JNC　TY7430　2000-001

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１１年度共同研究報告書

２０００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
49-4, Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)　2000

公開資料
JNC TY7430 2000-001
2000年3月

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）－

瀬戸政宏*、前田信行**、松井裕哉**

要旨

大規模地下空洞や大深度地下構造物の建設は、空洞周辺岩盤が本来持っている力学的・水理学的な物性を変化させ、空洞の安定性や地下水流動へ影響を及ぼす。

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、東濃鉱山の地表から掘削した深度約200mのボーリング孔において、AE法、DRAによる三次元初期応力測定およびAE法と水圧破砕法による初期応力測定を実施し、三次元的な初期応力状態を把握するとともに初期応力状態の評価手法の適用性について検討した。

それらの結果の概要について、以下に述べる。

- 鉛直方向の応力値は、堆積岩部では推定される土被り圧とほぼ等しく、花崗岩部ではそれより少し大きい。
- 水平最大主応力値は、深度と共にほぼ直線的に増加し、その勾配は花崗岩部の方が大きい傾向にあった。
- 水平最大主応力方向は、堆積岩部では概ねN-S～N45°Wで、花崗岩部ではほぼN45°W方向であった。
- 応力環境については、堆積岩部で遷移型（$\sigma_H > \sigma_V = \sigma_h$）、花崗岩部では遷移型もしくは横ずれ断層型（$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$）の応力環境であった。
- 今回用いたAE法、DRAおよび水圧破砕法は初期応力測定手法としての適用性があり、AE法と水圧破砕法を組み合わせた三次元的な応力状態の評価方法は有効であることが示された。

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：114F047
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層科学研究グループ　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層科学研究グループ

Public
JNC TY7430 2000-001
March, 2000

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 (H11) —

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

Abstract

Construction of large underground caverns or large-scale structures influences the mechanical and hydrological properties of a rock mass, and change of the rock mass properties affects the mechanical stability and hydrological behavior.

NIRE and JNC have been in collaboration 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 1999, a borehole was drilled vertically from the surface to 200m depth in the Tono Mine. Then, three-dimensional stress measurement was carried out using both AE method and DRA. Another AE method using specimens of the vertical direction (uniaxial) was performed, and the hydraulic fracturing technique was also applied in the borehole. The three-dimensional stress states were also evaluated by the latter two methods, and they were evaluated to assess the applicability of the methods to estimate in situ stress states. The main conclusions are as follows:

- Magnitude of the vertical stress in sedimentary rock was almost the same as the overburden pressure estimated by depth and rock density. It was slightly larger than overburden pressure in granitic rock .
- Magnitude of the maximum horizontal stress increased linearly with depth. The gradient of the stress-depth relation in granitic rock was larger than that in sedimentary rock.
- Orientation of the maximum horizontal stress was N-S~N45° W in sedimentary rock and almost N45° W direction in granitic rock.
- Stress regime was transitional type($\sigma_H > \sigma_V = \sigma_h$) in sedimentary rock and varied from transitional type to reverse faulting type($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$) in granitic rock.
- AE method and DRA were useful techniques to estimate initial stress state. And estimation of three-dimensional stress state from combination of AE method and hydraulic fracturing technique was also useful.

Work performed by National Institute for Resources and Environment (NIRE) and Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC) under contract.
Agreement No. : 114F047
JNC Liaison :Tono Geoscience Center, Geological Research Execution 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, Geological Research Execution Group.

岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討
（平成１１年度）

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――――――――――――――――――――――――　3
2.3 研究分担――――――――――――――――――――――――　3

３．試験概要――――――――――――――――――――――――――　4
3.1 地質概要――――――――――――――――――――――――　4
3.2 調査場所――――――――――――――――――――――――　5
3.3 試験概要――――――――――――――――――――――――　6

４．AE 法および DRA による三次元初期応力測定 ――――――――――　7
4.1 目的――――――――――――――――――――――――――　7
4.2 試験方法――――――――――――――――――――――――　7
4.3 試験結果――――――――――――――――――――――――　19
4.4 AE 試験および DRA 試験のまとめ ――――――――――――――　36

５．AE 法および水圧破砕法による初期応力測定――――――――――――　37
5.1 目的――――――――――――――――――――――――――　37
5.2 試験方法――――――――――――――――――――――――　37
5.3 試験結果――――――――――――――――――――――――　44
5.4 AE 試験および水圧破砕試験のまとめ――――――――――――――　51

６．総合評価――――――――――――――――――――――――――　52
6.1 三次元的な初期応力状態について――――――――――――――――　52
6.2 応力測定手法の適用性について――――――――――――――――　53

７．おわりに――――――――――――――――――――――――――　57

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－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　3

第３章
表－3.1.1　岩石物性－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　4
図－3.1.1　東濃鉱山の地質概要－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　4
図－3.2.1　99SE－02 孔の位置図－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　5

第４章
図－4.2.1　コアからの試験片作成方向（６方向）－－－－－－－－－　7
表－4.2.1　採取コアからの各方向の試験片準備状況－－－－－－－－　8
図－4.2.2(a)　岩石コアからのコア抜き状況（傾斜台）－－－－－－　9
図－4.2.2(b)　岩石コアからのコア抜き状況（コア抜き状況）－－－　9
図－4.2.3(a)　載荷試験状況（全景）－－－－－－－－－－－－－－－　10
図－4.2.3(b)　載荷試験状況（試験片拡大）－－－－－－－－－－－－　10
図－4.2.4　AE 計測システムの外観－－－－－－－－－－－－－－－－－　11
図－4.2.5(a)　累積リングダウンカウントと応力との関係－－－－－　12
図－4.2.5(b)　正規化累積リングダウンカウントと応力との関係－－　12
図－4.2.5(c)　正規化累積リングダウンカウント曲線の傾き変化率と
応力との関係－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　13
図－4.2.6　ひずみ・荷重計測システムの外観－－－－－－－－－－－　13
図－4.2.7(a)　ひずみ差と応力との関係－－－－－－－－－－－－－－　14
図－4.2.7(b)　正規化ひずみ差と応力との関係－－－－－－－－－－－　15
図－4.2.7(c)　正規化ひずみ差移動平均の変化率と応力との関係－－　15
図－4.3.1(a)　40m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－－　20
図－4.3.1(b)　80m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－－　21
図－4.3.1(c)　190m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－　22
図－4.3.1(d)　201m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－　23
図－4.3.1(e)　211m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－　24
表－4.3.1　深度別の AE 法による応力推定結果－－－－－－－－－－　25
表－4.3.2　深度別の主応力とその方向と傾斜－－－－－－－－－－－　26
表－4.3.3　深度別の鉛直応力値と水平面内の主応力－－－－－－－－　26

図－4.3.2(a)　三次元初期応力状態（深度：40m、下半球投影）－－　27
図－4.3.2(b)　三次元初期応力状態（深度：80m、下半球投影）－－　27
図－4.3.2(c)　三次元初期応力状態（深度：190m、下半球投影）－－　28
図－4.3.2(d)　三次元初期応力状態（深度：201m、下半球投影）－－　28
図－4.3.2(e)　三次元初期応力状態（深度：211m、下半球投影）－－　29
図－4.3.3　三次元初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　30
図－4.3.4　三次元的な初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　31
図－4.3.5　水平面内の最大主応力方向－－－－－－－－－－－－－－－－　32
表－4.3.5　AE 法および DRA による鉛直応力値 －－－－－－－－－－　33
図－4.3.6(a)　80m コアからの推定結果例 －－－－－－－－－－－－－　34
図－4.3.6(b)　190m コアからの推定結果例－－－－－－－－－－－－－　34
表－4.3.4　DRA による推定結果 －－－－－－－－－－－－－－－－－－　35

第５章

図－5.2.1　AE 計測システム－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　38
図－5.2.2　しきい値とイベントの関係－－－－－－－－－－－－－－－－　38
表－5.2.1　使用した装置の仕様－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　39
表－5.2.2　AE 試験の計測条件－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　39
表－5.2.3　AE 試験の試験深度－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　39
図－5.2.3　水圧破砕試験のシステム－－－－－－－－－－－－－－－－－　42
表－5.2.4　測定機器一覧－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　42
図－5.2.4　水圧破砕試験の手順－－－－－－－－－－－－－－－－－－－　43
表－5.3.1　鉛直方向の初期応力値－－－－－－－－－－－－－－－－－－　44
表－5.3.2　各供試体深度ごとの鉛直方向の初期応力値－－－－－－－－　45
図－5.3.1　鉛直方向の初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　45
表－5.3.3　水平面内の初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　46
図－5.3.2　水平面内の初期応力値の分布－－－－－－－－－－－－－－－　47
図－5.3.3　水平面内の最大主応力方向の分布－－－－－－－－－－－－－　48
表－5.3.4　三次元的な初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　49
図－5.3.4　三次元的な初期応力分布図－－－－－－－－－－－－－－－－　50

第６章

表－6.1.1　三次元的な初期応力状態－－－－－－－－－－－－－－－－－　52
図－6.1.1　鉛直方向の初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　54
図－6.1.2　三次元的な初期応力分布－－－－－－－－－－－－－－－－－　55
図－6.1.3　水平面内の最大主応力方向－－－－－－－－－－－－－－－－　56

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。また、坑道の掘削は岩盤が本来持っている力学的・水理学的な物性を変化させ、空洞周辺岩盤の安定性や地下水流動へ影響を及ぼす。

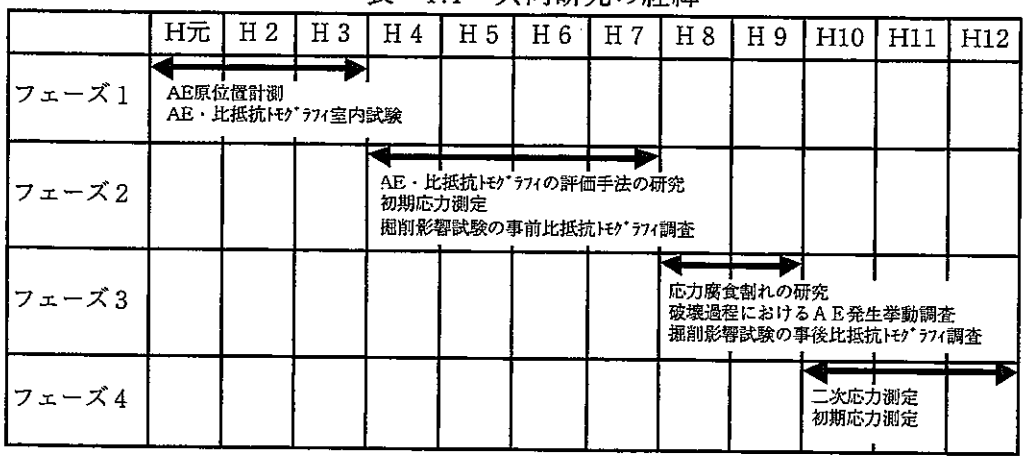
このような観点から、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構と呼ぶ）東濃地科学センターでは、工業技術院資源環境技術総合研究所（以下、資環研と呼ぶ）と、岩盤の力学的安定性に関する調査方法や評価方法をテーマとして、平成元年度より共同研究を実施している。表－1.1 に示すように、これまでに本共同研究では、フェーズ１（H元～H3）として、AE（Acoustic Emission）の原位置計測や AE および比抵抗トモグラフィに関する室内基礎試験を実施した。フェーズ２（H4～H7）として、弾性波および比抵抗トモグラフィの評価手法に関する基礎的な研究を実施するとともに、初期応力測定を実施した[1)]。また、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。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)]。今年度は、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 による三次元初期応力測定、AE 法および水圧破砕法による初期応力測定を実施し、三次元的な初期応力状態を把握するとともに、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。ここでは、研究成果として下記のことについて報告する。

①AE 法および DRA による三次元初期応力測定

②AE 法および水圧破砕法による初期応力測定

表－1.1　共同研究の経緯



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目的とする。

(3)本年度の目的

本年度は、東濃鉱山の地表から掘削した深度約 200m のボーリング孔を利用して、AE 法、DRA による三次元応力測定手法および AE 法と水圧破砕法を組み合わせた手法の二つの手法を用いて三次元的な初期応力状態の評価を行い、それらの結果を比較することによって、両手法の適用性について評価することを目的とする。

2.2 研究内容

①ボーリング孔の掘削と室内試験用岩石コアの採取

東濃鉱山敷地内の捨石堆積場の脇に、直径約 100mm、深さ約 200m のボーリング孔（99SE-02 孔）を鉛直下向きに掘削した。岩石コアは、全ての深度で採取したが、表層部や断層部でコアロスがあった。試験に用いる区間のコアは、定方位コアとして採取した。

②AE 法および DRA による三次元初期応力測定

99SE-02 孔から得られた定方位岩石コアから異なる 6 方向で円柱供試体を作成し、AE 試験および DRA 試験を行い、三次元初期応力測定を実施した。測定は、異なる 5 つの深度で実施し、深さ 200m までの三次元初期応力状態について検討した。

③AE 法および水圧破砕法による初期応力測定

99SE-02 孔から得られた岩石コアから鉛直方向の円柱供試体を作成し、AE 試験を異なる 5 つの深度で行い、鉛直方向の初期応力測定を実施した。また、99SE-02 孔において、水圧破砕法により水平面内の初期応力測定を行った。水圧破砕試験は 10 深度で行い、そのうち 5 つの深度は AE 試験を行った深度に合わせて行った。AE 試験により得られた鉛直方向の初期応力値および水圧破砕試験によって得られた水平面内の初期応力状態を組み合わせて、深さ 200m までの三次元的な初期応力状態について検討した。

④総合評価

上記の結果を総合的に比較・検討して、東濃鉱山領域における三次元的な初期応力状態についての評価を行うとともに、各手法の適用性について検討した。

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

研究項目	資環研	サイクル機構
①ボーリング孔の掘削と室内試験用岩石コアの採取		○
②AE 法および DRA による三次元初期応力測定	○	
③AE 法および水圧破砕法による初期応力測定		○
④総合評価	○	○

3．試験概要

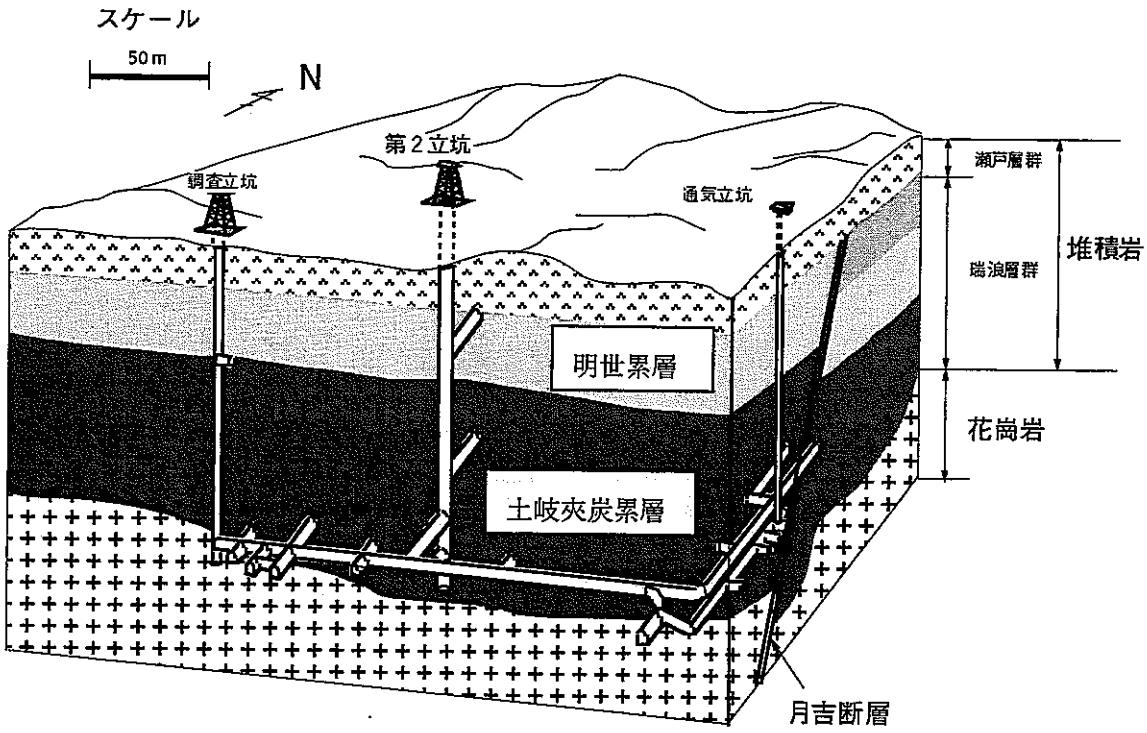
3.1 地質概要

東濃鉱山は岐阜県東濃地方の標高 300m 前後のなだらかな丘陵地に位置しており、その付近の地質は基盤をなす中生代～古第三紀の花崗岩（土岐花崗岩）、それを被覆する新第三紀の瑞浪層群（明世累層、土岐夾炭累層）と新第三紀～第四紀の瀬戸層群から構成されている。また、この地域には、走向がほぼ東西で傾斜が 60° 南落ちの月吉断層と呼ばれる逆断層（地質断層）がある。東濃鉱山の地質の概要を図－3.1.1 に、岩石物性を表－3.1.1 に示す[4)5)]。

ボーリング孔（99SE-02 孔）内の地質は、地表～14mは表土（瀬戸層）で、14～83mは瑞浪層群の明世累層で、83～152.7mは瑞浪層群の土岐夾炭累層であり、152.7m 以深は花崗岩であった。ボーリング孔は、深度 55m 付近で月吉断層と交差している。

表－3.1.1　岩石物性

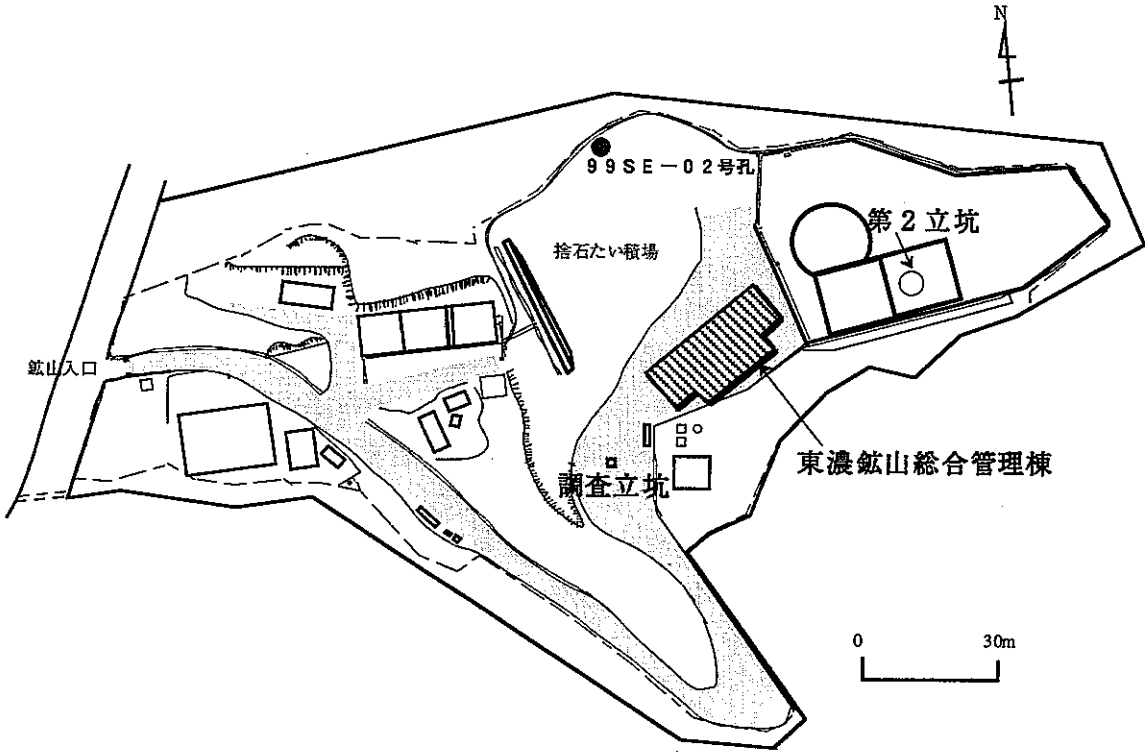
項目	明世累層	土岐夾炭累層	花崗岩
単位体積重量	1.73 t/m^3	1.90t/m^3	2.57 t/m^3
一軸圧縮強度	6.5MPa	6.3 MPa	158 MPa



図－3.1.1　東濃鉱山の地質概要

3.2 調査場所

試験を実施した 99SE-02 孔は、東濃鉱山敷地内の捨石堆積場脇に掘削された。図－3.2.1 に 99SE-02 孔の位置を示す。なお、掘削直径は約 100mm、深さは約 200m である。



図－3.2.1　99SE-02 孔の位置図

3.3 試験概要

東濃鉱山敷地内に掘削された 99SE-02 孔および得られた岩石コアを用いて、二つの手法で初期応力測定を実施し、東濃鉱山領域における三次元的な初期応力状態についての評価を行うと共に、各手法の適用性について検討した。なお、今回用いた二つの AE 法は試験方法や応力値の評価方法が異なっており、一つは資環研独自の客観的な判断基準に基づいて先行応力値を推定する方法であり、もう一つはサイクル機構が推奨しているもので予備試験により設定した計測条件を用いて試験を行い先行応力値を推定する方法である。

本研究で用いた二つの初期応力状態の評価手法を次に示す。

手法１：AE 法および DRA による三次元初期応力測定

99SE-02 孔から得られた定方位岩石コアから異なる 6 方向で円柱供試体を作成し、AE 試験および DRA 試験を行い、三次元初期応力測定を実施した。測定は、異なる５つの深度で実施し、深さ 200m までの三次元初期応力状態について検討した。

手法２：AE 法および水圧破砕法による初期応力測定

99SE-02 孔から得られた岩石コアから鉛直方向の円柱供試体を作成し、AE 試験を異なる５つの深度で行い、鉛直方向の初期応力測定を実施した。また、99SE-02 孔において、水圧破砕法により水平面内の初期応力測定を行った。水圧破砕試験は 10 深度で行い、そのうち５つの深度は AE 試験をした深度に合わせて行う。AE 試験により得られた鉛直方向および水圧破砕試験によって得られた水平面内の初期応力状態を組み合わせて、深さ 200m までの三次元的な初期応力状態について検討した。

4．AE 法および DRA による三次元初期応力測定

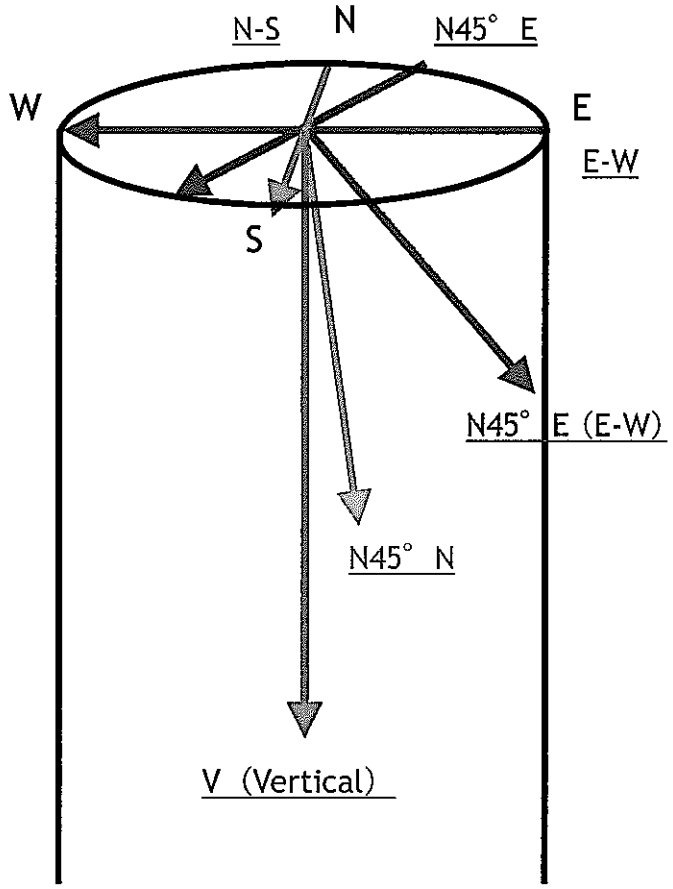
4.1 目的

東濃鉱山領域の初期応力状態を把握するとともに、応力状態の計測・評価手法の適用性について検討するために、東濃鉱山敷地内の地表から鉛直下向きに掘削した 99SE-02 孔から得られた岩石コアを用いて、AE 法および DRA により三次元初期応力測定を行った。

4.2 試験方法

（1） 岩石コアと試験片

試験に用いた岩石コアは、サイクル機構東濃鉱山の地表から約 211m まで掘削された鉛直ボーリング孔(99SE-02 孔)から採取されたものである。試験の対象としたコアは、地表からの深度が約 40m、80m、190m、201m、211m の地点のコアである。それぞれのコアについて、異なる 6 方向（鉛直方向（V 方向）、N-S 方向、E-W 方向、N45° E 方向、N-S 断面内の N45° N 方向、E-W 断面内の N45° E 方向）から試験片を作成した。試験片を作成した方向を図－4.2.1、作成状況を表－4.2.1 に示す。試験片の寸法、形状は直径 20mm、長さ約 45～55mm の円柱形である。



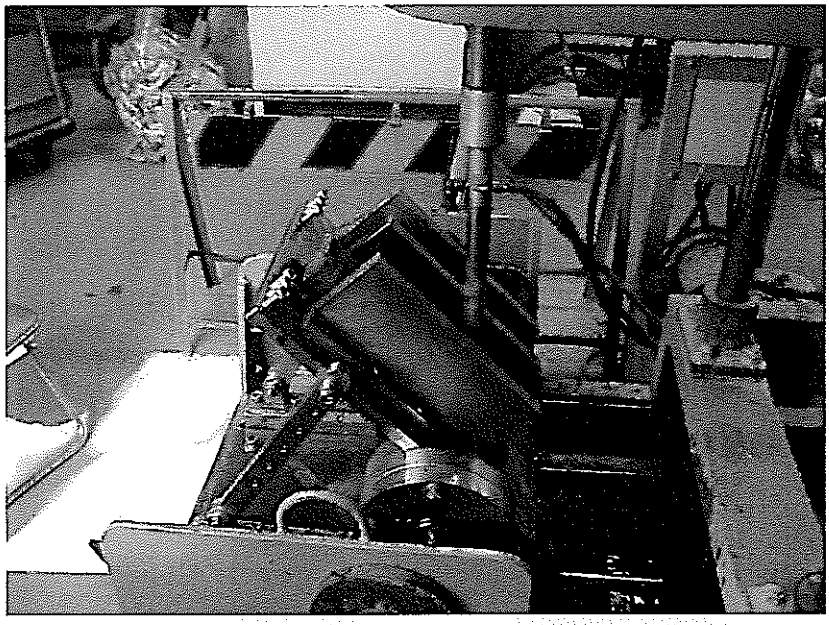
図－4.2.1　コアからの試験片作成方向（6 方向）

表－4.2.1　採取コアからの各方向の試験片準備状況

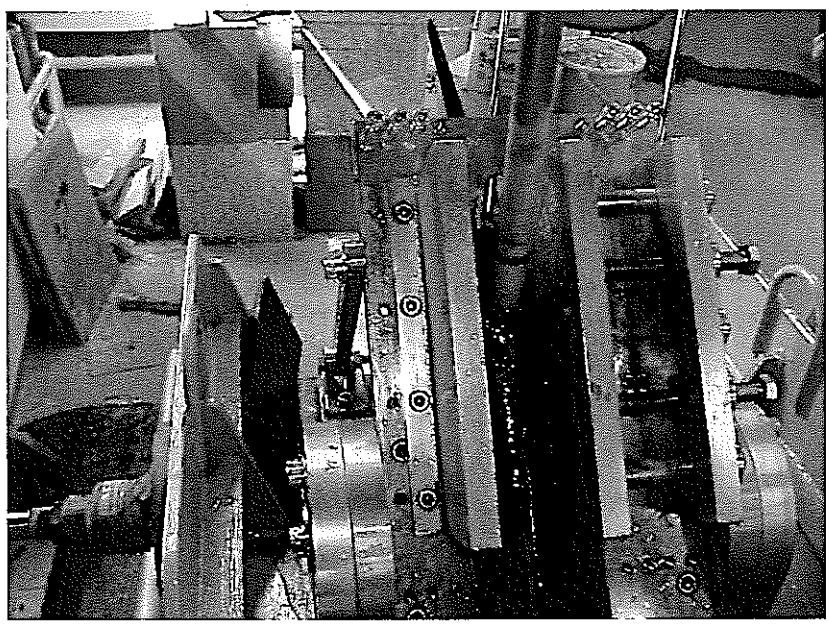
Core	Depth (m)	Specimen name
40 m Core	41.23 to 41.55	NS-A-1(S), 2, 3 N45° E-A-1(S), 2, 3 EW-A-1(F), 2(S), 3
	41.55 to 41.89	N45° N-A-1, 2, 3 N45° E(EW)-A-1, 2, 3
	41.89 to 42.22	V-A-1(S), 2(F), 3, 4, 5, 6(F) NS-A-4, 5(S) EW-A-4, 5(S) N45° E-A-4
	42.34 to 42.66	N45° N-A-4, 5(F) N45° E(EW)-A-4, 5(F) N45° E-A- 5(S)
80 m Core	79.00 to 79.35	NS-B-1, 2, 3(S) N45° E-B-1, 2, 3(S) EW-B-1(F), 2, 3, 4(S)
	79.77 to 79.85	V-B-1, 2, 3(F), 4(F)
	79.85 to 80.18	N45° N-B-1, 2, 3(F) N45° E(EW)-B-1, 2, 3(F)
	80.18 to 80.48	N45° N-B-4 N45° E(EW)-B-4 NS-B-4 N45° E-B-4 V-B-5(F), 6(S)
190 m Core	189.90 to 190.20	NS-C-1(F), 2, 3 N45° E-C-1, 2 EW-C-1, 2
	190.55 to 190.20	N45° N-C-1, 2 N45° E(EW)-C-1, 2 V-C-1, 2
201 m Core	201.75 to 201.95	NS-D-1, 2(F) V-D-1, 2, 3(F), 4(S)
	202.4 to 202.7	EW-D-1(F), 2, 3, 4 N45° E-D-1(F), 2, 3 NS-D-3 V-D-5(S)
	202.7 to 203	N45° N-D-1, 2 N45° E(EW)-D-1, 2
211 m Core	211.38 to 211.73	N45° N-E-1, 2 N45° E(EW)-E-1, 2 V-E-1(F), 2, 3, 4(S)
	211.79 to 212.15	NS-E-1(F), 2, 3 N45° E-E-1(F), 2, 3 EW-E-1, 2

（注）F:試験片整形中または整形後にき裂または不連続面が発見されたもの。
S:試験片を作成したが、試験片長さが40mm以下のもので、予備としたもの。

試験片の作成では、まず、湿式で20mmのコア抜きを行い（図－4.2.2(a),(b)）、その後端面の平行度が1/50mm以内になるように湿式で整形作業を行った。なお、コア抜きでは、コア抜き角度を0°から90°の範囲で任意に設定できる傾斜台を使用した。なお、作成した試験片は、乾燥劣化を防ぐために、充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の間実験室に保管した。



(a)傾斜台

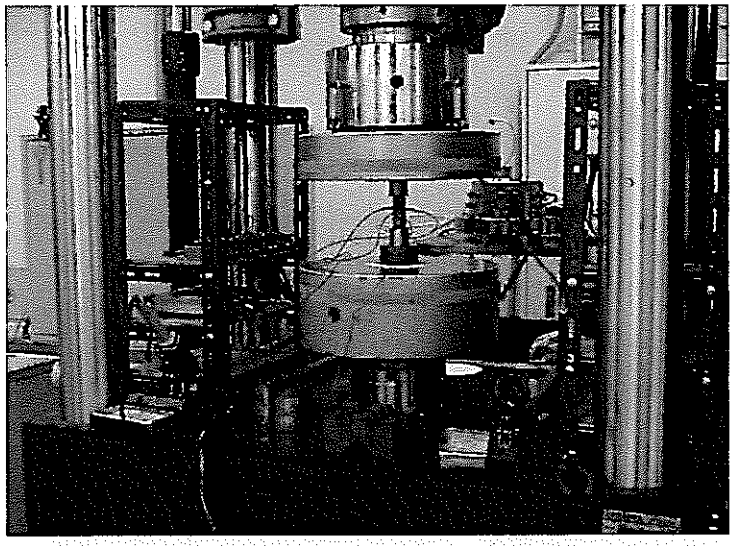


(b)コア抜き状況

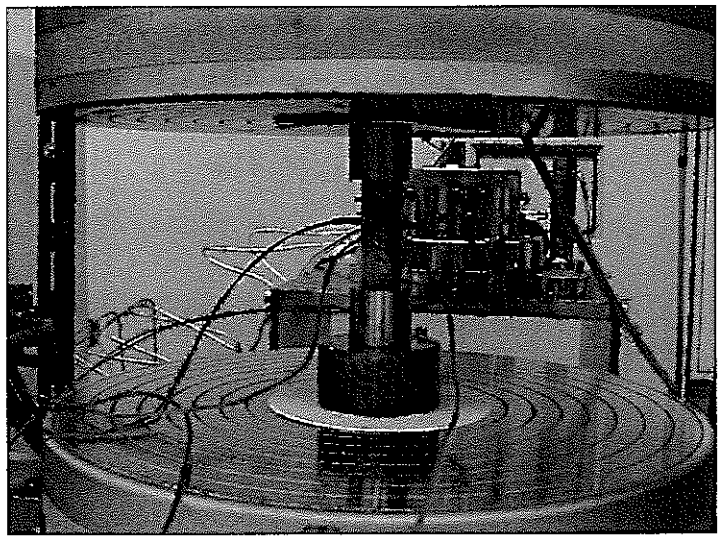
図－4.2.2　岩石コアからのコア抜き状況

（２）載荷方法

AE 法と DRA による先行応力推定のための一軸圧縮試験は一定の荷重速度条件（0.94 MPa/min）で行い、所定の最大応力レベル（推定される土被り圧の３倍程度）まで載荷と除荷を 2～5 回繰り返した。一軸圧縮試験に用いた材料試験機は MTS 製 810 型サーボ制御材料試験機で、載荷容量は 1,000 kN のものである。試験片にはひずみゲージ（ゲージ長：20 mm）を対称の位置に 2 枚貼り、試験時の軸ひずみを計測した。載荷にあたっては、2 枚のひずみゲージにおいて 0.3MPa まで軸ひずみが 1%以内で一致するように載荷板を調整し、試験片に対して偏った載荷にならないようにした。載荷試験の状況を図－4.2.3(a),(b)に示す。



(a) 全景



(b)試験片拡大

図－4.2.3　載荷試験状況

（3）AE 計測方法と AE 法による応力推定法

AE 法による初期応力測定では、「一度応力履歴を受けた固体材料は再載荷の際には以前に受けた応力レベルを超えるまで AE が発生しない」という AE のカイザー効果を利用し、一軸圧縮載荷時の AE の発生状況から岩石コアに作用していた応力値を推定する。

AE 計測は試験片に 2 個の AE センサーを取り付けて行った。使用した AE センサーは共振周波数が 500kHz の差動型センサー（NF 製 504DM 型）である。AE をカウントする際のしきい値は、周辺ノイズを検知しないレベルとして 250mV に設定した。AE センサーで検出された AE 信号はプリアンプで 40dB 増幅され、その後 AE 解析装置（NF 製 7661AE モジュール）で更に 40dB 増幅された。その AE 信号を用いて、リングダウンカウント等の特性パラメータ解析を行い、応力との関係を求めた。AE 計測システムの外観を図－4.2.4 に示す。

図－4.2.4　AE 計測システムの外観

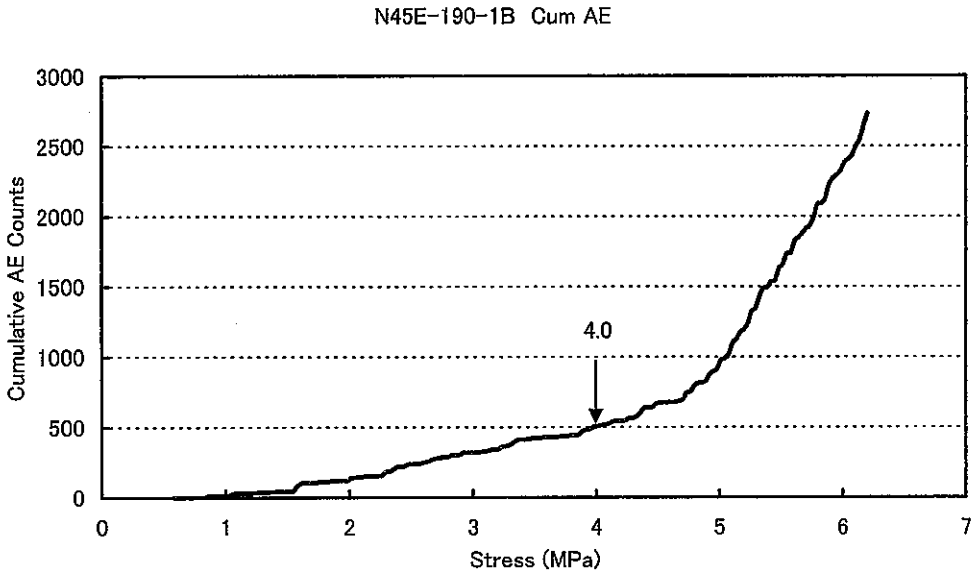
AE の発生状況から応力値を推定する方法としては、AE 発生数の累積曲線において AE の急増点を特定し、その点の載荷応力値を推定応力値とするものである。急増点の特定方法には、いくつかの方法が提案されているが、資環研が採用している客観的な方法として、下記の手順に従った（図－4.2.5(a)～(c)参照）。

①まず、累積リングダウンカウント（Cumulative AE Counts）－応力（Stress）関係図を作成する(図－4.2.5(a))。

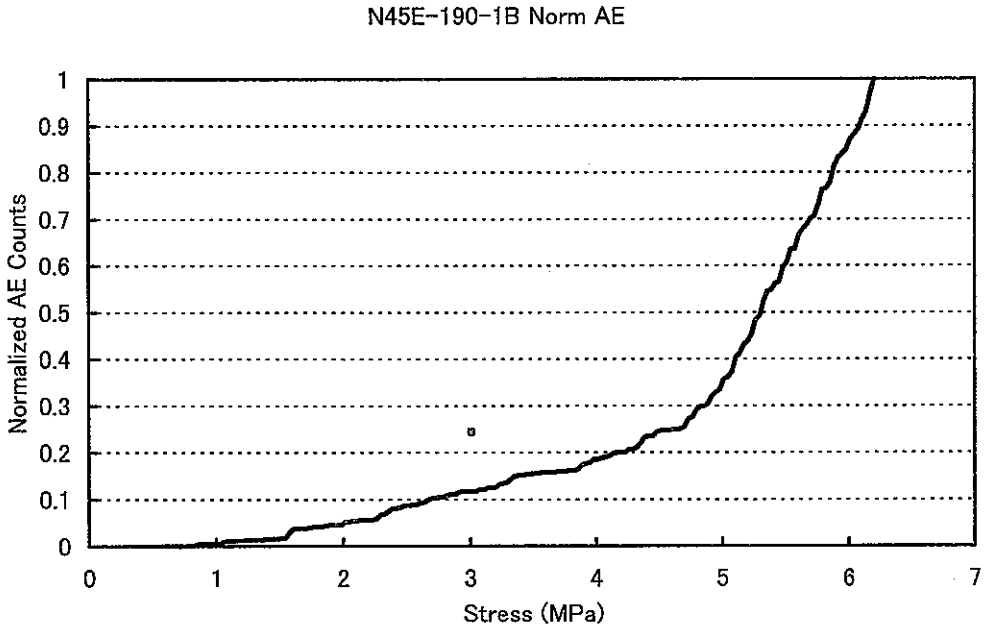
②次に、累積リングダウンカウントの最大値で正規化した正規化累積リングダウンカウント(Normalized AE Counts)－応力(Stress)関係図を作成する(図－4.2.5(b))。

③正規化累積リングダウンカウント曲線について 40 点間の傾きを計算し、連続する傾きの変化率を求め、傾き変化率（Criterion）－応力（Stress）関係図を作成する(図－4.2.5 (c))。

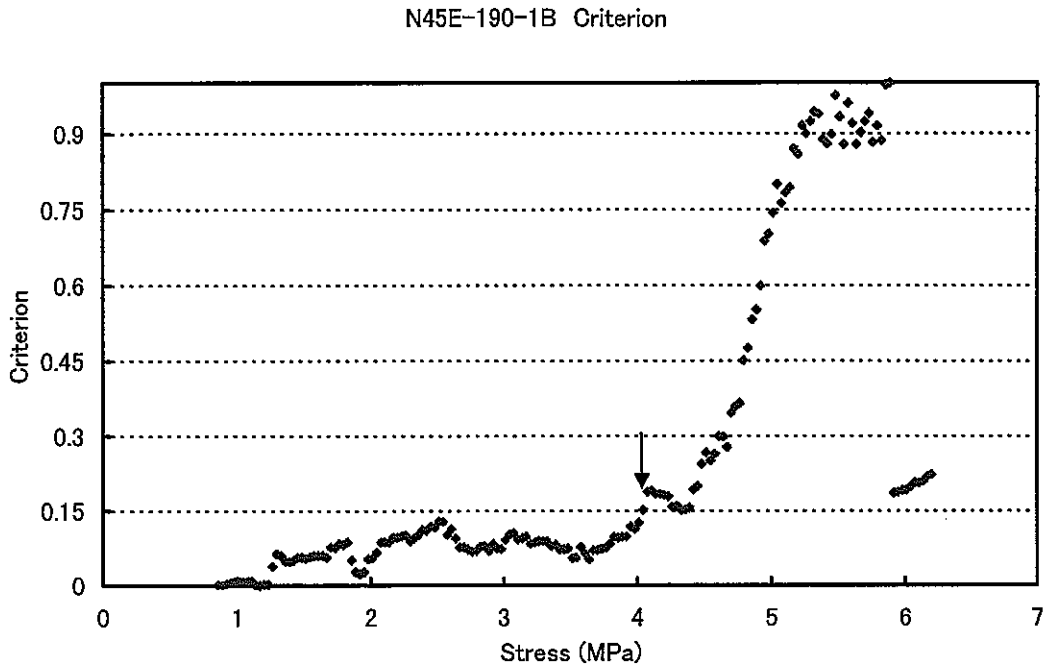
④その傾き変化率（Criterion）が 0.15 を超える点を AE の急増点とし、その時の応力を先行応力値として読み取る。



図－4.2.5(a)　累積リングダウンカウントと応力との関係
(190mコア、N45° E方向)



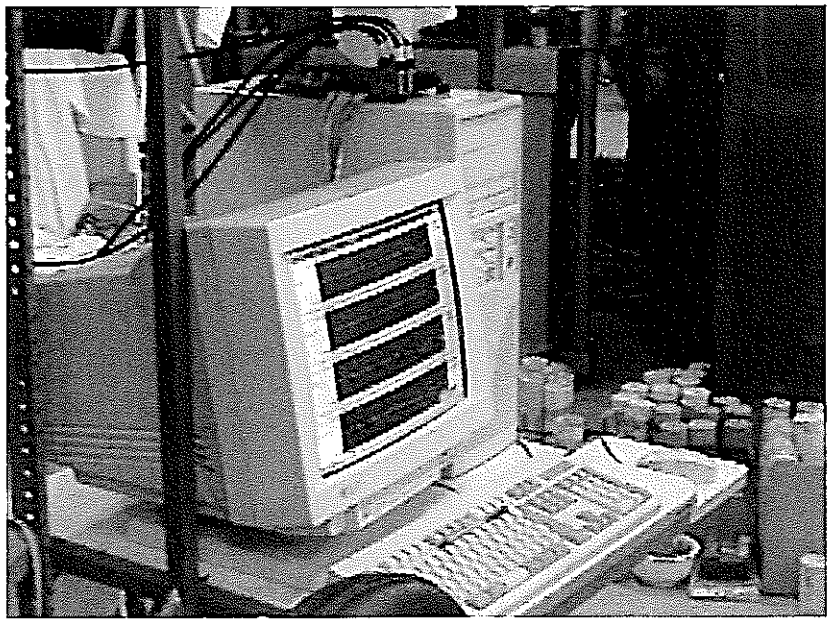
図－4.2.5(b)　正規化累積リングダウンカウントと応力との関係
(190mコア、N45° E方向)



図－4.2.5(c)　正規化累積リングダウンカウント曲線の傾き変化率と応力との関係　(190mコア、N45°E方向)

（4）ひずみ計測方法とDRAによる応力推定方法

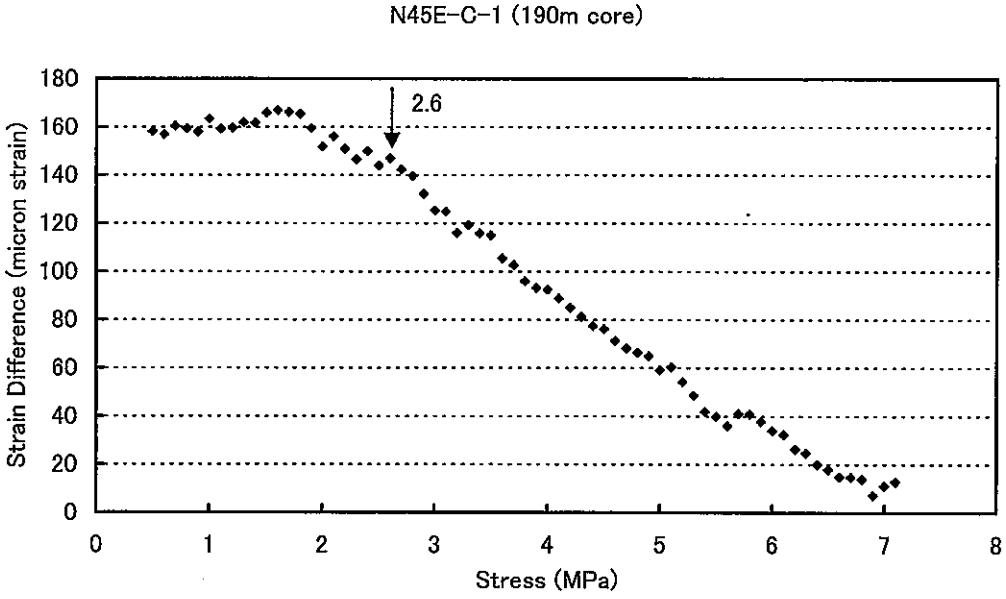
DRAによる初期応力測定では、繰返し一軸圧縮載荷時の軸ひずみを計測し、繰返しサイクル毎のひずみ差を求め、その変化状況から岩石コアに作用していた応力値を推定するものである。ひずみ・荷重計測システムの外観を図－4.2.6に示す。



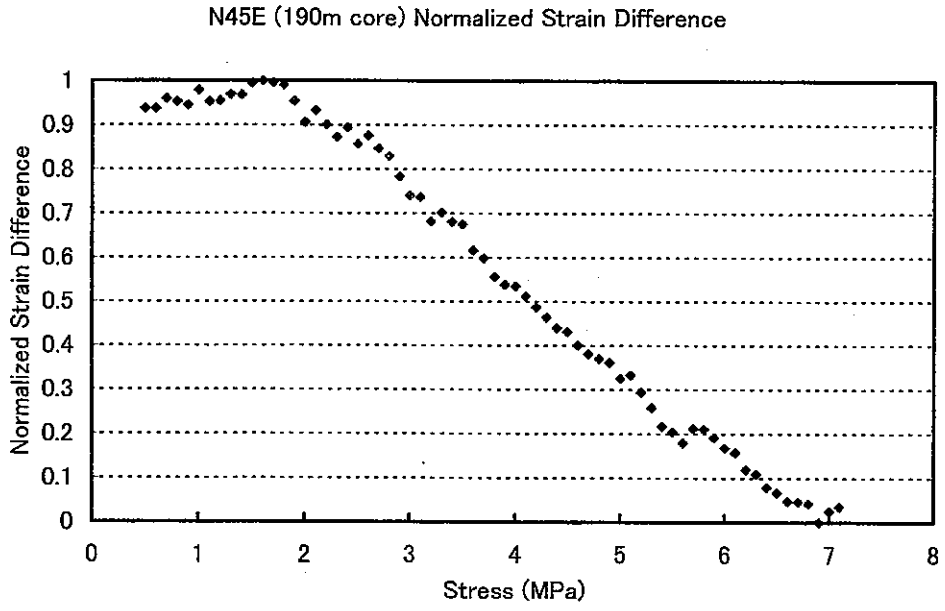
図－4.2.6　ひずみ・荷重計測システムの外観

DRAによる先行応力推定においては、ひずみ差ー応力線図において屈曲点を読み取る必要がある。試験によって得られたひずみ差変化から屈曲点を客観的に読み取るために、資環研が採用している次の手順にしたがって屈曲点を特定した（図ー4.2.7(a)～(c)参照)。なお、本試験においては、載荷5回目と載荷1回目のひずみ差を用いて評価した。

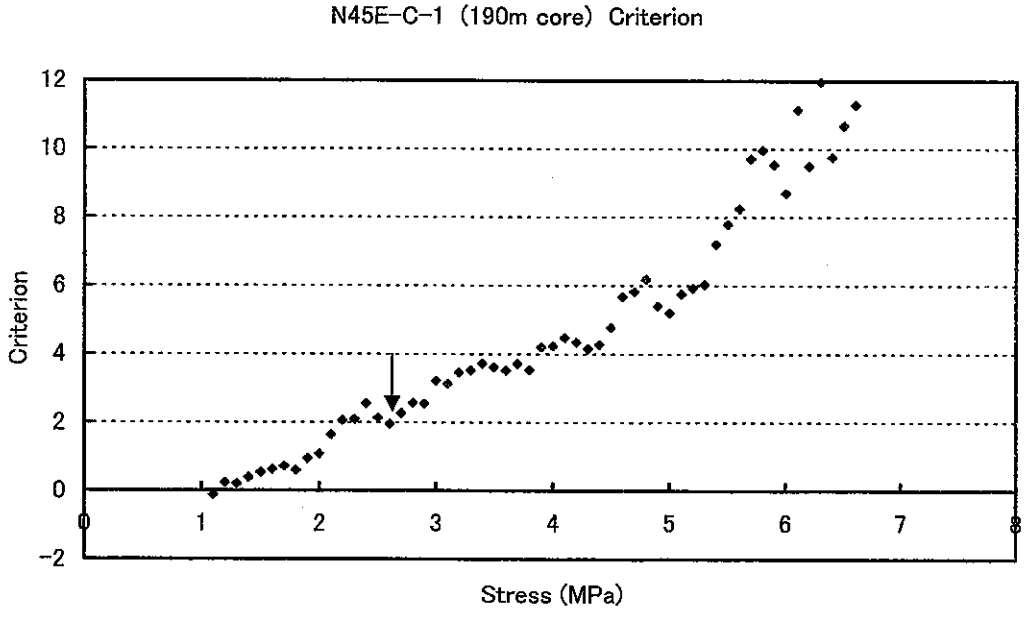
① ひずみ差(Strain Difference)ー応力(Stress)関係図を作成する(図ー4.2.7(a))。
② 各ひずみ差をその最大値で正規化し、正規化ひずみ差（Normalized Strain Difference）ー応力（Stress）関係図を作成する（図ー4.2.7(b))。
③ 正規化ひずみ差の移動平均を計算する。移動平均を計算する際に用いる平均個数は、ひずみ差ー応力関係のプロット点の分散度に依存し、本研究では20個の移動平均を計算した。
④ ③で求めた移動平均値の変化率を計算し、その変化率（Criterion）ー応力（Stress）関係図を求める（図ー4.2.7(c))。
⑤ 移動平均の変化率（Criterion）が2％を超える点を屈曲点とし、その時の応力値を先行応力値として読み取る。



図ー4.2.7(a)　ひずみ差と応力との関係（190mコア、N45°E方向)



図－4.2.7(b)　正規化ひずみ差と応力との関係（190m コア、N45° E 方向）



図－4.2.7（c）正規化ひずみ差移動平均の変化率と応力との関係
（190m コア、N45° E 方向）

（5）三次元主応力の値と方向の算出方法

6応力成分（$\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \tau_{YZ}, \tau_{ZX}, \tau_{XY}$）の値が得られれば、三次元主応力の値（$\sigma_i$, i=1～3）およびそれらの方向（λ_i, m_i, n_i）が算出できる。

まず、微小四面体においてX,YおよびZ方向の力の釣り合いを考えて整理すると次式を得る。

$$\sigma_i \begin{Bmatrix} \lambda \\ m \\ n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{YX} & \tau_{ZX} \\ \tau_{XY} & \sigma_Y & \tau_{ZY} \\ \tau_{XZ} & \tau_{YZ} & \sigma_Z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ m \\ n \end{Bmatrix} \qquad \cdots\cdots(1)$$

ここに、$\tau_{YZ}=\tau_{ZY}, \tau_{ZX}=\tau_{XZ}, \tau_{XY}=\tau_{YX}$として移項すると、以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} (\sigma_i-\sigma_X) & -\tau_{XY} & -\tau_{ZX} \\ -\tau_{XY} & (\sigma_i-\sigma_Y) & -\tau_{YZ} \\ -\tau_{ZX} & -\tau_{YZ} & (\sigma_i-\sigma_Z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ m \\ n \end{Bmatrix} = 0 \qquad \cdots\cdots(2)$$

方向余弦は$\lambda^2+m^2+n^2=1$であるから、σ_iが存在するためにはλ、m、nの係数マトリックスの行列式が0でなければならない。

$$\begin{bmatrix} (\sigma_i-\sigma_X) & -\tau_{XY} & -\tau_{ZX} \\ -\tau_{XY} & (\sigma_i-\sigma_Y) & -\tau_{YZ} \\ -\tau_{ZX} & -\tau_{YZ} & (\sigma_i-\sigma_Z) \end{bmatrix} = 0 \qquad \cdots\cdots(3)$$

上式より、

$$\begin{aligned} &(\sigma_i-\sigma_X)(\sigma_i-\sigma_Y)(\sigma_i-\sigma_Z)-2\tau_{YZ}\tau_{ZX}\tau_{XY}-(\sigma_i-\sigma_X)\tau_{YZ}{}^2 \\ &-(\sigma_i-\sigma_Y)\tau_{ZX}{}^2-(\sigma_i-\sigma_Z)\tau_{XY}{}^2=0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\therefore \sigma_i{}^3-(\sigma_X+\sigma_Y+\sigma_Z)\sigma_i{}^2+(\sigma_Y\sigma_Z+\sigma_Z\sigma_X+\sigma_X\sigma_Y-\tau_{YZ}{}^2-\tau_{ZX}{}^2-\tau_{XY}{}^2)\sigma_i \\ &-(\sigma_X\sigma_Y\sigma_Z-\sigma_X\tau_{YZ}{}^2-\sigma_Y\tau_{ZX}{}^2-\sigma_Z\tau_{XY}{}^2+2\tau_{YZ}\tau_{ZX}\tau_{XY})=0 \end{aligned} \qquad \cdots\cdots(4)$$

となり、σ_iの3次式が得られる。この3次式の3つの根が主応力σ_1, σ_2およびσ_3となる。

主応力の求め方を示す。(4) 式を簡単のために、次のように示す。

$$\sigma_i{}^3+a\sigma_i{}^2+b\sigma_i+c=0 \qquad \cdots\cdots(5)$$

ここに、

$$a=-\sigma_X-\sigma_Y-\sigma_Z$$

$$b=\sigma_Y\sigma_Z+\sigma_Z\sigma_X+\sigma_X\sigma_Y-\tau_{YZ}{}^2-\tau_{ZX}{}^2-\tau_{XY}{}^2$$

$$c=-\sigma_X\sigma_Y\sigma_Z+\sigma_X\tau_{YZ}{}^2+\sigma_Y\tau_{ZX}{}^2+\sigma_Z\tau_{XY}{}^2-2\tau_{YZ}\tau_{ZX}\tau_{XY}{}^2$$

(5) 式は次式のように書き表すこともできる。

$$X^3+3PX+Q=0 \qquad \cdots\cdots(6)$$

ここに、

$$X=\sigma_i+\frac{a}{3}、\quad P=\frac{b}{3}-\frac{a^2}{9}、\quad Q=c-\frac{ab}{3}+\frac{2a^3}{27}$$

(6) 式は、判別式Dが以下の条件のとき3つの実根を持つ。

$$D=Q^2+4P^3\leq 0 \qquad \cdots\cdots(7)$$

そして、その値は次式により求められる。

$$\begin{aligned} X_1&=2\sqrt{-P}\cos(\alpha/3)\\ X_2&=-2\sqrt{-P}\{\cos(\pi-\alpha)/3\}\\ X_3&=-2\sqrt{-P}\{\cos(\pi+\alpha/3)\} \end{aligned} \qquad \cdots\cdots(8)$$

ここに、

$$\alpha=\tan^{-1}\frac{\sqrt{-D}}{-Q}$$

ただし、$a<0$ の場合は $a+180\rightarrow a$ とする。

(8) 式は (6) 式の解であるから、主応力の値 σ_i は次式により求めることができる。

$$\sigma_i=X_i-\frac{a}{3} \qquad \cdots\cdots(9)$$

iは1～3であるが σ_i の代数的に大きい値（引張応力を正）から順に $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ とする。

つぎに、主応力の方向（方向余弦 λ_i,m_i,n_i）を求める。λ，m，nをI，J，Kと読みかえれば、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \mathrm{I}_i&=(\sigma_i-\sigma_\mathrm{Y})\tau_{\mathrm{ZX}}+\tau_{\mathrm{XY}}\tau_{\mathrm{YZ}}\\ J_i&=(\sigma_i-\sigma_\mathrm{X})\tau_{\mathrm{YZ}}+\tau_{\mathrm{ZX}}\tau_{\mathrm{XY}}\\ \mathrm{K}_i&=(\sigma_i-\sigma_\mathrm{X})(\sigma_i-\sigma_\mathrm{Y})-\tau_{\mathrm{XY}}{}^2 \end{aligned} \qquad \cdots\cdots(10)$$

これに $\mathrm{I}_i{}^2+J_i{}^2+\mathrm{K}_i{}^2=1$ の条件を加えれば、求める方向余弦は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \lambda_i&=\frac{\mathrm{I}_i{}^2}{\sqrt{\mathrm{I}_i{}^2+J_i{}^2+\mathrm{K}_i{}^2}}\\ m_i&=\frac{J_i{}^2}{\sqrt{\mathrm{I}_i{}^2+J_i{}^2+\mathrm{K}_i{}^2}}\\ n_i&=\frac{\mathrm{K}_i{}^2}{\sqrt{\mathrm{I}_i{}^2+J_i{}^2+\mathrm{K}_i{}^2}} \end{aligned} \qquad \cdots\cdots(11)$$

（6）面内主応力の値と方向の算出方法

ひとつの平面内において、横軸をh、縦軸をvとすれば、3応力成分（$\sigma_h,\sigma_v,\tau_{hv}$）よりモールの応力円を利用して容易に面内の主応力（σ_{1h} ,σ_{2h} ）を求めることができる。

すなわち、

$$\begin{matrix}\sigma_{1h}\\ \sigma_{2h}\end{matrix} = \frac{\sigma_h+\sigma_v}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_h+\sigma_v)^2}{2}+\tau_{hv}{}^2} \qquad \cdots\cdot(12)$$

また、その方向(ϕ)は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\tau_{hv}}{\sigma_h+\sigma_v} \qquad \cdots\cdot(13)$$

上式を満足するϕ値は常に２つ存在し、１つはσ_{1h}の方向であり、他の１つはσ_{2h}の（互いに直交）方向となる。これを以下のように規定しておくとσ_{1h}とσ_{2h}の方向を特定することができる。

すなわち、ϕはσ_{1h}の方向とし，ｈ軸を基準としてｖ軸方向（反時計方向）を正とすれば以下のようになる。

① $\sigma_h > \sigma_v$の場合・・・・・・・・・$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\tau_{hv}}{\sigma_h+\sigma_v}$

② $\sigma_h < \sigma_v$の場合・・・・・・・・・$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\tau_{hv}}{\sigma_h+\sigma_v}$

③ $\sigma_h = \sigma_v, \tau_{hv} > 0$の場合・・・・・$\phi = 45$

④ $\sigma_h = \sigma_v, \tau_{hv} < 0$の場合・・・・・$\phi = -45^\circ$

⑤ $\sigma_h = \sigma_v \neq 0, \tau_{hv} = 0$の場合・・・$\phi =$不定（等圧）

・・・・(14)

4.3 試験結果

（1） AE法による推定結果

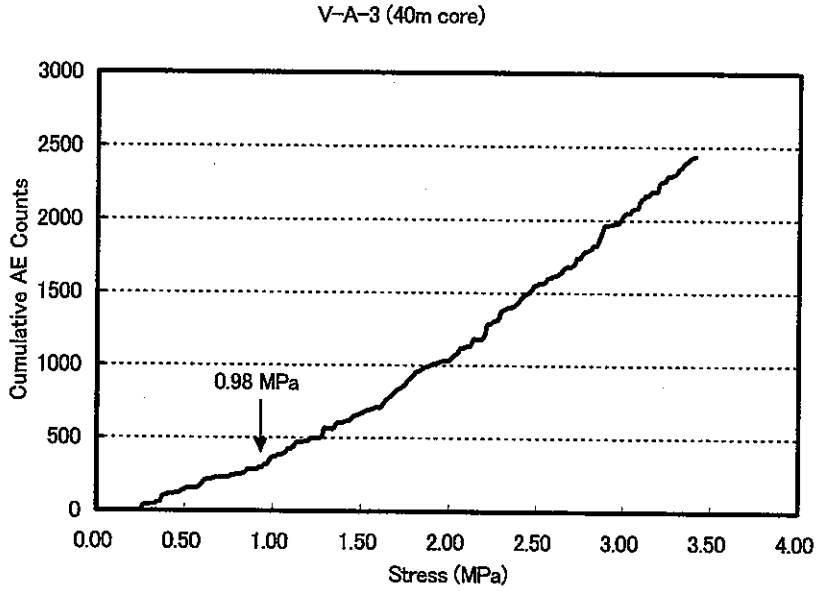
AE法による推定結果の例を図－4.3.1(a)～(e)に示す。(a)と(b)に示す結果は泥質の砂岩コアについてのもので、(c) から(e)は花崗岩コアについての結果である。なお、傾き変化率（Criterion）が0.15を越えたときの載荷応力の値を先行応力値とし、図中に矢印で示した。各試験片から推定された応力値を深度別に表－4.3.1に示す。それらから算定した三次元初期応力状態を表－4.3.2 および図－4.3.2(a)～(e)に、鉛直方向の応力値および水平面内の主応力を表－4.3.3および図－4.3.3～5に示す。

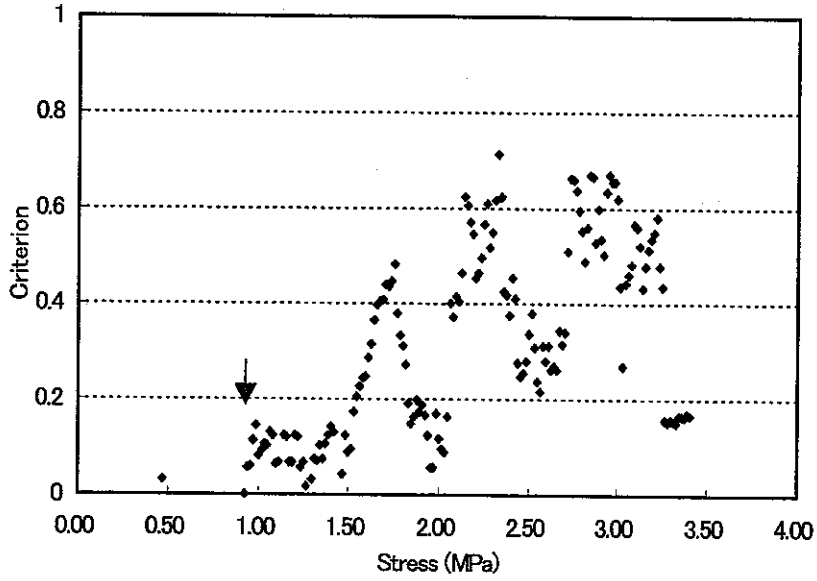
全体的な傾向として、各深度の各方向における測定結果はあまりばらつきがなく、得られた応力値については信頼性が高いと考えられる。また、例えば深度40mのように測定した6方向の応力値にはあまり大きなコントラストが見られない場合は、その主応力方向については若干のばらつきを考慮して評価する必要がある。

三次元初期応力状態について、堆積岩部と花崗岩部では異なった応力状態が得られた。堆積岩部での2つの結果によると、最小主応力方向がほぼ同じ方向（N60° W30° N）にあり、最大主応力値と中間主応力値にあまり大きな差がないことから、堆積岩部では最小主応力方向がN60° W30° Nであり、それに直交する面内での応力値は等方的であると考えられる。花崗岩部での3つの結果では、似たような応力状態が得られており、最大主応力値は5～7MPaで、その方向は概ねN30° W20° Sであった。最小主応力値は3.5～4.5MPaで、その方向は概ね鉛直方向であった。

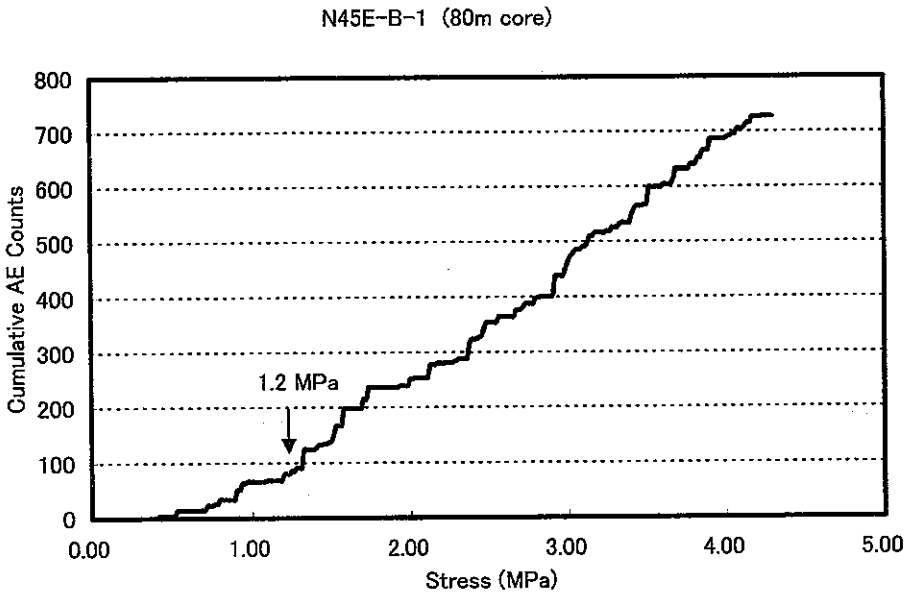
鉛直方向の応力値については、堆積岩部でも花崗岩部でも土被りと単位体積重量から算定される推定土被り圧と概ね等しい値が得られた。水平面内の主応力値については、最小主応力値は、推定土被り圧とほぼ等しく、最大主応力値は最小主応力値の約1.3倍程度であった。水平面内の最大主応力方向は岩種や深度に関係なく、概ねN30° Wであった。

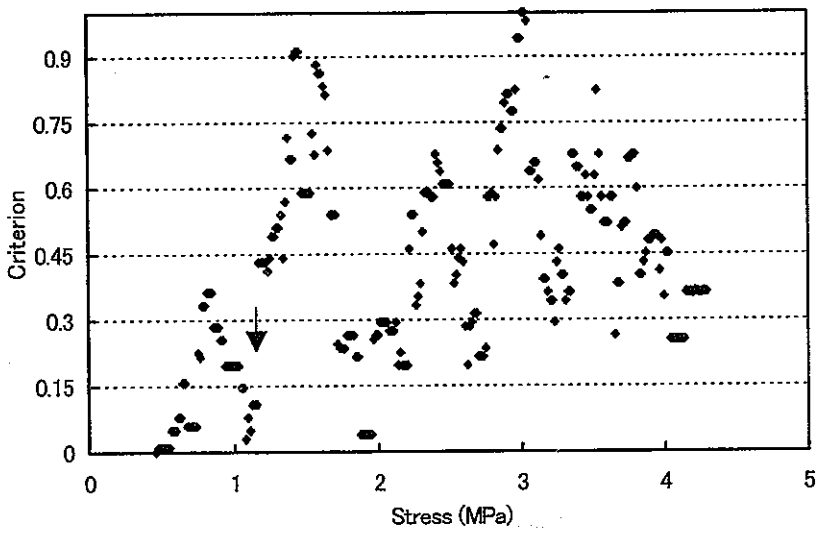
鉛直方向と水平面内の2つの主応力の大小関係を比較し、各深度の応力環境について検討した。その結果、堆積岩部では3つの応力値の大小関係に違いが見られ一概には評価できないが、浅いほうでは等方的で、深くなると“水平面内の最大主応力＞鉛直応力＞水平面内の最小主応力”であり、横ずれ断層型の応力環境であった。花崗岩部では、“水平面内の最大主応力＞鉛直応力＝水平面内の最小主応力”であり、遷移型の応力環境であった。



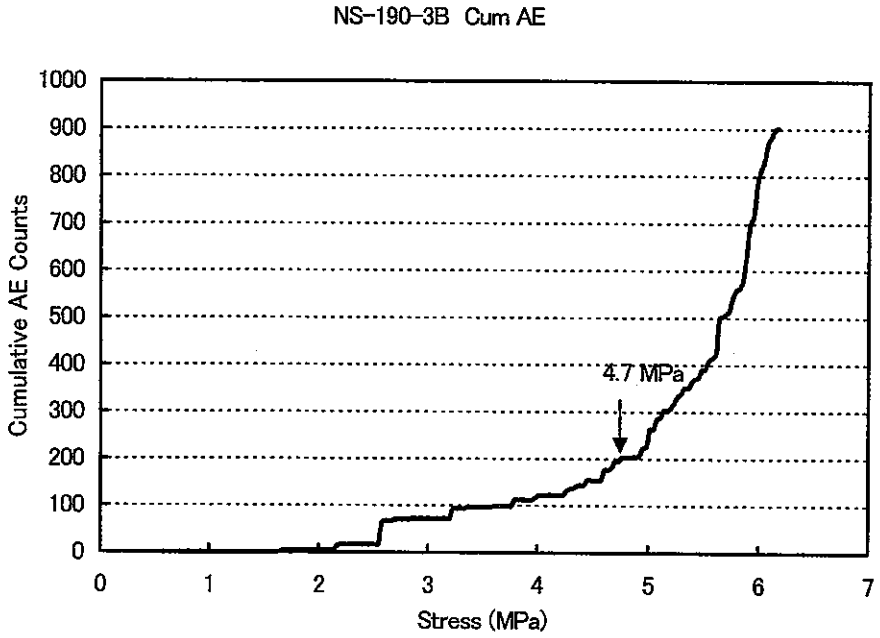


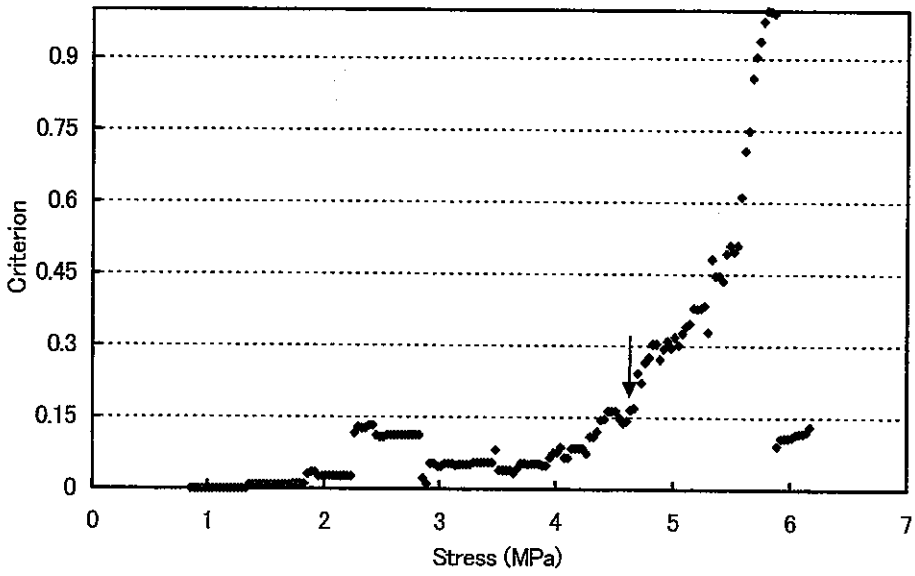
図－4.3.1(a)　40m コアからの推定結果例（V 方向）



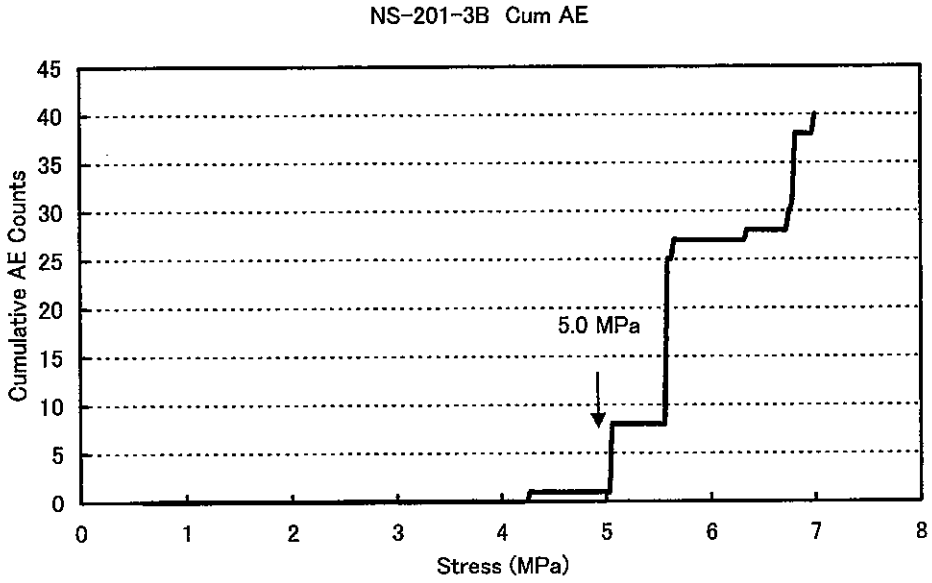


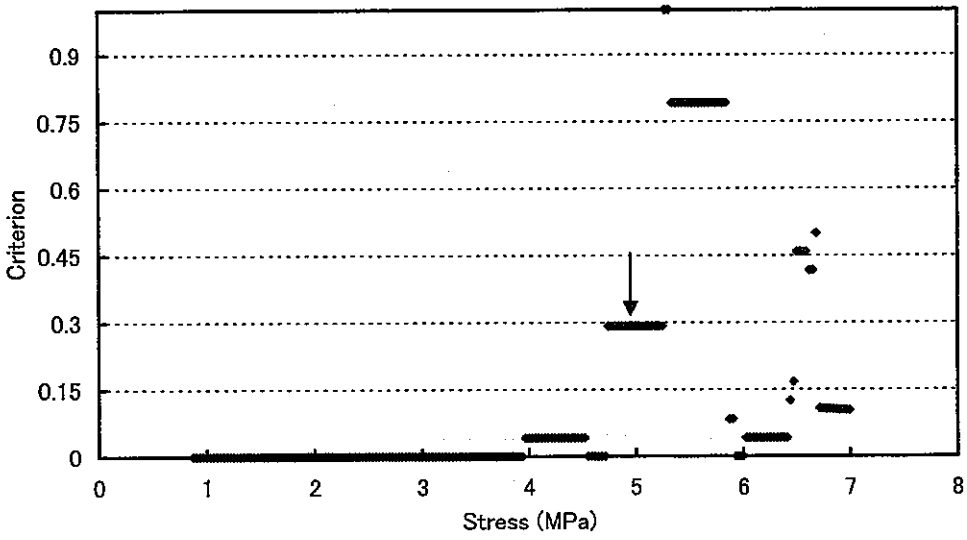
図－4.3.1(b) 80m コアからの推定結果例（N45° E 方向）



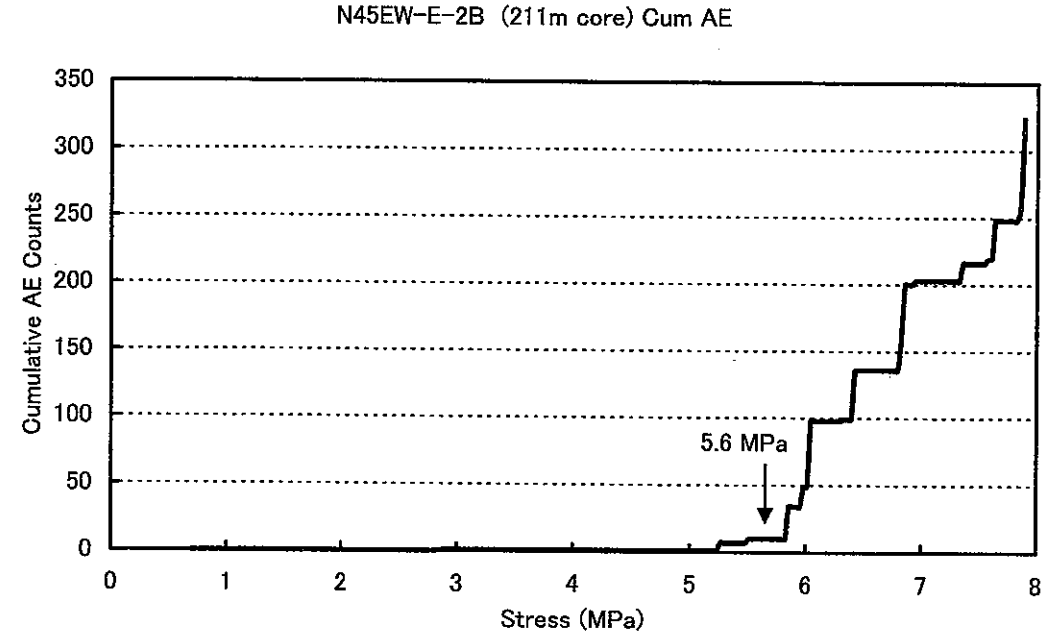


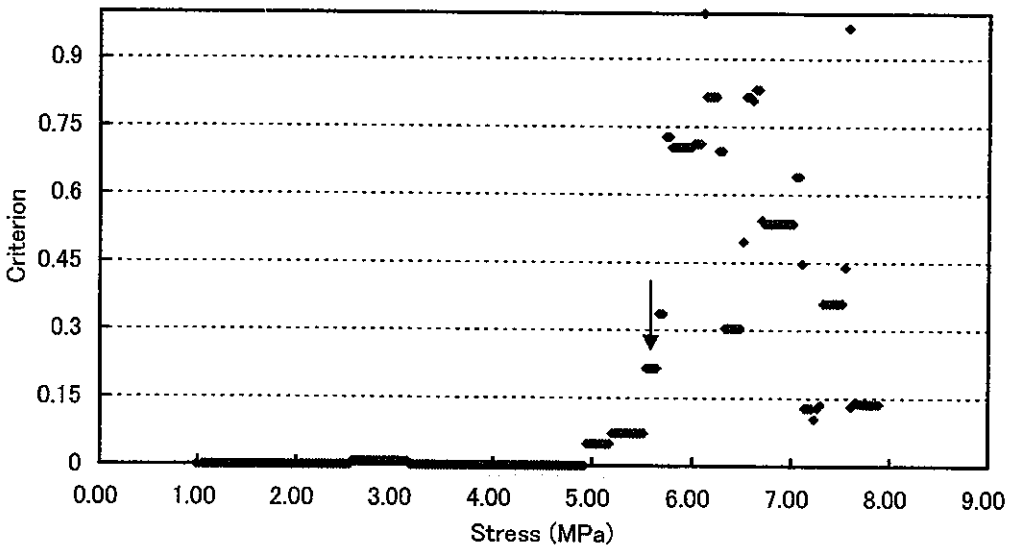
図－4.3.1(c) 190m コアからの推定結果例 (N-S 方向)





図－4.3.1(d)　201m コアからの推定結果例（N-S 方向）





図－4.3.1(e) 211mコアからの推定結果例 (N45° EW)

表－4.3.1　深度別の AE 法による応力推定結果

40mコア

Orientation	Stress (MPa)			Average (MPa)
V	0.98	0.92	1.0	0.97
N-S	0.62	0.70	0.70	0.67
N45° E	0.55	0.52	0.55	0.54
E-W	0.55	0.48	×	0.52
N45° N	0.70	0.52	0.61	0.61
N45° E(E-W 断面)	0.58	0.59	0.52	0.56

80mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	2.1	1.9	2.0
N-S	1.7	1.9	1.8
N45° E	1.2	1.0	1.1
E-W	1.6	1.8	1.7
N45° N	1.6	1.2	1.4
N45° E(E-W 断面)	1.1	1.3	1.2

190mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	3.4	4.0	3.7
N-S	4.7	4.7	4.7
N45° E	3.9	3.9	3.9
E-W	4.4	4.0	4.2
N45° N	4.2	4.0	4.1
N45° E(E-W 断面)	4.2	4.2	4.2

201mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	3.5	3.7	3.6
N-S	5.8	5.0	5.4
N45° E	4.6	4.8	4.7
E-W	4.9	5.0	5.0
N45° N	5.1	5.1	5.1
N45° E(E-W 断面)	4.9	5.1	5.0

211mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	5.2	4.6	4.9
N-S	6.3	6.0	6.2
N45° E	5.0	5.0	5.0
E-W	5.2	5.2	5.2
N45° N	5.1	5.2	5.2
N45° E(E-W 断面)	5.8	5.6	5.7

表－4.3.2　深度別の主応力とその方向と傾斜

40mコア:

Stress	Magnitude (MPa)	Bearing (°)	Plunge (°)
Sigma-1	1.1	82	68
Sigma-2	0.8	207	13
Sigma-3	0.3	301	18

80mコア:

Stress	Magnitude (MPa)	Bearing (°)	Plunge (°)
Sigma-1	2.6	190	45
Sigma-2	2.3	66	30
Sigma-3	0.6	315	31

190mコア:

Stress	Magnitude (MPa)	Bearing (°)	Plunge (°)
Sigma-1	5.0	161	22
Sigma-2	4.1	254	8
Sigma-3	3.5	1	66

201mコア:

Stress	Magnitude (MPa)	Bearing (°)	Plunge (°)
Sigma-1	5.8	150	7
Sigma-2	5.0	245	30
Sigma-3	3.6	47	59

211mコア:

Stress	Magnitude (MPa)	Bearing (°)	Plunge (°)
Sigma-1	6.7	160	24
Sigma-2	5.1	66	10
Sigma-3	4.5	45	64

注：主応力の方向、傾斜は下半球に投影。

表－4.3.3　深度別の鉛直応力値と水平面内の主応力

深度(m)	岩種	鉛直方向応力(MPa)	水平面内最大主応力値(MPa)	水平面内最小主応力値(MPa)	最大主応力方向
40	明世累層	0.97	0.7	0.5	N18° W
80		2.0	2.4	1.1	N43° W
190	花崗岩	2.7	5.1	3.8	N33° W
201		3.6	5.7	4.7	N34° W
211		4.9	6.6	4.8	N27° W

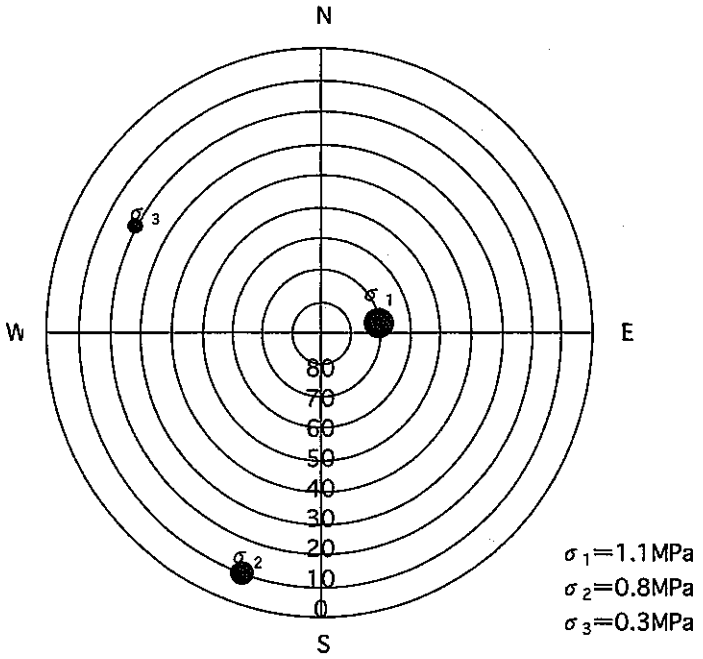


図4.3.2(a)　三次元初期応力状態（深度：40m、下半球投影）

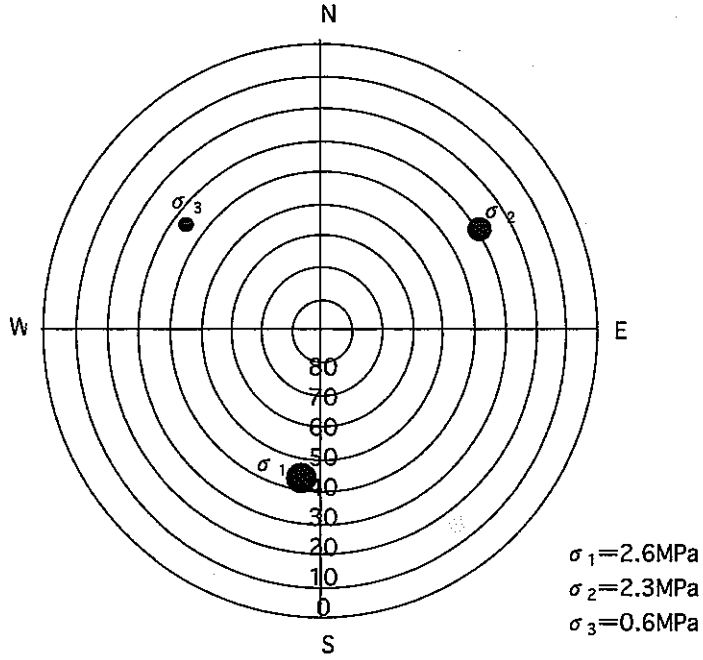


図4.3.2(b)　三次元初期応力状態（深度：80m、下半球投影）

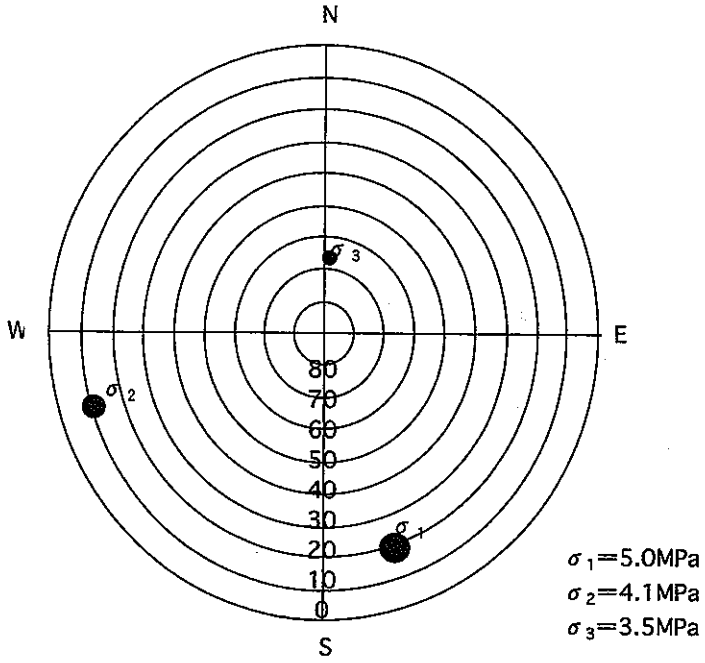


図4.3.2(c)　三次元初期応力状態（深度：190m、下半球投影）

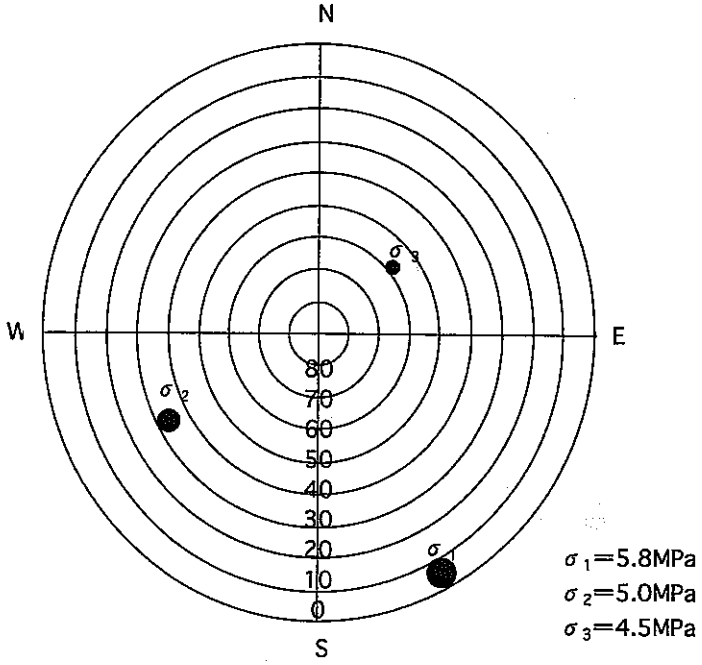


図4.3.2(d)　三次元初期応力状態（深度：201m、下半球投影）

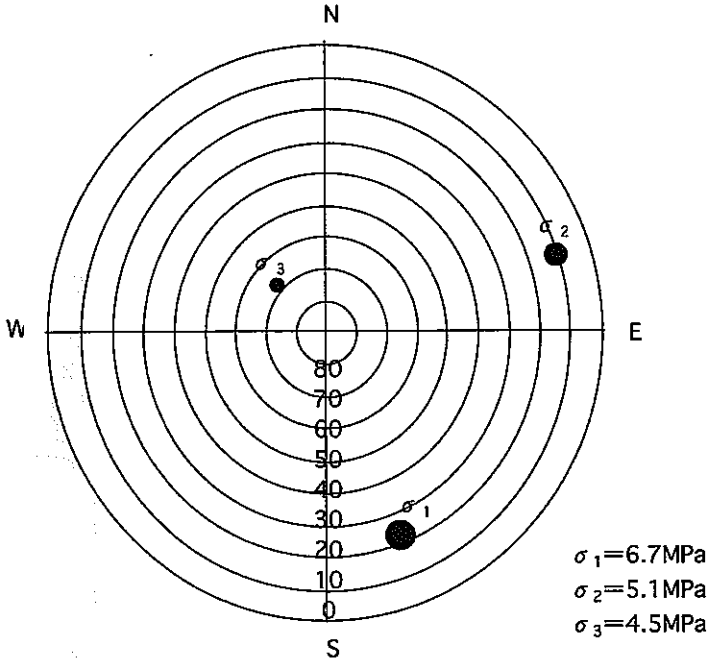
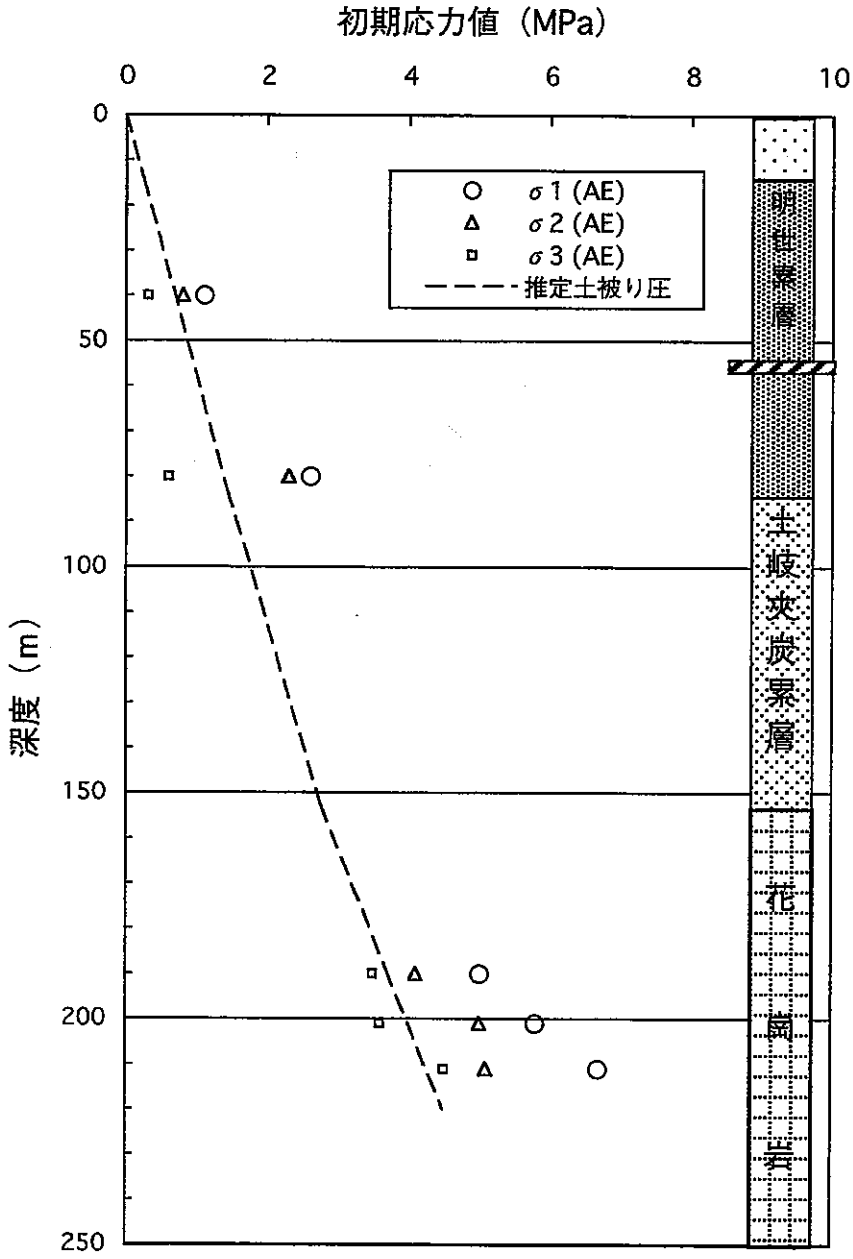
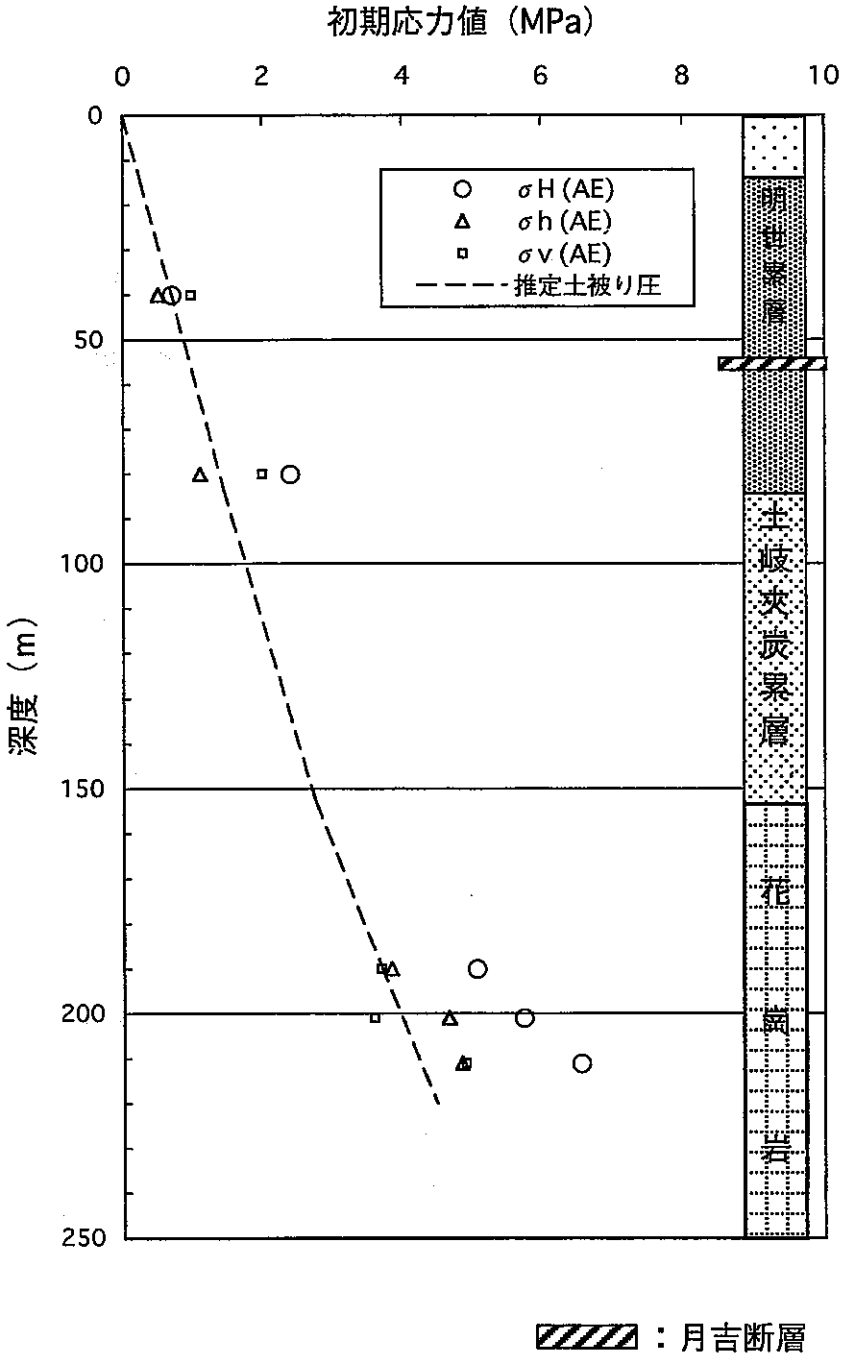


図4.3.2(e)　三次元初期応力状態（深度：211m、下半球投影）

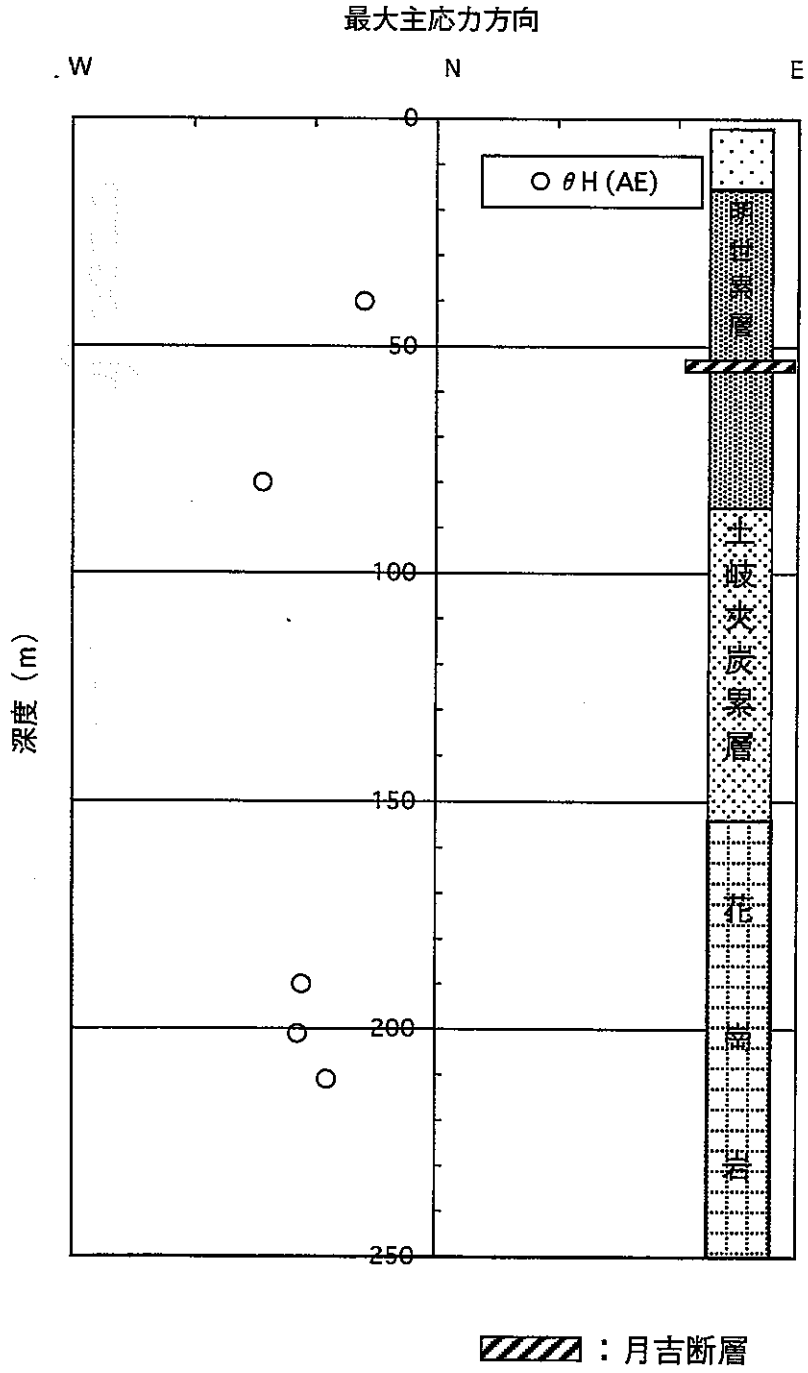


：月吉断層

図－4.3.3　三次元初期応力分布



図－4.3.4　三次元的な初期応力分布



図－4.3.5　水平面内の最大主応力方向

（2）DRAによる推定結果

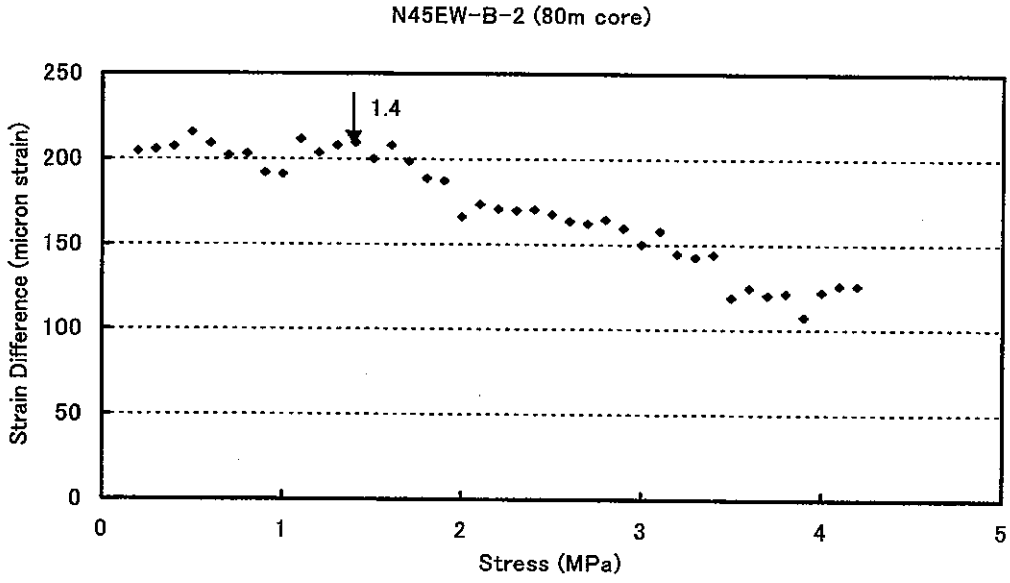
繰り返し載荷時のひずみ計測結果から、DRAによる応力推定を試みた。しかしながら、約2/3にあたる試験片において、各載荷サイクル間のひずみ差が小さいために明瞭な屈曲点を特定することができなかった。DRAによって応力値を推定できた結果の例を図－4.3.6(a),(b)および表－4.3.4に示す。移動平均変化率－応力図において移動平均変化率が2%を越える点を屈曲点とし、その時の応力値を先行応力値とし、図中に矢印で示した。

6方向すべての応力値が推定できた試験深度はなかったため、三次元初期応力状態を求めることはできなかった。また、水平面内の三方向（N-S,N45° E,E-W）の応力値が推定できた試験深度は190mのみであり、鉛直方向の応力値（V）が推定できたのは80m、190m、201mの試験深度であった。このため、鉛直方向の応力値についてのみ検討することとし、AE法の結果と比較することによって、この結果の信頼性について評価した。AE法およびDRAによって得られた鉛直方向の応力値を表－4.3.5に示す。DRAによって得られた鉛直応力値は、AE法によって得られた値とほぼ等しいため、DRAによって得られた応力値の信頼性はあると考えられる。

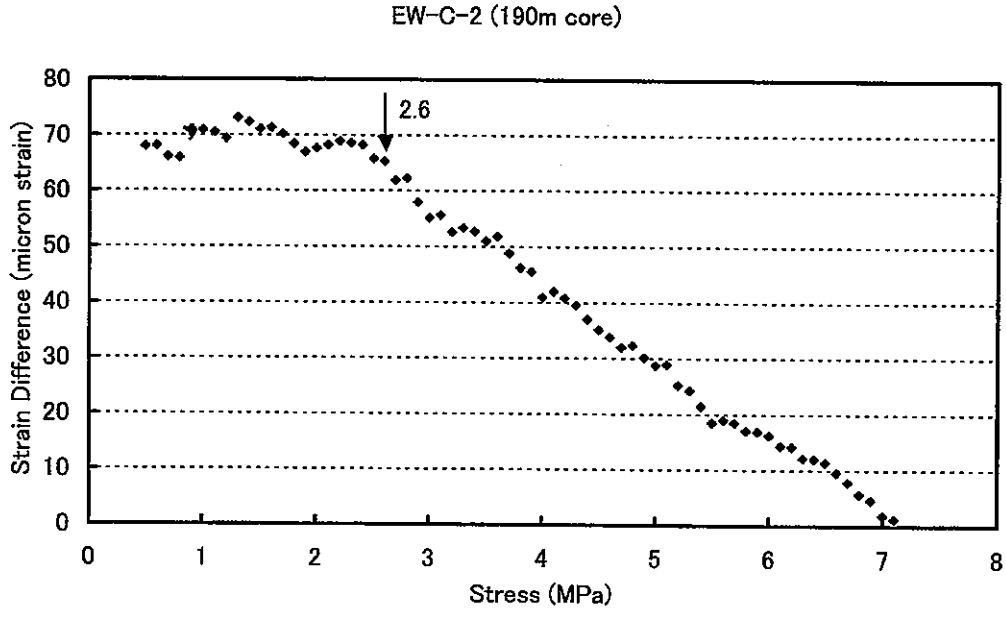
表－4.3.5　AE法およびDRAによる鉛直応力値

試験深度 (m)	鉛直方向応力 (AE：MPa)	鉛直方向応力 (DRA：MPa)
40	0.97	－
80	2.0	2.1
190	3.7	3.4
201	3.6	3.9
211	4.9	－

－：推定できず



図－4.3.6(a)　８０ｍコアからの推定例（E-W 断面の N45° E 方向）



図－4.3.6(b)　１９０ｍコアからの推定例（E-W 方向）

表－4.3.4　DRA による推定結果

40mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	×	×	×
N-S	×	×	×
N45° E	×	×	×
E-W	×	×	×
N45° N	×	×	×
N45° E(E-W 断面)	×	×	×

80mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	×	2.1	2.1
N-S	1.8	×	1.8
N45° E	1.3	1.6	1.45
E-W	×	×	×
N45° N	1.0	0.9	0.95
N45° E(E-W 断面)	1.1	1.4	1.25

190mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	×	3.4	3.4
N-S	2.4	2.9	2.7
N45° E	3.0	2.6	2.8
E-W	2.7	2.6	2.6
N45° N	2.2	2.6	2.4
N45° E(E-W 断面)	×	×	×

201mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	3.7	4.0	3.9
N-S	3.7.	2.4	3.1
N45° E	3.2	3.5	3.4
E-W	×	×	×
N45° N	2.3	×	2.3
N45° E(E-W 断面)	×	×	×

211mコア

Orientation	Stress (MPa)		Average (MPa)
V	×	×	×
N-S	×	×	×
N45° E	×	×	×
E-W	×	×	×
N45° N	×	×	×
N45° E(E-W 断面)	×	×	×

注：×は載荷2回目または3回目の途中で破壊。
全体的にひずみ差が小さく、誤差が大きいと思われる

4.4 AE 試験および DRA 試験のまとめ

東濃鉱山敷地内の地表から掘削した鉛直ボーリング孔から得られた岩石試料について、AE 法および DRA により三次元初期応力測定を実施した。その結果、AE 法では比較的明瞭なカイザー効果を捉えることができ、三次元初期応力状態を求めることができた。一方,DRA では全体的にひずみ差が小さく、約 2/3 の試験片において明瞭な屈曲点が得られず、三次元初期応力状態を求めることができなかった。

AE 法によって得られた知見を以下に示す。

1) 三次元初期応力状態について、堆積岩部では最小主応力方向が N60° W30° N であり、最大主応力と中間主応力がほぼ等しい値を示していたので、最小主応力方向に直交する面内での応力値は等方的であると考えられる。花崗岩部では最大主応力値は 5～7MPa で、その方向は概ね N30° W20° S であった。最小主応力値は 3.5～4.5MPa で、その方向は概ね鉛直方向であった。
2) 鉛直応力については、岩種によらず推定土被り圧に相当する応力値が得られた。
3) 水平面内の主応力値について、最小主応力値は推定土被り圧とほぼ等しく、最大主応力値は最小主応力値の約 1.3 倍程度であった。水平面内の最大主応力方向は岩種や深度に関係なく、概ね N30° W であった。
4) 応力環境については、堆積岩部では 3 つの応力値の大小関係に違いが見られ一概には評価できないが、浅いほうでは等方的で、深くなると“水平面内の最大主応力＞鉛直応力＞水平面内の最小主応力”であり、横ずれ断層型の応力環境であった。花崗岩部では、“水平面内の最大主応力＞鉛直応力＝水平面内の最小主応力”であり、遷移型の応力環境であった。

DRA によって得られた知見を以下に示す。

1) 鉛直方向の応力値について検討した結果、DRA によって得られた値は AE 法によって得られた値とほぼ等しいため、DRA によって得られた応力値の信頼性はあると考えられる。

5．AE 法および水圧破砕法による初期応力測定

5.1 目的

東濃鉱山領域の初期応力状態を把握するとともに、応力状態の計測・評価方法の適用性について検討するために、東濃鉱山敷地内の地表から鉛直下向きに掘削した 99SE-02 孔（直径約 100mm、深さ約 200m）を用いて AE 法および水圧破砕法により初期応力測定を実施した。AE 試験は、同孔から得られた岩石コアを用いて５つの深度で行い、鉛直方向の初期応力を測定した。また、水圧破砕試験は、同孔において 10 深度で行い、水平面内の初期応力状態について検討した。さらに、それらを組み合わせて三次元的な初期応力状態についても検討した。

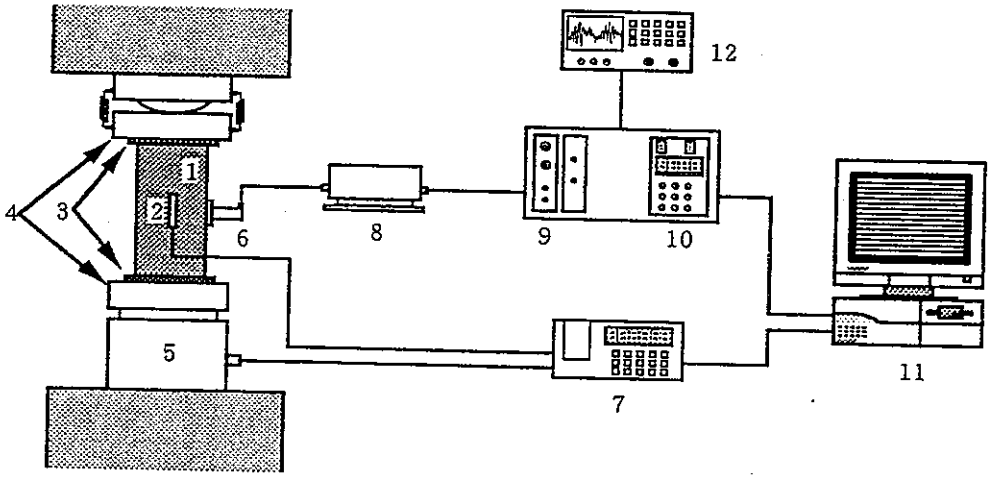
5.2 試験方法

(1)AE 法

本方法で使用している計測システムおよびカイザー効果の評価方法は、４章で述べた方法とは異なるものを用いた。本方法では、測定する岩種ごとにしきい値と感度を設定し、単調載荷時に連続的な AE が発生し始めるポイントをカイザー効果と評価している。このため、応力測定を実施する前に対象岩石を用いて予備試験を行い、先行応力を精度良く評価できるようなしきい値と感度の組み合わせを決めておかなければならない。今回は、これまでの実績から表－5.2.2 に示す計測条件を用いた[6]。

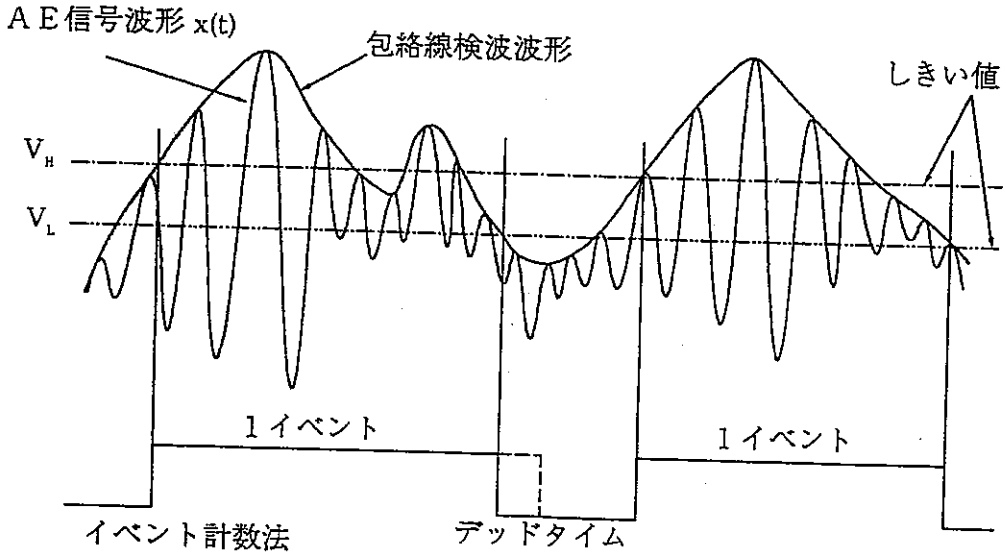
計測システムは、図－5.2.1 に示すように AE 計測機（トランスデューサ、アンプ、ディスクリミネータ、カウンタ）、マイクロコンピュータおよび圧縮試験機から構成されている。トランスデューサは共振周波数 140kHz の PZT（ジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子）であり、円柱供試体中央部に鋼製アタッチメントによって設置された。計測された波形は 100kHz～200kHz のバンドパスフィルタを介して AE 計測装置に送られた。AE 信号の計数には、図－5.2.2 に示すように１つの AE 信号波形を包絡線検波し計数するイベント計数法を用いた。その際、１組（V_H、V_L）のしきい値を用いることで検波精度の向上を図った。また、電気雑音を除去するためにアースを設置し、機械的雑音を除去するために載荷板と供試体の間にスポンジパットを入れた。載荷試験機は最大容量 150t の高剛性タイプのものを用いた。計測に使用した装置の仕様を表－5.2.1 に示す。

供試体については、ボーリング孔から得られた岩石コアから直径 20mm で高さ約 40mm の細長比約１：２の円柱供試体を作成した。その際、供試体の軸方向とボーリングコア軸方向を一致させた。AE 試験での供試体への載荷は、荷重制御により行い、荷重、変位、AE 発生数を計測した。変位の計測には、堆積岩の場合は変位計を、花崗岩の場合は歪みゲージを用いた。載荷速度は JIS M 0302 に準拠し、破壊するまでの時間が概ね 10 分前後になるように、堆積岩では 0.98MPa/min、花崗岩では 9.8MPa/min とした。



1.岩石供試体
2.ひずみゲージ
3.スポンジパッド
4.載荷板
5.ロードセル
6.トランスデューサ
7.ひずみ測定器
8.プリアンプ
9.ディスクリミネータ
10.カウンタ
11.マイクロコンピュータ
12.オシロスコープ

図－5.2.1　AE 計測システム



図－5.2.2　しきい値とイベントの関係

表－5.2.1　使用した装置の仕様

装置名称		メーカー	形式	仕様
多目的材料試験機	ロードフレーム	MTS	Model 315.01S	最大圧縮容量：150 t 最大引張容量：100 t 剛性：7×10^{9}N／m
	制御装置		Model 458.91	サーボ機構によるクローズドループ制御方式
	油圧供給装置		506.02E	最大油量：24.2 ℓ／min 動力：11.2kW
AE計測器	トランスデューサ	NF回路設計ブロック	AE-901S	140kHz共振型 高さ40㎜、直径12㎜
	プリアンプ		AE-912	40dB固定、差動式
	ディスクリミネータ		AE-922	メインアンプ、フィルタ(バイパス、ローパス) 内蔵
	カウンタ		AE-932	2ch出力、AE発生数計測時間 0.1、1、10、100sec
ひずみ測定器		東京測器研究所	TDS-301	0.08sec／点サンプリング 測定範囲：±40,000×10^{-6}
オシロスコープ		岩崎通信	DS-6121A	デジタルストレージ式 分解能8ビット、 25レベル／div、 クロックレート40MHz
マイクロコンピュータ		NEC	PC-9801RX	16ビット
ロードセル		東京測器研究所	LU-5TE	容量5 t
高感度変位計		東京測器研究所	CDP-10	1000×10^{-6}㎜

表－5.2.2　AE 試験の計測条件

	堆積岩	花崗岩
しきい値（V_H）	230mV	450mV
しきい値（V_L）	210mV	430mV
感度	90db	80db

試験に用いる岩石コアは、深度 40m 間隔で採取し、5 カ所での試験を計画したが、深度 120m～185m の区間では、固結度の低い砂岩や風化が顕著な花崗岩が分布しており、AE 法を用いた初期応力測定に用いる岩石コアとしては不適であると判断した。そのため、堆積岩では、深度 40m と 78m の 2 カ所で、花崗岩では深度 189m、200m、207m の 3 カ所で採取された岩石コアを用いて試験を行った。試験深度を表－5.2.3 に示す。

表－5.2.3　AE 試験の試験深度

	堆積岩	花崗岩
試験深度	40m,78m	189m,200m,207m

(2)水圧破砕法

本測定で用いた水圧破砕試験のシステムを図－5.2.3 に示す。破砕流体には清水を用いており、それは圧縮空気動高圧ポンプによって流量計および高圧ホースを通じてストラドルパッカーの加圧区間まで送られる。ボーリング孔の破砕区間における破砕流体の圧力は、ケーブルヘッドに内蔵された圧力変換器によって測定され、そのデータはアーマードケーブルを通じて地表の動ひずみ測定器まで転送される。破砕区間への圧入流量は圧力パネルに設置された流量計によって計測される。動ひずみ測定器および流量計の出力はいずれも A/D 変換器を介してパーソナルコンピューターに転送され記録される。データの取り込み速度は 50ms である。水圧破砕によって誘起された人工亀裂の方位は、インプレッションパッカーの下端に取り付けられた坑井方位傾斜儀計のデータから決定される。測定機器一覧を表－5.2.4 に示す。

次に、具体的な水圧破砕試験の手順を図－5.2.4 に従って示す。

①ダミーパッカーによるボーリング孔径の調査

水圧破砕用のパッカー（ストラドルパッカー）が自重でボーリング孔内を降下することができるだけの空間が確保されているかどうかを調査するために、ストラドルパッカーと同じ直径・重さのダミーパッカーを所定の深度まで降下させる。

②水圧破砕前の孔壁の型取り

水圧破砕試験では、より良好な試験条件を得るために天然き裂が少なく孔壁の安定した区間を試験位置として選定する。今回は、キャリパー検層結果、コア観察結果の RQD 値およびボアホールテレビ観察結果を総合的に評価し、試験位置を選定した。この試験位置で、インプレッションパッカー（ボーリング孔壁の凹凸を写し取るためのゴムパッカー）を用いた水圧破砕前の孔壁の型取りを行い、天然き裂の状態をさらに詳しく調査し、試験位置として妥当かどうかの判断を行う。この型取りの結果、孔壁に多数のき裂が確認された場合は別の試験位置を選定する。

③水圧破砕試験

所定の深度までストラドルパッカーを降ろし、まず、ゴムパッカーを膨らませて加圧区間を確保する。そして、ストラドルパッカーの加圧区間に比較的大きな流量（3～6L/min）で破砕流体（清水）を圧入し、破砕区間の水圧を上昇させる。ボーリング孔壁にき裂が生じて破砕区間の圧力が急激に低下したら高圧ポンプによる流体の圧入を停止し、圧力の経時変化を観測する。その後、加圧区間に通じる流路を大気に解放し、き裂に圧入されていた破砕流体を排出する。次に、再び同じ流量で流体を圧入し、先に生じたき裂がボーリング孔壁面において再開口するときの圧力 P_r（Re-opening pressure）を測定する。き裂の再開口は最低 4 回実施して、圧力－時間挙動の再現性を調べる。水圧破砕によって誘起されたき裂を再開口してからポンプを停止し、加圧区間に通じる流路のバルブを大気に解放すると破砕区間の圧力は低下し、き裂は再び閉じようとする。このため、き裂に圧入されていた破砕流

体は破砕区間に逆流する。このとき大気に解放されているバルブを閉じると破砕区間の圧力は回復する（Pressure rebound）。造成されたき裂に破砕流体が閉じこめられて岩盤あるいはボーリング孔へのリークが少ない場合、特に明瞭な圧力の回復がみられるので、このような破砕区間では、造成されたき裂に作用する法線応力と破砕流体の圧力が釣り合うときの圧力 P_s（Shut-in pressure）が容易に決定できることが多い。

④水圧破砕後の孔壁の型取りによる人工き裂の方位測定

水圧破砕後、再びインプレッションパッカーを用いて破砕地点の孔壁の型取りを行い、破砕前の型取りで得られたインプレッションと比較することにより新たに造成されたき裂が特定される。このインプレッションパッカーの下端には坑井方位傾斜儀計が取り付けられているので、インプレッションの表面に写し取られたき裂の走向傾斜を決定することができる。

そして、以上の手順で得られたデータを次に示す方法によって解析し、初期応力状態を算定する。今回用いた解析手法では、ボーリング孔軸がひとつの主応力軸の方向と一致していると仮定し、円孔まわりの弾性解を用いる解析方法に基づいて各測定深度における水平面内の主応力を求める。

Break down pressure（P_b）、ボーリング孔軸と直交する面内の最大主応力（S_H）、最小主応力（S_h）、Pore pressure（P_0）および破砕区間の岩盤の引張強度（T）から次式が導かれる。

$$P_b = 3S_h - S_H - P_0 + T \quad \cdots (1)$$

水圧破砕によって生じた縦き裂をボーリング孔壁面において再開するときの圧力を P_r（T=0）とすると次式となる。

$$P_r = 3S_h - S_H - P_0 \quad \cdots (2)$$

したがって、多孔質岩盤における水平面内の最大主応力の下限（S_{Hmin}）は次式で与えられる。

$$S_{Hmin} = 3S_h - P_r - P_0 \quad \cdots (3)$$

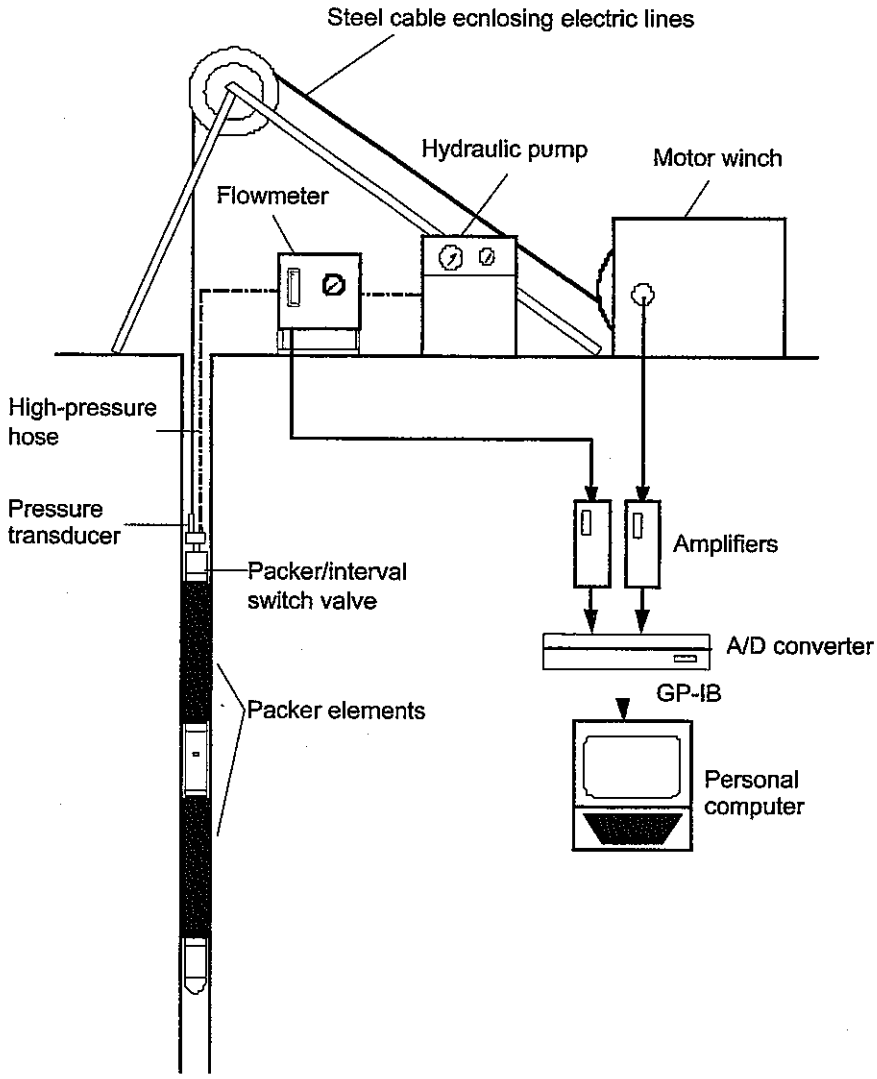
空隙率の小さい結晶質岩盤に対する水平面内の最大主応力の上限（S_{Hmax}）は P_0 を無視することによって、次式のように推定される。

$$S_{Hmax} = 3S_h - P_r \quad \cdots (4)$$

ここで、最小主応力は shut-in pressure（P_s）として水圧破砕試験における圧力－時間曲線から決定され、次式で表される。

$$S_h = P_s \quad \cdots (5)$$

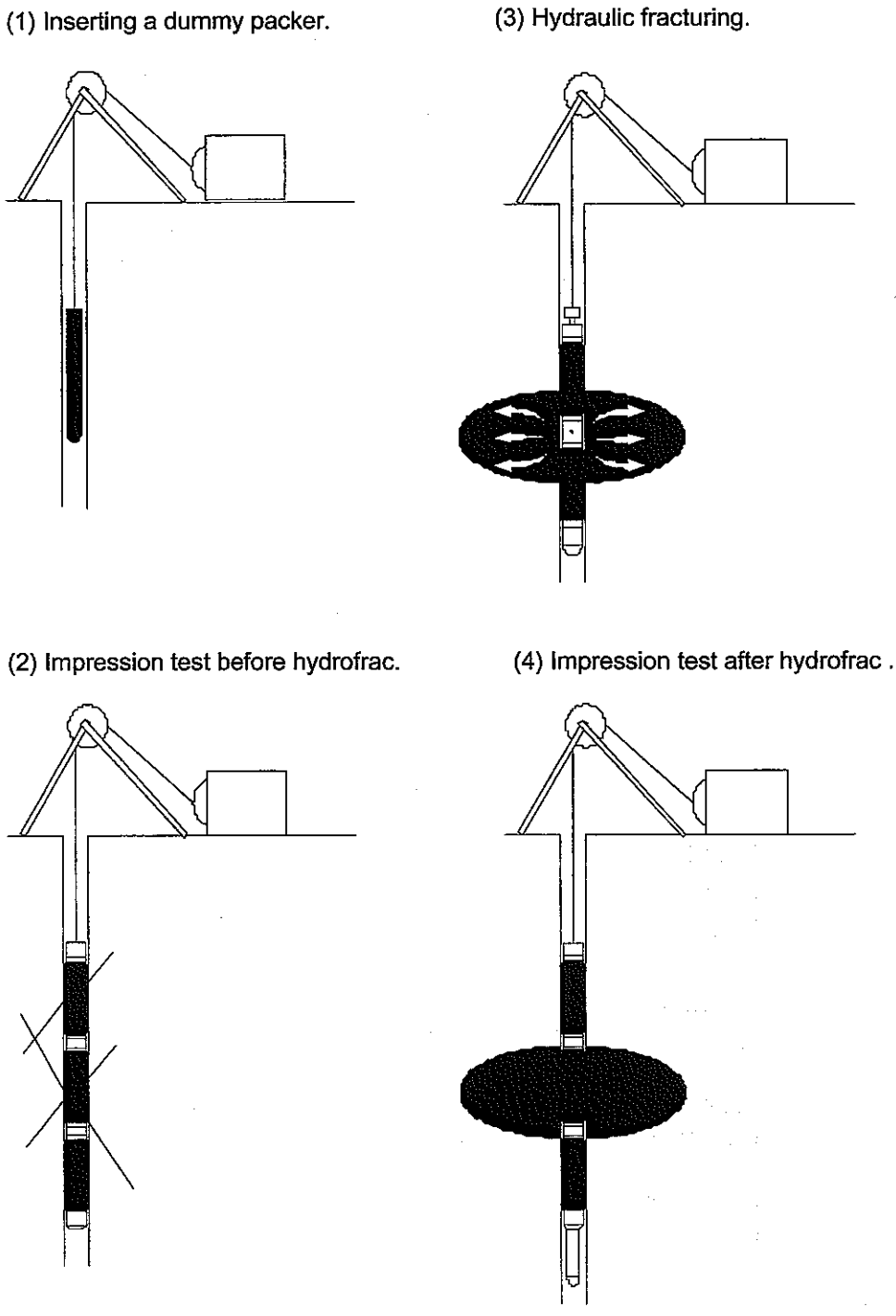
水圧破砕試験によって得られた Re-opening pressure（Pr）、shut-in pressure を式（3）～（5）に代入して、水平面内の最大主応力および最小主応力を求める。本解析において、P_0 は 99SE-02 孔の孔内水位（孔口からの深度 49.31m）から水圧破砕実施深度までの水頭に等しいと仮定した。



図－5.2.3　水圧破砕試験のシステム

表－5.2.4　測定機器一覧

測　定　機　器	メーカー	数量
ストラドルパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	同和工営（株）	1 本
インプレッションパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	同和工営（株）	1 本
ケーブルウィンチ、1.5kW、1000m 用	同和工営（株）	1 台
高圧ポンプ、JHP-500W、3.5l/min、35MPa	（株）フジキン	2 台
システムコントローラー、PC-9801T	日本電気（株）	1 台
A/D コンバーター、ADC-116C	（株）共和電業	1 台
シグナルコンディショナー、CDA-230C	（株）共和電業	1 台
圧力変換器、PGM-500KD、測定範囲 49.03MPa	（株）共和電業	1 台
流量計、MP-MCF-SLE、測定範囲 6.0l/min	流体工業（株）	1 台
坑井方位傾斜儀計、TYPE-SS、最小読取り精度 1°	（株）村田製作所	1 台



図－5.2.4　水圧破砕試験の手順

5.3 試験結果

(1)ＡＥ法

AE 試験については、堆積岩では深度 40m と 78m の２カ所で、花崗岩では深度 189m、200m、207m の３カ所で採取された岩石コアを用いて試験を行った。

ＡＥ法によって鉛直方向の初期応力値を計測した結果を表－5.3.1 に、それらの結果を平均して各供試体深度ごとにまとめたものを表－5.3.2 および図－5.3.1 に示す。表－5.3.2 には、単位体積重量と土被りから算定される鉛直方向の推定土被り圧に対する比も併記した。なお、表中の“－”は応力値が適正に評価されなかったことを示す。その理由としては、岩石の固結度が低いこと、風化が著しいことや岩石内にマイクロクラックなどが存在することなどの影響で、明瞭なカイザー効果が確認されなかったと考えられるためである。また、図中の破線は岩石試料の単位体積重量から算定した推定土被り圧である。

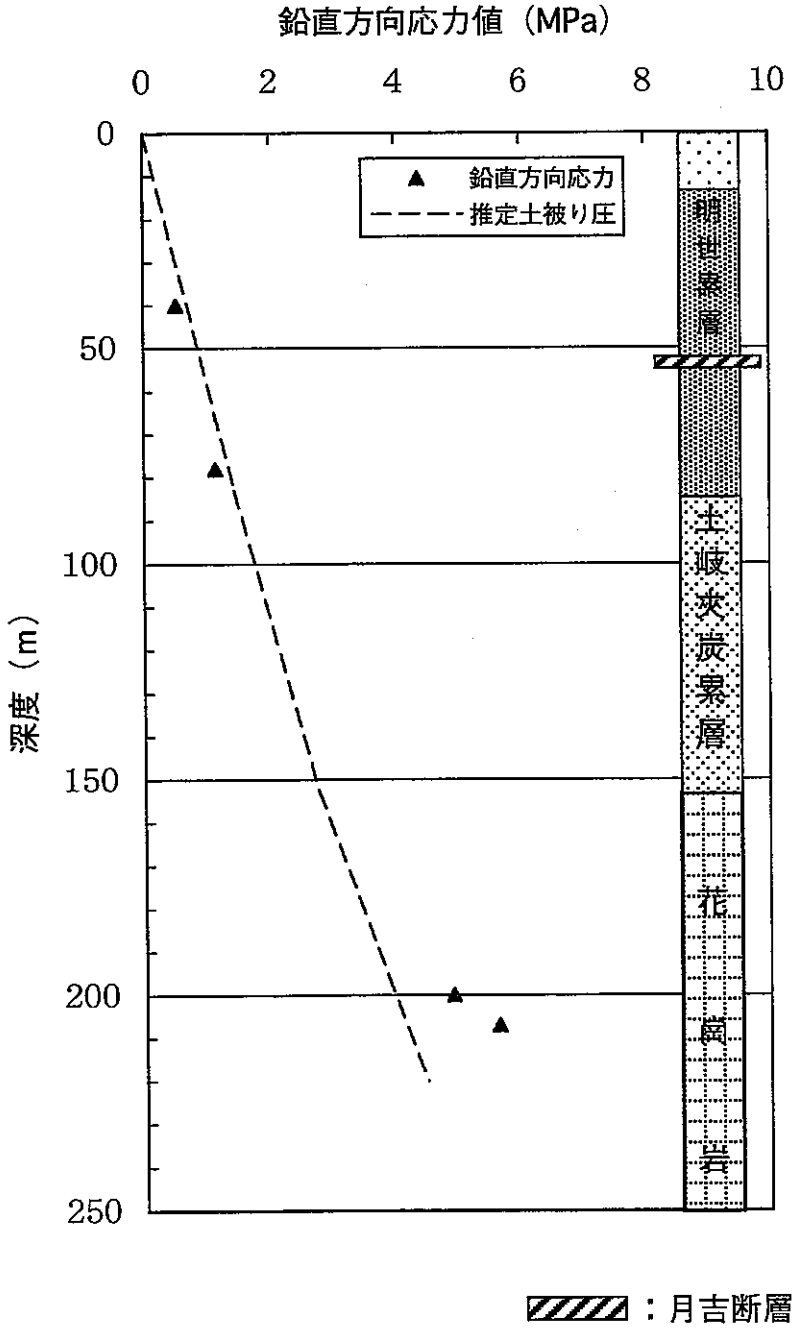
鉛直方向の初期応力値については、当然のことながら深度の増加に伴い大きくなっていた。それらを推定土被り圧と比較すると、堆積岩部と花崗岩部で異なる傾向が見られた。堆積岩部では推定土被り圧とほぼ等しく、花崗岩部では推定土被り圧に対して 1.3 倍程度の値であった。

表－5.3.1　鉛直方向の初期応力値

深度 (m)	岩種	単位体積重量 (t/m³)	応力値 (MPa)
40.00	明世累層	1.73	0.48
40.05		1.73	0.51
40.31		1.75	0.56
78.10		1.73	1.21
78.10		1.66	1.14
78.28		1.73	－
78.37		1.74	1.07
188.38	花崗岩	2.64	－
188.43		2.53	－
188.88		2.66	－
189.65		2.54	－
189.79		2.53	－
200.58		2.63	5.09
200.58		2.59	4.77
200.62		2.58	5.43
200.72		2.56	4.48
200.88		2.57	4.73
206.68		2.57	5.03
206.86		2.56	6.21
206.95		2.57	5.71
207.30		2.54	5.53

表－5.3.2　各供試体深度ごとの鉛直方向の初期応力値

深度 (m)	岩種	単位体積重量 (t/m³)	鉛直方向応力 (MPa)	推定土被り圧に対する比
40	明世累層	1.73	0.52	0.75
78	明世累層	1.72	1.1	0.85
189	花崗岩	2.58	－	－
200	花崗岩	2.58	4.9	1.23
207	花崗岩	2.56	5.6	1.35



図－5.3.1　鉛直方向の初期応力分布

(2)水圧破砕法

水圧破砕法によって水平面内の初期応力分布を測定した。水圧破砕試験は、10 深度で行い、そのうち５つの深度は、ＡＥ試験の結果と組み合わせて三次元的な応力状態について評価するために、ＡＥ試験の深度に合わせて行った。水圧破砕試験の結果を表－5.3.3 に、主応力値の分布を図－5.3.2 に、最大主応力方向の分布を図－5.3.3 に示す。ただし、水平面内の最大主応力値をσ_{max}、ボーリング孔内の水頭に相当する間隙水圧を考慮した場合の水平面内の最大主応力値をσ_{max-p}、水平面内の最小主応力値をσ_{min}、水平面内の最大主応力方向をθ_{max}とする。また、深度 105m における測定では、人工亀裂を生成させることができず既存き裂を利用したため、主応力値およびその方向とも他の結果と異なる性質のデータであることを考慮して評価する必要がある。

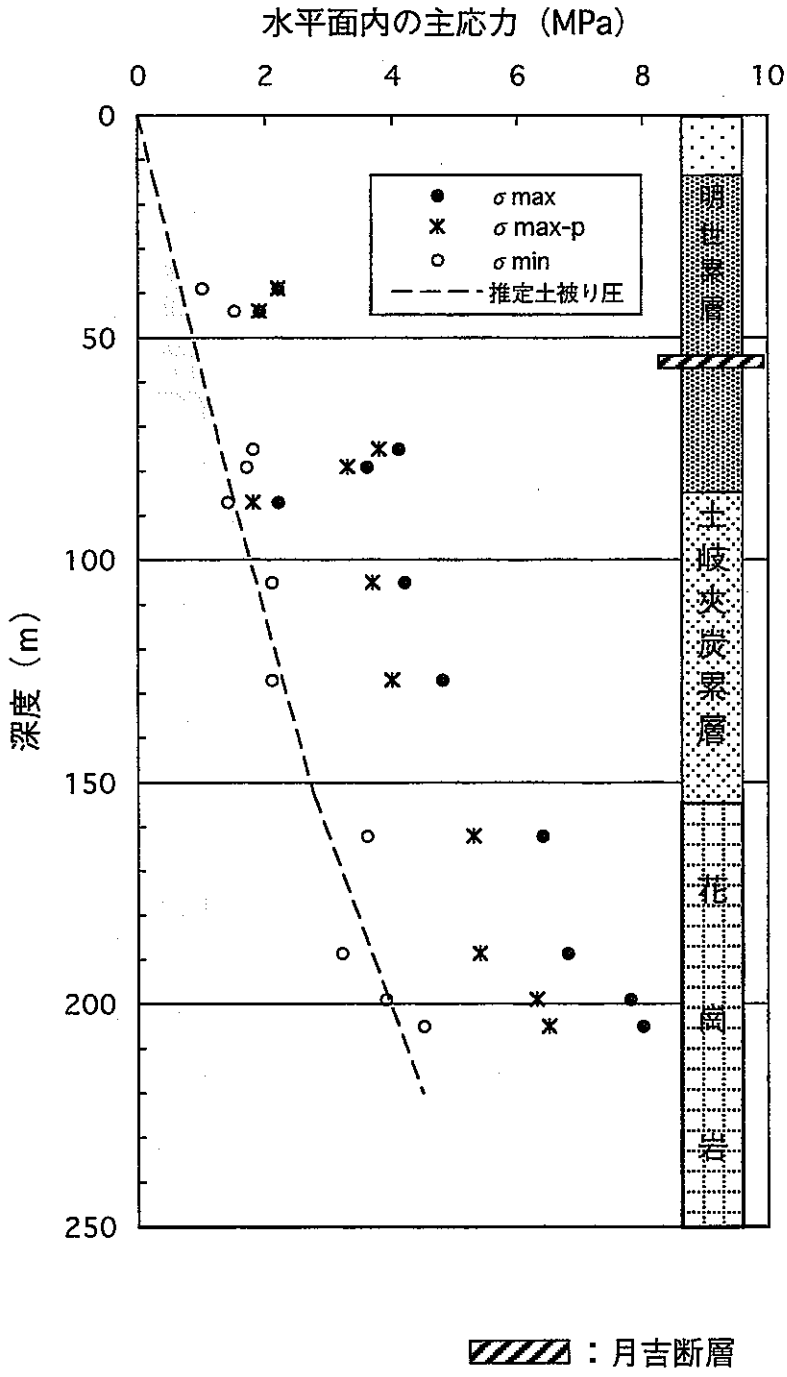
主応力値について、最大主応力値は深度と共にほぼ直線的に増加する傾向にあるが、堆積岩部と花崗岩部ではその増加の割合が若干異なっており、花崗岩部の方が僅かに大きい傾向があった。深度 87m の応力値は、近傍の測定値の約半分であり、極端に小さい値であった。これは、測定地点が土岐夾炭累層の上端部であり、堆積過程や地層境界の影響などで水平方向の応力が解放された可能性が考えられる。最小主応力値は深度と共にほぼ直線的に増加する傾向にあり、堆積岩部と花崗岩部での不連続的な分布傾向は見られなかった。

最大主応力方向について、深度 105m では既存亀裂を用いているため、主応力方向の信頼性は低いと判断し、除外して評価すると、今回の試験で得られた最大主応力方向は概ね N60° W から N30° E の範囲内にあった。堆積岩部では比較的ばらつきが多いが、平均的な方向はほぼ南北方向であると推測できる。花崗岩部では地層境界付近の測点を除けば、平均的な方向はほぼ N45° W であると推測できる。

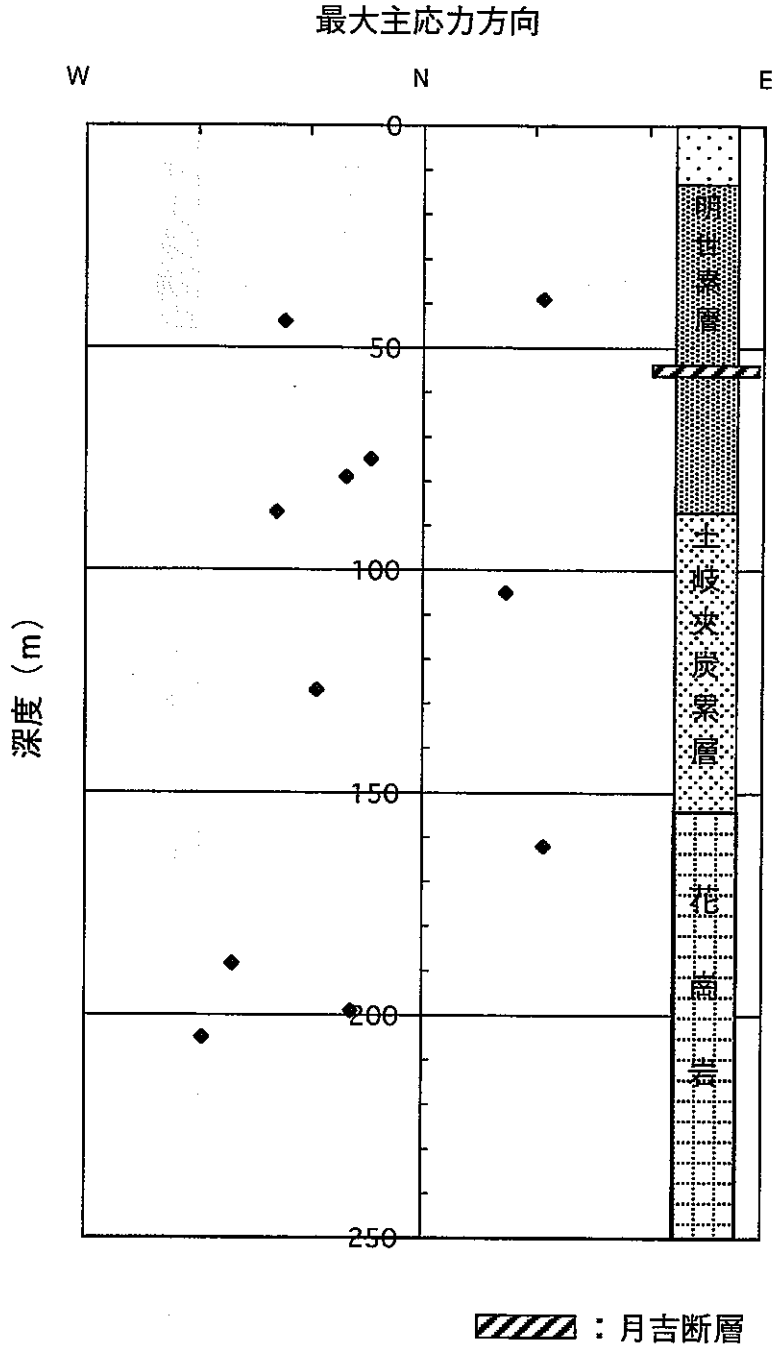
深度約 55m でボーリング孔と交差している月吉断層を挟んで初期応力状態に際立った変化は認められなかった。このことから、堆積岩部において月吉断層が現在の初期応力場へ与える影響はさほど大きくないと推測できる。

表－5.3.3　水平面内の初期応力分布

深度 (m)	岩種	σ_{max} (MPa)	σ_{max-p} (MPa)	σ_{min} (MPa)	θ_{max}	備考
39	明世累層	2.2	2.2	1.0	N32° E	
44		1.9	1.9	1.5	N37° W	
75		4.1	3.8	1.8	N14° W	
79		3.6	3.3	1.7	N20° W	
87	土岐夾炭累層	2.2	1.8	1.4	N39° W	
105		4.2	3.7	2.1	N22° E	既存亀裂
127		4.8	4.0	2.1	N28° W	
162	花崗岩	6.4	5.3	3.6	N32° E	
188.5		6.8	5.4	3.2	N51° W	
199		7.8	6.3	3.9	N19° W	
205		8.0	6.5	4.5	N58° W	



図－5.3.2　水平面内の初期応力値の分布



図－5.3.3　水平面内の最大主応力方向の分布

(3)三次元的な初期応力状態

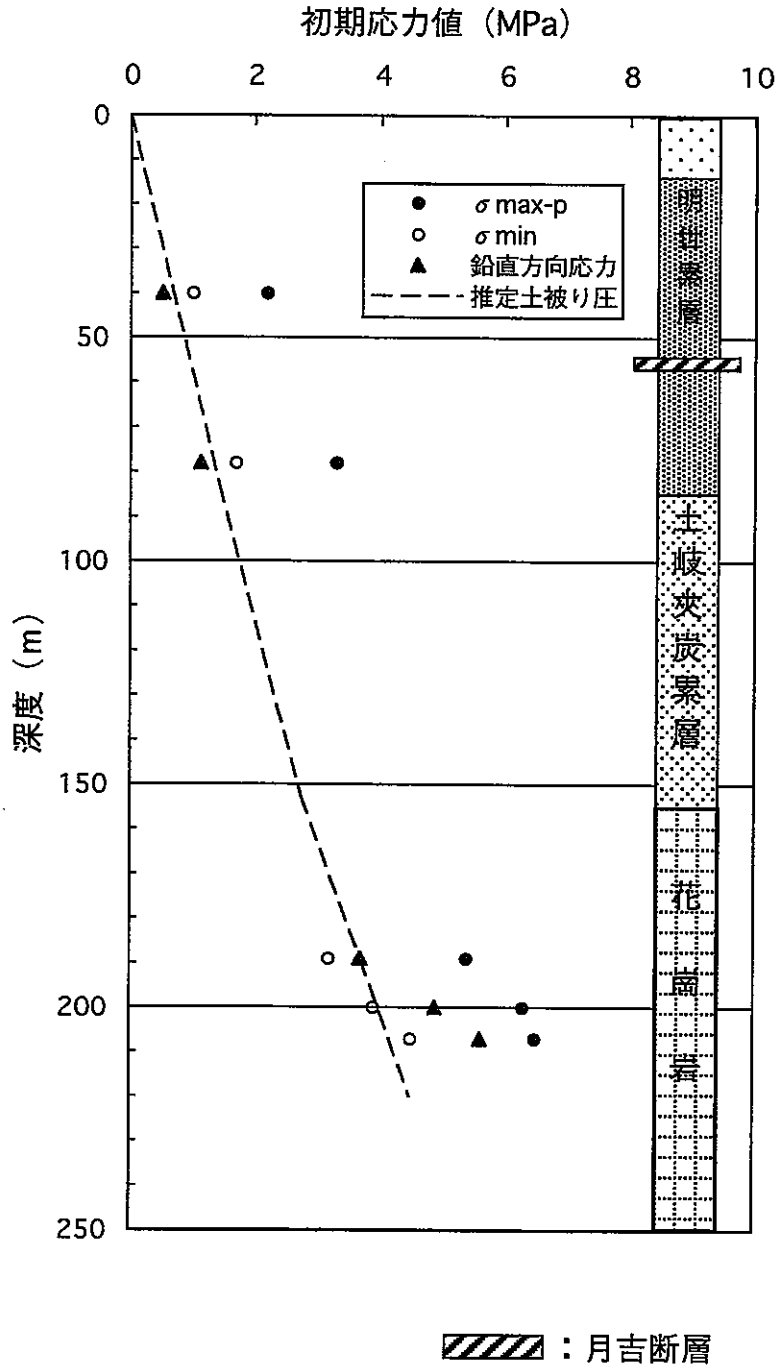
ＡＥ法によって求めた鉛直方向の初期応力値および水圧破砕法によって求めた水平面内の初期応力状態を組み合わせて、三次元的な初期応力状態について検討した。その際、水平面内の最大主応力値は間隙水圧を考慮した値を用いた。三次元的な初期応力状態を表－5.3.4 および図－5.3.4 に示す。欠測となっている深度 189m の鉛直応力値は、便宜的に推定土被り圧を用いて評価した。

三次元的な初期応力分布によると、堆積岩部（明世累層）と花崗岩部では三つの応力値（σ_{max}、σ_{min}、σ_v）の大小関係が異なっており、初期応力環境に違いがあることがわかった。堆積岩部（明世累層）では水平面内での最大主応力（σ_{max}）＞水平面内での最小主応力（σ_{min}）≒鉛直応力（σ_v）の遷移型であり、花崗岩部では水平面内での最大主応力（σ_{max}）＞鉛直応力（σ_v）＞水平面内での最小主応力（σ_{min}）の横ずれ断層型の応力環境であった。

この３つの応力値を主応力と仮定し、主応力比（σ_1／σ_3）について検討した。その結果、主応力比は、堆積岩部（明世累層）では 3～4 であり、花崗岩部では 1.4～1.7 であった。堆積岩部（明世累層）では、絶対値が小さいことと鉛直方向応力値が小さいため、異方的な応力状態として評価されたと考えられる。

表－5.3.4　三次元的な初期応力分布

深度 (m)	岩種	鉛直方向応力 (MPa)	σ_{max-p} (MPa)	σ_{min} (MPa)	θ_{max}
40	明世累層	0.52	2.2	1.0	N32° E
78		1.1	3.3	1.7	N20° W
189	花崗岩	3.6	5.4	3.2	N51° W
200		4.9	6.3	3.9	N19° W
207		5.6	6.5	4.5	N58° W



図－5.3.4　三次元的な初期応力分布図

5.4 AE 試験および水圧破砕試験のまとめ

東濃鉱山敷地内の地表から掘削した 99SE-02 孔から得られた岩石コアを用いてＡＥ試験を行い、鉛直方向の初期応力を測定した。また、同孔において、水圧破砕法によって 10 測点で初期応力測定を行い、水平面内の初期応力分布を求めた。さらに、それらを組み合わせて三次元的な初期応力状態について検討した。

その結果、ＡＥ法によって求められた鉛直方向の初期応力値については、深度の増加に伴い大きくなっている。それらを推定土被り圧と比較すると、堆積岩部と花崗岩部で異なる傾向が見られ、堆積岩部では推定土被り圧とほぼ等しく、花崗岩部では推定土被り圧に対して 1.3 倍程度の値であった。

水圧破砕法により求められた水平面内の主応力値については、最大主応力値は深度と共にほぼ直線的に増加する傾向にあるが、その増加の割合は花崗岩部の方が僅かに大きい傾向があった。最小主応力値は深度と共にほぼ直線的に増加する傾向にあり、岩種の影響によると考えられる不連続的な分布傾向は見られなかった。水平面内の最大主応力の方向については、概ね N60° W から N30° E の範囲内に分布しており、堆積岩部では比較的ばらつきが多いが、平均的な方向はほぼ南北方向であると推測でき、花崗岩部では堆積岩との境界に近い測点を除けば、平均的な方向はほぼ N45° W であると推測できる。

三次元的な初期応力分布によると、堆積岩部（明世累層）と花崗岩部では応力環境が異なっており、堆積岩部（明世累層）では遷移型であり、花崗岩部では横ずれ断層型であった。

これらの結果を検証するために、これまでに東濃鉱山で実施した初期応力測定の結果や地表の三角測量の結果から推定される東濃地域における最大圧縮方向と比較した。東濃鉱山において、これまでに地表から掘削した３本のボーリング孔を用いて同様の手法を用いて初期応力測定を実施した。それらによると、AE 法により求めた鉛直方向の応力値は推定土被り圧とほぼ等しく、水圧破砕法により求められた水平面内の主応力値は深度と共に増加し、その割合は花崗岩部の方が大きい傾向があった。水平面内の最大主応力方向は、堆積岩部と花崗岩では異なり、堆積岩部（土岐夾炭累層）では比較的ばらつきが多いが、平均的な方向はほぼ南北方向であり、花崗岩部では堆積岩との境界に近い測点を除けば、平均的な方向はほぼ N45° W であるという結果が得られた [7]。この結果は本孔（99SE-02 孔）で得られた結果と良く一致している。また、地表の三角測量の結果から推定される東濃地域における最大圧縮方向は N45° W であり [8]、花崗岩部の水平面内の最大主応力方向と一致している。堆積岩部での水平面内の最大主応力方向は、それらと異なっているが、東濃鉱山は土岐花崗岩体の盆地状の地形に形成された堆積岩内にあるため、その盆地地形の影響による可能性があると推察できる。

本孔（99SE-02 孔）で得られた測定結果は、これまでの同様の測定結果や測地学的な最大圧縮方向とほぼ同じ結果であり、今回の測定結果の信頼性を裏付けていると考えている。

6．総合評価

6.1 三次元的な初期応力状態について

6方向の供試体を用いた AE 試験により求められた三次元初期応力状態から鉛直方向応力と水平面内応力を計算した結果、および、鉛直方向の供試体を用いたＡＥ試験および水圧破砕試験によって得られた初期応力状態について、深度別にまとめたものを表－6.1.1 と図－6.1.1～3 に示す。なお、DRA については、約 2/3 にあたる試験片において明瞭な屈曲点が確認されなかったため、三次元初期応力状態の評価ができなかった。

鉛直方向の応力値については、多少のバラツキは認められるものの、堆積岩部では土被りと単位体積重量から算定される推定土被り圧と概ね等しい値が得られ、花崗岩部では推定土被り圧より若干大きい傾向が見られた。したがって、この地点の鉛直方向の初期応力値は、岩種により若干異なる傾向がある。水平面内の最大主応力値については、堆積岩部および花崗岩部において深度の増加と共にほぼ直線的に増加する傾向にあり、その勾配は花崗岩部の方が大きい傾向にある。水平最大主応力方向については、堆積岩部では概ね N-S～N45° W 方向であり、花崗岩部では多少のばらつきが見られるものの概ね N45° W 方向であるとみなすことができる。明世累層中で交差している月吉断層の上下で、応力状態の明瞭な違いは認められないことから、堆積岩部における月吉断層の現在の初期応力場への影響はさほど大きくないと推測できる。また、水平面内の最小主応力値は、岩種に関わりなくほぼ推定土被り圧とほぼ等しい。

三次元的な初期応力状態については、ほとんどの深度において水平面内の最大主応力が最も大きく、水平面内の最小主応力と鉛直応力はほぼ等しいかまたは大きくは違わない。応力環境については、堆積岩部と花崗岩部では異なっており、堆積岩部では３つの応力値の大小関係が異なっているが、“水平面内での最大主応力＞鉛直応力≒水平面内での最小主応力”の遷移型の応力環境である可能性が高い。花崗岩部では“水平面内での最大主応力＞鉛直応力≒水平面内での最小主応力”の遷移型か、または、“水平面内での最大主応力＞鉛直応力＞水平面内での最小主応力”の横ずれ断層型の応力環境である。

表－6.1.1　三次元的な初期応力状態

		深度 (m)	岩種	鉛直方向応力値 (MPa)	水平面内 最大主応力値 (MPa)	水平面内 最小主応力値 (MPa)	最大主応力方向
資環研実施分	ＡＥ法	40	明世累層	0.97	0.7	0.5	N18° W
		80		2.0	2.4	1.1	N43° W
		190	花崗岩	3.7	5.1	3.8	N33° W
		201		3.6	5.7	4.7	N34° W
		211		4.9	6.6	4.8	N27° W
サイクル機構 実施分	ＡＥ法 水圧破砕法	40	明世累層	0.52	2.2	1.0	N32° E
		78		1.1	3.3	1.7	N20° W
		189	花崗岩	－	5.4	3.2	N51° W
		200		4.9	6.3	3.9	N19° W
		207		5.6	6.5	4.5	N58° W

6.2 応力測定手法の適用性について

（1）二つのAE法の適用性について

資環研独自の客観的な判定基準により応力値を評価する方法とサイクル機構が推奨している予備試験により計測条件を設定して応力値を評価する方法について、鉛直方向の応力値を比較し、それらの適用性について検討した。二つの方法によって得られた応力値は概ね等しく、それらは土被りと単位体積重量から推定される土被り圧と概ね等しい値が得られた。これらのことから、今回用いた二つの AE 法は、どちらも初期応力測定手法としての適用性があると考えられる。

（2）DRAの適用性について

今回の DRA 試験では約 70%の供試体で応力の評価ができなかったが、評価できた供試体のうち鉛直方向の応力値については、AE 試験の結果とほぼ同じ値であった。それらの値は、土被りと単位体積重量から推定される土被り圧と概ね等しいことから、DRA によって得られた値の信頼性は高いと考えられる。また、昨年度の共同研究で実施した DRA 試験では、他の方法によって得られた値とあまり異ならない結果が得られていおり、初期応力測定方法としてのDRAの適用性はあると考えられる。

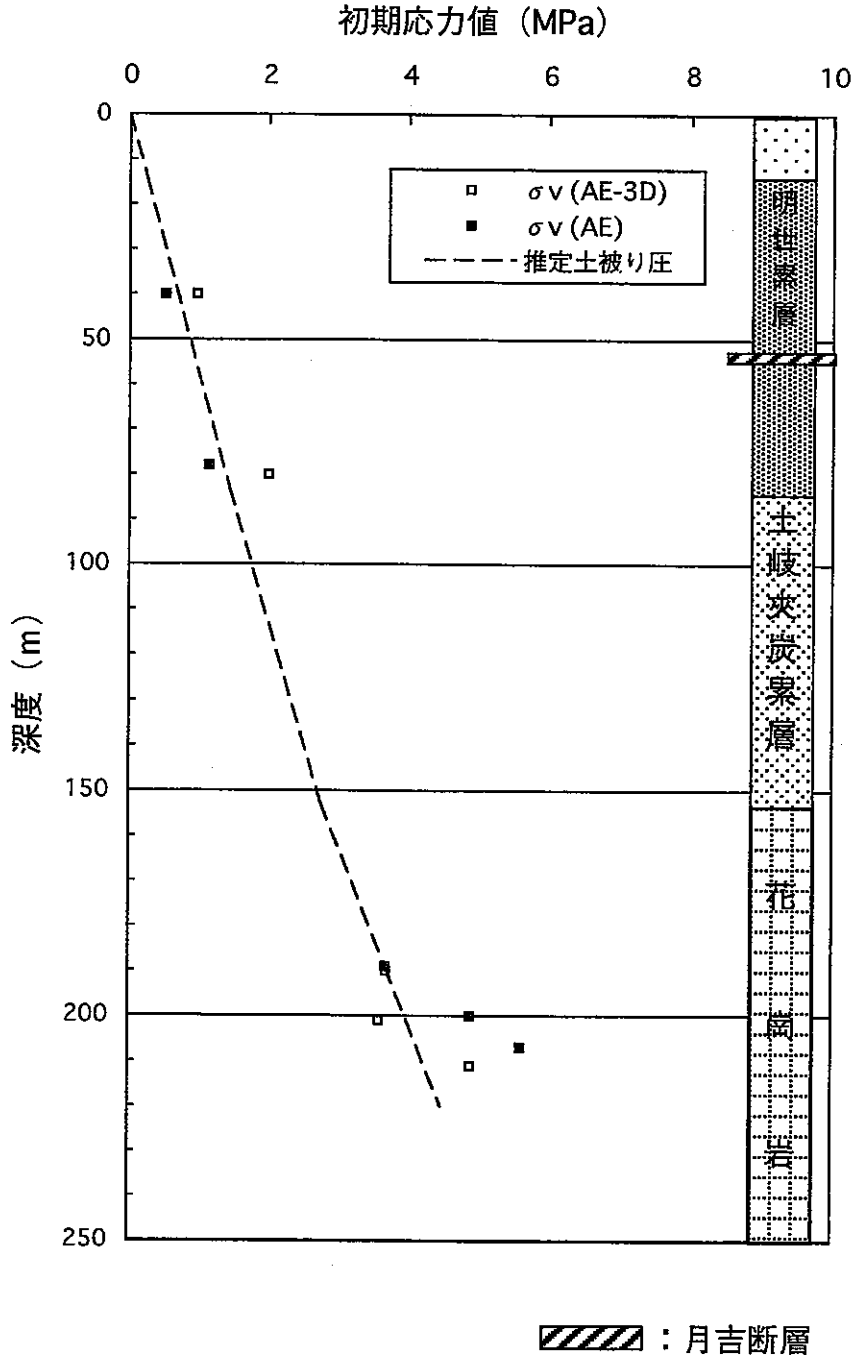
また、多くの研究者が DRA を初期応力測定手法として用いていることなどから、今回の DRA 試験において、測定できない供試体が多かったことについては、用いた試料が DRA には適さないものであったと考えられる。その原因については今のところ不明であるが、同様の測定事例を含めて検討し、岩種という観点での DRA の適用限界について明らかにする必要がある

（3）三次元的な応力評価手法の適用性について

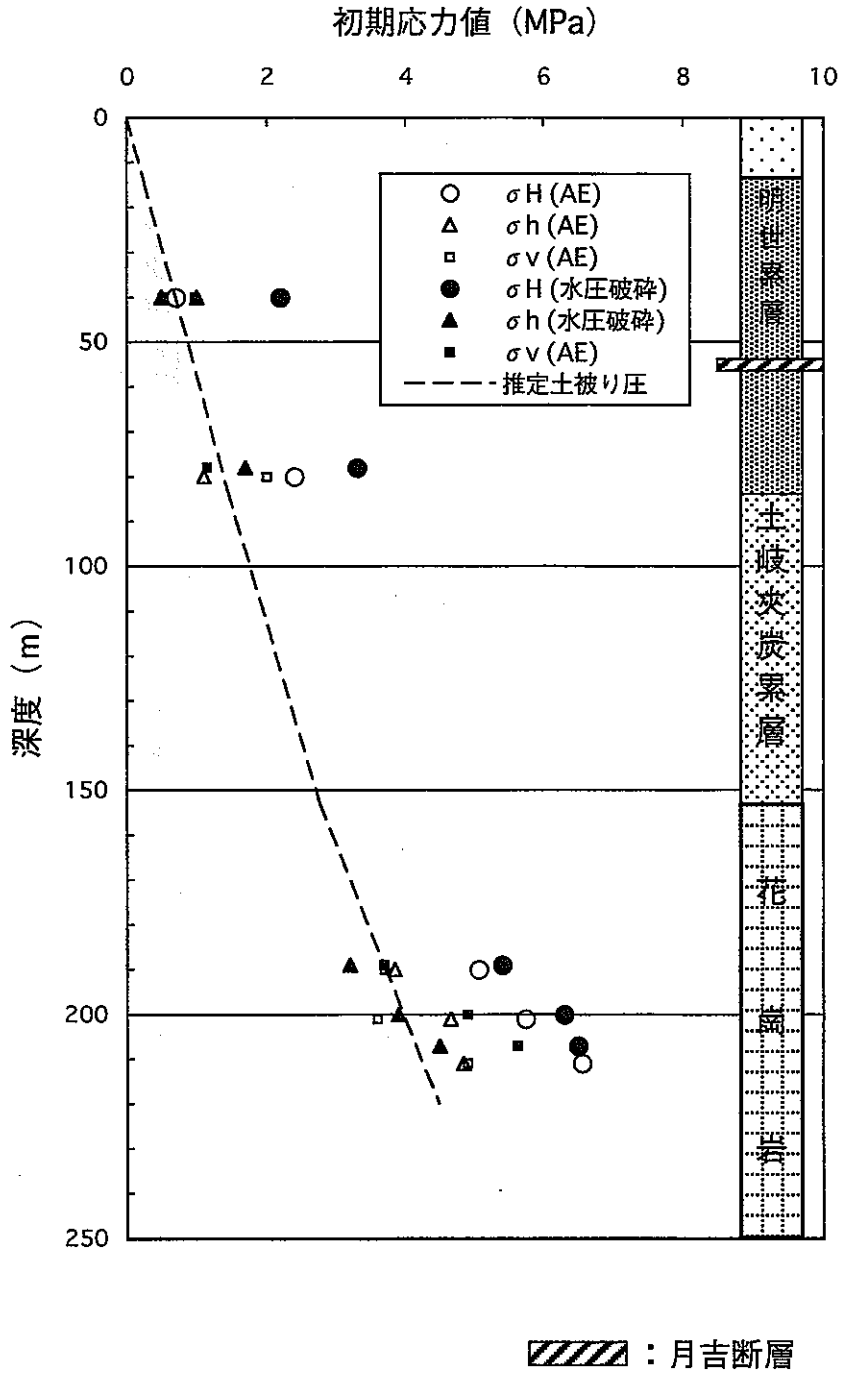
6方向の供試体を用いた AE 試験により求めた三次元的な初期応力状態と鉛直方向の供試体を用いたＡＥ試験および水圧破砕試験を組み合わせて評価した三次元的な初期応力状態を比較し、両手法の適用性について検討した。全体的な傾向として、AE 法と水圧破砕法を組み合わせた手法の方が、6方向の AE 法の値よりも大きい傾向にあったが、あまり大きな違いは見られなかった。堆積岩では応力値および水平最大主応力方向ともに、多少のバラツキは見られるものの、概ね大きな違いが見られなかった。花崗岩では応力値および方向ともにほぼ一致した結果が得られた。

これらの応力状態、特に花崗岩での応力状態については、これまでに東濃鉱山で実施した同様の手法を用いた初期応力測定の結果と比較的良い一致を示している。また、地表の三角測量の結果から推定される東濃地域の最大圧縮方向がほぼN45°Wであり、今回の結果の信頼性を裏付けていると考えている。

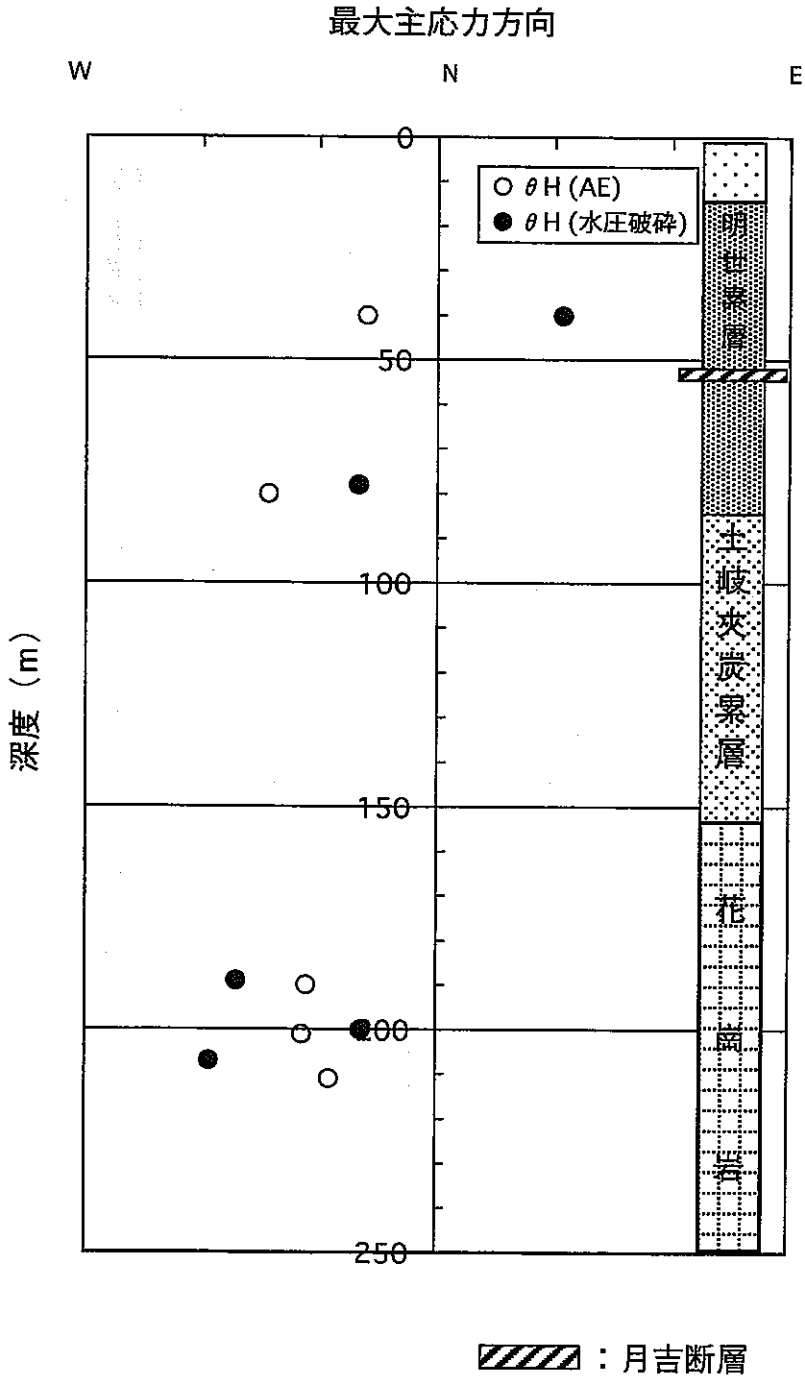
これらのことから、6方向の供試体を用いた AE 法という手法および AE 法と水圧破砕法を組み合わせた手法は、三次元的な初期応力測定手法としての適用性があることが示されるとともに、それらの手法の信頼性が向上したと考えられる。また、サイクル機構がこれまでに後者の手法により行った初期応力評価結果の信頼性を示していると考えられる。



図－6.1.1　鉛直方向の初期応力分布



図－6.1.2　三次元的な初期応力分布



図－6.1.3　水平面内の最大主応力方向

7．おわりに

東濃鉱山敷地内の地表から掘削した 99SE-02 孔において、二つの手法を用いて三次元的な初期応力状態の評価を行い、それぞれの手法の適用性について検討した。その結果、今回用いた二つの手法ともに三次元的な応力状態の評価手法としての適用性があることが示された。

今後の予定としては、原位置での初期応力値がその岩盤の一軸圧縮強度に比較的近いという特殊な場合では、現在の AE、DRA 試験のやり方では、各試験において応力値を評価するための情報が得られる前に、供試体が破壊し、応力の評価ができないことが考えられる。そこで、そのような特殊な条件でも応力の評価が可能な方法として、三軸応力状態で AE、DRA 試験ができる試験方法・応力評価手法の開発をする予定である。

また、一般的に用いられている応力測定方法は、その原理や測定方法・解析方法などに特徴があり、いずれの手法も絶対的な信頼性を有しているとは言い難い。このため、実際の測定においては、測定者のニーズ、現場状況や地質状況、時間的・経済的な制約条件の中で、測定者が最も有効な手法を選定しているのが現状である。将来的には、それぞれの応力測定方法において測定方法や評価方法を標準化することや適用する応力測定方法を選定する際の基準や指針となるものを開発することが望まれている。

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－岩盤空洞の安定性と地下水の影響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)動力炉・核燃料開発事業団技術資料：PNC TN7410 92-046、堆積岩地山における立坑周りの力学的・水理学的な特性変化、P6、1992

5)核燃料サイクル開発機構技術資料：JNC TJ7400 99-001、98SE-02 孔のコアを用いたＡＥ法による初期応力測定、P16、1999

6)核燃料サイクル開発機構技術資料：JNC TJ7400 99-001、98SE-02 孔のコアを用いたＡＥ法による初期応力測定、P5、1999

7)Maeda, N., Sato, T., Matsui, H. and Sugihara, K. (1999): Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state In soft sedimentary rock, Proceeding of THE '99 JAPAN-KOREA JOINT SYMOPSIUM ON ROCK ENGINEERING, pp.277~284.

8)国土地理院編：日本の地殻水平ひずみ、1990