

異なる測定法による マサ土の透水性指標の比較

Difference in Permeability Indices of Grus Soils Obtained
from Three Different Measuring Methods

若月 強*・佐々木 良宜**・松倉 公憲***

Tsuyoshi WAKATSUKI*,
Yoshinori SASAKI** and Yukinori MATSUKURA***

I はじめに

花崗岩山地の多くの急勾配斜面では、基盤の難透水層より上部の土層に地下水面が形成されて間隙水圧が発生することにより、土層が不安定になって表層崩壊が発生することが知られている。したがって、風化土層から基盤にかけての深さ方向の透水性の差異を知ることが表層崩壊の発生メカニズムを明らかにする上で重要となる。一般に土層の透水性は、採土缶に採取した試料を実験室に持ち帰った後、透水試験をおこなって透水係数を測定することにより知ることができる。しかし、厳密な意味での不攪乱試料を採土缶で採取するのは難しく熟練を要する作業である。一方、表層崩壊の発生するような急斜面では比較的容易に土層の鉛直断面を切り出せるので、この断面を利用して現場で透水性が測定できれば、試験に必要な労力を減らせるだけではなく、現場の(不攪乱状態での)比較的精度の高いデータが得られることになる。

本研究では、マサ土を対象として採土缶を用い実験室で測定した飽和透水係数(K)と山中式土壤透水通気測定器により現場で測定した透水係数(K_y)、単管式冠水型浸透計により現場で測定した浸透能(I_c)のそれぞれの測定値を比較してそれぞれの測定方法の適用性を検証することを目的とする。なお、透水係数は、「地層の動水勾配を表す定数で、単位の動水勾配のもとで、単位の断面積を単位時間に通過する水量」(新藤, 1981, p.445)と定義されている。一方、浸透能は、「降水あるいは灌漑水が地表面に十分に供給されているとき、地表面下に浸透していく水の速度」(鈴木, 1981, pp.282-283)、または、「単位時間当りに地表面からしみこむ水量を地表の単位面積当りについて表したもの」(高橋ほか, 1985)と定義されている。

II 透水係数・浸透能など諸物性値の測定方法

調査対象とした斜面は、北茨城阿武隈山地の

* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

** 筑波大学理工学研究科大学院生

*** 筑波大学生命環境科学研究科

角閃石黒雲母花崗岩 (Ghb)・花崗閃緑岩 (Gd)・閃緑岩 (Di) の計 3 種類の地質からなる。これらの斜面を以後、Ghb 斜面、Gd 斜面、Di 斜面と呼ぶことにする。いずれも表層崩壊が発生している斜面であり、その斜面勾配は $35 \sim 45^\circ$ と急勾配である。試料採取は崩壊地の滑落崖周辺で行った。土層の深さによる透水性の差異を見るため、かつ透水性の異なる試料を得るために、それぞれの調査斜面の各 1～2 地点において深さ 30～250 cm のトレンチをスコップを使って掘り、10～80 cm ごとに試料の採取および現場試験を行った。試料は 100 cm^3 の採土缶とサンプル袋に採取した。

実験室で測定される飽和透水係数 K は、 100 cm^3 の採土缶を用いた変水位透水試験法 (JIS A 1218, 地盤工学会編, 1991) により求めた。すなわち、 K (cm/sec) は、ダルシー則を使用した次式により計算できる。

$$K = 2.30 \cdot \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \cdot \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

ここで、 a : スタンドパイプの断面積 (cm^2)、 L : 供試体の長さ (cm)、 A : 供試体の断面積 (cm^2)、 $(t_2 - t_1)$: 測定時間 (sec)、 h_1 : 時刻 t_1 における水頭差 (cm)、 h_2 : 時刻 t_2 における水頭差 (cm) である。本研究の場合、 $a = 0.38 \text{ cm}^2$ 、 $L = 5.1 \text{ cm}$ 、 $A = 19.6 \text{ cm}^2$ 、 $h_1 = 17 \text{ cm}$ 、 $h_2 = 10 \text{ cm}$ である。試験中には $(t_2 - t_1)$ の値のみを測ればよい。

野外での透水係数 K_y は、山中式土壤透水通気測定器 (富士平工業 (株) 製) を用いて測定した。この測定器は注射器のような形状をしており、注射針先端の 4 個の小孔から一定量の水 (20 ml) を手動により均等の速度 (4 ml を 1 秒, 20 ml を 5 秒) で土層に注入し、そのときの注入抵抗圧力を測定するものである。小孔から流出した水は土層を飽和状態にして球状に拡散前進すると考えられている。ダルシー則は、 $v = k \cdot \Delta h/l$ (v は流速、 k は透水係数、 Δh は水頭差、 l は試料の長さ)

と表すことができ、単位長さの l のときには、 v が一定ならば k は Δh と反比例の関係である。したがって、注入抵抗圧を Δh とみなすと k は注入抵抗圧の逆数で表すことができる。たとえば、注入抵抗圧 1.0 kg/cm^2 は 1000 cm の Δh に相当し、この逆数 $1/\Delta h = 1 \times 10^{-3}$ (単位は cm/sec) は、ほぼ k と一致するとされている (富士平工業 (株) の使用説明書)。この注入抵抗圧の逆数で示される透水係数を K_y (cm/sec) と表記する。ただし、注入抵抗圧を測る圧力計の目盛りは $0.1 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ までとなっているため、 K_y の測定範囲は $1 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ に限定される。

浸透能は、単管式冠水型浸透計を用いて測定した。測定値の代表性や円筒管打ち込みによる土層の乱れ、横方向の浸透などの影響を考えると、土層に打ち込む円筒管の内径は大きい方が望ましいといわれている (高橋ほか, 1985; 辻村・恩田, 1996)。たとえば高橋ほか (1985) では内径 15 cm と 30 cm、辻村・恩田 (1996) では内径 10 cm と 20 cm の円筒管を用いている。しかし、表層崩壊の発生するような急斜面において、土層の深度ごとに広い水平面を切り出すことは困難であるので、内径 8 cm、高さ 4 cm の金属円筒を用いることとした。この円筒を土層に 3 cm 程度打ち込んだあとに水を満たし、単位断面積当たりの浸透速度を求めた。測定時間は 7～15 分程度であり、0.5～1 分ごとに浸透水量を測定した。浸透速度は測定開始から 0.5～2・3 分までは徐々に低下するが、その後ほぼ一定の値となった。この一定の値となったときの浸透能を I_c (cm/sec) と表記する。

また、実験室で K を測定した後の採土缶の試料を用い、乾燥単位体積重量 (γ_d , gf/cm^3 ; JIS A 1225)、間隙比 (e ; JIS A 1225)、含水比 (w , %; JIS A 1203)、飽和度 (S_r , %; JIS A 1225) を計測した。サンプル袋の試料からは、粒度組成 (JIS A 1204, シルト以下の細粒分は沈降法・砂以上の粗粒分は篩分け法による) を計測した。

III 土層の深さによる K , K_y , I_c の変化

土層の深さ方向の K , K_y , I_c の変化の一例として、Di 斜面における土層構造とそこでの計測結果を第 1 図に示した。この土層断面では深さ 250 cm までにおいて諸物性値を得ることができた。第 1 図によると、 K を用い土層を上から順に 3 層に区分することができる。1 層目は、深さ 0 ~ 60 cm にある $K = 1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ cm/sec と相対的に透水性の高い表層土層である。2 層目は、深さ 60 ~ 120 cm にあり、 $K = 7 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-4}$ cm/sec と相対的に透水性の低い土層である。3 層目は、深さ 120 ~ 250 cm の土層で K は $9 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$ cm/sec の範囲にあり、土層深の増加に伴い徐々に K が減少する。

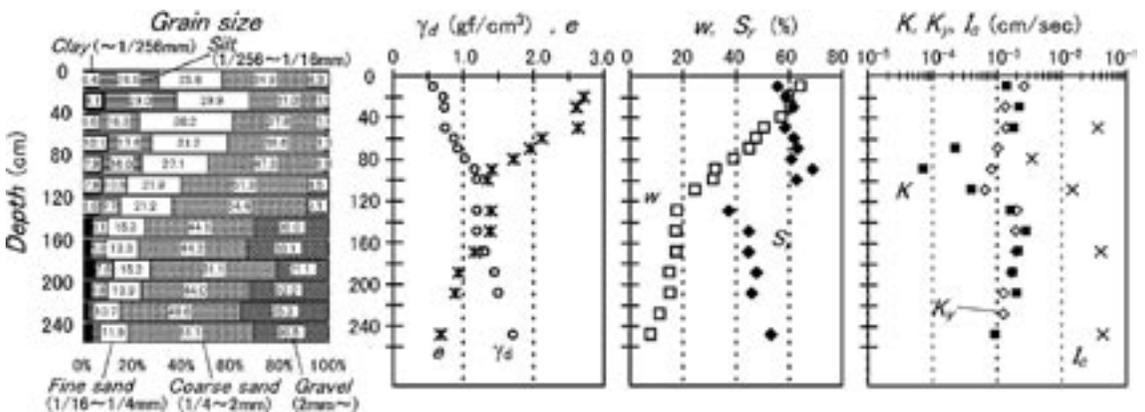
土層の透水性は、粒径が小さくなるほど、または γ_d が大きくなる（すなわち、 e が小さくなる）ほど低下する。1 層目は、2、3 層目に比べて相対的に γ_d がかなり小さいために、相対的に細粒であるにもかかわらず 2 層目より K が大きい。2 層目は、3 層目と同様大きな γ_d であると同時に、粒径は 1 層目と同様に細粒であるため、この土層の K はかなり小さく難透水層となっている。3 層目は、1、2 層目に比べて相対的に γ_d が大きい、

粒径がかなり小さいため K は 2 層目より小さい。また、深さによる粒度組成の違いはほとんどないが、土層深の増加に伴い γ_d は徐々に増加し、 e は徐々に減少する。それに対応して、 K , K_y も徐々に減少している。2 層目が難透水層であるため、それより浅い土層は水が貯留されやすいため、1、2 層目の S_r , w の値は 3 層目に比べて大きくなっているのであろう。

K と K_y を比較すると、1 層目と 3 層目はほぼ同じ値である。2 層目の K_y は 1・3 層目の K_y よりはやや小さい値であるが、 K と比較するとかなり大きな値となっており、この層の透水性の低さをそれほどうまく表すことができていない。一方、 K と I_c を比較すると、いずれの層においても I_c は K よりも 1 オーダー以上大きな値となっている。しかし、各層の I_c を比較すると、1・3 層目に比べて 2 層目の I_c はかなり小さな値となっており、変化パターンは K と類似し、土層の深さによる透水性の変化が相対的には表されている。

IV K と K_y ・ I_c との関係

第 2 図には、 K と K_y の関係を岩質ごとにプロットした。図中には、 $K = K_y$ の直線（細い実線）



第 1 図 閃緑岩 (Di) 斜面における土層の深度方向の物性値の変化

を示している。また、太い破線は上述した K_y の測定可能範囲を示している。 K と K_y の関係から、以下の回帰直線（太い実線）が得られた。

$$\log_{10} K_y = 0.331 \cdot \log_{10} K - 1.908 \quad (2)$$

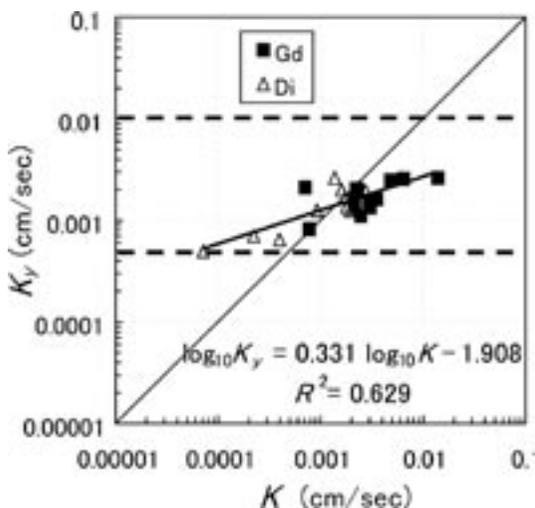
IIIで述べたように、土層の深さ方向の透水性の変化は、 K を測定することによりうまく表現することができる。したがって、この回帰直線が $K = K_y$ の直線から離れた場所に位置しているとしても、それが $K = K_y$ の直線と平行（すなわち、回帰直線の傾きが1）に近ければ、 K_y を測定することで土層の深度方向の透水性の相対的な変化を知ることができる。 1×10^{-3} cm/sec 付近では K と K_y の測定値はほぼ一致している。しかし、回帰直線の傾きが0.331と小さいことで表されているように、 $K > 1 \times 10^{-3}$ cm/sec の範囲では K に比べて K_y は小さくなり、逆に $K < 1 \times 10^{-3}$ cm/sec の範囲では大きくなっている。前者は、 K_y の測定において人の手では土層へ水を注入する速度を一定に保つことが困難であるため、注入速度が速くなる瞬間に、大きな注入抵抗圧が測定されて

いることが原因ではないかと考えられる。また後者に関しては、マサ土は相対的に粒径の大きな土であるので、 K_y の測定において注射針を挿入するときに粗粒の土粒子を押しつけていると考えられ、その際に土層に隙間が新たに形成されていることが原因ではないかと考えられる。そのため上述した Di の土層では、 K_y の値からは2層目が難透水層であることをうまく表現できておらず、土層の深さ方向の透水性の変化を明らかにできていないと思われる。これらのことから、マサ土に対しては山中式土壤透水通気測定器を用いないほうがよいといえる。

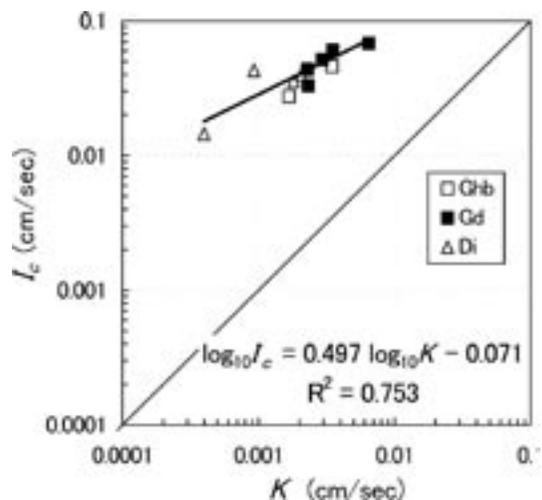
第3図には、 K と I_c の関係を岩質ごとにプロットした。図中には、 $K = I_c$ の直線（細い実線）を示している。 K と I_c の関係から、以下の回帰直線（太い実線）が得られた。

$$\log_{10} I_c = 0.497 \cdot \log_{10} K - 0.071 \quad (3)$$

IIIで述べた結果と同様に、この図からも I_c は K よりも1オーダー以上大きい。円筒管の内径が小さすぎることで、および浸透水が横方向へ逃げってしまうことにより I_c は大きな値となったのであ



第2図 K と K_y との関係



第3図 K と I_c との関係

う。しかし、回帰式の傾きは 0.497 となり K と K_y の関係における傾き 0.331 よりは大きいため、上述した Di の土層での結果と同様に、ある程度は I_c の測定によって土層の深さによる相対的な透水性の差異を表現できるといえる。しかし、 K の値が小さくなるほど K と I_c の値の差が大きくなっている。これは、土層に円筒管を打ち込むときに土層を攪乱してしまうことが原因で、透水性の低い土層ほど攪乱の影響を受けやすくなるためであろう。以上のことから、マサ土に対して浸透能試験を行うことにより、透水性の相対的大小関係はわかるが、透水係数の値との絶対的数値には 1～2 オーダー程度の差異があることに注意する必要があるといえる。

V おわりに

本研究では、マサ土を対象として採土缶を用い実験室で測定した飽和透水係数 (K) と山中式土壌透水通気測定器により現場で測定した透水係数 (K_y)、単管式冠水型浸透計により現場で測定した浸透能 (I_c) のそれぞれの測定値を比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) マサ土に対しては、山中式土壌透水通気測定器はそれほど有用ではない。

- 2) マサ土に対して浸透能試験を行うことにより、相対的な透水性の差異はある程度表現できるが、透水係数の値とはかなりの開きがあることに注意する必要がある。

文献

- 新藤静夫 (1981)：透水係数。町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・榎根 勇・小野有五編：「地形学事典」二宮書店，445。
- 鈴木裕一 (1981)：浸透能。町田 貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤 正・榎根 勇・小野有五編：「地形学事典」二宮書店，282-283。
- 地盤工学会 (1991)：透水試験。地盤工学会編：「土の試験実習書－第二回改訂版－」113-120。
- 高橋 裕・安藤義久・盛谷明弘 (1985)：流域地表面の浸透能測定法の相互比較。水利科学，**29**(1)，35-44。
- 辻村真貴・恩田裕一 (1996)：浸透能と降下浸透の測定。恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編：「水文地形学」古今書院，24-33。
- (2004 年 6 月 30 日受付，2004 年 9 月 8 日受理)