

原位置浸潤試験法を用いた土砂堆積地盤の透水性の評価

Evaluating Permeability of Sand Sediment by Using In-situ Infiltration Test

森井俊広 (もりい としひろ)
新潟大学 農学部

竹下祐二 (たけした ゆうじ)
岡山大学 環境理工学部

志賀剛 (しが つよし)
大成基礎設計㈱ 名古屋支社

1. はじめに

地盤や山腹斜面の降雨浸透の予測、締固め土の品質管理あるいはほ場での用水管理などにおいて、土の透水性を原位置で測定することが重要となる。1990年前後に、ソイルサイエンスの分野で、ゲルフ式プレッシャーインフィルトロメーター (Guelph Pressure Infiltrometer: GPI) 法が開発された^{1),2)}。GPI法は、地盤表面から定水頭状態で土中に浸潤させ、その浸潤量を測定することにより、現場飽和透水係数 (Field-saturated hydraulic conductivity of soil) K_{fs} を測定する。 K_{fs} は、空気泡を含んだ状態での現地地盤の透水性を表すもので、実際の地盤の透水や降雨浸透挙動などを予測する上で現実に即した情報を提供する。さらに、GPI法は測定が簡便、迅速であるという、原位置試験法としてのすぐれた特徴を持つとされている。

本報告では、これまで主としてソイルサイエンス分野で用いられてきたGPI法を地盤工学分野へ普及展開していくことを目的に、土砂堆積地盤での現地試験を通して、その適用性を紹介する。特に、短期間で比較的多数のデータが取れることから、これらに基づいて地盤の透水性を統計的に評価できることを示し、原位置試験法としての利点を強調した。試験サイトは、大規模な斜面崩壊土が流下し、峡谷河川に堆積した土砂堆積地盤である。地盤には直径30 cmから70 cm程度の大きな礫が散在し、その間にマトリックス部として小礫混じりの砂が分布する。

2. GPI法と現地試験の概要

2.1 GPI法の概要

GPI法は、カナダのGuelph (ゲルフ) 大学の研究グループにより開発された^{1),2)}。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には生じる定常浸潤量より、原位置で 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、測定も簡便、迅速に行うことができる³⁾。

GPI法の試験装置は非常にシンプルで、図-1に示すように、鋼製の単一リングにマリオット式の給水タンクをビニールホースなどで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。

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

$$G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad \dots\dots\dots (2)$$

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の浸潤挙動へ拡張するために導入された一種の補正係数である。式(2)の G は、 $K_{fs} = 10^{-2} \sim 10^{-7}$ cm/s、 $a = 5 \sim 10$ cm、 $d = 3 \sim 5$ cmを条件とした数値実験により求められた¹⁾。一方、式(1)中の α^* は、土の不飽和透水係数とサクシヨンの関係を指数関数で仮定したときのべき乗指数である。これにより、浸潤流れにせめる毛管力の影響をシンプルな形で表現することができ、 K_{fs} の算出式が簡略化された。 α^* は、土質観察などにより試験に先立ってあらかじめ定めておく必要がある。土の組織・構造分類に基づいた α^* の推奨値²⁾は、表-1に示すとおりである。

図-1の給水タンクの大きさは、地盤への浸潤流量、したがって土の透水性に応じて任意に変えることができる。またそれが小型になれば、この給水タンクを直接、給水管と連結させて一体化することもできる。

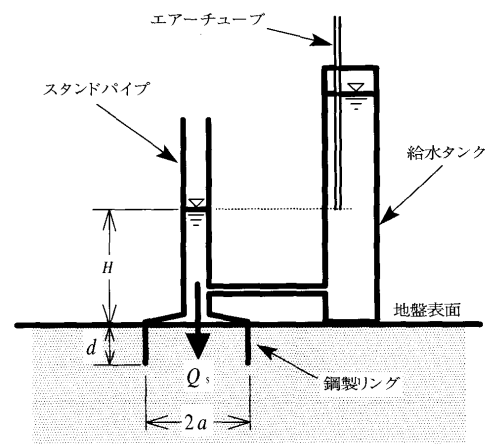


図-1 GPI法の試験装置の概要

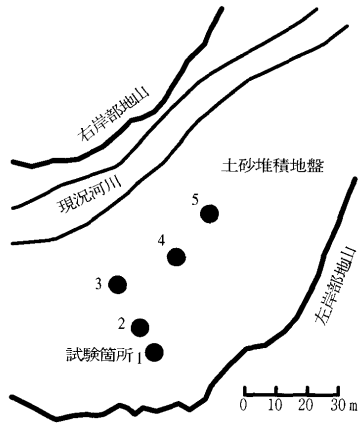
論文

表一 土の組織・構造分類に基づいた α^* の推奨値 (参考文献2) の Table 1-1 より邦訳・転記)

土の組織・構造分類	α^*, cm^{-1}
埋立て被覆材やライナーなどの締固められた構造のない粘性材料、湖成または海成堆積土など。	0.01
細粒組織(粘性)で非構造性の土。	0.04
非構造性材料と細砂を含む、粘土からロームまでのたいていの土、および一般の土の最初の選択値。	0.12
粗砂と礫質砂、および大きな亀裂やマクロポアをもつ高度に構造化された土も含む。	0.36

2.2 原位置試験の概要

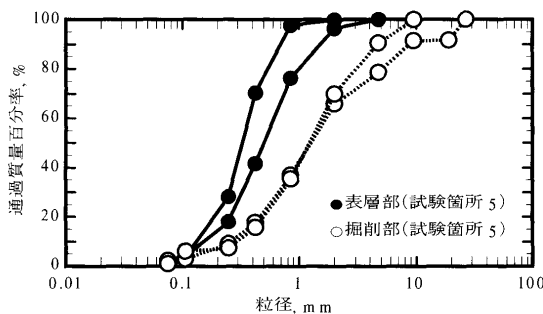
図一2に示すように、おおよそ幅50m、長さ160mの土砂堆積地盤で、互いに10mから20m離れた地盤表層部の5箇所を選び、大礫の間のマトリックス部を対象にGPI法による原位置浸潤試験を実施した。次いで、各試験箇所をバックホウで1m程度掘り、それからさらに10cmから30cmほど地盤を乱さないようにしてスコップで掘り下げた掘削部で、再度、試験を行った。試験には、市販の鋼管を利用した $a=5.5\text{cm}$ のリングを用い、 $d=3.0\text{cm}$ とした。 H は15~17cm程度を最も多く設定した。



図一2 GPI法による原位置試験を実施した試験箇所

GPI法の試験後に、リング挿入部近傍の地盤から、100cc容積のサンプラーを用いてコア土を採取し、室内で透水係数 K_{core} を測定した。採取したコア土は、原位置浸潤試験での空気封入状態に対応させるため、アルミバット内でコアの高さの半分程度まで浸漬し、1日間放置したのち、定水位透水試験装置にセットした。コア土に約30分間通水したのち、5分から10分間にわたる透水流量を3回ずつ質量で測定した。

図一3は、代表的な試験箇所の地盤表層部と掘削部か



図一3 試験箇所の土の粒度特性

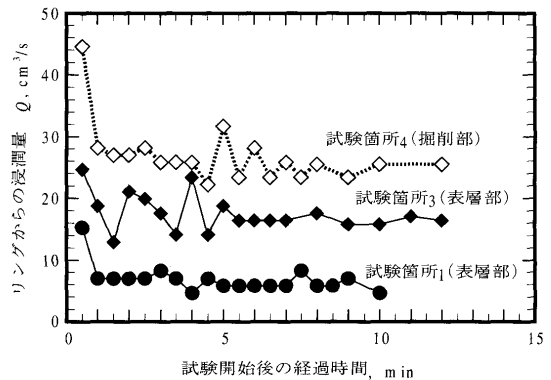
ら採取したコア土の粒度試験の結果である。地盤材料の工学的分類方法⁴⁾によれば、それぞれのマトリックス部の材料は、砂と礫質砂に分類される。現地での土質観察から、表一2の推奨値に準じて、 $\alpha^*=0.12\text{cm}^{-1}$ を仮定した。

3. 現地試験の結果

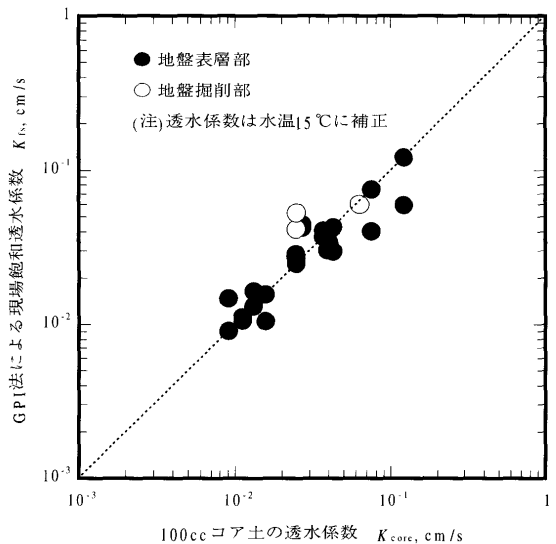
3.1 GPI法の試験特性

図一4は、GPI法を用いた原位置試験中における浸潤量の測定例を示したものである。地盤のマトリックス部が砂ないし礫質砂材料であることから、すべての試験ケースで、初期の水分状態に関係なく、試験開始後3分から7、8分といった早い段階で、浸潤量が一定に落ち着くのを確認できた。一連の試験では、このときの浸潤量を Q_s として、式(1)と(2)より K_{fs} を算出した。1点の K_{fs} を得るのに必要な試験時間は、装置の設置から、給水タンクへの水の補給、浸潤試験にいたるまで30分から1時間程度であった。

GPI法から得られた K_{fs} と100ccコア土の K_{core} を、図一5に比較する。いずれの透水係数も、水温15°Cの値に補正している。GPI法は、測定領域をできるだけ大きくして、地盤中の亀裂や小穴などの影響を包括した形で透水性を評価しようとするものである。図一5では、



図一4 GPI法を用いた原位置試験中の浸潤量の測定例



図一5 GPI法による K_{fs} と100ccコア土の K_{core} との比較

このGPI法から得られた K_{fs} が、100 ccといった小さな容積で測定された K_{core} とおおむね同程度の値を出している。このことから、今回対象とした地盤では、大きな礫の間に堆積した土砂は、亀裂や小穴などの水みちが少ない比較的均質な状態で分布していると推察できる。

3.2 地盤の透水性の統計的評価

試験によって得られる地盤の特性値にはばらつきが伴う。このばらつきの中で、対象とした地盤が、試験箇所ごとに平面的に異なった K_{fs} の分布特性を持つのか、また表層部と掘削部で K_{fs} に有意な違いがあるのかを調べた。分析では、試験箇所および地盤深さ（つまり表層部と掘削部）の二つの因子が K_{fs} の分布に影響するとして、二元配置の分散分析法を用いた。分析データは表一2に示すとおりである。図一2に示した5箇所の試験箇所のうち、試験箇所2の掘削部では、小礫が集中していたため試験が実施できなかった。表一3に、試験箇所2を除く4箇所の試験データに対する分散分析の結果をまとめる。同表の有意確率 p に着目して、 K_{fs} の分布特性をみると、次のことがいえる。まず、 K_{fs} は試験箇所ごとに統計的に有意な違いはもっておらず、地盤マトリックス部の透水性は、平面的にみればおおむね均一であることが分かる。一方、地盤表層部と掘削部の K_{fs} には統計的に高度に有意な差があり、土砂堆積地盤のマトリックス部は、深さ方向に非均質な透水性構造をもつと推察される。表一2から分かるように、 K_{fs} は、地盤表層部に比べ掘削部の方で大きくなっている。この透水性構造は、図一3の粒度組成の対比とも符合しており、斜面崩壊土が河床部に堆積する過程で、質量のより大きな礫や粗砂が深部に分布し、表層部には相対的に細かな砂が被覆することによって生じたと推察される。

4. まとめ

これまで主としてソイルサイエンス分野で用いられてきたGPI法を、土砂堆積地盤の透水性の評価に適用した。試験装置は非常にシンプルで可搬性にとり、測定も簡便で迅速に行えるといたる原位置試験法としてのすぐれた特徴をもつことを確認できた。特に第3.2節で示したように、比較的多くの試験データを短期間で得ることができ、これらにより、地盤の透水性構造を統計的な観点から分析できたことは、従来の原位置透水試験法に比べた場合の重要な成果であると考えられる。

今回の原位置試験を通して、GPI法は地盤の透水性を評価する用途で地盤工学分野にも積極的に使っていくことが確認できた。しかし、広く普及をはかっていくには、解決しなければならない課題が残されている。今回の原位置試験は透水係数が 10^{-2} から 10^{-3} cm/sの透水性の良い地盤を対象にしたものであるが、実務的には 10^{-6} から 10^{-7} cm/s程度の粘性土地盤にまで測定可能²⁾とされている。透水性に応じて測定時間は長くなるものの、このような低透水性の地盤への適用性を明らかにすることが今後の大きな検討課題の一つである。また、リングの a 、 d と定水頭 H の大きさを調整することによ

表一2 GPI法による原位置浸潤試験から得られた K_{fs} ^{a)}

試験位置	表層部		掘削部 ^{c)}	
	#1	#2	#1	#2
試験箇所 1	1.06×10^{-2}	1.48×10^{-2}	8.16×10^{-2}	8.32×10^{-2}
試験箇所 2	4.01×10^{-2}	5.96×10^{-2}	-	-
試験箇所 3	4.05×10^{-2}	2.96×10^{-2}	1.86×10^{-1}	5.58×10^{-2}
試験箇所 4	1.65×10^{-2}	3.04×10^{-2}	4.85×10^{-2}	4.15×10^{-2}
試験箇所 5	2.66×10^{-2}	3.40×10^{-2}	4.13×10^{-2}	5.99×10^{-2}

a) K_{fs} (cm/s) は、水温15℃に補正した値である。

b) 試験は、リング挿入箇所を変えて2回ずつ行った。

c) 試験箇所2の掘削部では、試験を実施していない。

表一3 分散分析の結果

因子	自由度	分散比 F_0	有意確率 p	寄与率, %
試験箇所	3	1.36	0.323	4.5
地盤深さ	1	8.76	0.018**	32.5
交互作用	3	1.01	0.437	0.1
繰返し誤差	8	-	-	62.9
合計	15	-	-	100.0

** 因子の影響が統計的に高度に有意であることを意味する。

り、GPI法の測定領域、つまり浸潤領域を任意に変えることができる。このことから、例えば、締固め土の透水性管理において、地盤の深さや層厚などのサイト条件に応じた原位置試験が可能になると考えられる。さらに、GPI法に新たな測定項目を加えることにより、 K_{fs} 以外に新規の地盤情報を収集できる可能性がある。著者らは、原位置浸潤試験中に、リング近傍の地盤表面で水分量の変化をモニターし、これを逆解析することにより、土の不飽和水分特性を推定できることを示した⁵⁾。この例は、GPI法自体の今後の新たな展開方向の一つを示唆すると考えられる。

原位置試験を実施するにあたり、新潟大学大学院自然科学研究科前期課程1年の森敬幸氏と松本智氏にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Reynolds, W. D. and Elrick, D. E.: Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, Soil Science Society of America Journal, 54, pp. 1233~1241, 1990.
- 2) Elrick, D. E. and Reynolds, W. D.: Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers, Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice edited by Topp, G. C., Reynolds, W. D. and Green, R. E., SSSA Special Publication, 30, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 1~24, 1992.
- 3) 森井俊広・井上光弘・竹下祐二: プレッシュチャーインフィルトメータ法を用いた原位置透水試験の測定精度, 農業土木学会論文集, No. 207, pp. 29~37, 2000.
- 4) 地盤工学会編: 土質試験—基本と手引き—, pp. 49~58, 2000.
- 5) Takeshita, Y., Yagi, K., Morii, T. and Inoue, M.: Inverse analysis of in situ permeability test data for determining unsaturated soil hydraulic properties, Unsaturated Soils for Asia edited by Rahardjo, H., Toll, D. G. and Leong, E. C., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 445~449, 2000.

(原稿受理 2001.2.16)