

原位置におけるしらすの不飽和浸透特性と その測定法の検討

杉尾 哲*・岡林 巧**

しらす地盤の不飽和浸透特性を求めるための原位置測定法について検討した。その方法として、シリンドラ用いる方法と注水孔による方法の2種類を選定し、しらす地盤において浸透試験を行った。また不攪乱試料を採取し、室内透水試験を行ってしらすの不飽和浸透特性を求めた。これらの結果から、電力を必要とせずに多くの地点で簡易に測定できる測定法としては、シリンドラ用いる方法が有効であることが明らかになった。

Key Words : shirasu, *in-situ permeability tests, unsaturated permeability, double-ring infiltrometer, parameter estimation*

1. まえがき

南九州の特殊土として知られるしらすは、鹿児島県全域と宮崎県南部に分布する火山噴出物の堆積物であり、その成因によって軽石流堆積物の非溶結部、降下軽石堆積物およびこれらの二次堆積物に分類される¹⁾。このしらすは、乾燥状態においては安定性が高く、場所によっては数10mの高さのほとんど垂直に近い崖で自立することもまれではない。しかし、南九州が日本でも有数の多雨地帯に属することに起因して、しらす斜面は梅雨末期や台風時にしばしば崩壊する。特に平成5年夏には梅雨明け直前の集中豪雨と台風13号にもたらされた大雨によって、鹿児島県下の数ヶ所で相次いで崩壊する地盤災害が発生した²⁾。

このような特殊な地盤環境を反映して、しらす地帯での雨水排水施設や流出抑制施設あるいは地盤内構造物等の設計において、降雨下における地盤への浸透量あるいは地盤内圧力水頭などを評価することが重要であり、このために原位置の不飽和浸透特性を的確に把握することが強く要求されている。ここに、しらす地盤における原位置での雨水浸透の測定については、西・木村³⁾や雨宮・武藤・中野⁴⁾、永吉・岡林⁵⁾の報告などがみられ、採取した不攪乱試料による不飽和浸透特性の同定については、中野ら⁶⁾や西垣ら⁷⁾の報告などにみられるが、そのような報告は極めて少ないので実状である。これは、これまでのしらすの浸透に関する研究が主に攪乱試料についての室内試験^{8), 9)}によってなされていてこと、および設計・施工等において不飽和浸透が考慮されるようになつたのは、つい最近であるため、原位置での不飽和浸透

本論文の内容の一部は既発表¹⁰⁾であるが、本編はその後の研究成果を加えて取りまとめたものである。

*正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科
(〒889-21 宮崎市学園木花台西1-1)

**正会員 工修 鹿児島工業高等専門学校助教授 土木工学科

特性を求めるための測定法そのものが確立されていないことによっている。

これまでの研究にみられた原位置での測定結果から不飽和浸透特性を求める手法は種々あるが、最も基本的なものは、浸透量あるいは土壤内の圧力水頭などの時間的变化を測定して、これを数値解析で再現できるように浸透特性を同定する方法であろう。この例として、岡ら¹⁰⁾は降雨発生装置への供給水量と地表流出量との差から浸透量を測定して、鉛直一次元不飽和浸透解析から不飽和浸透特性を同定している。また、西垣らは不圧浸透層での揚水試験¹¹⁾で、また最近では、米国開拓局で使用されているE-19法を応用し、注水孔直下の圧力水頭の測定を行って¹²⁾軸対称鉛直二次元不飽和浸透解析から不飽和浸透特性を同定している。

そこで、本研究は、できるだけ多くの地点で簡易に行える不飽和浸透特性を求めるための原位置測定法を確立させることを目的として、その基礎資料を与るために、シリンドラ用いる方法¹³⁾と注水孔による方法の2種類の方法でしらす地盤において浸透試験を行うとともに、原位置で採取した不攪乱試料を用いた室内透水試験を行ってしらすの不飽和浸透特性を求め、これらの結果を互いに比較することによって上記の原位置測定法を検討^{14), 15)}することとした。

2. 不飽和浸透特性曲線と推定式

不飽和帶の浸透を解析するためには、対象とする地盤の境界条件のほかに、図-1のような不飽和土の浸透特性曲線を必要とする。ここに、地盤中の体積含水率 θ と大気圧を基準とした圧力水頭 ψ との対応関係を図示した水分保持曲線、および不飽和透水係数と飽和透水係数の比 k_r と θ との対応関係を図示した相対透水係数曲線は、種々の推定式で表現されており、その代表的なものは以下のようである。

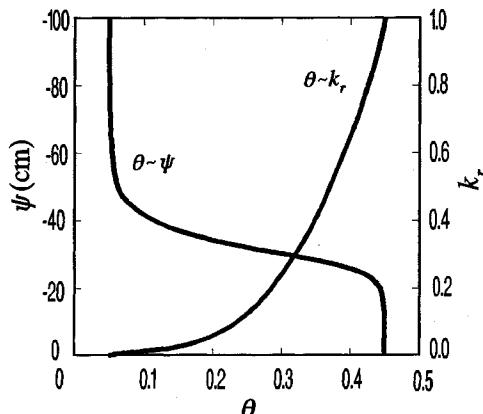


図-1 不飽和土の浸透特性曲線

Burdine式¹⁶⁾

$$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_c} \right)^{-1}, \quad k_r = S_e^{3+2\lambda} \quad \dots \dots \dots (1)$$

Campbell式¹⁷⁾

$$\left(\frac{\psi}{\psi_c} \right) = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\gamma}, \quad k_r = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2\gamma+3} \quad \dots \dots \dots (2)$$

Irmay式¹⁸⁾

$$k_r = S_e^3 \quad \dots \dots \dots (3)$$

Kroszynski式¹⁹⁾

$$S_e = \exp[b|\psi - \psi_c|] \quad \dots \dots \dots (4)$$

Mualem式²⁰⁾

$$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_c} \right)^{-1}, \quad k_r = S_e^{52+2\lambda} \quad \dots \dots \dots (5)$$

van Genuchten式²¹⁾

$$S_e = \frac{1}{1 + |a\psi|^n}^m, \quad k_r = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$m = 1 - 1/n$$

ここに、 S_e は有効飽和度であり、次式で定義される。

$$S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) \quad \dots \dots \dots (7)$$

また、 ψ_c は限界毛管水頭(cm), θ_s は飽和体積含水率(cm^3/cm^3), θ_r は残留体積含水率(cm^3/cm^3)である。

3. 不飽和浸透特性の原位置試験

これまでに行われた不飽和浸透特性の原位置試験では、降雨発生装置や揚水井あるいは注水孔などが用いられた。これらの試験法は互いに様々な特長を有するが、今後、多くの地点と多くの地質状況のもとで不飽和浸透特性を求めるためには、原位置測定法は、装置の設置が容易で測定に熟練を要しないこと、および測定に電力の供給を必要としないことが肝要であると考える。そこで、本研究においては、測定法として、地盤に打ち込んだシリンダからの浸透量の非定常変化を測定するものと地盤に注水孔を掘削して孔内水深の非定常変化を測定するものの2種類を選定した。

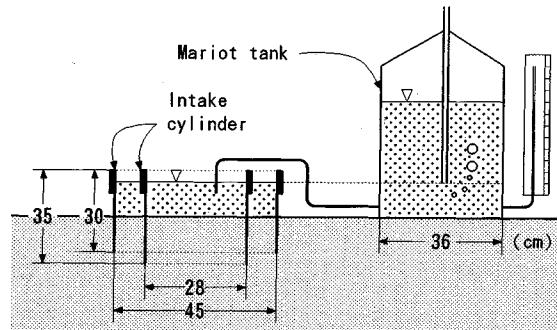


図-2 浸透量測定装置の概略図

しらす地盤の不飽和浸透特性の原位置試験は宮崎県北諸県郡高城町で行った。測定位置は表土を平面的に掘削除去して厚いしらす層の堆積が確認された場所である。

(1) シリンダによる非定常浸透量試験

a) 測定方法

この測定方法は、図-2のように地表面に打ち込んだシリンダ内の水深を一定に保ちながら地盤中に水を浸透させて、シリンダからの浸透量の時間的変化を測定するものである²²⁾。試験は、直径28cm、高さ35cmのシリンダと直径45cm、高さ30cmのシリンダをしらす地盤に二重に打ち込み、内径36cmのマリオットタンクから注水することによって、内側のシリンダ内の水深を一定に保つておいて行う。この時、シリンダからの浸透に伴ってマリオットタンクから給水されて、タンク内の水深が減るから、タンクに付属したマノメータによってタンク内水深の変化を測定し、その水深変化を用いて、内側のシリンダから地盤への浸透量の非定常変化を求める。なおシリンダの打ち込み時には、シリンダと地盤との密着性を保つために、たえず鉛直に打ち込むように配慮するとともに、打ち込み後には、シリンダと地盤との間にできた隙間に目詰めするために高濃度泥水を挿入するなどの注意が必要である。また、マリオットタンクはタンク内パイプの底部位置を設定することによって、内側シリンダ内の水深を設定することができるが、タンク内上部の空気圧が大気圧よりも低い状態にならないとシリンダ内の水位を一定に保つ機能を果たせない。したがって、試験準備時にタンクを密閉した状態で排水させて、タンク内に空気を吸い込む音を聞き、機能を果たす状態にあることを確認した。

測定は、あらかじめシリンダ内にビニール袋で遮水した状態で給水しておいて、ビニール袋の底を切開した時点から測定を開始した。本測定では、シリンダ内の水深は6cmであった。測定時の外側のシリンダ内への給水は、その水位と内側シリンダ内の水位とに相違が生じないよう配慮しながらマリオットタンクとは別に行った。ま

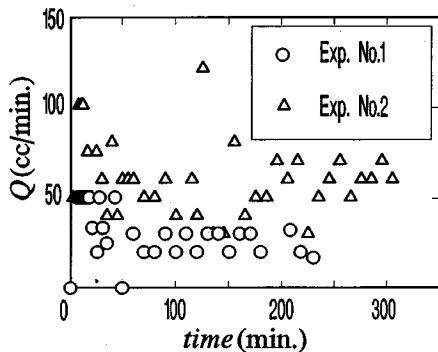


図-3 地盤への浸透量の変化

た測定はタンク内の時間的な水深変化がほぼ同じになるまで継続した。

b) 非定常浸透量の測定結果

上記のように測定した浸透量の時間的变化を図-3に示す。本測定ではマノメータの読み取りをmm単位の直読によって行っているため測定値がばらついているが、浸透量は試験開始直後に特に大きな値を示し、時間の経過とともに次第に減少して、3~4時間経過するとほぼ一定の浸透量を示す傾向にあることが分かる。この測定は、互いに5m程度離れた2ヶ所で測定したにもかかわらず、測定位置によって最終浸透量が異なった。

c) 非定常浸透の再現

原位置試験で発生させた不飽和浸透状況を有限要素法による飽和-不飽和浸透流の数値解析^{23), 24)}で再現することによって、不飽和浸透特性を同定した。軸対称鉛直二次元の流れの場における飽和-不飽和浸透解析の基礎方程式は、中心軸からの水平距離を r 、基準面からの鉛直向上きを z とすると、次式で表される。

$$\frac{d\theta}{d\psi} + \alpha S_o \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} + k \right) \quad (8)$$

ここに、 α は飽和領域で1、不飽和領域で0の値を持つ係数、 S_o は比貯留係数、 k は透水係数である。解析対象領域は、シリンドラ底面部分を密に要素分割し、シリンドラから離れるに連れて粗に分割すると、要素総数が164、節点総数が156となる。この程度の要素数の数値解析はパソコンで行えるから、後述するように種々の推定式の中で平均的な値を示すMualem式を対象として、浸透量の算定値と測定値の残差の平方和が最小になるようにパラメータを逐次近似しながら同定することとした。解析で与えた初期状態の圧力水頭は、南九州地域の年降水量約2,500mmの内、1,000mmが年間を通じて平均的に分散して定常的に地盤に浸透しているとみなして行った定常解析結果の圧力水頭の値を全節点に与えた。

まず、飽和透水係数 k_s とMualem式のパラメータの相違によって浸透量解析結果がどのように変化するかを調べ

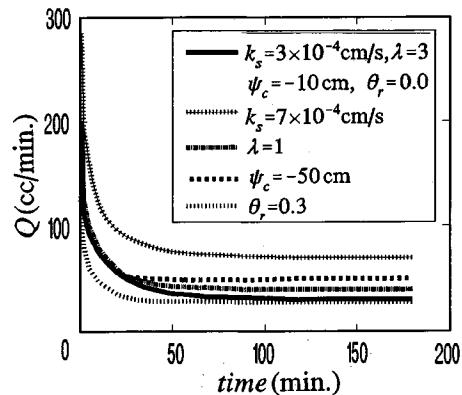


図-4 パラメータの違いによる浸透量と時間の関係

た。その結果の一部を図-4に示している。図中の実線は $k_s = 3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, $\lambda = 3$, $\psi_c = -10 \text{ cm}$, $\theta_r = 0.0$, $\theta_s = 0.4$ を用いた場合の解析結果であり、その他の曲線はこれらのパラメータの中の表示した値だけを変えた場合の解析結果を示している。これを参照すると、最終浸透量に大きく影響するのは ψ_c と k_s であり、 ψ_c の絶対値を大きくすると初期浸透量は変らずに最終浸透量が大きくなり、 k_s を大きくすると浸透量が全時間帯で大きくなることが分かる。 λ については、 λ を小さくすると k_s と同様に全時間帯で浸透量が大きくなるが、その変化は小さい。さらに θ_r を大きくすると初期浸透量が小さくなり、最終浸透量は変わらないことが分かる。

Mualem式のパラメータの内、飽和体積含水率 θ_s は、原位置で直径4.6cm、長さ10cmのシリンドラを地盤に打ち込んで採取した不攪乱状態のしらすについて土質試験を行って間隙率を求める。この値と同値であるとみなすことによって決定できる。また、飽和透水係数 k_s は、同様に採取した試料を用いて定水頭透水試験を行うことによって決定できる。

以上より、図-4の傾向と中野ら⁶⁾の結果を参考しながらMualem式のパラメータを逐次修正し、飽和透水係数も適宜修正して解析を進めていく。図-5, 6の解析結果を得た。解析結果の時間的な浸透量の変化は測定結果とよく一致している。このことから、この解析で求めた表-1の値が測定地盤の不飽和浸透特性を表していると考える。

次に、本測定は時間的な水深変化がほぼ同じになる時間帯まで行っており、この最終の時間帯においては浸透量はほぼ一定値を示し、シリンドラ内の地表面付近は飽和状態に近くなっていると考えられる。この時間帯の浸透流量を Q_s とおき、内部シリンドラの断面積を A 、地表面での動水勾配を I とおくと、飽和透水係数は次式によっても決定できることになる。

$$k_s = Q_s / (A I) \quad (9)$$

そこで表-1の浸透特性を用いて、図-5に示した測定

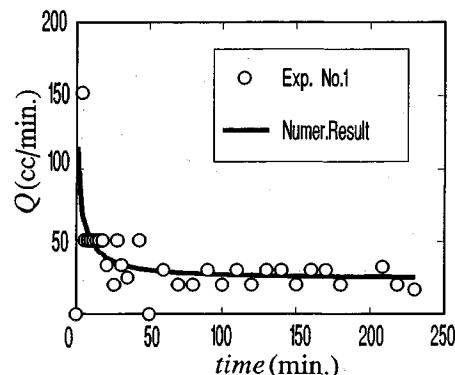


図-5 浸透量の実測値と解析値の比較(1)

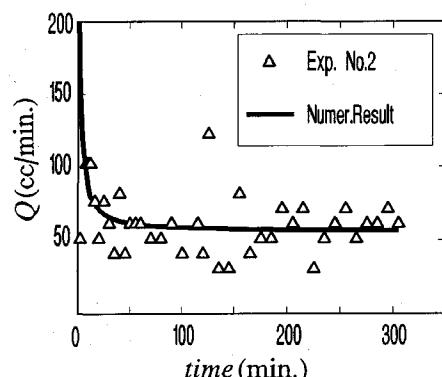


図-6 浸透量の実測値と解析値の比較(2)

表-1 Mualem式のパラメータと透水係数

パラメータ	Exp. No.1	Exp. No.2
ψ_c (cm)	-25.0	-25.0
λ	0.6	0.5
θ_r	0	0
θ_s	0.53	0.53
k_s (cm/s)	2.65×10^{-4}	6.10×10^{-4}

No.1におけるシリング中心での鉛直方向の圧力水頭と体積含水率の時間的变化を算定したものが図-7である。この結果より、測定の最終時間帯においては、地表面から17cm深までの区間が飽和体積含水率に達していることが分かるので、この部分の動水勾配を求めると2.55となつた。同様に求めた測定No.2の動水勾配は2.48であった。したがって、飽和透水係数を式(9)で概算するには、当該地盤においては動水勾配を2.5に選ぶべきであることが分かる。

(2) 注水孔による非定常水深試験

a) 測定方法

この測定方法は、図-8のように地盤に掘削した直径20

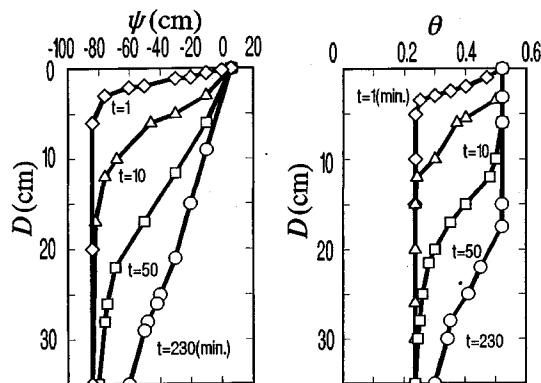


図-7 鉛直方向の圧力水頭と体積含水率

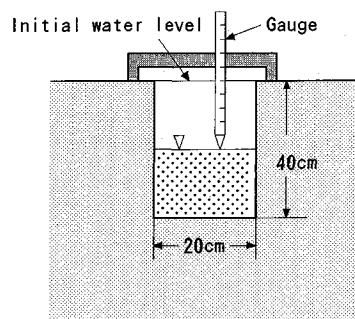


図-8 非定常水深測定の概略図

cm、深さ40cmの円柱状の注水孔から地盤中に水を浸透させて、注水孔内の水深変化を測定するものである。試験は、あらかじめビニール袋で遮水した状態で注水孔が満水状態になるまで注水しておいて、ビニール袋を切開した時点から測定を開始し、その後の水位の時間的変化を水位計で直読することによって行う。原位置試験としてはこの1回の測定で十分であろうが、今回は西・木村³⁾が行った原位置試験を参考にして、注水の繰り返しに伴う地盤中の水分量の変化についても測定するために、孔内水が無くなった時点で、すばやく満水になるまで再注水して、水深の測定を継続した。なお注水孔は互いに3m程度離れた位置に3個作成して、注水の繰り返し回数をそれぞれ2回、3回、4回と変化させる試験にあてた。また注水試験後に注水孔を中心とする幅160cm、深さ80cmの鉛直壁面を切り出し、その壁面の10cm間隔の格子位置で直径4.6cmのシリングを用いて厚さ3cm程度のしらすを採取して、その湿潤重量、乾燥重量および比重を測定して、体積含水率の鉛直方向の平面分布を求めた。

b) 非定常水深の測定結果

注水を3回繰り返す試験で測定した注水孔内水深の時間的变化を図-9に示す。この図から、孔内水が無くなる所要時間(以下、浸透所要時間という)は1回目より2

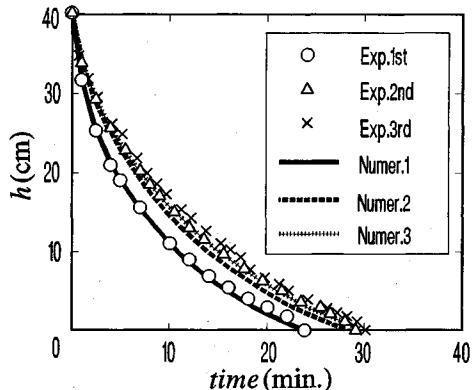


図-9 注水孔内水深の時間的変化

表-2 浸透所要時間の比較

	1回目	2回目	3回目	4回目
Exp. No.3	34.8	41.8	(単位: 分)	
Exp. No.4	23.8	29.1	30.1	-
Exp. No.5	30.8	39.0	41.3	42.9

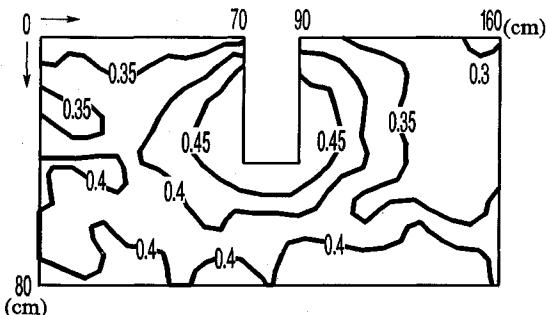


図-10 体積含水率の分布

回目、2回目より3回目のほうが長くなっているが、注水の回数を重ねるにつれて浸透所要時間の相違が小さくなっていることが分かる。このことから、注水に伴って孔周辺の飽和度がある程度高くなると、孔周辺の浸透状況があまり変化しなくなることが考えられる。また、3個の注水孔で測定した同一注水回数時の浸透所要時間を互いに比較すると、表-2のようになり、互いに3m程度離れた注水孔で測定したにもかかわらず、孔によって結果が異なっていることが注目される。

次に、測定した孔周辺の体積含水率の分布を図-10に示す。図-10は3回の注水試験が終了した後に測定したものである。測定結果は全体的に測定値が乱れていて、明瞭な体積含水率の分布を示していない。また試験終了後の壁面切り出し作業に約50分を要していて、その時間中にも浸透や乾燥が生じているので、厳密には試験終了直後の体積含水率ではない。しかしこの結果から、孔内

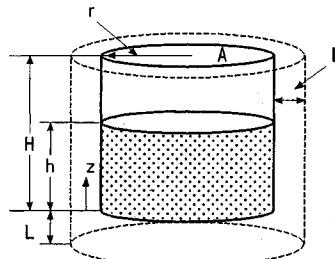


図-11 注水孔の概略図

水がほぼ注水孔の下半分を中心として浸透して、球状の体積含水率分布を形成していること、および注水孔の周りでは体積含水率がほぼ同じになっていることが分かる。

c) 注水孔内の水位変化

ここで、注水孔からの浸透について考えてみよう。注水開始後のある程度時間が経過した時点には、注水孔の周りに飽和された薄い筒状の部分が形成されると考えられるので、図-11に示すように筒の部分の厚さを注水孔の全周で一定と仮想してLとおく、孔内の任意の高さにおいて、筒の部分に内側から作用する圧力水頭を ψ_z 、外側から作用する圧力水頭を $\psi(\theta)$ とおくと、筒の部分を浸透する水の連続の式および側面と底面での運動の式は次のように表される。

$$-A \frac{dh}{dt} = 2\pi rh v_s + Av_B \quad (10)$$

$$v_s = k_s \frac{(\psi_z + z) - (\psi(\theta) + z)}{L} \quad (11)$$

$$v_s = k_s \frac{(\psi_z + 0) - (\psi(\theta) - L)}{L} \quad (12)$$

ここに、 r は注水孔の半径、 h は孔内の水深、 A は孔の断面積、 v_s と v_B は、それぞれ側面と底面でのダルシー流速、 z は孔底面から任意点までの高さである。筒の内外に作用する圧力水頭は位置と時間によって変化するから、式(11)の側面での動水勾配は式(12)の底面でのそれとは厳密には相違するが、筒の内側は等水頭線であり、 L を微小としているので、筒の外側もほぼ等水頭線と一致すると考えられ、動水勾配の相違はそれほど顕著でないことが想定できる。そこで、ここでは便宜上、これらを場所的に平均化して $I(\theta)$ とおく、時間的にも一定と仮定すると、式(10)は次式のように整理される。

$$-\frac{A}{2\pi rh + A} dh = k_s I(\theta) dt$$

孔の全高を H とおく、両辺を積分して、 $t=0$ で $h=H$ において整理すると、次式のような注水孔内の水位低下を表現する近似解を得る。

$$\frac{A}{2\pi r} \ln \frac{2\pi r H + A}{2\pi r h + A} = k_s I(\theta) t \quad (13)$$

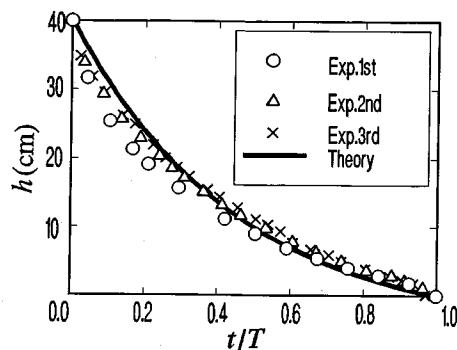


図-12 注水孔内水深変化の無次元時間表示

ここで $h=0$ となる浸透所要時間を $t=T$ とおくと、式(13)から次式が導かれる。

$$\frac{t}{T} = \frac{\ln[(2\pi rH+A)/(2\pi rh+A)]}{\ln[(2\pi rH+A)/A]} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

したがって、式(14)は、 $I(\theta)$ を場所的および時間的に一定と仮定できれば、注水孔内水位と t/T の関係が注水孔の形状だけで決定されることを示している。いま図-9の注水孔内水深の変化を t/T で整理すると図-12のようになる。これらを実線で示した式(14)の計算結果と比較すると、計算結果の水深の変化は注水初期に遅く、その後に速くなる傾向にあって、試験結果とは若干異なる曲線形状を示しているが、全体的には計算結果は試験結果とほぼ一致しているから、近似的には仮定が満足されていることが確認される。

次に、飽和透水係数の異なる2つの注水孔で、それぞれの浸透所要時間 T_1 , T_2 を測定した場合を考えると、式(13)より次式を得る。

$$\frac{\ln[(2\pi r_1 H_1 + A_1)/A_1]}{\ln[(2\pi r_2 H_2 + A_2)/A_2]} = \frac{(2\pi r_1/A_1) k_{s_1} I_1(\theta) T_1}{(2\pi r_2/A_2) k_{s_2} I_2(\theta) T_2} \dots \quad (15)$$

ここで、2つの注水孔の寸法が同じであれば、

$$k_s I_1(\theta) T_1 = k_s I_2(\theta) T_2$$

となり、 $I_1(\theta) = I_2(\theta)$ とみなせる場合は次式を得る：

$$k_{s_1} T_1 = k_{s_2} T_2 \dots \quad (16)$$

d) 注水孔からの非定常浸透の再現

注水孔からの非定常浸透を再現することによって地盤の不飽和浸透特性を同定するために、式(8)を用いて有限要素法による飽和-不飽和浸透流の数値解析を行った。解析対象領域は、注水孔周辺を密に分割し、注水孔から離れるに連れて粗に分割した。解析ではMualem式を対象として、注水孔内の非定常水深の算定結果が測定結果と一致するように、パラメータを定めることとなるしかし、この数値解析は、境界となる非定常時の孔内水深が注水孔からの浸透量によって決定されるので、計算は不安定であり、したがって計算実行上の時間きざみを十分に小さく設定することが必要である。このため、注

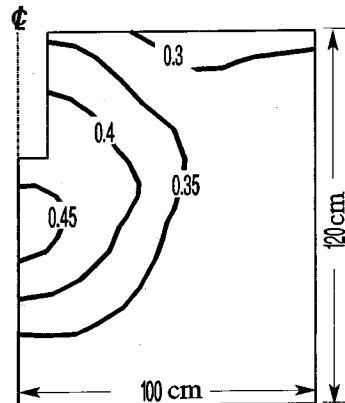


図-13 体積含水率の解析結果

表-3 Mualem式のパラメータと飽和透水係数

ψ_c (cm)	-26.0	試験番号	k_s (cm/s)
λ	0.6	Exp. No.3	6.24×10^{-4}
θ_r	0	Exp. No.4	9.17×10^{-4}
θ_s	0.53	Exp. No.5	7.28×10^{-4}

水孔からの非定常浸透を再現するには大型電子計算機でさえ多大の計算時間が必要とする。そこで、注水孔毎にMualem式のパラメータを同定することを断念し、パラメータは全注水孔で同一とみなし、飽和透水係数が互いに相違すると考えて同定した。

解析で与えた初期状態の圧力水頭は、注水しない状態で体積含水率の鉛直分布を測定しているので、測定した左右の断面での含水率の平均値に対応する ψ の値をMualem式から求めて各節点に与えた。いま、飽和透水係数 k_{s1} を用いた数値解析の浸透所要時間が T_1 で、測定した浸透所要時間が T_2 である時、その相違が余り大きくなれば $I_1(\theta) \approx I_2(\theta)$ とみなせるから、式(16)を用いることによって地盤の飽和透水係数 k_{s2} 求めることができる。このように求めたしらす地盤のMualem式のパラメータと飽和透水係数を表-3に示している。また表-3の値を用いた注水孔内の水深変化の算定結果を図-9に示している。これらの算定結果を測定結果と比較すると、多少の相違は見られるが、全体的にはよく一致している。

次に、注水試験終了後の体積含水率の分布について、壁面の切り出し時間(50分)を考慮して解析した結果を図-13に示している。解析結果の体積含水率は、注水孔の底部を中心とした球状の分布を示し、図-10の測定結果と傾向的に一致している。しかし解析結果には、注水孔底面の下部に体積含水率の最大値が現れており、測定結果にはその傾向は不明であった。このように、表-3の値を用いた体積含水率の解析結果を測定結果と比較する

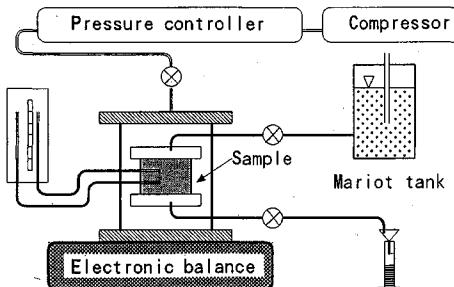


図-14 不飽和透水係数の測定

と、その分布は細かい点では相違するが、全体的には一致している。

以上の結果から、表-3の値は原位置におけるしらす地盤の不飽和浸透特性をほぼ表しているものと考える。

4. 不飽和浸透特性の室内試験

(1) 試験方法

原位置試験を行った場所から一辺約40cmの立方体の2個のしらすの土塊を不攪乱状態で採取し、図-14に示すような加圧式の不飽和透水係数測定器を恒温室内に配置して不飽和浸透特性を求めるための測定を行った²⁵⁾。本装置は大別して試料を入れる加圧室、圧力調整部および流量・水頭測定部からなり、直径10cm、高さ4cmのステンレス製の有孔円筒に試料を充填して、その上下両端に水頭差を与えてメンブレンフィルタを通して透水させる。この時、試料に与えた間隙水圧より大きい空気圧を加圧室内に与えると、試料にサクションが作用して、不飽和状態の浸透が発生するというものである。

しらすの不攪乱試料は、あらかじめ有孔円筒よりやや小さめの寸法に成型して有孔円筒に挿入し、円筒と試料の間にはパラフィンを流し込んで、パラフィンの硬化後に、すべての円筒小孔から試料にとどくまで針でパラフィンに小孔を開いた。試料中のサクションは、試料の二点にテンシオカップを設置し、マノメータにつないで測定した。メンブレンフィルタには、空隙径0.45μmのものを用いた。流量は給水側のマリオット管内の水深変化で測定するが、流量が小さい場合には下流側の排水口からの流出量を流量とした。また、本装置では、試料内の体積含水率の経時的变化を観察するために、加圧室を電子天秤に載せて、土試料の水分重量を測定している。この時、不飽和浸透特性は湿润過程と排水過程で異なるので、湿润過程について測定するために、種々検討の結果、本研究では次のように行った。まず、試料の装置への装着は試料が飽和状態のもとで行い、装着後に試料に作用するサクションを、いったん高サクションに設定する試料の水分重量が一定値を示す状態に落ち着くのを確認

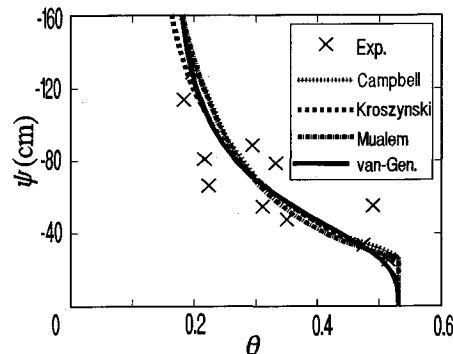


図-15 水分保持曲線

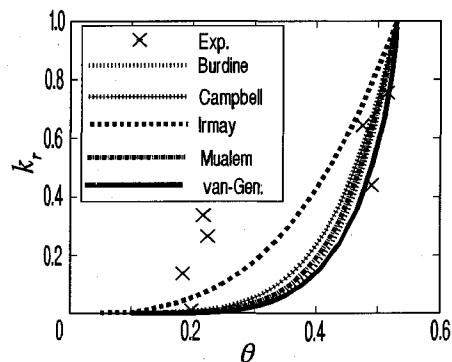


図-16 相対透水係数曲線

して、所定の低サクションを作成させるという手法である。なお、試料の体積含水率がほぼ一定値を示すまでは、約40時間以上を要した。

(2) 室内透水試験結果

測定した ψ - θ の対応関係および k_r - θ の対応関係を図-15, 16に示す。これらの試験結果はばらついているが、式(3)以外の各式から水分保持曲線を描けるので、室内透水試験で得られた測定値を用いて、各式の算定結果との誤差の平方和が最小になるように逐次近似しながらパラメータを同定すると表-4を得た。またそれらの算定結果を図-15に図示している。以上のようにパラメータが同定されると、式(4)以外の各式から相対透水係数曲線が計算される。これを図-16に図示しているが、Irmay式にはMualem式で算定した S_e の値を用いている。算定結果は、いずれの推定式もほぼ同じになるが、Mualem式は平均的な値を示すこと、およびIrmay式は他とは若干異なる値を与えることが分かる。

次に、不飽和透水係数 k と ψ の対応関係として整理すると図-17のようになる。図中には中野らが宮崎県東諸県郡塙原で採取した不攪乱状態のしらすについて室内試験によって求めた測定結果⁶⁾および宮崎県都城市で採取した攪乱状態のしらすについて排水過程で求めた室内試験

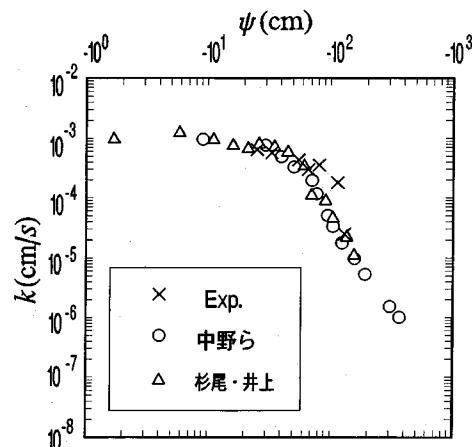
図-17 $k \sim \psi$ 曲線

表-4 推定式のパラメータ

	Burdine式 Mualem式	Campbell式	Kroszynski式	van Genuchten式
$\psi_c(\text{cm}), a(\text{cm}^{-1})$	-25.98	-26.82	-23.71	0.0203
$\lambda, \gamma, b(\text{cm}^{-1}), n$	0.593	1.558	-0.018	3.1699
θ_r	0	-	0.1325	0.1501
θ_s	0.5301	0.5301	0.5301	0.5301

結果²⁶⁾を合わせて図示しているが、これらは互いに一致していて、 $k \sim \psi$ 曲線上では試料の攪乱・不攪乱の状態および湿润・排水の過程による透水性の違いが顕著に現れないようである。なお、この結果から外挿すると、宮崎県都城地域の不攪乱状態のしらすの飽和透水係数は、 $3 \sim 9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 程度の値であることが推定できる。

5. 同定結果の比較

以上のように、2種類の原位置試験と室内試験によつてしらすの不飽和浸透特性を求めた。シリンダ用いた原位置試験から同定した結果を表-1に、注水孔用いた方法からの同定結果を表-3に、室内試験結果から同定したものを見表-4に示している。これらを比較すると、Mualem式のパラメータについては互いに一致した結果になっていることが分かる。しかし、飽和透水係数については数値が若干異なっている。透水係数については、均質とみうけられるしらす地盤の、互いに数mしか離れていない試験位置での測定結果から求めたものであり、もっと一致した結果が得られるものと考えられたが、この様な結果となった。ここに、注水孔による試験法はシリンダ用いる試験法に比べて測定上の設定条件の違いが起りにくい方法であるにもかかわらず、表-2に示したように浸透所要時間が注水孔ごとに相違する結果となったこ

と、および注水前に測定した体積含水率の分布が非常に複雑であったことを考慮すると、均一に堆積しているとみなされるしらす地盤においても、微視的には均一ではなく、同定結果の相違は地盤の局所的な浸透特性の違いが忠実に現れたものであると考えられる。したがって、シリンダを用いる方法と注水孔を用いる方法の2種類の原位置試験法は、いずれも測定位置の不飽和浸透特性を測定できる有効な試験法であるといえる。しかし、注水孔による非定常水深試験法は、同定解析に長時間の数値計算を要することを考慮すると、シリンダによる非定常浸透量試験法が最も有効であると考えられる。

6. 結語

しらすの不飽和浸透特性を求めるための原位置測定法を確立させるための基礎資料を与えることを目的として、シリンダを用いる非定常浸透量試験と注水孔による非定常水深試験の2種類の原位置浸透試験を行い、その結果を不攪乱試料による室内透水試験結果と比較して検討した。

この結果、原位置に打ち込んだシリンダからの浸透流量の時間的変化を測定して、その流れの場の飽和-不飽和浸透流について数値解析を行い、浸透流量の算定結果が実測結果と一致する様に不飽和浸透特性を決定する非定常浸透量試験法は、試験装置も大規模でなくて電力の供給を必要とせず、測定方法そのものが熟練を必要としない簡易な試験法であり、しかも比較的短時間の同定解析ですむ有効な方法であることが明らかになった。

今後、この方法を用いて、原位置試験が多くの地点で実地され、しらす地盤における降雨浸透に伴う地盤災害の防止の基礎資料を提供することとなれば幸いである。

最後に、本研究は文部省科学研究費一般C（課題番号、02650350；代表 岡林 巧）の補助を受けた。また、原位置試験および室内試験には、宮崎大学大学院生 桑畠英紀氏（現、国際興業㈱）および学部学生 松本俊二氏（現、㈱エイトコンサルタント）の熱心な協力を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山内豊聰監修・土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土、九州大学出版会, pp. 145~169, 1983年7月.
- 2) 平田登基男：1993年夏鹿児島豪雨災害、土と基礎, Vol. 41, No. 11, pp. 83~84, 1993年11月.
- 3) 西 力造・木村大造：シラス地帯研究（第2報）シラス層における含水量及びその力学的性質に及ぼす影響、鹿児島大学農学部学術報告, No. 1, pp. 18~27, 1925年.
- 4) 雨宮 悠・武藤 黙・中野政詩：台地不飽和土壤水分帯域の保水と移動－シラス地帯における土の特性と水の動態（III）、農業土木学会論文集、第93号, pp. 13~21, 1981年6月.
- 5) 永吉 馨・岡林 巧：地山しらす斜面における雨水の不

- 飽和浸透に関する試験、鹿児島工業高等専門学校研究報告、No. 20, pp. 99~104, 1986年1月。
- 6) 中野政詩・雨宮 悠・武藤 真・塩沢 昌・中村忠春: 宮崎県東諸県郡塚原シラス台地の水文地質構造—シラス地帯における土の特性と水の動態(II), 農業土木学会論文集, 第93号, pp. 7~12, 1981年6月。
 - 7) 西垣 誠・森田 修・和美 博: 不搅乱不飽和土の浸透特性の求め方, 第24回土質工学研究発表会講演集, No. 2-2, pp. 1645~1646, 1989年6月。
 - 8) 藤本 廣: 亂したしらすの不飽和(毛管)透水係数の評価について、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 199~205, 1987年12月。
 - 9) 榎本雅夫・阿部廣史・川上 浩: 不飽和土の水分保持特性と浸透特性, 第24回土質工学研究発表会講演集, No. 2-1, pp. 311~314, 1989年6月。
 - 10) 岡 太郎・角屋 隆・野口美具: 宅地域の雨水浸透と流出特性, 京大防災研究所年報, 第23号B, pp. 227~238, 1980年。
 - 11) 竹下祐二・西垣 誠・河野伊一郎: 不圧帶水層での揚水試験結果による不飽和浸透特性の算定法, 土質工学会論文報告集, Vol. 30, No. 2, pp. 159~170, 1990年6月。
 - 12) 西垣 誠・竹下祐二・河野伊一郎・千々松正和: 原位置における不飽和浸透特性の測定に関する考察, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集III, pp. 894~895, 1991年9月。
 - 13) 土壌物理性測定法委員会編: 土壌物理性測定法, 養賢堂, pp. 168~173, 1978年。
 - 14) 桑畑英紀・杉尾 哲・岡林 巧: しらす地盤における野外浸透実験, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集II, pp. 578~579, 1992年9月。
 - 15) 杉尾 哲・桑畑英紀・岡林 巧: しらすの不飽和浸透特性

の測定, 自然災害西部地区会報・論文集, 第15号, pp. 18~26, 1993年2月。

- 16) Burdine, N.T.: Relative permeability calculations from pore size distribution data, Petrol. Trans.AIME., No.198, pp.71~78, 1953.
- 17) Campbell, G.S.: A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Sci., No.117, pp.311~314, 1974.
- 18) Irmay, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Trans. AGU., Vol.35, No.3, pp.463~467, 1954.
- 19) Kroszynski, U.: Flow in a vertical porous column drained at its bottom at constant flux, J. Hydrology, Vol.24, pp.135~153, 1975.
- 20) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated media, Water Resour. Res., Vol.12, pp.513~522, 1976.
- 21) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, No.5, pp.892~898, 1980.
- 22) 小川 進・和泉 清: 流域の浸透パラメーターとその評価法, 土木学会論文集, No. 423 / II -14, pp. 121~129, 1990年11月。
- 23) Neuman, S.P.: Saturated unsaturated seepage by finite elements, Proc. ASCE HY., Vol.99, No.12, pp.2233~2250, 1973.
- 24) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No. 264, pp. 87~96, 1977年8月。
- 25) 岩田進午: 排水過程の水分運動の特質と圃場容水量, 農技研報B, No. 16, pp. 149~176, 1966年。
- 26) 杉尾 哲・井上 徹: 不飽和土の浸透特性の測定, 宮崎大学工学研究報告, 第36号, pp. 59~66, 1990年9月。

(1993. 12. 2 受付)

UNSATURATED PERMEABILITY OF SHIRASU AND ITS IN-SITU MEASURING METHODS

Satoru SUGIO and Takumi OKABAYASHI

In-situ tests for measuring unsaturated permeability of shirasu are carried out by means of two methods. The first is the method that measures the variation of infiltration rates from the double-ring infiltrometer. The other is one that does the variation of water depth in the recharging holes. Unsteady infiltration in the tests are numerically simulated to identify the parameters of Mualem's equation. The parameters are also identified from the laboratory test values that measured from the undisturbed soil. These results are compared and confirmed to be coincide with each other. However, evident difference is revealed in the numerical simulation; i.e. the computation for the recharging hole needs great amount of running time. From the results, it is cleared that infiltration test with infiltrometer is easy handling and useful method for the measurement in many locations.