

(31) 神岡岩盤試験場におけるき裂調査・比抵抗トモグラフィと岩盤水理特性
Hydraulic property characterized from joint survey and resistivity tomography
in Kamioka underground laboratory

鈴木健一郎*、並木和人*、丸山 誠*、桑原 徹*
Kenichirou Suzuki, Kazuto Namiki, Makoto Maruyama, and Toru Kuwahara

Permeability tensor were predicted using information obtained from a joint survey and laboratory permeability tests in Kamioka underground laboratory. Anisotropy of the permeability tensor are compared to that obtained from cross-hole tests. The differences between them are explained with the results of resistivity tomography survey to some extent. However, this result suggests that the major difficulty to predict the permeability tensor in this site is due to the identification of permeable joints.

1. はじめに

岩盤は不連続面の存在により多かれ少なかれ異方的な構造を有している。構造の異方性は水理学的な特性にも影響を与え、透水性にも異方性が現われる。このように不連続面によって形成される構造を基に岩盤の等価な透水テンソルを推定する手法の一つにクラックテンソルがある。神岡地下岩盤試験場において地質調査¹⁾および水理調査²⁾を実施し、不連続面の構造特性をクラックテンソルにより現わし、水理調査結果と比較することにより次のような結果を得た¹⁾。①試験サイトの岩盤が多孔質媒体として近似することの妥当性を9 m x 6 mの領域に対して実施したき裂調査結果に基づき、REVの概念およびき裂の連結性から検討した。き裂分布の意味からは調査地の岩盤はREVである。すなわちき裂分布の意味からは多孔質媒体として近似することが可能である。②三乗則を用いて、全てのき裂が同一の開口幅を持つとしてクラックテンソルにより透水係数を推定した。この時、開口幅に見掛けの開口幅を用いた値よりもサンプリングされた供試体の室内試験透水による水理学的開口幅を用いて算出した値の方がクロスホール透水試験結果をオーダー的に反映する。

この報告では、岩盤の構造の異方性と透水性の異方性について考察を行った。岩盤の表面き裂調査結果に加え、孔内き裂調査および比抵抗トモグラフィ探索から岩盤内の構造を推定し、透水試験から得られた岩盤水理特性と比較を行った。

2. き裂調査による透水テンソル

き裂調査データより、次の方法により透水テンソルを予測した。

$K_{eff(n)}$: 試験場床面の全き裂を対象として次式より求めた場合

$$k_{ij} = \frac{g}{12\nu} (P_{ik} \delta_{kj} - P_{ij}) \quad , \quad P_{ij} = \frac{m^{(L)} t_0^3}{h \langle \ln \cdot q \rangle} N_{ij} \quad (1)$$

ここに、開口幅 t_0 は実験室内で求めた水理学的開口幅(20 μ m)、き裂密度 $m^{(L)}$ は直交3方向でおよそ等しくほぼ10 (1/m)である。これらの値は全てのケースで同一とし、方向テンソル N_{ij} のみが各ケースで異なる。

$K_{eff(b)}$: 3試験孔において観察された全き裂を対象とした場合

* (株)大林組 技術研究所

$K_{ct(f+b)}$: Kct(f)とKct(b)のすべてのき裂を対象とした場合

$K_{ct(open)}$: 3試験孔において観察された開口き裂(11本)のみを対象とした場合

$K_{ct(rec)}$: 試験場床面の開口き裂(157本)が深度方向に一定長さの長方形であるとして次式より求めた場合

$$P_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^m l^{(n)} l^{(n)3} N^{(n)}_{ij} \quad (2)$$

ここで、 n 番目の開口幅 $l^{(n)}$ は、観察開口幅の平均と室内試験より求めた水理学的開口幅の比(22:1)により観測値を補正して求めた。 $l^{(n)}$ は n 番目のき裂のトレース長さである。

図-1にこれらの予測透水テンソルの主軸方向をステレオ網の下半球に投影したものを示す。図にはクロスホール透水試験結果(K_{ch})も並記した。これより次の点が指摘される。クロスホール透水試験から得られた透水テンソルの主方向は、最小値がNW-SE方向SE落ちであるから、それを法線とする面、すなわちN64E64N面上に他の2方向がある。最大値の方向はNW落ちである²⁾。 $K_{ct(f)}$ の主値方向は、EW方向E落ち、すなわち南北走向ほぼ鉛直のき裂が支配的な結果となり、 K_{ch} とは最大主軸方向は一致するが、中間と最小が回転している。 $K_{ct(b)}$ は、ランダム方向のヘアクラックを含むため試験結果とも表面のき裂分布とも整合しない。これら両者を含めた $K_{ct(f+b)}$ は、表面のき裂の方向に大きく依存し、ほぼそれに近くなる。 $K_{ct(open)}$ の場合は、試験場の3孔に交わった開口き裂のほとんどがS傾斜であるなど、表面に現われる特徴的なき裂と方向が整合しないため主軸の方向が異なる。 $K_{ct(rec)}$ の結果は $K_{ct(f)}$ とはほぼ同じ結果となった。

図-2に孔間試験から得られた透水テンソルと表面き裂の観察から計算された透水テンソルの主値と主方向を示した。孔間試験から決定された透水テンソルは異方性が大きく、予測値は小さいものである。

これらの違いの生じた原因を検討するためにき裂の方向と長さおよび方向と開口幅の関係を調べた。表面き裂調査により得られたき裂のトレース長さとき裂の走向との関係を図-3に示す。試験サイトの表面に現われたき裂は、急傾斜なN-S走向とNW-SE走向が卓越しており、それらの走向のき裂がやや大きいものであることを示している(図中の斜線部分)この傾向は試験場周辺の断層の方向に整合する。また、図-4にき裂の開口幅(マイク

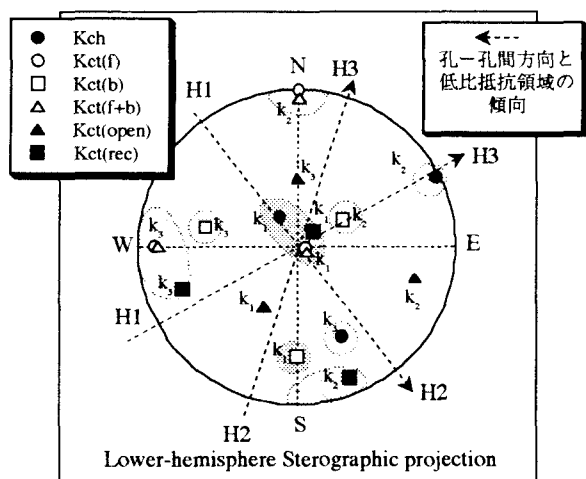


図-1 透水テンソルの主軸方向のステレオ網下半球投影および孔-孔間方向における低比抵抗ゾーンの傾斜傾向

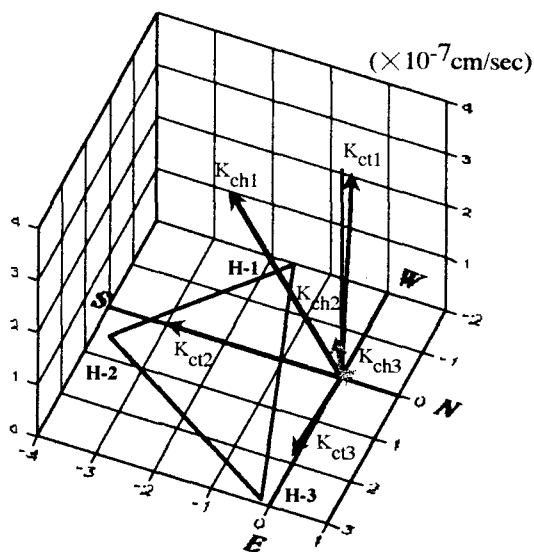


図-2 透水テンソルの主値と主方向(孔間透水試験結果および予測透水テンソルKct(f)、孔間透水試験孔配置)

ロスコーブにより計測された見掛けの開口幅)と走向との関係を示す。図中の斜線部分は図一3と同様である。開口幅の走向に対する分布も卓越方向に広い開口幅を持つ傾向がわかる。ただし、開口幅とトレース長さの相関性をとるとほとんど無い結果となる。サイト周辺のボーリング孔において観察されたき裂の卓越方向解析結果からは、開口き裂の卓越方向はNW-SE走向が得られており³⁾、その結果との対応からはN-S走向の開口性は表面掘削によるものと考えられるが、後述するように帯水性はある。また、試験場の3孔の観察からは開口き裂のほとんどがS傾斜であることからやや特殊な領域であることがいえる。

これらの地質調査結果と水理調査結果の差についての情報を得るため、試験対象領域内の深度方向での面的構造を知ることを比抵抗トモグラフィにより行った。

3. 比抵抗トモグラフィ調査結果

比抵抗は、岩盤についても、造岩鉱物の種類やその比率によって異なるため、岩盤構造推定が可能である。岩盤中では、岩自体の比抵抗が高いため、測定される比抵抗値はき裂や断層破碎帯などの主に間隙中の水の比抵抗の影響を強く受け、それらが地下水面下にあるとき、比抵抗は周囲に比べて低く測定される。この特性を利用して水理構造との比較を試みた。

3.1 測定方法

比抵抗探査の実施概念図を図-5に示す。坑道底部から下方へ掘削した3本のボーリング孔について、2本を一配置として3配置実施した。2本のボーリング中に孔中電極を挿入し、遠電極を約250m離れた坑外に設置して測定を実施した。坑内電極の間隔は0.5mで、1配置につき測定データ数は288である。なお、一般的には、同一孔の電極間での測定や地表

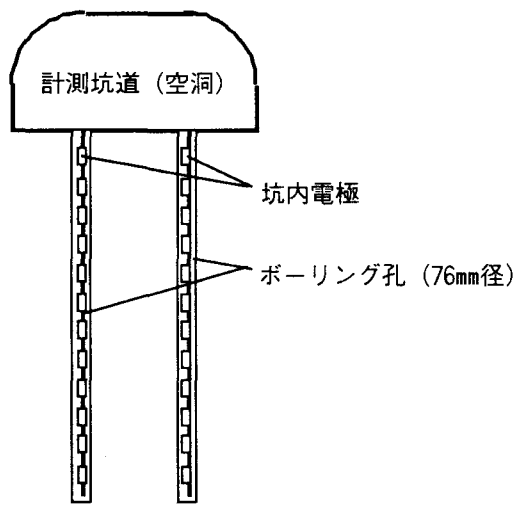


図-5 比抵抗探査の実施概念図

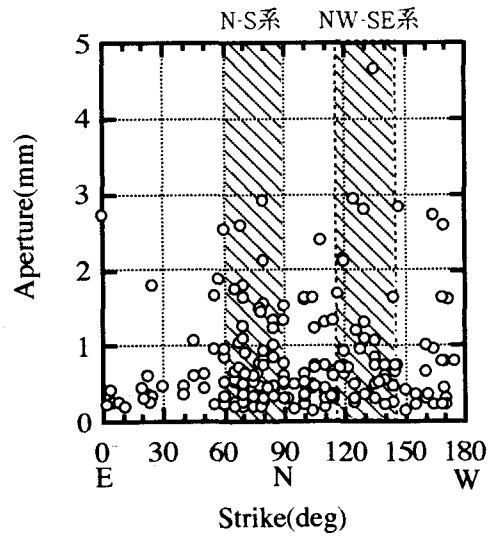


図-3 き裂の走向と開口幅との関係
(試験サイト床面き裂)

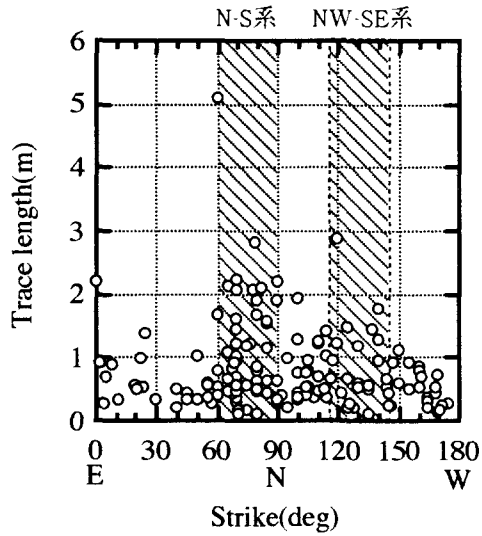


図-4 き裂の走向とトレース長さとの関係
(試験サイト床面き裂)

電極を併設しての測定を実施により、データ数を増やしてトモグラフィ解析の精度を高める必要がある。しかし、このサイトでは同一孔の測定データの採用により解析精度が低下することが過去の事例より明らかになっている。よって同一孔内の電極同士での測定は実施せず、地表電極の併用も電極設置の困難さより実施しなかった。測定器には応用地質（株）製の多点測定用電気探査装置McOHM21を使用した。比抵抗探査には電極の配置は二極法配置により実施した。解析は、FEMを用いて最小二乗法によるインバージョンにより実施した。

3.2 解析結果

図-6にトモグラフィ解析の結果を示す。3面とも比抵抗値は1000Ωm～10000Ωmの範囲に位置しているが、10000Ωm以上の高比抵抗部も部分的に存在する。これは一般的な地盤の値に比べて非常に高いのが特徴である。しかし、同じ神岡鉱山サイトにおいて、二本の斜孔を用いて実施した比抵抗トモグラフィの結果⁵⁾に比べると、全体的に低い値となっている。全体の傾向を低比抵抗ゾーンのおよその方向性として図-1に並記した。各断面の特徴は以下のようにまとめられる。

・断面1（H1-H2間）：地表近傍はH1側、H2側ともに1000Ωm程度の低比抵抗部が存在し、これは表層のゆるみと対応する。GL-1m～4.5mの範囲は10000Ωm以上の高比抵抗部となっており空地と呼ばれるスカルンに対応している。GL-7m～10m付近までは2000Ωm～4000Ωmの比較的低比抵抗な部分（伊西岩部分に対応）

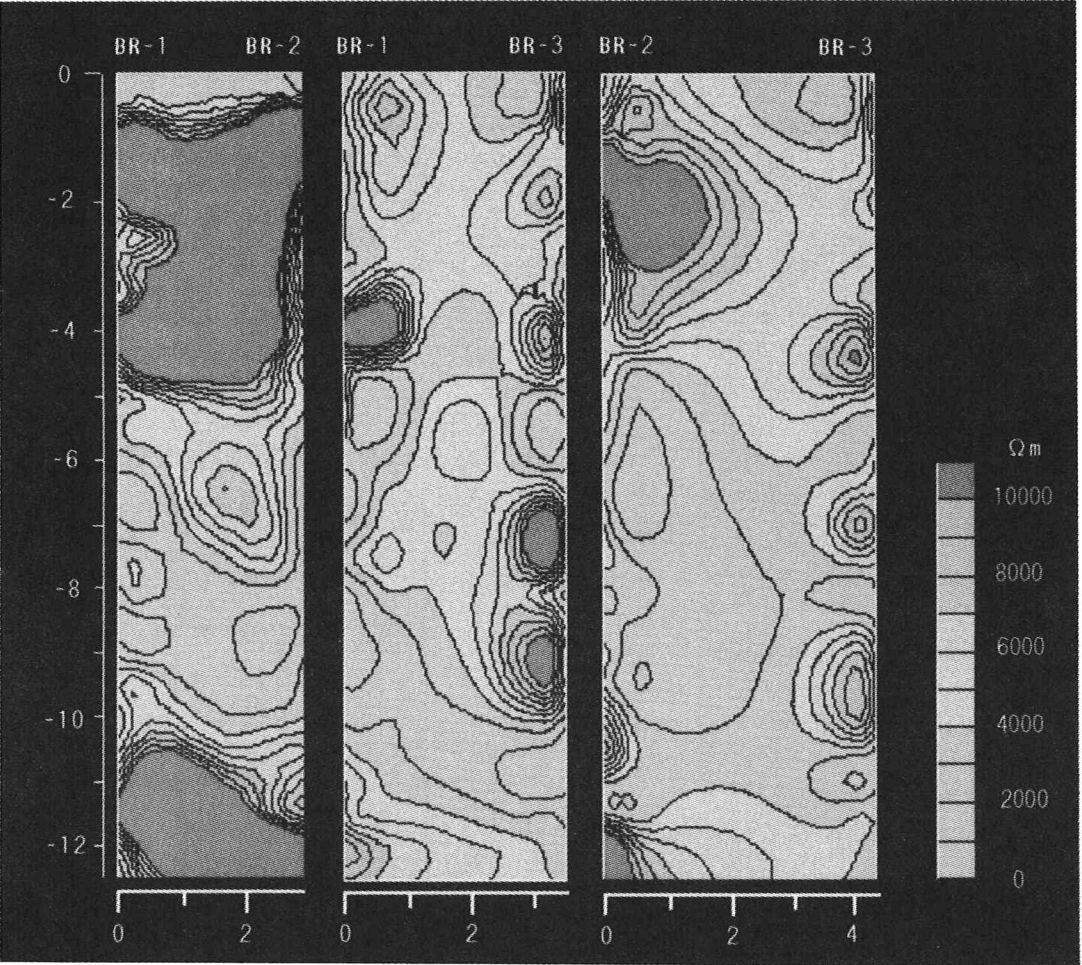


図-6 トモグラフィ解析の結果

が存在しており、この部分がH1側よりH2側へ傾斜（SE傾斜、図-1参照）していることが特徴である。GL-9.5m以深には10000 Ω m以上の高比抵抗部も空地に対応している。

・断面2（H1-H3間）：H1側のGL-4mと-12m付近、およびBr-3側のGL-2m、-4m、-7～-9mに高比抵抗部の分布は空地に対応している。また、この断面ではほぼ全域に低比抵抗部が表れていることが特徴である。

・断面3（H2-H3間）：H2側のGL-1.5m付近を中心に5000 Ω m～10000 Ω m以上の高比抵抗部が存在しているが、GL-5m以深には1000 Ω m～4000 Ω mの低比抵抗部が広く分布しているが、ボーリング孔に現われる空地の分布に比べ、断面3内にはその分布が広くないことを示唆している。

断面相互間のボーリング付近の比抵抗分布のつながり、岩種の分布との対応もよく解析結果は妥当なものであるとすると、試験場の比抵抗構造として、3つの卓越構造、①深部では東落ちに緩傾斜で3孔に連続する領域、②断面2に沿う領域および③断面3に沿う領域が推定された。断面2領域は透水試験から推定された主方向に一致し、断面3領域はき裂分布からの予測透水係数の主方向に一致する。両者の鉛直方向への連続性は断面3の方がやや優勢とみられる。この結果は透水試験から推定される主方向とき裂分布から推定される主方向の両者を支持するものであるが、異方性の程度については判断となる情報は得られない。

4. おわりに

孔間試験より得られた透水テンソル、クラックテンソルより推定された透水テンソルを用いた浸透流解析では、図-7に示す例から、実測値からの近似透水テンソル、き裂調査からの予測透水テンソルおよび間隙圧の実測応答はそれぞれおおよそ対応する結果となった。これは、解析的にある程度の妥当性が示される場合でも、孔間透水試験の孔配置とき裂の分布の関係から適当な配置がある可能性を示唆するものと考えられる。

比抵抗トモグラフィのよる比抵抗構造の把握では、岩種の違い、き裂の大局的な分布特性が表現され、全体を平均化するよりは詳しい情報を提供することが示された。

開口性のき裂で、しかもボーリング孔に交わり、少なくともそれから水が入り、それが連続して圧力の応答があることが各認されて、さらに途中の経路の可能性が指摘された場合でも全体の平均化において、その方向性を規定するには課題が残された。ある程度の地質調査により岩盤の平均的な透水性は把握可能であるが、透水経路を特定し、それをもとに方向を特定するにはより詳細な地質的な判断を得るための情報の収集が要求されることが指摘される。

【参考文献】

- 1) 鈴木ほか；地下岩盤試験場の水理特性に関する研究（その1）岩盤亀裂調査による等価透水係数テンソルの推定、第50回土木学会年次学術講演会、1995
- 2) 須藤ほか；地下岩盤試験場の水理特性に関する研究（その2）原位置岩盤のクロスホール透水試験結果について、第50回土木学会年次学術講演会、1995
- 3) Oda, M., Hatsuyama, Y., and Ohnishi, Y. Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden. Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B8, pp. 8037-8048 (1987)
- 4) 天野ほか；地質調査情報に基づく透水亀裂の判別、第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 126-130(1995)
- 5) 並木ほか；地下実験施設におけるジオトモグラフィ探査と岩盤評価(その2)、第29回土質工学研究発表会講演集、pp.127-130(1994)

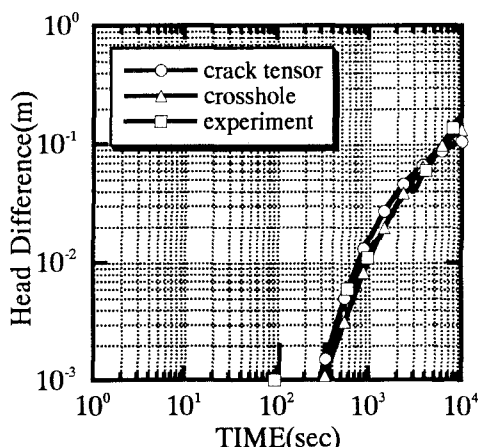


図-6 浸透流解析の結果
(H1-6m注入H3-10m観測の場合)