

片麻岩の開口割れ目の水力学的物性を用いた 深部トンネル周辺に生じた低透水領域の評価

ESTIMATION OF INDUCED LOW PERMEABILITY ZONE AT THE VICINITY OF A DEEP TUNNEL USING HYDRO-MECHANICAL PROPERTIES OF OPENED FRACTURES IN ROCK MASSES

池川 洋二郎*
Yojiro Ikegawa

The discontinuities, such as joints, dominate deformability, strength, and permeability of rock masses. Thus, many studies on mechanical, hydraulic and geometrical properties of opened fractures have been done. However, the physical properties have not been applied to predict the real behaviors of rock masses. Here, deformability of the opened fracture obtained by laboratory tests will account for the reason about the induced low permeability zone located at the vicinity of deep tunnel. This shows a possibility of estimating the field phenomena using the physical properties of opened fracture.

Key Words: rock mass, fracture, stress, permeability, tunnel

1. はじめに

深部地盤に廃棄物などの処分や隔離を行う場合、トンネルや空洞の掘削などで生じる周辺地盤の水力学的挙動のメカニズムを考慮した合理的な深部地盤の利用が望まれている。従来、トンネル安定性は、主として内空変位の計測を行い、弾塑性理論に基づいて評価され、多くの実績が挙げられている。このためか、トンネル周辺の間隙水圧が実測された例は極めて少ない。一方、深部の地盤では、高圧となる湧水処理、浸透や移流拡散現象を考慮することが重要になるため、間隙水圧などの地下水の情報と、力学的な考慮を合わせた合理的な評価の重要性が増すと考える。岩盤の水力学的挙動をより詳細に理解するには、岩盤中に分布する不連続面と総称される割れ目の水力学的な特性¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾を考慮すること非常に重要である。

一方、当所では深部のトンネル周りの間隙水圧の長期モニタリングを行った。得られた間隙水圧の計測結果⁷⁾は、均質等方の透水係数を仮定したトンネル周りの放射流の理論解で得られる間隙水圧の分布と比較すると、トンネル近傍数mの領域に全水頭で約2倍の間隙水圧が作用していた。この結果が生じた原因となるメカニズムは、既存の開口割れ目が応力の増加にともなって閉じることで、透水係数が低下し、間隙水圧が高くなった、つまり開口割れ目の透水係数の応力依存性によるものと仮定した。

この透水性の応力依存性の仮定を検証していくことで、深部岩盤でのトンネルや空洞の掘削で生じる岩盤の水力学的な挙動を合理的に評価することが可能になるものと考え、解析的な評価や室内試験による評価を行っている。

以下、2章では深部トンネルの周辺岩盤で計測された間隙水圧の概要と、放射流の解析解を用いた間隙水圧の分布に関する評価の概要、3章では力学的開口幅の変形量と水理学的開口幅の変形量の比較⁸⁾、4章では既存の開口割れ目の水力学試験の概要を記述し、5章で全体の考察とまとめを行う。

2. トンネル周辺の間隙水圧の概要

(1) 間隙水圧の計測結果

図-1は、当所が行った深部トンネルの周辺の間隙水圧の計測状況を模式的に示す。間隙水圧を計測したトンネルは、周辺の地下水面から約200m下にあり、トンネルに続く既設坑道は湧水で水没し、坑道の途中

*正会員 Ph.D 電力中央研究所 我孫子研究所 地圏環境部

で排水により水面が一定に維持されている。このため、周辺の岩盤から貯槽トンネルに向かう水の流れが生じる方向に動水勾配がある。

図-2の太い実線の折れ線は、図-1の模式図で示す地点で計測された間隙水圧の分布を示す。横軸は貯槽トンネルの天井部を基準高とする全水頭で、縦軸は貯槽トンネルの中心から上方向の距離を示す。この図から周辺で約120mほどあった全水頭が、トンネル近傍の数mの領域で急に低下していることがわかる。これは、トンネル近傍の掘削影響領域の外側の領域には、トンネルの掘削にともなう応力再配分で応力が増加した領域が存在し、この応力が増加した領域の透水係数が低下することで、間隙水圧が上昇しているものと思われる。

図-2の実線および点線の曲線は、解析解を示すが、概要は、2.2節に記す。

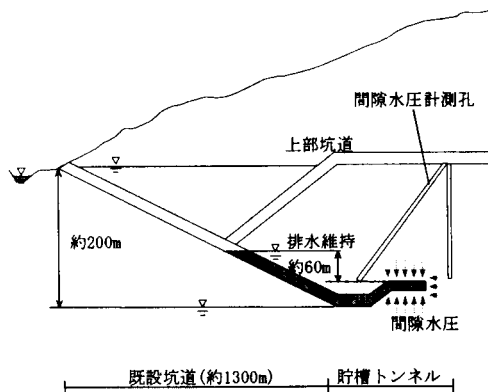


図-1 間隙水圧計測地点の模式図
(実際の貯槽トンネルは既設坑道に直交)

(2) 放射流の解析解による評価

トンネル軸に垂直な断面で、均質等方の多孔質体での放射流を仮定する。式(1)のダルシー則と、式(2)の連続式を、

$$v_r = k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1)$$

$$-Q = 2\pi r v_r \quad (2)$$

境界条件、 $r=r_0$ で $h=h_0$ と、 $r=r_1$ で $h=h_1$ として解くと、流量 Q は、式(3)で得られる。

$$Q = 2\pi k \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (3)$$

また、式(3)を整理すると、全水頭は式(4)で与えられる。

$$h = -\frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{r_0}{r} + h_0 \quad (4)$$

ここで、 v_r は半径方向の流速である。さらに、同心円状に分布する透水係数が異なる領域を考える場合は、式(4)を連立して解くことができる。

図-3はトンネル周辺の間隙水圧の分布を評価した時のモデルを示す。境界条件としては、トンネル上端を基準高さとする全水頭を用い、周辺地下水面の全水頭を169m、トンネル上端部の全出頭を63mとした。図-3(a)のモデル1は一樣な透水係数 k を用いた場合で、式(4)を用いて求めた全出頭の分布は図-2の点線の曲線で表される。この透水係数が一樣であると仮定した解析解で得られる全水頭は、実測値より全体に小さく、トンネル近傍での差が大きい。

図(b)のモデル2は同心円状に分布する掘削影響領域、低透水領域、初期領域に分けて各領域毎に透水係数を与えたもので、求めた全水頭は図-2の実線の曲線で表す。ここで、モデル1の透水係数 k は、坑道から完全に排水を行った時に計測した湧水量から式(3)を用いて求めた。このモデル1の透水係数は、モ

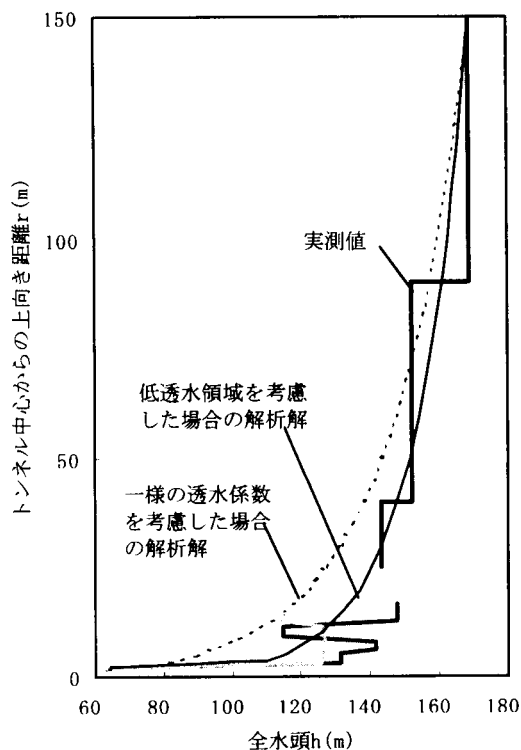


図-2 トンネル周辺の間隙水圧の分布

デル 2 の初期領域の透水係数 k_3 に等しい。また、モデル 2 の掘削影響領域の幅は弾性波探査の結果から50cmとし、透水係数は初期領域の透水係数 k_3 の5倍と仮定した。さらに、低透水領域の厚さと透水係数をパラメータとしたケーススタディにより、低透水領域の幅は、トンネル直径(3.2m)の4分の1程度、透水係数は k_3 の5分の1程度であることが分かった。以上の放射流れの解析解を用いた評価により、掘削影響領域の外側には、トンネル掘削より前の初期状態の透水係数の20%程に透水係数が下がった領域が存在することが想定される。

一方、弾性体理論より、トンネルの接線方向の応力は土被り相当圧の2倍になる。さらに、開口割れ目の透水係数の応力依存性の観点からトンネル掘削による変化を考えると、垂直応力の変化では最大2倍であるのに対し、透水係数は平均で5分の1程度であると考えられ、透水係数の変化の方が、より鋭敏であると言える。

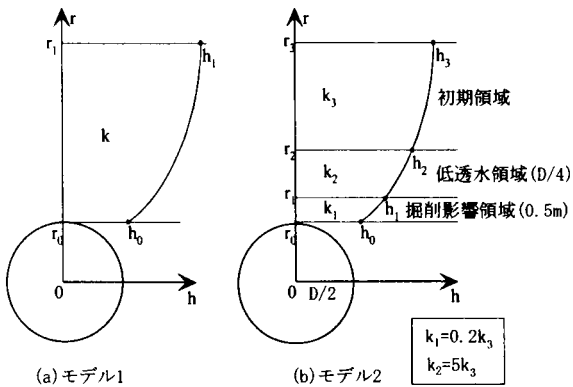


図-3 解析解のモデル

3. 力学的開口幅の変形量と水理学的開口幅の変形量

(1) 力学的開口幅の変形量 ΔE の概要

力学的開口幅の変形量は、弾性理論からトンネルの接線方向の応力が土被り相当圧の2倍になることから開口割れ目の垂直剛性を用いて求める。垂直剛性は図-1のトンネル近傍に削孔で得られたボーリングに含まれ、コア軸にほぼ垂直となる既存の開口割れ目を一枚含む円柱供試体を作成し、一軸圧縮することで、開口幅の変形量と割れ目に作用する垂直応力の関係を求めた。この垂直剛性試験の結果、垂直剛性の平均は2080GPa/mであった。

図-4は室内試験で3回の繰返し載荷で得られた開口割れ目の変形量と応力の関係を示す。図-1のトンネルの土被り圧は約400kPaで、土被り相当圧は約10MPaとなる。またトンネル接線応力は約20MPaである。この図より1回目の載荷を除くと、載荷および除荷のカーブは良く一致し、本地点の片麻岩の開口割れ目は、変形量が数十 μ m 程の場合は弾性的であることが分かる。

(2) 水理学的開口幅の変形量 Δe の概要

岩盤の割れ目の透水は、滑らかな平行平板(parallel plate)間の粘性流体の層流と仮定すると、解析解より流量 Q が平行平板の間隔の3乗に比例する。これを3乗則(cubic law)と呼び、3乗則に基づいて計算される開口幅を水理学的開口幅 e と呼ぶ。また、花崗岩、玄武岩、大理石などの硬質岩の引張割れ目を用いた室内実験などでは、3乗則の成立性が確認されている。

まず、平行平板間の一次元流の平均流速は、流体の粘性を考慮し、

$$v = \frac{e^2}{12} \frac{\rho g}{\mu} \quad (5)$$

で表される。さらに、式(3)と式(5)より、平行平板間の放射流の流量は、

$$Q = 2\pi \frac{e^3}{12} \frac{\rho g}{\mu} \frac{h_1 - h_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (6)$$

となる。これを水理学的開口幅 e^3 に関して解くと、

$$e^3 = \frac{6\mu Q}{\pi \rho g} \frac{\ln(r_0/r_1)}{h_1 - h_0} \quad (7)$$

が得られる。

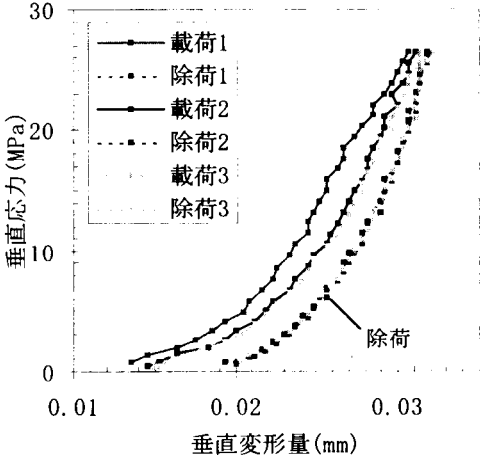


図-4 開口割れ目の変形量-応力関係

次に、トンネル軸に垂直な複数枚の平行な開口割れ目のモデルを仮定する。各々の開口割れ目では放射流が生じ、図-3(b)のモデル2で示したトンネルの中心からの距離と全水頭の関係(r-h)が生じているとすると、初期領域と低透水領域の割れ目の水理学的開口幅 e_1 と e_2 は、式(7)にモデル2と同じ境界条件を用いると、式(8)と(9)で求まる。

$$e_1 = \frac{6\mu Q}{\pi \rho g} \frac{\ln(r_2/r_1)}{h_3 - h_2} \quad (8)$$

$$e_2 = \frac{6\mu Q}{\pi \rho g} \frac{\ln(r_1/r_2)}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

さらに、初期状態の領域が低透水領域に変化することによる割れ目開口幅の変形量を式(8)と(9)で得られた結果を使い、差分として水理学的開口幅の変形量 Δe が求まる。ここで、透水量Qは、一枚当たりの割れ目の透水量である。

(3) 結果と考察

図-5は力学的開口幅の変形量と水理学的開口の変形量を比較するため、縦軸を開口幅の変形量に、横軸を割れ目の頻度にとったものである。割れ目の頻度は3(2)で仮定したトンネル軸に垂直で平行な開口割れ目単位長さ中の枚数である。図中の水平な太い実線は、トンネル接線応力が土被り相当圧の2倍となることから、室内試験で求めた開口割れ目の垂直剛性を用いて求めた力学的開口幅の平均の変形量 $6.3 \mu\text{m}$ である。また、右下がりの曲線は、割れ目頻度により一枚当たりの割れ目の流量が異なることから、各割れ目頻度に対して式(8)と式(9)で求まる水理学的開口幅の差を変位量としてプロットしたものである。

本地点の岩級は主にB級で一部C₀級の非常に新鮮な岩盤で、B級は割れ目間隔が50cm以上、C₀級は割れ目間隔が50cm未満としているので、B級では割れ目頻度は2となる。以上より、図-5で分かるように、 ΔE と Δe はオーダー的にほぼ一致していると言える。従い、図-2の間隙水圧の分布となったメカニズムとして開口割れ目の透水性の応力依存性によることを裏付ける一つの検証になっていると思われる。

4. 水力学試験の概要

(1) 水力学試験の概要

図-6は、ボーリングコアに含まれる単一の割れ目を含む円柱供試体を用いて、垂直応力と透水係数の関係を求める水力学試験の概要を示す。供試体下部から軸の位置に直径6mmの孔を設け、材料試験機で一軸圧縮を行いながら、割れ目内に放射流を生じさせた。

透水試験は、土被り相当圧と倍の応力の間を4等分し、各応力(11, 14.5, 18.5, 22MPa)に載荷圧を一定に保った状態で、透水圧Pと流量Qの関係を求める透水試験を行った。

(2) 開口割れ目の透水性の評価法

図-7に示すように、円管内の水位変化から透水性を求める変水位透水試験に基づいた開口割れ目の透水係数の求め方の概要を示す。まず、水位の変化dhと流量Qの間に次式が成立つ。

$$A(-dh) = Qdt \quad (10)$$

さらに、割れ目内の放射流において、流量が開口幅の3乗に比例する3乗則が成り立つと仮定すると、流量は開口幅の関数として次式で表される。

$$Q = 2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{v} \frac{h_3 - h}{\ln(r_1/r_2)} \quad (11)$$

ここで、A:ピュレットの断面積、h:全出頭、t:時間、a:割れ目の水理学的開口幅、v:動粘性係数、g:重力加速度、r:円柱供試体中心からの距離である。また、hは変数である。式(10)と式(11)より、

$$2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{v} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} dt = -A \frac{1}{h_3 - h} dh \quad (12)$$

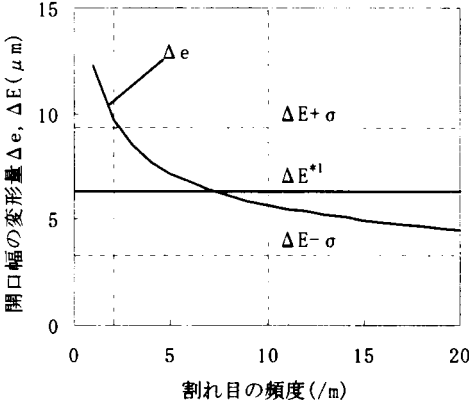


図-5 低透水域における割れ目頻度と開口幅変位量の関係
(*1:表-2の垂直剛性から求めた平均値, σ:標準偏差)

次に、時間 t_1 と t_2 の時、全出頭が h_1, h_2 として、積分する。

$$2\pi \frac{a^3}{12} \frac{g}{v} \frac{1}{\ln(r_1/r_2)} (t_2 - t_1) = A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (13)$$

式(13)を水理学的開口幅 a^3 について解くと、

$$a^3 = \frac{12}{2\pi} \frac{v}{g} \ln \frac{r_1}{r_2} \frac{1}{t_2 - t_1} A \ln \left(\frac{h_3 - h_2}{h_3 - h_1} \right) \quad (14)$$

式(14)より得られる水理学的開口幅を用いて、開口割れ目の透水係数は、3乗則より次式で得られる。

$$k_w = \frac{a^2}{12} \frac{g}{v} \quad (15)$$

以上のように、式(14)と式(15)を用いて透水圧の時間変化から、水力学的開口幅と開口割れ目の透水係数が求まる。

(3) 結果

図-8は室内試験による開口割れ目の垂直応力と透水試験の関係を示す。試験は同じ供試体を用い、3回試験の結果を示す。

(4) 考察

本地点の片麻岩を用いた室内実験で得られた結果から次のことがらが考察される。

- ・ 透水性の応力依存性が認められ、垂直応力の増加にともない、透水係数は小さくなる。
- ・ 供試体の載荷応力を土被り相当応力から2倍にすると、透水係数は2分の1である。
- ・ 同一供試体の3回の試験で得られた、開口割れ目の透水係数と応力の関係は、概ね一致し、片麻岩の割れ目においては、透水係数の応力依存性にある程度の再現性があると言える。

5. 考察とまとめ

以上の深部トンネル周辺の間隙水圧のモニタリング結果、放射流の解析解を用いた間隙水圧の分布の評価、力学的開口幅の変形量と水理学的開口幅の変形量の比較、室内試験による既存割れ目の垂直応力と透水性の関係より得られた考察を順を追って列記することで、まとめを行う。

- 1)従来より、説明が遅れている深部のトンネル周辺の間隙水圧の分布に関して、片麻岩中のトンネル周辺の間隙水圧のモニタリング結果を得ることができた。
- 2)間隙水圧のモニタリング結果では、トンネルの近傍数 m の領域で間隙水圧が間隙水圧が急激に低下し、トンネルの掘削影響領域の外側に透水係数が低下した領域が生じていることが推定された。この低透水領域が生じたメカニズムとしては、岩盤の透水係数の応力依存性によるものと考えられた。
- 3)放射流の解析解を用いたトンネル周辺の間隙水圧の評価により、掘削影響領域の外側にトンネル直径の4分の1程の厚さで、透水係数が5分の1程である低透水領域が存在していることが推測された。

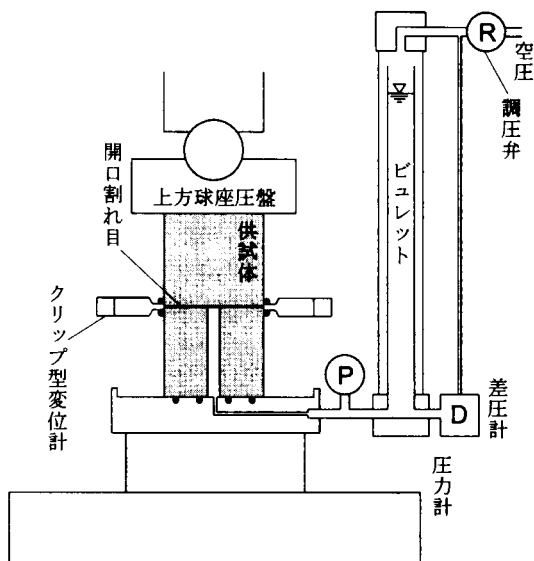


図-6 水力学試験の模式図

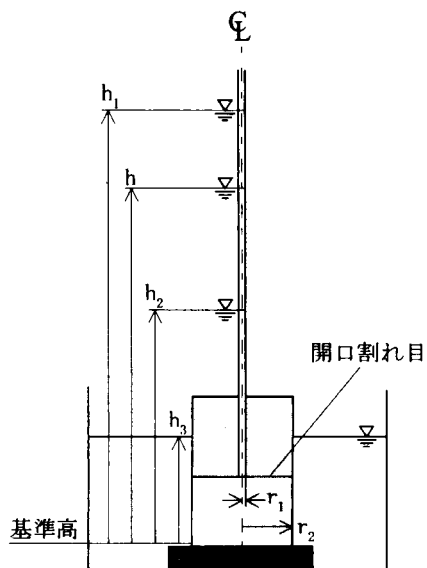


図-7 平行平板間の放射流を対象とした変水位透水試験の模式図

4)弾性体理論におけるトンネル接線方向の応力が土被り相当圧の2倍となるが、3)の低透水領域の透水係数は5分の1と評価されることから、開口割れ目の透水性の依存性に関しては、応力の変化より透水性の変化の方が鋭敏であると言える。

5)原位置の間隙水圧の計測孔に用いたボーリング孔の削孔で採取したコアに含まれる既存の開口割れ目を用いた室内の垂直剛性で得られた結果では、土被り相当圧から2倍の応力範囲の応力-変位関係は弾性的であった。これより、2)の原位置の間隙水圧の計測結果を支配していると考えられる開口割れ目の透水性の応力依存性は、開口割れ目の弾性変形を示す微小変形で生じた現象であると言える。

6)トンネルの掘削で生じたと考えられる低透水領域における開口割れ目の力学的開口幅の変化量 ΔE と水理学的開口幅の変形量 Δe は、ほぼ一致した。これは、2)で推定した低透水領域が発生したメカニズムが開口割れ目の応力依存性によるものであることを検証する一事例になるものと思われる。

7)既存の開口割れ目を用いた開口割れ目の垂直応力と透水性の関係を求める水力学試験の室内試験の結果より、開口割れ目には、透水係数の応力依存性が示された。さらに、この水力学試験の結果を用いて、2)で考慮した低透水領域の透水性の評価を行うことが望まれる。

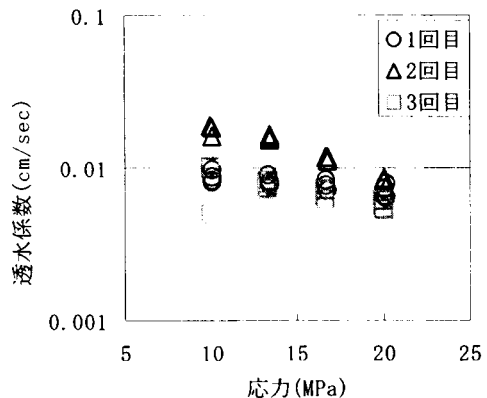


図-8 応力-透水係数の関係
C2-1. 15(1, 2, 3)

参考文献

- 1) Barton N. The shear strength of rock and rock joints. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1976;13(9):225-279.
- 2) Bandis S Lumsden A, Barton N. Experimental studies of scale effects on shear behavior of rock joints. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,18:1-21,1981.
- 3) Bandis N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr,22(3):121-140,1985.
- 4) 足立紀尚, 田村武, 高圧湧水化のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模, 土木学会論文集, No.280, pp87-98, 1978.
- 5) 石井卓, 郷家光男, 桜井英行, 里優, 木下直人, 菅原健太郎, 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, 土木学会論文集, No.715/Ⅲ-60, pp.237-250, 2002.9.
- 6) P.A. Witherspoon : Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water resources research, Vol.16, No.6, pp1016-1024, Dec., 1980.
- 7) 池川洋二郎, 中川加明一郎, 小規模空洞を使った水封式による圧縮空気貯蔵実験-残留した圧縮空気の挙動計測-, 土木学会論文集, No.715/Ⅲ-60, 2002.12. 掲載予定.
- 8) 池川洋二郎, 岩盤割れ目の垂直剛性と透水性に着目した深部トンネル周りに生じた低透水域の評価, 第37回地盤工学シンポジウム論文集, pp335-342, 2002.1.1.
- 9) 赤井浩一, 土質力学, 朝倉書店, pp268.
- 10) 田中達吉, 横山幸也, 神岡鉱山における電中研式初期地圧測定結果, 岩盤力学シンポ, 1989.