

# 水銀圧入法による砂の間隙径の測定

岐阜大学工学部土木工学科 正員 ○ 佐藤 健  
// 学生員 曾場 昭之  
大同工業大学建設工学科 正員 桑山 忠

## 1. はじめに

ポロシメーターを用いた水銀注入法による細孔径の測定範囲は $0.01\mu\text{m}$ ～数 $100\mu\text{m}$ である。細孔の形を円筒と仮定しているため、得られる細孔径分布は実際のものとは幾分違い、見かけの値である。しかしながら、そうした間隙径分布の情報により、土の透水特性や、締め固め特性の工学的性質がよく説明できることがわかってきた<sup>1)2)</sup>。本研究では、水銀圧入法を用いて粒状材料の間隙径分布を推定する方法を示し、得られた結果について、マクロ的な指標を用いながら考察を加える。また、測定結果の応用例として、水分保持特性曲線を推定したので、その方法と結果について以下に報告する。

## 2. 間隙径分布の測定

(a), 水銀注入法の原理 水銀注入法による細孔径の測定は、接触角が $90$ 度以上である液体は、表面張力のために自分自身では細孔内へ入って行けないという性質を利用するものである。細孔へ水銀を入れるためには、外側から圧力を加える必要があり、必要とする圧力は細孔径に関係し、その関係式は、Washburnの式として知られているもので、

$$Pr = 2\sigma\cos\theta \quad (1)$$

$P$ ; 加えた圧力  $r$ ; 細孔半径  $\sigma$ ; 水銀の表面張力  $\theta$ ; 接触角

で表される。細孔を円柱とすると水銀の表面張力は、 $2\pi r\sigma$ となり、接触面に垂直に働くことになる。細孔より水銀を押し出そうとする力は、 $2\pi r\sigma\cos\theta$ となり、この力に反して水銀を注入するには、水銀に $\pi r^2P$ の外力が必要で、平衡になるためにはこれらの力が等しくなる必要があり、 $2\pi r\sigma\cos\theta = \pi r^2P$ となり、(1)式が得られる。水銀注入法では、水銀の表面張力 $\sigma$ を $480\text{dyn/cm}$ 、接触角 $\theta$ を $141.3^\circ$ として計算している。

(b), 試料 粒径が大きくなると間隙径も大きくなることが予想され、ポロシメーターでは、 $60\sim 70\mu\text{m}$ 以上は測定誤差が大きくなると言われている。豊浦砂の粒径は $74\sim 420\mu\text{m}$ である。この砂を粉碎器を使用して $32\sim 53\mu\text{m}$ に細かく砕いたものを試料として用い、ポロシメーターの測定範囲内の試料を用いることにより、得られた結果の妥当性の検討が行い易いようにした。予備実験として粒状のままの試料の細孔径分布を測定し、砂粒子の細孔が何程度であるかも把握しておく。

(c), 粒状材料の測定方法 砂などの粒状材料は、粒子の配列によって骨格構造が構成される。この粒状材料の構造は各々の粒の細孔にはあまり影響されず、間隙径分布によって表現することもでき、間隙径は粒状材料の工学的性質に影響を与える重要な要素だとも考えられる。粒状材料の間隙径分布を測定するには、粒状材料を成形体にする必要があり、成形体にするにはいろいろな手段が考えられる。今回は、図に示すような鋼製容器に砂を入れて、容器ごとポロシメーターにかける方法を採用した。こうすることにより、砂の任意の密度の間隙径分布が得られることになる。

### (d), 測定試料の作成法

- ①市販の銅管(外径 $1\text{cm}$ ,内径 $8\text{mm}$ )を適当な高さ( $1\text{cm}$ 程度)に切断し、内容積を求める。
- ②銅管底面に樹脂系の接着剤で金網(呼び寸法 $74\mu\text{m}$ )を貼りつける。
- ③炉乾燥した砂試料を所定の密度になるように銅管に詰め、上端面に樹脂系の接着剤で金網( $74\mu\text{m}$ )を貼り付ける。

PORE SIZE ANALYSIS FOR PERMEABILITY ESTIMATION IN POROUS MATERIAL  
T.SATO and T.SOBA (Gifu University), T.KUWAYAMA (Daido Institute of Technology)

- ④ピンセットを使ってデイトメーター内に砂試料の入った銅管を注意深く静かに置く。
- ⑤デイトメーター内を真空(0.02mmHg)にし、水銀をシステムの所定の位置まで満たす。
- ⑥圧力を少しずつ加えながら、間隙内に侵入した水銀体積を、水銀面の降下量から読み取る。

### 3. 水銀圧入量から推定される間隙比

先述したように、水銀注入法では間隙径を円筒と仮定して、間隙径を推定している。したがって、測定される間隙径分布はある圧力に対応して(1)式より算出された円筒の半径に対応している。土試料表面での間隙の入り口よりも、試料内部の間隙が広がっている場合には、試料表面での情報が優先されて、小さい間隙が多く存在するという情報が得られる。また、試料に高圧がかかるために、粒自身の細孔がつぶれたり骨格構造が変形して間隙径が変化することもある。砂の透水性の推定に、水銀の通る間隙経路と水が通る間隙経路は同じであると考えられるので、ポロシメーターで測定された間隙径が、実際の間隙径分布と異なっても透水係数値がそれほど大きな差は出ないと考えている。ポロシメーターより得られた間隙径の、物理的意味を考えることはたいへん重要である。ここでは、マクロ的指標の間隙比に着目して、水銀注入法による間隙径測定法の妥当性を少し考察してみる。試料の間隙、粒子の細孔に侵入した総水銀注入体積は、既知であるので、間隙、細孔体積がわかる。したがって、試料の乾燥密度  $\gamma_d$  から推定される間隙比と比較して、水銀注入法で推定される値の妥当性を、マクロ的な観点から検討した。

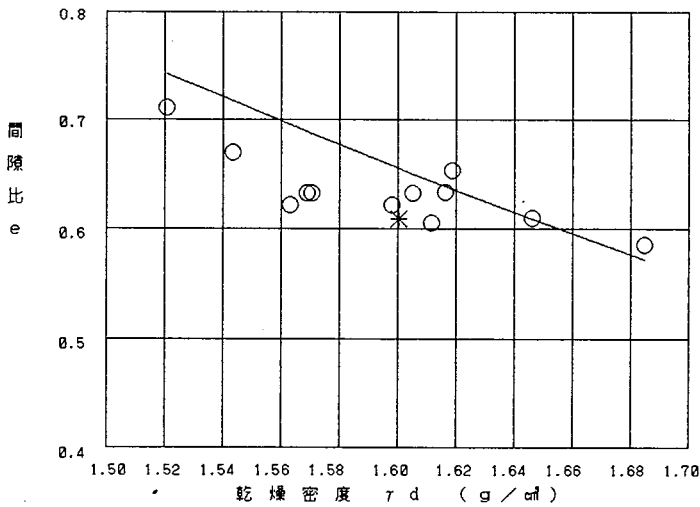


Fig. 1

Fig.1の○印は、水銀注入法により、 $[ e = \frac{\text{総水銀注入体積}}{\text{容器の体積} - \text{総水銀注入体積}} ]$  から算出したものであり、実線は

$$[ e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 ] \text{ の理論曲線である。}$$

一般に水銀注入法では、セラミックなどの成形体試料に水銀を注入した場合、間隙に侵入する総水銀体積は、実際の間隙の体積を上回ることなく、いくぶん小さく評価されると言われている。それは測定の限界に近い径の小さい間隙には水銀が侵入しにくいからだと考えられる。このことより、今回の容器に砂を詰めて得られた総水銀注入体積も実際の間隙体積よりも幾分小さく評価されたものと思われる。Fig.1 より間隙比が理論線と概ねよい一致を示しており、粒状材料を容器に詰めることによって、他のセラミックなどの成形体と同じように水銀注入法が間隙径の測定に有効に利用できると思われる。

Fig.2(a), (b)は32~53  $\mu\text{m}$ の粉碎砂を容器に詰めたものと、粒径74~420  $\mu\text{m}$ の豊浦砂を容器に詰めたものの比較である。どちらも乾燥密度は1.6g/cm³である。豊浦砂は、その粒径範囲 から74  $\mu\text{m}$ より大きな間隙も

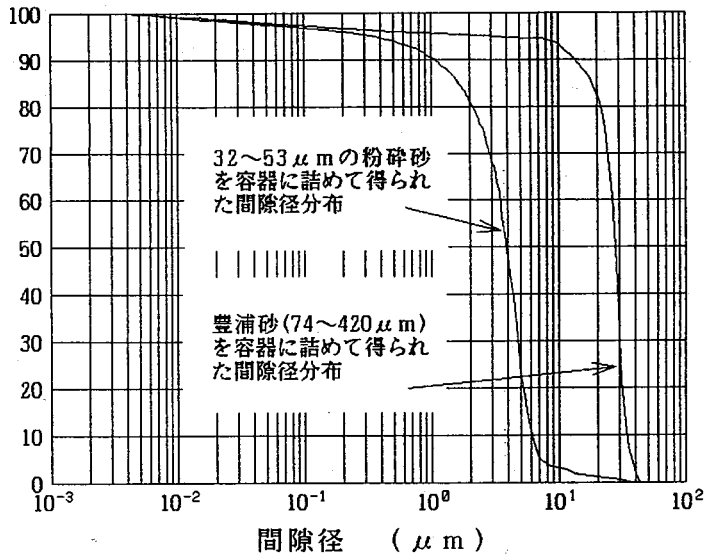


Fig. 2 (a)

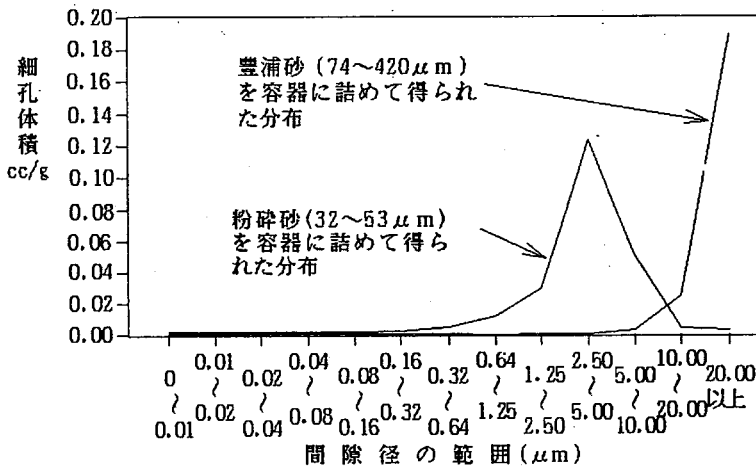


Fig. 2 (b)

試料内部に存在すると考えられるが、容器端面に貼り付けた金網の径の影響で、 $74\mu\text{m}$ より大きい間隙は測定結果には現れず、測定範囲の上限付近の間隙が多く存在しているような結果になっている。比重試験の結果によれば、粉碎砂と豊浦砂の比重は、いずれも同じ値(2.649)となった。マクロ的な土の「すきま」を表す指標となる間隙比はどちらも同じであるけれども、粒径が異なる場合には、間隙径分布もかなり異なることがFig.2(a)(b)の結果からわかる。今回の測定結果によれば、粒径の小さい試料の方が間隙径は、小さくなる傾向にあることがわかった。

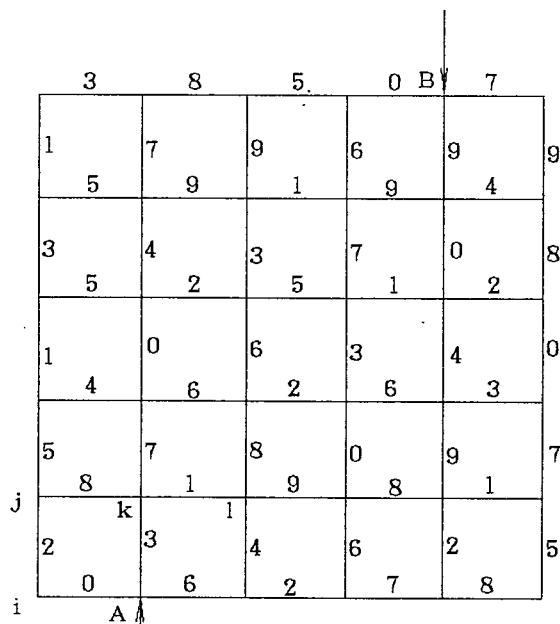
#### 4. 間隙径分布にもとづく透水特性の推定

間隙径分布情報から土の透水特性を推定する方法はいろいろ提案されている。大きく分けると、①Single Capillary Tube Model ② Bundle of Capillary Tube Model がある。①は、土の間隙を単一の円筒と考えるもので、あまりにも単純化しているということで、②のモデルがよく用いられる。②のモデルの代表例である Burdine Model<sup>3)</sup>を用いて透水係数を推定したところ、室内試験の結果よりもかなり大きい値が得られた。これは、②のモデルが径の同じ円筒の束で土の間隙をモデル化しており、連続する間隙経路における間隙径の場所的変化を考慮していないためではないかと考えられた。また、①、②のやり方はいずれも、土の

水分保持特性曲線が必要である。水分保持特性曲線は通常サクシオン-体積含水率（飽和度）関係で与えられることが多いけれども、この関係を室内で求めるには、砂質土を除きかなりの時間を必要とし、全サクシオンにわたって統一的方法で計測できる試験法も示されていない。水分保持特性曲線を間隙径から推定する試みが中野<sup>4)</sup>によって行われている。よく知られているように、水分保持特性曲線は吸水、脱水過程でヒステリシスを示すけれども、中野の研究は脱水過程を議論したもので、吸水、脱水のヒステリシスの再現性にまでは立ち入って議論していない。

### 5. 間隙径分布のネットワークモデルへの利用

①ポロシメーターより得られた間隙径分布曲線（確率密度関数になる）に従い、0~1の乱数を使ってネットワークモデルの格子点（node）と枝線（branch）に間隙径を割りふってやる。現在の水銀注入法による間隙径測定法ではnodeとbranchの間隙を区別することは難しい。したがって、今回の計算では2つを区別せずに計算している。簡単のためにFig.3に、間隙径分布（一様分布）をbranchだけで構成されたネットワークモデルに割りふった結果を示した。間隙径の大きさは0~9までの数字で区別している。



ネットワークモデルの説明図

Fig. 3

②毛管ポテンシャルに対応する間隙半径 ( $R_{crit}$ ) よりも小さな間隙にだけ水が浸透していくものとする。吸水過程では、毛管ポテンシャルに対応する間隙半径 ( $R_{crit}$ ) より小さい間隙半径で構成される浸透経路を探索して、浸透経路に含まれる全ての格子点（node）と枝線（branch）の割合 ( $S_{inf}$ ) を求める。Fig.3で  $R_{crit}$  に対応する数字が3として説明してみる。A点に侵入した水はA→i→jとA→k→lまで侵入する。これを何回も繰り返して、水で満たされたbranchの数を計算する。

排水過程では、吸水過程と逆に毛管ポテンシャルに対応する間隙半径 ( $R_{crit}$ ) よりも大きな間隙半径で構成される浸透経路のうち、ネットワークモデルを貫通するものを探索しその浸透経路に接するか、交わる全ての格子点（node）と枝線（branch）の割合 ( $S_{drv}$ ) を求める。 $R_{crit}=5$ を考えてみよう。Fig.1のB点から侵入しようとしている空気はB→7→9→8とB→9→9→7→5→6→8→9→6と侵入する。B→7→9→8の経路では排水は生じない。B→9→9→7→5→6→8→9→6の経路をたどる空気だけがメニスカスを破って、モデルを貫通し、排水が行われると考える。

③ネットワークモデルを貫通する浸透経路の発生割合 ( $I_0$ ) を求める。これは、排水過程の無限ループの発

生頻度に等しくなり、排水・吸水いずれの過程も同じ値になる。これが比透水係数となる。

④考える毛管ポテンシャルに対する飽和度、比透水係数の期待値を  $(S_{rinf})$ 、 $(S_{ravy})$ 、 $(I_0)$  を用いて計算する。

### 6. 推定した水分保持特性曲線

Fig.4に示すように、異なる3つの間隙径分布に対する水分保持特性曲線を、5.の方法で推定した。その結果をFig.5 (a),(b),(c)に示す。

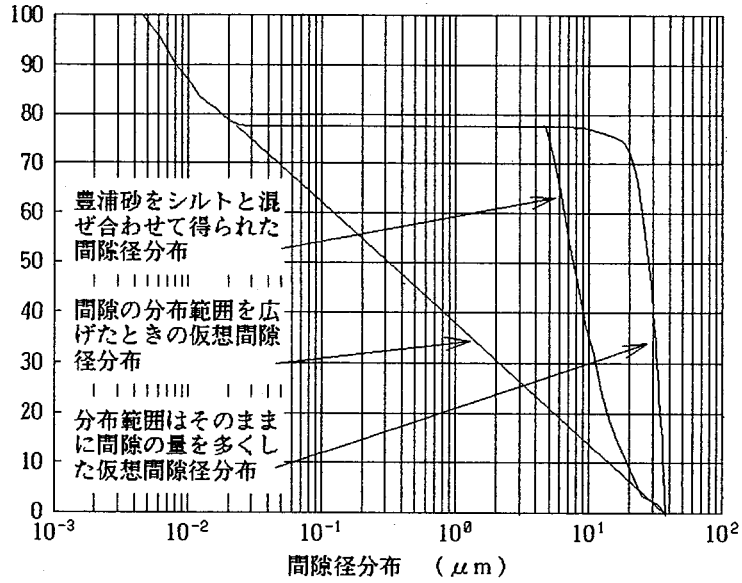


Fig. 4

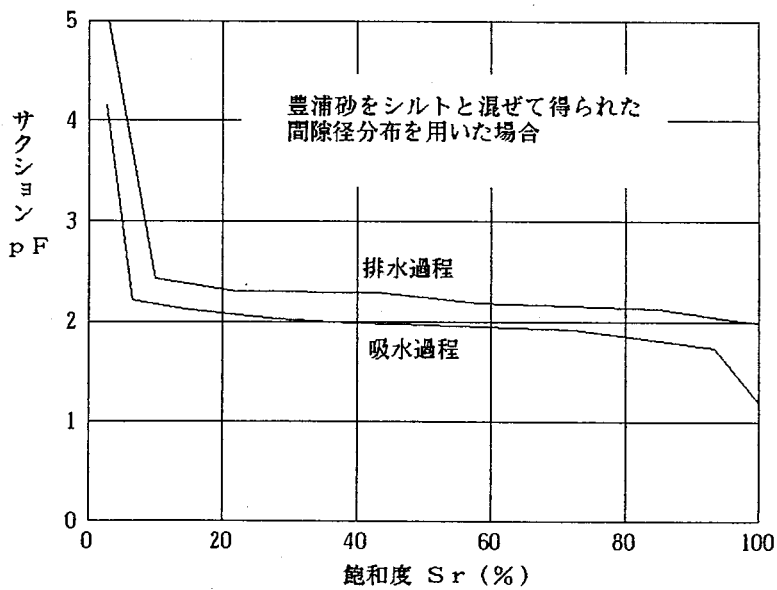


Fig. 5 (a)

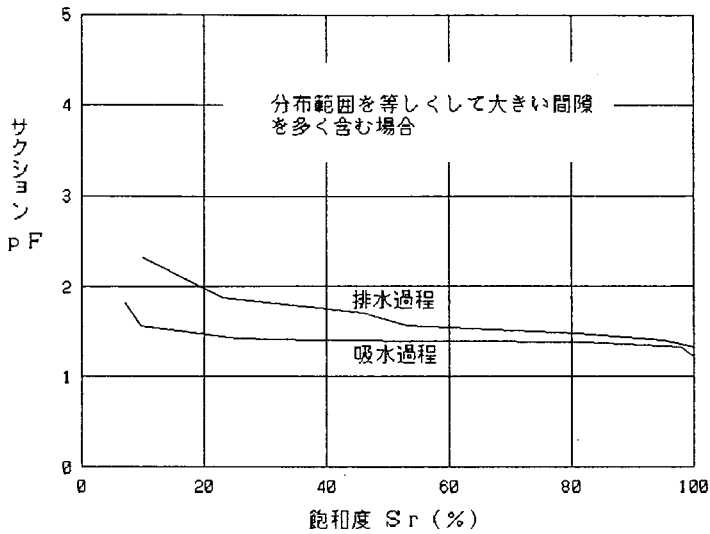


Fig. 5 (b)

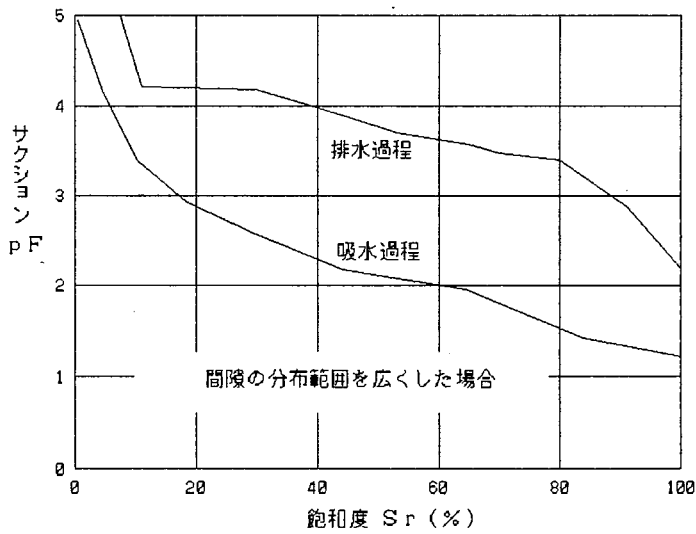


Fig. 5 (c)

①間隙径の分布範囲が同じでも、比較的大きな間隙径が多く存在する場合には、同一の飽和度でもサクシヨンは小さくなり、毛管上昇高さも小さくなる (Fig.5(a)と(b))。

②間隙径の分布範囲が広がると同一の飽和度でもサクシヨンが大きくなり、毛管上昇高さも大きくなる ((Fig.5(a)と(c)) )。

③間隙径の分布範囲が広いほど、中飽和度域のサクシヨン変化が大きくなる (Fig.5(a)) 。

以上の傾向が計算結果より読み取れる。

〈参考文献〉

- 1) S.Diamond : Pore Size Distributions in Clays, Clay and Clay Minerals, Vol.18, pp.7-23, 1970.
- 2) C.H.Juang and R.D.Holtz : Fabric, Pore Size Distribution, and Permeability of Sandy Soils, ASCE, Vol.112, No.9, pp.855-868, 1986.
- 3) N.T.Burdine : Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data, AIME, Vol.198, pp.71~78, 1953
- 4) 中野 政詩 : 土の水分量と毛管張力の関係 (脱水過程)、農業土木学会論文集、第35号、pp.1~9、1971