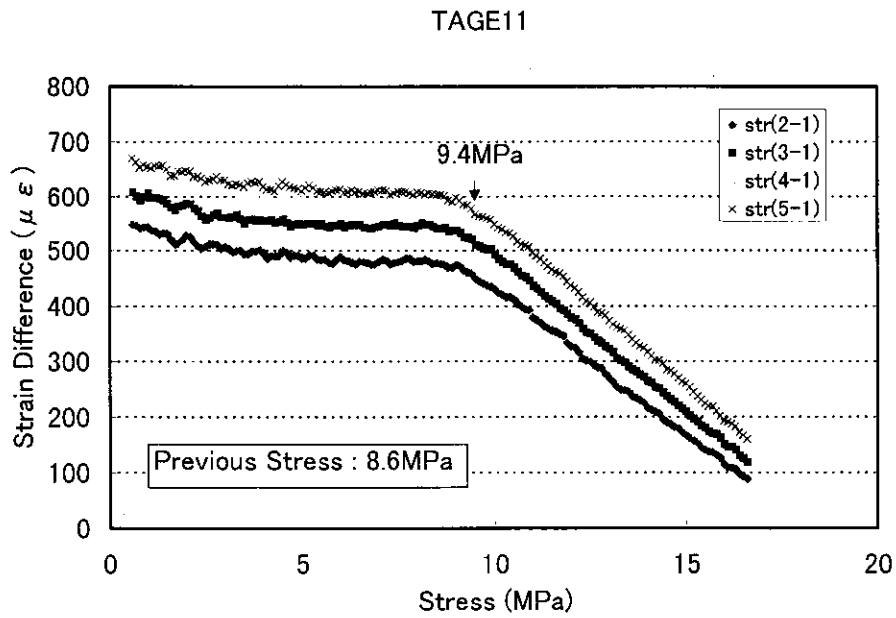


図 3.3.2 ひずみ差－応力の関係（弾性領域：応力レベル約 43%）

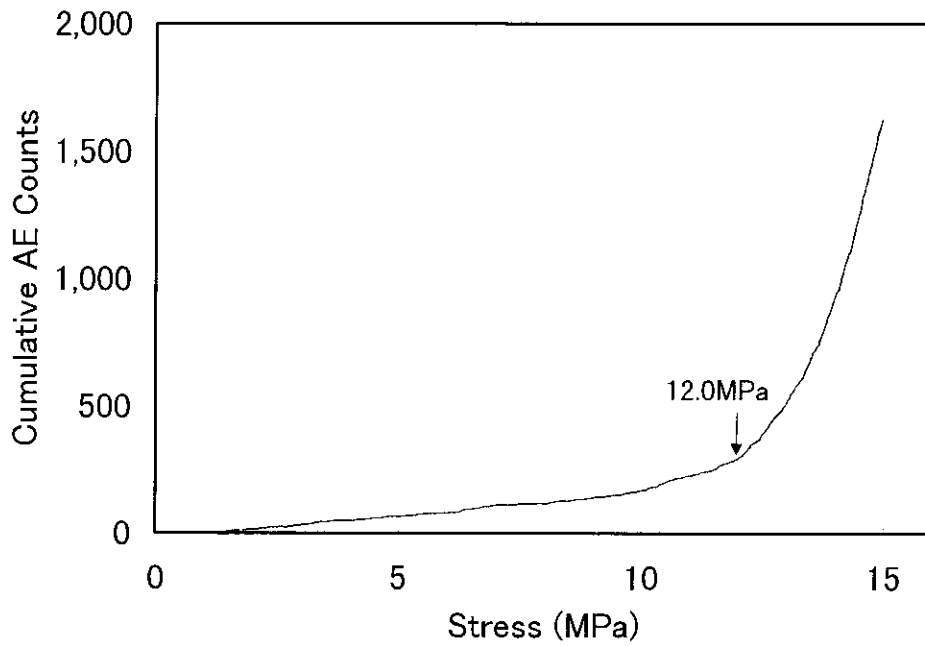


図 3.3.3 累積 AE カウント数－応力の関係
 (ダイラタンシー開始後の領域：応力レベル約 60%)

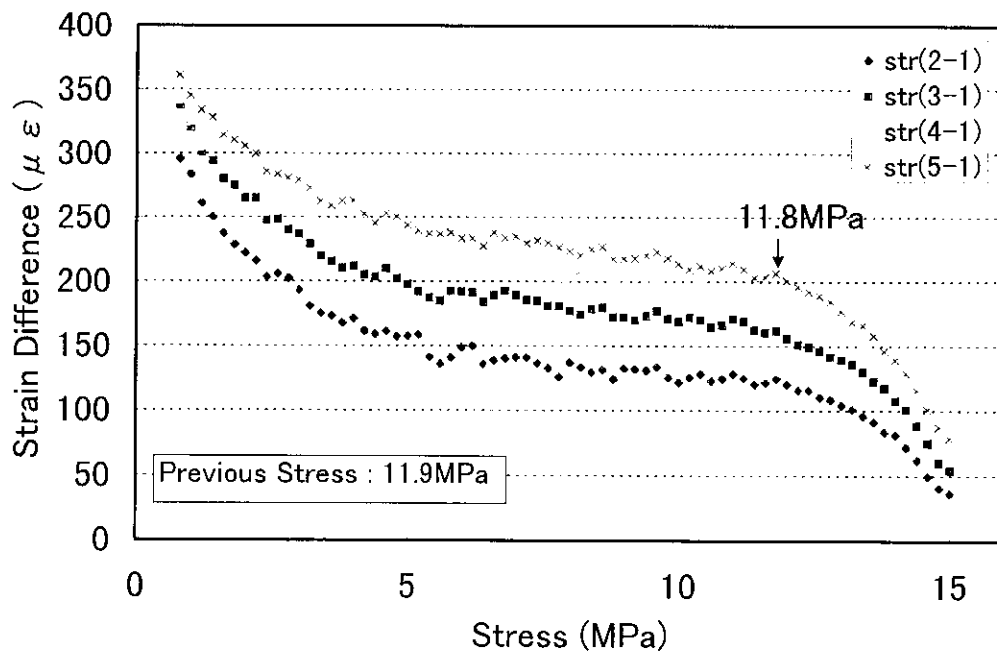


図 3.3.4 ひずみ差－応力の関係
 (ダイラタンシー開始後の領域：応力レベル約 60%)

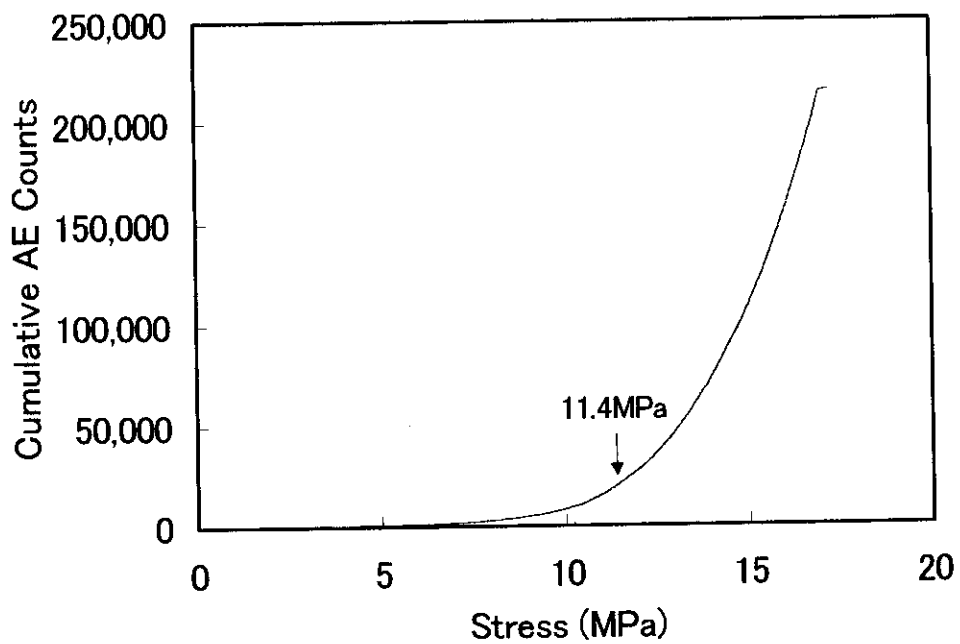


図 3.3.5 累積 AE カウント数-応力の関係 (破壊近傍領域: 応力レベル約 74%)

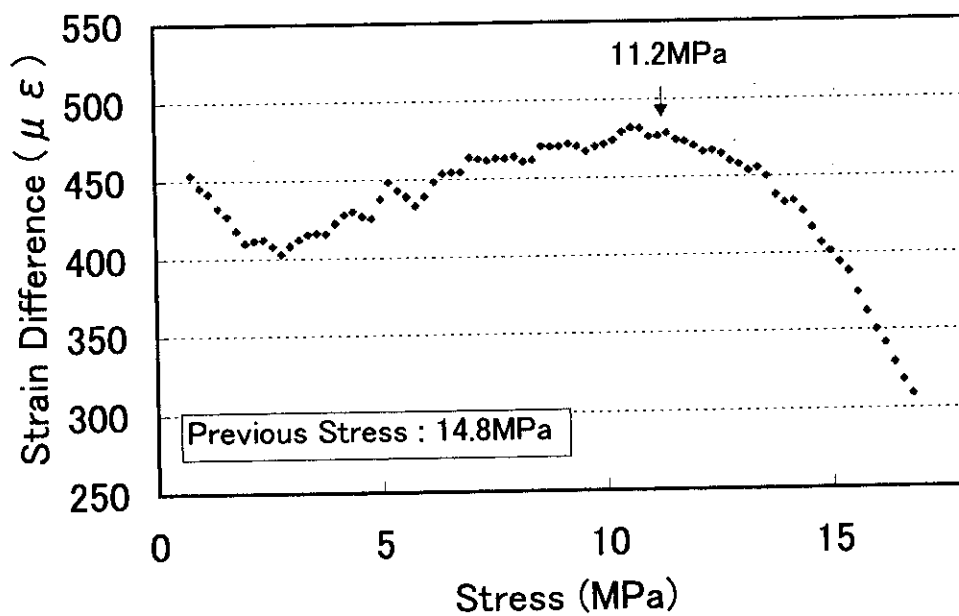


図 3.3.6 ひずみ差-応力の関係 (破壊近傍領域: 応力レベル約 74%)

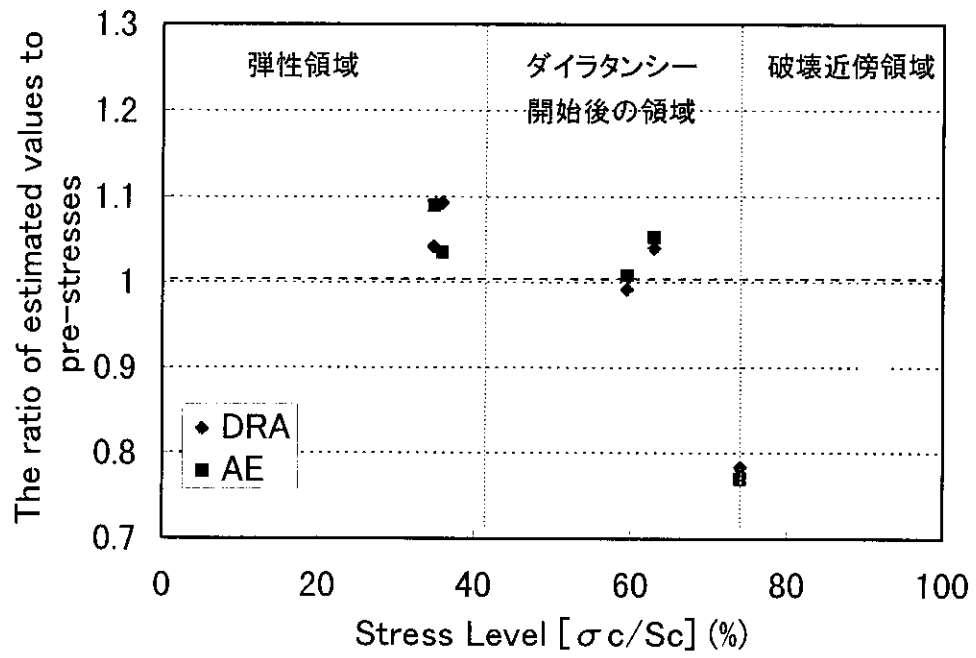


図 3.3.7 先行応力値の推定精度—応力レベルの関係

4. 岩石コアを用いた三軸応力下における初期応力測定手法の開発

4.1 試験システムの開発

4.1.1 圧力容器の製作

4.1.1.1 概要

前節までに示した先行応力値の応力レベルを変えて行った一軸繰返し载荷試験によって、先行応力値が岩盤の一軸圧縮強度に近い場合は、通常の一軸試験による AE 法および DRA では精度良く先行応力値を推定することは困難であることが示された。このため、先行応力値が岩盤の一軸圧縮強度に近い場合の応力測定方法として、三軸応力下での AE 法と DRA による試験を行なうために、封圧を作用するための圧力容器を製作した。

4.1.1.2 圧力容器の設計・製作

圧力容器は、一般の载荷試験機で使うことができる大きさとし、試験片は直径 30mm 程度、高さ 60mm 程度の円柱形のものを用い、封圧を 20MPa 程度まで作用させることができ、AE およびひずみの計測ができる構造とする。圧力容器の全体の組み立て図を図 4.1.1 に、容器部分の部品図を図 4.1.2 に示す。容器部分は SCM435 ステンレス製で、外径 145mm、内径 80mm、高さ 160mm の円筒形である。円筒部分の側面にねじ込み式の配線用の小穴が 2 つあり、ここにひずみゲージ用の線材を通しエポキシ樹脂で厳重にモールドし、耐圧性を確保する。側面には、油圧ポンプからの配管用バルブとエア抜き用のバルブを設けた。円筒状の内部には、上下に直径 80mm のピストンがあり、試験片の軸方向の荷重を伝え、内圧はピストンの O リングにより保持される。下部ピストンの下は球座の構造になっており、载荷の際のバランス調整ができる。また、上部ピストンは O リングの上の部分で水平方向に分割する構造になっており、そこに AE センサ設置用の切り欠きがある。試験片から発生した AE 信号は、上部ピストンを経由して受信されることになる。

耐圧性能試験により、本容器はおよそ 30MPa まで作用可能であることを確認した。

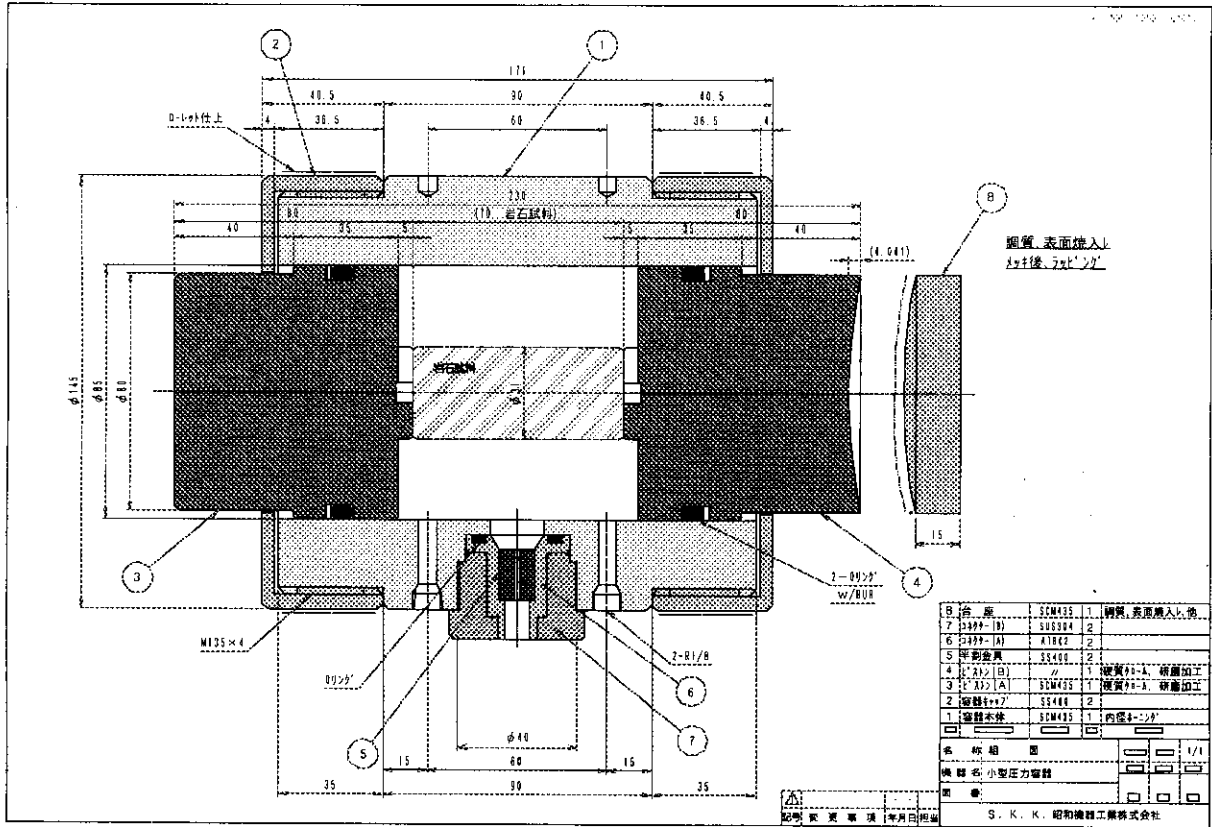


図 4.1.1 圧力容器の全体組み立て図

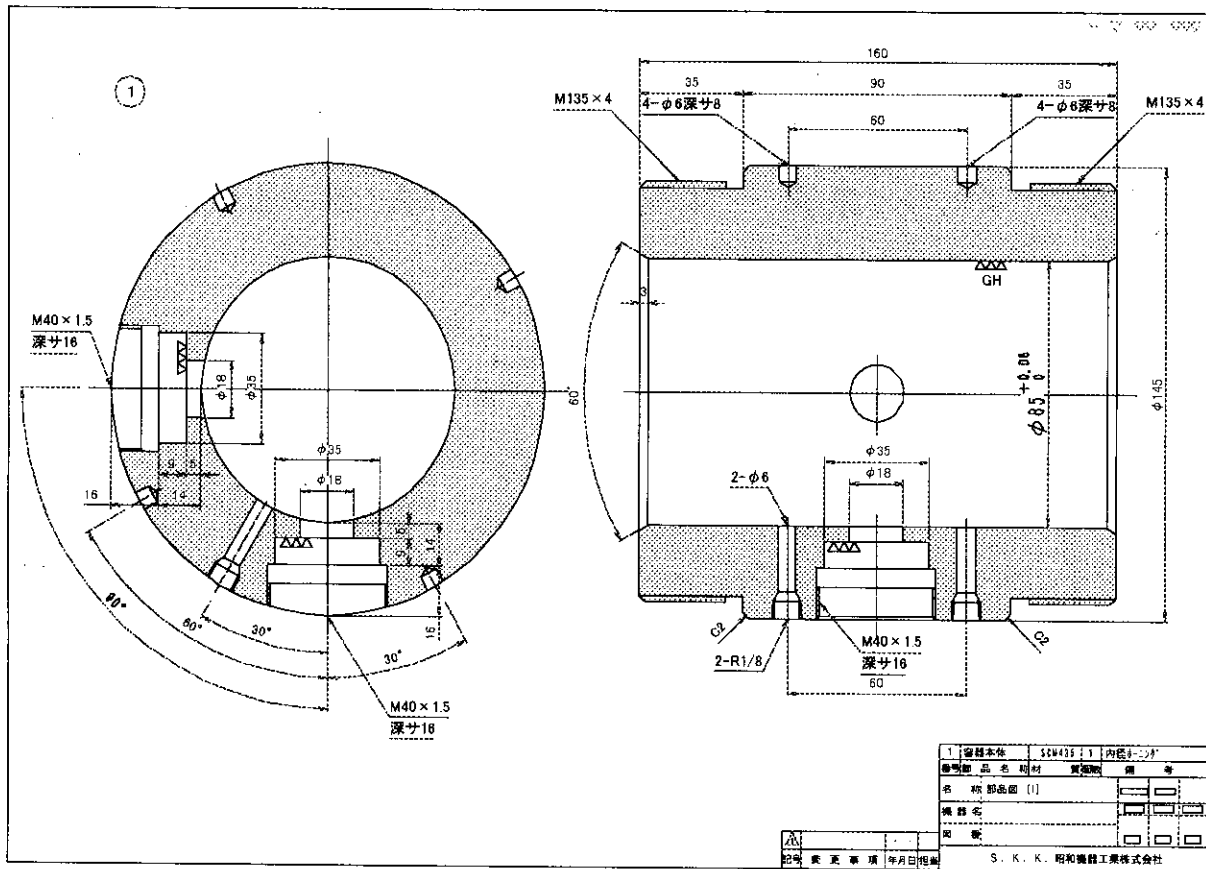


図 4.1.2 圧力容器の容器部分の部品図

4.1.1.3 使用方法

作成した圧力容器は、以下の手順によって取り扱い、試験装置に設置する。

- ① 圧力容器本体に下部ピストンを組み込み、ピストン落下防止用の蓋を閉める。加圧用のポンプを接続し、側面の配線用のキャップを閉じる。
- ② エンドピースとひずみゲージを取り付けてシリコンで覆った試験片（図 4.1.3 参照）のひずみゲージの配線を行なう。ひずみゲージの線は適当な長さに切断した後、ハンダによりモールド部の裸線と接続し、接続部をビニールテープ等で保護する。
- ③ 下部エンドピースにある位置決め用の穴（直径 5mm）に短い丸棒を通し、下部ピストンの中央に試験片をセットする。試験片の設置状況を図 4.1.4 に示す。配線は上下のピストンや載荷面と干渉を起こさないように試験片の側面に押し込む。加圧用のポンプと試験片をセットした圧力容器を図 4.1.5 に示す。
- ④ AE センサは、上部ピストンの内部にエレクトロンワックス（宋電子工業製）により接着する。AE センサと容器とのカップリングは、センサの感度を確保するために、確実にこなう。AE センサの配線は、ピストン部の切り欠きを通して圧力容器の外へ接続される。上部ピストンの内部への AE センサの貼り付けの状況を図 4.1.6 に示す。図 4.1.6 で見られる小さな Oリングは、そこから加圧流体（オイル）が AE センサ部分へ漏れ出さないようにするためのものである。
- ⑤ AE センサを取り付けた上部ピストンを容器に入れ、静かに試験片と接触させる。その後、上部ピストンの落下防止用の蓋を閉め、上部ピストンに空気抜き用のドレン・パイプを接続する。これで、圧力容器への試験片の設置が完了した。その状況を図 4.1.7 に示す。
- ⑥ 次に、材料試験機へこの圧力容器をセットする。そのとき、試験機からのノイズの影響を低減するために上部ピストンと載荷板の間に数枚のろ紙を挟む（図 4.1.8）。圧力容器内の空気抜き時や封圧下での試験機の操作の際には加圧流体（オイル）が流出する可能性があるため、ドレインの付近にオイルキャッチ用の容器を設置しておく。
- ⑦ ドレインを開けたまま、ポンプにより加圧流体（オイル）を圧力容器に送り、空気抜きをする。空気抜きが完了したら、ドレインをしっかりと閉める。
- ⑧ 試験機への圧力容器の設置が完了したのち、試験を開始する。

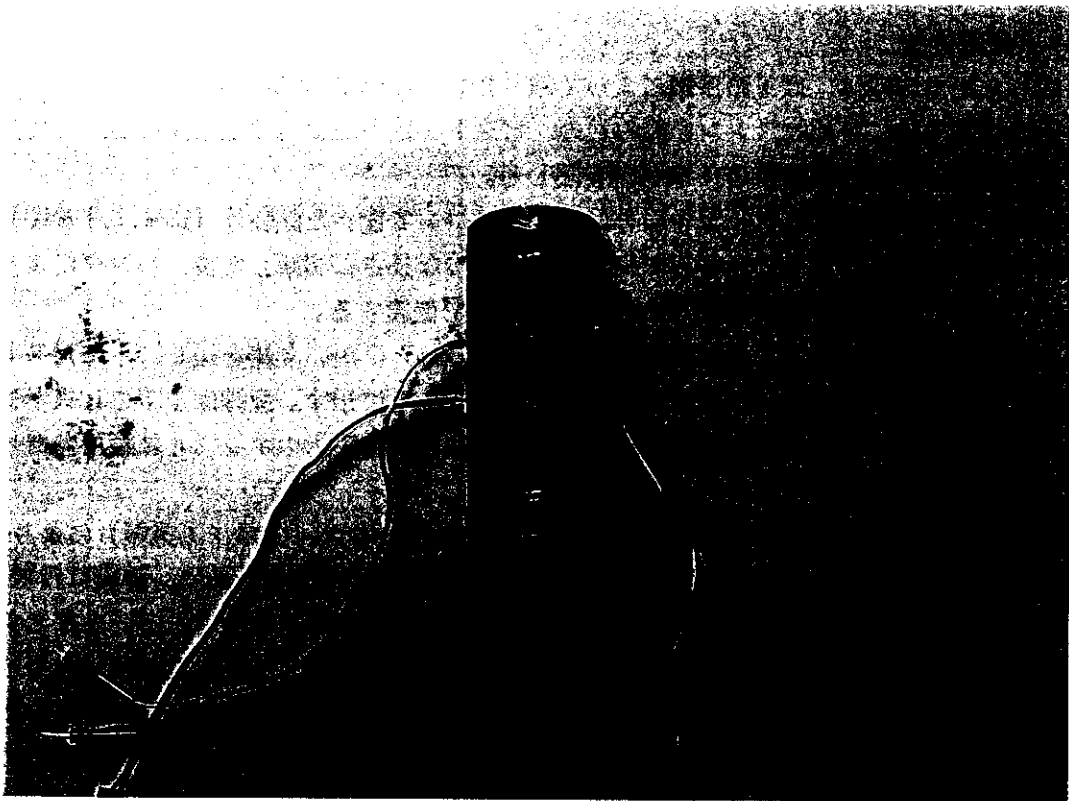


図 4.1.3 試験片（田下凝灰岩）

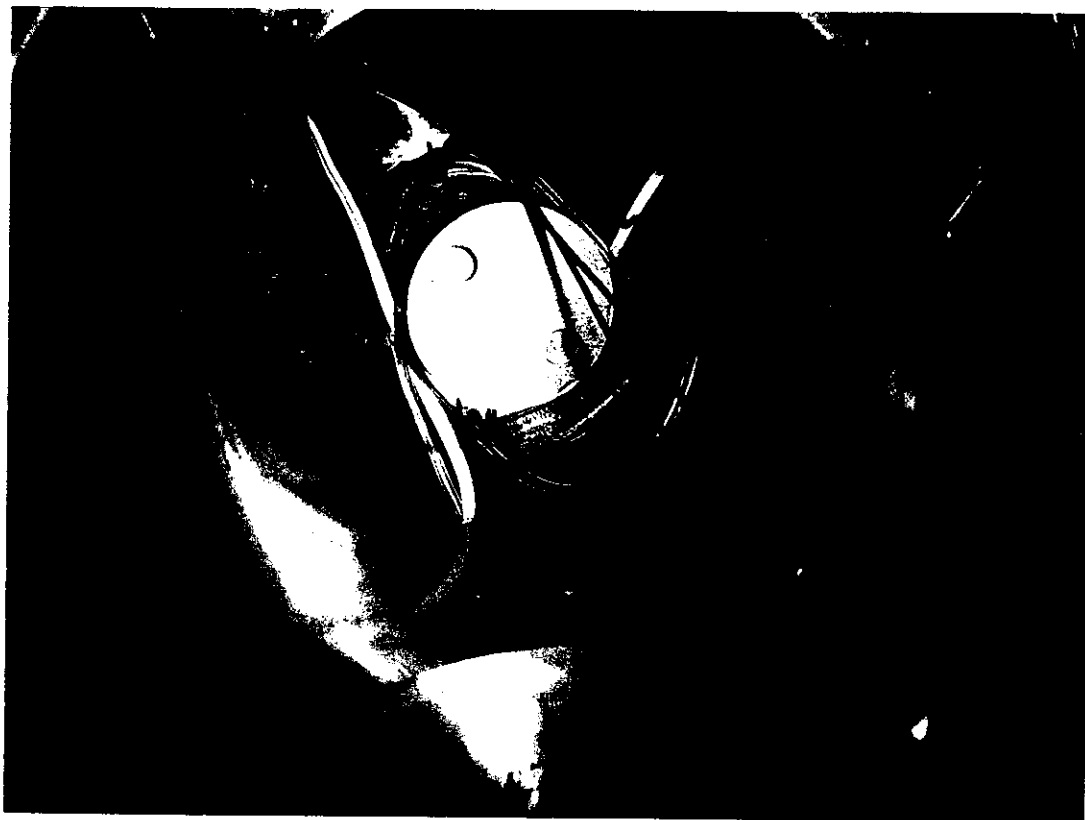


図 4.1.4 容器内部への試験片の設置状況



図 4.1.5 試験片をセットした圧力容器と加圧用ポンプ

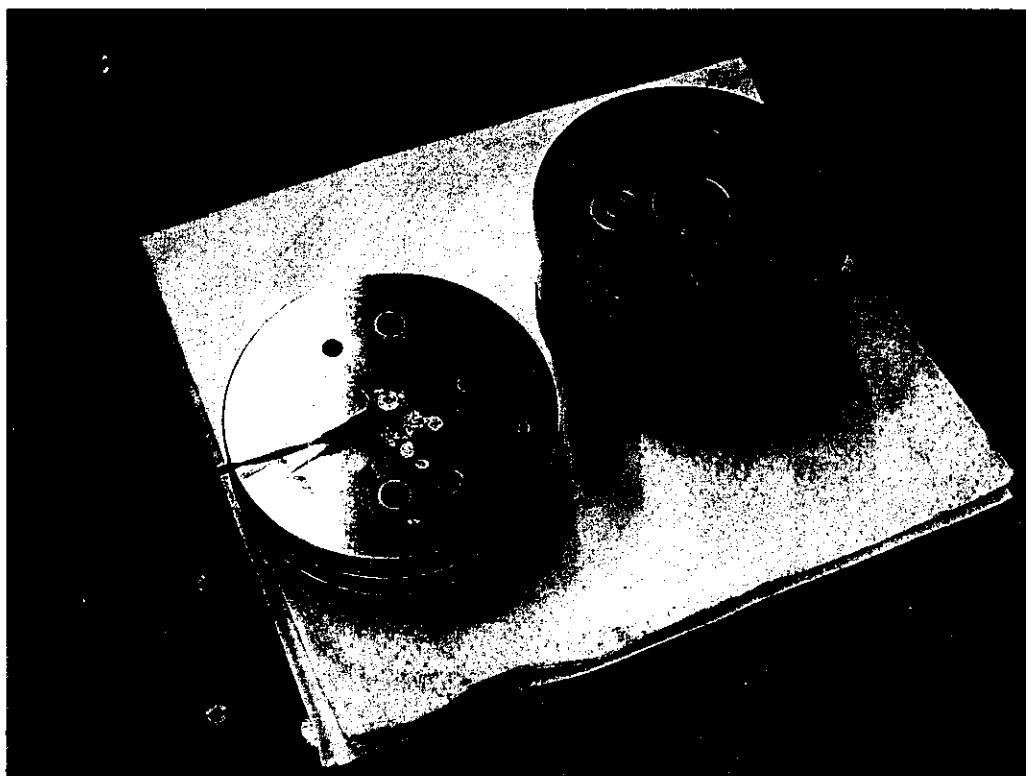


図 4.1.6 上部ピストンと AE センサ

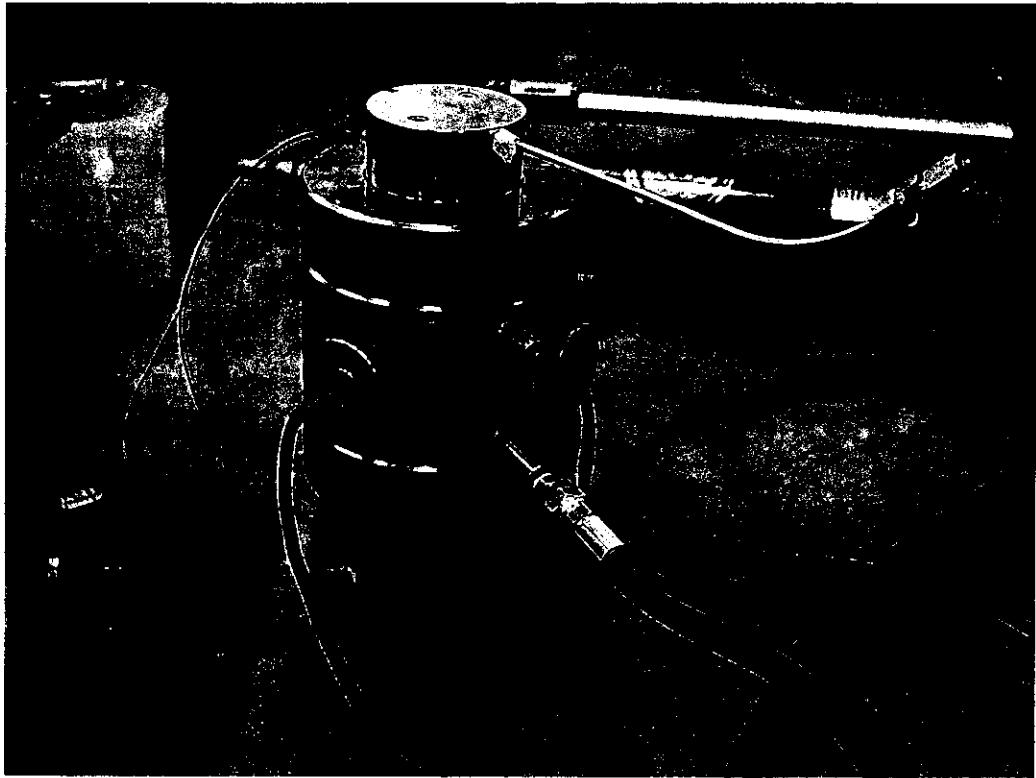


図 4.1.7 試験片の設置が完了した圧力容器

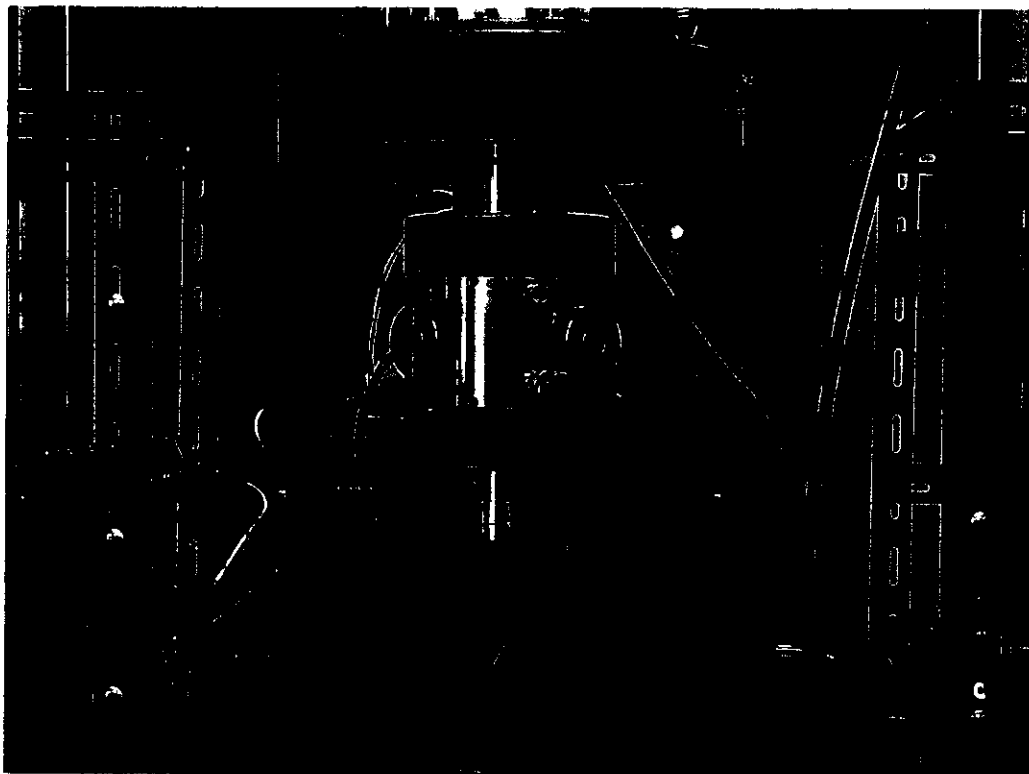


図 4.1.8 圧力容器の設置状況

4.1.2 圧力容器の性能確認試験

4.1.2.1 概要

製作した圧力容器の性能および AE の検出性能を確認するために、岩石試料を用いて、三軸応力下における載荷試験を行った。

4.1.2.2 目的

性能確認試験では、以下の3点を確認することを主な目的とした。

- (1) 試験中に圧力容器の中の圧力が維持されること
- (2) 三軸応力下における載荷試験で、AE が計測できること
- (3) 三軸応力下で AE のカイザー効果の発生を検出できること

4.1.2.3 試験片の作成

試験に用いた岩石試料は田下凝灰岩であり、その岩石物性は、密度が $1.76(\text{g}/\text{cm}^3)$ で、一軸圧縮強度が 20MPa である。岩石ブロックから直径約 30mm 、長さ約 60mm の円柱形の試験片を作成した。

試験片は、以下の手順により作成した。

- ① 岩石試料からボーリングマシンによって直径約 30mm のコア抜きを行った。コア抜きの速度は、 $1\sim 1.5\text{cm}/\text{min}$ 程度とした。
- ② コア抜きした試料をカッター（マルトー製）によって所定の長さに切断した。
- ③ 研磨機によって試料の両端を研磨し、試験片を作成した。そのとき、端面の平行度は $\pm 0.05\text{mm}$ 以内とした。
- ④ 試験片の側面に、ひずみゲージ（共和電業製 2 軸型ゲージ、ゲージ長 5mm ）を接着した。
- ⑤ 試験片への均等な載荷を行なうために、試験片の両端にエンドピースを接着剤（2 液混合のエポキシ樹脂タイプ）を用いて取り付けた。
- ⑥ 封圧によって試験片に加圧流体（オイル）が浸透するのを防ぐために、①～⑤の作業完了後、試験片の側面全体をシリコンで被覆した。

4.1.2.4 試験方法

圧力容器内への試料の設置方法および材料試験機への圧力容器の設置方法は、4.1.1.3 で述べた①～⑦の手順と同じ方法を用いた。性能確認試験の手順は以下のとおりである。

- ⑧ 載荷装置を荷重制御の設定にし、 $20\sim 40\text{kg}$ 程度の荷重かけて、圧力容器の上面と載荷板とを接触させた。この時、試験片と上部ピストンの接触状態は目視では確認できないので、ひずみの値が増加し始めたときに、試験片と上部ピストンが接触したと判断した。
 - ⑨ さらに 50kg 程度の荷重を加えてひずみの変化を観察し、2 枚のひずみゲージで検出されるひずみ量がほぼ同じになるように、載荷板を調整した。この時の、載荷板の位置（変位）を記録しておく。
 - ⑩ 載荷のバランスを調整した後、載荷装置を変位制御の設定にしてから、油圧ポンプにより所定の封圧をかける。加圧の際には、荷重の急激な変動を起こさないように注意して操作を行う。油圧ポンプのメーターで所定の封圧になった時点での、試験機の荷重値を記録しておく。
 - ⑪ 載荷装置の設定を変位制御から荷重制御に変更し、荷重の値をゼロクリアする。
 - ⑫ 載荷パターン（荷重、載荷時間、載荷速度など）を設定し、載荷を行なう。
- 本試験での載荷パターンは、荷重値を 3 段階（ $650\text{kg}[9.0\text{MPa}]$ 、 $800\text{kg}[11.1\text{MPa}]$ 、 $100\text{kg}[13.9\text{MPa}]$ ）

で上げていく繰り返し载荷である。载荷速度は、一回の载荷がおおよそ5分で終わる設定としたため、荷重値ごとの载荷速度は一定ではない。図4.1.9に本試験での载荷パターンを示す。

AEの計測については、上部ピストンに取り付けたAEセンサ(図4.1.10: NF回路設計ブロック社製 AE504DM型、差動型、共振周波数500kHz)からの信号はプリアンプ(図4.1.10: NF回路設計ブロック社製 AE9125)によって40dB増幅した後、AE解析装置(図4.1.11: NF回路設計ブロック社製7661型AEモジュール)に送られ、さらに40dBで増幅され、バンドパスフィルタ(100kHz~500kHz)を通った後に、パソコンで記録される。

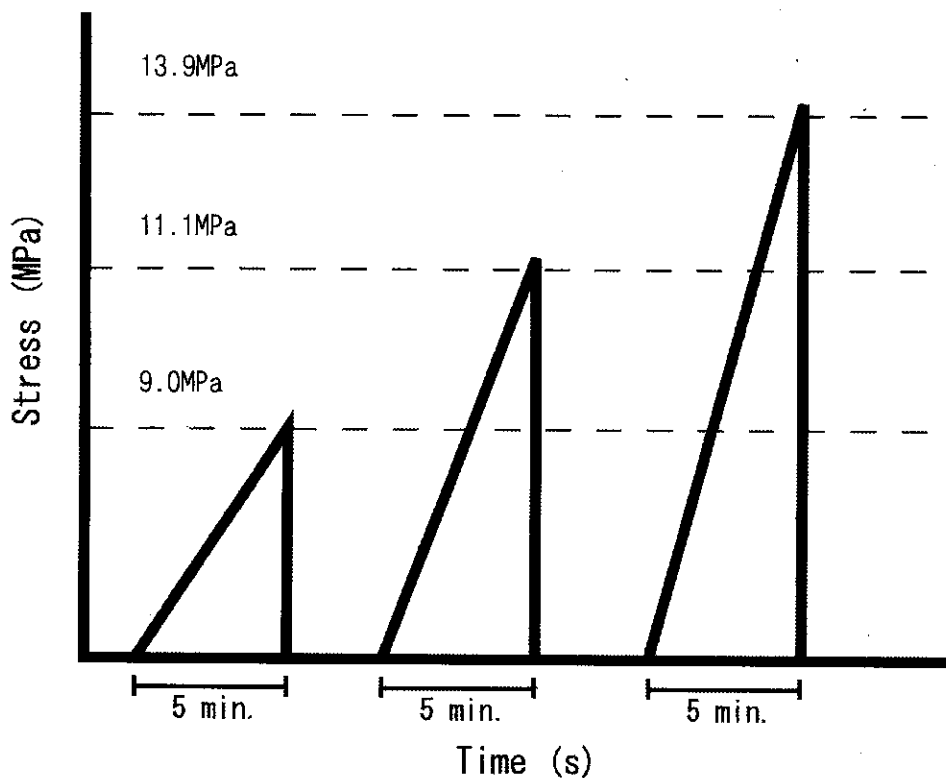


図4.1.9 性能確認試験の载荷パターン

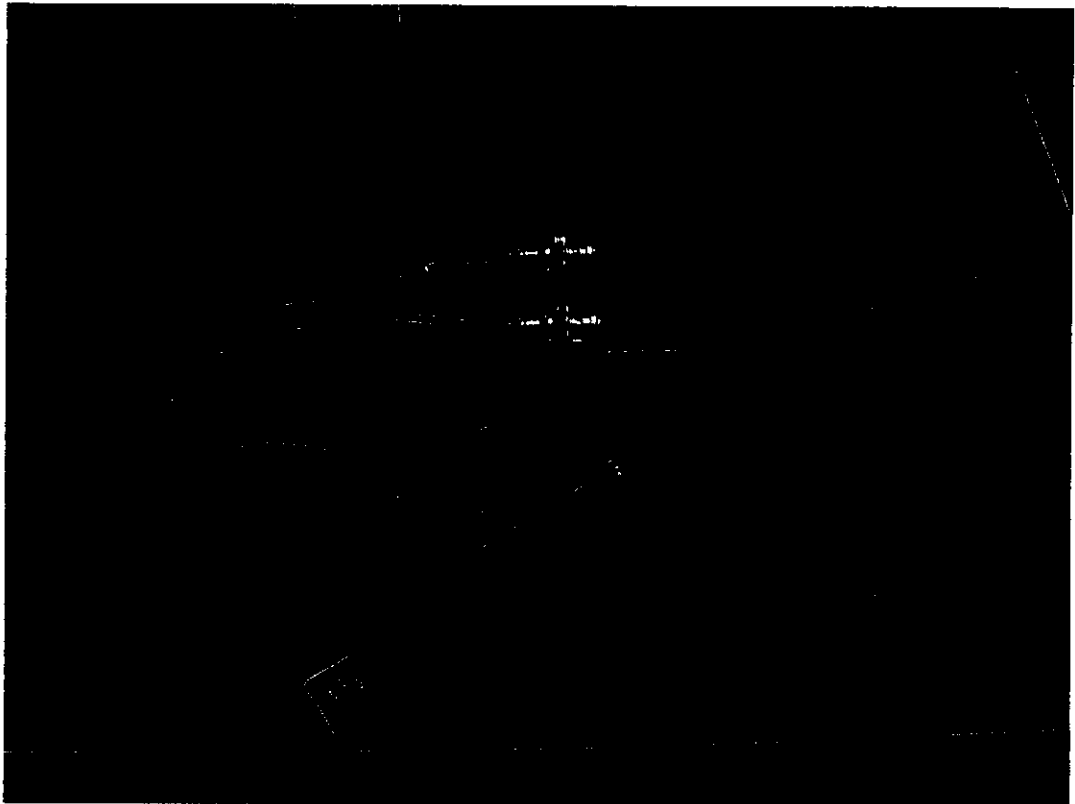


図 4.1.10 AE センサーとプリアンプ

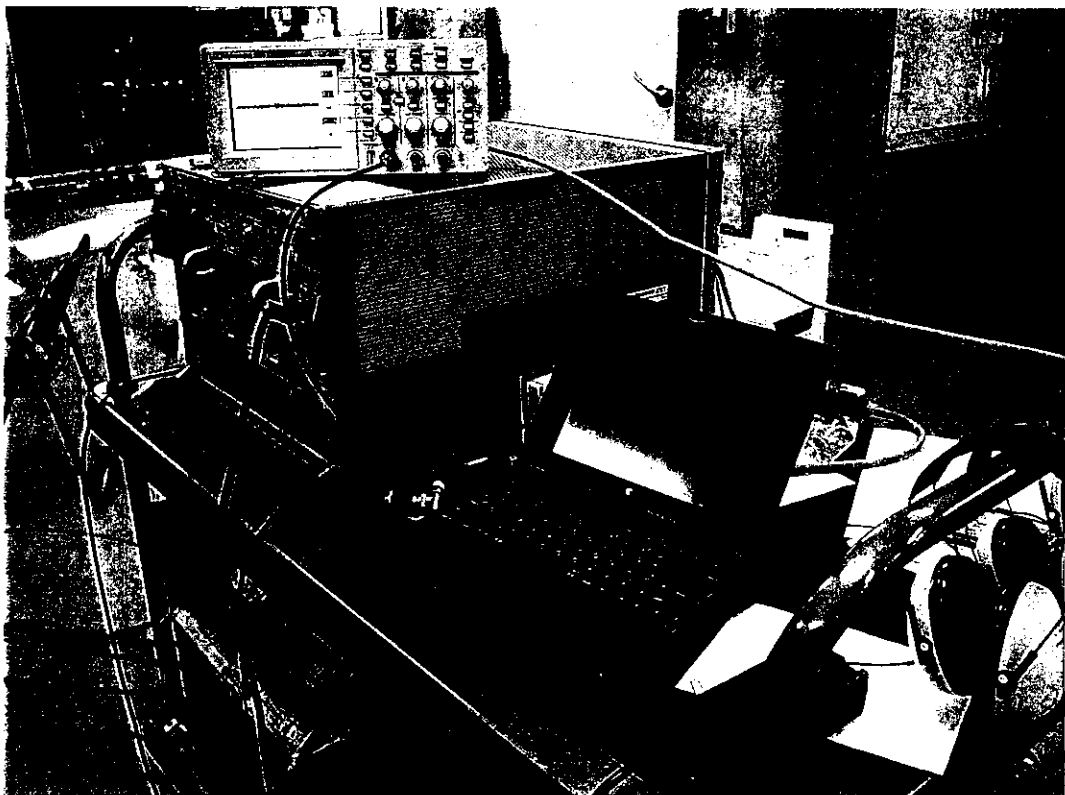


図 4.1.11 AE 計測装置と計測用パソコン

4.1.2.5 試験結果

本試験において封圧を加えた時点での荷重は約 150kgf (約 0.3MPa) である。この時点で手動ポンプの圧力計などの目視観察では、圧力の低下やオイル漏れなどが無いことを確認した。

試験結果を図 4.1.12 に示す。累積 AE カウントの総数は 100~300 の値を示しており、AE 法により先行応力値を推定するのに十分な数の AE が計測された。また、荷重値の時間変化とそれに対応する累積 AE カウント (リングダウンカウント) 数の変化から、2 回目、3 回目の载荷時に観測される AE の急増点は、それぞれ直前の载荷の最大荷重値付近に対応していることがわかる (1000 秒付近および 1350 秒付近)。このことは、封圧下においても比較的明確にカイザー効果が現れていることを意味している。

これらのことから、開発した圧力容器の上部ピストン内部に取り付けた AE センサーは十分に機能しており、三軸応力下での AE 計測が可能であることが示された。また、計測された AE 信号から先行応力値の推定を行うことは十分可能であると考えられる。

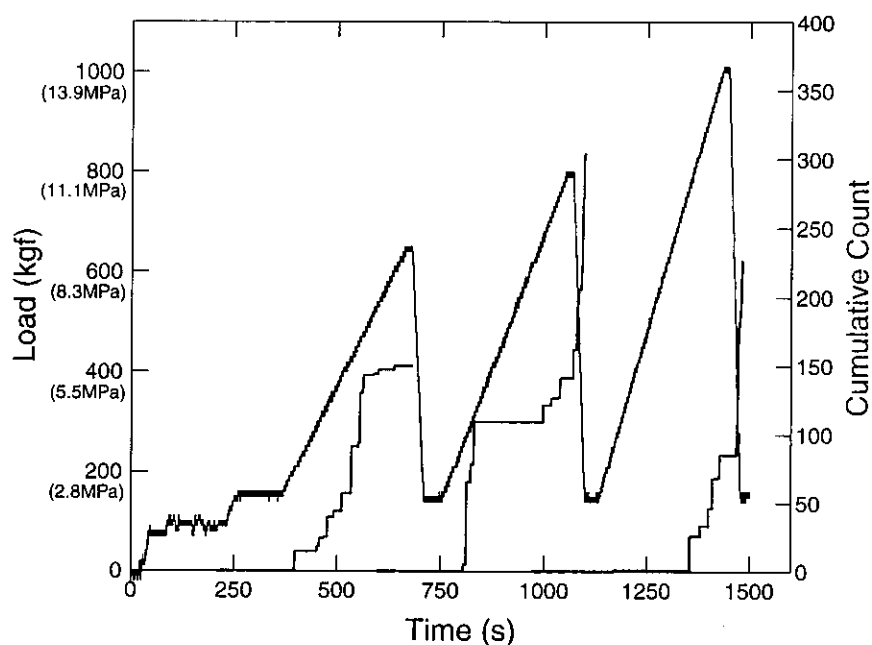


図 4.1.12 性能試験結果

4.2 三軸応力下における初期応力測定手法に関する基礎的検討

4.2.1 概要

東濃鉱山の堆積岩を用いて、開発した三軸応力下における初期応力測定手法の適用性について検討した。まず、東濃鉱山のボーリング孔から得られた岩石コアから作成した試験片を用いて、一軸圧縮試験を行ない、応力-体積ひずみの関係から、試験片が破壊に至るまでの変形特性を把握した。次に、一軸繰返し載荷試験を行ない、AE 法および DRA により原位置の初期応力値の推定を試みた。そして、先行応力を人工的に載荷した試験片を用いて、作成した圧力容器を利用して繰返し載荷試験を行ない、AE 法および DRA により先行応力値を推定した。そして、先行応力値と推定した応力値を比較し、三軸応力下における初期応力測定手法の有効性を評価した。

4.2.2 岩石の変形特性の把握

4.2.2.1 目的

東濃鉱山で採取された岩石試料の変形特性を把握するために、一軸圧縮試験を行った。

4.2.2.2 岩石試料

試験に使用した岩石は、サイクル機構東濃鉱山敷地内に掘削された鉛直ボーリング孔（00SE-03 孔）から採取された泥質砂岩（採取深度：33.00-35.28m）である。前述の方法で、原位置から採取された岩石試料から鉛直方向にコア抜きを行ない、試験片を作成した。試料は、直径 30mm、長さ約 60mm になるように加工し、端面はその平行度が $\pm 1/50\text{mm}$ 以内になるように成形した。その状態で測定した岩石の密度は約 1.6 g/cm^3 であった。なお、作成した試験片は乾燥劣化を防ぐために、十分に水を含ませた布に包み、それをビニール袋に入れて試験まで室内で保管した。なお、本試験では封圧を加えないため、シリコンによるコーティングは行なっていない。

4.2.2.3 試験方法

試験は、変位制御で載荷を行ったが、その変位速度は $120 \mu\text{m}/\text{min}$ になるように設定した。また、試験片への局所的な応力集中を避けるために、試験片の両端にエンドピースを取り付けた。試験片が均等に載荷されるように、試験片の下に球座を設置し、試験片の側面に貼ったひずみゲージの載荷軸方向のひずみ量がほぼ等しくなるように載荷板を調整した。AE センサは試験片の側面に対称の位置に 2 個取り付け、プリアンプで 40dB 増幅した後、AE 計測装置でさらに 40dB のゲインをかけて記録した。載荷は、完全に破壊に至るまで行ない、その過程での AE の計測を行った。

4.2.2.4 試験結果

応力-ひずみの関係を図 4.2.1 に、荷重と累積 AE カウントの時間変化を図 4.2.2 に示す。図 4.2.1 では、体積ひずみは 1.5MPa 付近にわずかな傾きの変化が見られるものの、ほぼ単調に増加しており、明瞭なダイラタンシーを示さず破壊に至っている。4 回の試験の結果、肉眼による確認で明らかに不均質試料と判断したコアを除いた 3 個の試験片の平均一軸圧縮強度は 4.6MPa であった。

図 4.2.2 では、AE は 1MPa 以下の小さな応力レベルから発生し始め、破壊の直前に急増している。全体的に見ると、AE 発生度数は破壊に向かって単調な増加を示しており、先行応力に起因すると考えられる明確な変局点は確認できなかった。

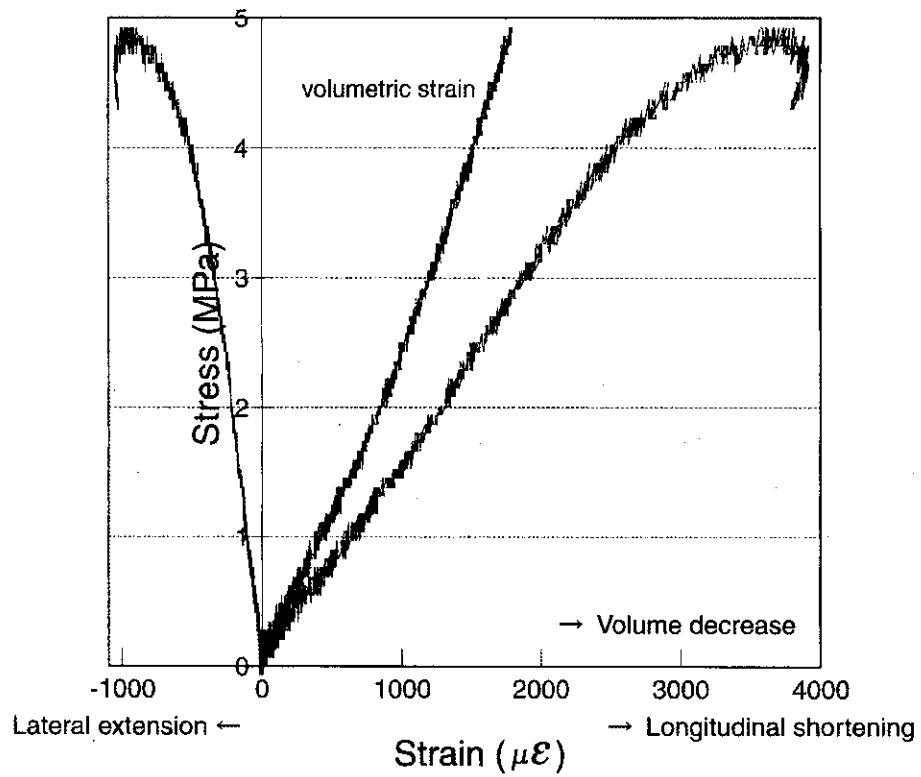


図 4.2.1 応力-ひずみ線図

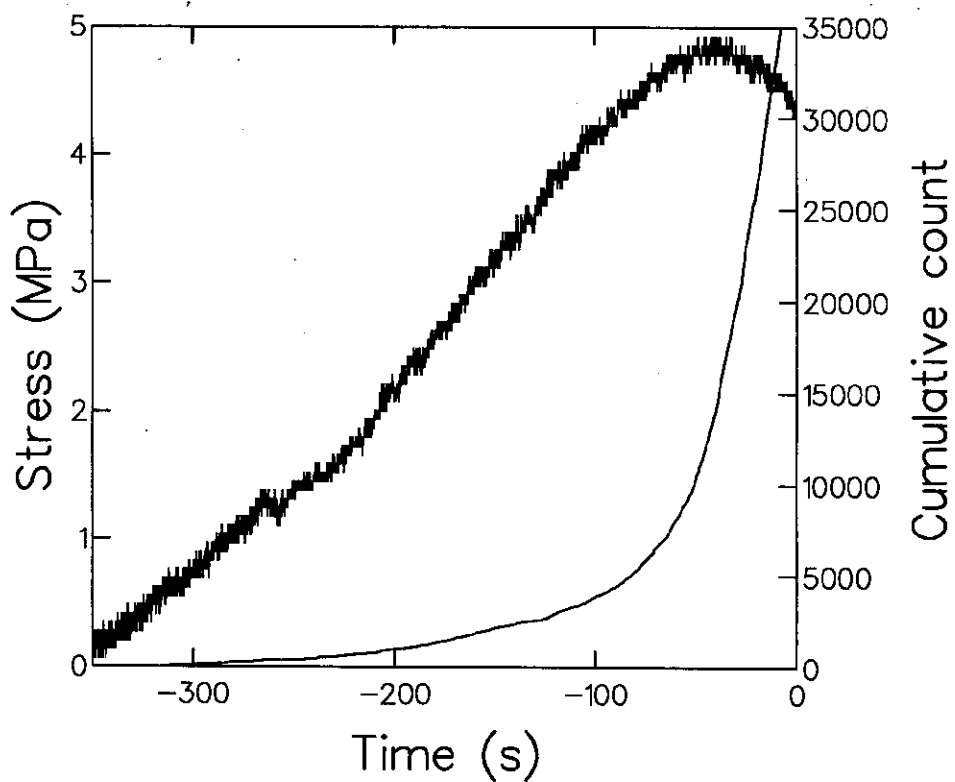


図 4.2.2 荷重と累積 AE カウントの時間変化

4.3 三軸応力下における初期応力測定手法の適用性の評価

4.3.1 目的

開発した三軸応力下における初期応力測定手法により先行応力値の推定を行ない、その手法の適用性を評価する。

4.3.2 岩石試料

岩石試料は、東濃鉱山の00SE-03孔から得られた岩石コアを用いて、これまでと同様の方法によって、直径30mm、高さ60mmの試験片を作成した(図4.3.1)。

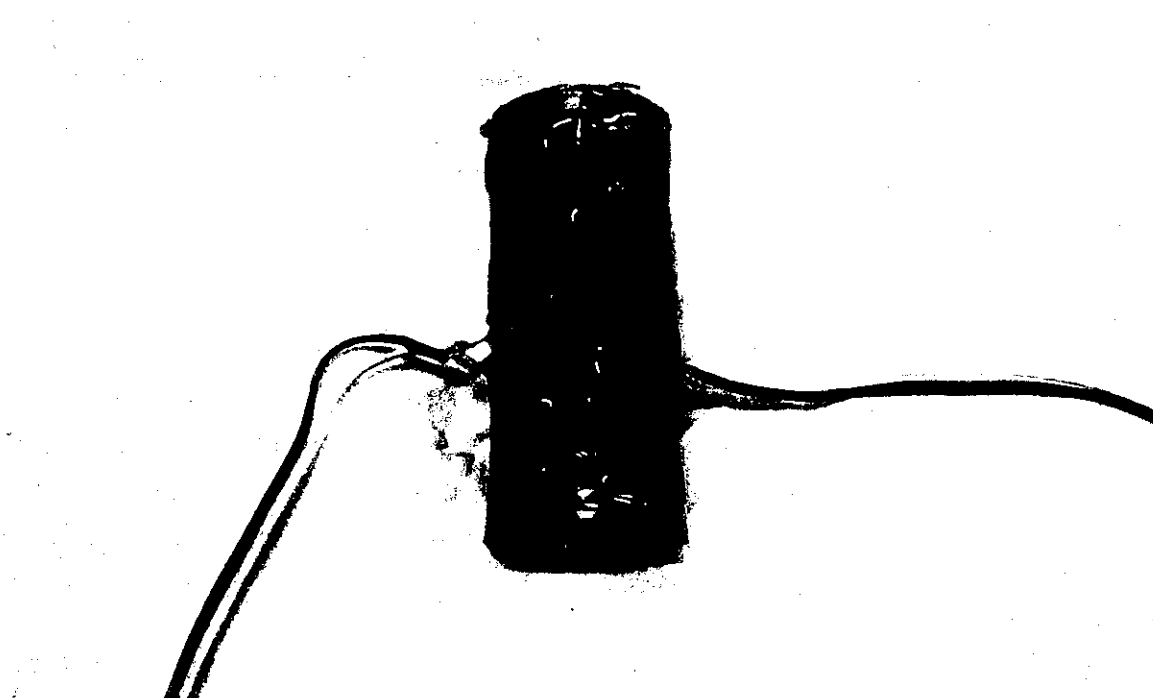


図 4.3.1 三軸応力下における試験用の試験片

4.3.3 試験方法

試験は、4.1.1.3で述べた手順で試験片を圧力容器の内部にセットした後、最初に約3MPa(220kgf)の応力値を先行応力として3時間与えた。そして、その先行応力を除荷した後、約1MPaの封圧の下で、約5MPa(370kgf)までの5回の繰返し載荷試験をAEおよびひずみの計測をしながら実施した。先行応力載荷時と載荷試験時の載荷パターンを図4.3.2に示す。

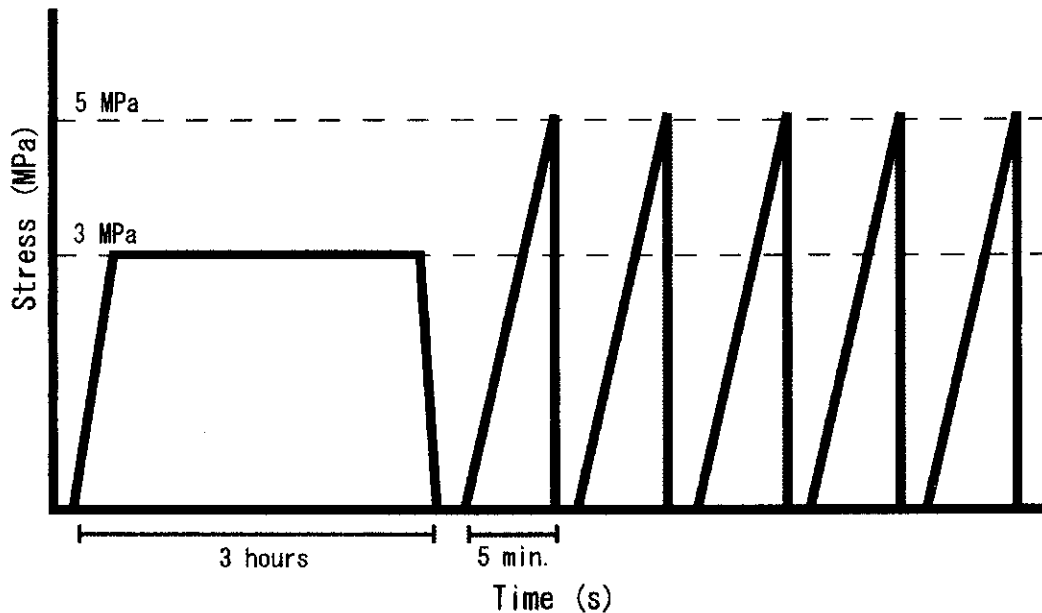


図 4.3.2 三軸応力下における繰返し荷重試験の荷重パターン

4.3.4 試験結果

荷重とひずみの時間変化の例を図 4.3.3 に示す。400 秒付近のひずみの中断は、キャリブレーションによるものであり有意なものではない。荷重変化に対するひずみの変化に注目すると、荷重レベルの低い段階では軸ひずみだけでなく、横ひずみまでも圧縮側に変化していることが分かる。これは、今回作成した装置が定圧バルブを持たないため、岩石とピストンの初期の接触状態が不十分であることなどの影響により、荷重初期に内圧が若干上昇したことが影響していると考えられる。このことから、今回の三軸応力下での試験では、微小荷重レベルでのひずみの挙動については注意が必要であると言える。

三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果のうち 1~3 回目までの荷重の結果を図 4.3.4 ~4.3.6 に示す。先行応力値の読み取りは、従来用いられている AE 法における読み取り基準（正規化した累積 AE カウント曲線の傾き変化率）の値と同等とし、0.2 に設定した。1 回目の荷重では、開始直後に傾き変化率が極端に大きくなったが、これはカイザー効果以外の要因によるものとした。また、最大荷重までも読み取り基準値を超えるものが見られなかったため、傾き変化率が急激に増加した応力値（3.1MPa）を推定応力値とした。2 回目の荷重では、AE の累積発生数は急激に減少したが、読み取り基準値を超えた応力値（3.5MPa）を推定応力値とした。そして、3 回目以降の荷重では、ほとんど AE が発生せず応力値の推定はほとんど不可能であった。これらのことから、AE 法による推定応力値としては、1 回目の荷重の値を採用することとした。三軸応力下での荷重試験を 3 回実施し、それらの試験により推定された応力値の平均は 3.25MPa であった。先行応力値はおよそ 3MPa（220kgf）であり、両者の差は約 6% であり、三軸応力下での AE 法により推定された応力値は、先行応力値とほぼ等しく、この手法の有効性が示された。

DRA による先行応力値の推定結果を図 4.3.7 に示す。DRA は、5 回目と 1 回目の荷重の軸ひずみを用いてひずみ差を計算した。得られたひずみ差曲線は滑らかでなく、通常の結果とは異なる形状の曲線となった。このため、従来の読み取り基準は適用できなかった。これは、先に述べたような試験中のひずみの挙動が不安定であることに起因している可能性が考えられる。参考値として、目視によりひずみ差曲線の屈曲点およびその先行応力値を推定すると、約 3.7MPa となった。この値は先行応力値との差は大きいものの、比較的先行応力値に近い値である。

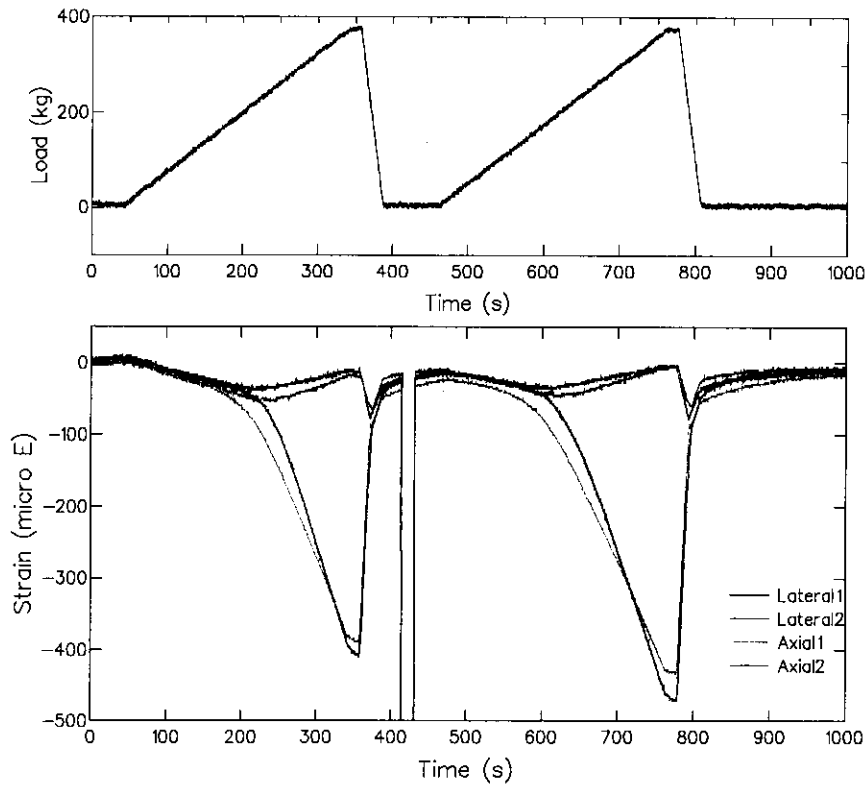


図 4.3.3 三軸応力下での荷重とひずみの時間変化

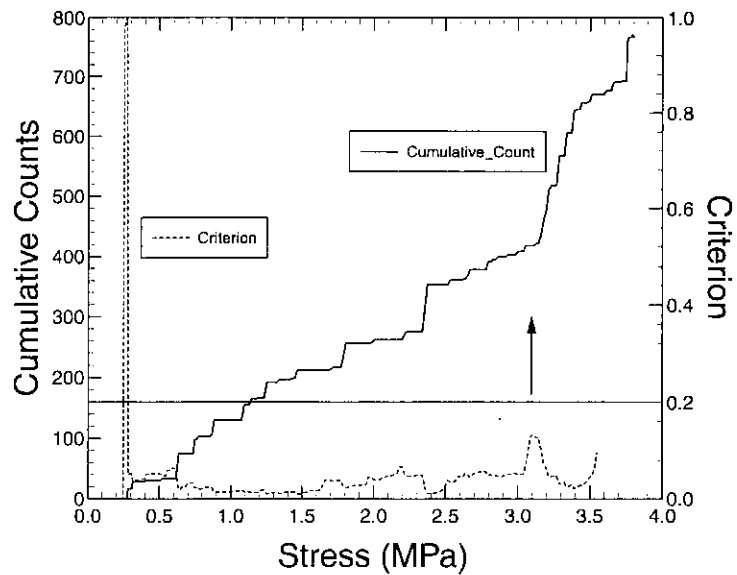


図 4.3.4 三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果（载荷 1 回目、先行応力 3MPa）

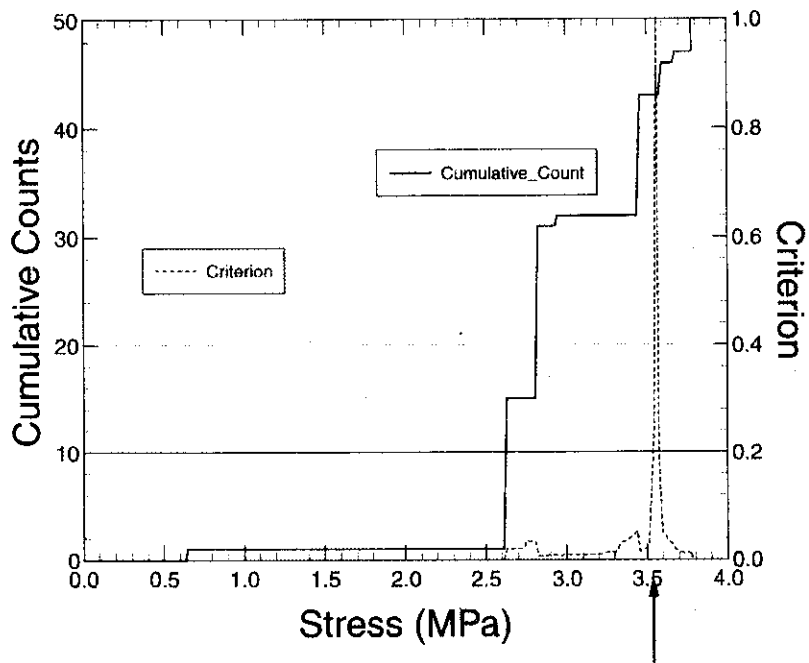


図 4.3.5 三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果（载荷 2 回目、先行応力 3MPa）

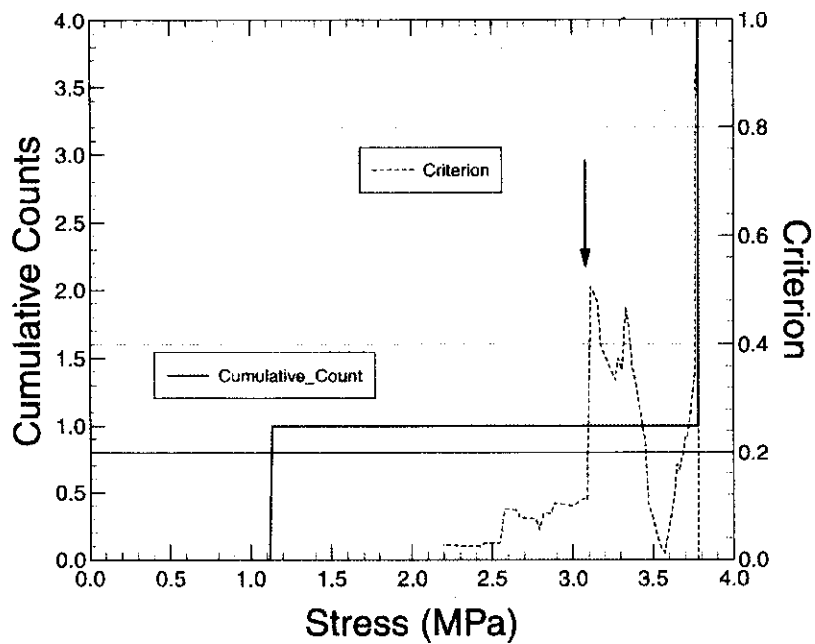


図 4.3.6 三軸応力下での AE 法による先行応力値の推定結果（载荷 3 回目、先行応力 3MPa）

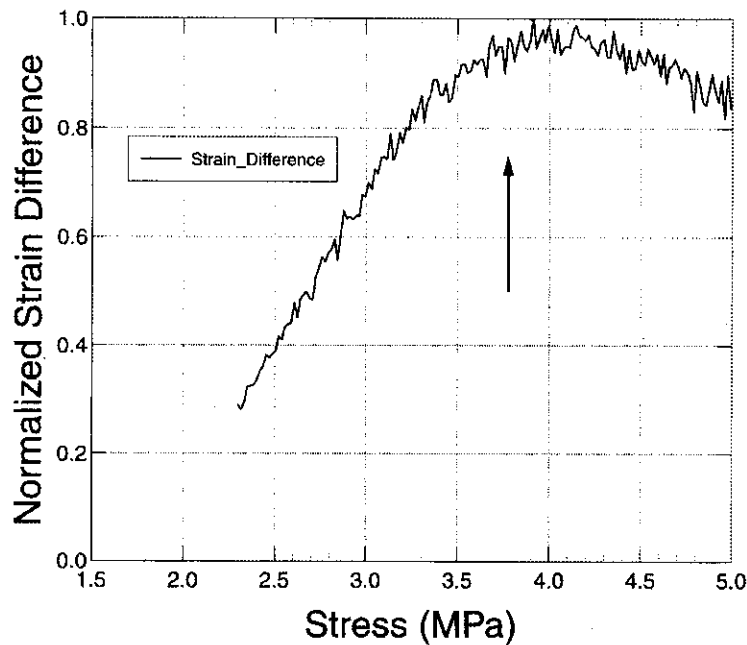


図 4.3.7 三軸応力下での DRA による先行応力値の推定結果 (载荷 5 回目と 1 回目、先行応力 3MPa)

4.4 三軸応力下における初期応力測定手法の適用試験のまとめ

東濃鉾山のボーリング孔から採取された岩石コアを利用して、一軸圧縮試験、一軸繰返し载荷試験、三軸応力下での繰返し载荷試験を行い、その方法の初期応力測定手法としての適用性について評価した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 東濃鉾山の堆積岩 (明世累層) の一軸圧縮強度は約 4.6 MPa であり、岩石の変形特性としては、体積ひずみはほぼ線形に減少し、ダイラタンシーが発生せず、破壊に至るといった特徴があった。計測された AE は、先行応力値を推定するのに十分な数であった。
- 2) 本岩石 (明世累層) を用いて、一軸圧縮载荷時に AE 法と DRA により鉛直応力値を推定した結果、あまり良好な結果が得られず、推定された応力値は想定される土被り圧に比較して 30% 以上高い値であった。このことから、今回採取した地点の試料では、従来の AE 法、DRA により鉛直応力の推定することは困難であることが分かった。
- 3) 三軸応力下での AE 法による応力推定の結果、比較的精度良く先行応力を推定できる可能性があることが分かり、その有効性が確認できた。

5. まとめ

岩盤の一軸圧縮強度と同程度の初期応力状態になっている地点の初期応力の測定に岩石コアを用いる方法を適用する場合は、載荷試験時に試験片での微小き裂の発生や進展などの現象が発生し、応力値の推定精度が著しく低下することがある。そこで、封圧を作用させた状態で一軸載荷試験を行なうことができれば、その封圧によりき裂の進展や試験片の破壊を抑制することができると考え、封圧を作用させるための圧力容器を製作し、三軸応力下における初期応力測定手法の開発を行った。

①三軸応力下における初期応力測定手法の開発

一軸状態のAE法およびDRAによる応力測定に関して、岩石の強度に対する先行応力値の割合が推定される応力値に与える影響を調査した。その結果、従来法では先行応力値が岩石の破壊強度に近い場合、カイザー効果が不明確になり推定される先行応力値に著しい誤差生じる可能性があることが確認された。このため、封圧を作用させるための圧力容器を作成し、その圧力容器を用いて性能確認試験を行ない、三軸応力下においても精度良く先行応力値を推定できる可能性があることを確認した。

②三軸応力下における初期応力測定手法の適用性の評価

東濃鉾山の堆積岩を用いて、開発した三軸応力下における初期応力測定手法の有効性を評価した。まず、東濃鉾山のボーリング孔から得られた岩石コアから作成した試験片を用いて、一軸圧縮試験を行ない、応力-体積ひずみの関係から、試験片が破壊に至るまでの変形特性を把握した。次に、一軸繰返し載荷試験を行ない、AE法およびDRAにより原位置の初期応力値の推定を試みた。さらに、同一の岩石に先行応力を人工的に載荷した試験片を用いて、作成した圧力容器を利用して繰返し載荷試験を行ない、AE法およびDRAにより先行応力値を推定した。これらの結果を比較した結果、開発した三軸応力下における初期応力測定手法は、堆積軟岩の一軸圧縮強度と先行応力値に近い場合の初期応力測定手法としての適用性があることが示された。

参考文献

- 1)動力炉・核燃料開発事業団技術資料：PNC TY1569 96-001、資源環境技術総合研究所／動燃事業団共同研究報告書－掘削に伴う物性変化に関する評価手法の開発－平成 6 および 7 年度共同研究報告書、1996
- 2)動力炉・核燃料開発事業団技術資料：PNC TY7569 98-001、資源環境技術総合研究所／動燃事業団共同研究報告書－岩盤空洞の安定性と地下水の影響に関する評価方法の検討－平成 9 年度共同研究報告書、1998
- 3)核燃料サイクル開発機構技術資料：JNC TY7400 99-001、資源環境技術総合研究所／サイクル機構共同研究報告書－岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討－平成 10 年度共同研究報告書、1999
- 4)核燃料サイクル開発機構技術資料：JNC TY7430 2000-001、資源環境技術総合研究所／サイクル機構共同研究報告書－岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討－平成 11 年度共同研究報告書、2000