

「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測

神谷浩二¹・宇野尚雄²・松島健之³

¹正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

²フェロー 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科(同上)

³応用地質(株) 東京事業本部東関東事業部水戸支店(〒310 茨城県水戸市南町1-3-27)

土の間隙径分布は、土の間隙構造特性を表現するための重要な要因の一つである。本報告では、土の間隙径分布を計測する手段として、土の間隙を毛細管の集合体とみなす毛細管モデルの仮定に基づいた「空気圧入法」を提案する。その方法は、飽和土試料への空気圧入によりその圧入圧力と空気透過量の関係から間隙径分布を求めるものである。そして、試作した装置により、砂質土や作成した毛細管模型の間隙径分布をその方法により計測した結果、水銀圧入法による計測結果と対比しても良好な間隙径分布が得られることを示す。また、砂質土の空気圧入法による間隙径分布と粒度分布の関係について考察するとともに、平均間隙径は平均粒径の2~3割程度であること等についても述べる。

Key Words : void diameter, air intrusion, capillary tube model, air permeability, sand

1. はじめに

フィルダムのフィルター材や薬液注入工法における懸濁液型注入材を選定するためには^{1), 2)}、土の間隙構造を把握することが必要であると考えられる。本研究は、その基礎的研究として、土の間隙構造を表す重要な要因の一つである間隙径分布を計測する技術的手法を検討したものである。

間隙径分布は水分保持曲線より推定されるとする方法がある³⁾。その研究には、Campbell⁴⁾、中野⁵⁾、北村ら⁶⁾、等の多数の成果があるけれども、計測結果との対比は未だ十分に検討されていない。一方、計測手法としては、土の二次元断面を電子顕微鏡により観察する方法⁷⁾、水銀圧入式ポロシメーター装置による水銀圧入法等の種々の方法があり⁸⁾、その中でも水銀圧入法によることが多い。しかしながら、水銀圧入法による計測の殆どは粘土のような細粒土を対象としている。砂質土を円筒管に充填する手法により計測した例もあるが、計測可能な間隙径の上限は、直徑にして0.1mm程度である⁹⁾。即ち、砂のようなマクロな間隙径分布を計測することは困難なようである。一方、計測装置が高価であること等にも関係して、間隙径分布の計測例はまだ少ない状況にある。

このような現状に対して、本論文では、マクロな間隙径分布を計測するのに有効であると考えられ、簡便な装置により計測できる「空気圧入法」を提案する。この方法は、耐火物等の多孔性材料の間隙径分布を計測するために、Žagarによって開発された手法に基づく¹⁰⁾。また、この方法は間隙は毛細管の集合体であると仮定する「毛細管モデル」に基づいており、飽和土試料への空気圧入により、その圧入圧力と空気透過量の関係から間隙径分布を求める方法である¹¹⁾。

本論では、試作した測定装置による砂質土や毛細管模型の間隙径分布の計測結果に基づいて、空気圧入法の適用性について検討した。その結果、良好な砂質土の間隙径分布が得られること、0.02~0.2mm程度の範囲の間隙径及びその分布の計測が可能であることを述べる。また、砂質土の粒度と空気圧入法による間隙径分布との関係について考察する。なお、水銀圧入法は間隙空間に水銀を圧入するもので、本方法とは原理的に異なるが、計測例も対比して示す。

2. 間隙径分布測定法

(1) 測定装置及び試料

空気圧入法により間隙径分布を測定するために試

表-1 測定試料

試料名称	粒子密度 (ρ_s g/cm ³)	平均粒径 (D_w mm)	金網の目 の大きさ (mm)
ガラスビーズ GB-C	2.489	0.359	0.300
豊浦標準砂	2.643	0.188	0.090
ガラスビーズ GB-AC	2.496	0.178	0.090
混合ガラスビーズ ①	2.482	0.121	0.061
混合ガラスビーズ ②	2.480	0.0792	0.061

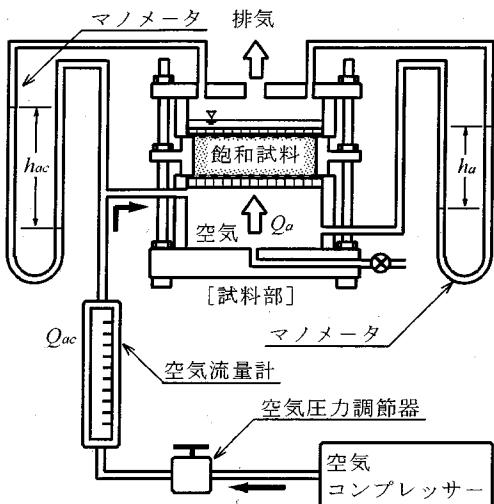


図-1(a) 間隙径分布測定装置全体概要図

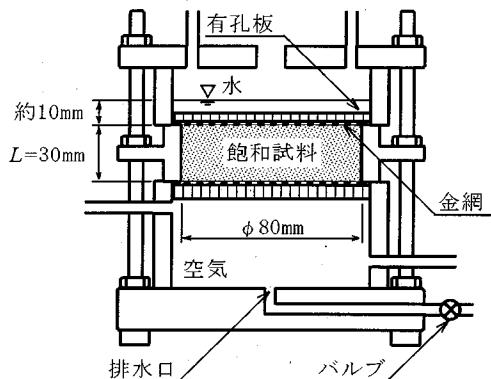


図-1(b) 間隙径分布測定装置試料部概要図

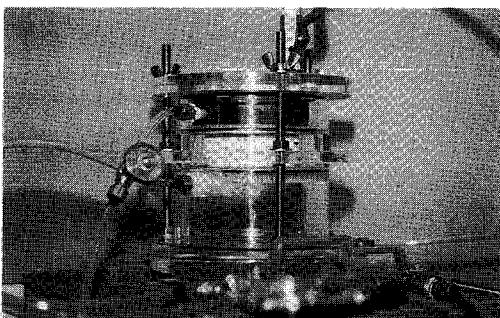


写真-1 間隙径分布測定装置試料部

作した装置は、装置の全体概要を示す図-1(a)のように、空気コンプレッサー、空気圧力調節器、空気流量計、マノメータ、試料部によって構成されている^{1,2)}。空気コンプレッサーより供給される圧縮空気を空気圧力調節器により、ある一定の空気圧力を調節して試料部に送気し、空気を試料層に鉛直上向

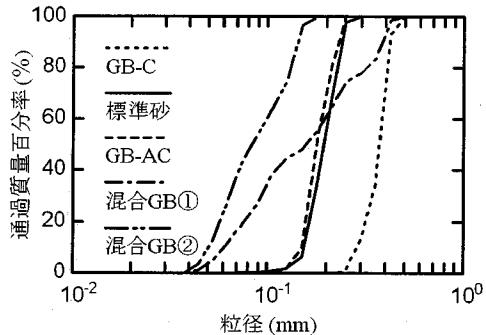


図-2 測定試料の粒度

きに透過させる。そして、空気流量計と試料部を接続しているチューブ内を通る空気流量 Q_{ac} (cm³/s) を空気流量計により、試料層上下端の空気圧力水頭差 h_a (cm) 及び上述のチューブ内と試料層上端の空気圧力水頭差 h_{ac} (cm) をマノメータによりそれぞれ計測する装置である。一方、試料を充填する試料筒は、図-1(b)、写真-1に示すように、内径80mm、高さ $L=30$ mmのアクリル製の円柱体である。また、高空気圧力の空気を試料層に鉛直上向きに透過させることで生じる試料の噴き出しを抑えるために、試料層上下端を金網、有孔板によって固定している。なお、有孔板は、直径2.85mmの穴が多く開いた厚さ5mmのアクリル板である。

ところで、この装置では、空気流量計により計測する空気流量 Q_{ac} は上述のチューブ内の空気流量であり、また、 h_{ac} は h_a よりかなり大きくなるため、 Q_{ac} を実際に空気が試料層を通るときの空気流量 Q_a (cm³/s) に次式によって補正する必要がある。

$$Q_a = \frac{\rho_{ac}}{\rho_a} Q_{ac} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{ac} : チューブ内の空気密度 (g/cm³)

ρ_a : 試料層下端の空気密度 (g/cm³)

この装置では試料層上端は大気圧であるため、空気圧 h_{ac} 、 h_a はそれぞれチューブ内の h_{ac} 、 試料層下端の h_a として扱い、 ρ_{ac} は次式により算出される。 ρ_a

も同様である。

$$\rho_{ac} = \frac{0.001293}{1 + 0.00367T_a} \frac{1033.23 + hac}{1033.23} \quad (2)$$

ここに、 T_a ：空気温度(°C)

標準大気圧下で $T_a=20$ (°C)のとき、 ρ_{ac} は0.00120(g/cm³)である。以下の空気流量の値は式(1)によって求めた Q_a である。

次に、測定試料には、表-1に示すガラスビーズGB-C、豊浦標準砂、ガラスビーズGB-AC、混合ガラスビーズ①、混合ガラスビーズ②(GB-C、標準砂、GB-AC、混合GB①、混合GB②と略称)の5種類を用いた。これらの試料の粒度を図-2に示す。また、表-1には、粒子密度 ρ_s (g/cm³)、平均粒径 $D_w=1/\sum(P_i/D_i)$ (P_i ：ある粒径範囲を代表する平均粒径 D_i (mm)の試料質量が全試料質量に対して占める割合)(mm)¹³⁾、試料層上下端を固定している金網の目の大きさを併記した。金網の目の大きさは、試料層の透気性や間隙径分布の測定結果に影響することが予想されたため、試料が留まる程度の十分に目が大きく、結果的には D_w の1/2程度以上の目の大きさの金網を選択した。

(2) 測定原理

Darcy則より、空気のx軸(水平)方向の一次元流れは、次式によって表される¹⁴⁾

$$v_a = -\frac{k}{\eta_a} \frac{dp_a}{dx} = -k \frac{\rho_w g}{\eta_a} \frac{dh_a}{dx} = -k_a \frac{dh_a}{dx} \quad (3a)$$

$$h_a = \frac{p_a}{\rho_w g}, \quad k_a = k \frac{\rho_w g}{\eta_a} \quad (3b)$$

ここに、 v_a ：空気流速(cm/s)

k ：固有透過度(cm²)

η_a ：空気の粘性係数(g/(cm·s))($T_a=20$ ℃のとき $\eta_a=0.000182$ (g/(cm·s)))

p_a ：空気圧力(gf/cm²)

ρ_w ：水の密度(g/cm³)

g ：重力加速度(cm/s²)

k_a ：透気係数(cm/s)

また、動気勾配*i_a*は次式によって与えられ、

$$i_a = \frac{h_a}{L} \quad (4)$$

ここに、 L ：試料層厚さ(cm)

式(3)より、固有透過度 k 及び透気係数 k_a は次式によって表される。

$$k = \frac{\eta_a L}{\rho_w g A} \frac{Q_a}{h_a}, \quad k_a = k \frac{\rho_w g}{\eta_a} = \frac{L}{A} \frac{Q_a}{h_a} \quad (5)$$

ここに、 A ：試料層断面積(cm²)

さて、乾燥試料について、空気の流れが鉛直上向きの透気試験を行うと、 h_a と Q_a は、式(5)より、図-3の①のように原点を通る直線関係が得られる。

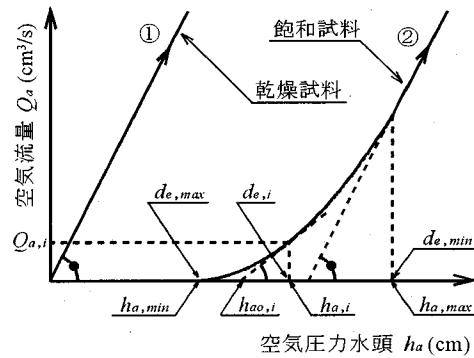


図-3 空気圧力水頭と空気流量の関係

次に、この乾燥試料を水で飽和した試料について、図-1(b)に示したように飽和試料層上面を約10mm高さの水で覆った状態で、飽和試料層の底面から空気圧力を与えると、空気圧が h_a,min になるとときに空気が鉛直方向に流れ始める。そして、更に空気圧を徐々に増加すると、 h_a と Q_a は、図-3の②のように、空気圧が h_a,min から h_a,max までの範囲では曲線関係が得られ、 h_a,max より大きくなるときは乾燥試料との関係①を h_a 軸方向に平行移動した関係と一致する。一方、関係②において、ある空気圧 $h_{ao,i}$ のときの飽和試料層を通る空気の流れに関する動気勾配*i_a*は、($h_{ao,i}$, $Q_{ao,i}$)における接線と横軸との交点の空気圧を $h_{ao,i}$ (cm)として、次式によって表される。

$$i_{a,i} = \frac{h_{ao,i} - h_{ao,i}}{L} \quad (6)$$

なお、この $h_{ao,i}$ は、後述する5.(1)のように、試料層上面を覆う蒸留水中に気泡が排出されるときに、試料層上面に形成される水膜による空気流に対する抵抗を表していると考えられる。そして、空気圧 $h_{ao,i}$ のときの k_i 及び $k_{a,i}$ は次式によって表される。

$$k_i = \frac{\eta_a L}{\rho_w g A} \frac{Q_{ao,i}}{h_{ao,i} - h_{ao,i}}, \quad k_{a,i} = \frac{L}{A} \frac{Q_{ao,i}}{h_{ao,i} - h_{ao,i}} \quad (7)$$

なお、関係②の $h_{a,max}$ より大きくなるときは、乾燥試料の場合と同じ透気性を示す。

飽和試料中を空気が流れるには、空気圧力が毛管圧力を越えて間隙水を押し出す必要がある。図-4のように「間隙部分は直径 d_e のまっすぐに連続した円形毛細管の集合体である」と仮定すると、空気が飽和試料中に浸入する力とその浸入を妨げる力の釣合関係より、ある空気圧 $h_{ao,i}$ のときに間隙径 $d_{e,i}$ (cm)は次式によって算出される。

$$d_{e,i} = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_{ao,i}} \quad (8)$$

ここに、 σ ：水の表面張力(dyn/cm)

図-3の関係②の $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ の範囲の曲線関係は、

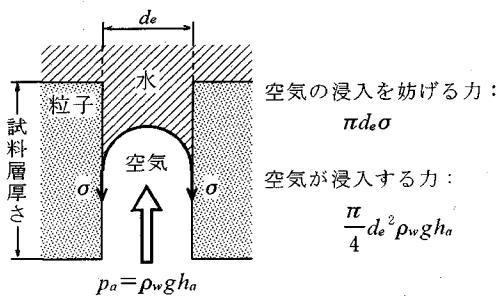


図-4 間隙径の定義

空気圧力増加に伴い大きな間隙径を有する間隙部分から順に間隙水が押し出され空気が流れる状態を表している。式(8)の $h_{a,i}$ を、空気が流れ始めたときの $h_{a,min}$ で代用することにより最大間隙径 $d_{e,max}$ が、また、乾燥試料の透気性と一致するときの $h_{a,max}$ で代用することにより最小間隙径 $d_{e,min}$ が、それぞれ算出される。

(3) 間隙径分布算出方法

(従来法) Žagarは¹⁰⁾、ある空気圧 $h_{a,i}$ のときに、式(7)から算出する k_i 、式(8)から算出する $d_{e,i}$ を用いて、空気圧によって間隙水が押し出され空気が流れた間隙部分の間隙率 $n_{e,i}$ (累積間隙率と称する)を次式によって算出している。

$$n_{e,i} = \frac{32k_i}{d_{e,i}^2} \quad (9)$$

なお、間隙径 $d_{e,i}$ の大きさを有する間隙部分の間隙率 $\Delta n_{e,i}$ は、 $\Delta n_{e,i} = n_{e,i} - n_{e,i-1}$ によって求められる。

本論文では、この $n_{e,i}$ から空気が流れる間隙部分体積の全間隙体積に対する比である累積間隙体積百分率 $V_c(\%)$ を次式によって定義する。

$$V_c,i = \left(1 - \frac{n_{e,i}}{n}\right) \times 100 \quad (10)$$

ここに、 n : 間隙率

式(9)、(10)による整理を従来法と呼ぶこととする。

しかしながら、図-3の曲線関係②では、 $h_{a,i}$ のときには最大間隙径 $d_{e,max}$ から $d_{e,i}$ までの範囲の大きさを有する間隙部分を空気が流れ、そのときの固有透過度が k_i であるにもかかわらず、式(9)は間隙径 $d_{e,i}$ のみの影響を考慮して $n_{e,i}$ を算出している。そのため、従来法の V_c では空気が流れた間隙部分を全て網羅した間隙体積を表現できていない懸念がある。

(修正法) Bearによって紹介されている種々の大きさの毛細管の集合体に関する固有透過度を表す式に基づけば¹⁵⁾、 $h_{a,i}$ のときの累積間隙率 $n_{b,i}$ は次式によって算出できる。

$$n_{b,i} = \sum_{j=1}^i \Delta n_{b,j}, \quad \Delta n_{b,j} = \frac{32 \Delta k_j}{d_{e,j}^2}, \quad \Delta k_j = k_j - k_{j-1} \quad (11)$$

ここに、 $\Delta n_{b,j}$: 間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の間隙率

Δk_j : 間隙径 $d_{e,j}$ の大きさを有する間隙部分の固有透過度(cm^2)

また、式(10)と同様に、累積間隙体積百分率 $V_b(\%)$ を次式によって定義する。

$$V_b,i = \left(1 - \frac{n_{b,i}}{n}\right) \times 100 \quad (12)$$

式(11)、(12)による整理を修正法と呼ぶことにする。式(11)では、各々の間隙径 $d_{e,j}$ からそれに対応した各々の間隙率 $\Delta n_{b,j}$ を算出してその累積量を n_b としているため、修正法には従来法のような懸念はない。

(4) 測定手順及び整理法

a) 乾燥試料の透気試験

① 炉乾燥試料を所定の乾燥密度になるように試料筒に充填し、試料部を組み立てる。そして、試料層下部に空気圧を調節した空気を送気する。

② 空気圧を徐々に増加させながら、空気流量 Q_{ac} 、空気圧力水頭 h_{ac} 、 h_a をそれぞれ計測する。

b) 飽和試料への空気圧入(間隙径分布の測定)

③ 上述の乾燥試料の透気試験後に、試料層上面に乾燥試料を飽和できる程度の体積の蒸留水を供給する。蒸留水が試料層内に浸透するとともに、 h_{ac} 、 h_a は増加、 Q_{ac} は減少する

④ 空気圧を $Q_{ac}=0(\text{cm}^3/\text{s})$ となるまで徐々に減少させ、試料層をほぼ飽和させる。そして、試料層上面の蒸留水が約10mm高さになるように調節する。

⑤ 空気圧を徐々に増加させ、飽和試料中で空気が流れ始めたとき(試料層上面を覆っている蒸留水中に排出される気泡で確認)、 Q_{ac} 、 $h_{ac,min}$ 、 $h_{a,min}$ をそれぞれ計測する。更に空気圧を徐々に増加させながら、 Q_{ac} 、 h_{ac} 、 h_a をそれぞれ計測する。

⑥ 式(1)により補正した Q_{ac} の h_a に対する増加率がほぼ一定になったと十分に判断されたとき、空気圧の増加を停止する。

ここで、図-5は、上述の①から⑥にかけての手順Aで計測した h_a と Q_{ac} の関係(\triangle 、▲印)に対して、それと同一間隙率の完全飽和した試料に空気圧入する手順Bで計測した h_a と Q_{ac} の関係(∇ 印)を比較したものである。いずれの手順によっても排水過程での h_a と Q_{ac} の関係がほぼ一致しているため、それを整理して求める間隙径分布もほぼ一致する。即ち、間隙構造の同一性や測定のし易さを考えると、一連の手順Aによって測定することも可能である。

⑦ 試料層上面を覆っている蒸留水を十分に取り除

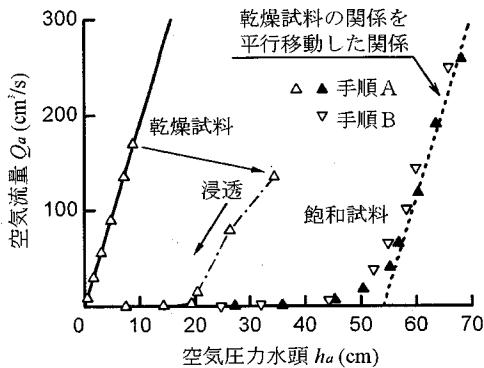


図-5 手順Aと手順Bによる空気圧力水頭と空気流量の関係(標準砂)

いた後に、試料の含水比 w を測定し、間隙水が空気によって置換された間隙部分の間隙率である空気間隙率 $n_a=n(1-w\rho_s/(\rho_w))$ を求める。

c) 整理法

- ⑧ 上述のa), b)で計測した空気流量 Q_{ac} を式(1)により Q_a に補正し、 h_a と Q_a の関係図を作成する。
- ⑨ 飽和試料に関する h_a と Q_a の関係が、乾燥試料の h_a と Q_a の原点を通る直線関係を h_a 軸方向に平行移動した関係と一致する部分を求め、 $h_{a,max}$ を決定する。そして、 $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ の範囲の計測点を通るとともに、 $h_{a,max}$ より大きい範囲の直線関係に漸近するように曲線を描く。
- ⑩ 上述⑨の曲線関係から、 $h_{a,i}$ 、その $h_{a,i}$ の地点での曲線との接線と h_a 軸との交点である $h_{ao,i}$ 、その $h_{a,i}$ に対応した $Q_{a,i}$ をそれぞれ読みとる。
- ⑪ 個々の $h_{a,i}$ から間隙径 $d_{e,i}$ を式(8)により、更に、個々の $h_{a,i}$ 、 $h_{ao,i}$ 、 $Q_{a,i}$ 及び $d_{e,i}$ から累積間隙体積百分率 $V_{b,i}$ を修正法である式(11)、(12)によりそれぞれ算出する。そして、 d_e と V_b の関係によって間隙径分布を表す。

3. 測定結果

(1) 砂質土の空気圧と空気流量の関係

標準砂、混合GB②についての空気圧 h_a と空気流量 Q_a の関係を示した図-5や図-6において、乾燥試料については、図中の実線のように、ほぼ原点を通る直線的関係を示している。レイノルズ数 Re を $Re=\rho_a v_a D / \eta_a$ (代表粒径 D は D_w (cm)とする)で定義して Re を試算すると、GB-Cでは $Re < 2.38$ 、標準砂では $Re < 0.41$ 、GB-ACでは $Re < 1.30$ 、混合GB①では $Re < 0.61$ 、混合GB②では $Re < 0.41$ である。Muskatの整理によれば¹⁸⁾、空気の流れの層流域は、レイノルズ数にし

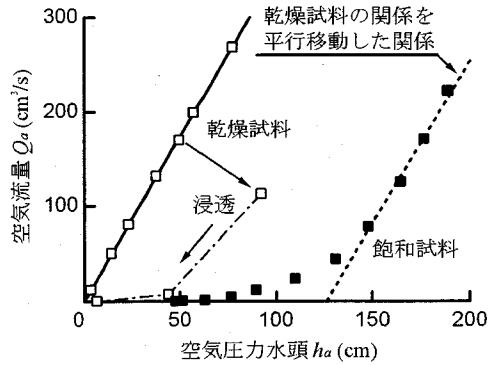


図-6 空気圧力水頭と空気流量(混合GB②)

て $Re < 1 \sim 10$ であるため、層流状態とみなすことができ、Darcy式(5)の関係が成立する。

一方、飽和試料に関する $h_{a,min}$ から $h_{a,max}$ の区間の h_a と Q_a の関係について Re を試算すると、GB-Cでは $Re < 1.13$ 、標準砂では $Re < 0.20$ 、GB-ACでは $Re < 0.79$ 、混合GB①では $Re < 0.26$ 、混合GB②では $Re < 0.10$ である。即ち、層流状態とみなすことができ、間隙径分布を求めるのに必要であるDarcy則に基づいた式(7)を利用できる。

(2) 間隙径分布

図-7には、砂質土に関する間隙径分布(実線、間隙径 d_e はmm単位で表示)を粒度(一点鎖線)と併せて示し、また、比較のため従来法によって整理した間隙径分布(点線)を併記した。各試料の間隙径の範囲はそれぞれ、GB-Cでは $0.101 \sim 0.221$ mm、標準砂では $0.0500 \sim 0.108$ mm、GB-ACでは $0.0408 \sim 0.116$ mm、混合GB①では $0.0223 \sim 0.111$ mm、混合GB②では $0.0193 \sim 0.0626$ mmにある。しかしながら、いずれの試料についても狭い範囲での間隙径の分布頻度がかなり高く、間隙径は粒度に関係なく比較的均等な分布を示す傾向にある。

一方、いずれの試料についても $V_{c,i} < V_{b,i}$ 、即ち、 $n_{e,i} > n_{b,i}$ となる傾向にあり、図-7(c), (d)では、 $V_{c,i} < 0$ 、即ち、 $n_{e,i} > n$ となる部分が存在する。間隙径分布の算出には、従来法より修正法による整理が適切であることが確認できる。

4. 毛細管模型の管径分布測定

空気圧入法は、先述の2. (2)のように、複雑な間隙構造を毛細管の集合体とみなす毛細管モデルの仮定に基づいている。ここでは、毛細管モデルそのものである「毛細管模型」を作成し、その管径分布

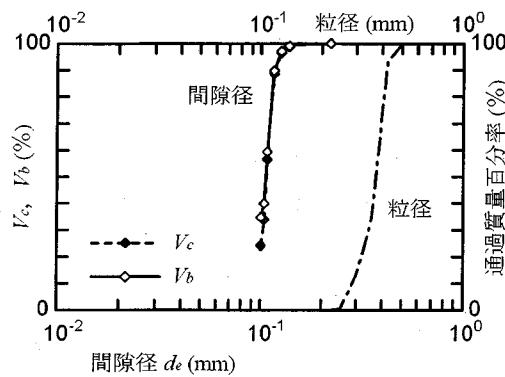


図-7(a) 間隙径分布(GB-C, $n=0.355$)

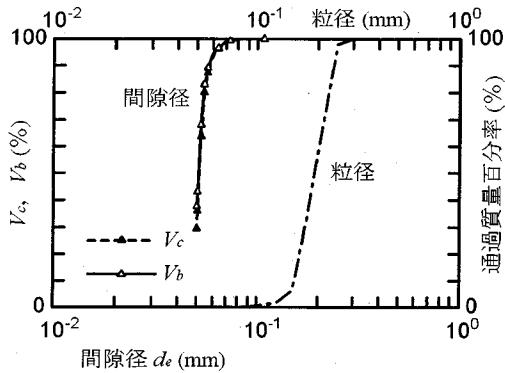


図-7(b) 間隙径分布(標準砂, $n=0.398$)

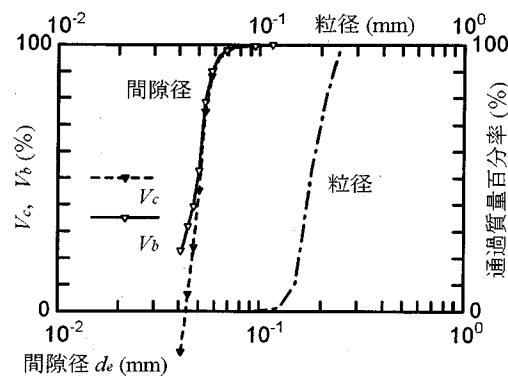


図-7(c) 間隙径分布(GB-AC, $n=0.346$)

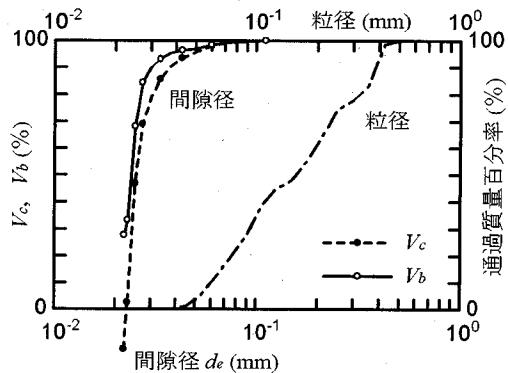


図-7(d) 間隙径分布(混合GB①, $n=0.295$)

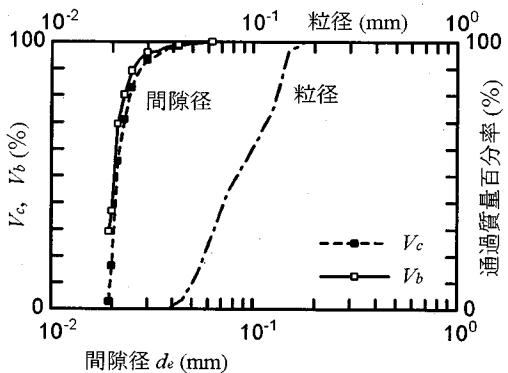


図-7(e) 間隙径分布(混合GB②, $n=0.340$)

を計測して、本手法の精度を確認することとする。毛細管には、表-2の左欄の設定状態に示す内径 d_e の4種類のステンレス管をそれぞれ N_v 本づつ用いた。また、表-2の設定状態には、飽和した各ステンレス管中を空気が流れるときの式(8)より予想される空気圧 h_a (cm)(水温 $T_w=20^\circ\text{C}$ のときであり、 $\sigma=72.75$ (dyn/cm), $\rho_w=0.9982$ (g/cm 3))を併記した。なお、右欄は後述する計測結果である。毛細管模型は、図-8や写真-2に示すように内径12mm(断面積 $A=1.131\text{cm}^2$)、高さ7.6mmのアクリルパイプの中に毛細管をアクリルパイプ断面に対して垂直になるように並べ、それらの毛細管の間にエポキシ樹脂を充填して作成した。その結果、従来法の式(9)から求められる Δn_e 、修正法の式(11)の Δm は、それぞれ表-2の設定状態のようになる。また、毛細管模型断面の一部の顕微鏡写真を写真-3に示すが、毛細管の断面形状は円形であることが確認できる。

図-9(a)は毛細管模型に対する手順A(図-5参照)による実験結果である。飽和状態に関する h_a と Q_{ai} の関係(●印)は、図-9(b)の実線のように、 h_a の増加に伴い大きな毛細管 d_{e1} から順に空気が流れ始め、

段階的に $Q_{ai}/(h_{ai}-h_{ao,i})$ 勾配が増加して変化する傾向にある。その変化するときの h_a を求めるると、表-2の計測結果のようであるが、設定状態から予測された h_a にほぼ一致し、設定した管径 d_e が的確に評価されている。また、表-2に示した設定状態の Δn_b と計測結果の Δn_b がほぼ一致しており、設定した管径分布(実線、 d_e と累積間隙体積百分率 V_b の関係で示す)と計測した管径分布(破線)を比較した図-10に

表-2 毛細管模型の設定状態と計測結果

i	設定状態					計測結果			
	d_e (mm)	h_a (cm)	N_v (本)	Δn_e	Δn_b	d_e (mm)	h_a (cm)	Δn_e	Δn_b
1	0.300	9.9	30	0.0188	0.0188	0.301	9.9	0.0186	0.0186
2	0.230	12.9	90	0.0331	0.0331	0.231	12.9	0.0424	0.0294
3	0.170	17.5	200	0.0401	0.0401	0.175	17.0	0.0812	0.0363
4	0.130	22.9	150	0.0176	0.0176	0.132	22.6	0.1343	0.0252

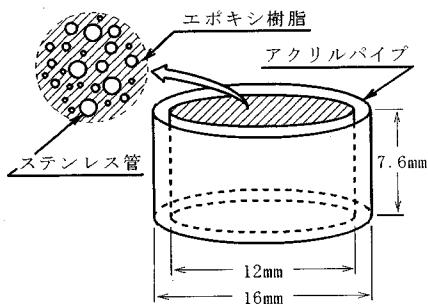


図-8 毛細管模型概要図

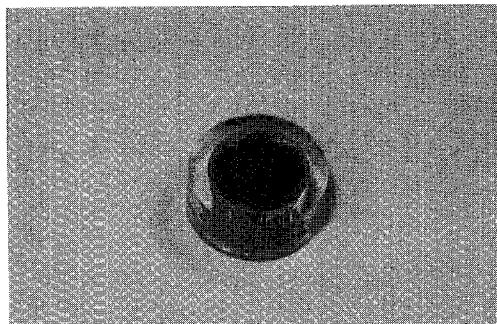


写真-2 毛細管模型全体写真

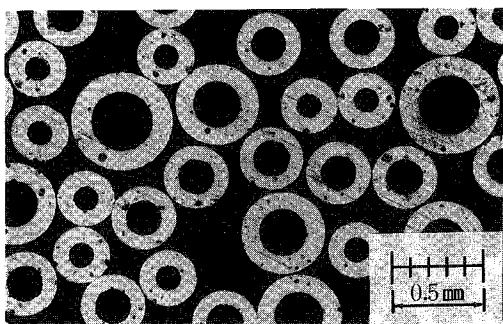


写真-3 毛細管模型断面の顕微鏡写真

よれば、両者の管径分布は良い一致をしている。一方、表-2に示した計測結果の Δn_e が設定状態の Δn_e とかなり異なり、図-10に併記した従来法による管径分布(一点鎖線)は、設定した管径分布とかなりのズレが認められ、 $V_{ci} < 0$ となる部分が存在し、不適当である。

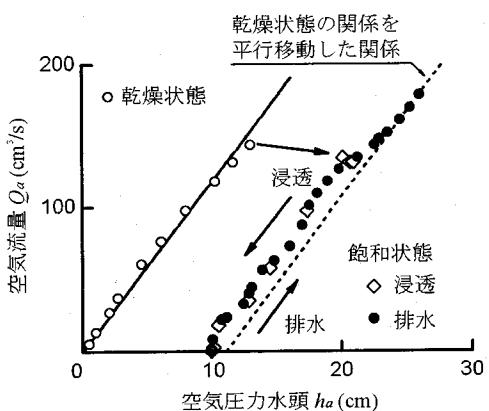


図-9(a) 空気圧力水頭と空気流量(毛細管模型)

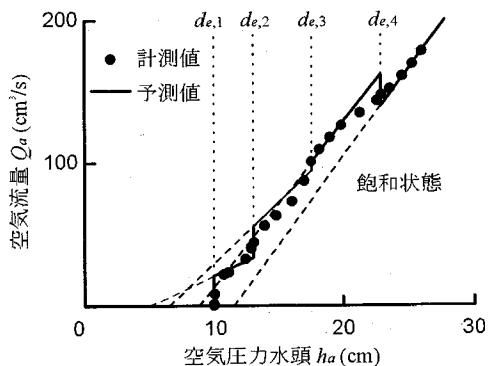


図-9(b) 飽和状態に関する空気圧力水頭と空気流量

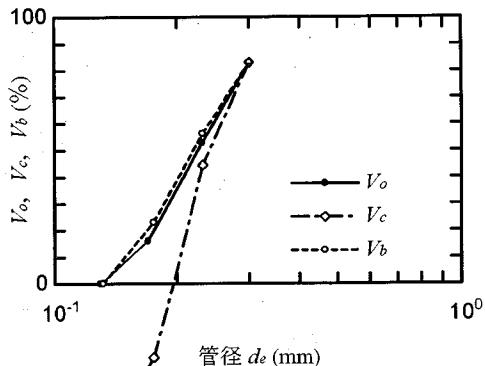


図-10 毛細管模型の管径分布

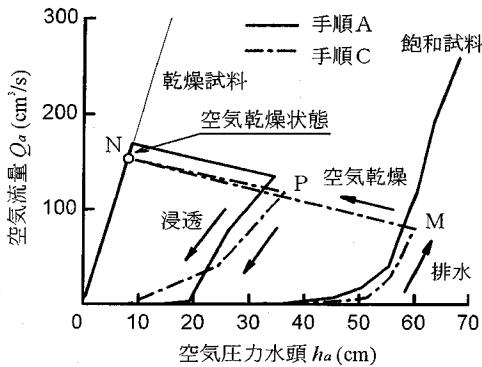


図-11 手順Aと手順Cによる空気圧力水頭と空気流量

5. 空気圧入法に関する問題点の検討

(1) 空気圧力水頭 h_{ao} の意味づけ

空気圧入法の測定原理の中で、図-3の h_{ai} での流量 Q_{ai} の観察後に $h_a \sim Q_a$ 関係に引く接線が横座標と交差する $h_{ao,i}$ の物理的意味は何であろうか。当初は試料上面のわずかな水深相当の水圧と考えたが、既述した整理の段階で明らかなように、 $h_{ao,i}$ は圧力レベルで変化させざるを得ず、しかもかなり大きい。このため、以下に考察する。

図-5の手順A(実線:乾燥-湿潤-飽和試料)に対比して、図-11の一点鎖線で示す手順Cは、当初から完全飽和試料の手順Bの途中のM点で、透気状態を約10時間の長時間維持すると試料上面の数mmの貯水が乾燥してN点に移動し、再度上面に給水しても元に戻らないP点で平衡した後、空気圧を下げる浸透過程までを表す。M→Nの過程では、試料上面の貯水部の水深が減少しても図中の点Mは移動せず、水深がなくなり気泡のみになって水分が減少する段階で、空気圧が低下し流量が増加してM→N過程を生ずることが判明した。即ち、M→N過程は試料上面の微量の水分による気泡が少なくなる過程を表す。このことは、図-4に示す間隙水を空気が押し上げて試料上面に達したときに出口で生ずる気泡の空気圧が大気圧より高い値を示し、これが $h_{ao,i}$ を発生させていると理解される。本手法で、試料層上面に少量の湛水面を作成する理由がこの点にある。

図-9(b)に示した毛細管模型の予測値は、 $h_{ao,i}$ が h_{ai} の5割、即ち、管径の2倍の大きさの出口気泡(式(8)の h_{ai} を $h_{ao,i}$ に置き換えて気泡径を算出)を仮定して求めたものであり、このとき計測値にかなり近い。一方、測定試料では、計測値は $h_{ao,i}$ が h_{ai} の7~9割であったが、これは毛細管模型に対比して三次元的間隙構造の影響を表現するものと考えられる。

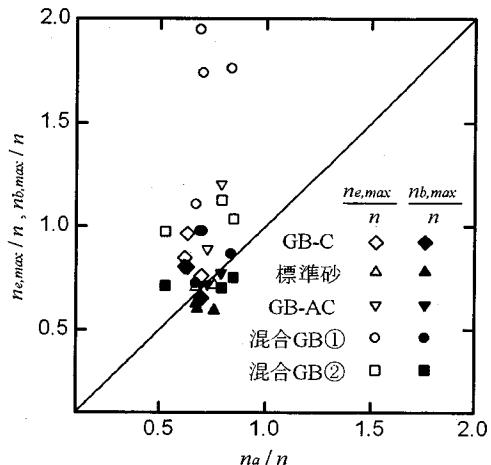


図-12 空気間隙率と最大累積間隙率

(2) 空気圧力水頭と空気流量の関係のヒステレシス

混合GB②に関する図-6や標準砂に関する図-5, 11にみられた間隙水の浸透と排水による h_a と Q_a の関係のヒステレシスは、毛細管模型に関する図-9(a)では生じていない。間隙構造は、毛細管模型では円形毛細管が一次元方向にまっすぐに配列している。それに対して、砂質土では複雑な間隙形状を有し、間隙は曲がりくねり、三次元的に枝分かれしている。即ち、砂質土で生じたヒステレシスは、これら間隙構造に起因して、間隙水の浸透と排水で水-空気界面の存在状態が異なるためではないかと推察される。

(3) 間隙空間と付着水(間隙水)

図-12は、2. (4)の手順⑦で求めた空気間隙率 n_a/n に対する比と最大累積間隙率 n_e,max 及び n_b,max のそれぞれの n に対する比との関係を示したものである。修正法によると、 n_b,max , n_a の両者とも n の6~9割程度であり、いずれの試料も $n > n_b,max = n_a$ である。 $n_b,max = n_a$ より、 n_b,max は間隙水が押し出され空気が流れた間隙部分の間隙率を良く表しており、 n_b,i も同様であると判断される。一方、このときの間隙水は、空気の流れに寄与しない粒子接触点付近や小さな間隙部分に残留していることが想像される。それ故、土粒子付着水が間隙径の評価に影響することが懸念されたが、表-2のように毛細管模型の管径が評価できていること、飽和試料に関する k が乾燥試料に関する k と一致することから、付着水による間隙径の評価への影響は少ないものと判断される。

図-13は、標準砂の間隙径分布を空気圧入法(実線)と水銀圧入法(一点鎖線)によりそれぞれ計測した結果を比較したものであるが⁹⁾、空気圧入法では、

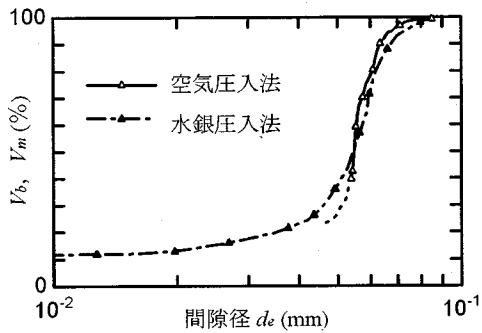


図-13 空気圧入法と水銀圧入法による間隙径分布の比較(標準砂, $n=0.398$)

試料層内の空気流に垂直な方向や空気が貫通できない部分の間隙を評価できないと考えられる。そのため、図-7, 13のように全間隙の3~4割程度の間隙部分の間隙径が計測されていない分布型となっている。また、三次元的に間隙径を評価できていると考えられる水銀圧入法による結果よりも間隙径分布は若干小さくなる傾向にある。

(4) 間隙径分布の計測可能範囲

図-2に示したような0.03~0.5mmの範囲に粒度をもち、粒径から細砂に分類される試料を対象として、図-7のようく0.02mm~0.2mmの範囲での間隙径分布を計測できることを示した。また、飽和試料への空気圧入圧力は、粒度の大きいGB-Cでは最大で $h_a=40$ cm、粒度の小さい混合GB②では最大で $h_a=200$ cmを必要とした。

6. 粒径と計測された間隙径

間隙径分布と粒度を対比して示した図-7によれば、いずれの試料についても計測される間隙径は、粒度の3割程度以下の範囲に分布する傾向にある。

次に、空気圧入法によって計測された間隙径分布の平均間隙径 d_e^* (cm)を次式で定義する。

$$d_e^* = \frac{V_v}{A_v} = 4 \frac{\sum V_{v,i}}{\sum A_{v,i}} = 4 \frac{\sum (N_{v,i} \pi d_{e,i}^2 L / 4)}{\sum (N_{v,i} \pi d_{e,i} L)} \\ = \frac{\sum \Delta n b_{i,j}}{\sum (\Delta n b_{i,j} / d_{e,i})} \left(\Delta n b_{i,j} = \frac{N_{v,i} \pi d_{e,i}^2 L / 4}{V} \right) \quad (13)$$

ここに、 V_v , A_v はそれぞれ計測された間隙部分の全体積(cm³), 全表面積(cm²)を表し、 $V_{v,i}$, $A_{v,i}$, $N_{v,i}$ はそれぞれ間隙径 $d_{e,i}$ を有する間隙部分の体積(cm³), 表面積(cm²), 個数を表し、 V は全試料層体積(cm³)。

図-14は、 d_e^*/D_w と e の関係を示したものであるが、 d_e^* は D_w の2~3割程度であり、 d_e^* , D_w と e の関

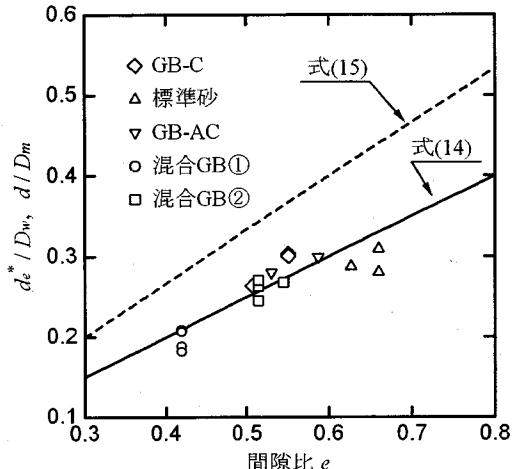


図-14 平均間隙径の平均粒径に対する比と間隙比の関係

係は、図中の実線で示すように、実験的に次式が得られた。

$$\frac{d_e^*}{D_w} = \frac{1}{2} e \quad (14)$$

ところで、空気透過法により土粒子の比表面積を求めるのに用いるKozeny-Carman式を誘導する過程で、平均間隙径 d (cm)と平均粒径 D_m (cm)の関係は次式によって表され¹⁴⁾、図-14に破線で示した。

$$\frac{d}{D_m} = \frac{2}{3} e \quad (15)$$

いずれの試料についても $D_w \approx D_m$ であるため、式(14)と式(15)の比較から、 d_e^* は d の3/4程度に小さくなる傾向にある。

7. おわりに

本論文は、飽和試料への空気圧入により、その圧入圧力 h_a と通過する空気流量 Q_a の関係から間隙径分布を求めるという「空気圧入法」を提案し、その方法の適用性について検討した。その結果、以下のことが判明した。

- (1) Žagarによって開発された空気圧入法は、以下に述べるような条件の下で、水銀圧入法に較べて簡便な装置により、間隙径分布の計測が可能であった。
- (2) 粒径から細砂に分類される試料に対して、0.02mm~0.2mmの範囲の間隙径分布が計測できることが確認できた。
- (3) 間隙径分布の算出方法は、Žagarの従来法には理論的に問題があった。そのため、新たに修正法を示したが、砂質土や毛細管模型の計測結果や累積間

隙率と空気間隙率の比較等からみてもこの方法が適切であった。

(4) 飽和試料への空気圧入時には、試料層上面に水膜による空気流に対する抵抗を表す空気圧力水頭 h_{ao} が負荷されることが考えられた。また、間隙水の浸透と排水によって生じた h_a と Q_a の関係のヒステレシスは、毛細管模型の結果との比較から砂質土の三次元的間隙構造に起因しているのではないかと推察された。

(5) 複雑な間隙構造を毛細管モデルで表現するため空気圧入法で計測した間隙径分布は、水銀圧入法によるものに較べて遜色なかった。しかし、毛細管流に垂直な方向の間隙を評価しにくいためか間隙径分布は若干小さくなる傾向にあった。

(6) 空気圧入法によって計測した間隙径は、均等な砂では粒径の3割程度、混合粒径試料では1~3割程度の範囲に分布した。また、間隙径分布から求めた平均間隙径 d_e^* は、理論的な関係式(15)で与えられる d に対して3/4程度であった。

本研究は文部省平成6年度科学研究費補助金(一般研究(C)、課題番号: No. 06650534、研究代表者: 宇野尚雄)の補助を受けた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 山口柏樹、大根義男: フィルダムの設計および施工, 技報堂, pp. 169-172, 1973.
- 2) 土質工学会編: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 土質工学会, pp. 127-129, 1985.
- 3) 土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎一, 森北出版, pp. 231-233, 1979.
- 4) Campbell, G. S.著, 中野政詩、東山勇監訳: パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版会, pp. 36-56, 1987. (原書は, Campbell, G. S. : *Soil Physics with Basic*, Elsevier Science Publishers B. V., 1985.)
- 5) 中野政詩: 土の水分量と毛管張力の関係(脱水過程)1—理論一, 農業土木学会論文集, 第35号, pp. 1-10, 1971., 及び, 土の水分量と毛管張力の関係(脱水過程)2—主として諸定数, 理論曲線, 実験曲線についてー, 農業土木学会論文集, 第35号, pp. 11-14, 1971.
- 6) 北村良介, 下川悦郎, 地頭菌隆, 岩松暉, 横田修一郎: しらす地盤における降雨に伴う土砂災害の発生機構の解明, 河川情報センター助成研究成果報告書, (財)河川情報センター, pp. 180-187, 1995., 及び, Kitamura, R., Jitousono, T., Joumoto, K. and Taguchi, H.: A Research Concerning Unsaturated Seepage Analysis Related to Slope Failure in Kagoshima, *Natural Disaster Science*, Vol.10, No.2, pp.1-11, 1988.
- 7) Feda, J. : *Mechanics of Particulate Materials*, Elsevier Scientific Publ. Co., pp.77-79, 1982.
- 8) 山口晴幸, 池永均: 土構造評価への水銀圧入型ポロシメーター装置の利用, 土と基礎, Vol. 41, No. 4, pp. 15-20, 1993.
- 9) 佐藤健, 曾場昭之, 桑山忠, 宇野尚雄: 水銀圧入式ポロシメーターによる粒状材料の間隙径分布の測定, 土木学会論文集, No. 445/III-18, pp. 139-142, 1992.
- 10) Zagar, L. : Ermittlung der Größenverteilung von Poren in Feuerfesten Baustoffen und Glasnutschen Teil II, *Arch. Eisenhüttenwes.*, Vol.27, No.10, pp.657-663, 1956.
- 11) Uno, T. and Kamiya, K. : Air Intrusion Method to Measure Sand Void Diameter, *Proc. of the 10th ARC on SMFE*, Vol.1, pp.99-102, 1995.
- 12) Jeschke, P. : Texture Analysis of Basic Refractory Brick, *J. Amer. Ceram. Soc.*, Vol.49, No.7, pp.360-363, 1966.
- 13) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, 土質工学会, pp. 68-69, 1982.
- 14) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No. 469/III-23, pp. 25-34, 1993.
- 15) Bear, J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publ. Co., pp.161-164, 1972.
- 16) Muskat, M. : *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*, McGraw-Hill Book Co., p.60, 1937.

(1995. 10. 5 受付)

MEASUREMENT OF THE DISTRIBUTION OF SANDY SOIL VOID DIAMETER BY AIR INTRUSION METHOD

Kohji KAMIYA, Takao UNO and Takeshi MATSUSHIMA

The distribution of soil void diameter is an important factor to express soil void structure, to select grout materials and filter materials. Air intrusion method to measure the distribution of soil void diameter is suggested. For the method based on the capillary tube model, it is required the relationship between pressure of air intruded into saturated soil and flow rate of air passed. In the present paper, the adaptability of the method is verified on the measurement of the distributions of void diameter of both sand samples and artificial capillary tube model. As a result, it is shown that the method is fairly good to estimate sand void diameter in comparison with the one by mercury intrusion method.