

簡易な現地浸透試験に基づく 地盤の浸透能力の評価方法について

ESTIMATION METHOD FOR INFILTRATION CAPACITY OF SOILS BASED ON SIMPLIFIED IN-SITU PERMEABILITY TESTS

岡泰道¹・松井準²

Yasumiti OKA and Jun MATSUI

¹正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

²学生会員 法政大学大学院 工学研究科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

Permeability tests have been widely used to estimate infiltration capacity of field soils. This study aims to discuss the applicability of borehole falling head tests(FHT) to the evaluation of saturated hydraulic conductivity(k_0) of the soils under dry conditions. Parameters relating to soil properties are determined by preliminary analyses with the test data obtained in Tsurumi River Basin. Also, the validity of Glover's equation is examined, based on the formula proposed by ARSIT. In addition, an empirical formula specifying the initial condition of the surface soil layer is introduced on the basis of the field data observed by tensiometers, and its parameters are classified according to the season and soil depth. As a result, k_0 values evaluated from FHT carried out for the dry Kanto loam soils are in good agreement with the values obtained by constant head tests and FHT under wet conditions.

Key Words : infiltration capacity, hydraulic conductivity, borehole test, falling head test
specific infiltration

1. はじめに

都市域の流出抑制を目的とした雨水浸透施設を設計する場合には、表層地盤の浸透能力の評価が必要となる。このための手法については多くの研究が行われ、その一部はすでに雨水浸透施設技術指針(案)¹⁾の中に盛り込まれている。同指針では現地浸透試験法の一つとして定水位ボアホール浸透試験結果を用いた評価方法が示されているが、孔内水位を一定に保つ定水位法に基づいているため、試験に多くの水量と時間を要し、試験によっては大掛かりな投資を必要とする。したがって、実施の簡易な変水位法が確立されれば、施設の設計上、きわめて有利となることが期待される。

現地変水位試験については従来様々な試験法や評価式が提案されてきた^{2), 3)}。しかし、ボアホール変水位試験については提案式の適用条件、精度等が十分に明確でないものが多く、また、結果から直接得られる物理量が透水性を示す絶対的な尺度でないこと、ならびに初期の表層土壌水分分布が試験結果に大きな影響を及ぼしてしまうことなどから、評価手法の確立がなされていないの

が現状である。こうした中で、近年、評価のある程度確立されている定水位試験の情報を基に、変水位の定量化の試みがいくつかなされるようになってきた^{4), 5)}。

本研究では、これらの研究も踏まえ、現地地盤において実施した定水位、変水位浸透試験結果に基づき、数値シミュレーションを含めた解析を行うことにより、指針との対応づけを考慮した変水位浸透試験の評価手法の確立を目的とした。

2. 現地浸透試験

筆者らは、都立小金井公園ならびに鶴見川流域を対象として、ボアホール浸透試験を行ってきた。この試験はポストホールオーガによる掘削孔(直径17~21cm)に注水を行い、図-1の装置を用いて現地地盤の浸透量あるいは孔内水位の時間的な変化を計測するものである。試験の種類を表-1に示すが、浸透面が乾燥状態と推定される定水位試験実施前の変水位試験(試験③)、定水位試験(試験①)、湿潤状態と推定される定水位試験後の変水位試験(試験②)の3つに大別できる。解析手順とし

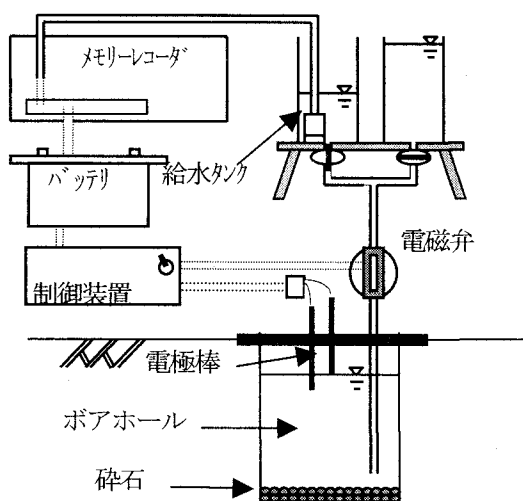


図-1 現地浸透試験装置

表-1 解析に用いた現地浸透試験結果の内訳

対象地域	土質分類	変水位 (定水位 前)	定水位	変水位 (定水位 後)
小金井公園内	関東 ローム	10地点	10地点	10地点
鶴見川流域		データ なし	6 地点	6地点

表-2 変水位試験の解析に用いる計算条件

表層 状態	土壌パラメータ				初期条件 (吸引圧分 布)
	θ_0	θ_r	定数 α	定数 β	
湿潤	0.75	0.45	4000	5	-60cmH ₂ O (一様分布)
乾燥					乾燥履歴に より異なる

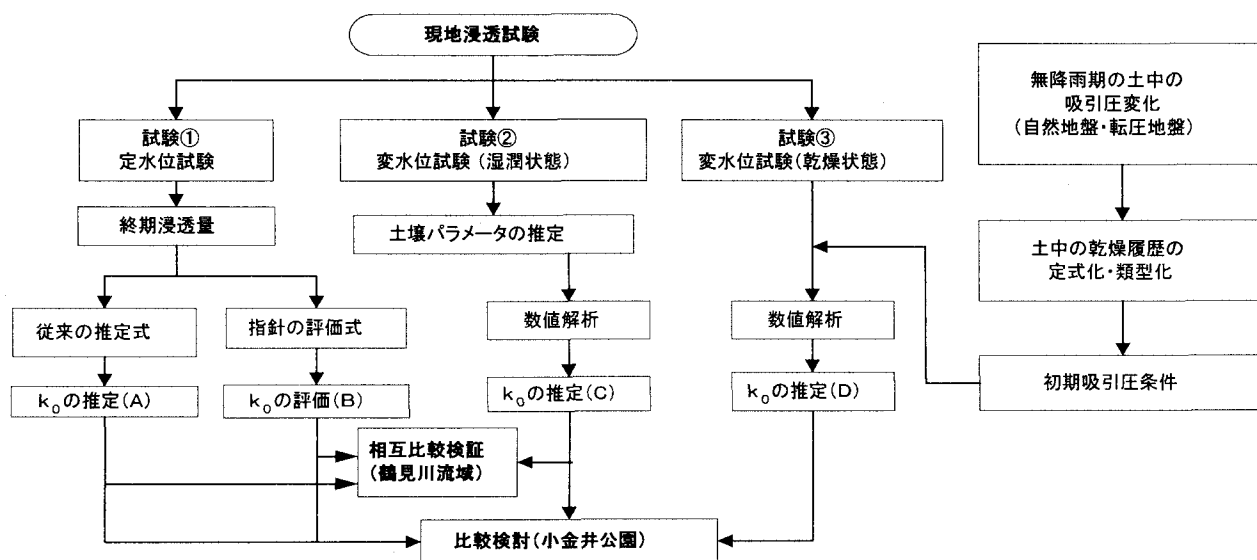


図-2 研究のフロー

ては、試験①での評価結果に基づいて、試験②の解析を行った上で、試験③の評価法の可能性を検討する。

図-2に本研究のフローを示す。

(1) 現地浸透試験法の分類

浸透試験は、注水方法により、定水位法と変水位法に分類できる。定水位法では一定水深を維持するために、制御装置と電極棒により電磁弁を制御し、ほぼ定常状態になるまでの浸透量の時間的変化を測定する。変水位試験では同じボアホールにおいて定水位試験の前後（鶴見川流域では後のみ）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により測定する。

(2) 従来の定水位試験の評価方法

技術指針¹⁾では、定水位試験結果から得られる試験

施設の形状と湛水深に対応した終期浸透量をもとに、次式によって、飽和透水係数 k_0 （以後は k_0 と表記）を算定することが標準的な方法となっている。 k_0 に換算して浸透能力を評価することで、種々の条件下の現地浸透試験結果を同一の指標で比較することができる。

$$k_0 = Q_t / K_t \quad (1)$$

ここで、 k_0 ：飽和透水係数（m/s）

Q_t ：浸透試験での終期浸透量（m³/s）

K_t ：試験施設の比浸透量（m²）で、施設の形状で決まる定数

一方、定水位試験の評価には試験条件に応じて従来多くのものが提案されてきたが、そのうちの代表的なものとして次のGlover式を挙げる事ができる²⁾。

$$k_0 = \frac{Q_i}{C_u \cdot r \cdot h}, \quad C_u = \frac{2\pi(h/r)}{\sinh^{-1}(h/r) - 1} \quad (2)$$

ここで、 r ：ボアホール半径、 h ：湛水深
Glover式に関しては、湛水深が小さい場合は適合度に問題があることが指摘されている⁶⁾。この原因の一つとして、Glover式の理論においては、 (h/r) の値が減少するにつれてボアホール底面からの浸透の割合が増大する点が考慮されていないことが挙げられる。このような問題点も含め、後述する変水位試験の数値解析の結果と合わせて議論することとする。

(3) 従来の変水位試験の評価方法

変水位試験の結果を片対数紙上にプロットすると直線に近い関係が得られることから、この傾きを一つの指標として整理することが多い⁷⁾。これを浸透能力係数と呼ぶが、定水位試験結果と同一の指標で判断できる絶対的尺度（本研究では k_0 に相当）ではないため、技術指針では採用されていない。この指標と定水位試験による k_0 との間には密接な関係がある⁸⁾が、検証はなされていない。

3. 変水位試験の解析方法

変水位試験の解析では、支配方程式としてRichardsの式を用い、FEMを用いた離散化により軸対称の浸透現象を再現する。具体的には施設形状等の計算条件を現地試験と同等にとり、 k_0 をパラメータとして、再現性のよい k_0 の推定を行う。数値解析により変水位試験の再現性を吟味するためには、水分保持・透水特性ならびに初期条件を決定しなければならない。筆者ら⁴⁾は水分保持特性（ $\theta - \phi$ 関係）としてCampbell式とHaverkamp式の2つを比較検討した結果、前者には解析結果に大きな影響を及ぼしかつpF試験等による決定が困難なパラメータが含まれており、実用上大きな障害になることを指摘した。

これを踏まえて、 $\theta - \phi$ 関係ならびに $k - \phi$ 関係にはHaverkamp式とIrmay式を以下のように用いることとした。

$$\theta - \phi \text{ 関係式: } \frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} = \frac{\alpha}{\alpha + [\ln|\psi|]^\beta} \quad (3)$$

$$k - \phi \text{ 関係式: } k = k_0 \cdot \left\{ \frac{\alpha}{\alpha + [\ln|\psi|]^\beta} \right\}^3 \quad (4)$$

ここで、 θ_0 ：飽和含水率、 θ_r ：残留含水率
 α 、 β ：定数、 ϕ ：吸引圧

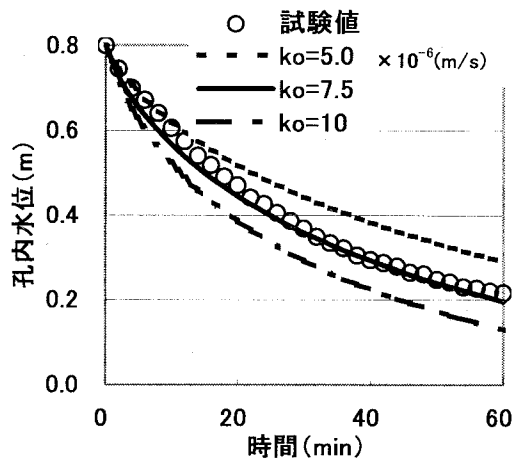


図-3 変水位試験（試験②）による k_0 の推定結果（鶴見川流域）

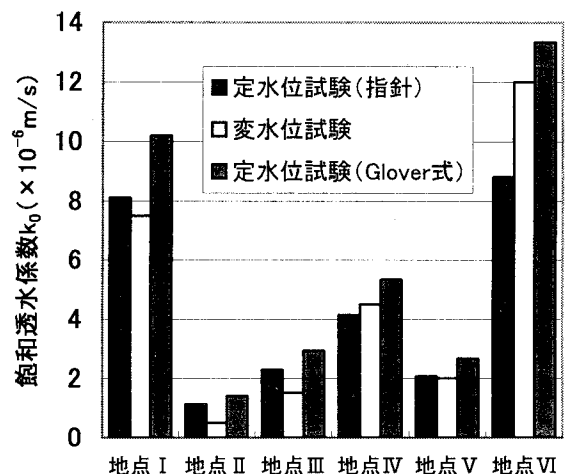


図-4 各種試験法による k_0 の推定結果（鶴見川流域）

4. 湿潤状態での変水位試験（試験②）の評価

(1) 土壌パラメータの決定方法

一般に、土壌特性は土壌の種類ごとに変化するだけでなく、同一種類の土壌でも場所によって変化するため、厳密には、現位置における土壌の小サンプルを用いた室内試験（pF試験など）を行い、特性値を求めておくことが望ましい。しかし、試験地点ごとにこのような作業を行うことは実用上困難なため、土壌特性の類型化が必要となる。

湿潤状態での変水位試験は、定水位試験終了後であるため、ボアホール付近の土壌が飽和に近い状態であることを表している。ここでは、乾燥時の変水位法の評価に先立ち、初期吸引圧分布が比較的安定している湿潤条件を用いて土壌パラメータをあらかじめ規定しておくという立場をとる。小金井公園の湿潤土壌について、筆者らは変水位試験（試験②）からパラメータの同定を行い、表-2に示すような値が再現性のよい計算条件であることを確認している⁴⁾。

しかし、表-2の値はあくまで小金井公園の代表値であり、他の関東ローム地盤への適用可能性については十分な検討がされていない。そこでこの計算条件を用いて、鶴見川流域の関東ローム地盤で実施された変水位試験の k_0 の推定を行うことで、土壌パラメータの整合性を検証する。具体的には、まず、鶴見川流域で実施された定水位試験（試験①）の結果から求めた終期浸透量 Q_f をもとに、(1)(2)式から得られたそれぞれの k_0 と、定水位後の変水位試験（試験②）から推定した k_0 の3者（図-2のフローのA、B、C）の比較を行う。

（2）推定した k_0 の比較

試験②による推定結果の1例を図-3に示すが、この例では $k_0=7.5 \times 10^{-6}$ (m/s) 程度と推定される。これらの結果を試験地点ごとに比較したものが図-4である。

（1）式の比浸透量を用いた指針による評価方法と（2）式のGlover式で求めた k_0 を比較すると、後者によるものが過大に評価される傾向にある。終期浸透量 Q_f は同一の値を用いていることから、これは算定式の違いから生じたものである。図中には示されていないが、湛水深が低下するにつれて技術指針¹⁾による算定式との差が増加していくことが明らかとなった。特に(H/r) が5より小さくなるとその差が顕著となる。この結果は、2.(2)で指摘したGlover式の問題点と符合するものであり、定水位試験の場合、指針から求めた飽和透水係数を浸透能力の指標として用いる方が妥当と判断される。

変水位試験（試験②）の k_0 は全般的に過小評価の傾向がみられる。この原因として、定水位試験後の変水位試験であるため、浸透面の目詰まりによって孔内水位の低減速度が遅くなったことも考えられる。事実、透水係数が低い地点の土壌にはシルト混じりのもの（例えば地点Ⅱ、Ⅲ）もいくつかあり、試験後の目視による検査からも細粒分の溶出が顕著であった。また、目詰まりによって孔内水位が低下しなくなり実験を中止した例もあった。以上の結果から、地盤条件の評価などに問題は残るが、関東ロームという土質分類で土壌パラメータを同定することは可能であると判断した。

5. 初期条件（初期吸引圧）の推定

現地変水位試験結果から地盤の浸透能力（飽和透水係数 k_0 ）を数値解析手法により評価するためには、現象が非定常であるため、初期条件として対象土壌の初期吸引圧分布をあらかじめ推定しておく必要がある。特に定水位試験前の変水位試験（試験③）を解析する場合は初期吸引圧がその微小な変動でさえも解析結果に大きな影響を及ぼすため、その設定は深度方向の分布も含め慎重に行わなければならない。ここでは長期

表-3 各地区の土壌特性

対象地域	土壌特性	土質分類	地被条件
長池地区	自然地盤	関東ローム	林地
永山地区	転圧地盤		裸地
小金井公園内	自然地盤		裸地

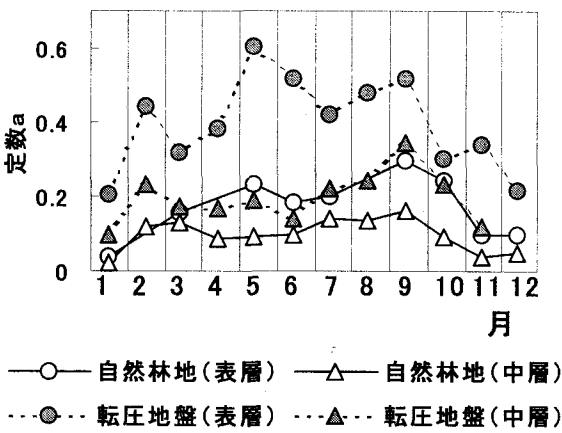


図-5 定数aの季節的变化

にわたる土壌吸引圧の実測記録（テンシオメータによる長期測定記録）を用いた土壌初期吸引圧の定式化、およびそれに基づいた、より利便性の高い初期吸引圧の推定手法について検討する。

テンシオメータの測定記録は2試験区のそれぞれタイプの異なる土壌（自然林地、転圧地盤）であり、変水位試験結果の解析の対象とする小金井公園を含めたそれぞれの特徴は表-3に示した通りである。

（1）乾燥履歴の定式化

土壌の初期吸引圧については、多摩ニュータウン地区でのテンシオメータを用いた土壌吸引圧の長期測定記録から、関東ローム土壌における無降雨期の不飽和帯吸引圧 ϕ の時間的变化は以下の式で近似できることが示されている⁹⁾。

$$\log(\psi/\psi_0) = a \cdot \sqrt{t} \tag{5}$$

ここに、 t は降雨終了からの経過時間、 ϕ_0 は降雨終了後1日程度経過した状態の吸引圧で最小含水量に相当する。また、定数 a は降雨終了後の経過日数による吸引圧の増加割合を表し、季節的要因に支配されると考えられる。

（2）推定式のパラメータの類型化

(5)式に含まれる2つのパラメータ（ a と ϕ_0 ）にはばらつきはあるものの、季節的には明確な特徴がみ

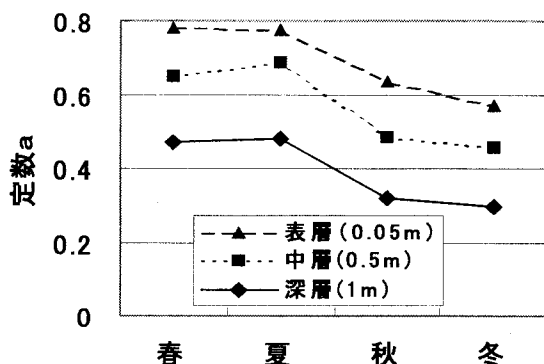


図-6 自然林地の各深度における定数 a の変動傾向

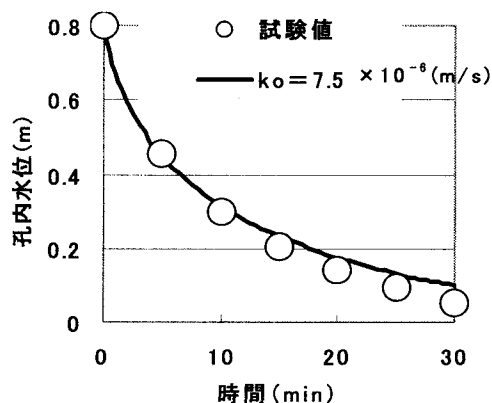


図-7 変水位試験 (試験③) による k_0 の推定結果
(小金井公園)

られる。しかし、岡ら⁴⁾ではこれらのパラメータの適用方法にやや問題があり、初期吸引圧条件の設定が不十分なものであった。本研究ではその点を踏まえ、土壌の特徴等を考慮し、各パラメータの変動傾向の定量的な把握方法について検討する。

a) 季節的な変動傾向

定数 a は降雨後の経過日数による吸引圧値の増加割合を表しており、季節的な気象要因および地被条件に支配されると考えられる。図-5に、自然林地と転圧地盤の表層 (深度5cm) と中層 (深度50cm) における、定数 a の季節的な変化を示す。個々のデータにばらつきがあるため、月単位で平均してある。全般的な傾向として定数 a は冬期に小さく、春になると漸増傾向を示し、8～9月の夏期にピークを示す。10月以降は急速に減少する傾向を見せている。以上のことから、定数 a の分布は季節ごとに特徴的な傾向を示しており、こうした傾向を考慮に入れた上で類型化することができると考えられる。

b) 各土壌の同一深度での比較

図-5から、さらに、同一深度 (表層) における2種類の土壌で定数 a の変動傾向を比較すると、すべての深度において自然林地よりも転圧地盤の値が大きい。これは両者の地被条件の相違に起因する。

c) 同一土壌における分布傾向

自然林地土壌での3深度 (表層: 5cm、中層: 50cm、深層: 100cm) における定数 a の変動傾向を図-6に示す。地表面付近の値は大きく、中層、深層と深くなるにつれて小さくなっている。

以上の結果を踏まえて、(5)式のパラメータ a を季節ごとに統合し、さらにそれを深度別に分類する方法で初期吸引圧の定量化を行った。一方、観測記録によれば、もう1つのパラメータ ϕ_0 に若干の変動は見られるが、自然林地土壌では最小含水量の範囲内 ($pF1.7 \sim 2.0$) にあることから、先ほどの分類法との整合性を考慮して、季節ならびに深度ごとの類型化を行った。

(3) 初期条件の分布

前項 (2) で整理したパラメータを用いた推定式 ((5)式) を用いて、3深度 (表層: 5cm、中層: 50cm、深層: 100cm) ごとに初期吸引圧を算出した。この値に基づいて、現地試験の土壌における吸引圧分布を的確に表現できるようにした。具体的には、地表面から深度50cmまでは深度5cmと50cmの吸引圧 (pF 値) で直線的に補間し、深度50cmから100cmについても同様にした。また、深度100cm以深の吸引圧はごく小さな範囲内では変化しないことから、深度100cm以深では深度100cmの値を一様に分布させた。

6. 乾燥状態での変水位試験 (試験③) の評価

類型化したパラメータ (定数 a ならびに ϕ_0) を基に初期吸引圧条件を設定する手法を用いて、小金井公園で行われた定水位前の変水位試験 (試験③) の解析を行った。解析で必要となる土壌パラメータとしては4.で評価の妥当性が検証されている表-3の値を用いた。

次に、ほぼ同じ気象条件であれば、(5)式の定数 a には地被条件がもっとも大きな影響を与えることを考慮し、裸地地盤である小金井公園の a の値として、転圧地盤 (永山地区) のものを用いることとする。

一方、 ϕ_0 は最小含水量範囲 ($pF1.7 \sim 2.0$) に相当するものであるが、試験地点は自然地盤であり、透水性の比較的良好な土壌であることから、自然林地 (長池地区) の値を用いることとした。解析結果の1例を図-7に示す。実験値と比較すると乾燥時の変水位試験 (試験③) の飽和透水係数 k_0 は $7.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 程度であると推定できる。以上のような方法で試験地点ごとに解析を行い、定水位試験 (試験①) ならびに湿潤時の変水位試験 (試験②) から得られた結果と比較したものが図-8である。

乾燥時の変水位試験 (試験③) 結果から推定した k_0 は全体的にみて定水位試験の値 (指針) よりもやや大きめとなっている傾向が特に夏期に見られる。この原因

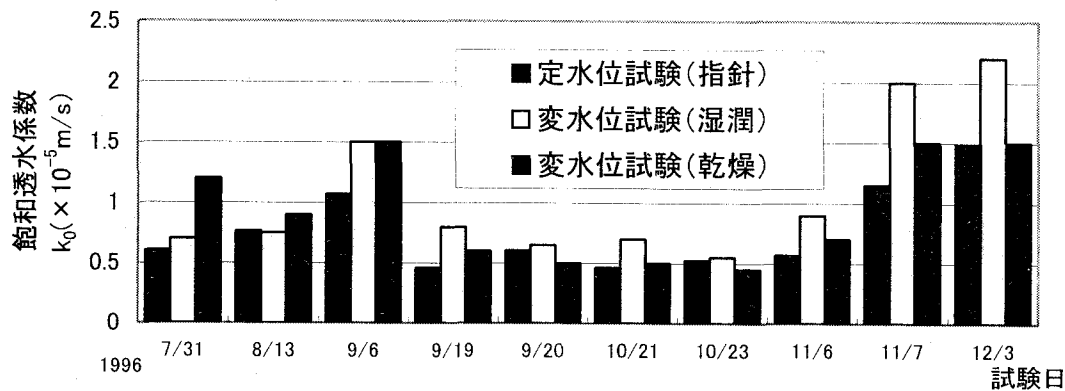


図-8 各種試験法による k_0 の算定結果 (小金井公園)

としては、試験実施地点での初期条件が実際の値よりも湿潤な状態に設定されている可能性が考えられる。このような差異はあるものの、透水係数の大小にかかわらず、3者はほぼ見合う値となっており、本研究で提示した評価方法の妥当性が確認できたと考えられる。

また、この解析を通じて、定数 a および ϕ_0 の定式化および類型化を図るための基礎データを得た自然地盤 (長池) と転圧地盤 (永山) とは異なる土壌タイプの小金井公園にも推定式の適用範囲を広げることが可能なこと、さらに、2つのパラメータ (定数 a 、 ϕ_0) のそれぞれの特性をある程度明らかにすることができた。

7. まとめ

本研究では、関東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ボアホール試験に基づき、乾燥条件下での変水位試験による浸透能力評価手法について検討を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 鶴見川流域での試験・解析結果より、関東ロームにかかわる標準的な土壌パラメータの妥当性を検証した。
- (2) 変水位試験の評価方法のうち、従来多用されてきたGlover式の問題点を具体的に明らかにした。
- (3) テンシオメータを用いた、長期の現地不飽和帯吸引圧観測値から得られた経験式を基に、土壌特性の異なる地区の深度別および季節別の乾燥履歴を定量化し、土壌の初期吸引圧条件の規定方法を整理した。
- (4) この条件を用いた小金井公園の試験結果の解析により乾燥時の変水位透水試験結果から飽和透水係数を推定し、定水位推定法および湿潤時の変水位試験結果との比較を行い、比較的よい評価精度が確認できた。

以上により、本研究で提示した変水位試験の評価手法の妥当性がある程度検証できたと考えられるが、一般化するにはまだ多くの課題が残されている。今回、

関東ロームを対象としたが、その他の土壌については浸透試験データのみならず初期条件にかかわるデータも不足しており、同レベルの議論にいたっていないのが現状である。また、乾燥時の変水位試験実施方法の見直しも必要と考えている。すなわち、試験回数、一般化しやすい試験条件など、実用化に向けて更に検討を要する。

参考文献

- 1) 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, 1995.
- 2) Stephens, D.B. and Neuman, S.P. : Vadose Zone Permeability Tests, Summary, Journal of Hydraulic Division, ASCE, No.108, pp. 623-639, 1982.
- 3) 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.
- 4) 岡泰道, 岩城孝之, 井上昇：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, 水工学論文集, 第41巻, pp. 13-18, 1997.
- 5) 吉沢拓也, 齋藤庸：現地浸透実験法の簡略法に関する検討—簡易浸透実験法の提案—, 日本工営技術情報, No. 19, pp. 119-126, 1998.
- 6) 岡泰道, 今井素生, 井上昇, 羽田誠：現地ボ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.
- 7) 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, 1984.
- 8) グエン・ソン・フン：雨水浸透施設における表層地盤の浸透能力係数と飽和透水係数との関係について, 雨水技術資料, Vol. 32, pp. 117-119, 1999.
- 9) 虫明功臣, 岡泰道, 小池雅洋：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), 第29回水理講演会論文集, pp. 131-136, 1985.

(2000. 10. 2受付)