盛土堤体の品質照査に向けた簡便で精度のよい現場透水試験法の提案

森井俊広*

（平成16年12月28日受付）

要　約

ため池堤防や河川堤防などの盛土構造物には，その重要な機能の一つとして，水位変動と降雨時の浸透に対する安全性が要求される。この水理学的な安全性を支配するのは土の透水性であり，これを適切に管理し検査するためには，土の透水性を簡便に精度よく測定できる現場透水試験法の導入が必要となる。ソイルサイエンス分野で開発されたゲルフ式プレッシャーインフィルトロメータ（GPI）法およびゲルフ式ウェルパーミアメータ（GWP）法を取り上げ，現場透水試験法としての適用性と実務性をまとめた。いずれの試験法も，定水位条件で生じる地盤への定常浸潤量を測定して現場飽和透水係数を推定するもので，測定は簡単で装置構造もシンプルである。GPI 法は地盤の平面的な広がりの中での透水係数を，また GWP 法は深さ方向の透水係数を効率的に測定することができる。限られた時間内で比較的多くの測定値が得られるため，地盤のもつ透水性を統計的な観点から評価できる。試験中に付加的な測定を行うことにより，土の不飽和水分特性を推定することも可能である。土の透水性を確実に評価できるような単一の標準的なアプローチを開発することはむずかしい。そのかわりに，互いに補足しあう組み合わせた方法が必要になる。ここで論議した GPI 法と GWP 法は，盛土地盤での利用に向けた組み合わせ方法の基本的な核になる可能性をもつと考える。

新大農研報，57(2):129-137，2005

キーワード：品質照査，盛土堤体，現場透水試験法，土の透水性，ゲルフ式プレッシャーインフィルトロメータ法，ゲルフ式ウェルパーミアメータ法

ため池堤防や河川堤防などの盛土構造物には，その重要な機能の一つとして，水位変動と降雨時の浸透に対する安全性[1)]が要求される。浸透に対する水理学的安全性は，浸透流解析をベースにした数値計算によって評価される。そして，設計段階で設定された締固め土の透水係数は，施工過程での品質管理を通して検査される。このため，地盤を含めたさまざまな土質構造物の設計・施工に性能規定が導入されると，それにみあった性能評価手法の開発あるいは導入が必要となってくる[2)]。土の透水性は，現場透水試験を通して管理され，検査されるのが理想である。このとき現場透水試験法に必要とされるのは，測定精度の良さ，ならびに，土のもつ不均質さを考慮して適切に透水性を評価できるようにするための多点数の測定能力，つまり試験法の簡便さである。しかし，精度の良さと簡便さの両方を満足する土の現場透水試験法はいまのところない。

本報文では，締固め盛土の透水性を測定するための効果的な現場透水試験法の導入を提案する。具体的には，ゲルフ式プレッシャーインフィルトロメータ（Guelph pressure infiltrometer，以下 GPI と呼ぶ）法とゲルフ式ウェルパーミアメータ（Guelph well permeameter，同じく GWP）法を取り上げ，これまでに進めてきたフィールドおよび室内試験を踏まえて，その特徴と現場透水試験法としての適用性あるいは実務性を紹介する。GPI 法および GWP 法は，いずれも，1985年から90年あたりにかけて，カナダの Guelph 大学の研究グループによって開発され，おもにソイルサイエンス分野で用いられてきた定水位浸潤試験法である。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など，現場試験法としてすぐれた特徴をもつ。

次章で，ため池堤防や河川堤防などの盛土構造物における浸透挙動と安全性の関係を調べる。この中で，管理・検査すべき品質として土の不飽和水分特性の重要性を指摘する。その次の章では，GPI 法と GWP 法の試験方法を紹介するとともに，代表的な試験調査例を通して，現場透水試験法としての適用性あるいは実務性を示す。GPI 法は地盤や締固め土の平面的な広がりでの透水係数の測定に，また GWP 法は深さ方向の透水係数の測定に適していることを示す。GPI 法は，現場での飽和透水係数を測定する目的で考案されたものであるが，これを拡張して，土の不飽和水分特性も推定できるようにした。その試験調査例も示した。原位置で，飽和透水係数のみならず不飽和水分特性まで把握できるとなれば，品質の検査にとどまらず，地山斜面の防災などにも活用できると期待される。締固めた地盤やフィルダムの不透水性ゾーンの透水試験法には，E-19法が広く用いられている。本章の後半では，数値計算実験により E-19 法と GWP 法の比較を行い，後者が精度と簡便さの点ですぐれていることを示す。本章で示す試験調査例はいずれも砂質地盤で実施したものである。しかし結論の基本部分は，堤防盛土など低透水性の地盤にもあてはまると考える。最後の章では，前章の検討内容を踏まえて，盛土堤体の品質照査に向けた簡便で精度のよい現場透水試験法の導入の必要性を強調した。

盛土堤体の浸透挙動と安全性

ため池堤防や河川堤防で生じる堤体内の浸透流は，フィルダムに比べて相対的に構造の規模が小さいため，地表面からの降雨浸潤の影響を受けやすい。図１は，高さ10m の堤防が，1日間にわたって時間強度30mm の豪雨を受け，その直後に外水位の上昇を受けた場合の堤体内の自由水面の位置を予測したものである[3)]。計算には，有限要素法（FEM）で定式化した飽和・不飽和浸透流解析法を用いた[4)]。降雨浸潤により，斜面近傍の自由水面が大きな影響を受けている。図２は，図１の自由水面の位置を考慮した上で，斜面のすべり安全率を円弧すべり面法

*代表者著者：morii@agr.niigata-u.ac.jp

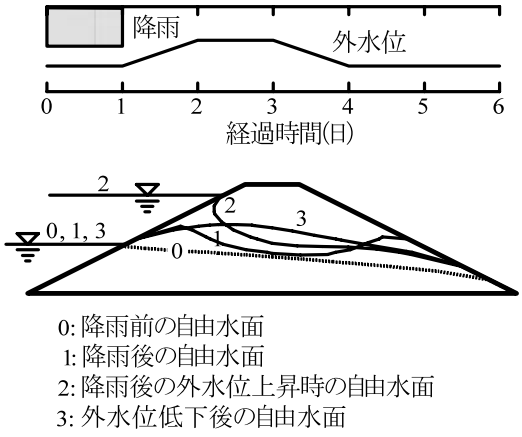

図1　降雨とその後の外水位上昇にともなう盛土堤体内の自由水面の変化

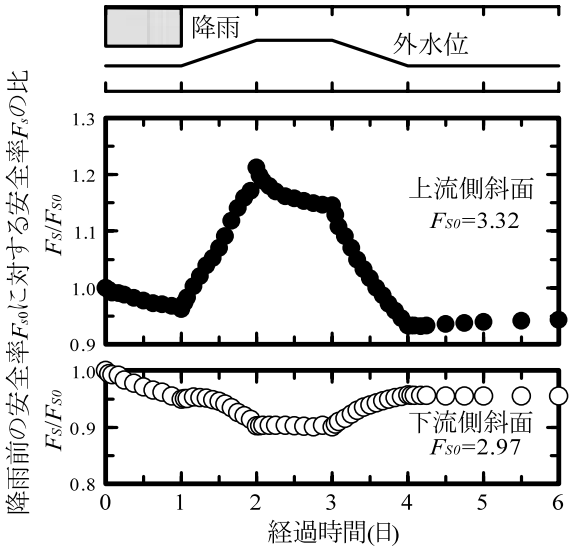

図2　降雨とその後の外水位上昇にともなう盛土堤体の斜面安全率の変化

で計算し，時々刻々の変化としてまとめたものである。特に堤防の下流側斜面では，降雨浸潤にともなう自由水面の上昇にともなって安全率が低下し，さらにその後の外水位の上昇によりさらに危険な状態になっていく様子がわかる。

一般には，堤体表面に植生があり，下流側法尻にドレーン工などが設けられるため，実際の浸透状況は図1と異なる。しかし，ため池堤防や河川堤防などの盛土堤体の水理学的安全性が，降雨浸潤によって少なからず影響を受けると考えることは，現実的であろう。降雨浸潤とそれにともなう浸透挙動を予測する方法は，いまのところ，飽和・不飽和浸透流解析法しかない。このため，土の飽和透水係数に加えて，新たに，不飽和透水係数を知る必要が出てくる。現行の盛土堤体の設計およびそれに対応する品質管理ではまったく考慮されていない土質特性である。したがって，堤体の品質を適切に管理し検査していくためには，原位置で土の飽和透水係数をいかに簡便にかつ精度良く測定するかという視点に加えて，土の不飽和水分特性の測定法の開発にも目を向けていく必要がある。

簡便で精度のよい現場透水試験法の導入

1．GPI法とGWP法を利用した現場透水試験

(1) GPI法

GPI法は，地盤表面の単一リング内から定水位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[5-7]。K_{fs}は，空気を含んだ状態での現地地盤の透水性を表すもので，実際の地盤の浸透や降雨浸潤を予測する上で現実に即した情報を提供できる。おおよそ10^{-4}から10^{-9} m/sの範囲のK_{fs}を測定できるとされている[6]。GPI法の試験装置を図3に示す。鋼製の単一リングにマリオット式の給水タンクをつないだ非常に簡単な構造ですむ。給水タンクをリングに直結すれば，後述するGWP法と基本的に同じ測定システムとなる。試験にあたっては，半径aの鋼製リングを地盤表面から深さdに挿入したのち，給水タンク内の空気管の位置により一定の圧力水頭Hに調整し，その状態でリング内から地盤へ浸潤させる。そして，時間が経過して浸潤量がおおむね一定に達したときを定常状態とみなして，この定常浸潤量Q_sを測定する。これよりK_{fs}は次式で算出できる。

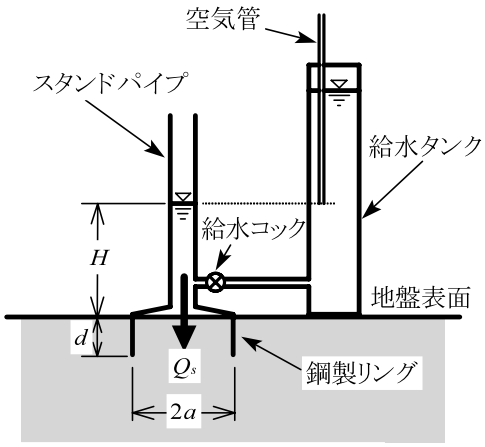

図3　GPI法の試験装置の概要

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

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

ここでα^{*}は，土の不飽和透水係数を負の圧力水頭hの指数関数で表した場合のべき指数，Gは形状係数である。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。土の組織や構造にもとづいて，表1に示す値が推奨されている[6,7]。式(1)は，地表面の点源からの浸潤に関する厳密な理論解を，リング内からの面状浸潤へ拡張したものである。この拡張のために導入されたのがGであり，式(2)は，K_{fs}=10^{-4}～10^{-9} m/s，H=0.05～0.25m，a=0.05～0.1m，d=0.03～

表１　土の組織・構造分類に基づく α^* の推奨値
（参考文献６）の Table 1-1より邦訳し単位変換）

土の組織・構造分類	α^* (m^{-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。	1
細粒組織（粘性）で非構造性の土。	4
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。	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。	36

0.05m および d/a=0.3～1.0を条件とした数値計算の結果にもとづいて誘導された。

鋼製リングを地盤に挿入する際に，リングと地盤土の間に水みちとなる隙間ができないように注意しなければならない。粘性土のような透水性の低い地盤で試験を行う場合，浸潤が一定に落ち着くまでに数日から数週間を要する。このため，この間に，外気温や日射によって給水タンクの水位が変動して正確な浸潤量を測定できなくなるなど，試験時間に加えて測定技術上の困難な問題が出てくる。また，試験時間を短縮するために大きな H を与えれば，リングが地盤から抜け出てしまったり，あるいは地盤とリングとの間の隙間を通って漏水が生じたりすることがある。

⑵ GWP 法

GWP 法は，GPI 法と同じく，カナダのゲルフ大学の研究グループによって開発された[7-10]。地盤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地盤中への定常浸潤量より，K_{fs} を測定する。試験装置の概要を図４に示す。マリオット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。地盤表面からオーガーで内径 $2a$ のウェルを掘削したのち，給水タンク内の空気管を調整してウェル内に所定の定水位 H を与え，ウェルの H 以下の側壁と孔底から土中へ入る浸潤量を測定する。時間の経過とともに浸潤量が一定になれば，これを定常浸潤量 Q_s とみなし試験を終了する。K_{fs} は次式により算出できる。

$$K_{fs}=\frac{C\cdot Q_S}{2\pi H^2+C\pi a^2+(2\pi H/\alpha^*)} \tag{3}$$

ここで，α^*は 先に説明した土壌パラメータで，試験に先立ってあらかじめ決定しておく必要がある。式⑶は，数値計算実験を通して，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して誘導された。C はこの拡張のために導入された形状係数で，土の種類に応じて，ウェルのアスペクト比 H/a の関数で与えられる[7]。この関数の形状を特定する理論的な背景はないが，たとえば，次の４次式により，適合度の高い記述式をえることができる[11]。

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

ここで b_0から b_4は土の種類に応じて表２の値をとる。

掘削したウェルの壁面の乱れや，粘性土地盤では締固めによる鏡面化，あるいは試験中の壁面の目詰まりや崩れが，浸潤挙動に重要な影響を持つ。ウェル内の壁面は直接に観察できないため，掘削およびウェル内への水の供給は慎重かつ適切に行う必要がある。粘性土のように透水性の低い地盤では，定常浸潤に達するまでに数日から数週間を要し，この間に，外気温や日射，蒸発によって給水タンク内の水位が変動して，正確な浸潤量を測定できなくなることがある。これも試験上の重要な注意点である。

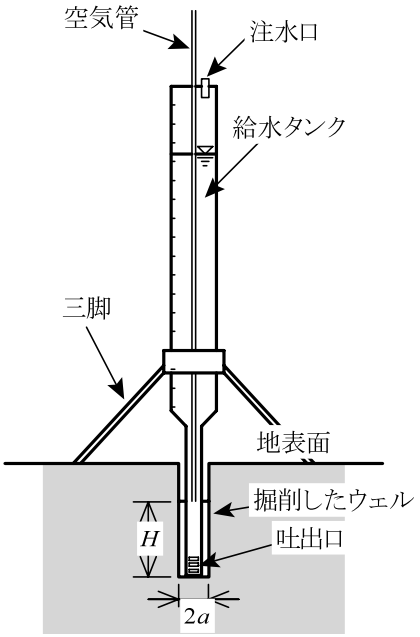

図４　GWP 法の試験装置の概要

表２　形状係数 C の関数を与える回帰適合係数

土	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
粘性土	−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

２．GPI 法による地盤の透水性の統計的評価

土砂堆積地盤での現地試験を通して，GPI 法の適用性を調べた[12]。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0.3m から0.7m 程度の大きな礫が散在し，その間に，粒径0.005m から0.01m 程度の小礫が混じった砂が堆積する。

図５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。試験対象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る。一連の試験では，このときの浸潤量を Q_s として，式⑴と⑵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 の試料円筒で採取したコア土の透水係数 K_{core} を，図６に比較する。K_{core} は，コア土を試

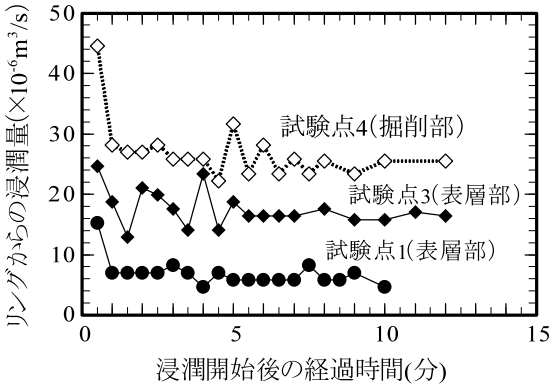

図5　土砂堆積地盤におけるGPI法で測定された浸潤量の時間変化

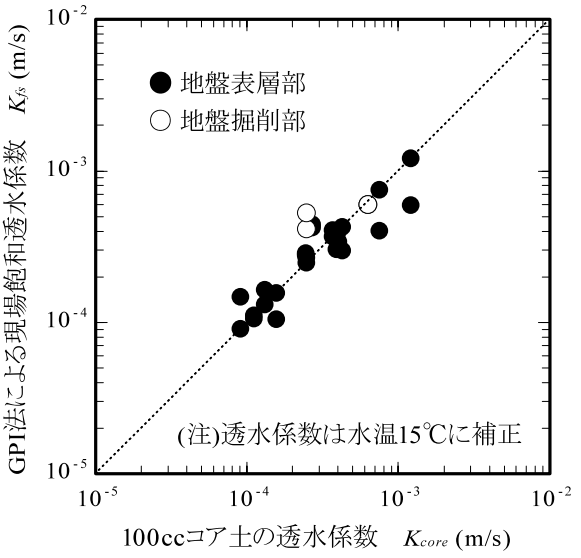

図6　GPI法によるK_{fs}とコア土の透水係数との比較

料高さの半分程度まで一昼夜浸漬したのち，室内定水位透水試験により測定した。K_{fs}，K_{core}のいずれも，水温15℃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6では，このGPI法から得られたK_{fs}が，100cc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，大きな礫の間に堆積している土砂は，亀裂や小穴などの水みちが少ない比較的均質な状態にあると推察できる。

試験によって得られる地盤の特性値にはばらつきがともなう。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，また地盤の深さ方向でK_{fs}に有意な違いがあるのかを調べた。互いに10mから20mはなれた5箇所の試験点でGPI法による現場透水試験を行い，次いでバックホーと人力で深さ約1mを掘削し，同様に試験を実施した。試験結果は，表3に示すとおりである。5箇所の試験点のうち，試験点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ていない。分析には，試験点および地盤深さ（つまり表層部と掘削部）の2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。表4に，試験点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}は試験点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。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，土砂堆積地盤の砂質部は，深さ方向に非均質な透水性構造をもつと推察される。表3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，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。このように，短期間に比較的多くの試験データを得ることができ，それらにもとづいて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，GPI法がもたらした重要な成果といえる。

表3　GPI法による現場透水試験から得られたK_{fs}[a)]

試験位置 / 繰返し[b)]	表層部		掘削部[c)]	
	#1	#2	#1	#2
試験点1	1.06×10^{-4}	1.48×10^{-4}	8.16×10^{-4}	8.32×10^{-4}
試験点2	4.01×10^{-4}	5.96×10^{-4}	−	−
試験点3	4.05×10^{-4}	2.96×10^{-4}	1.86×10^{-3}	5.58×10^{-4}
試験点4	1.65×10^{-4}	3.04×10^{-4}	4.85×10^{-4}	4.15×10^{-4}
試験点5	2.66×10^{-4}	3.40×10^{-4}	4.13×10^{-4}	5.99×10^{-4}

a）K_{fs}（m/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（#1，#2）行った。
c）試験点2の掘削部では，測定値が得られなかった。

表4　GPI法による現場透水試験から得られたK_{fs}の分散分析結果

因子	自由度	分散比 F_o	有意確率	寄与率(%)
試験点	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。

3．GPI法による土の飽和水分特性の推定

GPI法をベースとした土の不飽和水分特性の原位置推定法を新たに提案し，その実務性を調べる[13)]。具体的には，GPI法による試験中に，浸潤量に加えて，地表面近傍の土壌水分量の変化を計測したのち，遺伝的アルゴリズム（GA）で制御した数値計算を繰り返すことにより，浸潤量と水分量の時間変化をもっとも適切に再現する土の不飽和水分パラメータを推定するようにした。水分量の測定にはAmplified domain reflectometer（ADR）を用いた。ADRは，プローブ本体が直径0.04m，長さ0.15mの円筒で，その先端にプローブ針4本が直径0.0265m，長さ0.06mの範囲に取り付けられており，ハン

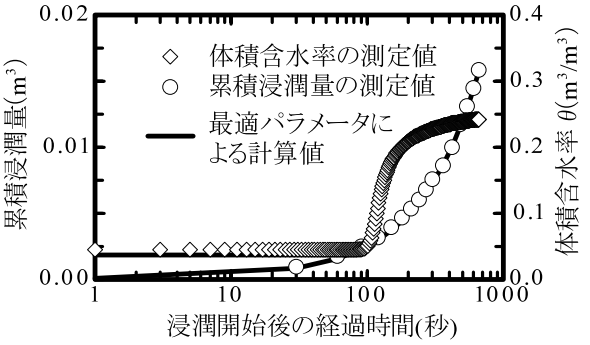

図7　累積浸潤量および体積含水率の測定値と推定値との比較

ディーな形状になっている。ADR で測定される水分量は体積含水率 θ である。

土の不飽和水分特性は van Genuchten（vG）モデル[14] で記述する。飽和透水係数が GPI 法でえられる K_{fs} に対応すると考えると，vG モデルでは，水分保持曲線を表す定数 α と n，飽和体積含水率 θ_s および残留体積含水率 θ_r が，土の不飽和水分特性を表す未知パラメータとなる。これらの未知パラメータ $\boldsymbol{b}=\{\alpha, n, \theta_s, \theta_r\}$ を決定するためには，$\boldsymbol{b}$ を変数とする次の目的関数 $\boldsymbol{O}(\boldsymbol{b})$ を最小にすればよい。

$$O(\boldsymbol{b}) = \omega_\theta \sum_{i=1}^{N} (\theta_m(t_i) - \theta_c(t_i, \boldsymbol{b}))^2 + \omega_Q \sum_{j=1}^{M} (Q_m(t_j) - Q_c(t_j, \boldsymbol{b}))^2 \quad (5)$$

ここで θ_m と Q_m はそれぞれ体積含水率と累積浸潤量の測定値，ω_θ と ω_Q はそれぞれ体積含水率と浸潤量に関する重み係数，N と M はそれぞれ体積含水率と浸潤量の計測データ数である。t_i，t_j は計測時間，また添え字の c はパラメータ $\boldsymbol{b}$ の条件での FEM 計算値であることを意味する。GA では，$O(\boldsymbol{b})$ の逆数を遺伝子の適応度として評価する。

前節で紹介した試験点３の表層部で，GPI 法による試験に加えて，地盤表層部の水分量測定を実施した。ADR の埋設位置は，プローブ針中央で半径0.145m，深さ0.125m であった。GA によるパラメータ推定では，飽和透水係数として，GPI 法からえられた K_{fs}= 4.98×10^{-4} m/s を用いた。また対象が砂であることから θ_r はゼロとみなした。遺伝子は n，α ともに６ビット，θ_s が４ビットの合計16ビットの長さで表し，遺伝子数30，交叉確率0.6，突然変異確率0.1とした。定水位浸潤を模擬するための FEM 計算では，深さ0.6m，半径0.5m の軸対称地盤を対象とし，地下水面は２m 深さに位置すると仮定した。

GA により推定された vG モデルのパラメータは α =5.4/m，n=1.9および θ_s=0.30であり，これに達するまでの世代は25であった。図７は，推定されたパラメータを用いて再現した θ および累積浸潤量の時間変化を，測定値と比較したものである。いずれも測定値を良好に再現している。図８は，推定されたパラメータと vG モデルから求めた土の不飽和水分特性である。相対透水係数 K_r は不飽和透水係数の飽和透水係数に対する比であり，θ_s で最大値1.0をとる。図中の点線は，**表１**より α^* =12/m として描いた K_r と θ の関係である。推定曲線である実線の θ-K_r 関係がこの点線に良好に対応していることから，推定した不飽和水分パラメータはおおむね一般的な砂の特性に対応していると判断できる。

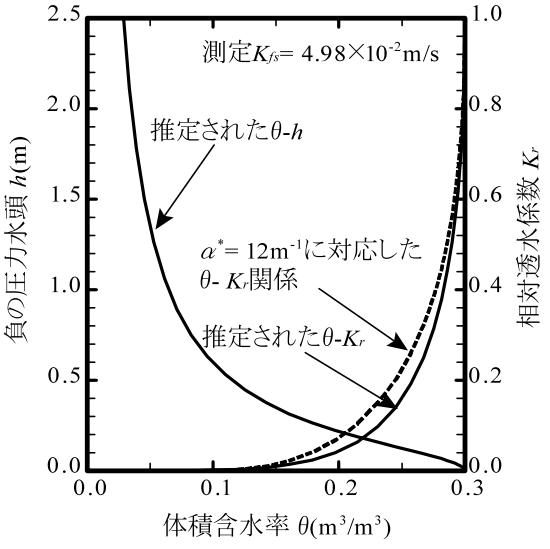

図8　推定された土の不飽和水分特性

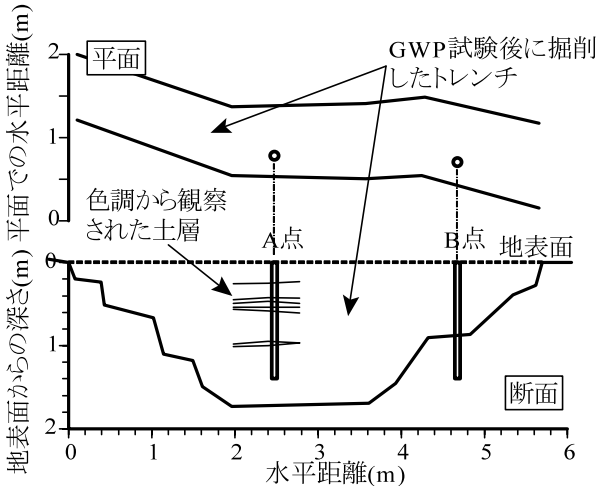

図9　GWP 法を用いた試験の位置とその後に掘削したトレンチの形状

４．GWP 法による深さ方向の透水係数の測定

GWP 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，直径2a=0.06m のウェルを用いた現場透水試験を実施した[11]。ウェルを深さ0.2m 間隔で逐次掘り下げながら，深さ1.4m まで GWP 法により K_{fs} を測定した。こののち，GWP 法の試験箇所を含む範囲で深さ1.6m まで地盤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た。あわせて，各土層から鉛直方向に100cc 容積のコア土を採取し，それらの K_{core} を測定した。その測定は本章第２節で説明した方法に準じた。GWP 法の試験は約2.2m 離した A 点および B 点の２箇所で行った。これらの試験位置とトレンチ形状を示すと，図９のようである。

図10に，K_{fs} と K_{core} の深さ方向の分布を比較する。K_{fs} の測定に際し，A 点では，深さ方向の各測点で H=0.075m で測定したのち，H=0.125m に水位を上げて続けて２回目の測定を

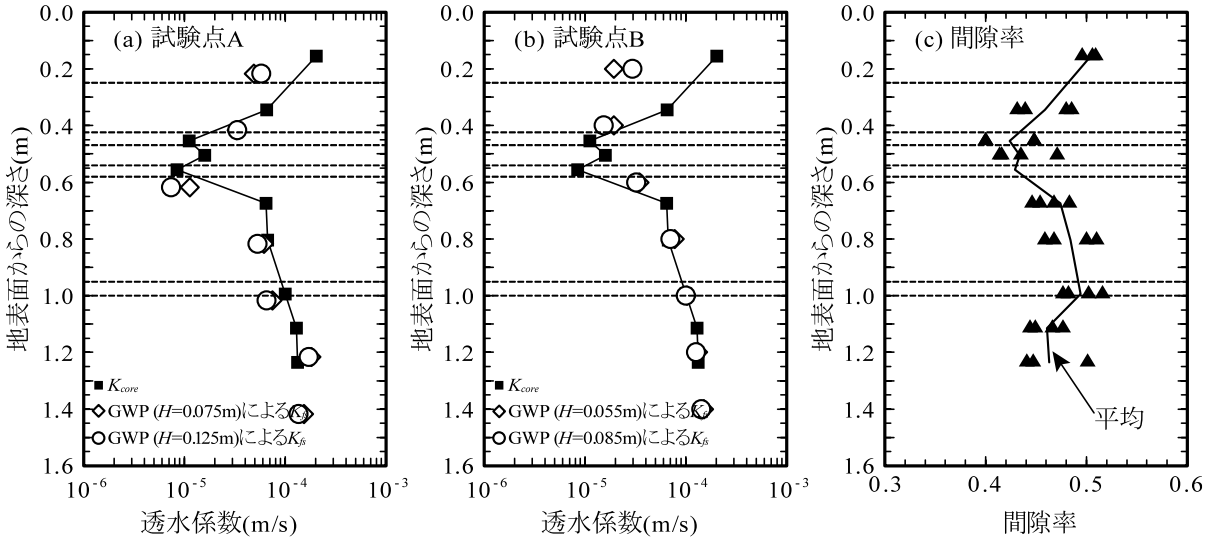

図10　GWP法およびコア土より求めた透水係数の深さ方向の分布

行った。B点では，H=0.05mとそれに続いて0.085mとした。K_{fs}，K_{core}のいずれも水温15℃に補正した値である。図中の横方向の点線は，トレンチの中央部分の掘削壁面に沿って主に色調から観察した土層構造である。地表面から深さ20cmまでは耕うん土層であり，深さ0.4mから0.6mにかけて厚さ0.05m程度の層が互層をなしている。深さ1m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0.6m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10の(c)には，コア土の密度と土粒子比重から求めた間隙率の分布も示している。図10より，表層部を除き，K_{fs}とK_{core}はおおむね対応しており，GWP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。深さ0.2m程度より以浅の表層部では，K_{fs}がK_{core}に比べかなり低めに測定されている。このような違いをもたらした理由の一つとして，ウェルの内壁の崩れが有望である。表層部は耕うん土層であるため，浸水によって容易にくずれ，実際にはウェルの内径が小さくなっているにもかかわらず，$2a$= 0.06mのままで式(3)によって計算を行うと，K_{fs}を過小に評価してしまうことになる。これらの一連の試験結果より，GWP法測は，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もつことが確認できる。測定精度についても，十分に実務的なものであると判断できる。

5．GWP法とE-19法との比較

E-19法は，1958年に米国内務省開拓局のマニュアルに掲載されたもので，国内では地盤工学会の「締固めた地盤の透水試験」[15]や農林水産省のフィルダムの設計基準書[16]で採用されている。図11に試験の概要を示す。まず，地盤に，標準として，直径0.3m，深さ0.3m程度の円筒状の試験孔（立坑）を削孔し，これを直径10mm程度の洗浄した砕石で充填する。次いで，マリオットサイフォンを利用して，一定水位Hで試験孔の底面と側面から浸潤させる。時間が経過しておおむね一定になった時点で，浸潤量Q_sを測定する。したがってGWP法とE-19法の試験手順では，試験坑とウェルのサイズが違っているだけで，そのほかはすべて同じである。地下水位が3Hより深いところ

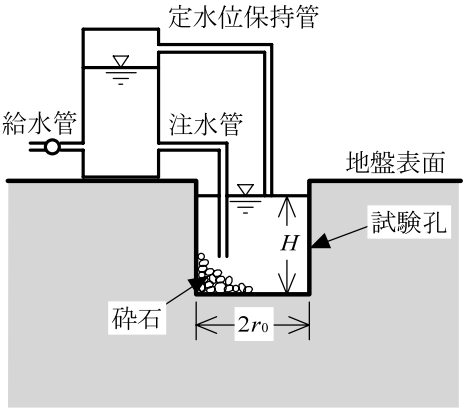

図11　E-19法を用いた現場透水試験の概要

にある場合，E-19法では，次式からK_{fs}を算出する。

$$K_{fs}=\frac{Q_s}{2\pi H^2}\left[2.3\log\left[\frac{H}{r_0}+\left\{\left(\frac{H}{r_0}\right)^2+1\right\}^{1/2}\right]-\left\{\left(\frac{r_0}{H}\right)^2+1\right\}^{1/2}+\left(\frac{r_0}{H}\right)\right] \quad (6)$$

ただしr_0は試験孔の半径である。

E-19法では，透水係数が10^{-7}から10^{-8}m/sオーダーの不透水性の盛土締固め地盤では，浸潤が定常状態に達するには2日から20日程度が必要となる。このため，実務では約1日で定常とみなして試験を進めることが多い。このような場合，E-19法は，実際の透水係数より大きめの値を算出することになる。締固め地盤では，層状に転圧が行われるため，水平方向と鉛直方向で透水性が異なる異方性が生じる。E-19法では，H/r_0の比が大きくなるにつれ，試験孔の側面から水平方向に向かう流れが卓越するようになり，水平方向の透水係数に近い値が算出されることが確認されている。また，締固め地盤では，盛土荷重によっ

て土の圧縮が進み，透水性が低下していくため，E-19法などの原位置試験法で得られる透水係数は，盛土完成後の値より大きめとなるといわれている[14]。

GWP 法と E-19法の背景にある理論の妥当性を，飽和･不飽和浸透流解析法を用いた数値実験により調べる[17]。地盤は，深さ2m，中心からの半径1.5m の軸対称領域とし，中心軸に地表面から深さ0.3m，半径0.15m の試験孔を設置する。H は0.1，0.2および0.3m の3ケースとする。地盤材料として，砂（飽和透水係数1×10^{-4} m/s，α^*=36/m，ローム（同じく1×10^{-6}m/s，12 /m），および粘土（同じく1×10^{-8} m/s，4 /m）を想定した。ここでα^*は，本章第1節で定義したように，土の不飽和透水係数を負の圧力水頭の指数関数で表した場合のべき指数である。数値計算では，不飽和透水係数と体積含水率の関係を共通にして，α^*の値にしたがって各材料の水分保持曲線を設定した。飽和間隙率はいずれも0.5とする。地盤の初期飽和度を一律60% とし，定水位下にある試験孔の底面と側壁面は既知圧力水頭境界面，その他はすべて不透水面とする。この数値実験より，ほぼ定常に達したと判断される時点での Q_s を求め，これから GWP 法では式(3)により，E-19法では地下水が深い場合の式(6)により，K_{fs} を算出した。数値計算に入力値として用いた透水係数が地盤の真の透水性を表すから，これを基準にして GWP 法と E-19法からえられた K_{fs} を比較すると，図12のようになる。GWP 法が，相対的に精度の良い推定値をだすのがわかる。GWP 法では，E-19法に比べ小規模な試験孔を使うことができ，１点の測定に要する作業時間が少なくてすむ。このため，多点数の，しかも精度の良いデータをとることができると期待できる。なお，E-19法は，その測定理論が実際の測定条件とあっていないと指摘されているが，図12をみる限りでは，実際と極端に異なる透水係数が推定されることはないようである。

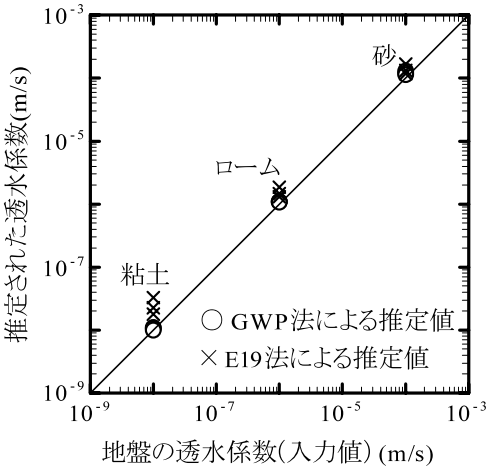

図12　数値計算による GWP 法と E-19 法との比較

まとめ

ため池堤防や河川堤防などの盛土構造物には，その重要な機能の一つとして，水位変動と降雨時の浸透に対する安全性が要求される。この水理学的な安全性を支配するのは土の透水性であり，これを適切に管理し検査するためには，土の透水性を簡便に精度よく測定できる現場透水試験法の導入が必要となる。本報文では，ソイルサイエンス分野で開発されたゲルフ式プレッシャーインフィルトロメータ（GPI）法およびゲルフ式ウェルパーミアメータ（GWP）法を取り上げ，現場透水試験法としての適用性と実務性をまとめた。いずれの試験法も，定水位条件で生じる地盤への定常浸潤量を測定して現場飽和透水係数を推定するもので，測定が簡単で装置構造もシンプルである。

GPI 法は地盤の平面的な広がりの中での透水係数を，また GWP 法は深さ方向の透水係数を効率的に測定することができる。限られた時間内で比較的多くの測定値が得られるため，地盤のもつ透水性の統計的な性質を評価することができるなど，原位置試験法としての優れた特徴を有する。さらに，試験中に付加的な測定を行うことにより，土の不飽和水分特性を推定することが可能となる。ため池堤防や河川堤防などの盛土構造物では，堤体の水理学的安全性が降雨浸潤の影響を受けやすいため，このように原位置で土の不飽和水分特性が把握できるとなると，盛土品質に対する照査はより確実なものとなる。もちろん，地盤が固有にもつ複雑さ，測定データに対する無数といえるほどの目的と利用方法，そしてそれぞれの方法がもつさまざまな理論的および実務的な制約により，土の透水性を確実に評価できるような単一の標準的なアプローチを開発することはむずかしいと考えられる。そのかわりに，互いに補足しあう組み合わせた方法が必要になる。ここで論議した GPI 法と GWP 法は，盛土地盤での利用に向けた組み合わせ方法の基本的な核になる可能性をもつと考える。

参考文献

1. 長屋淳一・村上章・八谷誠・佐藤毅．2003．土構造物の品質評価と現行設計法の問題点について．第38回地盤工学研究発表会発表講演集：1349-1350
2. 日経コンストラクション編集．1999．性能規定で広がる技術者の裁量．日経コンストラクション, 1999年５月28日号：46-54
3. Morii, T., Shimada, K. and Hasegawa, T. 1999. Stability of embankment dams based on minimum-experience of safety factor. International Symposium on Slope Stability Engineering, Matsuyama, Japan, Proceedings, 2: 817- 822
4. 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.
5. Reynolds, W. D. and Elrick, D. E. 1990. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Science Society of America Journal, 54: 1233- 1241
6. Elrick, D. E. and Reynolds, W. D. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice* edited by G. C. Topp, W. D. Reynolds and R. E. Green, SSSA Special Publication, 30, Soil Science Society of America, Madison, WI: 1- 24
7. Reynolds, W. D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: Field measurement. *Soil Sampling and Methods of Analysis* edited by Carter, M. R., Lewis Publishers: 599-613
8. Reynolds, W. D., Elrick D. E. and Clotheir B. E. 1985. The constant head well permeameter of unsaturated flow.

Soil Science, 139(2): 172- 180
9. Reynolds, W. D. and Elrick D. E. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α-parameter using the Guelph permeameter. Soil Science, 140(4): 292- 303
10. Reynolds, W. D. and Elrick D. E. 1987. A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. Soil Science, 144(4): 282- 299
11. 森井俊広・松本智・森敬幸．2001．ウエ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．新潟大学農学部研究報告，53(2)：151- 158
12. 森井俊広・竹下祐二・志賀剛．2001．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．土と基礎（地盤工学会誌），49(11)：7- 9
13. Takeshita, Y. and Morii, T. 2002. Field measurement of unsaturated soil hydraulic properties using constant head permeability test. Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Proceedings: 417- 423
14. van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892- 898
15. 地盤工学会（編）．1997．地盤調査法，地盤工学会：305- 311
16. 農林水産省農村振興局（編）．2003．土地改良事業計画設計基準　設計「ダム」 技術書「フィルダム」，社団法人農業土木学会：502- 503
17. 森井俊広・森敬幸・松本智・竹下祐二・井上光弘．2001．ウェルパーミアメータ法を用いた簡便で精度のよい原位置透水試験法．平成13年度農業土木学会大会講演会講演要旨集：482- 483

Accurate and Practical Field Permeability Tests for Quality Inspection of Soil Embankment

Toshihiro MORII*

(Received December 28, 2004)

Summary

Soil embankment constructed on reservoir, pond or river should be designed so that it is safe against a water fluctuation in reservoir or river as well as seepage flow due to rainfall which may cause deterioration of soil structures. Because the hydraulic safety of soil embankment is mainly governed by the permeability of embankment soil, it is practically important to measure it and qualify a state of safety of the soil embankment based on the measurements. An in-situ or field permeability test of soil is most promising to measure simply and accurately the soil permeability. In this report the applicability of the Guelph pressure infiltrometer (GPI) and Guelph well permeameter (GWP) are introduced effectively into the field permeability test of the soil embankment. Both the GPI and the GWP which have been developed in the soil science provide a field-saturated hydraulic conductivity of soil based on the measurement of a constant-head infiltration of water into soil. Their special features are characterized by their simplicity of the test equipment and the easiness of the measurement to obtain data. It is well understood that the GPI is suited for measuring the soil permeability along the ground surface, and the GWP for measuring the soil permeability along the soil depth of the ground. Statistical properties of the soil hydraulics are easily determined by the GPI or the GWP because it provides relatively large number of measurements during the limited period of the field test. It is also possible to extend the procedure of the GPI or the GWP test method so that it provides an estimation of unsaturated moisture properties of soil based on an additional measurement of soil moisture during the field permeability test. The complexities of the filed soil as well as the various theoretical and practical constraints of each method seem to show that no single standard approach will ever be developed. It appears instead that field investigations will require a suite of complementary methods. The GPI and the GWP have the potential for forming an essential core to such a suite of methods for use in measuring the soil permeability and qualifying the state of the hydraulic safety of the soil embankment.

Bull.Facul.Niigata Univ., 57(2):129-137, 2005

Key words: Quality inspection, Embankment, Field permeability test, Soil permeability, Guelph pressure infiltrometer, Guelph well permeameter

*Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp