

地下空洞周辺に形成される不飽和帯の進行・回復に関する解析

J R 東日本

埼玉大学工学部

G. I (NAGRA)

正会員 ○大沢 聡

正会員 渡辺邦夫

Paul Bossart

1. はじめに

近年、岩盤中に掘削された地下空洞を強制的に空調した場合、空洞周辺に不飽和帯が形成されることが確認されている¹⁾。不飽和帯の存在は、空洞へ流出する湧水量の評価やトレーサ試験等に影響を及ぼすため、その性質を詳細に把握しなければならない。しかし、従来、不飽和帯に関する情報は極めて少なく、その特性はよくわかっていない。そこで筆者らは、飽和-不飽和浸透流解析を行い空洞された地下空洞周辺のサクション圧分布を求め、スイス・グリムゼル地下研究所において実測されたサクション圧分布との比較を試みている²⁾。今回は、境界条件を実測されたポテンシャル分布等を基に設定することにより、実現象を忠実に捉える形で解析を行った。それにより、トンネル壁面というかなり大きなサクション圧が発生する岩盤においても、飽和-不飽和浸透流解析を適用できることが明らかになったので報告する。

2. 解析条件および解析方法

解析は2次元四角形要素を用いたFEMで、解析モデルを図-1に示す。このモデルはサクション圧を実測したグリムゼルの地下空洞を模している。また、計測を行った岩盤が割れ目のない比較的均質なものであったため、今回は対象岩盤を均質多孔媒体として捉え解析を行った。物性値を表-1に示す。透水係数・間隙率については、グリムゼルにおける平均的な値を用いている。また、不飽和特性(サクション圧-飽和度-不飽和透水係数)として、以下に示すvan-Genuchten式を採用した。この式の特徴は、 α 、 m という2つのパラメータのみから不飽和特性を決定できる点にある。

表-1 物性値・各パラメータ

透水係数	10^{-11} m/s
間隙率	1%
不飽和パラメータ α	0.000085
不飽和パラメータ m	0.48
飽和水分量 θ_s	70%
最小水分量 θ_r	0%

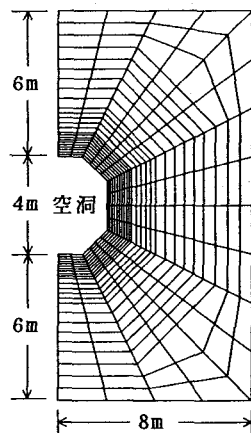


図-1 解析モデル

$$S_e = \{1 + |\alpha \psi|^n\}^{-m}, \quad S_e = (S - S_r) / (S_s - S_r)$$

$$r = S_e^{1/2} \{1 - (1 - S_e^{1/m})^m\}^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_e: \text{有効飽和度}, S_s: \text{飽和水分量}, S_r: \text{最小水分量} \\ S: \text{飽和度}, r: \text{相対透水係数}, \psi: \text{圧力水頭} \\ \alpha, m: \text{不飽和パラメータ} (n = 1/(1-m)) \end{array} \right\}$$

不飽和パラメータ α 、 m は、図-2に示すように、グリムゼルにおいて実測されたサクション圧-飽和度の関係に、van-Genuchten式をフィッティングさせることにより算定した。なお、式に含まれる飽和水分量・最小水分量等のパラメータは実測値から推定した値を用いた。以上の値も表-1に示す。

解析手順は、グリムゼルでの原位置試験過程に従った。グリムゼルでは、まず空洞内に湿度70%の空気を送入することにより壁面を乾燥させ岩盤内の地下水を排除し、不飽和帯の進行過程における空洞周辺のサクション圧分布を計測した。このとき、解析では空洞壁面のフラックス境界条件として、蒸発量測定装置を用いて計測された平均蒸発量 $1.2(\text{mg}/\text{m}^2/\text{s})$ を一様に、かつ

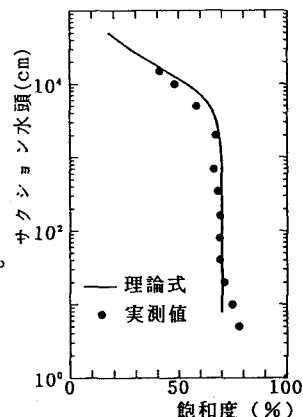


図-2 不飽和特性

定常的に与えた。また、壁面上の圧力水頭が-220m以下となった場合蒸発量を0とし、代わりに一定圧力水頭-220mを与えた。これは、圧力水頭が-220mになるときの間隙径をパイプモデルで考えると約 10^{-7} mとなり、その程度の大きさでは地下水は間隙壁面に吸着されてほとんど流れなくなるためである。そして、実測サクシオン圧がほぼ定常となった時点で、定常状態での実測によるサクシオン圧分布と解析による分布を比較する。次に、空洞内の空調を停止することにより空洞内をほぼ飽和状態に保ち、不飽和帯の回復過程を調べた。解析では定常状態における値を初期値とし、空洞内を完全飽和と仮定することにより壁面上をNo-flow境界と設定した。ここで回復過程におけるサクシオン圧分布の経時変化の比較を試みた。なお、上部・下部・右側面の外部境界条件にはグリムゼルの空洞周辺で計測されたポテンシャル分布を基に一定水頭24mとした。また、左側面はNo-flow境界とした。

3. 解析結果

図-3に、定常状態における空洞周辺の飽和度分布を示す。これを見ると、不飽和帯が空洞壁面から3~5m程度広がっていることがわかる。図-4は、空洞壁面から深さ方向のサクシオン圧分布を実測値と比較したものである。図より、傾向的にはほぼ一致しているといえる。なお比較に際して、サクシオン圧の計測が壁面からほぼ水平方向に行われたことから、解析値についても同方向の値を用いた。次に、不飽和帯の回復過程に対する比較を図-5(a)に示す。図は、壁面から10cmの位置における空調停止後の圧力水頭の経時変化を比較したものである。圧力水頭の上昇傾向を忠実に捉えていることがわかる。また、外部境界条件を設定する際に参考にしたポテンシャル分布にはばらつきが見られたため、境界条件を一定水頭32mとした場合についても解析を行った。回復過程に対する結果を図-5(b)に示す。図より24mのケースと比較して解析値の回復が早く、飽和状態に達するまでに30日程度の違いが表れている。

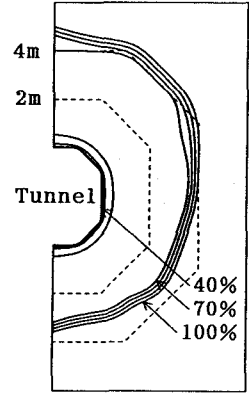


図-3 飽和度分布

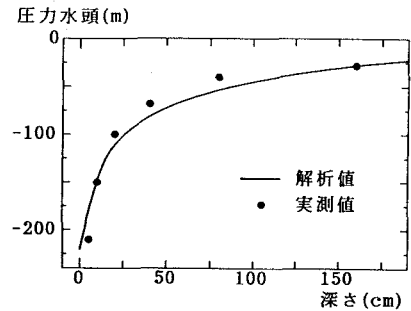


図-4 深さ方向のサクシオン圧分布

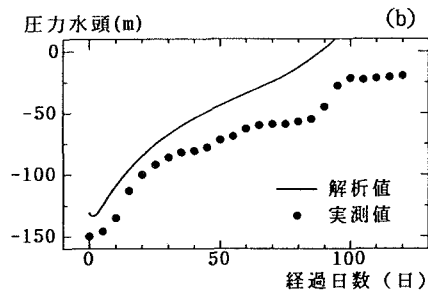
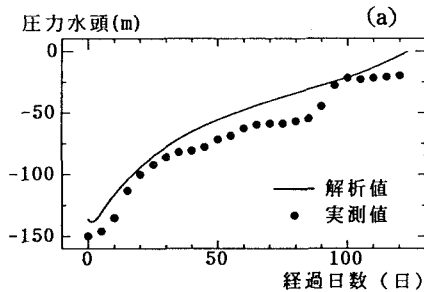


図-5 回復過程におけるサクシオン圧の経時変化 ((a):24m, (b):32m)

4. まとめ

不飽和特性としてvan-Genuchtenモデルを用いた飽和-不飽和浸透流解析を行うことにより、空調された地下空洞周辺における不飽和帯の広がり及び回復過程を求めた結果、実測値を忠実に再現することができた。また、外部境界条件の影響が解析結果にかなり反映されることが示された。

〈参考文献〉

- 1) M. Schneebeil, T. Baer, 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.
- 2) 大沢 聡, 渡辺邦夫: 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, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム, 1993.