



# 超深地層研究所計画（第1段階）における岩盤力学調査研究

中間 茂雄 山田 淳夫 青木 俊朗 佐藤 稔紀

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所

Rock Mechanical Investigations in the Mizunami Underground Research Laboratory Project (Phase I)

Shigeo NAKAMA Atsuo YAMADA Toshiro AOKI Toshinori SATO

Mizunami Underground Research Laboratory, Tono Geoscience Center

本調査研究では、超深地層研究所計画第1段階（地表からの調査予測研究段階）において、研究坑道掘削前の岩盤の物理・力学的な特性、初期応力状態を調査した。また、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動予測に関する解析・検討を行った。

調査の結果、研究用地における岩盤は、一部風化変質などによる強度低下部が認められるものの、見かけ比重が2.30～2.65、一軸圧縮強度が64～212MPa、ヤング率が20～68GPaであり、我が国における一般的な花崗岩とほぼ同様の物性であることが確認された。また初期応力状態はおおむね最大主応力方向が北～北西方向であり、研究用地周辺の測地学的な広域ひずみ場と同様の傾向が認められた。

これらの結果に基づいて土岐花崗岩の力学物性及び初期応力状態を設定し、第2段階以降の研究坑道の掘削による坑道周辺岩盤の挙動予測解析を実施した。予測解析では、既存き裂の伸展や新しいき裂の発生に基づいた掘削損傷領域の設定方法を検討し、その結果、既存き裂の伸展や新規き裂の発生により、変形や局所安全率、透水係数、き裂の開口量などの変化が坑道周辺に生じることが予測された。

*This report discusses about rock mechanical properties and in-situ stress state before excavation of shafts and drifts, and analysis of surround rock mass behavior in drift excavation based on the results of investigations in Mizunami Underground Research Laboratory Project (Phase I).*

*As results of the research, the rock mechanical properties of the Toki granite at the MIU construction site are; apparent specific gravity 2.30~2.65, unconfined compressive strength of 64~212MPa and, Young's modulus of 20~68GPa. The rock mechanical properties of Toki granite at the MIU construction site are similar to average values found in Japanese granite. Directions of maximum principal stress are N-S to NW-SE.*

*Based on these results, analysis was made and modeling method was established for excavation damaged zone in analysis of surround rock mass behavior in drift excavation. After Phase II, changes in distribution of deformation, safety factor, hydraulic conductivity, and opening fracture are caused by drift excavation.*

## キーワード

岩盤，地表からの調査，物理・力学特性，初期応力状態，応力測定，坑道掘削予測，掘削損傷領域，き裂，瑞浪超深地層研究所

*Rock Mass, Surface-Based Investigation, Physical and Mechanical Properties, In-Situ Stress State, Stress Measurement, Analysis of Rock Mass Behavior; Excavation Damaged Zone, Crack, Mizunami Underground Research Laboratory*



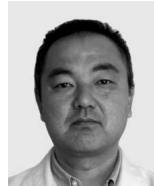
中間 茂雄

超深地層研究所グループ岩盤工学チーム所属  
研究員  
超深地層研究所計画の岩盤力学特性調査に関する研究に従事



山田 淳夫

超深地層研究所グループ岩盤工学チーム所属  
超深地層研究所計画の岩盤力学特性調査に関する研究に従事



青木 俊朗

超深地層研究所グループ岩盤工学チーム所属  
超深地層研究所計画の岩盤力学特性調査に関する研究に従事  
博士(工学)・技術士(建設部門)



佐藤 稔紀

超深地層研究所グループ岩盤工学チームリーダー  
副主任研究員  
超深地層研究所計画の岩盤力学特性調査に関する研究に従事  
博士(工学)

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地質環境には、廃棄物を物理的に隔離すること、人工バリアに適した設置環境を提供すること、及び核種の移行を遅延する天然バリアとして機能する3つの役割が期待されている。これらの役割を果たすために地質環境には、まず長期にわたって十分に安定であること、ついで人工バリアの設置環境及び天然バリアとして、岩盤や地下水の物理的・化学的性質が適切であることが求められる<sup>1)</sup>。

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では、精密調査地区選定段階の調査内容及び選定要件として、「当該対象地層等を構成する岩石の種類及び性状に関する事項」及び「当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること」がそれぞれ挙げられている。また、最終処分施設建設地の選定段階の調査内容及び選定要件として、「当該精密調査地区内の最終処分を行おうとする地層（以下、対象地層という）を構成する岩石の強度その他の当該対象地層の物理的性質に関する事項」及び「地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していると見込まれること」がそれぞれ挙げられており、これら岩盤の物理・力学的環境の調査・解析・評価手法の開発が求められている。

サイクル機構が岐阜県瑞浪市において進めている「超深地層研究所計画」<sup>2)</sup>は、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる地層科学研究の一環で実施しているものである。本計画は、深度1,000m程度の2本の立坑（主立坑・換気立坑）と2つの水平坑道群（中間ステージ；深度500m、最深ステージ；深度1,000mを計画）の掘削・建設を伴う深部地質環境の研究計画であり、施設の建設過程の各段階で岩盤の物理・力学的環境の調査を行いながら、前述したような課題にかかわる研究・技術開発を行っている。

本計画は1996年度より、瑞浪市明世町のサイクル機構が所有する用地（正馬様用地）において調査研究を行ってきたが、2002年1月に瑞浪市と市有地の賃貸借契約を締結し、研究坑道等の設置場所を正馬様用地の約1.5km東の市有地（以下、研究所用地という）に変更した（図1参照）。

超深地層研究所計画は、「地表からの調査予測研究段階（第1段階）」、「研究坑道の掘削を伴う研究

表1 超深地層研究所計画 調査研究スケジュール

研究段階	年度	1996	2000	2005	2010	2015
第1段階 (地表からの調査 予測研究段階)		■	■			
第2段階 (研究坑道の掘削 を伴う研究段階)			■	■		
第3段階 (研究坑道を利用 した研究段階)					■	■

現在 (2004.11)

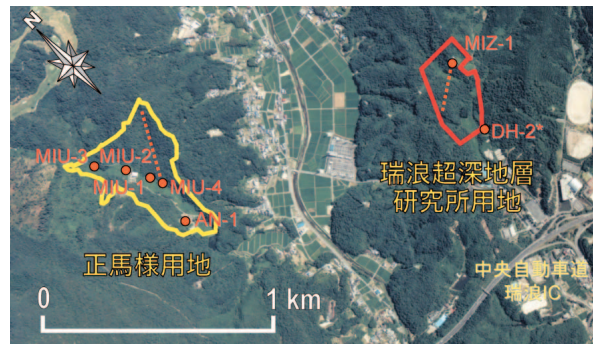


図1 研究の実施場所及びボーリング孔の位置  
（\*DH 2号孔は広域地下水流動研究の既存ボーリング孔）

段階（第2段階）」、「研究坑道を利用した研究段階（第3段階）」の3段階に分けて進められており、2004年度末には第1段階の調査を終了する予定である。また、第2段階に関しては、2003年より立坑の掘削工事を開始しており、2005年からは橋や巻上機、スcaffordを用いた本格的な掘削を行う予定である<sup>3)</sup>。

超深地層研究所計画第1段階における岩盤力学調査研究の目標は、瑞浪超深地層研究所が建設される対象岩盤の調査を通じて、ボーリング調査などの地表からの調査により、岩盤力学データの取得手法及び評価手法を確立することである。本報告では、第1段階における岩盤力学調査研究の結果明らかとなった研究坑道建設前の地下深部の岩盤力学特性を示した後、坑道掘削影響解析の結果について述べる。

## 2. 調査研究方法

本調査研究では、研究所用地周辺に基盤岩として分布する白亜紀後期の土岐花崗岩と呼ばれる結晶質岩を研究の対象岩盤とした。なお、研究所用地では厚さ百数十mの堆積岩層（新第三紀の瑞浪

層群及び瀬戸層群)が基盤の土岐花崗岩を不整合に覆っている。

具体的な調査研究方法としては、研究坑道群が主に建設される土岐花崗岩を研究対象として、研究坑道群が建設される深度1,000mまでの岩盤力学データとして、土岐花崗岩の物理・力学特性、初期応力の深度分布を取得した。初期応力の測定については、ボーリング孔及びボーリングコアを用いた現存する複数の手法を適用した。また、取得された岩盤力学データに基づき、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動予測解析を実施した。

## 2.1 ボーリングコアを用いた室内物理・力学試験

地表から深度1,000mまでの岩盤の物理・力学特性を把握するための室内物理・力学試験を実施した。調査方法としては、ボーリング調査で取得されたボーリングコアを深度50~100mピッチでサンプリングし、室内物理・力学試験により深度方向のボーリングコアの物理・力学特性の分布を求めた。試験は正馬様用地における5本のボーリング孔(AN 1号孔, MIU 1号孔, MIU 2号孔, MIU 3号孔:掘削長約1,000mの鉛直孔, MIU 4号孔:掘削長約800mの傾斜孔)のボーリングコアについて順に試験を実施し、その後、研究所用地近傍の広域地下水流動研究のために掘削された既存ボーリング孔であるDH 2号孔(掘削長約500mの鉛直孔),研究所用地内のMIZ 1号孔(掘削長約1,300mの鉛直~傾斜孔)のボーリングコアについて試験を実施した。これらのボーリング孔の位置を図1に示す。試験項目は、室内物理試験として、密度試験, 含水比試験, 有効空隙率試験及び弾性波速度試験を実施し、見かけ比重や含水比, 有効空隙率, 弾性波速度を算出した。また、室内力学試験として、一軸圧縮試験, 圧裂引張試験及び三軸圧縮試験を実施し、一軸圧縮強度, ヤング率, ポアソン比, 圧裂引張強度, 粘着力, 内部摩擦角を評価した。

## 2.2 初期応力測定

岩盤の初期応力は地下施設の設計・建設において最も重要な因子のひとつであり、坑道のレイアウトや安定性にも大きく影響する因子である。初期応力測定手法については、実用段階のものから研究段階のものまで、今日までに極めて多数の手法が提案されている<sup>4)</sup>。その理由は、各々の手法が

それぞれ長所, 短所, 適用限界を有しているためである。そのため、超深地層研究所計画では、現在日本国内で初期応力測定として適用されている手法や、サイクル機構がこれまでに実施した釜石鉱山(岩手県釜石市)や東濃鉱山(岐阜県土岐市)における調査試験研究で得られた知見に基づき、複数の手法により同一箇所において初期応力測定を実施した。測定手法はボーリングコアを用いた手法として、AE (Acoustic Emission) 法<sup>5)</sup>とDRA (Deformation Rate Analysis) 法<sup>6)</sup>との併用法(以下, AE/DRA法), DSCA (Differential Strain Curve Analysis) 法<sup>7)</sup>及びASR (Anelastic Strain Recovery) 法<sup>8)</sup>を、ボーリング孔を利用した手法として、水圧破砕法を用いた。

ボーリングコアを用いた手法は、ボーリングによって岩石にかかっていた応力が解放され、これによる岩石供試体の変形に伴い発生するAEやひずみを測定し、そのAEの発生量の変化や、ひずみ増分の変化等から原位置で作用していた応力値を推定するものである。また、ボーリング孔を用いた水圧破砕法は、水圧によって岩盤を直接破壊し、破壊時等の水圧や破壊の発生方向等から主応力値及びその方向を求めるものである。

## 2.3 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動予測解析

地下の岩盤中に坑道などの空洞を掘削すると、坑道周辺岩盤において、き裂の発生・伸張, 応力状態の変化あるいは間隙水圧の変化が生じる。この変化により、周辺岩盤の強度特性や変形特性などの力学特性, 透水係数などの水理特性あるいは地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。このような変化が生じる領域を「掘削影響領域」と呼ぶ。掘削影響領域は、地下空間の合理的な設計や施工にとって重要であるとともに、処分場閉鎖後の地下水の選択的な移行経路となることも想定されることから、その性質や広がり把握・評価は重要である。

掘削影響領域は、掘削のダメージにより岩盤が直接的に損傷を受ける「掘削損傷領域」、間隙水圧が低下し、地下水の化学的性質が変化する「不飽和領域」及び空洞の掘削による応力解放により岩盤中の応力状態が変化し、既存のき裂の開閉が生じる「応力再配分領域」の3つの領域の重ね合わせと考えられている<sup>1)</sup>(図2)。坑道周辺岩盤の挙動

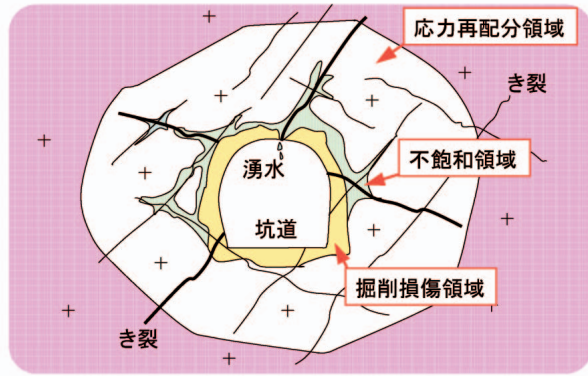


図2 掘削影響領域の概念図

予測解析では、坑道の力学的安定性及び掘削影響領域を予測評価する目的で数値解析が実施されるが、一般的な数値解析では、坑道掘削により応力が解放され、坑道周辺岩盤の応力変化によって形成される応力再配分領域が求まるのみである。実際の掘削では、発破や機械掘削による直接的なダメージによって掘削損傷領域が形成される。掘削損傷領域の形成は、応力再配分領域、すなわち掘削影響領域全体に影響を及ぼすことから、掘削影響解析において掘削損傷領域を適切にモデル化することが重要となる。そこで、本研究では、サイ

クル機構が計画している超深地層研究所計画で対象となる結晶質岩（土岐花崗岩）を例として、地表からの調査（深層ボーリング調査など）のデータに基づいて、掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析を実施し、掘削損傷領域の設定方法及びこれを考慮することによる解析結果に与える影響について検討を行った。解析の手法としては、有限要素法による解析を基本とし、結晶質岩などのき裂性岩盤の挙動を考慮した解析が可能なYoshida and Horiiが<sup>9)</sup>提案するMBC（Micro-mechanics Based Continuum model）及びOda<sup>10)</sup>が提案するクラックテンソルモデルを用いた。

### 3. 調査研究結果及び考察

#### 3.1 ボーリングコアを用いた室内物理・力学試験結果

試験で得られた物理・力学特性を表2及び図3に示す。調査対象である土岐花崗岩のうち研究所用地（MIZ 1号孔）における物性値は、見かけ比重が2.30~2.65、有効空隙率が0.64~13.5%、一軸圧縮強度が64~212MPa、50%接線ヤング率が20~68GPaであった。これらの結果は、先に調査を行った正馬様用地における値や日本の花

表2 研究所用地及びその周辺におけるボーリングコアの室内物理・力学試験結果（平均値）

物理・力学物性	研究所用地 (MIZ-1)	研究所用地 近傍 (DH-2)	正馬様用地 (AN-1, MIU-1~4)	日本の花崗岩類 <sup>1)</sup> **
見  け  比  重	2.605(2.623)*	2.623	2.624	2.63
有  効  空  隙  率	1.88%(1.15%)*	0.83%	1.31%	2.0%
弾性波速度 (P波)	5.36 km/s	4.8 km/s	5.27 km/s	4.75 km/s
弾性波速度 (S波)	2.83 km/s	2.41 km/s	2.85 km/s	2.44 km/s
一  軸  圧  縮  強  度	166 MPa	117 MPa	168 MPa	136 MPa
50% 接線ヤング率	52 GPa	58 GPa	51 GPa	33 GPa
ポアソン比	0.26	0.33	0.34	0.23

\* ( )内は地表から掘削長200mの値を除いた平均値

\*\* 花崗岩, 花崗閃緑岩, 花崗斑岩, 石英斑岩, 石英閃緑岩, 石英閃長岩, 片麻岩

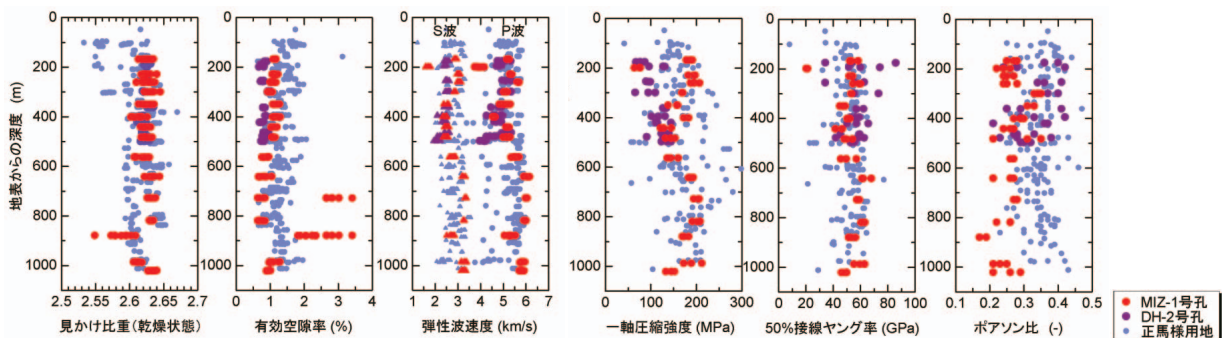


図3 研究所用地及びその周辺における岩芯の室内物理・力学試験結果

崗岩の平均的な値とほぼ同じであった。

一方、研究所用地近傍の既存ボーリング孔(DH 2号孔)では、一軸圧縮強度の低下が認められ、強度の低い岩盤の分布が確認された。このことは、研究所用地周辺で確認されている土岐花崗岩の表層部から厚さ200~300m程度の上部割れ目帯と呼ばれる割れ目の集中帯の存在と整合的であった。しかし、MIZ 1号孔においては、上部割れ目帯に対応する岩石強度の低下は認められず、深度200mにおいて岩石の変質に起因する強度低下が認められたのみであった。このことは、地質学的に同じ岩盤であっても、岩盤物性が場所によって変わりうることを示している。また、深度730m付近及び深度880m付近での有効空隙率の増加に見られるような物理特性の変化が一部認められたが、これに伴う一軸圧縮強度などの力学特性の低下は認められない。逆に、深度600m以深では、一軸圧縮強度が180~210MPaと比較的強度が大きく、岩石基質部の硬い岩盤が分布している。

以上のように物理・力学特性は深度によって一様ではないことから、同種の調査においては、複数の深度及び地点での調査の実施が必要と考えられる。

### 3.2 初期応力測定結果

#### (1) ボーリングコアを用いた初期応力測定

正馬様用地のMIU 1号孔,MIU 2号孔,MIU 3号孔のボーリングコアを用いたAE/DRA法による初期応力測定を実施した。本測定では、ボーリングコアをボーリング孔軸方向(鉛直方向)に整形し、鉛直方向の初期応力を評価した。その結果、断層や割れ目帯付近以外の地点では、ばらつきは大きいものの、ほとんどの値が岩石の単位体積重量から算出される土かぶり圧(単位体積重量×深さ)とほぼ同様であることが確認された。研究所用地のMIZ 1号孔の500mまでのボーリングコアを用いた測定では、正馬様用地とは異なり、深度の増加に伴い応力が低下する結果が得られた。AE法に関しては初期応力の大きさを決定するために重要となるAE急増点の読み取りが困難だったこと、DRA法に関しては、ひずみ差関数の非線形性が強く応力評価が困難であったことにより、測定誤差が多く含まれた初期応力測定結果となった。この理由のひとつとして、低応力下での岩石のダイレイタンス(応力の負荷による体積膨張)発

生の影響が考えられたため、深度500m以深の測定では、封圧の載荷によりダイレイタンスを抑制しながらのAE/DRA法による初期応力測定<sup>11)</sup>を試みているところである。

研究所用地近傍の既存ボーリング孔(DH 2号孔)及び研究所用地内のMIZ 1号孔の深度500mまでのボーリングコアを用いたDSCA法による室内試験を行った。DSCA法では、試験の結果得られるクラックパラメータの主値の方向より初期応力の主応力方向を推定することができる。これら主値の方向の分布はかなりばらついているものの、クラックパラメータの最大主値の方向はN S方向からNW SE方向であり、最大主応力の方向もこの方向にあると評価した。これらの結果は後述する正馬様用地で実施された水圧破砕法による初期応力測定で得られた最大主応力の方向とほぼ同様である。また、これらの結果は、研究所用地周辺の三角点の相対変位から推測される広域的な初期応力状態<sup>12)</sup>とも比較的一致している。

ASR法による初期応力測定は、松木らによる岩手県での測定実績<sup>13)</sup>を基に、土岐花崗岩を対象としたものとしては、研究所用地のMIZ 1号孔において初めて適用した。しかしながら、応力の評価に重要となる、非弾性ひずみの回復量が十分に現れず、定量的な初期応力の評価は出来なかった。

以上、研究所用地の初期応力状態は、ボーリングコアを用いたDSCA法による試験結果のみから評価せざるを得ない結果となったが、現時点の解釈として研究所用地の応力状態は、おおむね正馬様用地における応力状態と類似傾向にあり、最大主応力の方向はN S方向からNW SE方向であると推測される。

#### (2) ボーリング孔を用いた初期応力測定

ボーリング孔を用いた初期応力測定として、正馬様用地に掘削された3本の深層ボーリング孔(AN 1号孔,MIU 2号孔,MIU 3号孔)において実施した水圧破砕法による初期応力測定結果を図4に示す。

3本のボーリング孔の主応力値の深度分布によれば、深度500~650mを境にしてそれよりも上部と下部で応力環境が異なるという特徴が認められる。すなわちAN 1号孔では深度650mで $\sigma_H$ (水平面内の最大主応力) >  $\sigma_h$ (水平面内の最小主応力)  $\sigma_H$ (鉛直応力=土かぶり圧)の逆断層型と横ずれ断層型の遷移型の応力環境から $\sigma_H > \sigma_v >$

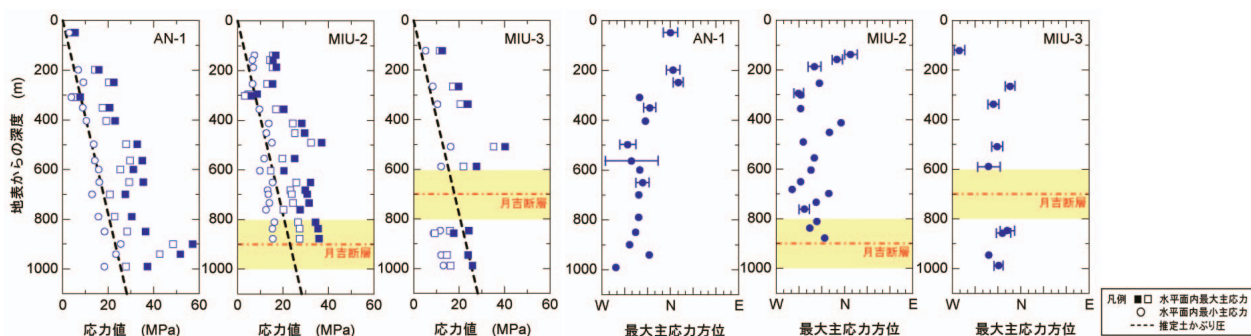


図4 水圧破砕法による初期応力測定結果

$\sigma_h$ の横ずれ断層型の応力環境へ、MIU 2号孔とMIU 3号孔では深度550m及び600mでそれぞれ $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ の逆断層型から $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ の横ずれ断層型へと応力環境が変化する。また、AN 1号孔とMIU 1号孔では、深度300m付近で初期応力が著しく低下している。これは土岐花崗岩の表層から厚さ200~300mに分布する上部割れ目帯の存在により、局部的に応力緩和が生じているためと推測される。さらに、MIU 3号孔の深度700m以下の月吉断層の下盤における主応力の大きさは、他のボーリング孔の同一深度で測定された値よりも著しく小さく、応力環境はこの断層を境に横ずれ断層型から正断層型に変化する。

3本のボーリング孔の最大主応力方向によれば、深度200~300mよりも浅い深度においてはAN 1号孔ではほぼNS方向、MIU 2号孔では深度100mから300mにかけてNからNW SE方向に約60°回転するよう見える。MIU 3号孔では深度100m付近でほぼE W方向である。深度300m以深ではいずれのボーリング孔においてもほぼN45°Wを中心分布し、三角点の相対変位から推測される広域的な初期応力状態<sup>12)</sup>とも比較的一致している。

以上のように測定された初期応力の大きさ及び最大主応力方向は深度によって異なっている。このような現象は“stress decoupling”と呼ばれており、stress decouplingは岩質の変化あるいは地形と関係があるといわれている。また、一般に岩盤内部の初期応力分布には地質構造、岩盤の不均質性及び異方性、地形などが影響を及ぼすことが知られている。しかし、調査地域の地形は比較的なだらかであり、応力環境が変化する深度500~650mに断層あるいは不整合面などの地質構造は認められない。

以上のことから地表からの調査段階において、岩盤深部の初期応力状態は、ボーリング孔を用いた調査によって初めて正確に推定可能なものであり、これらを正確に評価するためには、複数の深度あるいは地点における初期応力測定の必要があることを示している。

なお、研究所用地のMIZ 1号孔における水圧破砕法による初期応力測定は2004年11月末現在測定を実施中である。

#### 4. 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の挙動予測解析結果

##### 4.1 解析条件

解析対象領域は、現時点で瑞浪超深地層研究所の建設が予定されている研究所用地と同じ土岐花崗岩が分布し、当初建設が予定されていた調査データが豊富にある正馬様用地を対象とした。解析は、深度500mに研究坑道を掘削することを想定し、掘削坑道は円形立坑(掘削径7.3m)及び幌形の横坑(高さ3m×幅3m)とした。解析入力値は表3に示した値を用い、初期応力状態は正馬様用地における測定結果(図4)などを基に初期応力解析<sup>14)</sup>を行い、解析断面となる2次元断面に投影した値を用いた。き裂に関する情報については、正馬様用地における調査結果に基づき作成された岩盤力学概念モデル<sup>15)</sup>を参照し、解析対象となる深度500m地点を含む岩盤ゾーン(深度300~700m)に該当するボーリング区間に見られるき裂をすべて抽出し、この中から最も卓越するき裂、2番目、3番目に卓越するき裂の3つの亀裂を解析におけるき裂として取り扱った。解析に用いたき裂の走向・傾斜、き裂間隔、き裂有効長を表4に示す。なお、き裂有効長については、既存の大規模地下空洞やダムサイトなど様々なスケールで

表3 解析入力値（基質部の岩盤物性値）

弾性係数	49.4GPa
ポアソン比	0.34
単位体積重量	26.3kN/m <sup>3</sup>
初期透水係数	6.5 × 10 <sup>-10</sup> m/s

表4 解析入力値（き裂の特性値）

	卓越成分	卓越成分	卓越成分
走向・傾斜	N41E75SE	N87W51NE	NS4E
き裂間隔	0.20m	0.30m	3.45m
き裂有効長	0.35m	0.44m	1.71m

収集されたき裂トレース長とき裂密度との関係<sup>16)</sup>を基に、ポーリング孔に見られるき裂密度から算出した。

#### 4.2 掘削損傷領域のモデル化

掘削損傷領域のモデル化に際して、地表からの調査結果のみで設定することが困難なパラメータについては過去の坑道を利用した調査結果を参照した。サイクル機構が実施した、釜石鉱山（岩手県）及び東濃鉱山（岐阜県）における掘削影響試験において、掘削損傷領域の幅は、発破掘削の場合約80cm、機械掘削の場合約30cmと評価しており<sup>17)18)</sup>、本解析では、この2つの掘削損傷領域の幅を採用した。また、弾性波屈折法探査による弾性波速度の変化や孔内載荷試験の結果などから、掘削損傷領域では弾性係数が50～25%にまで低下している<sup>18)</sup>ことから、掘削損傷領域の弾性係数を50%及び25%になる2つのケースを設定した。さらに、手塚ら<sup>19)</sup>によると、掘削損傷領域に発生するき裂は、既存のき裂の伸展及び新規のき裂の発生あるいはその両方が想定されるため、新規き裂が発生する場合、既存き裂が伸展する場合の2種類をモデル化した。なお、新規き裂は、坑道壁面に平行に発生するものとした。

解析における掘削損傷領域のモデル化方法は以下のとおりとした。すなわち、初期条件（解析領域、岩盤物性、初期応力）を設定、応力解放率40%で全断面掘削、掘削損傷領域の設定（物性の変更）、残りの応力解放率60%で全断面掘削、とした。

#### 4.3 感度解析

掘削損傷領域内のき裂に関する個々のパラメー

タの変化が解析結果に及ぼす影響を把握し、掘削損傷領域の設定に用いるパラメータを決定することを目的として、MBCを用いた感度解析を実施した。解析に用いる岩盤物性は、表3に示した深度500mのものを用い、岩盤のき裂は単純化のため東西方向のみとし、き裂の長さや密度は表4に示した卓越き裂を用いた。感度解析の条件として、弾性係数、き裂密度、き裂方向、起伏角、摩擦角の各パラメータを変化させた。なお、MBCにおいてはき裂密度の増加とき裂有効長の増加は等価である（き裂長さが2倍になれば、き裂密度は2倍になる）ため、その変化はき裂密度の変化で代表させた。表5に各パラメータによる壁面近傍のき裂開口量の最大・最小値、その開口量差及びき裂開口に対する影響を示す。まず、き裂の開口条件はき裂面の摩擦角とその応力状態で決定されるため、直接的に影響を及ぼすのはき裂の摩擦角のみである。また、一度き裂が開口すると、岩盤基質部の弾性係数 $E$ が小さくなるほど、またき裂の密度 $1/d$ が大きくなるほどき裂を含んだ岩盤全体の系としての剛性は小さくなり、き裂の開口量は大きくなる結果となった。したがって、掘削損傷領域の影響度の高いものとしては、岩盤基質部の弾性係数 $E$ とき裂密度 $1/d$ であるとの結果が得られた。ただし、岩盤基質部の弾性係数 $E$ は岩盤基質のみならず、き裂の剛性にも影響を与えるパラメータであること、MBCは岩盤基質部の破壊は考慮せず、き裂の破壊のみで岩盤挙動を表現するモデルであることから、掘削損傷領域を考慮した影響解析の検討に用いるパラメータとしてはき裂密度 $1/d$ が最も適当である。

#### 4.4 解析結果

##### (1) MBCによる解析

感度解析で影響が大きいとの結果を得たき裂密度 $1/d$ を変化させた解析を行った。掘削損傷領域の特性の違いをみるため、既存のき裂が伸展する場合、壁面平行方向に新規のき裂が発生する場合の2種類の解析を行った。また、掘削損傷領域の幅を30cmと80cmの2種類について解析を行った。なお、解析条件は無支保とした。

解析の結果として得られた横坑断面のき裂開口量分布図を図5に示す。図5(a)は掘削損傷領域が無い場合の解析結果である。図5(b)(c)は、幅80cmの掘削損傷領域を設定し、掘削損傷により

表5 各感度パラメータでのき裂の開口量

パラメータ	壁面近傍（立坑北側）のき裂の開口量			考察 き裂開口に対する影響
	最大値	最小値	開口量差( - )	
岩盤基質部の弾性係数 $E$ ( $E/E_0=25\%$ )	0.34mm	0.11mm	0.23mm	小さくなると、き裂開口量は大きくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の密度 $1/d$ ( $1/d: 8$ 倍)	0.49mm	0.11mm	0.38mm	大きくなると、き裂開口量は大きくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の起伏角 ( $=20^\circ$ )	0.11mm	0.02mm	0.09mm	小さくなると、き裂開口量は小さくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。
き裂の摩擦角 ( $=20^\circ$ )	0.14mm	0.11mm	0.03mm	小さくなると、き裂開口量は小さくなる。 き裂開口条件にはあまり影響しない。

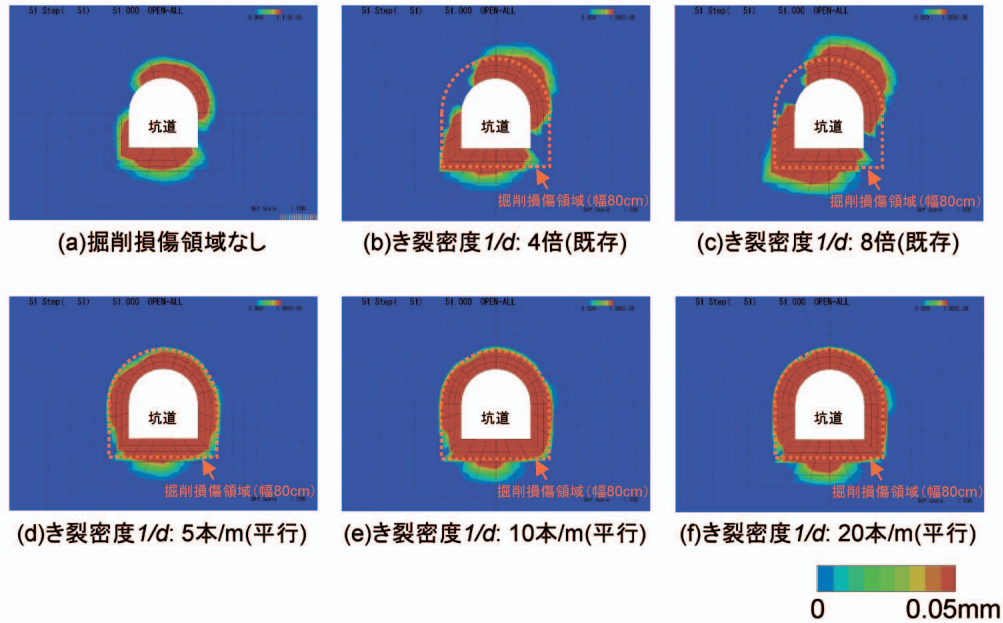


図5 MBCによる解析結果（き裂開口量分布図；き裂密度の影響）

掘削損傷領域内の既存き裂が伸展し、き裂密度が4倍及び8倍となった場合の解析結果である。図に示すように、き裂開口量の分布は掘削損傷領域を考慮しない場合の分布形状（右上部，左下部にき裂開口部が卓越）を維持したまま、その開口領域を拡大しており、き裂の開口が生じる応力再配分領域は、あらかじめ設定した掘削損傷領域の外にまで及んでいる。図5(d)(e)(f)は、幅80cmの掘削損傷領域内の掘削損傷によるき裂として、坑道壁面に平行なき裂を設定し、そのき裂密度を5本/m、10本/m、20本/mに変化させた場合の解析結果（開口量分布）である。図5(d)より、壁面に平行なき裂による掘削損傷領域を解析上考慮すると、坑道壁面全周にわたってき裂開口部が分布しているのがわかる。図5(e)(f)に示すように、壁面に平行なき裂の密度の増大により開口量の分布が変化する応力再配分領域の増大はごく

わずかであり、その領域は掘削損傷領域の外に及んでいない。

図6は既存き裂伸展及び新規き裂発生との2つのき裂発生パターンに対して、き裂密度を変化させた解析で得られた坑道天盤直上の変位量分布図である。変位量分布からも掘削損傷領域のき裂として既存き裂が伸展する場合の方が掘削損傷領域及び領域外の変位が大きいことがわかる。また、新規き裂が発生する場合は、掘削損傷領域が無い場合とほぼ同じ結果であることがわかる。

また、掘削損傷領域の幅を30cm及び80cmとした場合の解析結果の比較により、掘削損傷領域の幅が広がると、基本的にそのき裂開口量が増大する領域が拡大することがわかった。

(2) クラックテンソルモデルによる解析

クラックテンソルモデルによる解析については、掘削損傷領域の剛性が岩盤の剛性の50%及び



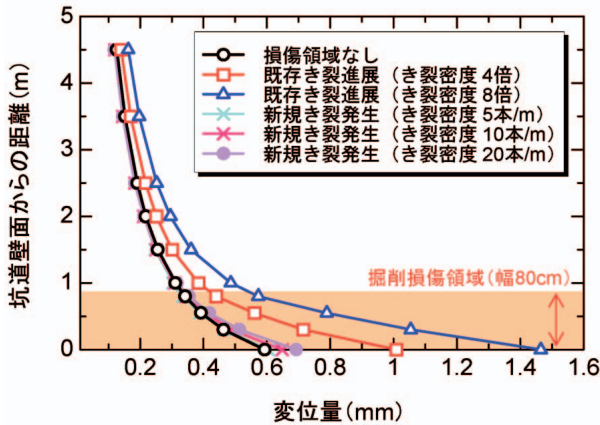


図6 MBCによる解析結果(坑道天盤の変位量分布)

25%となるようにき裂を設定した解析を行った。掘削損傷領域の幅は80cm、掘削損傷領域のき裂は、新規き裂がランダムな方向に発生するものとし、無支保条件で解析した。坑道の変形については、坑道の底盤部で最大変位が発生し、剛性が50%の場合1.91mm、25%の場合2.52mmとなった。掘削損傷領域を考慮しなかった場合は1.48mmであり、このときに比べ、29~70%変位が増大した。その他、新規き裂が壁面に平行に発生する場合の解析では、変位の差はほとんど無かった。岩盤の安全率分布については、剛性の違いによる差異はほとんど見られなかった。これはいずれの解析ケースにおいても、掘削損傷領域のほとんどの要素の局所安全率が、引張側のモードで決まっていることから、せん断強度の低下の影響を受けていないことがその要因と考えられる。

また、本解析で得られた応力分布を基に、仮想割れ目モデル<sup>20)</sup>(岩盤の透水性を仮想的な割れ目(き裂)の方向分布と各割れ目の透水性から決定するモデル)により岩盤中の平均的な水の流れやすさを示す平均透水係数の分布を求めた。その結果、掘削損傷領域の剛性の低下に伴い、平均透水係数の低下領域が大きくなった。透水係数の変化率は、掘削損傷領域として新規き裂の発生を考慮しない場合は掘削前の500倍以下であるのに対し、掘削損傷領域を考慮した場合、掘削前の800~1,500倍程度と相当大きくなった。

## 5. まとめと今後の取り組み

本調査研究では、超深地層研究所計画第1段階での岩盤力学調査研究として、物理・力学物性及び初期応力の測定方法、坑道周辺岩盤の挙動予測

解析手法を示すとともに、研究所用地に分布する土岐花崗岩について、研究坑道掘削前の岩盤の物理・力学物性及び初期応力状態を調査した。

調査の結果、研究所用地における岩盤は、風化変質などによる強度低下部が一部認められるものの、見かけ比重が2.30~2.65、一軸圧縮強度が64~212MPa、ヤング率が20~68GPaであり、我が国における一般的な花崗岩とほぼ同様の物性であることが確認された。また初期応力状態はおおむね最大主応力方向がN-S~NW-SE方向であり、研究所用地周辺の測地的な広域ひずみ場と同様の傾向が認められた。ただし、本調査研究においては、岩盤の物理・力学特性、初期応力状態ともに、深度や岩種によって様ではないことから、同種の地表からの調査の実施においては、複数の深度及び地点での調査の実施が必要である。

これらの結果に基づいて土岐花崗岩の力学物性及び初期応力状態を設定し、第2段階以降の研究坑道の掘削による坑道周辺岩盤の挙動予測解析を実施した。予測解析では、掘削損傷領域として、既存き裂の伸展や新規き裂の発生を考慮する方法を示すとともに、掘削損傷領域を考慮した解析により、変形や局所安全率、透水係数、き裂の開口量などの変化が坑道周辺に生じることが想定された。

今後、MIZ 1号孔における水圧破碎法による初期応力測定の結果を第1段階の調査研究結果として追加し、研究所用地の岩盤力学モデル(物理・力学特性、初期応力状態を表現したモデル)の構築並びに研究所用地における研究坑道の掘削影響予測解析を実施する。また、これら第1段階での成果は、研究坑道の設計の情報として活用されるとともに、今後の第2段階の研究坑道掘削段階において実施される測定結果との比較により、その妥当性が検証されることとなる。

## 参考文献

- 1) サイクル機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - ”, JNC TN1410 99-020~024 (1999)
- 2) サイクル機構: “超深地層研究所地層科学研究基本計画”, JNC TN7410 2001-018 (2002)
- 3) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 他: “地下1,000mの立坑工事に着手 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事”, トンネルと地下, Vol.35, No.6, pp.31-42 (2004)
- 4) 菅原勝彦: “岩盤応力測定に関する研究の動向”, 資

源と素材, Vol.114, p.834-844 (1998)

- 5) 金川忠 林正夫 他: “岩石における地圧成分のAcoustic Emission による推定の試み”, 土木学会論文報告集, 第258号, pp.63-75 (1977)
- 6) Yamamoto, K: “The rock property of in-situ stress memory: Discussions on its mechanism”, Proc. of Int. Symp. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, pp.46-51 (1995)
- 7) Strickland.F.G., Ren.N-K.: “Use of differential strain curve analysis in predicting in-situ stress state for deep wells”, Proc. 21st U.S. Symp. on Rock Mech., pp.523-532 (1980)
- 8) 松木浩二: “岩石の非弾性ひずみ回復を用いた三次元地圧計測法の理論的検討”, 資源と素材, Vol.108, pp.41-45 (1992)
- 9) Yoshida, H. and Horii, H.: “Micromechanics-based continuum model for a jointed rock mass and excavation analysis of a large-scale cavern”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol.41, Issue1, pp.119-145 (2004)
- 10) Oda, M.: “An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59-68 (1988)
- 11) 相馬宣和, 瀬戸政宏, 他: “封圧環境下におけるAE法による原位置初期地圧測定法の開発”, 資源と素材, Vol.118, pp.546-552 (2002)
- 12) 地震予知総合研究振興会: “日本の水平地殻歪1885-1983年”, pp.63-64 (1990)
- 13) 松木浩二, 竹内考二郎: “ASR法による岩手県湯ノ森地域の三次元地圧計測”, 資源と素材, Vol.110, pp.625-630(1994)
- 14) 森孝之, 田部井和人, 他: “亀裂開口現象を考慮した大深度坑道掘削の解析的検討”, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp.457-462 (2004)
- 15) 松井裕哉, 前田信行, 他: “MIU-3号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル”, JNC TN7420 2001-001(2000)
- 16) 大津宏康, 田中誠, 他: “我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究”, JNC TY8400 2001-004 (2001)
- 17) サイクル機構: “釜石原位置試験総括報告書”, JNC TN7410 99-001 (1999)
- 18) Sato, T., et al.: “In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan”, Engineering Geology, 56, pp.97-108 (2000)
- 19) 手塚昌信, 蓮井昭則, 他: “発破による爆破点近傍の岩盤の損傷に関する一考察”, 土木学会論文集, No.602/ -40, pp.139-144 (1998)
- 20) 石井卓, 郷家光男, 他: “仮想割れ目モデルによる空洞周辺岩盤の透水性変化予測手法”, 土木学会論文集, No.715/ -60, pp.237-250(2002)