ボアホールレーダーによる花崗岩岩盤特性調査 —釜石鉱山原位置試験場における調査結果について—

仙波 毅^{*1}・尾方伸久^{*1}・長谷川健^{*1}・岩崎 浩^{*2}・渡辺邦夫^{*3}

Characterization of Granitic Rock by means of the Borehole Radar — On the Result of the Measurements at the Kamaishi Mine *in-situ* Experiment Site —

Takeshi SEMBA^{*1}, Nobuhisa OGATA^{*1}, Ken HASEGAWA^{*1},
Hiroshi IWASAKI^{*2} and Kunio WATANABE^{*3}

Key words : ボアホールレーダー borehole radar, クロスホール調査 crosshole measurement,
トモグラフィ tomography

Abstract

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) has been developing techniques of evaluating groundwater flow in granitic rock. In a link of this purpose, PNC introduced the borehole radar system (RAMAC) which was developed by Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., because it is critical to investigate the spatial extent and dimensions of fracture zones.

This report describes the results of crosshole measurements which were performed with RAMAC system at the Kamaishi Mine *in-situ* Experiment Site in the northern part of Honshu Island, Japan.

The results are summarized as follows:

- (1) Spatial extent of some low velocity zones and high velocity zones of electromagnetic waves were delineated.
- (2) Almost of the seeping points observed by borehole TV lies in the low velocity zones.
- (3) The fracture concentrated zones or fracture zones with groundwater recognized by observing the wall of the gallery, which was dug along the borehole used for crosshole measurements, corresponded to the low velocity zones.

These results indicate that the low velocity zone obtained by the borehole radar measurements corresponds with the fracture concentrated zone or fracture zones with groundwater.

^{*1} 動力炉・核燃料開発事業団 Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC)

^{*2} 日鉄鉱業株式会社 Nittetsu Mining Co., Ltd.

^{*3} 埼玉大学工学部 Faculty of Engineering, Saitama University

1. はじめに

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、割れ目や割れ目帯すなわち「水みち」の位置

・規模・その透水性を把握することが必要不可欠である¹⁾。動力炉・核燃料開発事業団では、この割れ目や割れ目帯の位置・規模・その透水性を非破壊で、かつ3次元的に把握するための調査技術開発の一環として、スウェーデン廃棄物管理公社 (SKB) が開発した試錐孔内用レーダーシステム (RAMAC) を1988年度に導入し、日本の岩盤における適用試験を実施してきた^{2),3)}。

レーダー法は波長の短い電磁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に着目して、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる手法である⁴⁾。レーダー法で得られる情報は岩盤の電気的な特性に関するものである。岩盤の電気的な特性はその含水量や水の電気比抵抗と密接な関係がある。岩盤中に割れ目等が発達していると、その部分の含水量が多くなり、含水量が多くなると電磁波速度は遅く、減衰は大きくなる。このような含水量の違いに起因する電磁波の速度や減衰の特性の変化から、岩盤の水理地質特性に深く関連している割れ目や割れ目帯の3次元的分布を推定することが可能となる。

本稿では、試錐孔内用レーダーシステム (RAMAC) の、日本の岩盤における適用試験の一環として、釜石鉱山原位置試験場内に掘削された試錐孔を用いてクロスホール調査を行ったので、その結果について報告する。

2. 調査位置

釜石鉱山は岩手県釜石市と遠野市の中間に位置する (図-1)。調査を実施した試錐孔は、海拔575.6 mに位置する550 m レベル坑道に掘削されており、試錐孔はすべて栗橋花崗閃緑岩中に掘削されている (図-2)。図-3は調査に使用した試錐孔の位置を示したものである。この図に示したように、KD-89坑道からKH-5号孔

図-1 釜石鉱山位置図

が水平に掘削されており、KH-5号孔を中心として、同一坑道の東側にKH-6号孔が孔間距離12 mで、西側のKD-88坑道に孔間距離13 mでKH-4号孔がそれぞれ同一平面内に水平に掘削されている。また、KH-5号孔鉛直上方13 mのKB-89B試錐座からKH-7号孔が水平に掘削されている。なお、試錐孔の掘削長は約50 mである。

3. 測定および解析法

3.1 クロスホール調査の場合の測定法

クロスホール調査は2本以上の試錐孔を利用して行う。この調査では、一方の試錐孔にトランスミッタ (発信プローブ) を、他の試錐孔にレシーバ (受信プローブ) を設置し、トランスミッタを一定深度に固定し、レシーバを一定間隔で移動させ測定を行う。トランスミッタと

図-2 原位置試験場550 m レベル坑道位置および地質平面図

図-3 試錐孔配置詳細図

レシーバ間の距離が大きくなり、明瞭な受信信号が得られなくなれば、このトランスミッタ深度における測定を終了し、トランスミッタを次の点に移動し、同様の測定を繰り返す(図-4)。今回の調査ではトランスミッタ、レシーバとも2m間隔で移動させた。測定に用いたアンテナの中心周波数は20 MHz および60 MHz である。表-1 に各測定断面における測定仕様、測定波線および解析に用いた波線数をそれぞれ示す。ただし、測定深度は、各試錐孔の孔口からの深度で示してある。各プローブの3次元的位置は、試錐孔の孔曲りデータを用いて決定した。

なお、測定は平成2年3月21日から3月25日に実施した。

3.2 解析法

クロスホール調査で得られたデータを用いて、トモグラフィ解析を行った。トモグラフィ解析では、試錐孔間の岩盤をいくつかの格子(セル)に分割し、各セル内の電磁波のスローネス(slowness; 遅さ)は一定と仮定して試錐孔間の岩盤の電磁波のスローネス分布を求める。ここで、電磁波のスローネスとは速度の逆数、すなわち、(スローネス) = $1/(\text{速度})$ である。今回の解析では、電磁波の伝播経路をトランスミッタとレシーバを結んだ直線であると仮定し(反射、回折等は考えない)、CG法(Conjugate Gradient method; 共役勾配法)を用いて解析を行った^{5)~7)}。

セルサイズについては、OLSSON 等が検討している⁴⁾。これによれば、トランスミッタ・レシーバの移動間隔と同程度およびその半分程度の大きさとして解析を行ったところ、両者の結果は良く整合しており、さらに、セルサイズが小さいほうが隣接するセル間の連続が滑らかで、かつ図が見やすくなると報告されている。そこで今回はOLSSON 等に倣い、トランスミッタ・レシーバの移動間隔の半分の1m×1mの正方形セルを用いて解析を行った。各々のセルを通過する波線数の平均は

25であった(図-5)。

トモグラフィ解析結果から得られるスローネスは、基準値との差(residual slowness; スローネス残差)で示した。ここではスローネスの基準値として9259 ps/mを用いた。これは、KH-7 と KH-5 号孔間の測定波線のうち、46本の波線を用いて求めた電磁波の平均伝播速度108 m/ μ sの逆数である。なお、明らかに測定誤差が大きいと考えられる波線については、予め測定データから除去して解析を行った。

表-1 調査仕様

KH-4・KH-5 号孔間	
電磁パルスの中心周波数	60 MHz
サンプリング周波数	632 MHz
測定深度 トランスミッタ	1.20 m~45.20 m(KH-5 号孔)
レシーバ	1.27 m~41.27 m(KH-4 号孔)
測定波線の総数	419
解析に用いた波線の総数	354
KH-6・KH-5 号孔間	
電磁パルスの中心周波数	60 MHz
サンプリング周波数	632 MHz
測定深度 トランスミッタ	1.20 m~43.20 m(KH-5 号孔)
レシーバ	1.30 m~45.30 m(KH-6 号孔)
測定波線の総数	439
解析に用いた波線の総数	356
KH-7・KH-5 号孔間	
電磁パルスの中心周波数	60 MHz
サンプリング周波数	632 MHz
測定深度 トランスミッタ	1.20 m~45.20 m(KH-5 号孔)
レシーバ	1.20 m~47.20 m(KH-7 号孔)
測定波線の総数	482
解析に用いた波線の総数	425
KH-7・KH-4 号孔間	
電磁パルスの中心周波数	20 MHz
サンプリング周波数	230 MHz
測定深度 トランスミッタ	1.27 m~41.27 m(KH-4 号孔)
レシーバ	1.20 m~47.20 m(KH-7 号孔)
測定波線の総数	504
解析に用いた波線の総数	246
KH-7・KH-6 号孔間	
電磁パルスの中心周波数	20 MHz
サンプリング周波数	230 MHz
測定深度 トランスミッタ	1.30 m~45.30 m(KH-6 号孔)
レシーバ	1.20 m~47.20 m(KH-7 号孔)
測定波線の総数	552
解析に用いた波線の総数	254
サンプル数*	512
スタッキング数	128

* 1 レコード中のデータ数

図-4 クロスホール調査概念図

図-5 トモグラフィ解析に用いた波線経路とセル分割図

図-6 トモグラフィ解析結果
(図中●は、ポアホールテレビで観察された湧水点位置を示す)

4. 解析結果

図-6が解析の結果得られたスローネス分布図であり、縦軸方向に試験孔深度をとってある。この図では寒色系はスローネスが小さいこと（以後、速度が速いと表現する）を表し、暖色系はスローネスが大きいこと（以後、速度が遅いと表現する）を表しており、左から、KH-6・KH-5号孔間断面、KH-4・KH-5号孔間断面、KH-7・KH-5号孔間断面、KH-7・KH-6号孔間断面およびKH-7・KH-4号孔間断面の解析結果である。解析結果では電磁波速度の速い部分および遅い部分の連続が認められ、これをまとめると、図-7および図-8のようになる。前者はトモグラフィ解析結果から推定される低速度（ $102\sim 105\text{ m}/\mu\text{s}$ ）を示す部分の連続（低速度部1～4）を、後者はトモグラフィ解析結果から推定される比較的高速度（ $106\sim 110\text{ m}/\mu\text{s}$ ）を示す部分（高速度部1～2）の連続を示す。ここで、 $102\sim 105\text{ m}/\mu\text{s}$ はスローネス残差が $600\sim 250\text{ ps}/\text{m}$ 、 $106\sim 110\text{ m}/\mu\text{s}$ はスローネス残差が $200\sim 150\text{ ps}/\text{m}$ の部分である（図-6）。

今回の調査から以下のことが明らかになった。

（1）低速度を示す部分の連続について（図-7）

・低速度部1

KH-7・KH-6号孔間断面の深度5m付近に見られる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-4・KH-5号孔間断面をかすめ、KH-7・KH-4号孔間断面へ抜ける。

・低速度部2

KH-7・KH-6号孔間断面の深度10m付近に見られる低速度部は、KH-6・KH-5号孔間断面を通り、KH-7・KH-5号孔間断面に抜けるが、KH-4・KH-5号孔間断面においてはKH-4号孔に向かっては延びていかない。

・低速度部3

KH-7・KH-4号孔間断面の深度7m付近に見られる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-6・KH-5号孔間断面に抜ける。

・低速度部4

KH-7・KH-4号孔間断面の深度37m付近に見られる低速度部は、KH-7・KH-5号孔間断面を通り、KH-6・KH-5号孔間断面に抜ける。

（2）比較的高速度を示す部分の連続について（図-8）

・高速度部1

KH-7号孔孔口付近からKH-4, 5, 6を含む断面の深度30m付近へ抜けるように、比較的高速度を示す部分が連続している（トモグラフィ解析結果ではある厚みをもっているが、ここでは便宜上平面として図示した）。こ

図-7 トモグラフィ解析結果から推定される低速度部（ $102\sim 105\text{ m}/\mu\text{s}$ ）の3次的連続

図-8 トモグラフィ解析結果から推定される高速度部（ $106\sim 110\text{ m}/\mu\text{s}$ ）の3次的連続

の部分の走行はNE系、傾斜はNW系である。

・高速度部2

KH-4・KH-5号孔間断面、KH-6・KH-5号孔間断面およびKH-7・KH-5号孔間断面の孔口付近に比較的高速度を示す部分が認められる。この高速度部は、KH-7・KH-4号孔間断面およびKH-7・KH-6号孔間断面へは連続していない。

この高速度部は坑道の開放面に接しているため、空气中を伝播してきた電磁波を誤って読み取ってしまい、結果として孔口付近の電磁波速度が実際よりも速く解析されたのではないかとすることが懸念された。そこで、KH-6・KH-5号孔間断面の坑道の開放面近くで得られたデータにより電磁波速度を求めた結果、 $109\text{ m}/\mu\text{s}$ の値を得た。これは、空气中を伝播する電磁波速度約 $300\text{ m}/\mu\text{s}$ の約3分の1に当ることから、空气中を伝播した電磁波を誤って読み取ったとは考えられず、この高速度部は岩盤の状況を反映しているものと考えられる。

5. 考察

岩盤中を伝播する電磁波の速度 V_p は、真空中を伝播

する電磁波の速度を $V_c (=229.8 \text{ m}/\mu\text{s})$, 岩盤の比誘電率を ϵ_r とすると,

$$V_p = V_c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

で表される。上式に示すように, 岩盤中を伝播する電磁波の速度は岩盤の比誘電率によって決定される。岩盤のマトリックス部の比誘電率は一般的に 5~10 であるのに対し, 水の比誘電率は約 80 と非常に大きな値をとるため⁸⁾, 岩盤の比誘電率は岩盤中の含水量に大きな影響を受ける。すなわち, 空隙率が大きくなったり, 割れ目が発達して岩盤中の含水量が多くなれば, 岩盤の比誘電率が大きくなるため電磁波の速度は遅くなる。したがって, 前章で述べたトモグラフィ解析結果で確認された電磁波速度が遅い部分は含水量が多い部分であると考えられる。また, 電磁波速度が速い部分は岩盤中に割れ目等が発達していないために含水量が少ない部分であるか,あるいは割れ目等が発達していてもその含水量が少ない部分であると考えられる。

KH-4, 5, 6, 7 号孔においてはボアホールテレビにより孔内の割れ目観察が行われている。この結果, 割れ目の卓越方向として N30~40°E 系と N80~90°W 系の 2 方向が確認されたが, トモグラフィ解析結果から推定した上記低速度部 1~4 の連続のうち, 1 と 2 は N80~90°W 系, 3 と 4 が N30~40°E 系と読み取れ, 両結果は整合している。また, 試錐孔 KH-4, 5, 6 号孔では, 湧水割れ目の位置がボアホールテレビにより確認されている。図-6 中に示した●が湧水割れ目の位置であり, 湧水割れ目の位置と電磁波速度の遅い部分の位置は良く一致している。先にも述べたように, 電磁波速度の遅い部分は含水量の多い部分であると考えられるので, 電磁波の遅い部分は湧水割れ目を含む割れ目帯であると考えられ, 先に推定した電磁波の低速度部の 3 次元的連続 (図-7 参照) は, 湧水割れ目を含む割れ目帯の連続であると推定される。

6. 調査終了後に掘削された坑道壁面で観察された割れ目との比較

この試験場では試錐孔を利用した調査終了後, KH-5 号孔に沿って水平坑道 (KD-90坑道深度約 50 m) が掘削された (図-9)。この坑道壁面における割れ目分布状況を調べることで, 試錐孔内の観察結果だけではなく, さらに広範囲の割れ目とトモグラフィ解析結果との対比が可能となった。

図-10に KD-90坑道における割れ目観察結果を示す。この図は坑道天盤を中心とした展開図となっている。坑道の天盤の位置は KH-7・KH-5 号孔間断面においては,

図-9 KD-90坑道および KE-6, KE-7 号孔の位置図

KH-5 号孔から KH-7 号孔に向かって 3 番目のセルに相当する。また坑道壁面の位置は, KH-4・KH-5 号孔間断面では KH-5 号孔から KH-4 号孔に向かって 2 番目のセルに相当し, KH-6・KH-5 号孔間断面では KH-5 号孔から KH-6 号孔に向かってやはり 2 番目のセルに相当する (図-6 参照)。トモグラフィ解析結果と坑道壁面で観察された割れ目とを定性的に対比するに当り, 坑道天盤で観察された割れ目の集中度合いにより, A~E の 5 つのゾーンに分割した。各ゾーンとトモグラフィ解析結果とを比較した結果について以下に示す。

(1) ゾーン A (0 m~10 m)

このゾーンは全体的に割れ目の密度が低く, 割れ目充填鉱物としては石英, 方解石, 濁沸石, 束沸石, ブドウ石等が認められる。割れ目に伴う変質は少なく, 天盤からの滴水はほとんど認められない。坑道壁面においては特に東側の側壁で多数の湧水点が認められたが, 湧水量はごくわずかであった。

トモグラフィ解析結果では, KH-4・KH-5 号孔間, KH-6・KH-5 号孔間および KH-7・KH-5 号孔間の各断面でこのゾーンで電磁波の速度が速くなっているが, これは上記のように, 割れ目の発達が少ないことと対応しているものと考えられるが, ここは坑道の開放面側であるため, 坑道壁面からの水分の蒸発により岩盤内の水分量が減少している可能性もある。

トモグラフィ解析結果では, KH-5 号孔を含む水平面内で KH-6 号孔方向と比較して, KH-4 号孔方向が電磁波の速度が速くなっている。この部分では以前に KD-88坑道から 2 本の試錐孔 (KE-6 および KE-7 号孔, 孔長はそれぞれ 15 m) が KH-5 号孔と直行する方向に掘削されていた (図-9 参照)。これら 2 本の試錐孔では掘削直後は多量の湧水が認められたが, その後湧水量は漸次減少しクロスホール調査時点では湧水はほとんど観察されなかった。つまり, この 2 本の試錐孔が新たな水みちとなり, 試錐孔周辺岩盤の水を KH-4 号孔側から

図-10 KD-90坑道における壁面観察結果

多く排水する形になり、岩盤の乾燥が進んだため、KH-4号孔側の電磁波速度がKH-5号孔側の電磁波速度よりも速くなったものと考えられる。

(2) ゾーンB (10m～20m)～ゾーンC (20m～30m)

このゾーンは割れ目密度が高く破碎帯も認められる。割れ目充填鉱物としては、石英、方解石、濁沸石、束沸石、ブドウ石等が基本的に認められ、他に緑閃石、緑泥石等も多く認められる。また、割れ目に伴う変質も発達する。ゾーンBにおいては天盤および側壁において多数の流水・滴水箇所が認められる。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間およびKH-7・KH-5号孔間の各断面とも低速度部が認められる。特にゾーンBの天盤の位置には電磁波速度が非常に遅い部分が解析されており、割れ目観察結果と良い対応を示している。また、ゾーンBでは破碎帯は天盤から西方向に延びているが、この部分では電磁波速度はKH-6号孔側（東側方向）よりもKH-4号孔側（西側方向）で遅くなっている。逆に、ゾーンCでは破碎帯は天盤から東方向に延びているが、この部分では電磁波速度はKH-4号孔側（西側方向）よりもKH-6号孔側（東側方向）で遅くなっており、トモグラフィ解析結果と割れ目観察結果はやはり良い対応を示している。

(3) ゾーンD (30m～35m)

このゾーンの割れ目密度はゾーンAよりは若干高いが、ゾーンB～Cよりは低くなっている。割れ目充填鉱

物はゾーンB～Cとはほぼ同様で、割れ目に伴う変質はゾーンB～Cと比較して少ないが発達している。また、この区間では坑道天盤および側壁からの滴水はほとんど観察されない。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間およびKH-7・KH-5号孔間の各断面とも電磁波速度はゾーンB～Cよりも速いが、ゾーンAよりは遅い中間の速さを示している。

(4) ゾーンE (35m～)

このゾーンは割れ目密度が最も高く、ゾーンB～Cと同様に破碎帯も発達している。割れ目充填鉱物はゾーンB～Cと同様である。割れ目に伴う変質はゾーンB～Cに次いで多く発達する。坑道天盤および側壁からの流水、滴水箇所および湧水量は他のどのゾーンよりも多く観察されている。

トモグラフィ解析結果では、KH-4・KH-5号孔間、KH-6・KH-5号孔間およびKH-7・KH-5号孔間の各断面ともゾーンB～Cと比較して電磁波の速度が遅くなっており、坑道天盤および側壁からの流水、滴水量が他のどのゾーンよりも多いことと良く対応している。

さらに、KH-7・KH-5号孔間断面には他の断面と比較してより低速度を示す部分があり、天盤方向に湧水割れ目を含む割れ目帯が発達しているものと考えられる。

以上示したように、坑道壁面観察の結果、岩盤の含水量が多いと考えられる部分とトモグラフィ解析の結果得

られた電磁波速度の低速度部はメートルオーダーで非常に良い対応を示し、電磁波の低速度部が湧水割れ目を含む割れ目帯の連続であるという推定の妥当性が確認された。

7. ま と め

釜石鉱山原位置試験場内に掘削された試錐孔を利用してレーダー法クロスホール調査を行い、そのデータを用いたトモグラフィ解析結果と試錐孔および坑道側壁面観察結果を比較した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) トモグラフィ解析結果により岩盤内の電磁波速度の低速度部および高速度部の3次元連続性を推定することができた。
- (2) トモグラフィ解析結果で把握できた電磁波速度の低速度部は湧水割れ目を含む割れ目帯の集中している所であり、低速度部の3次元連続は湧水割れ目を含む割れ目帯の連続であるという推定の妥当性が確認された。このことは、レーダー法クロスホール調査はボーリングや坑道調査と併用することにより、割れ目帯や破碎帯の3次元調査に効果を発揮することを示している。

以上、本稿において、クロスホール調査で得られたデータをトモグラフィ解析することにより岩盤内の含水状況を定性的に把握できることを示したが、岩盤の空隙率とその誘電率の関係を明らかにすることにより、(1)式を用いて電磁波速度から直接岩盤の空隙率を推定できるものと考えられる。そこで今後は、トモグラフィ解析結果から岩盤の空隙率分布を求め、岩盤内の含水量を定量的に把握する手法を構築し、その結果および透水試

験、地質記載等により岩盤の透水性を3次元的に評価するための手法を開発していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 渡辺邦夫, 柳沢孝一, PUSCH, R., 佐久間秀樹, 藍沢稔幸, 山本肇, 神田信之 (1990): 蒸発量計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定(その2)——現場計測——, 応用地質, 31巻, 1号, pp. 1-11.
- 2) 佐久間秀樹, 坪田浩二 (1988): 土岐花崗岩におけるRAMACシステムの適用試験について, 物理探査学会第78回学術講演会講演論文集, pp. 305-309.
- 3) 仙波毅, 尾方伸久, 坪田浩二, 大沢英昭 (1989): ポアホールレーダの適用例 (特に花崗岩に対するRAMACの適用), 地下電磁計測ワークショップ——地中探査レーダ, ポアホールレーダの現状と展望——論文集, pp. 66-70.
- 4) OLSSON, O., FALK, L., FORSLAND, O., LUNDMARK, L., SANDBERG, E. (1987): Crosshole Investigations—Results from Borehole Radar Investigations, Stripa Project TR 87-11, SKB, Stockholm, Sweden
- 5) IVANSSON, S., (1984): Crosshole investigations—Tomography and its application to crosshole seismic measurements, Stripa Project TR 84-08, SKB, Stockholm, Sweden
- 6) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫 (1989): Getomographyにおける再構成手法評価(その1), 物理探査学会第79回学術講演会講演論文集, pp. 49-54.
- 7) 坪田浩二, 則竹和光, 伊東慎司, 落合竜夫 (1990): Getomographyにおける再構成手法評価(その2), 物理探査学会第80回学術講演会講演論文集, pp. 36-41.
- 8) CARMICHAEL, R. S., (1989): Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals, CRC Press, Inc.

(1991年8月15受付, 1991年11月30日受理)