

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4および5年度共同研究報告書

1994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

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

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

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

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開発」

平成4および5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	-----	3
4. 研究成果	-----	6
4. 1 資環研の研究成果	-----	6
4. 1. 1 精密起爆による弾性波トモグラフィの検討	-----	6
4. 1. 2 トンネル掘削に伴う比抵抗分布の変化	-----	13
4. 1. 3 不連続岩盤のAE発生挙動について	-----	19
4. 2 動燃事業団の研究成果	-----	29
4. 2. 1 坑道掘削影響試験の事前調査（初期応力測定）	-----	29
5. 総合評価	-----	39
6. 今後の方針	-----	40

巻末資料 共同研究基本計画書

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、中部事業所において大学・国立研究期間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 A E（Acoustic Emission）原位置計測試験と、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に基づく試験研究について、平成元年度より 3 ヶ年計画で共同研究を実施した。

しかし、この共同研究による物性変化のメカニズムの把握は、まだできていないため、両機関による相互の知見の活用により効率的な研究の進捗を図り、坑道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、平成 4 年度より 3 ヶ年計画で本共同研究を開始した。

しかし、動燃事業団の坑道掘削影響試験の予定が変更になり、室内試験の原位置への展開が本共同研究期間内では難しくなった。このため、共同研究基本計画書の見直しを行い、坑道掘削に伴う物性変化に関する評価手法の開発に関する基礎試験および坑道掘削影響試験の事前調査を本共同研究期間内の研究内容とすることとした。

ここでは平成 4 および 5 年度の研究成果として、資環研が実施した

- ①精密起爆による弾性波トモグラフィの検討
- ②トンネル掘削に伴う比抵抗分布の計測
- ③不連続岩盤の A E 発生挙動の検討

と、動燃事業団が実施した

- ④坑道掘削影響試験の事前調査（初期応力測定）の結果を報告する。

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。また弾性波トモグラフィ調査は過去の掘削影響試験でも実施され、掘削坑道周辺に弾性波速度の低下域を捉えているので、弾性波トモグラフィ調査の高度化を図ることとし、起爆遅れが無く、弾性波速度をより正確に計測できる精密起爆雷管（資環研で開発）を用いたトモグラフィ調査について、室内実験および現場計測実験を行うこととした。

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を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のある手法としてとりあげた。

A E計測は、岩盤中に発生するき裂を把握するための手法として研究を継続するとともに、岩盤の力学的挙動に重要な役割をはたす不連続面とA E発生分布に関する基礎実験を

行うこととした。

また中部事業所東濃鉦山の北延N A T M坑道において実施する掘削影響試験については、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、本研究では周辺岩盤の初期応力の測定をとりあげることとした。

岩盤の応力は、岩盤の変形や破壊等の力学的挙動を把握する上で重要な因子であり、坑道掘削によって坑道周辺の応力が変化し（応力再配分）、物性が変化することが考えられる。この応力再配分について検討を行うためには、掘削前の初期応力を把握しておく必要がある。そのため、今回は周辺岩盤の初期応力の測定を実施した。

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。

- ・精密起爆雷管を用いた弾性波トモグラフィ調査によって、き裂分布を弾性波速度分布として把握できるか検討し、また従来の瞬発雷管を用いた調査に比べて、どの程度正確に弾性波速度分布を把握できるか検討する。
- ・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比抵抗分布として把握できるか検討する。
- ・不連続面におけるA E発生分布を把握する。
- ・掘削影響試験の事前調査として、岩盤の初期応力を把握する。

3. 実施内容

実施した研究概要を以下に述べる。

(1) 研究内容

①精密起爆による弾性波トモグラフィ調査の検討

弾性波トモグラフィ調査では、従来弾性波の発振に瞬発電気雷管が用いられているが、代わりに、資環研で開発された精密起爆雷管を用いた弾性波トモグラフィ調査によって岩盤中のき裂分布を把握できるか検討した。精密起爆雷管は、瞬発雷管に比べ起爆遅れがほとんど無く、弾性波の発振を正確に捉えることができるため、弾性波速度がより正確に計測できる。

実験は、アクリル板を用いたモデル実験およびトンネル掘削現場の現場計測実験を実施した。モデル実験では、き裂を発生させたアクリル板を用い、精密起爆による弾性波トモグラフィ調査によってき裂の把握が可能かを検討した。また、高速度カメラと光弾性装置を用いて、アクリル板を伝播する弾性波を観測し、数値解析結果との比較検討を行った。

現場計測実験では、トンネルの周辺岩盤を調査し、坑道周辺の緩み領域や断層を把握できるか検討した。

②トンネル掘削に伴う比抵抗分布の計測

本研究では、トンネル掘削現場において比抵抗分布を計測することにより、現場での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把握できるかを検討した。トンネル掘削前および掘削中の複数の計測を行うことによって、トンネル掘削の進行に伴う周辺岩

盤での比抵抗分布の変化を検討した。

計測は2種類実施した。一方は、周辺岩盤全域での比抵抗分布を把握するためのトンネル掘削予定領域全域を対象にした計測で、他方はトンネルが断層を通過した際の比抵抗分布の変化を把握するための断層周辺を対象にした計測である。

③不連続岩盤のA E発生挙動の検討

岩盤等は荷重を受けると微細なき裂（マイクロクラック）が発生し、それに伴いA Eが発生する。このA Eを計測することで、掘削に伴い発生するき裂の分布を把握できると考えられる。一方、実際のA E計測において、新たにマイクロクラックが発生する際のA Eだけでなく、岩盤中の大小様々な既存の不連続面の開閉挙動等によって発生するA Eも計測されると考えられる。このため、掘削に伴うき裂分布を把握するには、岩盤中の不連続面におけるA Eの発生について検討しておく必要があるが、このような基礎的研究は少ない。

本研究では、不連続面を有する岩石試料を用いて、繰り返し載荷実験とA E計測を組み合わせ実施し、繰り返し載荷時の不連続面でのA E発生分布について検討した。載荷実験の最大応力は、通常、坑道周辺の応力値が岩盤の強度より低いことから、岩石試料の圧縮強度の約20%とした。

④坑道掘削影響試験の事前調査

中部事業所東濃鉦山における機械掘削による掘削影響試験のうち、坑道掘削前の周辺岩盤の物性を把握するための事前調査のひとつとして、初期応力の測定を実施した。

初期応力の測定には、応力解放法（8成分ひずみ計埋設法）およびA E法を用いた。

応力解放法は、既存の坑道から坑道掘削予定の位置に向かって水平ボーリングを削孔し、掘削予定坑道の近傍で3点測定した。A E法は、応力解放法のボーリングコアを用いて1点で実施した。

(2) 共同研究分担

上記研究のうち、資環研は、①精密起爆による弾性波トモグラフィ調査の検討、②トンネル掘削に伴う比抵抗分布の計測、および③不連続岩盤のA E発生挙動の検討、に関する室内実験および原位置試験を実施した。動燃事業団は、中部事業所東濃鉦山の北延NATM坑道で掘削影響試験の事前調査を実施した。また、両機関で研究成果について総合評価を行った。

共同研究の分担を次表に示す。

研究項目	資環研	動燃
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計測	○	
不連続岩盤の A E 発生挙動の検討	○	
坑道掘削影響試験の事前調査		○
総合評価	○	○

4. 研究成果

4. 1 資環研の研究成果

4. 1. 1 精密起爆による弾性波トモグラフィの検討

(1) はじめに

近年都市での開発用地の不足から地下空間を有効利用する大深度地下空間開発技術の研究が盛んに実施されている。また、山岳の多い日本ではトンネル掘削等の土木工事が盛んに行われており、岩盤を安全にかつ効率的に開発し有効利用するには、岩盤内の状態を的確に把握することが重要である。

岩盤内を探索する方法として弾性波の伝播速度を利用する弾性波トモグラフィ、電磁波の伝播状況による電磁波トモグラフィ、電気抵抗値の変化による比抵抗トモグラフィ等の各種トモグラフィの研究開発が進んでいる。これらの中で弾性波トモグラフィが最も実用化されているが、普通瞬発電気雷管による発振では起爆時間を正確に計測しているとは言難い。

本研究では、普通瞬発電気雷管の代わりに精密雷管を弾性波の発振源として用いることで弾性波の発振時間を正確に計測し、弾性波トモグラフィの精度を検討した。実験ではアクリル板を用いたモデル実験とトンネル掘削現場の計測実験を実施し、精密起爆による弾性波トモグラフィ解析を実施したので報告する。また、アクリル板を伝播する弾性波の様子を高速度カメラと光弾性装置で観測し、弾性波の数値シミュレーション結果と比較検討した。

(2) 精密起爆による発振について

弾性波トモグラフィでは、発振点から受振点までの到達時間を正確に計測することが重要である。振動の発振方法としては、雷管及び爆薬を用いてイオン探針法や巻線法により発振点の時間を計測するのが一般的であるが、数十 μ sから数百 μ sの時間遅れがあることが報告されている。また、瞬発雷管による起爆は通電後1~2msの起爆遅れがあり、また地震探査用の瞬発雷管でも数百 μ sの起爆遅れがある。これに対して精密雷管による起爆では、通電後1 μ s以内に精密雷管が起爆することが確認されており、発振点から受振点までの走時時間を正確に計測できる。

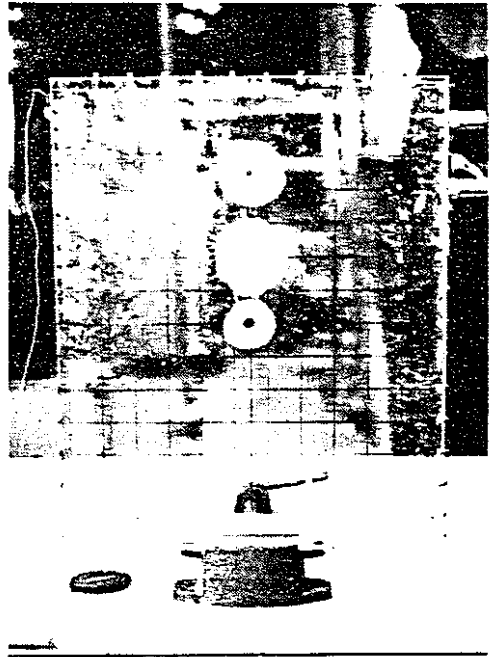
(3) アクリル板によるモデル実験

(a) 計測モデル

実験で使用したアクリル板(P波の伝播速度2.600m/s)は、縦43cm、横35cm、厚さ2cmのもので、発振点と受振点を3cm間隔でそれぞれ25個とした。計測では亀裂のないアクリル板と亀裂のあるアクリル板を用いて2回の実験を行い、弾性波トモグラフィを検討した。亀裂のあるアクリル板は、亀裂のないアクリル板を計測終了後に3個の電気雷管で発破し、亀裂を発生させて亀裂のあるアクリル板としたものであり、発破点から放射状の亀裂が発生した。実験で使用したアクリル板をFig.1に示す。



(a) Acrylic resin plate without crack



(b) Acrylic resin plate without crack generated by blasting

Fig. 1 Photograph of acrylic resin plate used in this model experiment

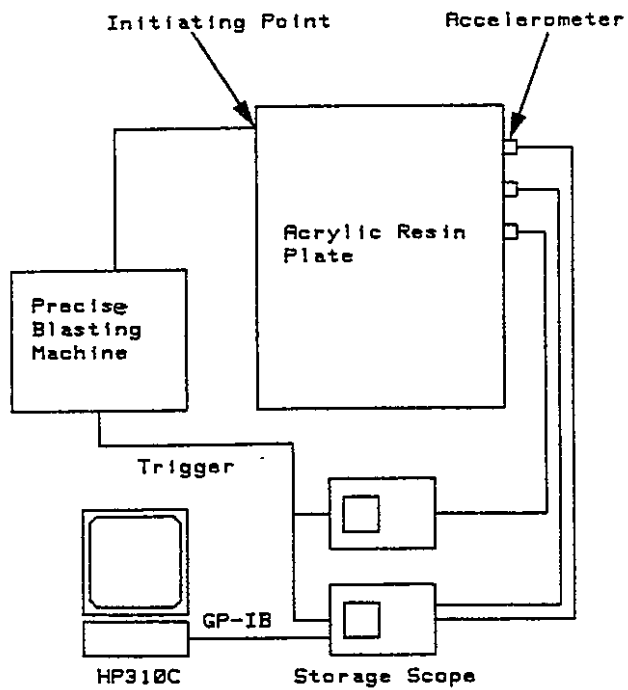


Fig. 2 Measuring system for model experiments

(b) 計測方法

計測では精密起爆器からの起爆記号を起爆点の発振信号として、3個の加速度計で弾性波を計測した。加速度計は、ティアック社製圧電型加速度計(707型、感度100mV/G、応答周波数3~14,000Hz、使用最大加速度15G)を使用し、アクリル板にボルトで固定した。

モデル実験では、雷管に使用される電橋線部を発振点に張付け、この電橋線を精密起爆器で起爆して、弾性波の発振点とした。弾性波の計測では、発振点から受振点までの時間を正確に計測するために、精密起爆器からの起爆信号をトリガー信号として、プリアンプ(ティアック製SA16)を介して2台のストレージスコープを用いてサンプリングレート10MHz(100ns)で計測した。計測した波形データは、GPIBを介してコンピュータ(HP310C)に取り込み到達時間を計測した。計測の概略をFig.2に示す。

(c) 解析方法

弾性波トモグラフィーの解析方法としては、波線追跡によって得られた計算走時と観測走時の誤差をこの波線が関与するすべての要素に分配することで要素の速度分布を更新し、この誤差が小さくなった時点で解析を終了するSIRT法を用いて解析した。

解析では解析区間を2×2cmの要素に分割して、それぞれの要素の速度を計算して破壊領域を推定する。

(d) 解析結果

亀裂のないアクリル板の解析では、各要素の弾性波速度が2,500~2,700m/sを示し、アクリル板のP波伝播速度に等しくほぼ均一であることが判明した。これに対して亀裂を発生させたアクリル板は亀裂領域付近で弾性波速度が2,300~2,500m/sの遅い領域が現れる。このことから雷管によって発生した亀裂の影響が現れ、亀裂を把握できたものと思われる。

これらの解析結果からアクリル板の用いた小規模のモデル実験でも起爆時間を正確に計測することで十分に破壊領域を計測できることが判明した。解析結果をFig.3とFig.4に示す。

(e) アクリル板を伝播する弾性波の観測

アクリル板を伝播する弾性波を光弾性装置と高速度カメラで観測した。実験で使用した高速度カメラはCordin社製フレーミングカメラモデル124である。撮影条件は、撮影速度: 2×10^5 駒/秒、撮影駒数: 26、フラッシュ: クセノンランプ、フィルム: 35mmカラーASA100で行った。実験ではモデル実験の発振で使用した電橋線の線爆発により圧力波を入力し、伝播する弾性波を観測した。観測の結果をFig.5に示す。

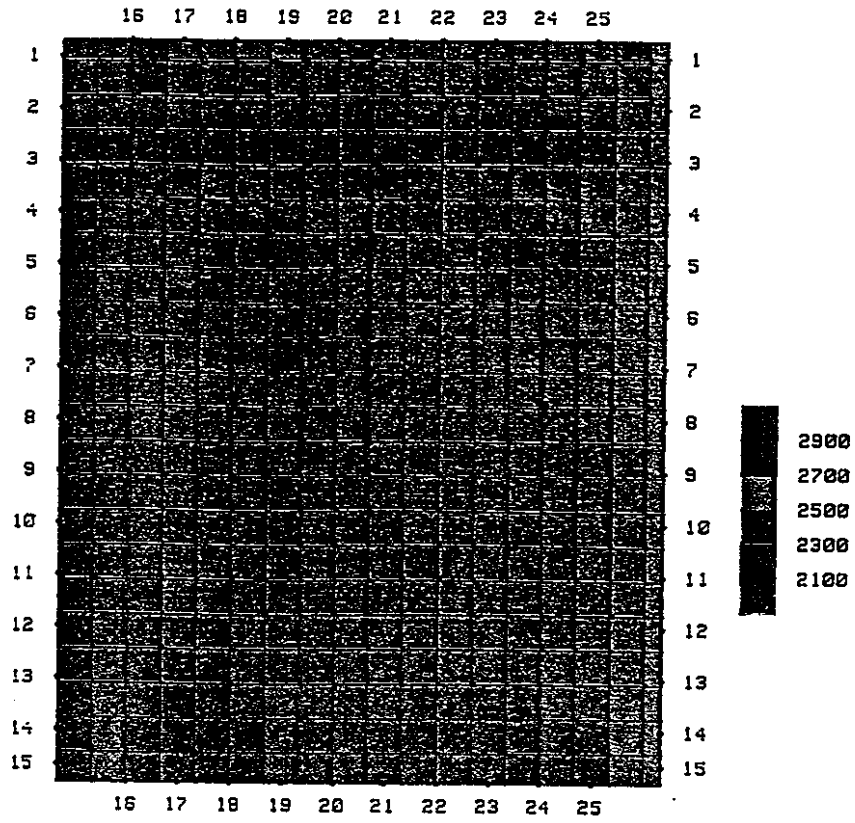


Fig. 3 Result of seismic tomography analysis for acrylic resin plate without crack

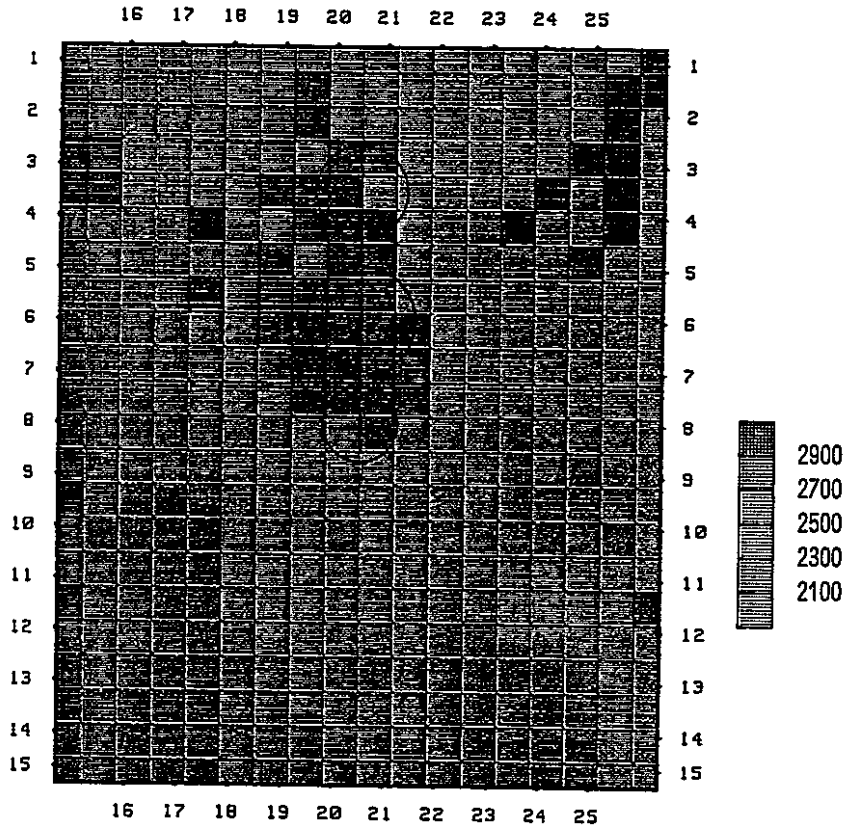


Fig. 4 Result of seismic tomography analysis for acrylic resin plate with crack generated by blasting

高速度カメラによる観測結果から、弾性波は伝橋線による起爆点から波道が放射線上に広がり、伝播することを確認した。また、観測した弾性波の伝播速度が約2,600m/sになりアクリル板を伝播するP波の伝播速度に等しく、P波の伝播を観測したことが判明した。

(f) 弾性波の伝播シミュレーション結果

アクリル板を伝播する弾性波を数値シミュレーションし、高速度カメラの観測結果と比較検討した。数値シミュレーションでは、解析区間を $1 \times 1 \times 1$ cmの要素に分割して3次元運動方程式をラグランジェ座標を用いて差分表により解きシミュレーションしたものである。数値解析用のコンピュータにはHP730CRXを使用した。数値シミュレーションによる解析結果をFig.6に示す。解析結果から高速度カメラによる観測結果と同様に圧力波の入力後に弾性波が放射状に広がり、観測波形と比較的良く一致した。これらの結果から、アクリル板を伝播する弾力波を十分に数値シミュレーションできることが判明した。

(4) 弾性波トモグラフィの現場実験

(a) 計測現場の概要

計測現場はL字型の構造になっており、深部にあるトンネル部と連絡坑道の岩盤を調査対象として精密起爆による弾性波トモグラフィの現場実験を実施した。Fig.7に計測現場の概略を示す。深部トンネル部は長さ約35m、高さ約4m、幅約4mの空間を形成しており、広大な地下空間になっている。Fig.8に計測現場を示す。

計測現場の地質状態は、坑道入口から約25m付近は坑道の堀削前のボーリング調査からRQD値(0~19)の最も悪い部分が存在することが判明していた。また、トンネル部の堀削後の地質調査からも粘土・方解石を伴う顕著な割れ目が数本存在することが確認された。いずれの割れ目も連続性が良く、これらの顕著な割れ目には同系統のジョイントが10cm間隔で発達しており、小規模の断層になっていると推定される。これらの観測結果から坑道入口から約25m付近にある断層は計測対象の岩盤の深部まで発達していることが予想される。

(b) 計測方法

精密雷管による発振点は坑道入口から連絡坑道の側面に沿って、トンネル部入口から2mまでを20cm間隔、2~10mまでを1m間隔、10~20mまでを2m間隔で計24箇所を設定した。受振点はトンネル入口から2.5m間隔で14箇所を設定した。弾性波計測用の加速度計は鉄製の杭を岩盤に埋め込みモルタル固定し、その上にティアック社製圧電型加速度計(707型)をネジで固定した。

計測では、精密起爆器からの起爆信号をトリガー信号として、加速時計の信号のプリアンプ(ティアック製SA-6)を介してデータレコーダ(ティアック製DRX-1)のデジタルに取り込み、フロッピーディスクに記憶した。計測のサンプリング

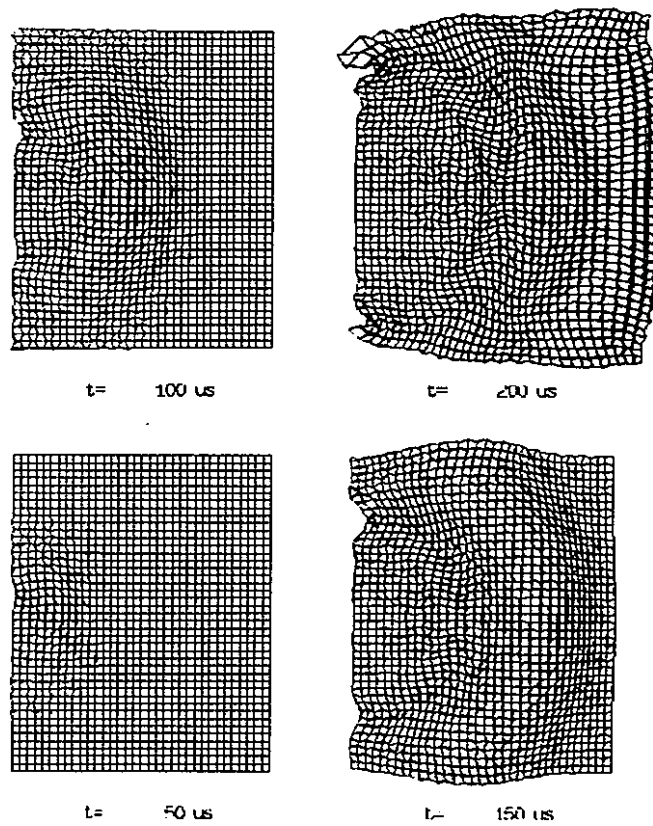


Fig. 6 Result of numerical simulation for seismic wave propagation in the acrylic resin plate

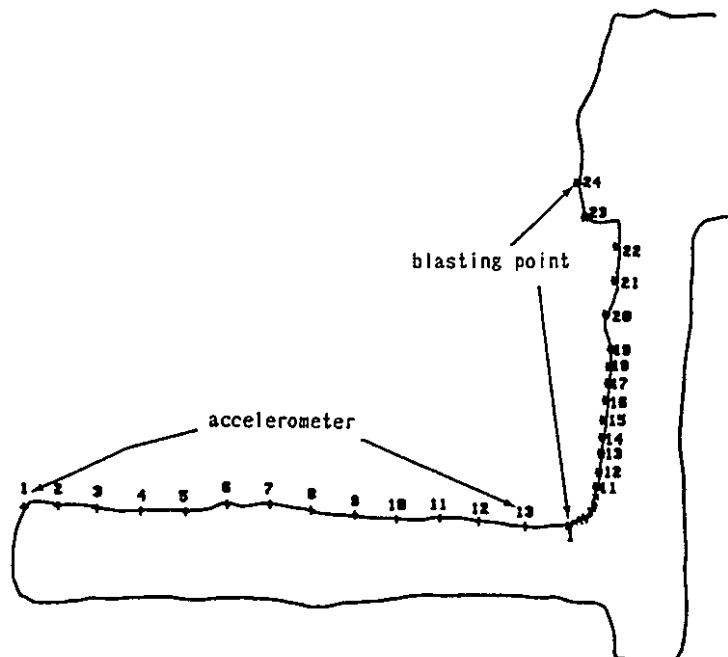


Fig. 7 Figure of test field for seismic tomograph

プレートは、50KHz (20 μ) で加速度計8ch, トリガー信号1chの計9chで同時計測した。また、計測波形は、現場に設置したモニターで確認しながら実験を行った。計測した振動波形は、雑音が少なく良好な波形が得られた。計測波形の一例をFig.9に示す。

波形計測のトリガー信号に精密起爆器からの起爆信号を用いることで発振点から受振点までの到達時間を正確に計測できた。また精密起爆器から直接トリガー信号を計測できるので、巻線法等による起爆前の雷管への処理が不要で、短期間での計測が可能となり、現場計測に適しているものと思われる。

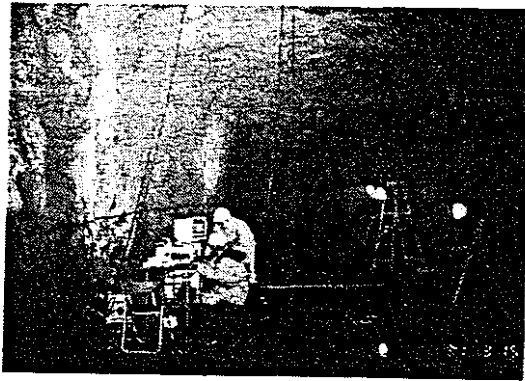


Fig. 8 Photograph of test field for seismic tomograph

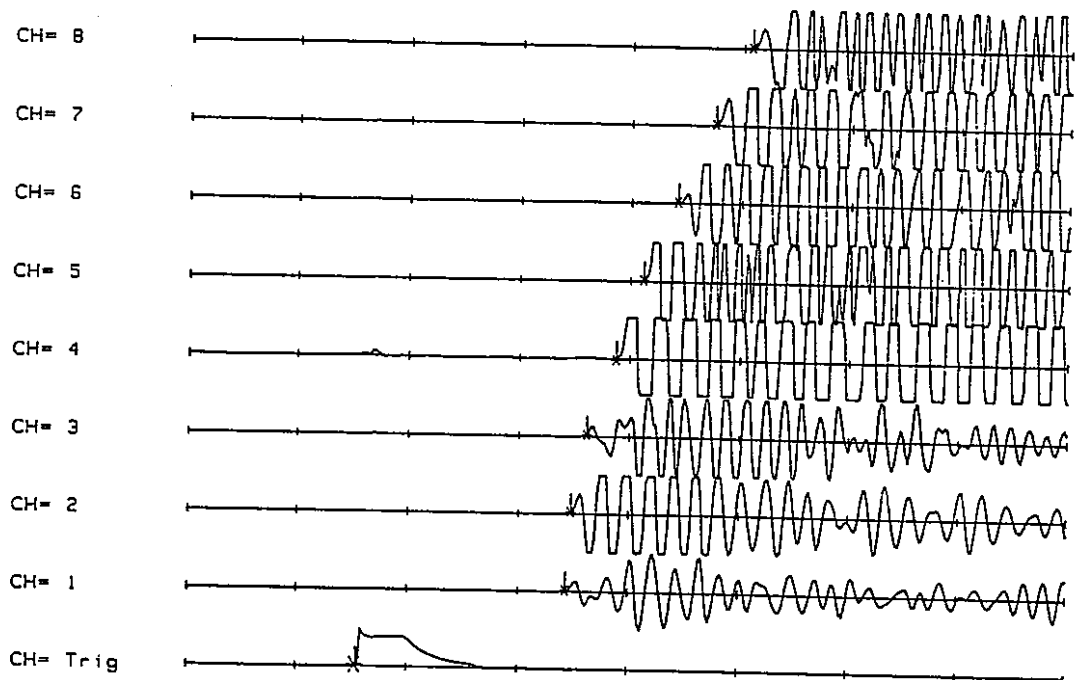


Fig. 9 Typical waveforms of seismic wave measured by accelerometer

(c) 解析結果の検討

解析方法は、アクリル板のモデル実験で使用したSIRT法を用いて、解析領域1×1mの要素に分割して解析処理した。弾性波トモグラフィーの解析結果をFig.10に示す。解析結果から、計測した岩盤はかなり良好な状態にあり、多くの要素が6,000～6,500m/sの弾性波速度の領域にあることが判明した。しかし、トンネル部の入口から20～25m付近に弾性波速度の遅い部分が存在する。これは、トンネル掘削前後の地質調査の関係から断層による弾性波速度の遅い領域を捉えたものと思われる。しかし、弾性波速度の計測が計測対象領域を取り囲む様に、設定できなかったため深部に存在すると考えられる断層を十分に把握できなかったものと思われる。また、トンネル部入口に弾性波速度の遅い部分が存在し、掘削による坑道の緩み領域を捉えたものと思われる。

(d) まとめ

精密起爆による弾性波トモグラフィーのモデル実験と現場計測の結果から以下のことが判明した。

1. アクリル板を用いた小規模のモデル実験で、精密起爆器を用いることで破壊領域を計測できることが判明し、高精度の弾性波トモグラフィーの実施が可能となった。
2. 高精度カメラによる観測結果と差分法による数値解析結果から、アクリル板を伝播する波動を十分に数値シミュレーションできることが判明した。
3. 弾性波トモグラフィーの現場計測実験では、トンネル部入口から20～25m付近に弾性波速度の遅い領域があり、断層による影響によるものと思われる。また、坑道入口付近に存在する緩み領域を捉えることができた。

精密起爆器による弾性波トモグラフィーは、従来の方法と比較して起爆点の起爆記号を容易にトリガー信号として用いることができるので、現場計測に適しているものと思われる。

4. 1. 2 トンネル掘削に伴う比抵抗の変化

(1) はじめに

地下に空洞を掘削すれば、その影響によって地下水の流動状態が影響を受けることはよく知られていることであるが、トンネル掘削の場合においては、それによって工事の進行阻害、安全上の面から問題となる岩盤からの大量湧水の発生の危険性も考えられる。また、生活圏に近接した箇所での工事では、地下水脈への影響を抑えた工事計画が必要になる。これら岩盤中の地下水に起因する問題に対して適切な対策を立てるためには、岩盤中の地下水分布の状態を広範囲で的確に

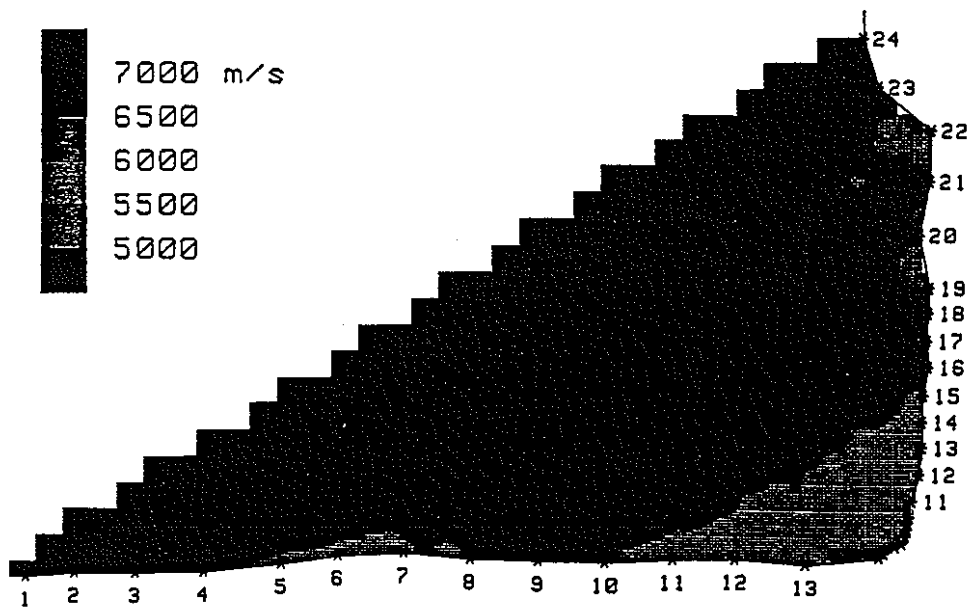


Fig. 10 Result of seismic tomography analysis for field test

把握するとともに、堀削によって地下水の状態がどのように変化するかを明らかにしていく必要がある。

実際の岩盤中の地質状態と併せて地下水の状況およびその変化を把握するためには、反射法地震探査や比抵抗法に代表される電気探査等物理探査技術の応用が有効と考えられる。その中で、大地に電流を流し、それにより形成される電位から岩盤中の比抵抗分布を解析する比抵抗法は、他の物理探査技術に比較して岩盤中の水の存在に対して敏感といわれている。

そこで、本研究では比抵抗法に着目し、トンネル堀削時の周辺岩盤中の地下水への影響を調べる目的で、トンネル堀削前と堀削進行中において複数回の計測を実施した。鉱床探査、岩盤調査等においては比抵抗電気探査技術は広く利用されてきているが、本研究で実施したようなトンネル堀削の進行に合わせた計測例は現在まであまり行われていない。本研究で実施した比抵抗法による計測によって、トンネル堀削の進行に伴って岩盤中の比抵抗分布に顕著な変化が認められ、岩盤中の地下水の流動状態がトンネル堀削によって影響されていることが推察された。

本論文では、計測によって得られたトンネル堀削に伴う岩盤の比抵抗分布の変化について、トンネル切羽位置、地下水、断層等と関連付けながら論じ、トンネル堀削時の岩盤監視技術としての比抵抗法の有効性について示す。

(2) 試験の概要

本試験においては、2種類の計測を実施した。ひとつは、No.3坑の坑道壁面に10m間隔で電極を500mの距離にわたって設定して行った計測である。この計測は、導坑堀削予定領域のほぼ全域の比抵抗変化の変化を検討するためのものである。他のひとつは、導坑堀削の出発点から約240m進んだところに断層（以下、F1断層と呼称）が存在するが、この断層周辺で実施した計測である。この計測では、電極は1m間隔で20mの距離にわたってNo.3坑の坑道壁面に取り付けた。この計測は、断層周辺の脆弱な岩盤部分でのトンネル堀削による比抵抗変化を検討するためのものである。

本計測では、ホールインアンカを坑道壁面の岩盤に打ち込んで電極とした。遠電極の取付も同様の方法である。また、計測に用いた装置は応用地質製のMcOHM-21で、電極配置は二極法（ポール・ポール法）によって計測を行った。

解析は次の手順で実施した。まず、計測された見掛比抵抗値に対して感度補正を施し、次いでそのデータに対して比抵抗構造の初期モデルを決定する。ここでは、一次元解析を繰り返し行い二次元断面を作成する。次いで、この解析結果を初期値にして、リニアフィルタ法によって繰り返し計算を行って比抵抗構造を求めた。この計算においても、一次元解析を繰り返し行って二次元断面を作成した。

(3) 試験結果と考察

(a) 広域比抵抗分布とトンネル掘削

観測用として利用したNo.3導坑の500mにわたって電極を設置して行った、広域にわたる比抵抗分布の解析結果を図1に示す。同図において、矢印で示した箇所が5m離れて掘削されているNo.4導坑の切羽位置である。また、同図(a)では、TBMによる掘削が開始した直後であるために、解析断面上に切羽がまだ完全には到達していない。なお、同図の横軸は1番電極（TBM出発点に最も近い電極）からの距離を示している。また、同図の縦軸は、トンネル壁面からの深度を示しており同図に示した解析断面では深さ100mまでを示している。

No.3導坑のトンネル壁面の展開画像の一部を図2に示す。同図に示した観察結果において、同図(a)はTBM出発点から約40m離れたところに認められた破砕帯（岩盤分類：D）を示している。同図(b)は、TBM出発点から約250m離れた箇所に出現していたF1断層（岩盤分類：D）を示している。また、同図(c)はトンネル壁面からの多量の滴水がみられたTBM出発点から約420m～450mの箇所の壁面を示しているが、同図に示すように多数の亀裂が互いに交差している様子が分かる。

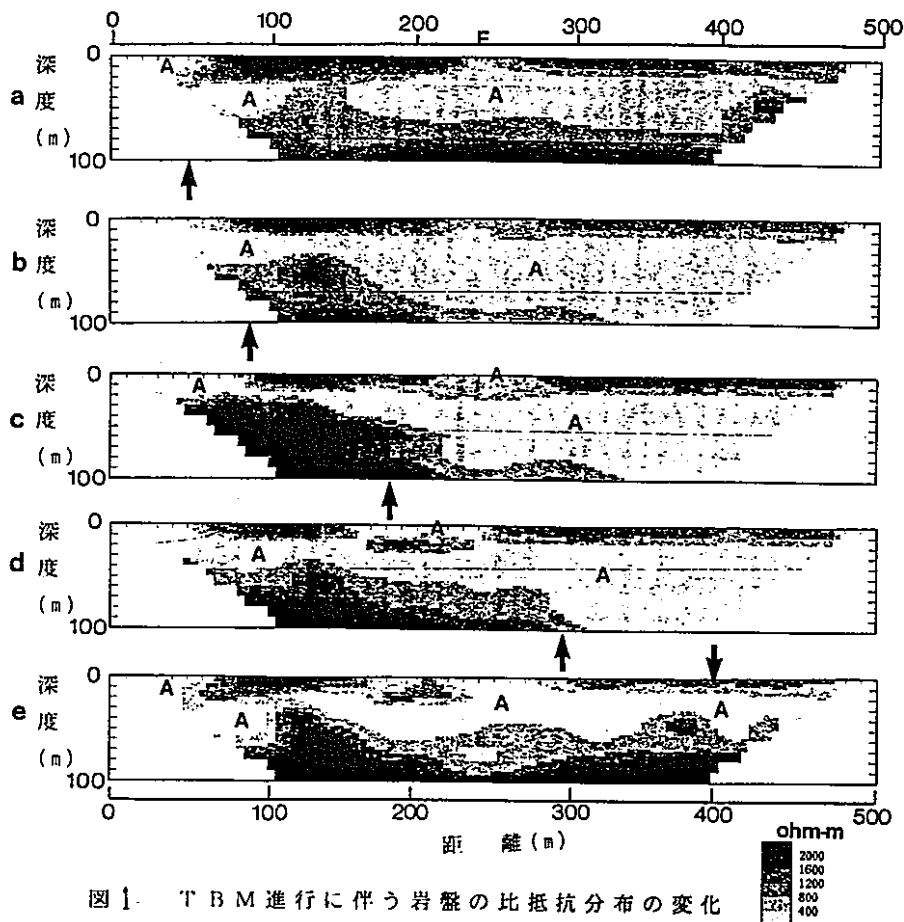


図1. TBM進行に伴う岩盤の比抵抗分布の変化
 (矢印は切羽位置を、Fは断層を示す)
 A: 200Ω・m以下

まず、図1(a)に示したトンネル掘削初期の段階の比抵抗分布と図2に示したトンネル壁面の観察結果との関係について述べる。比抵抗分布において $800\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯に着目すると、No.3導坑の壁面近くにみられる低比抵抗の位置は図2で示した多量の滴水が認められた破碎帯、F1断層等の位置とよく一致している。また、F1断層(図中F地点)近傍の岩盤の比抵抗が特に低い値($400\Omega \cdot m$ 以下: 図中Aと付記)を示しているが、その分布はF1断層がNo.3導坑に出現している箇所を起点とした分布になっていることが特徴的である。このことから、低比抵抗帯の分布は岩盤中の地下水の分布と極めて密接な関係があるものと思われる。

次に、TBMによるトンネル掘削の進行と比抵抗分布の変化との関係について述べる。比抵抗が $400\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯の変化をみると、掘削の進行に伴ってその領域がF1断層周辺を起点として拡大していることが分かる。また、切羽到達点の近傍では比抵抗が $400\Omega \cdot m$ 以下の領域が形成されていることから、このトンネル掘削によって岩盤中の地下水の分布が変動しているものと推察される。なお、掘削の進行によって壁面から奥部において高比抵抗の領域が出現しているが、これがNo.4導坑の影響に依るものかどうかは明らかではない。

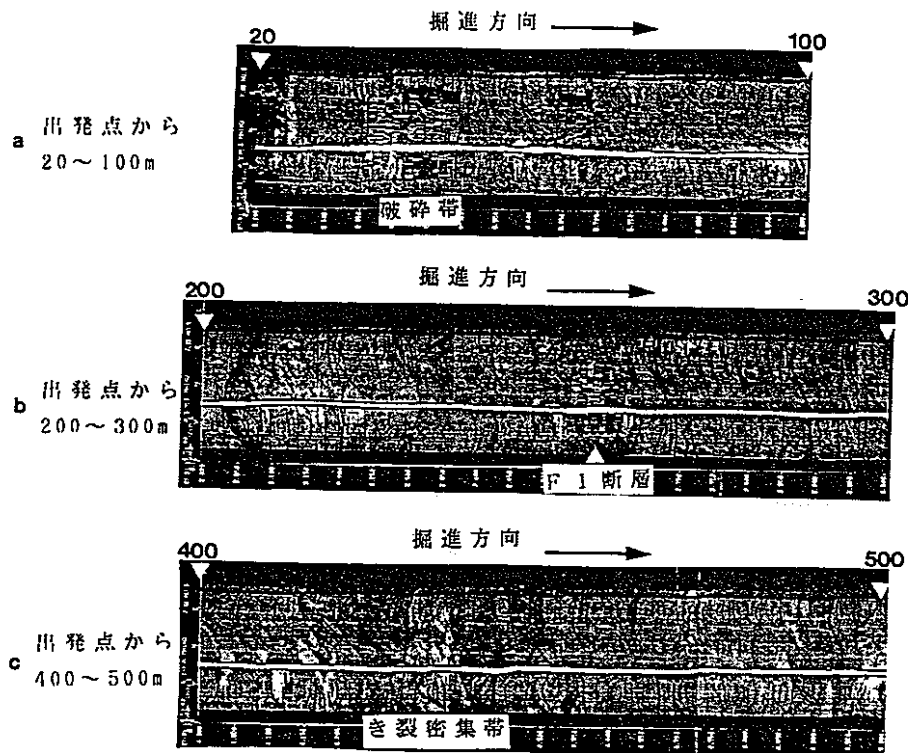


図2 No.3導坑のトンネル壁面の展開画像

(b) 断層通過前後の比抵抗分布の変化

断層を挟むかたちで電極を1m間隔に配置し、20mの区間で比抵抗分布の計測を実施した。図1に示したように、比抵抗分布は岩盤中の地下水の分布を反映している可能性が高いが、ここでは断層をTBMが通過する際の比抵抗分布の変化について検討した。

図3に比抵抗分布の解析結果をTBMの切羽位置（矢印）と併せて示した。同図において、横軸は1番電極（TBM出発点側）からの距離を示している。また、縦軸はNo.3導坑の壁面からの深度を示しており、本解析結果では深度10mまでを示している。

同図（a）の比抵抗分布図はトンネル切羽が計測領域に到達する前の段階の分布図であるが、F1断層を構成するD級の岩盤がNo.3導坑に露出している箇所から400Ω・m以下の低比抵抗帯が分布している。しかし、No.3導坑壁面近くで、かつ岩盤が花崗岩である箇所では比抵抗が高くなっている。同図（b）、（c）は、切羽が計測領域のほぼ中央まで到達したときの比抵抗分布図である。切羽到達前の

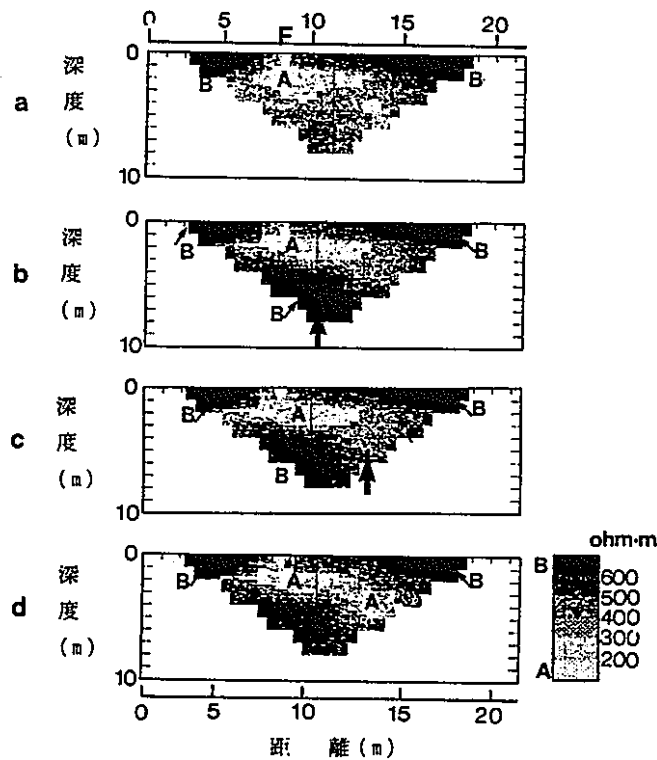


図3 断層通過前後の比抵抗分布の変化
（矢印は切羽位置を示す）

A:200Ω・m以下、B:600Ω・m以上

分布図との違いは、No.3導坑から約5m奥部に比抵抗 $600\Omega \cdot m$ 以上の領域が認められることである。No.4導坑の堀削はNo.3導坑から約5m離れてほぼ平行に堀削されていることと、比抵抗 $600\Omega \cdot m$ 以上の領域が出現している箇所がよく一致している。このことから、この $600\Omega \cdot m$ 以上（図中Bと付記）の領域はTBM堀削による影響が出現しているものと推察される。同図（a）においても認められた $200\Omega \cdot m$ 以下（図中Aと付記）の低比抵抗の領域がNo.3導坑壁面にほぼ平行に分布しているが、同図（b）、（c）の結果においてもその分布形態はほとんど変化していない。つまり、切羽位置が本計測領域のほぼ中央まで達した段階では、トンネル堀削の影響は岩盤中の地下水にまだ影響を与えていないと思われる。同図（d）は、切羽が計測対象域を5m先まで通過したときの比抵抗分布図である。同図（b）、（c）と比較すると、No.3導坑の約5m奥部に認められた高比抵抗（ $600\Omega \cdot m$ 以上）帯が認められなくなるとともに、 $200\Omega \cdot m$ 以下の低比抵抗帯が壁面から奥部側に拡大している様子が認められる。したがって、TBM切羽が完全に通過した後においては、岩盤の緩み等に起因して地下水が流動し、岩盤中の地下水の再配置が発生するものと推察される。地下水変化が生じている箇所（同図（b）、（c）の高比抵抗帯が認められなくなった箇所）と切羽との距離は約15mである。

（4）おわりに

トンネル導坑工事現場において、導坑（トンネル）堀削の進行に伴う岩盤の比抵抗分布の変化について検討を加えた。その結果、

①導坑のほぼ全域にわたる比抵抗分布は、計測域中に存在した破碎帯、断層等に関連した水理状況をよく反映したものであった。また、トンネルの堀削に伴う比抵抗分布の変化から岩盤中の地下水分布の変化を推定することが可能であることが明らかになった。

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が明らかになった。また、低比抵抗帯の変化を地下水分布の変化と対応させて推察すると、トンネル堀削による切羽周辺地下水の変化は切羽が完全に通過した後に出現することが分かった。

4. 1. 3 不連続岩石のAE発生挙動

（1）はじめに

岩石等の固体材料が応力の作用を受けると、アコースティックエミッション（Acoustic Emission, AE）の発生を伴ってマイクロクラックが発生する。岩石及び岩盤の破壊はマイクロクラックの挙動によって大きく影響されるので、AEの計測は

岩盤の破壊及び挙動を予測する有力な手段となる。

また一方で、岩石サンプル内で発生する微小破壊と実際の岩盤、地殻内で発生する破壊現象との類似性が明らかにされてきたことによって[例えば、Kusunose et.al, 1991; 飯尾(1982)等]、岩石試験片の破壊時のAEの計測、解析が実際の岩盤内の破壊現象を理解する上で必要な研究であるという観点から、多くの研究がなされてきた。特に、地震予知、深部鉱山での山はね予知との関連で多くの研究がなされ、ダイラタンシーの局在化[Yanagidani, T. et.al, 1988]、及びAE発生の時系列変化と最終破壊[Nishizawa, O. et.al, 1980; Lockner, D., 1992; Hirata, T., 1985]との関連、岩石破壊現象の記述へのフラクタルの応用[Hirata, T. et.al, 1985; 瀬戸他, 1988; Lei, X. et.al, 1992; Seto, M. et.al, 1993]等で報告がなされている。

実際の岩盤においては、節理から断層に至るまで大小様々な規模の不連続面が存在しており、これらが岩盤の挙動に影響すること、不安定化の原因になることが予想できる。しかしながら、不連続性を有する岩石のAEについてのこの種の基礎的な研究は、先に述べた原位置での研究に比べて少ない。また、従来の研究では岩石が最終破壊に至る過程でのAEについての研究が多いが、地下空洞周辺の岩盤の応力状態と岩盤の強度との関係を考慮すると、強度よりもかなり低い応力レベルでのAE挙動についても検討しておく必要があると考えられる。

以上のような研究背景に立って、本研究においては、不連続性を有する地質材料として選び、繰り返し圧縮載荷実験をAE計測と組み合わせて実施し、AE発生頻度、AE源分布と不連続面、ダイラタンシーとAE発生挙動等について検討した。本論文では、不連続岩石を用いて行った低応力レベルでの繰り返し載荷実験時のAE源分布の変化、繰り返し載荷過程でのAE発生特性の変化、及び非弾性体積ひずみとAE発生との関係等から、不連続岩石のAE発生挙動の特徴について論じる。

(2) 実験方法とAE計測方法

(a) 岩石試料

実験に使用した岩石は、原位置でのコアボーリングによって採取された片麻岩で、その一軸圧縮強度は約200MPaであるが、本実験では15個の岩石試料(直径: 47.6mm、長さ: 95.2mm、端面平行度: ± 0.02 mm)について繰り返し載荷実験を行った。15個の岩石試料の内、外観的に不連続性を呈する岩石試料は緑簾石等の脈石を有しており、脈石との境界で不連続性を有している。弾性波速度の面から述べると、岩石試料の直交する3方向の速度異方性としては最大で6.2%であった。

(b) 繰り返し載荷実験

繰り返し載荷実験では、圧縮強度の約20%に相当する40MPaを最大応力に設定

した繰り返し載荷実験を図1に示す載荷パターンで行い、その繰り返し載荷過程においてAE及びひずみの計測を行った。歪の計測は2軸のひずみゲージ（ゲージ長：5mm）を軸方向の中央部分に120° 間隔で3枚貼り、AEセンサは8個を試料の側面に取り付けた。

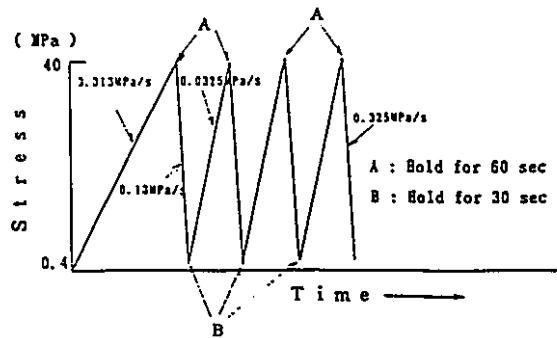


Fig.1 Loading pattern of cyclic loading

(3) 実験結果と考察

不連続性を呈する岩石については12個の試料について繰り返し載荷実験を行ったが、ここではその代表的な結果を用いて説明を行う。

(a) 繰り返し載荷の応力-歪関係

図3は、繰り返し載荷実験時の応力-歪線図を示している。応力が20MPa以上になると、体積歪の変化に非線形性が現れている。また、繰り返し載荷の進行に伴う残留歪の変化に着目すれば、1回目の除荷終了後が最も大きく、その後は徐々に飽和する傾向を示している。

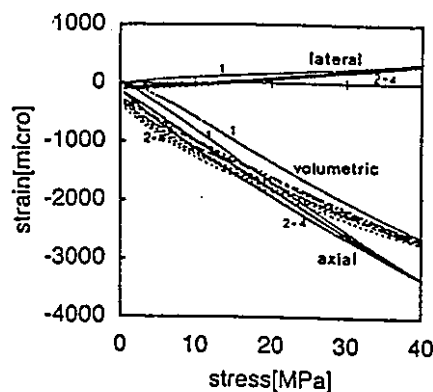


Fig.3 Stress-strain relations during cyclic loading

(b) 繰り返し載荷-除荷過程でのAE発生挙動

図4は、繰り返し載荷時におけるAE発生数（イベントカウント）と応力との関係を各サ

イクル毎に示している。AE発生パターンについてみると、1回目の載荷時においては載荷直後から多数のAEが発生しており、40MPa付近においては逆にその発生数が減少している。不連続性を呈する岩石の載荷1回目におけるAE発生パターンとして、載荷初期における多数のAEの発生は共通して認められた現象であった。2回目載荷以降については、載荷初期でのAEの発生は減少し、応力の増加に伴ってAE発生数が増加するという傾向を示している。

本実験では4回の繰り返し載荷-除荷を行ったが、40MPaの応力を繰り返し載荷したことによるカイザー効果は認められていない。これは、不連続面の載荷過程での挙動がAE発生に影響したこと、40MPaの応力を記憶するためのマイクロクラックが十分発達しなかったこと等によると考えられる。

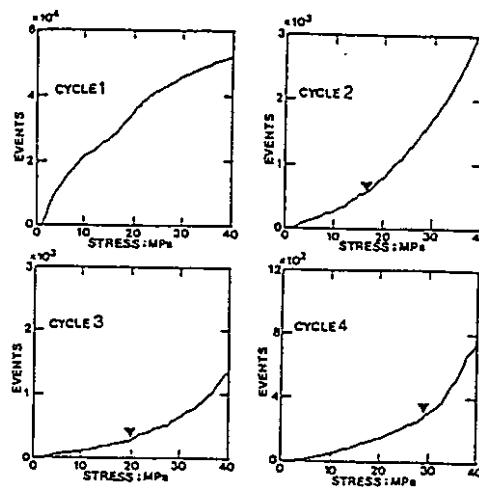


Fig.4 AE event counts history in loading

次に、各載荷サイクルでのAEイベント数の変化について示したものが図5である。発生総数は1回目の載荷時が最も多く、載荷サイクルの進行に伴って減少す

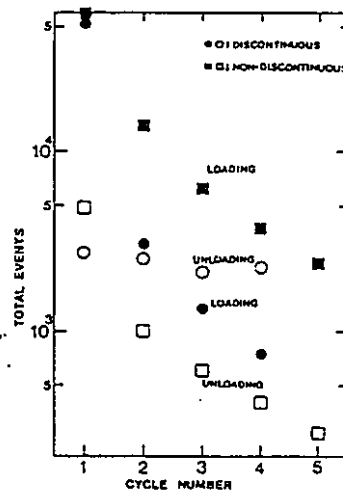


Fig.5 Change of cumulative events from cycle to cycle

る傾向が読み取れる。しかしながら、除荷時においては各除荷サイクルでのAEイベント総数に載荷時にみられるような大きな差は認められない。この結果は、同図に併せて示した不連続性を呈さない岩石試料の除荷時のAEイベント総数の変化が急激な減少を示していることとは対照的で、不連続面の挙動と密接に関連したものと考えられる。また、この結果から、不連続性岩盤においては応力緩和時においても多数のAEが発生することが推察される。図6は、各除荷サイクルのAEイベント数と応力との関係を示しているが、AE発生パターンの特徴としては、ある応力において急激にAEが増加し、その後沈静化するというパターンが各サイクルに共通している点である。AEの発生頻度が1イベント/秒以上に急増する応力に▼印を付けたが、1回目の除荷時においては、そのAE急増は除荷終了直前であるので明確ではないが、2回目以降の除荷サイクルにおいてAEが急増している応力が、載荷時のAE急増応力とよく一致している。つまり、繰り返し載荷過程でのその応力レベルを境界とした不連続面の挙動がAE発生に影響していることが推察される。

不連続岩石のAE発生を支配している不連続面の挙動に関するひとつの考え方としては、載荷過程でAEが急増する前までのステージでは不連続面の閉塞が発生し、それ以上の応力レベルでは新たな引張クラックの形成が発生してAEが急増する。また、除荷過程では、最初クラックが可逆的にせん断変形して引張クラックの閉塞が発生し、その後不連続面の開口が瞬間的に発生するためにAEが急増すると考えられる。

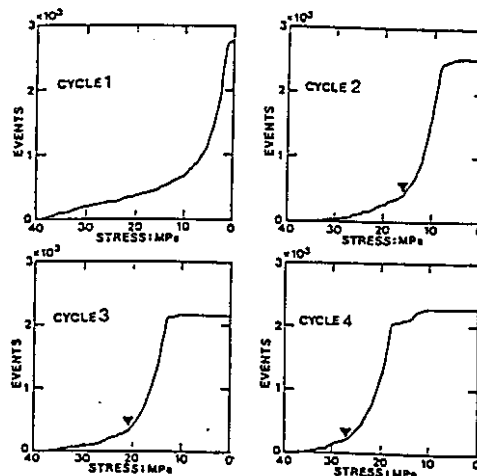


Fig.6 AE event count history in unloading

(c) AE源分布とのフラクタル構造

繰り返し載荷過程でのAE源分布を図7に示す。同図においては、緑廉石が脈石として介在しているが、X、Y及びZ方向から観て確認された不連続面の概略の位

置を実線で示している。1回目載荷時の結果をみると、AEは試料の上下端面付近の不連続面に沿った形態をとって分布している。すなわち、AEの発生が不連続面の挙動と密接に関係していることがこれより示されている。次に、2回目載荷以降のAE源分布をみると、AEの発生は沈静化しているものの、そのAE源分布は各サイクル毎に変化している様子が読み取れる。不連続面近傍でのAE集中域の形成からその集中域の外側にAE源の分布が移行し、それ以前の載荷サイクルでAE源の空白域となっていた領域を埋めるように発生していることが分かる。すなわち、このAE源分布の変化から、不連続岩石においては繰り返しサイクルの進行に伴って、不連続面を起点としてクラックが成長すること、更に発生するAEは不連続面の挙動を反映したものであることが推察される。

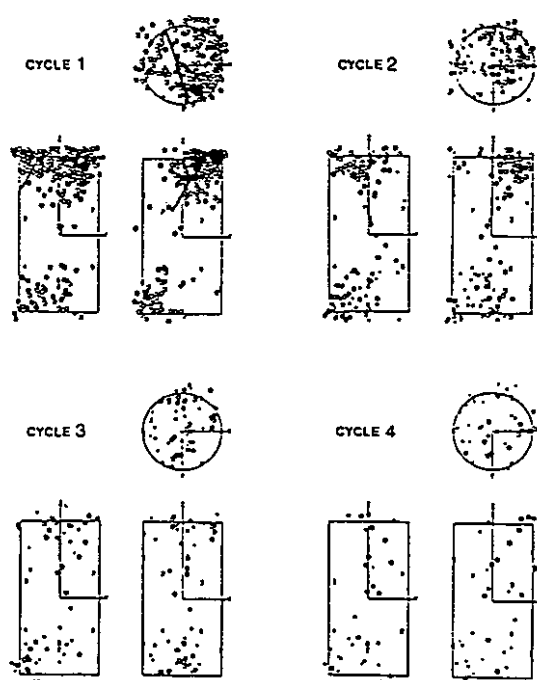


Fig.7 Variation of AE hypocenters' distribution during cyclic loading

自然界において様々なフラクタル構造が認められているが、地震の時系列変化、震源分布がフラクタルであることも報告されている [Kagan and Knopoff, 1980, 1981]。さらに、岩石、石炭等の地質材料の破壊試験時において発生するAE源の分布もまたフラクタル構造であることが報告されている [Hirata, T. et al., 1987; 瀬戸等, 1988; Kusunose et al., 1991; Seto et al., 1993]。

本実験で求められたAE源分布に対しても、フラクタル性について同様な検討を行ったが、まず、次式で定義される相関積分 $C(r)$ を求めた [Hirata, T. et al., 1987]。

$$C(r) = 2 \cdot N_r / N(N-1) \quad (1)$$

ここで、 N_r はAE源間の距離が r 以下のAE源ペアの数、 N は解析の対象となる総AE源数である。AE源決定精度と試料寸法との関係から、本実験においては r は2mmから32mmの範囲で検討を行った。もし、AE源分布がフラクタル構造である場合には、 $C(r)$ と r の間には次の関係が成立する。

$$C(r) \sim r^D \quad (2)$$

ここで、 D はフラクタル次元である。したがって、 $C(r)$ と r の関係が両対数グラフ上で直線関係を示せばその分布はフラクタルであり、直線の傾きがフラクタル次元となる。図8は、繰り返し载荷過程での1回目载荷時から4回目载荷時までのAE源分布における $C(r)$ と r の関係であるが、直線関係を示している。フラクタル次元の変化についてみると、繰り返し载荷回数 of 進行に伴って、2.18、2.28、2.42、2.83と増加している。すなわち、繰り返し载荷の進行に伴って、AE源分布

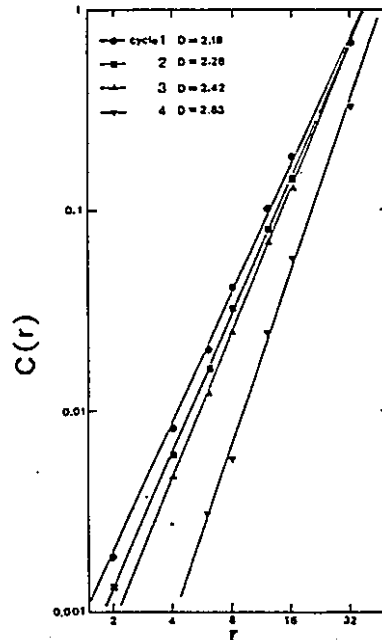


Fig.8 Correlation integral $C(r)$ vs distance r

が空間に一様なランダムな分布に変化していることを示している。1回目载荷時には、先に述べたようにAE源が不連続面に集中して発生したためにフラクタル次元は2に近い値となるが、その後はAE源の分布が不連続面と関連しなくなるに伴ってフラクタル次元は増加している。岩石、石炭の破壊実験において、破壊の進行に合わせてAE源が破壊発生箇所に集中し、AE源分布のフラクタル次元が低下することが報告されているが [Hirata, T. et al., 1987; 瀬戸等, 1988]、ここに示した低応力レベルでの不連続岩石における繰り返し载荷実験では、最初不連続面にAE源が集中し、フラクタル次元も従来報告されている破壊実験では [Hirata, T. et al., 1987; 瀬戸等, 1988] 破壊直前に相当するような2に近い値を示す

が、その後は破壊の発生箇所が不連続面から拡散していくに伴って逆に構造としては安定する方向に移行していることが推察される。

(d) 不連続岩石の非弾性挙動とAE

岩石内でのAEの発生が岩石の非弾性体積歪の進行と関係していることは知られている [例えば、Scholz, C.H. 1968; Lei et al. 1992]。本研究では、応力-体積ひずみの関係において、線形に変化している範囲を最小自乗法によって決定した後、その線形性からずれる体積ひずみ量、すなわち非線形体積ひずみを求めAE発生との関係を検討した。

図9は、本繰り返し実験における载荷1回目と载荷2回目の非線形体積ひずみとAEイベント数との関係を示している。载荷1回目においては、特に载荷初期の段階で非弾性体積ひずみの増加に関係なくAEが多数発生していることが分かる。このことから、1回目载荷時におけるAEの発生は不連続面の閉塞、滑り等の不連続面の挙動に関係したものであることが推察されるが、このことは先に示したAE源分布が不連続面近傍に集中した結果と調和的である。一方、载荷2回目については、非弾性体積ひずみの増加とAE発生との関係が線形関係にあり、発生したAEの80%以上が非弾性体積歪の増加に起因していることが分かる。すなわち、载荷2回目载荷においては、新しいクラックの発生による非弾性挙動がAE発生の主な原因と推察できるが、このことは2回目载荷時のAE源分布が不連続面の外側の領域に拡大していることと調和的である。なお、载荷3回目以降についても载荷2回目と同様な関係があることを確認している。

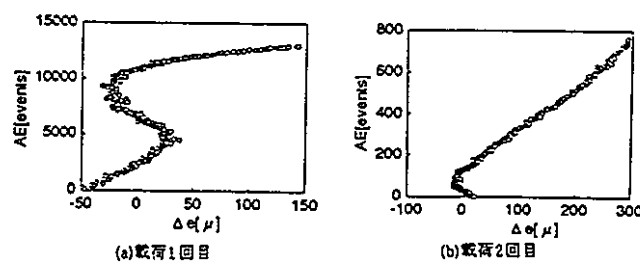


Fig.9 Dilatant strain vs cumulative AE events

図10は、比較のために同様な载荷パターンで行った稲田花崗岩の繰り返し载荷実験時の载荷1回目と2回目の非弾性体積ひずみと累積AE発生数との関係を示している。累積AE発生数は非弾性体積ひずみの増加に伴って増加していることが、载荷1回目と2回目において共に認められる。また、図11は、稲田花崗岩の繰り返し载荷実験時におけるAE源分布図であるが、図7に示した不連続岩石のAE源分布とは異なり、特定箇所への集中傾向は認められない。

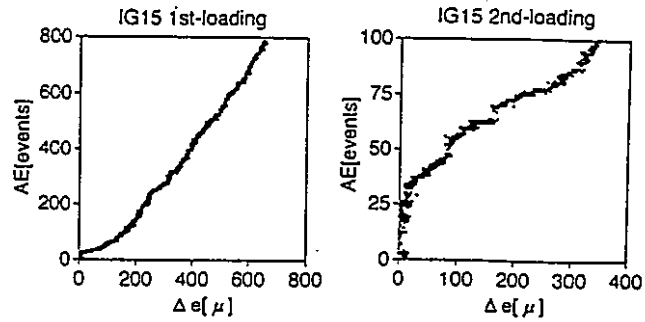


Fig.10 Dilatant strain vs. cumulative AE events
(Inada granite)

(4) おわりに

不連続岩石を用いた低応力レベル（一軸圧縮強度の約20%の応力レベル）での繰り返し載荷実験をAE計測と組み合わせて行い、不連続岩石において発生するAEの挙動をAE源分布、非弾性体積ひずみとの関係等から検討した。

その結果、

①不連続岩石の除荷過程でのAE発生数は繰り返しサイクルの進行に依存しない可能性があることが示された。

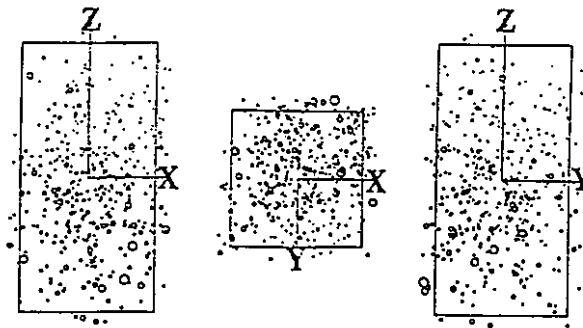


Fig.11 Distribution of AE hypocenters in granite

②載荷－除荷過程でのAE急増点に着目すると、2回目載荷以降では、同一サイクルにおいてはそのAE急増応力がほぼ一致することが認められ、不連続面の開閉挙動がAEの発生に反映していることが推察された。

③岩石の有する不連続面はAE発生挙動に大きく影響し、繰り返し載荷の1回目載荷時においてはその傾向が顕著で、AE源の分布は不連続面近傍に集中したものになる。しかし、2回目載荷以降はAE源は徐々に不連続面近傍から拡散する傾向

があることを示した。

④ AE源分布はフラクタル構造であり、そのフラクタル次元は繰り返し载荷の進行に合わせて2に近い値から3に近い値まで増加することを示した。

⑤ また、不連続岩石におけるAE発生挙動は、1回目载荷時は、非弾性体積ひずみと線形関係を示さないが、2回目以降の繰り返し载荷においては非弾性体積ひずみの増加と線形的な関係を示す。

4. 2 動燃事業団の研究成果

岩盤中に立坑や水平坑道などの空洞を掘削すると、空洞周辺の岩盤の変形性や透水性といった力学的・水理学的特性と、応力や間隙水圧といった力学的・水理学的条件が変化すると考えられる。このような力学的・水理学的な特性・条件が変化した空洞周辺の岩盤の領域（以下、掘削影響領域という）は、地下施設の設計・建設や力学的安定性等安全性の評価において、考慮すべき重要な要素のひとつと考えられる。

動燃事業団では、地層科学研究の一環として昭和62年度以来、岐阜県土岐市の東濃鉱山において水平坑道や立坑を掘削し、掘削影響領域の力学的・水理的特性とその広がりや、掘削影響領域の発生に関係する要因の研究などを、掘削影響研究として実施してきた。その結果、坑道掘削に発破工法を用いた場合には掘削影響領域が坑道周辺の約1mの範囲で存在すること、掘削影響領域は主にき裂の発生と変化・応力の再配分・不飽和領域の発生に伴い発生していると考えられることが明らかになった。しかし、このような変化は主に発破損傷に起因していると考えられたため、機械による掘削影響試験を行い、この結果とこれまでの発破掘削による掘削影響試験の結果を比較することとした。

機械による掘削影響試験の研究対象としている場所は、東濃鉱山の北延N A T M坑道である（図1参照）。北延N A T M坑道は、新第三紀堆積岩である瑞浪層群土岐夾炭累層下部層に掘削されており、地表下およそ135mに位置する。北延N A T M坑道の詳細図を図2に示す。平成4年度に計測用の坑道（以下、計測坑道という）を15m掘削した。平成5および6年度に、計測坑道から平成7年度に機械により掘削を計画している坑道（以下、試験坑道という）に向けて計測用の試錐を行い、各種の事前調査を実施する。

ここでは、事前調査結果のうち、初期応力測定について報告する。

4. 2. 1 坑道掘削影響試験 事前調査結果（初期応力測定）

(1) 目的

坑道掘削に伴う周辺岩盤への力学的影響を評価する上で重要な因子である坑道掘削前の周辺岩盤の三次元初期応力状態を把握するため、応力解放法（電力中央研究所方式8成分ひずみ計埋設法）及びA E（Acoustic Emission；固体材料が破壊するとき、蓄積された弾性エネルギーが急激に解放されることで発生する音波¹⁾）法で三次元初期応力の測定を実施した。応力解放法は、水平ボーリングを3本削孔し、各孔に1点、合計3点測定を行い、A E法は応力解放法で削孔されたボーリングコアを用いて、1点測定を行った。

(2) 測定方法

(a) 方法概要

測定方法は、応力解放法及びA E法を用いた。各方法の概要を以下に示す。

1) 応力解放法

応力解放法（埋設法）は、測定位置にひずみ計を埋設し、大口径ボーリングによってひずみ計を含めたコアを岩盤から切り離す（オーバーコアリング）ことで応力を解放させ、

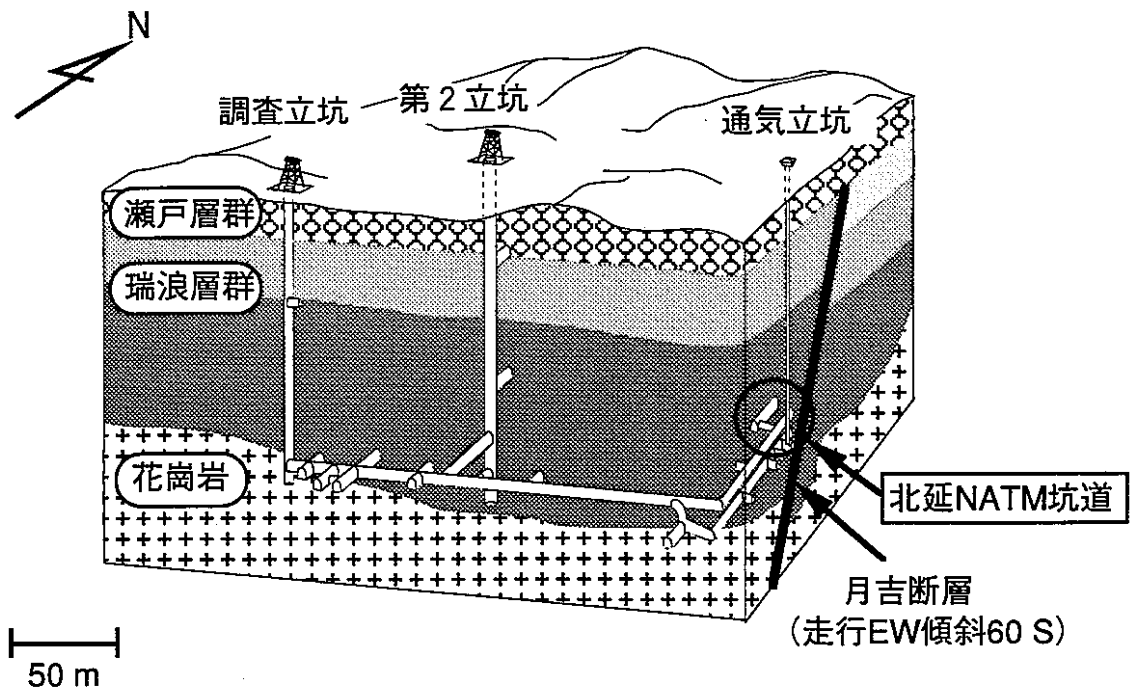


図1 東濃鉾山の概要図

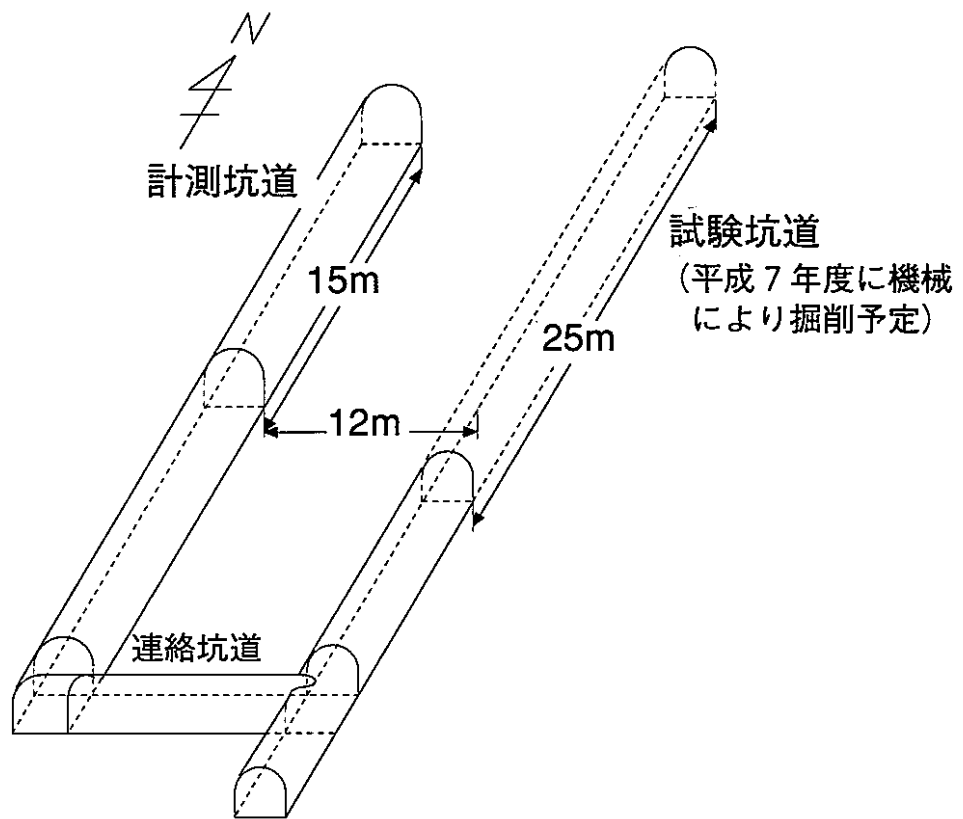


図2 北延NATM坑道

その時のひずみ変化を測定することにより応力を算定する方法である。この方法は、岩盤を弾性体と仮定し、応力解放時のひずみ変化から解放前の応力、すなわち岩盤の初期応力を算定する。

ひずみ計は、電力中央研究所で開発された8成分ひずみ計(図3参照)を用いた。8成分ひずみ計は、1点の計測で三次元応力の算定が出来るように孔径方向に4方向、斜め方向に4方向にひずみゲージが配置されている。

計測点に口径46mmのボーリング孔を削孔して、ひずみ計を挿入し、モルタルを充填してひずみ計を岩盤に固定する。このひずみ計を含んだ岩盤を口径216mmの大口径ボーリングでオーバーコアリングを行うことで応力を解放させ、その時の解放ひずみを測定する。解放ひずみを応力の値に換算することで、岩盤の三次元応力を算定する。測定された解放ひずみは岩盤の弾性係数のみでなく、充填モルタルの弾性係数、ボーリング孔周辺の応力集中等の影響を受けている。解放ひずみを応力の値に換算するには、これらの影響を包含したひずみ感度係数(埋設されたひずみ計での解放ひずみを、それに対応する応力に換算する係数)を求める。ひずみ感度係数は、ひずみ計を埋設した状態で回収された大口径の岩石コアを用いて、大型の三軸試験装置(図4)によって、載荷荷重に対する各ゲージのひずみを測定することで求める。

2) A E法

A E法は、「履歴荷重を受けた材料に載荷する場合、先行荷重値を越えるまではほとんどA Eは発生しない」というA Eのカイザー効果を利用して、初期応力を求める方法である。すなわち、岩石コアに載荷し、連続的なA Eが発生し始めた点での応力値をその岩石コアから評価される初期応力値とする。

原位置から採取された岩石コアより測定用供試体(直径30mm、高さ60mm)を作製し、A E計測センサーを取り付け、一軸圧縮試験機で載荷し、A Eを計測する。岩石コアは、応力解放法で削孔された口径218mmのボーリングコアを用いた。また1供試体から測定できる応力は1方向のみであること、三次元の応力を算定するためには異なる6方向の応力が必要とすることから、岩石コアから異なる6方向(東西、南北及び鉛直の直交する3方向、その3方向のうち各2方向に45°の角度をなす3方向)の供試体を作製・測定し、それらより三次元の応力を算定した。

なお、カイザー効果の時間依存性(カイザー効果より推定される応力は、応力解放後の時間経過とともに小さくなること。今回測定を行った岩相では応力解放後3日以内に測定を行えば、推定応力は先行荷重に一致し、4日以降になると、推定応力が先行荷重より小さくなることが既存の研究³⁾により明らかになっている。)があることから、コア採取から試験終了まで3日以内で実施した。

測定装置は、A E計測器、マイクロコンピュータ及び載荷試験機からなる。このうち、A E計測器はトランスデューサ(A Eセンサー)、アンプ、カウンタ等からなる(図5参照)。A E計数方法は、1つのA E信号波形を包絡線検波し計数するイベント計数法を用いた。またA E計測では雑音の除去、特に供試体と載荷板の接触部から発生する雑音の除去が重要であるが、本測定では独立気泡を有したスポンジパッドを供試体と載荷板の間に挿入することで雑音を除去した。

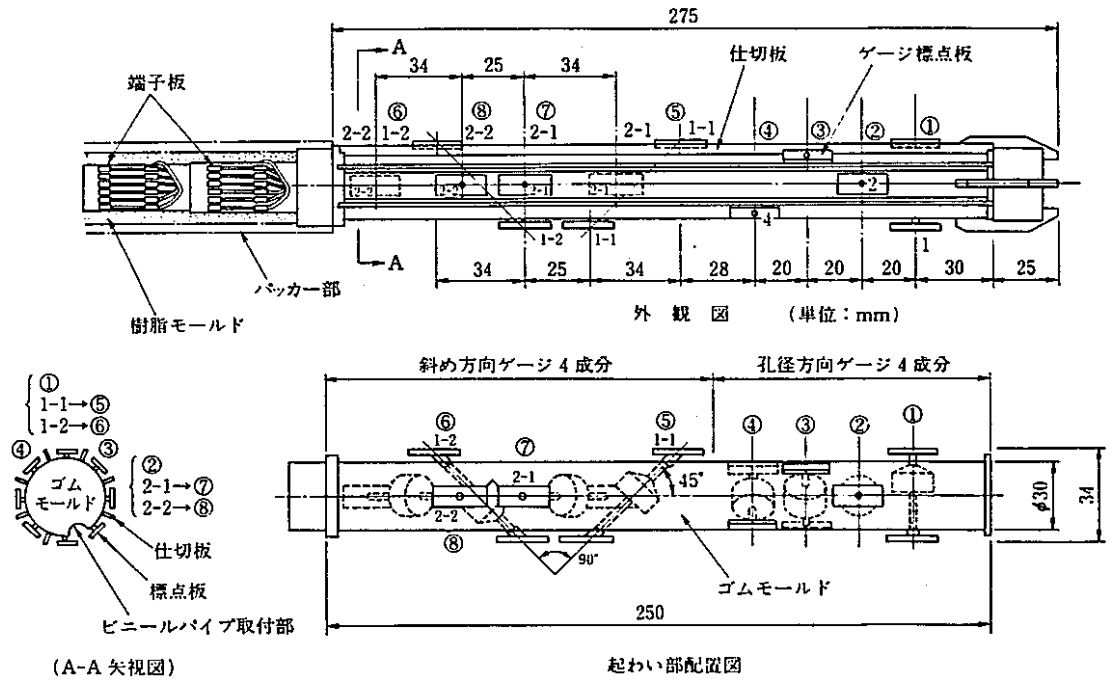


図3 8成分ひずみ計の概要¹⁾

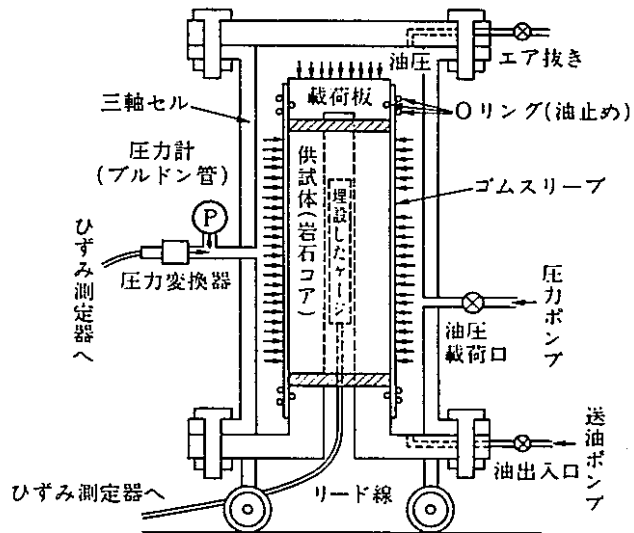


図4 大型三軸試験機の概要¹⁾

(b) 測定位置

初期応力測定 of 測定位置を図 6 に示す。応力解放法については、計測坑道より水平ボーリングを 3 孔削孔し、各孔について 1 点測定し、合計で 3 点の測定を行った。測定点を図 9.4 に示すように測定点 1、2 及び 3 とする。また周辺の地質状況を調査するため、測定ボーリング孔の削孔前に地質調査用ボーリングを 2 孔を削孔した。

A E 法は、MS - 3 孔のボーリングコア (口径 218mm) の、計測坑道より 5 ~ 5.4 m の部分を用いた。コアより異なる 6 方向の供試体を各々 3 点以上作製し測定した。これ以外に、応力解放法で測定した地点の近傍から採取したコアを用いて A E 法の測定を試みたが、コアの固結度が低く供試体の作製が困難なものが多く、また供試体を作製できたものでもカイザー効果が不明確であったため、初期応力は算定できなかった。

(c) 測定位置の地質

ボーリングコア観察などから推定された測定位置周辺の地質図を図 7 に示す。泥岩、砂岩及び礫岩が分布している。泥岩及び砂岩は固結度が比較的高いが、礫岩は固結度が低い。特に MS - 1 孔の 8 ~ 9 m などは非常に脆弱である。

測定は、試験坑道の近傍で実施することを予定していたが、計測坑道壁より 7 m 以深では、固結度の低い細礫礫岩 ~ 粗粒砂岩が予想され、オーバーコアリング時にコアが破断し測定ができない可能性があったため、測定点 1 は 6 m 付近で測定した。測定点 1 の測定後、計測坑道壁より 7 m 以深でボーリングを実施したところ、一部を除き測定可能と判断できたため、測定点 2 及び 3 については掘削予定坑道の近傍で実施した。

A E 法に用いたコアの地質は、泥岩 ~ 砂岩で、比較的固結度が高かった。

(3) 結果

(a) 応力解放法

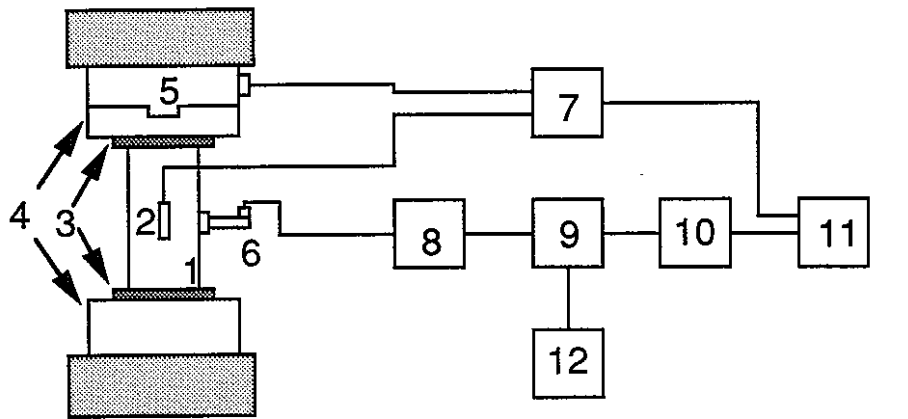
算定された主応力の値及び方向を図 8 に示す。

応力算定において、オーバーコアリング時のひずみ変化が異常で、岩盤を弾性体とする仮定に反するような挙動を起こしたゲージの値を除外して行ったが、測定点 2 において 2 点除外したため三次元解析が不可能になった。そのため、測定点 2 の応力算定では測定位置が最も近く、面内ひずみ分布図 (直交座標面に各ゲージで測定されたひずみをプロットした分布図) が類似している測定点 3 のデータを合わせて、三次元応力を算定し、測定点 2 での応力とした。

主応力の値にばらつきが見られるが、最大主応力は 2 MPa 以下である。最大主応力と最小主応力の比は 1.2 ~ 2 倍で、測定点 1 はほぼ等圧状態であるが測定点 3 ではやや異方的な状態を示している。また各測定点の鉛直応力は、土被り圧 (岩の比重を 1.8 とすると約 2.4 MPa) に比べて小さく、土被り圧の 0.6 ~ 0.7 倍程度である。

(b) A E 法

異なる 6 方向の供試体 (各方向 3 ~ 6 点作製) から、各方向の応力の平均値を求め、当該地点の三次元主応力を算定した。A E 法によって算定された三次元主応力の値及び方向を図 8 に示す。



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

図5 AE測定器の概略

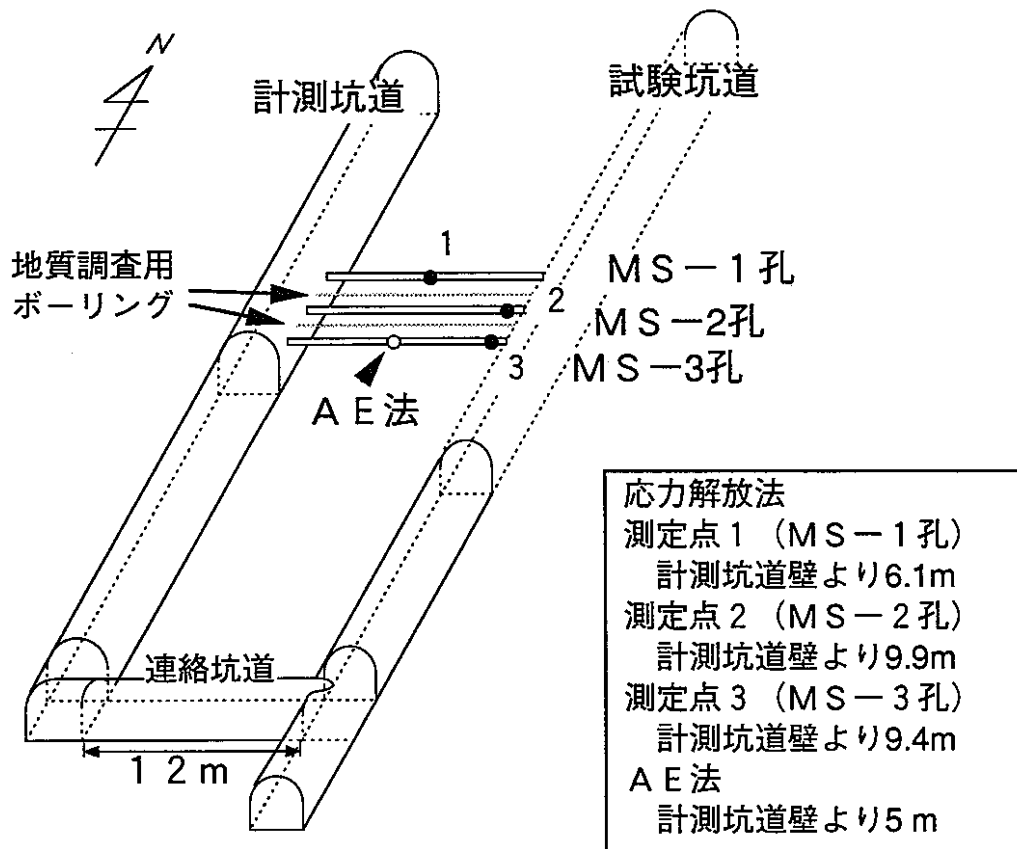


図6 測定点の配置

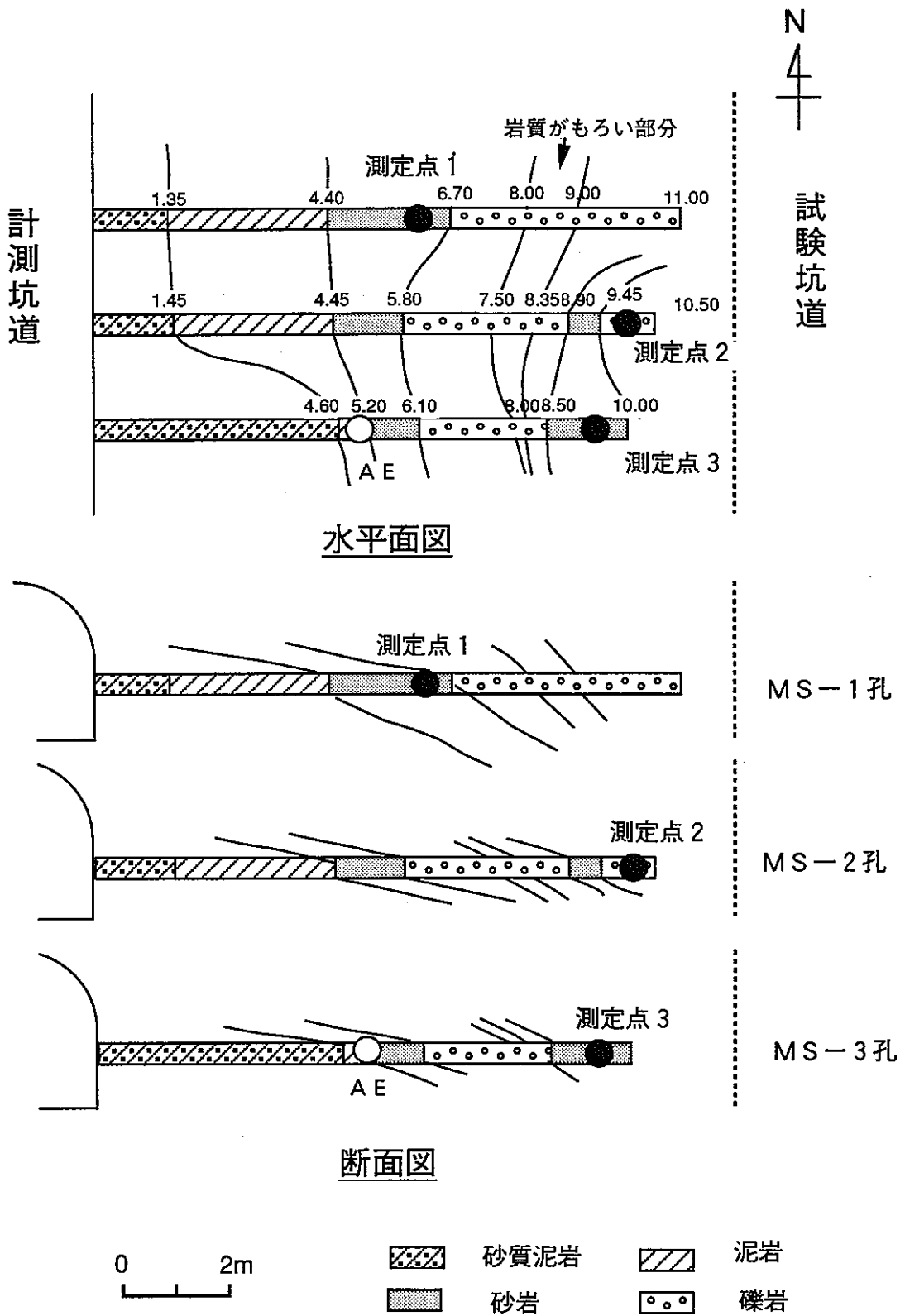


図7 測定点周辺の推定地質図

測定点		主応力値 (MPa)			σ_1 / σ_3	鉛直応力 σ_z (MPa)
		σ_1	σ_2	σ_3		
応力解放法	1	1.52	1.34	1.28	1.2	1.5
	2 *	1.76	1.53	1.25	1.4	1.7
	3	1.69	1.09	0.87	1.9	1.4
AE法 **		3.49	2.23	1.54	2.3	1.9

*) 測定点2および3のデータを用いた

(土被り圧 : 2.4MPa)

**) MS-3孔の5~5.4mで計測

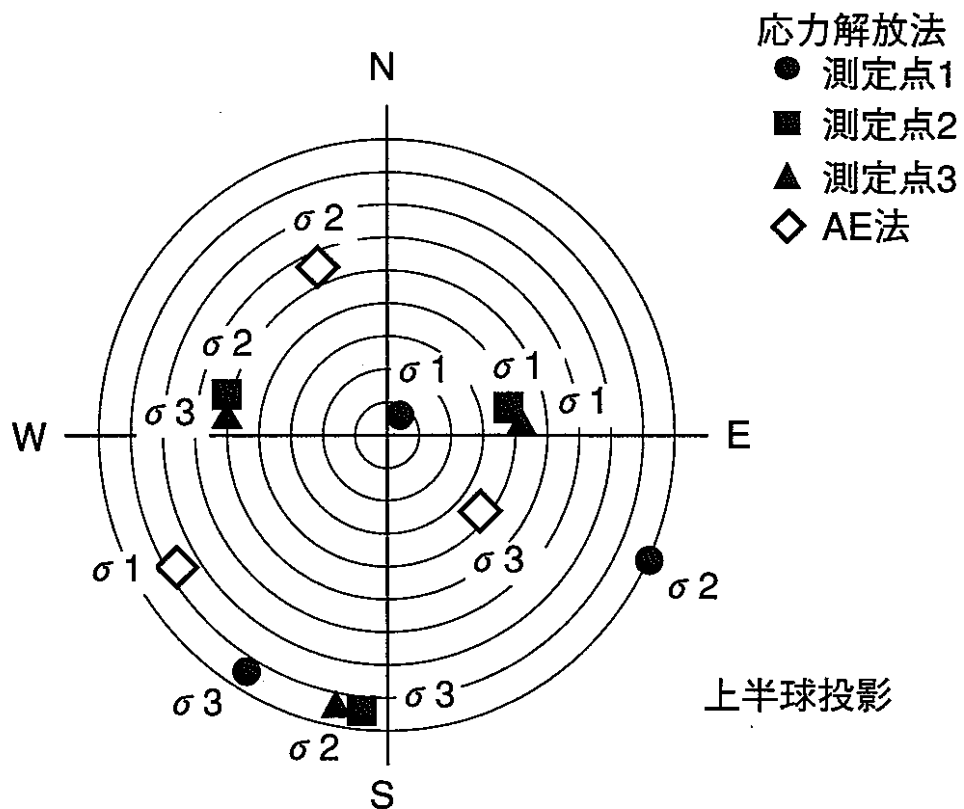


図8 初期応力測定結果

測定結果より、水平方向の応力成分が鉛直方向の応力成分の 1.2~1.7 倍で、また鉛直方向の応力成分は土被り圧（約2.4MPa）に比べて小さく、土被り圧の 0.8倍程度である。

最大主応力値は、土被り圧の約 1.6倍であり、西南西から傾斜15° 程度で作用している。最大主応力と最小主応力の比は 2.3となり、異方的な応力状態にあると考えられる。

(4) 考察

(a) 岩盤の不均質性の影響の検討

応力解放法で測定された主応力の値のばらつきの原因として、石田ら²⁾が指摘している岩盤の不均質性の影響（岩盤の剛性が部分的に異なる場合、剛性が高い部分の応力が大きくなること）について検討を行った。検討方法は、石田らの研究に準拠して、岩盤の剛性を反映する値として、ひずみ感度係数を用いた。

各測定点でのひずみ感度係数の平均値を算出（測定点2については、応力算定に用いた測定点2及び3のすべての感度係数の平均値を算出）して、応力値とプロットした。

最大主応力とひずみ感度係数の間では良い正の相関性がみられ（図9）、岩盤の剛性が高い部分ほど大きな応力値となっている。このことより最大主応力値のばらつきは、岩盤の剛性の不均質性が影響していると考えられる。

(b) 応力解放法とA E法の比較

応力解放法及びA E法で算定された応力値を比較した。

最大主応力の値では、A E法で算定された値が3.5MPaで、応力解放法で算定された値の約2倍となった。また中間及び最小主応力の値では、A E法での値が応力解放法での値の1.2~2.0倍で大きな値となった。最大主応力と最小主応力の比は、応力解放法では2.0以内であるが、A E法では2.3とより異方的な応力状態を示した。また鉛直方向の応力は、A E法での値がやや大きい値を示しているが、いずれも土被り圧（約2.4MPa）よりも小さい。最大主応力の方向は、応力解放法による方向は鉛直から東に40°、A E法による方向は、西南西に傾斜15°と異なっているが、水平面での最大主応力方向は、ほぼ東西から東北東~西南西の方向を示している。

A E法で測定された値が大きいことについて、A E法の測定が比較的固結度の高く、剛性が高いと考えられる位置で行われたことから、前述の岩盤の不均質性が影響していることが考えられる。

(5) まとめ

岩盤の三次元初期応力状態を把握するため、応力解放法（8成分ひずみ計埋設法）及びA E法によって、初期応力を測定した。応力解放法については3点、A E法については1点の測定を行った。応力測定結果として、以下のとおりである。

- ・最大主応力は、2 MPa 程度である。
- ・最大主応力と最小主応力の比は、2 倍以内である。
- ・鉛直成分の応力は、土被り圧に比べて小さく、土被り圧の0.6 ~0.8 倍程度である。
- ・最大主応力の値に差が見られるのは岩盤の剛性の不均質性が影響していると考えられる。

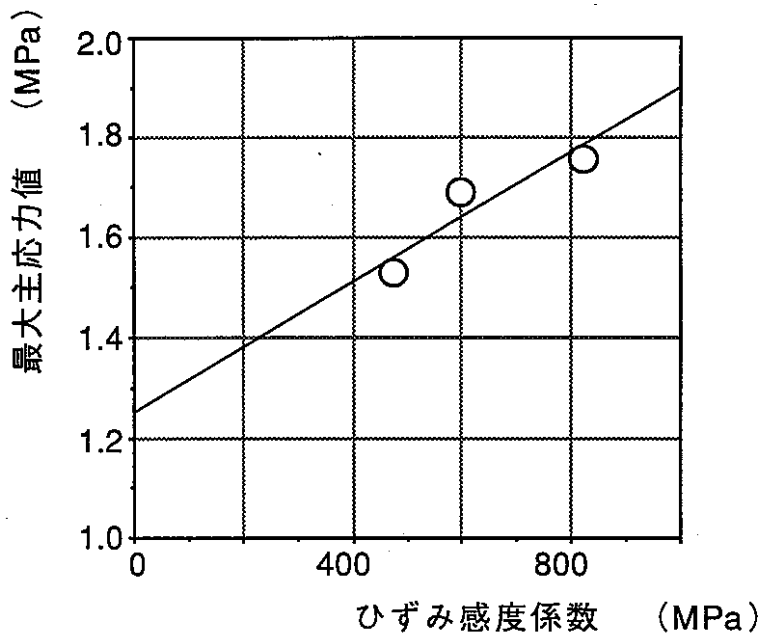


図9 岩盤の剛性と応力（最大主応力）

参考文献

- 1) 初期地圧測定法の現状と課題(1992), 土木学会
- 2) 石田毅, 金川忠(1987): 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, 地震, Vol. 40, No. 2, pp329-339
- 3) 畑浩二、木梨秀雄、杉原弘造、佐藤稔紀(1994): 新第三紀堆積岩におけるカイザー効果の時間依存性, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp235 ~240

5. 総合評価

共同研究によって、以下のような成果が得られ、研究課題が抽出された。

(1) 精密起爆による弾性波トモグラフィの検討

精密雷管による起爆は、瞬発雷管による起爆に比べ起爆遅れがほとんど無く（精密起爆雷管の場合は $1\mu\text{s}$ 以内、地震探査用瞬発雷管の場合は数百 μs ）、発振点から受振点までの走時時間を正確に計測できることから、正確な弾性波速度を計測できる。また瞬発雷管を用いた場合、起爆遅れの影響を小さくし発振の時間を性格に計測するため、雷管にイオン探針等を取り付ける処理が必要となるが、精密起爆雷管を用いた場合は起爆遅れが無いことから、その処理が不要となり、現場での準備期間を短縮できる。

アクリル板による室内実験からき裂を弾性波速度の低下領域として捉えることが確認され、また現場実験から断層やトンネル周辺の緩み領域についても弾性波速度の低下領域として捉えることができた。

これらより、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と考えられる。

しかし、精密起爆雷管を用いたことによる計測上の利点（より正確な弾性波速度を計測できる）については、今回の研究では原位置における瞬発雷管を用いたトモグラフィ調査との比較が実施されていないため、確認できていない。今後は、精密起爆雷管および瞬発雷管を用いた原位置でのトモグラフィ調査の比較実験を行い、原位置の弾性波速度分布をどの程度正確に把握できるかを確認することが課題である。

(2) トンネル掘削に伴う比抵抗の変化

現場における比抵抗トモグラフィ調査によって、多量の滴水が見られ地下水が多く分布していると考えられる破碎帯や断層を比抵抗の低い領域として捉えることができた。また、トンネル掘削による地下水分布の変化についても、比抵抗分布の変化によって推定できることが可能と考えられる。

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を捉え、不飽和領域を把握する手法として有効であると考えられる。

しかし、含水率と比抵抗値の関連や実際の比抵抗をトモグラフィ調査でどの程度まで性格に把握できるか等について、まだ不明である。今後は、比抵抗が既知の材料で構成されたブロック等を用いた室内基礎実験等を実施して、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、トモグラフィ調査でどの程度の精度で比抵抗分布が把握できるかの検討をしていくことが課題である。

(3) 不連続岩盤のA E発生挙動の検討

今回の研究では、繰り返し載荷時においてA Eは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、不連続面を起点にクラックが進展していくことが推察された。また、非弾性体積ひずみとA Eの関係について、載荷1回目の載荷初期に体積ひずみ増加に係わりなくA Eが多数発生していることから、不連続面での閉塞によってA Eが発生していると考えられる。

これらより、不連続面の閉塞等の挙動がA E発生に関係し、不連続面を起点にA Eが発生し、拡散していくので、A E計測により掘削に伴い発生するき裂の分布を把握するためには、既存の不連続面の分布を把握する必要があることが明らかとなった。

(4) 坑道掘削影響試験の事前調査

応力解放法とA E法による計測により、最大主応力が2 MPa程度で、最大主応力と最小主応力の比は2倍以内、鉛直成分の応力は土被り圧に比べて小さいという結果が得られた。但し、計測された主応力は、計測位置が近接していたにも関わらず、ばらつきが見られた。原因として、岩盤の不均質性の影響、特に剛性の不均質性が影響していると考えられた。

6. 今後の方針

今回の共同研究の成果を踏まえて、今後の方針について以下に示す。

- ・弾性波トモグラフィ調査については、精密起爆雷管および瞬発雷管を用いた原位置でのトモグラフィ調査の比較実験を行い、原位置の弾性波速度分布をどの程度性格に把握できるかを確認しておく。東濃鉾山の掘削影響試験での実施を検討する。
- ・比抵抗トモグラフィ調査については、比抵抗が既知の材料で構成されたブロック等を用いて、比抵抗トモグラフィ調査の精度や感度を確認する基礎実験を実施し、その成果に基づいて現場試験を実施し、計測手法の改良を進める。

卷末資料

共同研究基本計畫書

掘削に伴う物性変化に関する

評価手法の開発

— 資源環境技術総合研究所との共同研究 —

(共同研究基本計画書)

1. 件名

掘削に伴う物性変化に関する評価手法の開発

2. 目的

〔経緯〕

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、中部事業所において大学・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、岩盤の变形やき裂の発生・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A E（Acoustic Emission）原位置計測試験と、A E計測および比抵抗トモグラフィ調査に関する室内基礎試験による試験研究について、平成元年度より3ヵ年計画で共同研究を実施した。

しかし、この共同研究による物性変化のメカニズムの把握は詳細にはできていないため、両機関の知見の活用により効率的な研究の進捗を図り、坑道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、平成4年度より3ヵ年計画で本共同研究を開始した。しかし、動燃事業団の坑道掘削影響試験の予定が変更になり、室内基礎試験の原位置への展開が本共同研究期間内では難しくなった。このため、共同研究基本計画書の見直しを行い、坑道掘削に伴う物性変化に関する評価手法の開発に関する基礎試験および坑道掘削影響試験の事前調査を本共同研究期間内に実施することとする。

〔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。

したがって、両機関の知見の活用により効率的な研究の進捗を図り、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、本共同研究を継続実施する。

3. 実施内容

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し、2次元の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可能性があると考え、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。

弾性波トモグラフィ調査は弾性波を発振させ、弾性波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を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のある手法としてとりあげる。

A E計測は、岩盤中に発生するき裂を把握するための手法として研究を継続するとともに、岩盤の力学的挙動に重要な役割をはたす不連続面とA E発生分布に関する基礎実験を行う。

また中部事業所東濃鉱山の北延N A T M坑道において実施する掘削影響試験については、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する。そのうち、本研究では周辺岩盤の初期応力の測定および比抵抗トモグラフィ調査を実施する。

岩盤の応力は、岩盤の変形や破壊等の力学的挙動を把握する上で重要な因子であり、坑道掘削によって坑道周辺の応力が変化し（応力再配分）、物性が変化することが考えられる。この応力再配分について検討を行うためには、掘削前の初期応力を把握しておく必要がある。そのため、周辺岩盤の初期応力の測定を実施する。

また、比抵抗トモグラフィ調査を実施し、掘削前の比抵抗分布を把握する。
実施した研究概要を以下に述べる。

(1) 研究内容

①弾性波トモグラフィ調査技術の検討

弾性波トモグラフィ調査は過去の掘削影響試験でも実施され、掘削坑道周辺に弾性波速度の低下域を捉えているので、弾性波トモグラフィ調査の高度化を図ることとした。モデル実験によってき裂を弾性波速度の低下部分として捉えることができるか検討する。また、従来用いられている瞬発電気雷管の代わりに、資環研で開発された精密起爆雷管を用いた弾性波トモグラフィ調査によって弾性波速度分布をより精度よく把握できるか検討する。精密起爆雷管は、瞬発雷管に比べ起爆遅れがほとんど無く、弾性波の発振を正確に捉えることができるため、弾性波速度がより正確に計測できる可能性がある。

実験は、アクリル板を用いたモデル実験および現場計測実験を実施する。モデル実験では、き裂を発生させたアクリル板を用い、精密起爆による弾性波トモグラフィ調査によってき裂の把握が可能かを検討する。現場計測実験では、トンネル等の周辺岩盤で調査を実施し、坑道周辺の緩み領域や断層を把握できるか検討する。

②比抵抗トモグラフィ調査技術の検討

本研究では、トンネル掘削現場等での比抵抗トモグラフィ調査試験およびブロックを用いた室内基礎試験を実施する。

現場調査試験は、トンネル掘削現場において比抵抗分布を計測することにより、現場での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把握できるかを検討する。またトンネル掘削前および掘削中の複数の計測を行うことによって、トンネル掘削の進行に伴う周辺岩盤での比抵抗分布の変化を検討する。

室内基礎試験では、モルタルブロックに比抵抗が異なる物質を設置し、厚さ、方向等変化をさせて比抵抗分布を計測し、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、調査の精度や感度を確認する。

③A E計測技術の検討

岩盤等は荷重を受けると微細なき裂（マイクロクラック）が発生し、それに伴いA Eが発生する。このA Eを計測することで、掘削に伴い発生するき裂の分布を把握できると考えられる。一方、実際のA E計測において、新たにマイクロクラックが発生する際のA Eだけでなく、岩盤中の大小様々な既存の不連続面の開閉挙動等によって発生するA Eも計測されると考えられる。このため、掘削に伴うき裂分布を把握するには、岩盤中の不連続面におけるA Eの発生について検討しておく必要があるが、このような基礎的研究は少ない。

本研究では、不連続面を有する岩石試料を用いて、繰り返し載荷実験とA E計測を組み合わせた室内実験を実施し、繰り返し載荷時の不連続面でのA E発生分布について検討する。

④坑道掘削影響試験の事前調査

中部事業所東濃鉦山における機械掘削による影響試験の事前調査として、坑道掘削前の周辺岩盤の物性を把握するため、初期応力の測定および比抵抗トモグラフィ調査を実施する。

初期応力の測定は、応力解放法（8成分ひずみ計埋設法）およびA E法を用いる。

また、比抵抗トモグラフィ調査を実施し、比抵抗分布によって岩盤中の地下水分布の把握できるかを検討する。

⑤総合評価

- ・弾性波トモグラフィについて、室内試験および現場計測試験における結果から岩盤中のき裂分布の把握する手法としての適用性を評価し、精密起爆を使用することによる手法の精度の向上を評価する。
- ・比抵抗トモグラフィについて、現場計測試験により岩盤中の地下水分布を把握する手法としての適用性を評価する。また室内実験における結果から、調査による比抵抗分布の再現性等を評価する。
- ・A E計測について、不連続面でのA E発生分布を捉えることで、不連続面でのき裂発生について把握する。

- ・事前調査により掘削試験前の岩盤の物性、応力等を把握する。

(2) 共同研究分担

上記の研究にあたっては、両機関の相互の知見および経験を基に、適切な役割分担のもとに実施するものとする。

資環研は、①弾性波トモグラフィ調査技術の検討、②比抵抗トモグラフィ調査技術の検討、及び③A E計測技術の検討、に係わる室内実験および原位置試験を実施する。動燃事業団は、中部事業所東濃鉾山の北延N A T M坑道で掘削影響試験の事前調査を実施する。また、両機関で研究成果について総合評価を行う。

共同研究の分担を次表に示す。

研究項目	資環研	動燃
弾性波トモグラフィ調査技術の検討	○	
比抵抗トモグラフィ調査技術の検討	○	
A E計測技術の検討	○	
坑道掘削影響試験の事前調査		○
総合評価	○	○

4. 得られる成果とその反映

資環研との共同研究により、

- ①弾性波トモグラフィ調査技術の適用性および改良による精度の向上
- ②比抵抗トモグラフィ調査技術の適用性および精度に関する評価
- ③A E計測に係わる現象の把握
- ④坑道掘削前の岩盤の物性等の把握

を得ることができる。以上の成果は、

- ①坑道掘削に係わる物性変化の計測手法の確立
- ②坑道掘削に係わる物性変化の把握と評価

へと反映される。

5. スケジュール

共同研究は次表に従って実施する。

研究項目	4年度	5年度	6年度
弾性波トモグラフィ調査技術の検討	○	○	
比抵抗トモグラフィ調査技術の検討		○	○
A E計測技術の検討	○	○	
坑道掘削影響試験の事前調査		○	○
総合評価		○	○

原位置試験 基礎試験

事前調査

6. 成果報告等

- (1) 両者の意思疎通を綿密にし効率的な研究の展開を図るべく、研究の進捗について毎月月報を作成し担当者に送付する。
- (2) 成果報告については、中間報告および成果報告から構成され、年度毎に実施するものとする。開催日等に関する詳細な事項については、両者協議の上決定する。