

斜面内の降雨浸透および移流分散過程に関する模型実験と数値シミュレーション

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。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。そのため、不法投棄に関する地下水汚染の研究は数多く行われているが、そのほとんどは平地内における地下水汚染が対象であり、斜面を対象にしているものは稀である。

そこで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ことを試みる。また、斜面内浸透流と汚染物質の降雨による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る。

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位置を図1に示す。材料はマサ土を用い、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の両方を計測可能なセンサを1~5、体積含水率センサをA~E、間隙水圧センサをP-A、P-Dと表記する。

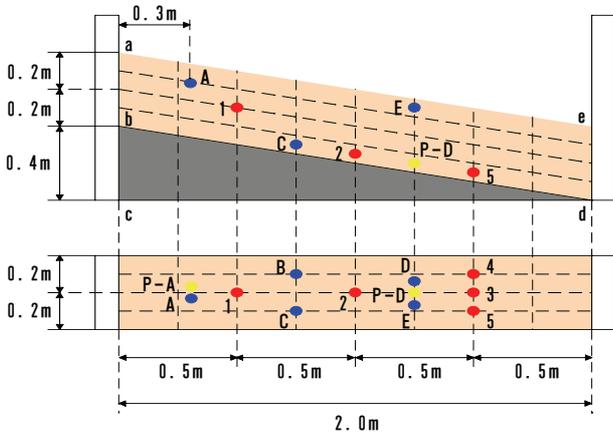
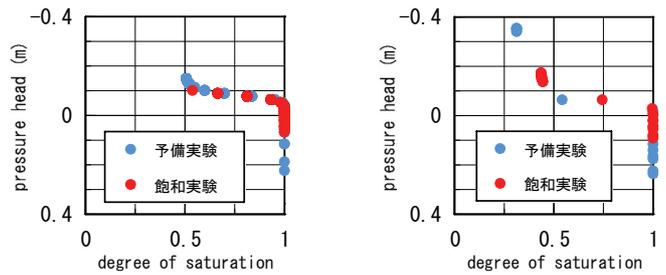


図1 模型斜面及び各種センサ埋設位置

実験手順について以下に記す。まず、模型内に上流側側面から給水し、斜面全体を概ね飽和させた後、自然に排水する(予備実験)。次に、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、人工降雨30mm/hrを3回に分けて与える(降雨浸透過程)。その後、食塩を除去し、降雨浸透実験と同量の人工降雨を与える(濃度減少過程)。最後に、模型斜面内を再び飽和させた(飽和実験)。

表1 間隙率

センサー位置	間隙率									
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
予備実験	0.370	0.392	0.353	0.360	0.321	0.420	0.420	0.416	0.420	0.420
飽和実験	0.372	0.372	0.410	0.403	0.362	0.361	0.437	0.402	0.425	0.232



a) 脱水曲線 b) 吸水曲線

図2 水分特性曲線(地点D)

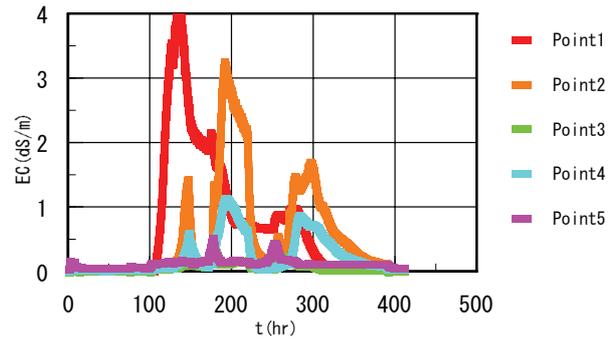


図3 電気伝導率の時間変化

3.実験結果

飽和時に測定された体積含水率から、以下の関係を用いて実験前後における間隙率 ϕ の変化を推定した。

$$\theta = \phi \cdot S_w \quad (1)$$

ここに、 θ は体積含水率、 ϕ は間隙率、 S_w は飽和度である。式(1)より得られた間隙率を表1に示す。表1より、地点A及びEにおいて間隙率が減少していることが確認された。

また、図2は、地点Dにおける水分特性曲線である。これより、地点Dにおける水分特性曲線は、一連の実験を通じて変化していないことが分かる。

図3に電気伝導率の時間変化を示す。地点1, 2, 4における電気伝導率は地点3, 5と比較して高い数値を計測している。このことから、浸透水は地点1, 2を経由した後、蛇行して地点4を通過したものと推測される。

キーワード 地下水, 斜面模型, 電気伝導率, 飽和度, 水分特性曲線

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

表 2 使用したパラメータ

初期間隙水圧 (m)	-0.35
飽和透水係数 (cm/sec)	0.028
ϕ	0.39
n	5.82
α (m ⁻¹)	12.0
S_r	0.44

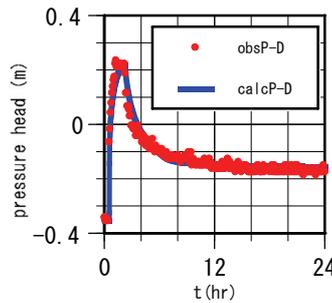


図 4 間隙水圧の時間変化 (地点 D)

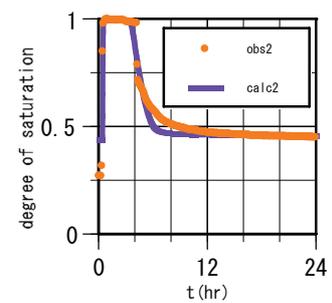


図 5 飽和度の時間変化 (地点 2)

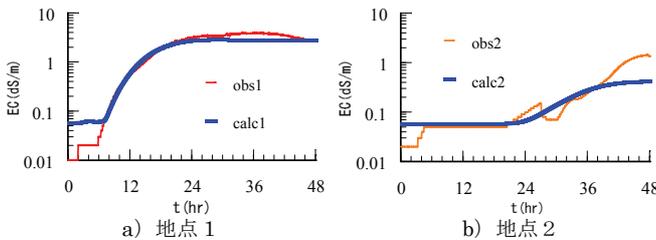


図 6 降雨浸透過程初期の電気伝導率の時間変化 (48hr)

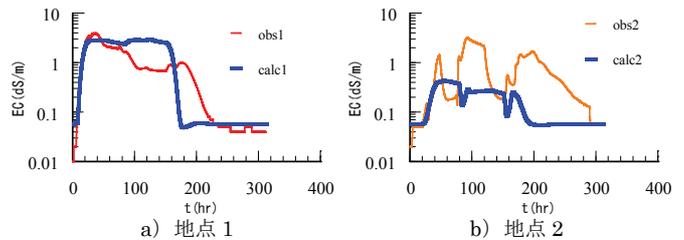


図 7 電気伝導率の時間変化の比較

降雨浸透過程で地点 0 の塩分が地点 1 に到達するのに要した時間は 6hr, 地点 0 と 1 との距離は 0.20m であるから, 鉛直浸透速度は 0.033m/hr であると推測できる. また, 浸透水が地点 2 から 4 に流下する時間は濃度減少過程より 6.75hr, 地点 2 から 4 における距離は 0.51m であることから, 斜面に沿う方向の浸透速度は 0.076m/hr であると推測できる.

4. 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・飽和度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.

$$\frac{\rho}{\rho_0} (S_w S_s + \phi \frac{dS_w}{d\psi}) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [K \cdot (\nabla \psi + \frac{\rho}{\rho_0} \nabla Z)] \quad (2)$$

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, ψ は圧力水頭, Z は位置水頭, K は透水係数テンソル, S_s は比貯留量, t は時間である.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (3)$$

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.

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{\{1 + (\alpha \psi_c)^n\}^m} \quad (4)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (5)$$

ここに, S_e は有効飽和度, S_r は残留飽和度, α , m , n はパラメータである.

5. 再現結果と考察

表 2 は, 予備実験の再現計算の際に用いたパラメータ, 図 4, 5 は, 予備実験における間隙水圧及び飽和度の時間変化と解析結果である. これより, 予備実験については数値解析により良好に再現されていると判断した. 次に, 降雨浸透過程を再現するため, 第 2 回降雨開始から 48 時間分の電気伝導率の変化から鉛直浸透強度を同定すると, 3mm/hr となった. このときの再現結果を図 6 に示す. 表 2 より, 地中に浸透する降雨量は実際に与えた 30mm/hr の 1/10 しか浸透していないことが分かる. これは, 表層にクラスト (雨滴によって破碎された細粒土分の目詰まりによる薄い難透水層) が形成されたためと考えられる. 図 7 は, 降雨浸透過程および濃度減少過程における電気伝導率の変化を示す. 図 7 より, 数値解析では実験中に計測した電気伝導率を再現できていないことが分かる. これに対する明確な説明は与えられないが, 使用したセンサー特性に起因している可能性の他, 数値解析では地点 0 (汚染源) における塩分濃度を一定と仮定しているのに対し, 実験では時間的に変化していた可能性が考えられる.

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 Science Society American Journal, Vol.44, pp.892-898, 1980.