

地下空間における水収支メカニズムの研究

埼玉大学工学部 ○米山 正樹

" " 佐藤 邦明

福井大学工学部 福原 輝幸

はじめに

従来、地下水工学で湧水といえば、液状水のことを意味し、ポテンシャル理論でも地下水数値シミュレーションでもこれを意味した。普通、人間が多く利用する地下空間（地下街など）では換気・空調が不可欠のため、湧水が液状水とは限らず、むしろ蒸気水の方が多い場合がある。本論では、蒸気水での湧水と液状水の湧水との関係を温度勾配のある浸透流理論を用いて数値解析したものである。

キーワード：地下空間、水収支、数値解析、湧水

1. 基礎式

図-1のような地下空間を考える。この地下空間に覆工を通して湧水が起こる。この理論は、Philip and De Vries と De Vries のモデルに基礎をおく。

温度勾配下の水分移動、熱エネルギー保存則はベクトル表示すると次式で与えられる。¹⁾

$$\left\{ \begin{array}{l} F \\ J_{\psi} \end{array} \right\} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \left\{ \begin{array}{l} G \\ C_a \end{array} \right\} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\left\{ \begin{array}{l} D_T \\ \lambda \end{array} \right\} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\left\{ \begin{array}{l} D_{\psi} \\ D_{\psi v} \end{array} \right\} r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right]$$

$$G = aRH(d\rho_0/dT)/\rho_l \quad \dots\dots (1)$$

$$D_T = D_{T1} + D_{Tv} \quad T \rightarrow \theta \text{ (含水率) : 水分移動}$$

$$D_{\psi} = D_{\psi l} + D_{\psi v}$$

$$J_{\psi} = \Delta h_v \rho_l \left(\frac{D_{\psi v}}{D_{atm} v_m \alpha_m} - \frac{\rho_v F}{\rho_l} \right)$$

$$C_a = C'_a + \Delta h_v a \left(\frac{d\rho_0}{dT} \right) RH$$

$$\lambda = \lambda' + \Delta h_v \rho_l D_{Tv}$$

ここに、 T ：温度、 ψ ：マトリックスポテンシャル、 F ：比水分容量、 t ：時間、 r ：円筒の中心からの距離、 a ：含空率、 RH ：相対湿度、 ρ_0 ：飽和水蒸気密度、 ρ_l ：液状水の密度、 D_{T1} ：温度液状水拡散係数、 D_{Tv} ：温度水蒸気拡散係数、 $D_{\theta l}$ ：等温液状水拡散係数、 $D_{\theta v}$ ：等温水蒸気拡散係数、 Δh_v ：蒸発潜熱、 D_{atm} ：水蒸気拡散係数、 v_m ：マスフローファクター、 α_m ：屈曲度、 ρ_v ：水蒸気密度、 C'_a ：体積熱容量、 λ' ：熱伝導率。

体積含水率と吸引圧の関係（ $\theta - \psi$ 関係）、不飽和透水係数特性（ $K - \psi$ 関係）は以下の式を用いた。²⁾

$$\psi = \psi_0 \left\{ \tau \left(1 - 2 \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{m1} + \eta (\theta_0 - \theta) + 1 \right\} \quad \dots\dots (2)$$

$$k = k_0 \left(\frac{\theta - \theta_c}{n - \theta_c} \right)^{m2} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 ψ_0 ：基準毛管ポテンシャル、 $m1$, $m2$ ：指数、 n ：空隙率[m³/m³]、 k_0 ：飽和透水係数[m/s]、

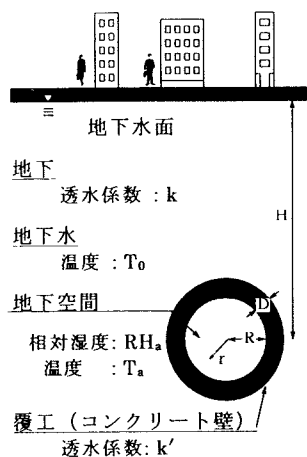


図-1 解析モデル

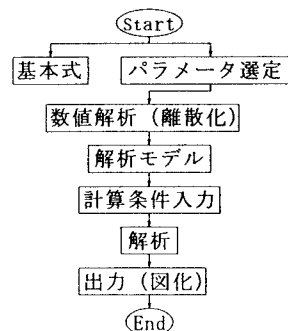


図-2 計算フローチャート

θ_c ：気乾状態での体積含水率、 τ 、 η ：係数。

また、総湧水量 q は次式で計算される。³⁾

$$q = \frac{2kH}{\left\{ \ln\left(\frac{2H}{R}\right) + \frac{k}{k'} \ln\left(\frac{r_0}{R}\right) \right\}}, \quad q = q_l(\text{液状水湧水量}) + q_v(\text{蒸気水湧水量}) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 $r_0 (=R+D)$ ：覆工外径、 k ：地山の透水係数、 H ：空洞中心から地下水面までの距離、 k' ：覆工の透水係数。

2. 解析手順と条件

図-2に沿って解析を進める。解析を行うにあたり、覆工の透水係数と空間内湿度の2つのパラメータを変化させ、液状水での湧水、蒸気水での湧水の量を求めた。

計算条件は、地山透水係数 $k=1.0 \times 10^{-7}$ m/s、地下水温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ 、空間内温度 $T_a=25^\circ\text{C}$ 、覆工厚 $D=1$ m、覆工内径 $R=10$ m、空洞中心から地下水面までの距離 $H=50, 100$ mとした。また、空間内湿度を50～90%の5通り計算した。初期の覆工の透水係数を $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-11}$ の間で変化させ、覆工内を初期飽和とし、湧水量が一定（時間 $t=150$ h）になるまで計算した。

3. 解析結果

図-3から透水係数比が小さいとき、湧水量は蒸気水のみとなるが、透水係数比が増加するにつれ液状水が急に増し一定値に近づく。その液状水湧水量と蒸気水湧水量が同程度となるのは、空間内湿度により異なるが、深さ50 mの場合は透水係数比が0.01程度で、深さ100 mの場合は0.005程度である。空間内湿度による違いは、湿度90%から50%に減少するにつれグラフで見ると右にずれている。すなわち覆工の透水係数比が、増加するにつれ、 q_l が減少し q_v が増加することを示す。その時の傾きは湿度によらず一定で、その後一定値に近づく。

おわりに

地下空間の水収支について数値解析を行った結果、蒸気水での湧水は、ある条件によっては液状水よりも卓越し、液状水と蒸気水の湧水を区別して考える必要があることが明らかになった。この知見は従来の湧水量の考え方に新しい理解を与えたことになる。

参考文献

- 1) 福原輝幸・佐藤邦明：地下空間の換気による覆工の蒸発・乾燥過程と湧水メカニズム、地下空間利用シンポジウム、pp.219-226、1992。
- 2) 福原輝幸・ジョージ・F・ピンダー・佐藤邦明：表面乾燥過程における飽和-不飽和多孔媒体中の熱・水分完全連成移行解析へのアプローチ、土木学会論文集、第423号、pp.111-120、1990。
- 3) 佐藤邦明：グラウトによるトンネル湧水量変化解析、トンネルと地下、vol.11,no.10、pp.47-52、1980。

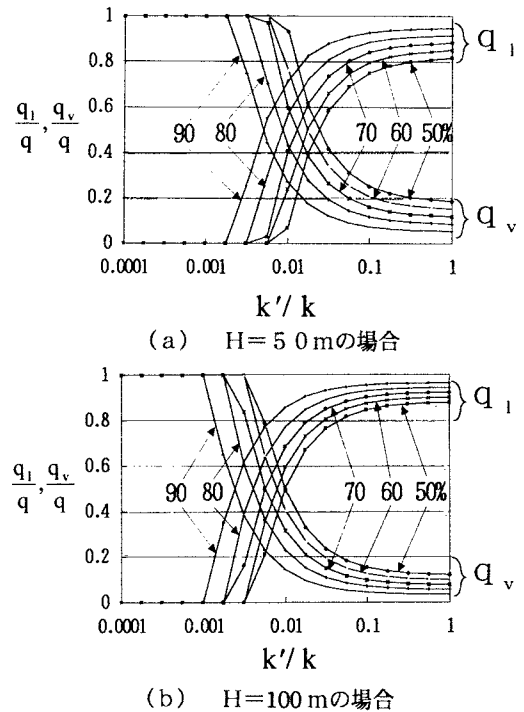


図-3 総湧水量に占める液状水、蒸気水の湧水量比