

変水位ボアホール浸透試験に基づく現地地盤の浸透能力の評価手法に関する研究

Study on the Estimation Methods for Infiltration Capacity of Field Soils Based on the Falling Head Tests Using Borehole

岡 泰道*・岩城孝之**・井上昇***

by Yasumiti OKA, Takayuki IWAKI and Noboru INOUE

This paper discussed the estimation methods for saturated hydraulic conductivities(k_o) of soils under various initial conditions, using borehole falling head tests(FHT). Parameters relating to soil properties were determined by soil tests and preliminary analyses. In addition, an empirical formula specifying the initial condition of the surface soil layer was introduced on the basis of the field data observed by tensiometers. As a result, k_o values evaluated from FHT carried out for the dry soils are in good agreement with the values obtained by constant head tests.

Keywords: Infiltration, Hydraulic Conductivity, Borehole Test, Falling Head Test

1. はじめに

浸透型流出抑制施設の計画などに際しては、対象地盤の保水透水能力の把握が不可欠であり、これらを定量化するための現地試験法の一つにボアホール浸透試験がある。この手法には定水位法と変水位法があり、前者については、雨水浸透施設技術指針(案)¹⁾でも現地調査の一項目として位置づけがなされているが、かなり大がかりな投資と作業を必要とするものもある。一方、試験の実施上はきわめて簡易な変水位試験では、円筒管打ち込み方式のものなど鉛直浸透が仮定できるものなどについては、いくつかの評価の試みはある²⁾ものの、ボアホール試験については計測される値が土壌の透水性を表現する物理量と直接対応してないために、これのみを用いて浸透特性を評価する手法が確立されていないのが現状である³⁾。本研究では、自然地盤において実施した定水位ならびに変水位の現地ボアホール浸透試験結果に基づき、後者による浸透能力評価を目的として、数値シミュレーションを含めた検討を行った。

* 正会員 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

** 学生員 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

*** 正会員 三井共同建設コンサルタント(株) (〒169 東京都新宿区高田馬場 1-4-15)

2. 現地試験方法

現地試験は、都立小金井公園内の自然ローム地盤を対象として、ポストホールオーガによる掘削孔および図1に示す装置を用いて行った。定水位試験では一定水深を維持するために、コントロールボックスと電極棒により電磁弁を制御し、ほぼ定常状態となるまでの浸透量の時間的変化を測定する。変水位試験は同じボアホールにおいて定水位試験の前後に行い、同じ湛水深からの水位の時間的変化を圧力センサーにより測定する。

試験地点は地表面に近い自然ローム地盤で

あり、1995年8月～1996年10月にかけて行った53ケースの実験のうち今回は16ケースの結果を用いて解析した。試験タイプは3つに大別され、定水位試験実施前の変水位試験（試験①）、定水位試験（試験②）、定水位試験実施後の変水位試験（試験③）を行った。解析手順としては、試験②に基づいて試験③の解析を行った上で、①の評価法の可能性を検討する。

3. 解析方法(基礎方程式の離散化ならびに土壌特性)

基礎式としてRichardsの浸透方程式を用いてGalerkin法により離散化し、軸対称の浸透現象を再現する。図2に示すように、円筒形の全面浸透タイプのボアホール（深さ80cm、直径21cmまたは17cm）に対して、上部および側方は、不透水境界とし、下部境界には地下水面を与えた。また、水分保持特性を表す $\psi - \theta$ 関係には、Campbell式ならびにHaverkamp式を適用して両者を比較する。透水特性に係わる不飽和透水係数（ $k - \psi$ 関係）は $\psi - \theta$ 関係によって異なるため、表1のような組合せで用いた。

4. 土壌パラメータの決定方法

変水位試験を解析する場合には土壌特性パラメータならびに初期条件を定量化する必要があるため、試験結果から直接同定できるパラメータ以外は、適当な仮定を用いるか、現地土壌の小サンプルを用いた室内試験などによりあらかじめ決定する方法を採らなければならない。本研究では変水位試験により現地地盤の飽

和透水係数 k_0 を推定する手法を確立することをねらいとしているが、まず、現象を支配する諸要因あるいは未知パラメータを以下の手順で決定する。図3に研究の全体フローを示す。図中の「計算条件の決定」の項

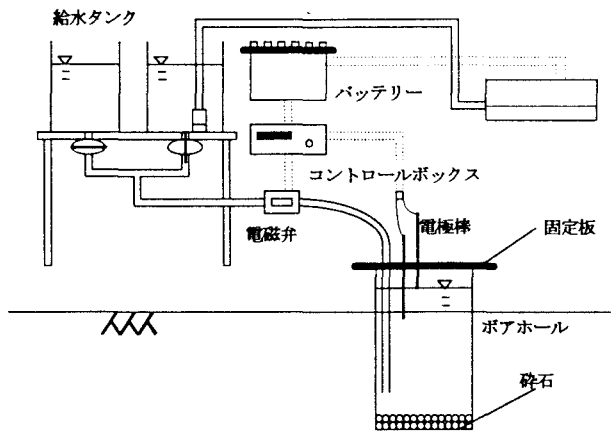


図1 ボアホール浸透試験装置

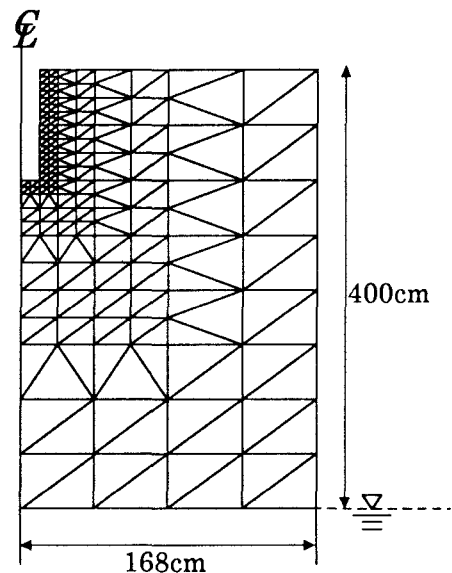


図2 メッシュ分割

表1 $\psi - \theta$ 関係及び $k - \psi$ 関係

	Case ①	Case ②
$\psi - \theta$ 関係	$\frac{\theta}{\theta_0} = \left(\frac{\psi}{\psi_{cr}} \right)^{-\frac{1}{b}}$	$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} = \frac{\alpha}{\alpha + [\ln \psi]^\beta}$
$k - \psi$ 関係	$k = k_0 \cdot \left(\frac{\psi_{cr}}{\psi} \right)^{2 + \frac{2}{b}}$	$k = k_0 \cdot \left\{ \frac{\alpha}{\alpha + [\ln \psi]^\beta} \right\}^3$
土壌パラメータ	$\theta_0, \psi_{cr}, b, k_0$	$\theta_0, \theta_r, \alpha, \beta, k_0$

目は、Case ①では空気侵入値 ϕ_{cr} の決定に、Case ②では初期吸引圧 ϕ_{ini} の決定にそれぞれ対応する。また、この項目から「数値解析」に連なる点線は Case ①の場合のみに当てはまるもので、Case ②では、無関係となる。

4.1 飽和透水係数の第一次試算値

初期条件や土壌特性パラメータが変水位試験結果に及ぼす影響を評価するとともにそれらの値を決定するために、まず、変水位試験と同じ土壌で行った定水位試験結果より、飽和透水係数 k_0 を推定し、これを一次試算値とする。推定式については試験条件に応じて従来多くのものが提案されており⁴⁾、ここでは試験条件に適合する次の Glover 式を用いた。この簡易式は（湛水深／ボアホール径）の値が1付近より小さくなると適合性が悪いが⁵⁾、本試験の場合2以上の値となっているので問題はないと考えられる。

$$\text{Glover 式} \quad k_0 = \frac{Q_s}{C_u \cdot r \cdot h} \quad C_u = \frac{2\pi(h/r)}{\sinh^{-1}(h/r) - 1}$$

Q_s : 終期浸透量, r : ボアホール半径, h : 湛水深

4.2 Case①(Campbell 式)のパラメータの決定

Case ①では、土壌パラメータとして θ_o , ϕ_{cr} , b , k_0 の4つがある。定水位試験結果ならびに現地サンプリングによる不攪乱土壌試験（簡易な $\phi - \theta$ 試験を含む）によれば、本研究で対象とした地盤は若干のばらつきはみられるものの、ほぼ同程度の特性を有すると考えられる。飽和含水率 θ_o は現地地盤の小サンプルを用いた試験結果を踏まえ、 $\theta_o = 0.75$ を代表値とした。また、 b は自然地盤の表層付近における関東ロームの平均的な値⁶⁾を採用し、 $b = 10$ とした。感度分析の結果により、この2つのパラメータが解析結果に及ぼす影響は小さいことが確認された。次に、空気侵入値に相当する ϕ_{cr} はシミュレーションにおいて支配的な影響を及ぼし、また、室内実験等による決定が困難なパラメータである。各試験結果から得られた ϕ_{cr} の推定値を図4に示すが、かなりのばらつきも見られる。ここでは定水位試験により求めた k_0 値を用いて、一連の変水位試験結果を最もよく再現しうる $\phi_{cr} = -50 \text{ cmH}_2\text{O}$ を採用した。対象地盤の初期条件 ϕ_{ini} については、定水位後のボアホール付近の土壌がほぼ飽和していると考えられるので、 ϕ_{cr} が決定されればその値に近い ϕ_{ini} を与えればよい。上で決定した ϕ_{cr} (完全飽和状態) よりやや排水した条件として、地下水面の近傍より上層では、 $\phi_{ini} = \phi_{cr} - 10 = -60 \text{ cmH}_2\text{O}$

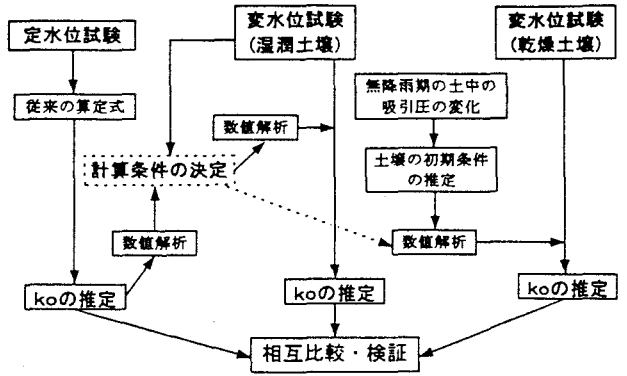


図3 研究のフロー

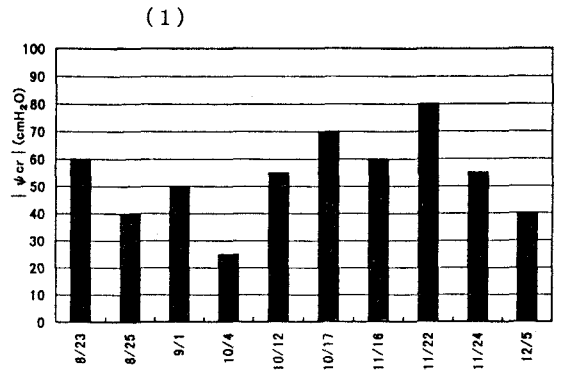


図4 ψ_{cr} の推定値の分布

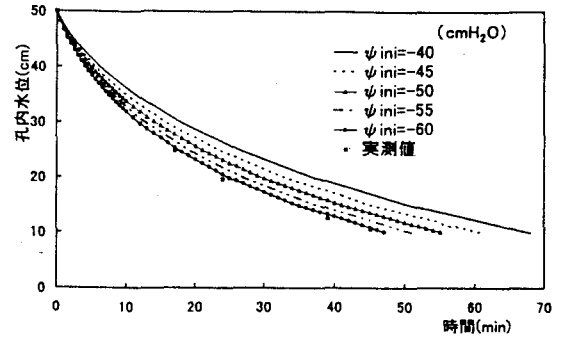


図5 初期吸引圧 ψ_{ini} の決定(1995/9/1)

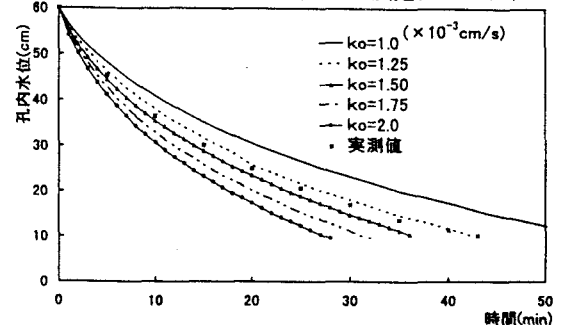


図6 k_0 の推定(湿潤土壌, 1995/11/24, Campbell 式)

を基準値とした。

4. 3 Case②(Haverkamp 式)のパラメータの決定

Case ②では、土壌パラメータとして θ_o , θ_r , α , β , k_o の5つがある。飽和含水率 θ_o については前節と同様に $\theta_o = 0.75$ を代表値とした。 θ_r は残留含水率に相当するが、試験による決定は困難なため、自然地盤表層(深度 50~150cm)の既往の試験結果⁷⁾ などより、 $\theta_r = 0.4 \sim 0.5$ 程度と推定されることから、 $\theta_r = 0.45$ とした。また、 β は関東ロームでは 3~6 程度の値をとるようである⁸⁾。予備解析によれば、本試験で対象としたロームの場合 5 前後の値となり、 ± 1 程度の差は解析結果にほとんど影響を及ぼさない。したがって、標準的な値として $\beta = 5$ を採用した。次に α は解析に対して比較的感度のよいパラメータであるが、上記の θ_o , θ_r , β , ならびに k_o (試算値)を固定した予備解析結果から、 α の値は 3000 以上となり、4000 程度で最適に近い再現が得られるが、その値付近ではシミュレーション結果に及ぼす影響はかなり小さくなる。これらのことから $\alpha = 4000$ とした。

初期条件 ϕ_{ini} については、前節の場合と異なり参考となるパラメータがないため、上記のすべての土壌特性値を固定した上で、一連の変水位試験結果をシミュレートし、最適値を探索した。結果を図5に例示するが、 $\phi_{ini} = -55 \sim -60 \text{ cmH}_2\text{O}$ 程度で最適となることがわかった。そこで、前節の Case ①で決定した ϕ_{ini} の基準値との整合性も考慮して、同じ $\phi_{ini} = -60 \text{ cmH}_2\text{O}$ を採用した。

5. 変水位試験結果の評価

前節までに決定したパラメータならびに土壌の初期条件を用いて変水位試験結果から飽和透水係数 k_o を推定する。

5. 1 湿潤土壌での変水位試験結果

定水位試験実施後に行った変水位試験(試験③)に対して、Case ①の Campbell 式を用いた方法により飽和透水係数 k_o を同定した結果の一例を図6に示す。得られた k_o を定水位試験結果と比較すると、この例では $k_o = 1.25 \sim 1.50 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (定水位試験結果: $1.29 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) となっており、ほぼ符合している。しかし、本方法には、 ϕ_{cr} という、シミュレーションに大きな影響を及ぼし、かつ室内実験等による決定が困難なパラメータが含まれている。これは、実用化を考えた場合に大きな障害となることが予測される。

次に、Case ②の Haverkamp 式を用いた方法により飽和透水係数 k_o を同定した結果の一例を図7に示す。定水位試験結果と比較すると、 $k_o = 1.25 \sim 1.50 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (定水位試験結果: $1.29 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$) となっている。以上の結果をまとめると図8のようになり、いずれも妥当な結果が得られている。したがって、現地地盤に即した平均的な土壌特性値を与えることで、比較的妥当な飽和透水係数を得ることができると考えられる。

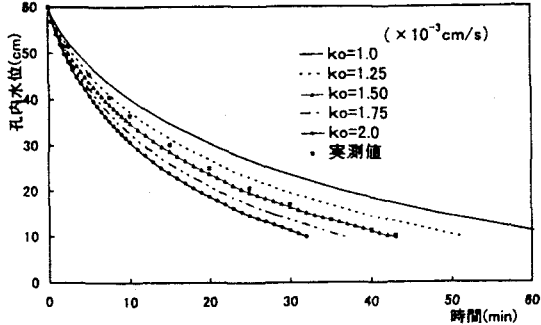


図7 k_o の推定(湿潤土壌, 1995/11/24, Haverkamp 式)

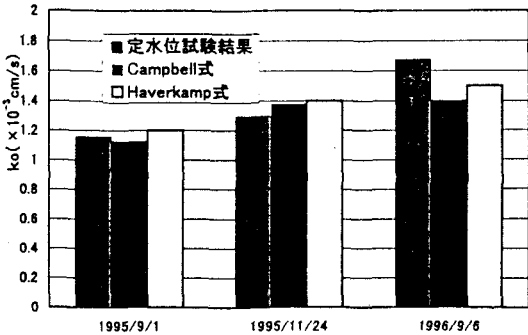


図8 k_o 値の比較(湿潤土壌)

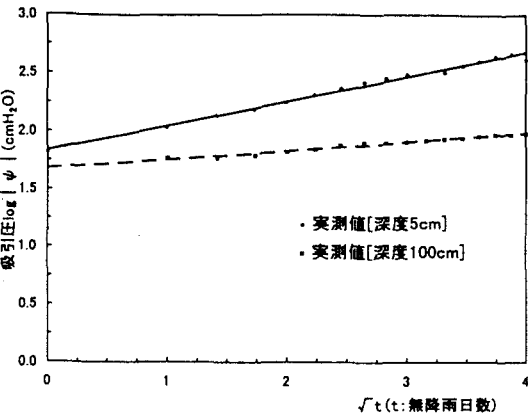


図9 降雨後の吸引圧変化(1982/10/20~11/5)

5. 2 乾燥土壌での変水位試験結果

(a) 現地土壌の初期条件の決定

乾燥条件下での変水位試験結果から k_0 を推定するためには、試験開始時の初期条件の規定が必要となる。筆者らの多摩ニュータウン地区でのテンシオメータによる長期観測記録⁶⁾によれば、関東ローム地盤における無降雨期の不飽和帯吸引圧 ϕ の時間的な変化は次式で近似できる。

$$\log(\psi/\psi_0) = a \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

ここに、 ϕ_0 は降雨終了後 1 日程度経過した後の吸引圧で、最小含水量に相当する。また、 a は季節的要因に支配される係数と考えられる。上式を季節別に分類して当てはめてみると、 a は各季節ごとにばらつきはあるもののほぼ一様な値として得られた。一方、 ϕ_0 にはかなりばらつきが見られるが、一般に言われている最小含水量の値 (p_F 1.7~2.0) の範囲内となっていることから、季節別に平均して定めることとした。(2)式の適用例を図 9 に示すが、この推定式により求めた深度 5cm および 100cm での吸引圧値を代表値として、鉛直方向に分布させ、初期条件とした。

(b) 乾燥土壌での変水位試験結果

定水位試験実施前に行った変水位試験 (試験①) に対して、Case ①の Campbell 式を用いた方法により飽和透水係数 k_0 を同定した結果を図 10 に、Case ②の Haverkamp 式による結果を図 11 に示す。得られた k_0 を定水位試験結果、Case ①、②の順で比較すると、(a) では $k_0 = 1.61, 1.50 \sim 2.00, 1.75 \sim 2.00 (\times 10^{-3} \text{cm/s})$ 、(b) では $k_0 = 1.29, 1.75 \sim 2.50, 1.75 \sim 3.00 (\times 10^{-3} \text{cm/s})$ となり、平均値で示すと図 12 のようになっている。ばらつきはあるものの比較的よく符合していることがわかる。一方、変水位試験による推定結果がやや過大になる傾向が明らかに見受けられる。前節 5.1 での湿潤条件下での推定ではこうした傾向がなかったことを考えると、この原因は初期条件の規定方法にあると推察される。具体的には、図 5 の ϕ_{ini} の影響と図 11 の k_0 の同定過程を比較すればわかるように、 $|\phi_{ini}|$ が実際の値よりも過小に (つまり実際よりも湿潤な状態に) 設定されていると考えられる。

以上の結果より、現地地盤の平均的な土壌特性値を規定するとともに、土壌に即した初期条件の推定式を用いることにより、乾燥土壌で行った変水位ポアホール浸透試験結果から飽和透水係数 k_0 が得られること

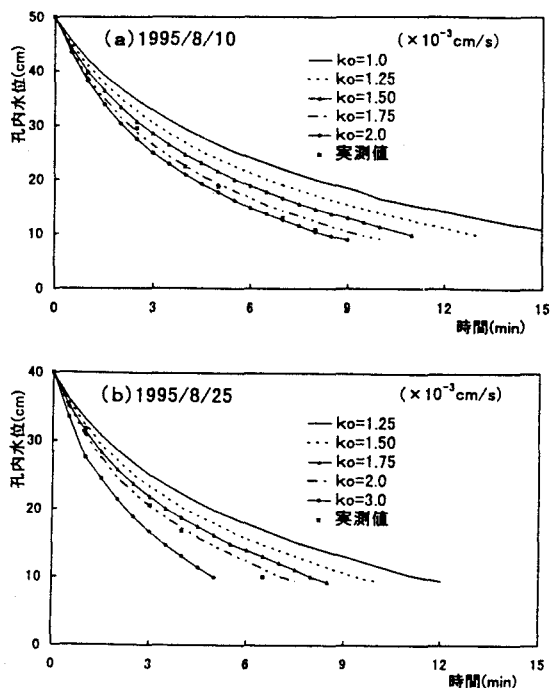


図 10 k_0 の推定(乾燥土壌, Campbell 式)

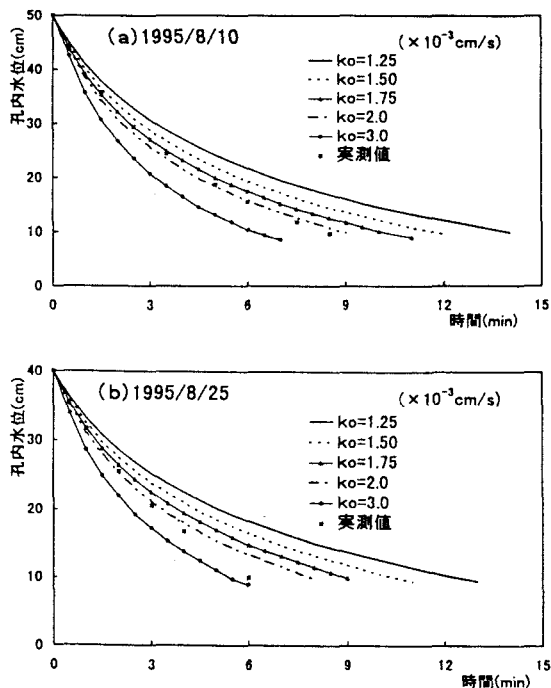


図 11 k_0 の推定(乾燥土壌, Haverkamp 式)

が示された。また、Case ② (Haverkamp 式) の場合は、図 3 の研究フローからもわかるように、定水位試験結果 (試験②) あるいは定水位試験後に実施した変水位試験 (試験③) の結果を直接用いることなく、乾燥条件下での変水位試験結果から比較的妥当な k_o 値の推定が可能であることがわかった。

6. まとめ

本研究では、自然ローム地盤において実施した定水位ならびに変水位の現地ポアホール浸透試験結果に基づき、乾燥条件下での後者による浸透能力評価を目的として、数値シミュレーションを含めた検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

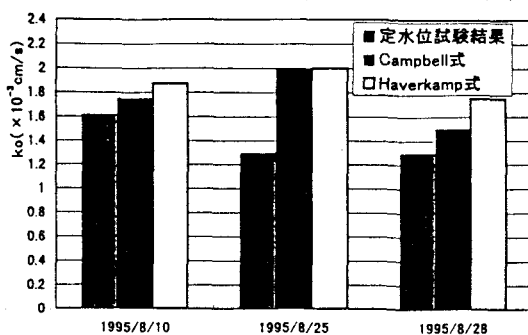


図 12 k_o 値の比較(乾燥土壌)

(1) 解析の前提となる土壌特性式として、従来より

多用されている Campbell 式と Haverkamp 式とを取り上げて変水位試験結果を評価する場合の適用性について比較し、前者を用いた場合の問題点を明らかにした。

(2) 定水位浸透試験結果ならびに数値実験等により土壌特性値を同定することにより、定水位試験後に実施した変水位試験結果から飽和透水係数を推定し、両者の整合性を示した。

(3) さらに、長期の現地不飽和帯吸引圧観測値から得られた経験式に基づいて初期条件を規定することにより、乾燥土壌での変水位試験結果から妥当な飽和透水係数 k_o が得られることを示した。

(4) また、Haverkamp 式を用いた場合は、乾燥条件下での変水位試験結果のみから k_o 値の推定が可能であることを示した。

今回の解析により変水位浸透試験の利用可能性がある程度明らかになったと考えられるが、乾燥土壌での変水位試験結果のみから現地地盤の浸透能力の評価を行うという実用化のためにはいくつか課題が残されている。まず、土壌を物理的特性に応じて分類・類型化することにより、特性式のパラメータを予め与える必要がある。これについては、定水位試験に基づく既往の研究も含めかなり明確になってきている。さらに、実験時の対象土壌の乾湿状態を推定する式を土壌タイプ別に分類整理する必要がある。

【謝辞】都立小金井公園管理事務所の方々には、長期間にわたり、現地浸透実験の実施に対しご理解ご協力を賜りました。また、本研究は (財) 小川育英会より補助を受けている。ここに、記して謝意を表します。

【引用文献】

- 1) (社) 雨水貯留浸透技術協会 (編) : 雨水浸透施設技術指針 (案) 調査・計画編, 121p., 1995.
- 2) 西垣誠 : 地盤の浸透特性と浸透能力, 雨水技術資料, Vol.14, pp.9-20, 1994.
- 3) 北海道開発コンサルタント (株) : 浸透施設の機構と流出抑制効果に関する研究, 技術開発部研究論文, HR-006, 150p, 1984.
- 4) Stephens, D.B. et al.: Vadose Zone Permeability Tests: Summary, J. Hydraulic Div., ASCE, No.108, pp.623-639, 1982.
- 5) 岡泰道ら : 現地ポアホール浸透試験結果の評価方法の検討, 水文・水資源学会 1995 年研究発表会要旨集, pp.44-45, 1995.
- 6) 虫明功臣・小池雅洋・岡泰道 : 自然林地における表層不飽和帯水分の挙動に関する研究(2), 土木学会第 29 回水理講演会論文集, pp.131-136, 1985.
- 7) 虫明功臣・小池雅洋・岡泰道 : 自然林地と都市化域における不飽和帯水分の挙動の相違(1) — 不飽和帯の水分保持特性について —, 生産研究, Vol.34, No.10, pp.445-448, 1982.
- 8) Katumi Musiake, Sri Kantha Herath and Masahiro Koike : An Appraisal of Suitability of Some Moisture-Suction Models for Kanto Loam, 生産研究, Vol.38, No.4, pp.196-199, 1986.