

斜面内の移流分散過程における降雨パターンの影響について

神戸大学大学院 学生会員 ○本田 貴之
 神戸大学大学院 学生会員 西田 広大
 神戸大学 正会員 齋藤 雅彦

1. はじめに

現在、我が国では廃棄物の不法投棄が多発している。不法投棄は、その多くは監視の目が届きにくい山林や河川敷にて発生しているが、廃棄物に含まれる有害物質が降雨によって流出し、地中に浸透すれば土壌及び地下水汚染を引き起こす可能性がある。一方、地下水汚染に関する従来の研究は、そのほとんどが平地内における汚染問題を対象としており、斜面内を対象にしているものは稀である。本研究では模型斜面を製作し、斜面内で発生する事象を実験的に把握するとともに、斜面内浸透流と汚染物質の移流分散過程について、数値シミュレーションによる再現を試みた。

2. 実験概要及び手順

本研究で使用した模型斜面及び各種センサ配置を図1に示す。地盤材料としては山砂を用い、測定項目は体積含水率、電気伝導率及び間隙水圧である。これ以降、体積含水率及び電気伝導率を計測可能なセンサを1~10、間隙水圧センサをP-1、P-5と表記する。また、電気伝導率と塩分濃度の関係は、各センサについて図2より校正式を求めた。

実験手順は、まず模型内に下流側のタンクから給水し、斜面全体を飽和させた後、自然に排水する（予備実験）。これは、地盤の初期化と水分特性曲線を得ることを目的としている。つぎに、地点1の直上（地点0）に汚染物質の代用として食塩を設置し、図3に示す降雨パターンの人工降雨を与える（移流分散過程）。ここでパターン2は、パターン1に対して降雨強度を2倍、継続時間を2分の1としている。

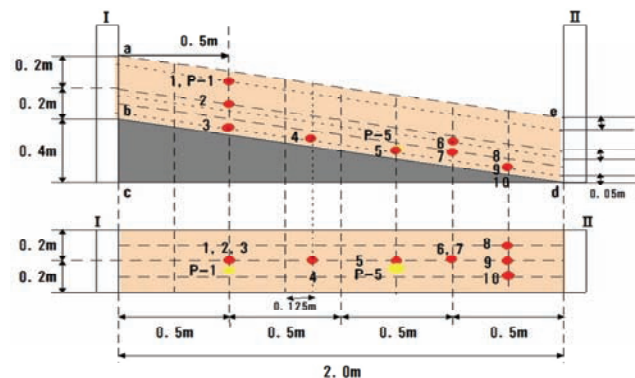


図1 模型斜面及び各種センサ埋設位置

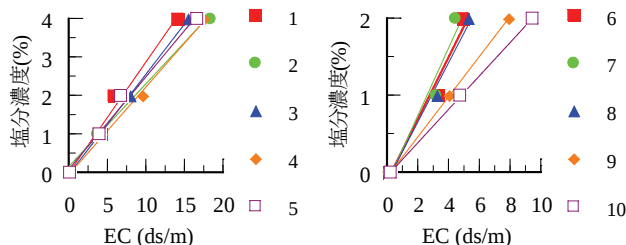


図2 電気伝導率(EC)と塩分濃度の関係

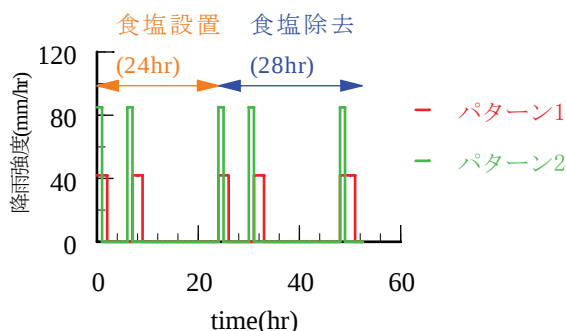


図3 降雨パターン

3. 数値解析における基礎方程式

実験によって得られた間隙水圧および濃度の時間変化を数値解析によって再現することを試みる。ここで用いる密度変化を考慮した飽和-不飽和浸透流の基礎式及び移流分散方程式を以下に示す。

$$\frac{\rho}{\rho_0} (S_w S_s + \phi \frac{dS_w}{d\psi}) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla Z)] \quad (1)$$

ここに、 ρ は濃度 C における水溶液の密度、 ρ_0 は濃度 0 における水の密度、 ϕ は空隙率、 ψ は圧力水頭、 Z は位置水頭、 $\mathbf{K}$ は透水係数テンソル、 S_s は比貯留量、 t は時間である。

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (2)$$

ここに、 C は濃度、 $\mathbf{D}$ は分散係数テンソル、 $\mathbf{q}$ はダルシー流速ベクトルである。

水分特性曲線は、以下の van Genuchten 式¹⁾を用いて実験値から各パラメータを同定した。

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{\{1 + (\alpha \psi_c)^n\}^m} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

ここに、 ψ_c は毛管圧、 S_e は有効飽和度、 S_r は残留飽和度、 α 、 n 、 m はパラメータである。

キーワード 地下水汚染、不法投棄、模型斜面、降雨浸透、移流分散解析

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学部内 TEL 078-803-6435

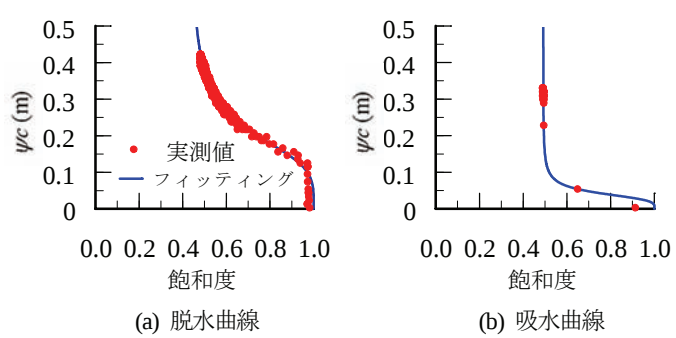


図4 水分特性曲線 (地点1)

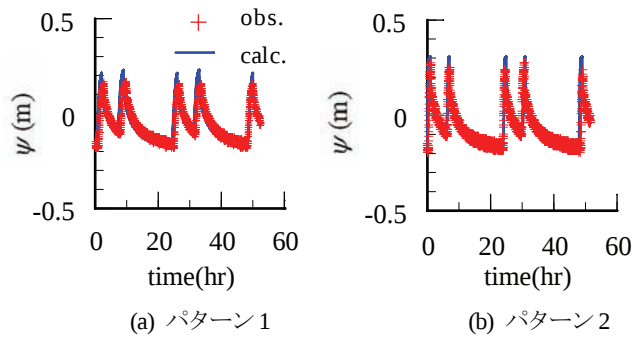


図5 圧力水頭の再現結果 (P-5)

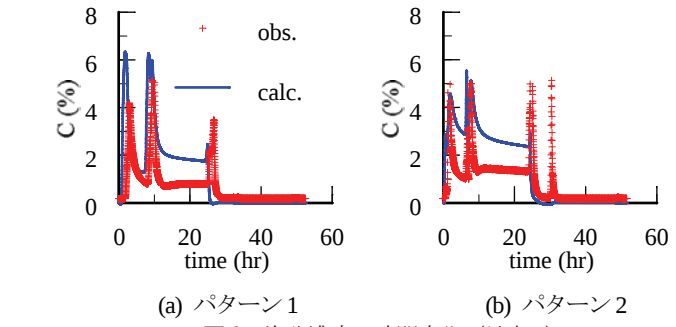


図6 塩分濃度の時間変化 (地点2)

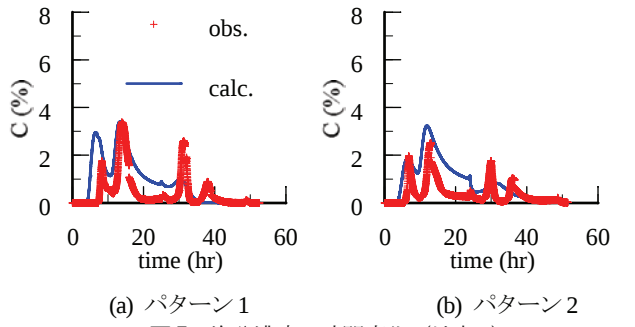


図7 塩分濃度の時間変化 (地点4)

3.実験および再現結果

図4は、予備実験で得られた地点1における水分特性曲線である。これより得られた式(3)のフィッティングパラメータを表1に示す。なお、実験では吸水・排水を繰返すので、数値解析による再現計算では水分特性曲線のヒステリシスを考慮している。ここで脱水曲線と吸水曲線の違いはパラメータ α の違いのみ表現し、パラメータ n および残留飽和度 S_r は、両者で共通の値としている。また、空隙率 ϕ は、飽和時の体積含水率の測定結果から0.3とした。

表1 水分特性曲線の同定結果

脱水曲線の $\alpha(=\alpha_d) (m^{-1})$	5.27
吸水曲線の $\alpha(=\alpha_w) (m^{-1})$	25.5
$n (-)$	4.11
残留飽和度 $S_r (-)$	0.437

図5は、それぞれの降雨パターンにおけるP-5の圧力水頭の測定結果と数値解析による再現結果を比較したものであるが、再現計算では測定値の再現性が良い飽和透水係数を試行錯誤的に求め、得られた飽和透水係数は $1.0 \times 10^{-4} m/s$ であった。各パターンの特徴を比較すると、降雨強度の大きいパターン2の方がピーク時の値が大きくなっている(＝地下水位が高い)。また、数値解析による再現も非常に良好であることから、流れ場については概ね再現されたものとする。

図6および図7は、地点2と地点4における各降雨パターンについて、塩分濃度の時間変化の測定結果と数値解析による再現結果を比較したものである。数値解析における

分散長は、地盤は概ね均質であると見なし、微視的分散のみを考えて5mmとし、汚染源における溶出濃度は直接測定することが困難であることから、実験結果および食塩の投入量を参考に8%と仮定した。また、電気伝導率を塩分濃度に換算する際の校正式は、飽和時のものであるため、飽和度が低下するとその影響を受けると考えられる。このため、比較対象の計算値は、濃度×飽和度としてで補正している。

まず、地点2について、降雨パターンによる相違は実験結果では顕著には現れていないが、解析結果ではパターン1の方がややピーク時の濃度が大きくなっている。また、2回目の降雨終了後に着目すると、実験値では1～2%程度まで濃度が低下するのに対し、再現結果では2～3%程度となっている。ただし、ピーク時の濃度については、ほぼ実験結果と一致していると見なしてよいだろう。地点4については、常に飽和度が高く保たれているが、地点2と同様の傾向が見られ、実験結果よりも解析結果の方が降雨終了後の濃度低下が緩やかであり、またピーク時の濃度は数値解析により概ね再現されている。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C、研究課題名：「山腹斜面における廃棄物の不法投棄に伴う汚染物質の拡散挙動の解明」、課題番号：21510031、研究代表者：齋藤雅彦)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.