

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年3月

資源環境技術総合研究所
動力炉・核燃料開発事業団

複製またはこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

技術開発課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Exploration and Mining Technology Development Section, Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-5102, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

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

目 次

1. はじめに	-----	1
2. 目的	-----	2
3. 実施内容	-----	4
4. 研究成果	-----	5
4.1 資環研の研究成果	-----	5
4.1.1 堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの検討	-----	5
4.1.2 堆積性軟岩の破壊過程でのAE発生挙動	-----	24
4.2 動燃事業団の研究成果	-----	50
4.2.1 坑道掘削影響試験の事後調査（比抵抗トモグラフィ調査）	-----	50
5. 総合評価	-----	59

1. はじめに

岩盤における坑道の掘削は、岩盤本来の力学的、水理学的物性に影響を与え、坑道周辺の水理環境の変化を促し、地下水流動へ影響を与える。動力炉・核燃料開発事業団（以下動燃事業団という）では坑道掘削に伴う物性変化の定量的評価のために、東濃地科学センターにおいて大学・国立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、資環研という）とは、岩盤の変形やき裂の発生・進展に伴って発生する微小弾性波により物性変化を捉えようとするAE（Acoustic Emission）原位置計測試験と、AE計測および比抵抗トモグラフィに関する室内基礎試験に基づく試験研究について、平成元年度より3ヵ年計画で共同研究を実施した。

また平成4年度より2年計画で掘削に伴う岩盤への影響の事前評価手法を開発するため、「精密起爆による弾性波トモグラフィの検討」「トンネル掘削に伴う比抵抗分布の変化」等の評価手法の基礎研究を実施した。さらに坑道掘削影響試験の事前調査として「初期応力測定」を実施した。

平成6年度は、坑道掘削影響試験の事前調査として「比抵抗トモグラフィ調査」および、評価手法の基礎研究として「室内規模での比抵抗計測実験」を実施した。平成6年度の結果として「室内規模での比抵抗計測実験」では基本事項に関する検討事項が多いことが分かったため、平成7、8年度は「室内規模での比抵抗計測実験」に重点を置きその基礎実験をもとに、原位置における掘削影響評価手法についての評価・検討を目的として、掘削前の比抵抗トモグラフィ調査を行った。

平成9年度は東濃鉦山の堆積性軟岩を対象として、室内試験は腐食環境を含む地下水環境における破壊挙動について検討を行うこととした。また、原位置試験は平成7、8年度の掘削前の比抵抗トモグラフィ調査の継続として、掘削後の比抵抗トモグラフィ調査を行い、坑道掘削が周辺岩盤に与える影響と調査手法の有効性について検討した。

ここでは平成9年度の研究成果として、

- ① 堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの研究
- ② 堆積性軟岩の破壊過程でのAE発生挙動
- ③ 原位置比抵抗トモグラフィ調査（坑道掘削の事後調査）を報告する。

2. 目的

(1) 共同研究の目的

坑道掘削に伴い周辺岩盤の力学的、水理学的物性が変化すると考えられる。このような物性が変化した岩盤領域は、新たな物質の移行経路となる可能性があるとともに、坑道の力学的安定性に影響をもたらすと考えられる。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。

共同研究においては、資環研が評価手法の開発に関する室内試験および原位置試験を実施し、動燃事業団が掘削に伴う物性変化を把握するために、東濃鉱山において掘削影響試験を実施するという分担とした。

(2) 本研究期間での目的

過去の共同研究で主に原位置試験により、掘削に伴い発生する岩盤の物性変化の関係を評価してきた。この中でも平成6年度から実施してきている比抵抗トモグラフィ調査は、岩盤中に電流を流し電位を計測することで、岩盤の電気比抵抗の分布を捉える。岩盤中に地下水が含まれる領域は、電流が流れやすく比抵抗は低下する傾向がみられることから、比抵抗トモグラフィ調査によって岩盤中の地下水分布を捉え、不飽和領域を把握できる可能性がある。また、室内における岩石の比抵抗測定値と併わせ、調査断面内の岩相も推定できる可能性もある手法として検討した。その結果、比抵抗トモグラフィ調査が坑道掘削後の岩盤中の地下水分布を捉え、不飽和領域を把握する方法として有効であることが確認された。しかし、どの程度まで正確に把握できるか等については確認できなかった。そこで昨年度までの研究では、既知の材料で構成されたブロック等を用いた室内試験を実施して、実際の比抵抗分布とトモグラフィ調査で評価される比抵抗分布を比較し、精度の確認と原位置計測への適用性を検討することにした。

本研究期間では、昨年度までのこれらの試験結果などを踏まえ、原位置における比抵抗トモグラフィ調査の有効性を確認することとした。具体的には動燃事業団・東濃鉱山の北延N A T M坑道で実施した掘削影響試験の内、比抵抗トモグラフィ調査について坑道掘削に伴う岩盤の物性変化を把握することを試みた。

さらに堆積性軟岩における岩石の破壊特性を検討するため、東濃鉱山の北延N A T M坑道で採取した岩石コアを用いて室内試験を行い、破壊挙動を推定するための破壊特性データの蓄積を図ることとした。

本研究期間での目的は、以下のようにまとめることができる。

- ・東濃鉱山北延N A T M坑道の堆積軟岩を対象に、室内試験によりノッチ入り供試体の曲げ試験を行い破壊靱性を求めることにより応力腐食割れの検討をする。
- ・上記と同じ岩石コアを用いて、室内試験（一軸圧縮破壊試験）を行い当該岩盤を構成する岩石の破壊過程でのA E発生挙動特性を把握する。
- ・坑道掘削の地山状態に対する影響を検討するための事前調査として、原位置比抵抗トモグラフィ調査を平成7年度に実施し、坑道掘削前の岩盤の比抵抗分布を把握した。そこで同じ計測断面で坑道掘削後の比抵抗トモグラフィ調査を実施し、両データを比較することで掘削に伴う影響を評価する。また、掘削影響評価手法のひとつとして用いてきた比抵抗トモグラフィ調査手法の有効性を検討する。

3. 実施内容

実施した研究概要を以下に示す。

(1) 研究内容

① 堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの研究

岩石が地下水環境のような湿潤条件下におかれた時に、通常の破壊強度以下の応力条件でも環境の影響を受けてき裂が進展する現象を応力腐食割れと言う。堆積性軟岩である東濃鉱山北延N A T M坑道の土岐挟炭累層の岩石コアを用いて破壊靱性試験を行い、応力腐食割れ現象について検討する。

② 堆積性軟岩の破壊過程でのA E発生挙動の研究

上記と同じ岩石コアを用いて岩石の一軸圧縮試験を行い、破壊過程におけるA Eの発生特性の変化と応力レベルなどの関係を明らかにする。具体的には岩石コアの破壊過程でのA E計測から得られるパラメータのm値(ここではA Eの最大振幅と累積数の関係を表す指数)を用いて、堆積性軟岩のA E破壊挙動を検討する。

③ 坑道掘削影響試験の事後調査(比抵抗トモグラフィ調査)

東濃鉱山北延N A T M坑道において、坑道掘削前に事前調査した断面と同じ位置において、坑道掘削後の比抵抗トモグラフィ調査を実施する。電流電極・電位電極はボーリング孔を利用して調査断面を囲むように配置(事前調査と同じ条件)し、さらに坑道掘削坑道周縁部にも岩盤内の電位を計測する。解析は2本の調査孔間で測定された電位データのみ用いた場合と、孔間測定データに加えて掘削坑道周縁部における測定データを用いた場合の2ケースについて実施する。

(2) 共同研究分担

共同研究の分担を次表に示す。

研究項目	資 環 研	動 燃
地下水環境下での応力腐食割れ研究	○	
破壊過程でのA E発生挙動の研究	○	
坑道掘削影響試験の事後調査		○
総合評価	○	○

4. 研究成果

4.1 資環研の研究成果

4.1.1 堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの検討

4.1.1.1 緒言

動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターの機械掘削坑道の計測孔から得られた堆積性軟岩コアを用い、破壊靱性を計測した。その際、地下水の破壊靱性に及ぼす影響を検討するため、5本中2本の試験片は実験中にき裂先端に水を供給し続けながら曲げ試験を行い、気中での実験結果と比較した。

当試験ではき裂先端の環境条件を湿潤状態とするため、実験中に岩石試料のき裂先端まで常に水あるいは溶液を供給し、新しいき裂面が水あるいは溶液に接触する条件が継続して保たれ続けるよう工夫した。稲田花崗岩、来待砂岩を用いた実験では、それぞれ強度低下が生じることを確認している（文献1）。なお、実験前に岩石試料を水あるいは溶液で飽和させることは行わなかった。

4.1.1.2 実験試料

実験に用いたのは動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターの機械掘削坑道の計測孔から得られた堆積性軟岩コアである。採取されたボアホールBVP-1のコア（坑道壁面より4.7～5.5m）、同97SI05（坑道壁面より4.6～5.5m）、同97SI07（坑道壁面より4.2～4.5m）のうち、ボアホールBVP-1、同97SI05の2本のコアより合計5本の試験片を得て実験を行った。なお、97SI07のコアは炭素質などの含有が多く、試験片を採取できなかった。各コアの写真を図4.1.1(a)～(c)に、試験片について表4.1.1に示す。試験片は寸法効果等を考慮し、円柱試験片をISRM(国際岩の力学連合会)の規格に従い作成し、同規格通りにシェブロンノッチを入れた。試験片は直径54mm、長さ200mm、荷重点距離は180mmである。試験片の形状を図4.1.2に示す。

岩石コア5本は切断、ノッチ加工等を行うまでは乾燥を出来る限り防ぐためにラップで密封した。加工後は再びラップで被い、保存した。試験前日にき裂先端部を水に触れさせるための被いを取り付けるため、気中にさらした。比較のため、気中で曲げ試験を行う試料も1日気中にさらし、曲げ試験を実施した。

4.1.1.3 実験方法

実験装置及び計測システムの概要を図4.1.3に示す。載荷に用いた試験機はMTS社810型サーボ制御式材料試験機であり、き裂を安定成長させるために最も適した制御方法として、COD(き裂開口変位)速度を一定とした条件で実験を行った。荷重、変位、CODなどのデータは試験機からコンピュータへ送り、ディスクに保存した。

この実験方法の特徴は、水頭差を利用してき裂先端に水が常に接触するよう供給を続けられる点にある。試験片に対し、ノッチを取り囲む部分に図4.1.3に示すようにビニールカバーをセットし、周囲をシリコンで固定かつ密封し、同図に示すように設置したタンクから水を供給して、ノッチ先端に常に水が接触するようにした。岩石試験片に対する水または溶液の供給は載荷実験中のみ行ない、実験前には水または溶液に浸漬させることは行っていない。

4.1.1.4 破壊靱性試験及び評価法

岩石試料に対しては、き裂が安定成長を続け、また破壊靱性の評価のためにき裂長さを推定できるよう、図4.1.4（文献2）に示すような繰り返し載荷を行う。荷重とCODの関係を図4.1.5～4.1.9に示す。ISRMの規格では、この関係を用いて岩石の破壊靱性を評価する。

岩石の破壊靱性について、ISRMでは以下のように規格化し、簡便なレベルIの試験と、非線形補正を行い、より厳密に破壊靱性を評価するレベルIIの試験とを提案している（文献3）。

まず、レベルIの破壊靱性は次式で求められる。

$$K=A_{\min}F_{\max}/D^{1.5} \quad (1)$$

ここで F_{\max} は最大荷重、 D は試験片の直径、 A_{\min} は無次元き裂長さ α の関数である。

上記で求めた線形破壊力学に基礎を置くレベルIの破壊靱性は寸法効果を含んでいることが知られている。そこでISRMではレベルIIの非線形補正を行うことが推奨されている。レベルII破壊靱性を求めるため、ISRM法では図4.1.4に示したような何回かの除荷、再載荷を行う。き裂長さと荷重点コンプライアンスの関係が分かっているならば、各サイクルの線形除荷曲線の傾き S から除荷時のき裂長さを求めることができ、これから除荷時の応力拡大係数が求められる。荷重 F と荷重点変位 μ_f のコンプライアンスを λ_{ff} として無次元コンプライアンス g_{ff} を次式のように定義すると、

$$g_{ff}=\lambda_{ff}E'D \quad (2)$$

この値は既に無次元き裂長さ α の関数として求められており、これを次式で表す。

$$g_{ff}=g_{ff0}f(\alpha) \quad (3)$$

ただし、 g_{ff0} は $\alpha=\alpha_0$ のときの初期無次元コンプライアンスであり、 $f(\alpha_0)=1$ である。これから、各サイクルにおける線形化除荷曲線の傾き S と無次元き裂長さ α は次の関係にある。

$$S/S_i=g_{ff0}/g_{ff}=1/f(\alpha) \quad (4)$$

ただし、 S_i は荷重-荷重線変位関係の初期接線の勾配である。

次に、Backerの提案した非線形補正係数 p を各サイクルについて求める。直線

$$Sc=0.85 \cdot (1-1.04 \Delta a_0/D) \cdot S_i \quad (5)$$

を囲む2つのサイクルの平均値 p_m を用いることにより、次式から除荷開始点(荷重 F_c)のき裂進展抵抗が求められる。

$$K^{II}=\{(1+p_m)(1-p_m)\}^{0.5} \cdot (F_c/F_{\max}) \cdot D^{1.5} \quad (6)$$

これが非線型補正されたレベルIIの破壊靱性 K_{II} である。なお、 p_m がゼロの時、すなわち理想的な線形弾性体の場合には K_{II} はレベルIで与えた破壊靱性 K_I と同じ値をとる。

4.1.1.5 試験結果

実験を行った堆積性軟岩について、前章で述べたISRM法で求めた気中の破壊靱性、および水と接触させた場合の破壊靱性を併せて表4.1.2に、その際のCOD（き裂開口変位）と荷重の関係を図4.1.5～9に示す。また、参考のために花崗岩と砂岩の破壊靱性を同表に示す。

表4.1.2より、堆積性軟岩については水に触れさせた場合の方が乾燥状態の岩石よりも破壊靱性が大きいことがわかる。また、花崗岩及び砂岩の両岩石と比較すると、気中での実験、き裂先端を水に触れさせた場合のいずれにおいても破壊靱性はかなり小さく、堆積性軟岩が非常に脆い材料であることがあらためて確認できる。

4.1.1.6 考察

・乾燥状態と湿潤状態での破壊靱性の差について

花崗岩や砂岩を用いた実験においては、乾燥状態と湿潤状態で破壊靱性を比較した場合、湿潤状態の破壊靱性は乾燥状態に比較して25～50%も低下するという結果が得られている。これは、水が常に供給されることで、き裂進展時に水がき裂先端に満たされ、 SiO_2 の結合が水分子と反応してき裂進展に寄与したり、水の介在で表面自由エネルギーが低減し、破壊応力が低下することなどが原因だと考えられる。

ところが、今回実験を行った堆積性軟岩では、花崗岩や砂岩で得られている破壊靱性と異なり、湿潤状態の方が高い破壊靱性が得られている。

これは、堆積性軟岩がもともと湿潤状態にあるサイトから得られた岩石コアであることが理由と考えられる。硬岩である花崗岩や、硬岩とは言えないまでも硬い岩石である砂岩（来待砂岩）とは異なり、堆積性軟岩の場合、むしろ室内でやや乾燥させた結果、表面を中心に微小き裂が成長し、かえって強度低下につながったと考えられる。

なお、図4.1.5～4.1.9の各載荷において、弾性除荷によるCOD成分と永久変形（仮に、荷重をゼロに戻した場合のCOD残余分と定義）の比をとると、き裂進展、損傷の進んだ試験片ほど永久変形分が大きく、き裂進展、損傷の程度のパラメータとなる可能性がある。今回の実験における弾性除荷によるCOD成分の全体比の変化を図4.1.10に示す。載荷回数を経るに従いこの比は大きく低下し、き裂進展とともに増加することがわかる。なお、湿潤試験片と乾燥試験片を比較すると、試験片によるばらつきが大きいものの、弾性除荷の割合がやや大きく、逆に乾燥試験片は永久変形分がやや大きいという結果が得られている。

4.1.1.7 結言

堆積性軟岩を用いて破壊靱性試験を行った。その結果、以下の事実が判明した。

- (1) 破壊靱性は $0.03MPam^{1/2}$ 程度であり、花崗岩や砂岩の数十分の1程度である。
- (2) 破壊靱性は湿潤状態の方が乾燥状態よりやや大きい。

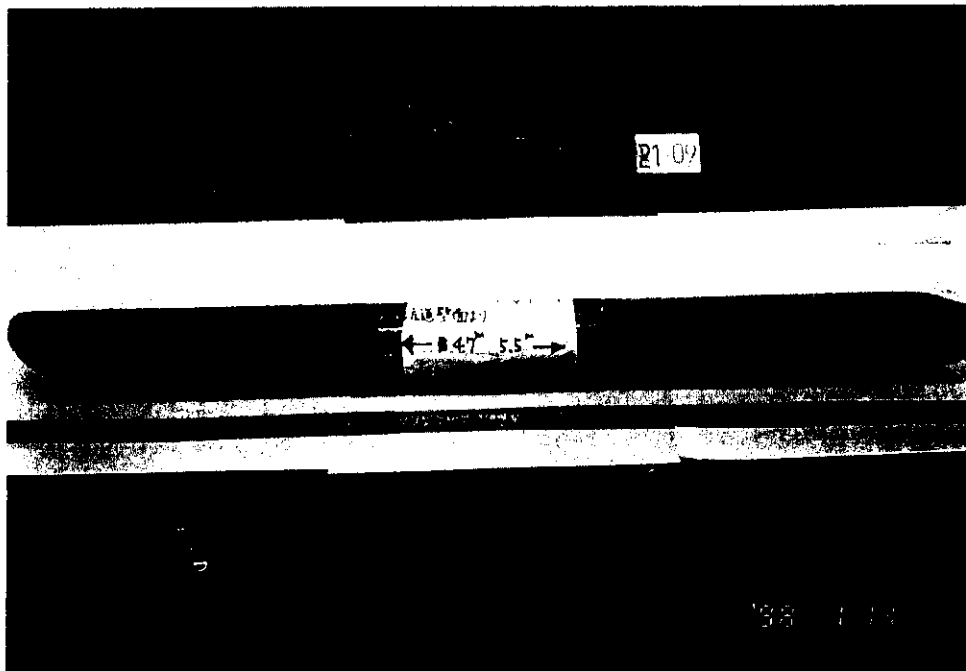
参考文献

- 1)歌川・瀬戸・小杉, き裂先端の環境条件を変化させた曲げ試験時のAE挙動, 資源素材学

会講演予稿集, p153 (1997)

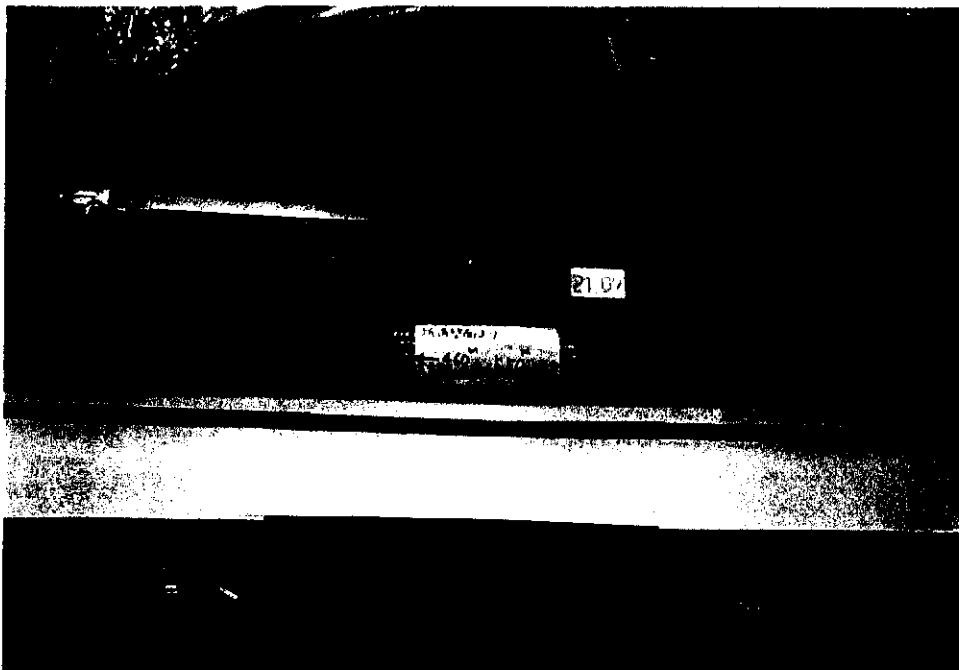
2) 松木浩二, ISRM法による岩石の破壊靱性評価, 昭和63年度科学研究費補助金研究成果報告書「岩石破壊力学の構築とその体系化のための総合的研究」, p1 (1989)

3) ISRM, Suggested Methods for Determining Fracture Toughness of Rock, Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25·2, p71 (1988)



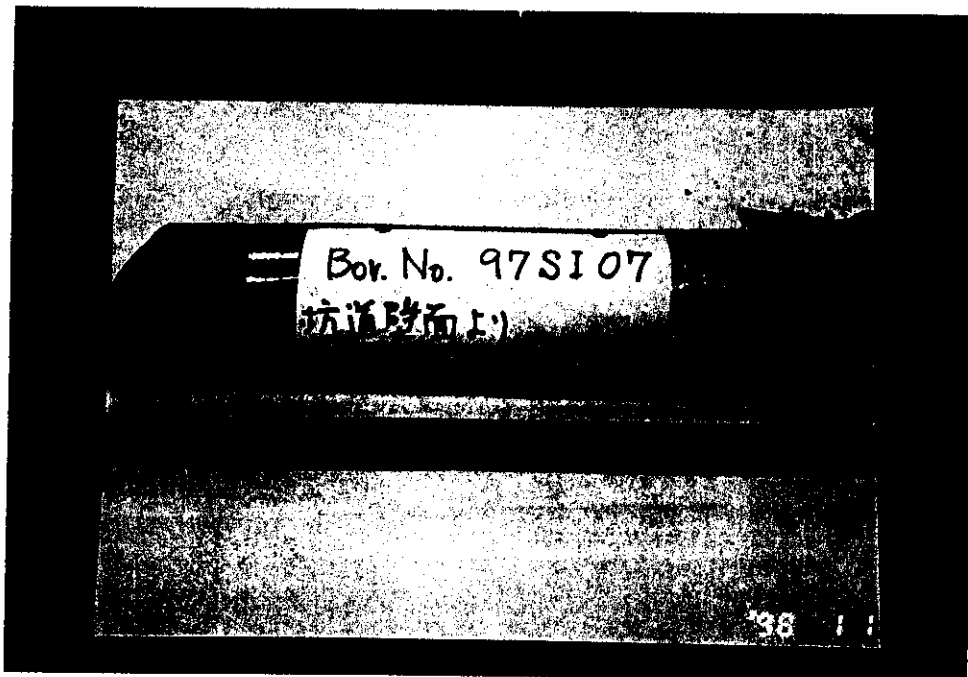
(a) ボアホールBVP-1より採取された岩石コア

図4.1.1 実験に用いた岩石コア



(b) ボアホール97SI05より採取された岩石コア

図4.1.1 実験に用いた岩石コア



(c) ボアホール97SI05より採取された岩石コア

図4.1.1 実験に用いた岩石コア

表4.1.1 堆積性軟岩試験片の概要

試料番号	岩種	ボアホール	壁面からの距離	該当図面
TNCB-1	堆積性軟岩	BVP-1	5.2m	図4.1.1(a)
TNCB-2	堆積性軟岩	97SI05	4.7m	図4.1.1(b)
TNCB-3	堆積性軟岩	97SI05	4.9m	図4.1.1(b)
TNCB-4	堆積性軟岩	97SI05	5.1m	図4.1.1(b)
TNCB-5	堆積性軟岩	97SI05	5.3m	図4.1.1(b)
(参考)	堆積性軟岩	97SI07	4.2m	図4.1.1(c)



(d) ノッチ加工の様子

図4.1.1 実験に用いた岩石コア

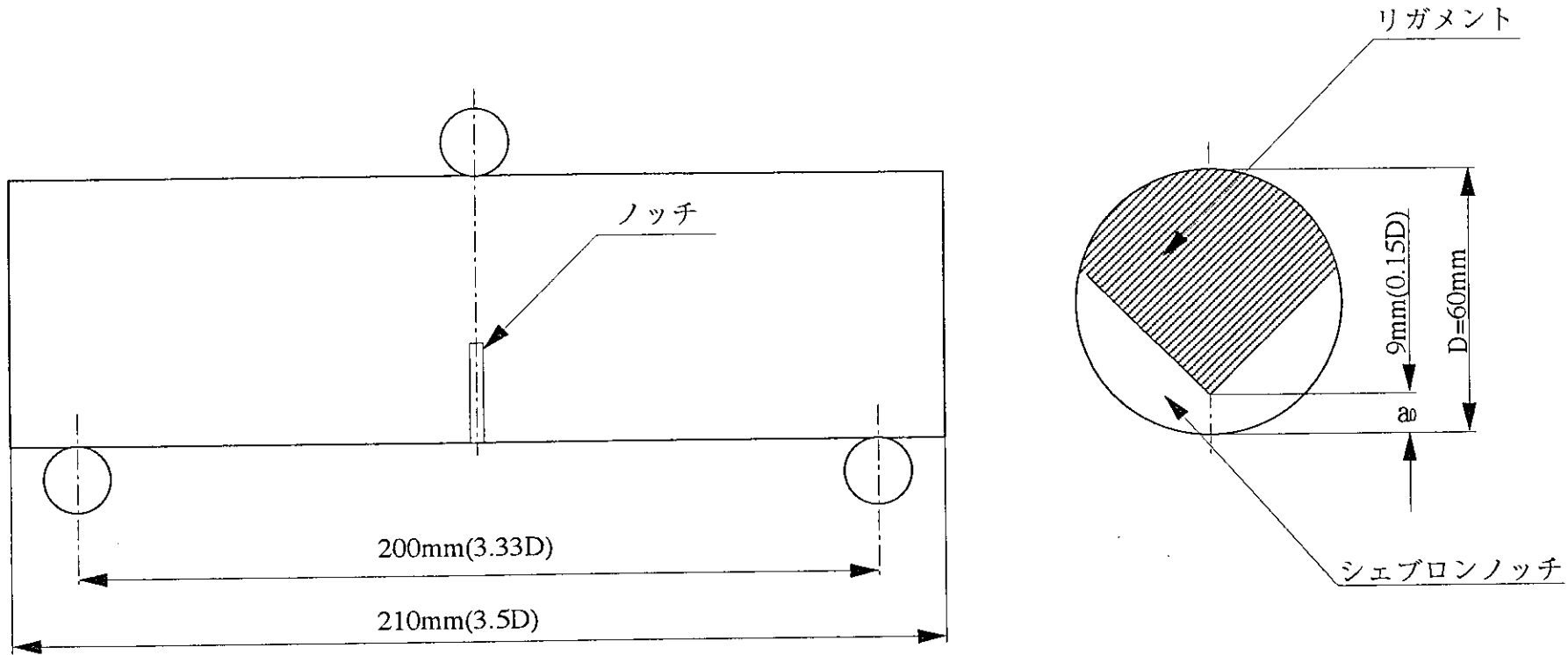


図4.1.2 試験片の形状

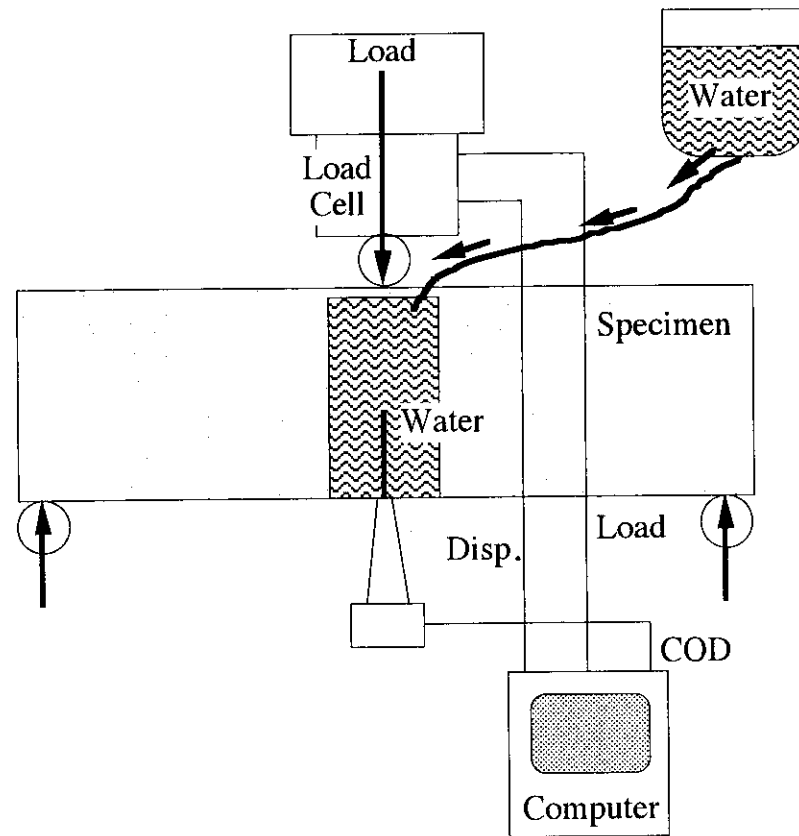


図4.1.3 実験装置及び計測システム

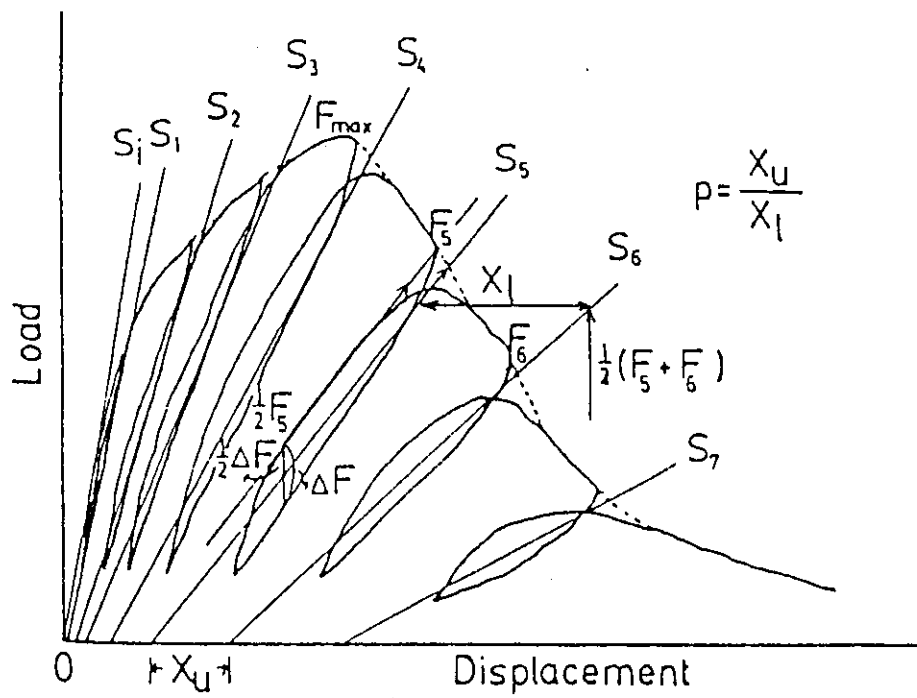


図4.1.4 ISRM法による除荷・再載荷

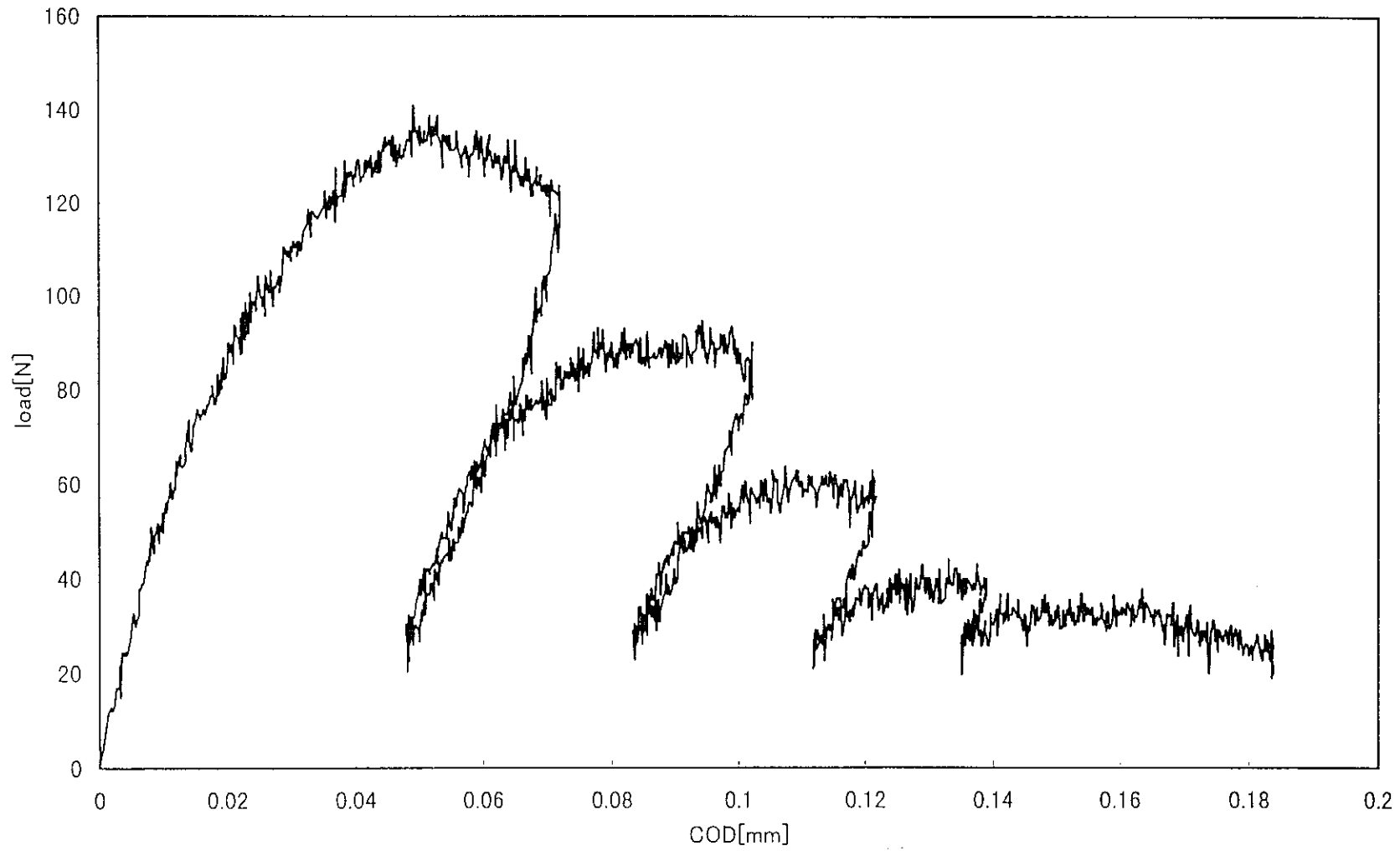


図4.1.5 堆積性軟岩試験片のCODと荷重との関係 (湿潤)

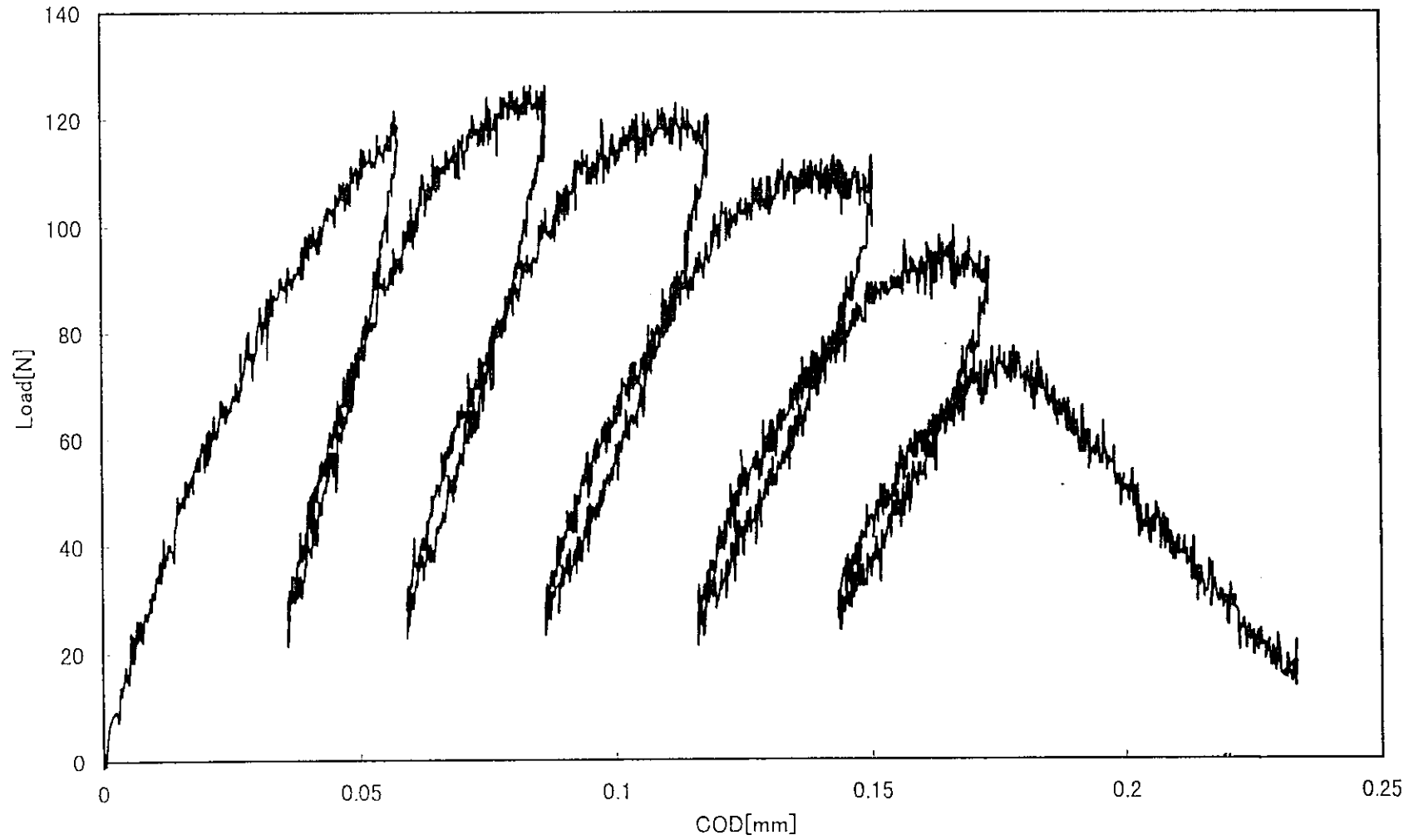


図4.1.6 堆積性軟岩試験片のCODと荷重との関係（湿潤）

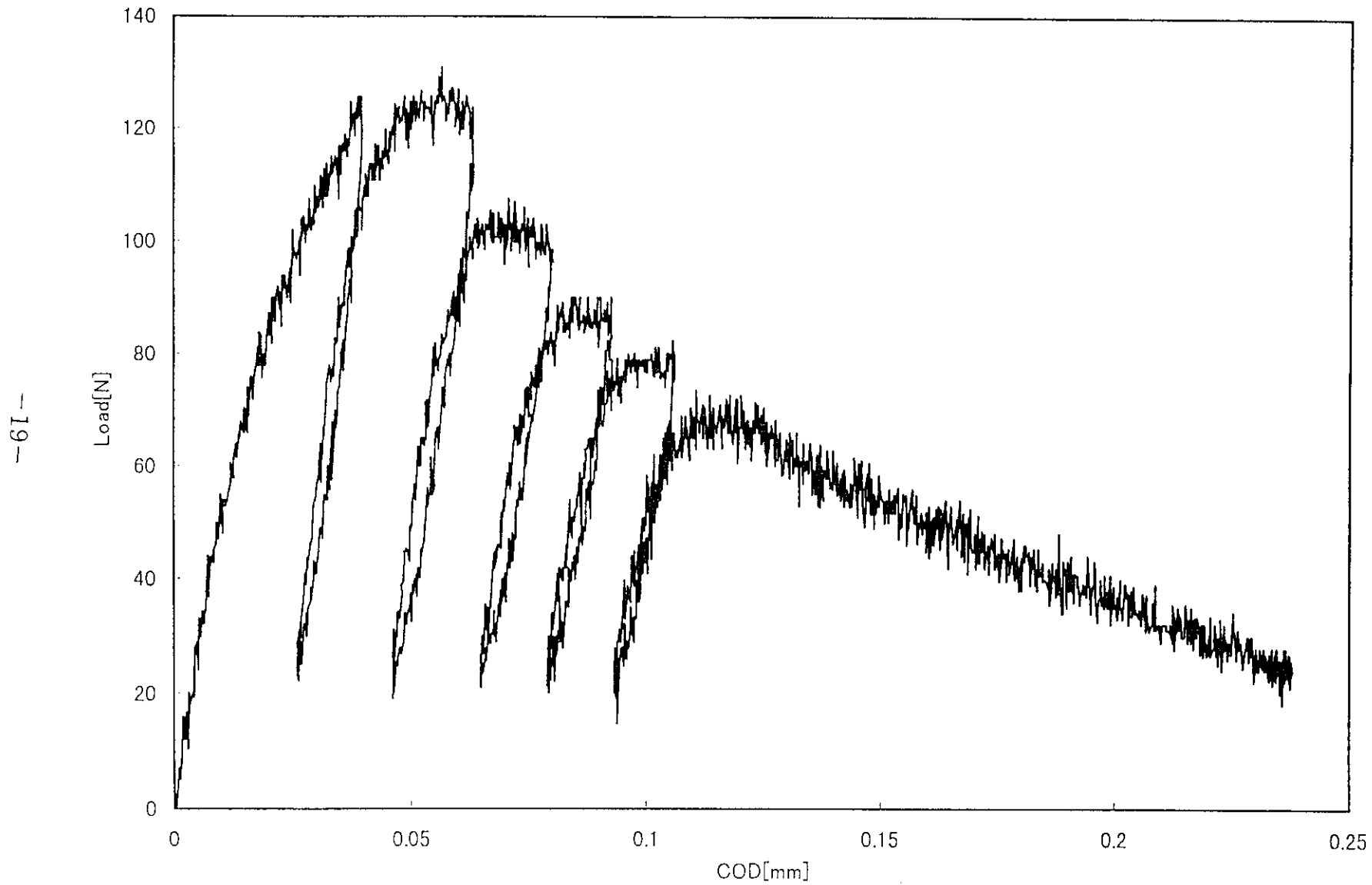


図4.1.7 堆積性軟岩試験片のCODと荷重との関係（湿潤）

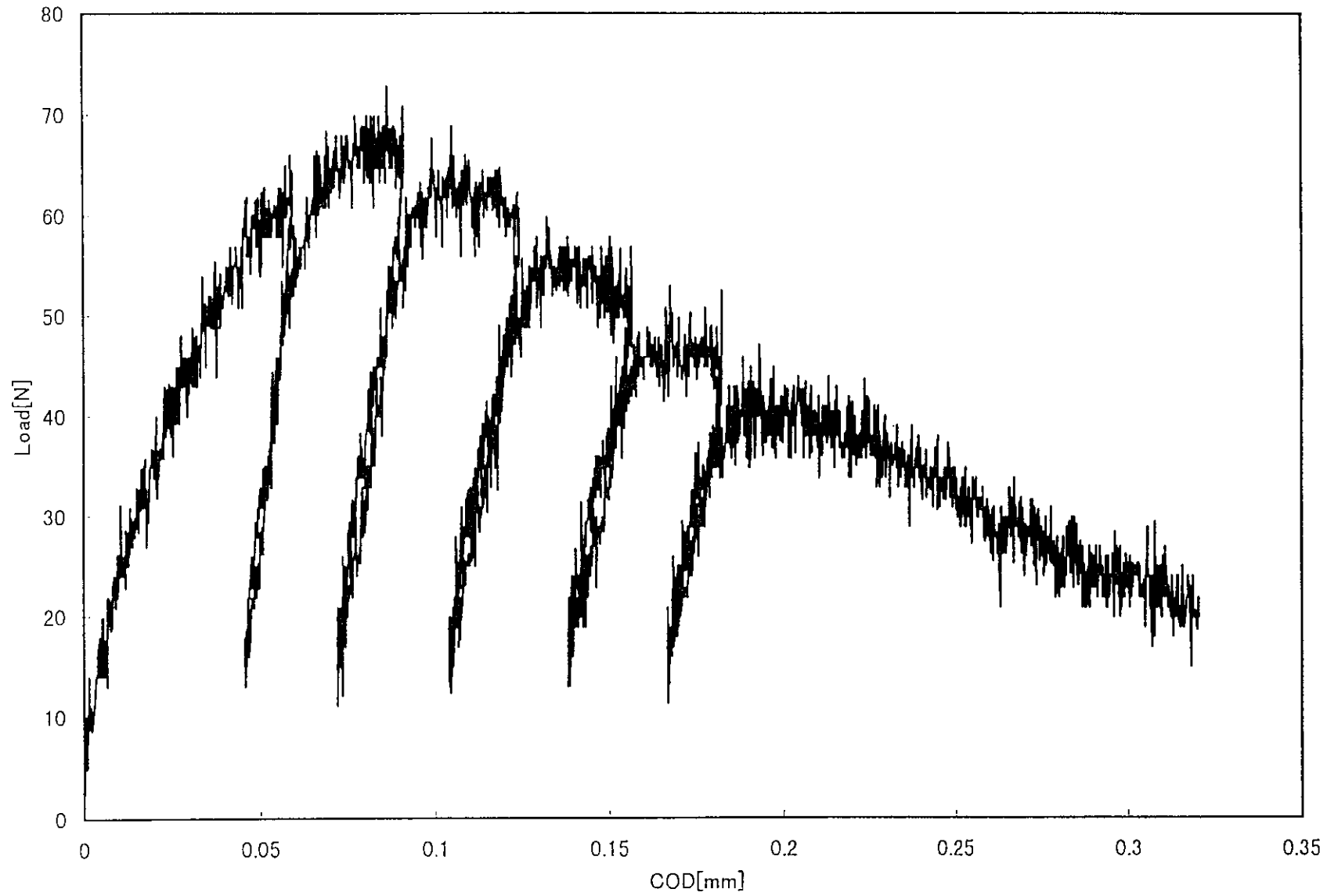


図4.1.8 堆積性軟岩試験片のCODと荷重との関係（乾燥）

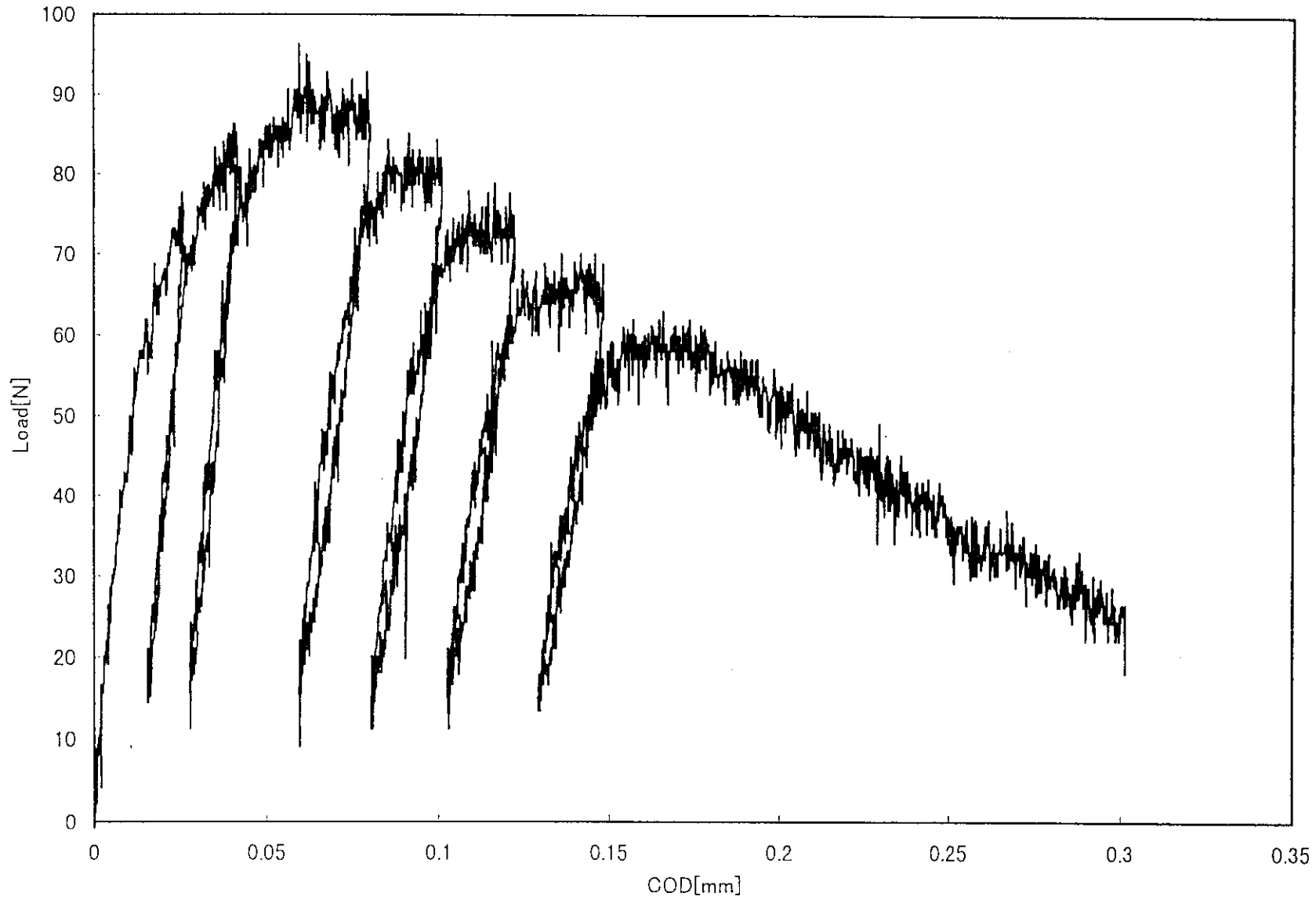


図4.1.9 堆積性軟岩試験片のCODと荷重との関係（乾燥）

表4.1.2 堆積性軟岩試験片の破壊靱性

試料番号	岩種	条件	破壊靱性	該当図面
TNCB-1	堆積性軟岩	湿潤	0.04MPam ^{1/2}	図4.1.5
TNCB-2	堆積性軟岩	湿潤	0.03MPam ^{1/2}	図4.1.6
TNCB-3	堆積性軟岩	湿潤	0.03MPam ^{1/2}	図4.1.7
TNCB-4	堆積性軟岩	乾燥	0.02MPam ^{1/2}	図4.1.8
TNCB-5	堆積性軟岩	乾燥	0.02MPam ^{1/2}	図4.1.9
(参考)	稲田花崗岩	乾燥	1.20MPam ^{1/2}	-----
(参考)	稲田花崗岩	湿潤	0.90MPam ^{1/2}	-----
(参考)	来待砂岩	乾燥	0.60MPam ^{1/2}	-----
(参考)	来待砂岩	湿潤	0.40MPam ^{1/2}	-----

堆積性軟岩の損傷の変化

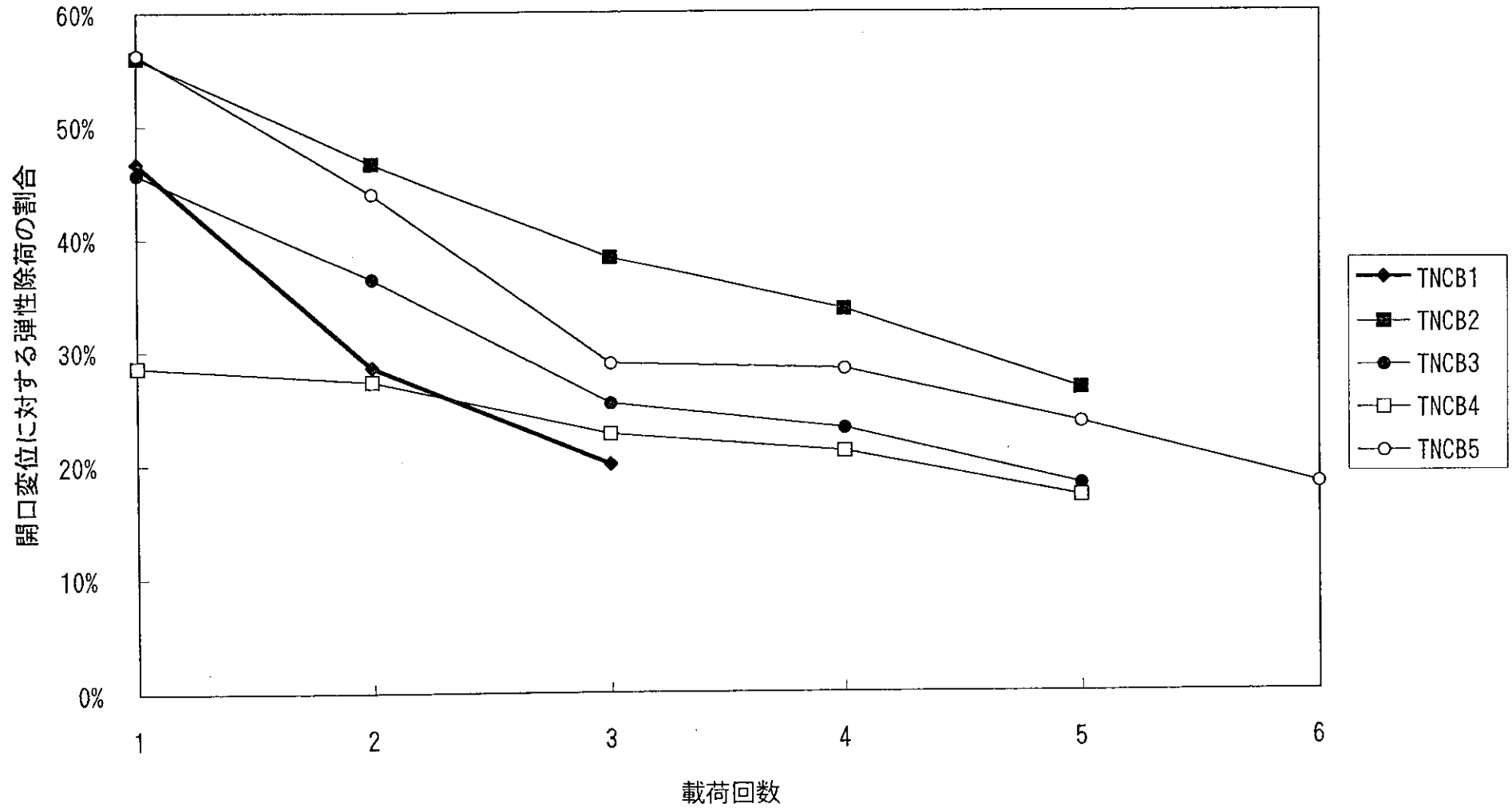


図4.1.10 堆積性軟岩における損傷パラメータの推定

4.1.2 堆積性軟岩の破壊過程でのAE発生挙動

4.1.2.1 はじめに

動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターにおいて採取された岩石コア試料を用いて、一軸圧縮破壊試験を実施した。本試験において使用した岩石試料は、三点曲げ破壊靱性試験に用いた試験片をノッチ箇所を切断し、端面を整形したものである。

本試験の目的は、一軸圧縮破壊試験時における破壊過程でアコースティックエミッション (Acoustic Emission, AEと以下略称) を計測し、ポストフェイリュア一域でのAEの相対的周波数成分変化とAE振幅分布特性の変化を調べることである。

4.1.2.2 試験方法

試験は、周変位速度を一定にした制御条件で実施した。試験に用いた材料試験機はMTS製815型材料試験機(図4.1.11)である。試験片には、2個のAEセンサーを取り付けるとともに、周変位検出用のチェーン型変位計を取り付けた(図4.1.12)。

取り付けた2個のAEセンサーは、ひとつはNF製921型(共振周波数:150 kHz)で、他の一つはNF製904DM型(共振周波数:400 kHz)である。これらセンサーからの出力はプリアンプで40dB増幅後、921型センサーの出力は50~200 kHz、904DM型センサーの出力は200~400 kHzのバンドパスフィルターを通し、さらにメインアンプで40dB増幅してカウント数を計数した。また、しきい値は、環境ノイズレベルより約20mV程度高い150mVに設定した。以下、低周波領域のフィルターを通して計数されたAEカウント数をAE(L)、高周波領域のフィルターを通して計数されたAEカウント数をAE(H)とする。AE計測において使用したシステムは、NF製AEモジュール7221型で、AE計測制御とデータ収録はMacintoshコンピュータで行った(図4.1.13)。

また、AEの振幅分布特性値のm値を求めるにあたっては、所定の時間帯に発生したすべてのAEイベントを用いて累積AEイベント数と振幅値(dB)との関係を求め、その関係図からm値を計算した。m値は、本来石本と飯田によって示された地震動の最大振幅とその発生頻度分布の関係を表す式(1)中の指数である。

$$n(A)dA = KA^m dA \quad (1)$$

ここで、 $n(A)$ は最大振幅 A から $A+dA$ までの地震の発生度数、 K は定数である。m値の低下と破壊との関係については、これまでも山はね予知の手段としての適用例がある。

4.1.2.3 試験結果例

(1) 試験試料1 (TONOSS02:図4.1.14)

本試験試料はコアNo.97SI05から作成したものである。図4.1.15は応力-軸変位線図を示しているが、約2.7MPaで最大強度に達した後、巨視き裂の発生・成長に合わせて応力がゆっくりと緩和し、軸変位が2.1mmを越えて急激に破壊に至った。ポストフェイリュア一域での変形はクラスI型の変形特性を示した。

図4.1.16は応力の時間変化を、図4.1.17はAEパラメータ(リングダウンカウント)

の時間変化を示している。載荷開始から約550秒後から応力はピーク値から緩和を開始している。これと調和的にAEの活動度が急激に低下している。肉眼で観察できた状況としては、応力緩和が開始した直後でせん断型の破断面が確認された。したがって、550秒以前の応力がピーク値にある段階でAEの発生を伴って破断面が形成され、その後それが成長するに合わせて応力が緩和したという破壊プロセスが推定される。

また、図4.1.18には計測されたAEの相対的周波数成分の変化 ($100 \times AE(L) / (AE(L) + AE(H))$) を示している。応力がピーク値にある段階では周波数成分は徐々に高周波側に変化していたが、ピーク値を越えた直後から急激に高周波成分が減少し低周波成分が卓越していることが分かる。この理由としては、発生するAEが微小き裂の発生と成長という破壊プロセスに伴うAEから、大規模なせん断型き裂の形成によるき裂間の滑りによるAEであるためにもともと低周波成分が卓越した大規模なAEであることと、巨視き裂の形成によってAEが発生源からセンサーに到達する過程で高周波成分が減衰しやすい状況になったことが考えられる。

図4.1.19はm値の変化を示している。大きな傾向としては、応力がピーク値に達する前でm値はいったん低下するがその後再び増加し、巨視き裂が形成されて応力緩和が顕著になると再びm値が急激に低下するという挙動を示した。

図4.1.20は試験終了後の試料の破断状況を示している。

(2) 試験試料2 (TONOSS03 : 図4.1.21)

本試験試料はコアNo. 97SI05から作成したものである。図4.1.22は応力-軸変位線図を示しているが、2.3MPaで最大強度に達した後、巨視き裂の発生・成長に合わせて応力がゆっくりと緩和している。ポストフェイリュアー域での変形はクラスI型の変形特性を示した。

図4.1.23は応力の時間変化を、図4.1.24はAEパラメータ (リングダウンカウント) の時間変化を示している。載荷開始から400秒後から応力はピーク値から緩和を開始している。これと調和的にAEの活動度が低下している。肉眼で観察できた状況としては、応力緩和が開始した直後でせん断型の破断面がAEセンサー直下を貫いていた。したがって、400秒以前の応力がピーク値にある段階でAEの発生を伴って破断面が形成され、その後それが成長するに合わせて応力が緩和したという破壊プロセスが推定される。

また、図4.1.25には計測されたAEの相対的周波数成分の変化 ($100 \times AE(L) / (AE(L) + AE(H))$) を示している。応力がピーク値にある段階では周波数成分は徐々に高周波側に変化していたが、ピーク値を越えた直後から急激に低周波成分のAEが卓越していることが分かる。この理由としては、発生するAEが微小き裂の発生と成長という破壊プロセスに伴うAEから、大規模なせん断型き裂の形成によるき裂間の滑りによるAEに変化したことと、巨視き裂の形成によってAEが発生源からセンサーに到達する過程で高周波成分が減衰しやすい状況になったことが考えられる。

図4.1.26はm値の変化を示している。大きな傾向としては、応力緩和と調和的にm

値は減少の傾向にあるが、巨視き裂が形成された時間帯でのm値の急激な低下が特徴的である。

(3) 試験試料3 (TONOSS03 : 図4.1.27)

本試験試料はコアNo. 97SI05から作成したもので、試験前の約20分間試料を蒸留水に浸漬して湿潤状態とした。図4.1.28は応力-軸変位線図を示しているが、2.0 MPaで最大強度に達した後、巨視き裂の発生・成長に合わせて応力がゆっくりと緩和している。本試験片もポストフェイリュア一域での変形はクラスI型の変形特性を示した。

図4.1.29は応力の時間変化を、図4.1.30はAEパラメータ（リングダウンカウント）の時間変化を示している。載荷開始から約150秒後から応力はピーク値から緩和を開始している。本試料では、他の乾燥状態の試料と比較して全体的にAEの活動度が低下している。湿潤状態では乾燥状態の試料と比較して、き裂形成時において塑性的な変形挙動が卓越するためにAEの活動度が相対的に低下するもの考えられる。

また、図4.1.31には計測されたAEの相対的周波数成分の変化（ $100 \times AE(L) / (AE(L) + AE(H))$ ）を示している。応力がピーク値付近にある段階では周波数成分は高周波成分が相対的に卓越しているが、ピーク値を越えた後は低周波成分のAEが卓越していることが分かるが、試験試料2において認められた変化と比較するとその傾向は明瞭ではない。

図4.1.32はm値の変化を示している。試験試料2と同様に大きな傾向としては、応力緩和と調和的にm値は減少の傾向にあるが、ポストフェイリュア一域の300秒付近でm値が増加しているのが特徴的である。この理由としては、この時間帯では応力緩和の速度が低下していることから、ポストフェイリュア一域での滑り変形がいったん停止し、次の滑りの前段階としてき裂先端に微小なき裂が発生、集積したために小規模なAEの発生が卓越したと推察される。

4.1.2.4 まとめ

動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターで採取された堆積性軟岩コアを用いた、周変位制御による一軸圧縮試験を実施し、その破壊過程でのAE発生挙動について検討した。

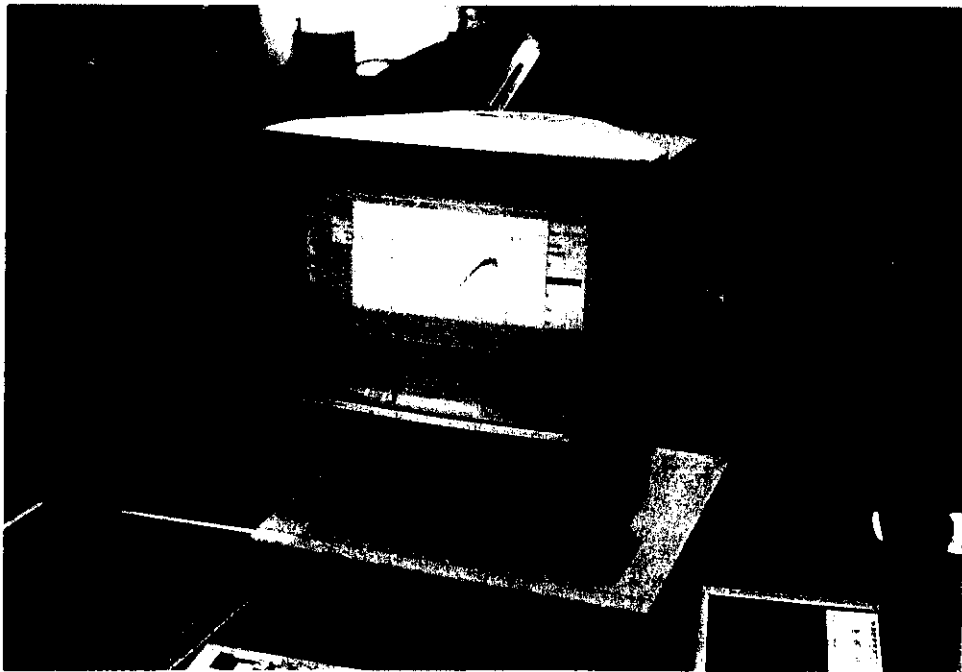
- (1) 周変位制御による堆積性軟岩のポストフェイリュア一域の変形特性はクラスI型であった。
- (2) AEの活動度は応力ピーク値付近において活発で、その後応力が緩和するに伴ってその発生頻度は低下する傾向にあった。
- (3) 計測されたAEの相対的周波数成分の変化では、ピーク応力前の段階では高周波成分が卓越し、ポストフェイリュア一域では低周波成分が卓越した。
- (4) 振幅分布特性値であるm値の変化では、応力緩和と調和的に低下する傾向を示したが、急激な応力低下域でのm値の低下、応力低下速度が緩やかな領域でのm値の上

昇といった特徴的な挙動も認められた。

(5) AE発生頻度の他に、 m 値、周波数成分の変化を追跡することによって岩石内部で起こっている破壊現象の予測がより高い信頼性をもって行える可能性があるものと考えられる。



(a) 材料試験機



(b) 制御用コンピュータ

図 4. 1. 11 試験に用いた材料試験機
-28-

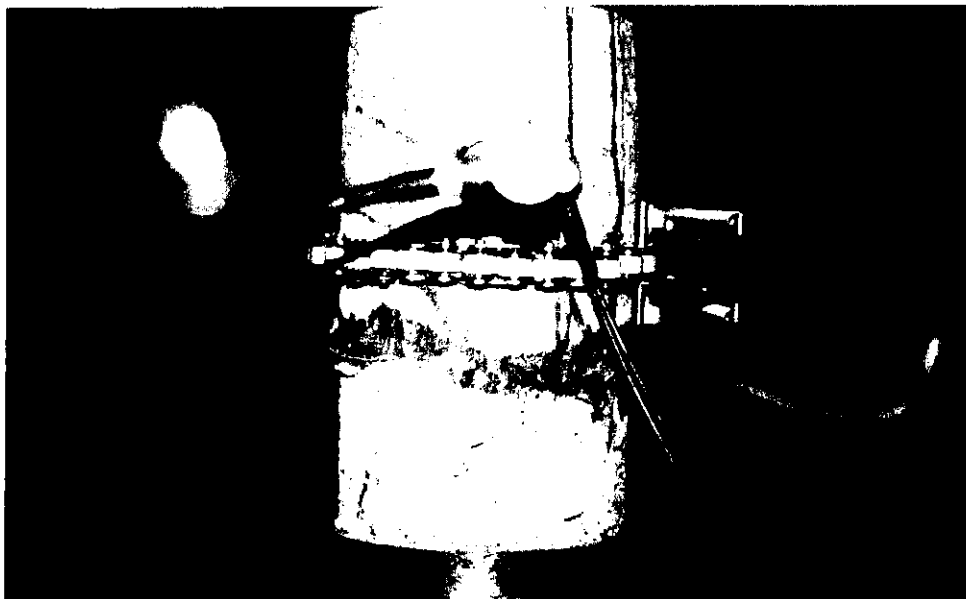
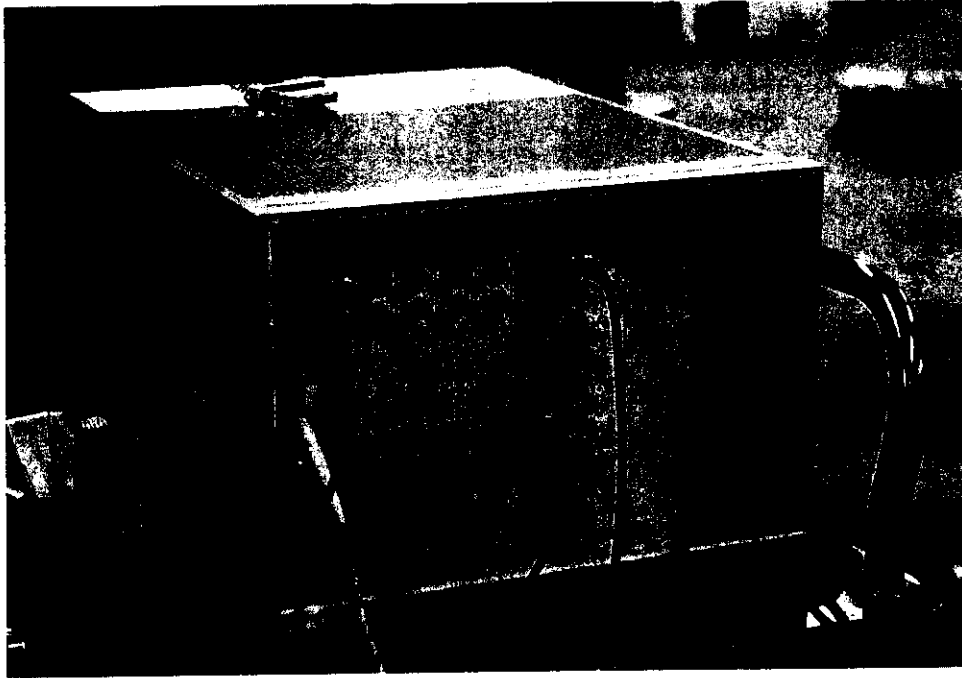
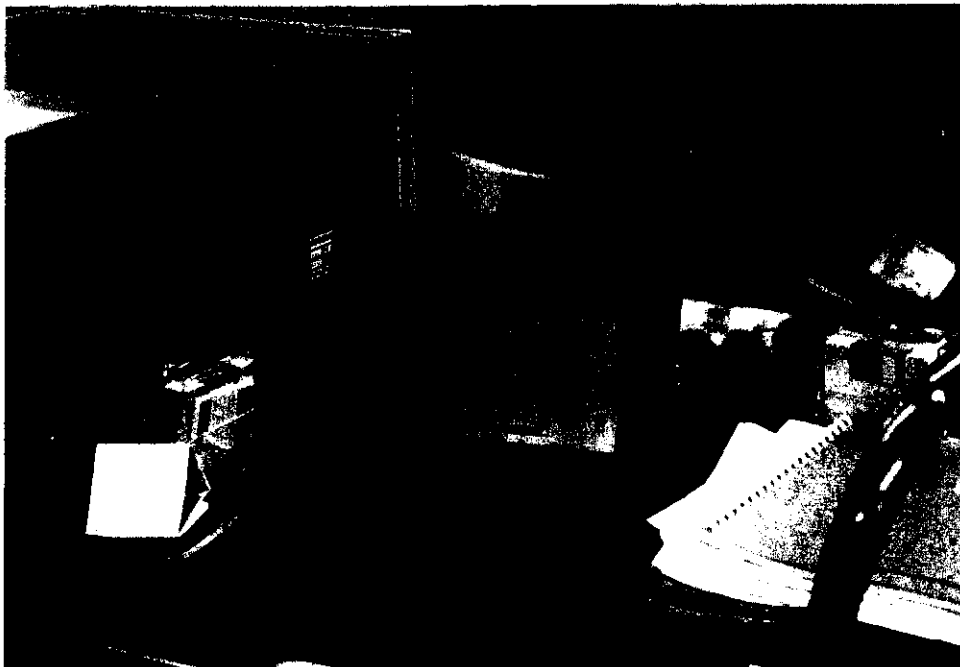


図4. 1. 12 試験において周変位制御に用いた
チェーン型変位計 (MTS製)



(a) AE計測用モジュール



(b) 制御用コンピュータ



図4. 1. 14 試験試料1
(TONOSS02 : BVP-2)

Stress—Axial Length Curve、TONOSS 02

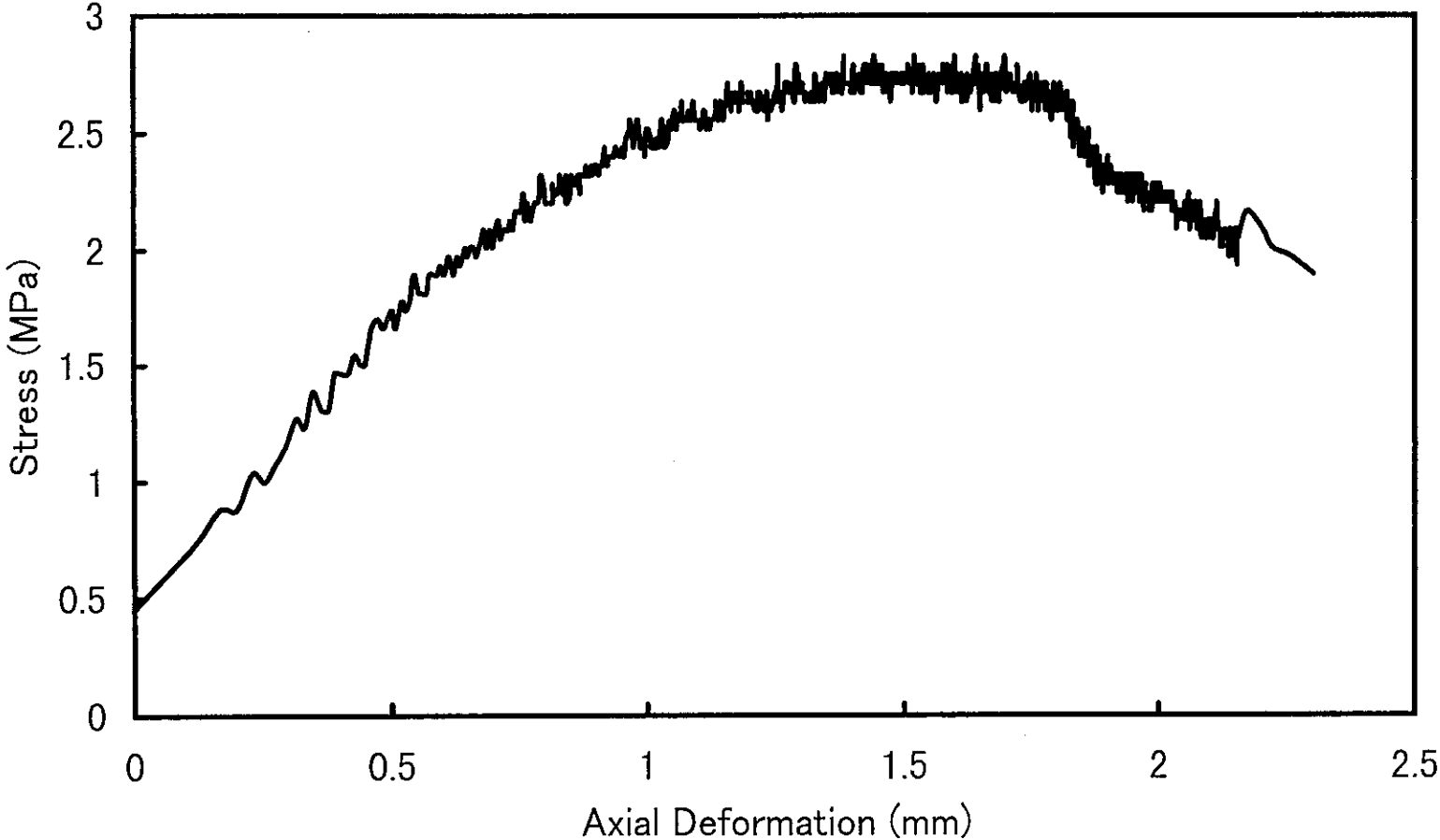


図4. 1. 15 応力—軸変位線図

Stress History, TONOSS02

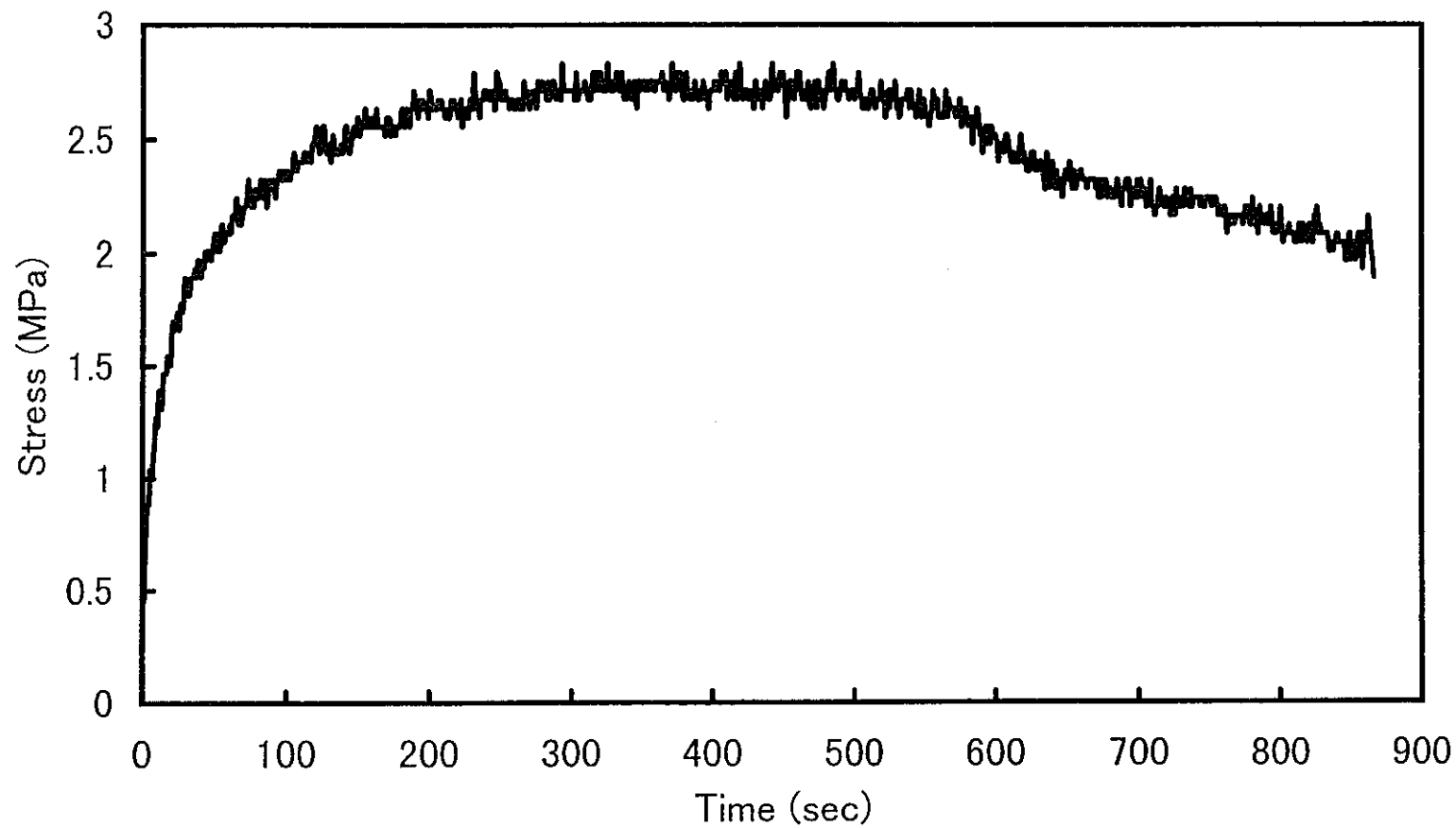


図4. 1. 16 応力の時間変化

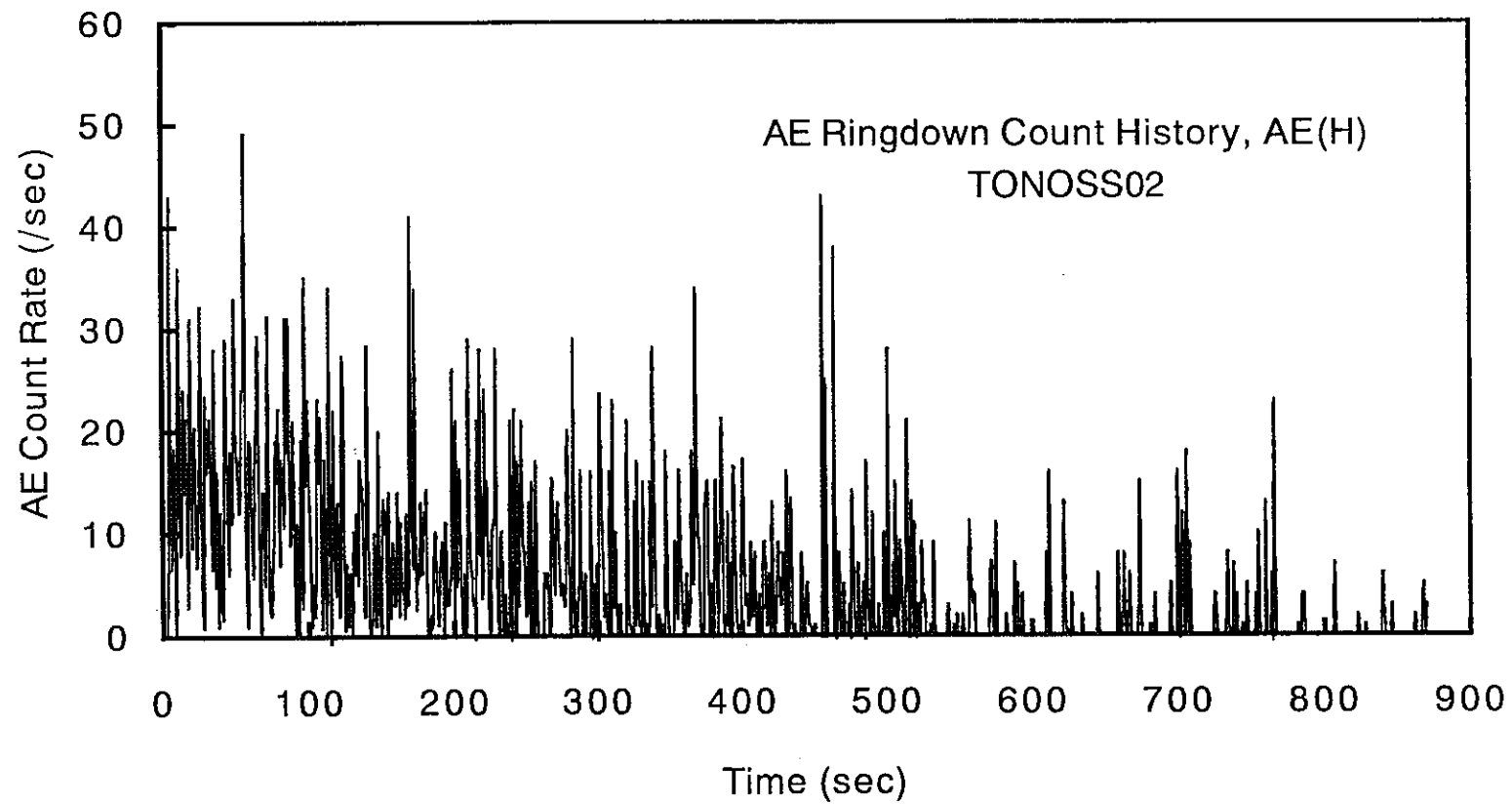


図4. 1. 17 AEリングダウンカウントレートの時間変化

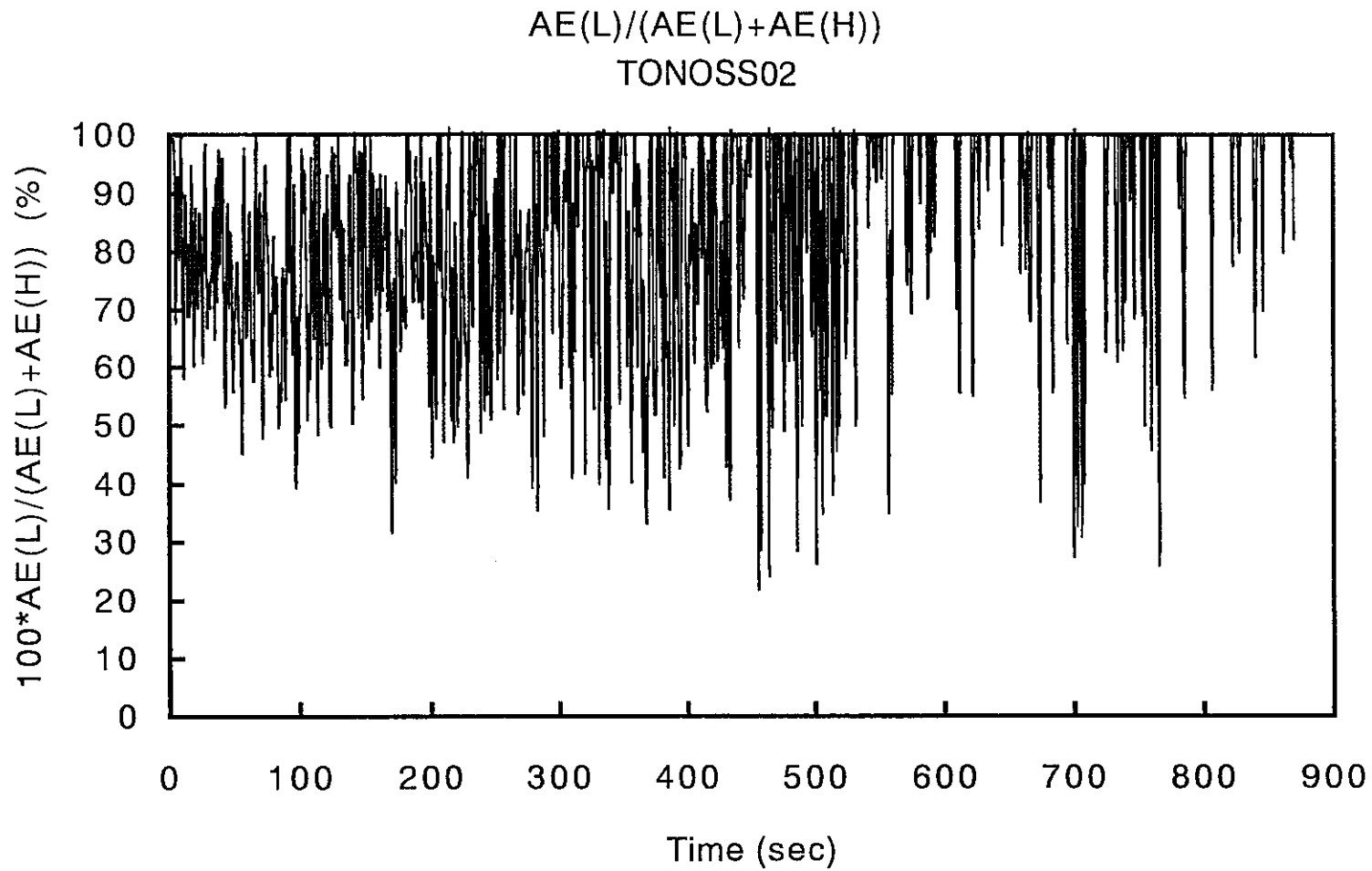


図4. 1. 18 AEの相対的周波数成分の変化

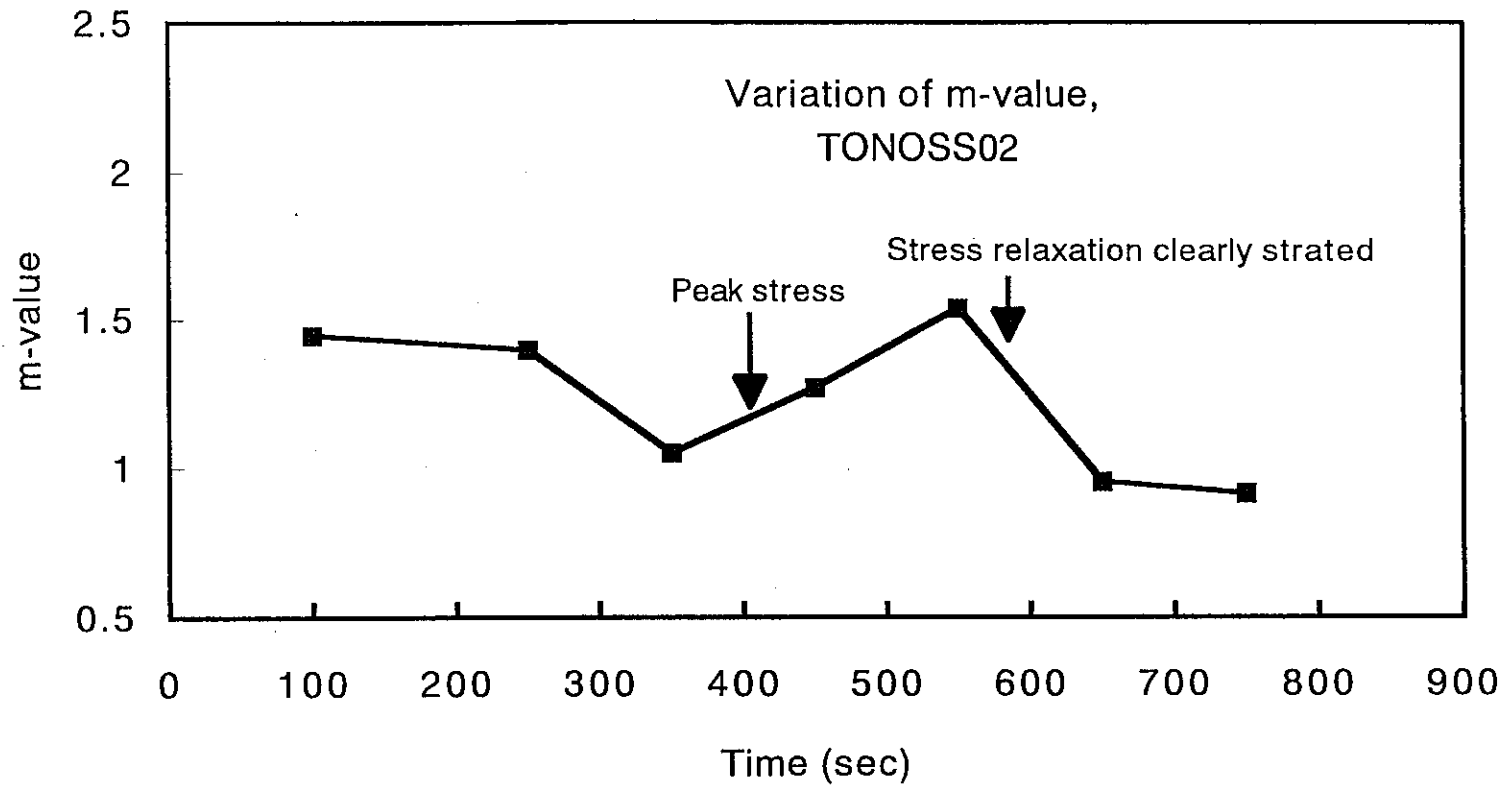


図4. 1. 19 m値の変化

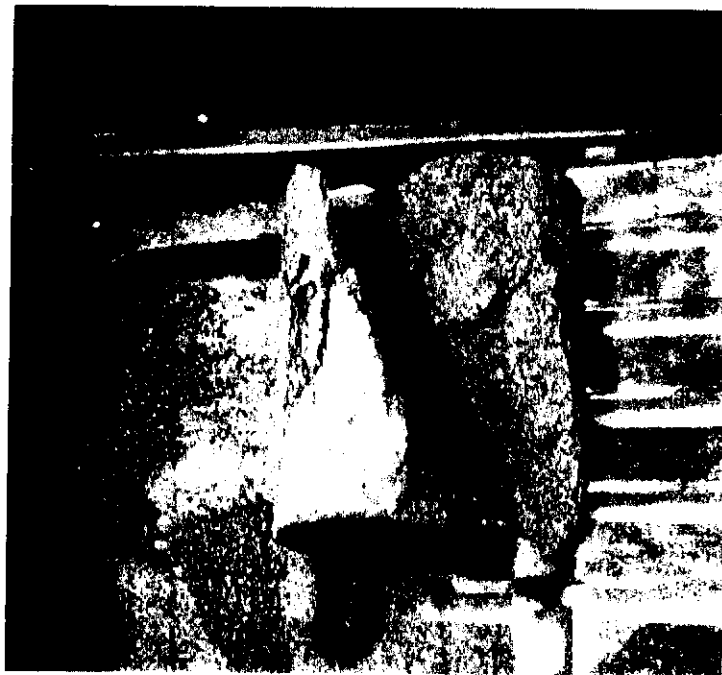


図4. 1. 20 試験試料2の破壊後状況

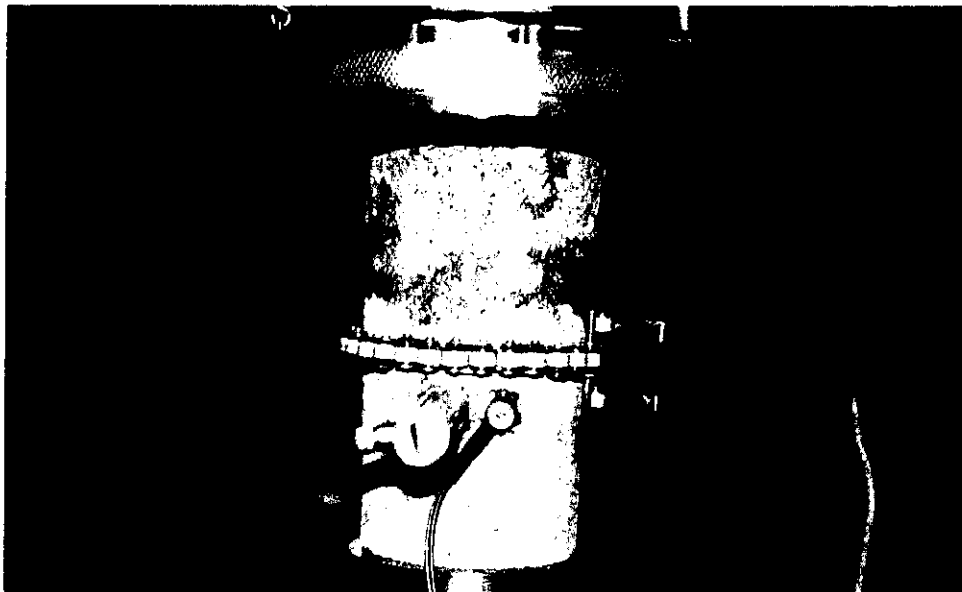


図4. 1. 21 試験試料 (TONOSS03)

Stress vs Axial Deformation Curve, TONOSS03

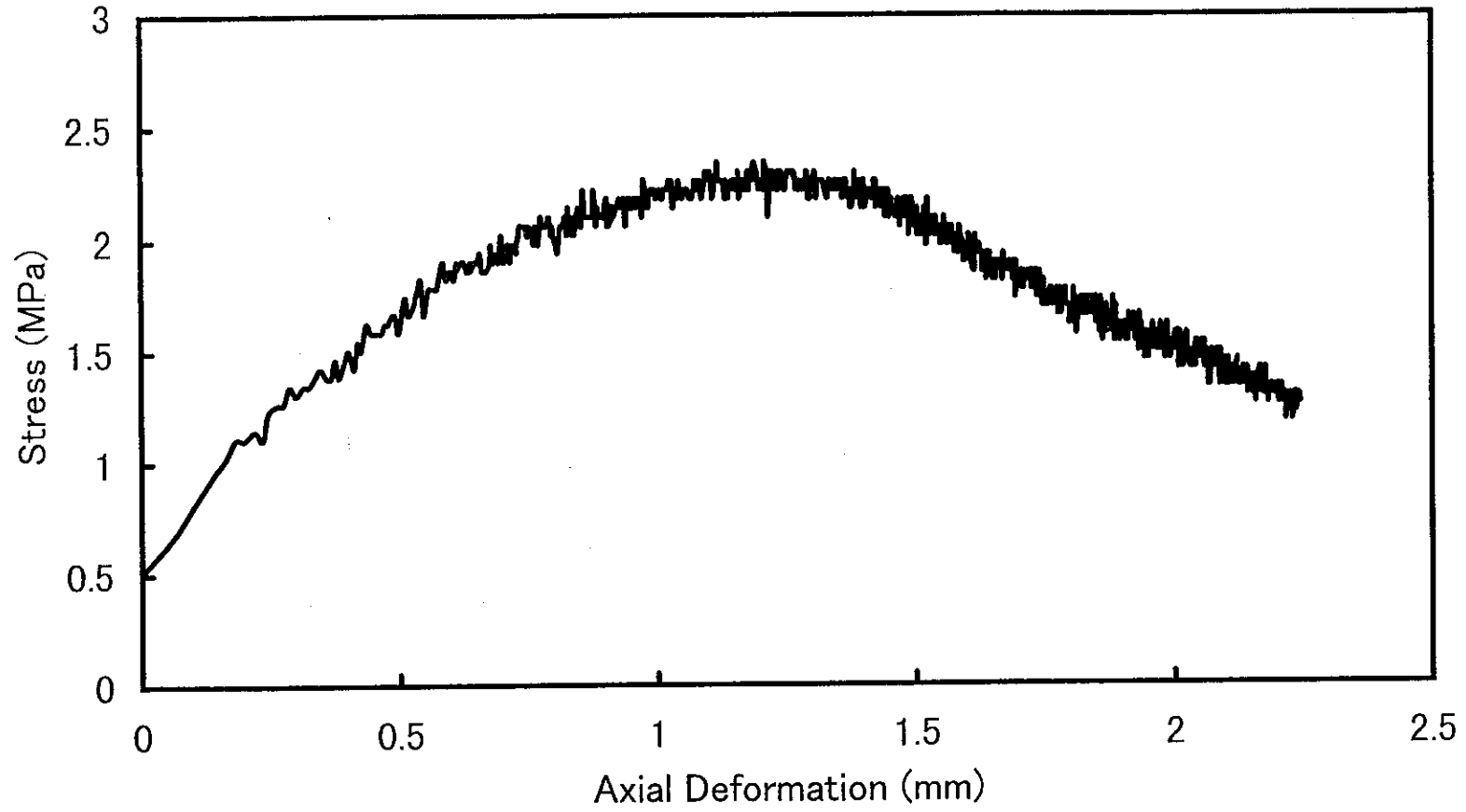


図4. 1. 2 2 応力一軸変位線図

Stress History, TONOSS03

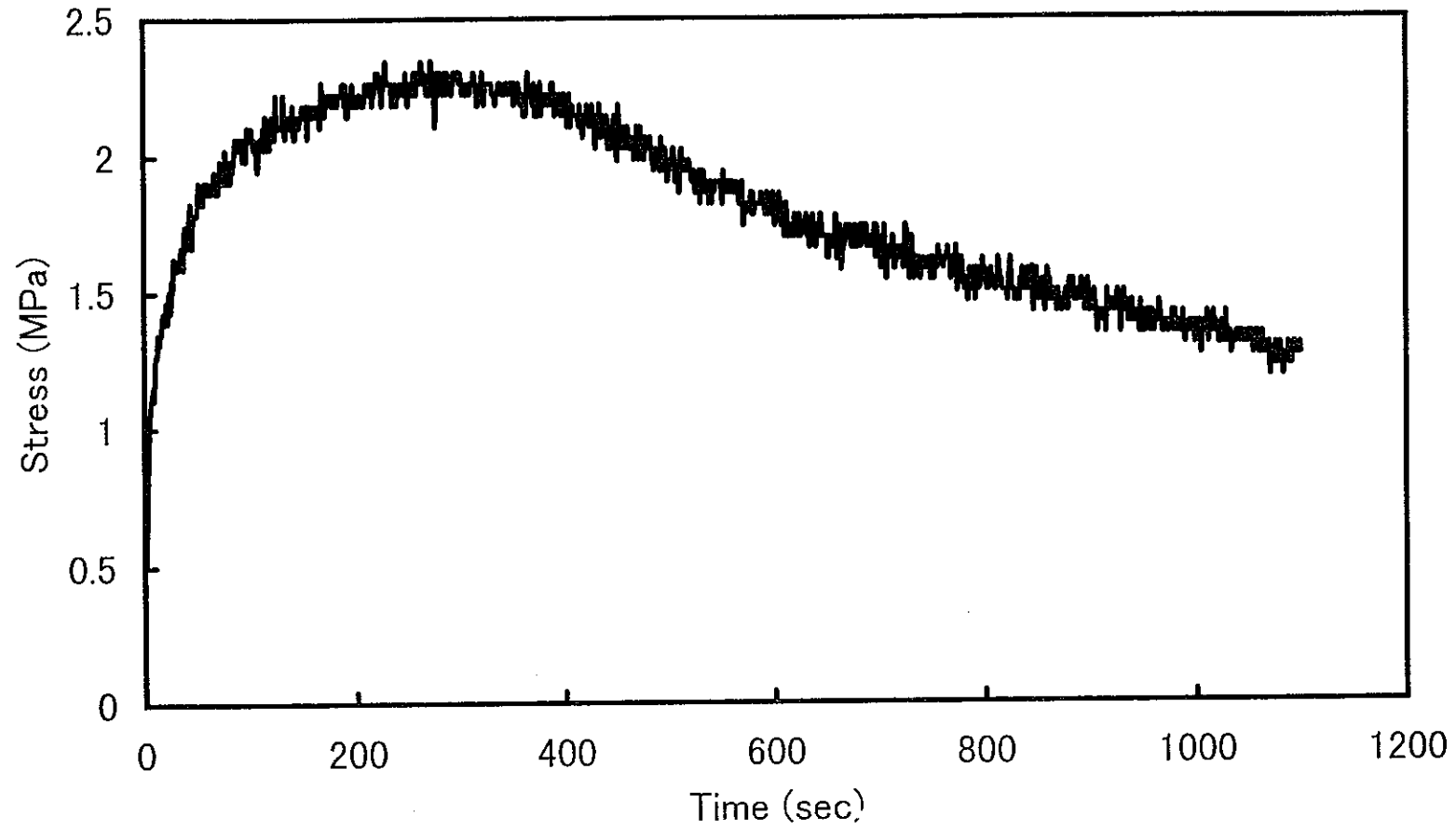


図4. 1. 23 応力の時間変化

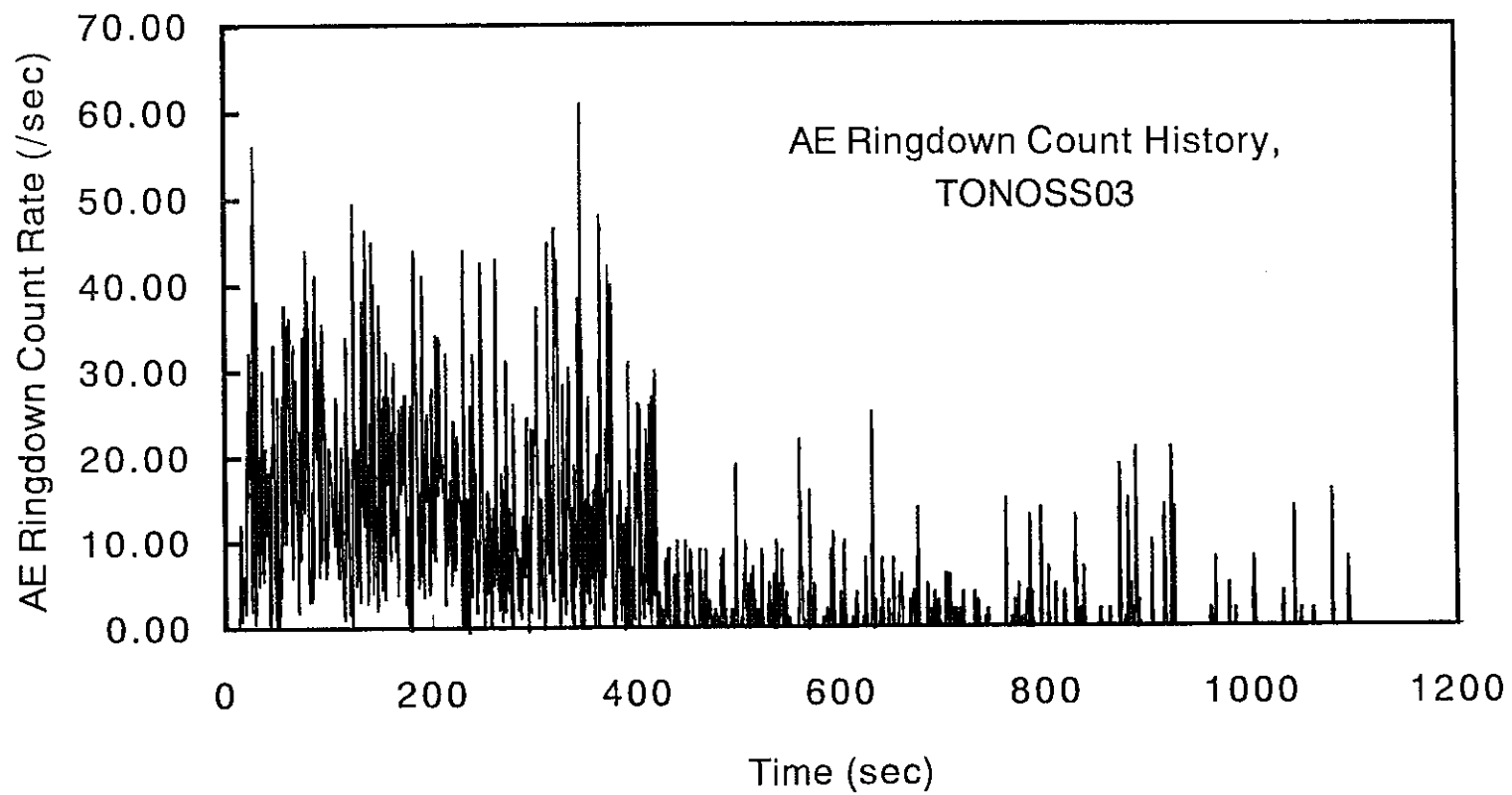


図4. 1. 24 AEリングダウンカウントレートの変化

Relative Frequency Variation
TONOSS03

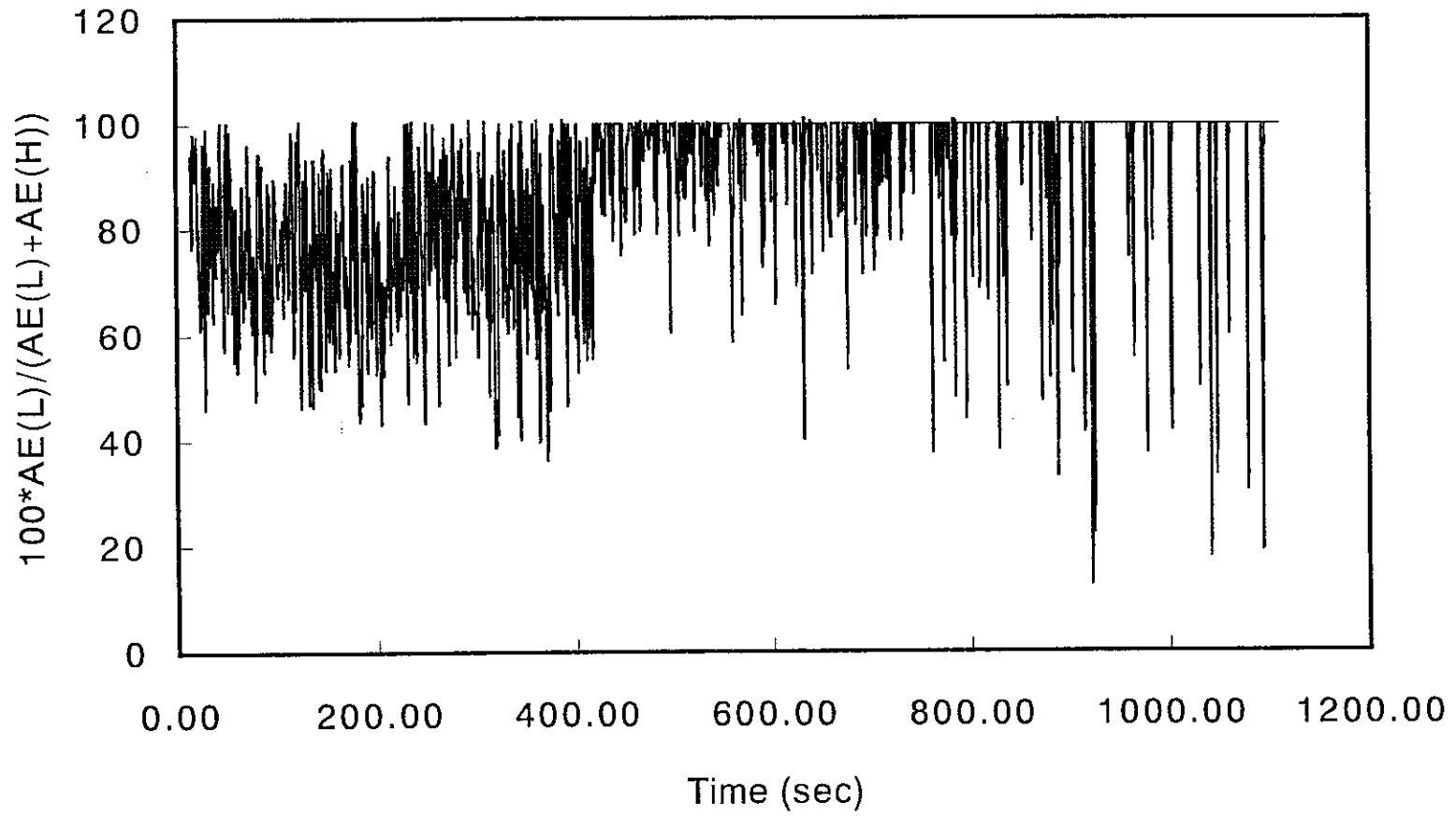


図4. 1. 25 AEの周波数成分の相対的变化

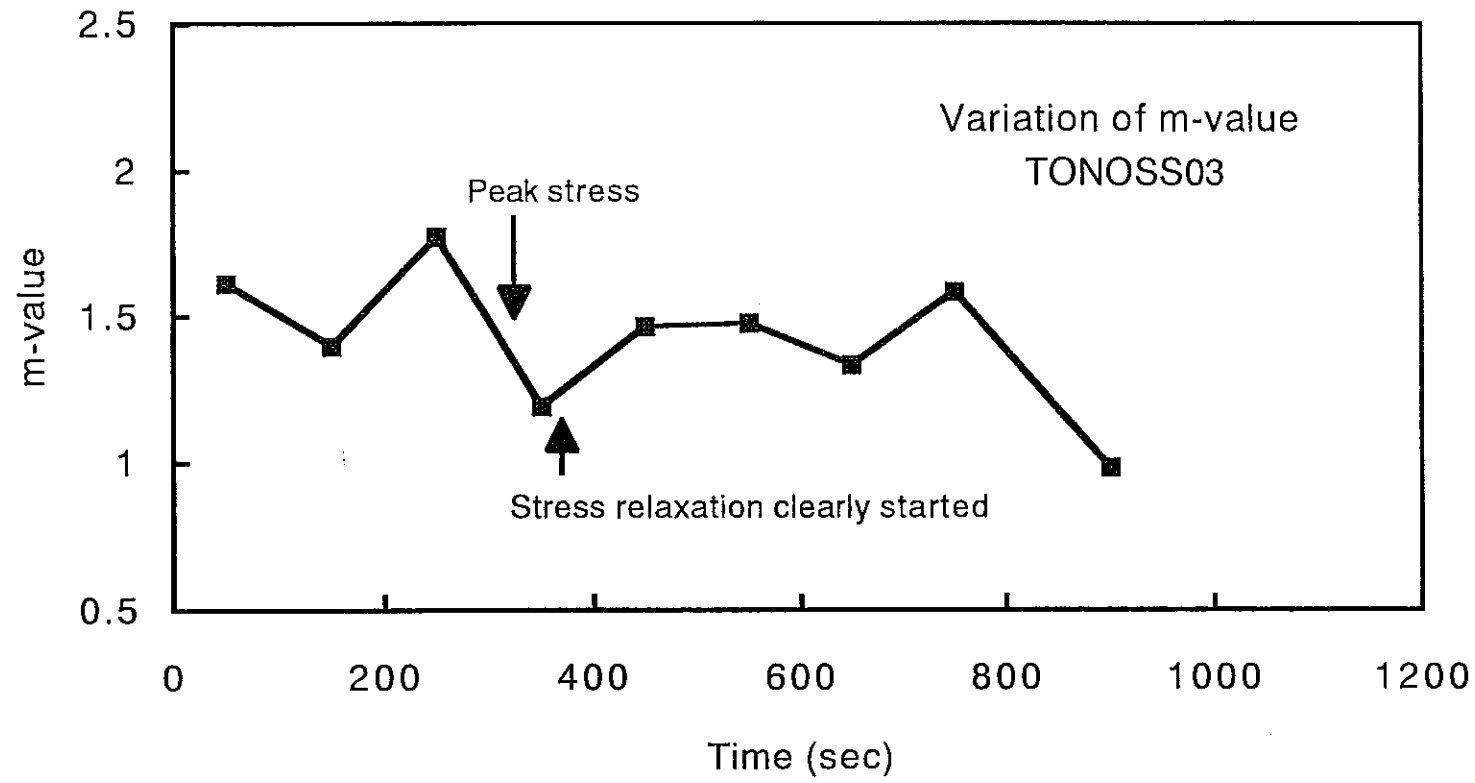


図4. 1. 26 m値の変化

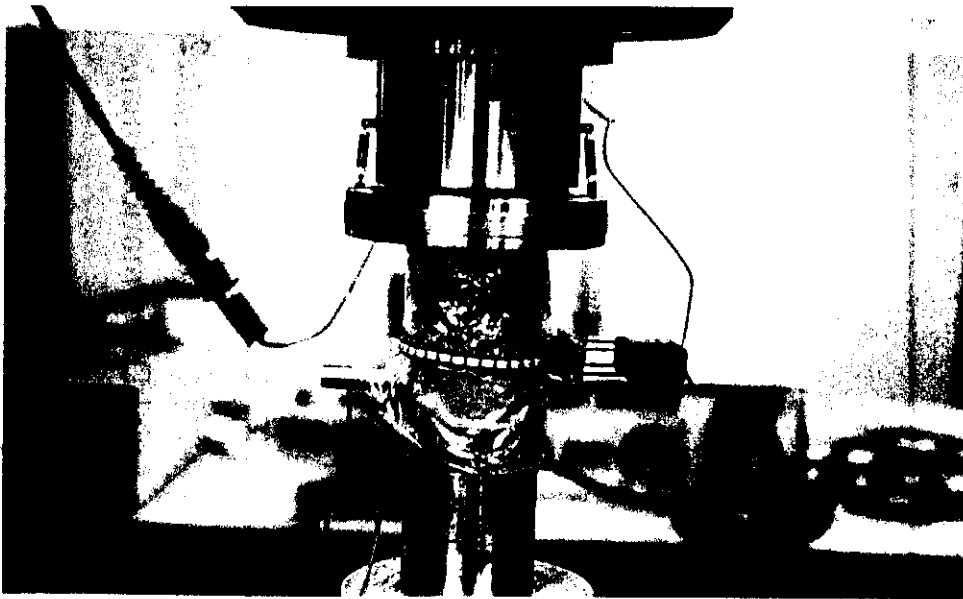


図4. 1. 27 試験試料
(TONOSS04)

Stress vs Axial Deformation Curve, TONOSS04

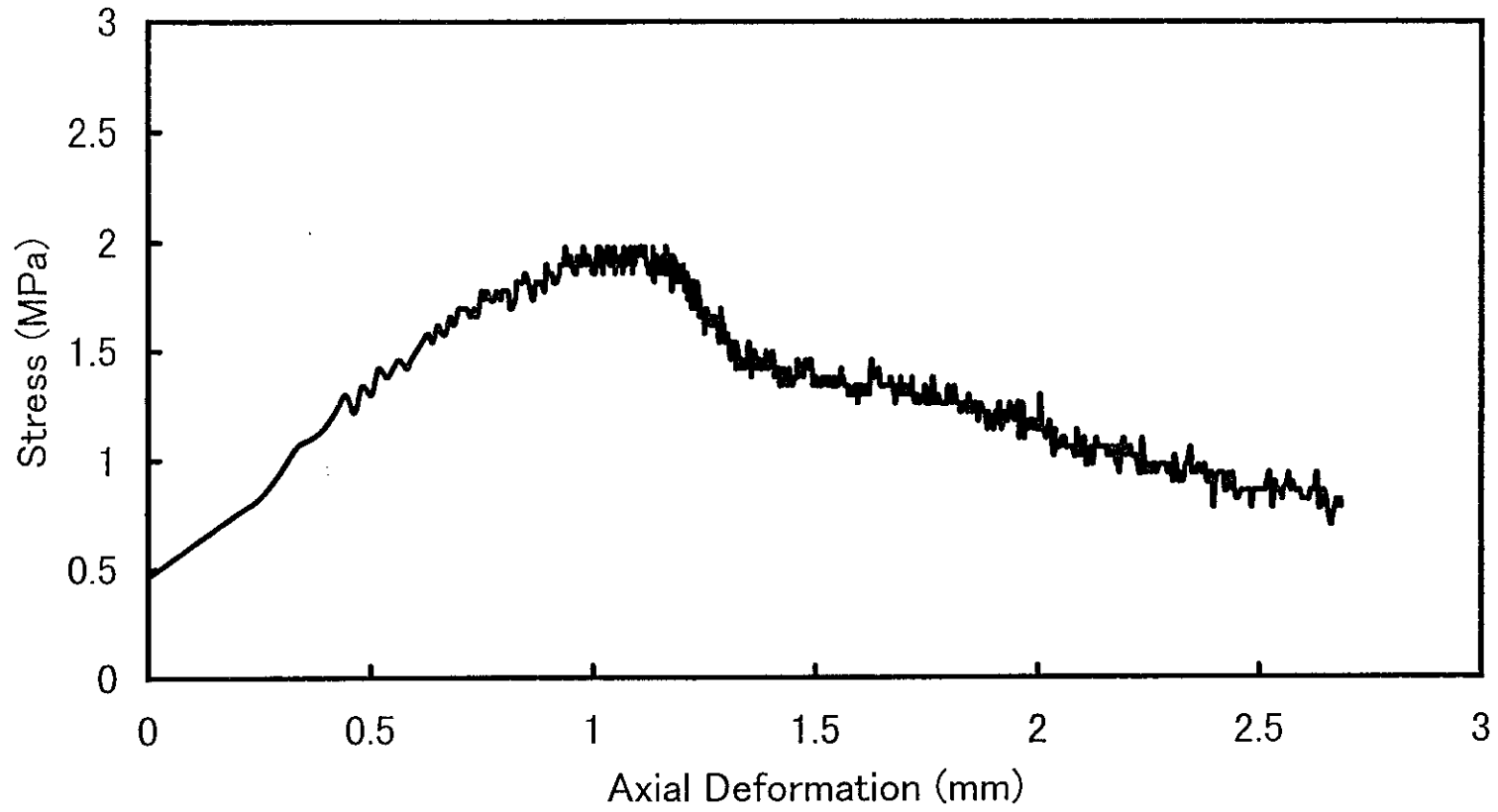


図4. 1. 28 応力一軸変位線図

Stress History, TONOSS04

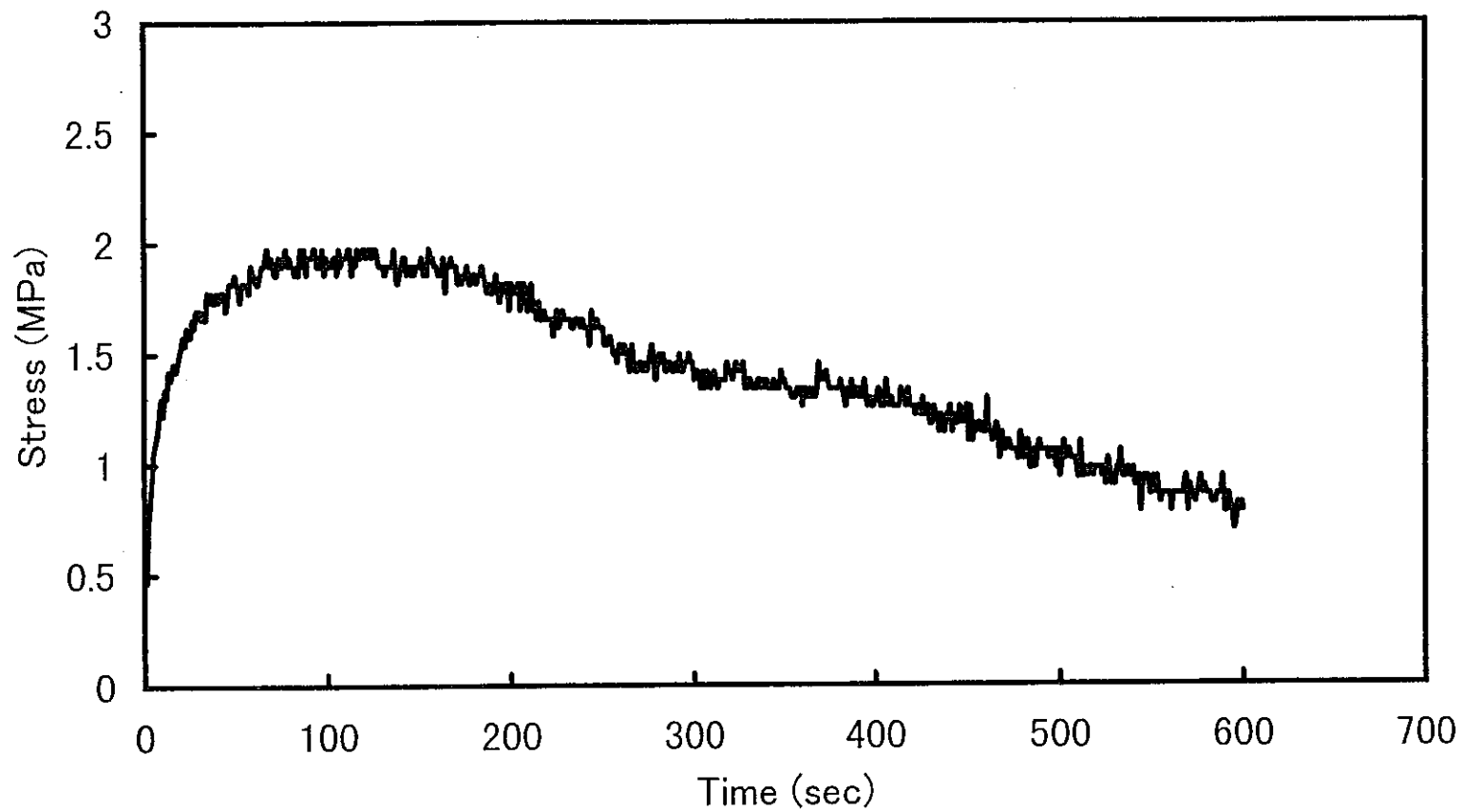


図4. 1. 29 応力の時間変化

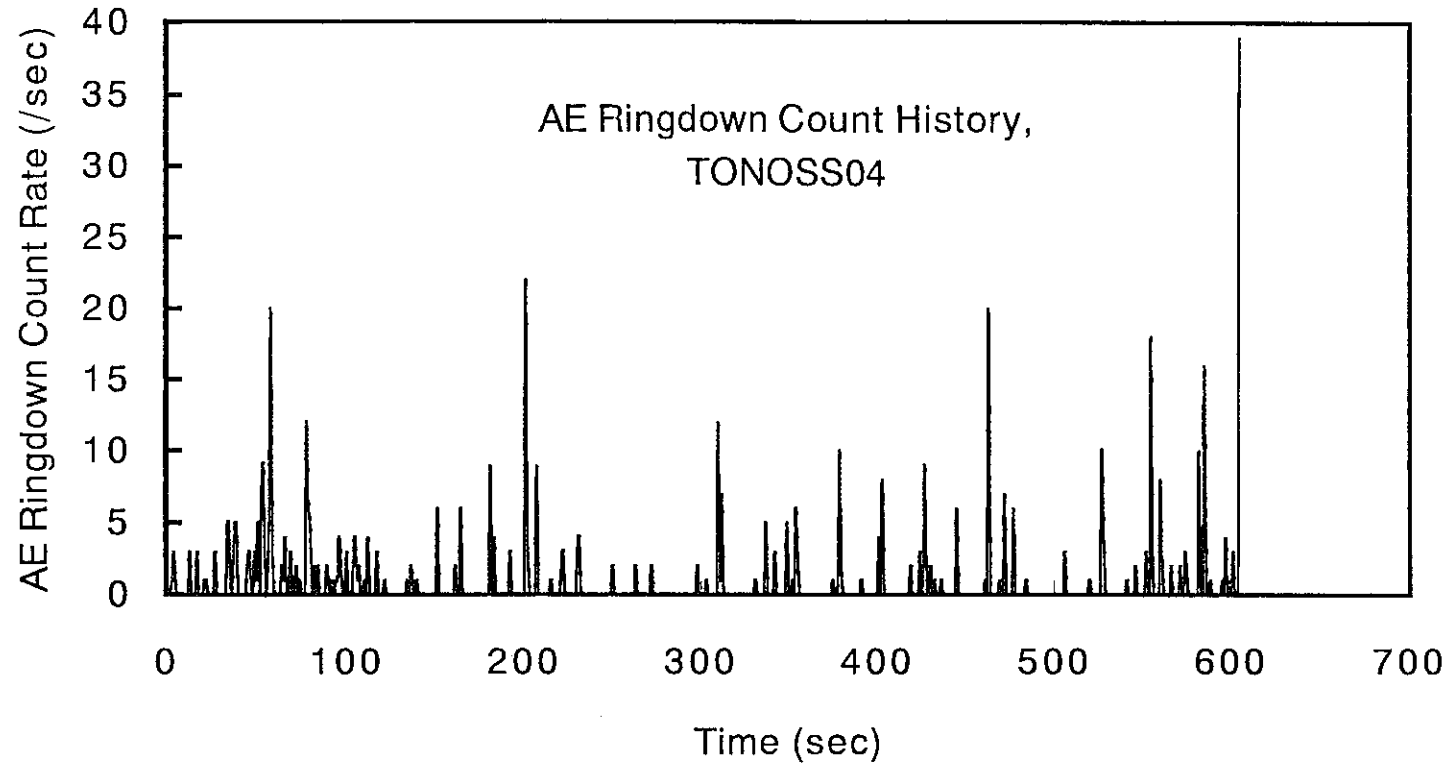


図4. 1. 30 AEリングダウンカウントレートの変化

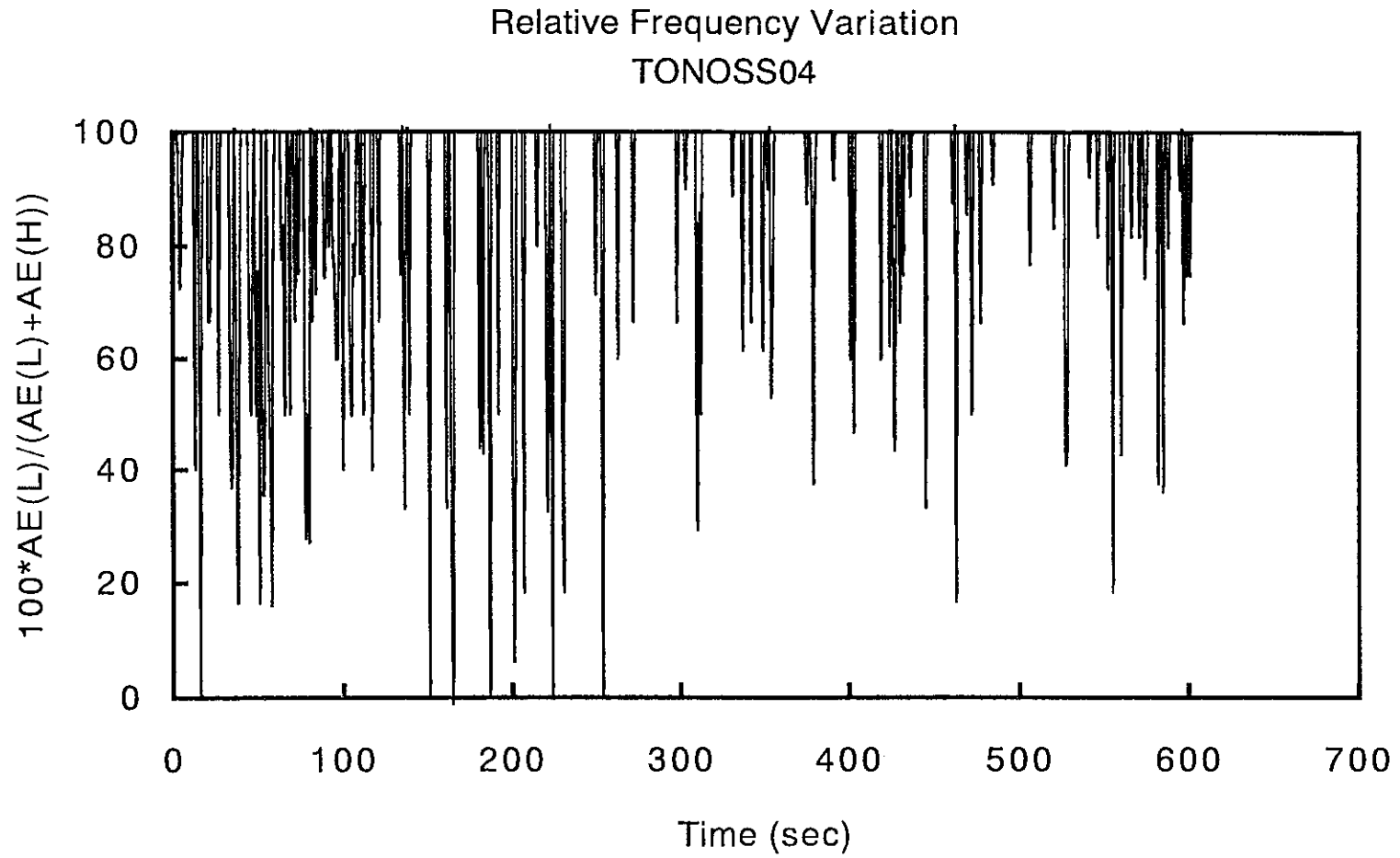


図4. 1. 31 AEの周波数成分の相対的变化

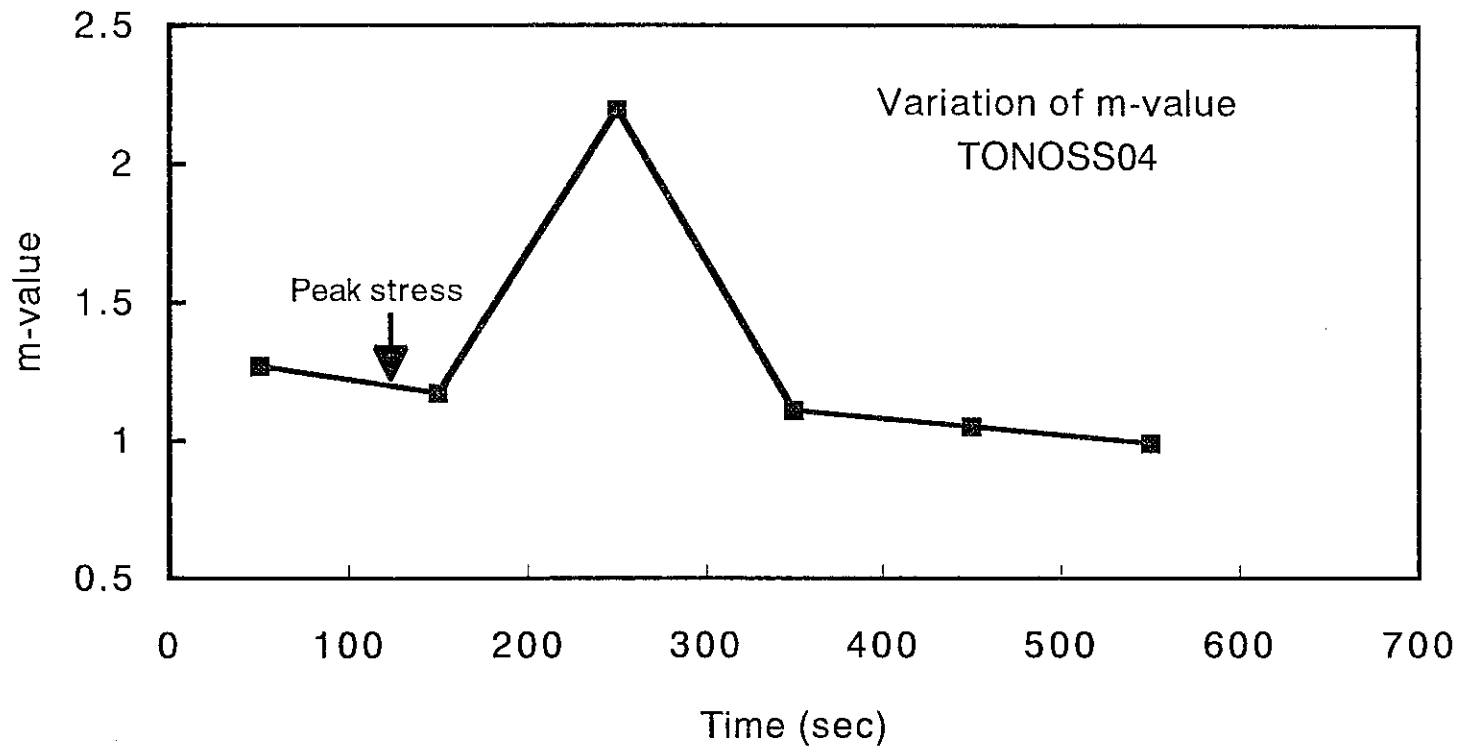


図4. 1. 3 2 m値の変化

4.2 動燃事業団の研究成果

4.2.1 坑道掘削影響試験の事後調査（比抵抗トモグラフィ調査）

(1)概要

本調査の目的は、東濃鉱山北延 NATM 坑道において、平成7年度に機械工法により掘削した坑道（以下、試験坑道という）を横断する断面において坑道掘削前後において比抵抗トモグラフィ調査を実施し、その断面内の坑道掘削前後の比抵抗分布を調査し、掘削影響領域を把握することである。

平成5年度に、坑道掘削前の調査として比抵抗トモグラフィ調査を実施し、その断面内での比抵抗分布を調査した。本年度は、坑道掘削後の調査として、同様の手法により同断面内での比抵抗分布を調査し、掘削影響領域について検討した。

(2)調査方法

比抵抗トモグラフィ調査とは、ボーリング孔などを利用して調査対象岩盤を囲むように電極を配置して電位を計測し、これらのデータより対象岩盤の比抵抗分布を再構成し、可視化する技術である。調査は、電位測定とトモグラフィ解析の2段階で実施される。

a)調査位置

本調査は、図-4.2.1 に示すように計測坑道から試験坑道を挟むように穿孔された2本のボーリング孔（MT-1、MT-2）を用いて実施した。これらのボーリング孔で挟まれた領域を調査対象断面とし（以下、調査断面という）、試験坑道は調査断面のほぼ中央に位置する。

b)測定方法

電極は、調査断面を囲むようにボーリング孔内および掘削された試験坑道および計測坑道の壁面に設置し、その数は、MT-1が20個、MT-2が21個、試験坑道が16個、計測坑道が10個の合計67個である。また、解析の際に必要な遠電極を地表に2箇所設置した。一般に、比抵抗測定においては、電流電極が水中にある場合に電流が効率よく岩盤に伝達され、電位電極も岩盤との接触性が向上し、精度良い計測電位を得ることが出来る。このような理由から、MT-1、MT-2孔を水で満たして計測を行った。計測システムの概略を図-4.2.2に示す。また、使用機器一覧表を表-4.2.1に示す。下記計測システムで、スキャナを介して順次電極の組み合わせを変えることにより、すべての電極間における電流値および電位を測定した。比抵抗測定手順を図-4.2.3に示す。

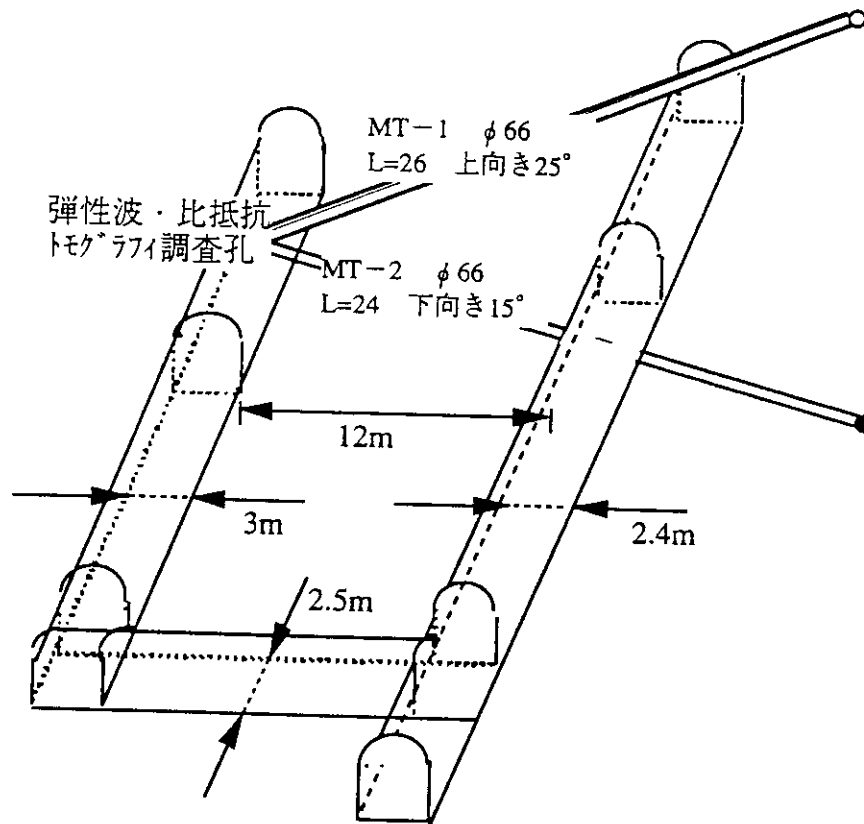


図-4.2.1 調査位置

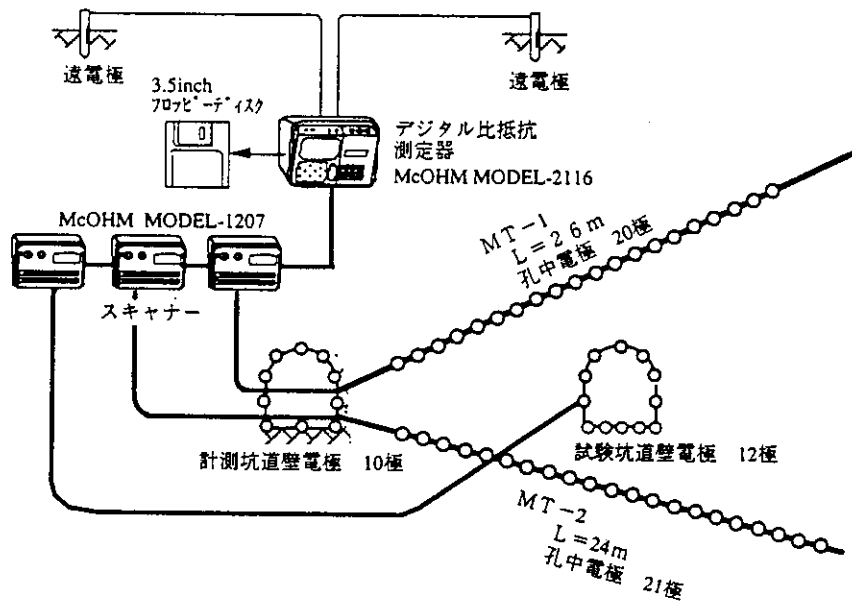


図-4.2.2 計測システム概略図

表- 4.2.1 比抵抗トモグラフィ・使用機材一覧表

区分	機材名	形式番号	製作会社	仕様・材質	数量
データ収録装置	電気探査	McOHM21 Model-2116	応用地質株式会社	デジタル式 ・送信部(定電流方式) 出力電圧:200V 出力電流:1~200mA 最大出力:40W ・受信部 チャンネル数:3 最小感度:5 μ V 入力インピーダンス:5M Ω ・制御部 制御電極数:250/ch スタッキング回数:任意	1
電極	電極切替器 (スキャナ)	McOHM Model-1207	応用地質株式会社	制御電極数:32	3
	測定ロッド 孔中電極			真鍮電極1mピッチ 塩ビパイプVP30製	2式
	電極棒 遠電極用			ステンレス、 ϕ 14mm L=400mm	10本
	電極棒 坑道壁用			鉄釘 L=150mm	26本
ケーブル	多芯中継 ケーブル			16芯0.3mm ² /芯 長さ 50m 100m	2本
	単芯ケーブル 遠電極			1.25mm ² 1.5 mm ²	1 km 200m
	多芯ケーブル 遠電極(立坑)			16芯 0.08 mm ² /芯	200m
その他	安定化電源(12V20A)、コネクタボックス、 ナイロンチューブ、ビニールテープ など				1式
室内データ 整理・解析	データ整理 コンピュータ	Optiplex 466/Mxe	デル コンピュータ	32 Bit メモリ-16MB DX2 66MHz	1式
	解析用 コンピュータ	SPARC Station10	サンマイクロ エレクトロニクス	ワークステーション 32Bit メモリ-64MB	1式
	作図出力	DesignJet 650C	ヒューレット パッカート	カラープロッター	1式

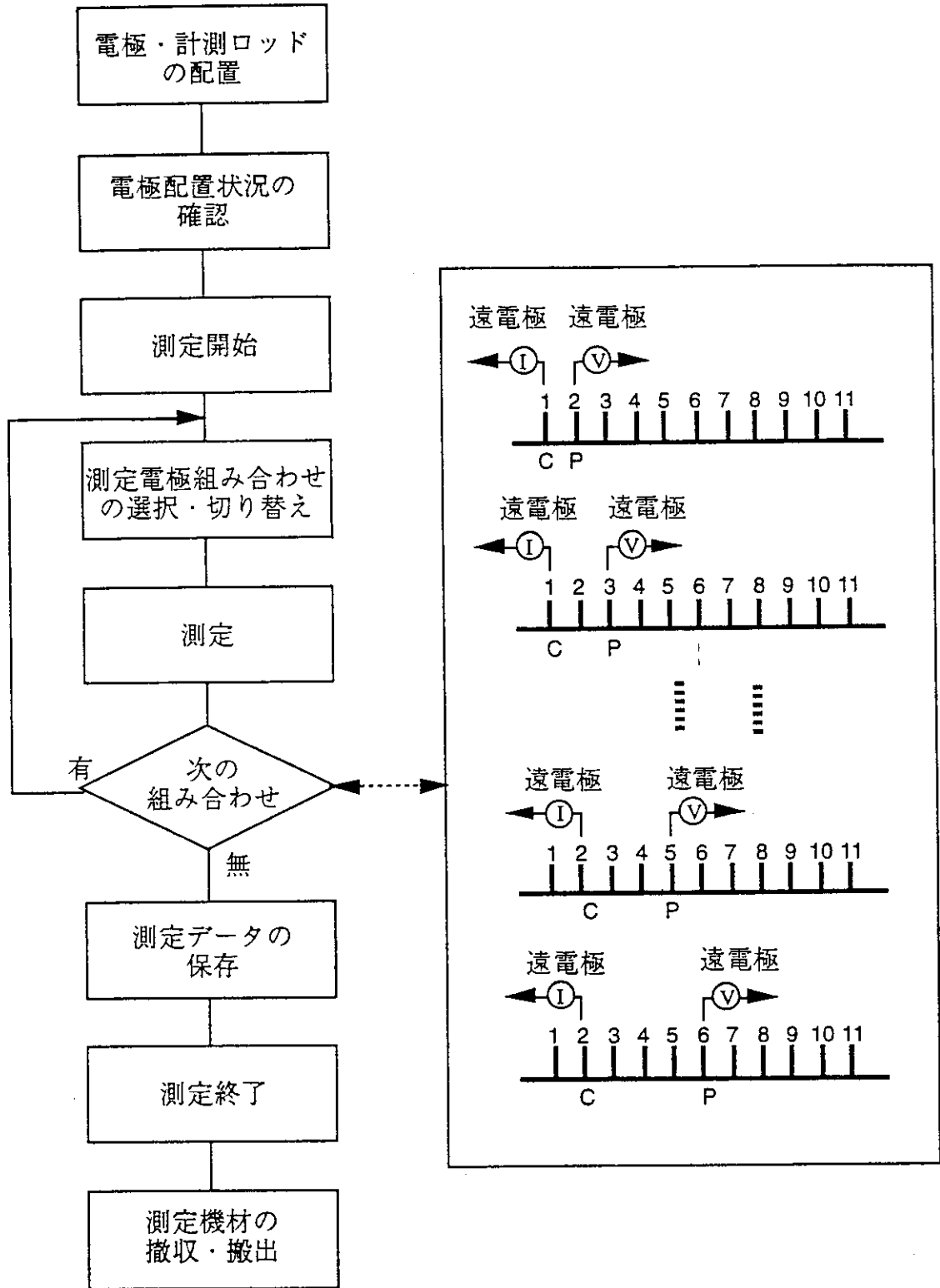


図-4.2.3 比抵抗測定手順

c)解析方法

・解析モデル

今回の解析に用いた断面は、試験坑道掘削前後における解析条件を等しくするため、試験坑道掘削前に実施した比抵抗トモグラフィ解析と同じものを用いた。解析領域については、有限要素法で解析するため解析結果に対する境界条件の影響を無くすために十分な領域として、調査断面を中心とした縦85m、横100mの長方形領域とした。また、解析メッシュについては、電極間隔および解析精度を考慮し調査断面の領域を十分細かく分割し、順次外側を大きく分割した。解析メッシュを図-4.2.4(a)および(b)に示す。

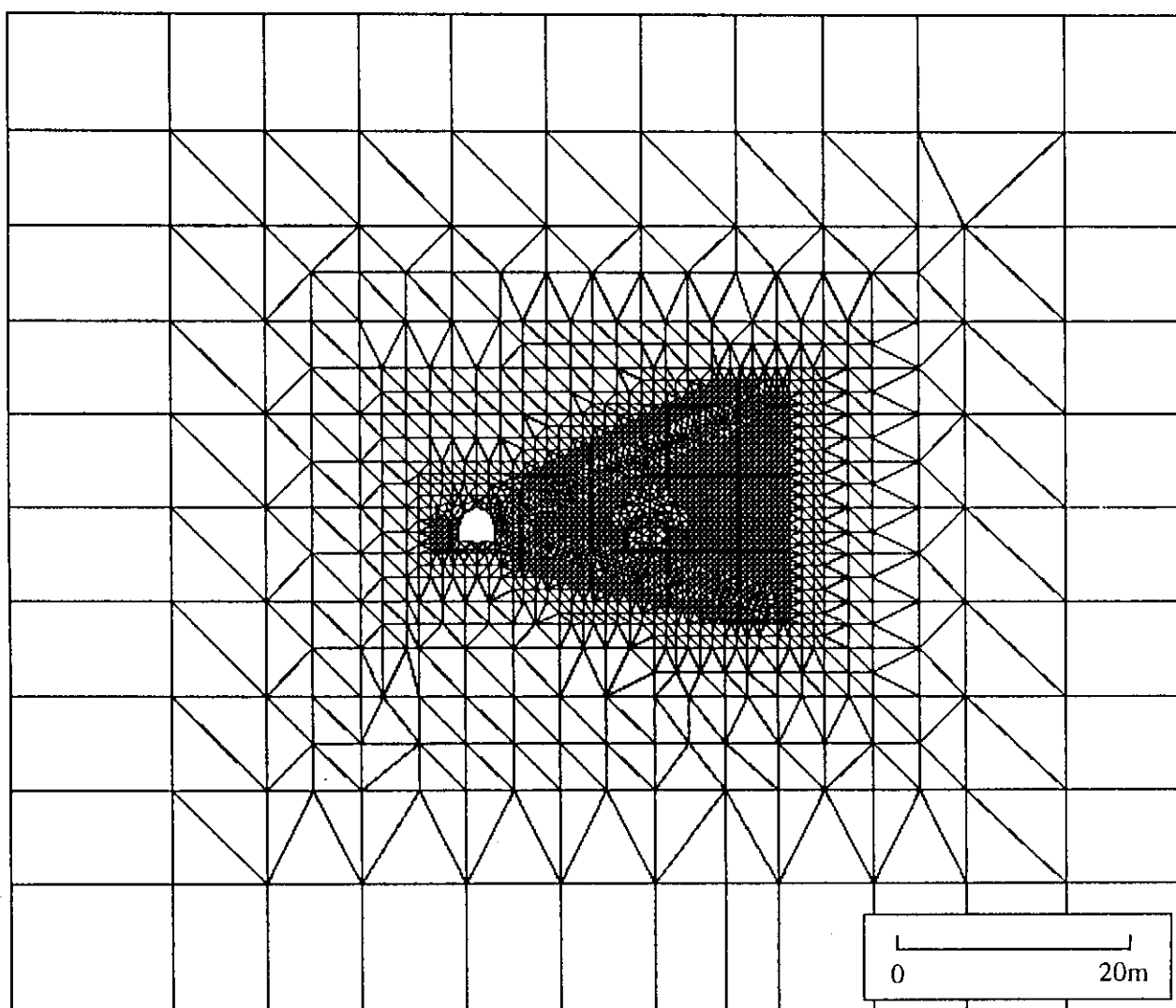


図-4.2.4(a) 解析メッシュ図

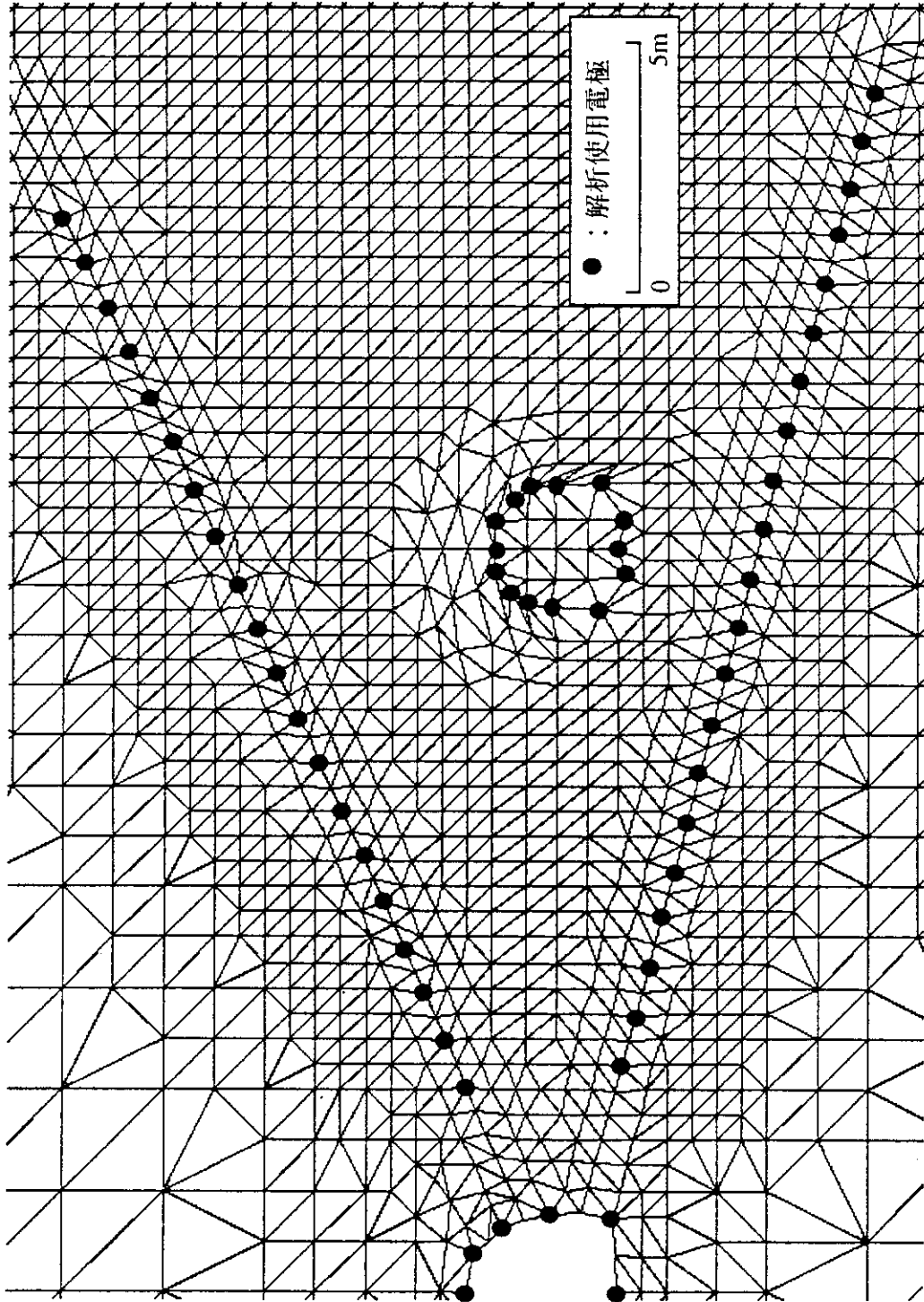


図-4.2.4(b) 解析メッシュ図 (拡大図)

・遠電極補正

遠電極が無限遠の位置にあるとして有限要素法により解析を行っているが、実際の測定においては、遠電極を地表に設置したことおよび最大電極間隔に対して必ずしも十分遠方に設置できなかったことから、測定結果を補正する必要があり、下記式を用いて補正を行った。

$$V' = fV$$

ただし、 V は測定電位、 V' は補正後の電位である。 f は補正係数であり、電流源、電位測定点、電極間距離、仮想電流源間距離より決まる。

d)解析ケース

解析は下記の2ケースについて実施した。

ケース1：MT-1、MT-2、試験坑道の電極のデータによる解析

ケース2：MT-1、MT-2、試験坑道、計測坑道の電極のデータによる解析

また、各解析における初期値は坑道掘削前に実施した比抵抗トモグラフィ解析結果を用いた。

(3)解析結果

・ケース1：

ケース1の解析結果を図-4.2.5に示す。解析対象部は全体的に7~15 Ωm であるが、MT-1孔12~21mの範囲で30 Ωm 以上の塊状の高比抵抗領域がみられた。

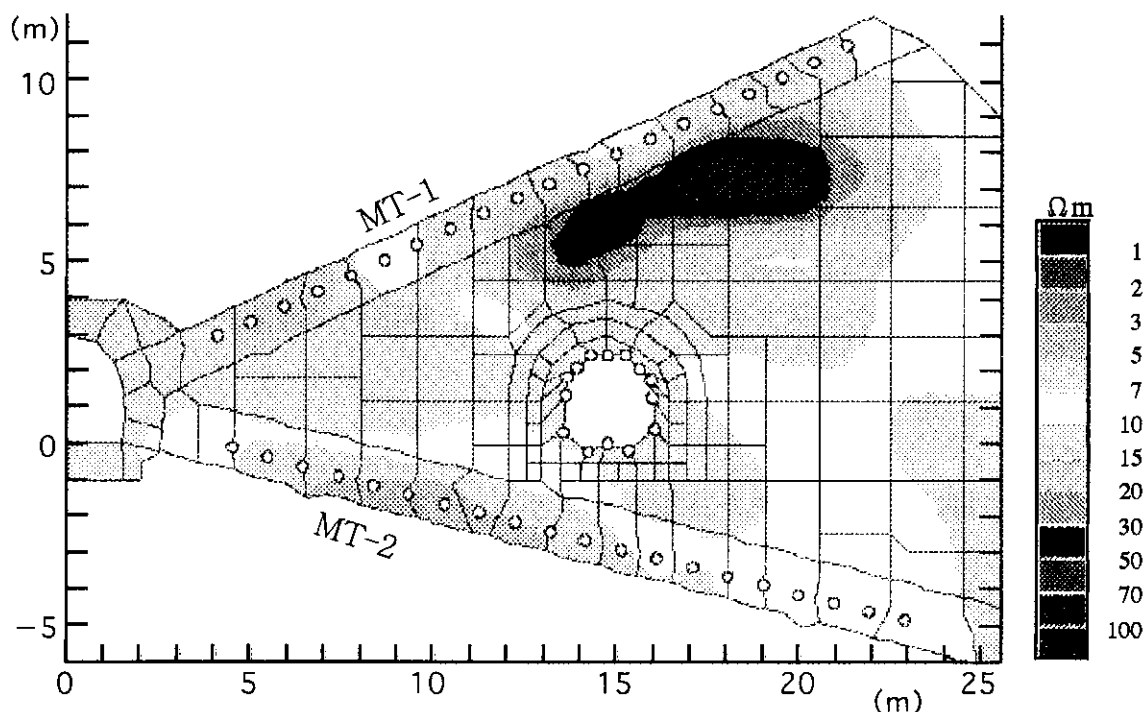


図-4.2.5 比抵抗トモグラフィ解析結果 (ケース1)

・ケース 2 :

ケース 2 の解析結果を図-4.2.6 に示す。ケース 1 と同様の結果が得られ、解析対象部は全体的に 7~15 Ω m であるが、MT-1 孔 12~21m の範囲で 30 Ω m 以上の塊状の高比抵抗領域がみられた。

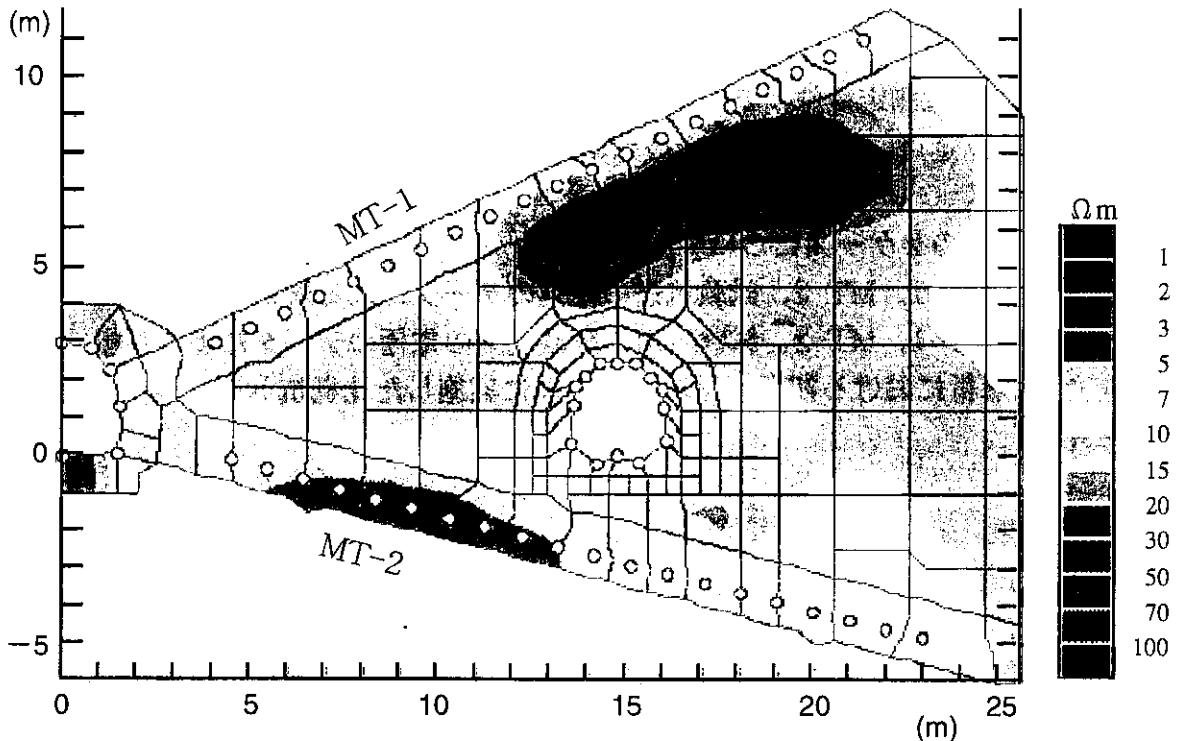


図-4.2.6 比抵抗トモグラフィ解析結果 (ケース 2)

ケース 1 とケース 2 の解析結果の比較を行い、事前調査結果と比較する結果を選定した。繰り返し計算回数に対する平均誤差および最大誤差の収束状況によるとケース 1 の方がその誤差が明らかに小さいことが確認された。その原因としては試験坑道に設置した電極の設置位置や設置状況によって、ある一つの組み合わせの電極で大きな誤差が生じたものと考えられる。また、誤差の分布状況もケース 1 の方が小さいことから、ケース 1 の解析結果を採用し、掘削前の結果と比較・検討することとした。

(4)考察

坑道掘削前後で実施された比抵抗トモグラフィ結果を用いて、それらの差 (掘削後-掘削前) を取ることによって比抵抗の変化の度合について検討した。その結果を図-4.2.7 に示す。

MT-1 孔の 11m 以深では掘削前より 10~30%高い比抵抗値を示し、MT-2 孔の 5~13m では掘削前に比較して 10~20%低い値を示した。坑道周縁部では 10%以上の変化は見られなかった。

坑道掘削前後で比抵抗の変化は一部において 10~20%程度の低下が見られたが、本手法においては測定・解析誤差が 20%程度含まれている可能性があることを考慮すると掘削前後で有意な差はないと判断できる。すなわち、今回実施した比抵抗トモグラフィ結果からは掘削影響領域は特定できなかった。

比抵抗値が上昇した領域については、その原因は明確にはわからないが、ボーリング孔の掘削による自由面の生成や地下水の流失の影響により岩盤の比抵抗が上昇した可能性があるかと推測することができる。

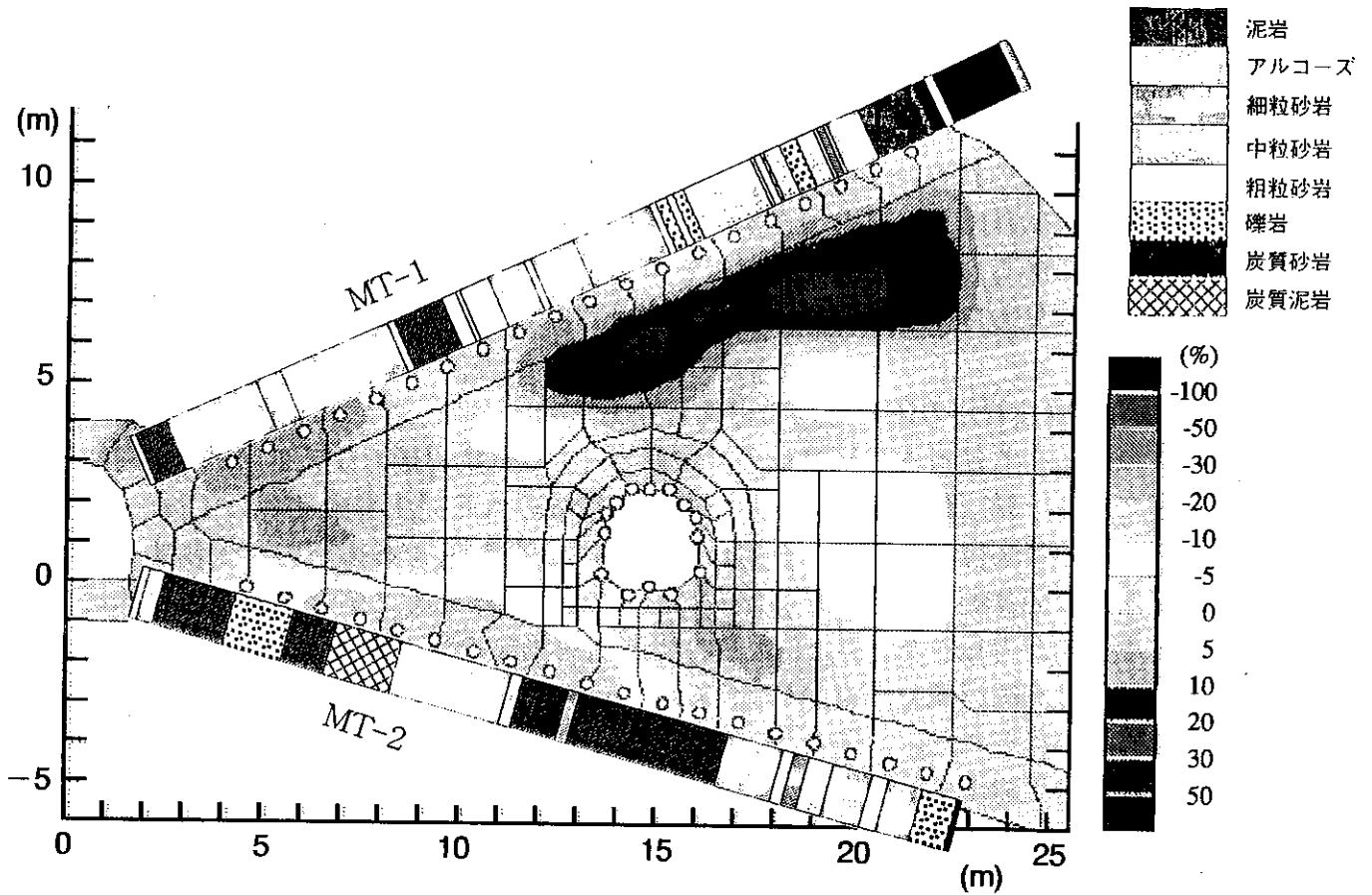


図-4.2.7 比抵抗トモグラフィ比較結果（掘削後－掘削前）

(5)まとめ

東濃鉱山北延 NATM 坑道において、坑道掘削前および掘削後に比抵抗トモグラフィ調査を実施し、掘削前後での比抵抗分布を調査し、掘削影響領域について検討した。

その結果、坑道掘削前後で有意な差はなく、今回実施した比抵抗トモグラフィ結果からは掘削影響領域は特定できなかった。

5. 総合評価

(1) 堆積性軟岩の地下水環境下での応力腐食割れの検討

動燃事業団、東濃鉱山の北延N A T M坑道の堆積性軟岩（土岐夾炭累層）コアを用いて、乾燥・湿潤状態における破壊靱性試験を行った。

その結果、堆積性軟岩の破壊靱性は $0.03\text{MPam}^{1/2}$ 程度であり、花崗岩や来待砂岩の値に比べて数十分の1程度で、非常に小さく脆い岩石であることが判明した。また、この堆積性軟岩は湿潤状態の方が乾燥状態に比べて破壊靱性がやや大きく、この傾向は花崗岩や来待砂岩の傾向と逆である。その原因として堆積性軟岩のスレーキングが考えられる。つまり、堆積性軟岩がもともと湿潤状態で存在していたが室内で乾燥させたところ、表面から微小き裂が成長し、かえって強度低下につながったと考えられる。

今回は試験結果のばらつきが大きかった。試験供試体数を増やし、データの蓄積が必要である。今後は使用した岩石コアである堆積性軟岩の鉱物分析などを行い、地下水成分も含めて応力腐食割れの定量評価を確認することが課題である。

(2) 堆積性軟岩の破壊過程でのA E発生挙動

東濃鉱山北延N A T M坑道の堆積軟岩（土岐夾炭累層）コアを用いて、周変位制御による一軸圧縮試験を実施し、破壊過程でのA E発生挙動について検討した。

A Eの活動度は応力ピーク値付近において活発で、その後応力が緩和するに伴ってA Eの発生頻度は低下する傾向になった。m値も同様に応力変化と調和的に変化する傾向が得られた。また、A Eの相対的周波数成分の変化では、ピーク応力前の段階では高周波成分が卓越し、ポストフェイリュアー領域では低周波成分が卓越した結果が得られた。

A E発生頻度の他に、m値、周波数成分の変化を追跡することにより岩石内部で起こっている破壊現象の予測がより高い信頼性をもって行える可能性が示唆された。

(3) 坑道掘削影響試験の事後調査（比抵抗トモグラフィ）

坑道掘削後の比抵抗分布は、試験坑道下部の3～10Ωmの低比抵抗域および試験坑道上部の20Ωm以上の局所的な高比抵抗域を除いてほぼ一様であり、その値は概ね10～15Ωmであった。また、試験坑道掘削前と掘削後のデータで掘削に伴う変化を比較すると、上述した局所的な低比抵抗域および高比抵抗域を除いて、概ね-5～+5%の変化率であった。

比抵抗の変化率に含まれる測定・解析誤差は最大15%程度と推定され、このことを考慮すると掘削前後の比抵抗の変化率は、有意な変化を示したとは言えない。

したがって、今回の機械掘削のような掘削影響が少ない断面での適用は、測定・解析誤差を数%以内に減少させない限り、比抵抗トモグラフィ調査だけで掘削影響の度合いを評価することは好ましくない。

また、比抵抗トモグラフィ調査結果から断面内の岩相を推定（細粒砂岩と粗粒砂岩の区別：室内における比抵抗測定値は、細粒砂岩で10～15Ωm、粗粒砂岩で15Ωm）することは、今回のように比抵抗値に大きな差のない岩相条件では難しいといえる。

今後の課題として、原位置における比抵抗トモグラフィ調査の適用に当たっては、測定・解析誤差をできるだけ減少させる技術の開発が望まれる。