



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層科学研究

3. 釜石における原位置試験

環境技術開発推進本部

資料番号：85-17

Geosciences Research

3. Kamaishi In-Situ Experiment

(Radioactive Waste Management Project)

釜石鉱山における原位置試験研究は、地下深部の地質環境特性に関するデータの取得、現象の理解ならびにその現象解析モデルの開発・確立、調査試験技術の開発・確立を目標として行われている。

釜石鉱山では結晶質岩系を対象として試験研究を行っているが、結晶質岩系の場合、地下水は主として岩盤中の割れ目を通して動き、その割れ目は岩盤の透水性や地下水の化学的性質に影響を及ぼすと考えられる。一方、岩盤内に空洞を掘削すると地圧が解放され、空洞周辺に存在する割れ目に変化して、岩盤の透水性が変化を受けやすくなる。そこで、結晶質岩系の基礎データを得るために、地下水流動に関する調査研究、地下水の地球化学特性に関する調査研究、岩盤力学に関する研究、人工バリアに関する研究、地震に関する調査研究の各分野にわたり原位置試験を実施している。

1. はじめに

釜石における原位置試験は、結晶質岩系の岩盤についての調査研究である。

この原位置試験は、岩手県釜石市にある鉄、銅を主として採掘した釜石鉱山の既存坑道を用いて1988年より行われている。標高約850mの山の中腹に水平に掘削された既存坑道（標高550mレベル）を使うため、地表下約300mでの水理・力学的試験を容易に行うことができる。ここでの調査研究は5分野（細分すれば6分野）に分けることができ、この場の試験環境を生かして、それぞれ次のような目的で行われている。

(1) 地下水流動に関する調査研究

1) 地質構造調査研究

目視による割れ目調査や物理探査によって、深部結晶質岩の割れ目分布（方向、長さ、幅、密度）やその規則性および不均一性を明らかにするとともに、以下に述べる各研究の基礎的データとする。

2) 地下水利試験研究

岩盤中の水の流れやすさを示す定数である透水係数をさまざまな試験により求め、結晶質岩における透水特性を把握する。また割れ目面内の地下水流動様式の把握を目的とする。

(2) 地下水の地球化学特性に関する調査研究

岩盤の中を流れる地下水は、岩石（鉱物）との反応等によりその水質が決定されることが考えられる。そこで地下水の化学的分析によって地下水の起源・年代や岩盤中の経路および坑道掘削により生じる地下水の水質変化等を把握する。

(3) 岩盤力学に関する調査研究

地下の岩盤中に空洞を掘削した場合、自然の岩盤中の圧力（地圧）の釣合いがとれなくなることや掘削時の発破による衝撃等により、もとの岩盤の性質が変化を受ける領域が発生することがあり、こうした変化を把握する。

(4) 人工バリアに関する研究

人工的に地下で物質が移動しないよう設ける障壁を人工バリアと呼んでいる。特に人工バリア材として有望な粘土材料についてその岩盤内での挙動を把握する。

(5) 地震に関する調査研究

地震は地上および地下の構造物の安定性を考える上で重要な現象である。このため地表と地下での地震動の違いや、地震時の地下水の挙動の把握を主な目的として地震観測を行う。

以上の5分野について、当初全体の目標としていた

- ・結晶質岩における地下の基礎的な諸特性の把握と現象の理解

- ・現有調査試験技術の適用性の確認

に関して所記の成果が得られたと考えられる。

今後は、これまでの調査研究の結果や考察に基づき、原位置試験の方法（データの測定方法や試験デザイン）を確立し、地下で生じる現象をより定量的に把握・評価できるように、特に以下の2つの課題について調査研究を進めていく必要があると考えられる。

- 1) 空洞周辺の岩盤の性質が変化する領域の定量的な把握

原位置試験の結果を解析する上で用いられる理論は、さまざまな仮定が前提にある。岩盤の性質が坑道の掘削により変化する領域ではこれらの仮定が成り立たず、既存の手法では性質の変化を定量的に評価することは限界があることがわかったため、本課題についての研究の必要がある。

- 2) 諸特性・現象の深度依存性の把握

深度が深くなると岩盤内の地圧は増加し、岩盤の性質（変形性・透水性）や、空洞掘削に伴う影響の領域の拡大等、深度により岩盤の諸特性あるいはそこで生じる現象が変化する可能性がある。その変化の規則性を見出せば、地下深部の諸特性・現象のより正確な把握と予測が可能となることから、本課題についての研究が必要である。

2. 地質

(1) 広域地質

北上山地は最高峰の早池峰山（標高1,941m）から釜石市の南方に向かって北西―南東に延びる早池峰構造帯（図1）¹⁾により、石灰岩相の卓越する南部型古生層地域とチャート層の卓越する北部型古生層地域に分けられる²⁾。原位置試験を実施している釜石鉱山は、この南部型分布域の北東端に位置し、この周辺は古生代石炭紀―二疊紀（およそ3億6千万～2億4千万年前）および中生代白亜紀（およそ1億4千万～6千4百万年前）の地積岩類と、これら貫く超塩基性―塩基性―酸性の各種火成岩とにより構成されている^{3),4)}。

古生代石炭紀～二疊紀の堆積岩は、ほぼ南北の走向を示し粘板岩、砂岩、石灰岩を主体としており、9つの地層に分けられる。釜石鉱山周辺で最も広い分布を示すのは甲子（かし）層で、粘板岩と石灰岩を主体としている。

中生代白亜紀の堆積岩は、釜石鉱山西方に南北に分布し、比較的緩傾斜で古生界を不整合で覆っている。これは馬木の内層と呼ばれ安山岩質火砕岩類を

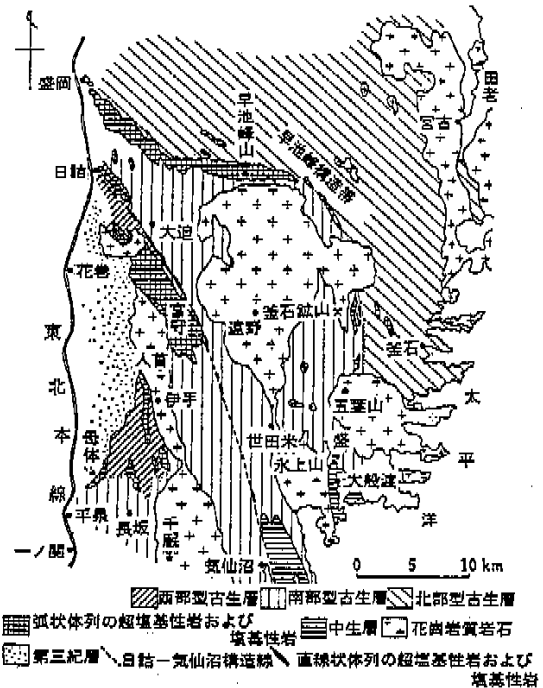


図1 北上山地中南部地質概略図

主体としている。

一方、これら貫く火成岩類は、岩質、分布および貫入時期から、大きく次のように分類される⁵⁾。

- ① 早池峰構造帯沿いに岩脈状に貫入したカンラン岩（超塩基性岩）や変ハンレイ岩ないし変輝緑岩（塩基性岩）。

- ② 釜石鉱山近傍の蟹岳（標高967m）付近を中心に分布する花崗閃緑岩（酸性岩）を主体とし閃緑岩やモンゾニ岩等を伴う蟹岳複合岩体。

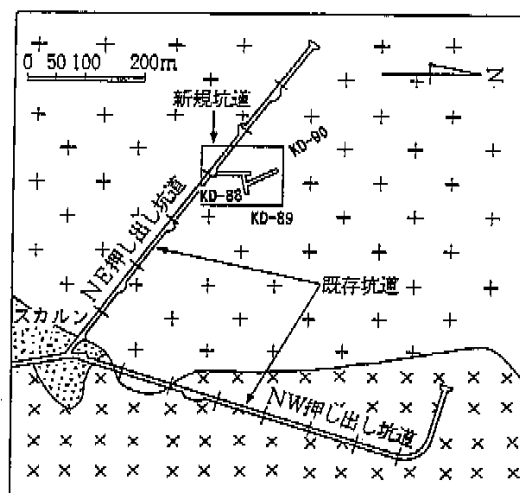
- ③ 上記蟹岳複合岩体に近接して分布する大部分が花崗閃緑岩からなる栗橋花崗閃緑岩体。

各岩体の貫入時期は、①、②、③の順序であり、その年代は①がおよそ4億5千万年前⁶⁾、②および③がおよそ1億2千万年前⁷⁾である。

(2) 釜石鉱山の地質と鉱床

釜石鉱山の鉱床は本邦最大の高圧交代銅鉄鉱床である。鉱床の形成は蟹岳複合岩体の貫入と密接な関係にあり、鉱床はこの岩体の周辺に存在する石灰岩とその他の岩石との間に生成したスカルン帯中に胚胎している。鉱石鉱物としては磁鉄鉱・黄銅鉱・キューバ鉱・磁硫鉄鉱および黄鉄鉱を主としている。

鉱床は蟹岳複合岩体の東西両翼に南北方向に配列するが、西列のほうが鉱床規模が大规模で操業対象となっている。鉱床は鉱石鉱物の組合せにより鉄鉱



凡 例

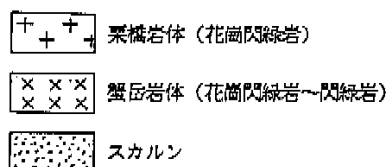


図2 主な原位置試験場周辺の地質概要

体、鉄銅鉱体および銅鉱体に分けられる。主として鉄鉱体は蟹岳複合岩体に近接してざくろ石スカルン中に、銅鉱体はそれから離れた石灰岩に接した灰鉄輝石スカルン中に、また鉄銅鉱体は両者の中間あたりに胚胎している。主な原位置試験場周辺の地質を図2に示す。

鉱山の坑道は主として西列に沿って南北方向のびており、坑道沿いの断面で見ると南側に中・古生代の堆積岩類、スカルン帯、鉱床ならびに蟹岳花崗閃緑岩が混在し、その北に栗橋花崗閃緑岩が分布する形となる。蟹岳花崗閃緑岩の形態は、地下1,000mにいたるまで下方に広がる形をしているが、栗橋花崗閃緑岩は地下1,000mまで形態を変えないものの岩体中に認められる弱い流理構造から下部ですばむ形が推定されている。

原位置試験は栗橋花崗閃緑岩分布域で実施されている。

3. 地下水流動に関する研究

(1) 地質構造調査研究

結晶質岩盤中では、地下水は主に割れ目や割れ目帯を流れると考えられ、結晶質岩の水理地質特性を

評価するためには、地質構造（割れ目や割れ目帯等）を事前に把握することが重要である。また、本調査で得られるデータは、他の調査の基礎データとしても必要不可欠である。

地質構造調査として、これまで義石原位置試験では、

- ① 坑道割れ目調査
- ② 岩芯観察
- ③ ボアホールテレビ観察
- ④ 物理探査

を実施した。

ここでは、このうち物理探査手法の一つであるRAMACシステム（OECD/NEA国際ストリーパ計画において開発された試験孔内用レーダーシステム）を用いたボアホールレーダーによるレーダートモグラフィー調査結果について述べる。

1) RAMACシステムによるレーダートモグラフィー調査^①

調査は、図3に示すKH-4～7孔の4本を用いて実施した。試験孔の掘削長は約50mであり、すべて栗橋花崗閃緑岩体中に掘削されている。

レーダートモグラフィーは、電磁波パルスを岩盤内に発信させ、電磁波の速度や減衰特性の変化を把握し、トモグラフィー解析により岩盤の不均質性や不連続面を推定するものである。岩盤中の割れ目帯・破碎帯・変質帯等は、高含水の状態であることが多く、電磁波の低速度または高減衰部分として捉えられる。

図4に解析結果を示す。図は解析の結果得られた遅さ分布図であり、数字が大きいほど遅さが大きい（速度が遅い）ことを表わす。縦軸の深度は孔口からの距離を表わす。また、●は湧水割れ目の位置である。これによると、孔口から10m、40m付近に電磁波速度の遅い部分の連続が認められ、電磁波の低速度部の連続は、湧水割れ目を含む割れ目帯であると推定される。

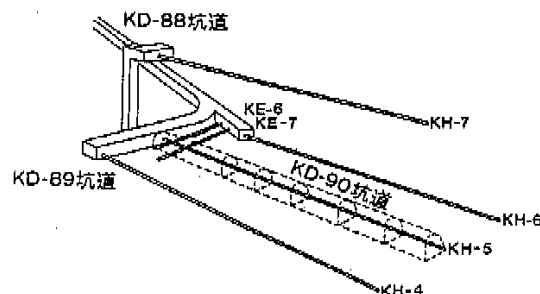


図3 KD-90坑道およびKH-4～KH-7号孔の位置図

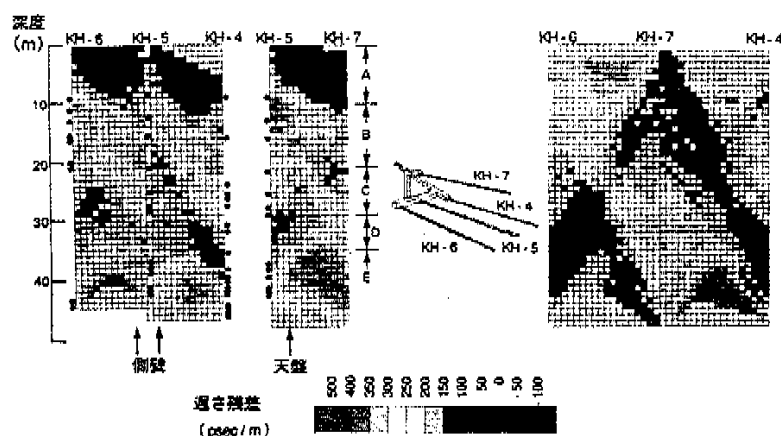


図4 トモグラフィ解析結果
(図中の●は、ボアホールテレビで観察された湧水点位置を示す)

また、本調査終了後、KH-5孔に沿って水平坑道(KD-90坑道、長さ約50m)を掘削し、坑道壁面の割れ目分布調査を実施した。その結果、岩盤の含水量が多いと認められた部分と、トモグラフィ解析の結果得られた電磁波の低速度部が良く一致した。さらに、KH-5孔で実施された低圧ルジオン試験で得られた透水係数の分布では、 10^{-8} cm/secの比較的高透水性を示す部分が認められたが、この部分もトモグラフィ解析では低速度部として捉えられた。

これらのことより、電磁波の低速度部は湧水割れ目を含む割れ目帯であるという推定の妥当性が確認されたとともに、本物理探査手法が結晶質岩中の、特に含水比の高い変質帯や割れ目帯を捉える有効な手段であることが確認された。

(2) 地下水理試験研究

花崗岩体中の地下水流動様式の把握のために、地下水理特性データの取得を目的として以下の試験を実施した。

① 透水試験

現在、亀裂性岩盤の水理特性は、割れ目内流動に着目した微視的方法と多孔質媒体として扱う従来の巨視的方法で評価されているが、本試験は、亀裂性岩盤である花崗岩の水理特性を後者の方法により評価することを目的とした。

試験は、単一のボーリング孔を用いた低圧ルジオン試験、複数のボーリング孔を用いた孔間透水試験、坑道規模の岩盤透水性試験を実施したほか、難透水性岩盤の透水性の測定手法としてベンチレーション試験を実施し、その適用性を検討した。

また、坑道規模の岩盤透水性試験およびベンチレーション試験では、試験対象領域の規模が試験結果に与える影響(スケール効果)について検討した。

② 単一割れ目内の地下水流下試験

上記①では、亀裂性岩盤を多孔質媒体として扱ったが、割れ目系岩盤内に掘削された坑道近傍における地下水の挙動についてみると実際には、位置によっては湧水がない割れ目があること、湧水している割れ目でも湧水量の位置的な偏りがあること等、均質媒体とは考えられない現象がみられる。

このような坑道近傍の地下水流動現象を明らかにするための基礎的な試験として、割れ目面上の地下水の流路を実際に観察することを試み、いわゆるチャンネリング現象が生じていることを明らかにし、さらにそこでの透水係数を推定するために有限要素法による2次元飽和不飽和浸透流解析を行った。

a. 低圧ルジオン試験

本試験はボーリング孔内にパッカーを設置し、孔口よりロッドを通して圧力水を注入したときの注入圧力と注入量から透水係数を求める試験である。

なお、透水係数は試験領域周辺のポテンシャル分布が放射状であり、かつ当該岩盤が多孔質均質媒体と見なせると仮定して算出する。

試験は図3に示すKH-5孔を用い、ダブルパッカーにより2.5mの長さで区切った15区間で実施した。KH-5孔は、試験場付近で卓越する割れ目の方向にほぼ直交している。

図5に試験結果を示す。図中、低圧ルジオン試験

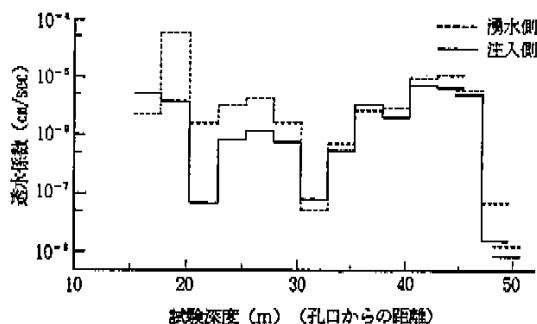


図5 低圧透水性試験区間および試験結果

の注入に対して、湧水を利用する方法で湧水量とそのときの湧水圧から透水性を求める透水試験の結果も破線で示してある。透水係数の値は 1.07×10^{-8} cm/sec - 1.51×10^{-5} cm/secであり、各区間によりばらつきが見られる。

b. 孔間透水試験

本試験は、一方のボーリング孔から一定流量の注入を行い、他のボーリング孔でその圧力水頭の応答を観測するもので、試験領域の岩盤を三次元均質異方性媒体（多孔質媒体）とした場合の理論曲線と、実際の試験の観測結果とをフィッティングすることによって、三次元均質異方性媒体としての透水テンソルと比貯留量を算定しようとするものである。現在のところ、この孔間透水試験の実施例は少なく、その適用性が十分に確認されていないことから、試験領域の地質特性や前述の単孔での透水試験結果および後述する岩盤透水試験結果と比較し、本試験の適用性について検討した。

試験は、図3に示すKH-5孔を注入孔、KH-4、6、7孔を観測孔として実施した。明瞭な圧力応答を示しかつ理論曲線にフィッティング可能な透水試験結果を用い、透水テンソル（主透水係数と主軸方向）と比貯留量を算定した。

表1に結果を示すとともに図6に透水係数の主軸方向をステレオネット上にプロット（図中+）した結果を示す。同図には、これまでの割れ目調査によるNW、NE坑道で卓越する亀裂面(N65E 75NW)と、その法線方向（極）を合わせて示した。これによると、最大および中間の透水テンソルの卓越方向は、割れ目卓越面内にあり、最小透水係数は卓越面に直交する方向である。この対応は、岩盤内の地下水流動が割れ目を通して生じていることを示唆しているものであり、このことから、本試験により岩盤の透水係数の主軸を適切に評価し得たものと判断できる。

表1 算定された水理定数

	透水係数 (cm/s)	方位 (°)	傾斜 (°)
No.1	$K_1: 5.92 \times 10^{-8}$	245.4	41.8
No.2	$K_2: 1.94 \times 10^{-8}$	60.5	48.2
No.3	$K_3: 5.49 \times 10^{-8}$	153.3	2.41

(比貯留量 $S_s = 8.50 \times 10^{-3}$ cm)

方位：北から東回りの角度

傾斜：水平面からの角度

また得られた透水係数の値は、低圧ルジオン試験や、岩盤透水試験により得られた値よりも1-2オーダー大きな値であった。これは表1の算定の際に、比較的圧力応答が明瞭な試験結果のみを用いているためである。

c. 岩盤透水性試験

割れ目系岩盤の物性は、スケール効果を持つことが知られているが、ある試験規模以上になれば、その物性値の変動が、全領域の物性値と比較して無視し得るような寸法(REV: Representative Elementary Volume)が存在することも知られている。

そこで、本試験では、図1に示すKD-90坑道において坑道規模の透水試験を実施し、岩盤の透水性に関するREVの評価を試みた。また坑道壁面の割れ目の分布から、統計的に透水性の異方性を表現できる透水テンソルを算定し、KD-90坑道周辺の透水性の異方性を推定するとともに、REVの評価を試みた。

本試験は、坑道を5区間（7.5m間隔）に分割

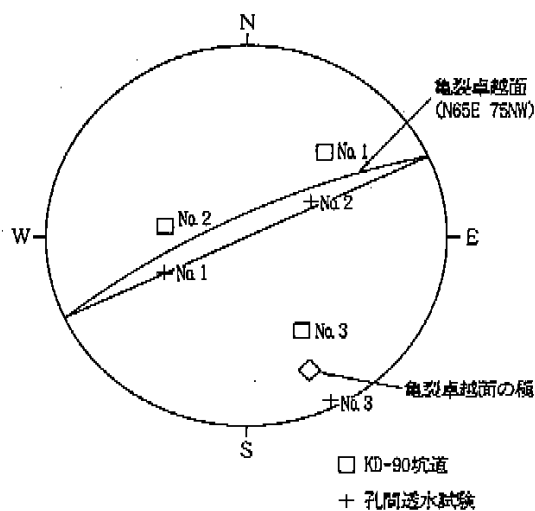


図6 透水係数の主軸方向（ステレオネット表示）

表2 試験区間長毎の湧水量、動水勾配と透水係数

区間長 (m)	試験区間	湧水量 (cc/min)	動水勾配	透水係数 (cm/sec)
7.5	1	357	5.39	2.34×10^{-5}
	2	548	5.09	3.81×10^{-5}
	3	26.8	4.78	1.98×10^{-7}
	4	29.4	4.58	2.27×10^{-7}
	5	401	4.38	3.24×10^{-5}
15.0	1, 2	853.1	5.24	2.88×10^{-5}
	3, 4	56.2	4.68	2.12×10^{-7}
	5, 6	430.4	4.48	1.70×10^{-5}
22.5	1, 2, 3	959	5.09	2.78×10^{-5}
	3, 4, 5	457.2	4.58	1.18×10^{-5}
30.0	1, 2, 3, 4	1034	4.95	2.19×10^{-5}
	2, 3, 4, 5	1005	4.71	1.89×10^{-5}
37.5	1, 2, 3, 4, 5	1416	4.85	2.07×10^{-5}

(注) 試験区間は、坑道奥よりナンバリング

し、各区間の坑道床面に設けられた堰により測定される坑道壁面からの湧水量と、KD-90坑道周辺の観測孔で計測される間隙水圧から求められる動水勾配より各区間の透水係数を求めるものである。透水係数は、(a)低圧ルジオン試験と同様に坑道周辺のポテンシャル分布は放射状と仮定し、坑道奥先端部からの球状流入分も考慮する。

試験結果を表2に示す。透水係数の値は 1.98×10^{-7} cm/sec $\sim 3.81 \times 10^{-5}$ cm/sec、坑道全体では 2.07×10^{-5} cm/secであり、KD-90坑道掘削前に、KH-5孔で行った低圧ルジオン試験とほぼ等しい結果であった。図7に各スケール（試験区間長）と相対誤差REとの関係を示す。図中の曲線は、測定値を補間した曲線である。

REVは、RE=0.3になるような規模と仮定するとKD-90坑道では20数mとなる。

一方、坑道壁面の割れ目分布から理論的に透水テンソル（透水係数、主軸方向）を算定した。結果を

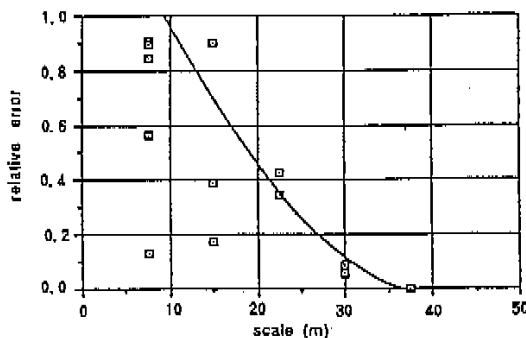


図7 岩盤透水試験におけるスケール効果

表3 KD-90坑道全体の透水テンソル

	透水係数 (cm/sec)	主 方 向	
		方 位 角	傾 斜
No.1	6.03×10^{-7}	41°	28°
No.2	5.13×10^{-7}	279°	46°
No.3	2.70×10^{-7}	150°	31°

表3に示すとともに、透水主軸方向をステレオネット上にプロット（図中□）した結果を図6に示す。透水係数の値は岩盤透水性試験に比べ、1オーダー小さな値であるが、透水テンソルの主軸方向は孔間透水試験と同様に、試験場周辺の割れ目卓越方向とほぼ一致している。また、本解析によるREVは、RE=0.3とした場合20数mであり、岩盤透水性試験結果とほぼ同じ値となった。これらのことから、割れ目調査から理論的に透水性の異方性やREVを推定できる可能性が示されたと考えられる。

d. ベンチレーション試験

前節の岩盤透水性試験は、堰により湧水量を計測しているため、湧水量の少ない難透水性岩盤に対しては、あまり有効ではない。このような測定方法では測定不可能な微量の湧水量の場合に適した測定方法として、ベンチレーション試験があり、すでにストリーバやグリムゼルで実施されている。

そこで、岩盤透水性試験と同一の場所でベンチレーション試験を実施し、その適用性を検討した。岩盤透水性試験と同様な手法で透水係数を算出しREVの評価を行った。

試験は図8に示すように岩盤透水性試験を実施した各区間の両端を隔壁により区切り、各区間に温風により通気を行い、その入気および排気に含まれる水分量の差から、蒸発量を算出するものである。なお、透水係数の算出には、この蒸発量と堰による湧

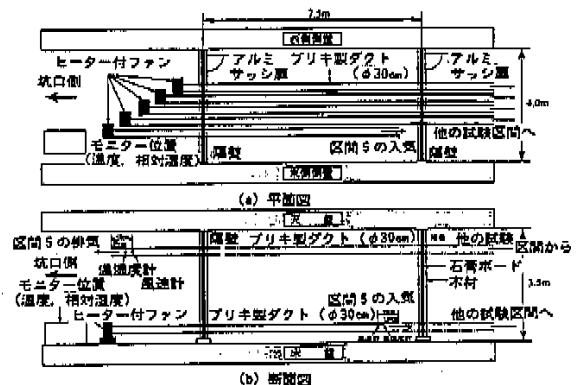


図8 ベンチレーション試験概念図

表4 各区間の湧水量、蒸発量および全湧水量(Stage I)

試験区間	湧水量(cc/min)	蒸発量(mg/sec)	全湧水量(cc/min)
区間1	570.4	180.0(10.8cc/min)	581.2
区間2	567.3	174.0(10.5cc/min)	577.8
区間3	16.8	70.0(4.2cc/min)	21.0
区間4	9.3	23.0(1.4cc/min)	11.3
区間5	410.4	1193.0(71.6cc/min)	482.0
合計	1574.8	1640.0(98.5cc/min)	1673.3

水量の和を用いた。また、温風通気条件として温度50℃、相対湿度20%程度を設定した。

試験結果を表4、5に示す。ここで表4は表5の温風通気(STAGE II)に先立って実施した自然状態の空気による強制通気(STAGE I)の場合の結果である。なお、区間5のみは、STAGE Iも温風通気を行った。全区間とも、STAGE IIの全湧水量がSTAGE Iに比べ増加しており、この増加分がベンチレーション試験により測定できた湧水量と考えることができる。特に区間3、4では湧水量はすべて蒸発量として回収することができた。このことは、本試験は今回設定した温風通気条件の場合、数10cc/min程度の微量な湧水量を精度良く測定できることを示していると考えられる。また、得られた透水係数は $2.24 \times 10^{-7} \sim 4.40 \times 10^{-6}$ cm/sec、坑道全体では 2.38×10^{-6} cm/sec、REVは図9に示されるように30m弱と、岩盤透水性試験結果とほぼ同じ値であった。

e. 単一割れ目の地下水流下試験⁹⁾

NW坑道壁面に現れた単一割れ目にトレーサーを注入し、実際に割れ目を切り出すことによって割れ目面上の流れを調査し、割れ目内の透水係数をパラメータとした2次元飽和不飽和浸透流解析でその流下状態を再現することを試みた。

試験は図10に示すように坑道壁面に現れた単一割れ目の上下に注入孔と観測孔を削孔し、注入孔からトレーサーを注入し、観測孔の各区間の投出量と測

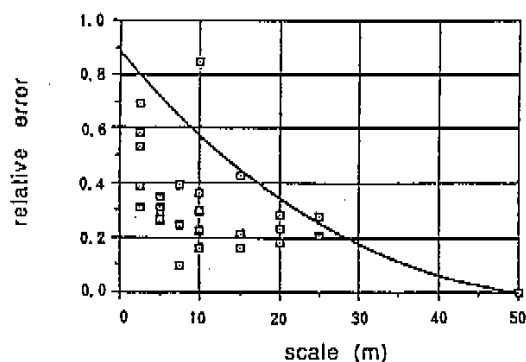


図9 KD-90坑道の割れ目解析による透水性におけるスケール効果

達時間を測定した。トレーサーにはエポキシ樹脂に溶かしたエオシンを用いた。

図11に地下水流下試験の諸元とトレーサー注入後切り出したブロックと岩盤の割れ目面上のトレーサーの付着状況から復元したトレーサーの流路を示す。注入圧は、0.2kg/cm²の定圧で行い、ほぼ30分後には定常に達した。この時の注入量は1.0cc/minであった。また、トレーサーの到達時間は12~14分程度であった。図より、トレーサーの流路は、岩盤奥に向かって斜め下方に細く流れる明瞭なものと、広く薄く直下に流下する不明瞭なもの2つが認められ、注入区間に近いところで分岐している。分岐している部分はトレーサーが広がっており、ここで流下を阻まれ滞留したものと推定される。また、割れ目面上に付着したエポキシ樹脂の厚さの測定結果によると、明瞭に現れた流路では0.2~2mmであり、中には2mmを越える部分も存在した。その対数平均値は1.03mmであった。

一方、図12に示すように2次元飽和不飽和浸透流解析の結果、流路にあたる部分では他の部分に比べ

表5 各区間の湧水量、蒸発量および全湧水量(Stage II)

試験区間	湧水量(cc/min)	蒸発量(mg/sec)	全湧水量(cc/min)
区間1	547.3	1343.0(80.6cc/min)	627.9
区間2	450.7	2192.0(131.5cc/min)	582.2
区間3	0.0	830.0(49.8cc/min)	49.8
区間4	0.0	467.0(28.0cc/min)	28.0
区間5	343.3	2325.0(139.5cc/min)	482.8
合計	1341.3	7157.0(98.5cc/min)	1770.7

注) 湧水量：坑道床面の堰により計測
蒸発量：入気と排気に含まれる水分量の差より算出

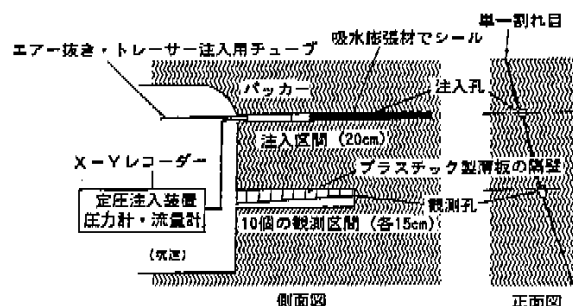


図10 試験の概要

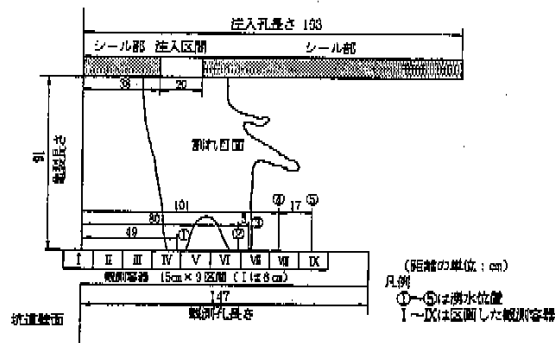


図11 試験諸元と復元したトレーサ流路

流速がきわめて速くなっていることがわかり、透水係数は流路の部分で -4.5×10^{-4} cm/sec、流路でない部分で 1.0×10^{-6} cm/secとなった。

以上のことより、本試験では、単一割れ目のチャンネルリング現象を実験的に確かめ、主要な流路の厚みが1 mm程度にも達することを明らかにした。とともに、2次元飽和不飽和浸透流解析によって流路と流路でない部分の透水係数は2オーダーの違いがあることが推定された。

4. 地下水の地球化学的特性に関する調査研究

深部結晶質岩中の地下水の化学的特性とその挙動を把握するために、NW、NE坑道を中心として地下水の水質分析を行い、地下水流動機構の推定を行った。

(1) 調査地域の概要

調査地域は、NW、NE坑道（550 mレベル）の既存坑道および新規坑道（KD88）、また550 mレベル坑道からのボーリング孔（KH-1孔）を含む領域で（図3参照）、その周辺の主要な地質は、栗橋花崗閃緑岩、蟹岳閃緑岩、蟹岳花崗閃緑岩、スカルン

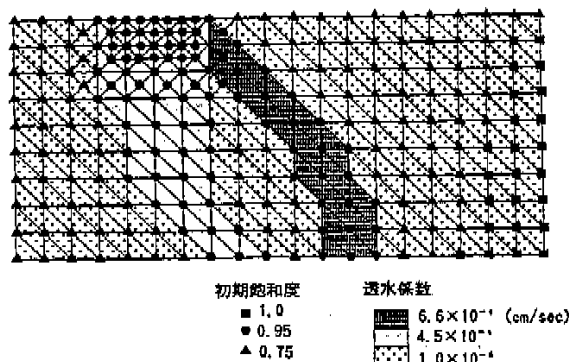


図12 飽和透水係数および初期飽和度の分布

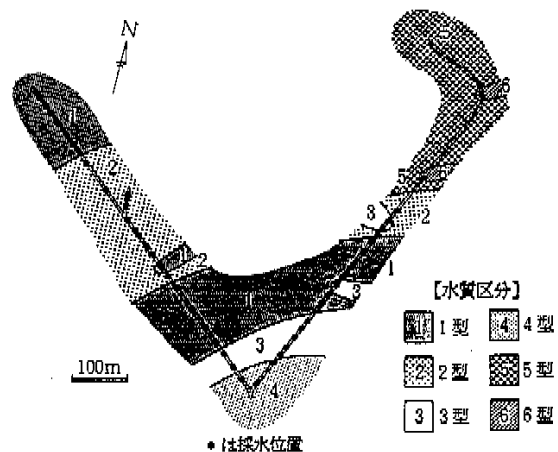


図13 550 mレベル坑道における湧水の採水位置および水質区分図

の4種類からなり、これらに伴いアプライト、ランプロファイアの薄い貫入岩がみられる。NE押し坑道の栗橋花崗閃緑岩、蟹岳閃緑岩は所々スカルン化しており、蟹岳閃緑岩は坑道最奥部で黄鉄鉱の鉱染が認められる。

(2) 地下水の水質による地下水流動の推定

1) 坑道湧水の水質

図13に採水場所を示す。坑道湧水の水質分析結果を、陽イオンと陰イオンの2成分系として、キータイグラムで表したものを図14に示す。なお、図中の黒の矢印は地下水中のイオンの富化を、白抜きの矢印は地下水の混合を示す。その結果、以下に示す6つの水質型に分類された。

- ①型：栗橋花崗閃緑岩の比較的高透水性ゾーンに分布する浅層タイプの地下水。
- ②型：栗橋花崗閃緑岩の低透水性ゾーンに分布するやや深層タイプの地下水。
- ③型：①型がスカルン、あるいは閃緑岩に由来する Mg^{2+} の富化を受けたと考えられる地下水。①型と④型が混合したと考えられる地下水。
- ④型：③型または①型がスカルン中の硫化物等から SO_4^{2-} の供給を受けたと考えられる地下水。スカルン中に分布。
- ⑤型：蟹岳花崗岩体中の硫化物から SO_4^{2-} の供給を受けたと考えられる地下水。蟹岳花崗岩の低透水性ゾーンに分布。
- ⑥型：①、②、⑤型が混合したものと考えられる地下水。⑤型の分布域に点在する。

KD-89坑道の湧水は、⑥型の付近に分布し、付

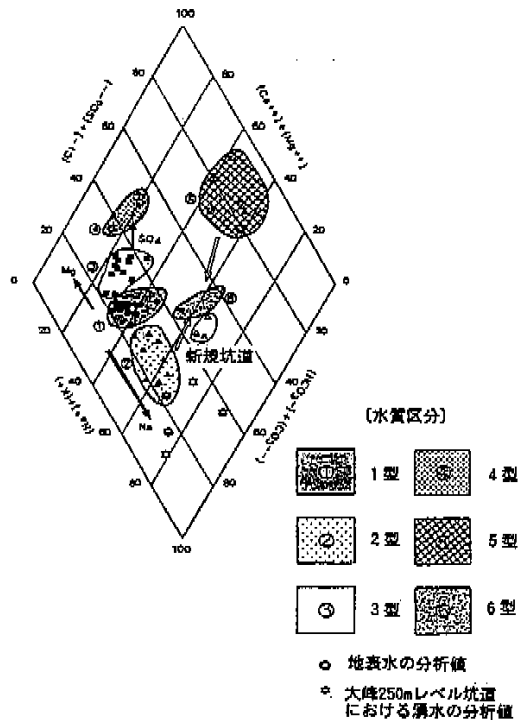


図14 550mレベル坑道における坑道湧水のキープダイグラム

近の既存坑道に湧出する②型の地下水よりも SO_4^{2-} が高化していると考えられる。

2) KH-1 孔の水質と長期間開放による変動

KH-1 孔をバッカーにより5区間(1区間約100m)に区切り、9ヵ月間にわたり3回採水し、水質の変化を調査した。その結果、除々に $\text{Na}-\text{HCO}_3$ タイプの深層被圧地下水系の領域から、 $\text{Na}-\text{SO}_4$ タイプの化石地下水的な水質状態へと変化する傾向が認められた。化石地下水的な水質状態へと変化する原因としては、鉱化作用を伴った蟹岳閃緑岩の SO_4^{2-} の供給が増加したためと考えられるが、これは蟹岳閃緑岩をゆっくりと通過してきた岩石・水反応のより進んだ停滞性地下水が、KH-1 孔の開放により岩体から絞りだされた結果と考えられる。

3) 環境同位体における特性

図15にKH-1 孔5区間の δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ の関係と長期開放による変動を示す。同図にはまた、磐石市の南方にある綾里における降水の安定同位体比測定結果に基づいて回帰した直線(降水ライン)を示してある。孔内の地下水は、降水ラインに沿っていることから、その起源は周辺地域の降水であると考えられるが、採水深度が増大するにつれて同位体比が小さくなる傾向が顕著に認められる。一般に、降水中

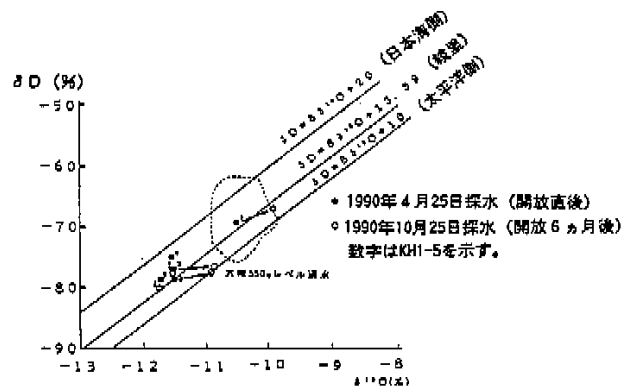


図15 KH-1 孔内地下水の δD - $\delta^{18}\text{O}$ 関係図と長期開放による変動

の水素・酸素の安定同位体比は、高標高の降水ほど小さくなることが知られている。このことから、孔内の地下水は深部になるほど、より高い標高から涵養されたものであることが推定される。

一方、KH-1 孔の各区間のトリチウム濃度は、最上部の区間1が開放直後に約6 TUと550mレベル坑道湧水における最低値とほぼ同じ値を示した。この区間では、坑道の影響を強く受けていることを示している。その他の区間の地下水は、いずれも2 TU以下であり、かん養後40年以上たった古い水であると考えられる。なお、開放6ヵ月後に採水した地下水は、いずれもトリチウム濃度が低くなっており、開放の結果、より古い地下水が絞り出されていると考えられる。

以上の水質分析結果を基に作成したこの地域での地下水流動の模式図を図16に示す。

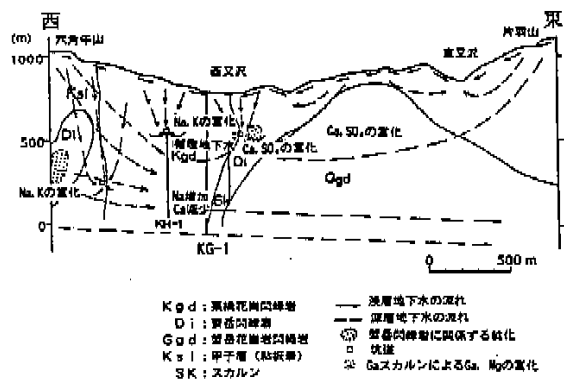


図16 厚位置試験場周辺の地下水流動模式図

今後、地下水の地球化学特性データを増やし、信頼性の高い地下水流動系の把握を行っていく予定である。

5. 岩盤力学に関する研究

(1) 坑道掘削影響試験

坑道の掘削影響の評価、特に坑道掘削による周辺岩盤内におけるゆるみ域（破壊）発生の有無を判定し、掘削に伴う周辺岩盤の透水性変化の評価を行うために新規坑道KD-89の掘削に伴う周辺岩盤の地圧・ひずみの変化を測定した。

坑道壁面より1 m程度離れば岩盤はおおむね弾性的挙動を示し、その影響範囲内外に試錐を行い、それぞれ割れ目系岩盤を代表するような地点において、岩盤物性の変化を測定した。

図17に試験の実施位置を示す。

地下岩盤内で坑道掘削した場合に、周辺の岩盤内に誘起される応力状態を理解するために、弾塑性軸対称モデルおよび弾塑性2次元断面モデルを用い、有限要素法による数値解析を行った。

1) 弾塑性軸対称解析

坑道の掘進によって変化していく周辺岩盤内の応力状態を把握するために、坑道縦断面の軸対称モデルを用いて解析を実施した。

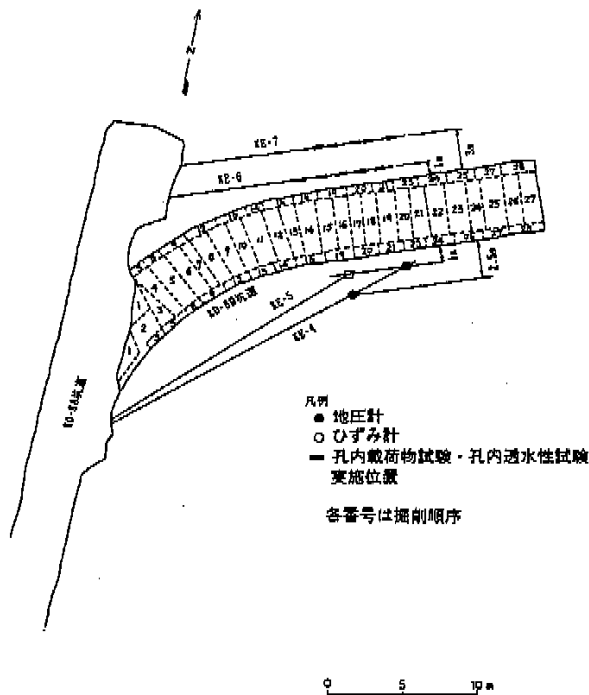


図17 掘削影響試験位置および試験孔の配置

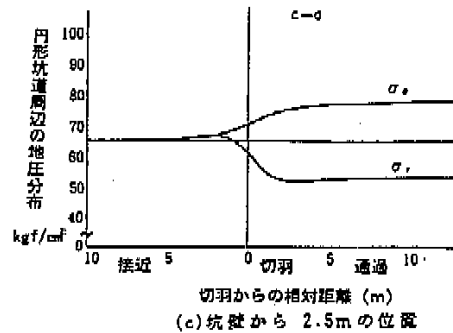
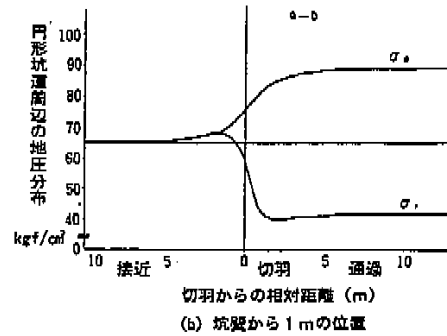
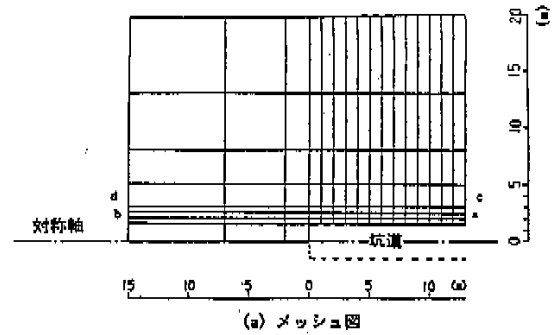


図18 円形空洞周辺の応力分布

ルを用いて解析を実施した。図18(a)にメッシュ図を、(b)、(c)に坑道軸方向の岩盤内応力分布を示す。(b)、(c)は、それぞれ地圧計設置位置に対応している。

計算結果から、土被り分の等方応力状態においては、岩盤は弾性的挙動を示している。また、坑道壁面からの距離が大きくなるにしたがって、切羽通過後の応力集中、および応力解放の度合い、つまり坑道掘削による応力変化が減少していく様子が現れている。

2) 2軸応力場における平面弾塑性解析

釜石鉱山の実際の坑道の形状に近い矩形断面で、坑道壁面と垂直方向の応力状態を把握するために、坑道横断面の平面弾塑性モデルを用いて解析を実施

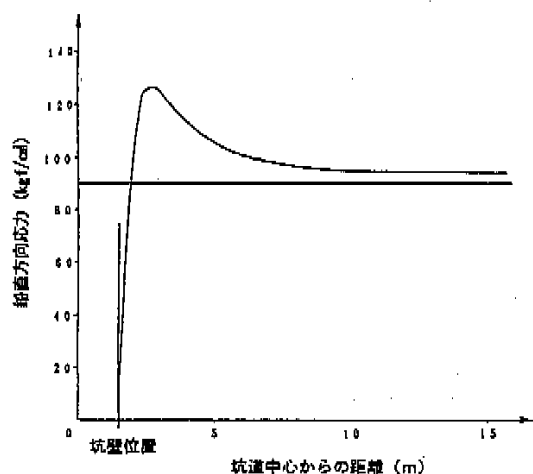


図19 矩形坑道周辺の応力分布

した。図19に鉛直方向の応力成分を示す。

坑道のごく近傍に塑性域(破壊域)が発生しているが、全体的には弾性的挙動を示していると言える。この場合、鉛直方向の応力は、坑道壁面近傍では解放されているが、岩盤深部に向かうにしたがって急激に圧縮状態へと移行したのち、初期応力状態へと漸移している。坑道の影響による圧縮応力の他に、坑道断面が矩形であるために引張応力が作用し、このように極大点のある複雑な応力分布を示すものと考えられる。

図20に、くさび形地圧計、多軸岩盤ひずみ計で測定した地圧、ひずみの経時変化を示す。地圧、ひずみとも測定器設置からの変化値で表示している。地圧計は、新規掘削坑道の壁面からそれぞれ1m、2.5m離れた位置に設置し、鉛直方向の地圧成分を測定した。

また、ひずみ計は新規掘削坑道KD-89の壁面から1m離れた位置に埋設しており、鉛直方向、坑道壁面と直交方向、平行方向の3ひずみ成分を測定した。

地圧変化を見ると、両位置とも切羽通過後圧縮状態となり安定している。これは、軸対称モデルによる解析結果の σ_r の挙動に対応している。地圧変化量は、坑道壁面に近い位置の方が小さくなっている。一方、ひずみ変化を見ると孔軸方向と水平方向(孔軸に垂直)は、切羽通過後引張状態となり安定

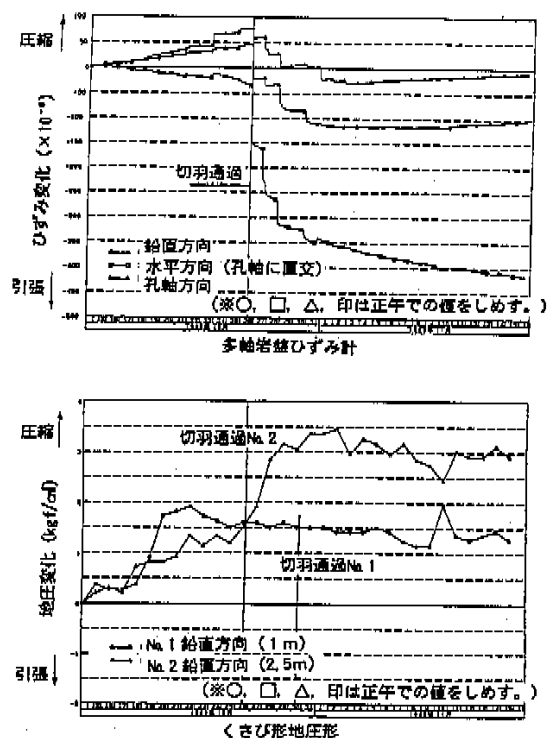


図20 くさび形地圧計、多軸岩盤ひずみ計の経時変化

している。これは坑道掘削による応力解放の影響と考えられ、解析結果の σ_r に対応するものである。しかし、鉛直方向のひずみは引張状態で安定しており、先の鉛直応力の測定結果とは逆になっている。しかし、実際の坑道断面は矩形であるので、坑道近傍ではかなり引張応力の影響を受け、坑道壁面に垂直な方向の鉛直応力は、図18のような分布をしているものと考えられる。したがって、地圧計・ひずみ計が坑道壁面から圧縮状態の極大点の間に位置しており、しかもひずみ計が初期応力値とほぼ等しい値をとる距離に位置していた場合に、上記の結果は説明がつく現象といえる。この場合、岩盤内の応力分布は複雑となっても、坑道周辺の岩盤は弾性的挙動を示しているといえよう。

これまで実施した坑道掘削の影響評価、計測結果の解釈は、定性的なものにとどまっているが、岩盤挙動ならびに物性変化を定量的に取り扱えだけの精度で計測し、解析することが今後の課題である。特に花崗岩のような割れ目系の岩盤では、破壊が生じる場合にはその範囲と程度を、また、破壊の発生に際し弱部となる割れ目の強度特性や割れ目の破壊に伴う透水性の変化程度を定量的に把握することが必要である。

6. 人工バリアに関する研究

(1) 岩盤内充填粘土挙動試験

処分システムの設計および性能評価においては、ニアフィールドの処分環境を評価する上で必要な、周辺岩盤からの圧力、地下水の浸透に伴う緩衝材の膨潤、廃棄体から発生する熱による応力変化と水分移動、地圧・膨潤圧による密度変化・含水比の変化が相互に影響を及ぼす熱-水-応力が連成した現象を正しく評価する手法が必要になる。

本研究では、原位置岩盤の割れ目を介した地下水の侵入によるベントナイトの膨潤圧、水分量の変動およびそれらの不均一性を調べる。併せてベントナイト中にヒーターを設けて、ニアフィールドでの伝熱特性を評価し、熱およびベントナイトの膨潤が周辺岩盤に及ぼす力学的な影響を明らかにする。

試験の概要を、図21に示す。試験は以下の項目にしたがって行う。

- ① 坑道床面に現れた単一割れ目を対象とし、ベントナイト充填孔に水をもたらすような割れ目を選定する。
- ② 周辺岩盤のひずみ、温度測定のための観測孔4孔を穿孔する。
- ③ 孔内載荷試験およびコアによる変成性試験を実施する。
- ④ 坑道床面から鉛直下向きに、上記の割れ目と交差するように $\phi 300\text{m}$ 、深さ1mのベントナイト充填孔を穿孔する。
- ⑤ 各観測孔にひずみ計、熱電対を埋設する。
- ⑥ ベントナイトブロックを組み立てる。

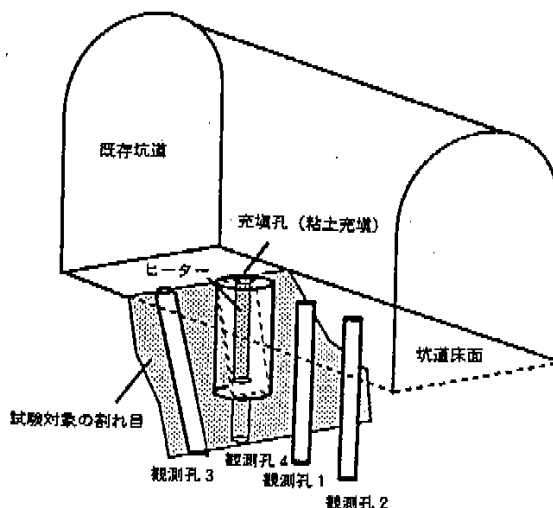


図21 岩盤内充填粘土挙動試験の概要

- ⑦ ベントナイトブロックを設置する。
- ⑧ 反力を取り孔口を網板で閉鎖する。

また、測定項目として、

- ① 緩衝材の膨潤圧の発生と周辺岩盤の力学的影響
- ② ニアフィールド伝熱特性の評価
- ③ 緩衝材の流出

があげられる。

熱-水-応力連成条件下での人工バリア（緩衝材、周辺岩盤）のモデルを確立するためには、解析に必要な緩衝材や岩盤の強度、透水、伝熱に関する物性値を取得する必要がある。このため、原位置におけるコアボーリングの実施および応力熱の伝達に関する基礎特性試験を実施する必要がある。また、本試験で得られたデータは、基礎特性試験で得られた値より計算した数値解析の結果と比較し、解析コードの妥当性を検討する。なお、岩盤内充填粘土挙動試験は現在準備中である。

7. 地盤に関する調査研究

(1) 地震観測

釜石鉱山の高峰地区坑道に設置した地震計の位置は、図22に示すとおりで、合計6箇所に設置してある。

その範囲は平面的には東西800m、南北800m、鉛直方向には地表付近(EL.865m)からEL.725m、EL.550m、EL.250mの各坑の3坑道、深度615m間にあわっている。

地震波の平面アレー観測網として、EL.550m坑に一辺の長さがそれぞれ760m、790m、860mの三角形を形成するよう測点を配置し、さらにこの平面上の3点と地表部の測点によって三角錐状の観測網を形成している。

これまで明らかになった釜石地区の地震の特性として、地表下約300mの坑道内における最大加速度

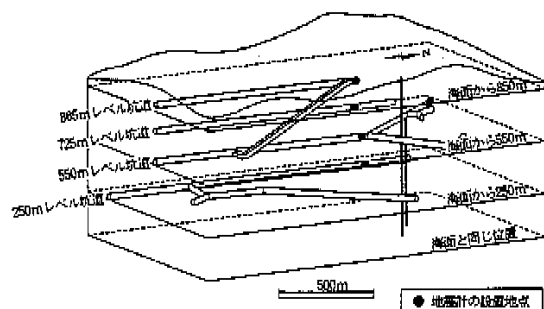


図22 地震観測点の配置図

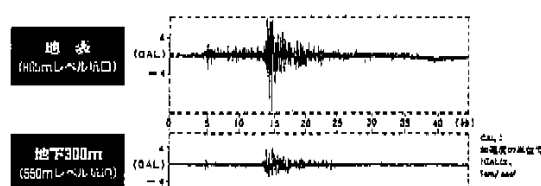


図23 金石の地震波形（観測結果の一例／1991年1月27日18時56分 マグニチュード4.6 震源までの距離58km）

振幅は概ね地表の1/2程度であり、他の研究例で見られる特性と類似した結果が得られた。（図23）これまでの観測により、地下深部における地震動特性を検討するのに不可欠な貴重なデータが得られつつある。今後の課題として、地震動の地下伝達率を一般化、定式化するとともに、地下深部における地震動をシミュレートできるモデルを構築することが必要である。

(2) 地震時空洞の安定性に関する研究

立型空洞に対する動的応答解析は、構造物—地盤系を3次元領域、不規則領域、無限層領域に分けてモデル化できるプログラムが用いられており、静的解析では軸対称リング要素を用いたモデルに等価震度、または変位を地震荷重として入力している。

動的解析法と静的手法の結果についても比較検討を行った。

この結果、立型空洞の解析法および補強設計等について以下の知見が得られた。

- ① 地震時の安定性評価のため、空洞掘削時解析による常時応力と、地震時発生応力の重ね合わせが必要である。
- ② 地震時解析としては動的解析を行うことが望ましいが、1次元地盤応答解析から得られた最大せん断力分布に基づく等価震度を作用させた静的解析法により、比較的適切な評価が可能である。
- ③ 安定性の評価基準としては、破壊包絡線とモールの応力円の最短距離により表わされる局所安全係数、およびポアソン比の変化が用いられるが、ここでは局所安全係数1.2以下を補強

対象領域の基準、ポアソン比0.45以上をゆるみ領域と規定した。

- ④ 上述の基準に基づき、補強対象領域を設定し、円弧すべり法、平面すべり法等で補強設計を行うが、そのときにも適切な震度を作用させる必要がある。

空洞の耐震性評価には、以上のような耐震安定性の検討手法が、基本的には適用可能と思われる。しかし、この検討方法による安定性の余裕度が充分でなければ、動的解析による検討も実施することが望ましいと考えられる。

(3) 地震が地下水流動に与える影響に関する研究

地下水観測として、主に電気伝導度の変動、観測孔の水圧、水質、湧水量変動調査を行った。湧水は、550m坑道内の9地点で採取した。

観測孔の水圧、湧水量変動は、降雨量の季節変動や、潮汐等の変動を鋭敏に捉えていることが明らかになった。また、地震の発生による地下水圧の変動は、これまでの観測結果からは、2 gal以上の最大加速度であれば過半数の場合に水圧の変動（0.03k gf/cm²程度の変化）があることが観測された。

水質の変化については、2つの陰イオン（HCO₃⁻とSO₄²⁻）の等量の相互関係に負の相関がみられたことから、水の混合率がわずかに変動した可能性があることが明らかとなった。今後は、さらに観測データを増やすことが必要である。

（環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ
北山 真、小川 豊）

参考文献

- 1) 柴田秀賢、日本岩石誌1、朝倉書店、(1968)。
- 2) 小貫義男、北上山地地質誌、東北大地質古生物誌、60、1～236、(1969)。
- 3) 南部松夫、他、昭和44、45、46、47、48年度地質調査報告書、遠田野地、全属鑑査事業団(1970、1971、1972、1973、1974)。
- 4) 南部松夫、他、昭和47、48、49、50、51、52年度地質調査報告書、遠田野地、全属鑑査事業団(1973、1974、1975、1976、1977、1978)。
- 5) 浜辺修二、野崎敏雄、岩手県蛇山付近の地質構造、蛇山地質、26、93～104、(1973)。
- 6) 熊沢、大上、日本地質図大系東北地方、地質調査所、朝倉書店、(1989)。
- 7) 河野義礼、植川真夫、本邦新花崗岩K-Ar dating (II)、北上山地の花崗岩類、岩誌、53、143～154、(1965)。
- 8) 仙波 敏、長方 伸久、他、ポアホールレーダーによる花崗岩類裂隙調査、応用地質学会平成3年度研究発表論文集。
- 9) 新見 健、野口 真文、他、花崗岩類における割れ目内流れに関する基礎的研究、土木学会第24回岩盤力学に関するシンポジウム、(1992)。