

1. まえがき

冬期に道路の凍結を防止して車両を安全に通行させるために、凍結防止剤として我が国や諸外国において塩化カルシウム(CaCl_2)、あるいは塩化ナトリウム(NaCl)が用いられる。これらは、気温の上昇とともに雪融け水等に混ざって周辺の環境中へと流出し、地下水や表流水を汚染する¹⁾。上水道の水源としてこのような地下水や表流水を利用する場合、含まれる塩分の濃度とともにコストが増大することが懸念される。また、水域での塩分濃度の上昇は生態系に重大な影響を及ぼす。上述のような凍結防止剤として用いられた塩類の環境中での挙動については未解明な部分も少なくない。とりわけ、不飽和地盤でのこれらの物質の移動に関する検討は殆ど行われていない。飽和地盤内での流れは Darcy 則によって表現できることが知られている。一方、不飽和地盤では、飽和度に応じて透水係数が大きく変動するが、この飽和度は降水等の影響を受けて変化する。本研究では、このような降水等による地盤の飽和度と透水係数の変化特性について検討した。

2. モデル

図-1のように、水田や畑地のような不飽和地盤上の積雪が気温の上昇によって融解し、地盤内へと浸透する場合を想定する。鉛直上向きに z 軸をとれば、飽和・不飽和浸透流の解析には、次の Richards の式²⁾が用いられる。

$$(C + \beta S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_e(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_e(\psi) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\psi(=p/\rho g)$ ：不飽和地盤の圧力水頭、 K_e ：不飽和透水係数、 S_s ：飽和地盤における比貯留係数である。上式において、係数 β と比水分容量 $C(=d\theta/d\psi)$ に関して、飽和地盤の場合には $\beta=1$ 、および $C=0$ である。不飽和地盤に対しては $\beta=0$ とすれば、飽和・不飽和地盤に適用可能である。

水分特性曲線と不飽和透水係数 K_e の推定には van Genuchten のモデル³⁾を用いる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} \quad (2)$$

ここに、 S_e ：有効飽和度、 θ ：体積含水率、 θ_r ：残留水分量、 θ_s ：間隙率、および α と n ：定数である。これらの定数 α と n は土質条件(砂質土、シルト、粘土等)によって異なる値をとる。後述(3.)のように、本研究では砂質土を対象とするので、 $\alpha=0.145(\text{cm}^{-1})$ 、 $n=2.68$ とした³⁾。なお、式(2)において、定数 m と n は次式で関係づけられる。

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

不飽和透水係数 K_e は有効飽和度 S_e 、すなわち、圧力水頭 ψ の関数であり、次式であらわされる。

$$K_e(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここに、 K_s ：飽和透水係数である。なお、比水分容量 C は

$$C = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\alpha^n(n-1)(\theta_s - \theta_r)(-\psi)^{n-1}}{[1 + \{\alpha(-\psi)\}^n]^2 - \frac{1}{n}} \quad (5)$$

基礎式(1)は長さスケールとして地盤の厚さ δ を、速度スケールとして飽和透水係数 K_s を用いて無次元化された後、空間方向に中央差分、時間方向に Crank-Nicolson 法を用いて離散化され、数値解が求められる。

3. 解析対象とする地盤

本研究では、砂質土からなる不飽和透水性地盤を考える。地盤の飽和度は降水等によって変化する

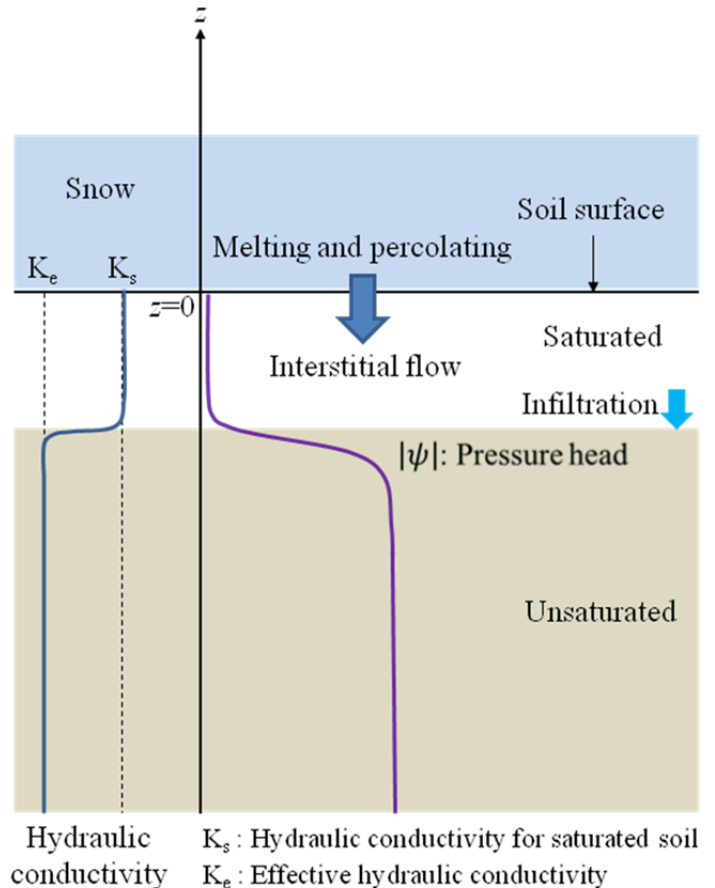


図-1 飽和・不飽和地盤内での浸透流

るが、ここでは図-1のように地盤上の積雪が融けて地盤内へと浸透する状況を想定する。このような状況下では、地盤上層部において飽和度が上昇し、それに伴い透水係数 K_e も増大する。初期条件として、飽和度 $S_e=16\%$ 、すなわち、サクシオン $\psi=-20\text{cm}$ ($p \doteq -200\text{kPa}$) を与える。境界条件は、土壌表面 ($z=0$) において $\psi=0\text{cm}$ (飽和状態) とし、地盤底面 ($z=-\delta$) において $\partial\psi/\partial z=0$ とする。なお、この地盤の下方は不透水性地盤と考えている。

4. 結果と考察

以上のような条件下でのシミュレーション結果を図-2~4に示す。これらの図の縦軸は地盤厚 δ を用いて無次元化してある。先ず、図-2, 3より地盤内のサクシオンと飽和度の鉛直分布が無次元時間 $T^+ (=K_s \cdot T/\delta)$ とともに変化する様子が見て取れる。すなわち、時間とともに飽和・不飽和境界面は下方へと移動する。飽和領域 ($S_e \doteq 1.0$) では $\psi=0$ であり、サクシオンは境界面付近で急激に変化する。

図-4は $T^+=0.10$ における無次元透水係数 (K_e/K_s) の地盤内鉛直分布を示したものである。 $z=0$ 近傍では $K_e/K_s=1$ であり、 K_e は飽和透水係数 K_s に等しい。 K_e/K_s は $z/\delta \doteq -0.35$ において急激に小さくなり、 $z/\delta=-0.35$ 以深では K_s よりも数オーダー小さく、サクシオン $\psi=-20\text{cm}$ に対応した値 ($K_e/K_s \doteq 5 \times 10^{-4}$) となる。上層の $K_e/K_s=1$ となる領域は飽和地盤であり、Darcy 則で表される流れ場が形成される。一方、境界面 ($z/\delta=-0.35$) 以深では、上述のように不飽和透水係数は飽和地盤のその $1/1000$ 以下であり、実質的に不透水性地盤とみなせる。

以上より、地盤が飽和状態であれば Darcy 則に基づく流れ場が形成され、浸透流に起因して物質が移動する。他方、不飽和地盤においては、透水係数は飽和地盤のそれよりも数オーダー小さく、実質的に不透水性であり、物質移動は期待できない。したがって、凍結防止剤として環境中に放出された塩類は、草原や畑地等の不飽和地盤においては長期間(次の降水によって地盤が飽和するまで)地盤内に留まると考えられる。このような塩類の地盤内での挙動を明らかにするためには、飽和・不飽和浸透流のみならず飽和・不飽和物質移動についても、今後より詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金、基盤研究(C)「陸水域における砂質底泥への乱れの浸透と水・底泥間での物質移動過程に関する研究、課題番号：22560522」(代表：東野 誠)の援助を受けて行われた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) Novotny, E.V., Sander, A.R., Mohseni, O. and Stefan, H.G. : Chloride ion transport and mass balance in a metropolitan area using road salt, Water Resources Research, 45, pp.1-13, 2009.
- 2) Richards, L.A. : Capillary condition of liquids through porous mediums, Physics, 1, pp.318-333, 1931.
- 3) Van Genuchten, M.Th : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of American Journal, 44, pp.892-898, 1980.

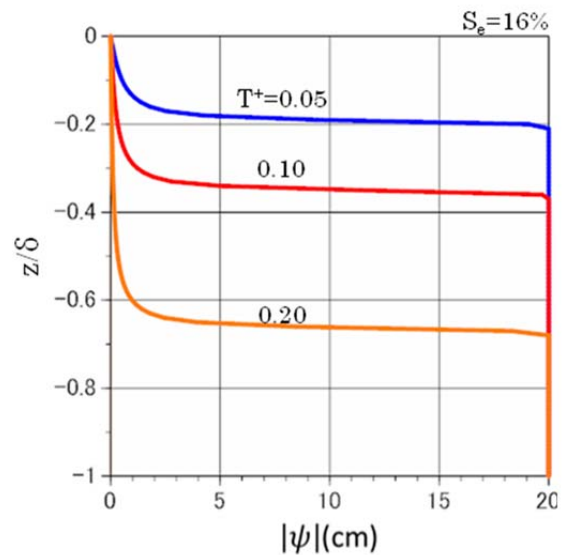


図-2 サクシオン $|\psi|$ の鉛直分布の時間変化

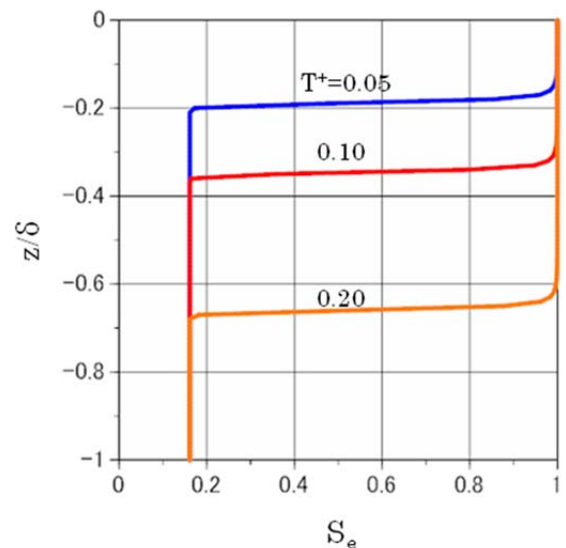


図-3 飽和度 S_e の鉛直分布の時間変化

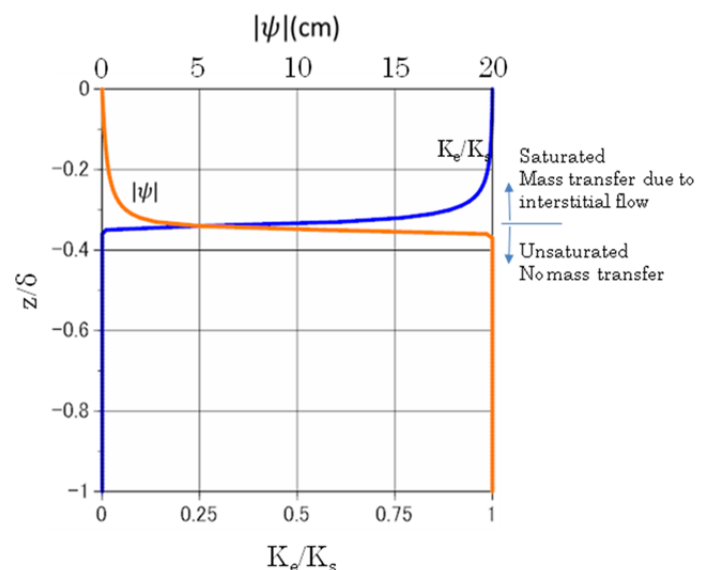


図-4 透水係数 (K_e/K_s) の鉛直分布