

水分分布を近似した非定常法による不飽和透水試験

中部大学 正会員○杉井俊夫 山田公夫
 ㈱アイエスシー 正会員 植村真美
 中部大学大学院 学生員 奥村 恭
 岐阜大学大学院 学生員 佐宗隆幸

1. まえがき

地盤災害の対策として、地盤における浸透水の挙動を把握することは欠かすことができない。その解析手段として、これまで数値解析が行われるが、それには最低限の物性値（不飽和浸透特性）が必要とされる。室内試験法には、これまで多くの研究者らによって開発され、様々な方法が提案されてきている^{1,2,3)}が、まだ、試験法の考案段階であり、明確な不飽和浸透特性の評価がなされていないのが現状である。本論文は、これまで様々な問題点を抱えていた室内の不飽和土の透水試験に対して、新たな方法を提案するものであり、その実用性・有効性を示すと同時に同時に本試験法を行う上での留意する点などを指摘している。提案する試験法は、Watson らによって開発された瞬時水分計測法⁴⁾をヒントに、供試体内の鉛直方向の水分分布を線形近似することにより、小型かつ装置も安価となっている。また、非定常法であることから短時間で、さらに低い透水性の地盤材料にも適用可能である特徴を有していると同時に、本試験法は非定常法の中でも Darcy 則を用いる直接法である特徴をもつ。

2. 従来の不飽和透水試験法

表-1 不飽和透水試験の分類¹⁾

不飽和透水係数を計測する方法には表-1 に示されるように定常流のもとで計測する定常法と定常流に至る前に計測する非定常法と流動条件下で大別することができる。定常法は非定常法に比べて、後述する理由から安定した結果を得ることができるとされるが、定常法を作り出すために時間が掛かるために、砂などの高い透水性材料、高飽和域の測定に適する。一方、非定常法の場合は、定常流を作り出す必要がないため、計測時間が極めて短く、多くの飽和度に対して透水係数を得ることが可能であり、定常法のような試料の透水

不飽和透水試験	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		
逆解析法	瞬時水分計測法	Multi-step Outflow Method	

係数や試料の水分量などの制限は受けにくい。しかし非定常法では、ほとんどの方法が水分拡散係数を求める方法であり、不飽和透水係数を求めるには式(1)のように水分特性曲線の勾配である比水分容量を水分拡散係数に乗じてやらなければならない。そのため、水分特性曲線が必要となり、水分特性曲線の精度が不飽和透水係数に大きく影響することは必須である。このことが Darcy 則を用いる定常法の方が安定した透水係数

$$k(\theta) = D(\theta) \times c(\theta) \quad (1) \quad \text{ここに } k(\theta): \text{透水係数(cm/s)}$$

$$c(\theta) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (2) \quad \begin{array}{l} D(\theta): \text{水分拡散係数(cm}^2\text{/s)} \\ c(\theta): \text{比水分容量(cm}^3\text{/cm}^3\text{)} \\ \psi(\theta): \text{圧力水頭(cm)} \end{array}$$

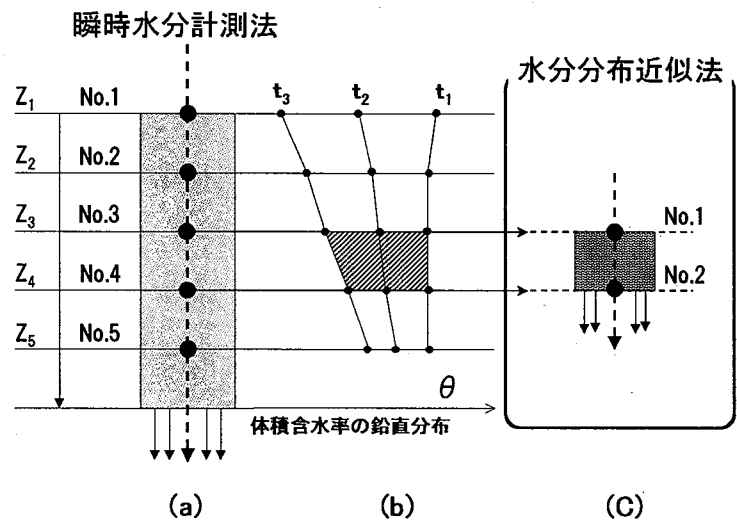
Approximated Profile Method for hydraulic conductivity test of unsaturated soils: T.Sugii, K.Yamada, (Chubu Univ.) M.Uemura(ISC,co), T.Okumura(Chubu Univ.) & T.Saso(Gifu Univ.)

が得られる一番の理由であると筆者らは考える。今、こうした方法を間接法と呼ぶならば、表一1における非定常法の不飽和透水試験のうち瞬時水分計測法以外は、すべて間接法である。この中で、瞬時水分計測法は唯一、Darcy 則を用いた直接法と呼べる方法であったが、1960年代開発当初、水分計測にはRI・中性子水分計が用いられており、取り扱いが困難で高価な装置となり、普及型の試験装置とはいえなかった。1980年代になると比誘電率を利用したTDR⁵⁾、FDR⁶⁾、ADR⁷⁾と呼ばれる水分センサーが開発され、センサーの安全性、経済性など向上し、不飽和透水試験法の中でも有望な方法となっていた。

3. 水分分布近似法

瞬時水分計測法は極めて短時間でかつ、高精度で不飽和透水係数を評価することができるが、これまでの試験装置では、試料を多量に要することや、準備段階において粒径が小さい試料になると試料を十分に締固めることが困難であり、十分に飽和させたり、高サクションを与えることができないなどの問題や、比較的高価な試験装置となるなどの問題点があった。この試験法をさらに実用可能なものにするために、これらの問題点を踏まえ、これまでの瞬時水分計測法の試験装置を改善し、新しい不飽和透水試験法である水分分布近似法(Approximated-profile-method)を提案する⁸⁾。

瞬時水分計測法は、図一1(a)で示すようにある一定の計測間隔ごとに水分量、間隙水圧を測定している。しかし、図一1(b)で示すように、ある一定の測定間隔で水分量を計測していたとしても、流量分布を求める場合、センサーの間の水分分布は線形近似の形をとらざるを得ない。間隙水圧についても同様なことがいえる。センサー間をこのように線形近似していても十分な精度で透水係数を求めることが可能なことから、瞬時水分計測法の一部のモデル化を試みる



図一1 瞬時水分計測法における流量分布の予測方法

ことにした。そこで、図一1(c)で示すように一層だけを取り出した形にすることによって、不飽和浸透特性を計測することを考えた。この場合、重要となるのは、試料の長さ(線形近似となる長さ)、図一1(b)の流れの一部を再現できるような境界条件の2つである。本研究ではADRセンサーの大きさ(ロッドの長さ6cm)から小さくすることができないため、試料長さ15cmで固定することにした。

3.1 水分分布近似法の測定原理

(1) 鉛直一次元の流れにおける Darcy 則

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。

$$\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (2)$$

さらに式(2)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式(3)となる。

$$K(\theta) = \left(\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right)_{z,t} / \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right)_{z,t} \quad (3)$$

式(3)の分母(動水勾配)、分子(流速)を以下のように求める。

(2) 流速の求め方

図-2に示すように、ADRによって供試体上端の体積含水率の経時変化を計測する。同時間隔で上端から下端にかけての排水流量を計測する。試験終了後、炉乾燥法により供試体下端の含水比 W_n から体積含水率を求め、任意時間あたりの流量変化はロードセルより明らかになるため、試料下端の体積含水率($\theta_{z2}^{t_{n-1}}, \dots$)は逆算できる。さらに供試体中間までの流量変化 A を求め、式(4)より流速が算出できる。

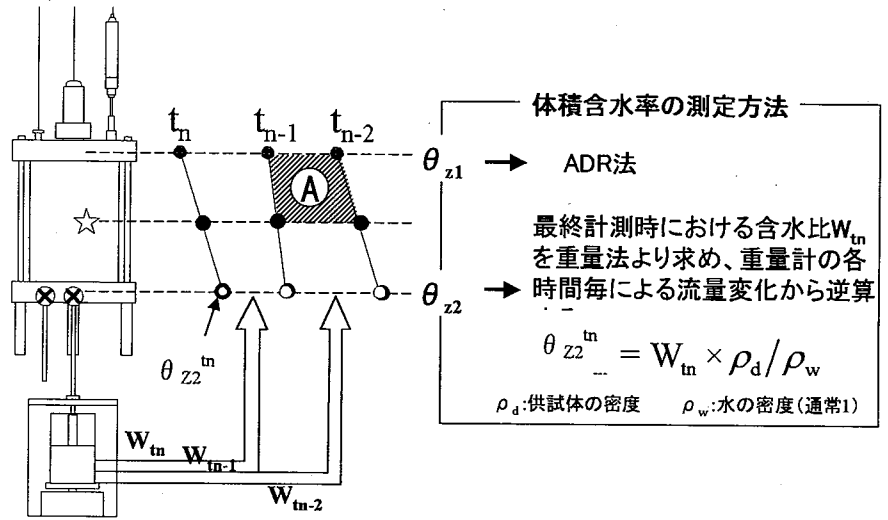


図-2 流速の求め方

$$\left[\int \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z, \frac{t_n + t_{n-1}}{2}} = \frac{A}{t_n - t_{n-1}} \quad (4)$$

(3) 動水勾配の求め方

図-3に示すように、 Z_1 (上端)と Z_2 (下端)のサクションの経時変化をテンシオメータにより測定する。任意時間での供試体中心の動水勾配を求めるには、計測点 Z_1 と Z_2 のサクションの差と試料の高さから式(5)のように求めることができる。

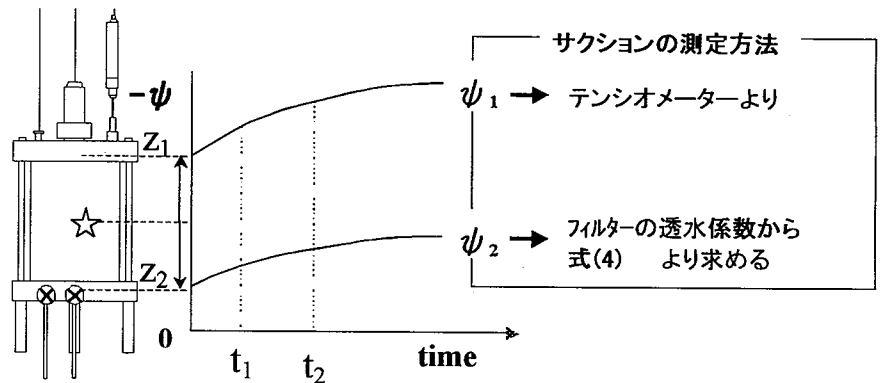


図-3 動水勾配の求め方

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 \right)_{z, \frac{t_n + t_{n-1}}{2}} = \left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{z_1 - z_2} \right)_{t_n + t_{n-1}} + 1 \quad (5)$$

試料下端 Z_2 のサクションの求め方は、試料下端にフィルターを敷くため、そのフィルターの透水係数の抵抗により式(6)で求めることができる。

$$h = H - \frac{d \times Q}{A} \left(\frac{1}{k_f} \right) \quad (6)$$

- H: 試料に掛かっていると考えられる圧力差(見かけの圧力差(cm/H₂O))
- d: フィルターの厚さ(cm)
- k_f: フィルターの透水係数(cm/sec)
- A: 断面積(cm²)
- Q: 流速(cm/sec)
- h: 実際に掛かかる圧力差(cm/H₂O)

3.2 試験装置

図-4に提案する瞬時水分計測法の試験装置の概要図を示す。アクリル製円柱(内径10cm、高さ15cm)の容器を使用し、上部からテンシオメータ、ADR (Amplitude-Domain-Reflectometry) が差し込めるようになっており、データロガーに記録させ、パソコンで表示させることによって、上端のサクションと体積含水率が計測できるようになっている。また、加圧口より空気圧が調整可能であり、吸引法だけではなく試料によっては加圧法も可能となっている。ただし、アクリル製の強度を最大100MPaとする。

これまでの瞬時水分計測法に比べて試料を少量化することによって、準備時間、試験時間の更なる削減が

できる。また、テンシオメーターと ADR をそれぞれ一本とした。試料が少量のため、水分変化が迅速であり、それに対応できるセンサーを選んだ。マイクロテンシオメーター1秒、ADR は約 10 秒間隔で計測が可能である。データロガーは、RS-232C コネクタでパソコンとの接続を行った。

3.3 ADR センサーの校正

シータープローブの出力と土壌水分量との関連は非線形である。特定の土によってはその形も変化する。シータープローブは、非常によい精度でその土壌の電解質定数(ϵ)を感知するが、土壌の測定された電解質定数と水分量(θ)の関連は、その土壌が持つ要素、成分によって異なるからである。シータープローブから出力される電圧と土壌水分量に変換するときの誤差をなくすためにも、予めその試料別に校正(キャリブレーション)した方が精度が良いとされる⁹⁾。

今回計測対象試料の豊浦標準砂(図-5)とシルト(図-6)の結果を下記に示す。

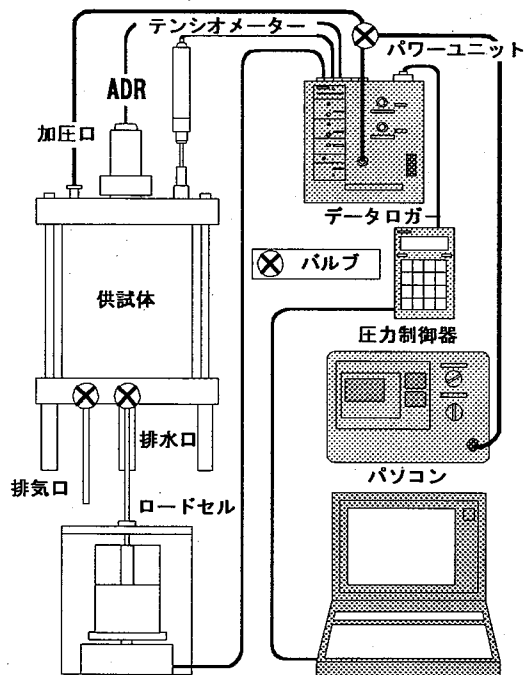


図-4 水分分布近似法試験装置

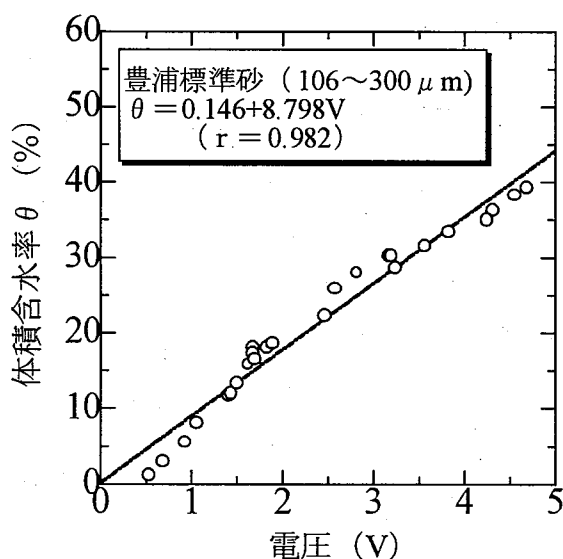


図-5 キャリブレーション結果(豊浦砂)

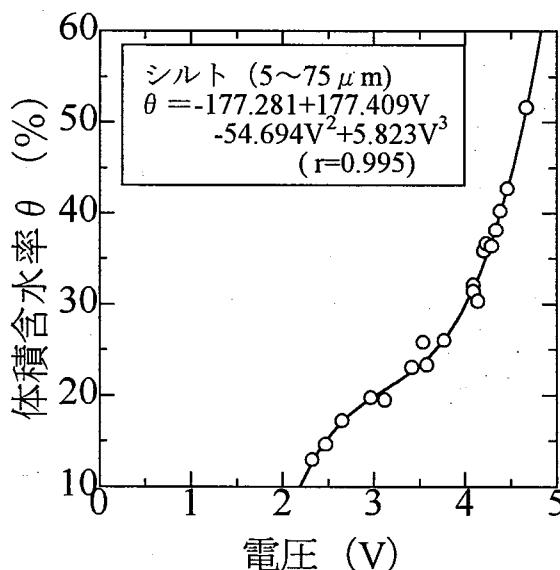


図-6 キャリブレーション結果(シルト)

3.4 試験ケースと使用フィルター

今回、比較のため、不飽和透水一斉試験が行われている豊浦砂を取り上げ、また細粒土への適用をも調べるため、長良川シルトを用いて実験を行った。なお、フィルターの透水性が計測できる透水係数の大きさに影響するため、豊浦砂はガラスフィルターを、またシルトでは親水性のメンブレンフィルターを使用した。また、境界条件である圧力をも示しておく。

表-2 試験ケース

		吸引法	加圧法	加圧法
試料	試料名	豊浦砂		長良川シルト
	粒径 (μm)	106-300		5-75
	飽和透水係数	2.01E-02		3.47E-04
	乾燥密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.535	1.499	1.37
フィルター	フィルター名	ガラスフィルター		メンブレンフィルター
	開孔径 (μm)	30-40		0.2
	厚さ (cm)	0.472		0.005
	透水係数	3.67E-04		2.21E-06
	AEV (kPa)	9.0		189
境界条件圧力(kPa)		4.8 (下端)	7.0 (上端)	211(上端)
計測時間		27分	148分	24時間

4. 豊浦砂の試験結果

4.1 豊浦砂の水分変化と圧力変化

図-7,8 に吸引法と加圧法の水分変化を示す。上端の値は ADR センサーで計測した値であり、下端の体積含水率は、前述した供試体内の水分分布を線形近似し、最終時の含水比測定と排水量の時系列から算出された値である。また、試料中間の水分量は線形分布としていることから上端と下端の平均値である。これより加圧法の方が負荷圧が高いためもあるが、早く上端と下端の水分量差が少なくなることがわかる。間隙水圧の経時変化を図-9,10 に示した。試料上端はテンシオメータで計測した値を、試料下端は式(6)で排水境界からの水頭差を補正し算出された値である。試料中間は両者の平均値である。この図から加圧法の方が動水勾配が2倍ほど大きいこと、3分ほどで動水勾配が急変していることがいえる。

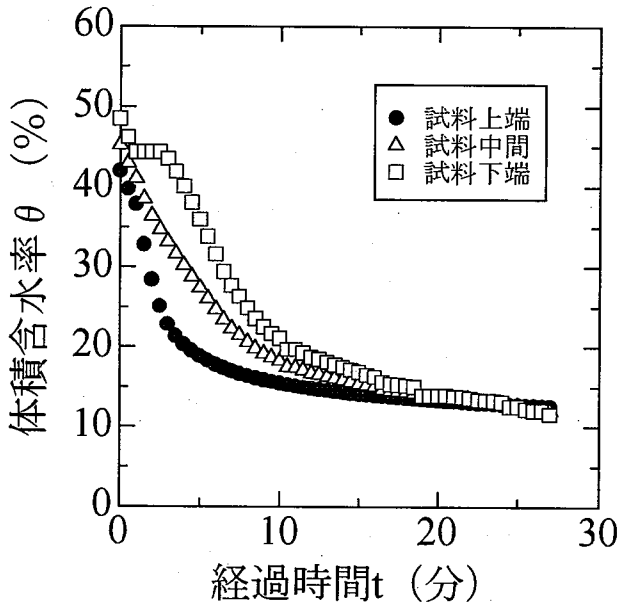


図-7 体積含水率の経時変化 (吸引法)

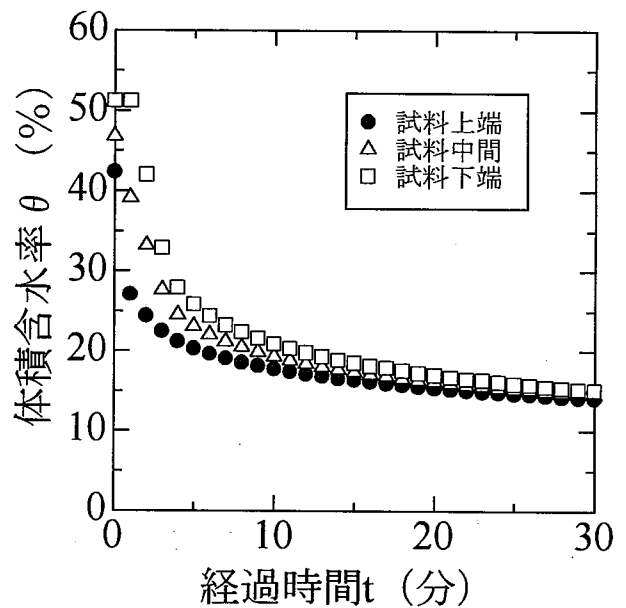


図-8 体積含水率の経時変化 (加圧法)

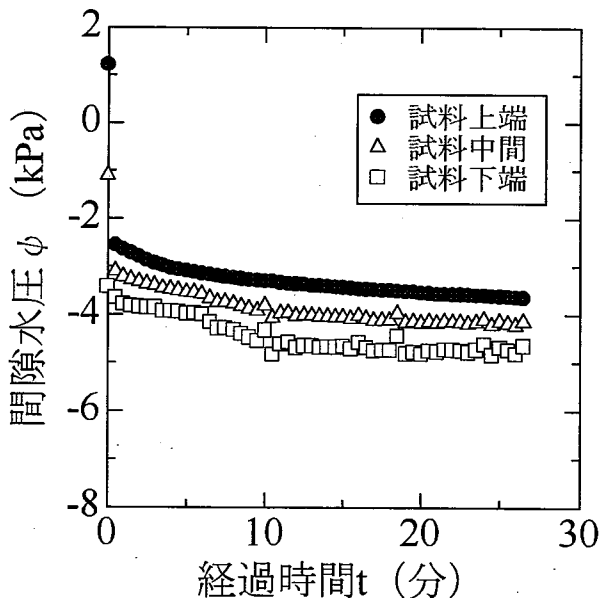


図-9 間隙水圧の経時変化(吸引法)

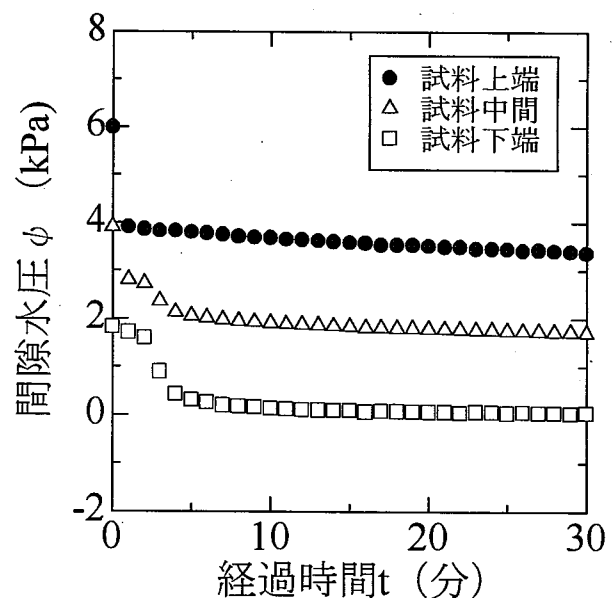


図-10 間隙水圧の経時変化(加圧法)

4.2 水分分布近似法で求めた豊浦砂の不飽和透水係数

図-11,12に吸引法、加圧法によって得られた不飽和透水係数の結果を示す。なお、一斉試験で得られた結果も併せて示す。これより、本試験法で得られた結果は他の試験結果と非常に高い合致性を得ており、妥当な結果であると判断できる。加圧法については低飽和域においては一致しているが、飽和度が上がるにつれて他の試験結果と乖離しているところがある。この原因として、加圧法では図-8,10に示すように間隙水圧が一気に加わり間隙水圧および水分の鉛直分布が線形分布となり得ていないのではないかと推察される。しかし、排水を進めていく上で、下端まで不飽和になるとほぼ線形分布となり、低飽和時から逆算していく本方法では飽和度が高くなるほどその誤差が反映されて行くものと考えられる。

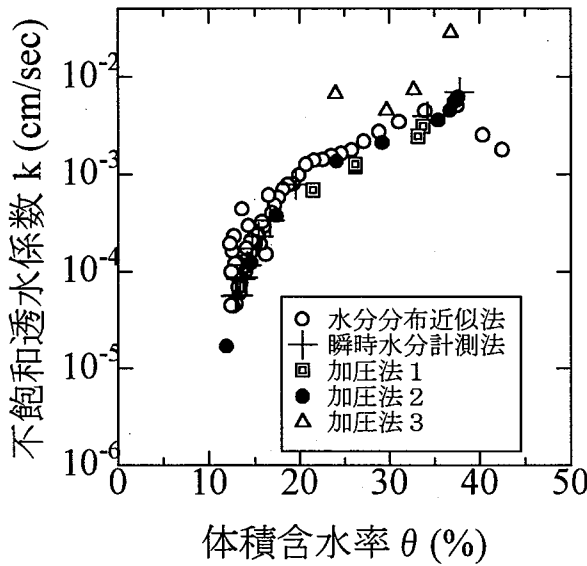


図-11 不飽和透水試験結果（吸引法）

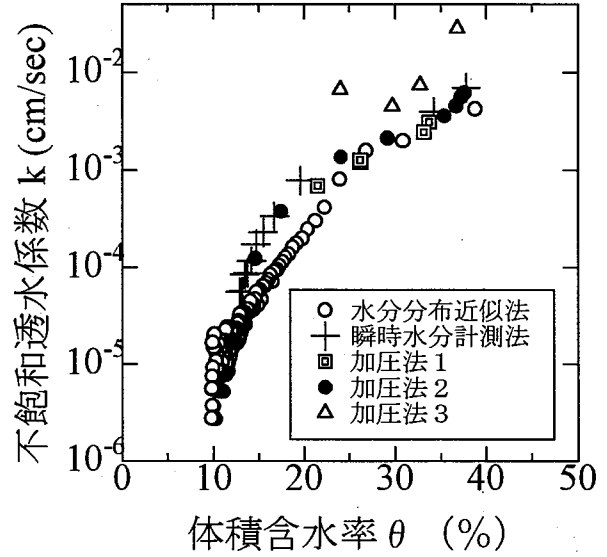


図-12 不飽和透水試験結果（加圧法）

5. シルトの試験結果

5.1 シルトの体積変化による影響

シルトの場合、吸引法では圧力に限界があるため加圧法のみを使用した。また、加圧時には排水とともに圧密が生じており、体積変化が生じる。水分分布近似法では、先に述べたように水分量を求める際に試料の高さが大きく影響するため体積変化が生じる場合の測定が問題となることが予測される。そこで今回、別途、乾燥密度を考慮した水分特性曲線¹⁰⁾を用いて補正することを試みた。

(1) 乾燥密度を考慮した水分特性曲線

サイクロメータを用いて得られた化学ポテンシャルから、電導率から得られる浸透ポテンシャルを差し引いたマトリックサクシオンと乾燥密度および体積含水率の関係を図-13に示す。また、あるサクシオン負荷時の体積の関係を式(7)に示す。

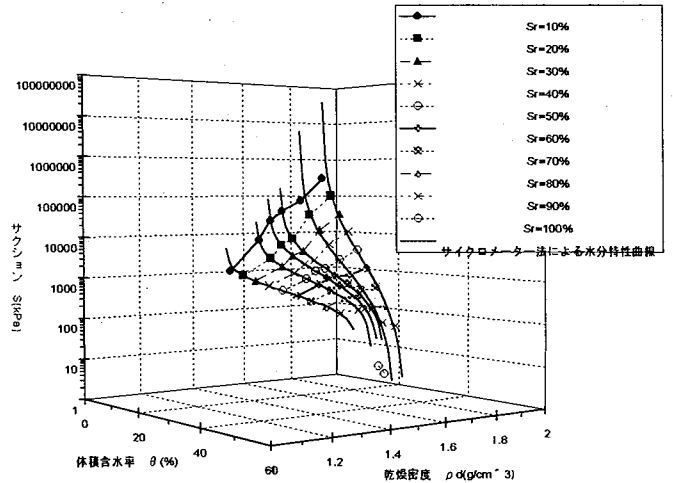


図-13 乾燥密度・サクシオン・水分量の関係

$$\log S = 1.67 + (1/0.783 \times (\ln(V - V_s + V_w)) / V_w) + 1.06 \times (m_s / V - 1) \quad (7)$$

ここに、 S : サクシオン V : 試料体積 V_s : 土粒子体積 V_w : 水分体積 m_s : 試料乾燥質量

式(10)より、計測されるサクシオン S と水分の体積 V_w 、試料乾燥質量 m_s を与えることにより、試料体積 V が得られる。また、試料断面積 A は一定であることから各計測時の試料高さが求まる。これより、図-14 に示すように最終計測時より前の時間の体積含水率が算出できる。

なお、この時のステップ時間の試料長さの変化はないものとして、台形面積で算出している。このようにして得られた試料高さの変化と時間の関係を図-15 に示す。時間とともに圧密により、試料の長さが増加しており、徐々に減少率が小さくなっていることから、圧密が終了していきることがわかる。

この経時変化による鉛直高さより、乾燥密度を求め直した結果、1.37 (初期) \sim 1.68 g/cm^3 (最終) の変動があることが明らかとなった。

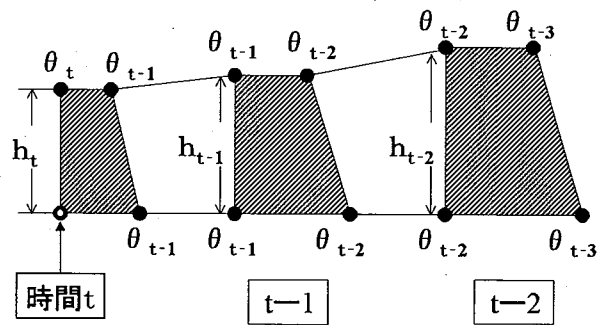


図-14 乾燥密度の変化による体積含水率の算定

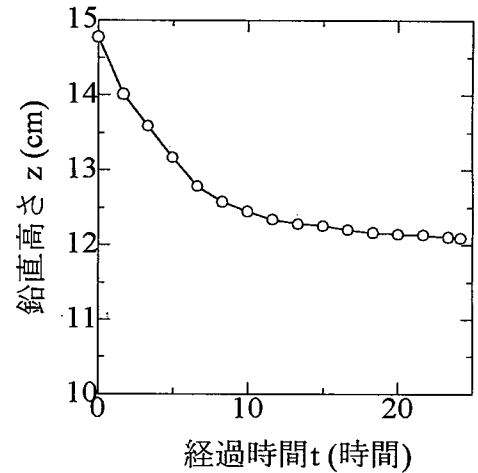


図-15 経過時間と鉛直高さの変化

5.2 シルトの水分変化と圧力変化

シルトの水分量、間隙水圧の経時変化をそれぞれ図-16、17 に示す。試料上端、中間、下端はそれぞれ豊浦砂で説明したものと同一である。ここで図-16 の体積含水率の鉛直分布においても、はっきり示されているように計測時間 2 時間まで上端の体積含水率が少しではあるが増加している。これは、図-17 でも示しているように上端に負荷している空気圧を 100kPa から 200kPa に途中で加圧した際に、一度負荷圧が 0kPa に戻ったこと、および初期の排水が強制的に行われたため鉛直方向の水分分布が線形分布と大きく異なるため計算上、上端の水分量が高くなったものと推察される。また、図-17 の試料上端の間隙水圧が 15 時間以降で低下しているが、100kPa がセンサーの限界であり 15 時間までの間隙水圧は正しく測られているものである。

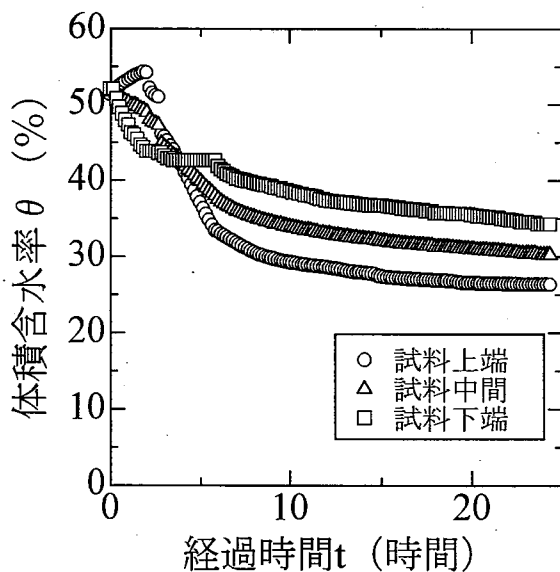


図-16 体積含水率の経時変化(シルト)

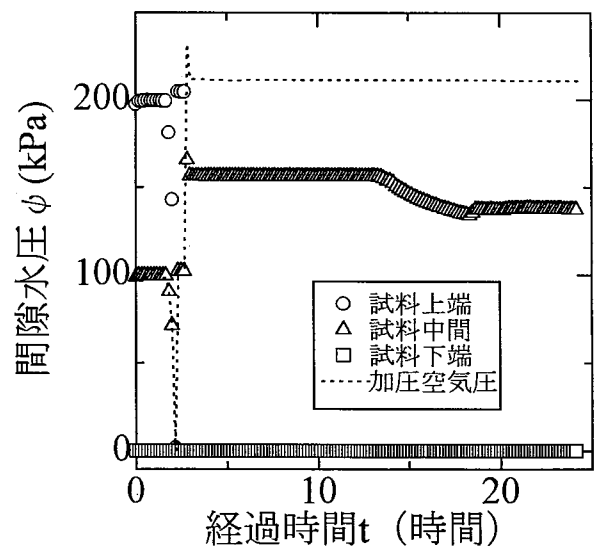


図-17 間隙水圧の経時変化(シルト)

5.3 シルトの不飽和透水係数

以上の結果より、シルトの不飽和透水係数を求めた結果を図-18に示す。また、加圧法とサイクロメーター法で求められた水分特性曲線から、van Genuchten—Mualem モデル¹¹⁾である式(8)を用いて求めた透水係数の関数を図中にあわせて示した。計測時の平均値の1.59と最終時の1.68g/cm³の乾燥密度に対して求めており、飽和透水係数は別に行った変水位透水試験の結果を使用した。

$$k = k_s \cdot Se^{0.5} \left[1 - (1 - Se)^{1/m} \right]^2 \quad (8)$$

ここに、 k_s ：飽和透水係数、

Se ：有効飽和度

m ：van Genuchten モデルのパラメータ

先に述べたように、体積含水率30%以上はテンシオメータによる間隙水圧が測れていないことを加味す

ると、ほぼ最終の乾燥密度に近い破線の結果に近い結果を得ることができるとがわかる。今回の結果から供試体の長さを時間的に計測することで、体積変化が著しい試料についても測定できることがわかった。

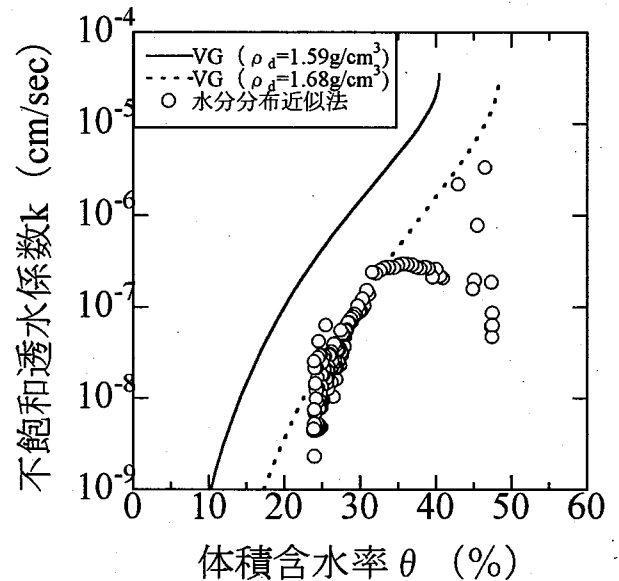


図-18 不飽和透水係数(シルト)

6. あとがき

室内の不飽和透水試験法について、非定常法である水分分布近似法の提案を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 吸引法と加圧法を比較した場合、計測初期である高飽和域において加圧法の値に誤差を生じやすいことがわかり、水分分布が線形分布と異なることに起因していることが推察された。この対策として、徐々に加圧力を増加する方法や、吸引法との併用が考えられる。
- 2) シルトのような体積変化を生じる試料で加圧法を用いる場合、試料の高さを時間的に計測することにより、不飽和透水係数を推定できることがわかった。
- 3) フィルター選択の誤りや、加圧法の誤差が生じたとしても、本試験法は試験終了時(低飽和時)より、逆算して求めていくため、水分量の全範囲に誤差が影響することがなく、誤差の影響範囲が小さい。
- 4) 以上の結果、本提案試験法は、室内試験不飽和透水試験として有効な方法であることがいえる。

【参考文献】

- 1) 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) 農業土木学会編：土の理工学性実験ガイド(実験書シリーズNo.1),農業土木学会,pp106~113,1983
- 3) Richards,L.A.and Moore,D.C. : Trans Ame Geophys. Union,33,pp.531~540,1952
- 4) Watson,K.K: An instantaneous profile method for determining- the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials,Water Res.Res.,Vol. 2,709-715,1966
- 5) 巽北平・三野徹・赤江剛夫・長堀金造：電磁波を利用した新しい土壌水分計について(Ⅲ)平成6年度農土学会講演要集, pp.152-153,1994.
- 6) 堀野治彦・丸山利輔：TDRによる土壌の体積含水率および電気伝導度の測定について、土壌の物理性、65,pp.55-61,1992
- 7) 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,水分・水資源学会誌,Vol.11,No.6,pp.555~564,1998
- 8) T.Sugii,K.Yamada & Uemura: Measuring hydraulic properties for unsaturated soils with unsteady method, UNSATURATED SOILS FOR AS IA,pp.439-444,2000.
- 9) Topp,G.C.et al : Electromagnetic determination of soil water co-ntent,measurements in coaxial transmission lines. Water Resour.Res.16,pp.574~582(1980)
- 10) 杉井俊夫・山田公夫・近藤智美：土の密度を考慮した水分特性曲線についての一考察,第35回地盤工学研究発表会,1271-1272,2000.
- 11) Mualem,Y : Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media:Generalize Macroscopic Approach,Water Resour .Res.,114(2),325-334,1978