

土の飽和透水係数の原位置測定

森井俊広・秋田由紀*・佐藤みわ**

(平成12年6月6日受付)

要約 土中の水の動きを正確に予測する上で、原位置で測定される現場飽和透水係数 K_{fs} が重要な役割をになう。本研究では、土の K_{fs} を測定するために開発されたプレッシャーインフィルトローメータ法の実験的な適用性を、ほ場および室内試験、ならびに数値計算により調べる。主として砂を対象とする。プレッシャーインフィルトローメータ法の理論的な特徴を、ほ場透水試験と数値計算により検討したのち、これが非常に優れた実務的な原位置透水試験法になりうることを示した。一連の検討を通して、次のことを明らかにした。試験結果にもとづいて土の K_{fs} を計算する際、土の不飽和透水係数を記述するパラメータ α^* の値として、これまで提案されている値より小さめの 0.06 cm^{-1} 程度を用いた方がよい。また、リングの半径と深さ、それに土の表面に作用させる定水頭の大きさを適切に組み合わせるにより、プレッシャーインフィルトローメータ法で測定できる土領域の深さを任意にコントロールできる可能性がある。

キーワード：原位置透水試験、プレッシャーインフィルトローメータ法、ほ場試験、FEM 数値計算

はじめに

土の透水性を原位置で測定することが、土中の水分移動と、場合によっては、物質移動を予測するうえで非常に重要となる。1990年代初期、ソイルサイエンスの分野で、カナダ Guelph 大学の研究グループによりプレッシャーインフィルトローメータ (Pressure infiltromete) 法が開発された^{1),2),3)}。この試験法は、地表面にわずかに挿入した単一のリング内に一定の水頭を与え、ある時間が経過した後生じる定常浸潤量より、原位置での現場飽和透水係数 (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。おおよそ 10^{-2} から 10^{-7} cm/s の範囲の K_{fs} を測定できるとされている。

本論文では、プレッシャーインフィルトローメータ法の理論背景の特徴を紹介するとともに、砂地盤における原位置試験と数値実験を通して、試験法の実務性を調べる。

試験法の特徴

1. 試験法の概要

プレッシャーインフィルトローメータ法で用いる装置は、図1のように、鋼製の単一リングにマリオット式の給水タンクを連結した構造となっている。半径 a のリングを地盤表面から深さ d に挿入したのち、一定の圧力水頭 H のもとでリング内から地盤へ浸潤させ、時間が経過して定常状態に達したときの浸潤量 Q_s を測定する。このとき、 K_{fs} は次式により算出できる。

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

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (1b)$$

ここで、 G は形状係数で、地表面の点湧源からの定常浸潤に対する厳密な理論解を、リング内からの面状浸潤へ拡張するため、数値実験¹⁾により求められた。プレッシャーインフィルトローメータ法の特徴の一つは、この G の導入にある。数値実験では $a=5\sim 10 \text{ cm}$ 、 $d=3\sim 5 \text{ cm}$ 、 $d/a=0.3\sim 1.0$ 、 $H=5\sim 25 \text{ cm}$ が条件となっているが、

*北海道開発局網走開発建設部

**新潟県農地部上越農地事務所

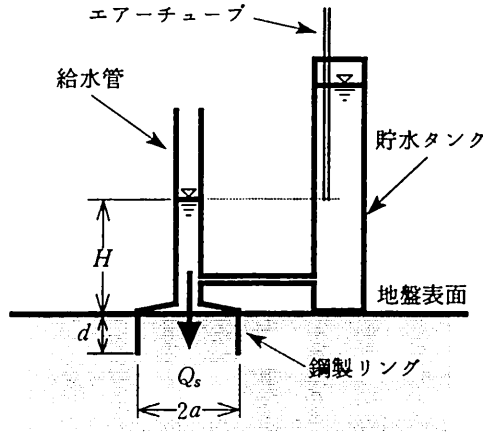


図1 プレッシュャーインフィルトロメータ法の試験装置の構造概要

表1 α^* の影響を調べるための数値実験に用いた公表土

Soils	K_{fs} , cm/s	α^* , cm^{-1}		
		Case 1	Case 2	Case 3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Fine sand	9.72×10^{-3}	0.12	0.12	0.0474
Sandy loam	2.0×10^{-3}	0.12	0.04	0.0648
Silt loam	1.28×10^{-3}	0.12	0.04	0.0216
Clay loam	1.0×10^{-3}	0.12	0.04	0.0175

G は d/a のみに依存するため、基本的には a または b そのものに制約を受けないと考えられる。

2. α^* の影響

式(1)の α^* は、土の不飽和透水係数 K とサクション h の関係を指数関数で表したときのパラメータである。プレッシュャーインフィルトロメータ法の二つめの特徴がこの指数関係の仮定であり、浸潤流れにしろ毛管力の寄与をシンプルな形で表現することにより、 K_{fs} の算出式が簡略化された。しかし、 α^* は、土壌の観察などにより試験に先立ってあらかじめ仮定しておく必要がある³⁾ため、この値が適切に仮定されていないと、 K_{fs} の測定に不要な誤差をもたらすことがある。この誤差の程度を調べるため、表1に示す公表データを用いて、定水頭浸潤を模擬した数値実験をおこなう^{4),7)}。表1の第2列目は土の飽和透水係数 K_{fs} 、第3列目は第一近似的な α^* の推奨値 (Case 1)、第4列目は土の種類に応じた推奨値 (Case 2) である (Case 1とCase 2の推奨値はいずれも文献2および3による)。一般に、土の $K-h$ 関係が完全な指数関係で表されることは少ない。 α^* は、理論的に、

$$\alpha^* = \frac{K_{fs}}{\int_{-\infty}^0 K(h) dh} \quad (2)$$

のように定義されるから、このような場合には、式(2)にもとづいて積分的に等価な α^* 値 (Case 3) を用いればよい⁴⁾。これを表1の第5列目に示す。図2には、一例として、Clay loamの $K-h$ 関係と、Cases 1-3の α^* を用いて描いた $K-h$ 関係を比較している。同図から、 α^* の値により、それから想定される不飽和透水特性がかなり違ってくるのがわかる。数値実験の対象とする地盤は、次章の第1節で説明する砂地は場での原位置試験

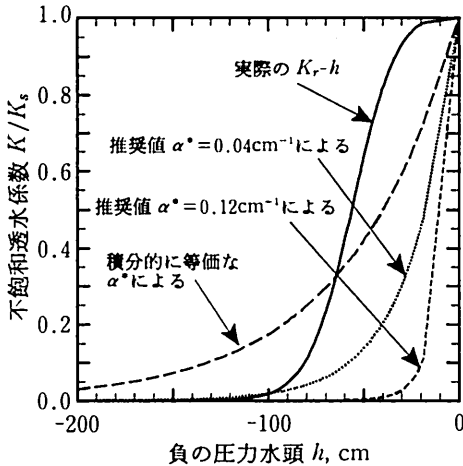


図2 α^* にもなる不飽和透水特性の違い (表1のClay loamの例)

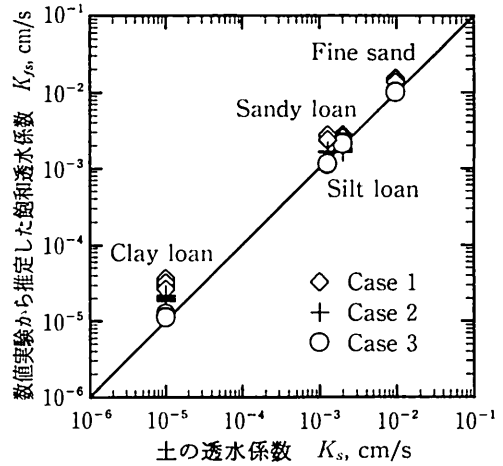


図3 α^* の影響を調べるための公表土を用いた数値実験

をもとに、深さ60cm、半径40cmの軸対称領域とした。数値計算には、Richradsのポテンシャル方程式を有限要素法で定式化した飽和不飽和流解析プログラム SUSFEM⁹⁾を用いる。実験には、現実的な範囲で、 $a=5\sim 7.5$ cm、 $d=3\sim 5$ cmのサイズをもつ3種類のリングと、 $H=10, 20$ cmを想定した。

図3は、数値実験の結果にもとづき、 K_{fs} を K_s に対比させたものである。 K_s は数値実験の入力値として用いた値で、ここでは真の透水係数に相当する。 K_{fs} は、数値実験でえられた Q_s を式(1)に代入して算出した。同図より、仮定した α^* の値により、 K_{fs} が1.2~3.5倍 (Case 1)、あるいは1.2~2倍 (case 2) 程度大きめに見積もられてしまうケースがあることがわかる。この誤差を大きくするか小さくするかは、試験の目的や経費などの観点から判断しなければならない。一般には、ベターな測定精度を確保するために、少なくとも土の種類に応じた α^* を用いるか、あるいは、締め固め土管理などでは、一度だけ詳細な土の不飽和水分特性に関する試験を行い、その土にふさわしい α^* を明らかにしておくなどの手段をとるのが实际的であるといえる。

プレッシャーインフィルトローメータ法の実務性

1. 測定理論の検証

プレッシャーインフィルトローメータ法の基礎式は、一定水頭条件下でリング内から土壤中へ向かう三次元的な浸潤挙動の理論にもとづいて誘導されている。したがって、測定される Q_s とそれによって算出される K_{fs} は、土壌中の浸潤挙動と物理的に整合性をもったものでなければならない。ここでは、 K_{fs} を用いた数値解析の結果を、プレッシャーインフィルトローメータ試験中に計測した土壌内の水分挙動と比較することにより、測定理論の妥当性を検証する⁹⁾。

試験は、細粒分をほとんど含まない最大粒径2mm程度の砂からなる砂地間場で実施した。 $a=5.5$ cmのリングを、土壌に $d=3.0$ cmまで挿入したのち、一定水頭 $H=9.7$ cmのもとで10分間にわたって浸潤量を測定した。定水頭浸潤中の土壌内の圧力水頭は、小型テンシオメータと埋設型土壌感圧水分センサーによって、水分量は、英国 Delta-T Devices 社製のシートプローブによって測定した。図4に計測センサーの埋設位置を示す。数値計算には、前節で紹介した SUSFEM を用いた。計算領域は、別途に実施したプレッシャーインフィルトローメータ試験サイトで掘り出した水分球根の観察にもとづいて、深さ60cm、半径40cmの軸対称領域とした。

図5に、土壌内の水分挙動の計測値と SUSFEM による数値計算結果を比較する。数値計算による再現性は非常に良好で、式(1)で代表されるプレッシャーインフィルトローメータ法の測定理論は、十分に妥当なものであることが確認できる。プレッシャーインフィルトローメータ法からえられた K_{fs} は 2.74×10^{-2} cm/sであった。この程度の大きさの透水性をもつ砂では、図5 (a)からわかるように、定常浸潤状態に達するまでの時間はおおむね

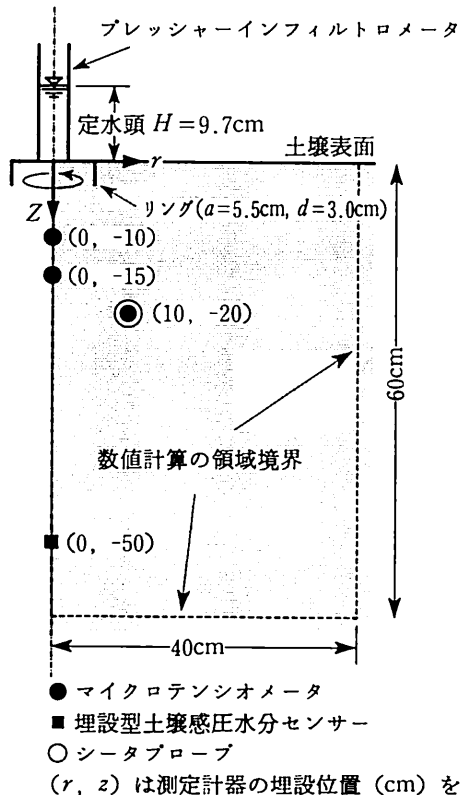


図4 プレッシャーインフィルトメータ法を用いた場透水試験中の土壌内の水分挙動の計測

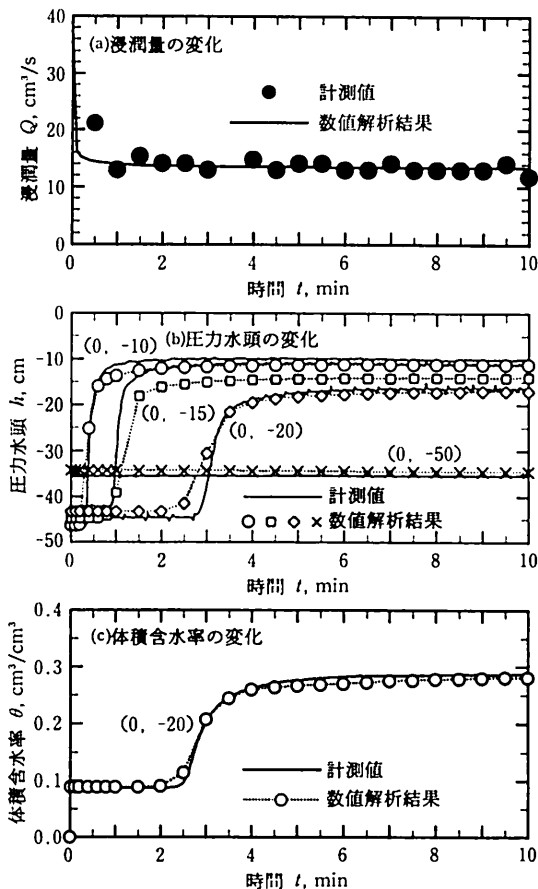


図5 プレッシャーインフィルトメータ試験中の地盤内の水分挙動の計測値と数値計算値との比較。括弧内の数値は給水管中心軸からの半径、深さ位置 (cm) を表す。

5分間程度と非常に短く、試験法のもつ測定迅速性を確認することができる。なお、式(1)による K_{fs} の算出にあたっては、既往の公表データ⁹⁾にもとづいて、 $\alpha^* = 0.068\text{cm}^{-1}$ を用いた。

2. 測定精度の検証

前節と同じように、砂を対象に142地点(乾燥密度 $1.3\sim 1.6\text{g}/\text{cm}^3$)でプレッシャーインフィルトメータ法を用いた原位置透水試験をおこない、 K_{fs} を測定した⁹⁾。図6に、代表的な試験地点から採取した砂の粒度特性を示す。いずれの砂も、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2mm程度のきれいな砂[S]に分類される。 α^* には 0.06cm^{-1} を用いた。試験終了後に100cc定容積サンプラーにより土壌コアを採取し、これを半日から1日間、水に浸したのち、室内定水位透水試験により透水係数 K_{core} を測定した。図7に K_{core} と K_{fs} を比較する。いずれも水温 15°C に換算した値である。慣行法として実績のある K_{core} を基準にすると、平均でみて、おおむね1.2~1.3倍ほど大きくなる程度で、実務的に十分な測定精度をもつと判断できる。

3. 測定深さ

プレッシャーインフィルトメータ法で測定の対象となる土壌深さを、SUSFEMを用いた数値実験により調べる⁷⁾。図8(a)に示すように、深さ ζ の位置に、上層土に比べ透水性が1オーダー低い下層土が水平に分布する砂地盤を仮定する。地盤の大きさは、第1節と同じく、深さ60cm、半径40cmの軸対称領域とする。 $\zeta=60$

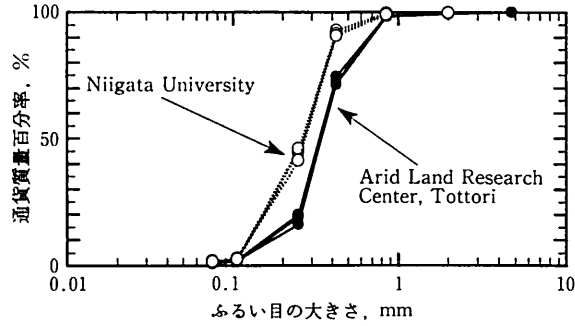


図6 砂の粒度特性

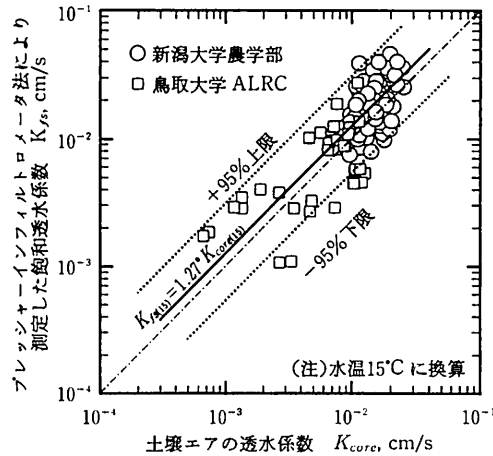


図7 プレッシャーインフィルトローメータ法と土壌コアから求めた透水係数の比較。いずれも水温15°Cに換算。

cmの均一地盤から次第に ζ を小さくしていくと、ある ζ の位置で Q_s 、したがって式(1)から推定される K_{fs} が、下層土の影響を受けて、それまでと異なった値を示すようになる。このときの ζ を、プレッシャーインフィルトローメータ法の測定深さと考える。 a 、 d 、 H は現実的な範囲で設定した。図8(b)と(c)に、数値実験からえられた K_{fs} の ζ ともなう変化をまとめる。ここで対象とする砂地盤では、測定深さはおよそ15~25cm、平均では20cm程度であることがわかる。この議論をさらにおし進めると、リングと定水頭の大きさを適切に組み合わせることにより、測定の対象深さを任意に設定することが可能となる。これはプレッシャーインフィルトローメータ法のもつ、原位置試験法としてのすぐれた特徴の一つにあげることができる。

図9は、図8の代表的なケースについて、定水頭浸潤中に水分で飽和された領域、いわゆる飽和水分球根の時間変化を示したものである。図9(a)は均質土壌、図9(b)は、1オーダー低い透水係数をもつ下層土壌が地表面から深さ10cmに分布するは場での、浸潤開始後1、10、20および30分の飽和水分球根を示したものである。これらの図からわかるように、透水性の低い土壌が下層に分布すると、地表面から下方に向かう水の流れが阻害され、均質土壌で本来生じる水分球根より大きな飽和領域が形成されることになる。飽和領域が拡大すると動水こう配は下がり、たとえば図9(b)の状況では、浸潤量が減少し、その結果、式(1)から算出される K_{fs} も低めになり、試験値としての信頼性が低下することになる。図9(a)からは、さらに、浸潤が始まりある時間が経過したのちは、飽和水分球根は一定の大きさに取れんし、それ以降、拡大も収縮もしなくなるのがわかる。この大きさは地表面にかかる定水頭によって決まると考えられる。一方、飽和水分球根周辺の不飽和領域では、浸潤前線が時間とともに拡大し、それともなって水分分布も大きく変わっていく。図9(a)の細線は、飽和

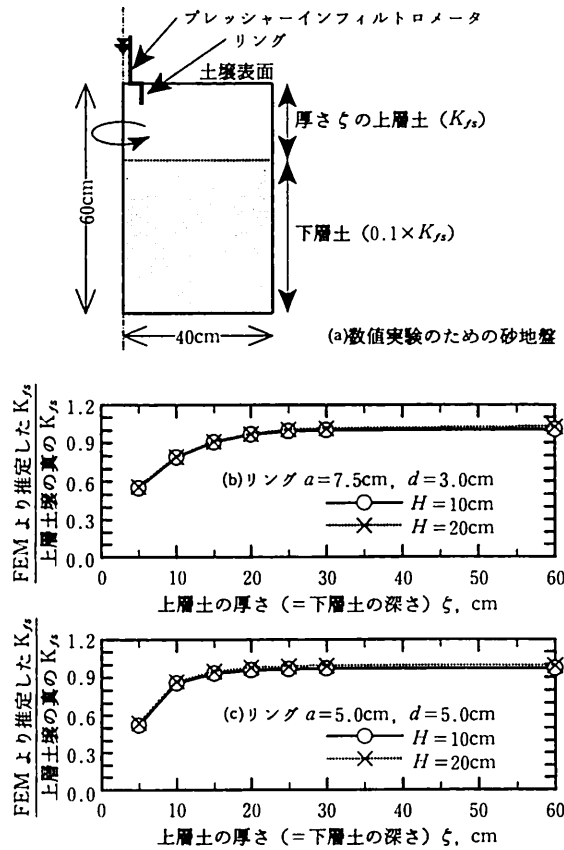


図8 砂地盤場におけるプレッシャーインフィルトローメータ法の測定深さを調べるための数値実験結果

80%に相当する圧力水頭 $h=-16\text{cm}$ の等水頭線について、その時間変化を示したものである。飽和水分球根と違って、時間とともに、水分が相対的に広い範囲にわたって急速に広がっていく様子を見ることが出来る。水の動きは、均質な土壌の場合、鉛直下方向に卓越するが、下層に透水性の低い土壌が分布すると、それとの境界に沿って横方向に広がっていく傾向にあるのがわかる。

まとめ

土壌や地盤の複雑さと各試験法がもつ理論的、実務的な制約などにより、単一の標準的な原位置透水試験法を確立することは非常に難しい。そのかわりに、各試験法を組み合わせた互いに補足し合う方法が必要になる。ここで議論したプレッシャーインフィルトローメータ法は、このような組み合わせの基本的な核になりうるのではないかと考える。砂地盤に限定してではあるが、十分に実務的な測定精度をもつことを確認するとともに、測定の対象となる地盤の深さがおよそ20cm程度になることを示した。

プレッシャーインフィルトローメータ法は、効率的なかんがい計画を目的とする農用地での原位置透水試験のほかに、農薬汚染や土壌汚染の分析に必要な現地の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にも適用できると考えられる。特に、盛土構築物での原位置透水試験法は、たとえばE19法のように透水係数を算出するための理論背景と実際との間にずれがあることや、締固めにもなる構造異方性あるいは深さ方向の密度こう配に起因する透水異方性などにかかわる問題をもっており、現実的な試験法の開発が指向されている⁶⁾。プレッシャーインフィルトローメータ法は、以上にみたように、原位置透水試

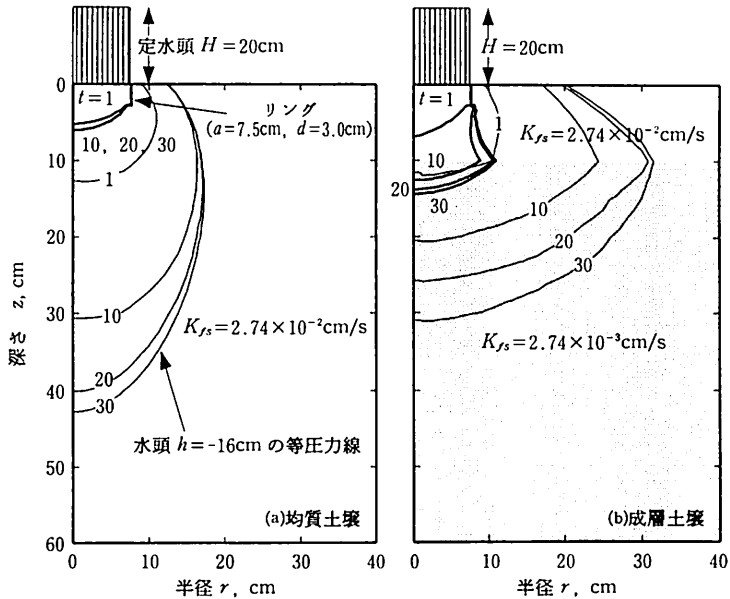


図9 プレッシャーインフィルトメータ法の測定深さを調べるための数値計算からえられた、定水頭浸潤中における土壌中の飽和水分球根（太い線）と等圧力水頭線（細い線）。図中の t は浸潤開始後の時間（分）を表す。

験法としてのすぐれた利点を多く備えており、今後、このような締め固め地盤への積極的な適用がのぞまれる。このためには、装置サイズによる測定深さのコントロール方法、ならびに透水異方性の評価方法を検討していくことが必要であり、これらを今後の継続的な研究課題としたい。

参考文献

1. REYNOLDS, W.D. and D.E. ELRICK. 1990. Ponded infiltration from a single ring: I Analysis of steady flow, *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1233-1241.
2. ELRICK, D.E. and W.D. REYNOLDS. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. pp.1-24 in TOPP, G.C., W.D. REYNOLDS, and R.E. GREEN (eds.) *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, SSSA Special Publication, 30, Soil Science Society of America, Madison, WI.
3. 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.
4. 森井俊広・秋田由紀・井上光弘・竹下裕二. 1999. プレッシャーインフィルトメータ法による砂地ほ場の透水性の測定. 平成11年度農業土木学会大会講演会講演要旨集: 740-741.
5. 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.
6. 森井俊広・井上光弘・竹下裕二. 1999. プレッシャーインフィルトメータ法を用いた土の原位置透水試験. 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, III: 582-583.
7. 森井俊広・井上光弘・竹下裕二. 2000. プレッシャーインフィルトメータ法を用いた土の透水性の原位置測定. 第35回地盤工学研究発表会発表講演集.

In-situ Measurement of Field-saturated Hydraulic Conductivity of Soil

Toshihiro MORII, Yuki AKITA* and Miwa SATO**

(Received June 6, 2000)

Summary

In situ measurements of field-saturated hydraulic conductivity, K_{fs} , are essential for accurate prediction of water movement in soil. In this study, the practical applicability of the pressure infiltrometer method which has been developed to measure K_{fs} of soil is examined using field and laboratory tests and numerical calculations. Sand was selected for the study. Theoretical features of the pressure infiltrometer method are explained by the field permeability tests and the numerical calculations. It is shown that the pressure infiltrometer method can be an excellent practical in situ permeability test. It is suggested that about 0.06cm^{-1} or some smaller value of α^* may be more appropriate for sand and loam in calculating K_{fs} of soil. It is also found that the depth of the soil region whose permeability is measured by the pressure infiltrometer method is changeable by selecting a suitable combination of the radius and insertion depth of the ring as well as the constant head imposed on the soil surface within the ring.

Key words: In-situ permeability test, Pressure infiltrometer method, Field test, FEM numerical calculation

*Abashiri Administration Office, Hokkaido Development Bureau, Hokkaido, Japan

**Jouetu Administration Office, Department of Agricultural Lands, Niigata Prefecture, Niigata, Japan