

マサ土のような圧縮性を有する土の  
不飽和浸透特性に関する研究STUDY ON SEEPAGE CHARACTERISTICS IN UNSATURATED  
DECOMPOSED GRANITE SOIL AND THEIR NUMERICAL ANALYSES

佐々木清一\*・西田一彦\*\*

By Seiichi SASAKI and Kazuhiko NISHIDA

## 1. 序

衆知のとおりマサ土は、風化により変質した構成鉱物の複雑な組合せから成っているため特殊土の仲間に入れられ、特に水分との関係は複雑であるとされている。現在までの上記と関係深い著者らの研究成果を紹介すると、まずマサ土粒子の変質と水分吸着特性について B.E.T. の吸着理論に基づいて検討した結果、風化度の大きい試料は、水分吸着による自由エネルギーレベルの低下量（表面自由エネルギー）が著しく、しかもこのような土粒子の性質は土塊の保水性にも反映する<sup>1)2)</sup>。つまり、風化度の大きな試料は、高い保水性を示すことが明らかにされた<sup>3)</sup>。また、風化度のパラメーターとして比表面積を採用し、土粒子の基本物性と関係づけ不飽和透水係数を推定する手法を示した<sup>4)</sup>。

最近、人工盛土やフィルダムのコア材にこの種の材料の使用される機会が増えつつある。ところで、周期的に地下水の浸透、排水を繰り返すようなコア部にマサ土が用いられる場合、土の性質が従来ものとはかなり変化するものと考えられる。そして、このコア部は不飽和浸透現象の形態をとる。

土の不飽和浸透に関する研究は、古くから試みられていた。たとえば、Richards(1931)のポテンシャル理論、そしてこれらの数値解析の可能性を示した Klute(1952)等を始めとし、現在に至るまで発展の途をたどっている。特に、この方面の研究は、土壌の水分状態と作物の成育との関係の究明をねらいとする土壌物理の分野において、数多く取り扱われており土木工学の分野でも、最近研究が進められている。

不飽和浸透の数値解析の手法にウエイトをおいた研究

として、F.E.M. を駆使した飽和-不飽和浸透流の解析<sup>5)</sup>や地盤の応力・変形と浸透流の解析<sup>6)</sup>等がある。さらに、少し異色の実験的研究として、不飽和土中における熱と水分の移動<sup>7)</sup>、舗装部の温度変化による路盤内の水分移動機構の解明<sup>8)</sup>、パワーケーブルに発生する熱によるケーブルの破損防止の目的で、埋め戻し土の保水性を確保し水分移動を抑制するための安定処理法の開発<sup>9)</sup>をねらいとした研究等が挙げられる。

これらの研究の中で、いずれも共通する点是不飽和土の浸透特性を支配するパラメーターの計測手法が十分確立していないことであり、その実測値の集積も少なく高度に開発された解析手法を生かすためにも、この方面の研究が重要である。

そこで、本論文では、マサ土のような特殊性をもつ土が Fig. 1 に掲げられるように盛土やフィルダムのコア材として使用された場合を想定し、土層カラムを使用した吸排水の繰り返し実験を行った。そして、風化度と不飽和浸透のパラメーターとの関係を把握するとともに、特に風化度の大きいマサ土について、吸排水時の沈下特性を測定し、体積変化を考えた不飽和浸透方程式による解析を試み合理的解析法を見出すように努めた。

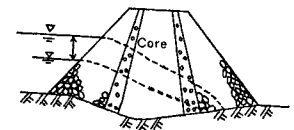


Fig. 1 Filldam core under variable water level.

## 2. 試料の基本物性と実験方法

本実験に使用した試料は、和歌山県日高川産の川砂と風化度の異なる3種類のマサ土である。マサ土は、大阪三门市市と奈良県生駒山において採取したものであり、自然の鉱物組成を有するものである。

これらの試料は、自然乾燥後、過度に破砕しないよう

\* 正会員 和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学科

\*\* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

にときほぐし 2000 μm ふるいでふるい分けした。そして、試料の風化度の尺度は見かけ比重  $G_a$  (注1)、比表面積、強熱減量の値を採用し、それらの値を総合して判断した。その結果、川砂、マサ土 1, 2, 3 と番号の大きい順に風化度が高くなる。特に、この比表面積は水銀圧入ポロシメータで 1~1000 kg/cm<sup>2</sup> (98 kPa~98 MPa) まで加圧し測定しているため、その値の大きい試料は土粒子内外表面に複雑な凹凸を有することを示唆している。一方、日本統一分類法では、一様に砂質土に分類されるが中でもマサ土 3 は MI となり高い圧縮性を有する土に分類される。特に、この種の土をコア材に使用された場合を想定し解析の対象とした。

盛土あるいはフィルダムコアにマサ土が使用され、上流側土中の水位が変動する場合を予想したモデル実験を行った。装置は角柱の塩化ビニル製容器(断面 100×100 mm<sup>2</sup>, 肉厚 5 mm, 長さ 800 mm)で、その中にできるだけ均一な密度になるように試料を詰めた。まず、吸水は Fig. 2 に示される給水装置から水頭 80 cm (動水勾配 1) のもとで容器の底部にあるポーラスストーン(位置まで水位を上げておき浸透を開始した。砂では約 1 日、マサ土は約 2 日間行い 70 cm の位置にあるトランスジューサーのサクションが 0~10 cm の範囲に入ったときをもって飽和とみなし、給水を停止しただちに排水コックを開き排水実験に移った。このような要領で約 1 か月間吸排水の繰り返し実験を行った。

吸排水実験中に生じる沈下は、変位トランスジューサー(最大変位 100 mm, 精度 3/1000 mm)により、サクションは圧力トランスジューサー(最大圧力 ±1 kg/cm<sup>2</sup> (98 kPa), 精度 ±2/1000 kg/cm<sup>2</sup> (196 Pa))の先端に直径 6 mm, 長さ 50 mm の円筒形のセラミック製チップ (Air-entry value 2 kg/cm<sup>2</sup> (196 kPa)) を取り付け同図に示

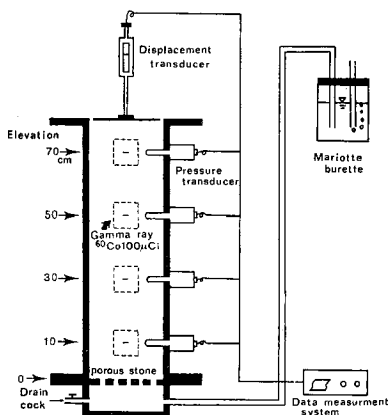


Fig. 2 Layout of experimental apparatus.

注 1) 見かけ比重  $G_a$  とは、土粒子内部の空隙も土粒子容積の一部としたときの値であり、この値が小さいことは土粒子内空隙が多いことを意味する。

される配置により自動データシステムで昼夜にわたり測定を遂行した。なお、測定間隔は吸水実験 3 分、排水実験 1 時間である。さらに、試料容器と土の摩擦をできるだけ軽減するため、その壁面にワックスを塗り試料表面には 0.13 kg/cm<sup>2</sup> (12.7 kPa) のおもりを載荷した。

ところで、本研究のごとく土中の任意の深さにおいて時々刻々変化する水分量を簡単に精度よく、しかも長期にわたり計測する手法として R.I (Radio Isotope) による法が現時点で最も効果的と考えられる。その理由は非破壊法であるために試料を乱すことなく、その密度や含水比の物性値を繰り返し測定できる。しかも、盛土やフィルダム現場においてもボーリング孔を利用し測定可能である。このような利点から、含水比の計測は  $\gamma$  線密度計を用いた。そして、この装置は角柱の任意の位置へ上下に移動し、試料のどの位置でも測れるよう工夫した。線源には低キューリの <sup>60</sup>Co 100 μCi を用い GM 管で 30 秒間の  $\gamma$  線量を計測した。

$\gamma$  線利用による含水比の決定はあらかじめ作成される校正曲線に左右される。したがって、本研究ではこの種の曲線は試料の種類に左右されないとの報告<sup>10)</sup>もあるが、マサ土の複雑な物性と水分との関係を考え試料ごとに作成した。特に、校正曲線を作る実験はマサ土の破碎による構造変化の影響を考え多数の試料による非繰り返し突固め法で行った。そして、含水比の計算は乾燥密度一定という前提で行われるため実験時に校正曲線を作ったときの乾燥密度になるように試料を詰めておく必要がある。この煩雑さを解消するために、各種の密度についてただちに含水比が得られる実験式 (1) を用いた。

$$w = \frac{R + 0.163 r_d - 0.856}{\alpha} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $w$ : 含水比 (%),  $R$ : 計数率比,  $r_d$ : 乾燥密度 (Mg/cm<sup>3</sup>),  $\alpha$ : 実験式の勾配

式 (1) に試料の実験前の乾燥密度  $r_d$  を代入すれば含水比  $w$  が求められる。ただし、著しい沈下の生ずる試

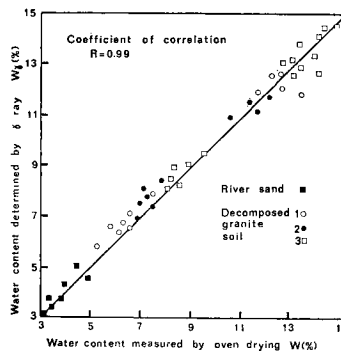


Fig. 3 Comparison of results determined by oven drying and gamma ray method.

料であれば修正した乾燥密度  $\gamma_d$  を採用しなければならない。

**Fig. 3** は  $r$  線と炉乾燥法による含水比の値をプロットしたものである。これらの相関係数  $R$  は 0.99 であり密接な関係をもつことを意味する。さらに、 $r$  線の誤差の要因として放射線のゆらぎにかかわるものが考えられるため、計数率比  $R$  の誤差を調べた結果、 $\pm 0.001$  と一定であった。そして、この値と関数関係にある式 (1) の平均二乗誤差を誤差伝播の法則から求め炉乾燥法の値と比較すると、小数点以下 1 桁くらいのばらつきであり他の含水比測定法と比べても、本手法の誤差は十分許容できるものと考えられる<sup>11)</sup>。

### 3. 風化度と不飽和浸透特性

試料の表面に設置した沈下計の動きを観測するために、まず吸水実験を行った。吸水過程で盛土に一般にみられるコラップス現象といわれている沈下が生じる<sup>12)</sup>。そして、排水過程に入ると沈下は徐々に進行する。ここで、排水を中止し数日間静止の状態にしておくと、沈下の割合は吸水排水過程よりも少ないが、やはり生じる。

今回の実験の目的は、特に圧縮変形中の透水特性を明

らかにすることであり、大部分の沈下が排水中に起こるよう吸水後ただちに排水を開始した。

**Fig. 4** は吸水排水過程の沈下特性を示したものである。この図によれば、マサ土 3 の沈下量は川砂やマサ土 1, 2 のそれよりもきわめて大きく、繰り返して吸水排水実験を行うと累積沈下はますます増加する。そして、その沈下量は初期の含水比や密度にも関係するはずである。

特に、排水中の沈下はサクシジョンの増加に伴う有効応力の増分と粒子間レベルの構造変化によるものといわれている<sup>13), 14)</sup>。

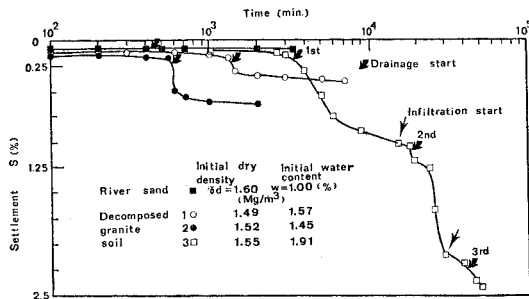
コア材に風化度の大きなマサ土を使用する場合、締め固め密度が小さいと沈下量が大きくなることが予想される。したがって、施工管理が重要であるとともに土構造物の浸透を解析するうえで、沈下による体積変化が問題となる。すなわち、通常の不飽和浸透方程式ではなく体積変化を考えた不飽和浸透方程式による解析の必要性を示唆するものである。そこで、特に、排水時に着目しその浸透特性について調べることにする。

**Fig. 5** は体積含水率  $\theta$  の経時変化とそれに及ぼす風化度の影響を表わしたものである。同図から、体積含水率  $\theta$  は排水時間の経過とともに徐々に小さくなり、また土柱の上部の値は下部のそれより小さい。そして、体積含水率  $\theta$  は排水直後に大きい変化がみられ、その後長時間経過後のその変化は小さい。さて、各試料の体積含水率  $\theta$  の分布に対し風化度の影響をみると風化度の大きなマサ土 3 は、川砂や他のマサ土よりもきわめて高い値を呈している。

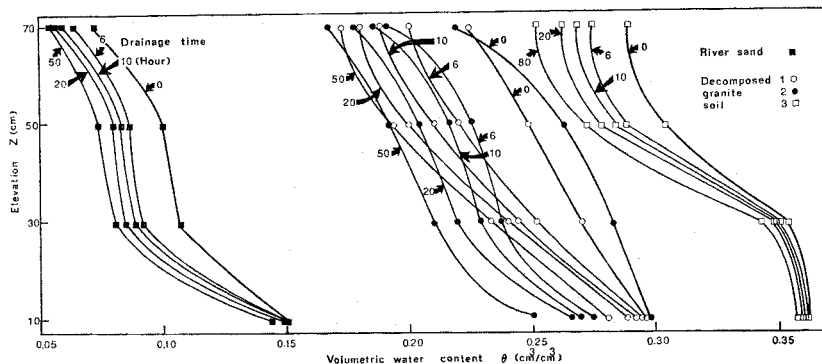
排水時間に対応しサクシジョン  $\psi$  の値を測定した結果が **Fig. 6** である。各試料のサクシジョン  $\psi$  は、排水時間の経過とともに増加し、また土柱の上部ほどその値は大きい。特に、風化度の大きいマサ土 3 はきわめて高いサクシジョン  $\psi$  を示している。そして、長時間経過後のこれらの変化も体積含水率  $\theta$  と同様に小さい。ここで、

**Fig. 5** と **Fig. 6** を対比させると時間の経過に従って体積含水率  $\theta$  は減少し反対にサクシジョン  $\psi$  は増加することがわかる。つまり、風化度の大きい試料ほど、高い体積含水率  $\theta$  においても高いサクシジョン  $\psi$  の値がみられることが特長である。

**Fig. 7** は試料の水分保持曲線を示したものである。両者の関係においても風化度の影響は明ら



**Fig. 4** Settlement properties of samples during wet-drainage experiment.



**Fig. 5** Volumetric water content distribution of samples during drainage.

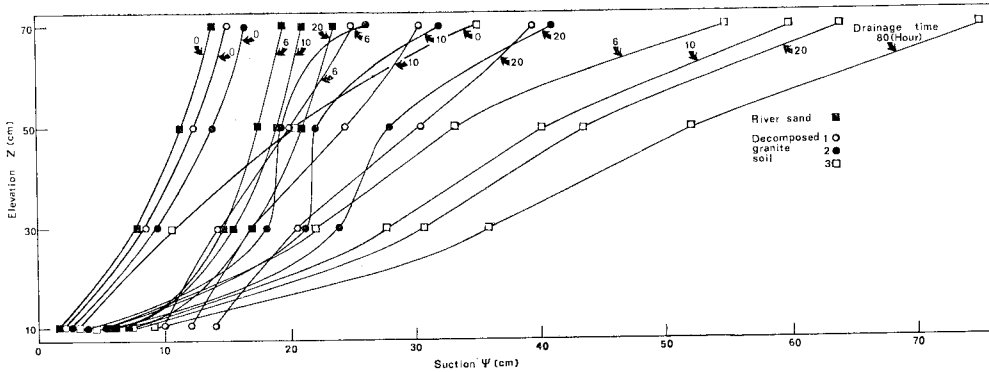


Fig. 6 Suction distribution of samples during drainage.

かである。つまり、サクシオン  $\psi$  一定の条件で風化度の大きい試料は高い体積含水率  $\theta$  を示す。ところで、この図において曲線の勾配  $d\theta/d\psi$  は比水分容量といわれ、水分拡散係数  $D$  や体積含水率  $\theta$ 、サクシオン  $\psi$  の解析に必要な量である。本実験の場合、 $\psi=0, 100$  cm 付近では  $d\psi/d\theta$  の値が  $\infty$  となり Klute 型の拡散方程式は、この近傍では使えないことになる。

4. 圧縮性に伴う間隙比変化とその不飽和浸透を支配するパラメーター

不飽和浸透解析を行うためには、土のパラメーターの正しい計測結果とその集積が必要である。従来から、各種の方法が提案されているが、本研究のおもな対象である体積変化を伴う場合のデータは乏しい。そこで、排水中の透水係数、拡散係数と風化度の関係、さらに体積変化を取り入れたパラメーターについて以下検討する。

Fig. 8 は不飽和透水係数  $K$  と体積含水率  $\theta$  の関係を示すものであり、 $K$  は式 (2) によって求めた<sup>15)</sup>。

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

各試料の不飽和透水係数  $K$  は、体積含水率  $\theta$  と深く関係し体積含水率  $\theta$  の増減により大幅に変化する。そして、風化度の大きい試料ほど高い体積含水率  $\theta$  にもかかわらず不飽和透水係数  $K$  は小さくなっている。また、同じ体積含水率  $\theta$  でも不飽和透水係数  $K$  は、風化度の異なるものほど小さい傾向を示している。このような現象は、マサ土粒子表面に含まれている多数の凹凸やインク瓶形の空孔と関係し、また拘束水の存在を暗示するものと考えられ、これらの要素も一種の抵抗力となっているものと思われる。さらに、両者の関係は土中水分の減少と増加過程では異なるといわれ、いわゆるヒステリシスを有する。これは水分保持曲線の特性に支配されるも

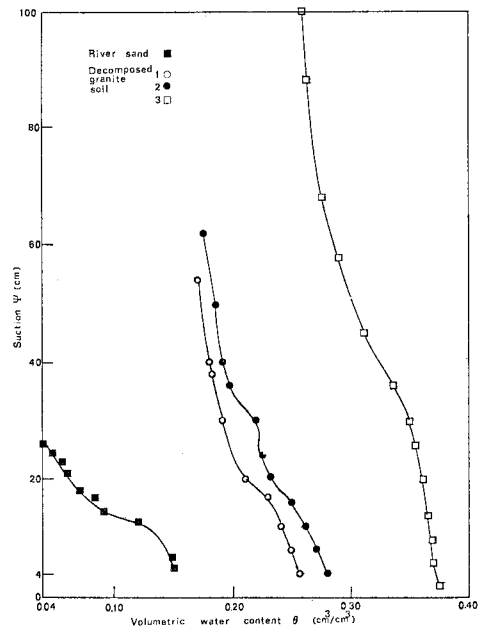


Fig. 7 Soil moisture characteristic curve of samples during drainage.

のである。しかし、このヒステリシスは体積含水率  $\theta$  を用いると無視し得るほど小さいがサクシオンとの関係では無視できない。その理由は、土中のインク瓶形間隙や間隙中を水が前進するときと後退するときの接触角の違いによるメニスカスの違いであると報告されている<sup>16)</sup>。いま、不飽和透水係数  $K$  が測定法により差があるかどうかを検討するため、既報の飽和度を人工的にコントロールした定常法と非定常法との値を比較すると、ある程度の幅をもちながらばらついてはいるが不飽和透水係数  $K$  の変化の傾向は一致している。したがって、著者らがすでに提案した不飽和透水係数を表わす式による非定常浸透流の解析への利用も可能となる<sup>4)</sup>。

体積含水率  $\theta$  やサクシオン  $\psi$  の分布を予測するには、不飽和透水係数  $K$  と体積含水率  $\theta$  の関係を正しく

把握し両者がある関数で表現しなければならない。最近、この種の関係を求めるために、相対透水係数  $K_r$  と有効飽和度  $S_e$  の関係で表現する方法があり、Fig. 9 は Fig. 8 を式 (3) を用いて再整理したものである<sup>17)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} K_r &= K/K_{sat}, \\ S_e &= (\theta - \theta_r) / (\theta_{sat} - \theta_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $K_r$ ：相対透水係数、 $K$ ：不飽和透水係数 (cm/s)、 $K_{sat}$ ：飽和透水係数 (cm/s)、 $S_e$ ：有効飽和度、 $\theta$ ：体積含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、 $\theta_r$ ：最小体積含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、 $\theta_{sat}$ ：飽和体積含水率 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)、ここで  $\theta_r$  は吸着水や拘束水という浸透に直接関与しない水分であり pF 3.3 の水分とした。

風化度の異なるマサ土の場合でも、両者は両対数紙上でほぼ直線の関係を示しており、これらを関数化すれば不飽和透水の解析に役立つものと考えられる。

Fig. 10 は水分拡散係数  $D$  と体積含水率  $\theta$  の関係を表わしたものである。この拡散係数  $D$  は、ある体積含水率  $\theta$  に対する Fig. 8 の  $K$  と Fig. 7 から得られる  $d\theta/d\psi$  との商で定義される。そして、水分拡散係数  $D$  は体積含水率  $\theta$  に左右され体積含水率  $\theta$  の増加により大きくなる。さらに、この値は風化度の大きい試料ほど小さくなる。

3. で風化度の大きい試料ほど沈下が著しい事実を明らかにした。排水中の沈下を間隙比  $e$  に直し時間的变化

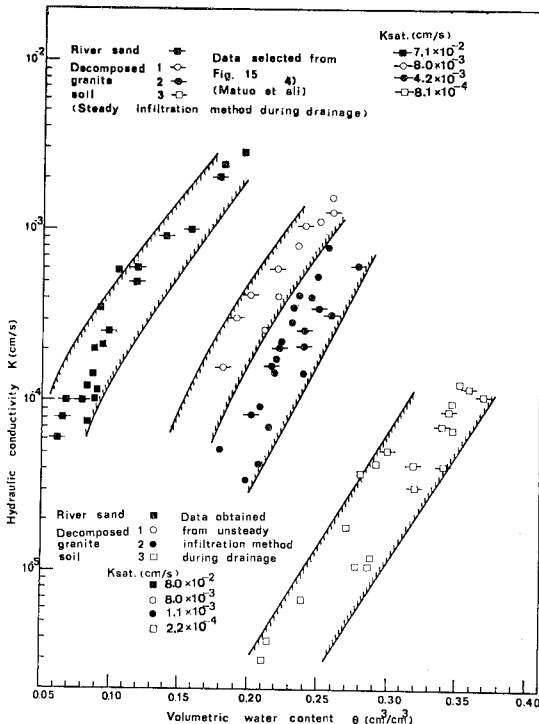


Fig. 8 Relationship between hydraulic conductivity and volumetric water content of samples.

として表わした結果が Fig. 11 である。この結果、間隙比  $e$  は排水時間の経過とともにしだいに小さくなる。ところで、間隙比  $e$  は厳密には深さごとに異なるものであるが、土中の変位を測定することが困難であるため、深さ方向に対しても同様であると考えた。

浸透中に体積変化を生ずる場合、体積含水率  $\theta$  でなく体積含水比  $\vartheta = V_w/V_s$  の変化を追跡する方が合理的である。ここに、 $V_w$  は土中水の体積を表わし、 $V_s$  は土粒子の体積であり体積含水比  $\vartheta$  は  $\vartheta = (1+e)\theta'$  という関係になる。ここで注意を払わねばならない点は、間隙比  $e$  は Fig. 11 の値を用い、また体積含水率  $\theta'$  の計算は式 (1) の中に含まれる乾燥密度  $\rho_d$  を一定とするのではなく、逐次変化する間隙比  $e$  を乾燥密度  $\rho_d = G_s \cdot$

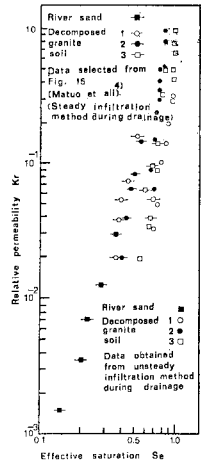


Fig. 9 Relationship between relative permeability and effective saturation.

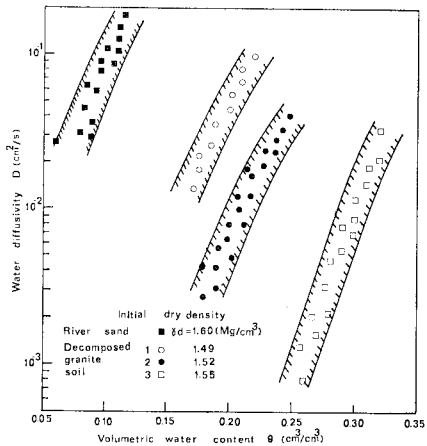


Fig. 10 Relationship between water diffusivity and volumetric water content of samples.

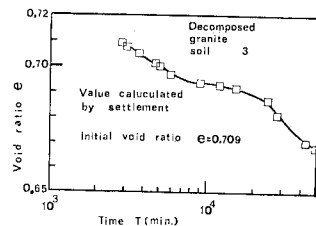


Fig. 11 Change of void ratio with time during drainage.

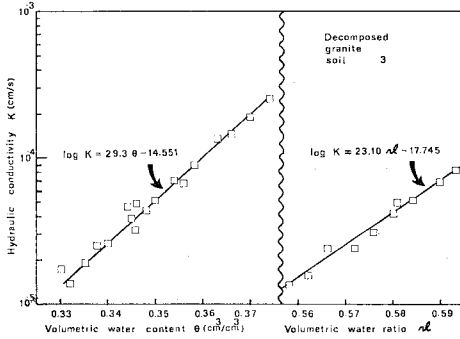


Fig. 12 Relation of hydraulic conductivity for volumetric water content and volumetric water ratio.

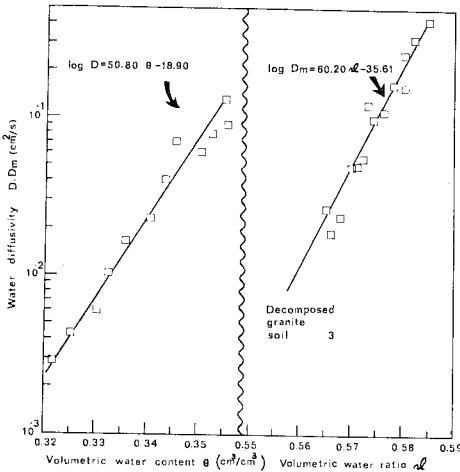


Fig. 13 Relation of water diffusivity for volumetric water content and volumetric water ratio.

$r_w/1+e$  に修正して算出することである。

Fig. 12 は不飽和透水係数  $K$  と体積含水率  $\theta$ , 含水比  $\theta$  の関係を示した。特に、 $K$  と  $\theta$  の関係は圧縮沈下中の関係を示すものであり解析の便利さを考えて直線で近似した。同じように、Fig. 13 は水分拡散係数  $D, D_m$  との関係を表わしたものである。ここに、水分拡散係数  $D_m$  は  $D_m = (K/1+e) \cdot (d\phi/d\theta)$  の関係で表わされ、 $\phi/d\theta$  の値は体積含水率による水分保持曲線から求めた。したがって、3. で指摘したように、 $d\phi/d\theta$  が  $\infty$  付近は省略し

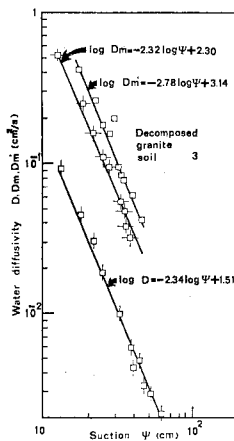


Fig. 14 Relationship between water diffusivity and suction.

た。

Fig. 14 は水分拡散係数  $D, D_m, D_m'$  とサクシオン  $\psi$  の関係をプロットしたものである。この図中で、水分拡散係数  $D_m'$  は  $D_m' = (1+e) \cdot D_m$  の関係となる。同図から明らかなように、拡散係数はサクシオン  $\psi$  の増加とともに急激に小さくなり、両者の関係は直線で近似される。

### 5. 圧縮性を考えた不飽和浸透方程式による解析

マサ土の体積含水率とサクシオンの実測データに対して、得られたパラメーターを入力し数値解析を以下のような手順で試みた。まず、圧縮性を考えない通常の鉛直浸透の不飽和方程式を用いてその解析を行った。そして、これらの式は Klute の拡散方程式とよばれ式 (4), (5) で与えられる。

体積含水率  $\theta$  に関して、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \dots\dots\dots (4)$$

サクシオン  $\psi$  に関して、

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial D}{\partial z} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、式 (4) において水分拡散係数  $D$  は体積含水率  $\theta$  の関数であり Fig. 13 で示される実験式で与えられ、不飽和透水係数  $K$  はやはり体積含水率  $\theta$  の関数として Fig. 12 の式で表わされる。また、式 (5) において水分拡散係数  $D$  は、サクシオン  $\psi$  の関数で Fig. 14 の式で与えられる。そして、これらの式は、いろいろな地点の時々刻々と変化する水分とサクシオンを知るときに用いられる。

さて、本研究の解析対象は沈下の著しいマサ土である。すでに 3., 4. で指摘したとおり排水中に時々刻々と変化する沈下、すなわち間隙比  $e$  の変化を考えた方程式に基づく解析を必要とする。したがって、式 (4), (5) はマサ土の排水時の解析に対して適当でない。ところで、浸透中に間隙比の変化を伴う解析手法は、従来から膨潤土中の水分移動の研究分野で開発され、次のように説明されている<sup>19)</sup>。

鉛直一次元流れにおいて、 $z$  軸を固定し土は表面から下方に圧縮沈下するものとして、物質座標  $m$  を式 (6) のように定義して用いる。

物質座標を採用する理由は、変形を微小とし無視せず有限変形とすることである。そして、体積変化を考えた不飽和浸透方程式は、体積変化を考えない場合の解析と同様に取り扱われる。

$$m_z = \int_0^z (1+e)^{-1} dz \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $e$  は間隙比である。そして、このとき連続の式は式 (7) で表わされる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_z}{\partial m_z} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\theta$  は体積含水比、 $m_z$  は物質座標  $m$  の  $z$  成分、 $q_z$  は土中水の移動フラックス  $q$  の  $z$  成分である。

土中水の移動フラックスは、Darcy の法則により式 (8) で与えられる。

$$q_z = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \dots\dots\dots (8)$$

そして、式 (8) の  $\phi$  は水の全ポテンシャルを意味し式 (9) となる。

$$\phi = \phi + z - \Omega \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\phi$  はマトリックスポテンシャル (通称サクシオンとよぶ) といわれ、土粒子と水分との相互作用に支配される。 $z$  は位置、 $\Omega$  は土かぶりによるポテンシャルである。そして、 $\Omega$  は、特に式 (10) で関係づけられる。

$$\Omega = P(0) + \int_0^z r dz \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $P(0)$  は荷重によるもので本実験では一定である。 $r$  は土の見掛け密度である。ところで、式 (8)、(9)、(10) から式 (8) は式 (11) に書き直すことができる。

$$q_z = -K \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} + 1 - r \right) \dots\dots\dots (11)$$

さらに、式 (6)、(7)、(11) の組合せにより体積含水比  $\theta$  に関する式を誘導することができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) \\ &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( K \frac{\partial \phi}{(1+e) \partial m_z} \right) + \frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) \\ &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{(1+e) \partial m_z} \right) + \frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) \\ &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( D_m \frac{\partial \theta}{\partial m_z} \right) + \frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) \dots\dots (12) \end{aligned}$$

ここに、 $D_m$  は  $D_m = (K/(1+e)) \cdot (\partial \phi / \partial \theta)$  であり圧縮沈下時の水分拡散係数を意味し、体積含水比  $\theta$  の関数として **Fig. 13** の実験式で与えられる。同様にして、不飽和透水係数  $K$  も **Fig. 12** に示されている式で表わされる。

サクシオン  $\phi$  に関する式は、式 (12) の両辺を  $\partial \theta / \partial \phi$  で除することにより導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( D_m \frac{\partial \theta}{\partial m_z} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \\ &\quad + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( D_m \frac{\partial \phi}{\partial m_z} \right) + \frac{\partial D_m'}{\partial m_z} (1-r) \\ &\dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここに、 $D_m'$  は  $D_m' = K \partial \phi / \partial \theta$  であり  $D_m$  とともに

サクシオン  $\phi$  の関数として **Fig. 14** の式で与えられる。

式 (12)、(13) は浸透中に変化する間隙比  $e$  と湿潤密度  $r$  を含む式である。しかし、序文でも述べたように水位変動を伴うコア内の湿潤密度は一定ではなく、大幅な変化が予想される。このような事実はフィルダムの現位置調査においても明らかにされている<sup>19)</sup>。そこで、式 (12)、(13) の中の湿潤密度  $r$  は、一定ではなく沈下による間隙比  $e$  の変化により変化する。したがって、 $e$  と  $\theta'$  から

$$r' = \frac{G_s}{1+e} r_w + \frac{\theta'}{100}$$

に修正した値を採用すべきと考える。そして、 $r'$  は位置と体積含水比により変化するものと考えられるならば、まず体積含水比  $\theta$  の場合は式 (14) のように修正すべきである。つまり、式 (12) において、

$$\frac{\partial K}{\partial m_z} (1-r) = \frac{\partial K}{\partial m_z} - \left( K \frac{\partial r'}{\partial m_z} + r' \frac{\partial K}{\partial m_z} \right) \dots (14)$$

同様に、サクシオン  $\phi$  の場合式 (13) において、

$$\frac{\partial D_m'}{\partial m_z} (1-r) = \frac{\partial D_m'}{\partial m_z} - \left( D_m' \frac{\partial r'}{\partial m_z} + r' \frac{\partial D_m'}{\partial m_z} \right) \dots\dots\dots (15)$$

したがって、式 (12) は式 (16) となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( D_m \frac{\partial \theta}{\partial m_z} \right) + \frac{\partial K}{\partial m_z} \\ &\quad - \left( K \frac{\partial r'}{\partial m_z} + r' \frac{\partial K}{\partial m_z} \right) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

また、式 (13) は式 (17) で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial m_z} \left( D_m \frac{\partial \phi}{\partial m_z} \right) + \frac{\partial D_m'}{\partial m_z} \\ &\quad - \left( D_m' \frac{\partial r'}{\partial m_z} + r' \frac{\partial D_m'}{\partial m_z} \right) \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

そこで、式 (4)、(5)、(12)、(13)、(16)、(17) の差分近似式を求め検討した。これらの詳細は、6. に譲る。いま、Crank-Nicholson 法により一例として、式 (16)、(17) の差分式を求めたところ式 (18)、(19) のとおりである。ここに、 $R = \Delta t / \Delta m_z^2$  である。

体積含水比  $\theta$  については、

$$\begin{aligned} A \theta_{i+1}^{n+1} + B \theta_i^{n+1} + C \theta_{i-1}^{n+1} \\ = -A \theta_{i+1}^n + D \theta_i^n - C \theta_{i-1}^n + E \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

そして、この式の各係数は、次のとおりである。

$$\begin{aligned} A &= -RD_m(\theta_{i+1/2}^n) \\ B &= 2 + RD_m(\theta_{i-1/2}^n) + RD_m(\theta_{i+1/2}^n) \\ C &= -RD_m(\theta_{i-1/2}^n) \\ D &= 2 - RD_m(\theta_{i-1/2}^n) - RD_m(\theta_{i+1/2}^n) \\ E &= 2 R \Delta m_z \{ K(\theta_{i+1/2}^n) - K(\theta_{i-1/2}^n) \} - 2 R \Delta m_z \\ &\quad \cdot [K(\theta_i^n) \{ r'(\theta_{i+1/2}^n) - r'(\theta_{i-1/2}^n) \} \\ &\quad + r'(\theta_i^n) \{ K(\theta_{i+1/2}^n) - K(\theta_{i-1/2}^n) \}] \end{aligned}$$

式 (18) は、湿潤密度  $r'$  に対する体積含水比  $\theta$  の関係を必要とし、これらは **Fig. 15** で表わされ、つまり

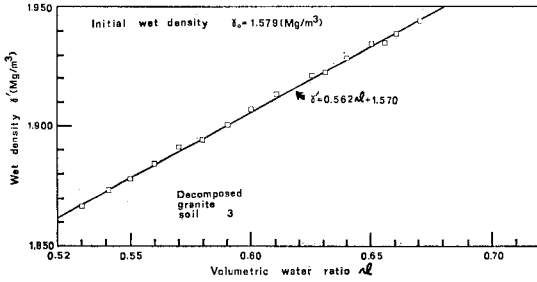


Fig. 15 Relationship between wet density and volumetric water ratio of samples.

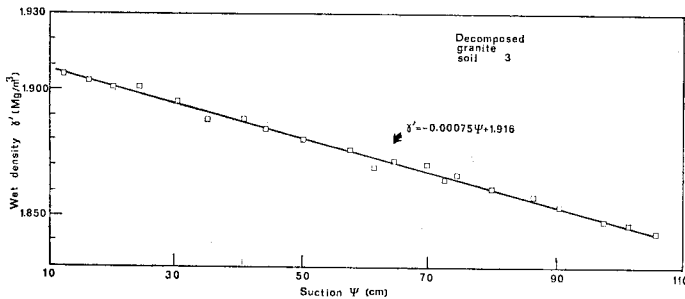


Fig. 16 Relationship between wet density and suction of samples.

$r'$  は  $\vartheta$  の増減により直線的に変化する。

サクシオン  $\psi$  については、

$$A'\phi_{i+1}^{n+1} + B'\phi_i^{n+1} + C'\phi_{i-1}^{n+1} = -A'\phi_{i+1}^n + D'\phi_i^n - C'\phi_{i-1}^n + E' \dots \dots (19)$$

ここに、この式の各係数は下記のとおりである。

$$\begin{aligned} A' &= -RD_m(\phi_{i+1/2}^n) \\ B' &= 2 + RD_m(\phi_{i-1/2}^n) + RD_m(\phi_{i+1/2}^n) \\ C' &= -RD_m(\phi_{i-1/2}^n) \\ D' &= 2 - RD_m(\phi_{i-1/2}^n) - RD_m(\phi_{i+1/2}^n) \\ E' &= 2 R\Delta m_z \{ D_m'(\phi_{i+1/2}^n) - D_m'(\phi_{i-1/2}^n) \} \\ &\quad - 2 R\Delta m_z [ D_m'(\phi_i^n) \{ r'(\phi_{i+1/2}^n) \\ &\quad - r'(\phi_{i-1/2}^n) \} + r'(\phi_i^n) \{ D_m'(\phi_{i+1/2}^n) \\ &\quad - D_m'(\phi_{i-1/2}^n) \} ] \end{aligned}$$

式 (19) において、特に湿潤密度  $r'$  とサクシオン  $\psi$  との関係は Fig. 16 に示される式となる。ところで、 $r'$  と  $\vartheta$  の関係は本来、土柱の各位置ごとに異なるものであるが本実験では微小なため無視した。

式 (18), (19) は未知数 3 個をもつ方程式であり、その解は Gauss の消去法で求められる。そして、それに伴う初期および境界条件は、次のとおりである。鉛直上方に物質座標  $m_z$  軸の正の方向をとれば、

- ① 初期条件:  $t=0, m_z > 0, \vartheta = \vartheta_i$  (初期体積含水比分布)
- ② 境界条件:  $t > 0, m_z = 0, \vartheta = \vartheta_s$  (飽和の体積含水比)

$$m_z = \int_0^{80} (1/1 + e) dz, \quad \vartheta = \vartheta(t)$$

- ③ 初期条件:  $t=0, m_z > 0, \phi = \phi_i$  (初期サクシオン分布)

- ④ 境界条件:  $t > 0, m_z = 0, \phi = 0, m_z = \int_0^{80} (1/1 + e) dz, \phi = \phi(t)$

特に、この種の式は、その係数が未知数であるため直接解を求めるわけにはいかない。これらの解法として、いろいろ提案されているが最も収束のよい繰返し計算法<sup>20)</sup>を採用し解析した。

### 6. 解析結果の検討

5. で述べた各種の不飽和浸透方程式による解を検討するために、繰返し 3 回吸排水実験を行ったマサ土 3 の排水時の値と比較検討するものである。

Fig. 17 は体積含水比  $\vartheta$  の変化を物質座標  $m_z$  を用いて整理したものである。 $m_z$  は、通常の座標  $z$  から沈下分を差し引き式 (6) で再計算を行った。図

中の実線は、実験値であり、破線は式 (16) の計算結果である。この結果、両者の関係は、ほとんど一致しており入力パラメーターの良好さを物語っている。特に、式 (16) において湿潤密度  $r'$  が  $m_z$  と  $\vartheta$  により変化すると仮定した考えの正しさをこの図より示唆できる。

Fig. 18 はサクシオン  $\psi$  の実験値と式 (17) による解析結果をプロットしたものである。これより体積含水比と同様に良好なる結果を示している。つまり、式 (17) の解析に必要なパラメーターの正しさを裏づけている。

Fig. 19 において、式 (4) は一点鎖線、式 (12) は実線、式 (16) は破線を表わし、それぞれの値は数値解を

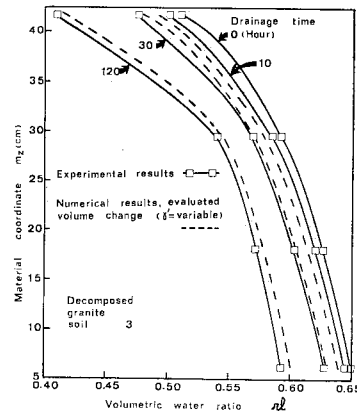


Fig. 17 Comparison of numerical and experimental results of volumetric water ratio after 3rd rewet-drainage test.



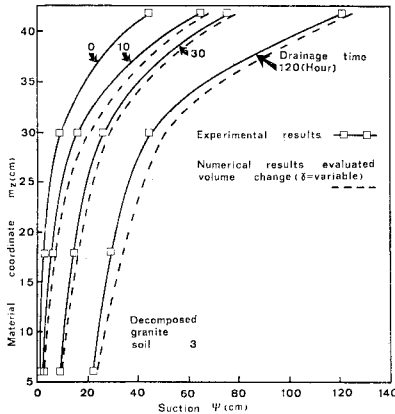


Fig. 19 Comparison of numerical and experimental results of suction after 3rd rewet-drainage test.

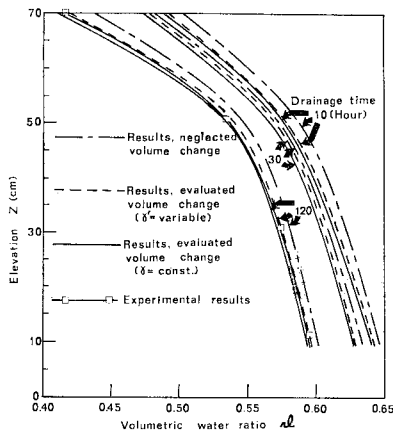


Fig. 19 Numerical and experimental profiles of volumetric water ratio.

示す。ここに、式(4)による値のみ各時刻に対応する間隙比  $e$  を体積含水比  $\theta$  に換算した値を表示した。さて、これらの3つの式の結果は、いずれも排水中に時々刻々と変化する体積含水比の各位置における分布を明確に示している。さらに詳しくみると、これらの結果はそれぞれ若干異なっている。つまり、体積含水比は各式の中で間隙変化を考えない式、間隙変化と湿潤密度を考えるが密度は変化する式、間隙変化と湿潤密度を考えるが密度は一定とする式であり、後の式になるほどその値は小さい。すなわち、体積変化を考えたこの種の式で湿潤密度  $r$  は取り入れられているものの一定としている。しかし、実際の土中の  $r$  は、体積含水比と沈下により変化するものであり、その差が式(12)と(16)に現われている。そして、図中の120時間後の実験値と式(16)の数値解とはよく対応している。

Fig. 20 はサクシオン  $\phi$  に関する数値解で、式(5)は一点鎖線、式(13)は実線、式(17)は破線をそれぞ

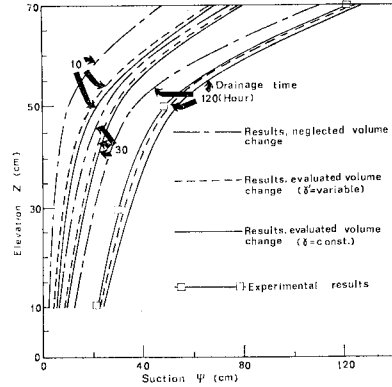


Fig. 20 Numerical and experimental profiles of suction.

れ表わしている。これらの値は、各位置ごとに大幅に変化しており土の表面に近づくほど大きくなる。やはり、サクシオンの値においても体積含水比と同様に3つの式による差は明らかである。内訳は、間隙変化を考えない場合、間隙変化と湿潤密度の変化を考える場合、間隙変化と湿潤密度を考えるが、その密度は一定とする場合であり、後の条件ほどサクシオンは大きくなる。特に、式(13)と(17)の差は歴然としており、式(10)に示された土かぶりポテンシャルの影響を呈している。さらに、式(17)の数値解と120時間後のサクシオンの実験値との一致から、 $r'$  の変化という仮定の正しさが裏づけられる。以上6.を総括すると、フィルダムのコア材に風化度の大きいマサ土を使用する場合、特に沈下を排水中に生じさせた結果、その影響が体積含水比とサクシオンの分布に反映するため、その解析には湿潤密度  $r'$  と間隙比  $e$  の変化を取り入れた式(16),(17)を用いるべきであり、それらの妥当性を明らかにした。

$r$  線利用による土中水分計測の今後の課題として、次のように考える。マサ土のように湿潤密度の変化の大きい材料については、精度よく含水比を測定できるが変化の小さい材料では、かなり困難である。そこで、 $H_2O$  の水素原子を直接とらえる中性子線を利用する方法が有利と考えられる。本解析は、単に室内実験から得たパラメーターを利用したものにはすぎないが、現場で含水比やサクシオンの経時変化に関するデータの計測が、可能になればさらに信頼度も増すであろう。

## 7. 結 論

本論文は、各種の風化したマサ土の不飽和浸透特性を明らかにする目的で、土層カラムによる模型実験を行った。そして、特に著しく風化した試料の排水過程に生ずる沈下量を測定し体積変化を考えた不飽和浸透方程式に

基づく解析を試みた。得られた主要な結果を要約すると次のようになる。

(1) 土中の含水比は、ガンマ線密度計 ( $^{60}\text{Co}$  100  $\mu\text{Ci}$ ) で測定したところ、その精度はマサ土のような物性の複雑な土でもキャリブレーションを正確に行えば、炉乾燥法に近い値を得ることができ、しかも非破壊で同時性という利点をもっている。

(2) 風化度により、吸排水時の沈下量は異なり風化度の大きい試料ほど、その沈下量は大きい。そして、著しく沈下の生ずる試料でもその含水比は、式(1)に沈下量から求めた乾燥密度  $\rho_d$  を代入すれば推定できる。

(3) 各種に風化したマサ土の相対透水係数  $K_r$  は、有効飽和度  $S_e$  の増減により直線的に変化する。

(4) 不飽和透水係数、水分拡散係数、水分保持曲線は、いずれも風化度に大きく支配され、特に沈下の著しい試料では、浸透中に間隙比の変化を伴うため体積含水比を用いるべきである。

(5) 体積変化を考えた浸透解析は、従来の式(12)、(13)に基づいていたが、実際の土中では水位変動のために湿潤密度は大幅に変化する。したがって、式(16)、(17)を使用すべきである。

(6) 式(16)、(17)で解析した結果、湿潤密度の影響は明らかであり、特に体積含水比よりもサクションに対して著しい。

#### 参 考 文 献

- 1) 西田一彦・佐々木清一：水蒸気吸着によるマサ土粒子の表面特性の検討，土質工学会論文集，Vol. 15, No. 2, pp. 79~87, 1975.
- 2) Nishida, K., S. Sasaki and C. Aoyama : Water Adsorption on Decomposed Granite Soil Particles and Its Influence on Permeability, Technology Reports of Kansai University, No. 20, pp. 153~160, 1979.
- 3) Matsuo, S., K. Nishida and S. Sasaki : Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 1, pp. 13~22, 1979.
- 4) Matsuo, S., K. Nishida and S. Sasaki : Physical Properties of Soil Particles and Their Effect on Hydraulic Conductivity of Unsaturated Decomposed Granite Soil, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4, pp. 1~12, 1981.
- 5) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和一不飽和浸透流の解析，土木学会論文集，第 264 号，pp. 87~96, 1977.
- 6) 大西有三・村上 毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文集，第 238 号，pp. 87~96, 1980.
- 7) Dempsey, B.J. : A Mathematical Model for Predicting Coupled Heat and Water Movement in Unsaturated Soil, Int. Jour. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol. 2, pp. 19~34, 1978.
- 8) Raudkivi, A.J. and V.U. Nguyen : Moisture Movement in Basecourses due to Temperature Gradients, Ph.D. Thesis, Univ. of Auckland, Report No. 107, 1973.
- 9) Mitchell, J.K. : Backfill Materials for Underground Power Cables, EPRI Report, pp. 1~73, 1981.
- 10) 土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ，土質工学会，pp. 27~63, 1974.
- 11) 佐々木清一・西田一彦：マサ土の不飽和浸透特性と圧縮沈下について，土木学会関西支部年次講演会集，pp. III-4-1~III-4-2, 1982.
- 12) 福田 護：盛土地盤の浸水に伴う沈下とその解析について，土質工学会論文集，Vol. 17, No. 2, pp. 65~73, 1977.
- 13) 軽部大蔵・苗村康造・森田 登・岩崎哲雄：不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 269 号，pp. 105~119, 1978.
- 14) Lee, I.K. : Soil Mechanics—New Horizons, London Newnes—Butterworth, pp. 112~157, 1974.
- 15) 河野伊一郎・西垣 誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究，土木学会論文集，第 307 号，pp. 59~69, 1981.
- 16) 八幡敏雄：土壌の物理，東大出版会，pp. 35~68, 1977.
- 17) 西垣 誠・河野伊一郎・浅間康史：鉛直一次元浸透解析による不飽和土の浸透特性の吟味，土木学会全国大会年次講演集，pp. III-269~III-270.
- 18) Smiles, D.E. : One-Dimensional Vertical Flow of Water in Saturated Swelling Soils, Trans. of the 10th Int. Congress, pp. 81~89, 1974.
- 19) 岩片 透：ラジオアイソトープを利用した密度測定方法 (R.I. 法) のフィルダム盛立管理への適用性，土と基礎，Vol. 23, No. 5, pp. 63~69.
- 20) 大西有三・西垣 誠：土中水の不飽和流動，土と基礎，Vol. 29, No. 7, pp. 65~72, 1981.

(1983.4.22・受付)