

II-24

土壌水分特性曲線に及ぼす土壌構造の影響

北見工業大学 正員 中尾隆志
北海道大学 正員 藤田睦博

1. まえがき

著者らは不飽和土壌内の保水機構を微視的な立場から解析することを目的に、土粒子を球形と仮定し、2個の粒子間における水と空気の表面張力によるリング水の保水効果について検討を行ってきた。これまでの研究成果により、リング水の保水効果は土粒子の粒径比およびその間隙特性に強く影響を受ける事が判明した^{1), 2)}。従って、本モデルを実際の土壌に対して適用するには2球間モデルから3次元モデルに拡張すると同時に対象となる土壌の粒径分布や間隙特性をも明らかにしなければならない。しかし、実際の土壌は種々の粒径より成り立っており、その詰まり方は不規則であるため、間隙特性を数学モデルとして表現することは容易ではない。

本報告では3次元空間を有する間隙特性の変化が水分特性曲線にどのような影響を及ぼすかを調べるために、土粒子を等球径規則集合体とみなした場合の体積含水量とサクシヨンの関係(以下、 $\theta - \phi$ 関係と称す)の算定を試みた。また、4種類の珪砂試料を用いて吸水試験を行い、粒径分布および間隙率の変化が $\theta - \phi$ 関係に与える影響を調べたので報告する。

2. 不飽和土壌内の保水形態

図-1は土壌内の保水形態の概要を模式的に表している³⁾。含水量が非常に少ない場合(a)には、土壌内の保水形態は次の2つに分類することができる。1つは土粒子表面を覆っている”皮膜水”と呼ばれる非常に薄い水膜であり、一方は土粒子接合部に生じる水と空気の表面張力によって生じる”リング水”と呼ばれる保水形態である。しかし、皮膜水はその厚さが水分子の数倍と言われており、一般の自然土壌のように 10^{-3} mm以上の粒径を有する場合にはこれを無視することができる⁴⁾。後者のリング水による保水はいわゆる鞍型の形状を呈しており、こ

の場合、図中(b)に示したように土粒子を球形と仮定すると、著者らが従来より提案しているモデルにおいて2球が完全に接触している場合のサクシヨンと保水量の関係より簡単に求めることができる¹⁾。さらに含水量が増加すると、いわゆる”懸垂水”となる。この場合、個々のリング水は互いに連結し、水の移動が可能となる(c)。その後、水分量の増加に伴い、ついには間隙中の空気は含水により、土粒子間内部の間隙内に気泡として取り残される(d)。この気泡の大きさは水量の増加と共に小さくなり、これに伴い気泡内部の空気圧が増大する。

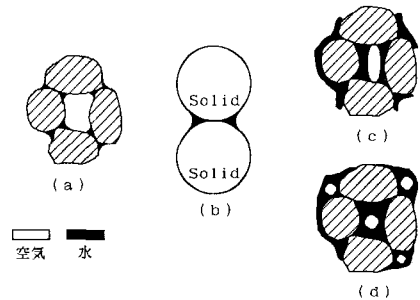


図-1 土粒子の保水形態

3. 等球径粒子の規則充填構造

先に述べたように、実際の土粒子の形は球ではなく、その大きさもさまざまに充填の程度も不規則な構造を形成している。従って、厳密に土壌内の間隙特性を数学モデルとして表現するには粒径分布を説明変数として確率論的に取り扱わなければならない⁵⁾がその取扱いは複雑となる。しかし、構成される土粒子が等球径からなり、さらに規則的に配列された集合体と考えるならばその集合体の充填特性は規則集合体を構成する最小の集合体である基準容積を考えることにより、幾何学的条件から容易に求めることができる。

3. 1 等球径規則充填構造の物理特性

最上ら⁶⁾は粒状体が等球径のみの集合体から成り、粒子が規則的に配列する充填方法を表-1のように5つに分類している。

表-1 等球径規則集合体の物理特性

充填方法	接触点数	リング水の数	球の配置パターンの組み合わせ	基準容積	密度	間隙比	間隙率 ε (%)
単純立方体	6	3	I型のみ	$8R^3$	$\frac{\pi}{6}$ 0.5236	0.9008	47.64
立方四面体	8	4	I, II型混合	$4\sqrt{3}R^3$	$\frac{\pi}{3\sqrt{3}}$ 0.6046	0.6539	39.54
立方斜方体	10	5	II型のみ	$6R^3$	$\frac{2\pi}{3\sqrt{3}}$ 0.6301	0.4324	30.19
角柱体	12	6	I, II型混合	$8\sqrt{2}R^3$	$\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ 0.7405	0.3504	25.05
心四面体	12	6	II型のみ	$8\sqrt{2}R^3$	$\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$ 0.7405	0.3504	25.05

この場合、最も疎の充填構造をなすのは間隙率 ε が 47.64%となる単純立方体集合の場合であり、また最密充填構造を形成するのは角柱体集合と面心四面体集合の2通りとなる。対象となる土壌がこの5つの集合体のどれに属するか判定は、1つの球が他の球と接触する数 n と ε に対し、著者らが求めた次式の近似関係により決定される⁷⁾。

$$n = 417.38 \varepsilon^{-1.1} \dots (1)$$

3. 2 リング水による保水効果

リング水が互いに独立して存在する条件は任意の球が他の球とどのように接触しているのかによる。この関係を調べるため、等球径からなる土粒子の規則的な詰まり方の2次元配置パターンを求めると図-2に示すように、ある球に対し隣接する球の中心とのなす角度が $\alpha = 90^\circ$ (I型) となる4個の球からなる場合と $\alpha = 60^\circ$ (II型) となる3個の球からなる場合の2通りとなる。2球間に生じるリング水が基準容積内で互いに独立して存在する場合には、図より明らかに $\omega_{MAX} = \alpha/2$ を満足していなければならない。当然の事ながら I、II型では ω_{MAX} はそれぞれ $45^\circ, 30^\circ$ となる。

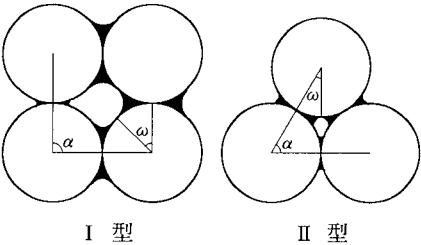


図-2 等球径の2次元配置パターン

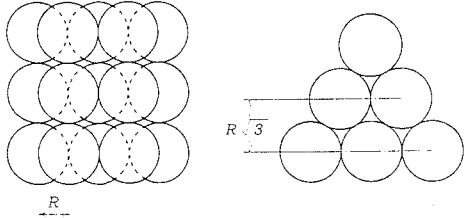


図-3 立方四面体集合

図-3は立方四面体集合の平面図と側面図を示している。この場合、平面上からみた配置パターンはI型であり、側面側からみた配置パターンはII型となる。また、基準容積は底面の面積 ($2R^2$)、高さ $\sqrt{3}R$ となり、リング水が独立して存在するとき、この基準容積内に4個分に相当するリング水が形成される事になる。この時の1個分のリング水による $\theta - \phi$ 関係は紙面の関係上省略するが R と2球間の中心とリング水の先端のなす角度 ω により求められる¹⁾。同様の方法により他の集合体に対してもリング水が独立して存在する場合の $\theta - \phi$ 関係を求めることができる。図-4は $2R = 149 \mu m$ とした時のリング水が独立して存在する場合の $\theta - \phi$ 関係を示している。

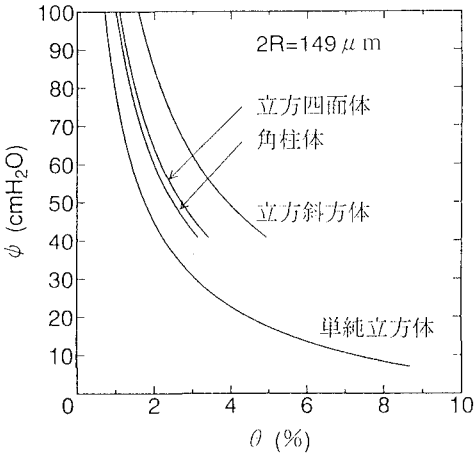


図-4 リング水が独立して存在する時の $\theta - \phi$ 関係

3. 3 気泡が存在する場合の保水効果

2章で述べたように、間隙中の水分が増加すると、リング水が個々に独立して存在する状態から懸垂域へ、さらに気泡を間隙内に取り込む状態へと変

化する。従って、厳密には含水量が懸垂域に変化すると各保水域において個々の形状より新たに曲率半径を求め、これよりサクシオンと保水量の関係を求めなければならない。しかし、本モデルのように規則的な充填をなす場合には含水量が ω_{MAX} を越えた場合、個々のリング水は全て連続してしまう。このような場合、表面張力により最も安定した形状となるのは球状であると考えられる。従って、本モデルでは基準容積の重心を中心として気泡を形成するものと仮定した。この場合、水と空気の圧力差($P_w - P_a$)は式(2)により計算される。

$$P_w - P_a = -\frac{2\sigma}{r_0} \quad \dots (2)$$

ここに、 r_0 : 気泡の半径、 σ : 水と空気の表面張力

また、気泡が初めて形成されたときの気泡内部の圧力を1気圧とすると、保水内部の圧力が P_w から $P_w + \Delta P$ に変化した場合の気泡の体積 V_a はパスカルの原理およびボイルの法則より式(3)により求めることができる。

$$V_a = \frac{P_a V_0}{\Delta P + P_a} \quad \dots (3)$$

ここに、 V_0 : 初めて気泡を形成したときの気泡の体積、 P_a : 1気圧

従って、基準容積内の保水量は基準容積から基準容積内に占める土粒子の体積と式(3)の気泡の体積を差し引くことにより求めることができる。

4. 吸水実験による本モデルの比較検討

本モデルの検証と土壌構造（間隙および粒径分布の変化）が土壌水分特性曲線に及ぼす影響を調べるために、珪砂試料を用いた突き固め試験と土柱法による吸水試験を行った。

4. 1 実験方法

図-5に実験に用いた水分量測定装置の概要を示す。実験は長さ120cm、内径約11cmの塩ビ管に試料を詰め、水深が20cmとなるように越流水槽内に10日間設置し、吸水試験を行った。実験終了後10cm毎に試料を取り出し、これより吸水過程の土壌水分特性曲線を得た。用いた試料は、全くふるい分けをしない試料（山形産4号珪砂 粒径範囲 3.5~250 μ m）と粒径が149~250 μ mの範囲にとどまる2種類の珪砂

試料を用い、また締め固めの程度として突き固め試験用ランマーでそれぞれ 50回/25cmと25回/50cm の2通りで突き固めた試料、計4ケースについて実験を行った。各ケースともそれぞれ2回ずつ実験を行

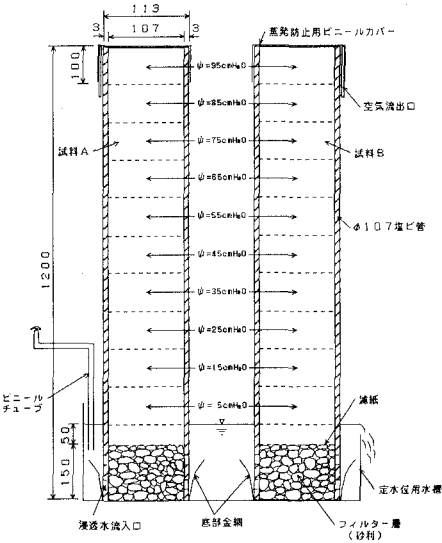


図-5 実験装置

表-2 実験条件

	突き固め条件 (回/cm)	粒径範囲 (μ m)	間隙率 (%)
Case 1	50/25	149~250	45.24
Case 2	50/25	3.5~250	44.24
Case 3	25/50	149~250	47.29
Case 4	25/50	3.5~250	46.53

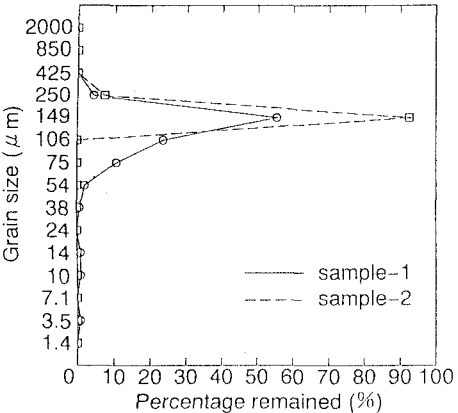


図-6 粒径分布

い、その平均値を実験値とした。各ケースの実験条件と実験開始前の間隙率を表-2に、用いた試料の粒径分布を図-6に示す。表-2より、同一の突き固め条件では粒径範囲の広いCase 2, Case 4の方が間隙率が小さく、締め固め程度が良いことがわかる。また、同一の粒径範囲では突き固めが25回/50cmの場合よりも50回/25cmの方が締め固まっていることがわかる。

4. 2 本理論との比較検討

試料の実験開始前の間隙率は表-2に示したように44.2~47.3%であったが、実験終了時には39.8~43.5%に変化していた。これはリング水によるサクシジョンのため試料がより密に締め固まったためと思われる。従って、試料の間隙率を実験終了時の値とすると、式(1)より得られる n は7前後となり、この試料を等球径からなる充填モデルに当てはめると単純立方集合体($n=6$)と立方四面体集合($n=8$)の中間に位置することになる。また、等球径に置き換えられる土粒子半径は粒度分布の最頻値より、 $2R=149\mu m$ として計算を行った。実験で得られた土壌水分特性曲線(吸水過程)と土粒子充填を単純立方集合体および立方四面体集合とした場合の $\theta-\phi$ 理論曲線(実線)を図-7に示す。

吸水実験から得られる結果として同一の ϕ では粒径範囲が広いCase 2, Case 4の方が粒径範囲の狭いCase 1, Case 3よりも θ がいずれも大となっており、さらに同一の粒径範囲の試料でも間隙率が小で、

より締め固まっているCase 1, Case 2の方がCase 3, Case 4よりも θ が大となり、粒径分布や試料の締め固め程度は土壌水分特性曲線に影響を与えることを示している。また、実験値のほとんどは、単純立方集合体および立方四面体集合とした場合の $\theta-\phi$ 理論曲線の領域内に存在しており、等球径規則集合体モデルにより、おおよその $\theta-\phi$ 関係を推定することが可能である。

5. あとがき

本研究では土壌を構成する土粒子が等球径規則集合体であるとの仮定のもとに、その土壌構造が $\theta-\phi$ 関係に及ぼす影響を調べてきた。しかし、本モデルでは等球径を仮定しているため、保水が懸垂域に入ると含水量が増加しているにもかかわらず、サクシジョンの変化は、飽和付近を除きほとんど見られない。しかし、粒度分布範囲の広い土壌ではこの部分においても、含水量の増加に対しサクシジョンが急激に減少すると言われており³⁾、この部分に対し、本モデルを如何に改良するかが今後の問題となる。

《参考文献》

- 1) 中尾隆志, 藤田睦博: 等球粒子モデルを用いた不飽和浸透流の微視的解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 1992.
- 2) 中尾隆志, 藤田睦博: 異球径粒子モデルを用いた土壌内水分の保水効果に関する研究, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 1992.
- 3) Bear J. and Bachmat Y.: Introduction to "Modeling of Transport Phenomena in Porous Media, KLUWER ACADEMIC PUBLISH, 1991.
- 4) Orr F. M., et al.: Pendular Rings between (Meniscus Properties and Capillary Force, Journal Fluid Mechanics, 67, 723-742, 1975.
- 5) Nakao T., Fujita M., Kudo M. and Nishimura T.: Retained Water in Soil Based on Probabilistic Pore Structure, Proc. of International Congress on Modelling and Simulation, Vol 3., 1993.
- 6) 最上武雄 編: 土質力学, 技報堂, 1969.
- 7) 中尾隆志, 藤田睦博: 土粒子の充填構造に関する解析, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, 1993.

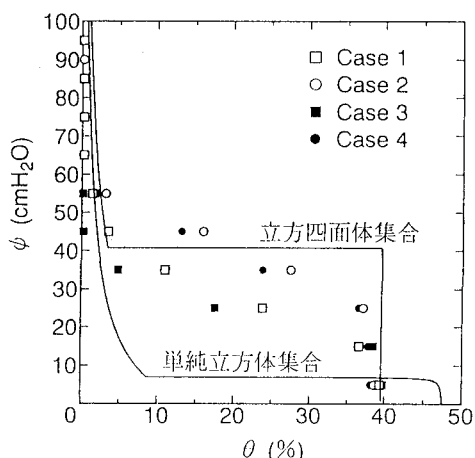


図-7 $\theta-\phi$ の計算値と実験値の比較