

ウェルパーミアメータ法を用いた砂地ほ場での透水係数の測定

森井俊広・松本 智*・森 敬幸*

(平成12年11月30日受付)

要約 砂地ほ場で、ゲルフ式ウェルパーミアメータ (GP) 法の適用性を調べた。当試験法は、1985年前後にカナダの Guelph 大学の研究グループによって開発されたもので、オーガーで掘削した半径数 cm 程度のウェル内に一定水位を保ち、そのときに生じる定常浸潤量を測定して、ほ場における飽和透水係数 K_{fs} を測定するものである。一連の試験より、測定装置のシンプルさ、測定の簡便さと迅速性といった原位置試験法としての優れた性能を確認できた。測定精度も、十分に実務的なものであった。深さ140cm まで実施した GP 法からえられた K_{fs} と、その後掘削したトレンチでの土層断面の観察結果および採取コア土の透水係数との対比を行った。GP 法は、試験条件と土質に応じた測定領域をもつため、層構造をもつほ場では、この測定領域に含まれる土層を平滑したような K_{fs} を算出すること、また砂地ほ場のように相対的に透水性の高い土壌では、主に鉛直方向の透水係数を測定することが分かった。

キーワード：原位置透水試験、ウェルパーミアメータ法、砂地ほ場、ほ場飽和透水係数

はじめに

ほ場の水管理や山腹斜面の降雨浸透予測、締固め土の品質管理、あるいは土壌中の汚染物質の移動予測などを行おうとするさい、土の透水性を原位置で測定することが重要となる。1985年前後に、カナダの Guelph 大学の研究グループによりウェルパーミアメータ (Well permeameter) 法が開発された^{1,2,3)}。この試験法は、土壌表面からオーガーによって掘削したウェル内に一定の水頭を与え、ある時間が経過した後に生じる土壌中への定常浸潤量より、原位置でのほ場飽和透水係数 (Field-saturated hydraulic conductivity) K_{fs} を測定しようとするものである。明確な浸潤理論に立ち、かつ試験装置がシンプルで、測定も迅速であるという、原位置透水試験法としてのすぐれた利点をもつとされている。

本報文では、ゲルフ式ウェルパーミアメータ法 (GP 法) の測定理論の特徴を紹介するとともに、砂地ほ場における原位置試験⁴⁾を通して、測定精度や実務性を調べる。ほ場での試験では、まず、GP 法とウェルの周辺から採取した土壌コアとの比較により、GP 法の測定精度を調べる。次いで、深さ140cm まで実施した GP 法と、土壌に掘削したトレンチから採取した土壌コアの透水係数の分布を比較し、GP 法が、特に、深さ方向の透水係数の測定にすぐれていることを明らかにする。

GP 法の概要

GP 法の試験装置の概要を図1に示す。マリOTT式の給水タンクとそれを支える三脚のみの構成で、非常にシンプルな構造である。土壌中にオーガーで内径 $2a$ のウェルを掘削したのち、排水口が孔底に接するようにして給水タンクを設置する。空気をストッパーにあてた状態で給水タンクを満水にしたのち、流出水によって孔壁が乱されないように空気を徐々に引き上げ、ウェル内の水位が所定の定水位 H になるようにする。こののち、給水タンクに付けた目盛りを一定の時間間隔で読み、給水タンク内の水位の低下割合、つまりウェルの H 以下の側壁と孔底から土壌へ入る浸潤量 Q を測定する。時間の経過とともに Q が一定になれば、これを定常浸潤量 Q_s とみなし試験を終了する。 K_{fs} は、これらの測定値から、次式により簡単に算出できる¹⁾。

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q_s}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + (2\pi H/\alpha^*)} \quad (1)$$

ここで、 α^* は土壌パラメータで、試験に先立ってあらかじめ仮定しておく必要がある。 C は形状係数である。

*新潟大学大学院自然科学研究科

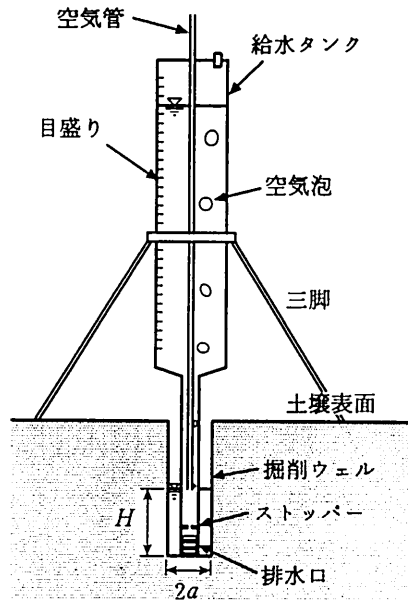


図1 ゲルフ式ウェルパーミアメータ (GP) の構造概要

表1 土壌分類に対応したパラメータ α^* の推奨値

土壌の分類	α^* , cm^{-1}
ライナーや海成堆積土等の構造をもたない締固められた粘土	0.01
ローム等の細粒構造の土	0.04
粘土からロームまでのたいていの構造性の土、中・細粒の砂、一般土	0.12
砂礫土、大きな空隙をもつ土	0.36

式(1)は、静水圧、重力、毛管力による浸潤成分を考慮した厳密な浸潤理論と数値実験によって提案された。土壌パラメータ α^* は、土の不飽和透水係数と負圧の関係を指数関数で表した場合のべき乗指数で、表1のように、土壌の種類に応じた値⁹⁾が推奨されている。Cは、地表面上にある点源からの浸潤に関する理論解を、ウェルからの円筒状の浸潤に拡張適用するため、数値実験により導入された無次元の係数である。図2に示すように、Cは、土壌の種類ごとに、ウェルのアスペクト比 H/a の関数⁹⁾となる。この関数の形状を特定する理論的背景はないが、たとえば、次のような $\sqrt{H/a}$ の4次式により適合度の高い記述式をえることができる。

$$C = b_0 + b_1 \cdot \sqrt{H/a} + b_2 \cdot (\sqrt{H/a})^2 + b_3 \cdot (\sqrt{H/a})^3 + b_4 \cdot (\sqrt{H/a})^4 \quad (2)$$

ここで b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 は土壌の種類に応じて表2のような値をとる。

砂地ほ場での原位置試験

1. GP法の実務性と測定精度

GP法の簡便性や迅速性といった実務性と測定精度を調べるため、新潟大学農学部の砂地ほ場において原位置透水試験を行い、 K_{fs} を測定した。試験終了後に、ウェル周辺を掘り下げ、ウェル内で設定した定水頭の中央箇所に対応する深さから、100cc定容積サンプラーを用いて鉛直方向に土壌コアを採取し、室内定水位透水試験

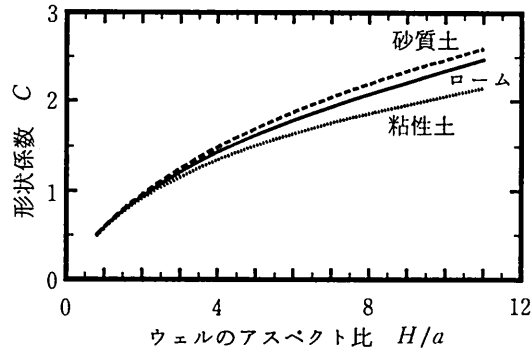


図2 形状係数 C とウェルのアスペクト比 H/a との関係

表2 形状係数 C の関数を与える回帰適合係数

土壌の種類	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
粘土	-0.0069	0.2124	0.5542	-0.2137	0.0260
ローム	-0.0039	0.1989	0.5760	-0.2100	0.0259
砂	-0.0055	0.2550	0.4735	-0.1447	0.0150

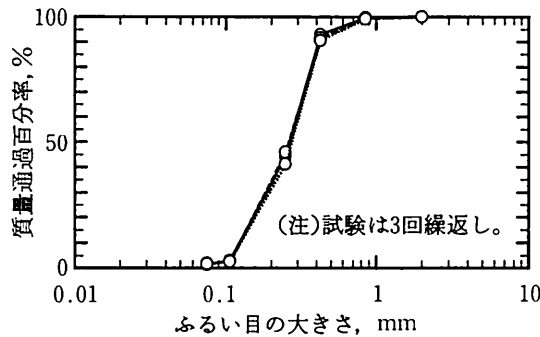


図3 代表的な試験箇所から採取した砂の粒度曲線

により透水係数 K_{core} を測定した。図3に、代表的な試験箇所から採取した土壌の粒度を示す。日本統一土質分類法によると、細粒分をほとんど含まない最大粒径1 mm程度のきれいな砂[S]に分類される。このため、式(1)の α^* として、表1より 0.12cm^{-1} を採用した。また C は、表2の砂質土系の係数を用いて、式(2)により計算した。ただし、すべての試験で、直径 $2a=6.0\text{cm}$ のウェルを用いた。GP法の試験後に採取した土壌コアは、アルミバット内でコア容器の高さの半分程度まで浸漬させて1日間放置したのち、 K_{core} を測定した。

図4に、 Q の時間変化の測定例を示す。同図の試験では、まず $H=7.5\text{cm}$ で一連の測定を終えたのち、ウェル内の水位を上げ、 $H=10.0\text{cm}$ として、再び測定を行っている。いずれにおいても、空気管を所定の H まで徐々に引き上げているため、浸潤開始直後の測定値はとっていない。これらの測定例からわかるように、試験の対象とした 10^{-3}cm/s オーダーの砂地土壌では、3分から5分といった早い段階で Q が一定値 Q_s に達しており、ごく短時間で試験を実施できることが確認できる。図5は、ウェルの深さ20cm、40cmおよび60cmの位置で測定した K_{fs} と、対応する深さから採取した土壌コアの K_{core} を比較したものである。同図の K_{fs} と K_{core} は、

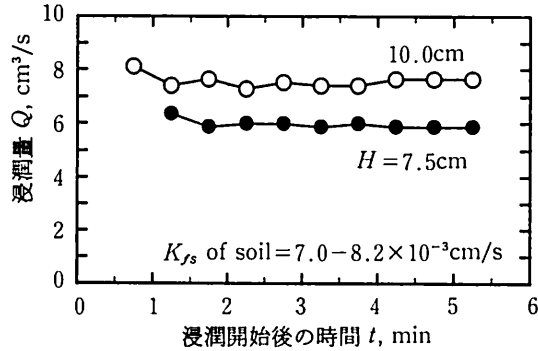


図4 浸潤量の時間変化の測定例

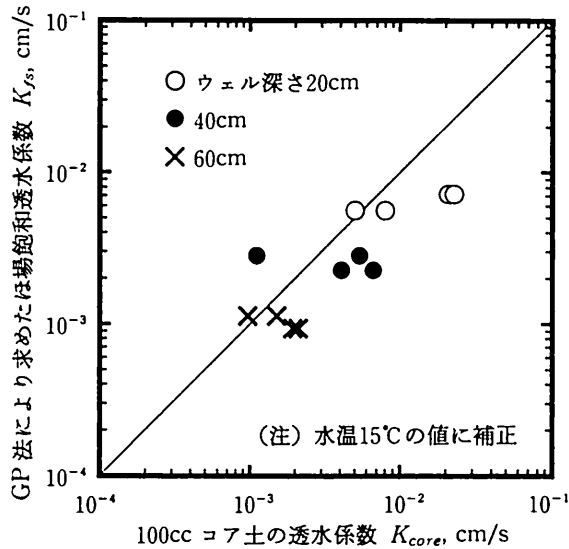


図5 GP法と土壌コア法で求めた飽和透水係数の比較

いずれも、水温15°Cの値に補正している。図5より、対応に多少のばらつきがあるものの、GP法によってえられる K_{fs} の精度は、おおむね、実務の上で大きな問題はないと考えられる。

2. 深さ方向の透水係数の測定

前節の試験に引きつづいて、ウェルを深さ20cm間隔で逐次掘り下げながら、深さ140cmまでGP法による試験を行い、深さ方向に K_{fs} を測定した。このうち、GP法の試験箇所を含む範囲で深さ160cm程度まで土壌をトレンチ状に掘削し、掘削断面の観察により土層構造を調べるとともに、各土層から鉛直方向と水平方向に土壌コアを採取し、それらの K_{core} を測定した。GP法の試験は約220cm離れた2箇所(GP-A点およびGP-B点)で行った。これらの試験位置とトレンチ形状を示すと、図6のようになる。 K_{fs} を計算するための α^* と C の値、ならびに土壌コアの室内透水試験の方法は、前節で説明したとおりである。

図7に、試験位置GP-B点で測定した K_{fs} と K_{core} の分布を比較する。 K_{fs} については、深さ方向の各測点で $H=5.5\text{cm}$ と 8.5cm の2回にわたって測定を行っている。 K_{fs} 、 K_{core} のいずれも水温15°Cに補正した値である。図7の右側に示す土層構造は、図6の中央部分の掘削断面で主に色調から観察したものである。地表面から深さ20cmまでは耕うん土層であり、深さ40cmから60cmにかけて厚さ5cm程度の砂層が互層をなしている。深

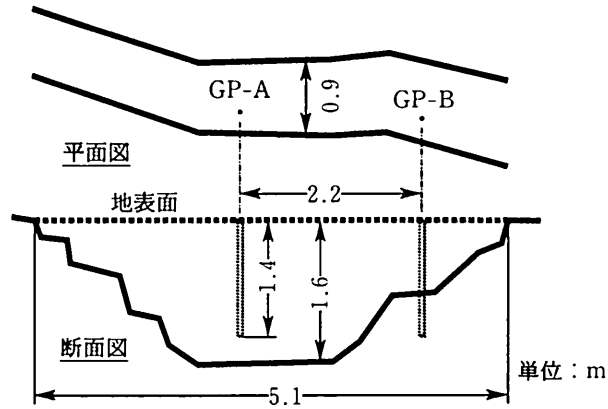


図6 深さ方向の透水係数を測定するために2箇所で実施したGP試験の位置とその後に掘削したトレンチの形状

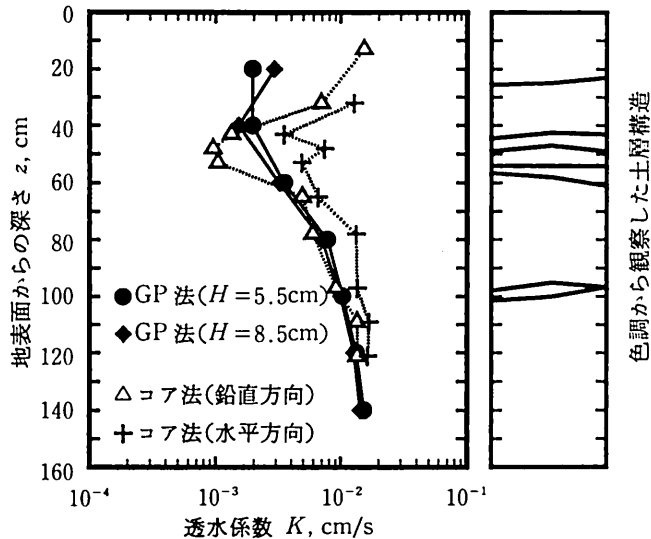


図7 GP法および土壌コア法により求めた透水係数の深さ方向の分布と土層断面（試験点GP-B）

さ100cmあたりに薄い非均質層が分布するものの、観察からは、深さ60cm以深はおおむね均一で上層に比べて相対的に粗粒の砂層となっている。図7より次のことがいえる。

a) 深さ60cm以深の均一な砂層では、GP法の K_{fs} と土壌コアの K_{core} はおおむね対応しており、前節で示したように、GP法の測定精度は実務的に十分なものであることが確認できる。

b) 各土層の中心点から土壌コアを採取しているため、 K_{core} は土壌の透水係数の分布を比較的忠実に反映していると考えられる。これを前提にすると、深さ60cm以浅にみられるような互層土壌では、GP法は、各層の透水性を平滑化したような測定結果を出していることがわかる。

c) 試験対象の土層は透水異方性をもつ。各土層で水平方向に採取した土壌コアの透水係数を鉛直方向のそれと比較すると、深さ20cmから60cmあたりの互層部分で2倍から8倍程度、60cm以深の均一な砂層で1.2~2倍程度となっている。このうち鉛直方向の土壌コアの透水係数が、GP法の K_{fs} と相対的に良好に対応

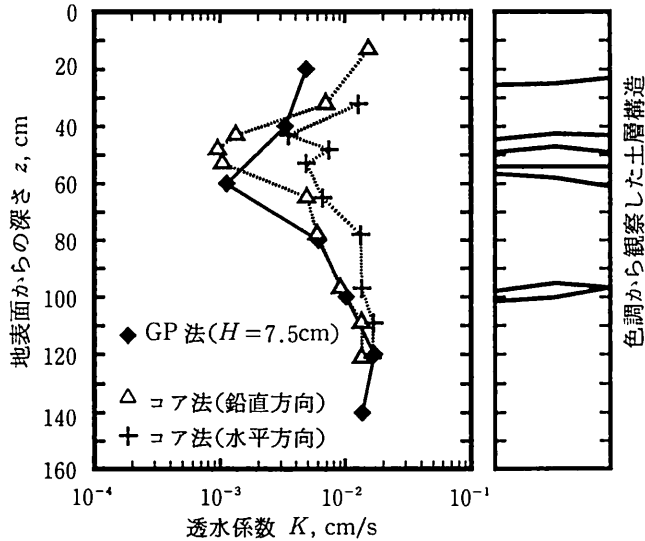


図8 GP法および土壌コア法により求めた透水係数の深さ方向の分布と土層断面(試験点GP-A)

していることより、透水係数が 10^{-3} cm/sオーダーの砂地土壌では、GP法はおもに鉛直方向の透水係数を測定していると考えられる。

図8は、もう一つの測定点GP-Aにおける試験結果を、図7と同じ書式でまとめたものである。このうち、土壌コアのデータは図7と同じものである。GP法では、 H を不規則にとったため、共通して比較できる $H=7.5$ cmのみの結果を示している。図7とほとんど同じ特徴を、図8の K_{fs} および K_{core} の分布特性、ならびに両者の対応関係にみる事ができる。

まとめ

簡便で迅速な土の原位置透水試験法に関する研究の一環として、GP法の適用性を調べた。砂地は場での一連の試験結果より、測定装置のシンプルさ、測定の簡便さと迅速性といったGP法の原位置試験法としての優れた性能を確認できた。測定精度についても、十分に実務的なものであることを明らかにした。前章第2節のb)で述べた土壌深部までの試験結果から、GP法には、設定したウェル内の定水位や土壌特性などに応じてある広がりをもつ測定領域があり、この領域に複数の土層が含まれる場合、GP法はそれらの土層の平均化した透水係数を出すことが明らかとなった。さらに同じくc)からは、この測定領域に応じて卓越する浸潤流れがあることも示唆された。これらは、GP法を実務で用いていく場合に重要となる特徴であり、今後、さらには場での原位置試験結果を蓄積していくとともに、室内での土槽実験や数値実験⁹⁾を用いることによって、これらの詳細な特徴を調べていく予定である。

著者らの一人は、これまで、簡便で迅速な原位置透水試験法として、プレッシャーインフィルトメータ(PI)法の適用性を調べてきた^{7,8,9,10)}。PI法は、GP法とほぼ同じ測定理論に依拠したもので、土壌表面にわずかに挿入した単一のリング内から定水頭浸潤を生じさせ、ある時間が経過して一定に落ち着いたときの定常浸潤量からは場飽和透水係数を測定するシステムとなっている。PI法が土壌の比較的浅い部分を対象とするのに対し、GP法ではウェルを掘り下げていくことにより、かなり深い部分まで透水係数を効率的に測定することができる。したがって、PI法はは場や地盤の平面的な透水性の分布を、GP法では深さ方向の分布を探るのに適しているといえる。GP法、PI法のいずれも装置のシンプルさや測定の簡便さ、迅速性ですぐれていることから、これらをうまく組み合わせることによって、広域なは場や地盤の透水性の評価、効率的なかんがい計画の立案、農薬汚染や土壌汚染の分析に必要となる透水性の統計的分布の把握、あるいは工学分野での締固め土の施工品

質管理などを合理的に進めていくことが可能になると期待される。

本研究は、文部省科学研究費補助金による補助を受けた(基盤研究(B)、課題番号12556036)。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1. REYNOLDS, W. D., E. ELRICK and G. C. TOPP. 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, 136 (4): 250-268.
2. REYNOLDS, W. D., E. ELRICK and B. E. CLOTHIER. 1985. The constant head well permeameter of unsaturated flow. *Soil Science*, 139 (2): 172-180.
3. REYNOLDS, W. D. and E. ELRICK. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140 (4): 292-303.
4. 森井俊広・松本 智・森 敬幸. 2000. ウェルパーミアメータ法を用いた土の透水性の原位置測定. 農業土木学会京都支部第57回研究発表会講演要旨集: 74-75.
5. REYNOLDS, W. D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: Field measurement. Pp. 599-613 in Carter, M. R. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers.
6. MORII, T. 1999. Prediction of water movement in soil by finite element method. *Bulletin of the Faculty of Agriculture, Niigata University*, 52 (1): 41-54.
7. 森井俊広・井上光弘・竹下祐二. 1999. プレッシュャーインフィルトロメータ法を用いた土の原位置透水試験法. 農業土木学会誌, 204: 149-158.
8. 森井俊広・井上光弘・竹下祐二. 2000. プレッシュャーインフィルトロメータ法の測定理論に関する実験および数値計算による検討. 農業土木学会誌, 206: 19-27.
9. 森井俊広・井上光弘・竹下祐二. 2000. プレッシュャーインフィルトロメータ法を用いた原位置透水試験の測定精度. 農業土木学会誌, 207: 29-37.
10. 森井俊広・秋田由紀・佐藤みわ. 2000. 土の飽和透水係数の原位置測定. 新潟大学農学部研究報告, 53 (1): 47-54.

Measurement of Hydraulic Conductivity of Soil in Sand Field by Using the Well Permeameter

Toshihiro MORII, Satoshi MATSUMOTO* and Takayuki MORII*

(Received November 30, 2000)

Summary

An applicability of the Guelph well permeameter (GP) method was examined by in-situ tests in sand field. The GP method, which was developed by the researchers of Guelph University, Canada, around 1985, is an in-situ permeability test to determine a field-saturated hydraulic conductivity of soil, K_{fs} , by measuring steady-state infiltration rate from a bored well into the soil to maintain constant head of water within the well. The in-situ tests in the sand field showed that an apparatus of the GP method as well as a procedure to measure the steady-state infiltration rate is quite simple. Accuracy of K_{fs} was successfully evaluated by comparing with saturated hydraulic conductivity of soil cores sampled from the test sites without disturbance. K_{fs} along the vertical line from the soil surface to 140cm in depth were measured by the GP method and plotted together with the soil profile along the vertical section of a trench in the soil. Comparison between K_{fs} along the soil profile and the saturated hydraulic conductivity of the soil cores sampled from the soil layers revealed that, in the case of layered soil, the GP method provides a weighted average value of K_{fs} of layered soils included within some region around the well. It was also shown that the vertical component of hydraulic conductivity is preferably measured by the GP method in sand soil.

key words: In-situ permeability test, Well permeameter method, Sand field, Field-saturated hydraulic conductivity of soil.

*Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Japan