

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年度および7年度共同研究報告書

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	TY1569 98-001	1998.5.25
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1996年3月

工業技術院 資源環境技術総合研究所

動力炉・核燃料開発事業団

資源環境技術総合研究所との共同研究
「掘削に伴う物性変化に関する評価手法の評価・検討」
平成6年度および7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	6
4. 1 資環研の研究成果	6
4. 1. 1 室内規模での比抵抗計測実験	6
4. 1. 2 原位置コアを用いた破壊挙動の計測について	8
4. 2 動燃事業団の研究成果	21
4. 2. 1 坑道掘削影響試験の事前調査（比抵抗トモグラフィ調査）	21
5. 総合評価	33
6. 今後の方針	34

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。また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。

さらに平成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年度の実施結果として「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。そこで平成7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過去の研究成果を踏まえ掘削影響評価手法についての評価・検討を行った。

ここでは平成6年度と平成7年の研究成果として、資環研が実施した

- ① 室内規模での比抵抗計測実験
 - ② 岩盤物性値の室内試験（原位置コアを用いた破壊挙動計測）
- と、動燃事業団が実施した
- ③ 坑道掘削影響試験の事前調査（比抵抗トモグラフィ調査）
- 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、東濃鉾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A Eの分布状況と岩盤の物性変化の関係を評価してきた。しかし、岩盤中でのA Eの減衰が激しく、A E発生地点の同定が困難であったため、物性変化とA Eの分布状況との関連は明らかにできなかった。このため、本共同研究ではA E計測以外の調査手法も対象とし、物性が変化する範囲を捉える手法の検討を行うこととした。

掘削に伴う物性変化を評価するための既存の調査手法として、トモグラフィ調査に注目した。トモグラフィ調査は、弾性波や電磁波等を用いて岩盤中を非破壊的に探査をし、2次元的な物性分布を可視化できるという特徴を有している。

掘削に伴う物性変化は、過去の掘削影響試験等の結果から主にき裂の発生、不飽和領域の発生、応力の再配分に伴って発生すると考えられている。これらの現象を捉えることで物性変化を評価できると考え、各種のトモグラフィ調査のうち、き裂分布の把握手法として弾性波トモグラフィ調査、不飽和領域の把握手法として比抵抗トモグラフィ調査について検討を進めることとした。

弾性波トモグラフィ調査は弾性波を発振させ、弾性波の伝播速度の分布を求める方法である。岩盤中にき裂があると、弾性波の伝播速度は低下する傾向がみられることから、弾性波トモグラフィ調査を岩盤中のき裂分布を把握できる可能性のある手法としてとりあげた。その結果、原位置調査及びアクリル板を用いた室内実験から、弾性波トモグラフィ調査は、き裂の発生による物性の変化を把握できる手法として有効であることが確認された。

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。そこで本研究では、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。

また、東濃地科学センター東濃鉦山の北延N A T M坑道において実施した掘削影響試験について、坑道掘削前の岩盤の物性を把握するための事前調査を実施した。そのうち、本研究では坑道掘削前の比抵抗トモグラフィ調査を実施して、周辺岩盤の比抵抗分布を把握し、既知の岩盤の比抵抗測定値から原位置の岩相を推定することを試みた。

A E計測は、不連続岩盤のA E発生挙動の研究において、A Eが不連続面近傍に集中して発生し徐々に不連続面から拡散する傾向が見られること、また、不連続面を起点にクラックが進展していくことが確認された。そこで本研究では東濃鉦山の北延N A T M坑道における坑道掘削位置近傍での岩石コアを用いて室内試験を行い、当該岩盤の岩石の基礎物性データと破壊特性を把握することとした。

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。

- ・室内規模での比抵抗計測実験により、計測手法の妥当性と精度の確認ならびに原位置計測への適用性の可能性について検討する。
- ・東濃鉦山北延N A T M坑道掘削予定位置周辺で採用した岩石コアを用いて室内試験を行い、当該岩盤を構成する岩石の基礎物性データと破壊特性を把握する。
- ・坑道掘削の地山状態に対する影響を評価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実施し、坑道掘削前の岩盤の比抵抗分布を把握する。

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 室内規模での比抵抗計測実験

モルタルブロックを用いて2極法による比抵抗トモグラフィ室内実験の基本事項における下記の基礎実験を行い、当計測方法の妥当性ならびに精度や適用可能性について検証する。

室内実験で採用した2極法は、半無限体を仮定して作られたものであり、当該モデルが有限体を使用する室内実験に適用できるかについては議論が残る。実験モデルの妥当性について、無垢のモルタルブロックと銅板を埋め込んだモルタルブロックとの比較及び周辺の境界条件を変化させたモデルで確認を行う。

予めモルタルブロックに埋め込んだ銅板を当該計測が検知するかどうか確認することを通じ、当該方法における測定精度の確認を行う。

② 岩盤物性値の室内試験（原位置コアを用いた破壊挙動計測）

東濃鉾山北延NATM坑道掘削予定位置近辺の試錐孔で採取した岩石コアを整形し、室内で一軸圧縮試験を行い、当該岩盤を構成する岩石の基礎物性データと破壊特性を把握する。具体的には推積軟岩のカイザー効果を確認することと、AE計測から得られるパラメータのm値（ここではAEの振幅と累積数の関係を表す指数）を用いて推積軟岩の破壊挙動の推定を試みる。

③ 坑道掘削影響試験の事前調査（比抵抗トモグラフィ調査）

東濃鉾山北延NATM坑道掘削予定位置を含む断面において、比抵抗トモグラフィ調査を実施した。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し、岩盤内の電位を計測した。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した。

上記①の室内試験結果をもとに、原位置における比抵抗トモグラフィ調査結果について検討を行う。

(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
室内試験での比抵抗計測実験	○	
岩盤物性値の室内試験（原位置コアを用いた破壊挙動計測）	○	
坑道掘削影響試験の事前調査（比抵抗トモグラフィ調査）		○
総合評価	○	○

平成7年度共同研究成果報告

4.研究成果

4.1資環研の研究成果

4.1.1 室内規模での比抵抗計測実験

(1) はじめに

本研究では比抵抗法により岩盤の物性変化等の把握を目的に研究開発を行い、平成4～5年度には非抵抗法による原位置試験を実施し、トンネル導坑掘削の進行に伴う比抵抗分布の変化について検討を行い、(1)トンネル導坑のほぼ全域にわたる比抵抗分布が計測域中に存在した破碎体、断層等に関連した水理状況をよく反映したものであること、(2)断層周辺での比抵抗分布の計測から、トンネル切羽周辺の局所的な変化も比抵抗分布によく反映されること、などが明らかになった。

しかし現場における適用可能性や精度を評価するためには本方法及び測定機器の基本的特性を把握しておく必要がある。そこで平成7年度は、本方法の精度及び分解能を評価するための室内実験を実施した。

(2) 実験方法

平成6年度は比抵抗法及び計測機器の精度及び分解能について検討するため、図4.1に示すような3つの試験片を作成し、これを対象に平成4～5年度に実施した原位置試験で使ったのと同じ機器を用いて室内実験を実施した。対象とした試験片は、いずれも一辺が300mmの立方体であるモルタル試験片である。このモルタル立方体に長さ約300mm、幅50mm、厚さ2mmの銅板を、上部が立方体上面にほぼ接するように、一方の試験片では同図(a)に示すように中央に垂直に、もう一方は同図(b)に示すように45度の傾斜で埋め込んだ。また、試験片上面には直径1mmの電極を10mm間隔で27本、銅板と垂直になるように一直線に並べて埋め込み、これら27本の電極を交互に電流源電極、電位測定電極に用いて測定を行った。これらと対照するために銅板を埋めずに電極のみを設置した試験片をも用意し、実験を行った。

実験装置の概要を図4.2に示す。計測には応用地質社製McOHM21model2116型比抵抗測定器及び同社製2207A型スキャナーを使用した。比抵抗測定器の受信部の入力インピーダンスは5MΩ以上、最小電圧感度は6μVである。

本研究では二極法を用いて試験片中央断面を対象に計測を行った。計測は4回行い、その平均値を採用した。定電源電流は5mAとし、電圧は図4.3のような交替直流波形を用いて計測を行った。遠電極は試験片上面の隅に設置した。

二極法においては、電位測定電極と電流源電極との間隔がrの場合、見かけの比抵抗の値 $\rho(r)$ は

$$\rho(r)=2\pi rV/I$$

で表される。ここでVは電位、Iは電流を示す。対象地盤が均質等方な場合には、見かけの比抵抗の値 $\rho(r)$ はそのまま実際の比抵抗の値を示すものの、対象地盤が不均質な場合に

は、見かけの比抵抗の値は必ずしも真の比抵抗値を表さない。このため、種々のモデルを想定した解析により比抵抗分布を求める手法がとられることが多い。本研究では地盤が水平方向に10層に分かれる二次元モデルを想定し、試験片内部の比抵抗の分布を求めた。

(3) 結果

測定結果を図4.4に示す。図4.1(a)に示した銅板が垂直に埋め込まれた試験片に対しては、図4.4(a)のように中央上部に帯状に値の小さい領域が広がる見かけ比抵抗の分布が、また図4.1(b)に示した銅板が45度の傾斜で埋め込まれた試験片に対しては、図4.4(b)のように中央上部に斜めに値の小さい領域が確認される見かけ比抵抗の分布が得られた。また、銅板が存在しない試験片では同図(c)に示すように値の小さい領域は認められなかった。

これをもとに前章に示した二次元モデルの解析を行った結果、図4.1(a)に示した銅板が垂直に埋め込まれた試験片に対しては図4.4(a)のように、また図4.1(b)に示した銅板が45度の傾斜で埋め込まれた試験片に対しては同図(b)、無垢の試験片については同図(c)のような結果が得られた。

幅及び深さが無限大の導電体を、周囲の比抵抗が一定の地中に垂直に埋めた場合、見かけ比抵抗断面は導電体の周囲で低く、中心では逆に周辺と同様の極大値が得られることが知られている。また、傾斜のある場合には左右が非対象になることが知られている。有限体を用いた今回の実験では端面の影響もあり上下で比抵抗値がかなり異なることから理論値通りにはならないが、銅板に相当する断面で低い見かけ比抵抗値が得られていることがわかる。

また、二次元モデル解析では、垂直銅板の試験片の計測では、図4.1(a)では水平方向では丁度中央に比抵抗値の低い領域が見られ、また垂直方向でもメッシュの一辺の長さが20mmであることから、銅板の深さ50mmにほぼ相当する3メッシュ分60mmまで比抵抗値の小さい領域が得られていることがわかる。

また、45度傾斜の銅板の試験片の計測では、図4.4(b)ではメッシュが20mmであることから深さ35mmにほぼ相当する2メッシュ分の40mm程度まで比抵抗値の小さい領域が斜めに分布しており、いずれも予め埋め込んだ銅板の位置に概ね一致した精度よい結果が得られていると見ることができる。

(4) まとめ

比抵抗法及び当該測定機器の現位置における適用可能性や精度を評価するため、室内実験を実施した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- (1)水平方向の誤差はかなり小さく、垂直方向についても銅板の深さが精度よく求められること。
- (2)低比抵抗体として用いた銅板がある供試体とない場合では明らかに有意な差が見られること。
- (3)銅板が45度傾斜と垂直の場合では有意な差が得られ、位置だけでなく形状が比抵抗法及び当該機器で計測可能であること。

4.1.2 原位置コアを用いた破壊挙動の計測について

(1) はじめに

地下空間の安定性を確保し、健全性評価を行うためには構成材料である岩石、岩盤の破壊挙動について検討を行うことが必要である。岩石については岩石特有の複雑な破壊機構を有することから、従来から様々な検討がなされてきた。また、火成岩と堆積岩ではもちろん、同じ堆積岩でも岩種によってこの性質は微妙に異なることが知られているが、軟岩は手法の難しさもあって他よりも検討例が少ない。

本研究では、原位置から採取した泥岩、礫岩、砂岩のコアを対象に一軸圧縮試験において得られるAE(アコースティック・エミッション)を計測し、これから得られるパラメータを用いて軟岩の破壊挙動について推定を行った。

(2) 実験方法とAE計測方法

実験では、整形した泥岩、礫岩、砂岩の3種類のコアの一軸圧縮破壊試験を行い、その際に岩石内で発生するAEを計測した。一軸圧縮破壊試験は変位速度一定の条件で実施したが、その速度は $75 \mu\text{m}/\text{min}$ とした。載荷開始から最大強度に達するまでの時間は5分から10分であった。

AE計測に用いた計測システムは、PAC製のMISTRAS-2001で、センサーはPAC製のnano-30を使用した。使用したセンサーの共振周波数は300kHzである。センサーからの信号は、プリアンプで40 dB増幅後AE計測システムに送られ記録された。

(3) 実験結果

まず、泥岩を用いてカイザー効果の出現に関する基礎的な実験を行った。カイザー効果とは、一度応力履歴を受けた岩石に載荷を行うと、それ以前に受けた最大応力を越えるまで顕著なAE発生が認められないという現象で、これを利用して地下応力の計測が近年試みられている。しかし、このカイザー効果を利用した地下応力計測の例は硬岩がほとんどで、軟岩に応用された例は少ない。その理由は、軟岩が硬岩に較べて劣化しやすいために、地圧情報を記憶しにくいと考えられているためである。

図4.6は、泥岩のカイザー効果に関する実験結果であるが、上図が1回目の載荷時のAE計測結果、下図が2回目の載荷時の結果である。1回目と2回目の載荷の時間差は約3分であるので、経過時間の影響はないと考えられる。図4.6に示されるように、2回目載荷時のAE挙動は、矢印で示された先行応力レベルを越えるあたりから急増している。つまり、経過時間が短い場合には、泥岩のような軟岩においても明瞭なカイザー効果が観察されることが確認できた。

次に、泥岩の破壊進行に伴うm値の変化を図4.7に示す。m値とは、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次式中の指数である。

$$n(A)dA = kA \cdot m dA \quad (1)$$

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値の変化は、最大強度点に達する直前まで増加傾向を示した後、破壊直前で減少する。また、ポストフェイリユアー領域に入ると再びm値は増加するが、急激な応力低下を伴うき裂形成

の直前に減少する傾向を示した。その後、応力が徐々に緩和するに伴って、一旦増加したm値も減少する。つまり、m値は急激な応力低下を伴う規模の大きい破断面の形成直前で一旦減少するが、その前段の微小き裂の形成、蓄積過程では増加することが示された。

図4.8は、礫岩の破壊過程でのAE発生挙動を示している。AE活動は、応力が最大強度点に達するまでは静穏であるが、最大強度点以降の、いわゆるポストフェイリュア一域では活発にAEが発生し、かつ大規模なAEの発生が認められる。m値の変化では、最大強度点に近づくに伴って急激に減少し、最大強度点以降は若干回復後ほぼ一定の値を維持している。礫岩の変形挙動は泥岩や後に述べる砂岩に比較すると延性的であったが、それは、礫岩の場合微小破壊の発生そして集積というステップが応力載荷直後に短時間で発生し、局所的な破断面上で滑りがゆっくりと進行した結果であることが、試験片の観察から認められている。最大強度点前の応力増加に伴うm値の減少傾向は、局所的な破断面の形成とその破断面上で発生している滑りに伴う破壊の発生を反映していると考えられる。最大強度点以降は、その破断面を起点として新たな微小破壊の発生、集積が行われるためにm値は増加する傾向を示す。

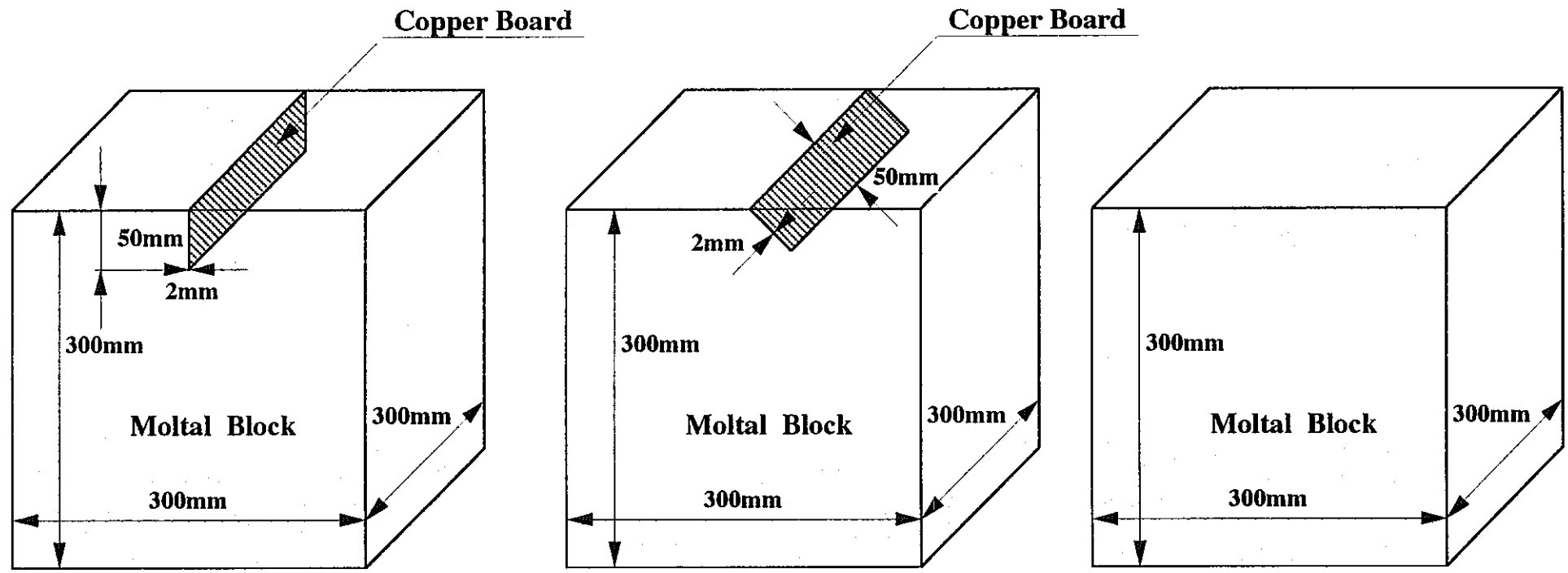
図4.9は、砂岩の破壊過程におけるAE発生挙動を示している。AEは最終強度点に達するまではほぼ一定の頻度で発生しており、破壊は脆性的に急激に発生した。破壊発生前のm値の変化では、載荷直後から応力の増加に合わせて増加して破壊発生応力の約80%程度の応力時に一旦減少するが、その後増加傾向を示して破壊直前に再び減少している。

(4) まとめ

泥岩、礫岩、砂岩の3種類のコアを用いて一軸圧縮破壊試験時のAEを計測した結果、次のことが明らかになった。

- 1) 泥岩を用いたカイザー効果の検討によって、先行応力を受けてから試験までの経過時間が短い場合には、軟岩においても明瞭なカイザー効果が認められる。
- 2) 泥岩のAE挙動におけるm値の変化では、最大強度点の直前や急激な応力低下の発生する直前でのm値の減少と、最大強度点以降のm値の緩やかな増加傾向が特徴的であった。
- 3) 礫岩では、載荷直後の低い応力レベルの段階からm値の減少が始まり、最大強度点以降では一旦増加した後ほぼ一定の値を維持する。
- 4) 砂岩では、破壊が脆性的であったためにポストフェイリュア一域での変化は明らかではないが、泥岩と同様に最大強度点直前でのm値の減少が特徴的であった。

最後に、本実験はすべて乾燥条件下で実施されたが、飽和条件下でのAE挙動はこれとは異なることが予想される。今後、飽和条件下での検討が必要と考えている。また、ポストフェイリュア一域のAE挙動は緩み域形成過程のAE発生挙動を理解するうえで重要と考えられるので、周歪み制御による試験によってその領域でのAEデータを蓄積する予定である。



(a) 銅板が底面に垂直な試験片

(b) 銅板と底面のなす角が45度の試験片

(c) 銅板のない試験片

図4.1 試験片の形状

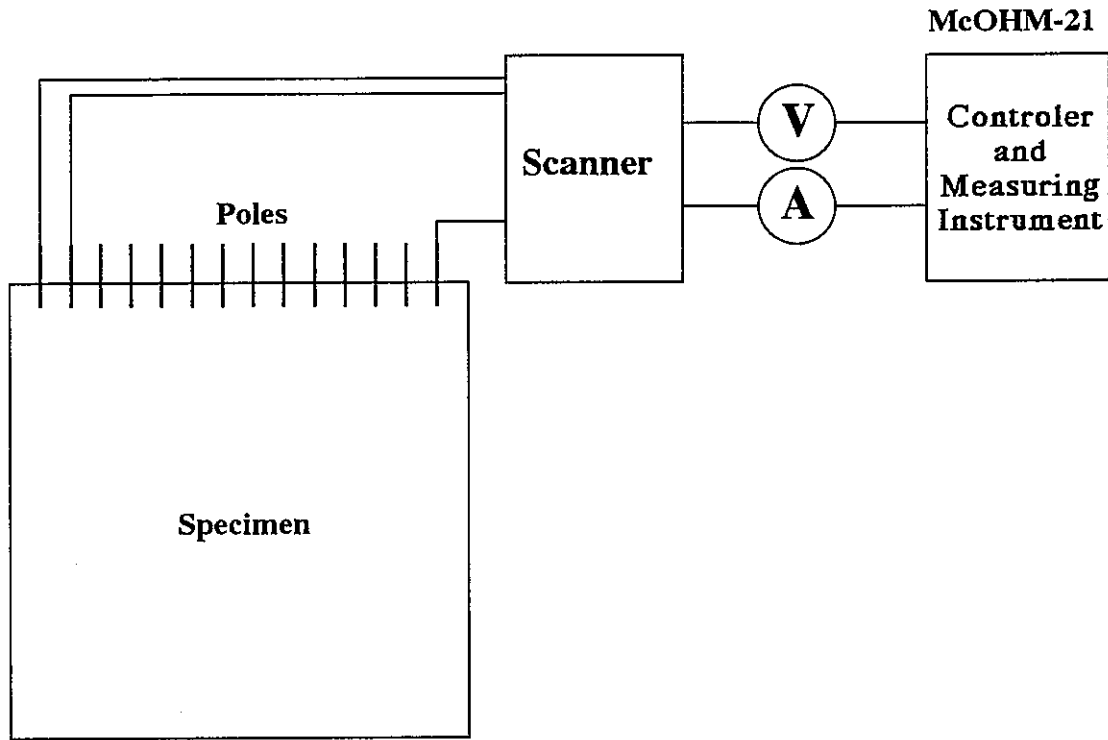


図4.2 実験装置の概要

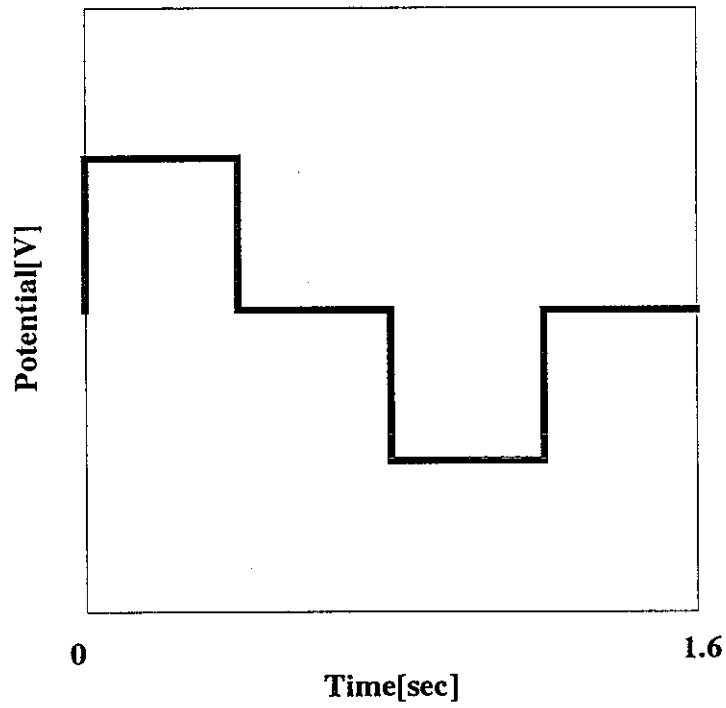


図4.3 波形モード

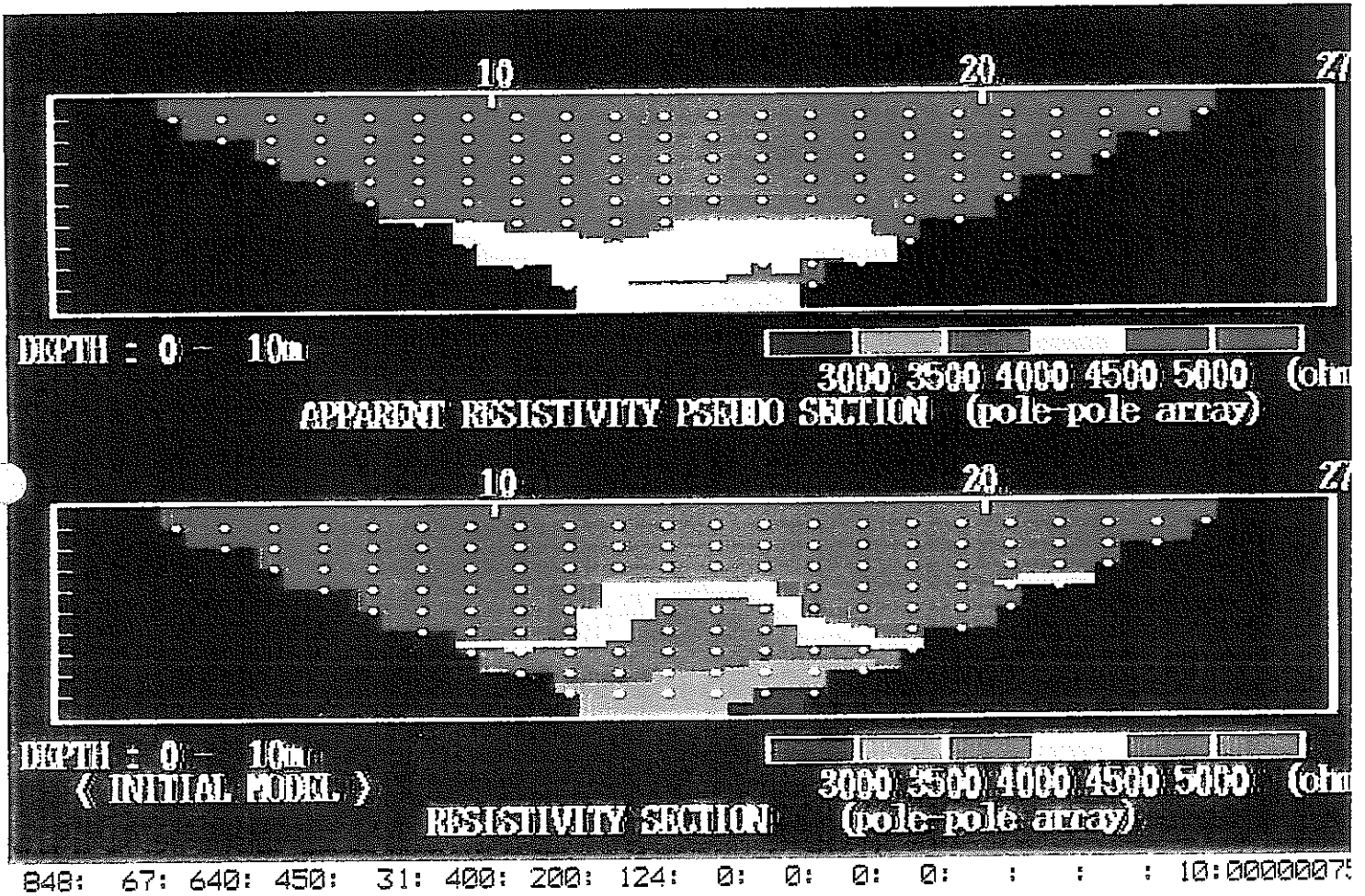


図4.4(c)銅板のない試験片

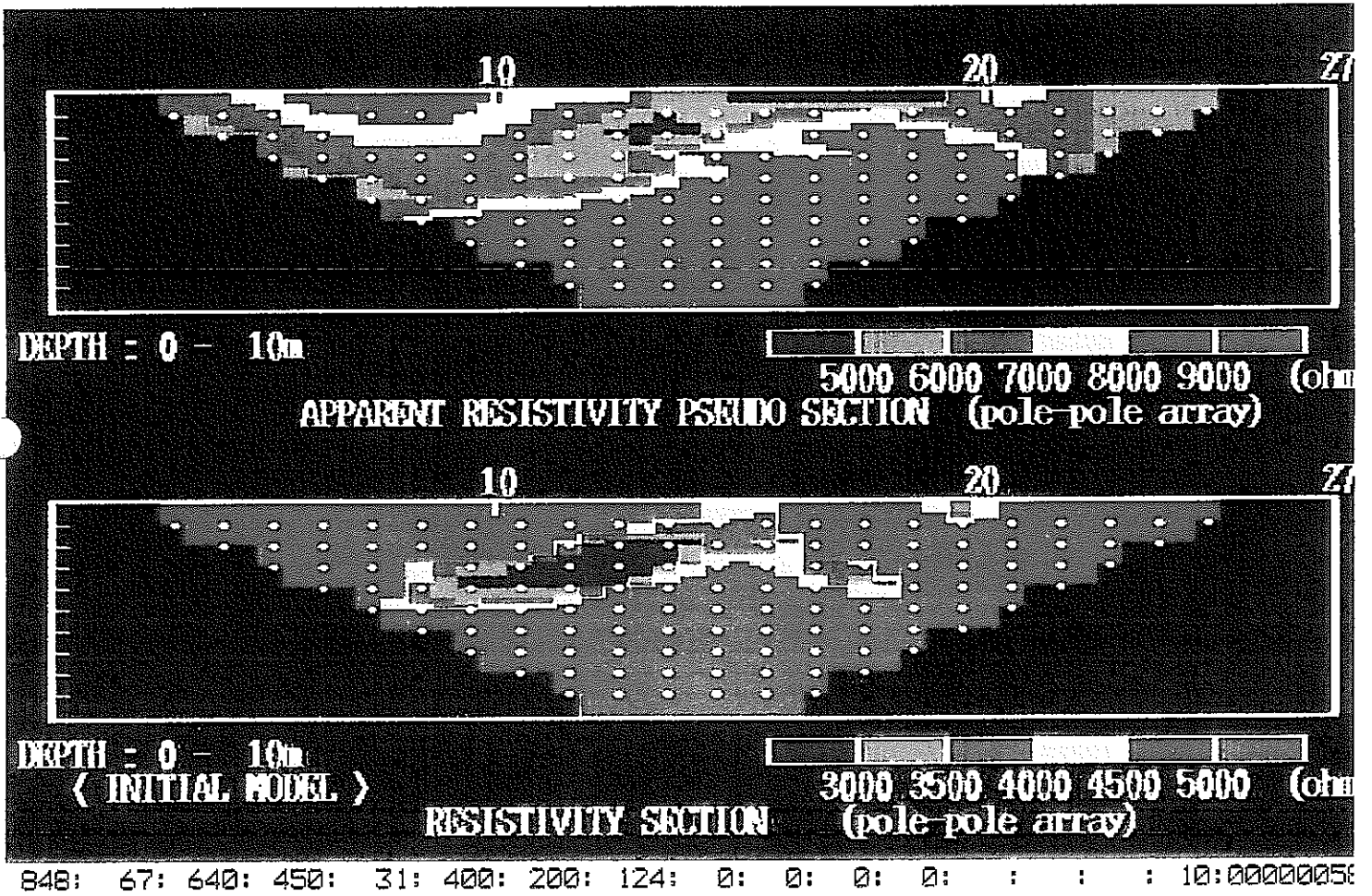


図4.4(b)銅板と底面のなす角が45度の試験片

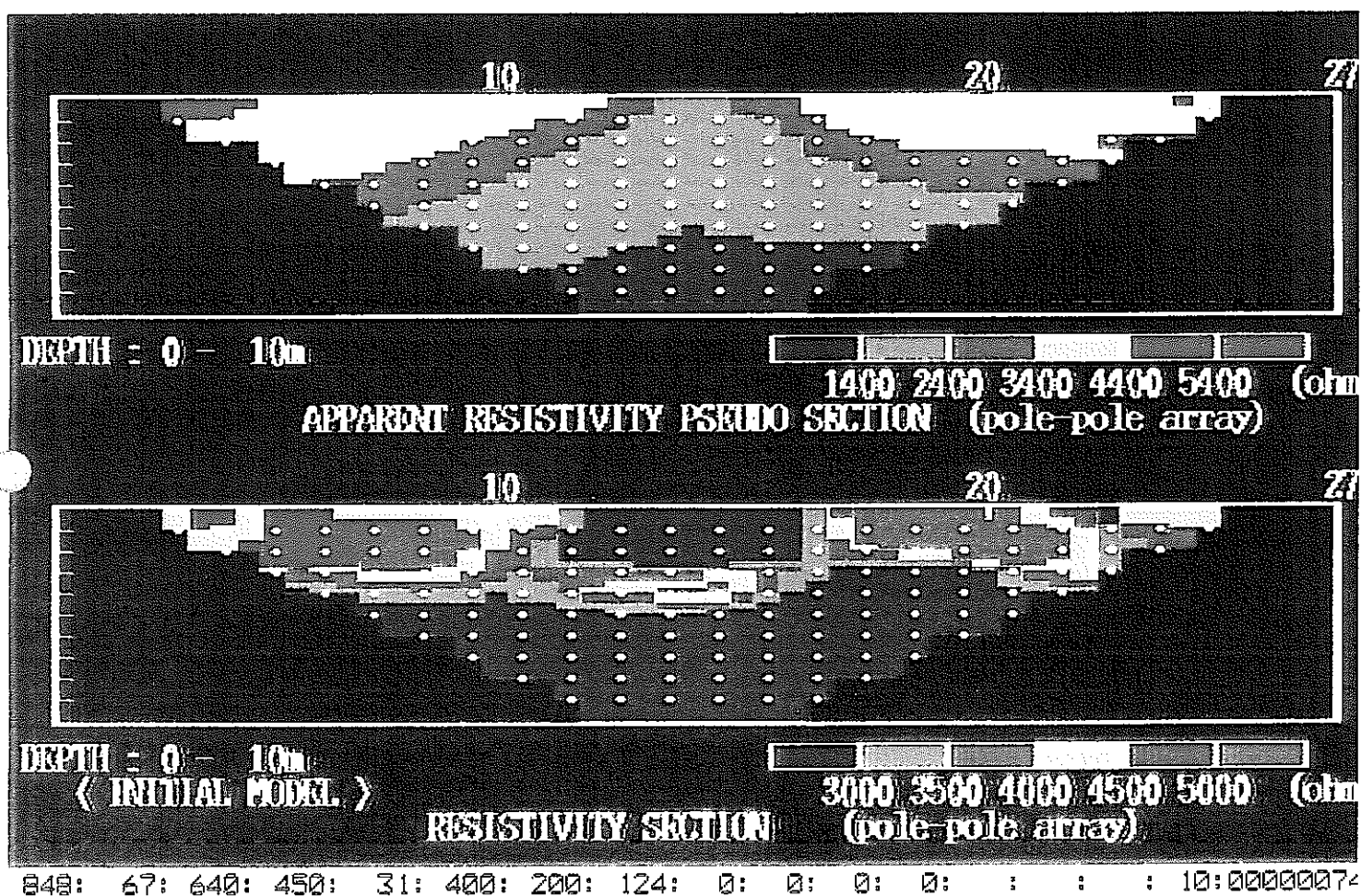


図4.4(a)銅板が底面に垂直な試験片

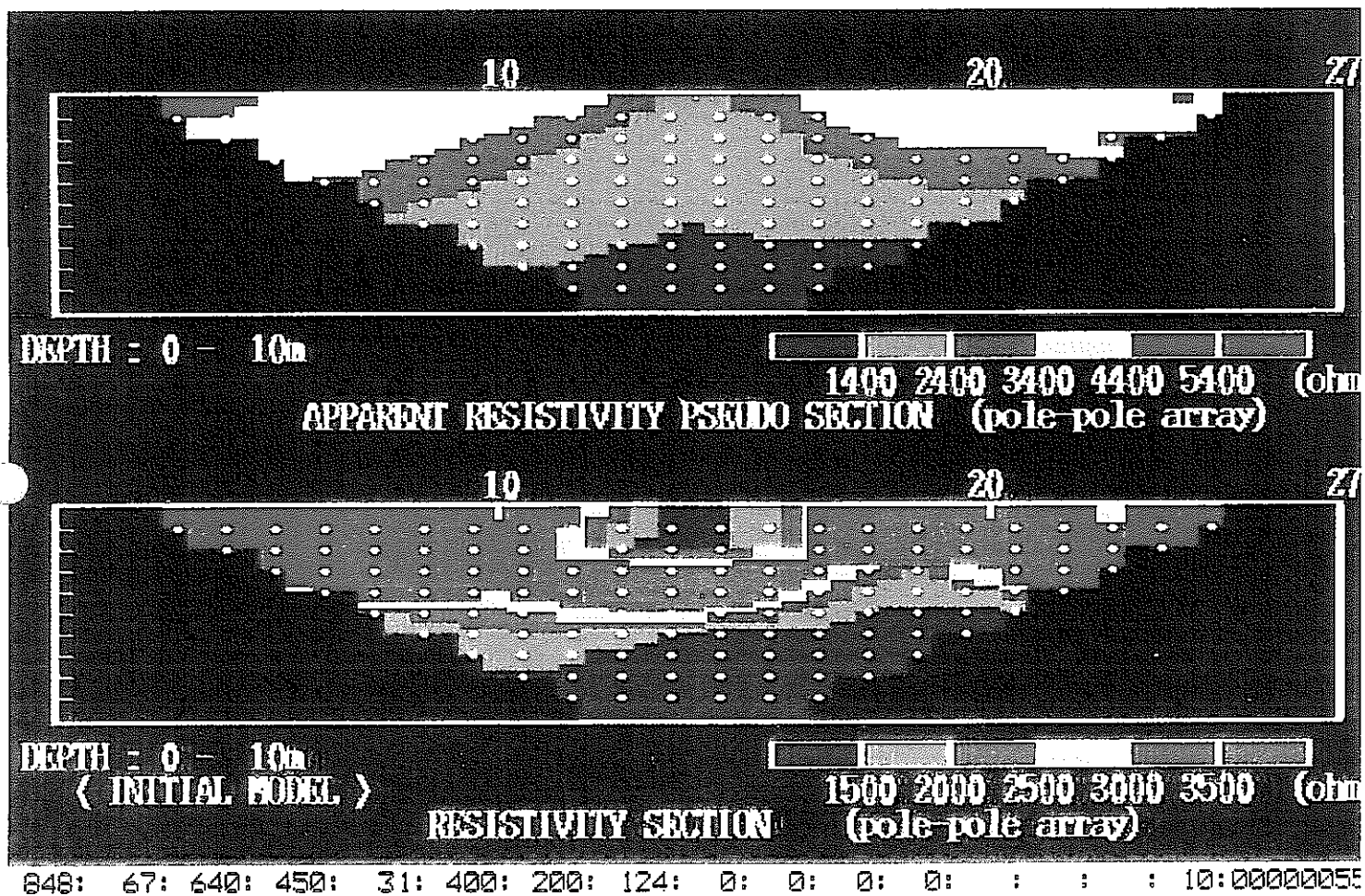


図4.4(d)銅板が底面に垂直な試験片

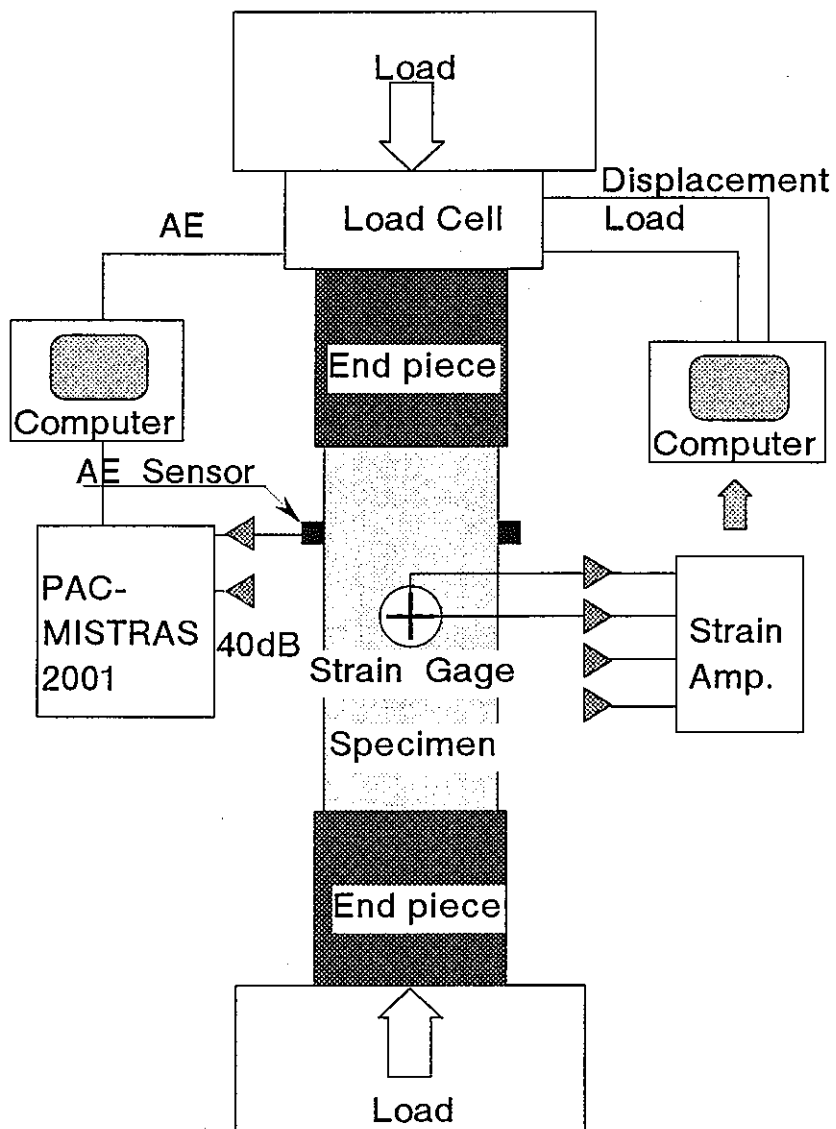


図4.5 実験装置の概要

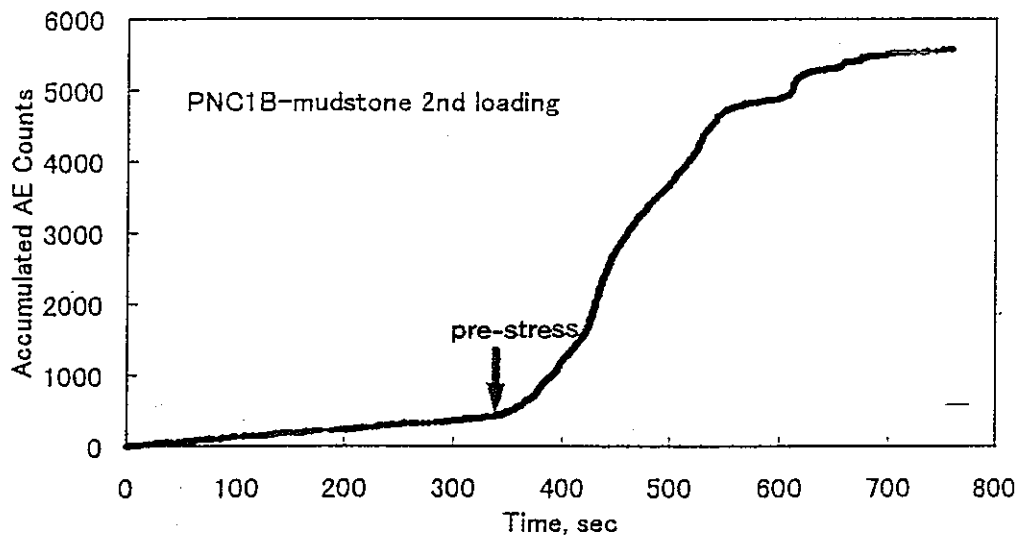
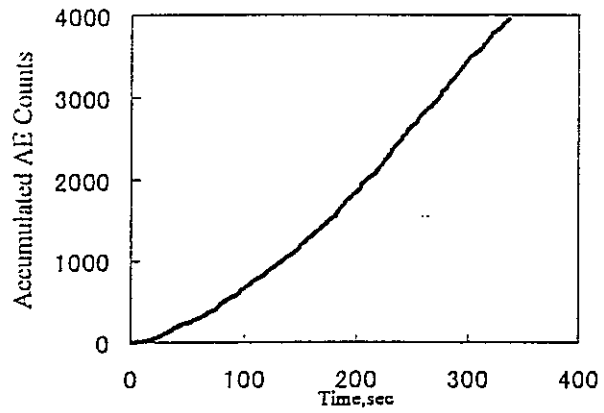


図4.6 泥岩におけるカイザー効果の確認

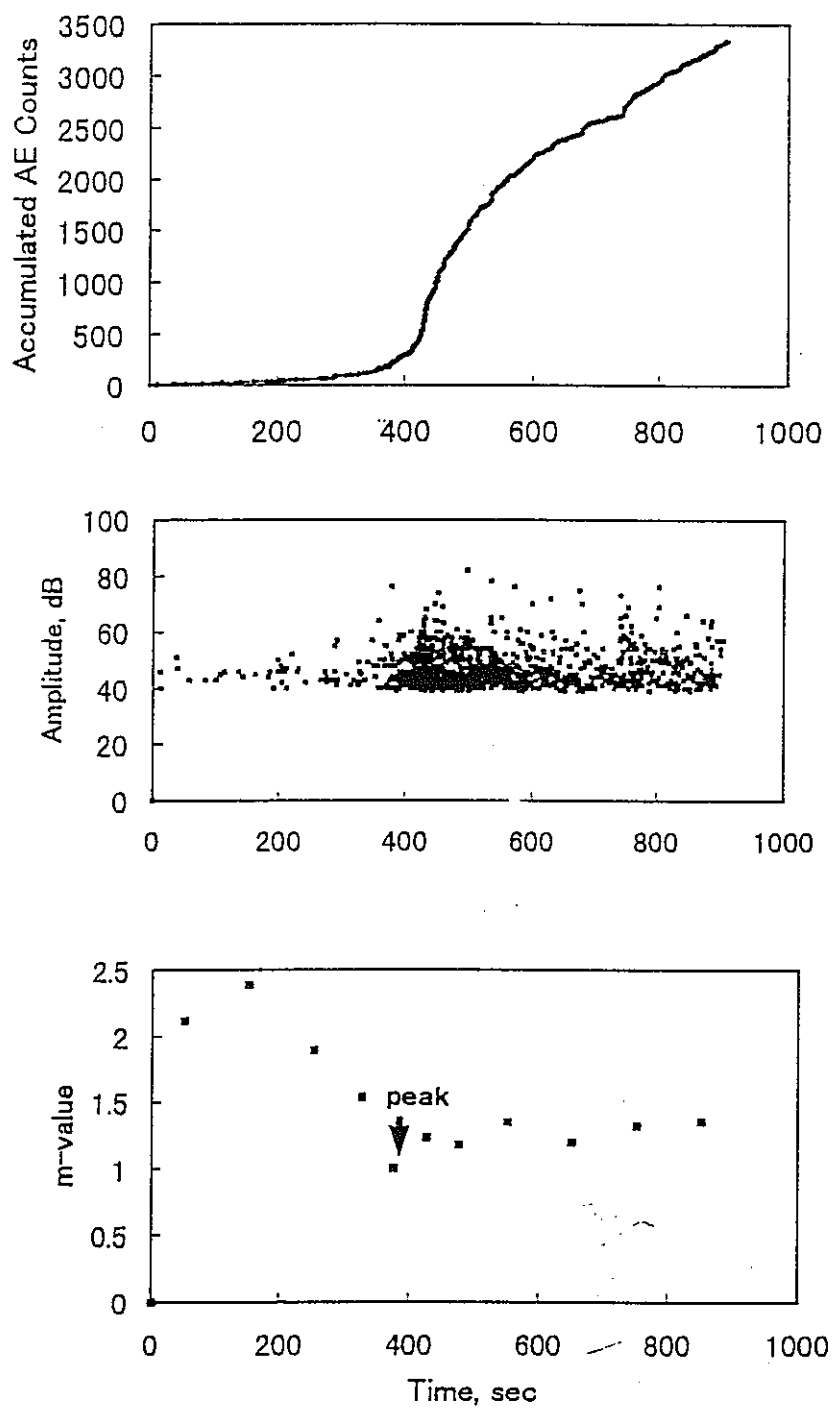


図4.7 泥岩におけるAE発生特性

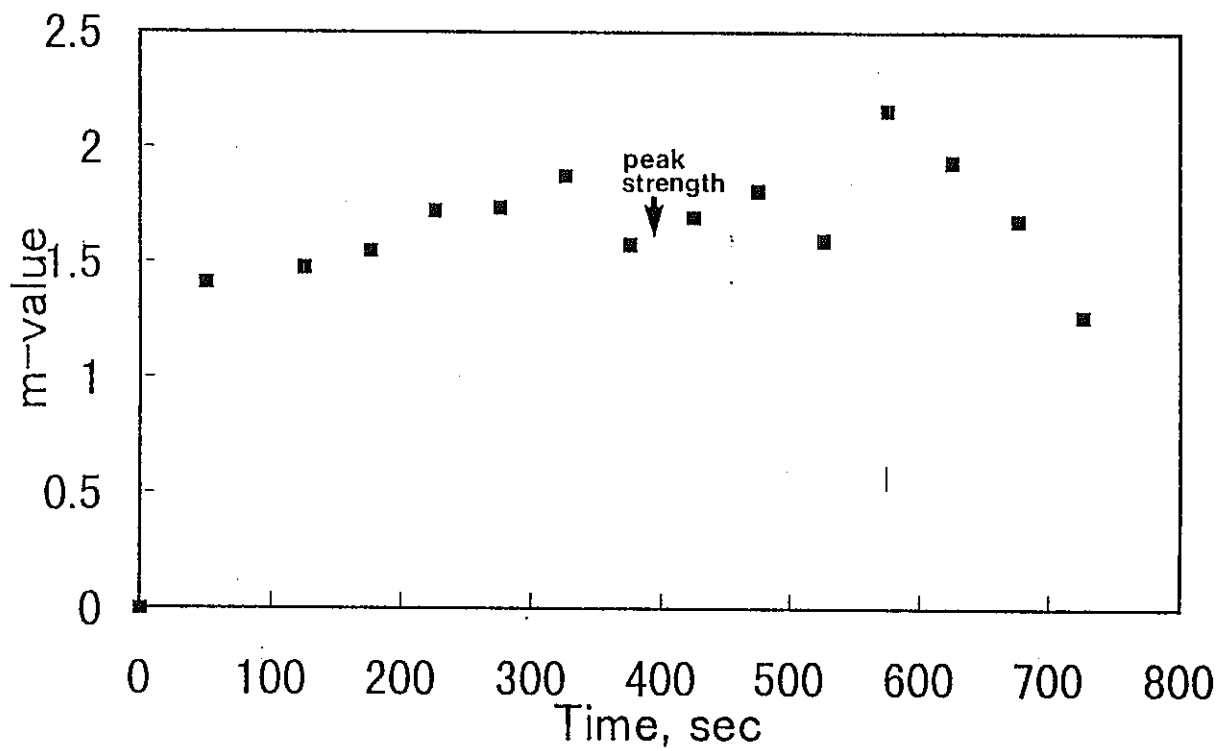


図4.8 礫岩におけるAE発生特性

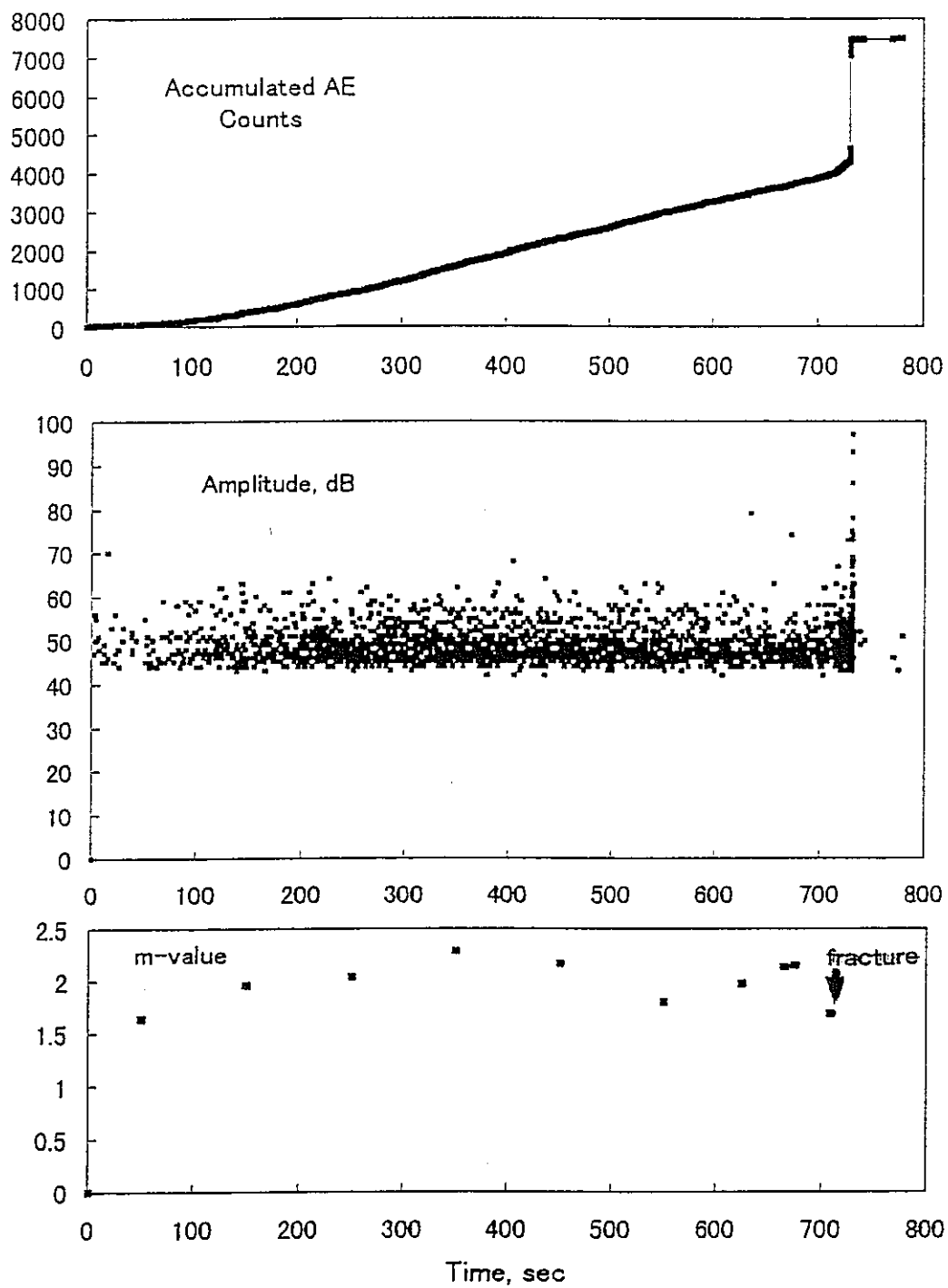


図4.9 砂岩におけるAE発生特性

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前調査（比抵抗トモグラフィ調査）

(1) 概要

本調査の目的は、平成7年度に掘削した坑道（以下、試験坑道という）を含む断面において坑道掘削前後に比抵抗トモグラフィ調査を実施し、その断面内の比抵抗分布の坑道掘削前後の変化より掘削影響領域を把握することである。平成5年度に、この一環として坑道掘削前の岩盤内の比抵抗分布を調査した。この結果の評価に際し、平成6年度、平成7年度に実施した比抵抗トモグラフィの室内試験結果を反映させ原位置比抵抗トモグラフィ調査結果を見直した。

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内の比抵抗分布を再構成し、これを可視化する技術である。調査は電位測定と解析の2段階に大別される。

(2) 調査方法

(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掘削された計測用ボーリング孔（MT-1孔、MT-2孔：弾性波トモグラフィ調査と同一孔）を用いて実施した。これらのボーリング孔で挟まれた調査の対象となる断面（以下、調査断面という）のほぼ中央に試験坑道が位置する。ただし、MT-1孔の深度22～23m付近において孔壁の崩壊が激しく測定装置を設置できなかったため、MT-1孔での計測は孔口～22mの範囲で行った。

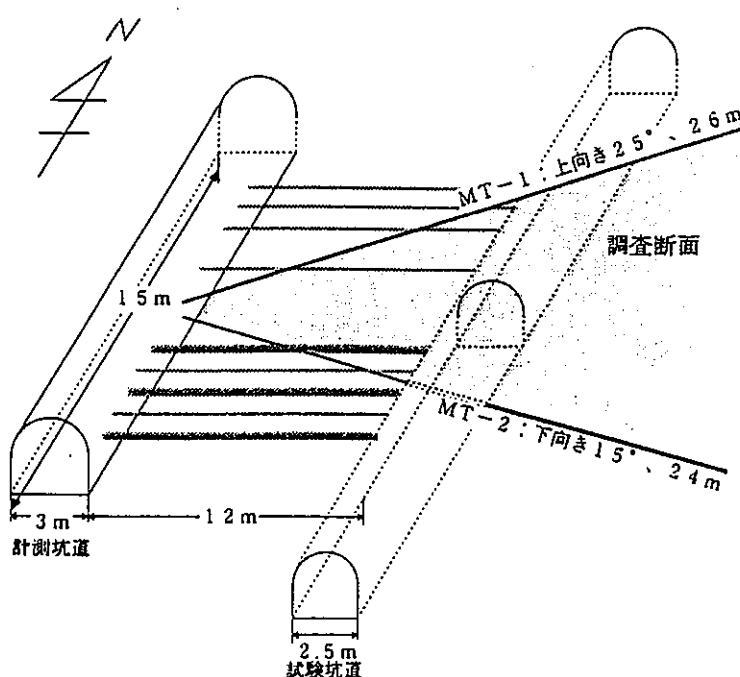


図4.2.1 調査位置概要

(b) 測定方法

電流電極・電位電極は図4.2.2に示すように調査断面を囲むように配置した。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、電位電極も岩盤と電極との接触がよくなり、精度のよい観測電位を得ることができる。このような理由から、MT-1孔、MT-2孔は孔内に水を満たしてから測定を行った。

計測坑道は空洞であり電気を通さないため、電気的には比抵抗が無限大の領域である。一方、ロックボルトやレールなどの金属は電気を通しやすい。これらが解析結果に影響を与える可能性が考えられたため、その影響を評価するために上記の調査孔内での測定に加えて図4.2.3に示すように計測坑道周縁での比抵抗測定を実施した。調査孔内および計測坑道周縁の比抵抗測定は2極法により行った。2極法では調査区域から十分に離れた場所に遠電極を必要とするため、これらを地表に設置した。

測定は順次電極の組合せを換えることにより行った。電極の組合せは予めプログラムして自動計測とし、測定データはフロッピーディスクに記録した。測定された電位波形には迷走電流による乱れや電極の接地不良による異常はみられなかった。

測定に使用した機器の一覧表を表4.2.1に示す。

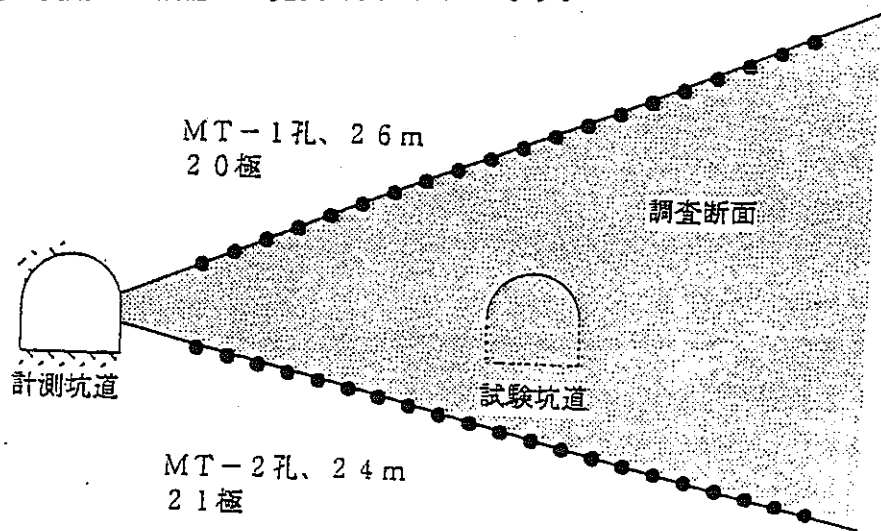


図4.2.2 調査孔内の電極配置

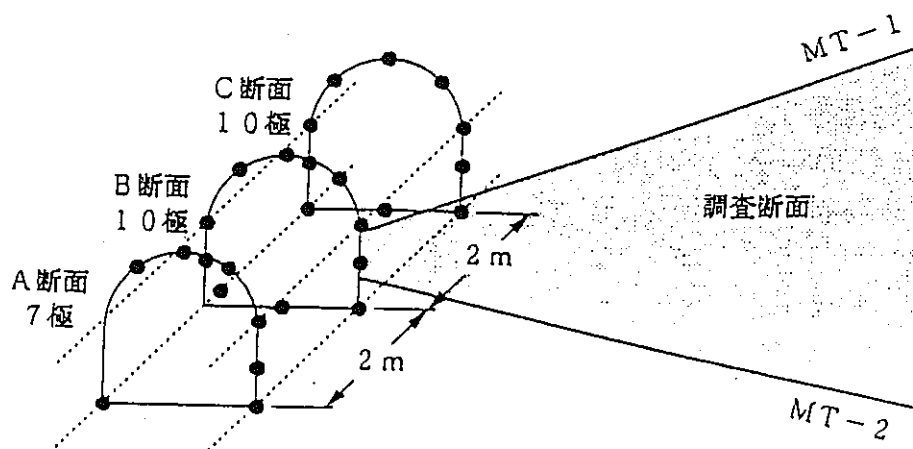


図4.2.3 計測坑道周縁の電極配置

表 4.2.1 比抵抗トモグラフィ測定使用機材一覧表

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 スキャン回数: 任意	1
	電極切換器 (スイッチ)	McOHM Model-1207	応用地質 株式会社	制御電極数: 32	3
電極	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			鉄クギ、L=100mm	35本
ケーブル	多芯中継 ケーブル			16芯 0.3mm ² /芯 長さ 20m 10m	3本
	単芯ケーブル 遠電極用			1.25mm ² , 0.75mm ²	1km
その他	安定化電源 (12V20A)、コネクターボックス、 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 コンピューター	PC98RA	日本電気	32bit メモリー1MB 数値演算プロセッサ	1式
	解析用 コンピューター	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 メモリー64MB	1式
	作図出力	Pixel Dio	キャノン	カラーレーザーコピー IPU、PS/IPU	1式

(c) 解析方法

1) 解析モデルの作成

電流は岩盤内の広い範囲を3次元的に流れるため、解析範囲は調査断面に対して十分に大きくする必要がある。通常は解析断面は調査断面の5倍程度の大きさにするのが一般的である。したがって、解析断面は図4.2.4aに示すように2本の調査孔(MT-1孔、MT-2孔)で挟まれた調査断面をほぼ中央に含むような、縦85m、横100mの矩形領域とした。調査範囲を最も詳細に要素分割し、総要素数は4075、総節点数は2086である。

要素分割を細かくすると電位計算精度が向上するが、計算に要する時間が長くなり、また測定データが少ないと解析精度が低下する可能性がある。そこで、隣接した数個の要素群は同じ比抵抗特性を持つブロックと仮定した。ブロック数は一般的に測定データ数の約半分とするのが望ましいといわれているため、今回は測定電位データ数820に対して約半分の399ブロックとした(図4.2.4b参照)。これにより、未知数の数(ブロック数)は測定データ数に見合った量となり、また、詳細な要素分割により精度の良い電位計算が可能になった。

2) 遠電極補正

遠電極は理論上は無窮遠方であるが、実際に地表に設置した距離は有限である。そのため、この距離を考慮して測定データを補正する必要がある。これを、遠電極補正¹⁾という。今回の解析では、測定電位データにこの遠電極補正を施した値を用いた。

3) 比抵抗分布の再構成

解析断面の構造データおよび電位データを用いて次のような逆解析を行い、調査断面内の比抵抗分布を求めた。仮定したある比抵抗分布に従い電位計算を行い、各電極において測定されるべき理論電位を計算した。この理論電位と実際に測定された電位との差の2乗平均(以下、RMS残差という)が最小となるように逐次比抵抗分布の修正を行った。

今回の解析においては、繰返し計算の回数は10回とした。10回目における繰返し計算毎のRMS残差の減少はみられなかったため、十分に収束していると判断された。

(d) 解析ケース

前述の解析モデル(ブロック数399)と電位データ(測定数820)を用いて解析を実施した。解析は、調査孔(MT-1孔、MT-2孔)間のデータのみ(図4.2.2参照)を用いた場合と、計測坑道やロックボルト、レールなどが解析結果に与える影響を評価するために孔間データに加えて、計測坑道周縁での測定データ(図4.2.3参照)を用いた場合の2ケースについて実施した。

ケース1 : 調査孔間データのみ

ケース2 : 調査孔間データおよび計測坑道周縁データ

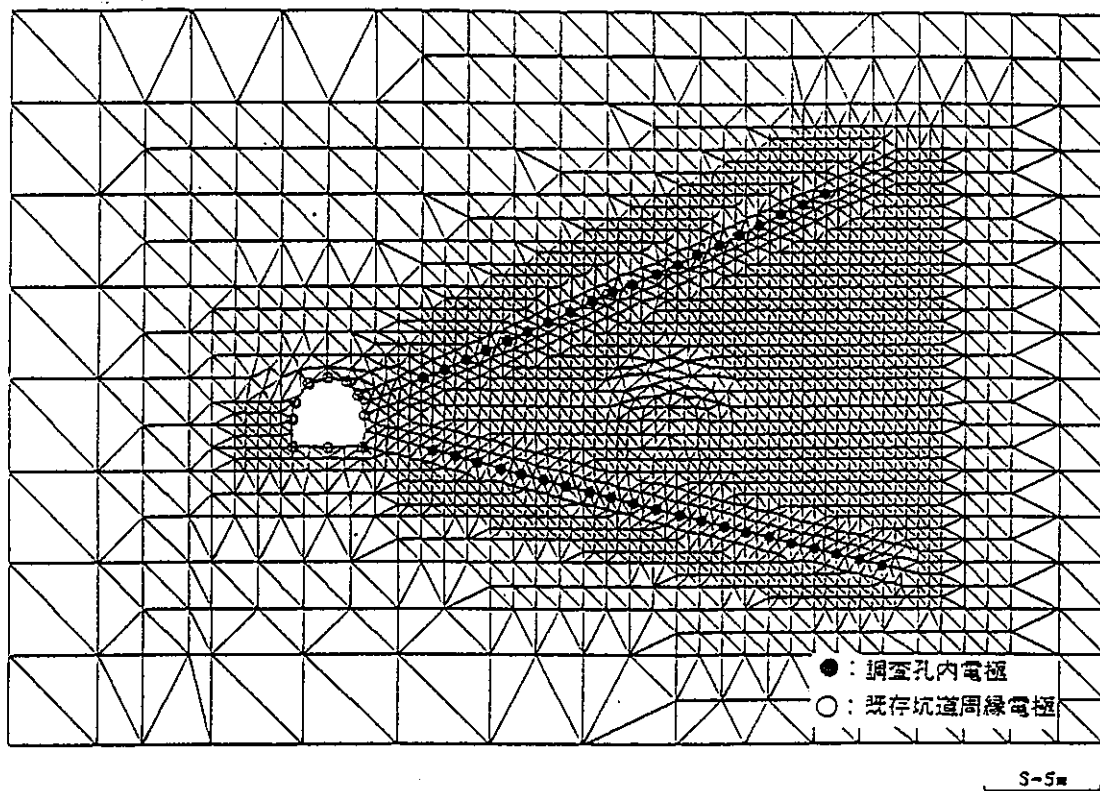


図 4.2.4a 解析メッシュ図（調査断面近傍の拡大図）

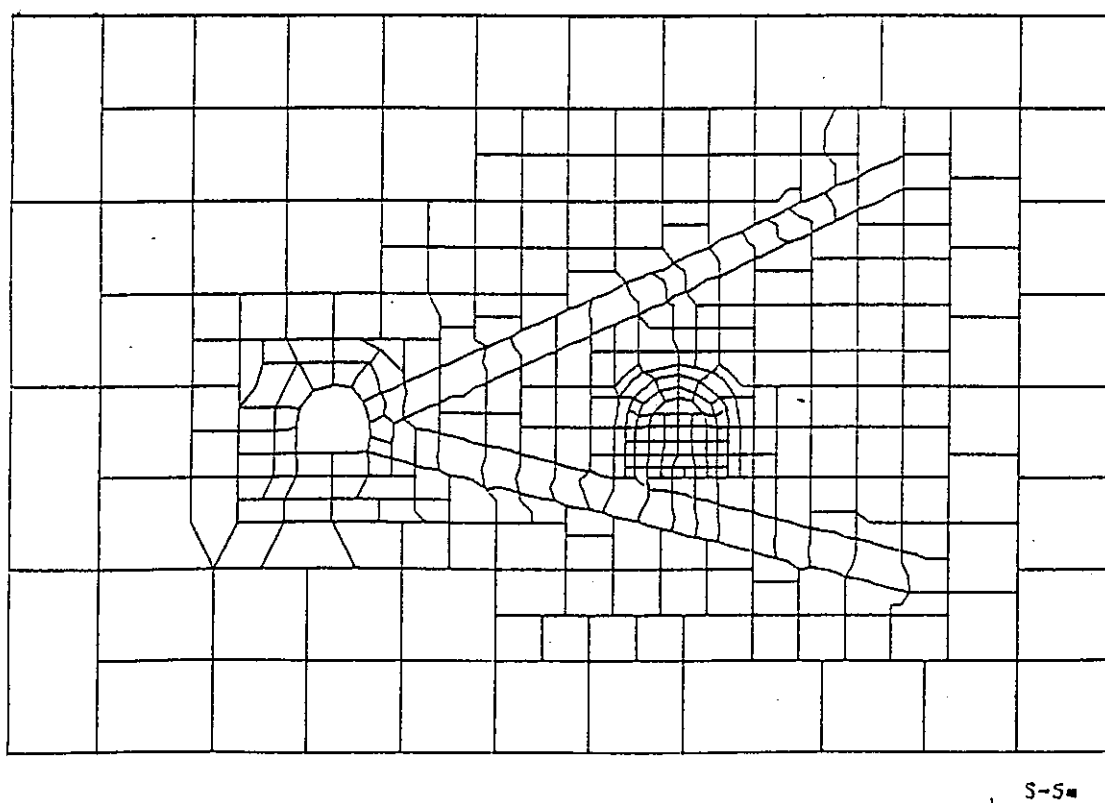


図 4.2.4b ブロック区分図（調査断面近傍の拡大図）

(3) 結果

図4.2.5に、各ケースの繰返し計算10回目における比抵抗分布図を示す。図4.2.6は、各ケースの繰返し計算毎のRMS残差および電位残差の絶対値の最大値（以下、最大残差）の収束状況を示したものである。図4.2.7と4.2.8に、各ケースの測定電位と計算電位の比較図、測定電位と計算電位の残差のヒストグラムを示す。

(a) ケース1（孔間データのみ）

図4.2.5aの繰返し計算10回目における比抵抗分布図において、調査断面内の全体的な比抵抗分布は一様に10~15 Ω m程度の値を示している。ただし、MT-1孔付近では全体的に10 Ω m以上、MT-2孔付近では10 Ω m以下の部分がみられる。

図4.2.6のRMS残差および最大残差の収束状況において、両者は繰返し計算回数の増加とともに単調に減少し、10回目において十分に収束している。ただし、測定された比抵抗値が2オーダーの幅を持つため、値の大きさにかかわらず均等に重み付けするために、残差は電位残差を測定電位値で除して正規化し、%で表示している。

図4.2.7aの測定電位と計算電位の比較では、プロットは概ね傾き1の直線上に分布しており、直線に対する全体的なばらつきは平均的に分散している。

図4.2.8aの測定電位と計算電位の残差のヒストグラムにおいて、残差は全データ820個のうち58%に当たる474個が $\pm 10\%$ 以内（標準偏差11.74%）に分布している。

(b) ケース2（孔間データおよび計測坑道周縁データ）

図4.2.5bの繰返し計算10回目における比抵抗分布図において、調査断面内の全体的な比抵抗分布は一様に10~20 Ω m程度の比抵抗値を示している。ただし、MT-1孔付近では全体的に10 Ω m以上、MT-2孔付近では10 Ω m以下、試験坑道上部では局部的に20 Ω m以上の値を示す部分がみられる。

図4.2.6のRMS残差および最大残差の収束状況において、両者は繰返し計算回数の増加とともに単調に減少し、10回目において十分に収束している。残差はケース1と同様に測定電位値で正規化したもので表している。

図4.2.7bの測定電位と計算電位の比較図において、プロットは概ね傾き1の直線上に分布しており、直線に対するばらつきも平均的であるが、電位が0.1mVより高い部分ではケース1に比べて大きなばらつきがみられた。この部分のデータを抽出すると坑道周縁部における測定データが多かった。

図4.2.8bの測定電位と計算電位の残差のヒストグラムでは、ほぼ正規分布をしているものの、全体的に若干左側へ偏る傾向がみられ、測定値に対して計算値が小さい傾向があることを示している。全データ865個のうち71%に当たる611個が $\pm 10\%$ 以内（標準偏差11.57%）に分布している。

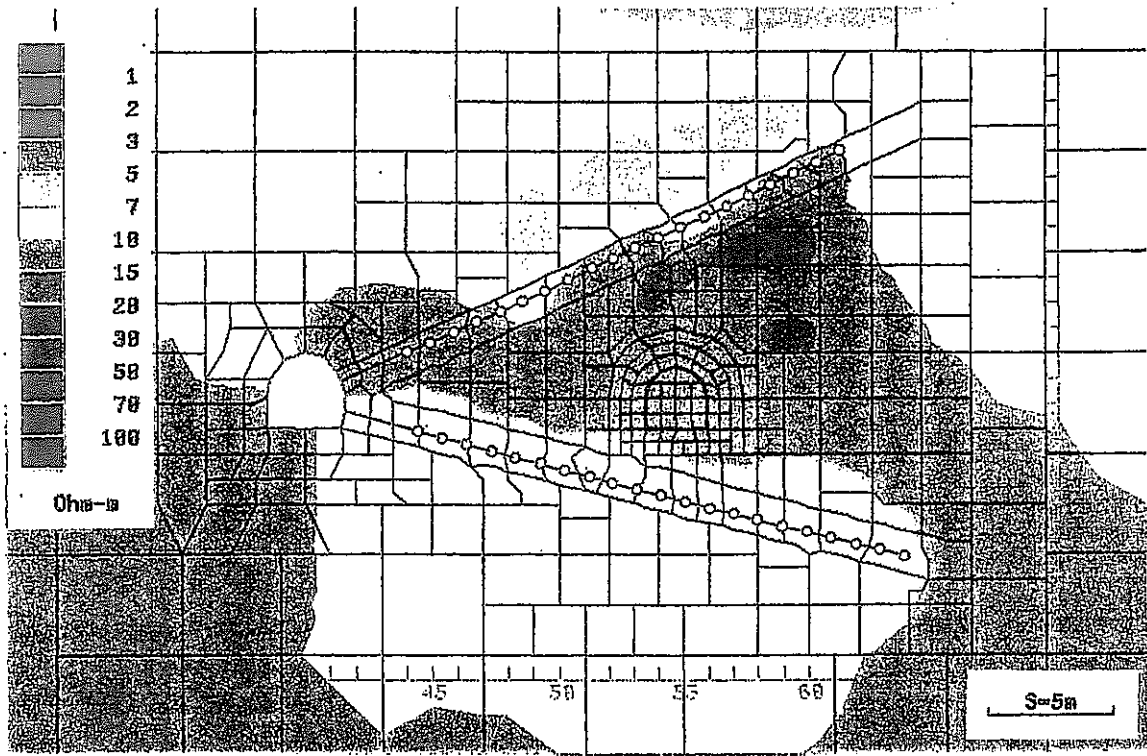


図 4.2.5a 比抵抗分布図 (ケース1)

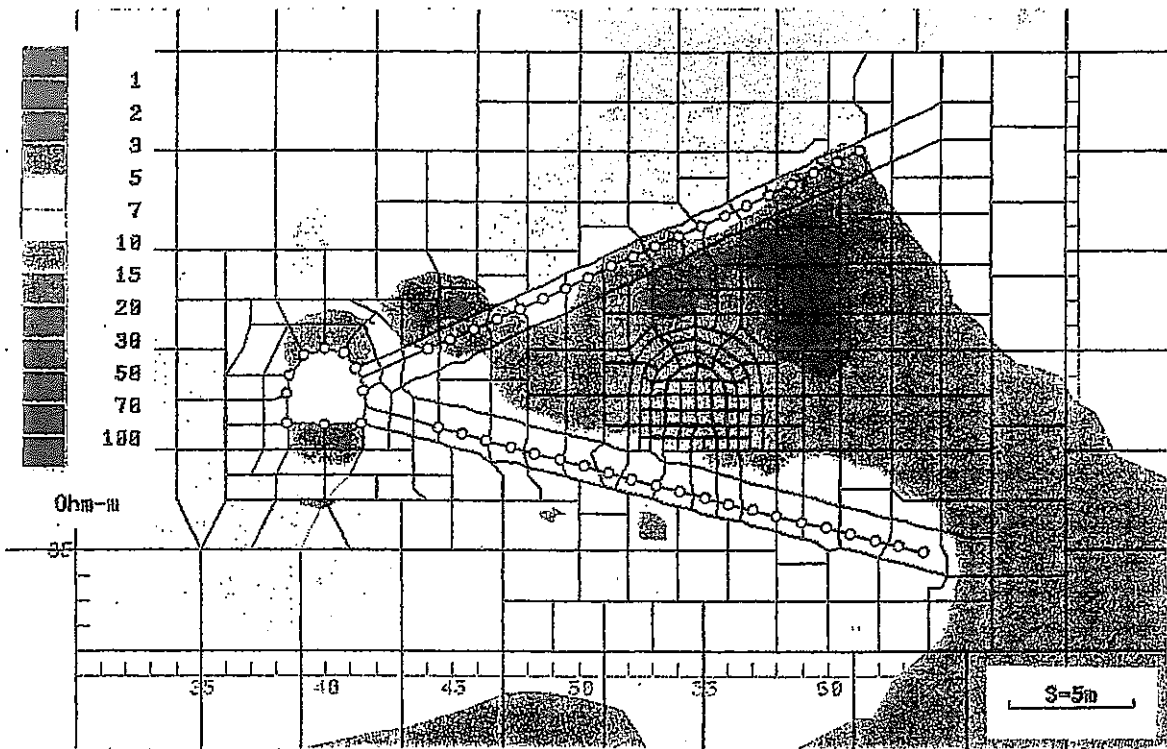


図 4.2.5b 比抵抗分布図 (ケース2)

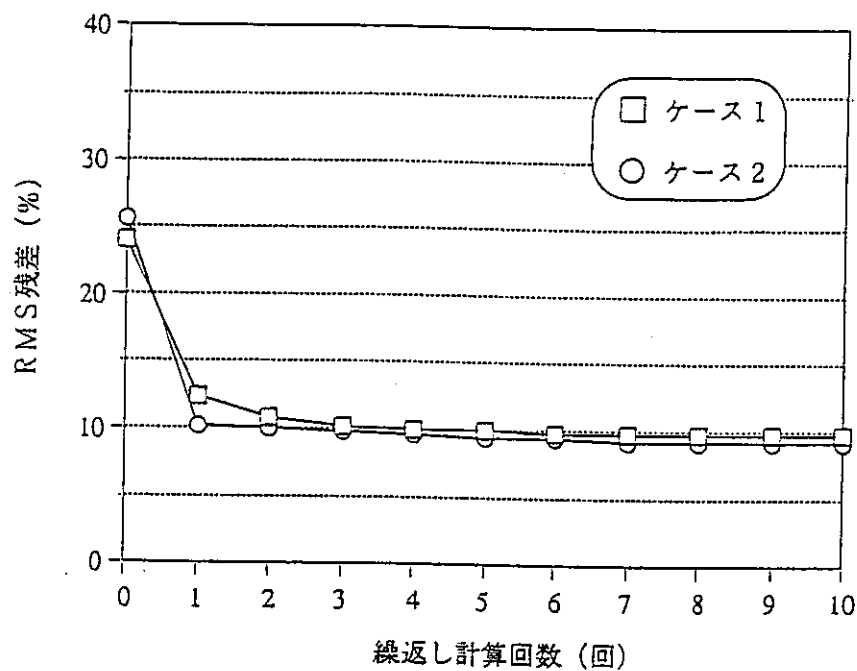


図 4.2.6 a 繰返し計算における RMS 残差の収束状況

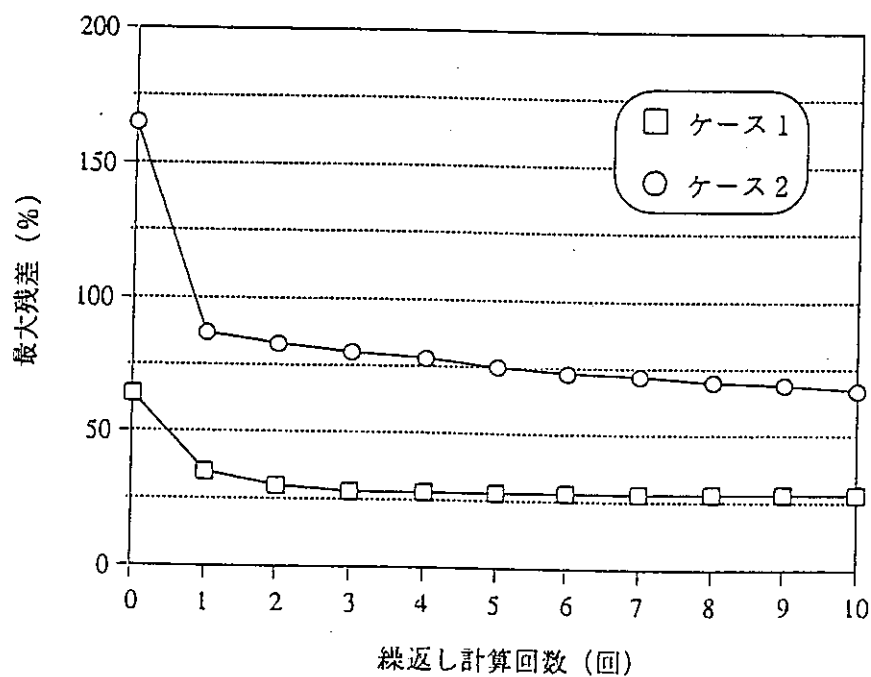


図 4.2.6 b 繰返し計算における最大残差の収束状況

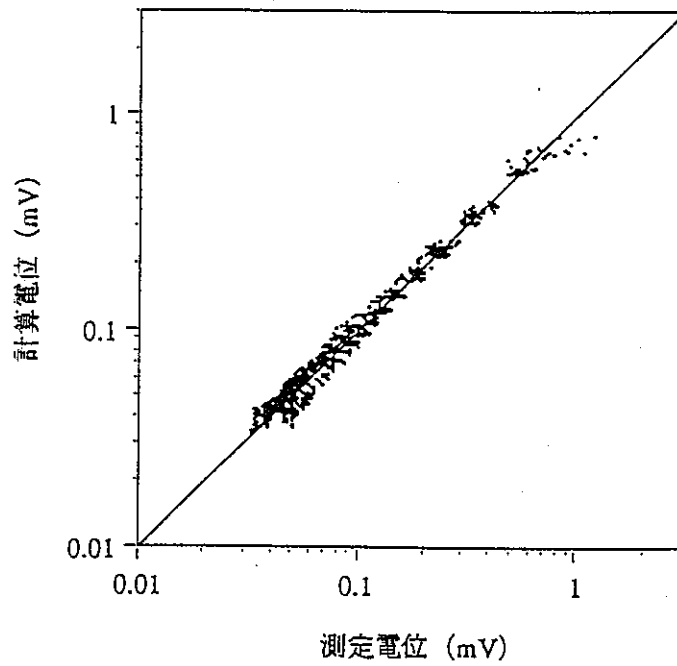


図 4.2.7 a 計算電位と測定電位の比較 (ケース 1)

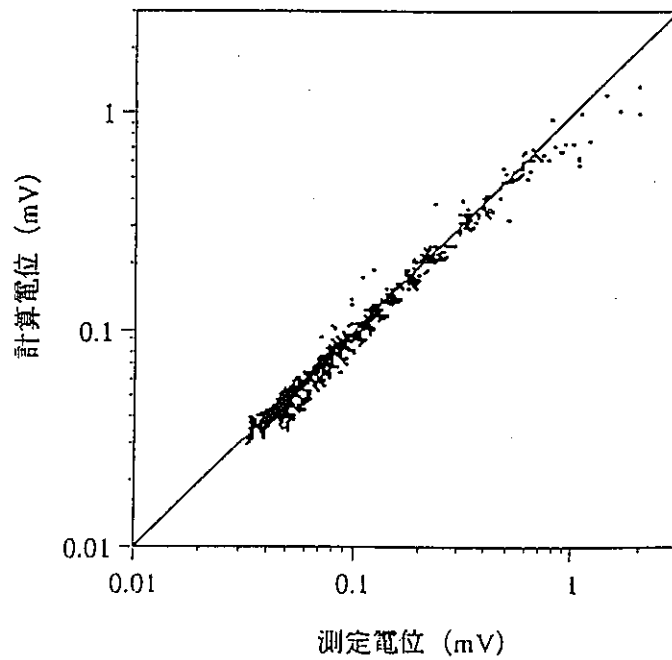


図 4.2.7 b 計算電位と測定電位の比較 (ケース 2)

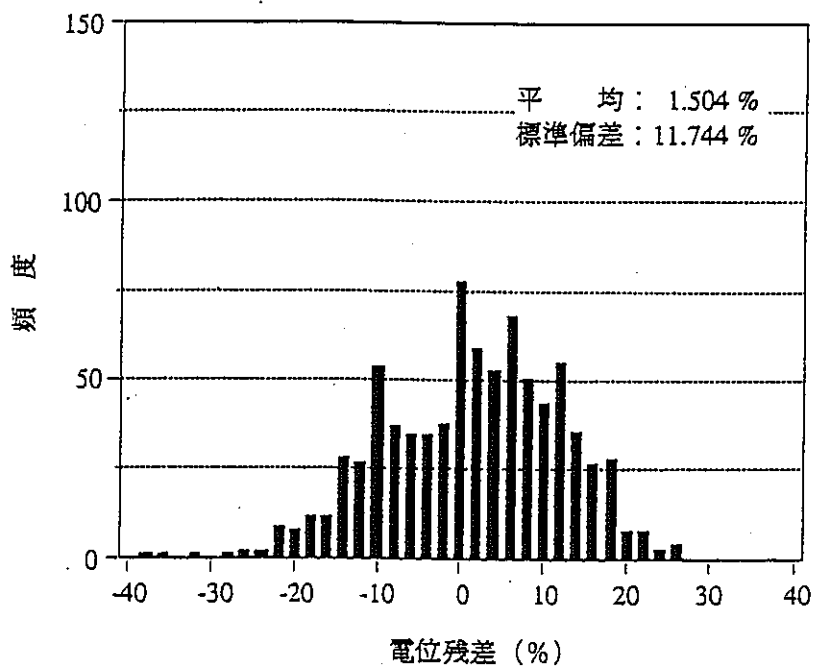


図 4.2.8 a 電位残差 (計算電位 - 測定電位) の分布 (ケース 1)

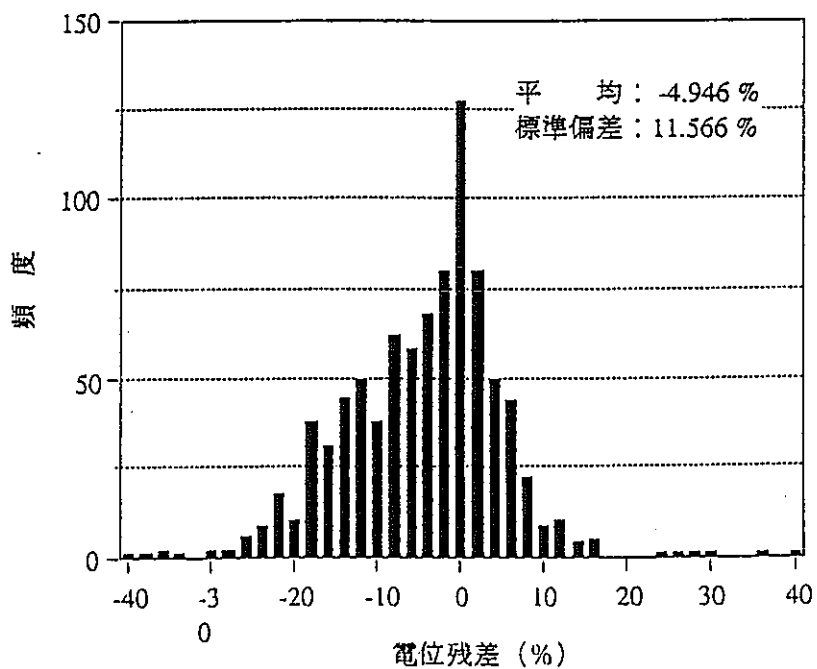


図 4.2.8 b 電位残差 (計算電位 - 測定電位) の分布 (ケース 2)

(4) 考 察

図4.2.5では両調査孔で挟まれた調査断面全体では一様な比抵抗分布となっており、断面内の地質は比較的一様であると推定される。ただし、この調査断面部分の比抵抗値が、その外側の部分に比べて若干高めになる傾向が、両ケースで共通にみられる。これは明らかに不自然な傾向であり、その理由としては次の2つが考えられる。

- ・調査断面内では電極が比較的密に配置されているため、その面積の割にデータ数が比較的多いが、調査断面の外側では非常に広い面積に対してデータ数が少ないこと。
- ・調査断面内ではブロック分割が細かいのに対し、外側では粗くなっているため、調査断面内外の解析精度が違ふことによる解析上の計算誤差。

また、このことより、調査断面内における比抵抗値は外側部分のそれに比べて信頼性が高いと考えられる。

図4.2.6の両解析ケースにおける繰返し計算回数に対する収束状況を比較すると、最大残差はケース1に比べてケース2の方が大きいものの、RMS残差はケース2の方が若干小さい。最大残差は局所的なものであるので、解析領域全体で考えるとケース2の方がよりよい収束状態にあるといえる。

図4.2.7の電位の計算値と測定値の比較および図4.2.8の残差の分布においては、ケース2では計算値が測定値に対して若干小さい傾向がみられるが、全体的な残差のばらつきはケース2の方が小さくなっている。

以上より、解析結果としては計測坑道、ロックボルト、レールなどの影響を評価するための坑道周縁部の測定データを用いたケース2の方が、実際の岩盤の比抵抗分布状況をより忠実に表しているものと考えられる。

ケース2の解析結果では、調査断面内の比抵抗は、ボーリング孔近傍で5~10Ω_m、試験坑道上部で20Ω_m以上、その他の部分は10~15Ω_mであった。室内における比抵抗測定では、細粒砂岩で10~15Ω_m、粗粒砂岩で15Ω_m以上を示している。したがって、調査断面内の地質は全体的に細粒砂岩が卓越しており、試験坑道上部で一部粗粒砂岩が分布していると推定される。

(5) まとめ

本調査の目的は、来年度に掘削を予定している試験坑道を含む断面において、坑道掘削前後の岩盤内の比抵抗分布の変化より掘削影響領域を把握することである。平成5年度は、その一環として、坑道掘削前の岩盤内の比抵抗分布を把握するために、比抵抗トモグラフィ調査を実施した。

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し、岩盤内の電位を計測した。解析は、2本の調査孔間で測定された電位データのみを用いた場合と、孔間測定データに加えて計測坑道、ロックボルト、レール等の影響を評価するための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した。これらの結果より、速度分布や計算の収束状況などについて検討した。

両ケースともに、調査断面内の比抵抗分布は、ボーリング孔近傍で見られる5~10Ωの低比抵抗域および試験坑道上部の20Ω以上の局所的な高比抵抗域（ケース2のみ）を除いてほぼ一様で、その値は10~15Ωであった。

両ケースの解析結果を比較すると、収束状況がよいこと、残差のばらつきが小さいことなどより、坑道周縁部のデータを用いたケースの方が、実際の岩盤の比抵抗分布状況を忠実に表現していると考えられる。

既往の室内での比抵抗の測定結果および今回の比抵抗トモグラフィ調査結果より、調査断面内の地質は細粒砂岩が卓越し、試験坑道上部で一部粗粒砂岩が分布すると推定される。

参考文献

- 1) 佐々宏一、芦田 譲、菅野 強：「建設・防災技術者のための物理探査」、森北出版、P133-135.

5. 総合評価

① 室内規模での比抵抗計測実験

モルタルブロックを用いて銅板の試験片を垂直に埋め込んだケース、銅板を斜め 45° に埋め込んだケース、銅板を埋め込まないケースの3ケースについて測定した。測定は二極法を用いて試験体中央断面について実施し、解析は二次元モデルにて行った。

銅板がある試験体とない試験体では明らかに比抵抗の分布に有意な差があることが確認された。さらに銅板のある試験体はいずれも予め埋め込んだ銅板の位置および形状と概ね一致する形で比抵抗値の小さな領域が確認され、精度の良い結果が得られた。

これより、比抵抗トモグラフィは母材と比抵抗値の異なる材料の位置だけでなく、形状もある程度把握できることが確認され、当該機器の現場への適用性可能性が検証できた。

しかし、電極の位置や数などを変化させた計測条件の変化による測定結果への影響については確認できていない。今後はこの影響を確認することが課題である。

② 岩盤物性値の室内試験

東濃鉱山北延NATM坑道の堆積軟岩（土岐夾炭累層）における泥岩を用いて一軸圧縮試験を行った。1回目の載荷と2回目の載荷時間の差が短い場合、明瞭なカイザー効果が観察された。また、同様に測定したAE計測から得られるパラメーターのm値を用いて軟岩の破壊挙動の推定を試みたところ、泥岩、砂岩、礫岩の岩種による差が確認された。

課題とし、今回の室内試験は乾燥条件下で実施したが、原位置環境を考慮した飽和条件下の検討が必要である。また、最大強度点以降のAE挙動は損傷領域形成過程のAE発生挙動を理解する上で重要と考えられるため、その領域でのデータの蓄積が必要である。

③ 坑道掘削影響試験の事前調査（比抵抗トモグラフィ）

調査断面内の比抵抗分布は、ボーリング孔近傍で $5 \sim 10 \Omega \text{m}$ の低比抵抗域および試験坑道上部の $20 \Omega \text{m}$ 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 $10 \sim 15 \Omega \text{m}$ であった。

既往の室内での比抵抗測定結果および今回の比抵抗トモグラフィ調査結果より調査断面内の地質は細粒砂岩が卓越し、試験坑道上部で一部粗粒砂岩が分布すると推定された。

このことより比抵抗トモグラフィ調査は岩盤中の地下水分布のみならず、室内試験の比抵抗測定結果を併わせなければ岩層についても推定できる可能性が示唆された。

課題として、試験坑道掘削時の測定断面における岩相結果と本結果との比較を行い、測定結果の評価を実施する必要がある。また試験坑道掘削時に、再度同じ条件で比抵抗トモグラフィを行い、坑道掘削が地山状態に対する影響を検討する必要がある。

6. 今後の方針

今回の共同研究の成果を踏まえ、今後の方針について以下に示す。

- ・ 堆積性軟岩の一軸圧縮試験を乾燥、湿潤条件下でポストフェイリュア一域まで実施し、A E発生特性、特に振幅分布特性およびA Eの周波数特性について検討する。また、地下水環境下で堆積軟岩の応力腐食割れ挙動について検討する。
- ・ 試験坑道掘削前の比抵抗トモグラフィ調査により、調査断面の比抵抗分布の把握と、岩相の推定を行った。そこで今後は、試験坑道掘削後と同じ調査断面で比抵抗トモグラフィ調査を実施し、坑道掘削が地山状態に与える影響を検討する。さらに、坑道掘削時における地質調査を実施して、坑道掘削前の推定した岩相との比較・評価を行う。