

現地土壌特性の評価に基づく雨水浸透施設の浸透解析

Numerical Analysis of Infiltration Characteristics of Urban-storm-runoff
Infiltration Facility, Based on the Estimation of Soil Properties

東京大学生産技術研究所	正員	虫明功臣
東京大学大学院	学生員	○山田邦博
日本工営(株)	正員	桑原衛
東京大学生産技術研究所	正員	田村浩啓

1. はじめに

都市域における雨水流出抑制策ならびに地下水涵養機能の保全策として、各種の地下浸透施設が実用化されつつある。現状では、施設の設計浸透能の評価に際しては、現地での実物大の施設等を対象とした注水試験に基づくものとされている。これは、現地の浸透対象層の特性を直接に把握できるという点で最も確実な方法と考えられるが、注水試験に要する多量の水をいかに確保するか、あるいは、試験時の特定の条件をいかに解釈すべきか、等の問題点がある。したがって、浸透に係わる現地土壌特性の評価、およびそれを組み込んだ形での数値解析による浸透特性の評価法を確立することが、いっぽうで必要であると考えられる。本研究では、後者を目的としている。

浸透特性を浸透理論に基づいて数値解析する場合、まず浸透対象層の θ (含水率)– ϕ (吸引圧)関係、および k (不飽和透水係数)– ϕ 関係を定めなければならない。現地で採取した試料を対象として、 θ – ϕ 関係については室内試験により比較的容易に求めることができるが、 k – ϕ 関係を不飽和透水測定装置により定めることは、この試験にいくつかの難点が伴うために容易ではない。そこで本研究では、 θ – ϕ 関係より k – ϕ 関係の推定を試み、その妥当性を検討する。

さらに、地下浸透トレンチを対象に行なわれた現地注水試験の結果と、上述のようにして定めた θ – ϕ 関係、 k – ϕ 関係を用いて数値シミュレーションを行なった結果とを比較・対照する。これによって、小試料により土壌特性を把握することの妥当性および数値シミュレーションによる現象の再現性について議論する。

2. θ – ϕ 関係による k – ϕ 関係の推定

2.1 θ – ϕ 関係に基づく k – ϕ 関係の推定に関する理論¹⁾

Childs と Collis-George および Marshall の提唱した不飽和浸透現象のモデルは次の3つの仮定から成り立っていた。①土壌中の水の流れは連続した2つの孔のうち小さい方の孔に支配される。②一貫して連結している孔だけが全体としての透水係数に関与する。③土壌中の孔はランダムに連結している。

彼らのモデルは、これらの仮定の下に、半径0の孔からあるサクションに対して飽和する最大の径の孔の透水係数への寄与分を加え合わせれば、全体としての透水係数が求まるというものであった。

G. S. Campbell は、この概念に基づき、さらに土壌中の間隙径の分布関数を一様と仮定して透水係数を次のように記述した。

$$k = M \int_0^R \int_0^R r^2 F(r) dr F(r) dr \quad (1)$$

ここに、 r ：間隙径、 M ：定数、 R ：あるサクションに対して飽和する最大の径、 $F(r)$ ：間隙径分布関数

間隙径 r は、 θ – ϕ 関係と r – ϕ 関係(毛管上昇の式)を通して含水率 θ と関連づけられる。すなわち、 θ – ϕ 関係を次式で表わされると仮定し、

$$\phi = \phi_0 (\theta / \theta_0)^{-b} \quad (2)$$

ここに、 ϕ_e :エア-エントリーポテンシャル、 θ_0 :飽和含水率、 b :定数

かつ、毛管ポテンシャルを $\psi = -2r/r$ (ここに、 r :水の単位体積重量)と表わすと、

$$r = -(2r/\phi_e)(\theta/\theta_0)^b \quad (3)$$

含水率の変化分は、飽和している間隙の変化分に等しいから、 $F(r)dr = d\theta$ 。式(3)とこの関係を式(1)に代入して積分すると、 $k = M'\theta^{2b+2}$ (ここに、 M' :定数)。飽和透水係数を k_0 とすれば、

$$k = k_0(\theta/\theta_0)^{2b+2}, \text{ あるいは } k = k_0(\phi_e/\psi)^{2+2/b} \quad (4)$$

と表わされる。

2.2 関東ロームに対する $\theta-\phi$ 関係式の適合性

Campbell の理論を適用するためには、 $\theta-\phi$ 関係が式(2)の様に表わされることが必要である。ここでは、後の節において関東ローム層に設置された地下浸透トレンチを解析の対象とする関係上、関東ロームに対する式(2)の適合性を検討する。

まず、 ϕ_e を定めなければならないが、ここでは次の2つの方法を取り結果を比較した。① pF水分試験により得られた ϕ と θ の関係から、 ϕ の増加に伴い θ が θ_0 から大きく異なり始める ϕ の値を ϕ_e とする。②いくつかの仮定した ϕ_e に対して、最小2乗法により求めた $\theta-\phi$ 関係式からの標準偏差が最も小さくなる ϕ_e を採用する。

東京都昭島市昭島つつじヶ丘ハイツ内と東京大学生産技術研究所千葉実験所構内の各深度で容積100 ccの円筒試料を採取し、土柱法、吸引法および加圧板法により $\theta-\phi$ 関係を求め、それらに対する式(2)の適合性を検討した。図1(a),(b)に $\theta-\phi$ 関係の例を示す。①の方法では、値の細部については主観の入る余地があるが、今回対象とした試料に対しては10~30 cm H₂O の範囲内の値を定めることができる。図2(a),(b)には、②の方法により仮定した ϕ_e の値と標準偏差との関係を示す。この方法によっても①の結果と類似の値を定められることがわかった。したがって、まず $\theta-\phi$ 曲線から ϕ_e の概略値の見当をつけ、次に②の方法によって式(2)の関係を定めるのが合理的と考えられる。図3(a),(b)には、このようにして定められた式(2)と実験値の関係の例を示す。今回対象としたいずれの試料に対しても $\theta-\phi$ 関係は式(2)でよく表現できると判断される。

2.3 加圧型不飽和透水係数測定試験の概要

実験装置の概略を図4に示す。円筒試料(容積314 cc)を設置した槽内はコンプレッサーにより一定の圧力がかかり、試料内の水分は所定の吸引圧に保たれる。試料上下面にはメンブランフィルター(孔径0.8 μ の細密多孔フィルター)が密着され、所定圧力下で試料内に水分が補給される。試料内には、鉛直方向2 cmの間隔で2本のテンシオメータが埋め込まれ、2点間のポテンシャルの差が測定される。浸透量はマリOTT管からの給水量と排水量により測定し、不飽和透水係数は試料内の水分移動が定常に達した時点で次式により計算する。

$$k = -q / (\Delta h / \Delta z + 1) \quad (5)$$

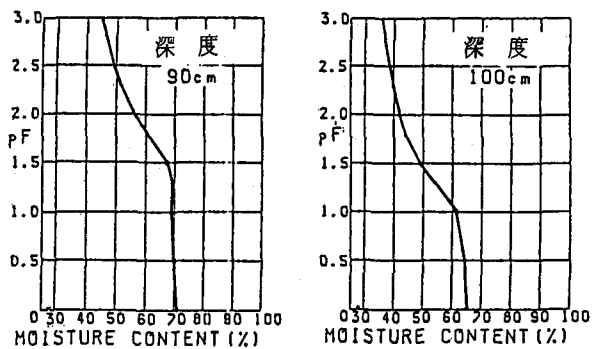
ここに、 $\Delta h : \Delta z$ 隔てた2点間の吸引圧の差、 q :浸透量

この実験は技術上いくつかの難点を含んでいるが、主なものは次の3つである。①低サクション時、試料上下面のフィルターが土の浸透能力以下である場合、試料内に水分が貯留され2本のテンシオメータの読みが同一となって勾配が計算できなくなる。②実験中にフィルターと土壌面の接触が悪くなることがあり、見掛け上透水係数が小さく測定される。③実験中に給排水チューブ内に気泡が生じ、水の給排水がスムーズに行なわれなくなることがある。

これらの難点のために、吸引圧の所要の範囲にわたって連続的に良好な試験結果を得ることが難しい。

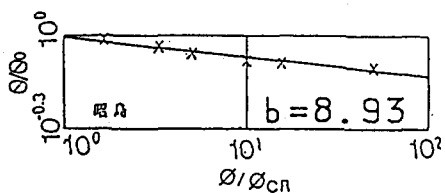
2.4 $k-\phi$ 関係の実験値と理論値の比較

加圧型不飽和透水係数測定試験で一連の $k-\phi$ 関係が求められた例は少ないが、良好な試験結果が得られた例を図5(a),(b)に×印で示す。図中にはCampbellの理論より定めた $k-\phi$ 関係、すなわち、式(2)の決定に際して求めた定数 b を式(4)に入れた関係式が実線で表わされている。なお、式(4)の決定に当たっては飽和

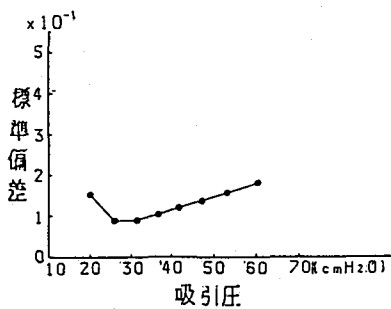


(a) 昭島つつじヶ丘ハイツ (b) 東大生研千葉実験所

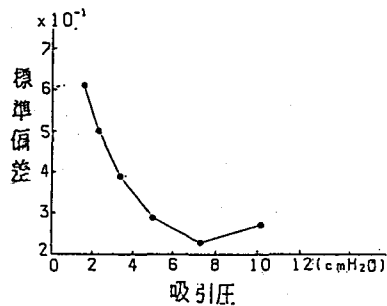
図1 関東ロームの pF 水分曲線の例



(a) 昭島つつじヶ丘ハイツ

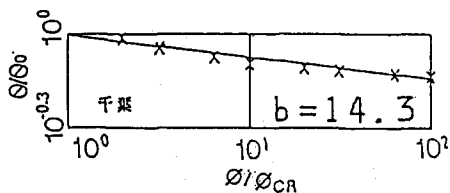


(a) 昭島つつじヶ丘ハイツ



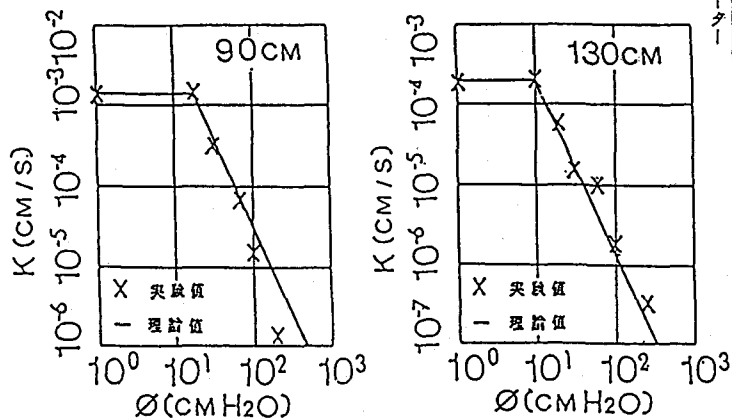
(b) 東大生研千葉実験所

図2 仮定した ϕ_e と (2) 式からの標準偏差の関係



(b) 東大生研千葉実験所

図3 関東ロームに対する式(2)の適用例



(a) 昭島つつじヶ丘ハイツ

(b) 東大生研千葉実験所

図5 $k-\phi$ 関係の実験値と理論値

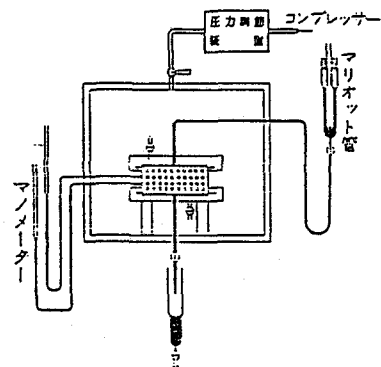


図4 加圧型不飽和透水係数測定装置の概略

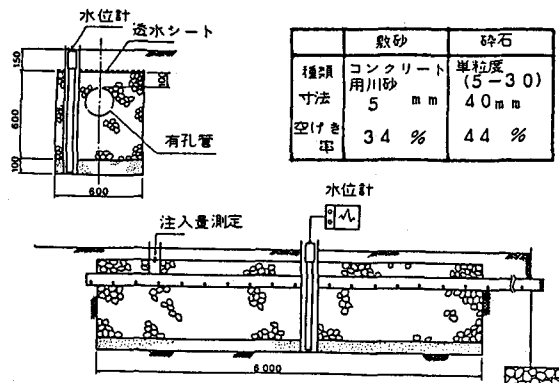


図6 対象トレンチの概要

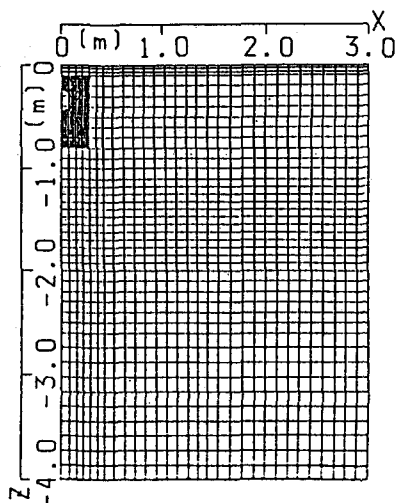


図7 計算領域およびメッシュ設定状況

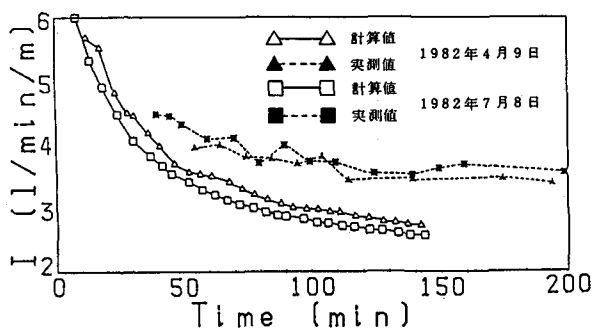
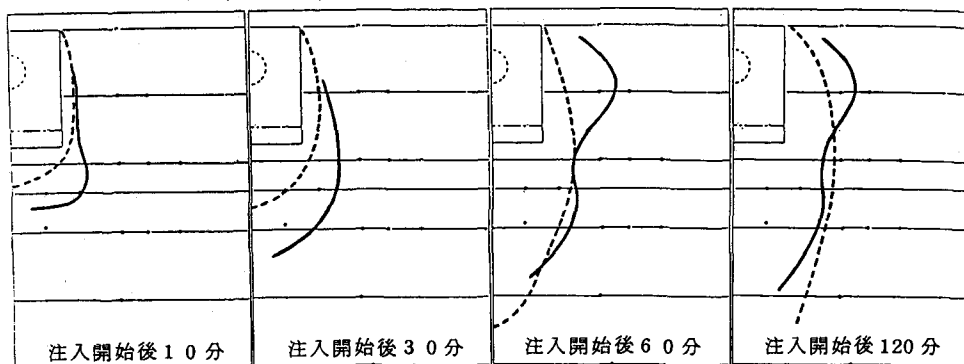
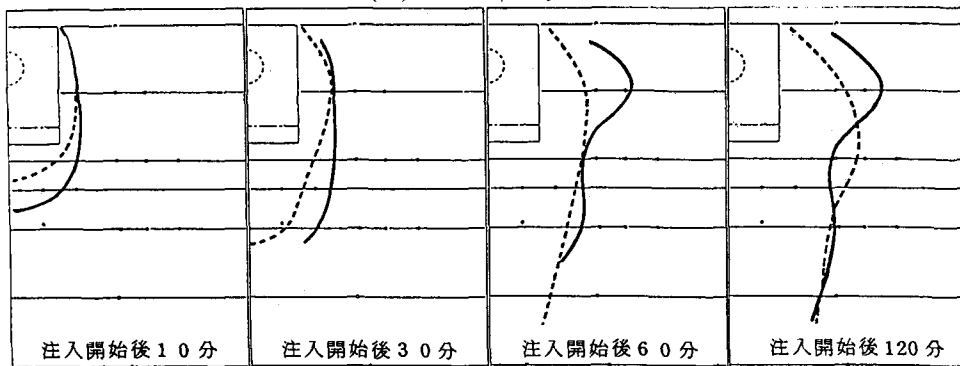


図8 浸透能の時間変化



(a) 1982年4月9日



(b) 1982年7月8日

図9 飽和域の拡大範囲

透水係数 k_0 の値を定めなければならないが、ここでは100cc円筒試料に対する変水頭透水試験により得られる値を採用している。

図5(a), (b)では理論値と実験値が類似の傾向を示しており、現状では少数の検証例ではあるが、関東ロームに対しては $\theta - \phi$ 関係より $k - \phi$ 関係を定めることができると考えられる。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析の対象とした注水実験の概要²⁾

注水実験の対象とした地下浸透トレンチは住宅都市整備公団が昭島つつじヶ丘団地に試験施工したもので、その諸元を図6に示す。トレンチ設置場所付近の土層は、表層約90cmまで造成工事によって攪乱されたローム質土壌、90~300cmの間が立川ローム層、それ以深は粗粒砂礫よりなる立川礫層であり、地下水位は地表面下10m付近にある。このトレンチの周辺にはテンシオメータを配置し、実験中の土壌の吸引圧の変化を測定している。注水実験開始後トレンチ上面に水位が達すると、その水位が保たれるように注水量を調節し、注水量(=浸透量)がほぼ一定となった時点で注水を停止する。解析の対象とした実験は、1982年4月9日および7月8日に行われたものである。

3.2 基礎式

直交座標系 x, y, z に対して、連続方程式とダルシー形の運動方程式より浸透方程式を吸引圧 ϕ で表現すると、次式が得られる。

$$f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (6)$$

ここに、 $f(\phi) = \partial \theta / \partial \phi$, k_i : i 方向の透水係数

ここではトレンチの軸に垂直な断面内での2次元流を考え、また透水係数は等方性として次式を用いる。

$$f(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (7)$$

これをADI法³⁾により差分化して数値計算を行なう。

3.3 計算条件

計算領域およびメッシュ設定状況を図7に示す。メッシュ間隔は、浸透初期大きなポテンシャル勾配で浸透現象が進むトレンチ周辺部では x, z 方向とも細かく、これから離れた所では大きく設定した。

境界条件は次の通りである。

- 1) モデルは左右対称であり、中心線を越えて移動する水分は無いと考えられるので、中心線上($x=0m$)は不透水境界とする。
- 2) 地表($z=0m$)では、乾燥時蒸発による上向きのフラックスが生じると考えられるが、短期間の水移動を扱う計算であるため、地表は不透水境界とする。
- 3) 実験結果より水平方向には水分があまり拡散しないと判断され、かつ計算時間を短縮するという便宜上の理由から、水平方向 $x=3m$ に不透水境界を設けた。
- 4) トレンチ内水位を各時間ステップで入力し、それに対応する水頭がかかるものとする。ただし、今回の対象は、定水位注入試験であるから、各時間を通じて一定水頭で計算を行った。
- 5) 従来の観測結果によれば、豪雨時にも地中深部の吸引圧の変化は小さい。こうした知見より深度4mに底部の境界を設定し、そこに実験前の深度2.1mのテンシオメータによる吸引圧の観測値を与え、注入期間中それが変化しないとした。

初期条件としては、実験開始前における各深度のテンシオメータ実測値を基に、深度2mまでは層別に水平方向一定とし、2m以深は一律に2.1mのテンシオメータの値を与えた。

計算に必要なパラメータは、 θ_0, ϕ_0, b, k_0 の4つである。トレンチ周辺の深度2.1mまでの各深度か

ら採取した試料に対して pF 水分試験により $\theta - \phi$ 関係を求めたが、その中から平均的と考えられる深度 90 cm のものを全層に適用する。各パラメータの値は 2 章で述べた方法で定められ、 $\theta_0 = 0.7113$ 、 $\phi_0 = -2.0 \text{ cm H}_2\text{O}$ 、 $b = 8.93$ 、 $k_0 = 1.6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ である。なお、 k_0 については同深度における 4 試料に対する試験結果のうち最大の k_0 値を採用した。

3.3 数値シミュレーション結果の考察

浸透能の時間変化、および飽和域 ($\phi \geq 0$) の拡大の時間経過について、実験と数値解析の結果を比較したのが、それぞれ図 8、図 9(a)、(b) である。図 8 に着目すると、計算値は時間の経過とともにほぼ一定値に近づくという定性的傾向を再現しているものの、量的には 2～3 割小さな値となっている。透水係数は試料に対する試験結果の中でも大きいものを採用したにもかかわらずこうした結果になることから、小試料に基づく透水係数の評価は現地よりかなり小さめの値を与えるものと考えられる。

図 9(a)、(b) に着目すると、約 1 m 以浅では計算値と実験値の間かなりの相違があるが、それ以深では両者は類似の傾向を示し、計算結果は飽和域が水平方向にあまり拡大しないという実験結果を再現している。現地の表層 50 cm 位までは、畑土のような土壌で構成され下層とはかなり土壌特性が異なるにもかかわらず、全層で同じパラメータを与えたことが、浅層における計算値と実測値の相違の原因になっているものと想像される。

4. まとめと今後の課題

本研究を通じて得られた主な結論と今後の課題を以下に列記する。

- 1) 関東ロームの $\theta - \phi$ 関係は、 $\phi = \phi_0 (\theta / \theta_0)^{-b}$ の形で表現できることを、東京都昭島市昭島つつじヶ丘ハイイツ内および東大千葉実験所構内の種々の深度の試料に対する pF 水分試験により確かめた。
- 2) $\theta - \phi$ 関係が上記の形式で表現できれば、Campbell の理論を適用して $\theta - \phi$ 関係から $k - \phi$ 関係を求めることができる。こうして求めた $k - \phi$ 関係 $k = k_0 (\phi_0 / \phi)^{2+2b}$ を不飽和透水係数測定装置により得られた関係と比較した。測定の困難さから実験値が得られた例は少ないが、両者はほぼ一致し、測定が比較的容易な $\theta - \phi$ 関係から $k - \phi$ 関係を定める可能性が示された。
- 3) 昭島つつじヶ丘ハイイツに設置された地下浸透トレンチに対する注水試験を対象に、上記の方法で定めた $\theta - \phi$ 関係、 $k - \phi$ 関係を用いて浸透方程式の数値解析を行った。今回の解析では浸透対象層全層に対して同一のパラメータを用いたが、浸透能ならびにトレンチ周辺の吸引圧の時間変化の定性的傾向は数値計算によってよく再現される。
- 4) 数値計算では浸透能がかなり小さめの値になっている。これは、飽和透水係数 k_0 を小試料によって評価したためと考えられ、今後は現地透水試験等により現地に則した k_0 の評価法を検討する必要がある。また、浅層で計算値と実験値の一致は悪いが、上層と下層でパラメータを変えた解析を行う必要がある。

【謝辞】昭島つつじヶ丘ハイイツでの注入試験は、住宅・都市整備公団建築部土木課が企画し、当研究室がこれに協力したものである。注入試験、資料整理等に当っては、当研究室の岡泰道、小池雅洋の諸氏および武蔵工大学生反町央君の協力を得た。なお、本研究は文部省科研費（自然災害特別研究(1)、代表者早稲田大学吉川秀夫教授）の援助を受けている。記して各位に深謝の意を表します。

【参考文献】1) G. S. Campbell ; A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Science, vol.117, no.6, 1974

2) 虫明, 桑原; トレンチ型雨水処理施設の浸透特性に関する研究, 第27回水講, 1983・2

3) P. J. Roache ; 高橋亮一訳; コンピュータによる流体力学(上), 構造計画研究所, 1978・5