

PS II-3 雨水浸透促進施設の浸透性能の評価 — 原位置浸透試験を基礎として

東京大学生産技術研究所 正員 虫明 功臣
 日本工営(株) 正員 S. Herath
 東京大学生産技術研究所 正員 弘中 貞之

1. はじめに

都市域における雨水浸透促進法は、洪水流出抑制だけでなく、地下水涵養の促進、面的汚濁物の流出抑制など、水量と水質の両面から水環境の保全効果が期待され、近年急速に普及しつつある。しかし、施設の浸透性能を設置対象地盤の特性に則して如何に評価するかと言った基本的課題は未解決のままである。最近では幅20m以上の浸透施設が計画、実施されているが、飽和-不飽和浸透はきわめて非線形性が強い現象であるために、小規模な現地浸透試験から外挿によって大型施設の浸透性能を評価することは極めて難しい。ここではまず、小型原位置浸透試験結果に飽和-不飽和流れの方程式を適用して不飽和透水係数を逆推定する方法を検討し、ついで、得られた不飽和透水係数を用いた浸透量推定値の妥当性を現物施設に対する注水実験と対照することによって議論する。

2. 逆推定の方法

飽和-不飽和流れの基本式としては、Richards式が適用できる。

$$C(\psi) \cdot \partial \psi / \partial t = \nabla [k(\psi) \cdot \nabla (\psi - z)] \quad (1)$$

ここに、 ψ : 毛管ポテンシャル、 $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$: 比水分容量、 θ : 体積含水率、 $k(\psi)$: 透水係数。

これは限られた条件の下でしか理論解は得られず、一般に数値解析に依らざるを得ない。その場合、対象とする土壤の $\theta-\psi$ 関係と $k-\psi$ 関係が必要である。これら関係式に含まれるパラメータを土壤特性パラメータと呼ぶことにする。ここでは、原位置浸透試験結果に次式を適用してパラメータの最適値を求める方法の適用を図る。

$$q - \hat{q} = \sum_{i=1}^n \partial q / \partial p_i \cdot \Delta p_i \quad (2)$$

ここに、 q : 浸透速度の観測値、 $\hat{q}$: 観測値 q の時点での(1)式の数値解析に基づく浸透速度の計算値、 p_i : 土壤特性パラメータ、 n : パラメータの数、 Δp_i : p_i の修正分。 q としては、試験により得られる浸透速度-時間曲線上の7~8点が用いられ、 $q - \hat{q}$ が許容値以下になった時に最適パラメータとする。

3. 土壤特性の表現式

$\theta-\psi$ 関係の表現式としては、土壤タイプに応じて多くのものが提案されているが、ここでは本研究で対象とする関東ロームの試料試験結果に適用性が良い次式を用いる。

$$\theta = \alpha (\theta_0 - \theta_r) / \{ \alpha + (\ln |\psi|)^{\beta} \} + \theta_r \quad (3)$$

ここに、 θ_0 : 飽和含水率、 θ_r : 残留含水率、 α 、 β : 土壤による常数。 $\theta-\psi$ 関係については、採取試料の室内試験結果が場所的的代表性を有するので、試験結果に上式を適用す

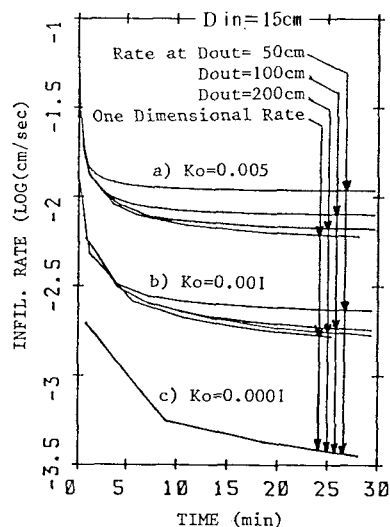


図1. 外部円筒のサイズが内部円筒の浸透速度に及ぼす効果(シミュレーションによる)

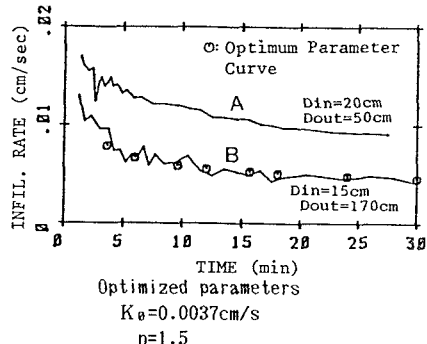


図2. 二重円筒試験結果(定水位5cm)と土壤特性パラメータの逆推定

ることによってパラメータを決定する。

k - ϕ 関係は、関東ロームを含む各種の土壌の試料試験結果に適合性の良い次式を採用する。

$$k = K_0 \cdot S_e^n \quad (4)$$

ここに、 K_0 ：飽和透水係数（異方性を考慮する場合に K_{vo} ：鉛直飽和透水係数、 K_{ho} ：水平飽和透水係数）、 $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_0 - \theta_r)$ ：飽和度、 n ：土壌による常数。試料試験による K_0 は大きなバラツキを示し、代表性に乏しい。そこで、原位置浸透試験によりマクロパラメータとしての K_0 と n を求めようというのが本研究の意図である。

4. 小型原位置浸透試験結果への逆推定法の適用とその結果

原位置浸透試験としては、常用される二重円筒試験とボアホール試験（いずれも定水位）を用いる。同じサイトでも試験地点毎に試験結果がかなり異なるとの報告もあるが、不攪乱の関東ローム地盤の場合には、浸透表面を適切に仕上げかつ濁水が生じないように粗砂や礫で表面を保護することによってほぼ一様の結果を得ることができる。

二重円筒試験の場合には、外部円筒の大きさによって内部円筒の浸透速度は大きな影響を受ける（例えば、図2のカーブAとBの比較）。図1は数値シミュレーションによってその効果を調べたものである。関東ロームのように透水係数が高い場合には、例えば内径15cmの内部円筒に対して2m程度の外部円筒が必要である。図2には、内径15cmの内部円筒に対して170cmの外部円筒を用いた試験結果に2.で述べた方法を適用して得られた最適値が示されている。 K_0 は妥当な値であるが n が過少な値となっている。 K_0 は浸透速度曲線が定常に近くなった部分で決まるのに対して、 n には初期の降下部の感度が高い。このように大きな外部円筒では瞬時に外部円筒と内部円筒を同一水位にすることが極めて困難であるため、浸透曲線の初期の部分で精度のよいデータを得ることが難しい。 n の推定精度が悪いのはそのためである。

ボアホール試験では、鉛直透水係数と水平透水係数と同時に推定する。二重円筒試験地点と同じサイトで実施したボアホール試験（径22cm、地上からの深さ1m、50cmの定水位）で得られた浸透速度曲線に逆推定法を適用して得られた結果は、 $K_{vo} = 0.0033 \text{ cm/s}$ 、 $K_{ho} = 0.0037 \text{ cm/s}$ 、 $n = 3.31$ といずれも feasible な値である。土壌特性パラメータ推定のためには、①試験が容易、②地表面から3m程度までなら任意の深さで試験が可能、③ k_v と k_h の双方が求まる（ただし、ユニークな組を求めるには多少の問題あり、会場で）、の点でボアホール試験が二重円筒試験より有利である。

5. 浸透促進施設の浸透性能評価への逆推定パラメータの適用性

浸透試験と同じサイトの浸透井（内径180cm、地上から深さ230cm）と浸透トレンチ（幅50cm、地上から深さ80cm、長さ2m〔両端50cmは緩衝部〕）に対する注水実験結果と推定パラメータを用いた数値シミュレーション結果を図4と図5に示す。これらは推定値のマクロパラメータとしての妥当性を示すものである。

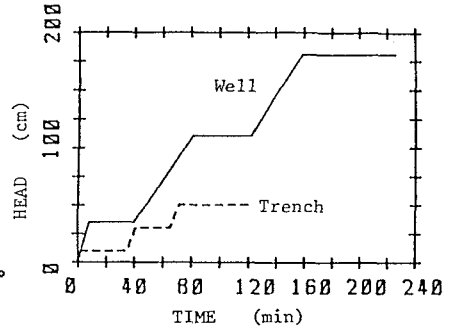


図3. 浸透施設への段階注水実験の水位

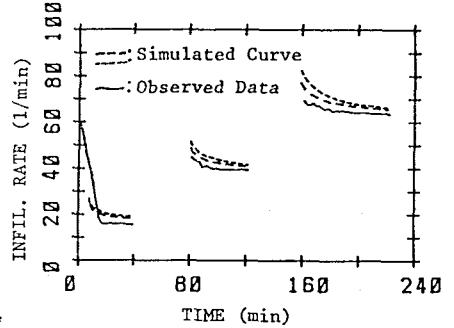


図4. 浸透井に対する実験結果とシミュレーション結果（上の破線：初期、飽和度30%、下：飽和度50%）

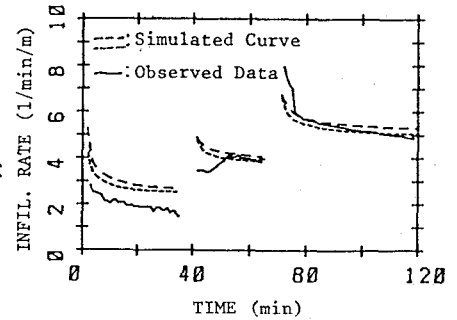


図5. 浸透トレンチに対する実験結果とシミュレーション結果（図4と同じ条件）