

(67) 割れ目モデルによる孔間透水試験解析の試み

埼玉大学工学部 ○荒井紀之
日鉄鉱業(株) 岩崎 浩
清水建設(株) 藍澤稔幸
埼玉大学工学部 渡辺邦夫

Analysis of the pressure distribution change caused by a injecting test
by using a fracture network model.

Noriyuki Arai, Saitama University
Hiroshi Iwasaki, Nittetsu Mining Co., Ltd.
Toshiyuki Aizawa, Shimizu Const. Co., Ltd.
Kunio Watanabe, Saitama University

Abstract

Authors have developed a fracture network model (DONCHAN MODEL) for analyzing the fracture flow around a tunnel. This model is based on an assumption that the groundwater flows in a conduit system composed of channels in major fractures and intersections between the fractures. The hydraulic head change caused by the water injection around a tunnel of the Kamaishi mine was analysed by using this model. The obtained results are as follows;

1. The influence of the channel direction on the head response could be successfully evaluated.
2. Channel direction seems to be roughly identical to the lineations developing on a fracture.

1. はじめに

岩盤内の地下水の主要な浸透経路は、連続性のよい割れ目である。さらに地下水は、これらの割れ目内を一樣に流れるのではなく、むしろ特定の水みち(チャンネル)に沿って流れることが指摘されている。著者は以上の観点に立って、割れ目系の中の特に重要と思われるチャンネルなどの流れ経路のみを取り出し、3次元管路網として解析するモデル(DONCHAN MODEL)を開発した。そのモデルを釜石鉱山原位置試験場の位置するNW押し坑道に適用し、まだ定性的であるが実際の湧水量分布を解析できることを示した¹⁾。今回は、このモデルを使い孔間透水試験の解析を試みたものである。

2. モデルの考え方

岩盤中の割れ目系はきわめて複雑であり、さらに一つの割れ目面内においても場所により透水性が異なる。このように複雑な浸透経路をもつ媒体内の流れをモデル化する場合、解析の目的を考慮し実際の流れの性質が失われないように配慮しながら簡単化する必要がある。このモデルでは、以下の仮定を導入している。

①各割れ目上には流れやすい方向が存在する。また、地下水は、割れ目面内を一樣に流れるのではなく、チャンネルと呼ばれる高透水部を主要

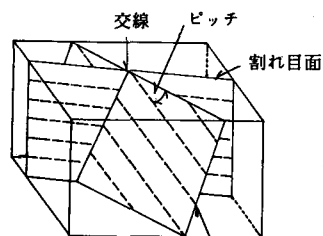


図-1 モデル模式図

に流れている。

②異なった2つの割れ目の交線部は、透水性が大きく、水みちを形成している。

③坑道近傍30～50 m程度の領域内では、割れ目は連続している。

①について、今回は簡単のために各割れ目は一つの方向にのみ透水性を有するとした。この性質は、図-1のモデル模式図に示されるように、割れ目面内に一定の方向性を持ち、ある一定間隔で並んだ仮想水路を考えることにより再現した。②の仮定は、著者らによる坑道壁面の蒸発量測定結果や、湧水分布の観察等から設定されたものである。また、この仮定により、割れ目相互の水のやり取りが可能となる。

以上のように、このモデルはかなり大幅な簡単化がなされている。しかし、従来のモデルに比べ多くの割れ目を取り扱うことができ、計算も容易でありまた現場対話的解析として発展させることが可能である。

3. 孔間透水試験

試験方法は、複数のボーリング孔に注入区間と水頭観測区間を配置し、注入区間から一定流量を与えながら観測区間で水頭増加量の経時変化を観測する。そして、この水頭増加量の経時曲線とあらかじめ求めておいた均質異方性媒体の理論曲線をフィッティングさせることにより透水テンソルなどの水理定数を求めるものである²⁾。しかし、実際の割れ目系を含む岩盤においては、均質な多孔質媒体とのずれの程度におおじて様々な解析上の問題が生じることが指摘されている。たとえば、理論曲線と観測曲線のフィッティングがうまくいかない、各観測ごとに得られる方向透水係数が大きくばらつく、透水テンソルの主値が負となり物理的に意味のあるデータが得られない等である。このような場合は、従来の方法で水理定数を求めることは難しく、割れ目モデルを用いた解析が必要と思われる。

3. 1 釜石鉱山原位置試験場における試験結果

今回の解析は1990年4月に釜石鉱山・原位置試験場において、動力炉・核燃料開発事業団により行われた孔間透水試験結果³⁾を対象とした。原位置試験場は当鉱山の北端に位置し、標高は約575 mであり、試験サイト付近の土被り厚は約260 mである。試験場周辺は、中生代白亜紀に貫入した栗橋花崗閃緑岩体が分布している。卓越割れ目と

して走行N30°～90°E、傾斜60～90°NWの比較的連続性のよい割れ目が存在する。図-2は、試験サイト周辺の坑道および試験孔の配置を示したもので、KH-4～KH-9の計6本のボーリング孔が設けられている。ただし、KH-8孔とKH-9孔は、孔間透水試験終了後、当試験サイトの水頭を測定するために掘削されたものである。また、表-1は、解析の対象とした試験ケースである。

注入区間は、図-3に示されるようにKH-5孔に2区間設けられている。孔口よりそれぞれA、C区間と

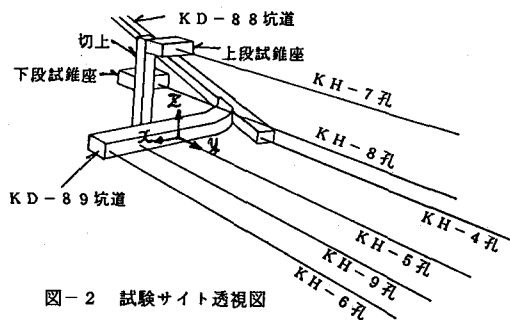


図-2 試験サイト透視図

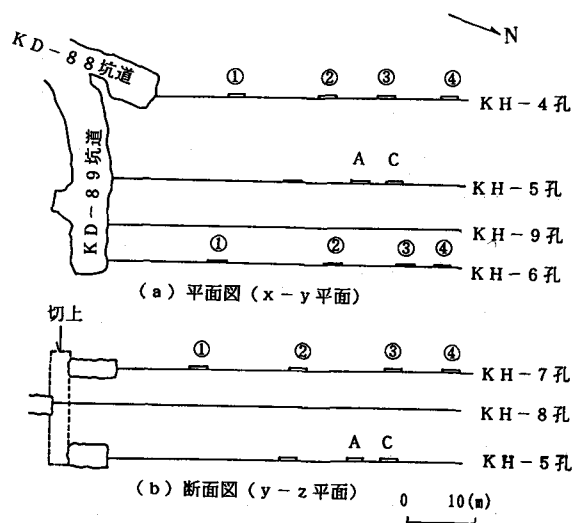


図-3 試験区間の配置

表-1 解析に使用した試験ケース

試験ケース	注入区間	注入量 (cc/sec)
試験A	A	4.45
試験C	C	0.30

呼ぶことにする。また、観測孔については、KH-5孔を囲むようにKH-4、KH-6、KH-7孔から成る3本のボーリング孔が配置されている。観測区間は、それぞれの観測孔に4区間ずつ設定されており、孔口より①、②、③、④と番号を振ることにする。長ら³⁾の報告に示されているように、KH-4孔の水頭値はその他の試験孔にくらべ著しく小さいため解析には用いていなかったが、今回は、これらの観測区間のデータも考慮することにする。また、その報告によれば、試験Aは比較的良好な理論曲線と一致しているが、試験Cにおいては一致度がよくない。以上から、長ら³⁾は試験サイト周辺の岩盤が多孔質媒体と異なる性質を持つこと、つまり割れ目系の不均質性を反映している可能性があると指摘している。

4. DONCHANモデルによる解析

4. 1 割れ目系の設定

まずKH-4、5、6、7、8、9の各観測孔について、コア鑑定およびボアホールTVの映像をもとに、割れ目ゾーンを抽出した。また、KH-4、5、6、7孔において実施された比抵抗トモグラフィーの解析結果より、深度10~20m区間と40~50m区間において、観測孔に対しほぼ垂直方向に伸びる低比抵抗ゾーンが認められた。今回は、コア観察から得られた割れ目ゾーンを基本とし、これに比抵抗トモグラフィー結果、およびKD-88、89坑道において観察される割れ目系を考慮し、図-4に示すような割れ目系を設定した。

4. 2 チャンネルおよび交線の透水量係数

チャンネルおよび交線の透水量係数は、KH-5孔において実施された低圧透水試験結果を参考として推定した。低圧透水試験によれば、その平均的な透水量係数Kを知ることができる。チャンネル等の透水量係数として、全体の流量がKの媒体と等しくなるように $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ の値を仮定した。また、チャンネルの間隔はすべて5.0mとした。実際には、割れ目ごとに透水量係数が異なるはずであるが、今回は簡単のためにすべて同一の値とした。

4. 3 境界条件

本試験においては境界水位等が測定されていない。そのため、今回は以下のように境界条件を推定した。計算領域内には計6本の観測孔があり、KH-5孔を除いて孔間透水試験終了後、継続して観測が行われている。そこで、これらの水頭実測値にあうように、境界面における水頭値を試行錯誤的に探索してみた。水頭実測値として、ほぼ定常状態に達した1990年7月末時点のデータを使用した。解析の結果、KH-4孔を除いてほぼ一致させることができた。それが図-5に示すものであり、当試験サイトの西側に位置するNW押し坑道の影響を考慮し、左側面手前側のポテンシャル値を下げた場合である。なお、手

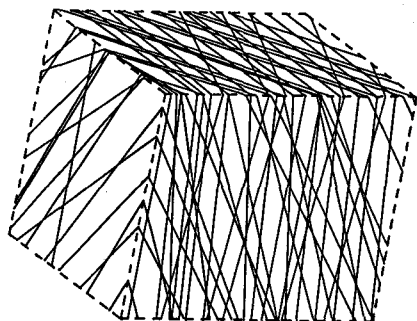


図-4 解析に使用した割れ目系

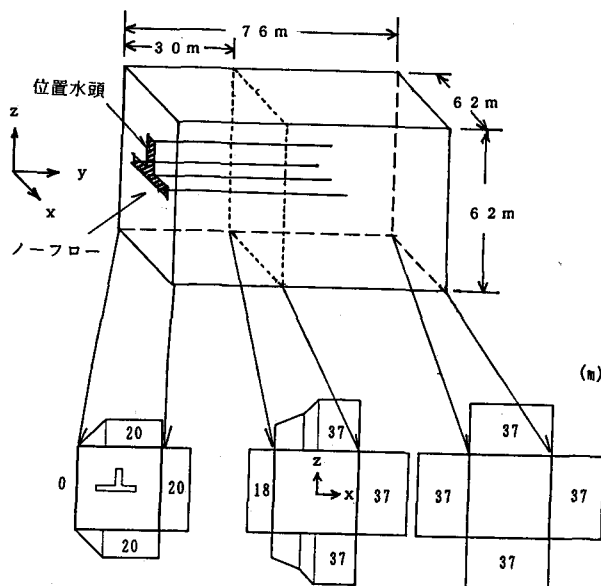


図-5 解析領域および境界条件

前側の境界面は、坑道に接している部分を除いてノーフロー条件とした。坑道に接している境界面については位置水頭を与えた。

4. 4 水頭応答特性の解析方法

3章において、すでに記したA, Cの2ケースについて、以上の仮定に基づきDONCHANモデルによる解析を行った。今回は、定常流解析のみを行った。一方試験では非定常変化が得られているので、以下のようにして試験結果から定常状態の水頭上昇量を推定した。

注入区間と観測区間とを点とみなした場合、3次元均質異方性媒体を仮定することにより、水頭上昇量は $t \rightarrow \infty$ のとき以下になる。

$$\Delta h = Q (Kd/D)^{1/2} / 4\pi R$$

ここに、Dは透水テンソルの行列式、Kdは注水および観測区間の方向透水係数、Rは注水および観測区間の間の距離、Qは一定注水量で

ある。RやQは既知であり、 Kd/D の値は試験結果を理論曲線とフィッティングさせることにより求められている。この様にして求めた定常状態における水頭上昇量を図-6に示す。左側の2つの円は水平方向の水頭上昇量を、右側の2つの円は鉛直方向の水頭上昇量を表示したものである。むろん、割れ目モデルに基づく限り、均質媒体を仮定した理論曲線と一致する必要は無いが、今回は便宜的に定常時の水頭上昇値として図-6の値を使うことにする。

また、A, Cの各注入区間に与える一定注入量として、試験においてはそれぞれ4.45cc/sec, 0.30cc/secを与えている。解析においては、いずれの区間にも4.00cc/secの一定量を注入した。また、水頭応答特性に対するチャンネルの方向による影響を調べるために、チャンネルのピッチが0°, 45°, 90°の場合について比較解析を行った。

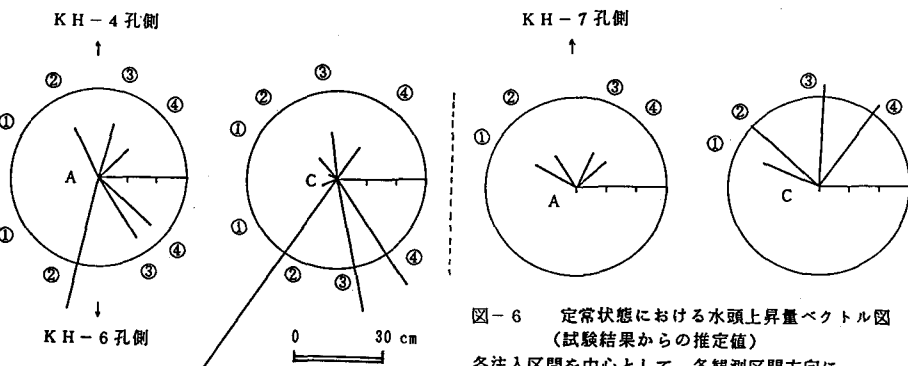


図-6 定常状態における水頭上昇量ベクトル図
(試験結果からの推定値)
各注入区間を中心として、各観測区間方向に、水頭上昇量 ΔH (m)をベクトル表示してある。
注入量はA区間が4.45cc/sec、B区間が0.30cc/secである。

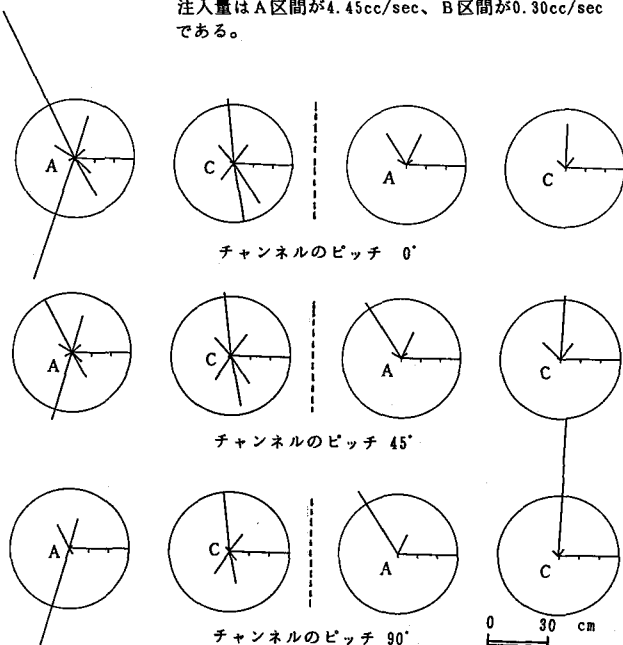


図-7 定常状態における水頭上昇量(計算値)
注入量はA, B区間とも4.00cc/secである。

4. 5 水頭応答特性の解析結果

解析結果を図-7に示す。これらの解析結果を先に示した図-6と比較すると以下のことがわかる。

- ①水頭上昇値の大きさを比較すると、A区間から注入した場合、ほぼ同程度の値をとるがC区間については、実際の注入量の約1.3倍の値を与えて解析したにもかかわらず、計算値の方が小さな値となってしまった。
- ②定性的に水頭の応答性を比較すると、チャンネルのピッチを 0° または 45° に設定し、A区間から注入した場合について、ある程度傾向が一致している。
- ③試験においては、いずれの注入区間から注入した場合も、KH-4孔側の応答性がKH-6孔側よりも小さくなっている。これに対し、解析値においてはこのような傾向は認められない。

まず、①の原因であるが、C区間から注入した場合、解析では過小な水頭上昇量となった。このことから、実際にはC区間周辺の透水性が、他の区間に比べて相対的に大きいことが予想される。

②の結果について検討する。当試験サイト周辺の坑道において、割れ目面上の条線の方角を調べたところ、図-8の

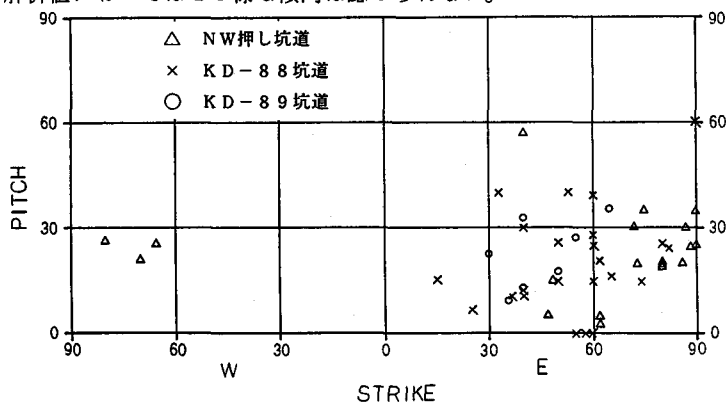


図-8 試験サイト周辺の条線のピッチ

図から、比較的低角の条線が多いことがわかる。もし、条線の方に透水性が卓越していると仮定すると、②の解析結果と一致するようである。また、C区間から注入した場合の応答性が一致していない。これは、C区間近傍にN50°W前後の走行を有する割れ目が局所的に存在するためと考えられる。

6. 結論

今回提唱する割れ目モデルを用い、定常流解析により孔間透水試験の評価を試みた。その結果、試験結果をすべて説明できない等問題点はあるが、①水頭の応答特性に対する、チャンネルの方向による影響を評価することができた。また、②チャンネルの方向が、割れ目面上に形成された条線の方向と一致する可能性があることがわかった。今後は、新規坑道掘削に伴う湧水量分布の予測解析、トレーサー試験の解析等を行い、より妥当性の高いモデルを開発してゆきたい。

謝辞 本研究にあたり貴重なデータを御提供頂いた動力炉核燃料開発事業団に対し、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藍澤、渡辺、井口、長：水みちを考慮した実際の空洞における3次元岩盤浸透流解析，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.386～390，1990。
- 2) Hsieh, P. A., Neuman, S. P., Stiles, G. K., Simpson, E. S.: Field Determination of the Three-Dimensional Hydraulic Conductivity Tensor of Anisotropic Media 2. Methodology and Application to Fracured Rocks, Water Resour. Res., Vol.21, N011, pp1667～1676, November, 1985
- 3) 長、野口、穂刈、奥野、日下部：孔間透水試験による岩盤透水係数の三次元異方性評価，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.447～452，1990。