

乱さないまさ土の土構造と工学的性質

Soil Structure and Engineering Properties of Undisturbed Decomposed Granite Soil

佐々木清一 (ささき せいいち)

(和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学科)

1. まえがき

花崗岩の風化残積土であるまさ土は、近畿、中国、四国、北九州一帯に分布しており、この種の土は従来から道路、宅地、フィルダムの盛土材料として利用されてきた。しかし、土質工学的特徴として、①風化の程度により物理、力学的性質が異なる、②土粒子自体が破碎しやすい、③水の浸透に伴い圧縮沈下、すなわちコラプス現象が生じやすい、等を有しているため、土構造物の設計において取扱い上注意を要する土とされている。

多くの研究者は、上記の土質工学的特徴の解明を試み、かつ設計、施工においても、常に配慮を行う努力を続けてきた。しかし、集中豪雨により発生する自然斜面や切取り斜面の崩壊事故は、現在でもまさ土の分布地域に多く見られる。このような浸透に伴う崩壊機構の解明は全く未知の分野であり、また切取り斜面の設計法にしても、弾性波試験などの現位置調査の結果から、経験的基準に従って決めているにすぎない。

自然斜面や切取り斜面における土の性質は、人工盛土の場合と著しく異なるので、乱さない試料を地盤から採取し、その特性を解明する必要がある。しかし、乱さない試料の採取や試験が困難なため、情報は限られていた。

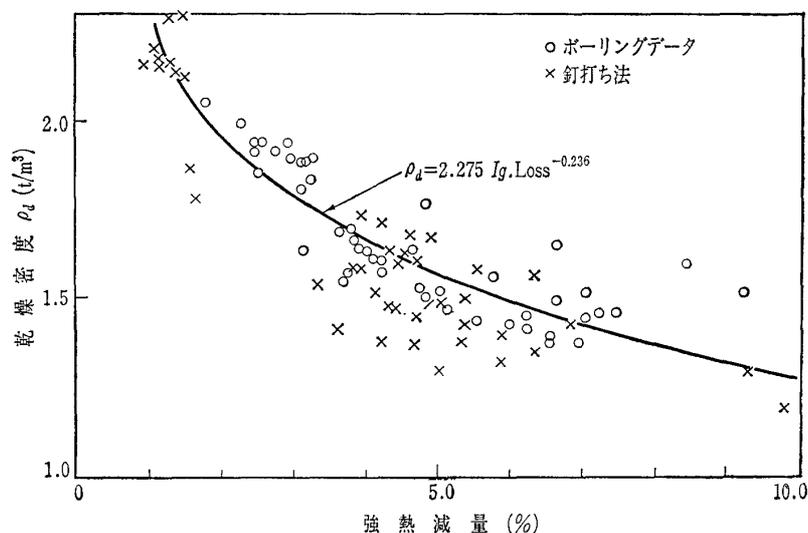
著者は、締め固めたまさ土を対象とした透水性、圧縮性、せん断特性などの工学的性質について、物理化学的視点から究明し、それらに及ぼす土粒子物性と水分との役目を明らかにした²⁾。そこで、これまでの土粒子物性と水分との関係に

関する研究の延長上のテーマとして、乱さない試料を対象とした浸透パラメーター（水分特性曲線、不飽和透水係数）の特徴をとらえ、土構造の立場から検討を行い、解析上問題となる2、3の要因について考察する。

2. 風化の程度と土構造の特徴

まさ土に限らず風化残積土の工学的性質を論じる場合、風化の程度をいかに合理的に表示するかが重要となる。風化の程度の判定は、物理、化学、力学的なものまで種々の手法が考察されている。しかし、おのおの判定法は、対象物によっても自ずから適用範囲に限界があり、また結果の利用目的によっても、とるべき手法が異なることは言うまでもない。そこで、工学的に利用する立場からみると、できる限り測定が簡単であり、しかも工学的に直結することに焦点がしぼられてくる。

乱された試料の風化の程度として、一般的に用い



図一 試料の乾燥密度と強熱減量の関係

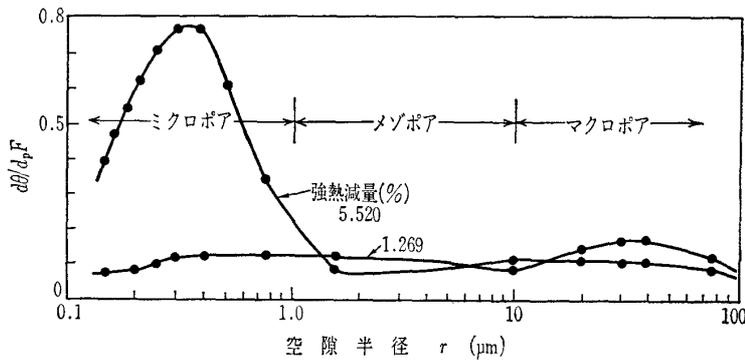


図-2 試料の空隙分布曲線 (pF 測定法)

3. 試料の採取法と実験

実験に用いた試料は、大阪府交野市の交野山系において緩やかなまさ土斜面から採取したものである。乱さない試料の採取法は、実験目的により異なり、その手法については種々開発されているが、本実験の場合は、斜面において大型試料（断面 130 mm²、長さ 300 mm）をサンプリングする必要があるため、作業効率の良い釘打ち法を採用した⁴⁾。この手法は地盤を平滑に削りとり、図-3のよう

られている強熱減量に注目し、乾燥密度との関係を示した結果が、図-1である。この図より、強熱減量が増加し、つまり風化の程度が大きくなると乾燥密度が減少する。そこで、図中に示すように両者の関係を表現する実験式を求めておくと、例えば弾性波試験による地盤のP波速度により、乾燥密度が推定されると、風化の程度の値が求められる。この関係に用いられている強熱減量は、有機物の影響を受けやすいのであらかじめ取り除いておく必要がある。

にあらかじめ周囲に釘穴をあけた塩化ビニールまたはベークライト製の板を置き、約 15~20 cm の釘を打ち込んでいく。その後注意深く釘の周囲の土を削り、整形し釘穴のあいた別の板で試料を挟み込む。さらに、水がもれないように釘面と周囲に対してエポキシ系樹脂（建設用エスダイン）を用いて完全に

乱さない状態の土構造 (Soil Structure) を定量的に分析し、風化の程度との関係を次に検討する。

図-2 は試料の空隙分布曲線を示したものである。この分布曲線は、加圧板および加圧膜法により測定された水分特性曲線を基に、式(1)、(2)を適用して得られた値をプロットした結果である³⁾。

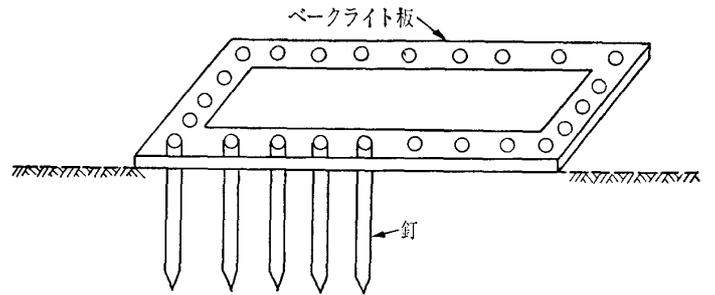


図-3 西田による乱さない試料の採取法

$$\frac{d\theta}{dpF} = -\frac{\theta_s}{B \cdot C} \exp\left(\frac{pF-A}{B}\right) \left\{ \exp\left(\frac{pF-A}{B}\right) + 1 \right\}^{-\left(\frac{1}{C}+1\right)} \dots\dots\dots(1)$$

$$r = \frac{0.15}{\phi} \dots\dots\dots(2)$$

- ただし、 θ : 体積含水率 (cm³/cm³)
- θ_s : 飽和体積含水率 (cm³/cm³)
- A, B, C : 定数
- r : 空隙半径 (μm)
- ϕ : サクシオン (cm)

図-2 から風化の程度の大きい試料はミクロポアが著しく多く、マクロポアは割合少ない。一方、風化の程度の小さい試料は、ミクロ、マクロポアとも少なく、偏った分布を呈していない。つまり、風化の程度が大きくなると空隙構造が極端に偏った特徴を示していることが空隙分布から明らかにされた。

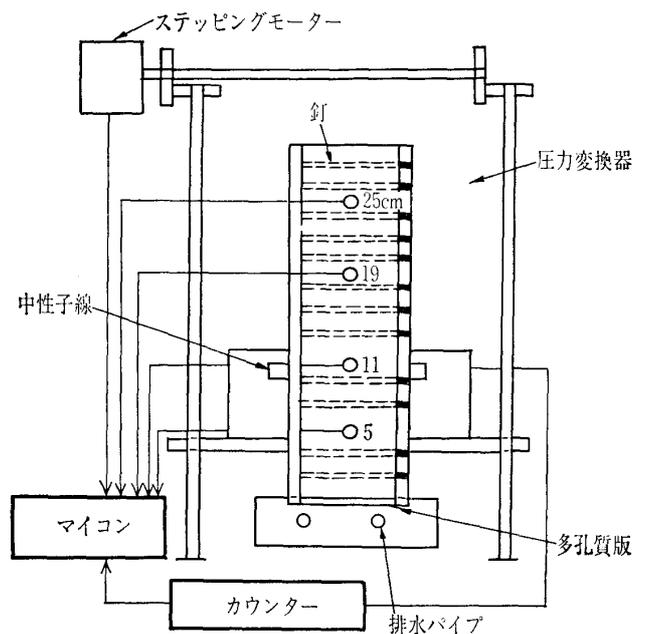


図-4 実験装置

密封する。

上記の手順で作成した試料を図一4に示される浸透実験装置に固定した。実験中のサクシヨンの変化は、5, 11, 19, 25 cm の位置にてセラミックチップを付けたトランスジューサー ($\pm 1 \text{ kgf/cm}^2$) で、この位置の含水率は中性子線 ($^{252}\text{Cf } 50 \mu\text{Ci}$) の手法を用いそれぞれ排水状態にて計測した。特に、サクシオンと含水率の経時変化は、排水開始から数時間の間に著しく変化するために、これに追従できるように測定時間を30分間隔とし、ほぼ平衡時間15時間に至るまでマイコン制御による自動計測を試みた。そして、サクシオンと体積含水率の経時変化の値から、水分特性曲線、ならびに不飽和透水係数と体積含水率の関係を求めた。

不飽和透水係数 $K(\theta)$ は式(3)で計算することができる⁵⁾。

$$K(\theta) = \frac{\left\{ \int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial z} dz \right\}_{z,t}}{\left\{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\}_{z,t}} \dots\dots\dots (3)$$

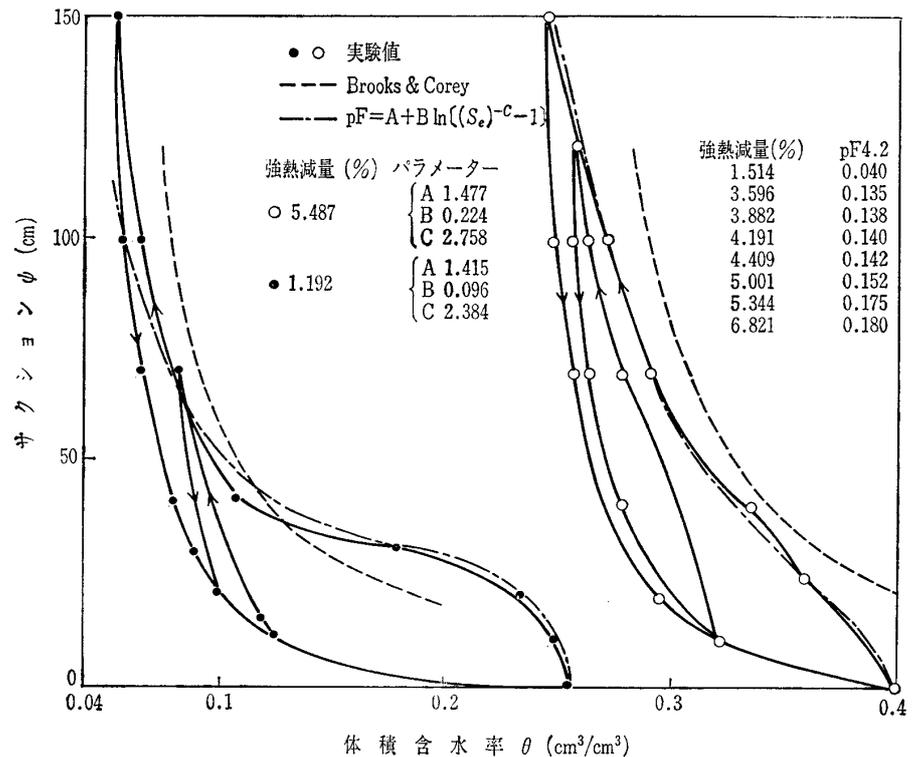
ただし、 θ : 体積含水率 (cm^3/cm^3)

ψ : サクシオン (cm), z : 位置 (cm), t : 時間 (s)

飽和透水係数は、浸透実験終了後、図一4に設置されている試料を利用し動水勾配1のもとで定水位試験から測定した。

4. 土構造に立脚した浸透パラメーターの検討

現在、飽和・不飽和浸透流解析手法が地下水解析や土構造物の安定性の検討に適用可能になっている。ところで、解析を行う場合、入力定数として、飽和土の浸透特性(飽和透水係数)に加えて、不飽和土の浸透特性(水分特性曲線, 不飽和透水係数)が必要となる。これらの定数決定に際し、従来から締め固めた試料を対象とした実験値は、多く報告されているが、乱さない試料の値については極端に少ない。そこで、浸透パラメーターの特徴を2.で述べた土構



図一5 試料の水分特性曲線

造に立脚して、風化の程度と関係づけて検討を行う。

試料の水分特性曲線は、図一5に示すとおりである。この図において、風化の程度の大さい試料ほど水分特性曲線の脱水と吸水過程における差、すなわちヒステリシス現象が顕著である。このような現象は、2.で述べた土中の空隙構造の影響と考えられる。

土の浸透現象を解析するには、上記の水分特性曲線をなんらかの形で数式化されることが望ましい。この曲線の形状を評価する実験式として Brooks and Corey (ブルックスとコリー) の式(4)⁶⁾と松川らの式(5)⁷⁾に基づいて検討する。

$$\left. \begin{aligned} S_e &= \left(\frac{\psi}{\psi_{er}} \right)^\lambda \\ S_e &= \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$pF = A + B \ln \{ (S_r)^{-C} - 1 \} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 S_e : 有効飽和度

ψ : サクシオン (cm)

ψ_{er} : 限界毛管水頭 (cm)

θ : 体積含水率 (cm^3/cm^3)

θ_s : 飽和体積含水率 (cm^3/cm^3)

θ_r : 残留体積含水率 (cm^3/cm^3)

λ, A, B, C : パラメーター, S_r : 飽和度

式(5)においても式(4)と同様に S_r の代わりに S_e で置き換えられた式を用いるものとする。これらの計

算には、 θ_r が必要であるが、pF 4.2に相当する含水率を用いる。ところで、 θ_r は浸透現象には直接関係しない拘束水分と考えられ、図—5の中に示されているように、風化の程度が大きくなるとこの種の水分も増加する。また、式(4)、(5)による排水過程に対するサクシヨンの計算値が図—5に示されているが、水分特性曲線の評価には式(5)を適用した値が実験値に近づくことを示している。

次に、3.の土層浸透実験から測定された不飽和透水係数（比透水係数の値と対比する）を2、3の提案されている式を用いて吟味する。Irmay（イルメイ）は、比透水係数 K_r と有効飽和度 S_e との関係に次の簡単なべき関数式を与えている⁹⁾。

$$K_r = K/K_s (S_e)^n \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 K ：不飽和透水係数 (cm/s)

K_s ：飽和透水係数 (cm/s), n ：指数

ところで、Irmay は不飽和土に Kozeny（コズニイ）モデルを適用して、 $n \approx 3.0$ を導いている。

Jackson（ジャクソン）は Poiseulle（ポアジュー）の法則と Darcy（ダルシー）の法則に基づいて式(7)

を導いた⁹⁾。

$$K_r = (S_e)^\beta \frac{\sum_{j=i}^m [(2j+1-2i)/\phi_j^2]}{\sum_{j=1}^m [(2j-1)/\phi_j^2]} \dots\dots\dots(7)$$

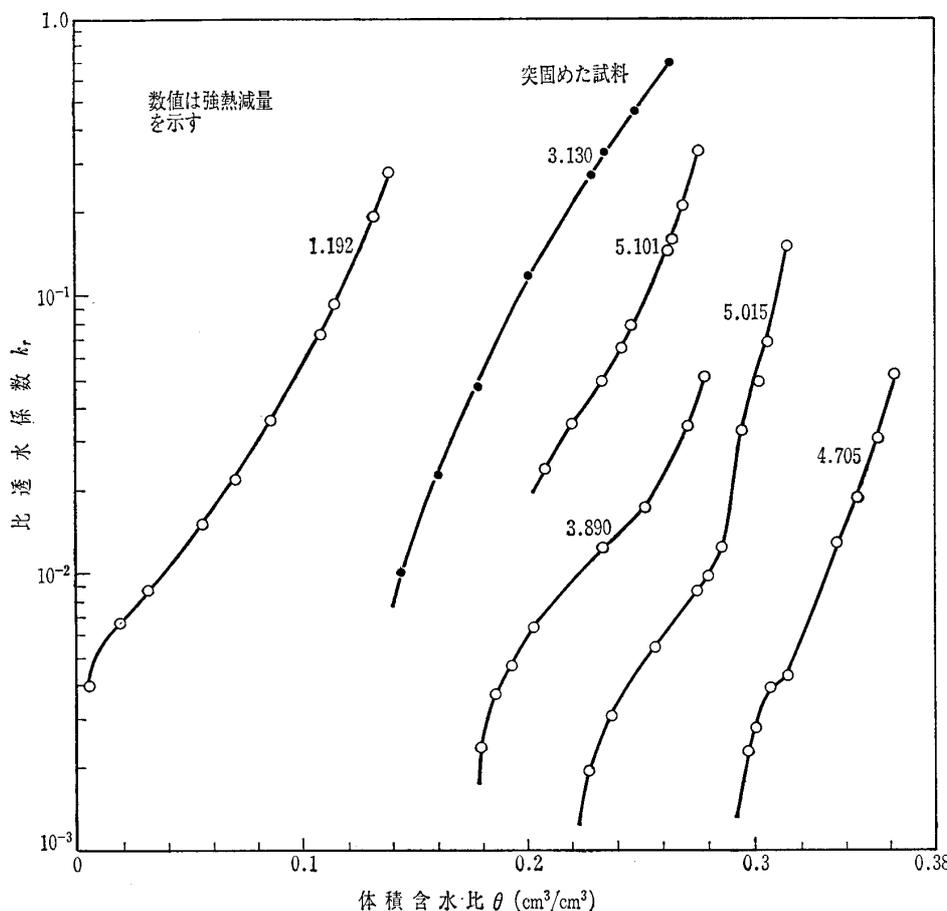
i は水分特性曲線を m 個に分割した時、 $i=1$ が飽和体積含水率 θ_s に対応するものである。指数 β は、 $\beta=0.0, 0.5, 1.0, 4/3$ の場合、Marshall（マーシャル）、Ragad（ラガッド）、Kunze（カンツ）、Millington & Quirk（ミリングトンとクワーク）らの主張する手法である。式(7)の計算を行うとき、 $\phi_j = \frac{1}{2}(\phi_j + \phi_{j+1})$ の値であり、図—5に示された水分特性曲線を分割して用いる。

Van Genuchten（ヴァン・グエンチェン）は S_e を関数として、式(8)を提案している¹⁰⁾。

$$K_r = S_e^{\frac{1}{2}} \{1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m\}^2 \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $m = 1 - \frac{1}{n}$ であり、指数 n は水分特性曲線の形状に影響するパラメーターで、締め固めたまき土に関する竹下のデータに従い $n=2, 3$ とした¹¹⁾。

図—6は比透水係数と体積含水率の実験値をプロットしたものである。これらの関係において、締め固めた試料の場合には、両者の関係が緩やかな放物線形となる¹²⁾。しかし、これらの図が示すように乱さない試料の場合には、体積含水率がある値まで減少すると、比透水係数が急激に減少し、一部不連続的現象を示す。この傾向は、風化の程度が大きいほど著しくなると考えられる。このような特性は2.で述べた偏った空隙分布を保有する土構造の影響によるものと考えられる。そこで、提案されているいくつかの式による計算値を同図の中に示し、実験値との対比した結果が、図—7、8である。これより乱さない試料の場合には、前述のいずれの関数モデルに基づく推定式にも適用



図—6 各種の風化の程度を有する試料の比透水係数と体積含水率の関係

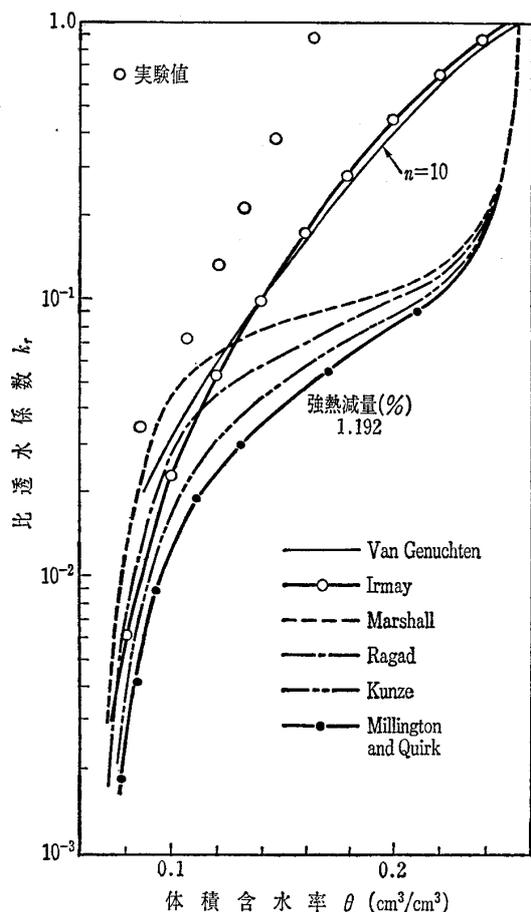


図-7 試料の比透水係数と体積含水率の関係
(風化の程度の小さい試料)

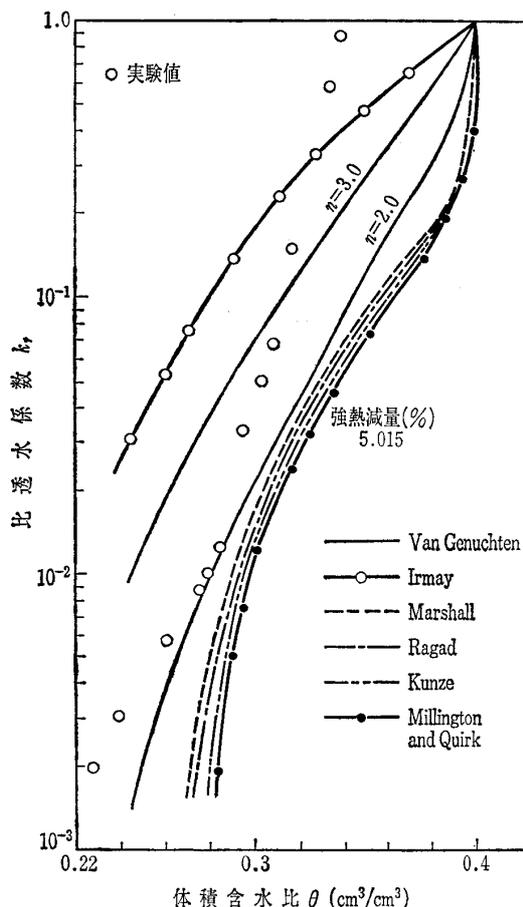


図-8 試料の比透水係数と体積含水率の関係
(風化の程度の大きい試料)

しがたい。つまり、これらの式に空隙分布特性を評価する要素を加味する必要性を示唆している。このようなパラメータを用いて、自然斜面の浸透流解析を試みる場合には、実験値で入力値を入れざるを得ない。その結果、解析結果の精度、収束性に影響を及ぼす。今後、この種のデータの蓄積と解析手法の開発が望まれる。

5. まとめ

乱さないまさ土の工学的性質の一つとして浸透パラメータに及ぼす土構造の影響に焦点を当てた結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 風化の程度の基準として、強熱減量が工学的性質を評価しやすい。
- (2) 風化の程度の大きい試料は、土構造を構成している空隙分布が偏った状態を示す。
- (3) 風化の程度の大きい試料ほど、拘束水分量が増え、 pF 4.2 に相当する水分で評価できる。そして、この水分量は浸透パラメータの推定

に重要な要因となる。

- (4) 水分特性曲線は式(5)で評価できるが、不飽和透水係数は、既往の式(6)~(8)の適用も困難であり、著しい不連続性を示す。このような特徴は、偏った空隙分布の影響と考えられる。

謝辞 本報告をまとめるに際し、種々の助言をいただいた関西大学工学部土木工学科西田一彦教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 西田一彦：風化残積土の工学的性質，鹿島出版会，pp.151~169，1986。
- 2) 例えば Matsuo, S., Nishida, K. and Sasaki, S. : Physical Properties of Weathering Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability, Soils and Foundations, Vol.19, No.1, 1979.
- 3) 松川 進・相馬恒一：土壌水分特性曲線(脱水曲線)を表す新たな実験式，農業土木学会論文集，第104号，pp.31~38，1983。
- 4) 前出(1)
- 5) 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，土木学会論文報告集，第307号，pp.59~68，1981。

報文—2127

- 6) Brooks, R.H. and Corey, A.T. : Hydraulic Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow, ASCE, IR(92), pp.61~88, 1966.
- 7) 前出(3)
- 8) Irmay, S. : On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil, Trans., AGU, Vol.35, No.3, pp.463~467, 1954.
- 9) 土壌物理研究会 : 土の物理学, 森北出版, pp.239~276, 1979.
- 10) Van Genuchten, M. Th. : A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Am. J., Vol.144, pp.892~898, 1980.
- 11) 竹下祐二 : 地盤の浸透特性値の算定方法に関する研究, 学位論文, pp.129~210, 1991.
- 12) 佐々木清一・西田一彦 : まさ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, 土木学会論文報告集, 第304号, pp.133~142, 1983.
(原稿受理 1991.2.27)