

ゲルパーミアメータ法で測定した土壌透水係数の補正手法と精度

京都大学大学院農学研究科 ○正岡直也・柳井鴻太郎・岩尾健司・小杉賢一朗

1. 研究背景

自然土壌において任意深度の透水性を迅速かつ非破壊的に測定できる原位置試験法として、定水位井透水計ゲルパーミアメータを用いた手法(以下GP法)が挙げられる。単純な装置と明確な理論により飽和透水係数 K_s が求められ^{1,2)}、実用性の高い手法として主に農業分野で認知されている。しかし、森林土壌においては解析式中の土質定数の値や実用上の様々な制限要因の影響が不明であることから、これまで適用事例がみられなかった。

本研究では多様な森林土壌を対象とした数値シミュレーションを行い、適切な土質定数ならびに実用的な測定時間や補正式を提案して精度を検証することで、山地斜面の透水性探査にGP法を適用する指針を示すことを目的とした。

2. 研究手法

2.1 GP法の測定原理

GP法の測定装置の概要を図1aに示す。土層に掘削された半径 a [cm] のウェル内の水位が H [cm] に保たれたまま外部の不飽和土壌へと水が浸潤していく。時間経過により減少しながら一定値に漸近するのでこれを定常浸潤量 Q [cm³/sec] とみなす。Reynolds と Elrick らの解析^{1,2)}によれば、土壌の飽和透水係数 K_s [cm/sec] は次式によって求められる。

$$K_s = CQ / (2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi H / \alpha^*) \quad \cdots(1)$$

ここで、 C は形状係数と呼ばれ式(2)のように H/a の関数で表される³⁾。また、 α^* [cm⁻¹] は土壌パラメータであり式(3)で定義される。

$$C = \left(\frac{H/a}{b_1 + b_2 H/a} \right)^{b_3} \quad \cdots(2)$$

$$\alpha^* = K_s / \phi_m \quad \cdots(3)$$

ここで、 $b_1 \sim b_3$ は定数、 ϕ_m [cm²/sec] はマトリックフラックスポテンシャルである。 α^* と C が既知ならば一通りの Q - H の測定から K_s を算出できる(単水位法)²⁾。既往研究において土質ごとに α^* と C の推奨値が示されているが^{2,3)}、これまで森林土壌に適合する値は示されていない。

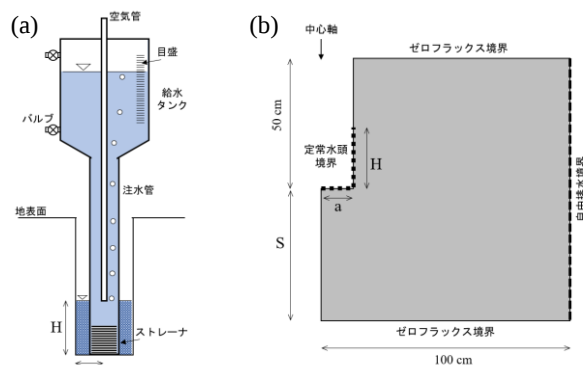


図1 (a) GP法の概要 (b) 数値計算の領域設定

2.2 数値シミュレーション

日本国内10ヶ所の国有林で採取された250個の森林土壌サンプルから測定された K_s と pF 曲線のパラメータ⁴⁾を利用し、GP法を再現した数値シミュレーションをHYDRUS 2D/3Dで行った。GP法における水分移動の対称性を踏まえ、円柱状の三次元領域を半径方向に切断した二次元断面を計算領域とした(図1b)。詳しい条件は前報⁵⁾を参照されたい。

2.3 検討事項

2.3.1 森林土壌に適したパラメータ

本研究では ϕ_m を土壌の吸水度(Sorptivity) S_p [cm/sec^{1/2}] から計算した⁶⁾。詳細は省略するが、HYDRUS 1Dを用いた一次元数値計算によって各サンプルにつき S_p から ϕ_m を求め、式(3)に代入することで α^* を求めた。

また、式(1)に ϕ_m , Q 計算値および既知の K_s , a , H を代入すると C が算出できる。各サンプルにつき Q を $H/a=5, 7.5, 10$ の3通り計算し、 H/a - C 関係に対して式(2)を最小二乗法でフィッティングすることでパラメータ b_1, b_2, b_3 を求めた。

2.3.2 不透水面の影響の検討

不透水面までの距離 S (図1b) が小さい場合、下方への浸潤が阻まれ Q を過小評価する可能性がある。これを検討するため、基準となる $S=50$ cm に加え $S=0, 5, 10, 20$ cm の4条件で計算領域を設定して計算した。 $S=50$ cm における定常浸潤量 Q に対して S の影響を受けた定常浸潤量を Q_s とし、変化率 $P_s = Q/Q_s$ を求めた。

2.3.3 実用的な浸潤時間の検討

浸潤時間 T が短いと浸潤量を過大評価する可能性がある。しかし、定常化には長時間を要するうえ判断が難しいため、実用上では T を一律に定めて浸潤量の補正を行うのが望ましい。本研究では $T=10\text{ min}$ 時の浸潤量 Q_{ST10m} (10分浸透量) を採用し、 $T=6\text{ hour}$ 時の Q_S に対する Q_{ST10m} の変化率 $P_{T10m} = Q_S/Q_{ST10m}$ を求めた。

3. 結果と考察

3.1 森林土壌に適したパラメータ

求められた α^* (中央値) および $b_1 \sim b_3$ の値は $\alpha^* = 0.16\text{ cm}^{-1}$, $b_1 = 2.051$, $b_2 = 0.128$, $b_3 = 0.783$ であった。これらの値は一般的な構造的な土に近いが、大孔隙を多く含むためやや砂質土寄りの性質も示していた。

3.2 不透水面の影響の補正

不透水面の影響による Q の減少は、不透水面距離とウェル水深の比 S/H に比例していた。グラフは省略するが、 P_S と S/H の関係は式(4)で表わされた。

$$P_S = -0.0678(S/H)^3 + 0.542(S/H)^2 - 1.45 S/H + 2.29 \quad (0 \leq S/H < 3)$$

$$P_S = 1 \quad (3 \leq S/H \leq 10) \quad \cdots \cdots (4)$$

3.3 10分浸潤量の補正

いずれの条件でも P_{T10m} は $\log_{10} Q_{ST10m}$ と正の相関を示し、 S/H と比例関係にあった。グラフは省略するが、関係式は式(5), (6)のように定められた。

$$P_{T10m} = 0.083 \log_{10} Q_{ST10m} + i \quad (P_{T10m} \leq 1) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$i = 0.000562(S/H)^3 - 0.0135(S/H)^2 + 0.108 S/H + 0.619 \quad (0 \leq S/H \leq 10) \quad \cdots \cdots (6)$$

3.4 補正による誤差

これまでに提案した式(4)~(6)を統合すると、実際に測定される「不透水面影響下の10分浸潤量 Q_{ST10m} 」は、次の式(7)によって「不透水面の影響を受けない定常浸潤量 Q 」に補正され、これを式(1)に代入すれば最終的に K_S が算出される。

$$Q = Q_{ST10m} \times P_{T10m} \times P_S \quad \cdots \cdots (7)$$

GP 法により測定される K_S (K_{S_GP}) と真値である土壌サンプルの K_S (K_{S_true}) との間には、パラメータ α^* と C の近似に加え上記の補正式 (式 4~6) の近似に起因する誤差が生じる。これらの誤差につ

いて検討するため、図2において特定の S/H と T の条件下で算出した K_S の測定値と真値を比較した。

図2aは不透水面の影響がない浸潤6時間 ($S/H=5$, $T=6\text{ hour}$) の K_S と、浸潤10分 ($T=10\text{ min}$) の K_S を示している。どちらも概ね0.5~2倍の範囲 (図中の破線) にあり、さらに10分浸潤量の補正 (式5, 6) で生じる誤差も無視できるほど小さいことがわかった。図2bは不透水面の影響がない浸潤6時間 ($S/H=5$, $T=6\text{ hour}$) の K_S と、不透水面直上かつ浸潤10分 ($S/H=0$, $T=10\text{ min}$) の K_S を示している。後者は点の分布範囲がやや上下に広がった。これは不透水面の補正 (式4) に起因する誤差により K_S の測定精度がある程度下がることを示している。

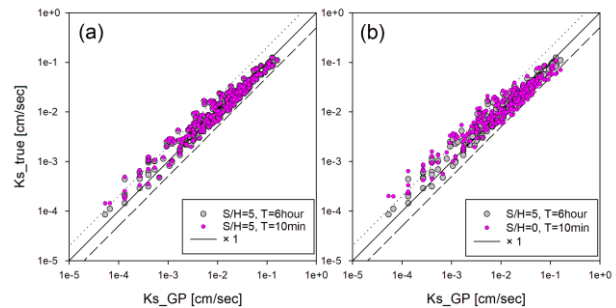


図2 K_{S_GP} と K_{S_true} の関係

4. おわりに

以上のように、GP 法による K_S の測定精度が示された。もし厳密な土壌物理性の測定を目的とするなら、特に不透水面の影響を受ける条件においては注意が必要である。しかし、オーダースケールで変化する野外土壌の透水性分布を探索する目的に対しては十分高い精度を有しているといえる。また、浸透流出や崩壊予測の分布型モデル上では、透水係数の精度の厳密さよりも、空間的不均質性をより詳細に再現できる利点の方が重要だろう。

引用文献

- 1). Raynolds et al. (1985). Soil Sci., 139(2), 172-180.
 - 2). Elrick et al. (1989). Groundwater Monitoring and Remediation, 9(3), 184-193.
 - 3). Zhang et al. (1998). Soil and Tillage Res., 49(3), 219-221.
 - 4). 真下育久 (1960). 林野土壌調査報告, 11, 1-182.
 - 5). 正岡直也ら (2024). 令和6年度砂防学会研究発表会概要集, R4-22, 219-220.
 - 6). Reynolds and Elrick (1985). Soil Sci., 140(4), 292-302.
- (連絡先: masaoaka.naoya.7e@kyoto-u.ac.jp)