

真砂土で構成された不飽和地盤への雨水浸透と塩分の除去

大分高専 正会員 東野 誠
 大分高専 学生会員 ○麻生大樹, 大分高専 米光佑太
 大分高専 正会員 工藤宗治, 鹿児島大学 正会員 酒匂一成

1. まえがき

冬季の気温低下に伴う路面の凍結は、自動車事故等を引き起こす最も危険な要因の一つである。路面の凍結を防止する為、水より低い凝固点が得られる塩化ナトリウム(NaCl)や塩化カルシウム(CaCl₂)等の凍結防止剤が散布される。我が国においては北日本や東日本の寒冷地のみならず、九州地方においても凍結防止剤は使用されている。この、凍結防止剤の大部分は環境中に残存し、道路周辺の地盤、水田、畑地等を経て最終的には河川へと流出し、橋脚などの構造物を腐食・劣化させるとともに、植生や河川生態系に重大な影響を及ぼす。また、地盤内に残存した凍結防止剤は降水とともに周囲の水田、表流水中へと流出し、夏季においても高濃度の塩分が検出されるなど、年間を通じて環境への被害を引き起こすことが報告されている¹⁾。本研究では、このような地盤内の塩分の挙動について、特に真砂土で構成された地盤に着目した。真砂土は、全国的に、とりわけ関西以西で広く分布している。先ず、地盤内の水分移動を再現するために不可欠な水分保持曲線について検討した。次に、このような地盤から降水の浸透によって塩分が除去される過程について、シミュレーションによる再現を試みた。

2. 地盤の水分移動モデル

本研究での解析対象地盤は、図-1 のように均質な真砂土からなる1次元不飽和地盤とする。飽和・不飽和地盤の浸透流解析には次の Richards 式が用いられる。

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

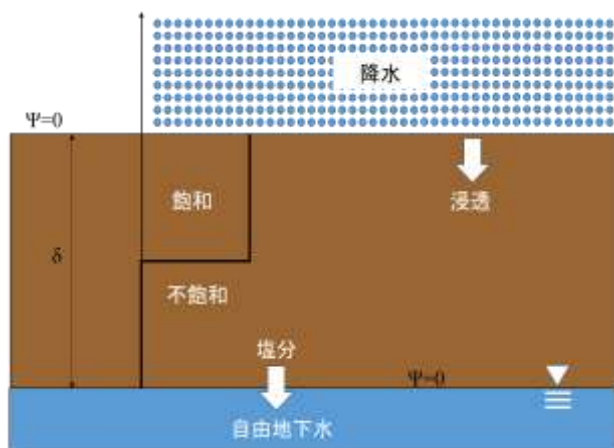
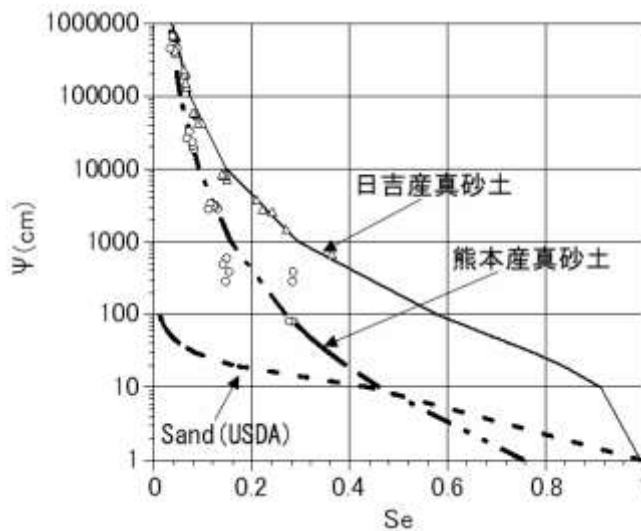


図-1 解析対象地盤

図-2 $\psi \sim S_e$ 関係 (熊本真砂土・日吉真砂土)

ここに、 ψ : 不飽和地盤のサクション、 θ : 体積含水率、 K_e : 不飽和透水係数である。

本研究では、水分特性曲線と不飽和透水係数 K_e の推定にあたって、異なる土の水分保持曲線に適合するための自由度が高く、かつ最も広く用いられている以下の van-Genuchten モデル²⁾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_r : 残留体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率である。また、 α , n , m : 形状パラメータであり、これらは土質条件（砂質土、シルト、粘土等）によって異なる値をとる。なお、(2) 式において、定数 m と n は次式で関係付けられる。

$$m = 1 - 1/n \quad (3)$$

不飽和透水係数 K_e は有効飽和度 S_e 、すなわち、サクション ψ の関数であり、次式で表される。

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

ここに、 K_s : 飽和透水係数、 l : 間隙結合係数である。

3. 真砂土の水分保持曲線

図-2 は熊本産真砂土、および日吉産真砂土について

表 1 モデル定数

	熊本産真砂土	日吉産真砂土	Sand(USDA)
α	2.68	0.057	0.145
n	1.235	1.301	2.68

てサクシオン $\psi(cm)$ と有効飽和度 S_e との関係を実験的に調べたものである. United States Department of Agriculture(USDA)は, 砂で構成された地盤には, 前述の van-Genuchten モデル定数として $\theta_r = 0.045$, $\theta_s = 0.43$, $\alpha = 0.145$, $n = 2.68$ を推奨している. 図-2 中にはこれらのパラメータを用いた場合の式(2)による水分保持曲線が併示されているが, 図より, これらのモデルパラメータが実験値を再現し難いことは明らかである. また, 熊本産真砂土と日吉産真砂土では, グラフ上の異なる位置にプロットが並ぶ. そこで, これらの真砂土の $S_e \sim \psi$ 関係に式(2)をあてはめ, 実験値との誤差が最小となるように α , n を決定すれば, 表-1 のようである.

以上のようにして得られた α と n を式(2)に代入し, $S_e \sim \psi$ 関係をシミュレートした結果を図-2 に併示する. これより, α と n を適切に与えれば, van-Genuchten モデル(式(2))は真砂土における $S_e \sim \psi$ 関係(実験値)を良好に再現し得る.

4. 不飽和地盤からの降水による塩分の除去

表-1 のモデル定数を用いて, 真砂土で構成された不飽和地盤からの塩分の除去について検討した. それに際して, 間隙率と飽和透水係数は実測値, すなわち $\phi = 0.4$, $K_s = 3.93 \times 10^{-3}(cm/s)$ を用いた. 図-1 のように, 初期状態として Field capacity を仮定し, 連続的に表面流出が生じるに十分な雨量強度で降雨が継続する場合を想定する. 図-3 のように, 地盤が飽和状態となるまで, 物質移動は生起せず, 塩分は地盤内に保持されるが, 一旦飽和状態に達すると, 浸透流による物質移動に起因して塩分が地盤から除去される. なお, 図-3 の横軸は, 飽和透水係数 K_s と地盤厚さ δ によって無次元した無次元量 $t^*(=K_s \cdot t/\delta)$ である. 図-3 より, USDA の想定する Sand よりも, 日吉産真砂土の方が地盤から塩分を完全に除去するのに, より長時間を要することが確認できる.

図-4は地盤厚さを1mとして, 地盤から塩分を十分に除去するのに必要な降雨継続時間 $T_{total}(hours)$ について検討したものである. ここで, 飽和透水係数は Sand (USDA)では $K_s = 8.25 \times 10^{-3}(cm/s)$, 熊本産, および日吉産真砂土では $K_s = 3.93 \times 10^{-3}(cm/s)$ とした. この図より, Sand(USDA)の場合, 約2時間の降雨で地盤から塩分を除去し得る. 一方, 日吉産真砂土では約8時間, 熊本産真砂土では60時間以上要しており, 砂地盤であっても水分保持曲線によって, 地盤から塩分を除去するのに要する時間が大きく異なる.

図-5は, Sand(USDA), 日吉産真砂土, および熊本産真砂土について地盤厚さ(δ)と塩分を地盤から除去

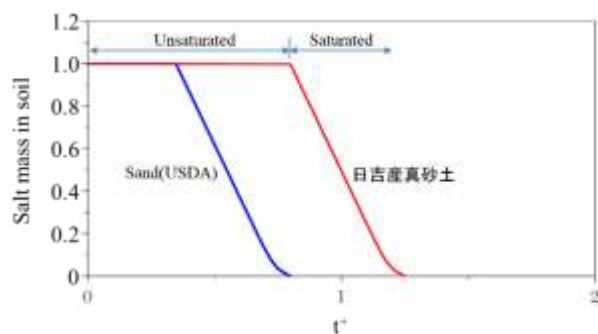


図-3 不飽和地盤からの塩分の除去

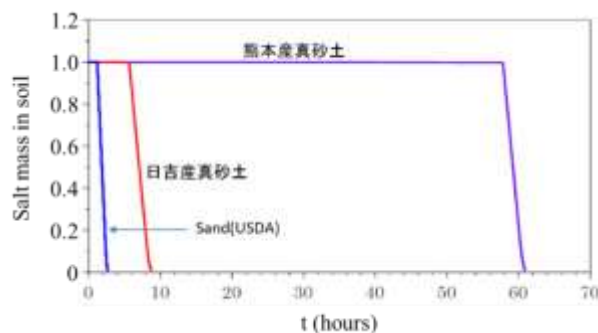
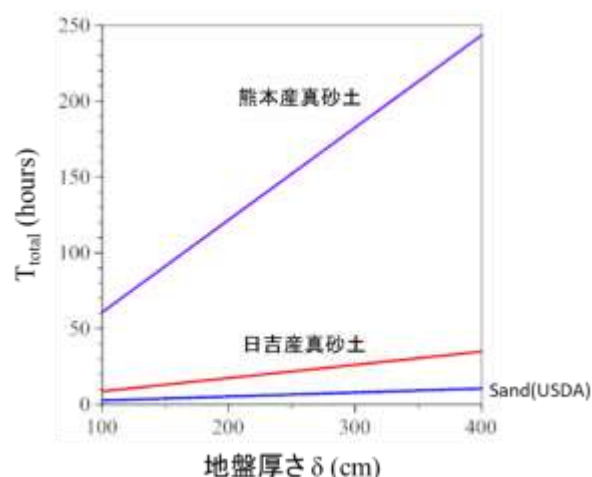


図-4 砂地盤からの塩分の除去(地盤厚さ 1m)

図-5 $T_{total} \sim \delta$ 関係

するのに必要な降雨継続時間 $T_{total}(hours)$ との関係を示したものである. δ とともに T_{total} が長くなる様子が見て取れる. Sand(USDA)の場合, $\delta = 4m$ として, 地盤から塩分を除去するのに約10hoursの連続的な降雨が必要である. 一方, 日吉産真砂土では, 約25hours(1日), 熊本産真砂土では約240hours(10日)であり, 真砂土においては, より長い時間の降雨が必要であると示唆される.

参考文献

- Novotny, E. V., Sander, A. R., Mohseni, O. and Stefan, H.G. (2009). Chloride ion transport and mass balance in a metropolitan area using road salt, Water Resources Research, 45, pp. 1-13.
- 坂井勝, 取出伸夫:水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル, 土壌の物理性 111号, pp. 61-73, 2009.