

## 降水による凍結防止剤由来塩分の不飽和地盤からの除去について

大分高専 正会員 東野 誠

### 1. まえがき

著者は、冬期に凍結防止剤として使用された塩化ナトリウム (NaCl) や塩化カルシウム (CaCl<sub>2</sub>) の不飽和地盤内での挙動について検討を行っている。前報<sup>1)</sup>では、降水の浸透による地盤の飽和度や透水係数の変化特性の検討結果について報告した。本研究では、細砂や粗砂で構成された裸地盤を対象として、降水の浸透による流れ場の形成と、これによる地盤からの塩分の除去について、数値実験による検討を行った。

### 2. モデル

図-1のように、砂で構成された裸地盤 (飽和透水係数  $K_s=0.001\sim0.1\text{cm/s}$ ) を考え、降水が不飽和地盤へと浸透する状況を想定する。ここで、雨量強度は表面流出が生ずるに十分と考えている。また、雨水の貯留による地盤表面での圧力の上昇は考慮しない。このような条件下において、飽和・不飽和浸透流は、Richards の式で表される。その際、水分特性曲線と不飽和透水係数  $K_e$  の推定には van Genuchten のモデルを用いた<sup>1)</sup>。

一方、地盤内での NaCl や CaCl<sub>2</sub> 等の塩分の収支は、化学・生物過程や吸脱着を無視し得る場合、次の移流分散方程式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C$  は塩分濃度、 $z$  は鉛直座標であり、上向きを正とする (図-1)。また、 $u$  は浸透流速であり、各タイムステップ毎に流れ場が得られた後、Darcy 則によって次式で与えられる。

$$u = -K_e \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{p}{\rho g} + z \right) = -K_e \frac{\partial}{\partial z} (\Psi + z) \quad (2)$$

ここに、 $\Psi$ : サクシオン、 $p$ : 圧力、 $\rho$ : 密度、 $g(=980\text{cm/s}^2)$ : 重力加速度、 $K_e$ : 不飽和透水係数である。なお、式(1)中の分散係数  $D_{zz}$  は、次式のように、Darcy 流速  $u$  と地盤の空隙率  $\phi$  の関数である<sup>2)</sup>。

$$D_{zz} = \alpha_L u + \phi^2 D_m \quad (3)$$

上式において、 $D_m (=2.0 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s})$  は NaCl の分子拡散係数、 $\alpha_L$  は縦分散長であり、地盤を構成する砂の粒径  $d_s$  で近似される ( $\alpha_L \approx d_s$ )。ここで、 $d_s$  は飽和透水係数  $K_s$  と次式で関連付けられる<sup>3)</sup>。

$$K_s = \frac{g}{\nu} \frac{5.6 \times 10^{-3} \phi^3 d_s^2}{(1-\phi)^2} \quad (4)$$

ここに、 $\nu$  は動粘性係数である。

Richards 式、および移流分散方程式 (1) は、長さスケールとして地盤厚  $\delta$  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。

初期条件は、 $\psi = -40\text{cm}$  ( $p \approx -400\text{kPa}$ ) とする。これは飽和度 5% に対応する。境界条件は地盤表面 ( $z=0$ )、および底面 ( $z=-\delta$ ) で  $\Psi=0$  とした。他方、式(1)に関しては、初期条件として地盤内の至る所で  $C=C_0$  とした。境界条件は、 $z=0$  において  $C=0$ 、および  $z=-\delta$  において、 $\partial C / \partial z = 0$  とした。

### 3. 結果と考察

厚さ  $\delta$  の地盤単位面積あたりに含まれる塩分量  $m$  は次式で表される。

$$m = \phi \int_0^\delta C(z) dz \quad (5)$$

ところで、初期状態での地盤単位面積あたりの塩分量は  $m_0 = \phi C_0 \delta$  であるので、これと式(5)より無次元塩分量  $m/m_0$  を

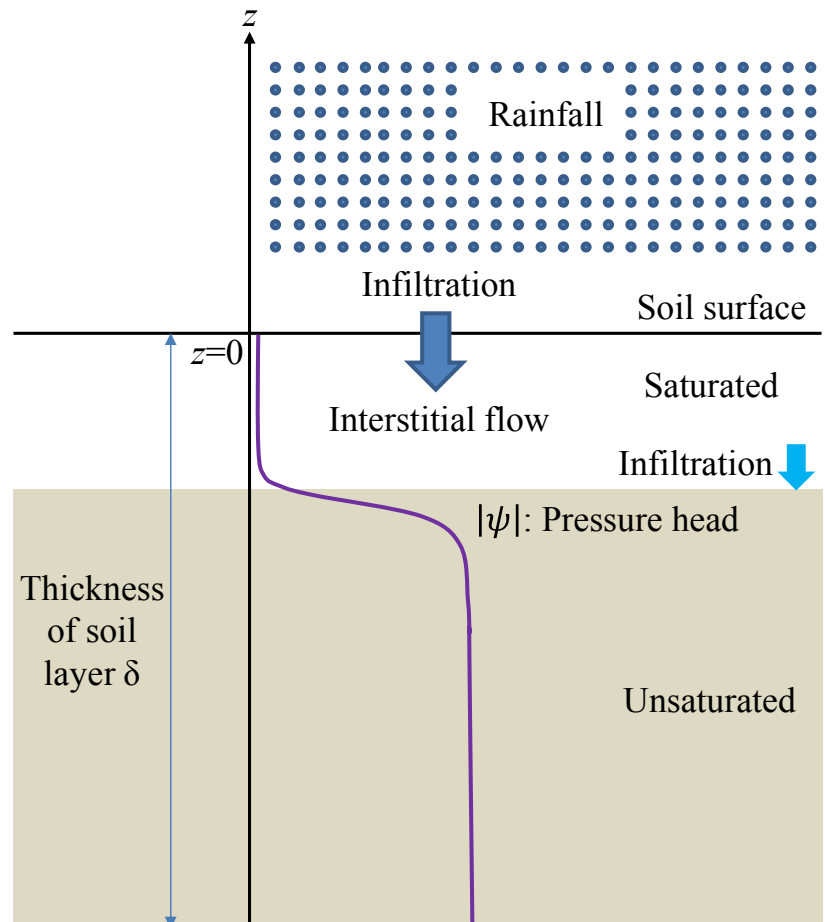


図-1 飽和・不飽和浸透流

シミュレートして図-2 に示す。  
図の横軸  $t^+ (=K_s t / \delta)$  は無次元時間であるが、 $t^+ \sim 0.32$  では地盤が完全に飽和していないため、底部からの浸透水の流出はゼロであり、地盤内塩分量は一定である。地盤が完全に飽和した  $t^+ \approx 0.32$  以降、浸透水の流出とともに塩分が除去され、時間とともに塩分量が減少してゆく様子が見て取れる。図中の  $t^+50$ 、および  $t^+90$  は、初期状態での塩分量をそれぞれ 50%、および 90% 除去するのに必要な降水継続時間である。ここで、地盤内の塩分量を 99% 除去するのに必要な降水継続時間  $t^+99$  を同様に定義すれば、図より  $t^+99=1.427$  を得る。

図-2 において地盤厚  $\delta=1\text{m}$  とし、飽和透水係数  $K_s=0.1, 0.01$ , および  $0.001\text{cm/s}$  としたときの地盤内塩分の時間変化を図-3 に示す。これより、塩分を地盤から 99% 除去するためには各々 0.4, 4, および 40hours の連続的な降水が必要である。次に、飽和透水係数  $K_s$  と地盤厚  $\delta$  に応じて、地盤内の塩分を 99% 除去するのに必要な降水継続時間  $t99$  をプロットすれば図-4 のようである。この図より、 $K_s > 0.01\text{cm/s}$  では、塩分を 99% 以上除去するのに約 1 日の降水で十分である。一方、 $K_s \approx 0.001\text{cm/s}$  では約 40 ( $\delta=1\text{m}$ ), 80 ( $\delta=2\text{m}$ ), および 120hours ( $\delta=3\text{m}$ ) の降水が必要である。我が国において、梅雨や台風を除外すれば、連続 3 日以上の降水を期待するのは容易ではない。我が国よりも年間降水量の少ない地域においてはなおさらであり、地盤厚や地盤を構成する砂の粒径によっては、冬期の凍結防止剤に由来する塩分が長期間に亘って地盤内に残存し、環境や生態系への影響が懸念される。

#### 参考文献

- 1) 東野 誠: 不飽和地盤における物質移動に関する一考察, 平成26年度土木学会西部支部研究発表会, II-013, pp.145-146, 2015.
- 2) 日本地下水学会: 地下水シミュレーション, 技報堂出版, 2010.
- 3) Boudreau, B. P., and B. B. Jørgensen (Eds.): The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry, Oxford Univ. Press, Oxford, U. K., 2001.

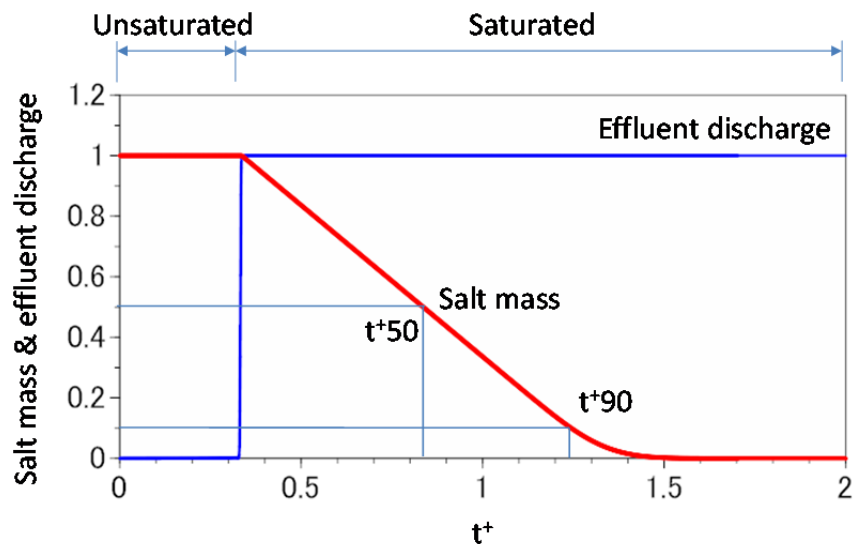


図-2 降水の浸透に伴う地盤内の塩分の時間変化

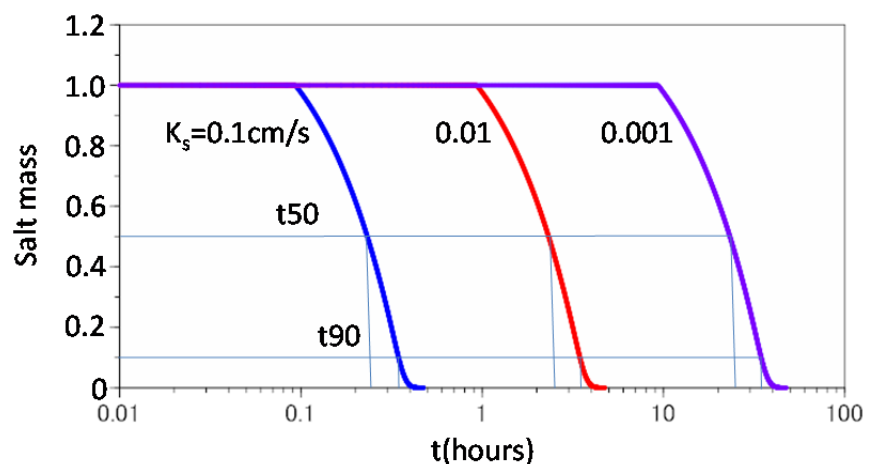


図-3 地盤内塩分の時間変化～ $K_s$  関係

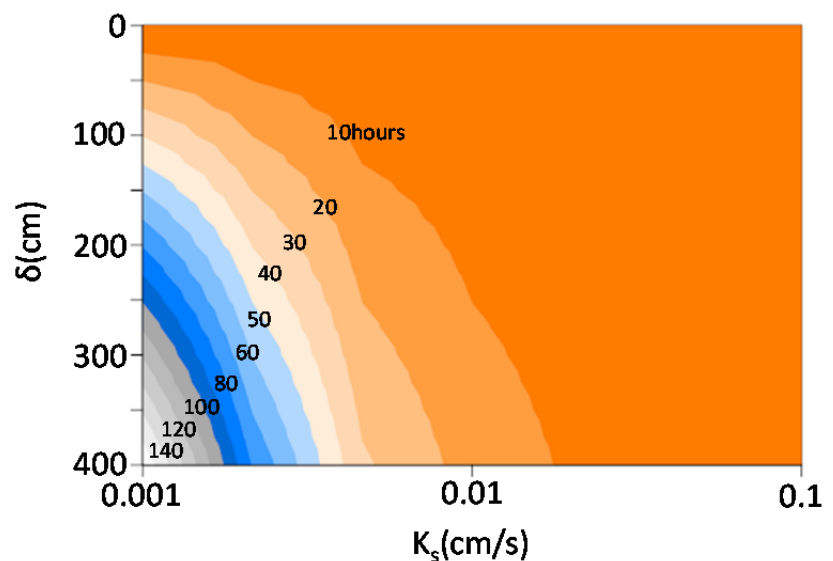


図-4  $t99 \sim K_s$  &  $\delta$  関係