

中部大学工学部 杉井 俊夫  
 中部大学工学部 山田 公夫  
 中部大学大学院 植村 真美

1.まえがき

不飽和土の浸透特性（不飽和透水係数及び水分特性曲線）を計測する方法は、表-1 に示すように、流動条件下で大別することができる<sup>1)</sup>。定常法においては、定常流に至るまでに多量な時間を要することや、定常に至る前に誤って計測してしまう問題があった。一方、非定常法については、短時間での測定が可能であるが、これまで土壌水分計としてRI(中性子線、 $\gamma$ 線)計測器を使用していたため、装置の取り扱いには十分な注意が必要であった。しかし、近年、TDR(Time-Domain Reflectometry), FDR(Frequency-Domain Reflectometry), ADR(Amplitude-Domain Reflectometry)法<sup>2)3)</sup>といった、電磁波による水分測定器具が開発され、以前より簡便かつ合理的に不飽和浸透特性が算出できるようになった。本研究室においても、ADR 法を用いて、極めて短時間で不飽和土の浸透特性を求めるとされている瞬時水分計測法<sup>4)</sup>（非定常法）の試験を行っている。しかし、定常法と非定常法の試験法の違いによるばらつきが報告されており<sup>5)</sup>、本報告は、pF 試験と不飽和透水試験を同時に実施できる加圧法（定常法）<sup>6)</sup>の試験結果を用いて、定常法と非定常法の比較について検討を行っている。

表-1 不飽和透水試験の分類<sup>1)</sup>

不飽和透水係数	定常法・非定常法	原理	方法
	定常法	圧力制御	フラックス制御法
加圧法			
非定常法	流出流入計測	経時的水分分布計測	加圧板流出法
			One-step 法
	Boltzmann法		
	Moisture moment法		
	Vertical infiltration法		
	Crust-topped columns法		
	Sorptivity法		
	熱風 法		
瞬時水分計測法			
	逆解析法	Multi-step Outflow Method	

2.定常法と非定常法による不飽和透水試験

2.1 定常法（加圧法）

(1) 試験の概要

加圧型不飽和透水試験装置の概要図を図-1 に示す。基本的には、Richards 型試験装置をベースにしているが、圧力室内の鋼製の供試体リングに小孔を設けて加圧できるようになっている。また、圧力室に負荷する空気圧とともに給・排水ピュレットにも背圧を負荷できるようになっており、空気圧を制御することにより供試体内のサクションを変化させることができる。さらに給・排水ピュレットが各々2 連となっており、0.01ml までの流量が測定可能である。空気圧制

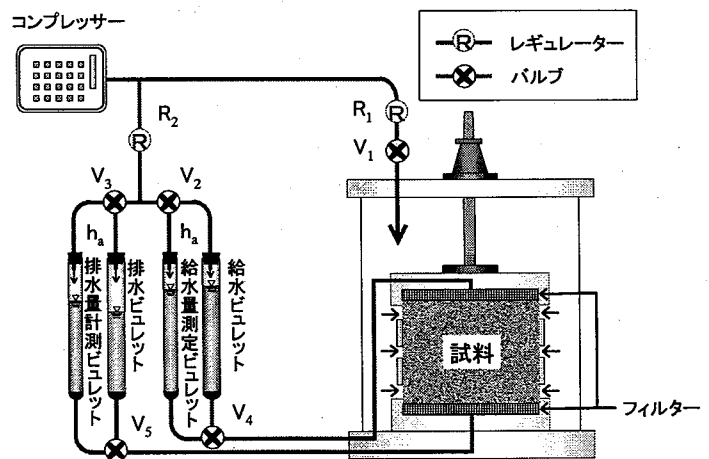


図-1 加圧型不飽和透水試験

Measuring unsaturated Hydraulic conductivity and soil water characteristic curves in laboratory.  
 T.Sugii, K.Yamda and M.Uemura (Chubu University)

御による供試体内に発生するサクシヨンの説明のため、図-2 に原理図を示す。図-2 に示すように試料上端の圧力水頭  $H_{w1}$ 、下端の圧力水頭  $H_{w2}$ 、ピュレット内空気圧  $h_a$ 、側方空気圧  $U_a$  とする、試料上端のサクシヨン  $S_1$ 、試料下端のサクシヨン  $S_2$  はそれぞれ

$$\begin{aligned} S_1 &= U_a - (H_{w1} + h_a) \\ S_2 &= U_a - (H_{w2} + h_a) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。

給水量、排水量、水位の読みを一定時間おきに測定し、試料内の水の流れが定常になるまで続ける。本実験は、準定水位試験であり、定水位の許容範囲とし、その水位変動を 0.3 から 0.4cm と設定して測定を行った。 $\Delta t$  時間中の水頭差  $\Delta H$ (cm) を透水前の給水ピュレット・排水ピュレットの水位  $H_1$ (cm)、 $H_2$ (cm)、透水後の水位  $H_1'$ (cm)、 $H_2'$ (cm) を用いて次のように算出する。

$$H = \frac{(H_1 - H_2) + (H_1' - H_2')}{2} \quad (2)$$

通水時間中の給水量と排水量が等しくなれば、その時の水の流れは定常流であると考え、その時の流量、動水勾配から不飽和透水係数を求めた。図-3 に示すフィルターの損失水頭を考慮して式(3)から不飽和透水係数を算出した。

$$\begin{aligned} k &= \frac{L \times Q}{h \times A} \\ &= \frac{L \times Q}{A \left[ H - \frac{d \times Q}{A} \left( \frac{1}{k_{f1}} + \frac{1}{k_{f2}} \right) \right]} \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、空気圧制御によるサクシヨンを段階的に変え透水試験を行うごとに、流入・流出量を記録しておき、試験後の含水比から逆算して得られる水分量を利用する「連続試験」により、不飽和透水係数と水分特性曲線が同一供試体で求めることができるのも、この試験装置の特徴である。今回、用いた試料は、既に一斉試験<sup>5)</sup>が行われた信頼性ある表-1 のガラスビーズを用いた実験を行った。

#### (2) 加圧法により評価された不飽和浸透特性

前述した加圧法不飽和透水試験で得られた標準砂とガラスビーズの水分特性曲線と不飽和透水係数の結果を図-4,5,6,7 に示す。粒径が小さいガラスビーズの方が、試料への空気が浸入する空気浸入値(Air Entry Value)が 4kPa と大きく、不飽和透水係数も小さいこ

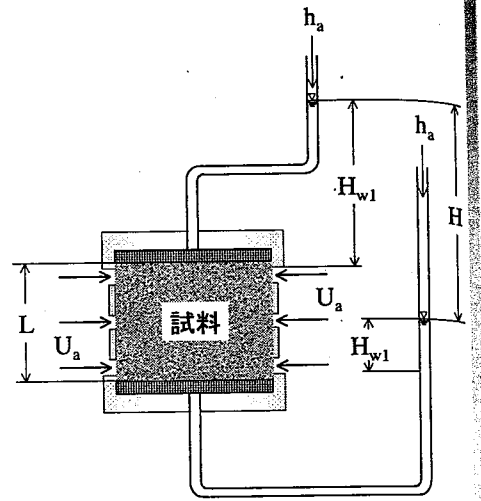


図-2 空気圧制御によるサクシヨン制御

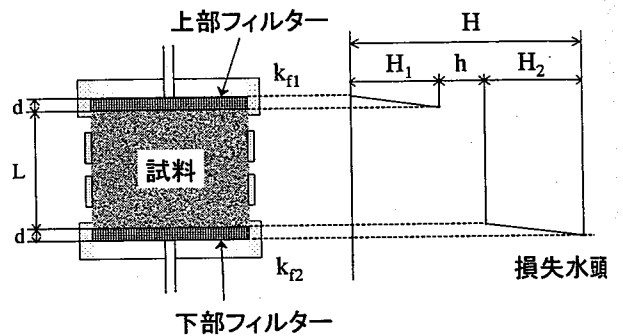


図-3 フィルターおよび試料における損失水頭

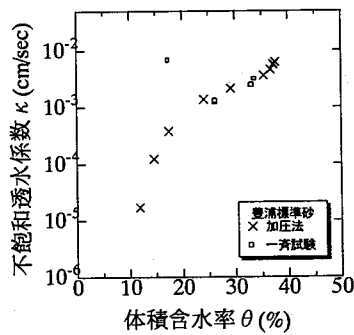


図-4 不飽和透水係数(豊浦標準砂)

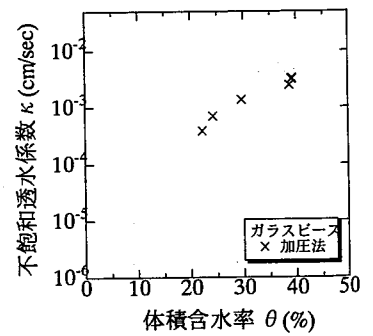


図-5 不飽和透水係数(ガラスビーズ)

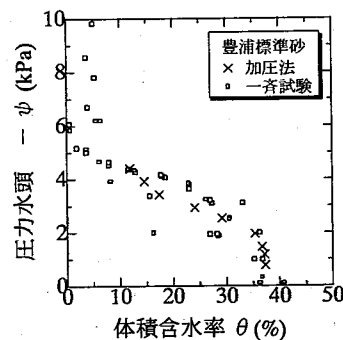


図-6 水分特性曲線(豊浦標準砂)

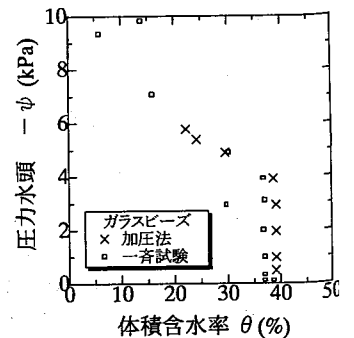


図-7 水分特性曲線(ガラスビーズ)

とがわかる。また、飽和付近では榎本ら<sup>7)</sup>の実験結果のように不飽和透水係数の低下が急激に変化する傾向が得られている。また、同時に示した一斉試験で得られた結果とも、ほぼ一致しており、本試験結果は信頼性の高いものと判断できる。

## 2.2 非定常法 (瞬時水分計測法)

### (1) 試験の概要

図-8に、今回用いた、瞬時水分計測法の試験装置を示す。7列製角柱 (幅10cm・奥行き10cm・高さ50cm) を使用し、上部から10cm間隔でテンシオメータとADRを各面に設置できるようにした。それぞれ間隙水圧と体積含水率が測定されるようになっている。試験試料、密度 ( $\rho_d = 1.51 \text{g/cm}^3$ ) とともに加圧法と同一にした。今回、乾燥した試料をセットし、下端から湿潤させた後、排水過程の測定を行った。排水面は、図-8中のA点

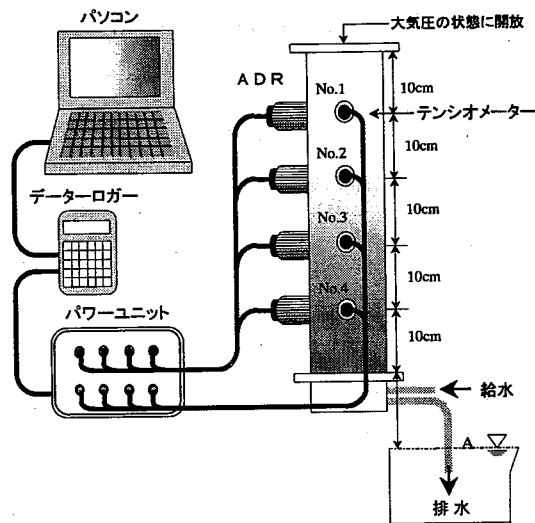


図-8 瞬時水分計測試験装置

(試料下端を豊浦標準砂は  $-1.76 \text{kPa}$ , ガラスビーズは  $-1.96 \text{kPa}$  で固定) とする。

### (2) 透水係数及び水分特性曲線の算出方法

鉛直一次元排水実験を対象にした Darcy 式は次式のように表すことができる。

$$\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = K(\theta) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (4)$$

さらに式(4)を展開し、任意の測点の各時間での不飽和透水係数を求める式は(5)式となる。

$$K(\theta) = \left( \int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right)_{z,t} / \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)_{z,t} \quad (5)$$

式(5)の分母、分子を以下のように求める。

#### a) 流速の求め方 (分子)

① 図-9に示すように、土柱内での各計測点での体積含水率の経時変化を計測する。

② 図-9で示す各時間の体積含水率を各計測点での体積含水率の関係に入れ替え、図-10のように整理する。

③ 図-10より任意の点 (例えば No.3) を時間  $t_1$  から  $t_2$  の間に通過する流量は、図-10中の斜線で示す値となる。この面積 A とし、(6)式の分子は次式で計算ができる。

$$\left[ \int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z_1, t_1}^{z_2, t_2} = \frac{A}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

#### b) 動水勾配の求め方 (分母)

① No.1 から No.4 の圧力水頭の経時変化を、図-11に示す。

② 任意の点 (No.3) における動水勾配は任意の点を挟む上下の計測点 (No.2 と No.4) の圧力水頭の差と高さから次

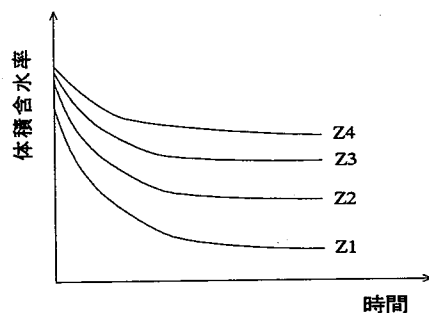


図-9 体積含水率の経時変化

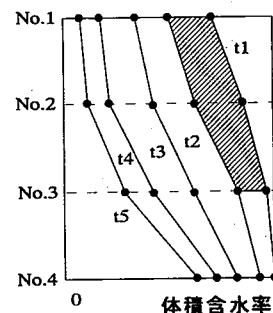


図-10 体積含水率の鉛直分布

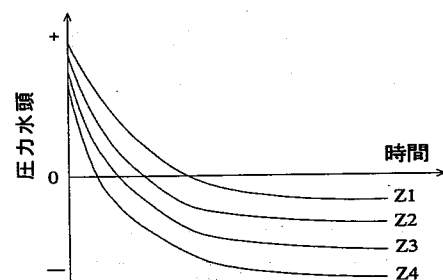


図-11 圧力水頭の経時変化

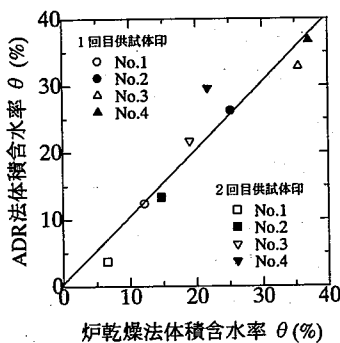


図-12 ADRキャリブレーション

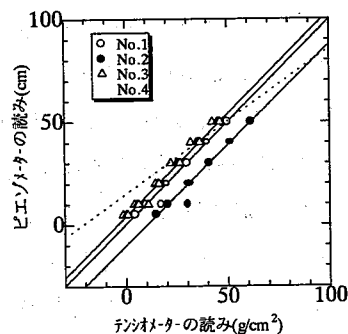


図-13 マイクロテンシオメータキャリブレーション

式のように容易に求めることができる。

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1\right)_{z_3, \frac{z_1+z_2}{2}} = \left(\frac{\psi_2 - \psi_4}{z_2 - z_4}\right)_{\frac{z_1+z_2}{2}} + 1 \quad (7)$$

今回、体積含水率、圧力水頭を計測する際に ADR とマイクロソメーターを使用した。キャリブレーションの結果を図-12,13 に示し、これにより補正を行うこととした。また、計測時の体積含水率と圧力水頭の値より水分特性曲線を同時に求めることができる。

### (2) 瞬時水分計測法により評価された不飽和浸透特性

図-14,15 に体積含水率の経時変化を示す。豊浦標準砂、ガラスビーズとも、時間の経過とともに、体積含水率が減少し、排水されていることがわかる。しかし、豊浦標準砂の No.4 においては、図-16 の No.4 (鉛直高さ 40cm) からわかるように、体積含水率の変化がない。これは、最下端の ADR センサーの位置での負荷圧力が、試料の A.E.V (空気浸入値または毛管上昇高) を越えていないためである。また A.E.V が大きいガラスビーズの方が、30 秒以後、水分量の低下を生じている原因は、試料上部の保水性が高く上部からの水が補給されていないことに起因するものと考えられ、図-16,17,18,19 に示されるように試料による水分分布および圧力分布が異なることは大変興味深い。図-20,21,22,23 に非定常法の不飽和透水係数と水分特性曲線の結果を示す。

### 2.3 2つの試験法による結果の比較

加圧法、瞬時水分計測法の2つの方法による結果を図-24,25,26,27 に示す。ここで、水分特性曲線図中の実線、波線は van Genuchten モデル<sup>8)</sup> (式(8)) によるフィッティング関数を示す。また、その関数から Mualem モデルを用いて不飽和透水係数を推定した推定曲線 (式(9)) が不飽和透水係数図中の実線、波線である。

加圧法と瞬時水分計測法の不飽和透水係数の実験結果についてみると非常に良い精度で一致していることがわかる。一斉試験の結果からも、十分信頼性が高い結果であるといえよう。これ

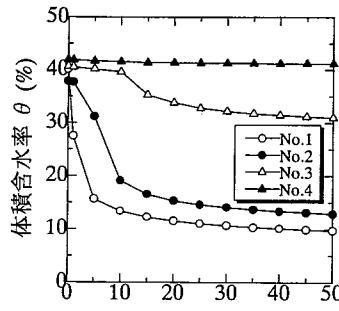


図-14 体積含水率の経時変化 (豊浦標準砂)

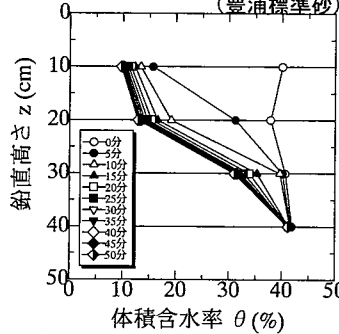


図-16 体積含水率の鉛直分布 (豊浦標準砂)

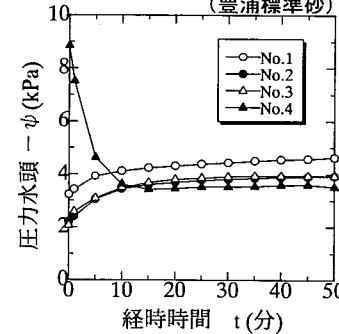


図-18 圧力水頭の経時変化 (豊浦標準砂)

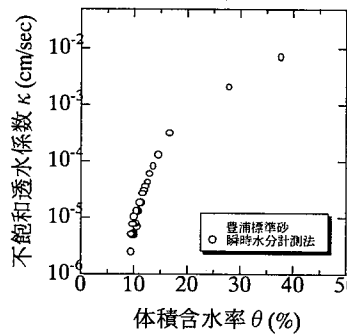


図-20 不飽和透水係数 (豊浦標準砂)

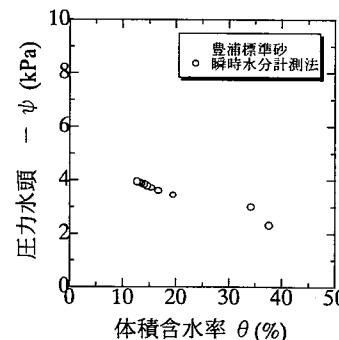


図-22 水分特性曲線 (豊浦標準砂)

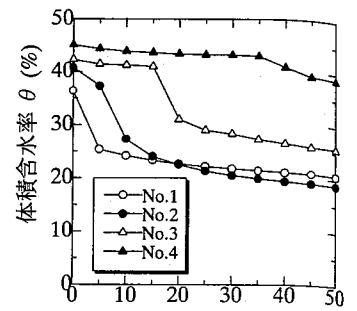


図-15 体積含水率の経時変化 (ガラスビーズ)

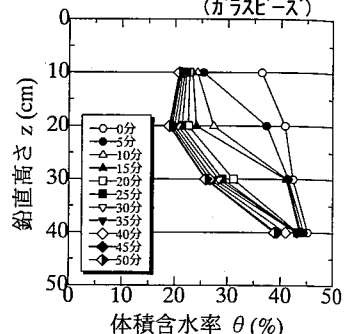


図-17 体積含水率の鉛直分布 (ガラスビーズ)

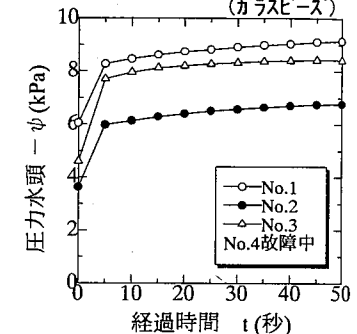


図-19 圧力水頭の経時変化 (ガラスビーズ)

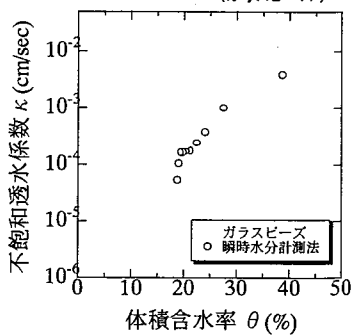


図-21 不飽和透水係数 (ガラスビーズ)

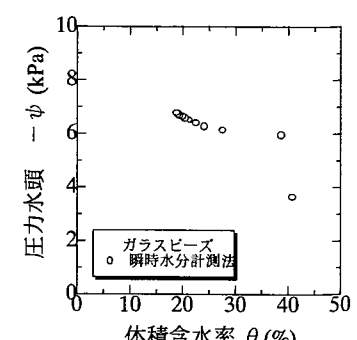


図-23 水分特性曲線 (ガラスビーズ)

に対して、水分特性曲線では、高飽和度付近において瞬時水分計測法の方で圧力水頭の値が大きく計測されている。一斉試験の結果から、瞬時水分計測法の結果が過大評価されていると判断できる。また、VanGenuchten モデルによると水分特性曲線は、加圧法、瞬時水分計測法ともに明らかに異なるが、Mualem モデルで示した不飽和透水係数曲線の誤差は小さい。これは、高飽和時の透水係数が大きいいため影響が少ないことが考えられる。

$$S_e = \left[ 1 + |\alpha\psi|^n \right]^{-m} \quad (\alpha > 0) \quad (8)$$

$$k(\psi) = k_s \cdot S_e^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (9)$$

$k(\psi)$ : 不飽和透水係数、 $k_s$ : 飽和透水係数、 $\psi$ : 圧力水頭  
 $S_e$ : 有効飽和度、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $\theta_r$ : 最小含水量

### 3. 定常法と非定常法における水分特性曲線

#### 3.1 水分移動の保水性

豊浦標準砂、ガラスビーズで行った加圧法と瞬時水分計測法の水分特性曲線の結果から、高飽和域において、瞬時水分計測法は加圧法よりも大きく、計測時間が経過した低飽和域になるほど、両者が一致する傾向にあることがわかった。非定常法では、定常法よりも水分の移動が著しいため、個体と液体が付着する力が違うことが予想される。そのため、図-14,15 による瞬時水分計測法での流速経時変化を調べ、図-28 に示した。体積含水率の減少に伴い流速も減少しており、図-22,23 の低飽和時において、非定常法と定常法の結果が漸近するのと同時に流速が小さくなることがわかる。

サクシオンはメニスカスの形状により大きく変わるとする Batel(1954,1955年)<sup>9)</sup>による等球モデルの考えを(10)式と図-29 に示す。

$$H = 2\pi\sigma \cdot \sin\alpha \left\{ \sin(\alpha + \delta) + \frac{r}{2} \sin\alpha \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right\} \quad (10)$$

$$R_2 = r \cdot \sin\alpha - R_1 + R_1 \cdot \sin(\alpha + \delta) \quad R_1 = \frac{r(1 - \cos\alpha)}{\cos(\alpha + \delta)}$$

毛管圧は液面と個体(球)の接触部の断面に作用し、表面張力はその個体が持つ円周、固体同士が接触する中心を結ぶ線に平行な方向に成分が作用するとして、吸引力  $H$  を表すと予想される。よって、個体と液体の接触角(退行角)と排水速度の関係を考え、その関係をメニスカス試験により求めることにした。

#### 3.2 メニスカス試験

図-30 にメニスカス実験装置を示す。直径 0.7cm のガラス管に水を入れ、ガラス管下部のバルブにより、流速を変え排水させ、その際のメニスカスの状態をデジタルビデオで撮影する。水道水を用いて水温は

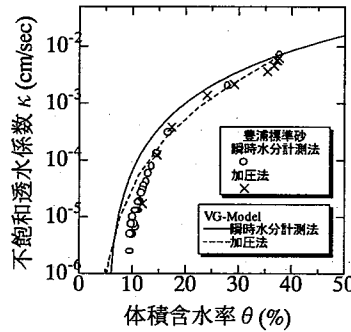


図-24 不飽和透水係数 (豊浦標準砂)

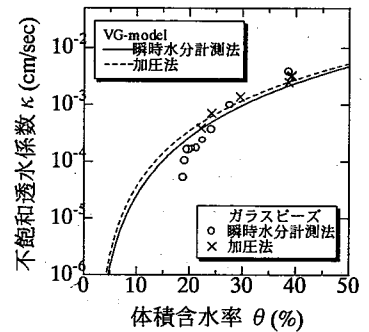


図-25 不飽和透水係数 (ガラスビーズ)

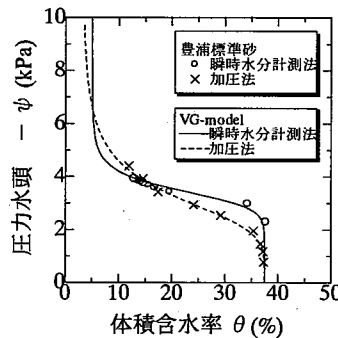


図-26 水分特性曲線 (豊浦標準砂)

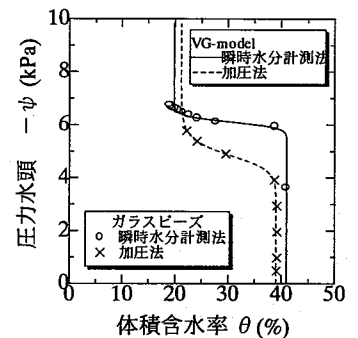


図-27 水分特性曲線 (ガラスビーズ)

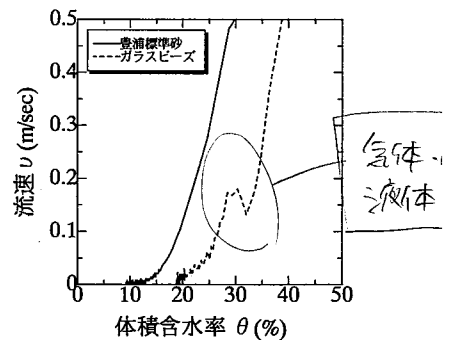


図-28 体積含水率と流量の関係

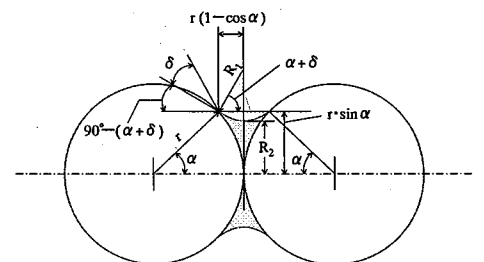


図-29 Batel の考え

11°とする。

撮影されたメニスカスから接触角を式(11)<sup>10)</sup>より求め、流速変化に伴う接触角の変化を図-31に示した。

$$a = \frac{D}{2} \frac{1 - \sin \delta}{\cos \delta} \quad (11)$$

(a:表面のくぼみ D:ガラス管の直径  $\delta$ :接触角 図-7参照)

図-31から流速が増加することにより明らかに接触角が小さくなるのがわかる。メニスカス下の圧力差(図-32中式)より、接触角が小さくなるほど圧力差が大きくなる。このことから非定常時の流速が速い場合、接触角は小さく、サクシオンが大きめに測定されることがいえる。定常法、非定常法の水分特性曲線の誤差はこのことが原因と考えられる。また、標準砂より間隙径が小さいと考えられるガラスビーズの方が誤差が大きいのは図-32中式の分母の管の半径を間隙径に置かれることにより容易に理解できる。

#### 4.あしがき

定常法、非定常法における不飽和透水試験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。①不飽和透水試験においては、両者とも一致することが確認された。②水分特性曲線については、高飽和時において非定常法が大きい圧力水頭を示すことが得られた。その原因として、非定常時の水分移動速度が速いため、退行角が小さくなり、サクシオンとしては大きめの値となることが推察される。

最後に岐阜大学工学部助教授 佐藤健先生には大変参考になるご助言とご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### [参考文献]

- 1) 不飽和地盤の透水評価に関する研究委員会：不飽和地盤の透水評価手法ワークショップ '97 (地盤工学会), p23, 1998
- 2) 井上 光弘：塩分を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価 水文・水資源学会誌 Vol.11, No.6(1998), pp.555-564
- 3) 三野 徹・冀 北平・赤江 剛夫・長堀 金造：電磁波を利用した新しい土壌水分計測について(Ⅲ), 一線式電極による標準砂の校正曲線, 平成6年度農業土木学会, pp.152-153, 1994
- 4) 河野伊一郎・西垣 誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究 土木学会論文報告集 第307号 1981年3月
- 4) 宇野尚雄・佐藤 健・杉井俊夫・柘植 浩史：空気圧制御による不飽和砂質土の透水係数試験法, 土木学会論文集, No.418/Ⅲ-13, pp.115~124, 1990
- 5) たとえば、不飽和地盤の透水評価に関する研究委員会：不飽和地盤の透水評価手法ワークショップ '97 (地盤工学会), pp82から90, 1998
- 6) 宇野尚雄・佐藤 健・杉井俊夫・柘植 浩史：空気圧制御による不飽和砂質土の透水係数試験法, 土木学会論文集, No.418/Ⅲ-13, pp.115~124, 1990
- 7) 榎本雅夫・阿部廣史：不飽和砂質土の浸透特性と水分保持特性, 不飽和地盤の透水にかかわる諸問題シンポジウム発表論文集 地盤工学会, pp101~106, 平成8年3月
- 8) 竹下祐二・河野伊一郎, 不飽和浸透特性の推定方法とその適用について, (技術・研究ノート) p95~107, Vol.11, No.1, 1993
- 9) 三輪茂雄：粉粒体工学, 朝倉書店, p357, 1972
- 10) 岩田進午・高見晋一・内嶋善兵衛：土壌物理学概論, pp39~40, 1997

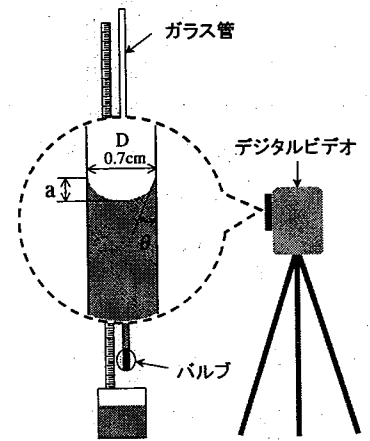


図-30 メニスカス試験装置

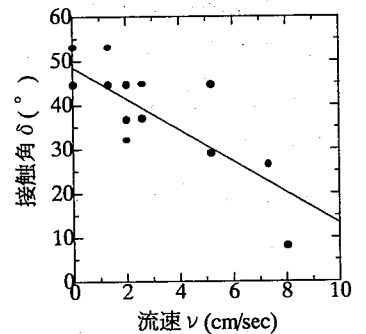


図-31 流速と接触角の関係

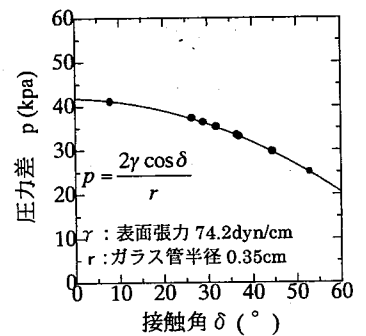


図-32 圧力差と接触角の関係