

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

石井 卓¹・郷家光男²・桜井英行²・里 優³・木下直人³・菅原健太郎⁴

¹正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

²正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

³正会員 工博 株式会社地層科学研究所 (〒242-0014 神奈川県大和市上和田 1794 鳥海ビル 2F)

⁴正会員 株式会社地層科学研究所 (〒242-0014 神奈川県大和市上和田 1794 鳥海ビル 2F)

本論では、地下空洞の掘削に伴う透水性の変化を予測・評価することを目的として、割れ目分布の偏りと透水係数の応力依存性を考慮した解析手法(仮想割れ目モデル)を提案する。本手法では、原位置で得られた透水テンソルをもとに、Bingham 分布を用いて仮想の割れ目群を発生させる。この仮想割れ目群で特徴づけられる岩盤に対して、空洞を掘削した場合の応力変化を求め、透水係数がどのように変化するかを予測する。この手法を用い、神岡鉱山で行われた「スーパーカミオカンデ」掘削時の透水係数の変化率を予測した。原位置で行われた計測と予測結果は、いずれも空洞周囲での透水係数の増加を示し、相互に整合的なものであった。

Key Words: excavation disturbed zone, virtual fracture model, anisotropic permeability, stress-dependence, fractured rock

1. はじめに

地下空洞の掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化を予測することは、岩盤構造物に要求される機能を確保するため、また、建設工事の周辺への影響を評価する上で重要である。特に、放射性廃棄物の処分施設を地下に建設する場合には岩盤の難透水性能を重視するため、掘削の影響による岩盤の透水係数の変化を考慮する必要がある。米国ネバダ州の使用済み核燃料を地層処分することを目的としたユッカマウンテンプロジェクトにおいては、地下処分施設の設計に関する指針において、「掘削面から3m離れた位置における透水係数の変化が1ケタ以下」をめざすことが提案されている¹⁾。

しかしながら、わが国における既往の計測結果によれば、空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水係数は、掘削前と比較して変化しない場合もあれば、数百倍に増加する場合もあり^{2),3)}、変化する領域の広がりに関しても様々で、既往の観測実績データだけに基づいて空洞掘削時の透水性変化領域の広がりや変化の程

度を予測することは困難である。透水係数が数百倍も増大した事例³⁾によると、孔内透水試験のために注水した水が坑道に漏水したことが確認されていることから、坑道を横切る既存の割れ目が坑道掘削時に開口して水みちが坑道壁面に直結したものと考えられる。

原位置の透水係数を調べる方法としては、坑道への湧水量から推定する方法もあるが、坑道から水平外向きに削孔したボーリング孔において拡張パッカーにより測定区間を区分けして、注水法によって透水係数を測定する方法が多い。この方法では、坑道壁面から1~2m程度までの区間はパッカー設置区間として使用するために計測することはできない。さらに、通常は測定区間が1m以上である。放射性廃棄物の地層処分では、坑道周辺の掘削影響領域の水理特性を詳細に把握することが安全評価上重要なことから、近年、10~50cmの測定区間で計測ができる試験装置の開発が行われ、原位置計測に適用されている^{4),5)}。

一般に、空洞の掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変

化の原因としては、①発破による岩盤の直接損傷、②空洞周囲の応力集中による岩盤の破壊、③応力再配分に伴う既存割れ目の開口、の三つが重要であると考えられている。①、②の原因に対しては、施工技術上で対処することや、良好な岩盤を選ぶことによって対処することができる。③の原因に対しては、セメントミルクやベントナイトを用いたグラウトにより人為的に改善させる方法が考えられる。しかし、高レベル放射性廃棄物の地層処分にセメントグラウトを適用する場合、水和物からのCaイオン溶出による劣化により長期(千~万年オーダー)にわたって性能を担保することは難しいこと、ベントナイトグラウトには長期耐久性が期待されるが、全坑道にわたって改良することは経済的でないと考えられる。また、改良をしなくても地下施設の安全性を示せば、グラウトの必要性はなくなると言える。したがって、空洞の掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化については、何らかの予測手法を開発し、事前に検討する必要がある。

不連続性岩盤を対象として、掘削などの外乱による透水性の変化を評価する手法は、既に様々な研究者によって提案されている。例えば、吉田ら^{6,7)}は、空洞掘削に伴う割れ目のせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的なメカニズムであると考え、割れ目の変形挙動を考慮できる解析手法(MBC解析)を高レベル放射性廃棄物処分場の処分坑道の掘削解析に適用した。そして、割れ目の開口変位から透水係数を算定し、空洞周囲の透水係数の変化に関する検討を行っている。ただし、割れ目分布による透水係数の異方性に関する考察はなされていない。

山辺ら⁸⁾は、不連続性岩盤において、割れ目に作用する垂直応力によって透水係数が変化することに着目して、応力依存性を考慮した透水テンソルを提案している。ただし、この手法は、テンソル化した後に応力依存性を考慮していることから、方向分布によっては、透水性の変化を正しく予測できない可能性がある。

Kelsallら⁹⁾は、透水係数が変化するメカニズムとして、応力再配分に伴う既存割れ目の開口に着目し、円形坑道周辺岩盤の透水性の変化を予測する手法を提案した。そして、深部立坑の掘削影響領域の考察を行っている。

多田ら¹⁰⁾は、単一割れ目の室内透水試験から、割れ目の透水係数と垂直応力の関係を求め、それに基づいて空洞掘削時の応力変化に伴う透水係数の変化を予測する手法を提案している。この手法の基本概念はKelsallらの研究⁹⁾と同じである。

筆者らは、Kelsallらや多田らと同様に、不連続性

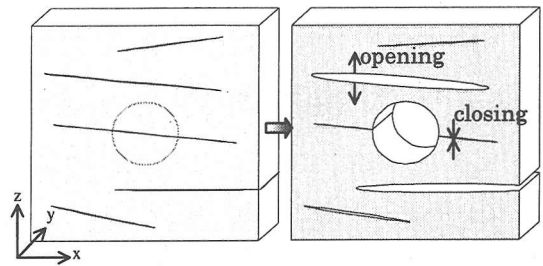


図-1 水平方向割れ目の卓越する岩盤における空洞周囲の割れ目の透水性の変化挙動

岩盤では応力の変化に伴う各割れ目の透水係数の変化に着目すれば、空洞掘削に伴う周辺岩盤の透水性の変化を予測できると考えた。しかし、彼らの方法では、割れ目分布の偏りに起因する岩盤の透水係数の異方性を考慮できない。また、割れ目分布の偏りを考慮して空洞周囲の透水性の変化を解析する場合には、3次元モデルで評価する必要があるが、多田らの方法では2次元問題に限定されている。例えば、図-1に示すような水平割れ目の卓越する岩盤に坑道を掘削した場合には、坑道の上部和下部の岩盤の透水係数が著しく増大するのに対して、側壁部ではほとんど増加しない傾向となることが予想される。よって、このような割れ目分布が偏ることによって生じる透水係数の異方性についても考慮できる手法を提供できることが望ましい。

これらの問題を解決するために、本研究では次のような手法を開発し、空洞掘削に伴う岩盤の透水性の変化を予測することとした^{11),12)}。すなわち、仮想の割れ目群を発生させ、各割れ目の透水係数が応力依存性を有することと初期応力を考慮して、原位置で計測された初期透水テンソルを再現する。次に、この仮想の割れ目群と空洞掘削後の応力から掘削後の透水テンソルを算定して、空洞掘削に伴う岩盤の透水性がどのように変化するかを予測する。

割れ目には目視にて観察できるものもあるが、観察しきれないものも存在している。そして、観察された割れ目でも、充填物によって透水性を有していない場合や、観察できなかった割れ目が透水性にとって支配的である場合も考えられる。そこで、筆者らは、原位置の透水テンソルから岩盤の透水性を支配している割れ目群を推定することを考えた。ただし、この推定された割れ目群は、目視観察で得た割れ目群と一致しないことが考えられる。また、その実体を確かめることは非常に難しいと考えられるので、この割れ目群に仮想という言葉を用いている。

仮想の割れ目群を採用することによってモデル化を簡便なものにすることができるというメリットも

生じる。第1に、割れ目の連続性、広がり、密度、1本1本の割れ目の透水特性について実際の割れ目の特性値に近づくの必要はない。むしろ、均質媒体としての岩盤の透水特性を評価するのに十分な数の無数の割れ目を仮想的に発生させて、実測した岩盤の透水係数に合致するような値を割れ目の体積密度として仮想的に決定するという方法を採用した。このような手段を採用することによって現場における測定対象割れ目の連続性、広がり、密度等の不確実性について統計的に分析する必要はなくなる。第2に、割れ目の透水性に与える応力再配分の影響についても室内試験データを簡便に組み込むことができる。

本論文では、実測値（原位置の透水テンソル、または割れ目の卓越方向と岩盤の平均的な透水係数）を再現できる仮想的な割れ目群を「仮想割れ目群」と称し、仮想割れ目群に透水係数の応力依存性を組み込んだモデルを「仮想割れ目モデル」と呼ぶことにする。そして、ここでは、この仮想割れ目モデルによる透水性の変化の予測手法の全体像を概説するとともに、割れ目群の発生方法と岩盤の透水テンソルの求め方について詳細を示す。また、空洞掘削に伴う透水係数の変化に関して、原位置（神岡鉱山）で計測された試験結果と本手法による予測値との比較を行い、本手法の妥当性について検討した結果についても示す。

2. 透水性の変化の予測手法

(1) 本手法の概要

仮想割れ目モデルでは、岩盤の透水性は割れ目の分布と各割れ目の透水係数により決定されると考える。なお、割れ目は空間に様に存在するものとし、その体積は、対象としている領域に比べ十分小さい場合に限定する。

予測に要する原位置のデータは以下のとおりである。

- ・ 割れ目の方向分布（透水テンソルが得られている場合はなくてもよい）
- ・ 初期応力（データがない場合は土被り深さから設定する）
- ・ 透水テンソル（データがない場合は透水係数でよい）
- ・ 割れ目供試体による透水係数の応力依存式（室内試験に基づいて設定する）

本手法では、計測できるパラメータを反映でき、以下に示すような手順を踏んで解析を行う（図-2参

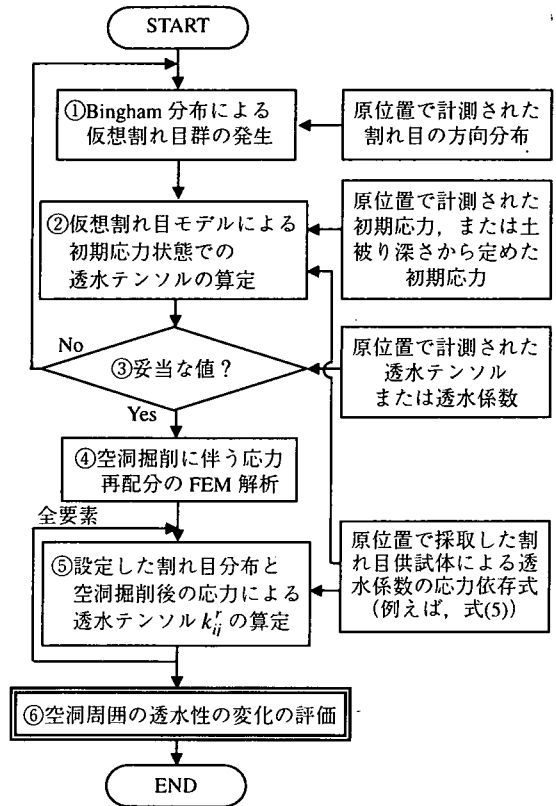


図-2 仮想割れ目モデルによる透水性の変化の予測手法

照)。

- ①第1回目の透水テンソルを算定する時には、何らかの方法で仮想割れ目群のパラメータを設定することが必要であるが、原位置で観測された割れ目の方向分布のデータがある場合は、それに基づいて仮想割れ目群を発生させる。第3章で記述するが、Bingham分布の分布方向と透水テンソルの主方向には密接な関係があることがわかっているので、割れ目の方向分布のデータがない場合は、原位置の透水テンソルの主方向を参考にする。すなわち、Bingham分布は等値線が楕円状の形状となるが、この短軸方向を透水テンソルの第1主値の方向、長軸方向を第2主値の方向、集中方向を第3主値の方向になるようにして仮想割れ目群を発生させる。
- ②初期応力と仮想割れ目モデルから初期応力状態の透水テンソルを算定する。なお、第1回目の透水テンソル算定時では、式(12)の割れ目体積密度 ρ には適当な値($\neq 0$)を代入する。
- ③②で求めた透水テンソルと原位置の初期透水テンソルと比較する。同じ透水性になっていない

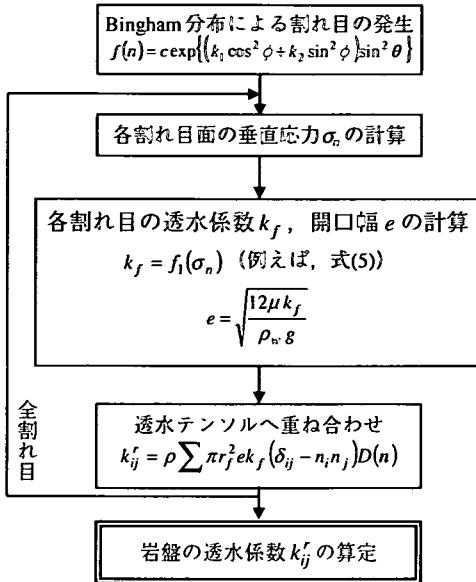


図-3 透水テンソルの算定方法

場合は, ①に戻って再計算をすることになるが, 透水テンソルの主方向が合っていないときには, Bingham 分布の長軸, 短軸, 集中方向を調整する。主値の比 (K_1/K_3 , K_2/K_3) が合っていないときには, Bingham 分布の係数 k_1 , k_2 を調整する。また, 主値の算術平均値が合っていないときには, 割れ目の体積密度 ρ を調整する。この様に, 仮想割れ目群の方向分布と体積密度を調整し, 同じ透水性を示すまでこれを繰り返す。

- ④ FEM 等の数値解析により, 空洞掘削後の応力を求める。
- ⑤ 設定された仮想割れ目モデルと④で求めた応力から, 空洞掘削後の透水テンソルを求める。
- ⑥ 空洞掘削前後の透水テンソルから, 透水性の変化を評価する。

原位置において透水係数しか計測されていない場合は, 割れ目の方向分布データに基づいて仮想割れ目群を発生させて, 原位置の透水係数に相当するよ様に仮想割れ目群の体積密度 ρ を調整する。

仮想割れ目モデルでは, 方向分布の偏りによって, 透水係数に異方性が生じることに着目していることから, 入力パラメータとしては, 原位置で計測された透水テンソルが望ましい。原位置において岩盤の透水テンソルを計測した例としては, Hsieh ら¹³⁾, 青木ら¹⁴⁾, 長ら¹⁵⁾の研究がある。なお, 透水テンソルが得られていない場合でも透水係数の異方性を考慮することができる。すなわち, 原位置で観測された割れ目の方向分布と, 計測された透水係数を用いて

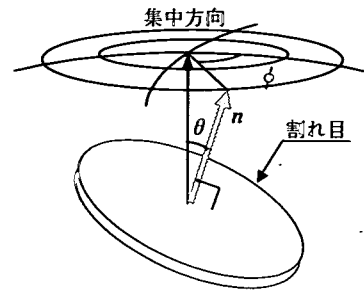


図-4 割れ目の方向の定義

透水テンソルを推定することができる。

発生させた仮想割れ目群から岩盤の透水テンソルを求める手順は図-3に示すとおりであり, 以下に具体的な手法を説明する。

(2) 仮想割れ目群の発生

仮想割れ目群は空間に様に存在すると仮定されていることから, 仮想割れ目群は各割れ目の方向によってのみ特徴づけられる。

大西・中川¹⁶⁾は, 割れ目の法線ベクトル n に関する観測データから, その分布を確率・統計的に記述する研究を行っており, Fisher 分布と Bingham 分布の適合性を比較している。それによると, Fisher 分布よりも Bingham 分布の方が観測データに適合することが示されている。よって, ここでは, 法線ベクトル n の分布は Bingham 分布により表現できるものとし, これにより割れ目を発生させることとした。Bingham 分布は次式のような関数であり, 集中方向周りに等値線が楕円状の形となるものである。

$$f(n) = \frac{1}{4\pi d} \exp \left\{ (k_1 \cos^2 \phi + k_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \theta + k_3 \cos^2 \theta \right\} \quad (1)$$

ここに, θ は集中方向からの角度, ϕ は集中方向周りの角度を示す (図-4 参照)。 $k_1 \sim k_3$ は集中度を示す係数, d は正規化のための係数であり, $k_1 \sim k_3$ の関数である。また, 一般的に $k_3 = 0$ ¹⁷⁾としてもよいことから, 係数をまとめるなどして, 次式で Bingham 分布を表現することができる。

$$f(n) = c \cdot \exp \left\{ (k_1 \cos^2 \phi + k_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \theta \right\} \quad (2)$$

ここに, c は正規化のための係数である。

方向に関する確率密度が式(2)で特徴づけられる割れ目に対して, 透水テンソルを求めるときに第2章第4節に示すような重み付け平均を行う場合, 通常は確率密度関数に関する積分を行うことになる。た

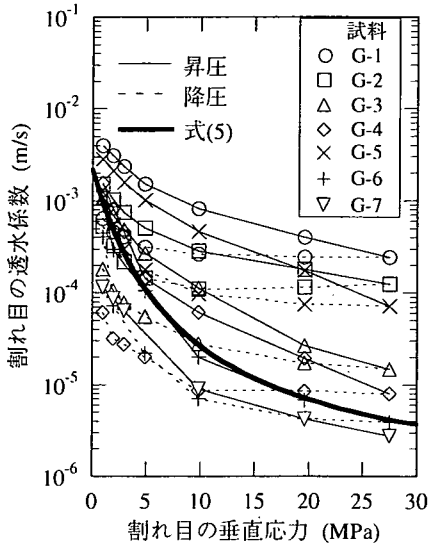


図-5 実測値に基づく割れ目の透水係数の応力依存曲線¹⁰⁾

だし、本手法では、式(2)をそのままの形で積分をせず、Bingham 分布に従う仮想割れ目群を離散的に作成し、それらを重ね合わせることで透水テンソルを算定することとした。

式(2)と一様乱数を用いれば、法線が Bingham 分布に従う仮想割れ目群を発生させることができる。

(3) 割れ目の透水係数と開口幅の算定

割れ目を含む岩石の室内透水試験で得られたデータから、割れ目の透水係数は垂直応力の双曲線関数による近似式¹⁰⁾で表現できる。室内透水試験による割れ目の透水係数のデータを図-5に示す。

割れ目の透水係数は応力履歴に影響されることから、昇圧過程（掘削によって応力が増加する過程）における割れ目の透水係数 k_{fl} に対しては式(3)が、降圧過程（掘削によって応力が低下する過程）における割れ目の透水係数 k_{fu} に対しては、式(4)が提案されている。

$$\log_{10} k_{fl} = \frac{\sigma_n}{\alpha + \beta \sigma_n} + \log_{10} \gamma \quad (3)$$

$$k_{fu} = k_{f0} + (k_{fl} - k_{f0}) D_r \quad (4)$$

ここに、 α , β , γ は実験定数、 σ_n は割れ目に作用する垂直応力、 k_{f0} は掘削前の割れ目の透水係数、 D_r は降圧（除荷）過程補正係数である。

放射性廃棄物処分場の地下施設の様に、岩盤の透水性の変化を重要視する施設の設計を考えたとき、

解析による透水性変化の評価は実測値よりも保守な値を与えることが望ましい。また、空洞掘削時の応力解放が透水性増大の要因であることを考えると、垂直応力が減少する割れ目には降圧過程の式を用いるべきであると言えるが、昇圧過程の式を用いたほうが保守的な評価を与えることが期待できる。よって、第3章および第4章の解析では、最も大きな応力依存性を示した花崗岩試料（図-5の+印）のデータによる実験式¹⁰⁾を用いることとし、昇圧過程の式(3)だけを用いた。実験式を式(5)と図-5に示す。

$$\log_{10} k_f = \frac{\sigma_n}{-2.44 - 0.28 \sigma_n} + \log_{10} 2.2 \times 10^{-3} \quad (5)$$

ここに、 k_f (m/s) は割れ目の透水係数、 σ_n (MPa) は割れ目に作用する垂直応力である。

仮想割れ目群の方向分布が定まり、各割れ目面の垂直応力 σ_n が算定できれば、式(5)より割れ目ごとの透水係数 k_f を算定することができる。

また、割れ目を平行平板でモデル化すると、水理学的開口幅 e は次式で算定できる¹⁸⁾。

$$e = \sqrt{\frac{12 \mu k_f}{\rho_w g}} \quad (6)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 μ は水の粘性係数である。

(4) 岩盤の透水テンソルの算定

次の作業は、仮想割れ目群を有する岩盤の透水テンソルを求めることである。これは、各割れ目の透水係数を、その方向を考慮して重ね合わせることで求められる。

2次元問題では、平行平板内の直線流れを仮定することによって、割れ目の透水係数 k_f と岩盤の透水係数 k_r の関係を次式で表すことができる。

$$k_r = \eta e k_f \quad (7)$$

ここに、 η は割れ目の密度である。

3次元問題で考えると、式(7)は割れ目の透水係数を体積の重みを付けて平均化することで岩盤の透水係数を求めていると考えることができる。例えば、図-6に示すような平行割れ目を有する岩盤では、割れ目に沿う方向における岩盤の透水係数 k_r が次のように求められる。

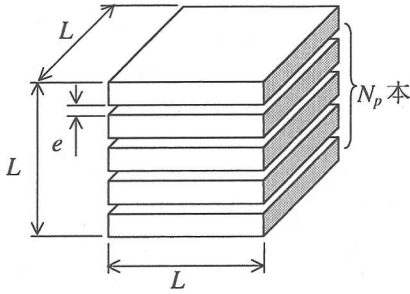


図-6 平行割れ目を有する岩盤

$$k_r = \frac{\sum V_f}{V} k_f = \frac{N_p L^2 e}{L^3} k_f = \frac{N_p}{L} e k_f = \eta e k_f \quad (8)$$

ここに、 V は岩盤の体積、 V_f は割れ目の体積、 N_p は割れ目の数である。

次に、これを一般化することを考える。すなわち、割れ目の面内方向の透水係数は k_f 、面外方向は 0 であることから、これを全体座標に変換した後に、体積 V_f で重み付けをして平均化すれば、岩盤の透水テンソルを求めることができる。

また、各々の割れ目は法線ベクトル \mathbf{n} 、体積 V_f 、透水係数 k_f という特性を持っている。そして、ある任意の特性の組合せ (\mathbf{n}, V_f, k_f) を考えたときに、この特性を持つ割れ目が N_f 個あるものとする、岩盤の透水テンソル k_{ij}^r と割れ目の総数 N は次のようになる。

$$k_{ij}^r = \frac{1}{V} \sum_{l=1}^m V_f^{(l)} k_f^{(l)} (\delta_{ij} - n_i^{(l)} n_j^{(l)}) N_f^{(l)} \quad (9)$$

$$N = \sum_{l=1}^m N_f^{(l)} \quad (10)$$

ここに、添え字の (l) は l 番目の特性の組合せを意味している。また、 m は特性の組合せの総数、 δ_{ij} はクロネッカのデルタである。

割れ目の平面形状をモデル化する方法としては、円、楕円および多角形が考えられるが、ここでは、菊地ら¹⁹⁾の考え方に準じて図-7のように割れ目の平面形状を半径 r_f の円盤としてモデル化するものとする。すなわち、楕円の場合、形状を指定するためには、短径と長径およびいずれかの方向が必要である。また、 n 角形の場合は $(n-1)$ 個の相対的な位置の座標が必要である。それに対して、円は半径だけで形状を指定できるので最も実用的であると考えられる。よって、体積 V_f は次のようになる。

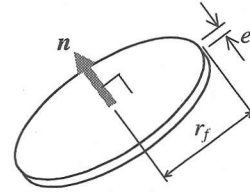


図-7 円盤による割れ目のモデル化

$$V_f^{(l)} = \pi r_f^2 e^{(l)} \quad (11)$$

式(11)より、各割れ目の特性値は $(\mathbf{n}, r_f, e, k_f)$ となる。岩盤の応力 σ が与えられると、法線ベクトル \mathbf{n} から垂直応力 σ_n を求めることができる。そして、垂直応力 σ_n 、式(5)、式(6)から、透水係数 k_f と水理学的開口幅 e を求めることができる。よって、特性値の内、透水係数 k_f と水理学的開口幅 e は法線ベクトル \mathbf{n} の従属変数であることがわかる。

したがって、式(9)は式(10)と式(11)より、次のようになる。

$$\begin{aligned} k_{ij}^r &= \frac{N}{V} \sum_{l=1}^m V_f^{(l)} k_f^{(l)} (\delta_{ij} - n_i^{(l)} n_j^{(l)}) \frac{N_f^{(l)}}{N} \\ &= \rho \sum_{l=1}^m \pi r_f^2 e^{(l)} k_f^{(l)} (\delta_{ij} - n_i^{(l)} n_j^{(l)}) D(\mathbf{n}^{(l)}) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 $\rho (=N/V)$ は割れ目の体積密度、 $D(\mathbf{n}) (=N_f/N)$ は法線ベクトル \mathbf{n} の相対頻度を示す関数であり、本手法では、密度関数として式(2)の Bingham 分布を用いている。なお、円盤の面積を表す項は、割れ目の面積を表す項で置き換えることもできる。

以上により、仮想割れ目群の体積密度 ρ と方向 \mathbf{n} 、ならびに頻度 $D(\mathbf{n})$ が定められれば、仮想割れ目モデルによる岩盤の透水テンソルを計算することができる。

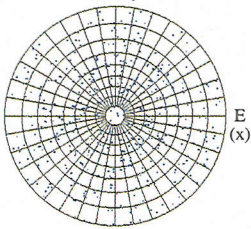
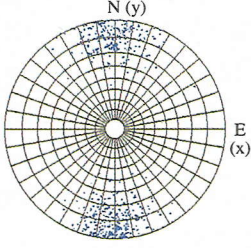
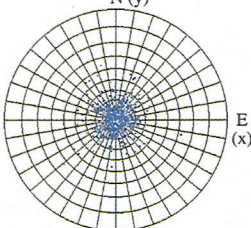
3. 予備解析

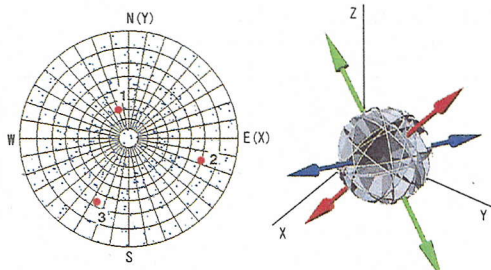
これまで示した手法の特徴を明瞭にするため、簡単な数値モデルにより空洞掘削に伴う岩盤の透水性の変化について調べてみた。

(1) 割れ目の分布と岩盤の透水性の関係

最初に、特徴的な 3 種類の割れ目の分布例を設定した。割れ目の分布とその岩盤の主透水方向を図-8に示す。

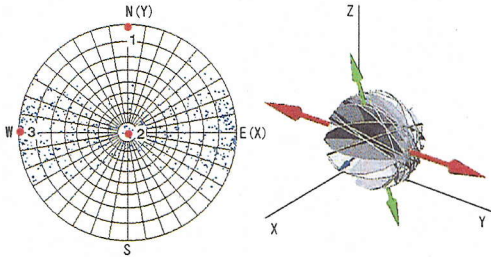
表-1 解析ケース

解析ケース	初期応力	割れ目分布 (ステレオネット, 上半球投影)
Case1	$\sigma_x=5$ (MPa) $\sigma_y=5$ (MPa) $\sigma_z=5$ (MPa)	N (y,空洞軸方向) 
Case2	$\sigma_x=5$ (MPa) $\sigma_y=5$ (MPa) $\sigma_z=10$ (MPa) (水平:鉛直=1:2)	同上
Case3	$\sigma_x=5$ (MPa) $\sigma_y=5$ (MPa) $\sigma_z=5$ (MPa)	
Case4	$\sigma_x=5$ (MPa) $\sigma_y=5$ (MPa) $\sigma_z=5$ (MPa)	



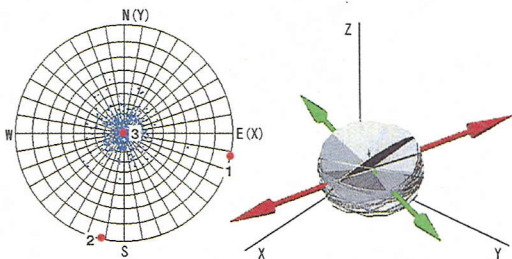
透水テンソルの主値 $K_1:K_2:K_3=1.03:1.02:1.00$

(a) $(k_1, k_2) = (-0.01, -0.01)$



透水テンソルの主値 $K_1:K_2:K_3=2.69:2.21:1.00$

(b) $(k_1, k_2) = (-10, -0.01)$



透水テンソルの主値 $K_1:K_2:K_3=8.88:8.78:1.00$

(c) $(k_1, k_2) = (-10, -10)$

図-8 割れ目の法線ベクトル分布と主透水方向

図-8の左側はBingham分布によって発生させた割れ目の方向分布(青点)と式(12)により求めた主透水方向(赤点)をステレオネット上(上半球投影)に示したものである。図中の数字は主値を示している。図-8の右側は、割れ目の分布を円盤の集合で、岩盤の透水テンソルの主方向と主値の大きさを矢印の方向と大きさで示したものである。ここでは、割れ目の透水係数と開口幅は応力にかかわらず単位とした。

Bingham分布の係数 (k_1, k_2) は上から $(-0.01, -0.01)$ 、 $(-10, -0.01)$ 、 $(-10, -10)$ である。

方向分布が等方的である場合(図-8(a))は、当然ながら岩盤の透水性も等方的で、主値の比率は

$K_1:K_2:K_3=1.03:1.02:1.00$ となる。

方向分布がステレオネット上で帯状になる場合(図-8(b))は、ほとんどの割れ目の走向方向が同じであることから、これに平行な方向が透水テンソルの第1主値(K_1)の方向となる。また、これに直交する方向が第2(K_2)、第3主値(K_3)の方向となる。この場合の主値の比率は、 $K_1:K_2:K_3=2.69:2.21:1.00$ となる。

割れ目の法線ベクトルが特定の1方向に集中する場合(図-8(c))は、割れ目面に平行な方向が第1、第2主値の方向となり、両者の値はほぼ等しくなる。また、集中方向が第3主値の方向となるが、第3主値は第1、第2主値に比べ著しく小さくなる。この場合の主値の比率は、 $K_1:K_2:K_3=8.88:8.78:1.00$ となる。

表-2 円形断面トンネル周辺の透水係数の変化率計算結果一覧

	Case1	Case2	Case3	Case4
x方向の透水係数 変化率				
y方向の透水係数 変化率				
z方向の透水係数 変化率				
凡例	 0 20倍			方向の定義

(2) 空洞掘削による透水性の変化

次に、本手法を用いて、初期応力状態や割れ目分布の差によって円形断面トンネルの周辺の透水性がどのように変化するかを試算した。解析ケースを表-1に示す。ここでは、割れ目の方向分布は等方的 ($(k_1, k_2) = (-0.01, -0.01)$) であるが、初期応力が等方的な場合 (Case1) と異方的な場合 (Case2)、割れ目の法線ベクトルが1方向に集中 ($(k_1, k_2) = (-10, -10)$) しているが、その方向が異なる場合 (Case3, Case4) を想定した。Case3では集中方向を空洞軸方向 (y方向) に、Case4では図-8(c)と同様に鉛直方向 (z方向) に一致させた。また、掘削後の応力は線形弾性解析により求めた。

解析結果は、空洞掘削前後の透水係数を初期状態の透水係数で除し、変化率として整理した。透水係数の変化率の計算結果を分布図で表したものを表-2に示す。

a) Case1

x方向の透水係数の変化率に注目すれば、x-y平面にほぼ平行した面を持つ割れ目では、その垂直応力 (ほぼ σ_x に等しい) が空洞の天端および底盤で減少

するために、この部分ではx方向の透水係数が増加する。

また、z方向に着目すると、y-z平面に平行な面をもつ割れ目の垂直応力 (ほぼ σ_x) は側壁部で減少するために、側壁のz方向の透水係数は増加する。

円孔の接線方向に平行な割れ目では、空洞近傍ほど垂直応力が減少するため、透水係数が一様に増加する。したがって、空洞に沿う方向 (y方向) の変化率は空洞近傍ほど大きな値を示し、分布は同心円状となる。

b) Case2

Case1と同じ等方的な割れ目の方向分布であるが、初期応力の異方性の影響を受けて結果は異なったものとなっている。すなわち、空洞の天端や底盤近傍では、各成分の透水係数の変化率はCase1よりも増大している。また、側壁部ではほとんど増加していない。

c) Case3

割れ目面に垂直方向の応力 (ほぼ σ_y) が空洞掘削前後でわずかにしか変化していないため、いずれの方向の透水係数も1.1~1.3倍程度しか増加していな

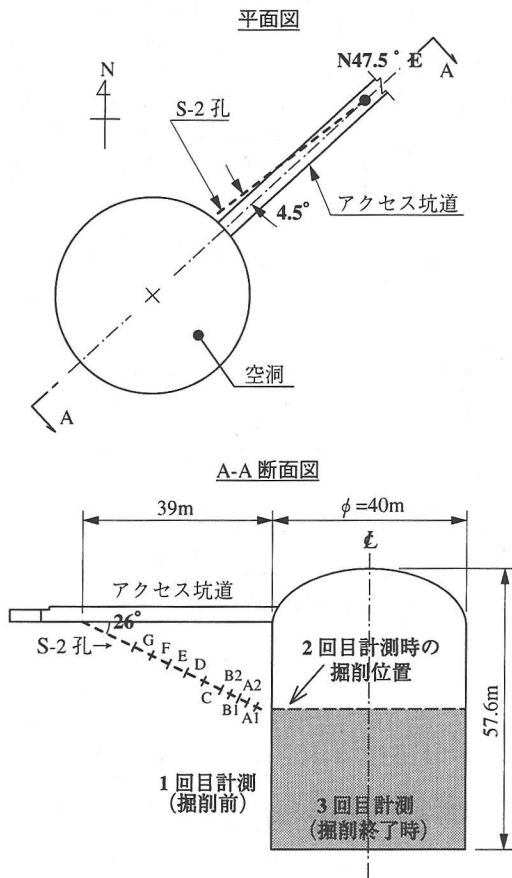


図-9 空洞と透水試験用ボーリング孔 (S-2) の配置

い。

d) Case4

このような割れ目の方向分布は図-1 の概念図に相当している。空洞の天端および底盤近傍では、割れ目の垂直応力 (ほぼ σ_z) が減少するために、これらの部分で岩盤の透水係数の変化率が大きくなる。割れ目の多くが同じ方向を向いており応力変化に対して一斉に透水係数の変化を示すため、透水係数は他の場合に比べ大きく変化するという特徴がある。

4. 神岡鉱山における計測結果との比較

不連続性岩盤内における地下大空洞の建設に伴う周辺岩盤の透水係数の変化を測定し、本論文において提案している手法を用いた解析結果との比較、検討を行った。

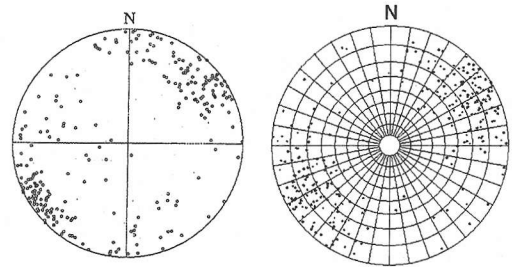


図-10 S-2孔で実測された割れ目分布(左)と Bingham 分布による仮想割れ目群 (右)

(1) 計測概要と計測結果²⁰⁾

対象とした地下大空洞は、東大宇宙線研究所が、岐阜県神岡町の神岡鉱山内に建設した、大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測施設「スーパーカミオカンデ」である。空洞の規模、形状は、直径 40m、高さ 57.6m のサイロ型で、土被りは約 1000m である。

神岡鉱山付近の地質は、主に飛騨変成岩類に分類される片麻岩、「混成型花崗岩」とよばれる花崗岩質の変成岩および石灰岩からなり、いずれの岩石も約 1.8 億年前に大きな変成作用を受けた結晶質の岩石である。比較的一様な岩盤が浅部から地下深部まで分布している。そして、周辺には破碎帯を伴う大規模な断層から節理までの多様な割れ目が分布している。

透水試験は、図-9 に示すように空洞の側部の S-2 孔において 3 回実施した。S-2 孔の孔径は $\phi 76\text{mm}$ 、削孔長は 41.4m である。図-9 に示すように、S-2 孔は空洞側部に向かって下向き 26° 、アクセス坑道方向 (N47.5° E) に対して 4.5° NW 側に振った方向に掘進されている。測定区間長は、孔内深度 11.8m から 31.8m までの区間 (区間 C~G) では 4.0m、孔内深度 31.8m から孔内深度 39.8m までの区間 (区間 A1~B2) では 2.0m とした。

原位置透水試験は、岩盤の透水試験方法としては最も一般的な方法である一定水頭注入法を用いて行った。具体的な試験方法および得られた注入圧力-注入量曲線 (P-Q 曲線) から透水係数を求める方法は、基本的には、既に筆者らが報告した方法²¹⁾と同じである。

割れ目分布の調査としてボーリング孔のコア観察およびボアホールテレビ (BTV) による孔内観測を行った。割れ目分布の調査結果を図-10 (左)、透水試験結果を図-11 に示す。図-11 において、区間 F および G は測定限界値 ($5.0 \times 10^{-12}\text{m/s}$ 以下) を下回っていることを示す。掘削前の透水係数 (第 1 回目の計測値) は、孔内深度 28m (空洞壁面から約 14m) 以浅では 10^{-11} から 10^{-12}m/s のオーダーであり、非常に小さな値を示している。孔内深度 11.8~27.8m (区

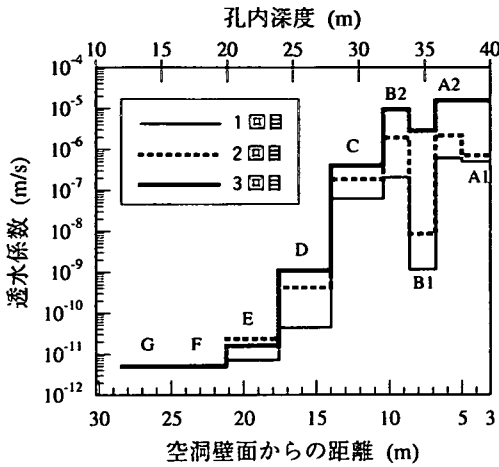


図-11 S-2孔における透水試験結果

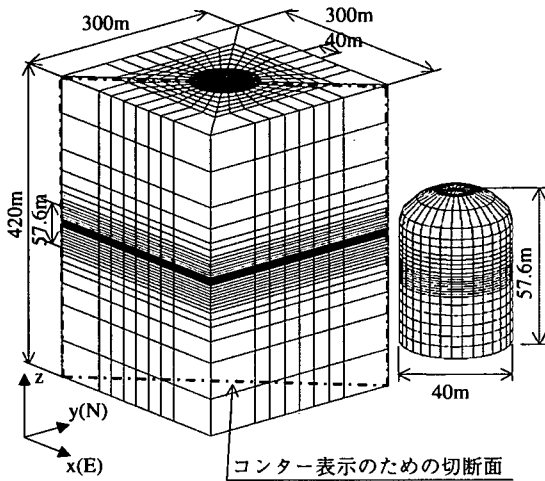


図-12 解析メッシュと掘削部分

間D~G)の透水係数の平均値は $1.6 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ である。孔内深度28m以深(空洞壁面から約14m以内)では、 10^{-7} から 10^{-8} m/s のオーダーを示している。孔内深度27.8~39.8m(区間A1~C)の透水係数の平均値は $2.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ である。割れ目密度では両者の違いはあまり明瞭ではないが、開口割れ目(本論文では、BTV観察による開口幅1.0mm以上の割れ目を開口割れ目としている)密度は明瞭に異なっている。孔内深度10~28mの区間における平均開口割れ目密度は0.17本/mであるのに対して、28m以深では1.08本/mであり、後者の方が開口割れ目密度は高くなっている。

図-11の第2回目および第3回目の測定結果によれば、孔内深度20m(空洞壁面から約21m)以深では、掘削により透水係数が增大していることがわか

表-3 応力解析に用いた物性値と初期応力²⁾

ヤング係数	50 (GPa)
ポアソン比	0.2
初期応力 σ_1 (N309° E68° E)	29.4 (MPa)
σ_2 (N60° E8° W)	19.3 (MPa)
σ_3 (N153° E20° N)	6.2 (MPa)

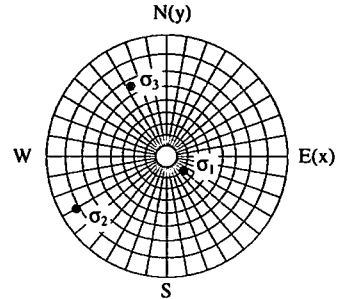


図-13 応力解析に用いた初期応力(ステレオネット, 下半球投影)

る。2回目の測定では、最も透水係数が增大している区間において、約9倍であったが、3回目の測定(掘削終了後)では、大幅に透水係数が增大しており、最大で3桁増大している区間もある。

第2回目の測定においては、割れ目の開口幅の変化は全くみられなかった。第3回目の測定でも、割れ目の開口幅の変化は少ししかみられず、わずかに、孔内深度38~40m(空洞壁面から約3~5m)の区間において、3本の割れ目の開口幅が増大した(いずれも0.5mm以下)。

(2) Bingham分布による仮想割れ目群と解析条件

仮想割れ目モデルを用いて透水性の変化を評価するために、ここでは、

- ・ 割れ目の方向分布
- ・ 初期応力
- ・ 原位置の透水係数
- ・ 割れ目供試体による透水係数の応力依存式

を入力パラメータとした。

S-2孔で観測した割れ目の方向分布が図-10(左)のように得られていることから、これに視覚的に近くなるように、Bingham分布による仮想割れ目群を発生させた。発生させた仮想割れ目群を図-10(右)に示す。

仮想割れ目群が求められた後、空洞掘削による岩盤の応力変化を求めるために有限要素法による三次元線形弾性解析を行った。解析に使用したメッシュを図-12に示す。解析領域は $300\text{m} \times 300\text{m} \times 420\text{m}$ の

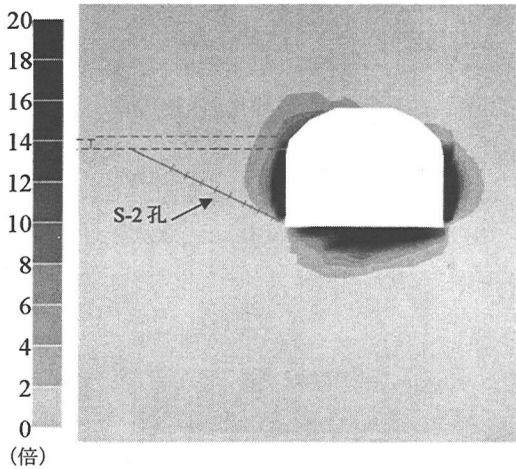


図-14 空洞周辺の透水係数の変化率分布 (掘削位置は2回目計測時)

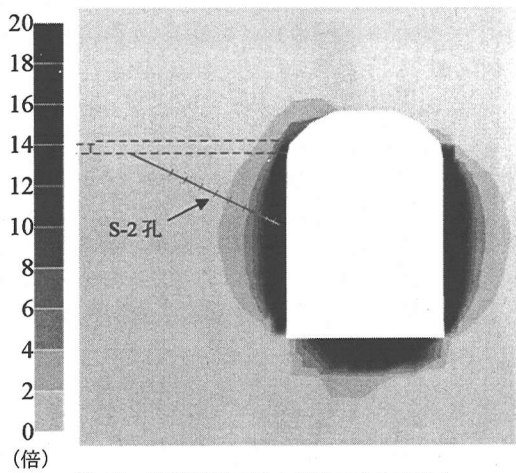


図-15 空洞周辺の透水係数の変化率分布 (掘削終了時)

直方体で、全要素数は 26240、全節点数は 27593 である。掘削部分は解析領域の中心に位置しており、側部から解析領域側面までの距離は 130m、天端から解析領域上面までの距離は 181.2m となっている。モデル化は本体空洞のみで、図-9 に示すアクセス坑道のモデル化はおこなっていない。また、境界条件は解析領域の上面、底面、および、側面の面外方向の変位を固定としている。なお、解析するに当たっては座標系と方位の関連付けが必要となるが、ここでは、x 方向を E 方向に、y 方向を N 方向に一致させることとした。なお、アクセス坑道の位置と S-2 孔の方向であるが、解析上は NE-SW 方向にあるものとした。厳密に言えば、アクセス坑道も S-2 孔もこの方向からはずれた位置にある。しかし、その差はわずかであることから、解析結果に大きな差を与えないであ

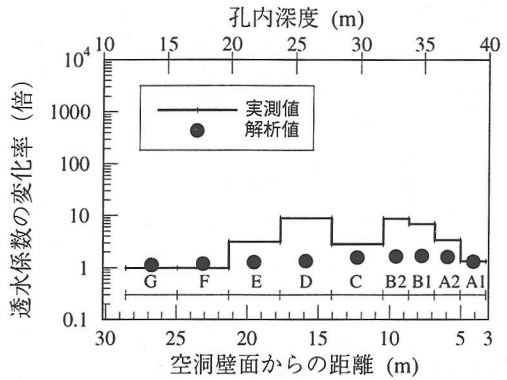


図-16 空洞掘削による透水係数変化率の比較 (掘削位置は2回目計測時)

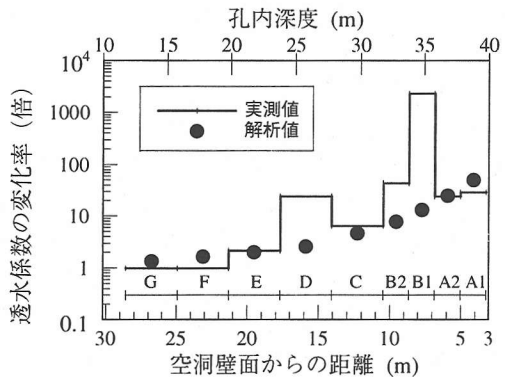


図-17 空洞掘削による透水係数変化率の比較 (掘削終了時)

ろうと考えたためである。

応力解析に使用した岩盤の物性値と初期応力を表-3 と図-13 に示す。これらの値は文献²²⁾より設定した。

原位置の初期の透水係数は、区間 A1~E の対数平均値より $7.76 \times 10^{-9} \text{m/s}$ と設定した。区間 F と G は測定限界よりも小さい値であったことから、透水係数を設定する際には、これらの値は除外した。

なお、割れ目の透水係数の応力依存曲線は、式(5) (図-5 参照) を使用した。

(3) 解析結果

解析は、第2章で示した手順に基づいて行った。なお、実測値は S-2 孔軸直交方向の透水係数に相当すると考えられるので、解析で求める透水係数は、

透水テンソルを S-2 孔軸方向に座標変換して、孔軸に直交する 2 方向の成分の相加平均値とした。

始めに、仮想割れ目群の体積密度 ρ を仮定し、掘削前の初期応力解析結果から初期透水係数を求める。そして、これを原位置の初期の透水係数と比較することにより、仮想割れ目群の体積密度 ρ を 10.05 本/m³とした。

次に、仮想割れ目群の方向分布、体積密度および各掘削段階の応力から、掘削段階ごとの透水係数を求めた。最後に、初期透水係数と掘削段階ごとの透水係数から変化率を調べた。

空洞掘削前後における透水係数の変化率のコンター図を図-14 と図-15 に示す。

また、S-2 孔の計測区間ごとの実測値と解析値の比較を図-16 と図-17 に示す。

第 2 回目の測定結果は、空洞中段まで掘削した状態のものである。図-16 によると、実測および解析結果ともに、透水係数の変化率は計測孔に対して山なりの形になる傾向を示しているが、これは、S-2 孔の先端部は、空洞の底部の隅角部に位置しているため、圧縮応力が集中し、結果として透水係数は変化しなかったためと解釈できる。解析結果の透水係数変化率の大きさは一致しなかったものの、変化率の傾向はほぼとらえることができた。

図-17 によると、第 3 回目の測定結果と解析結果の透水係数の変化率は、区間 B1, B2, D を除く 6 区間でほぼ一致している。実測値によると、壁面から離れるにしたがって変化率は小さくなる傾向があるが、解析値もその傾向を示している。空洞周辺の岩盤は、力学的には全く安定している状態で、透水係数だけが大きく変化しと考えられる、と報告²⁰⁾されている。本解析では、弾性解析で求めた応力変化で透水係数の変化を評価しているが、空洞掘削終了時測定結果（第 3 回目）ともほぼ一致していることから、当該手法による予測は妥当なものと考えられる。なお、区間 B1 では掘削により透水係数が 3 桁増加しており、解析値とは大きく異なっているが、これは、図-11 から明らかのように、掘削前の透水係数が隣接区間のそれよりも 2 桁以上小さい特異な区間であったためであり、本手法の欠陥によるものではないと考えられる。

本論文のモデルでは、塑性域や既存割れ目のせん断に伴う開口による透水性の変化を扱うことはできない。したがって、空洞周辺の岩盤で塑性域が発生している場合には、その領域における実測値と予測値は異なることが考えられる。竹村ら²³⁾の解析と計測によると、この空洞の塑性域は壁面から 3m 程度であることが示唆されているが、S-2 孔により掘削前

後に透水係数を計測できたのは、壁面から 3m 以内である。壁面から 3m 以内の透水性変化のデータがないため、塑性域や割れ目のせん断に伴う開口による透水性の影響については確認できなかった。

5. まとめ

本論文で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- ・空洞掘削に伴う岩盤の透水性の変化を予測する手法の全体像を示し、このうち、仮想の割れ目群の発生方法と、これより岩盤の透水テンソルを求める方法について説明した。
- ・典型的な割れ目の方向分布を仮定し、空洞掘削に伴う応力変化により岩盤の透水性がどのように変化するかを試算し、空洞周辺の 3 次元的な応力変化による透水テンソルの変化を表現可能な手法であることを確認できた。
- ・神岡鉱山に掘削されたスーパーカミオカンデ周囲の透水係数の変化率の実測結果と仮想割れ目モデルによる予測結果について比較を行った。原位置で観測された割れ目分布と孔内透水試験データおよび室内の割れ目透水試験データを反映して設定した仮想割れ目モデルを用いて掘削による影響を予測した結果は、実測された結果と同様の傾向を示しており、不連続性岩盤の弾性領域に対する当該手法の妥当性が確認できた。今後の課題として以下の点が上げられる。
- ・本手法では、掘削に伴う既存割れ目のせん断変形の影響を考慮していない。神岡鉱山のような硬質岩ではせん断変形が微小であるため実測値を再現できたと考えられるが、局部的に生じていたかもしれない既存割れ目が大きく開口するような領域に対しての当該手法の適用性は確認できなかった。壁面近傍に生じる局部的な破壊や発破損傷が岩盤の透水性に与える影響に対しては、別途検討が必要である。
- ・深部に掘削する場合にはせん断変形に伴う割れ目の透水係数の変化についても着目する必要がある。特に、軟質岩では既存割れ目のせん断変形の影響は無視できないと考えられる。
- ・堆積岩に拡張する場合には、基質部の透水性を無視できるとは限らないので、割れ目の透水性と同時に基質部の透水性も考慮したモデルを構築する必要がある。
- ・軟質岩で深部に空洞を掘削する場合には、せん断変形により基質部にクラックの発生・成長が

生じる可能性があり、これらの影響についても考慮する必要がある。

本手法は、原位置で観測された割れ目の方向分布と原位置で観測された透水係数を入力パラメータとすることもできるし、原位置で計測された透水テンソルを用いても評価することが可能である。割れ目の観察が空間や時間の制限などで困難な場合には、孔間透水試験等によって直接得た値を入力パラメータに使えるので、本手法の実用性は高いと考える。

謝辞：本研究を行うにあたり、神岡鉱業（株）より計測の機会を提供して頂きました。また、三井金属鉱業（株）には原位置の計測に御協力を頂きました。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) United States Department of Energy: *Site Characterization Plan, Yucca Mountain Site, Nevada Research and Development Area, Nevada*, DOE/RW-0199, chapter 8, pp.8.3.2.2-15, 1988.
- 2) Kinoshita, N., Ishii, T., Kuroda, H. and Tada, H.: Prediction of permeability changes in an excavation response zone, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.138, No.2, pp.217-224, 1992.
- 3) 杉原弘造, 亀村勝美, 二宮康郎: 堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.239-251, 1998.
- 4) 安達哲也, 杉原弘造: 堆積軟岩での掘削影響領域の透水係数測定, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, III-B181, pp.362-363, 1996.
- 5) 南将行, 日比野悦久, 谷智之, 星野吉昇, 今井久: 坑道周辺の掘削影響領域の水理特性把握を目的とした短区間透水試験装置の開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, CS1-017, 2001.
- 6) 吉田秀典, 堀井秀之: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996.
- 7) 吉田秀典, 金子岳夫, 堀井秀之: 高レベル廃棄物処分坑道・処分孔の MBC 解析と掘削影響領域の評価に関する研究, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.226-230, 2001.
- 8) 山辺正, 小田匡寛, 前川恵輔: 異方性を有する岩盤における非線形応力・浸透連成解析, 第 27 回土質工学研究発表会講演集, pp.1321-1324, 1992.
- 9) Kelsall, P.C., Case, J.B. and Chabannes, C.R.: Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, No.3, pp.123-135, 1984.
- 10) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹: 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
- 11) 桜井英行, 里優, 木下直人, 石井卓: 掘削の影響による岩盤透水性の変化に関する研究 第 1 報 キ裂分布の異方性と透水係数の応力依存性を考慮した解析手法の開発, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-49, 1999.
- 12) 郷家光男, 石井卓, 桜井英行, 菅原健太郎, 木下直人, 里優: 仮想割れ目モデルによる透水性変化予測手法と原位置計測の比較, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, CS1-022, 2001.
- 13) Hsieh, P.A., Neuman, S.P., Stiles, G.K. and Simpson, E.S.: Field determination of three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 2. Methodology and application to fractured rocks, *Water Resources Research*, Vol.21, No.11, pp.1667-1676, 1985.
- 14) 青木謙治, 塩釜幸弘, 戸井田克, 手塚康成, 小淵考晃, 升元一彦: 亀裂性岩盤の透水特性評価に対するクロスホール透水試験の適用性について, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.441-446, 1990.
- 15) 長久, 野口義文, 穂刈利之, 奥野哲夫, 日下部寧: 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.
- 16) 大西有三, 中川誠司: 節理方向のグループ化と確率的モデル化に関する一考察, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.173-176, 1993.
- 17) Onstott, T.C.: Application of the bingham distribution function in paleomagnetic studies, *Journal of Geophysical Research*, Vol.85, No.B3, pp.1500-1510, 1980.
- 18) 例えば, ドミニコ, P.A., シュワルツ, F.W.: 地下水の科学 I - 地下水の物理と科学-, 地下水の科学研究会訳, 土木工学社, pp.68, 1995.
- 19) 菊地宏吉, 水戸義忠, 本田眞: 節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究 (その 2) - 節理分布特性要素と確率モデル-, 応用地質, 第 33 巻, 第 5 号, pp.19-31, 1992.
- 20) 木下直人, 石井卓, 安部透, 竹村友之: 空洞掘削に伴う周辺不連続性岩盤の透水特性変化, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.206-210, 1992.
- 21) 木下直人, 安部透, 竹村友之, 横本誠一: 原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水理特性の調査, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.481-485, 1993.
- 22) 鶴見憲二, 藤井伸一郎, 中川哲夫: スーパーカミオカンデの空洞掘削について, 資源と素材, Vol.111, No.6,

pp.381-386, 1995.

- 23) 竹村友之, 鶴見憲二, 西村毅: スーパーカミオカンデ
空洞の掘削, 土と基礎, Vol.46, No.6, pp.28-30, 1998.

(2001. 9. 17 受付)

PREDICTION OF PERMEABILITY CHANGES IN ROCK MASS AROUND CAVERNS BY VIRTUAL FRACTURE MODEL

Takashi ISHII, Mitsuo GOHKE, Hideyuki SAKURAI, Masaru SATO,
Naoto KINOSHITA and Kentaro SUGAWARA

In this study, we propose a method of analysis i.e. VIRTUAL FRACTURE MODEL to predict permeability changes caused by excavating a cavern in anisotropic fractured rock. In this method, based on permeability tensor calculated from in situ tests, fracture settings are virtually created with Bingham distribution. The alterations in permeability of the virtual fracture settings are predicted according to the anisotropic stress changes around a cavern. This method was applied to predict the permeability changes in Super-Kamiokande excavated in Kamioka Mine at the depth of 1000m. Consequently, both in situ measurements and predictions showed an increase of permeability around caverns to be consistent with each other.