

携帯型ミニディスクインフィルトロメータによる 現場透水係数の精度向上に関する検討

工学部 酒匂 一成

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響で集中豪雨が増加しており、それに伴う斜面崩壊が多発している。2019年における鹿児島県では6月下旬から7月上旬にかけて集中豪雨に見舞われ、県内各地で表層崩壊や破堤などの災害が生じた。このような災害に対して、防災関係者は崩壊発生後に崩壊原因などを検討する際に、斜面の地形や地質の調査に加え、土の基本的物理量や保水性、透水性、せん断強度特性を調査することが多い。その中で、透水係数については、原位置試験および室内試験によって求められるが、災害現場で試料採取が困難な場合もあるため、より簡易に原位置で透水係数を計測することができれば調査者にとって有益であると考えられる。

従来用いられてきた現場透水試験法は、計測に用いる装置が大きく、水を大量に使用するという問題がある。加えて、試験孔を用いる方法では、その孔を掘削する作業も必要になるため、災害現場での計測は極めて困難となる^{1), 2)}。

そこで、本研究では、携帯型ミニディスクインフィルトロメータ（METER社、以降、インフィルトロメータと称す。）を用いる。この方法は、地表面で試験を行う負圧浸入計の一種であり、従来の現場透水試験器に比べて持ち運びが容易で、準備がほとんど要らず計測を速やかに開始できるという利点がある。現場での計測に導入しやすいことから、地盤の疎水性、浸透、灌漑システム的设计、侵食の危険性の評価などの多くの研究で利用されてきている³⁾。しかし、計測結果（現場透水係数）の精度が良くわからない課題があることから、本研究では、安定した精度の現場透水係数を得るため、インフィルトロメータの圧力水頭の設定を考慮し、さらに計測地表面の含水状態に着目した室内試験を行う。その試験結果に基づき、バラツキが小さい計測手法を提案する。



写真-1 インフィルトロメータ

2. インフィルトロメータによる現場透水係数の算出方法

(1) インフィルトロメータの概要

写真-1にインフィルトロメータを示す。インフィルトロメータは、全長32.7cmと小型であり、1回の計測に使用する水量は135mLと従来の現場透水試験器と比較し少量である。装置は上下の2つのチャンバーと圧力水頭調整チューブ、多孔質ディスクで構成されている。上下のチャンバーはチャンバーバリアによって水が行き来しないようになっており、上部チャンバーには圧力水頭を負荷するための水が入り、下部チャンバーには地表面に浸潤させる水が入っている。写真-2のように圧力水頭調整チューブは昇降でき、 $-0.5 \sim -7.0$ [cmH₂O]の負の圧力水頭を負荷させながら計測を行うことができる。圧力水頭は、圧力水頭調整チューブに示される値を指す上部



写真-2 圧力水頭調整チューブ

（左は -6 [cmH₂O]、右は -1 [cmH₂O]に設定した時の状況）

チャンパー内の水面の位置で設定される。装置底部のディスクは多孔質になっており、地表面に置くことで下部チャンパーから水が地表面に浸潤していく。計測方法は、写真-1のように、ストップウォッチで時間を計りながら水を浸潤させ、下部チャンパーに記されている目盛りから浸潤量を読み取ることで時間当たりの浸潤量を計測する。計測で得たデータから、透水係数を推定する。

(2) 現場透水係数の算定方法

本研究では、Reynolds and Elrick が提案した手法⁴⁾を用いる。この方法は、土舗装の現場の浸透特性の計測などへの適用例(Sugii et al.⁵⁾)を実施している。Reynolds and Elrick らの方法は、Woodingの経験則⁶⁾に基づいたものである。Wooding は、浅い円形の溜池から浸潤する流量を理論的に計算し、ディスクから浸潤する流量を次式で表現した。

$$Q = \pi R^2 k_{wu}(h) + 4R\phi(h) \tag{1}$$

ここに、 Q : 定常流量 [cm³/s], $\phi(h)$: マトリックポテンシャル [cm²/s], $k_{wu}(h)$: 不飽和透水係数 [cm/s]。

Gardner⁷⁾は不飽和透水係数が飽和透水係数の指数関数で表現できると仮定しており、不飽和透水係数は次式で表現できると述べている。

$$k_{wu}(h) = k_{fs} \cdot \exp(ah) \tag{2}$$

ここに、 k_{fs} : 現場飽和透水係数 [cm/s], a : パラメータ係数。

また、マトリックポテンシャル $\phi(h)$ は次式で表現できる。

$$\phi(h) = \int k_{wu}(h) dh = \frac{k_{fs} \cdot \exp(ah)}{a} \tag{3}$$

式(3)を式(1)に代入すると次式が得られる。

$$\log_e \left(\frac{Q}{t} \right) = ah + \log_e \left\{ \left(\pi R^2 + \frac{4R}{a} \right) \cdot k_{fs} \right\} \tag{4}$$

ここで、式(4)は図-1のような直線を表す式であり、 $h=0$ のとき現場飽和透水係数 k_{fs} は次式で表現される。

$$k_{fs} = \frac{\exp \{ \log_e(Q/t) \}}{\pi R^2 + 4R/a} \tag{5}$$

式(5)において、未知数は定常流量 $\log_e(Q/t)$ とパラメータ係数 a であり、図-1に示すように $h - \log_e(Q/t)$ 関係から、直線の傾きと切片から得られる。この方法では、1個の現場飽和透水係数を得るために、インフィルトメータの圧力水頭値を変えた最低3回の計測が必要となる。ここで、現場飽和透水係数を推定するための手順を次に示す。図-2は1回の計測で得られる $Q-t$ 関係図である。図-2の直線部のように、計測開始後、経過時間当たりの浸潤量(流量)がおおよそ一定になり、定常状態と判断された際の流量を計測する。圧力水頭を変えた最低3回、同様の計測を行い、定常流量を図-1のようにプロットし、回帰直線を引く。その回帰直線の傾きと切片から a と $\log_e(Q/t)$ が得られ、現場飽和透水係数(以降、現場透水係数と称す)が得られる。

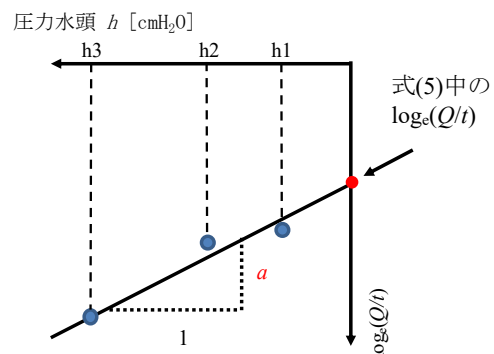


図-1 $h - \log_e(Q/t)$ 関係図

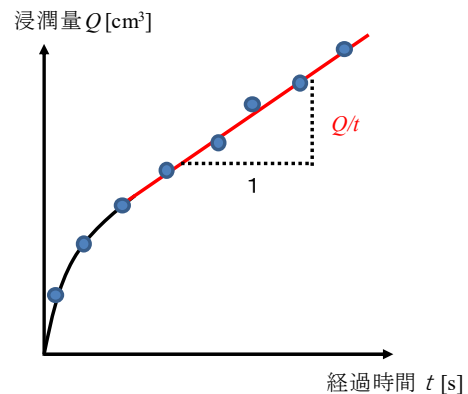


図-2 計測から得られる $Q-t$ 関係図

3. 設定圧力水頭および地表面の含水状態が試験結果に与える影響の考察と最適な試験手順の検討

本研究では、インフィルトロメータの圧力水頭の設定方法や地表面の含水状態が試験結果に与える影響について、室内試験を実施し、試験結果を考察することで、最適な試験手順について検討する。

(1) 室内試験の概要

本試験の試料として、鹿児島県鹿児島市郡山町で採取したシラスを用いる。供試体は、含水比 $w=12.8\%$ で、間隙比が $e=0.98$ となるように透水円筒に締め固めた。試験では、地表面の含水状態が計測結果に及ぼす影響を考慮するため、計測開始前の供試体の含水状態を 3 ケース設定する。供試体作製後に後述する方法で加水や乾燥を行い、各ケースの含水状態に調整する。ケース 1 (自然乾燥状態) は、日当たりと風通しの良い場所で自然乾燥をさせた状態とする。ケース 2 (湿潤状態) は、供試体下部からゆっくりと上部まで湿潤させた状態とする。ケース 3 (極度乾燥状態) は、供試体を炉乾燥機で 3 時間乾燥させた状態とする。また、インフィルトロメータの圧力水頭の設定についても検討するため、インフィルトロメータの圧力水頭を $-1, -2, -3, -4, -5, -6[\text{cmH}_2\text{O}]$ に設定して、順次、浸潤量の計測を行う。計測後は、各ケースの条件で、供試体の含水状態を再調整し、再度計測を繰り返す。各ケースにおいて、これを 7 セット繰り返し、1 つのケースにつき、42 個の計測結果を得た。1, 3, 5, 7 セット目は、圧力水頭 $-1[\text{cmH}_2\text{O}]$ から計測を始め、2, 4, 6 セット目は、圧力水頭 $-6[\text{cmH}_2\text{O}]$ から計測を始める。

(2) 設定圧力水頭の試験結果に与える影響

上述の試験条件により、各ケース 42 個のデータが得られる。これらのデータから圧力水頭が重複しない 3 つのデータを用い、式(5)より現場透水係数を算出すると、各ケース 6,860 個の透水係数が得られた。6,860 個の透水係数には、負の値や平均値から大きく外れた透水係数 (外れ値) が存在した。それらがどのような計測条件 (圧力水頭 3 種類) の組合せから算出されたかを考察する。負の値の透水係数については、圧力水頭 $-1, -2, -3[\text{cmH}_2\text{O}]$ 、 $-1, -2, -4[\text{cmH}_2\text{O}]$ の様な組合せが存在した。図-3 の実線のように直線の傾きが負で右下がりの回帰直線となる。ここで、外れ値の透水係数を $k_{fs} < \mu - 2\sigma$ 、 $k_{fs} > \mu + 2\sigma$ の範囲にある透水係数 k_{fs} とした (平均値 μ 、標準偏差 σ)。 $k_{fs} > \mu + 2\sigma$ の透水係数については全て $-1, -2, -3[\text{cmH}_2\text{O}]$ の様な組合せであった。 $k_{fs} < \mu - 2\sigma$ の透水係数については、およそ 8 割が $-1, -2, -3[\text{cmH}_2\text{O}]$ の様な組合せ算出された。外れ値の透水係数は図-3 の破線のように、 a 、 $\log_e(Q/t)$ が小さくなるため算出されたと考えられる。

このように圧力水頭の間隔が狭い設定の場合、負の値や外れ値が算出される可能性が高いと考えられる。一方、図-3 の一点破線のように圧力水頭の間隔を離すと平均値に近い透水係数が得られる可能性が高いと考えられる。

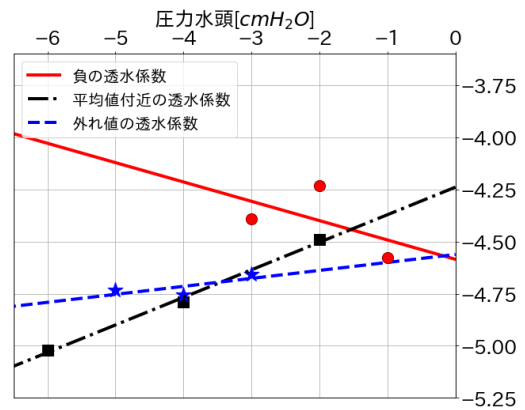
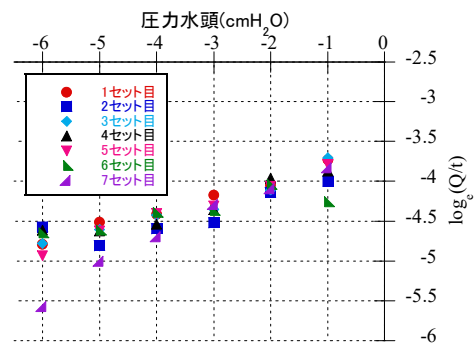
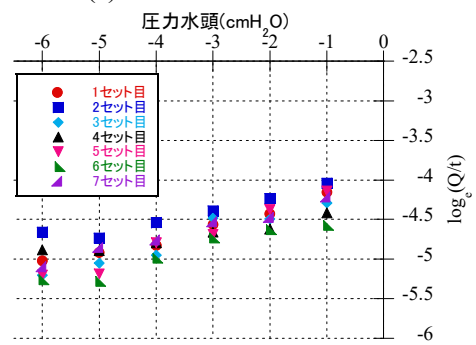


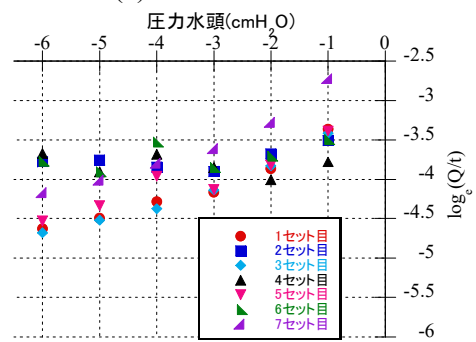
図-3 3種類の回帰直線



(a) ケース 1 (自然乾燥)



(b) ケース 2 (湿潤)



(c) ケース 3 (極度乾燥)

図-4 実験結果

(3) 地表面の含水状態が試験結果に与える影響

図-4に実験で得られた計測結果を示す。図-4(a), (c)から、計測前の地表面が乾燥している状態では、最初に計測を行う圧力水頭-1や-6[cmH₂O]の結果のバラツキが大きいことがわかる。そこで、各ケース42個のデータから圧力水頭が重複しない3つのデータを用い、式(5)より現場透水係数を算出された各ケース6,860個の現場透水係数を用いるにあたり、上述のデータの組合せによっては負の透水係数を示す場合を除いた結果を用いて、図-5に示すようなヒストグラムを作成した。図-5より、ケース3はケース1、ケース2に比べてばらつきが大きいことがわかる。ケース1とケース2では大差無いが、原位置で地表面の状態の再現しやすさを考慮すると、十分に地表面を湿潤させるケース2(湿潤状態)が良いと考えられる。

(4) 最適な試験手順に関する検討

設定圧力水頭や地表面の含水状態の影響を考慮した室内試験結果の考察に基づき、図-6に示すような試験手順を提案する。インフィルトロメータを設置する前に、地表面に水を十分に浸潤させる。この装置では、3つの圧力水頭で計測を行う必要があるが、最初に、圧力水頭を-1cmH₂Oと設定し、試験を行う。次の設定は、透水性が良い場合は-4、-6cmH₂Oとし、透水性が悪い場合は-3、-5cmH₂Oと設定して試験を行う。それらのデータを用いて2(2)で述べた方法で現場透水係数を算定する。

以上のような試験手順に則り、追加で試験を行ったところ、 $k_{fs}=4.76 \times 10^{-6}$ [m/s]であった。この値をケース2の透水係数(負の値は除く)から標本サイズ3で抽出して描いた標本平均分布にプロットすると、図-7に示すように、追加試験の透水係数が標本分布内に収まることわかった。

4. おわりに

本研究では、安定した精度の現場透水係数を得るため、インフィルトロメータの圧力水頭の設定を考慮し、さらに計測地表面の含水状態に着目した室内試験を行った。試験結果の考察から、バラツキが小さい結果を得るためには、計測前に十分に地表面を湿潤すること、インフィルトロメータの圧力水頭の設定間隔に注意が必要であることがわかった。また、その考察に基づき、最適な試験手順を提案した。提案手順に則した追加試験結果が、地表面を十分に湿潤させて試験を行ったケース2の試験の標本サイズ3の標本平均分布の範囲内に含まれることが確認された。今後、より多くの試験およびその他の土の種類の場合などでその妥当性を検討していきたい。

謝辞: 本研究で用いる試験試料を採取するにあたり、レモン通商株式会社の協力を得た。また、本試験を実施するにあたり、鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻 M1 の小川大輝君の協力を得た。ここに謝意を示す。

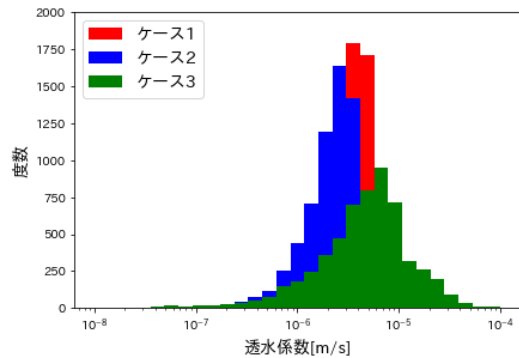


図-5 各ケースで得られた現場透水係数のヒストグラム

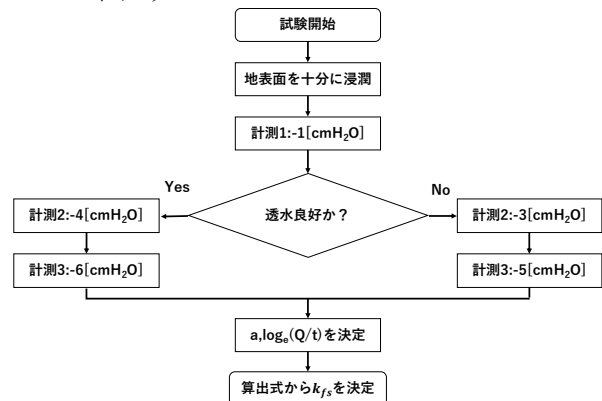


図-6 提案する試験手順

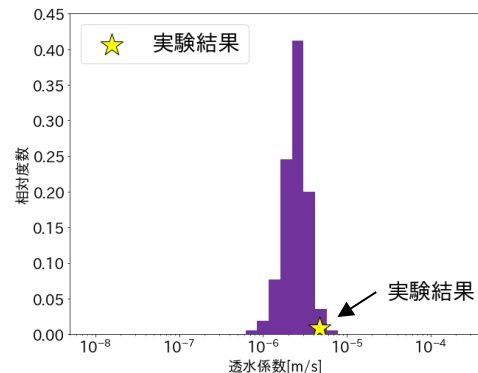


図-7 ケース2の標本平均分布

参考文献

- 1) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. : In Situ Measurement of Field-saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity, and the α -parameter Using the Guelph Permeameter, Soil Sci., Vol.140, pp.292~303, 1985.
- 2) Elrick, D.E. and Reynolds, W.D. : Infiltration from Constant-head Well Permeameters and Infiltrometers, Advanced in Measurement of Soil Physical Properties, SSSA Special Publication No.30, pp.1~24, 1992.
- 3) METER Group : Mini Disc Infiltrometer, <https://www.metergroup.com/environment/products/mini-disk-infiltrometer/>, (令和2年6月22日12時現在) .
- 4) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. : Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tensiometer Infiltrometer, Soil Sci. Soc. Am. J. Vol.55, pp.633-639, 1991.
- 5) T. Sugii, H. Yokawa and M. Ishii: Measurement of field-hydraulic soil properties using suction infiltrometer for soil-based pavement, Proc. of the 7th Asia-Pacific Conference of Unsaturated Soils (AP-UNSAT2019), pp.84-89, 2019.
- 6) Wooding, R.A. : Steady infiltration from a circular pond, Water Resour. Res. 4, pp.1259-1273, 1968.
- 7) Gardner, W.R. : Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table, Soil Sci. Vol.85, pp.228-232, 1958.