

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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section.

Technology Management Division.

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

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

1999

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）－

瀬戸政宏*、前田信行**、松井裕哉**、佐藤稔紀**

要 旨

大規模地下空洞や大深度地下構造物の建設の際の岩盤における坑道の掘削は、岩盤本来の力学的・水理学的な物性に影響を与えると同時に坑道周辺の力学的・水理学的な環境に変化を促し、坑道の力学的な安定性や地下水流動などへ影響を与える。

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。フェーズ1では、AEの原位置計測や比抵抗トモグラフィの室内試験、フェーズ2では、弾性波・比抵抗トモグラフィの評価手法に関する研究、フェーズ3として、応力腐食割れや破壊過程のAE計測を実施した。本年度からフェーズ4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研究を開始した。本年度は、AE法、DRA法および応力解放法を用いて坑道周辺の二次応力測定を実施するとともに、測定地点の岩石の鉱物モード分析を実施した。

それらの結果の概要について、下記に述べる。

① AE法およびDRA法による二次応力測定

鉛直方向の二次応力値は、坑道からの深度が2～2.5mで極大となり、その値は4～5MPaであった。今回の試験において得られた応力値は、コア採取直後に実施した結果とコア採取後140日に実施した結果との差は認められなかった。

② 応力解放法による二次応力測定

応力解放法により得られた二次応力は、3地点とも類似した応力状態であった。最大主応力値は約3.5MPaで、その方向は概ねN60°W70°Nであり、中間主応力値は約2.5MPaで、その方向はN70°W20°Sであり、最小主応力値は2.3MPaで、その方向はN10°E0°Nであった。また、それらの鉛直成分はいずれも約3.5MPaであり、AE法とDRA法により得られた結果と良く一致している。

③ 鉱物モード分析

構成鉱物は石英、長石類、黒雲母、不透明鉱物であり、微細な細粒で全体的に微細な粘土鉱物が生じている。鉱物粒子は比較的新鮮であり、粒子は歪角礫状を呈している。

鉱物モード分析結果によると、基質が87%、石英が6.1%、長石類が1.5%、黒雲母が2.7%、不透明鉱物が0.1%、空隙が2.7%であった。

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：104F0056

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

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

— A study of evaluative method for rock cavern stability (H10) —

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

Abstract

The excavation of drift to construct the underground large cavern or large-scale structure influences the mechanical and hydrological properties of rock mass itself, and the change of the rock mass properties affects the mechanical and hydrological behavior of rock mass around the drift.

NIRE and JNC have been in collaboration since 1989 to develop the techniques for evaluating the rock mass behavior. In phase 1, from 1989 to 1991, in situ AE measurement and laboratory tests for resistivity tomography were carried out to understand the microcracking and deformation during the excavation. In phase 2, from 1992 to 1993, the collaborative research focussed on the development of seismic and resistivity tomographies. In phase 3, from 1994 to 1996, stress corrosion in rock and AE behavior of rock under compressive stress were fundamentally studied to understand the microcracking in rock in underground environment. Phase 4 has just started from 1998 to investigate the evaluation methods of in situ stresses in rock mass. In 1998 the stresses around the road way were evaluated using AE method, DRA method and over-coring method. Also, mineral mode analysis was carried out to know the rock property itself.

The main conclusions are as follows:

1) Stresses evaluated by AE and DRA methods

The vertical stresses varied with distance from drift and reached maximum of 4 to 5 MPa in the distance of 2 to 2.5 m from the drift. In this measurement any significant difference has not been found between the stresses evaluated after a few days and nearly 140 days from core drilling.

2) Stresses evaluated by over-coring method

The measurements were carried out at three different distances from the drift, and the results were almost same at the three places. The magnitude and orientation of maximum principal stress were about 3.5 MPa and N60W70N, respectively, and those of intermediate principal stress 2.5 MPa and N70W20S, respectively. The magnitude of minimum principal stress was about 2.3 MPa and its orientation was about N10E0N. The vertical stress was 3.5 MPa which was well consistent with the results of AE and DRA methods.

3) Mineral mode analysis

The rock consisted of quartz, feldspar, mica and opaque minerals, and the minerals are fine. Clay minerals were also included. The particles were almost fresh and conglomerated. The contents were 87 % of matrix, 6.1 % of quartz, 1.5 % of feldspar, 2.7 % of mica, 0.1 % of opaque and 2.7 % of porosity.

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

Agreement No. : 104F0056

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.

目 次

1. はじめに	1
2. 目的	2
2.1 共同研究の目的	2
2.2 本フェーズの目的	2
2.3 本年度の目的	2
3. 研究概要	3
3.1 研究内容	3
3.2 研究分担	3
4. 研究成果	4
4.1 AE法およびDRA法による二次応力測定	4
4.1.1 はじめに	4
4.1.2 試験の概要	5
4.1.3 試験結果と考察	7
4.1.4 まとめ	9
4.2 応力解放法による二次応力測定	49
4.2.1 概要	49
4.2.2 地質概要	49
4.2.3 測定方法	49
4.2.4 測定結果	50
4.2.5 考察	51
4.3 鉱物モード分析	71
4.3.1 概要	71
4.3.2 測定方法	71
4.3.3 測定結果	72
5. 総合評価	77

1. はじめに

大規模地下空洞や大深度地下構造物の建設の際の岩盤における坑道の掘削は、岩盤本来の力学的・水理学的な物性に影響を与え、坑道周辺の力学的・水理学的な環境に変化を促し、坑道の力学的な安定性や地下水流動などへ影響を与える。核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）の東濃地科学センターでは、坑道掘削に伴う物性変化の定量的評価のために、国内外の大学・研究機関等との協力を図りつつ、種々の研究開発を進めている。

その中で、工業技術院資源環境技術総合研究所（以下、資環研）とは、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。これまでに本共同研究では、フェーズ1（H元～H3）として、A E（Acoustic Emission）原位置計測やA E計測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、弾性波トモグラフィと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。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、堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの研究、堆積性軟岩の破壊過程でのA E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。

本年度から3年計画で、フェーズ4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、研究を実施している。そのうち、本年度は、A E法、D R A法および応力解放法を用いて坑道周辺の二次応力測定を実施した。また、測定地点の岩石の鉤物モード分析を実施した。

ここでは、平成10年度の研究成果として、下記のことについて報告する。

- ①A E法およびD R A法による二次応力測定
- ②応力解放法による二次応力測定
- ③鉤物モード分析

2. 目的

2.1 共同研究の目的

大規模地下空洞や大深度地下構造物の建設の際に、坑道掘削に伴い周辺岩盤の力学的・水理学的な物性が変化する領域が生じると考えられる。このような領域は、坑道の力学的安定性に影響を及ぼすと共に、新たな物質の移行経路を形成する可能性がある。このような観点から、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重要である。しかし、坑道掘削に伴う岩盤の物性変化を計測・評価する手法は確立されているとはいえない。このため、掘削に伴う物性変化に関する計測・評価手法の開発を目的として、資環研との共同研究を開始した。

2.2 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。本フェーズでは、昨年度までのこれらの試験結果などを踏まえ、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などについて検討することとした。具体的には、東濃鉱山において、掘削によって生じた坑道周辺の二次応力分布を把握するためにA E法、D R A法および応力解放法によって応力測定を実施する。また、地表から掘削した試錐孔を用いて、初期応力状態を把握するために、A E法、D R A法および水圧破碎法などによって応力測定を実施する。

2.3 本年度の目的

本年度は、掘削によって生じた坑道周辺の二次応力分布を把握するためにA E法、D R A法および応力解放法によって坑道周りの応力測定を実施する。また、二次応力測定を実施した地点の岩石の構成鉱物の観察および量比の測定を行うために、鉱物モード分析を実施する。

3. 研究概要

3.1 研究内容

① A E法およびD R A法による二次応力測定

東濃鉦山の北延N A T M坑道の側壁から5 m 以内の定方位岩石コアを用いてA E試験およびD R A試験を行い、鉛直応力を求め、坑道周辺の二次応力分布について検討する。

② 応力解放法による二次応力測定

東濃鉦山の北延N A T M坑道において、埋設型ひずみ計を用いた応力解放法によって3点（坑壁から0.5,1.0,1.5m）で応力測定を行い、坑道周辺の二次応力分布について検討する。

③ 鉦物モード分析

二次応力測定を実施した地点の岩石試料を用いて、鉦物モード分析を実施し、構成鉦物の観察および量比の測定を行う。

④ 総合評価

上記の結果を総合的に比較・検討して、掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学的安定性の評価を行う。また、両手法の適用性について検討する。

3.2 研究分担

共同研究の分担を表-3.2.1に示す。

表-3.2.1 共同研究分担表

研究項目	資 環 研	サイクル機構
① A E法および D R A法による二次応力測定	○	
② 応力解放法による二次応力測定		○
③ 鉦物モード分析		○
④ 総合評価	○	○

4. 研究成果

4. 1 AE 法および DRA 法による2次応力測定

4. 1. 1 はじめに

地圧の計測技術を分類すると、水圧破碎法や応力解放法に代表される原位置でのボーリング孔を用いる方法と原位置から採取された岩石サンプルから地圧を推定する方法の2種類に大別できる。現在、最も適用例が多く、かつ信頼性の高い技術としては水圧破碎法と応力解放法があげられる。また、地下から主にボーリングによって採取された岩石コアサンプルを用いて地圧を推定する方法は、まだ確立された技術とはなっていないが、簡便に、迅速に地圧を計測できる方法として今後有望な方法である。この岩石コアサンプルからの地圧推定法の代表的な方法としては、ここで対象とするアコースティックエミッション (Acoustic Emission、以下 AE と略称) のカイザー効果を応用した方法と変形率変化法 (Deformation Rate Analysis、以下 DRA と呼称) があり、この他に、DSCA (Differential Strain Curve Analysis)、ASR (Anelastic Strain Recovery) 法があげられる。

カイザー効果とは、一度応力履歴を受けた固体材料は再載荷の際には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ものである。AE のカイザー効果を利用して地圧を推定した事例は過去にもいくつか発表されている「金川ほか (1981)、道広ほか (1988)、Momeyez and Hassani (1992)、Seto et al. (1997)、瀬戸ら (1998)、伊藤ら (1998)」。

一方、DRA は、山本らによって提案された方法「詳細は Yamamoto et al. (1990)」で、応力履歴を受けた岩石内の、既に発生しているクラックが載荷によって閉塞するときの変形特性と、先行応力以上の載荷によって新たなクラックの成長が発生する場合の変形特性に相違が生じることを利用する方法である。すなわち、岩石試験片に一軸の繰り返し載荷を与え、各サイクルの同応力レベルにおけるひずみ差を求め、このひずみ差の挙動の相違から先行応力を求めることになる。

AE 法と DRA については、金川ら (1977)、山本ら (1983) によって提案されて以来、多くの研究者によって実験的研究が行われている。しかし、AE 法、DRA とともに標準的な地圧測定法として確立するためにはまだ明らかにすべき課題が残されている。その一つが経過時間の問題である。これは、コアを採取してから地圧測定の試験までに経過する時間が測定精度にどの程度、どのように影響するかという問題である。過去にもこの問題についていくつかの研究が行われているが、岩石が以前に受けた先行応力をどの位の期間保持できるかの見解には、数日のオーダーから数年のオーダーまで大きな開きがあるのが実状である「Goodman (1963)、Kurita and Fujii (1977)、Yoshikawa and Mogi (1981)、瀬戸ら (1992; 1998)」。また、その他の課題としては、AE 法と DRA では試験片に一軸圧縮応力を加え、AE 発生急増点と変形率の変化点によって先行応力を決定するが、なぜ一軸圧縮試験によって載荷軸方向の地圧成分を求められるのかという問題がある。過去にもいくつかの検討結果があるが、AE 法で認められる急増点は偏差応力に対応する「Hughson and Crawford (1987)」、試験時の載荷軸方向に平行な先行応力に相当する「道広ほか (1988)、瀬戸ら (1998)、後藤ら (1999)」、封圧下で先行応力を受け

た岩石の DRA による軸応力推定は大きな誤差を伴う「小島ら(1992)」等の見解があり、結論は明らかになっていない。すなわち、岩石コアに記憶されている地圧の記憶メカニズムについての科学的な解明がまだ十分ではない。

本研究では、これらの問題に関する基礎的な検討データを示すとともに、AE 法、DRA の二次応力推定への適用性を検証することを目的として、核燃サイクル機構東濃鉱山で採取された 2 種類のコアを用いて鉛直応力推定を試みた。

4. 1. 2 試験の概要

(1) 岩石コア

試験に用いた岩石コアは核燃サイクル機構東濃鉱山で採取された。今回の試験では、2 本のボーリング孔 (98SI-04 孔と 98SI-05 孔) から採取されたコアを試験対象としたが、これらボーリング孔は被り深さ約 140m の地点にある本延坑道の側壁から水平に約 5m 掘削されたものである。

2 本のボーリング孔から採取したそれぞれのコアから試験片を準備したが、その寸法、形状は直径 30mm、長さ約 65~73mm の円柱形である。本試験では、坑道周辺の鉛直 2 次応力の推定を目的としたため、試験片を作成した方向はすべて試験時の载荷軸方向が原位置の鉛直応力方向に一致するように作成した。

試験片の作成では、まず、湿式で 30mm のコアボーリングを行い (図 4.1.1)、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、コアボーリングは、出来るだけ多くの試験片を作成するために、図 4.1.2 に示すようにできる限りボーリングを密に行った。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の間実験室に保管した。試験片の保管状況を図 4.1.3 に示す。

(2) 試験方法

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応力速度 (0.84 MPa/min) 条件で行い、所定の最大応力レベルまで载荷と除荷を 5 回繰り返した。このときの最大応力は、6~7 MPa の範囲に設定した。

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、载荷容量は 1,000 kN のものである。岩石試験片には単軸のひずみゲージ (ゲージ長: 20 mm) を 2 枚貼り、試験時の軸ひずみを計測した。载荷開始前には、軸ひずみが 2 枚のひずみゲージすべてにおいて 0.6MPa まで 1% 以内で一致するように载荷板を調整し、载荷が片当たりにならないようにした。

(3) AE 計測方法と応力推定法

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。図 4.1.4 に試験状況図を示す。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 センサーで検出された AE 信号は、プリアンプで 40dB 増幅し、その後 AE 解析装置 (NF 製 7661AE モジュール) に送られ更に 40dB 増幅して解析に供し

た。また、AE をカウントする際のしきい値は 150mV であった。AE 解析装置に送られた AE 信号を用いて、リングダウンカウント、エネルギー等の特性パラメータ解析を行い、応力との関係を求めた。なお、以下に述べる AE の解析結果の表示は、AE リングダウンカウントの累積数の変化を用いて結果例を示す。

AE の急増点を特定し推定応力レベルを決定する方法は、下記の手順にしたがって行った。

- ① まず、応力-累積リングダウンカウント数関係図を作成する。
- ② 次に、累積リングダウンカウント数の最大値で正規化した応力-正規化リングダウンカウント数関係図を作成する。
- ③ 累積リングダウンカウント数変化曲線について 40 点間の傾斜を計算し、連続する傾斜の変化率を求める。
- ④ その変化率が 0.2 を越える点を AE 急増点として読み取る。

(4) DRA による先行応力推定

DRA による先行応力推定においては、ひずみ差-応力線図にいくつかのパターンが出現し、中には屈曲点として読み取れる可能性がある応力レベルが複数存在する場合がある。資環研が有するデータによるひずみ差-応力関係の形としては、図 4.1.5 に示す 4 パターンが代表的である。これらのパターンは、岩種、先行応力レベル等に影響されると推察される。また、ひずみ差を求めるときにどの载荷サイクルのデータを用いるかによっても形が異なってくる。それぞれのパターンにおいて、屈曲点として読み取る点を矢印で示してある。

本試験で対象としたコアにおいて認められたひずみ差-応力関係のパターンとしては、図 4.1.5 に示したパターンのうち Type-1 と Type-4 の 2 種類であった。このひずみ差変化から屈曲点を客観的に読み取るために、次の手順にしたがって屈曲点を特定した。

- ① ひずみ差-応力関係を求めた後、得られたひずみ差の最大値で正規化し、正規化ひずみ差-応力関係図を作成する。
- ② 次に、低い応力レベル側から連続する 5~10 個のひずみ差データの移動平均を計算する。この操作をひずみ差データ 1 個分ずつずらしながら最大応力レベルまで繰り返す。
- ③ その後、連続する移動平均値の変化率を計算し、移動平均変化率と応力との関係図を作成する。
- ④ この移動平均変化率が 2% を越える点を屈曲点として読み取る。

ここで定めた 2% という基準値は、今回の試験対象とした堆積性軟岩に物性が近い来待砂岩、田下凝灰岩といった堆積性岩石の基本的なカイザー効果確認実験を行って定めた値である。

また、従来の DRA に関する研究報告では、ひずみ差を求める際に 1 回目载荷時のひずみ値を利用しない方が良い「Utogawa et al.(1997)」と述べられているが、本試験ではすべて 1 回目のひずみ値を基準にしてひずみ差を求めて応力推定を実施した。

(5) 経過時間の影響

先述したように、岩石コアに記憶された応力情報がいつまでコア内に保持されるかについては諸説がある。本研究では、コアを採取してから数週間以内に行った試験結果と数ヶ月後に実施した試験結果を比較して、この経過時間の影響について検討した。98SI-04 コアについては、ほとんどの試験を数週間以内に終了した。98SI-05 コアについては、ボーリング実施後3~5ヶ月の範囲で試験を実施した。

4. 1. 3 試験結果と考察

(1) 強度試験結果

鉛直二次応力推定試験を開始するにあたって、試験時に試験片に与える最大応力を決定するために一軸圧縮強度試験を実施した。試験では、試験片に前節で述べたと同じ要領でひずみゲージを貼り、ひずみの測定を行った。

図 4.1.6 は、コア試験片作成直後に実施した強度試験結果の一例である。試験片は PN4-130 で、98SI-04 コアのうち深さが 1.30m 地点に相当するものである。一軸圧縮強度は 7.5MPa で、50%強度でのヤング率は 1.31 GPa、ポアッソン比は 0.29 であった。コア試験片採取直後に行った強度試験数は 3 回であるが、平均一軸圧縮強度は 7.3 MPa であり、ヤング率は 1.32 GPa、ポアッソン比は 0.29 であった。

ここで決定された強度に基づいて、試験では約 6 MPa を最大載荷応力として最大 5 回の繰り返し一軸圧縮載荷試験を行った。

図 4.1.7 は、コア試験片作成後 5 ヶ月が経過した後に実施した一軸圧縮強度試験の結果の一例である。試験片は PN5-435 で、98SI-05 コアのうち深さが 4.35m 地点のものである。一軸圧縮強度は 5.7MPa、50%ヤング率は 1.05 GPa である。本試験片のほかに 2 回の強度試験を行ったが、平均一軸圧縮強度は 5.7MPa、ヤング率の平均は 1.2 GPa であった。コア試験片採取直後の試験結果と比較すると強度、ヤング率ともに低下している。また、ポアッソン比は平均で 0.31 となり、わずかに増加している。したがって、コア試験片作成 5 ヶ月後に行った試験では、試験片の経時変化による強度低下が発生していたために、二次応力推定試験時の最大載荷応力を当初決定した応力よりも低い値、すなわち 4.5~5MPa の間に設定した。

(2) 98SI-04 コアの結果

98SI-04 コアにのうち、コア採取後 2~3 週間の間で実施した試験によって AE 法と DRA により推定された鉛直応力の結果を表 4.1.1 に示す。表中のサンプル番号において、“PN4” は 98SI-04 コアであることを示し、それに続く数字は坑壁からの深度を示している。例えば、“PN4-117” は、坑壁から 1.17 m の部分から作成された試験片であることを示している。

AE 法による推定結果例を図 4.1.8~4.1.13 に示す。同図においては、上段に累積 AE リングダウンカウントと応力との関係を、下段に累積リングダウンカウントの傾斜の変化率と応力との関係を示している。推定では、下段に示した累積 AE リングダウンカウントの傾斜の変化率が 0.2 を越えた時点での応力を推定値として読み取った。同

図には、それぞれ読み取った応力値をあわせて示してある。

図 4.1.14 は、AE 法による推定応力をボーリング深さ方向の変化として示している。傾向としては、深さが 1.5m 以浅での推定値は約 2MPa で、1.7~2.5m の深さにおいて推定応力値は 3.5~5MPa の範囲に広く分布している。また、ボーリングの最深部に相当する深さ 4.5m 以上の地点では 3~4MPa の範囲にあった。すなわち、AE 法によって推定された鉛直二次応力分布としては、深さ 1m 坑道周辺では緩みによると考えられる応力低下がみられるとともに、深さ 2~2.5m において応力集中が発生しているものと推察される。

表に示した結果のうち、DRA による推定例を図 4.1.15~4.1.20 に示す。同図においては、上段に正規化したひずみ差と応力との関係を、下段に移動平均したひずみ差の変化率と応力との関係を示している。ここで示した正規化したひずみ差は、载荷 5 回目と 1 回目のひずみの結果を用いて算出したものである。推定では、移動平均した正規化ひずみ差の変化率が 2% を越えた時点での応力を推定値として読み取った。同図には、それぞれ読み取った応力値を併せて示してある。

図 4.1.21 は、DRA による推定応力をボーリング深さ方向の変化として示している。傾向としては、深さが 1.5m 以浅での推定値は 3~3.5MPa で、1.7~2.5m の深さにおいて推定応力値は 4~5MPa の範囲に分布している。また、ボーリングの最深部に相当する深さ 4.5m 以上の地点では 3~4MPa の範囲にあった。すなわち、DRA によって推定された鉛直二次応力分布は、AE 法による推定と同様に、深さ 1m 坑道周辺では緩みによると考えられる応力低下がみられるとともに、深さ 2~2.5m において応力集中が発生しているものと推察される。しかし DRA では、坑道からの深度が浅い地点での推定応力値が、AE 法のそれより大きく推定されている。

なお、本コアにおいては、応力集中が認められた深度 2.5m 地点とボーリング孔最深部との間の推定値が希薄になっている。これは、深度が 3~4.5m の間の試験片の多くが、試験片作成過程（コアボーリング、端面整形）で破壊してしまったり、また試験片として作成できても試験中に破壊したり、試験直前にひび割れが発見されたりして、この区間の試験ができなかったことに起因している。

(3) 98SI-05 コアの結果

98SI-05 コアのうち、コア採取後 2~3 週間の間で実施した試験によって AE 法と DRA により推定された鉛直応力の結果を表 4.1.2 に示す。表中のサンプル番号において、“PN5” は 98SI-05 コアであることを示し、それに続く数字は坑壁からの深度を示している。本コアについては、この期間に実施した試験の数は少なく、応力推定を行った試験個数は 5 個であった。また、深度的にも限定されており、深度 1m 以浅のものが 4 個、深度が約 1.8m のものが 1 個であった。しかしながら、AE 法及び DRA によって推定された応力値は、ともに同時期に実施された 98SI-04 コアからの同一深度での推定結果とよく一致した結果となっている。

次に、98SI-05 コアのうち、コア採取後 73 日から 101 日の期間で実施した試験での推定結果を表 4.1.3 に示す。表中において、DRA 推定結果の欄に×印を示したものは、試験時に载荷 2 回目までに試験片が破壊してしまい、DRA による推定ができなかった

ものであることを示している。

AE法による推定結果例を図4.1.22～4.1.27に示す。同図においては、上段に累積AEリングダウンカウントと応力との関係を、下段に累積リングダウンカウントの傾斜の変化率と応力との関係を示している。推定では、98SI-04コアの場合と同様に、下段に示した累積AEリングダウンカウントの傾斜の変化率が0.2を越えた時点での応力を推定値として読み取った。同図には、それぞれ読み取った応力値をあわせて示してある。

図4.1.28は、AE法による推定応力をボーリング深さ方向の変化として示している。傾向としては、深さが2.5mに達するまで、深度の増加に伴って推定応力は約2.5MPaから約4MPaまで増加していき、その後深度の増加に伴って減少するという傾向を示している。応力分布の傾向は、98SI-04コアにおいて認められた傾向とほぼ同様で、深度が浅い領域が低応力域となっており、応力の極大（応力集中）が深度2～2.5mの範囲に存在している。98SI-04コアにおける試験では、応力集中域からボーリング孔最深部までの変化がコア不良によって把握できなかったが、本結果によれば応力集中が認められる深度約2.5m地点から孔最深部に向かって応力が低下していく傾向が明瞭に示されている。

表4.1.4は、98SI-05コアのうち、コアを採取してから140日後に実施した試験による推定結果を示している。表中で、×印が付してあるデータは、試験途中で試験片が破壊してしまい推定ができなかったものである。図4.1.29～4.1.31にAE法による推定結果例を、図4.1.32～4.1.34にDRAによる推定結果例を示す。推定された応力分布の傾向としては、AE法の場合では、深度が浅い部分での推定値は1MPaと低く、深度が約3m付近で極大値を示している。一方、DRAによる推定結果は、深度が浅い領域でAE法による推定値より大きくなっているが、この傾向は先に述べた経過時間がこれより短い場合においても認められたものである。深度が3.25mでの推定値が極大値を示した点は、AE法による推定と同じであるが、浅い領域での推定値との差は小さく、深度方向への応力分布のコントラストはAE法による推定結果と比べて希薄である。また、先に表4.1.1～4.1.3に示した推定結果との比較から経過時間の影響についてみると、推定された応力値の間にはAE法、DRAともに経過時間による有意な変化は認められない。

4.1.4 まとめ

98SI-04孔と98SI-05孔から採取されたコアを用いて、坑道周囲の鉛直二次応力の推定をAE法とDRAを用いて実施した。その結果、

- ① 98SI-04コアについて、コア採取後2～3週間の範囲で行ったAE法による推定結果によれば、図4.1.14に示しように鉛直二次応力は坑道からの深度が2～2.5mで極大となり、その応力値は4～5MPaの範囲であった。
- ② 98SI-04コアについてのDRAによる推定結果では、図4.1.21に示したように二次応力の分布の傾向はAE法によるそれとほぼ同様であり、2～2.5mの深度で極大値を示し、その値も4～5MPaの範囲であった。しかし、深度が2m以浅の領域での推定値はAE法に比較して高い値であった。
- ③ 98SI-05コアについて、コア採取後2～3週間の範囲で行ったAE法とDRAによる

推定結果は、試験個数は少ないものの 98SI-04 コアから推定された応力値の範囲内に入っており、ボーリング孔の場所が異なることによる影響は小さいものと考えられる。

- ④ 98SI-05 コアについて、コア採取後 73～101 日の範囲で実施した AE 法による推定結果によれば、図 4.1.28 に示したように鉛直二次応力は深度に伴って増加し、2～2.5m で極大となり、その後は深度の増加に伴って減少するという傾向を示した。求められた二次応力値は、98SI-04 コアから求められたものとほぼ同じであった。
- ⑤ 98SI-05 コアについて、コアを採取してから 140 日後に行った試験結果によれば、試験個数は少ないものの有意な経過時間の影響は認められなかった。

参考文献:

- Goodman, R.E. (1963) : Geol. Soc. Amer. Bull., 74, 487-490.
- Hughson, D.R. and A.M. Crawford (1987) : Proc. 6th Int. Congress on Rock Mech., 2, p.981-985.
- 伊藤久夫・桑原保人・西沢修・山本清彦・工藤里絵・横山幸也 (1998) : 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、p.689-694.
- 後藤史樹・島田英樹・松井紀久男・瀬戸政宏 (1999) : 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集、pp.261-265
- Kaiser, J (1953) : Archiv. für das Eisenhüttenwesen, 1/2, p.43-45.
- 金川忠・林正夫・仲佐博裕 (1977) : 土木学会論文報告集、第 258 号、pp.63～75.
- 金川忠・北原義浩・林正夫 (1981) : 電力中央研究所報告、研究報告 381004.
- Kurita, K. and N. Fujii (1979) : Geophys. Res. Lett., 6, p.9-12.
- Momeyev, M. and F.P. Hassani (1992) : Rock Mechanics edited by Tillerson and Wawersik, Balkema, Rotterdam, p979-987
- 道広一利・畑浩二・藤原紀夫・吉岡尚也 (1988) : 材料、第 37 巻、第 423 号、pp.1449-1455.
- 村山朔郎・道広一利・斉藤二郎・吉岡尚也 (1985) : 土木学会論文集、第 364 号/III-4、pp.107-112.
- 瀬戸政宏・歌川学・勝山邦久 (1992) : 土木学会論文集、No.445/III-18、pp.93-100.
- 瀬戸政宏・E.Villaescusa・歌川学・勝山邦久(1998) : 資源・素材学会誌、Vol.114、No.12、pp.845-855
- Seto, M., Utagawa, M., Katsuyama, K., Nag, D.K. and V.S. Vutukuri (1997) : Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol.34, No.3/4, p.638.
- Utagawa, M., Seto, M. and K. Katsuyama (1997) : Proc. Int. Symp. on Rock Stress, pp.187-192.
- 山本清彦・桑原保人・平澤朋郎 (1983) : 地震学会春季大会講演予稿集、No.1
- Yamamoto, K., Kuwahara, Y., Kato, N. and T. Hirasawa (1990) : Tohoku Geophysical Journal (The Science Reports of Tohoku University, Series 5), Vol.33, No.2, p.127-147.
- Yoshikawa, S. and K. Mogi (1989) : J. of Acoustic Emission, Vol.8, No.4, p.113 - 123.

表4. 1. 1 98SI-04コアからの推定結果
(コア採取から2~3週間後の試験)

サンプル番号	深度 (m)	推定応力(MPa)		試験日 (dd/mm/yy)
		AE法	DRA	
PN4-030	0.3	3.7	3.1	2/9/98
PN4-060	0.6	2	2.7	9/9/98
PN4-083	0.83	2.2	3.3	2/9/98
PN4-095	0.95	2.4	3.6	9/9/98
PN4-117	1.17	1.4	3.5	2/9/98
PN4-174	1.74	4.6	4.1	2/9/98
PN4-203	2.03	5.1	4.6	9/9/98
PN4-215	2.15	3.7	4.5	8/9/98
PN4-233	2.33	5.1	4.3	10/9/98
PN4-237	2.37	4.4	4.2	2/9/98
PN4-249	2.49	3.5	4.6	10/9/98
PN4-265	2.65	4.2	4.3	10/9/98
PN4-276	2.76	3.9	4.1	8/9/98
PN4-335	3.35	2.7	4.6	2/9/98
PN4-470	4.7	3.2	3	8/9/98
PN4-474	4.74	3.9	3.7	13/9/98

表4. 1. 3 98SI-05 コアからの推定結果
(経過時間:73~101日)

サンプル番号	深度 (m)	推定応力(MPa)		試験日 (dd/mm/yy)
		AE法	DRA	
PN5-012	0.12	2.7	3.2	1/12/98
PN5-056	0.56	2.2	3.7	1/12/98
PN5-112	1.12	2.5	2.4	1/12/98
PN5-117	1.17	3.7	3.6	1/12/98
PN5-177	1.77	4.2	4	1/12/98
PN5-222	2.22	3.2	×	1/12/98
PN5-234	2.34	4	×	1/12/98
PN5-250	2.5	4.3	4.4	6/11/98
PN5-285	2.85	3.8	×	1/12/98
PN5-310	3.1	3.6	3.7	6/11/98
PN5-330	3.3	3.4	4.1	6/11/98
PN5-400	4	2.9	3.5	6/11/98
PN5-425	4.25	3	4.2	2/11/98
PN5-450	4.5	2.5	3	6/11/98

表4. 1. 4 98SI-05コアからの推定結果
(試験までの経過時間: 140日)

サンプル番号	深度 (m)	推定応力(MPa)		試験日 (dd/mm/yy)
		AE法	DRA	
PN5-021	0.21	1	3.3	8/1/99
PN5-039	0.39	1	3.2	8/1/99
PN5-298	2.98	2.9	×	8/1/99
PN5-325	3.25	4.1	4.2	8/1/99
PN5-370	3.7	×	×	8/1/99
PN5-395	3.95	2.6	3.9	8/1/99
PN5-430	4.3	3.8	3.9	8/1/99
PN5-490	4.9	×	×	8/1/99

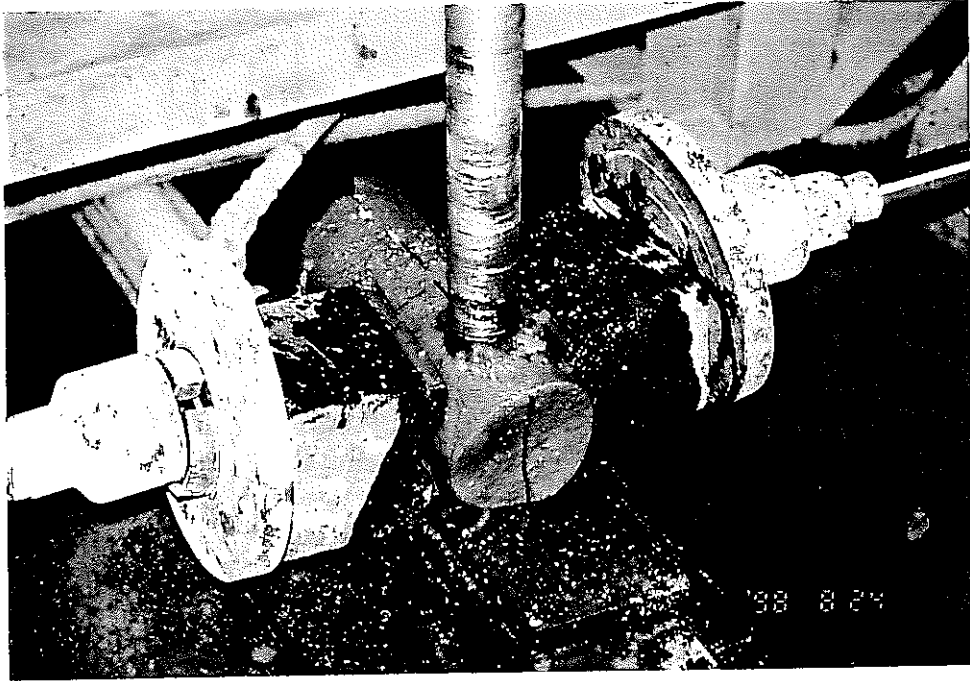


図 4.1.1 コアボーリング状況



図 4.1.2 コアリング後の岩石コア



図 4.1.3 整形後の試験片保管状況

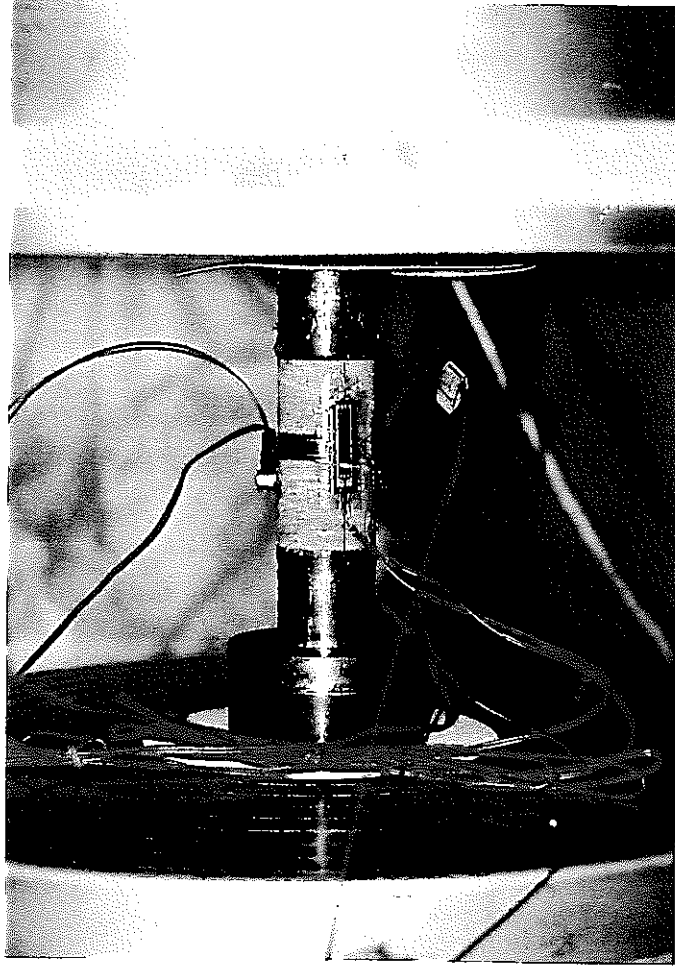


图 4.1.4 一轴压缩试验状况

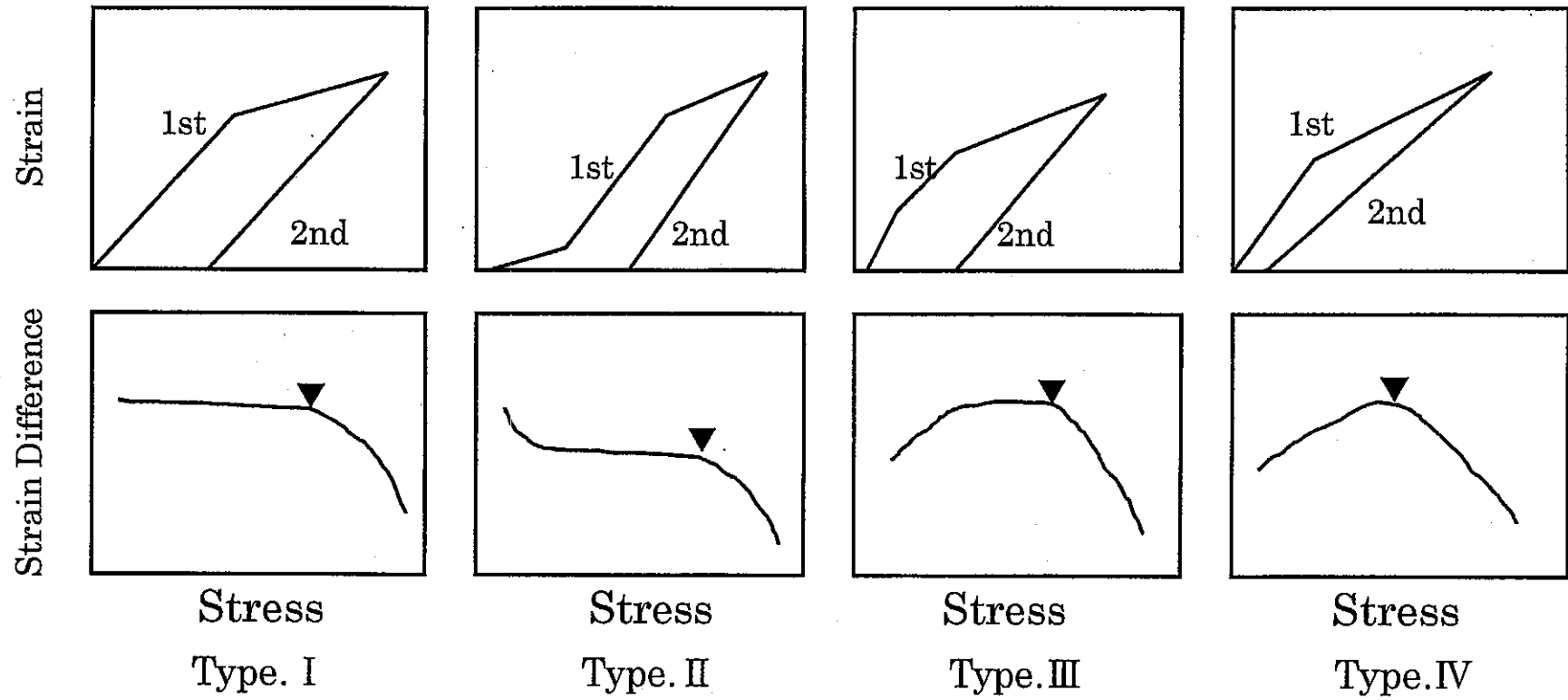


図 4.1.5 DRA 法におけるひずみ差-応力関係パターン

PN4-130

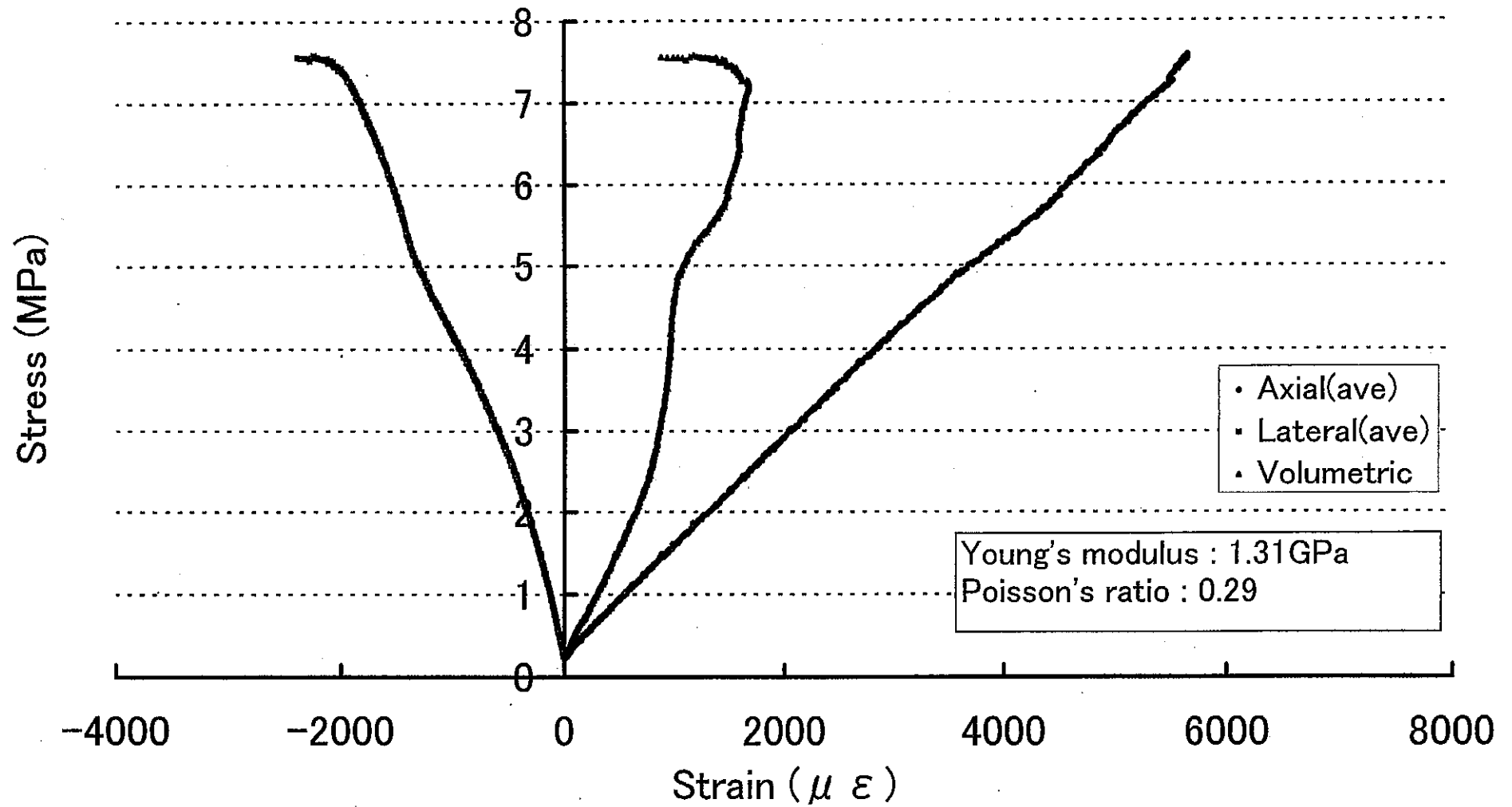


図 4.1.6 コア試験片の一軸圧縮試験時の応力-ひずみ関係例
(PN4-130 試験片)

PN5-435

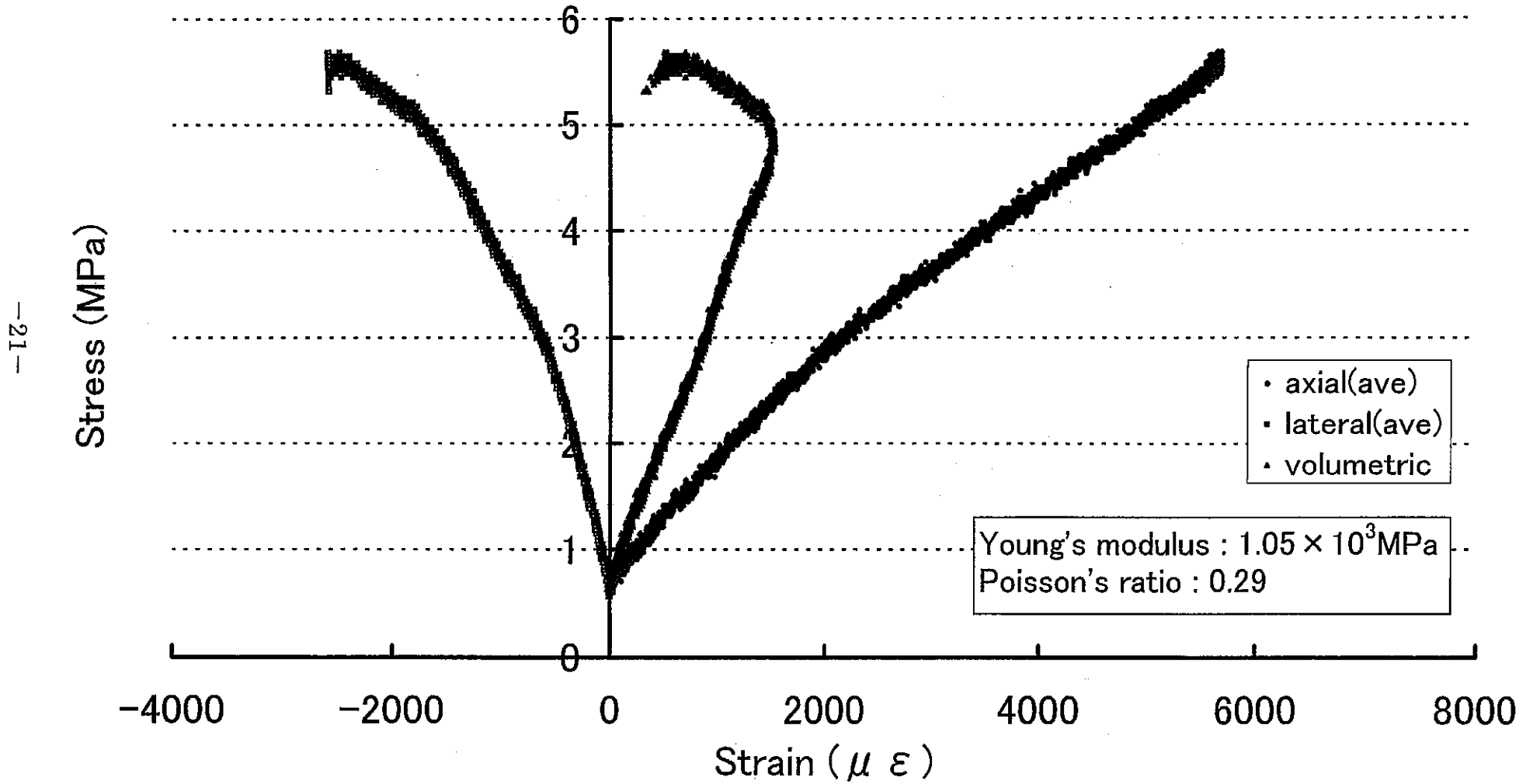


図 4.1.7 コア試験片の一軸圧縮試験時の応力-ひずみ関係例
(PN5-435 試験片)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-060) using AE Technique

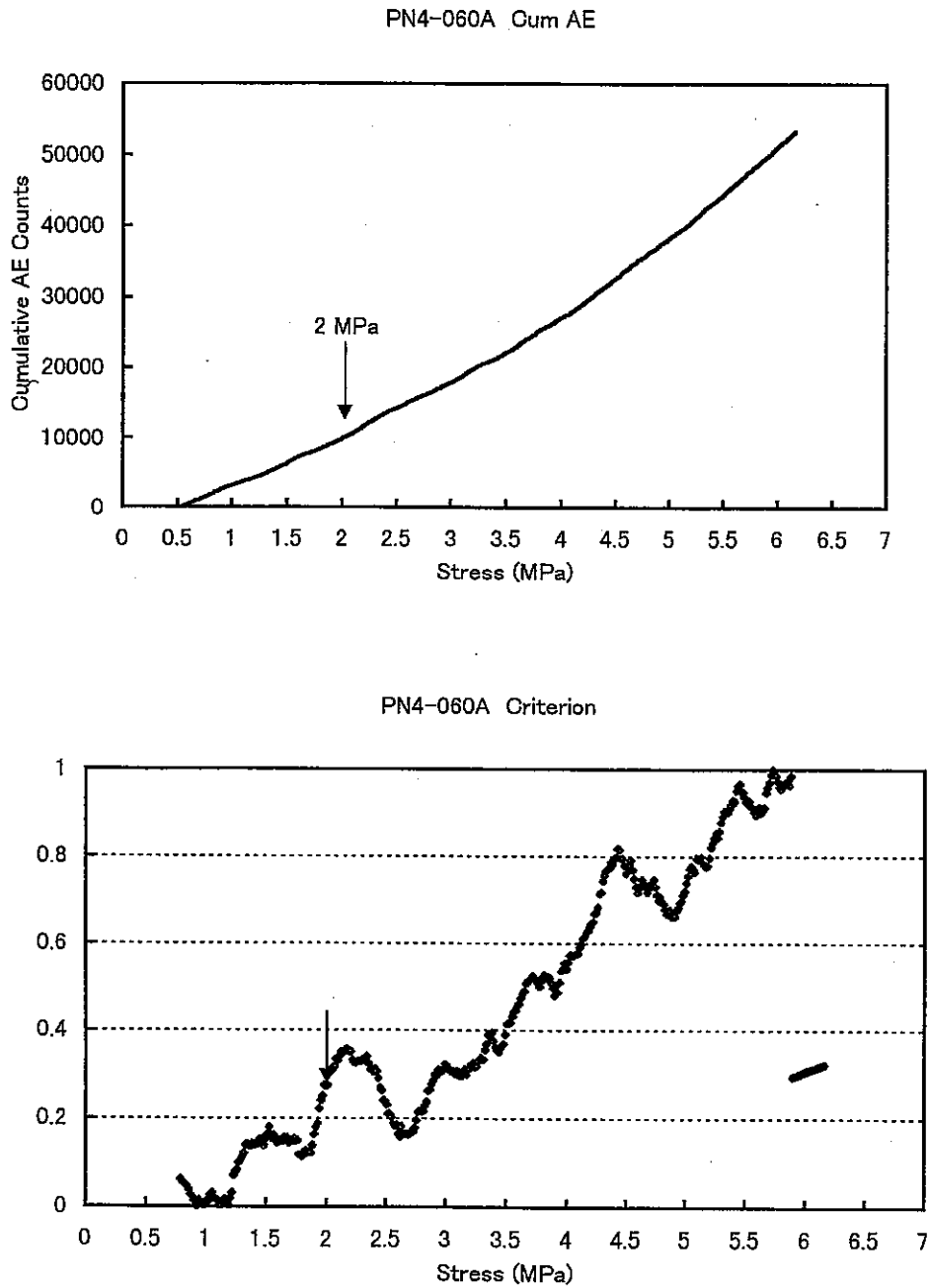


図 4.1.8 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
 (上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
 ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-117) using AE Technique

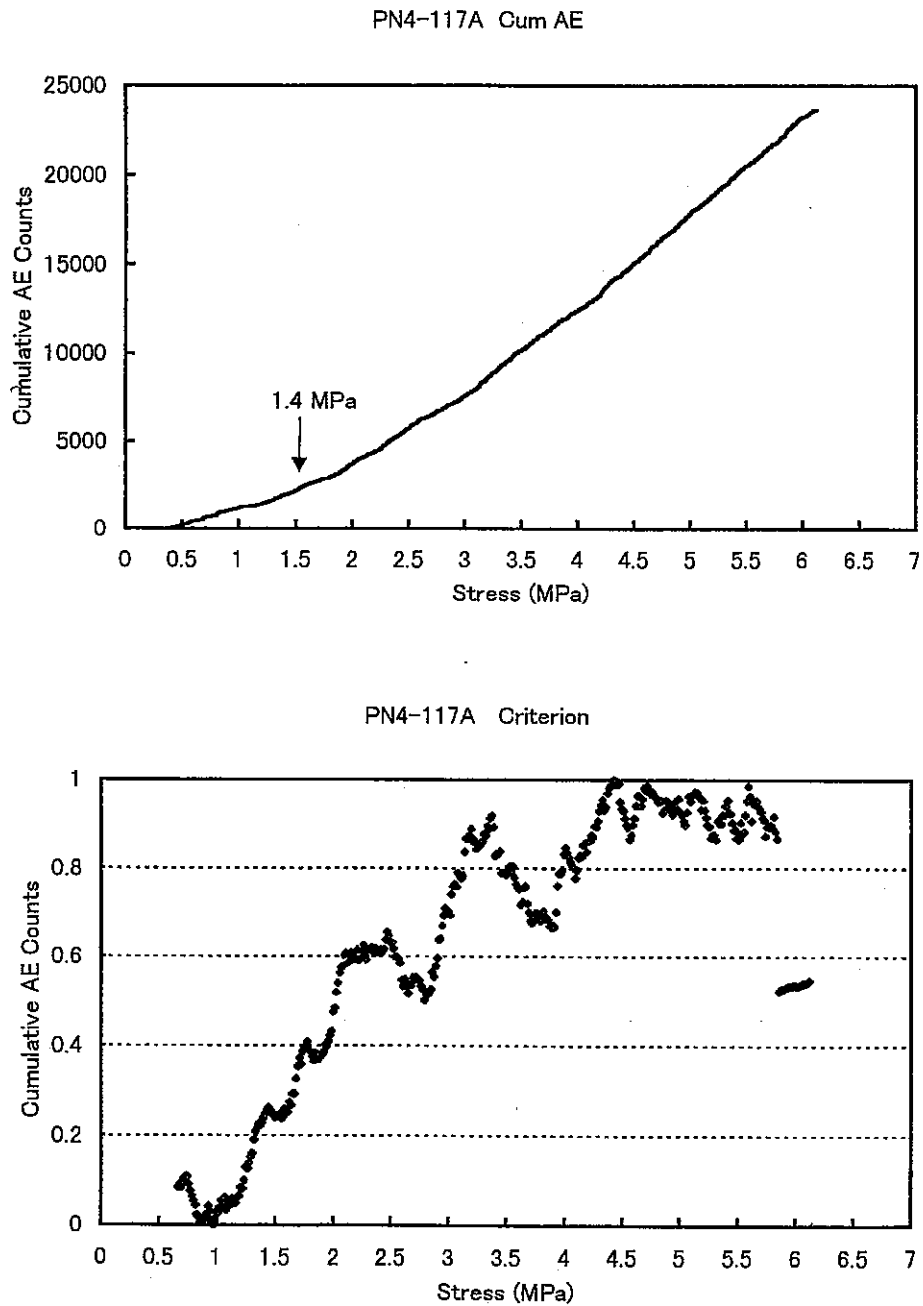


図 4.1.9 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-174)
using AE Technique

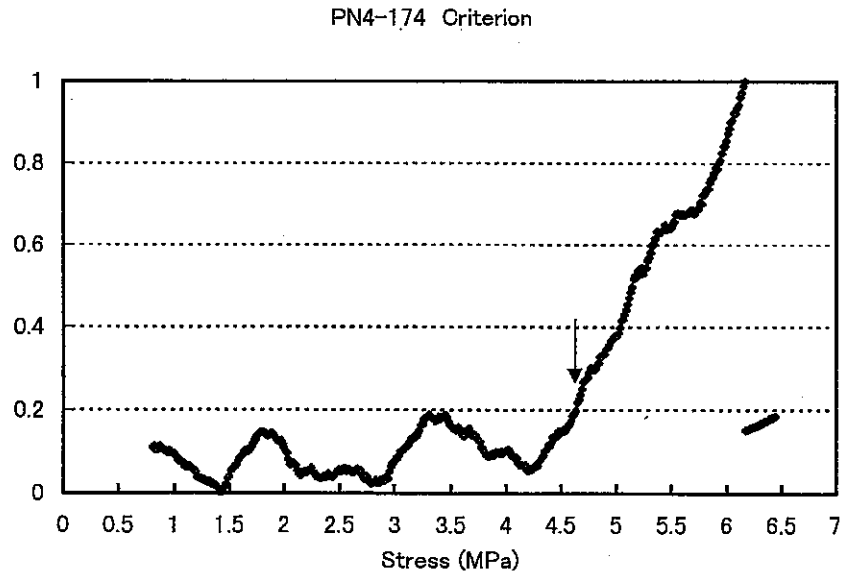
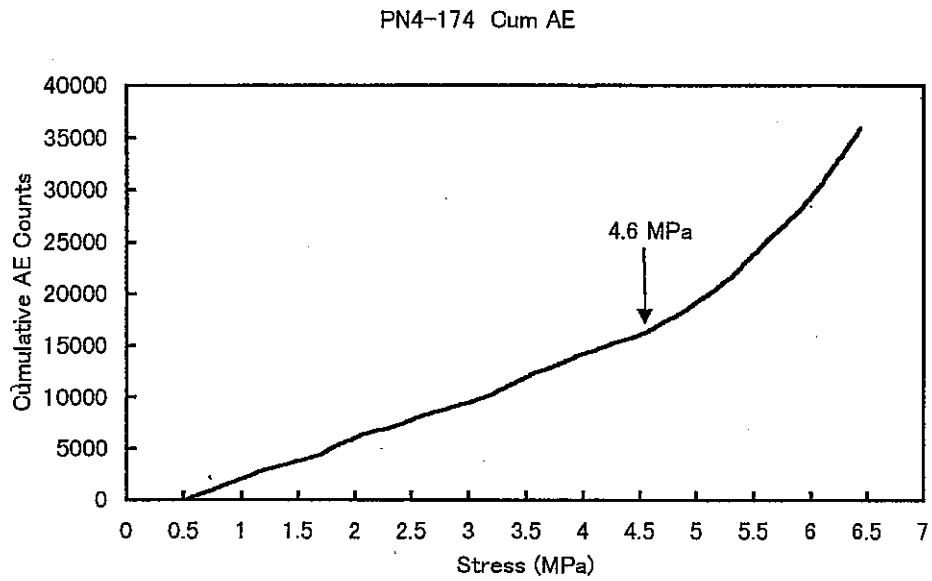


図 4.1.10 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-249) using AE Technique

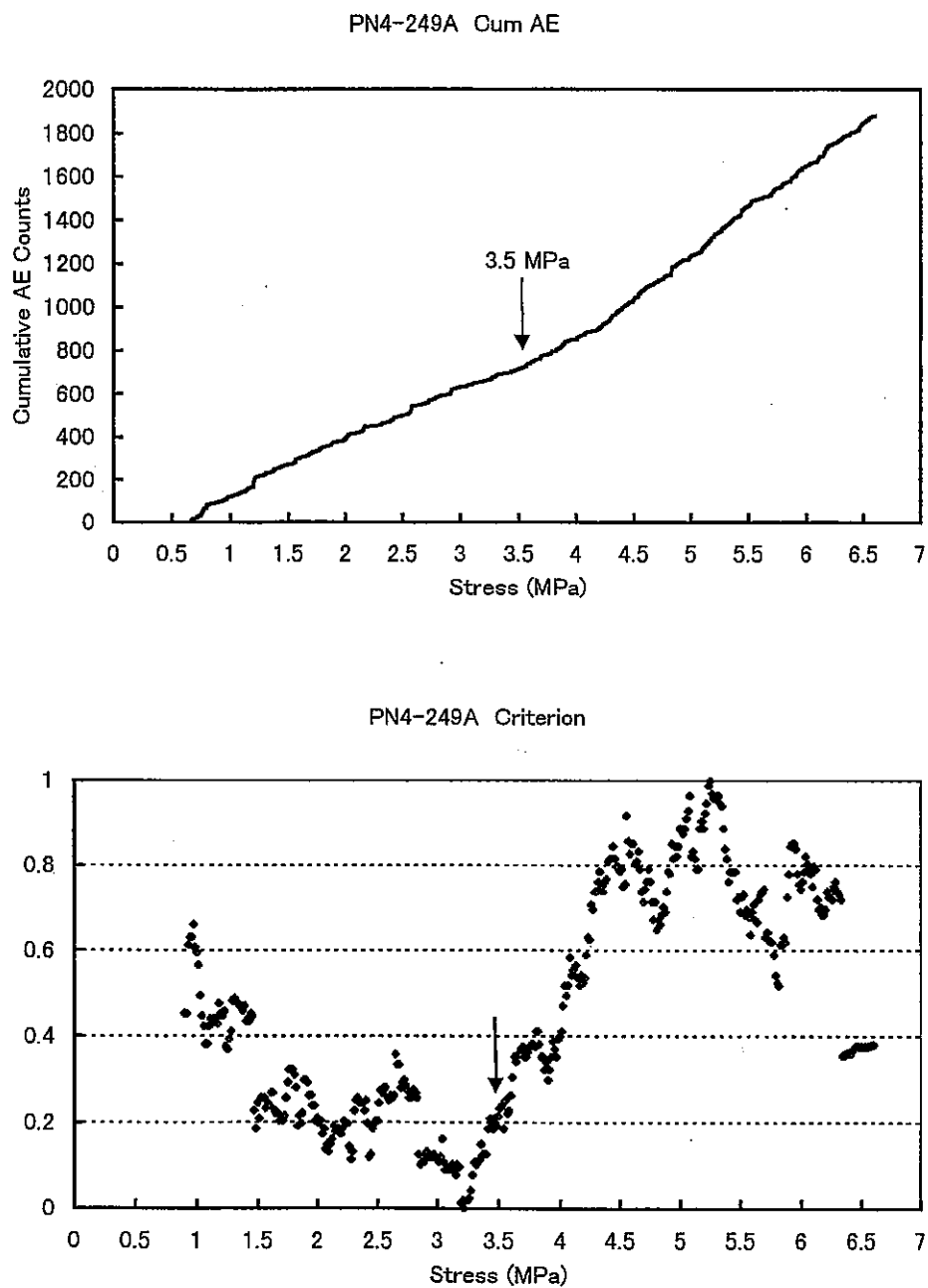


図 4.1.11 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数－応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率－応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-335)
using AE Technique

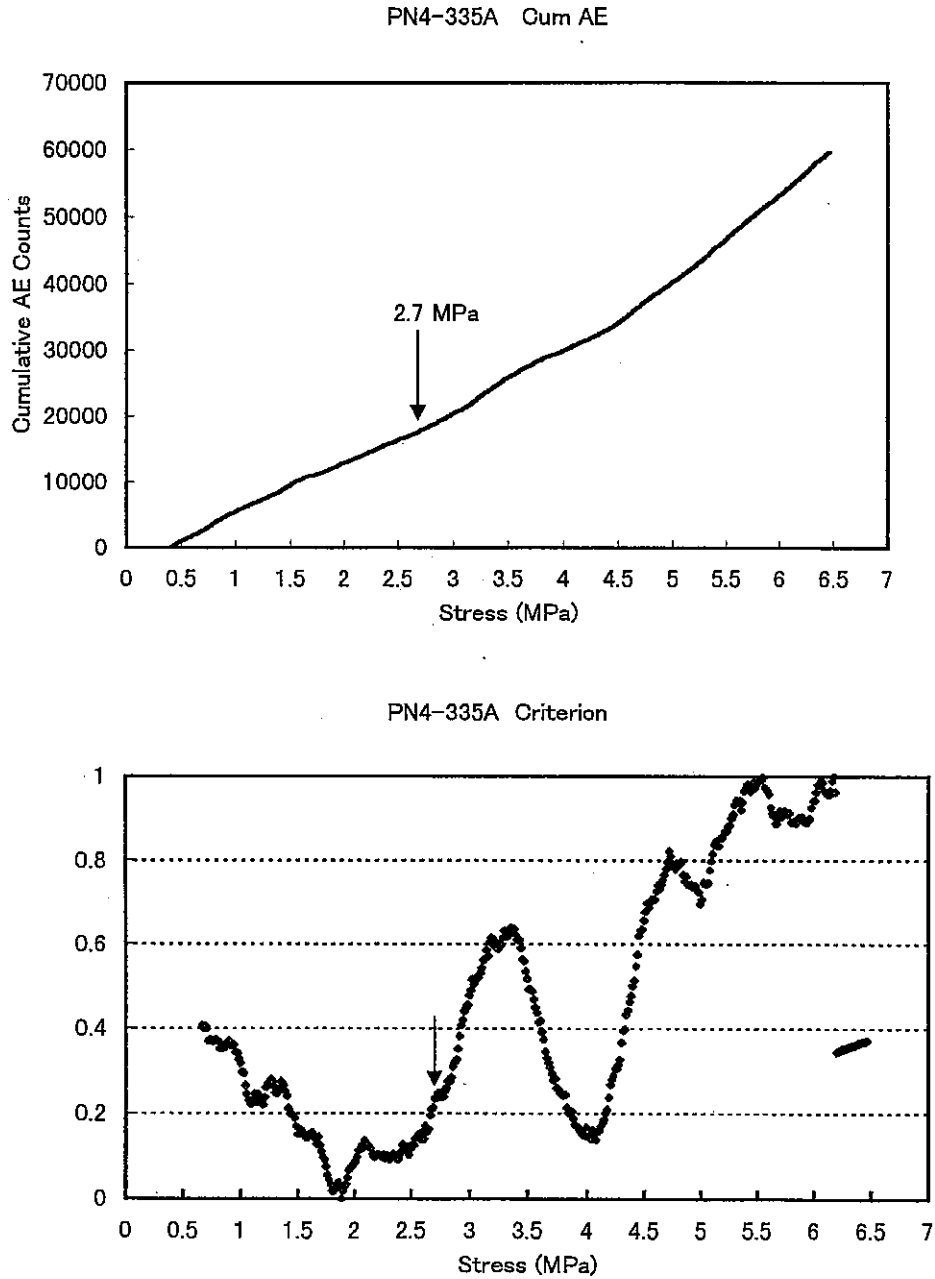


図 4.1.12 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 4 (PN4-470)
using AE Technique

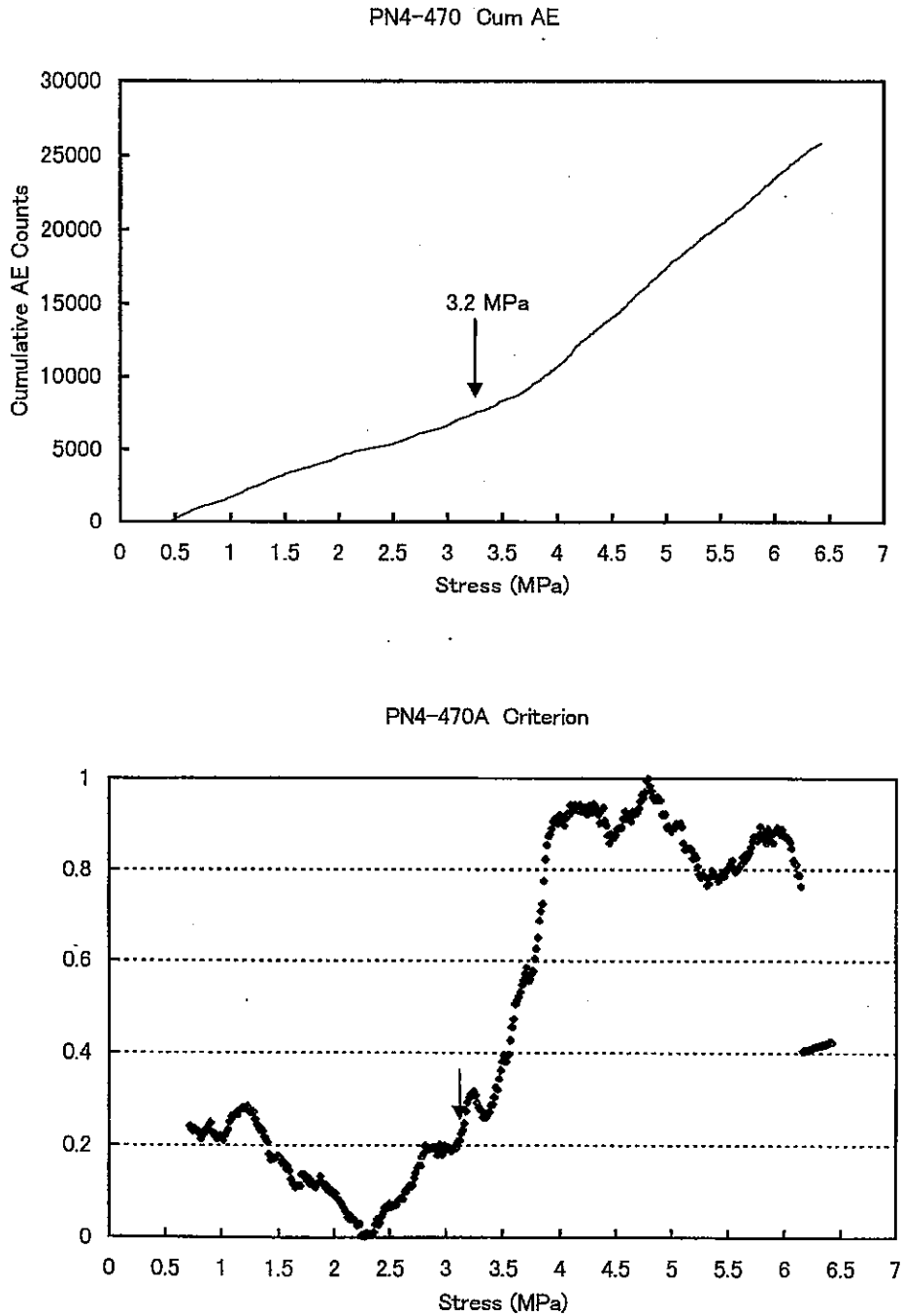


図 4.1.13 98SI-04 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Estimated Vertical Stress from AE Method
(TONO CORE-4)

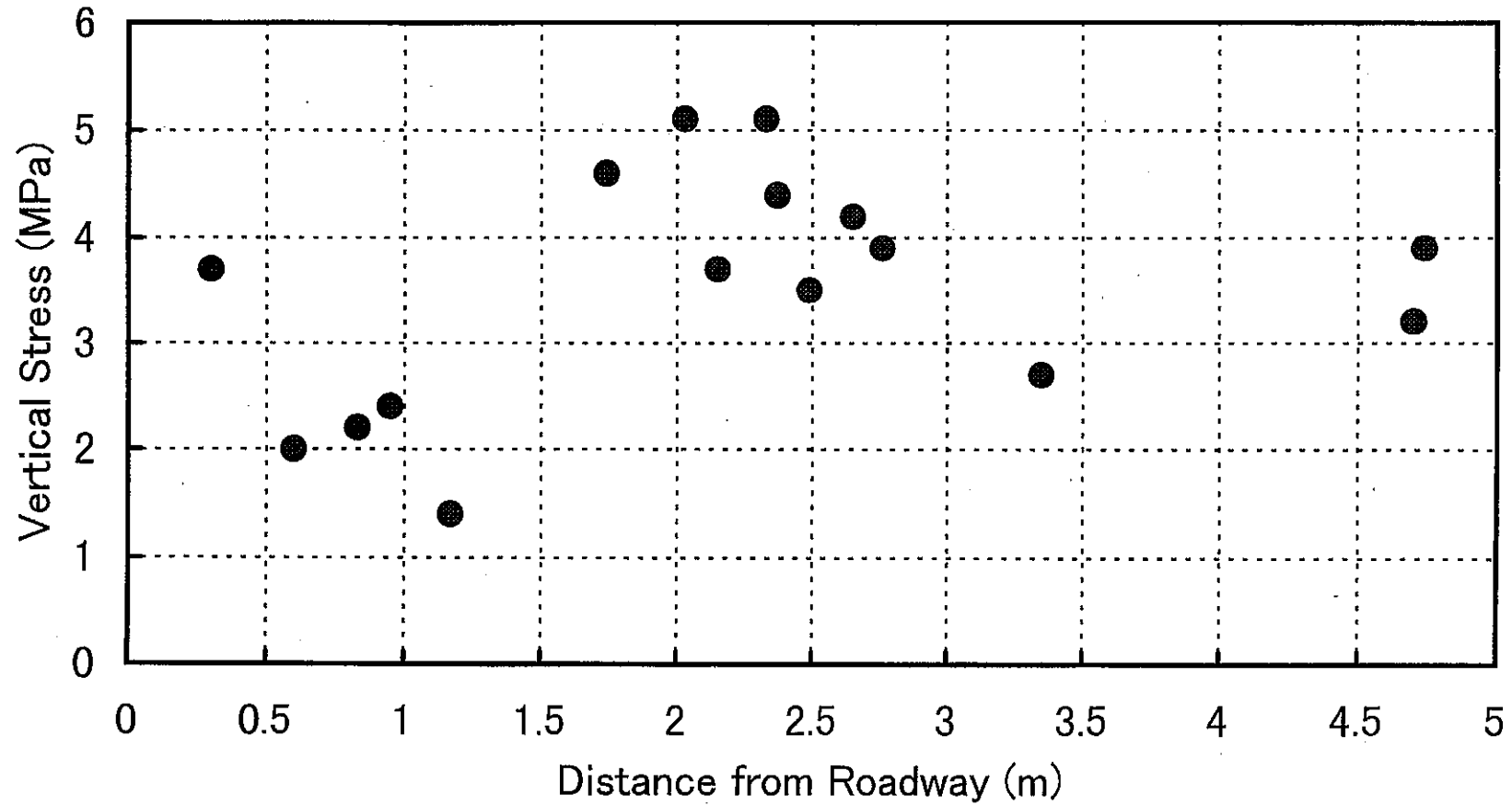


図 4.1.14 98SI-04 コアから AE 法によって推定された鉛直応力と深度との関係
(経過時間 2~3 週間)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

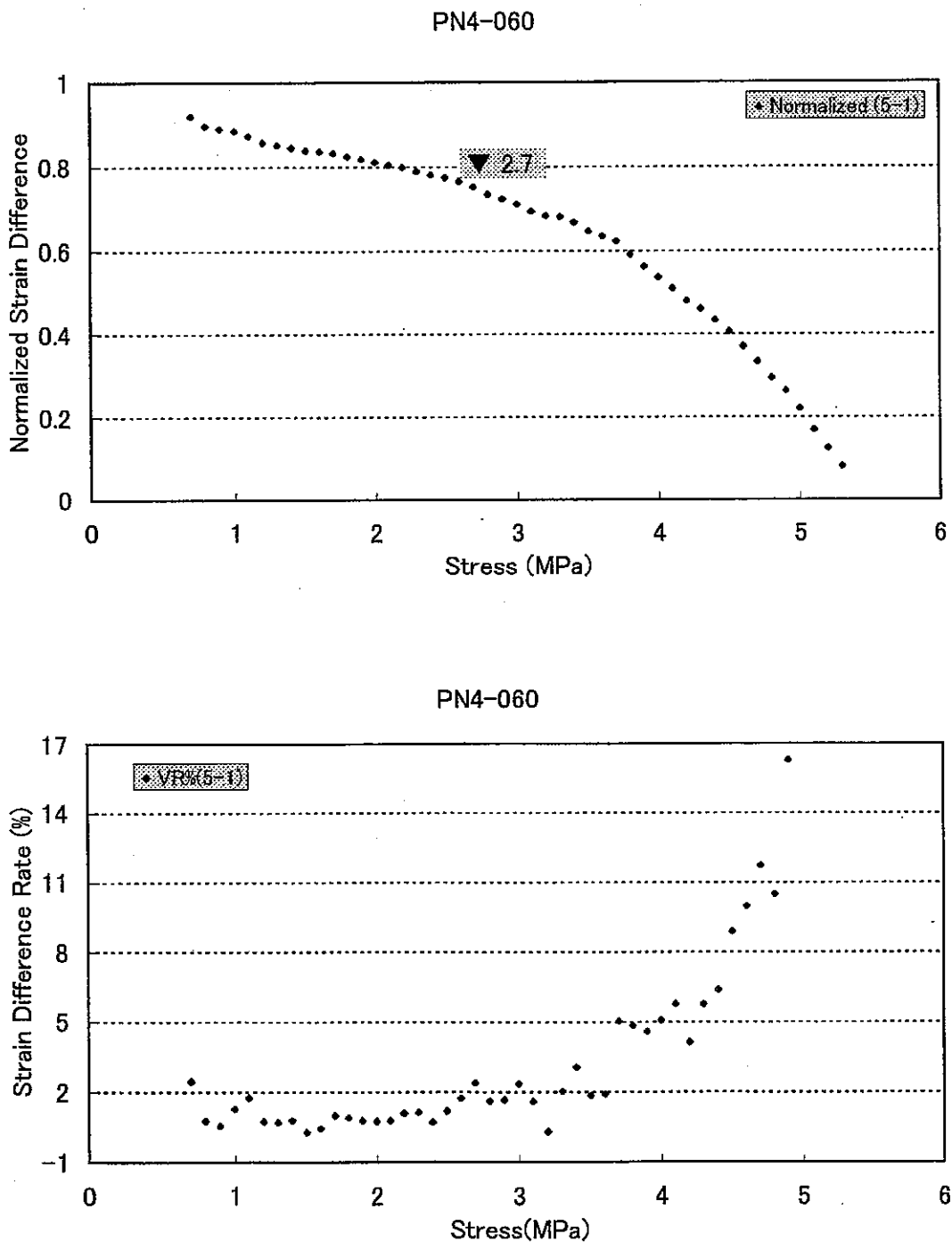


図 4.1.15 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差－応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率－応力関係)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

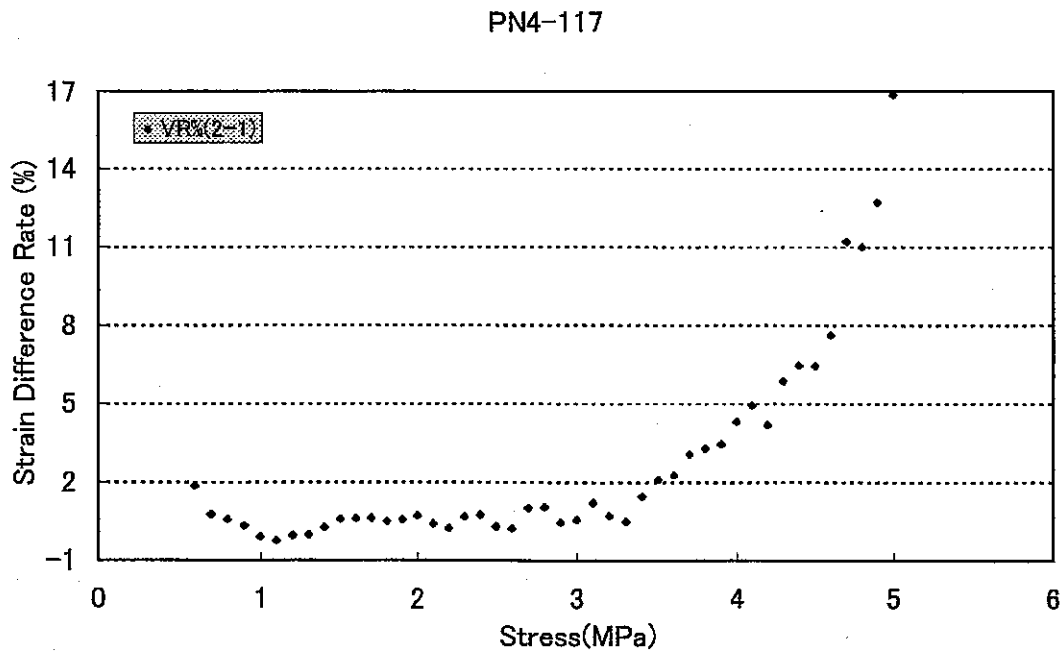
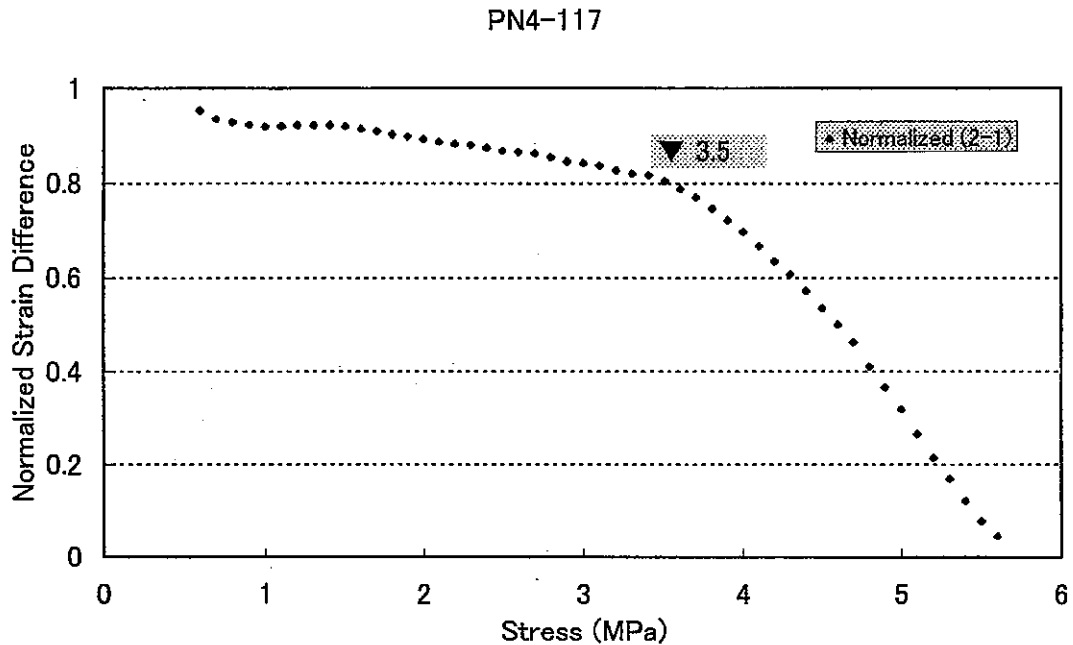


図 4.1.16 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率-応力関係)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

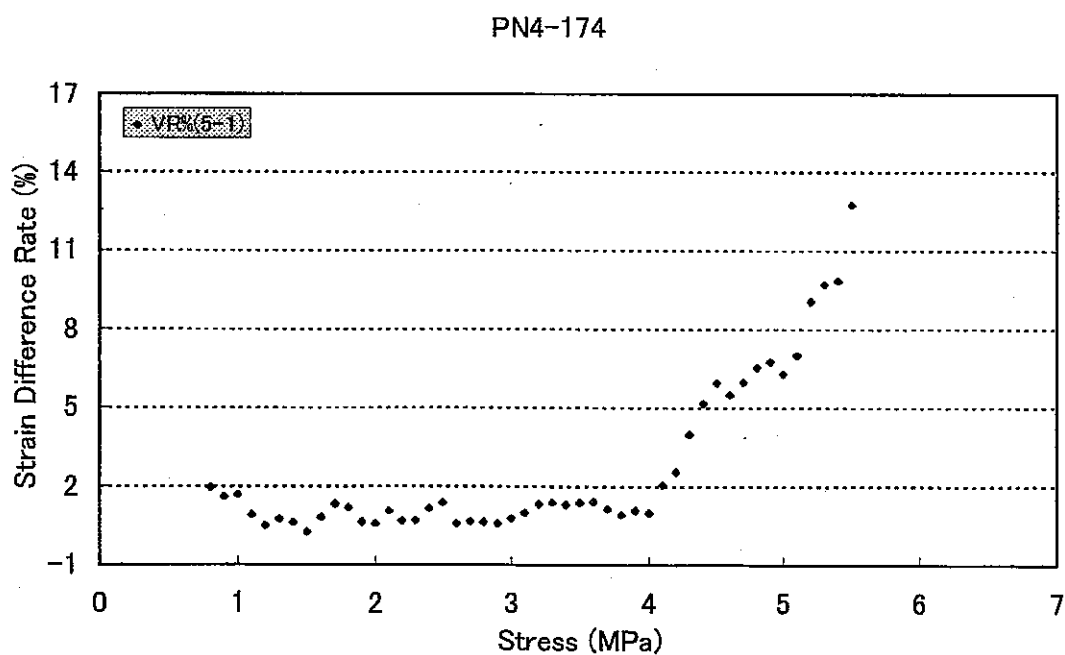
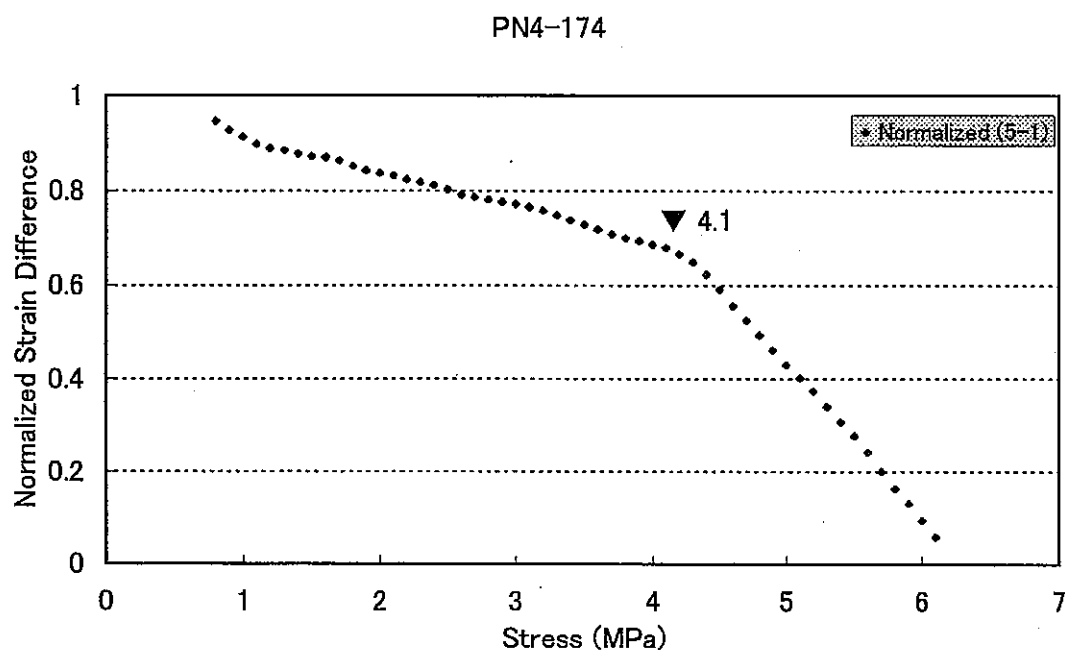


図 4.1.17 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率-応力関係)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

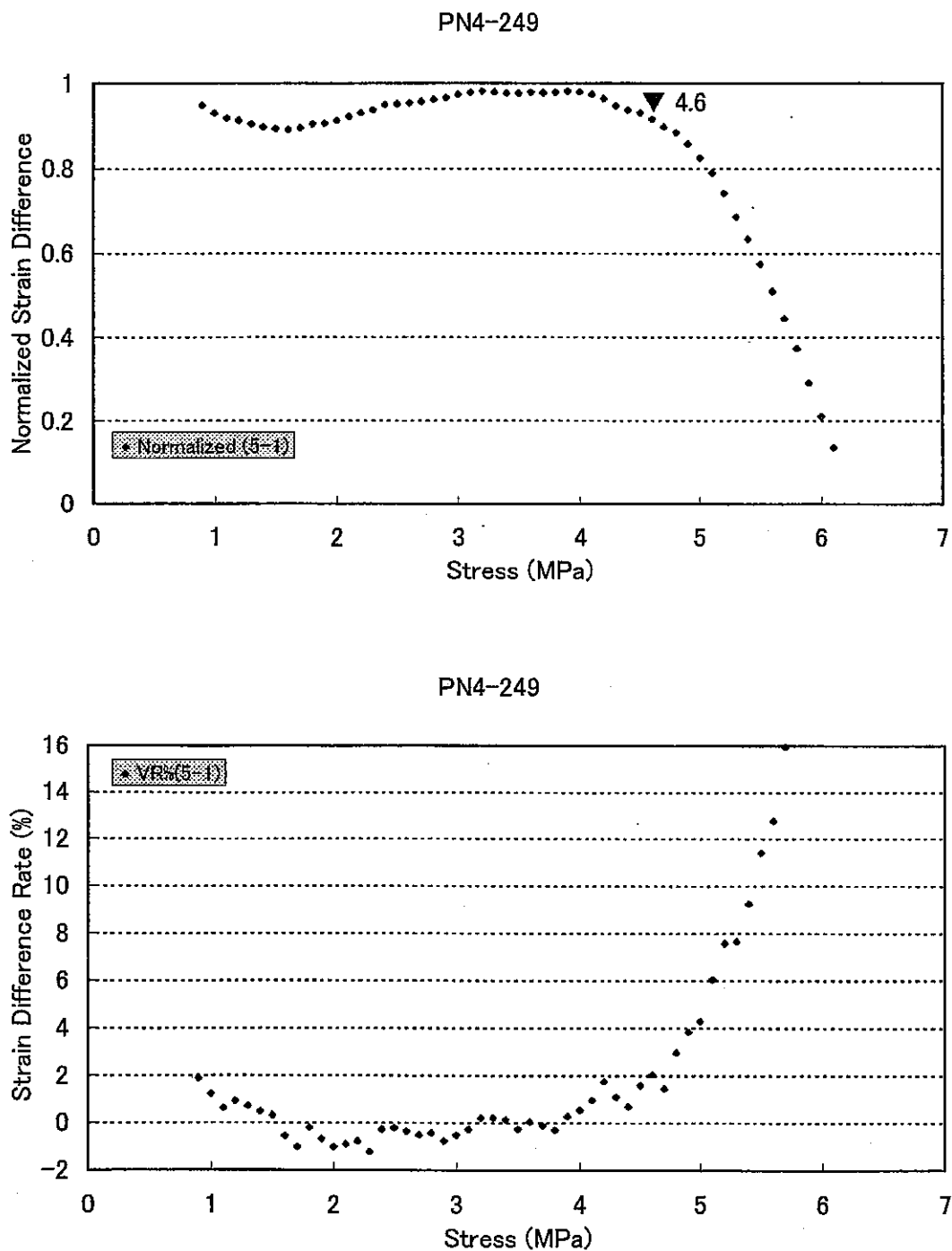


図 4.1.18 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率-応力関係)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

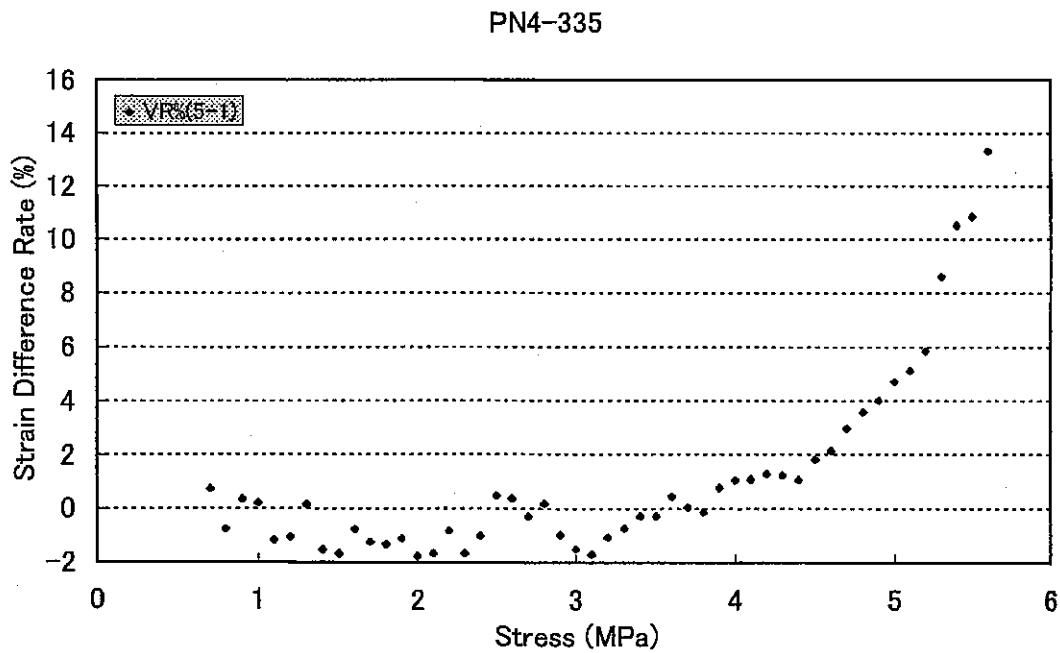
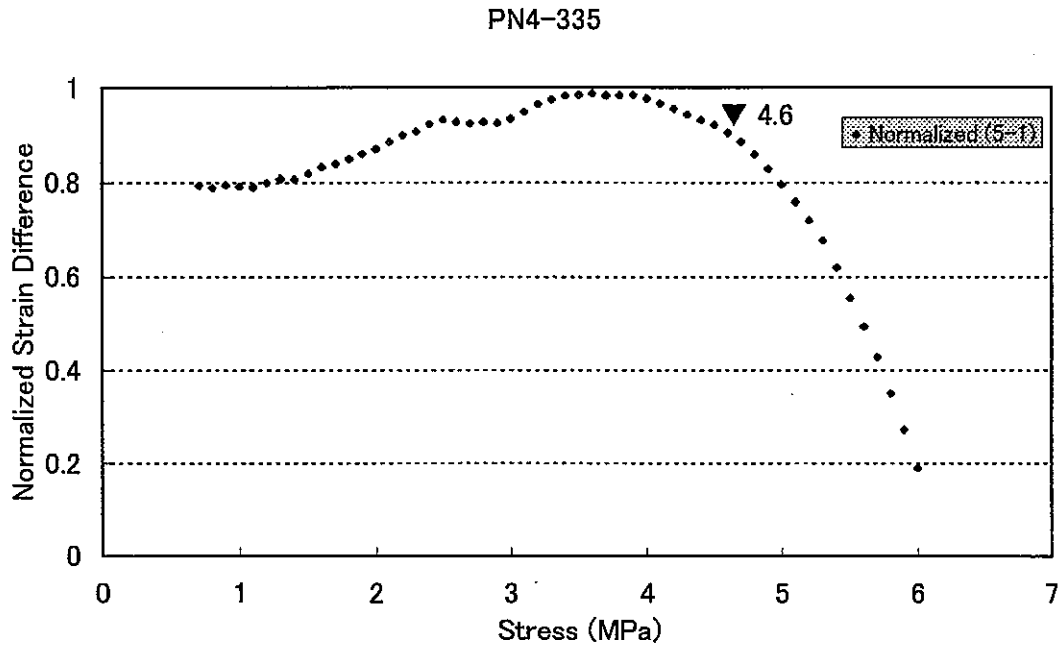


図 4.1.19 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率-応力関係)

Estimated stress from TONO4 core using DRA

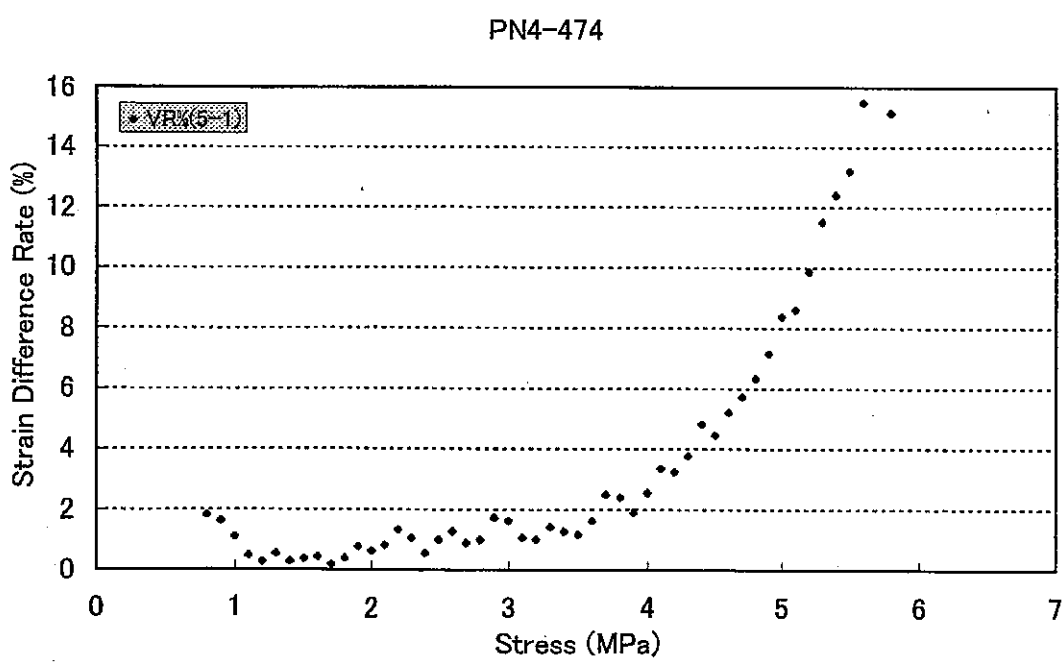
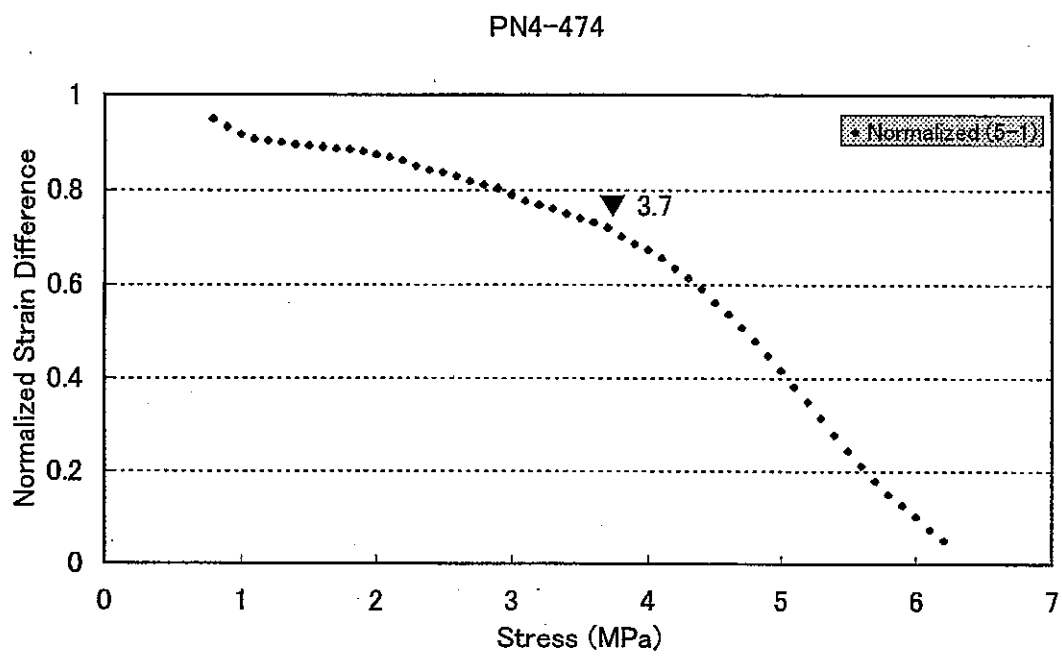


図 4.1.20 98SI-04 コア試験片からの DRA 法による推定例
 (上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
 変化率-応力関係)

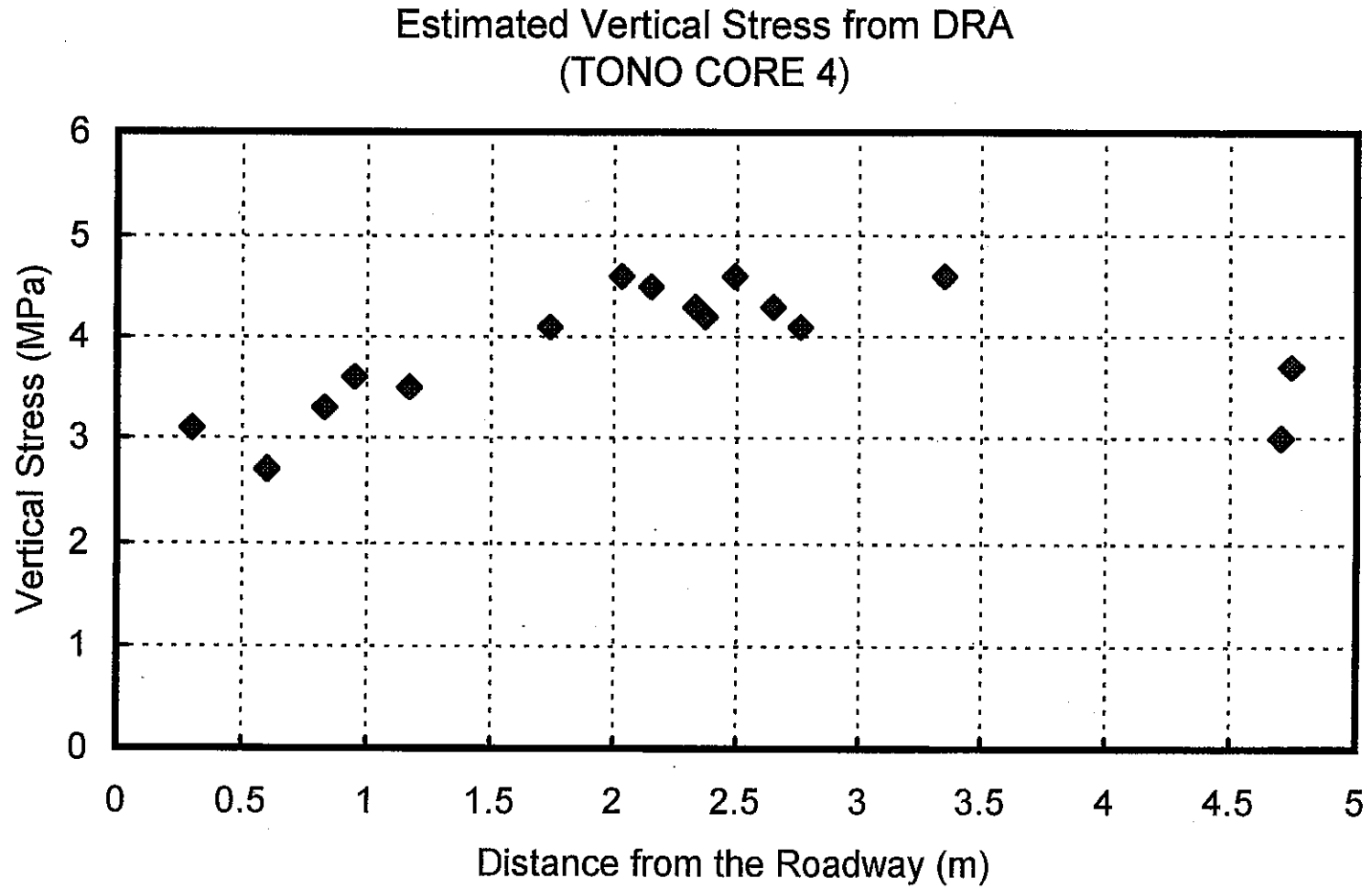


図 4.1.21 98SI-04 コアから DRA 法によって推定された鉛直応力と深度との関係 (経過時間: 2~3 週間)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-052) using AE Technique

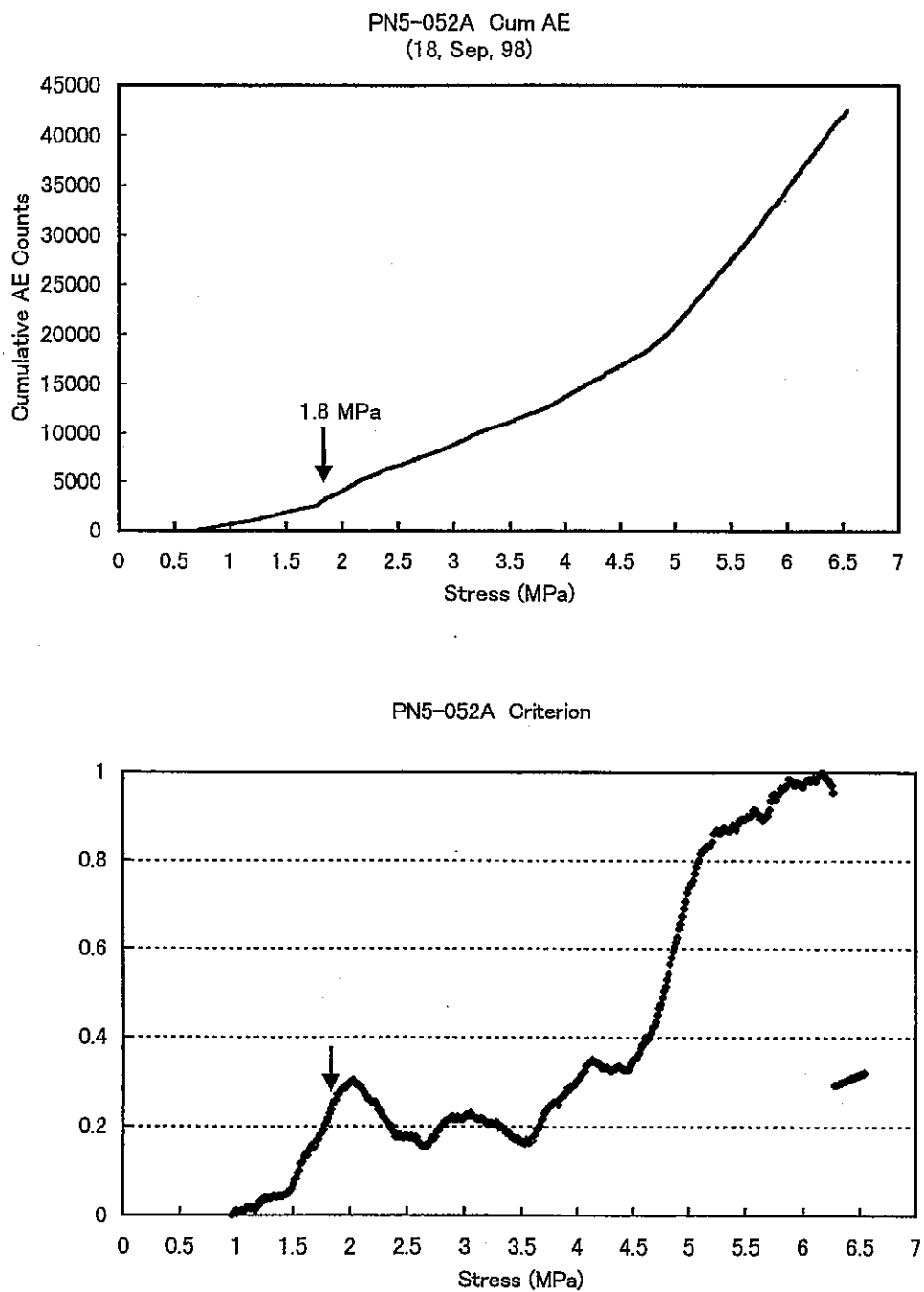


図 4.1.22 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-177)
using AE Technique

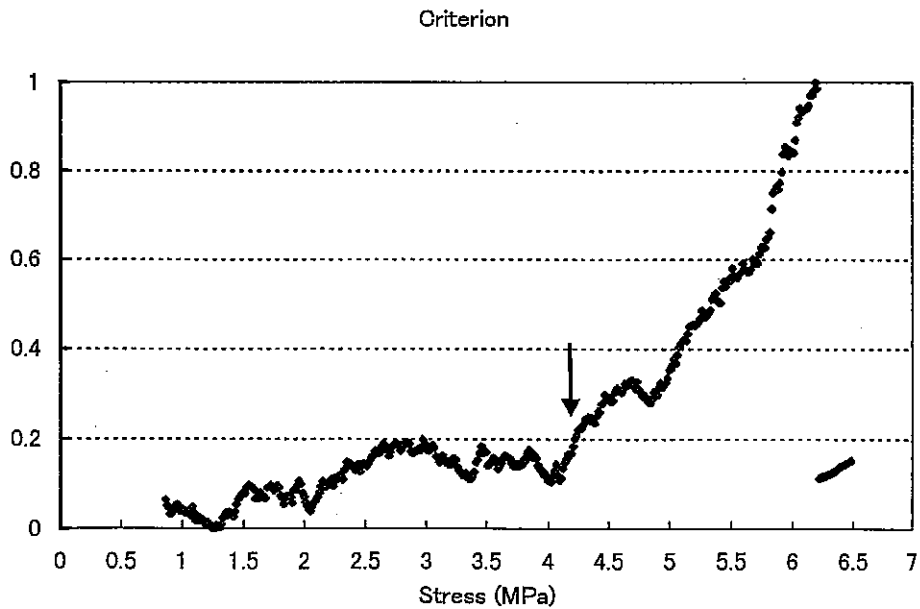
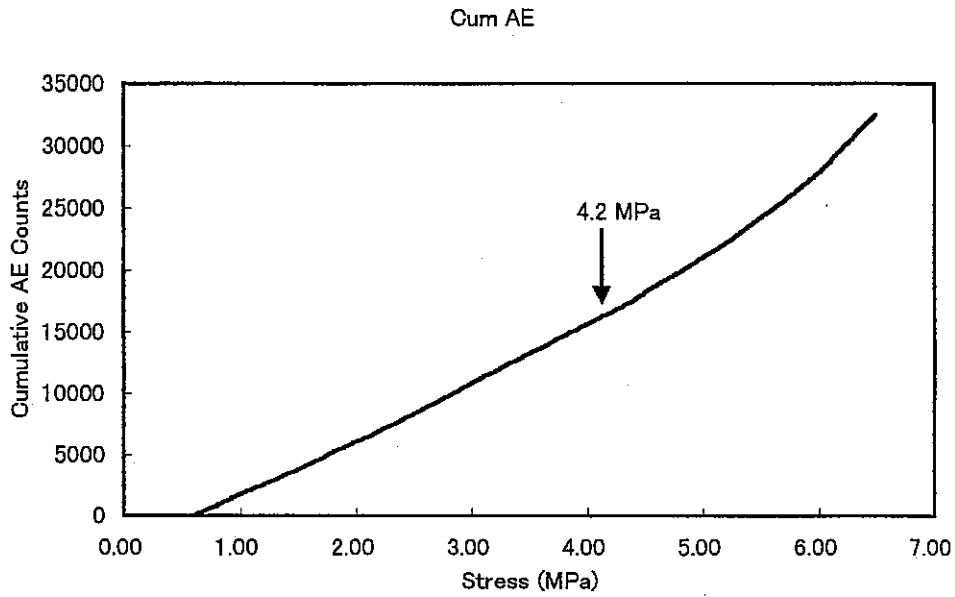


図 4.1.23 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-234)
using AE Technique

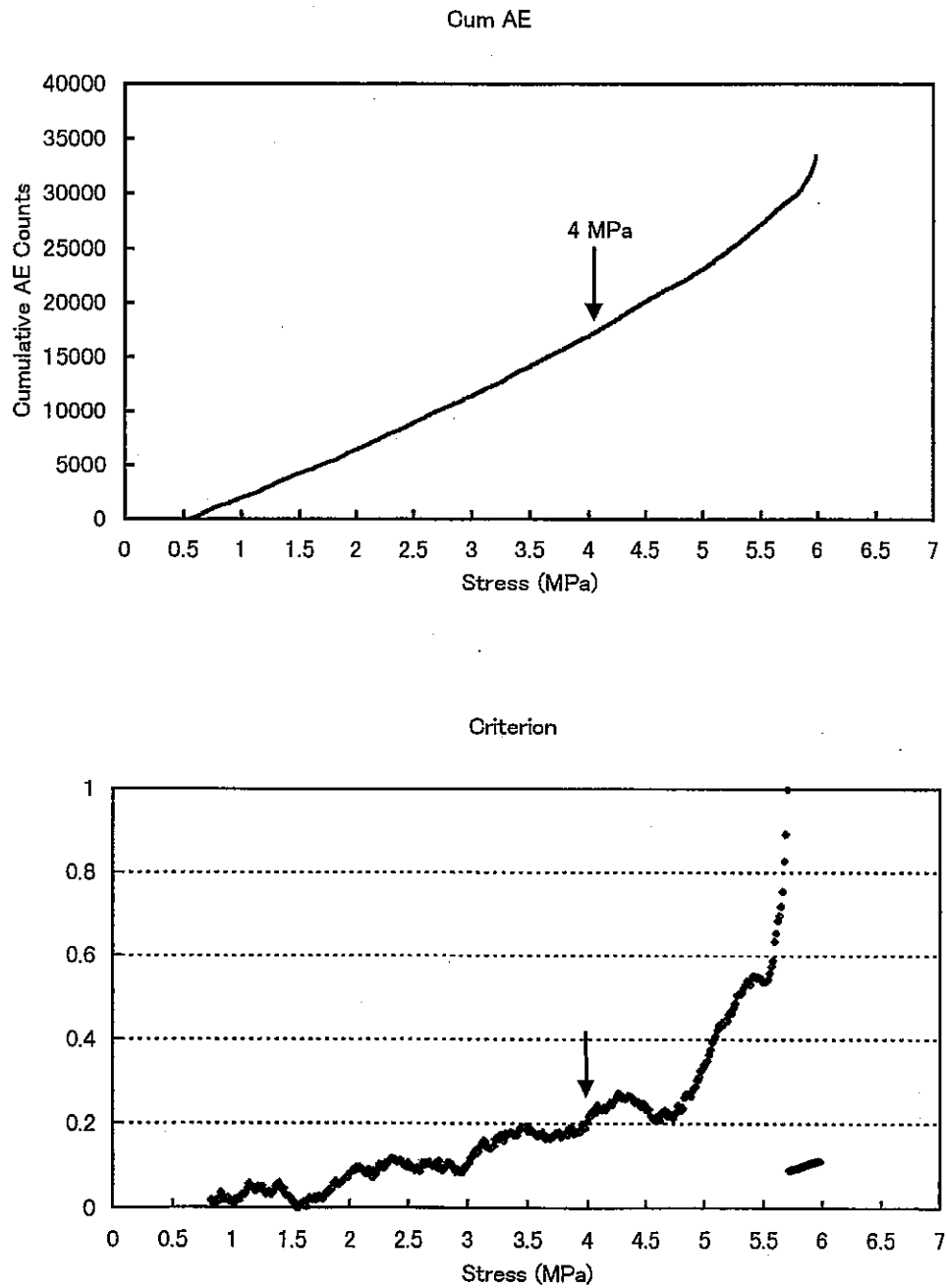


図 4.1.24 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-285)
using AE Technique

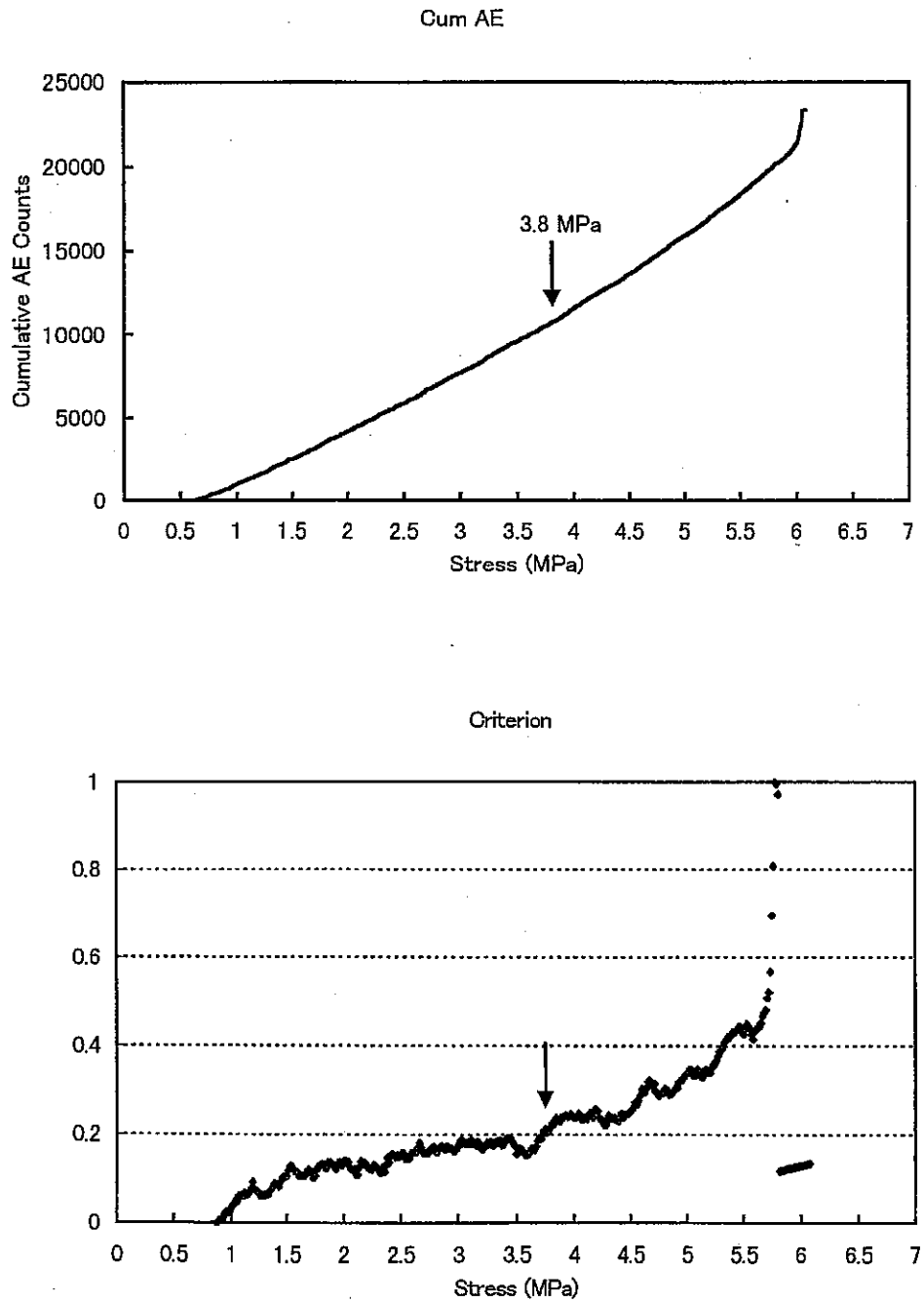


図 4.1.25 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数－応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率－応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-330)
using AE Technique

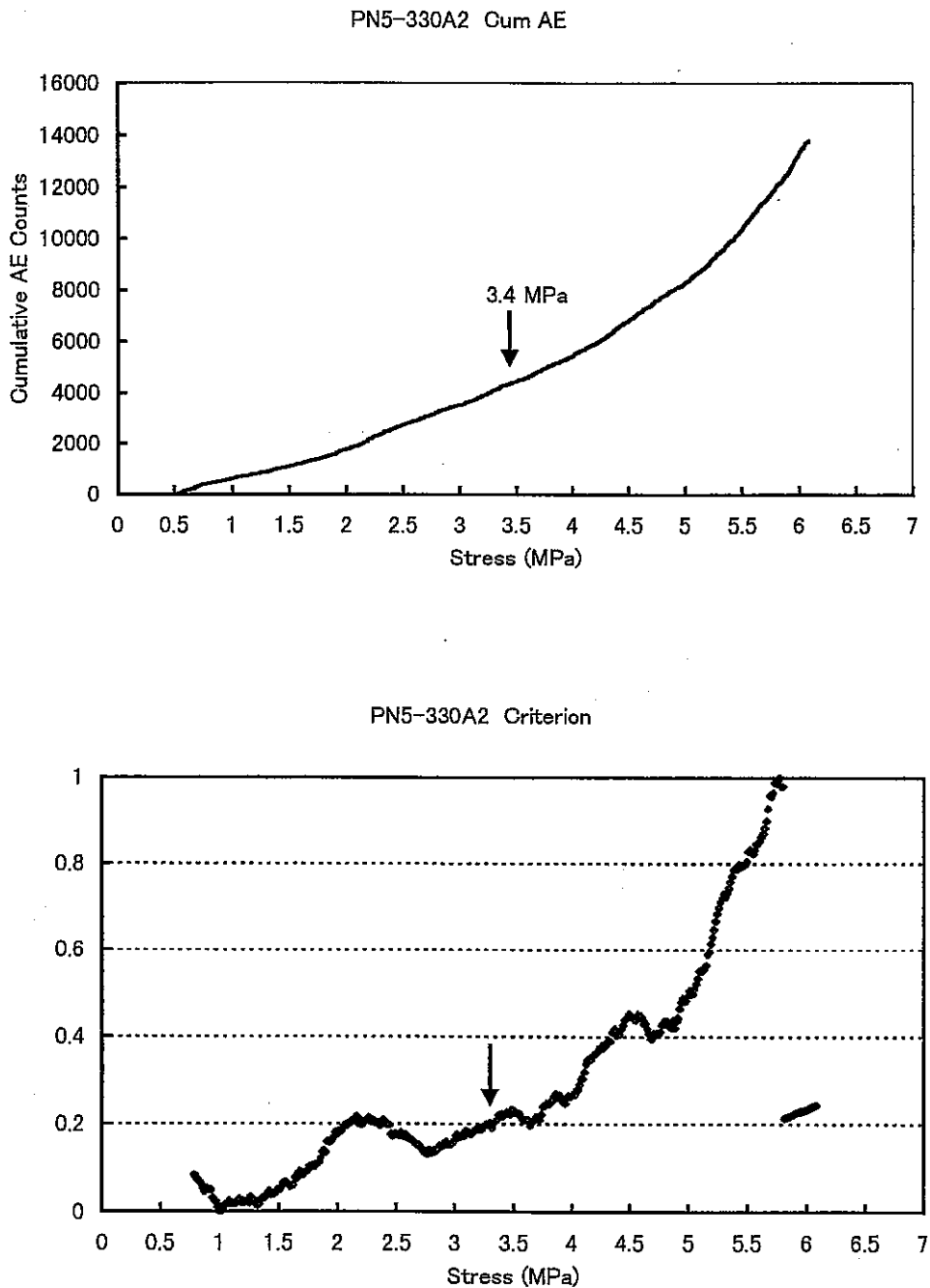


図 4.1.26 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-450) using AE Technique

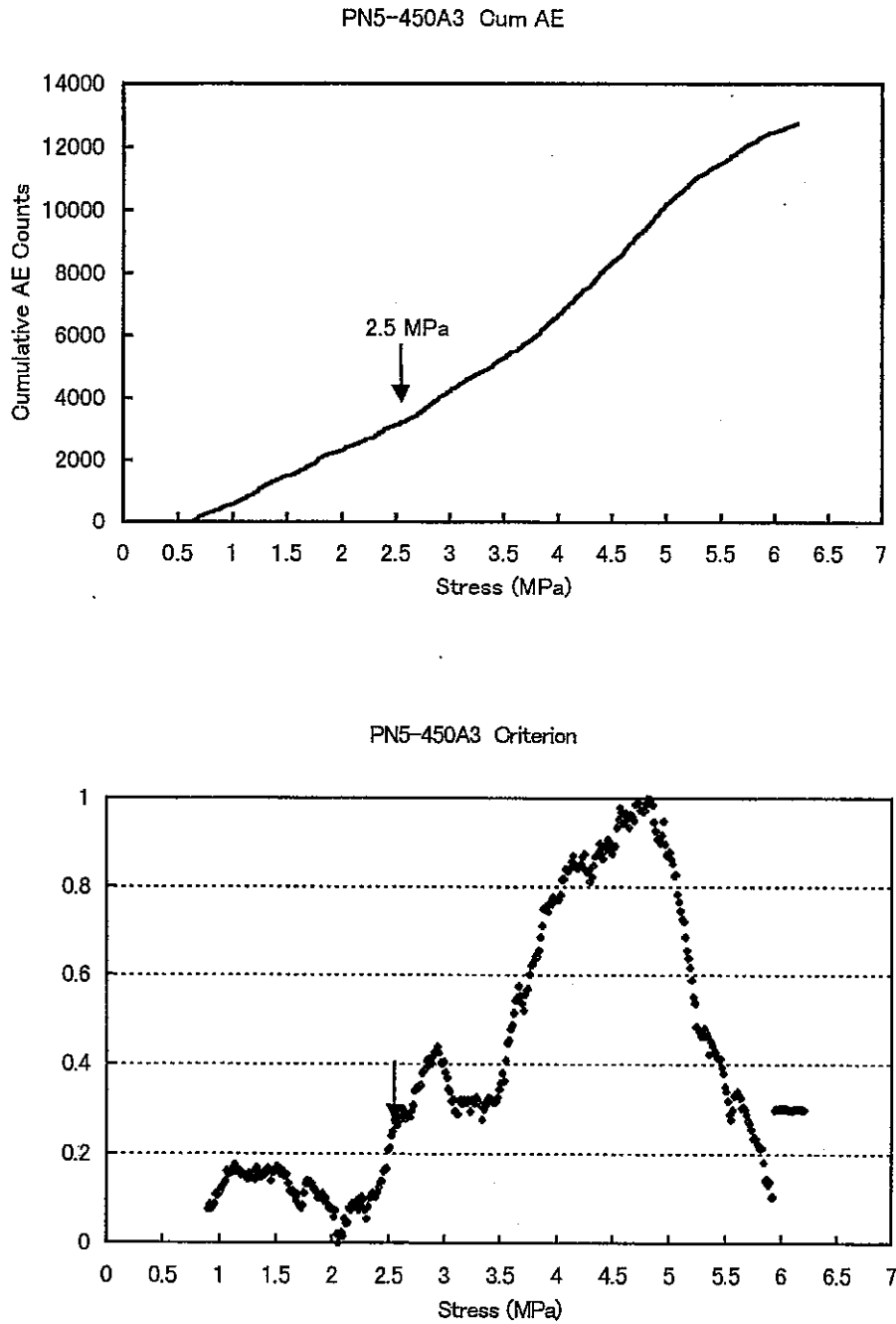


図 4.1.27 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Estimated Vertical Stresses from AE Method
(98SI-05 CORE)

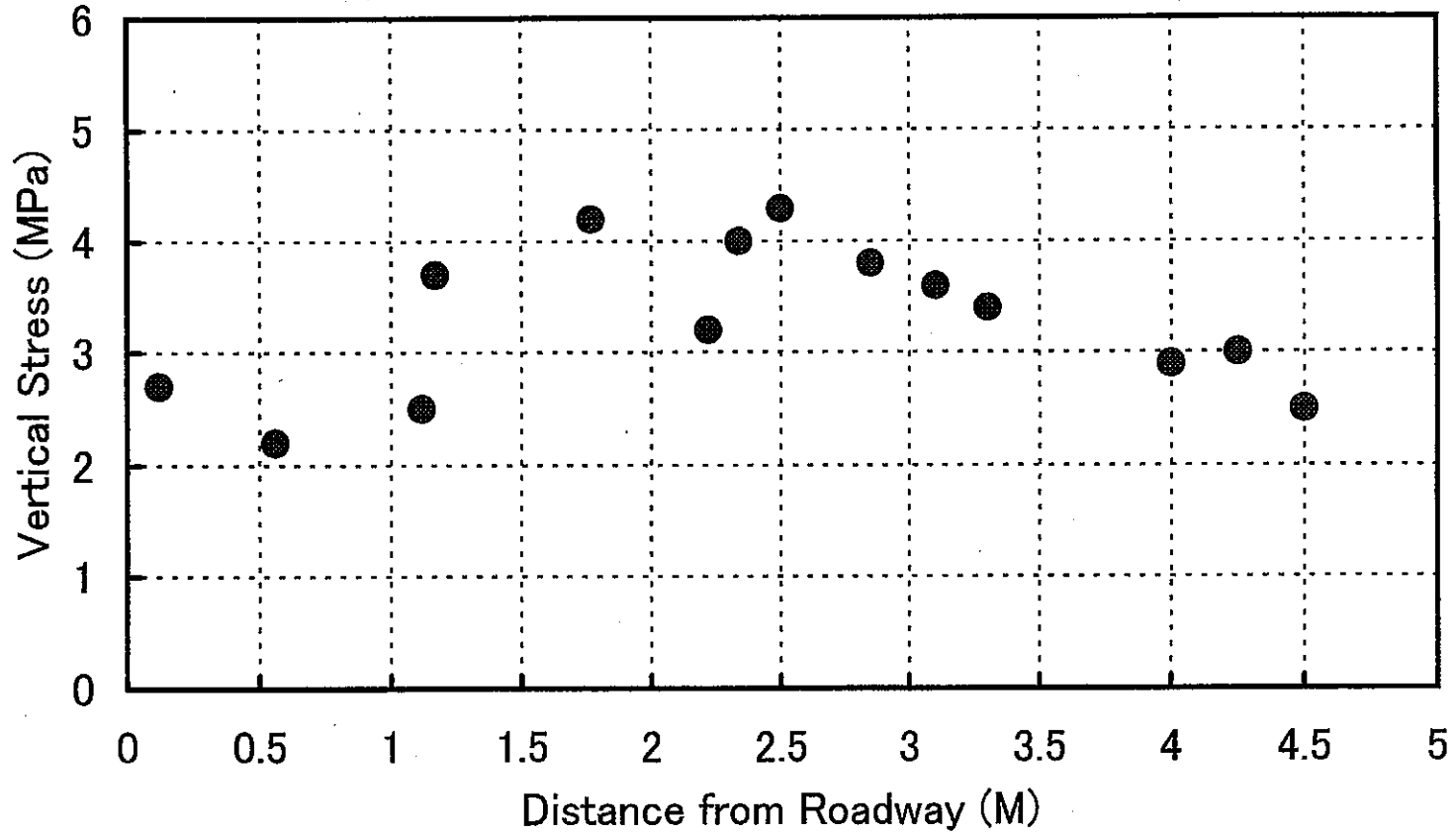


図 4.1.28 98SI-05 コアから AE 法によって推定された鉛直応力と深度との関係
(経過時間：73～101 日)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-039)
using AE Technique

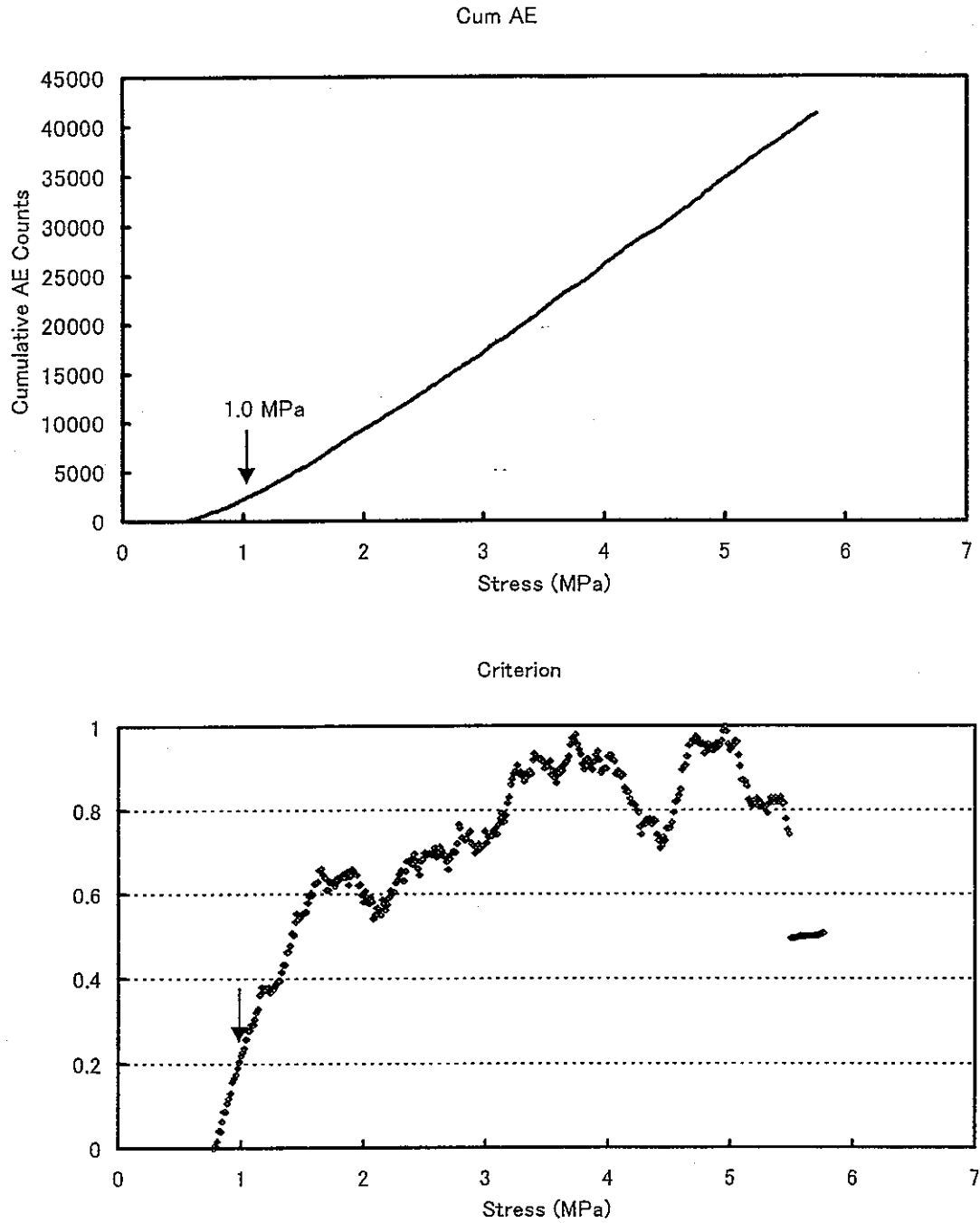


図 4.1.29 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数－応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率－応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-395)
using AE Technique

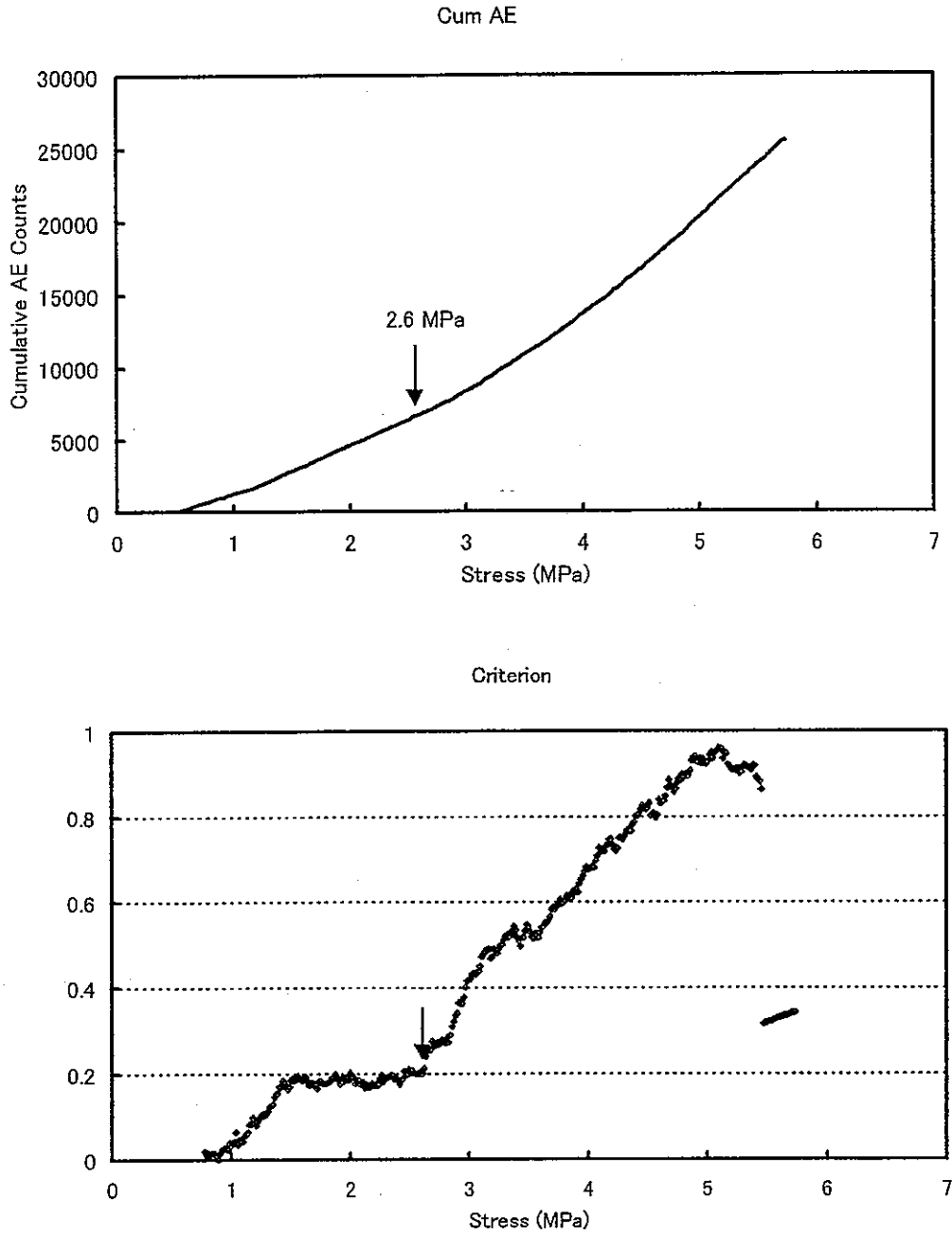


図 4.1.30 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数-応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-430)
using AE Technique

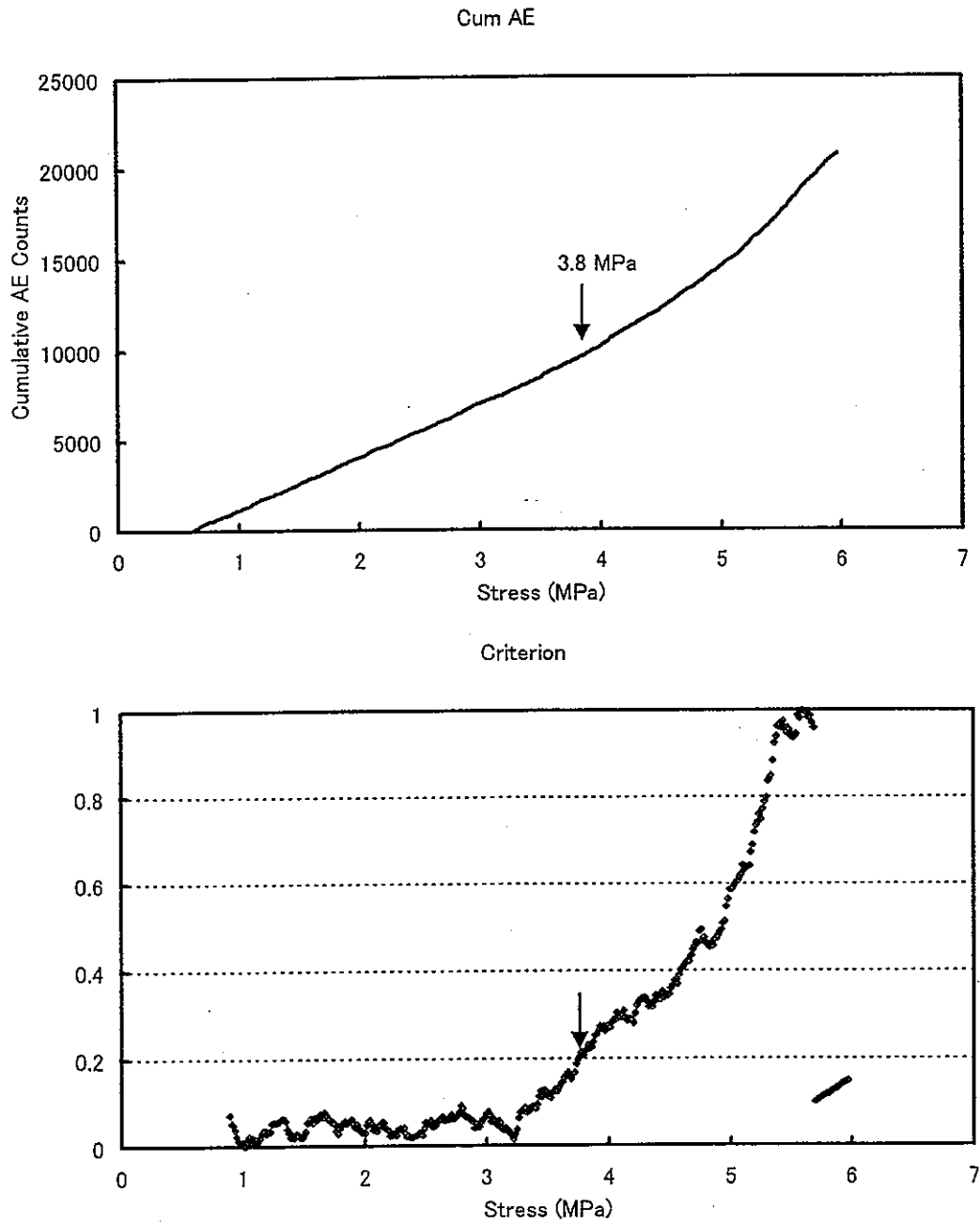


図 4.1.31 98SI-05 コア試験片からの AE 法による推定例
(上段：累積リングダウンカウント数－応力関係；下段：累積リング
ダウンカウント数の傾斜変化率－応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-039)
using DRA Technique

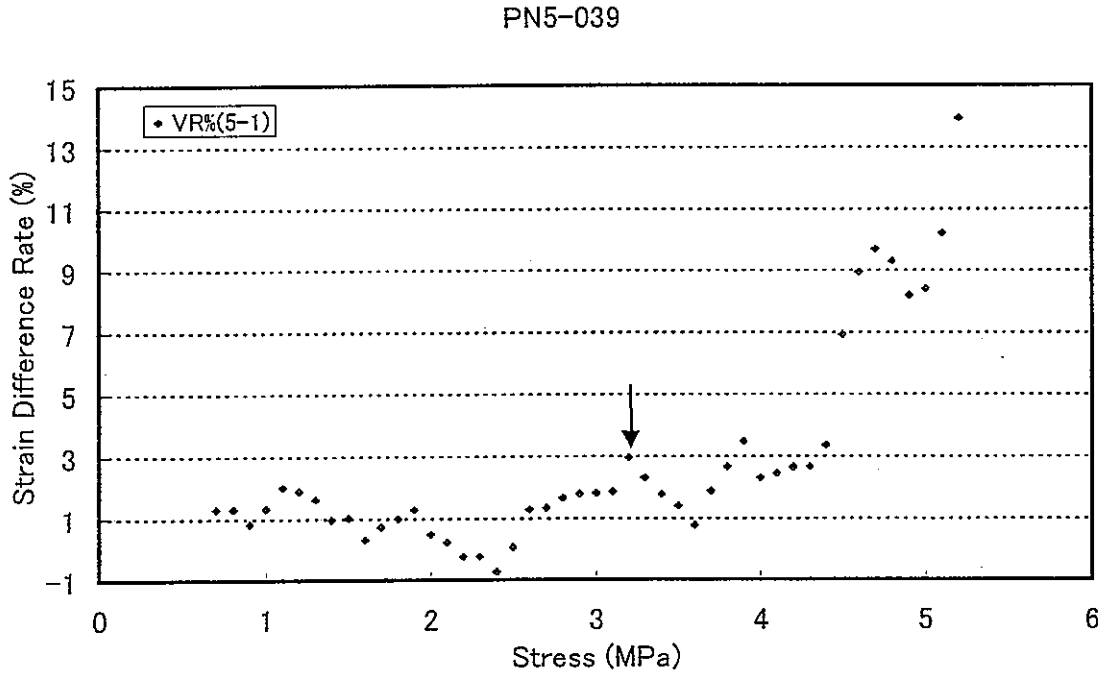
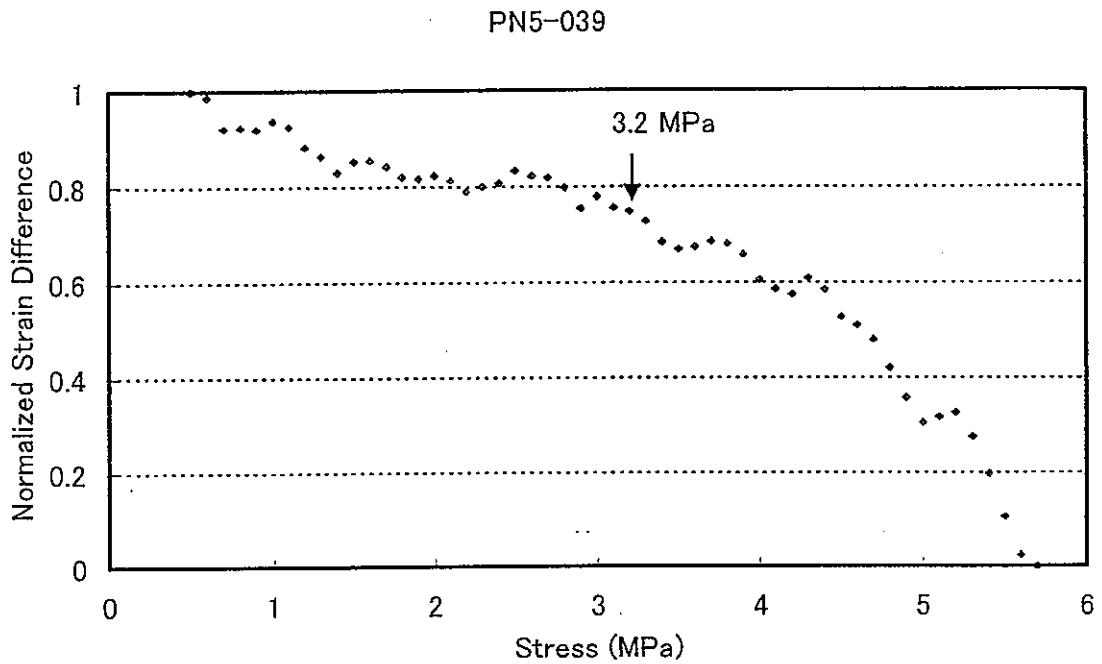


図 4.1.32 98SI-05 コア試験片からの DRA 法による推定例
(上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-395)
using DRA Technique

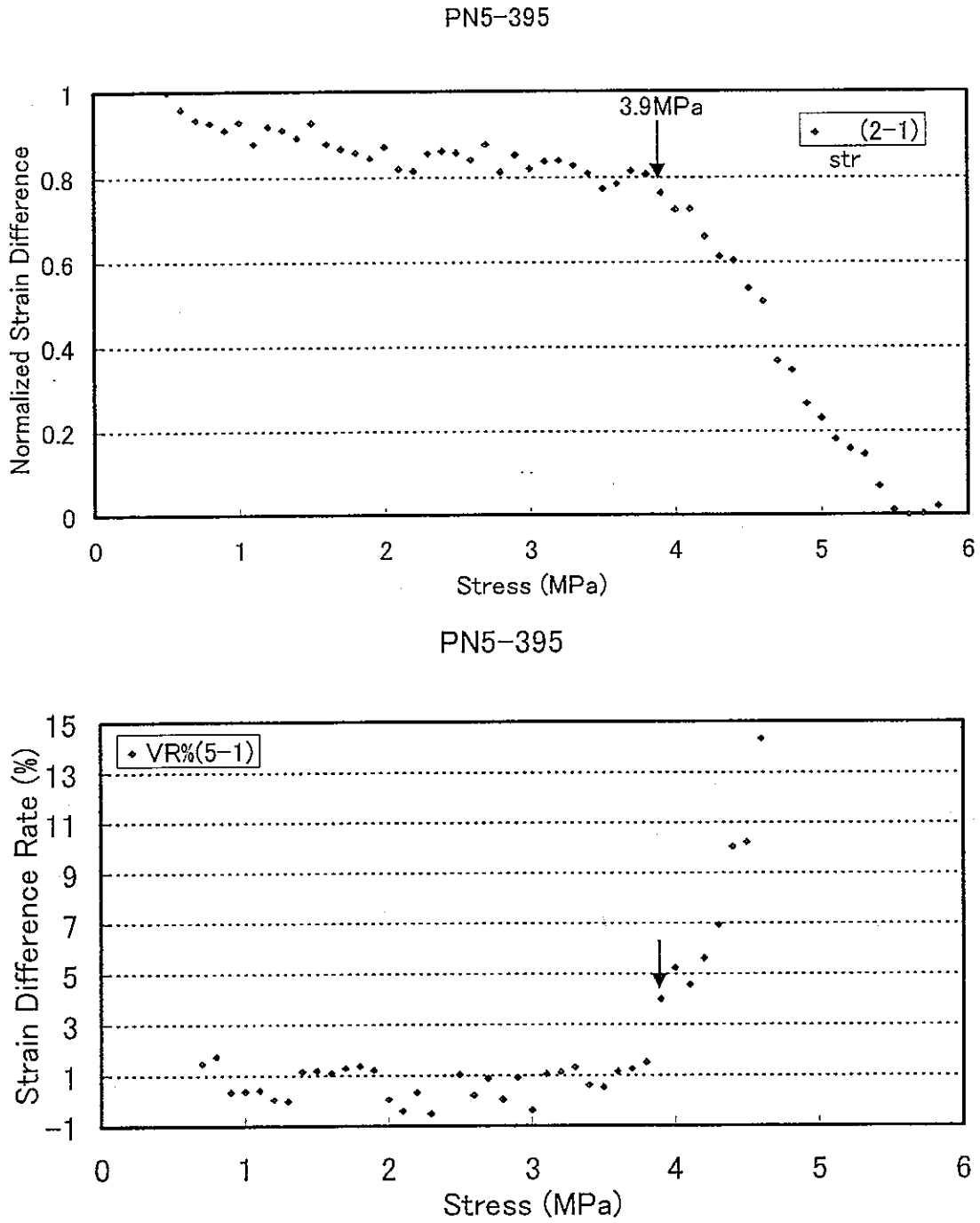


図 4.1.33 98SI-05 コア試験片からの DRA 法による推定例
(上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
変化率-応力関係)

Stress Estimation from TONO CORE 5 (PN5-450)
using DRA Technique

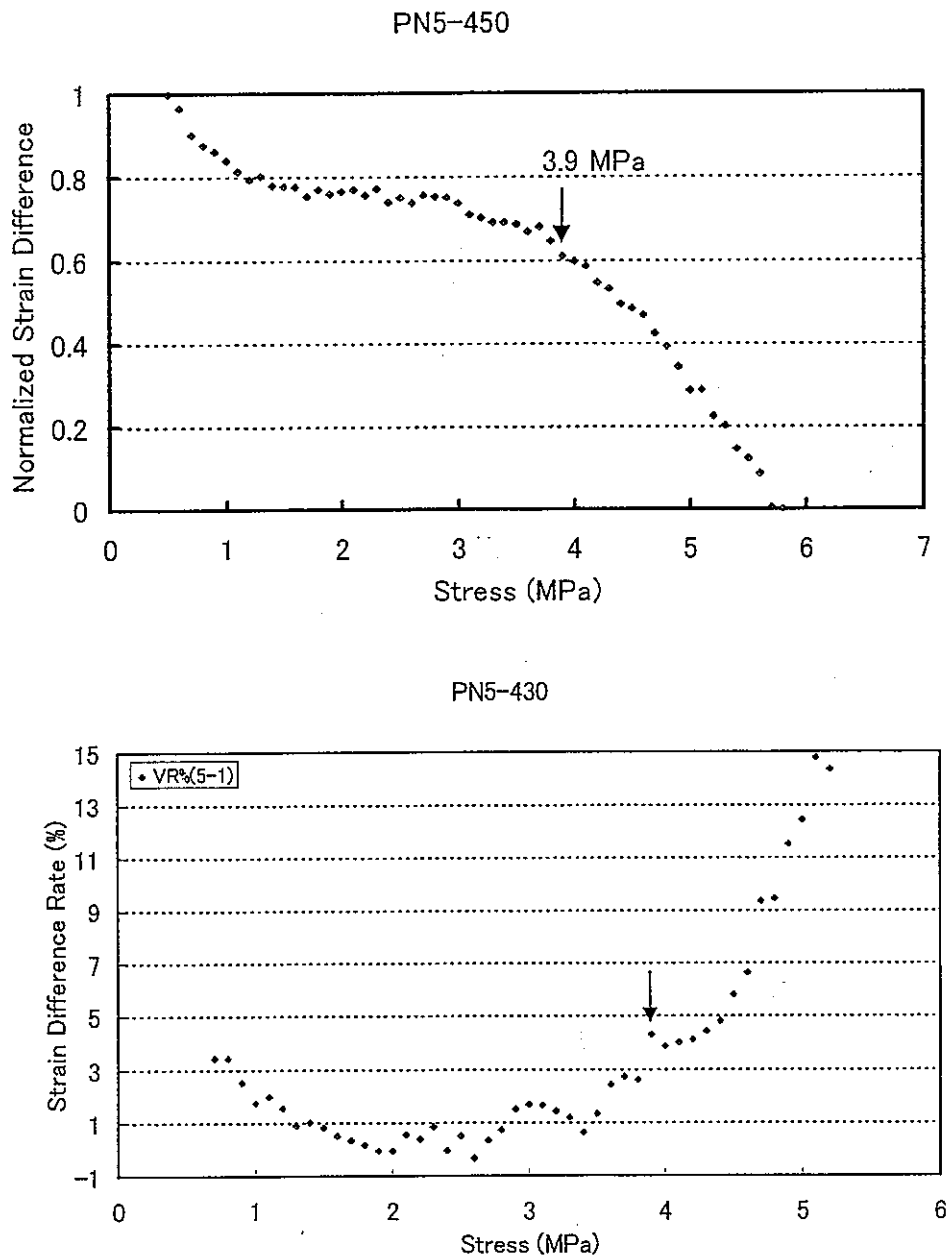


図 4.1.34 98SI-05 コア試験片からの DRA 法による推定例
(上段：正規化したひずみ差-応力関係；下段：ひずみ差の移動平均
変化率-応力関係)

4.2 応力解放法による二次応力測定

4.2.1 概要

北延 NATM 坑道において掘削された坑道は 2 年以上経過しているため、坑道掘削による応力再配分によって、坑道周辺で生じた二次応力状態は安定していると考えられる。この坑道周辺の二次応力状態を把握するために、電中研式 8 成分埋設型ひずみ計を用いて応力解放法によって、三次元応力測定を実施した。

4.2.2 地質概要

東濃鉦山は岐阜県東濃地方の標高およそ 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、基盤をなす中性代～古第三紀の花崗岩、それを被覆する新第三紀の瑞浪層群と新第三紀～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° 南の月吉断層と呼ばれる逆断層がある。測定を実施した瑞浪層群の砂岩の基本的な物性を表-4.2.1 に示す。

表-4.2.1 瑞浪層群の砂岩の物性

項目	物性値
自然密度	18.0 kN/m ³
有効間隙率	47.4 %
P 波速度	2.1 km/s
一軸圧縮強度	6.4 MPa
圧裂引張強度	0.8 MPa
静弾性係数	2.7 GPa
静ポアソン比	0.29
せん断強度	1.6 MPa
内部摩擦角	19.5 °

4.2.3 測定方法

東濃鉦山北延 NATM 坑道において、埋設型 8 成分ひずみ計を用いた応力解放法を実施し、坑道周辺の二次応力分布を測定した。測定は、坑道壁面から水平に掘削された 2 本の試錐孔 (97SI-01、97SI-02) を用いて、坑壁から 0.5m, 1.0m, 1.5m の地点の合計 3 点で実施した。応力解放法を実施した地点の概略図を図-4.2.1 に示す。埋設型ひずみ計を用いた応力解放法による応力測定は図-4.2.2 に示した測定手順に従って実施した。埋設型 8 成分ひずみ計の概略図を図-4.2.3 に示す。また、ひずみ計は 1 番のゲージが鉛直方向を向くように設置した。オーバーコアリングによって回収されたひずみ計が埋設されているオーバーコアについて、8 成分ゲージの外圧に対するひず

み感度係数を求めるために、ひずみ感度試験を実施した。ひずみ感度試験の概要を図-4.2.4に示す。応力解放によって生じる解放ひずみを測定する主要資機材を表-4.2.2に、ひずみ感度試験に用いる主要資機材を表-4.2.3に示す。

応力解放によって計測された解放ひずみおよびひずみ感度試験から求められたひずみ感度係数を用いて、3次元の応力値を求めた。解析は、図-4.2.5に示す手順に従って実施した。

4.2.4 測定結果

(1) 測定孔ボーリング結果

応力解放法を実施した2本のボアホール内の地質は、ほとんどが粗粒砂岩であり、一部に細粒砂岩があった。ひずみ計を埋設した位置の岩種はいずれも粗粒砂岩であった。この粗粒砂岩の粒径は、最大で3mm程度であり、細粒砂岩～シルト岩を不規則に混入する。

(2) ひずみ計の設置

ひずみ計の設置は、97SI-01孔の0.5m,1.5m地点および97SI-02の1.0m地点の合計3点で行った。埋設はセメントを用いて実施し、ひずみ計の埋設後、7日間以上養生を行い、その間のひずみの経時変化を測定した。ほとんどのひずみ計は埋設終了後3～5日経過すると、概ねひずみは安定したが、一部のゲージでドリフトの傾向が認められた。しかしながら、それらのひずみ計は、解放ひずみ測定直前の1時間当たりのひずみの変化量は 1μ 以下となり、解放ひずみの測定には影響が無視できるほど小さいと考えられる。養生中のひずみの経時変化を図-4.2.6～4.2.8に示す。

(3) 解放ひずみの測定

ひずみ計の埋設および養生終了後、解放ひずみを測定するためにオーバーコアリングを実施した。いずれの測点でも各ゲージの測定値はばらつきが少なく概ね理論的な挙動を示した。測定された解放ひずみを表-4.2.4に示す。また、オーバーコアリング時のひずみの経時変化を図-4.2.9～4.2.11に示す。

(4) ひずみ感度試験

オーバーコアリングを行い回収したひずみ計が埋設してあるオーバーコアについてひずみ感度試験を実施した。いずれのゲージによる応力-ひずみ曲線も下に凸となり、軟岩で一般的に見られる挙動を示した。ひずみ感度試験の応力-ひずみ曲線図を図4.2.12～4.2.14に示す。ひずみ感度試験から得られた各ゲージの解放ひずみに対応する等方応力を表-4.2.5に示す。

ひずみ感度試験結果からひずみ感度係数を求める場合には、一般的には、得られた応力-ひずみ曲線の割線勾配を用いる。しかしながら、本測定においては、以前に東濃鉱山で実施された同様の測定と比較するために、接線勾配を用いることとした。ひずみ感度係数を求める際には、ひずみ計が埋設されているコアの弾性係数は1471MPa

を、ポアソン比は0.35を用いた。

解放ひずみおよびひずみ感度係数から各測点における二次応力状態を表-4.2.6に示す。

(5)二次応力測定結果

二次応力測定により得られた三次元主応力についてシュミットネット（下半球投影）を用いて図-4.2.14に示す。それによると、3地点とも類似した応力状態であった。最大主応力値は3.3~3.8MPaで、その方向はN50~80° W60~80° Nであった。中間主応力値は2.3~2.8MPaで、その方向はN60~80° W10~30° Sであり、最小主応力値は2.1~2.5MPaで、その方向はN10~20° E5° S~5° Nであった。瑞浪層群の砂岩の一軸圧縮強度は6.6MPaで、一軸圧縮強度と最大主応力値の比は約2であり、岩盤の力学的な安定性は問題ないと考えられることができる。

4.2.5 考察

坑道を掘削する前に、坑道掘削予定地点近傍で実施された初期応力測定の結果によると、最大主応力値は1.7MPaでその方向はほぼN80° E50° Sであり、中間主応力値は1.3MPaでその方向はほぼN85° W40° Sであり、最小主応力値は1.1MPaでその方向はほぼN5° E5° Nであった。

初期応力状態と二次応力状態を比較するために、それらの応力状態をシュミットネット（下半球投影）を用いて図-4.2.15に示す。二次応力状態は、最大主応力値が初期応力状態の2.2~2.5倍になり、その方向は鉛直方向に近づいている。また、中間・最小主応力値も1.7~2.2倍になっており、坑道壁面から1.5m以内の岩盤では2~3倍程度の応力集中が発生していることがわかった。

最大主応力方向がほぼ鉛直方向であること、および、坑道と測点の位置関係から鉛直方向の応力集中が最も顕著であると考えられることから、鉛直応力成分について検討することとした。鉛直方向を応力値を表-4.2.7に示す。鉛直方向の初期応力が1.5MPaであり、水平坑道掘削により、鉛直応力は坑壁から0.5mの地点では3.7MPaに、1.0mの地点では3.3MPaに、1.5mの地点では3.4MPaになり、それぞれ2.4倍、2.2倍、2.2倍となった。坑道掘削による応力集中は、0.5mの地点では他の2点より大きく、1.0mと1.5mの地点では、ほぼ同程度であると考えられる。

【水平面図】

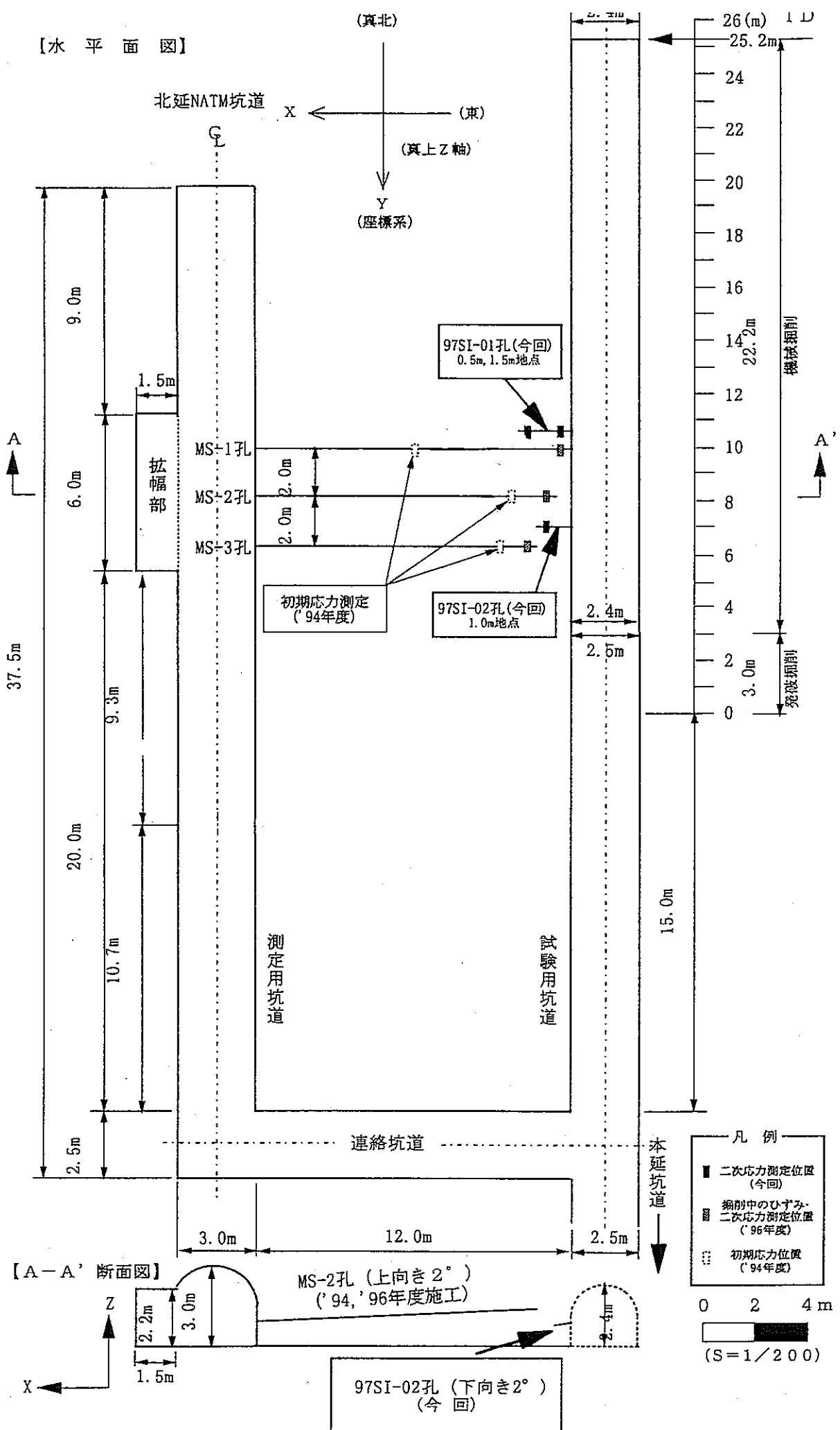


図-4.2.1 二次応力測定地点

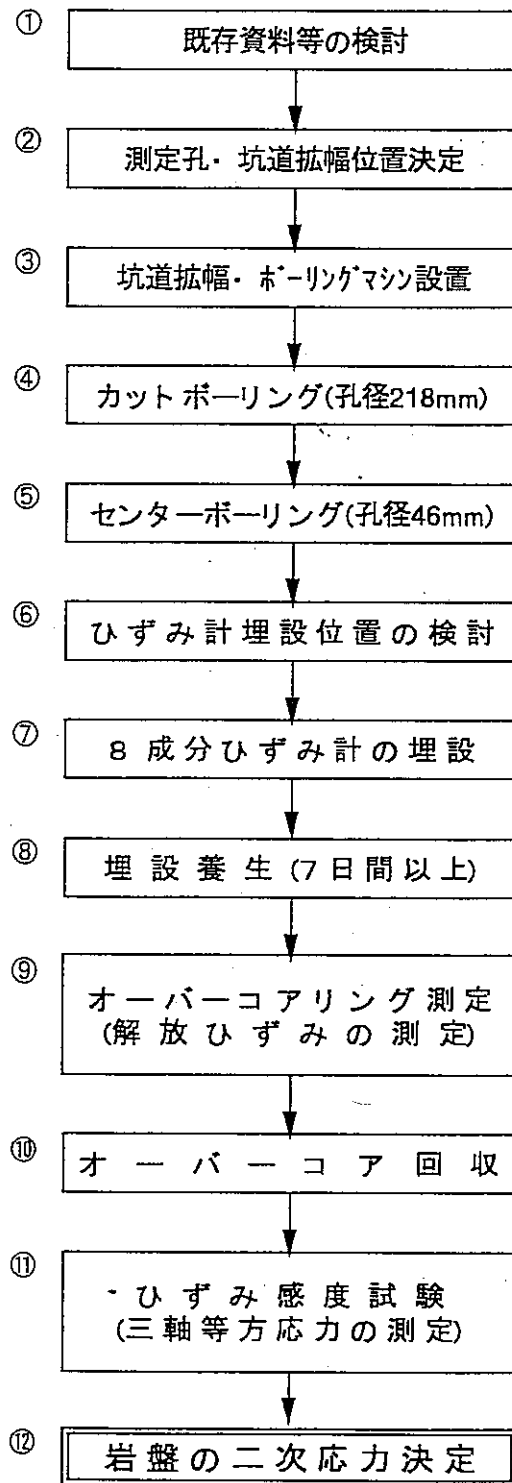
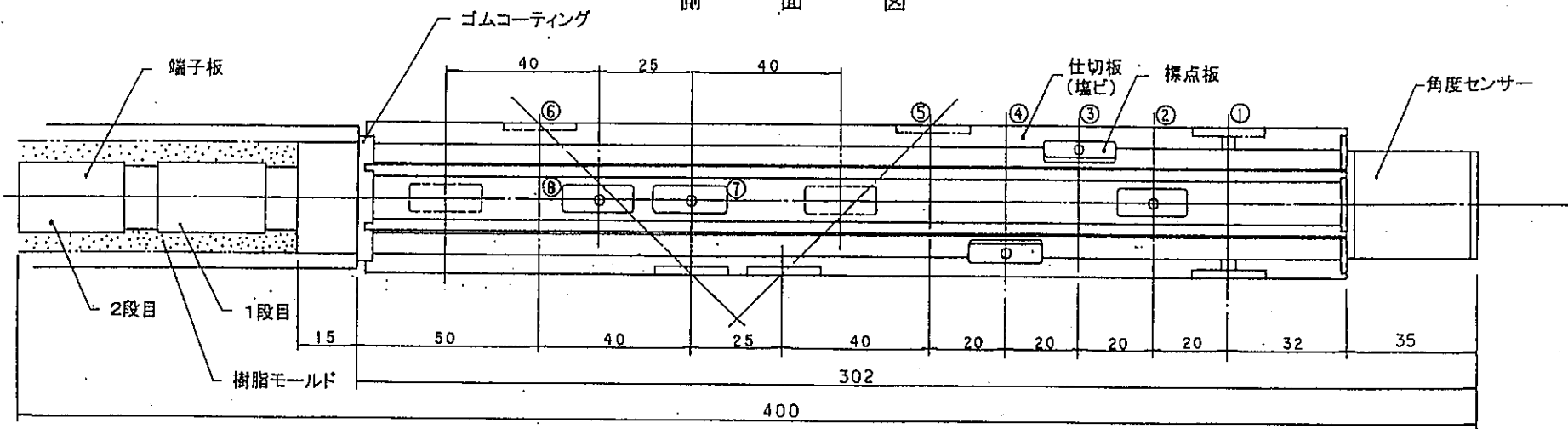
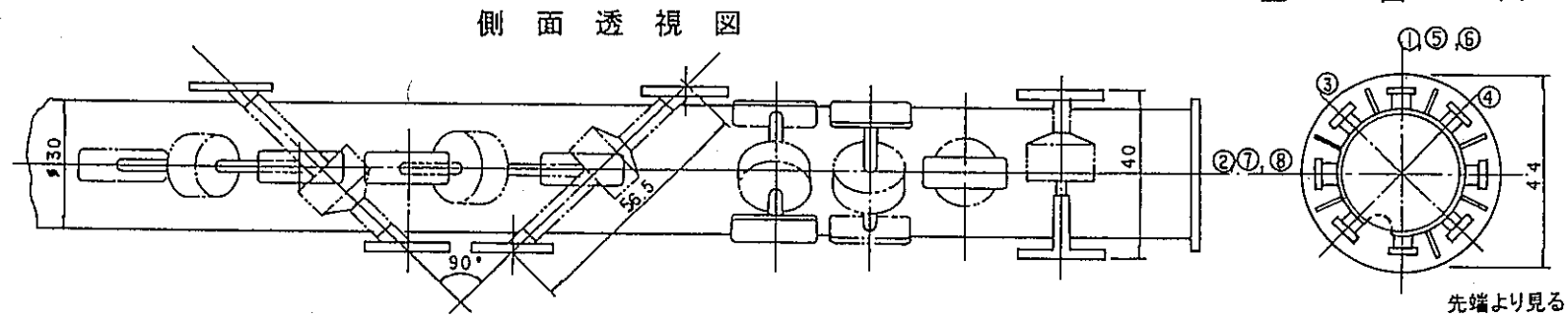


図-4.2.2 埋設型ひずみ計を用いた応力解放法の測定方法

側面図



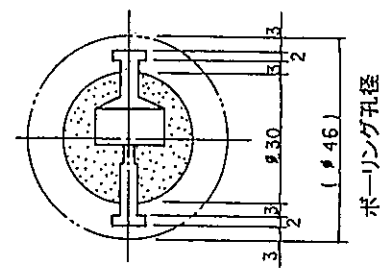
正面図



側面透視図

—54—

断面図



端子板展開図

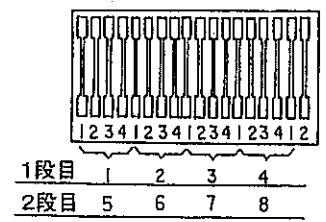


図-4.2.3 埋設型8成分ひずみ計の概略図

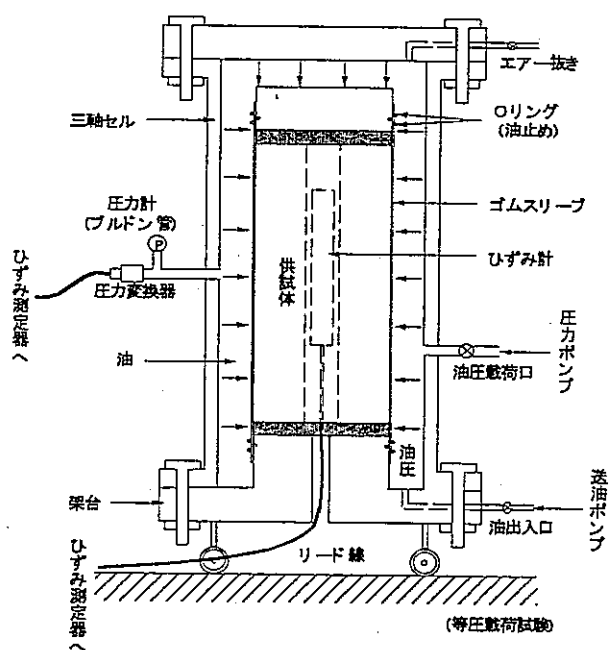
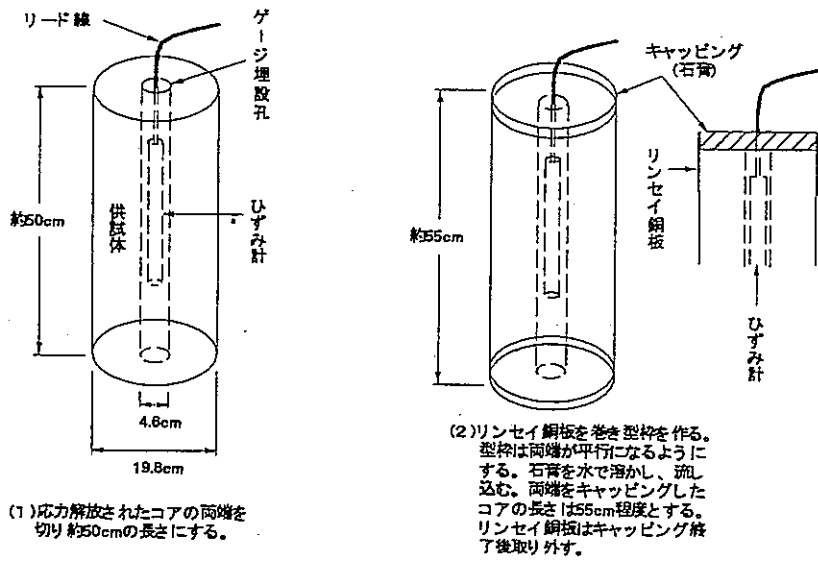


図-4.2.4 ひずみ感度試験の概要

表-4.2.2 解放ひずみの計測に用いる主要機材

使用目的	名 称	形 式・仕 様	数 量	備 考
ボーリング オーバーコアリク	ボーリングマシン	OP-1(動力7kW)	1台	オーバーコアリク用 センターホーリング用 オーバーコアリク用 センターホーリング用
	ボーリングポンプ	MS-1503(動力5.5kW)	1式	
	ロッド	φ73mm l=1.0, 0.5m他	1式	
	コアチューブ	φ40.5mm l=1.0, 0.5m他	1式	
	ダイヤモンドビット	φ218mmシングル l=1.0, 0.5m他	1式	
	センターリングガイドパイプ	φ46mmダブル l=1.0, 1.5m	1式	
	ウォータースイベル	φ218mmシングルサーフェスタイプ	1式	
	ウォータースイベル	φ46mmダブルサーフェスタイプ	1式	
ひずみ計 埋 設	8成分ひずみ計	電中研方式 BMS-44D-TX型	3台	
	パッカー	特殊	1式	
	充填材用ホース	外径8mm, 内径6mm	1式	
	エアパイプ	外径6mm, 内径4mm	1式	
	保護管	φ53mm l=1.0, 0.5, 0.3m他	1式	
	手動式注入ポンプ	特殊	1式	
	計量器具		1式	
	早強セメント		1式	
	混和材	ホリゾナル EVA-AD5型	1式	
	フローコーン	プレパクト型 1725cc	1台	
アクリルパイプ	φ46mm用	1本		
計 測 器	データロガー	TDS-601	1台	
	スイッチボックス	SWS-30	1台	
	パーソナルコンピュータ	ノートパソコン	1台	
	プリンター	PR-201	1台	
	無停電電源装置	AC100V	1台	
	電圧安定器	AC100V	1台	
仮設資材 そ の 他	単管パイプ		1式	拡張用
	給水・給電資材	キャパタ付, 分電盤, グラウトランス	1式	
	ピック、他拡張材料		1式	

表-4.2.3 ひずみ感度試験に用いる主要機材

使用目的	名 称	形 式・仕 様	数 量	記 事
キャッピング	焼石膏	特級	1式	
	リンセイ銅板	1,800×200×0.2mm	1式	
	水準器		1台	
試 験	三軸試験装置	セル等	1台	
	油圧ポンプ		1台	
	電動キャポン	100V	1台	
	真空ポンプ	100V	1台	
	ゴムスリーブ	φ198mm用	1式	
	リング	φ198mm用	1式	
タービン油		1式		
計 測 器	圧力変換器	PGM-50	1式	
	データロガー	TDS-601	1台	
	パーソナルコンピュータ	ノートパソコン	1台	
	プリンター	PR-201シリーズ	1台	
そ の 他	工具類		1式	

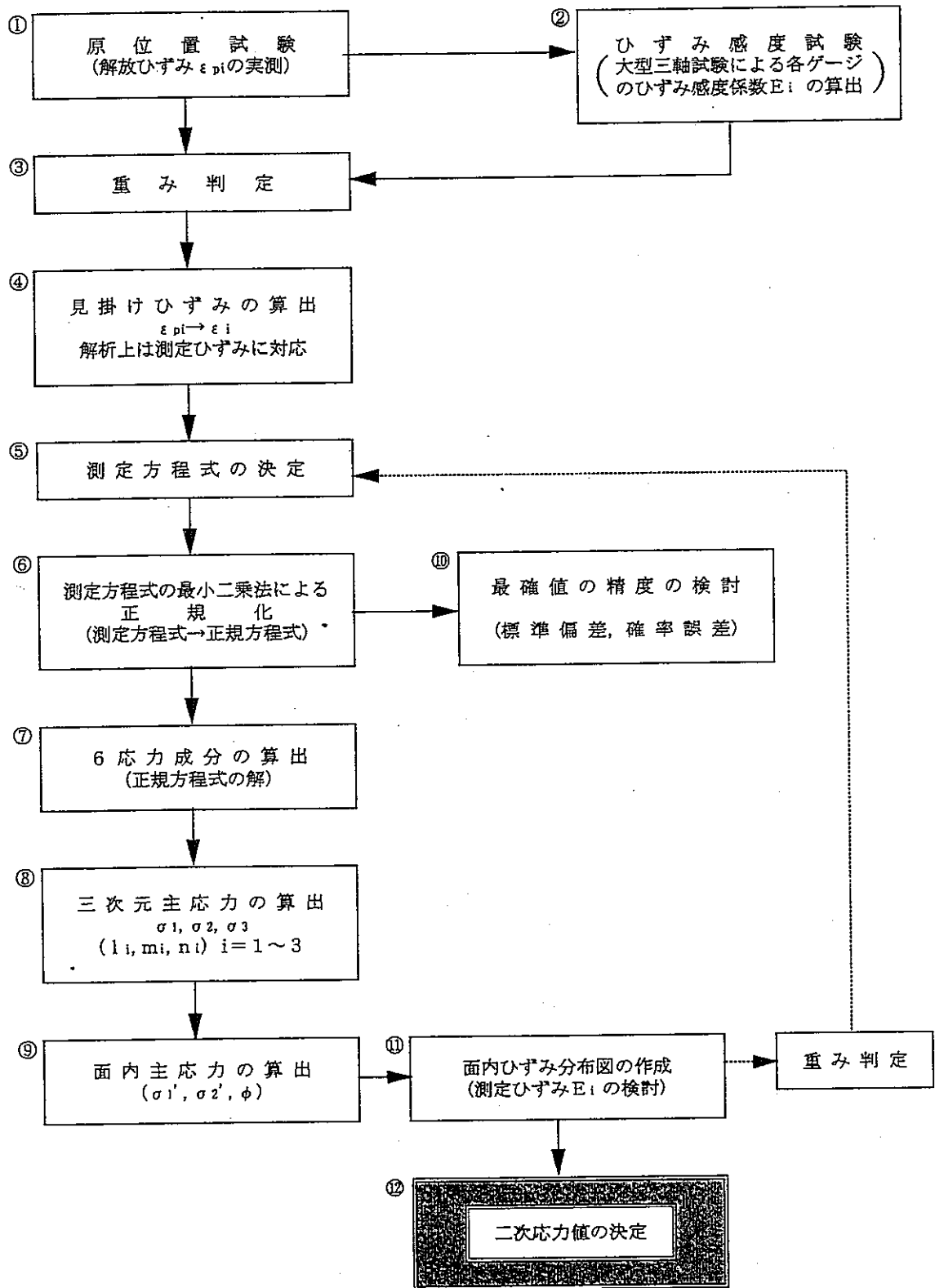


図-4.2.5 ひずみ感度係数を考慮した岩盤応力の解析方法

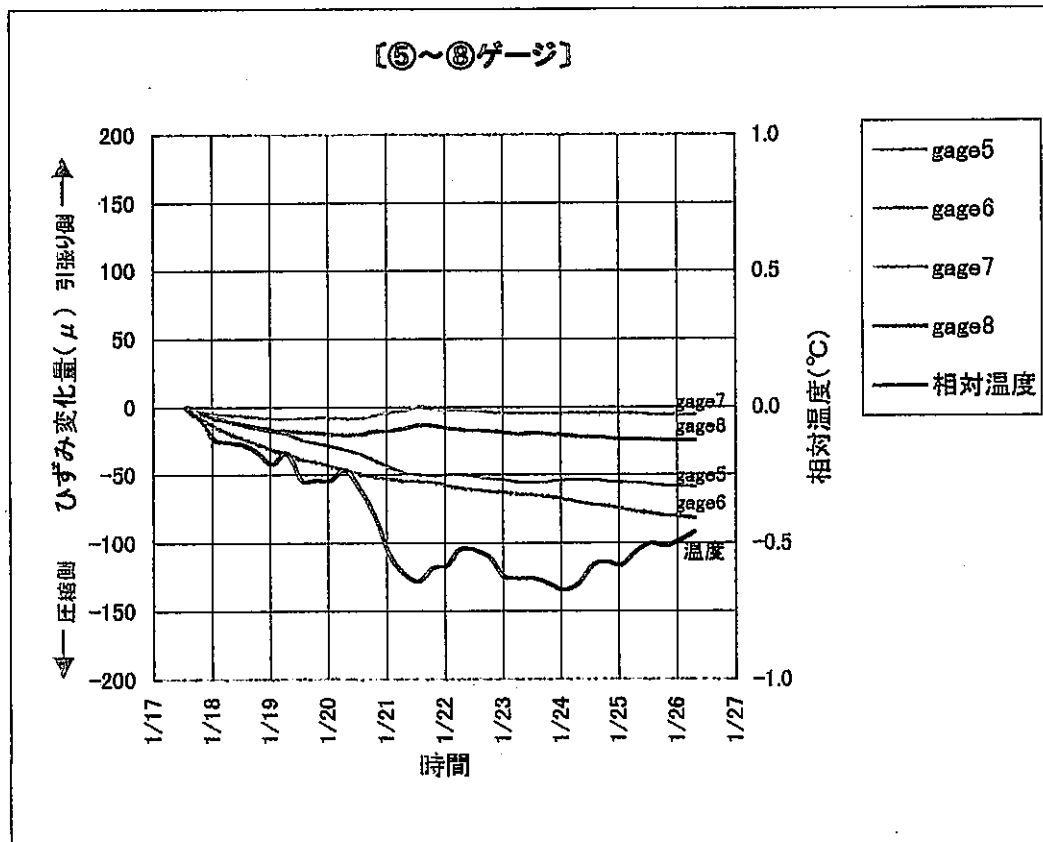
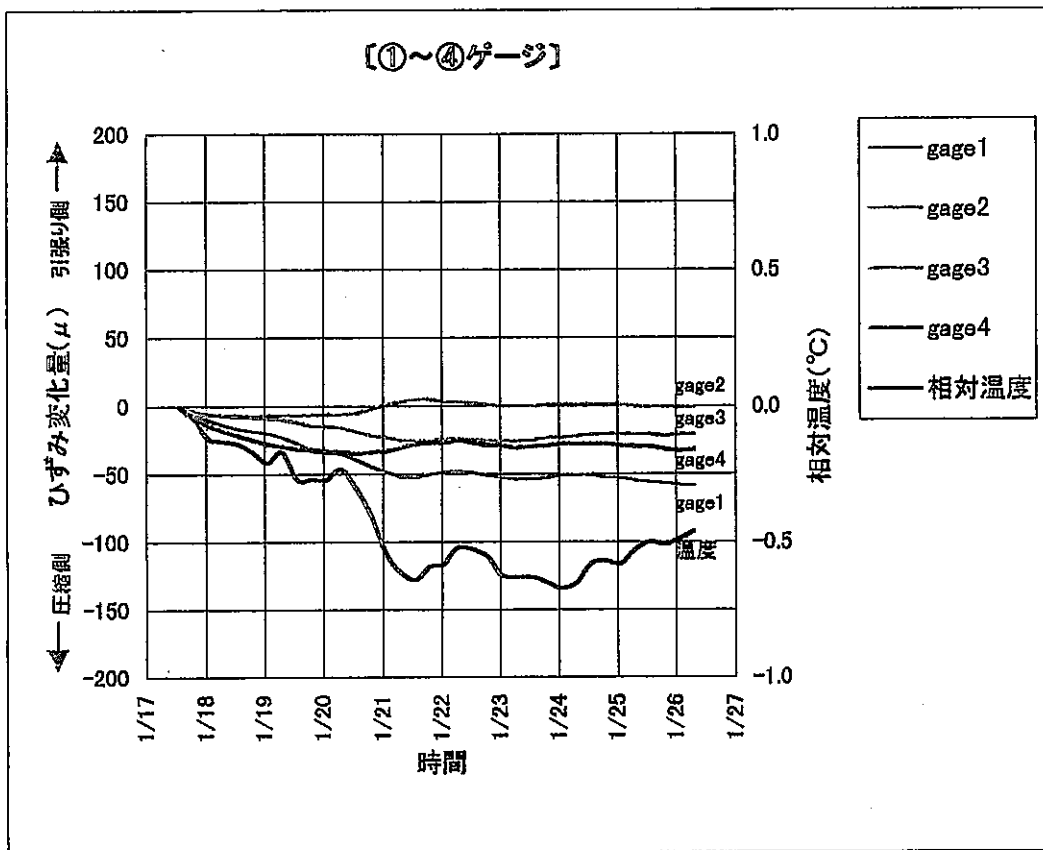


図-4.2.6 養生中のひずみの経時変化 (OC-1、0.5m 地点)

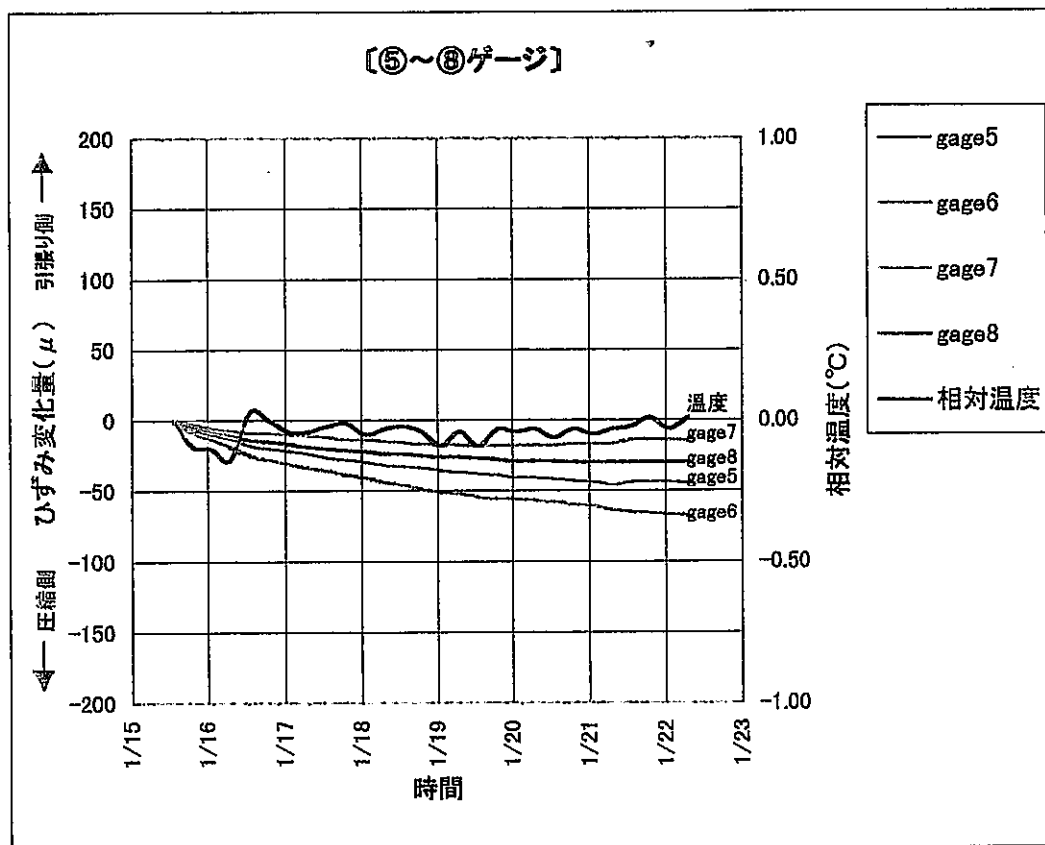
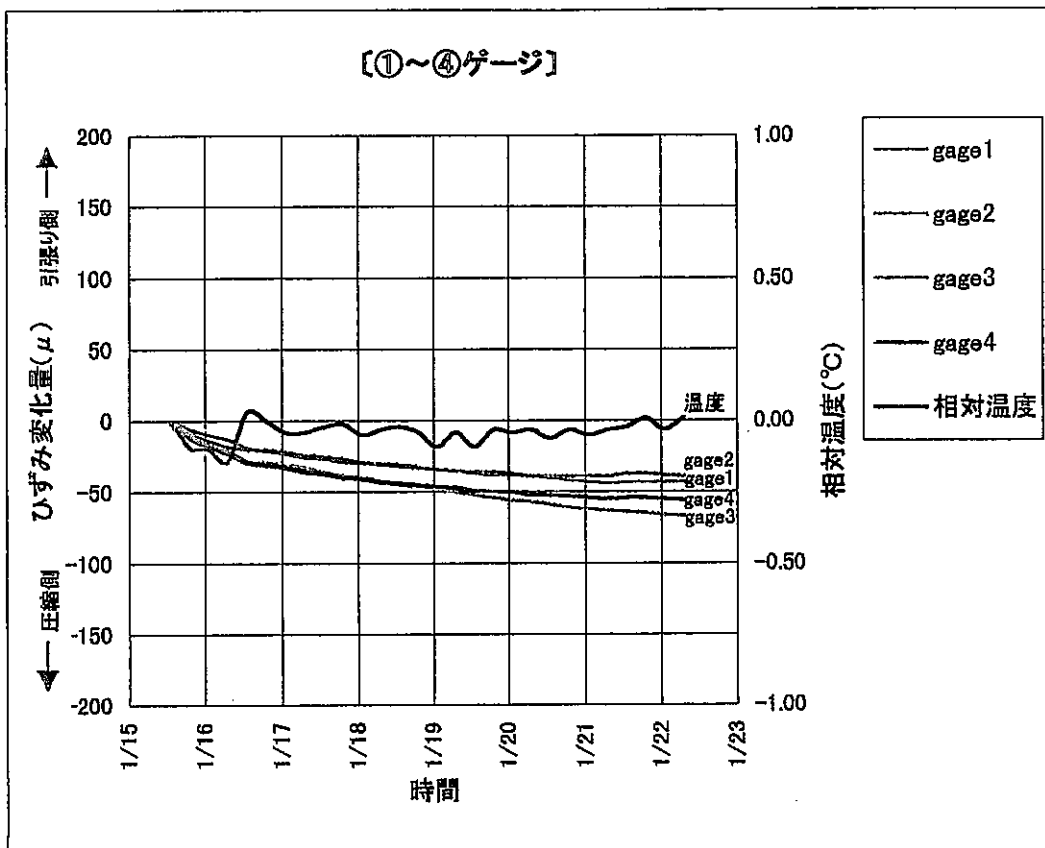


図-4.2.7 養生中のひずみの経時変化 (OC-2、1.0m 地点)

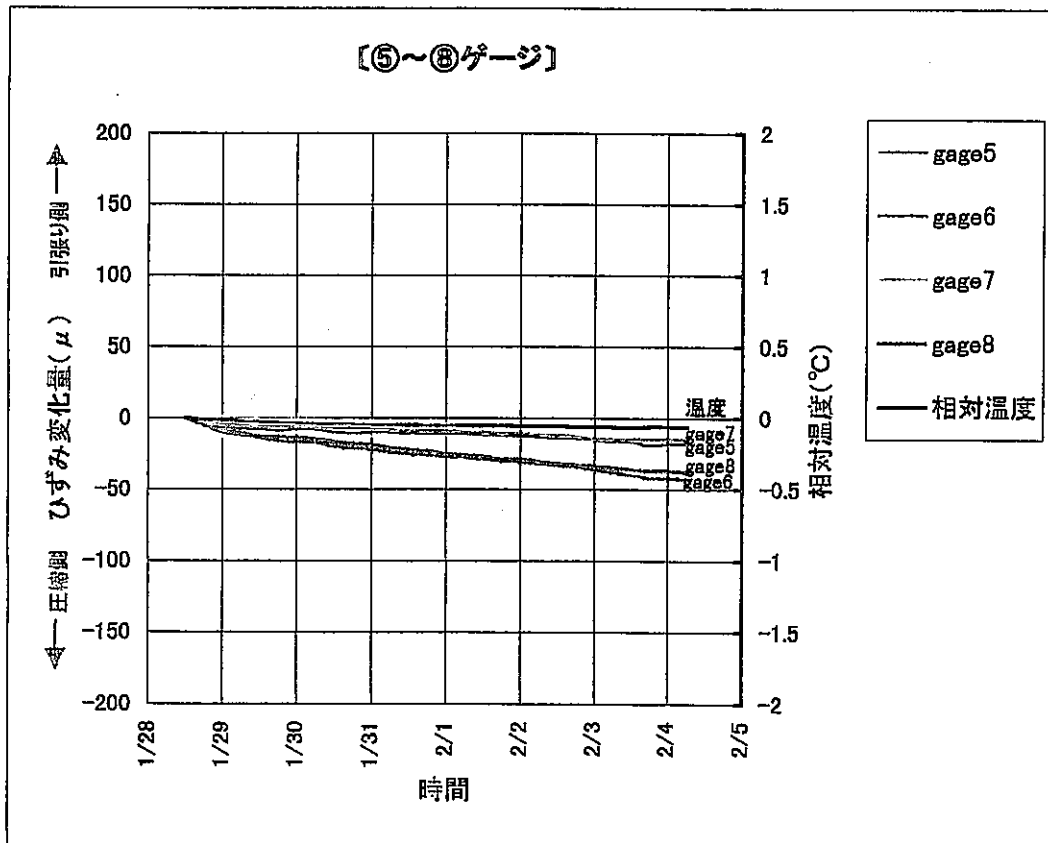
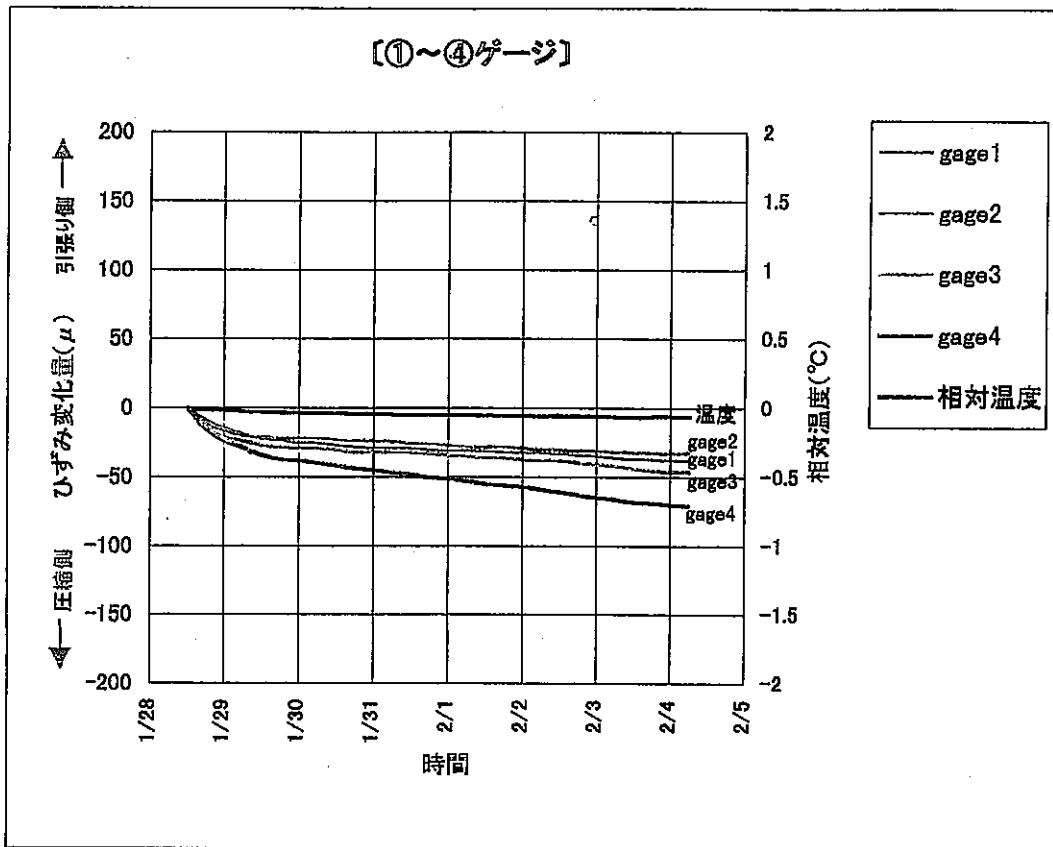


図-4.2.8 養生中のひずみの経時変化 (OC-3、1.5m 地点)

表-4.2.4 測定された解放ひずみ

測点No.	ゲージ No.	解放 ひずみ (μ)	測点No.	ゲージ No.	解放 ひずみ (μ)	測点No.	ゲージ No.	解放 ひずみ (μ)
OC-1-1	①	2038	OC-2-1	①	1828	OC-1-2	①	1860
	②	560		②	565		②	777
	③	1325		③	1227		③	1234
	④	1735		④	1629		④	1769
	⑤	1204		⑤	976		⑤	834
	⑥	1619		⑥	1209		⑥	1414
	⑦	287		⑦	326		⑦	708
	⑧	520		⑧	536		⑧	1176

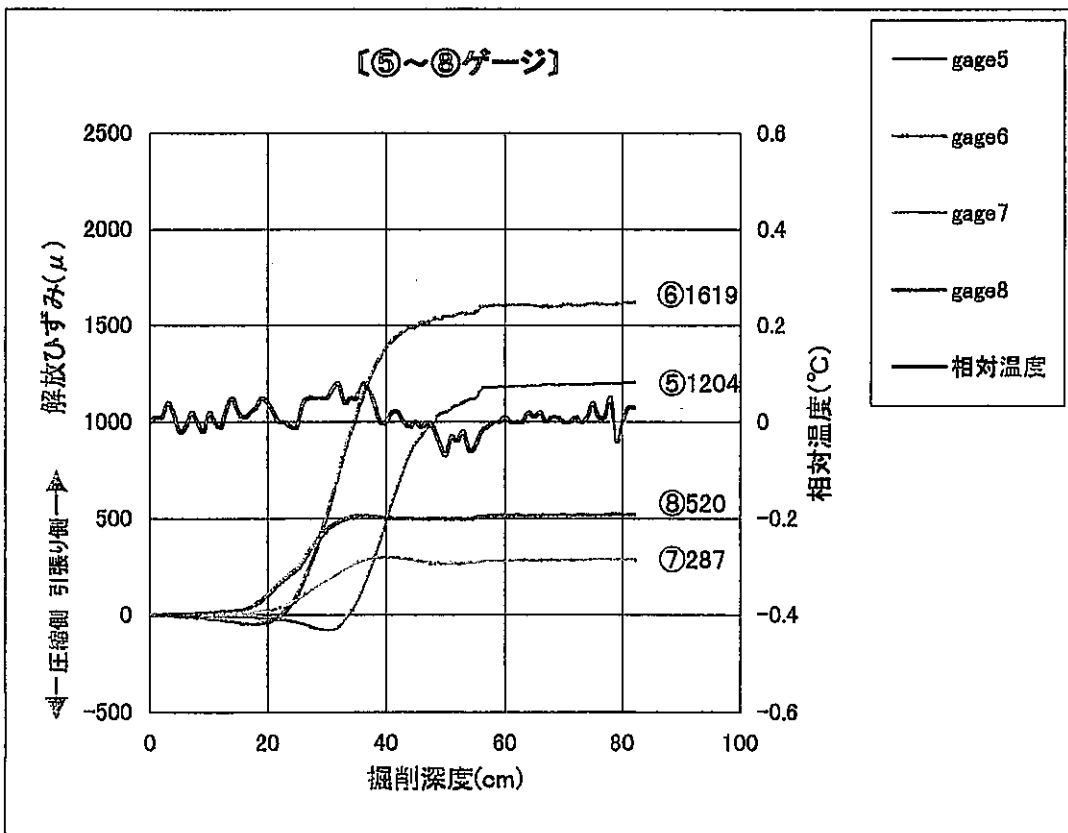
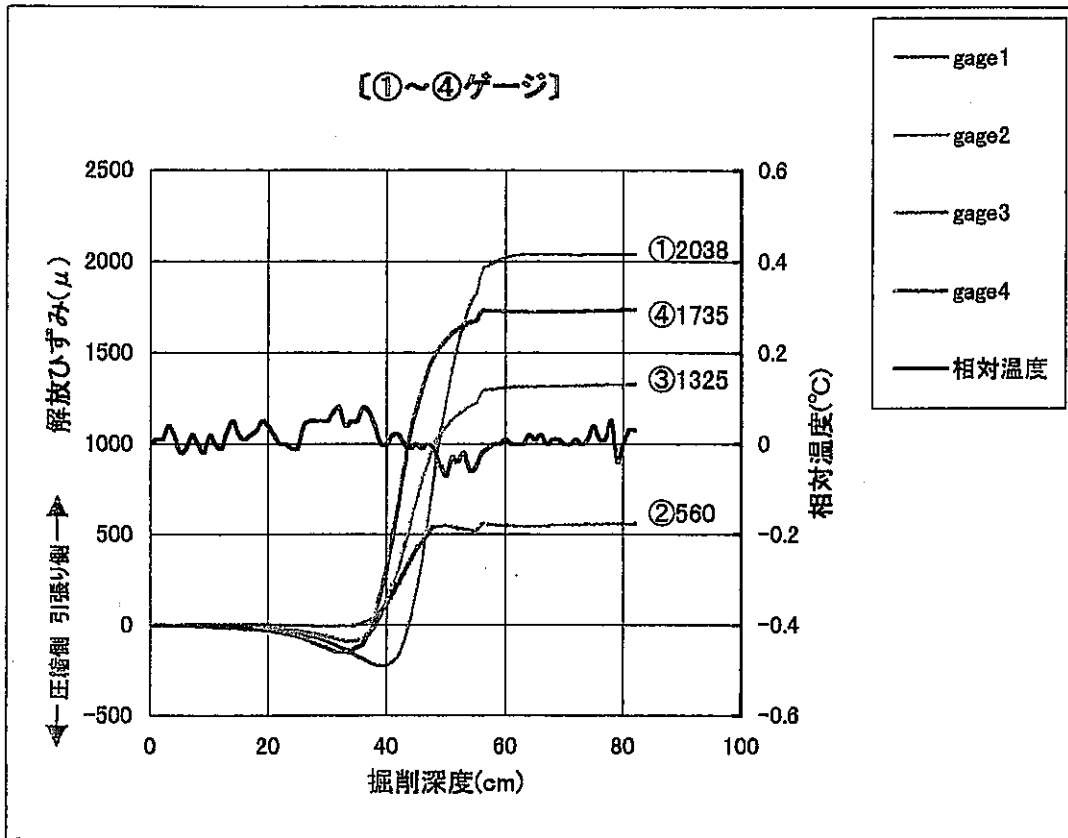


図-4.2.9 オーバーコアリング時のひずみの経時変化 (OC-1、0.5m 地点)

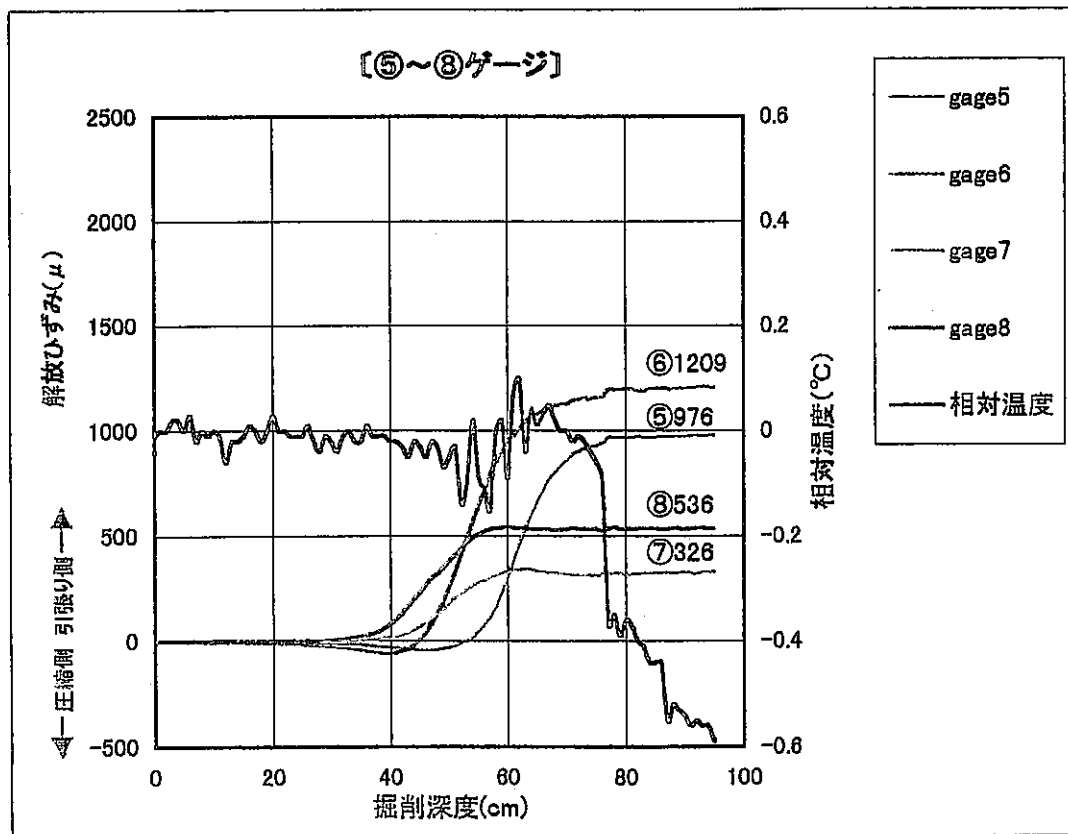
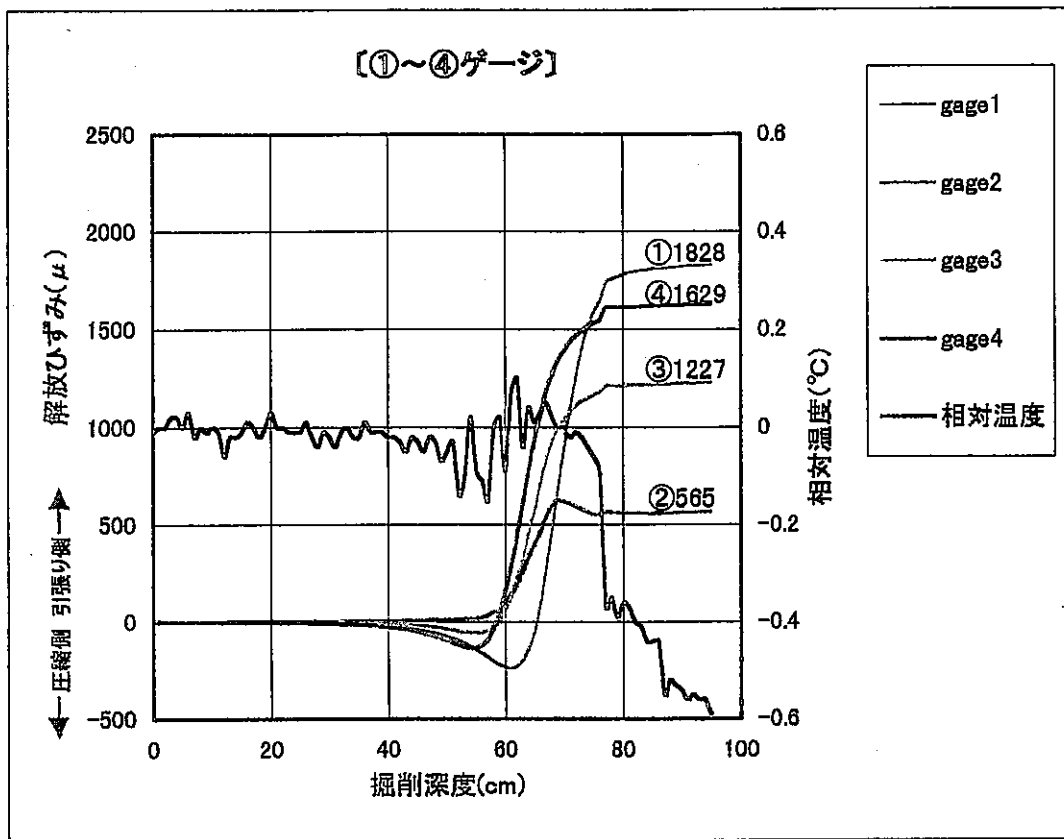


図-4.2.10 オーバーコアリング時のひずみの経時変化 (OC-2、1.0m 地点)

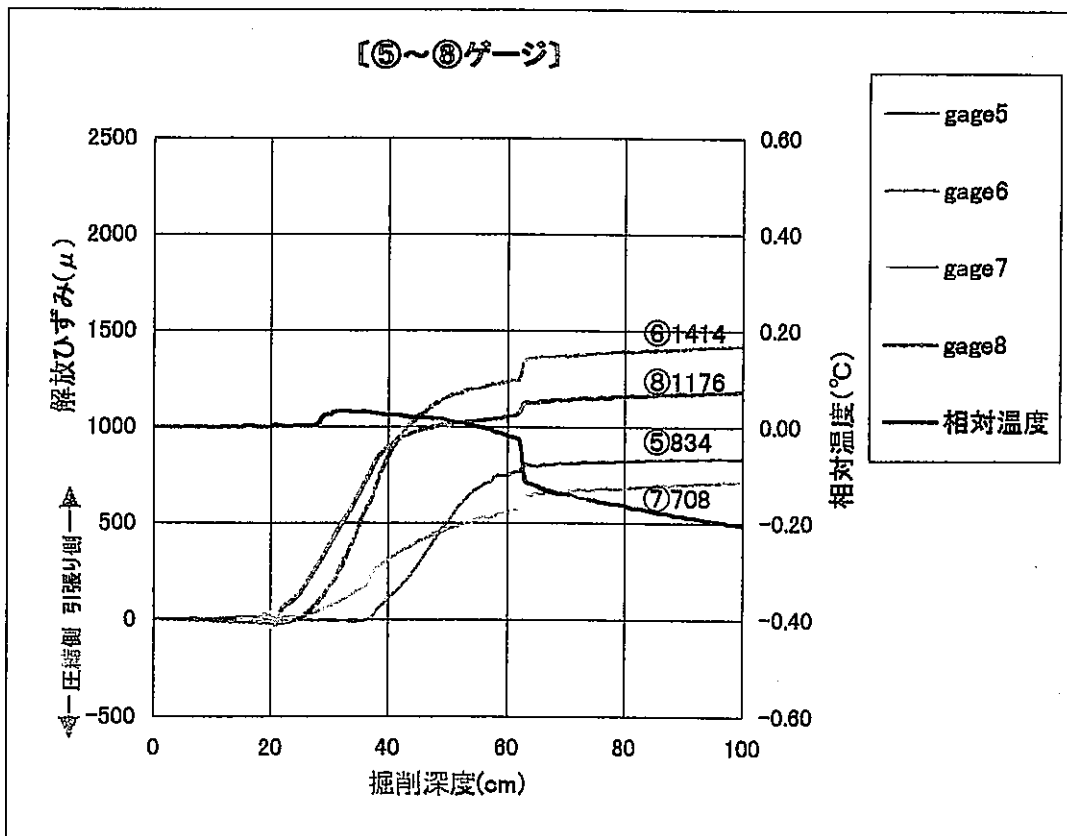
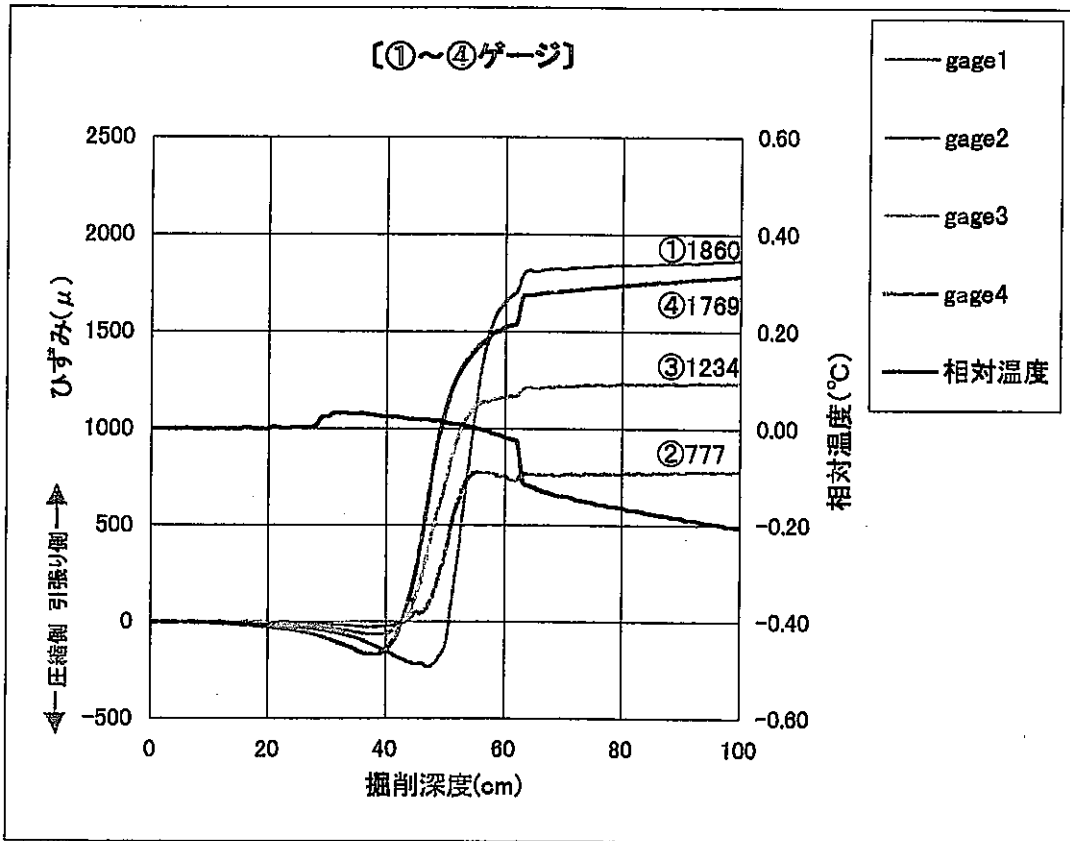


図-4.2.11 オーバーコアリング時のひずみの経時変化 (OC-3、1.5m 地点)

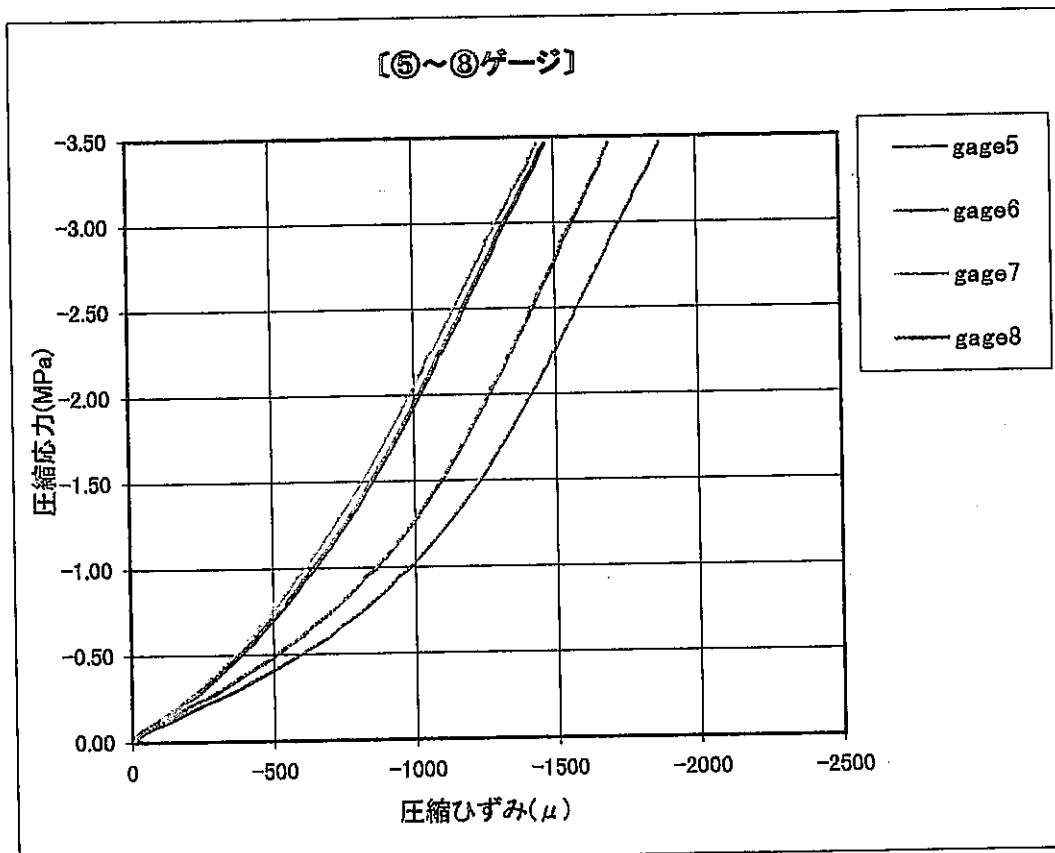
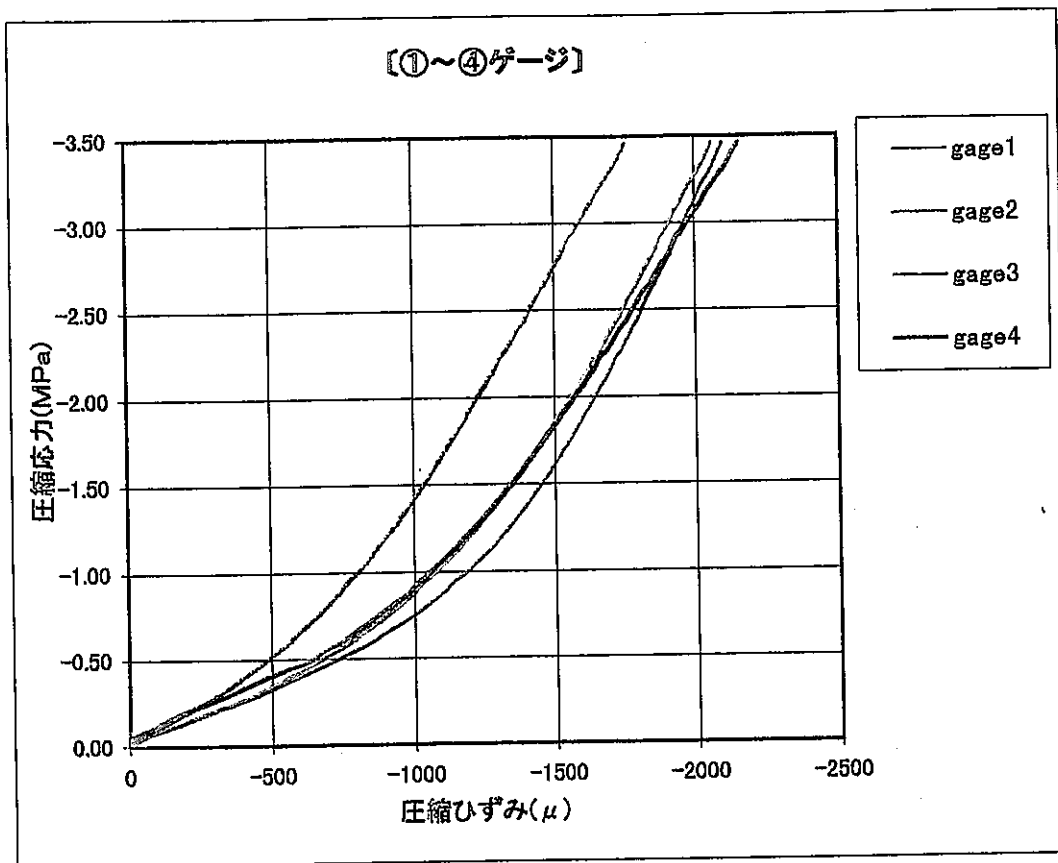


図-4.2.12 ひずみ感度試験における応力-ひずみ曲線 (OC-1; 0.5m 地点)

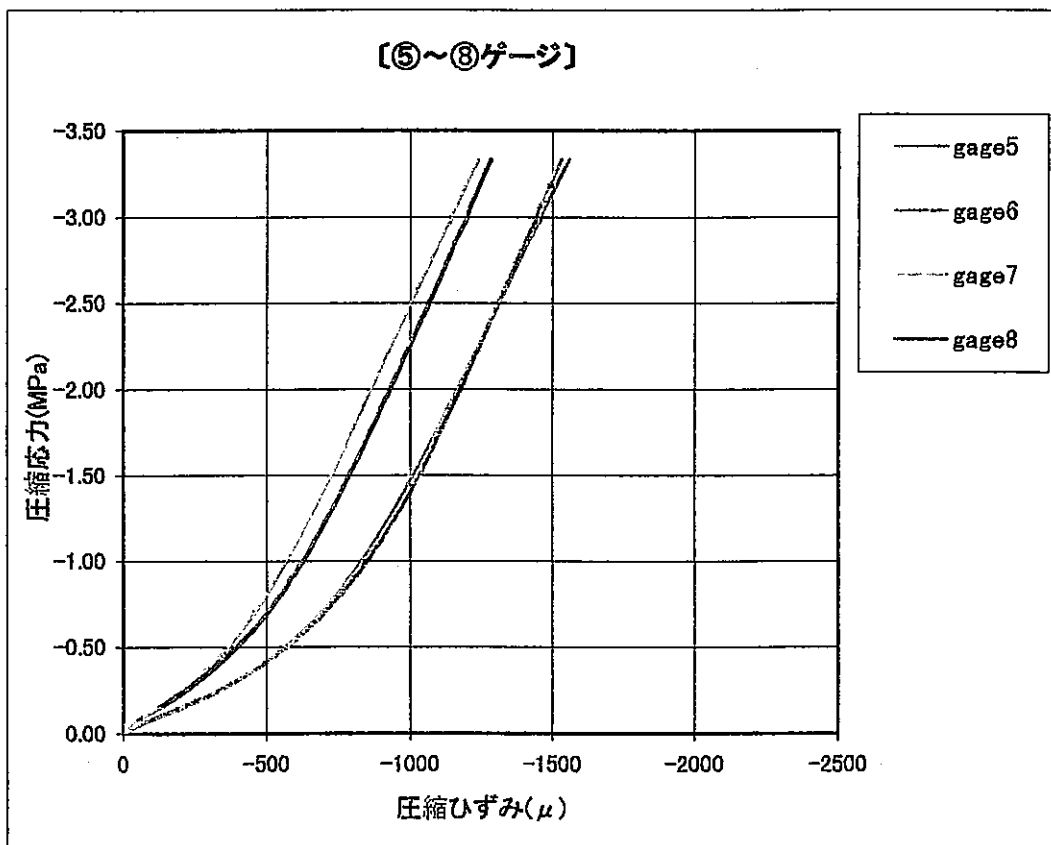
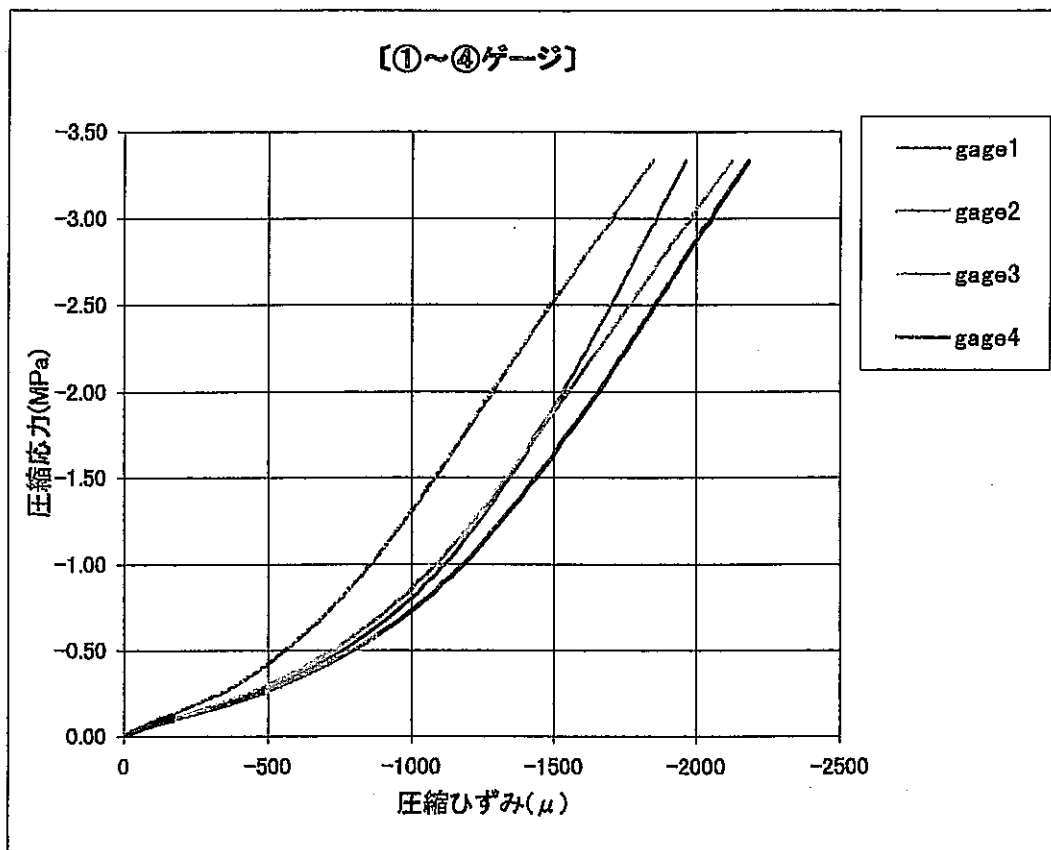


図-4.2.13 ひずみ感度試験における応力-ひずみ曲線 (OC-2、1.0m 地点)

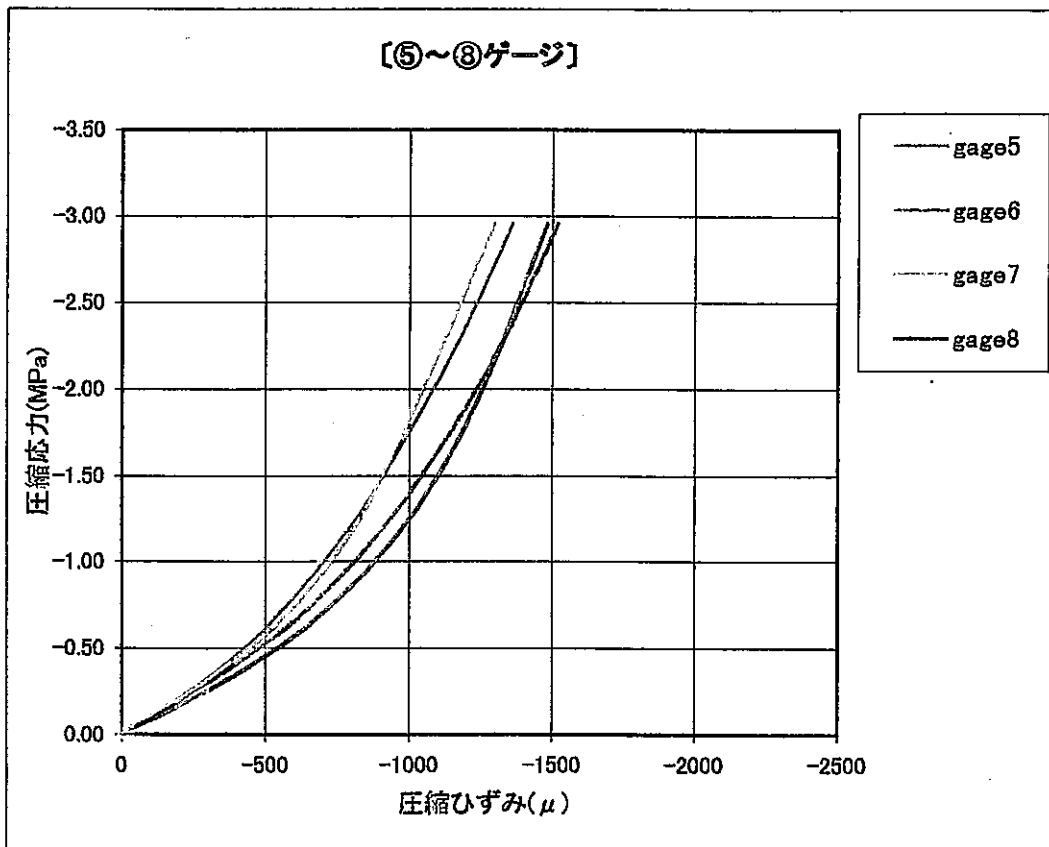
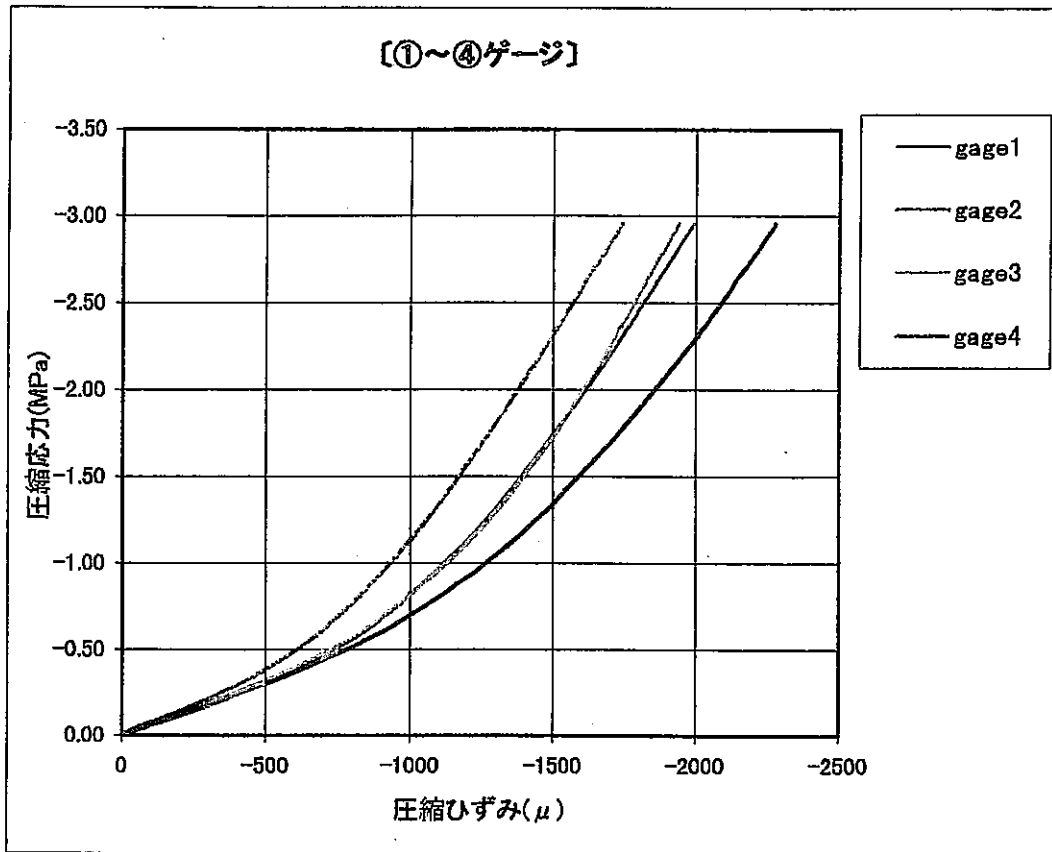


図-4.2.14 ひずみ感度試験における応力-ひずみ曲線 (OC-3、1.5m 地点)

表-4.2.5 解放ひずみに対する等方応力

測点No.	ゲージ No.	等方 応力 (MPa)	測点No.	ゲージ No.	等方 応力 (MPa)	測点No.	ゲージ No.	等方 応力 (MPa)
0C-1-1	①	-3.26	0C-2-1	①	-2.91	0C-1-2	①	-2.62
	②	-0.60		②	-0.52		②	-0.74
	③	-1.46		③	-1.28		③	-1.18
	④	-2.38		④	-1.94		④	-1.83
	⑤	-1.44		⑤	-1.41		⑤	-1.31
	⑥	-3.20		⑥	-2.13		⑥	-2.58
	⑦	-0.38		⑦	-0.44		⑦	-0.96
	⑧	-0.74		⑧	-0.78		⑧	-1.71

表-4.2.6 各測点における二次応力状態

測点番号		0C-1-1(接線)	0C-2-1(接線)	0C-1-2(接線)	
坑壁からの深度(m)		0.5	1.0	1.5	
項目		測定二次応力	測定二次応力	測定二次応力	
総データ数 解放ひずみの個数)		8	8	8	
弾性係数 E (MPa)		1471			
ポアソン比 ν		0.35			
6 応力 成分	σX (MPa)	-2.47	-2.32	-2.95	
	σY (MPa)	-2.33	-2.15	-2.58	
	σZ (MPa)	-3.70	-3.28	-3.37	
	τXY (MPa)	0.05	0.06	0.14	
	τYZ (MPa)	-0.18	-0.12	-0.06	
	τZX (MPa)	0.26	0.14	0.33	
三 次 元 主 応 力	$\sigma 1$ (MPa)	-2.30	-2.13	-2.53	
	$\sigma 2$ (MPa)	-2.42	-2.31	-2.80	
	$\sigma 3$ (MPa)	-3.78	-3.31	-3.57	
	$\sigma 1$	方位角H1(°)	261.5	255.3	68.8
		傾斜角V1(°)	5.8	3.8	4.3
	$\sigma 2$	方位角H2(°)	-7.3	-14.0	-23.7
		傾斜角V2(°)	12.1	9.6	29.6
	$\sigma 3$	方位角H3(°)	146.5	143.9	166.3
傾斜角V3(°)		76.5	79.7	60.0	
面 内 応 力	X-Y (水平面)	σX (MPa)	-2.47	-2.32	-2.95
		σY (MPa)	-2.33	-2.15	-2.58
		τXY (MPa)	0.05	0.06	0.14
		$\sigma 1'$ (MPa)	-2.31	-2.13	-2.53
		$\sigma 2'$ (MPa)	-2.48	-2.34	-2.99
		θ (°)	72.4	72.9	72.3
	Y-Z (南北断面)	σY (MPa)	-2.33	-2.15	-2.58
		σZ (MPa)	-3.70	-3.28	-3.37
		τYZ (MPa)	-0.18	-0.12	-0.06
		$\sigma 1'$ (MPa)	-2.30	-2.14	-2.57
		$\sigma 2'$ (MPa)	-3.73	-3.30	-3.37
		θ (°)	-7.4	-5.8	-4.2
	Z-X (東西断面)	σZ (MPa)	-3.70	-3.28	-3.37
		σX (MPa)	-2.47	-2.32	-2.95
		τZX (MPa)	0.26	0.14	0.33
		$\sigma 1'$ (MPa)	-2.41	-2.30	-2.77
		$\sigma 2'$ (MPa)	-3.76	-3.30	-3.55
		θ (°)	78.6	81.8	61.4

注1) 応力は圧縮を負、引張りを正とした。

注2) 三次元主応力は $\sigma 1$: 最小主応力, $\sigma 2$: 中間主応力, $\sigma 3$: 最大主応力とした。

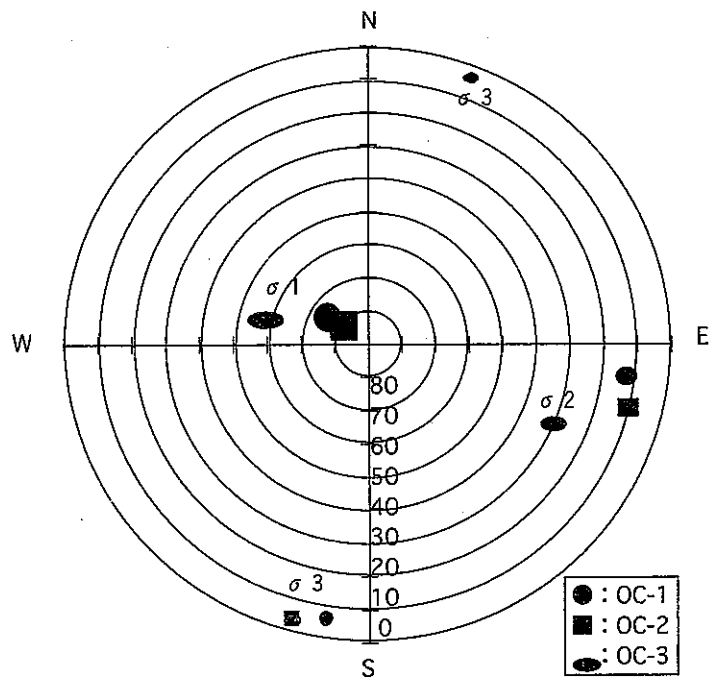


図-4.2.14 坑道周りの三次元主応力状態

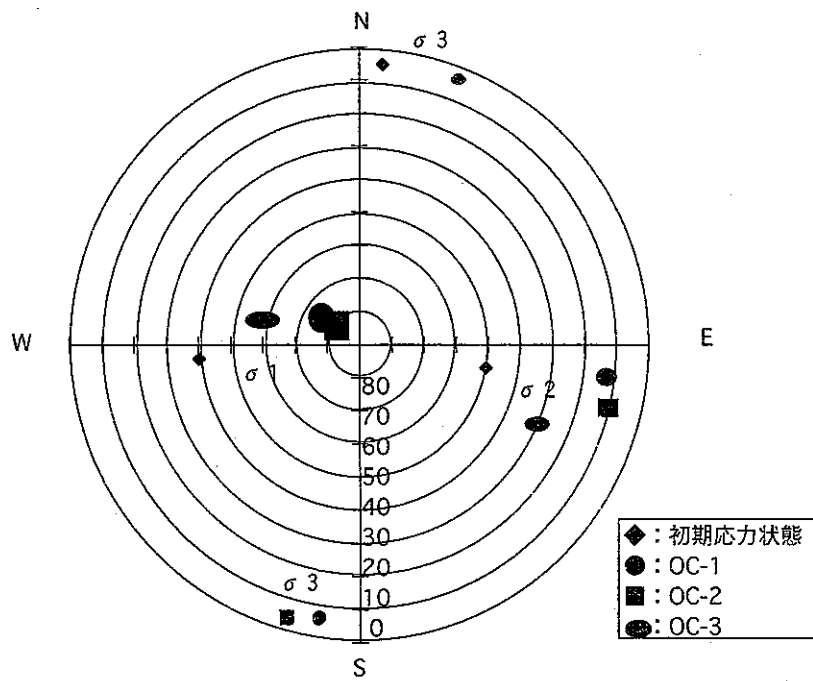


図-4.2.15 初期応力状態と二次応力状態の比較

表-4.2.7 鉛直成分の比較

	深度 (m)	σ_v (MPa)
初期応力	—	1.52
OC-1	0.5	3.7
OC-2	1	3.3
OC-3	1.5	3.4

4.3 鉱物モード分析

4.3.1 概要

二次応力測定を実施した瑞浪層群の砂岩の構成鉱物およびその量比を把握するために、鉱物モード分析を実施した。

4.3.2 測定方法

試料は、98SI-04孔の深度5m付近の細粒砂岩を用いて薄片を1個作成し、薄片観察をすると共にボックスカウント法によって鉱物モード分析を実施した。

(1) 薄片作成

- ① 岩石切断用ダイヤモンドカッターによって、採取された試料から岩石チップ（10×24×36mm程度）を作成した。
- ② 岩石チップの片面を研磨剤（#220,600,1000）により研磨し、平面化した。
- ③ チップの研磨面をエポキシ系接着剤でスライドガラス（48×24mm）に接着し、固化後に岩石チップを研磨剤（#220,600,1000,3000）により0.02～0.03mmの厚さになるまで回転式研磨台にて入念に研磨した。
- ④ 研磨した薄片に人造バルサムのオイキット（接着剤）でカバーガラスを接着して鏡下観察用岩石薄片とした。

(2) 偏光顕微鏡観察

作成した岩石薄片を用いて、偏光顕微鏡観察および薄片写真撮影を実施した。偏光顕微鏡はNikon製OPTIPHOT2-POLを使用した。また、写真撮影にはNikon製FX-35DX（カメラ）および同社製AFX-DX（露出計）を使用し、各試料の代表的な組織がみられる部分を、オープンニコールとクロスニコールの2つの状態で撮影した。

(3) 鉱物モード分析

製作した岩石薄片を用いて鉱物モード分析を行った。モード分析については、特に定められた基準はないが、黒田・諏訪（1983）¹¹に述べられている方法に基づいて行った。以下には、その方法について述べる。

モード分析は、岩石中の鉱物の量比を求める方法である。薄片はある一定の厚さを持っているので、薄片上に見られる鉱物の面積比は薄片中の鉱物の量比に等しい。その薄片が岩石を代表する部分であれば、薄片から求めた鉱物量比は岩石中の量比に等しくなる。鉱物量比を求めるために通常行われている方法はポイントカウンター式といい、薄片上に仮想的な間隔のメッシュをかけ、メッシュの交点がどの鉱物上にあるか点数を数え、その点数の割合で鉱物の面積比を求めるものである。メッシュ間隔に特定の基準は無く、鉱物粒子の粒径によって異なる。

分析は、上記偏光顕微鏡およびSwift社製自動ポイントカウンターを用い、以下

の手順で行った。

- ①岩石薄片を用いて構成粒子の粒径からモード分析を行うためのメッシュ間隔を決めた。本試料では、1試料あたり2000点程度になるように、0.02mm程度のメッシュ間隔とした。
- ②このメッシュ間隔を基準にし、薄片を試料台上で、一定間隔に移動させ、十字線の真下に位置する鉱物をカウントする。
- ③各鉱物のカウント数から各鉱物の含有量比を求めた。

4.3.3 測定結果

(1) 薄片観察結果

構成鉱物は石英、長石類、黒雲母、不透明鉱物である。薄片の写真写真 4.3.1～2に、薄片拡大写真を写真 4.3.3 に示す。試料を構成する鉱物は、微細な細粒で、全体的に微細な粘土鉱物が生じている。鉱物粒子は、比較的新鮮であり、粒子は亜角礫状を呈し、粒子径は0.01～0.02mmで最大0.05mmである。基質中には幅0.01～0.02mmの空隙が存在している。この空隙の長さは、薄片内では最大20mmであるが、それ以上の連続性については不明である。薄片の状態から推察するには、樹枝状の拡がりを持っているものと考えられる。

(2) モード分析結果

鉱物モード分析結果を表 4.3.1～2 および図 4.3.1～2 に示す。それらによると、ほとんどが基質で87%であった。鉱物粒子については、石英が6.1%、長石類が1.5%、黒雲母が2.7%、不透明鉱物が0.1%であり、合計で10.4%であった。空隙は2.7%であった。

参考文献

- 1) 黒田吉益、諏訪兼位：偏光顕微鏡と造岩鉱物「第2版」、共立出版、1983



オープンニコル



クロスニコル

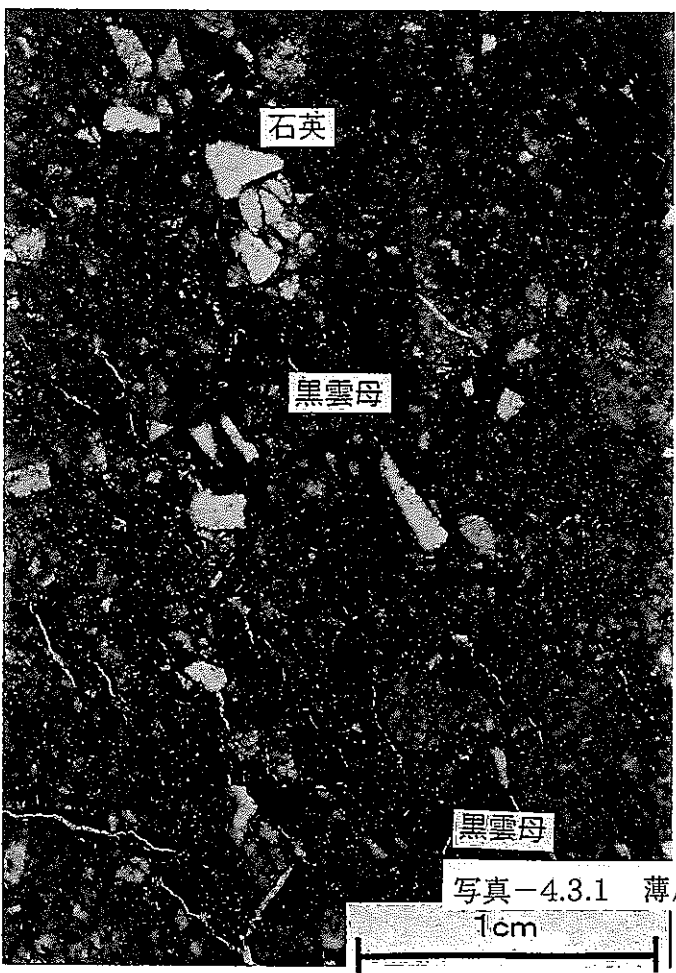


写真-4.3.1 薄片写真 (1cmスケール)



オープンニコル



クロスニコル

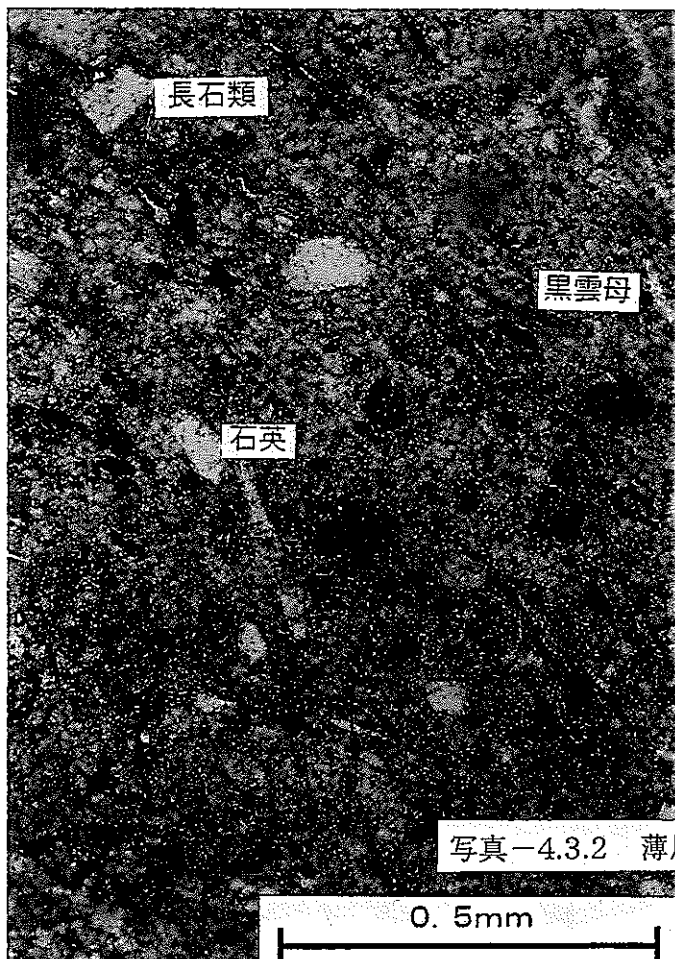


写真-4.3.2 薄片写真 (0.5mm スケール)





空隙

空隙

空隙

写真-4.3.3 薄片拡大写真

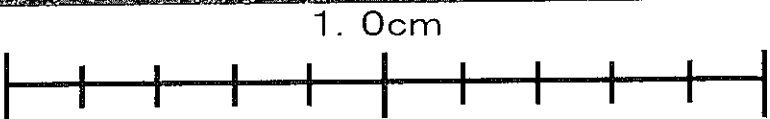


表-4.3.1 鉍物モード分析結果表

	石英	長石類	黒雲母	不透明鉍物	基質	空隙	合計
カウント数	121	29	54	2	1740	54	2000
含有割合(%)	6.1	1.5	2.7	0.1	87.0	2.7	100

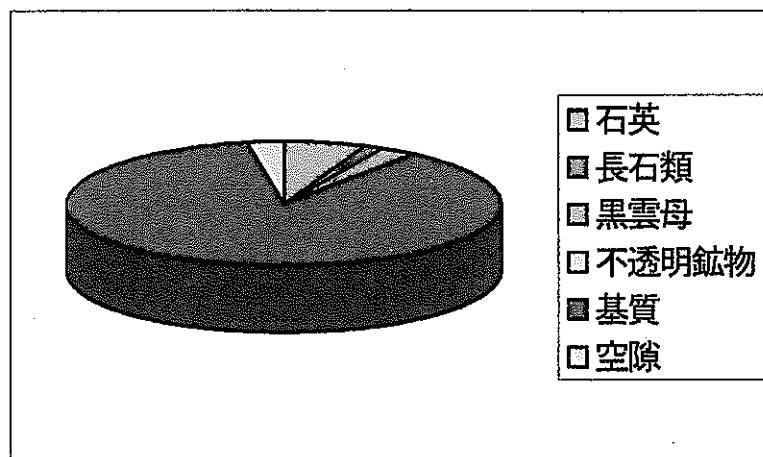


図-4.3.1 鉍物モード分析結果図

表-4.3.2 鉍物粒子・基質・空隙割合表

	鉍物粒子	基質	空隙	合計
カウント数	206	1740	54	2000
含有割合(%)	10.3	87.0	2.7	100

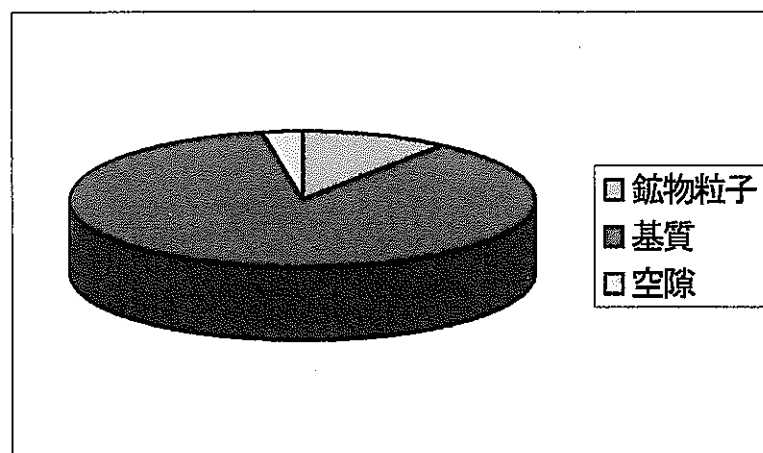


図-4.3.2 鉍物粒子・基質・空隙割合図

5. 総合評価

東濃鉦山の北延 NATM 坑道において、坑道周辺の二次応力分布を把握するために、AE法、DRA法および応力解放法を用いて応力測定を実施した。その結果を図-5.1 に示す。

AE法およびDRA法では、坑壁から 5m までの範囲において鉛直応力の連続的な分布を把握することができた。AE法で得られた鉛直応力値は、坑壁近傍で1~2MPa、深度2m付近で5MPaで最大となり、それより奥では3MPaであった。DRA法では坑壁面近傍で3MPa、深度2.5m付近で4.5MPaで最大となり、それ以深では3~4MPaであった。応力解放法で得られた鉛直応力値は、坑壁から0.5mの地点では3.7MPa、1.0mの地点では3.3MPa、1.5mの地点では3.4MPaであった。

AE法およびDRA法の結果と、応力解放法による結果は良い一致を示している。また、坑道壁面から1.5m以内では、それ以深の鉛直応力よりも低い値を示しているが、これは坑道周りに生じた緩み領域の影響によるものと推測できる。

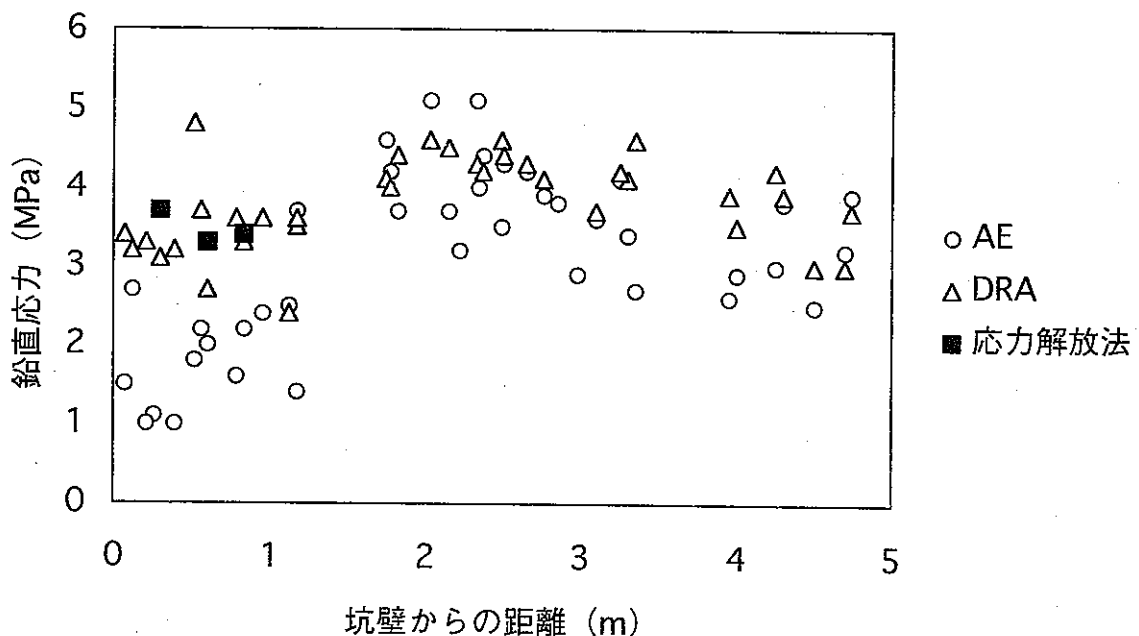


図-5.1 二次応力の鉛直成分の比較