

# 間隙径分布の計測による 水分保持特性・比透水係数の推定

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

## 1. まえがき

ポロシメーターを用いて土の間隙径分布を測定し、その結果を用いて不飽和透水特性を検討している。ポロシメーターより得られた間隙径分布にもとづいてBurdineモデルを用いて透水係数を推定すると、実験値と比較してかなり大きい値になった。この原因は間隙径の場所的な変化を考慮に入れていなかったためと考えられ、間隙径の空間分布を考慮するためネットワークモデルの応用を試みた。

## 2. 従来の研究

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>1)</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な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な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>2)</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。

## 3. 間隙径分布情報のネットワークモデルへの適用

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.1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。

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( $S_{ring}$ )を求める。Fig.1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

---

PORE SIZE ANALYSIS FOR PERMEABILITY ESTIMATION IN POROUS MATERIAL

T.SATO and T.SOBA (Gifu University), T.KUWAYAMA (Daido Institute of Technology)

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 ( $I_o$ ) 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 ( $S_{inf}$ )、( $S_{drv}$ )、( $I_o$ ) を用いて計算する。

#### 4. 推定した水分保持特性曲線と比透水係数

豊浦標準砂の不飽和透水係数および水分保持特性曲線を推定するためには、まず間隙径分布曲線をポロシメーターによって求める必要がある。砂の間隙径分布を測定するには、砂は塊状でなければならない。そのためシルトと混合した砂塊を作成してポロシメーターによる水銀注入法で測定した。得られた間隙径は、Fig.2のように、 $10\mu\text{m}$ と $10^{-2}\mu\text{m}$ の付近に分布しているが $10^{-2}\mu\text{m}$ 付近の間隙径の小さい方は、シルトで形成された間隙径ではないかと考えられた。そこでネットワークモデルに与えられる間隙径は、 $5\sim 30\mu\text{m}$ の範囲を用いてそのあいだの確率分布に従った。計算結果をFig.3, Fig.4に示した。図中の○印と●印は既発表の豊浦砂に関する測定結果である。浸透破壊の高飽和度領域 (80%以上) での計算と、残存飽和度付近の計算に、今後の改良の余地が残されるものの、水分保持特性のヒステリシスの再現性、比透水係数の室内試験結果との一致度から判断すると、ネットワークモデルを介した不飽和透水特性推定に、間隙径分布の情報が効果的に利用できる可能性がうかがわれた。

#### 5. あとがき

ネットワークモデルの考え方自体は新しいものではなく、かなり以前よりいろいろな分野 (毛細血管内の血液の流れ、活性炭の吸着・脱着現象、災害時の避難経路、地震の発生規模、亀裂の進展等) で使われている。いずれも、確率過程に立脚して、複雑な現象を再現したり、ある統一的な原則を見出す際によく用いられる手法である。土の間隙径分布が簡単に測定できるならば、水分保持特性・透水特性推定へも、ネットワークモデルが使えるようなことを、砂のケーススタディーによって示した。1990年5月6日～9日までスペインで開かれた応用化学学会のシンポジウムに出席した。マイクロポアの計測法と、その間隙のモデル化が話題の中心であった。ここで示したと同様のネットワークモデルが用いられていたけれども、注目の中心は、間隙の結合性だとか、間隙内部の粗度、間隙形状であった。土では、かなり空間平均化された量を問題にすることが多く、それ程細かい考慮をしなくてもFig.3, Fig.4程度の対応は得られるものと考えている。

#### <参考文献>

- 1) N.T. Burdine : Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data, AIME, Vol.198, pp.71~78, 1953
- 2) 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
- 3) 佐藤・桑山 : 間隙径分布情報にもとづく不飽和透水係数推定の試み、第44回 土木学会年次学術講演会概要集、pp.1048~1049、1989.
- 4) 河野・西垣 : 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、pp.59~69、1981.

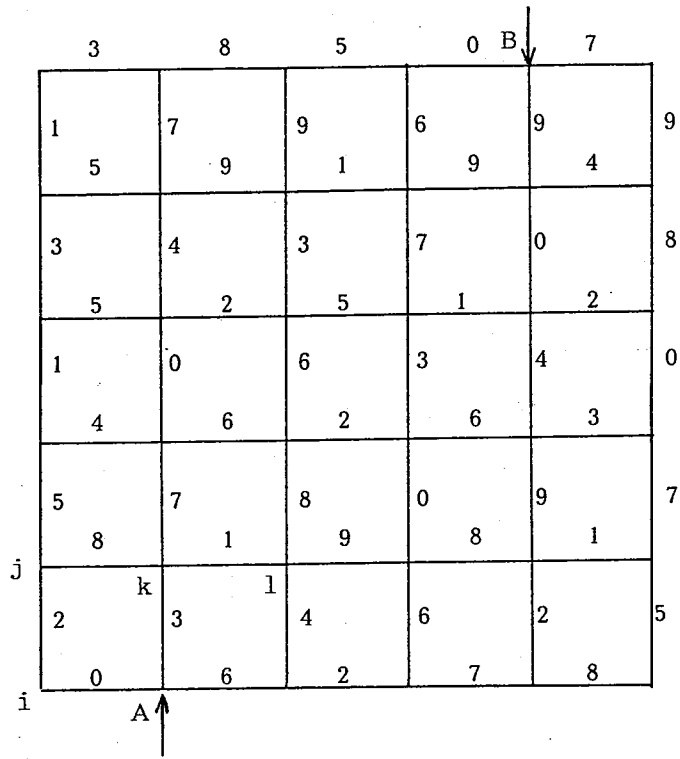


Fig.1 ネットワークモデルの説明図

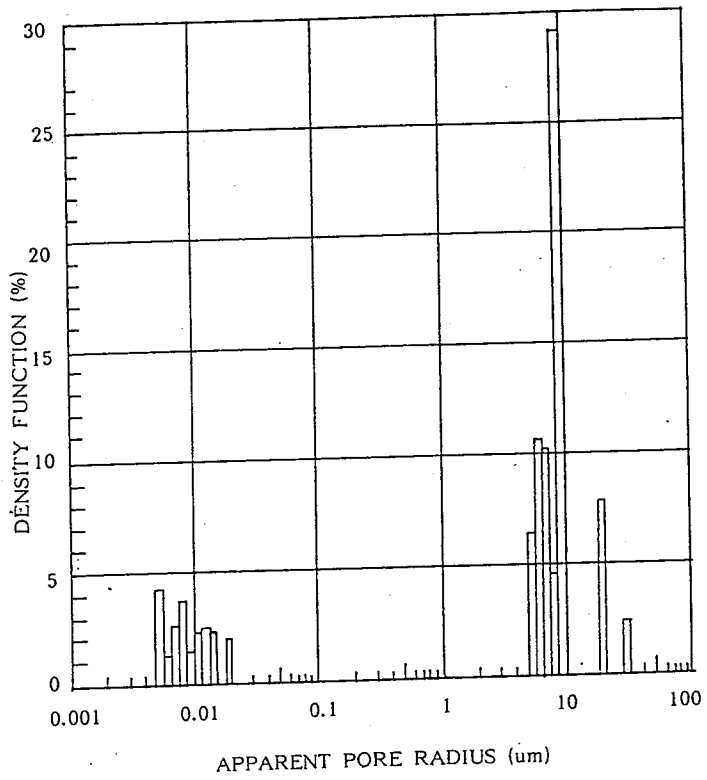


Fig.2 砂の間隙径分布

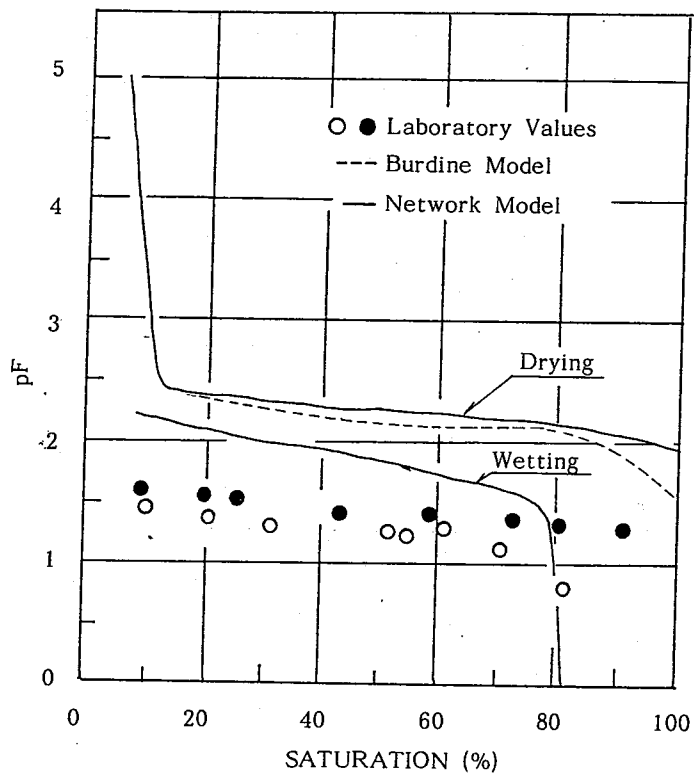


Fig.3 ネットワークモデルによる水分保持特性曲線

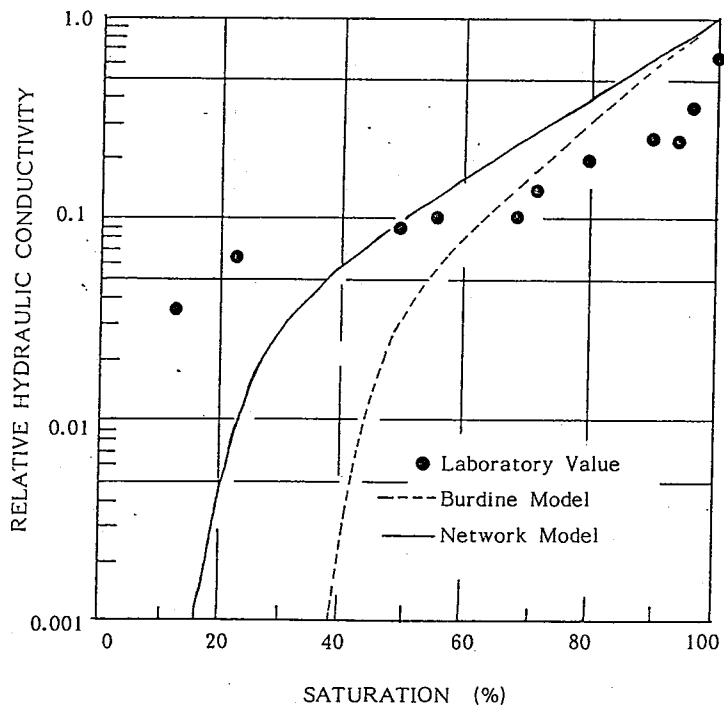


Fig.4 ネットワークモデルによる比透水係数-飽和度関係