

生長する根の吸収を考慮した不飽和地盤内水移動の数値解析

九州大学工学部 学生会員 ○古賀 泰史 九州大学大学院 正会員 笠間 清伸
九州大学大学院 正会員 古川全太郎 九州大学大学院 正会員 八尋 裕一

1 はじめに

日本の七大公害の一つである土壤汚染に対して、植物根の物質吸収・固定能力を活かして地盤内浄化を行う「ファイトレメディエーション」という工法が期待されている。この工法は、従来の汚染土の掘削除去や客土工法と比較して安価で簡易に行えるメリットがある反面、植物の種族、生長の個体差があり効果が不安定であり、また効果が発揮されるまで時間がかかる等のデメリットもある。したがって、効果的・効率的にファイトレメディエーションを行うためには、地盤環境に対する植生生長の応答を事前に把握・予測し、対象の地盤に即した適切な植生及び植栽方法を提案する必要がある。そこで、著者らは植物根が存在する場合の水分・化学物質の移動を考慮した「地盤環境-植生生長シミュレーター」を開発し、根の生長と吸収を考慮した数値解析を行った。本文では、円筒座標系で表した不飽和地盤内に根が存在する条件での水分移動解析モデルの有用性を検証するために、地盤内の初期体積含水率分布と根の生長スピードを変化させたパラメトリック・スタディを行った。

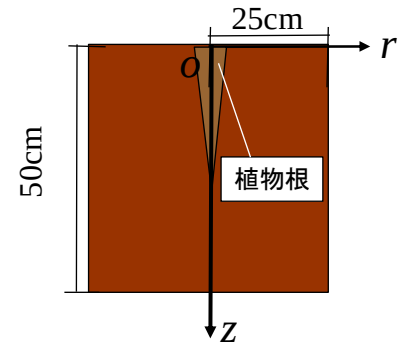


図-1 二次元円筒座標系解析場の概念図

2. モデルの解析概要と解析条件

不飽和土中の水分移動は、水分移動の基礎式で表される。対象とする地盤内に植物根が存在する場合、根が水分を吸収し、根の周辺の地盤の体積含水率が減少する。ここで水移動式に根による吸収項を導入することで根に向かう水の動きを表現できる。図-1 に解析場の概念図を示す。幅 50 cm、深さ 50 cm の均質な水分特性を有する地盤を想定した。本研究では円筒座標系 (r, ϕ, z) 空間を、根の最大半径が存在する ϕ 方向の面で切った微小平面での二次元解析を行った。植物根は解析場の上部中央点 O から真下にまっすぐ伸長する単一根を仮定した。従って、この解析場は $z = 0$ で軸対称となるため、これの右半分だけを解析した。根の水分吸収を考慮した円筒座標系二次元場における、不飽和地盤内の水分移動は、以下の式(1)で表わされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{C(\theta)} k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{C(\theta)} k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} - Y(\theta) \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率 (cm^3/cm^3), $k(\theta)$: 不飽和透水係数 (cm/h), $C(\theta)$: 水分容量 (cm^{-1}), $Y(\theta)$: 根系による単位時間あたりの水分吸収量 ($\text{cm}^2/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) である。 $k(\theta), C(\theta)$ は水分特性を表す Van Genuchten¹⁾ の式を用いる。その式は以下の式(2), 式(3)で表わされる。

$$C(\theta) = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) (\theta_s - \theta_r) \alpha \left[1 + \left\{ \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n-2}} \right]^{\frac{n-1}{n}} \quad (2), \quad k(\theta) = k_e \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left\{ \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \right]^2 \quad (3)$$

ここに、 n, α : 土の状態で決まる定数, θ_s : 飽和体積含水率 (cm^3/cm^3), θ_r : 残留体積含水率 (cm^3/cm^3), k_s : 不飽和透水係数 (cm/h) である。根による単位時間あたりの水分吸収量 $Y(\theta)$ は、根と土のポテンシャル差で表され、以下の式(4)に従う。

$$Y(\theta) = \frac{\psi_m(\theta) - \psi_{r1}(\theta)}{r_{ab}(\theta_s / \theta) + L_{v2} \cdot R} \quad (4)$$

ここに、 $\psi_m(\theta)$: 根の近傍の水ポテンシャル (cm), ψ_{r1} : 根の中の水ポテンシャル (cm), r_{ab} : 吸水根の単位長さ当たりの透過抵抗 (day/cm), L_{v2} : 根長密度 (土の単位断面積あたりに存在している根の長さ (cm/cm^2)),

R : 吸水根が土壌から受ける通導抵抗(day/cm²). 土壌は細粒砂質土を用い, その保水性試験の実験値から得られた Van Genuchten の回帰式²⁾(表-1)を用いた. また, 植物に関しては, 一般的な植生実験³⁾から得られた結果(表-2)を基に設定した.

本研究は一定の解析条件の中で初期体積含水率分布を 2case 設定した. 図-2 に解析に使用した体積含水率分布を示す. 解析には, 深さ方向に伴い, 体積含水率 θ が 16.03%から 23.86%へ増加する分布 (case1) および case1 とは逆に 23.86%から 16.03%に減少する分布 (case2) を用いた.

3. 体積含水率分布と水移動

300 時間後の体積含水率, 300 時間後の $dt=0.01$ 時間の間での根の水分吸収量をそれぞれ図-3, 図-4 に示した. 図-3 から層の厚さが均等であるため移流による体積含水率変化はほとんどないと考えられる. しかし case 2 から, 根が水分を吸収した際の横方向の水移動は視認できる. 図-4 の case1, 2 を比較してみると, 根の周りの体積含水率が高い程, 根はより多くの水分を吸収することがわかる. また, 表-3 に根の生長スピードを 0.055cm/h から 1.5 倍の 0.0825cm/h に変化させた際の, 300 時間後の dt 間の水の吸収量を示した. 根の生長スピードが増え, 根の長さが長くなり, 水分吸収量は増加する. case 毎に見ると, 根の生長スピードを 1.5 倍に増やすと, 2 倍以上の水分吸収量になることが明らかとなった.

4. まとめ

本検討で得られた成果を以下にまとめる.

- 1) 根の周辺の体積含水率が高い程, 水移動または吸収による体積含水率変化は大きい.
- 2) 根の生長スピードが 1.5 倍になると水分吸収量は約 2.3 倍になった.

謝辞: 本研究は, JSPS 科研費 JP16K18151 “汚染物質動態と植物根の生長を考慮した環境配慮型地盤浄化シミュレーターの開発”の助成を受けたものです. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- 1)中野政詩, 土の物質移動学, 東京大学出版会, pp16-18, 1991
- 2)Van Genuchten,M.Th. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci.Soc. Am.J.,44,892-898,1980.
- 3)Fujisawa,A.,Zentaro,F.,Kasama,K.:A Numerical Study for Root Growth Considering Advection-Diffusion-Absorption of Solution in the Ground,Proc. Of the 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering(JS-TAINAN2016),pp.29 - 32, 2016

表-1 解析条件 (土壌)

Parameter		unit	value
飽和体積含水率	θ_s	%	47.369
残留体積含水率	θ_r	%	8.1946
VG パラメータ	α	cm ⁻¹	0.19026
	n		2.0303

表-2 解析条件 (植物)

Parameter		unit	value
吸水根の透過抵抗	r_{ab}	s/cm	8.6×10^8
根中の水ポテンシャル	ψ_{r1}	cm	1.0×10^3
根が土壌から受ける通導抵抗	R_{12}	s/cm ²	2.0×10^4
根の生長スピード	r_s	cm/h	0.055or0.0825
根の最大半径	r_l	cm	2.5

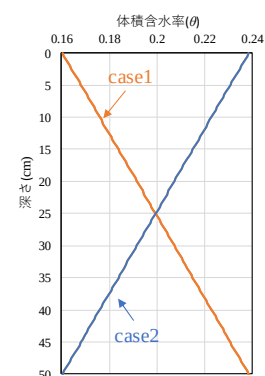


図-2 初期体積含水率分布

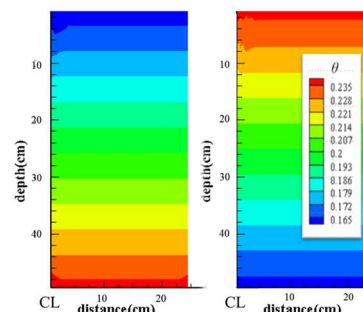


図-3 case1, 2 の 300 時間後の体積含水率

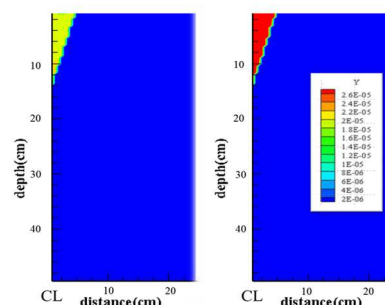


図-4 case1, 2 の 300 時間後の水分吸収量

表-4 根の生長スピードと水分吸収量の関係

	根の生長スピード r_s (cm/h)	
	0.055	0.0825
case1	5.44×10^{-4}	1.29×10^{-3}
case2	7.61×10^{-4}	1.75×10^{-3}