砂質土で構成された地盤の降水による塩分の除去について

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　後藤陽登，田中直哉，中屋敷　彬

1．まえがき

著者らは，不飽和地盤からの降水による塩分の除去について検討を行っている[1]．すなわち，冬期において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（$CaCl_2$）等が春~夏期にかけて，降水の浸透によって生起される浸透流により地盤から除去される過程について，シミュレーションによる考察を行った．本研究では，上述の研究をさらに発展させて，豊浦砂，および真砂土で構成された地盤を対象とし，降水による地盤からの NaCl 除去を定量的に表現するためのモデルを構築するとともに，その妥当性を実験結果との比較により検証した．

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，あるいは豊浦砂からなる 1 次元不飽和地盤である．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．

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

ここに，θ：体積含水率，ψ：土中水圧力水頭（サクション）である．式（1）中の不飽和透水係数 $K_e(\psi)$ については，従来の研究と同様[1]に van-Genuchten モデル[2]を用いる．

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

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．本研究では，真砂土と豊浦砂を対象としている．よって，モデル定数は，従来の検討結果[1)-4)]に基づいて**表-1** のように与える．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．

$$K_e(S_e)=K_s S_e^{\,l}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \tag{3}$$

ここに，K_s：飽和透水係数，l：間隙結合係数（=0.5）である．一方，飽和・不飽和地盤内の NaCl の収支式は次式で表される．

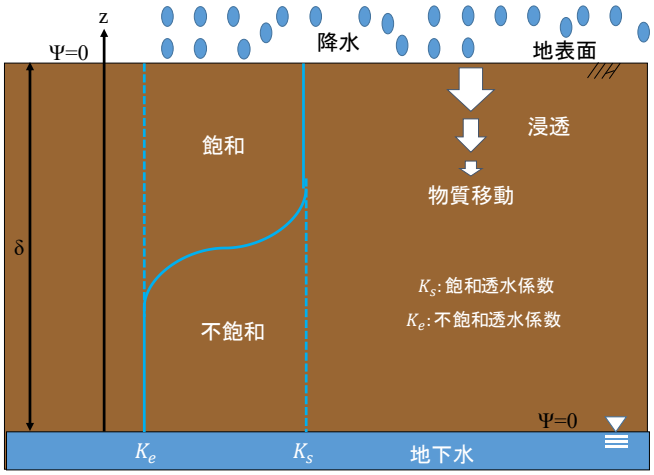

図-1　解析対象地盤

表-1　モデル定数

	真砂土	豊浦砂
α	0.057	0.0116
n	1.301	1.925
K_s (cm/s)	0.00393	0.0296

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{w}{\phi}\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial z}\left\{D_{zz}\frac{\partial C}{\partial z}\right\} \tag{4}$$

ここに，φ：地盤の空隙率，D_{zz}：分散係数，C は NaCl 濃度である．なお，w は地盤内の浸透流速であり，式（1）より得られた ψ から Darcy 則により与えられる．

3．実験材料と方法

実験は，**図-2** のような直径 9cm，高さ 50cm の PVC カラムを用いて行った．PVC カラムの上部と下部にはそれぞれ直径 5~10mm の Gravel を 5cm 敷き詰め，その間を真砂土，あるいは，豊浦砂で満たした．濃度 10g/L に調整した NaCl 溶液をカラム中の真砂土，あるいは，豊浦砂へと浸透させ，1 週間静置した後，カラム上部より静かに精製水（EC~0ms/cm）を注入した．なお，実験では，シミュレーションと同様，雨量強度は表面流出が生じる程度に大きく（雨量強度>地盤の飽和透水係数），かつ，地盤表面では大気圧を仮定している．精製水注入後，カラム内の砂が飽和すれば，カラム下部より，浸透水が流出する．この流出水を採水し，電気伝導度 EC を LAQUAtwmEC-33BL（HORIBA 製）により測定した．カラム流出水の NaCl 濃度は，予め求めておいた NaC-EC 関係式より求めた．

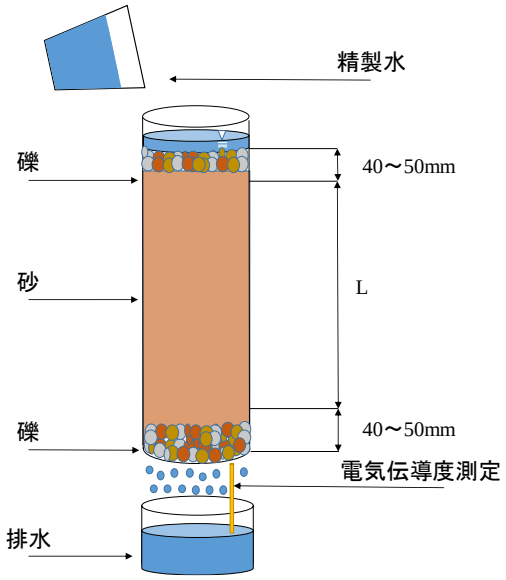

図-2　実験装置

4. 結果と考察

真砂土に対するカラム流出水 NaCl 濃度の経時変化のシミュレーション結果を実験値とともに**図-3** に示す. なお, NaCl 濃度は初期値で除して無次元化した. また，シミュレーションにあたっては，有効飽和度（S_e）の初期値は，初期含水比（W）の実験値から次式によって求めた.

$$S_e = \frac{WG_s}{100}\left(\frac{1}{\phi}-1\right) \tag{5}$$

ここに, G_s は土粒子の比重である. 実施した全ての実験において，結果にばらつきが見られた．気温や，湿度等同一条件下においても差異が見られたが，これは真砂土の不均一な材質に起因する．そのため，シミュレーション結果とも大きな乖離が見られた. 真砂土は，地盤内部に水がよく浸透する部分と，そうでない部分が形成され，これらが実験結果に大きく影響した可能性が示唆される．実験後の PVC カラムには大きな空隙が確認されたこともこれを裏付けている．**図-3** は，モデルが真砂土による実験結果を再現することが容易ではないことを示している.

次に, 豊浦砂の実験結果とシミュレーション結果を**図-4** に示す. 豊浦砂は約 400～500 秒で NaCl 濃度が急減し，600～800 秒で NaCl 濃度はほぼ 0 に近い値まで低下した. これは豊浦砂がほぼ均一な材料であり，透水係数が真砂土と比較して 1 オーダ大きいことが要因と考えられる．豊浦砂は実験値が安定しており，複数回も実験を行ったが, ほぼ同様の結果が得られた. また，シミュレーション結果ともほぼ一致しており，豊浦砂に対しては, モデルの妥当性を示すものといえよう.

5. まとめと今後の課題

実験とシミュレーション結果より, 豊浦砂で構成された地盤の塩分除去に要する時間はシミュレーションで概ね推定可能である．一方，真砂土に関しては，地盤の締固めや粒度分布などを考慮して実験を行い，シミュレーション結果と比較する必要がある．また，実際の地盤は粘土, シルト, 砂, 礫等の混合物であり，地盤毎に水分保持曲線, あるいは当該地盤の特徴を考慮したモデルの構築が必要である.

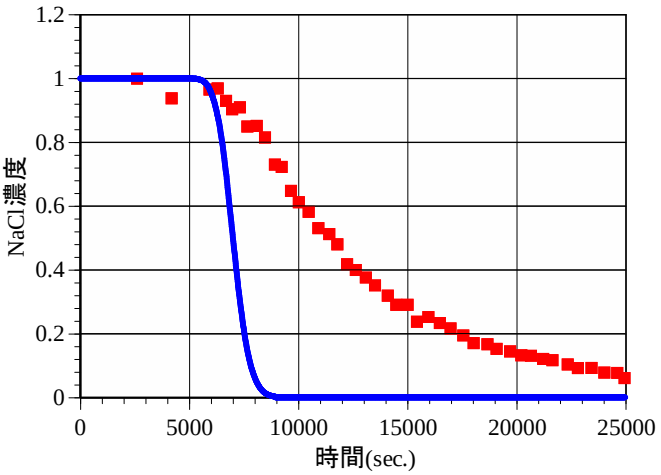

図-3　シミュレーションと実験値の比較（真砂土）

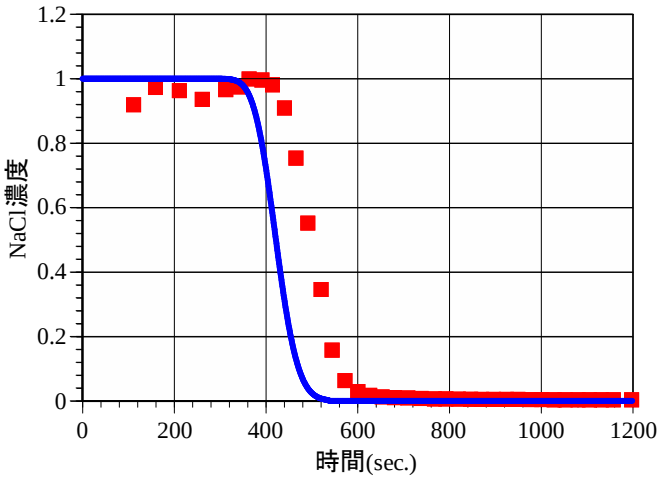

図-4　シミュレーションと実験値の比較（豊浦砂）

参考文献

1) 東野　誠，麻生大樹，米光佑太，工藤宗治，酒匂一成：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，平成 30 年度土木学会西部支部研究発表会，II-039, pp.173-174, 2019.
2) 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.
3) Higashino, M., Erickson, A.J., Toledo-Cossu, F.L., Beauvais, S.W. and Stefan, H.G.: Rinsing of Saline Water from Road Salt I Sandy Soil by Infiltrating Rainfall：Experiments, Simulations, and Implications, Water, Air, & Soil Pollution, 228:80, 2017.
4) Higashino, M. and Stefan, H.G.：Rinsing of Saline Water after Frequent Road Salt Applications from an Unsaturated Sandy Soil by Rainwater Infiltration：Significance of Rainfall Duration, American Society of Civil Engineers, vol.145, No.5, 2019.