

(80) 空調された岩盤空洞周辺の不飽和帯進行に関する数値解析

埼玉大学大学院 ○大沢 聡
埼玉大学工学部 渡辺邦夫

Analysis of the unsaturated zone developing around a tunnel

Satoshi Osawa, Saitama University
Kunio Watanabe, Saitama University

Abstract

Tunnel is dried up in usual under a ventilation condition. Unsaturated zone is formed and developed around a tunnel when dry air is ventilated. This unsaturated zone much influences on the groundwater flow pattern around tunnel and reduces the groundwater inflow. For this reasons the development of the unsaturated zone must be studied in detail. The authors numerically analysed the development of this unsaturated zone on the basis of a saturated-unsaturated flow theory. For the calculation the evaporation rate from tunnel wall must be introduces as a boundary condition given on tunnel wall. The relation between average evaporation rate and relative humidity and temperature conditions are studied using of many evaporation rates data obtained in some tunnels. The unsaturated zone development around a tunnel could be well analysed.

1. はじめに

最近の地下空洞周辺の水利特性に関する報告から、地下空洞を強制的に空調した場合、壁面付近が乾燥し、空洞周辺に不飽和帯が発生することが確認されている。不飽和帯の発達、空洞への湧水量評価や空洞周辺の地下水特性に多大な影響を及ぼすと考えられる。従って、現在、廃棄物地層処分など地下水特性を十分に把握しなければならない分野で、不飽和帯に対する関心が高まっている。しかし、スイスのグリムゼル地下研究所における地下空洞近傍の毛管水圧及び水分量測定の実例はあるものの、岩盤の不飽和帯に関する情報は極めて少ない。

本研究では、まず空調された地下空洞における壁面上蒸発量計測を行い、現地計測の面から、不飽和帯の性質及び空調条件と蒸発量の関係を調べた。また、飽和-不飽和浸透流解析により、不飽和パラメータの推定と不飽和帯の形成・後退(湿潤)過程を求め、グリムゼルでの実測例と比較し、本解析の妥当性を検証した。その結果、岩盤の不飽和帯の性質が明かとなったので報告する。

2. 不飽和帯の発達と空洞壁面における蒸発量特性

蒸発量の現地計測は、スウェーデン・ストリッパ鉱山、スイス・グリムゼル、釜石鉱山(NW坑道, KD-90坑道)の4坑道で行った。各坑道はいずれもカコウ岩中に掘削されたもので、地下水面下に位置する。また、岩の平均的な透水係数はいずれも 10^{-8} (cm/s)以下である。各々の坑道では、隔壁を設けて坑道を仕切り強制的に乾燥空気を送入するベンチレーションテストが行われた。このテストにより、壁面付近の岩盤中の水は蒸発することになる。もし、空洞へ向かう浸透流量より蒸発量が大きければ、空洞壁面付近が乾燥し不飽和帯が発生するはずである。図-1は、ストリッパ鉱山におけるValidation Drift掘削後1カ月・14カ月の、割れ目のない壁面からの蒸発量分布を示したものである。なお、図-1(b), (c)は、(a)を展開した図であ

る。これを見ると、掘削直後（図-1(b)）では、乾燥空気の送入に伴い壁面近傍の水が蒸発し、全体に蒸発量が大きくなっていることがわかる¹⁾。しかし、14カ月経過すると（図-1(c)）、蒸発量は1/4~1/5に低下していることがわかる。この理由としては、まず初期の蒸発量が浸透流量よりも大きかったために、間隙中の水が空気に置きかわり不飽和帯が発生することが考えられる。さらに、不飽和帯が進行すると透水係数が低下するため、浸透流は減少し蒸発量も時間と共に低下することになる。また、グリムゼルではThermo-Couple Psychrometerを用いて顕著な割れ目のないカコウ岩中の毛管水圧が計測され、70%程度の湿度の空気を約1年送入した場合、不飽和帯が壁面から1.6m以上に広がり、壁面から5cmの位置では2.2MPaもの負圧の発生が確認された²⁾。このように、岩盤の透水係数が小さく地下水面下の空洞であったとしても、空洞内を空調することにより壁面から水分が蒸発し、周辺に不飽和帯が発生し極めて大きな負圧が発生することがわかる。以上から、不飽和帯の発達過程を概略的に見積もる際に、蒸発量計測が有効であることがわかる。

しかし、できれば与えられた空調条件で蒸発量を推定できることが望ましい。そのため、上述した4坑道における蒸発量計測結果から、空調条件と蒸発量の関係の整理を行った。空調条件として、①岩盤壁面の湿度と空洞内部の平均湿度との差及び②空洞内温度を選定した。なお、岩盤壁面と空洞内部での温度変化はほとんど見られなかった。しかし、たとえ同一空調条件で計測したとしても、壁面の形状により蒸発量に違いが見られる場合がある。その理由として、まず蒸発量は、壁面からの距離の異なる2点（間隔6mm）で計測した絶対湿度勾配に、水分拡散係数を乗じて算出されるものであるため、2点での湿度が場所によらず一定であれば蒸発量も一定となる。しかし、図-2のように凹凸のある壁面上で計測した場合、壁面からD離れた位置での湿度をそれぞれ h_a , h_b とすると、bでは水蒸気が滞留することにより、 $h_a < h_b$ となる。壁面a, bでの湿度を一定 ($H_a = H_b$) とし、それぞれの点での湿度勾配を求め比較すると $(H_a - h_a)/D > (H_b - h_b)/D$ となり、bでの蒸発量はaに比べて小さくなる。このように、空気中の湿度を一定(H)とし壁面上と空気中の湿度差を用いた場合蒸発量にばらつきが生じることとなる。そのため、今回の整理では空調条件と、その条件下で測定された平均蒸発量がどのようになるかを見た。蒸発量-湿度差-壁面温度の関係を図-3に示す。これを見

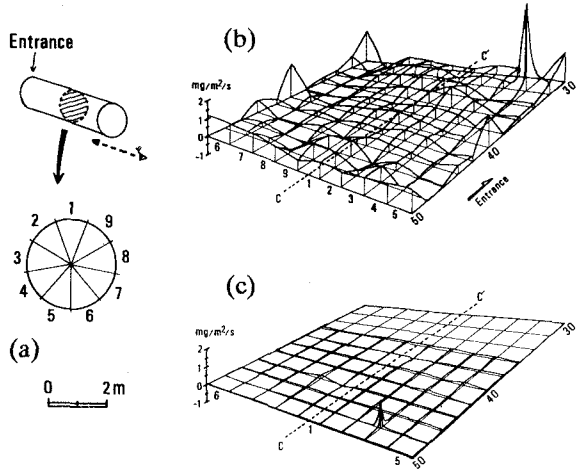


図-1 ストリッパ鉱山での1カ月、14カ月後の蒸発量分布

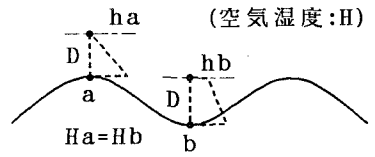


図-2 凹凸のある壁面上での蒸発量の違い

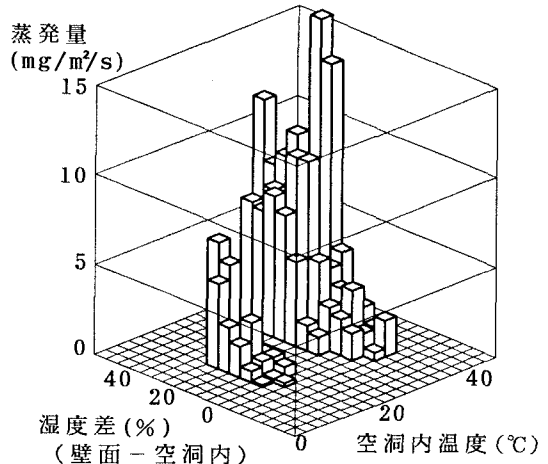


図-3 蒸発量-湿度差-空洞内温度の関係

ると、湿度差・温度ともに高くなる程、蒸発量も高くなる傾向が見られる。また、湿度差がマイナスとなる部分で蒸発量がプラスとなる部分が見られる。この理由として、壁面位置によっては乾燥が進み壁面周辺の湿度が低下しているにもかかわらず、空洞内湿度を場所によらず一定と設定しているため、このような現象が生じると思われる。しかし、問題はありますが空調条件から蒸発量が推定できることが明かになり、空洞周辺の不飽和帯に関する解析を行う上で、壁面上のフラックス境界条件を設定できるようになった。

3. 解析方法

本来、水蒸気輸送を伴うような数値解析を行う場合、地下水流れを2相流（水蒸気+水）として取り扱う必要がある。しかし、水蒸気輸送が卓越するのは壁面近傍のわずかな部分であることから、大局的に考える場合、飽和-不飽和浸透流解析を用いることで対応できると思われる。従って、本研究では地下水流れを単相流としてとらえ、解析を行うことにした。

飽和-不飽和浸透流解析を行う際、不飽和浸透を大きく支配する不飽和特性（サクション圧-飽和度-不飽和透水係数）を決定しなければならない。しかし、岩を対象にしてこれらの関係を実験的に求めることは極めて困難である。そこで、今回釜石鉱山から採取したカコウ岩円筒供試体（直径6cm, 高さ15cm）を用いて高さ方向の水分量を測定し、1次元飽和-不飽和浸透流解析による計算値をフィッティングさせることで不飽和パラメータを推定した。不飽和特性を表す関数モデルとして、以下に示す van-Genuchten式を用いた³⁾。

$$S_e = \{1 + |\alpha \psi|^n\}^{-m} \quad \dots (1)$$

$$S_e = (S - S_r) / (S_s - S_r)$$

$$K(S) = K_s \cdot S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2 \quad \dots (2)$$

S_e : 有効飽和度, S_s : 飽和水分量, S_r : 最小水分量

S : 飽和度, $K(S)$: 不飽和透水係数, K_s : 飽和透水係数

Ψ : 圧力水頭, α, m : パラメータ ($n=1/(1-m)$)

(1)式中のパラメータ α, m

を非線形最小2乗法を用いて反復修正することにより、不飽和パラメータを決定した。解析アルゴリズムとして修正マルカート法を用いた⁴⁾。なお、カコウ岩供試体の飽和透水係数は 1.25×10^{-10} (cm/s) であり、 S_s, S_r はそれぞれ84%, 0%と仮定した。図-4に、実験及び解析結果を示す。図を見ると、岩の不均質性の影響により実験値にばらつきが見られるが、両者は傾向的に一致していると思われる。

図-5は決定した不飽和特性である。また図-6に、グリ

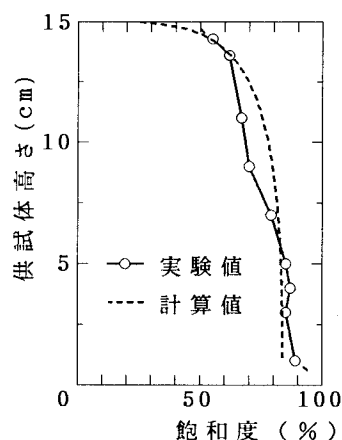
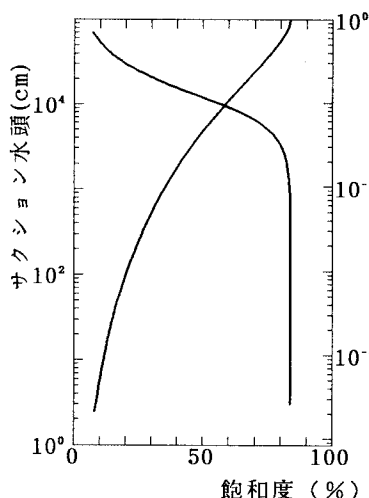


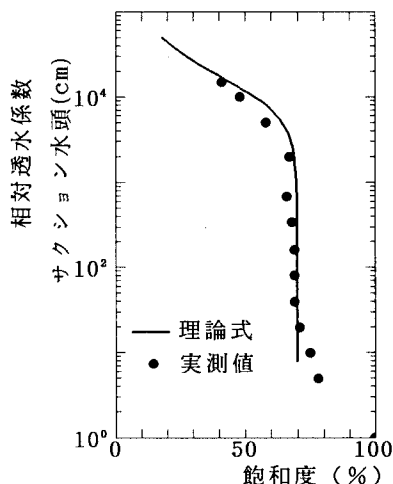
図-4 水分分布の実測と計算値



$$\alpha = 0.0001$$

$$m = 0.558$$

図-5 不飽和特性（釜石）



$$\alpha = 0.000085$$

$$m = 0.48$$

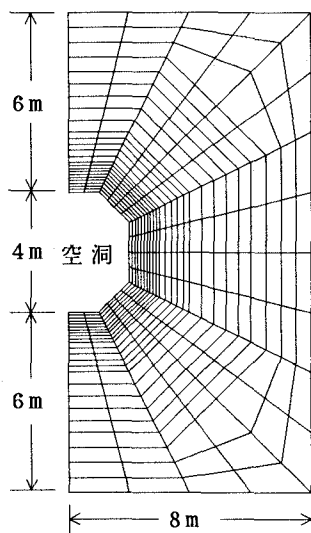
図-6 水分特性（グリムゼル）

ムゼル研究所において実測により求められたサクシオン圧-飽和度の関係を示す。理論式として van-Genuchten 式があてはめられ、良い一致がみられている。サクシオン圧-飽和度の関係について釜石鉱山・グリムゼル両者の結果を比較すると、パラメータ α 、 m ともにほぼ同様の値を示していることがわかる。従って、実験精度や飽和度-不飽和透水係数の関係を考慮していないなど、まだ問題は残されているが、ある程度カコウ岩の不飽和パラメータを推定できるようになった。また、カコウ岩を対象としたモデルに対する不飽和特性に van-Genuchten 式が有効であることが明かになった。

4. 非定常不飽和浸透流の解析

4-1 解析条件の設定とモデル化

本解析は、グリムゼルにおける空洞周辺の、①定常状態でのサクシオン圧及び②不飽和帯の後退過程(湿潤過程)を実測値として比較検討するために行うものである。解析モデルは、図-7に示すような2次元四角形要素とした。物性値として、飽和透水係数を 10^{-11} (m/s)、間隙率を1(%), 比貯留係数を 10^{-6} (1/m)に設定した。境界条件として、上部・下部・右側面で一定水頭(32m)、左側面はNo-flow、空洞壁面にグリムゼルでの蒸発量測定によって得られた平均蒸発量($1.2 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{s}$)を与えた⁵⁾。なお不飽和パラメータとして、図-6で求めた値を用いた。



(要素数:384, 節点数:425)

図-7 解析メッシュ図

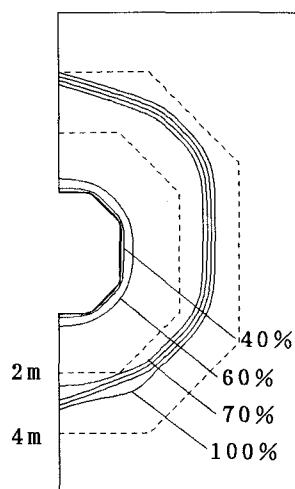


図-8 飽和度分布

4-2 解析結果

①定常状態でのサクシオン・飽和度分布

グリムゼルにおいて、実測された最大サクシオン圧は2.2MPaであり、2.2MPaものサクシオン圧が生じる際の間隙径をパイプモデルで考えるとそれは $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}$ 以下となる。間隙径が $1 \times 10^{-7} \text{ m}$ 程度になると、水は壁面に吸着されほとんど流れなくなることが確認されているので、坑道壁面でサクシオン圧が2.2MPaを越えた場合、壁面の蒸発量をすべて0とし一定圧力水頭(-220m)を与えた。図-8に空洞周辺の飽和度分布を示す。これを見ると、不飽和帯が壁面から3m~4m程度広がっていることがわかる。また、空洞上部の方が広がりが大きい、これは飽和度がサクシオン圧によって決定されるものであり、

上部でのサクシオン圧が大きく下部で小さくなることから、このような現象が生じるのである。次に、定常時での計算結果と実測サクシオン圧との比較を行った。計測は水平方向に行われたので、解析値も同様に水平方向の値を用いた。図-9に深さ方向のサクシオン圧分布の結果を示す。両者の関係は非常に調和的であり、計算の妥当性を示していると思われる。

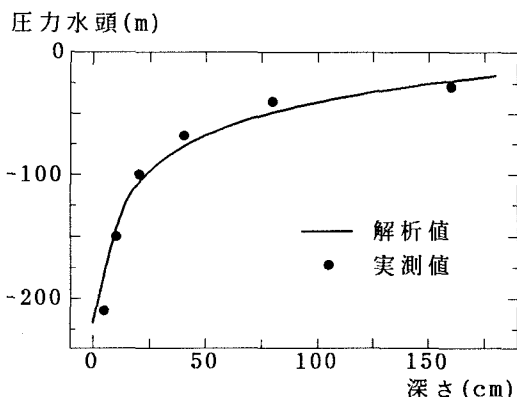


図-9 深さ方向のサクシオン圧分布

②不飽和帯の後退過程（湿潤過程）

グリムゼルでは、空洞内の空調をストップし空洞内湿度を飽和状態に保つことにより、不飽和帯の後退過程を調べる実験も行われた。解析では、定常計算で求めた定常値を初期値として非定常計算を行った。このとき壁面はNo-flow条件とした。図-10に壁面から深さ10cmにおける結果を、図-11に20cmにおける結果を示す。10cmの結果を見ると、初期値が20m程度異なっているため一致していないが、傾向的には一致し、いえると思われる。20cmの結果では約30~40日後まで良く一致しているが、その後実測値に回復の遅れが生じている。これは、1つの理由として、不飽和浸透流のヒステリシスとも考えられる。

以上の解析結果から、境界条件やヒステリシスなどの物性値に関してまだ問題はあものの飽和-不飽和浸透流解析を用いることにより、不飽和帯の形成・後退（湿潤）過程をある程度求められることが明かとなった。

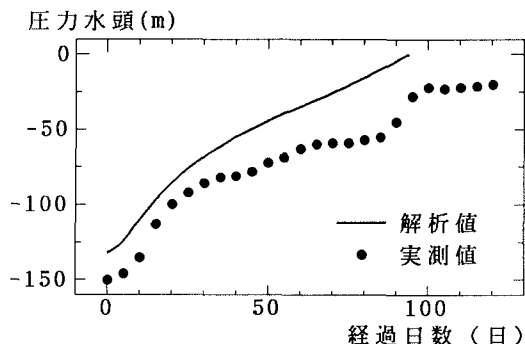


図-10 不飽和帯の後退過程（深さ10cm）

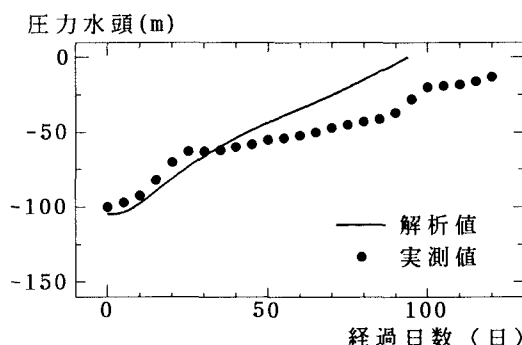


図-11 不飽和帯の後退過程（深さ20cm）

5. まとめ

- ①地下空洞を空調した場合、空調条件（①岩盤壁面の湿度と空洞内部の平均湿度との差・②空洞内温度）のみから蒸発量を推定できる可能性が明かとなった。
- ②カコウ岩供試体を用いて高さ方向の水分量分布を計測し、1次元飽和-不飽和浸透流解析により計算された値をフィッティングさせることにより、不飽和パラメータをある程度推定できるようになった。
- ③グリムゼルにおけるサクシオン圧測定を実測値として、2次元飽和-不飽和浸透流解析により計算された値と比較した結果、深さ方向のサクシオン圧分布に関して定常値では良い一致を見せた。また、不飽和帯の後退（湿潤）過程では、傾向としてほぼ一致した結果が得られた。

以上より、空洞壁面における蒸発量分布を行うことや、飽和-不飽和浸透流解析による数値解析から、岩盤の不飽和帯の発達に関する性質を把握できることが示された。

<参考文献>

- 1) K. Watanabe: Evaporation Measurement in the Validation Drift -Part3, stripa Report, 91-36, pp. 1-39, 1991.
- 2) M. SCHNEEBELI, T. BAER, H. ABPLANALP, H. WYDLER, H. -P. LASER and H. FLUHLER: Water Content and Water Potential in Unsaturated Granite: Experiment, NAGRA Interner Bericht 92-75, pp. 1-52, 1992.
- 3) 竹下祐二, 西垣 誠, 河野伊一郎: 不圧帯水層での揚水試験結果による不飽和浸透特性の算定方法, 土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 2, pp. 199-210, 1990.
- 4) 中川 徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, pp. 1-206, 1982.
- 5) K. Watanabe: Evaporation Measurement at the Grimsel Test Site, NAGRA Interner Bericht 90-15, pp. 1-49, 1991.