地盤の透水性定数を求める 2,3 の新しい調査方法

Some New Survey Methods for Obtaining the Permeability Parameter of Groundwater



1. まえがき

近年における建設工事の進展は、都市化に対応した雨水 浸透工法の開発や大深度地下開発等に代表されるように、 様々な地下水問題に対応しなければならなくなっている。 地下水問題を定量的に評価するには、地盤の透水性定数 (特に透水係数)を正確に把握することがますます重要に なってきていると考えられる。

地盤の透水係数を求める方法の中で,原位置試験法が最 も望ましい方法であると思われる。それは,自然の複雑な 堆積条件を乱すことなく試験ができるからである。しかし, 現実には,地層構成の複雑さ,不均一などによって,試験 そのものが困難であったり,理論と不一致なことが起こっ たりして,それほど容易ではない。

試験とか実験とかは,できるだけ計算要素を少なくして 実測で物理量を求めるのが,本来の目的であると思う。こ の観点に立てばより現実に即した原位置試験法を開発すべ きであると考える。

本論文では,筆者らが数年来取り扱っている地盤の透水 性定数を求める原位置試験方法の内,以下に示す3方法に ついて紹介するものである。

- ① 観測孔を用いたスラグ法による現場透水試験方法。
- ② 流速流向計で測定した流速と動水勾配から透水係数 を求める方法。
- ③ トレンチから不飽和帯に注水し、多段式地中比抵抗 器を用いて浸透過程を測定し、それによって得られる 浸透形態をもとに不飽和浸透特性を逆解析から求める 方法。

2. 観測孔を用いたスラグテストによる透水係数 の測定法

2.1 スラグテストとは

単孔式現場透水試験によって透水係数を求める場合,一般に Hvorslev (ボシレフ)の式を 算出根拠としている。 Hvorslev 式の主な仮定条件¹⁾は,①試験孔の水位変化に 伴って周辺の自然水位が低下または、上昇せず、被圧状態

*大成基礎設計
*大成基礎設計
技術本部課長
**大成基礎設計
技術本部

を保つこと、②試験孔内の水位と自然水位との差を、ダル シー則の成立範囲内とすること、③試験孔隙部が変形しな いこと等である。

従来行われている単孔式現場透水試験法は,これらの条件を満足していないため,一般にいわれている注入法と回 復法による透水係数が一致しなかったり,透水係数の値そ のものが疑わしい結果になる場合がある。この問題を克服 するため観測孔仕上げした井戸内でスラグテストを試みた。

スラグテストとは、一定体積のおもりを試験孔内に投入 または引き上げる事によって、孔内水位を瞬間的に変化さ せる非定常透水試験法の一種である。本試験法は Cooper (クーパー)²⁾ らによって米国で実施された方法であり、従 来の現場透水試験と比較して、以下の様な違いがある。

- ① 水頭差が試験ごとに違う従来法に対し、本試験法は 任意一定の水頭差で試験ができる。
- ② 初期水頭差を確保するための水位変化に要する時間は、3~4秒程度で、従来法のベーラーによる汲み上 げでは対応できなかった高透水性地盤でも試験が可能である。

また,今回の試験では孔壁の崩壊を防止するために,ス トレーナーパイプを試験孔隙部に設置した。

2.2 試験例

茨木県筑波郡谷原村地先において実施したスラグテスト について述べる。

試験地の土質条件およびスラグテストの装置を,図-1 に示す。試験対象層は沖積砂層でN値が10~20の緩い砂層 であり、粒度組成は図-2のとおりである。試験孔隙の区 間はG.L.-10m~G.L.-14m間の4mである。この区間 の D_{20} の粒径は0.0012~0.09 mm であり ばらつきが大き く、 D_{20} から透水係数を推定すると $3.0 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-3}$ の幅を持つ。

図-3は,注入法における時間(*t*)~水位(*H*)曲線であ り,図-4は*t*~log *h* 曲線である。Hvorslev の式により 解析した透水係数の値を表-1に示す。これには,別の試 験孔で試験した従来法による透水係数を併記している。

この試験結果によれば,スラグテストでは注入法と回復 法の測定方法による透水係数の差異がほとんど認められず, 従来法では多少の差異が認められる。今回の従来法の試験 結果は,かなり精度が高い結果となったが,通常実施して





いる従来法は今回ほど精度は高くなく,ばらつきを持つこ とが多い。また,試験区間の透水係数は10⁻⁶~10⁻³オーダ ーとばらついており,スラグ法はこの区間の平均的透水係 数を示していると解される。



表-1 解析結果

試	験	法	透水係数(cm/s)		
			スラグテスト	従来法	
注	入	法	1.49×10-4	1.77×10-4	
回	復	法	1.58×10-4	2.79×10-4	

2.3 スラグテストの有効性

従来の単孔式現場透水試験法における注入法と回復法に より測定した透水係数は,オーダーが違う程の差があるこ とが多い。せっかく単孔式現場透水試験を実施していなが ら,最終的に透水係数の値を決める際,粒度から推定した 値を採用している例が非常に多い。これは自ら単孔式現場 透水試験法の有効性を否定していることにもなる。以上の ことからスラグテストは,注入法と回復法の測定法による 違いを克服し,試験結果の信頼性と精度を向上させること のできる原位置透水試験法として有効であると思われる。

3. 流速流向計による透水係数の測定法

流速流向計の開発³⁾ とその実用化によって流速が実測で きるようになった今日,各点の水位測定によって動水勾配 さえ求めれば,簡単に透水係数が得られる。ここでは,流 速流向計による透水係数の測定法について述べる。

3.1 流速流向計

ー般的に普及した流速流向計の一つに、土質調査ボーリ ング孔を利用して測定できる「L型」がある。「L型」は、 ①孔底地盤の地下水流が測定できること、 $2^{2}\times10^{-2}\sim2\times10^{-6}$ cm/s までの流速が測定できること、③流速と流向が 同時測定できること、④流速で±5%、流向で5°内外の 高精度で測定できること等の特徴を持っている。

測定原理や装置については,他の文献"に詳しい。

3.2 透水係数の求め方

(1) 水位等高線法

同一帯水層内の観測井戸で水位を計測して,水位等高線 を描く。地盤の透水係数が一定であれば,水位等高線は等

土と基礎, 37-6 (377)







図-6 透水係数を求める2点平均法

ポテンシャル線に等しいと考えてよい。

図—5のNo.1地点とNo.2地点での流速をそれぞれ v_1 , v_2 にすると,透水係数は次のように求められる。ただ し,等高線の水位は, $h_2 > h_0 > h_1$ の関係にある。

(2) 2 点平均法

図-6における No.1 地点で流速および流向を測定し, 同時にその地点の水頭を測定する。流向線上のある離れた 距離 6 の地点 No.2 (上流側でもよい)においても 同様の 測定を行う。両地点での,流速と流向の測定値は必ずしも 一致しないため,2地点の値を平均して透水係数を求める 必要がある。

2地点の流向が違うことは、2点間の流線が直線ではな く、湾曲して流れていることを意味し、直線bよりも長い 流線長となる。これを $h=b/cos(4\theta/2)$ で近似させる。2 地点の水頭を h_1, h_2 とすると、平均した透水係数は、次式 で表される。

$$k = \frac{l_0(v_1 + v_2)}{2(h_1 - h_2)\cos\frac{\Delta\theta}{2}}$$
(3)

June, 1989

(3) 1 点簡便法

一般的には、(3)式において、 $4\theta=0$ とみなせる場合が多く、 $v_1 = v_2$ とすることができる。この場合、ある1点で流速と流向および水位(h_1)を測定し、流向線上のある離れた距離 l_0 の地点で水位(h_2)を測定すれば、次式で透水係数が求められる。

3.3 実測例

秋田県雄物川流域において実測した例を紹介する。図— 7は、河川敷に設置されている上水道の水源井戸の構造と 地盤状況を示したものである。この井戸では平均9300 m³/dの揚水をしている。井戸の周辺で水位と地下水の流 速と流向を測定した結果を、水位等高線図として図-8に 示す。測定した流速と水位等高線から各点の透水係数を求 めると、表-2となる。

水源井戸構造は図-9に示すようにモデル化し, 揚水量 *q*から平均的な透水係数*k*を求めた。



ここに、q: 揚水量 (9300 m³/d), l: 水平有孔管の長さ



NII-Electronic Library Service

No.	1926
* 1 • •	1080



表-2 流速流向計で測定した透水係数 k

図一9 水源井戸の揚水量から透水係数を求めるための計算条件

(50m), s:低下水位 (1.5m), R:限界距離 (50m) とす ると, 平均的な 透水係数 k=3.05×10⁻² cm/s となり, 表 -2の値とほぼ一致している。

また, 琵琶湖西岸で測定した例⁵⁾でも, 流速流向計によ る透水係数が, 湖底から流出する地下水を直接 測 定 する Seepage meter⁶⁾による透水係数とよい一致をみた。

流速流向計による透水係数の測定法は,算定式で計算す る要素が少なく,直接測定法に近い方法である。この方法 で得た透水係数の信頼性は,かなり高いものと考えるが, この方法が普及するにつれて,多くのデータでその信頼性 や精度を確かめていきたいと思う。

4. トレンチ法による不飽和浸透特性の把握

4.1 浸透解析と不飽和浸透特性

近年では雨水浸透処理工法を用いて降雨の地下涵養を促進することや、汚染物質の地下浸透等を検討するため不飽 和領域を考慮した浸透解析が多方面で行われている。この 浸透解析には、不飽和透水係数 (k_{θ}) と体積含水率 (θ) の 関係と、負の圧力水頭 (ϕ) と θ の関係が必要である。しか し、これらの不飽和浸透特性は非線形であり、原位置で計 測した実測例が少ない。

今回,トレンチからの注水試験を実施し,不飽和領域の 浸透形態を多段式地中比抵抗器を用いて計測した。この試 験結果と FEM 飽和一不飽和浸透解析⁷⁾を用いて不飽和浸 透特性を導く逆解析手法について述べる。

4.2 原位置試験方法

試験装置は図ー10に示すとおりである。トレンチの注水 装置と注水の浸透形態を測定する多段式地中比抵抗測定器 および水位観測孔から構成されている。多段式地中比抵抗 測定器については、文献⁸⁾に詳しい。

測定方法は、トレンチ内の注水位を一定とし、時間経過 における浸透量と浸潤線の変化を計測するものである。



4.3 逆解析の方法

不飽和浸透パラメーター ($\phi \sim \theta \sim k$)を求める方法は,実 測した注入量・水位から FEM 飽和一不飽和浸透流解析を 用いて逆解析するものである。解析は試行錯誤法によって 行った。

解析に用いた不飽和浸透パラメーターは,以下の諸条件 で仮定した。なお,条件中 kr は不飽和透水係数比である。

Aタイプ…… $\psi \sim \theta$, $k_r \sim \theta$ を線形とする

 $Bタイプ \cdots \phi \sim \theta$ は非線形, $k_r \sim \theta$ を線形とする

 $C タイプ \cdots \psi \sim \theta$, $k_r \sim \theta$ を非線形とする

上記の内, $\psi \sim \theta \sim k_r$ の非線形性を考慮するために下記に 示す, Van-Genuchten (バンギノヒテン)の提案式⁹⁾を用 いた。なお, 式中の記号 S_e は有効飽和度, θ_s は飽和体積 含水率, θ_r は最小容水量を示す。

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{1 - 1/n}} \dots (6)$$
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_r - \theta_r} \dots (7)$$

さらに、Van-Genuchten は(6)式の水分保持関数について、 不飽和透水係数を求める Mualem (ムアレム)の式¹⁰⁾に代 入して、次式を求めている。

$$k_{r} = \frac{k_{\theta}}{k_{\theta}} = S_{e^{1/2}} [1 - (1 - S_{e^{1/m}})^{m}]^{2} \dots (8)$$

m = 1 - 1/n(9)

よって、 Bタイプ、 Cタイプの ($\psi \sim \theta \sim k_r$) の非線形パ ラメーターは、提案式中の係数 (α , n) を変化させ、実測 値の注入量と水位の経時変化が再現するように非定常解析 で求めた。

4.4 実測例

埼玉県の西南部のローム層において浸透試験を実施した 例を紹介し,不飽和浸透パラメーターの逆解析手法の有効 性と問題点について述べる。

図一11は、実測注入量とA、B、Cタイプの不飽和パラ

土と基礎, 37-6 (377)



図-12 不飽和浸透·浸潤図(150分経過後)

メーターを用いた時の解析注入量の経時変化を比較したも のである。この時逆解析から推定した Van-Genuchten 提 案式中の係数は, α =0.13, n=1.7, θ_r =0.2 である。

実測注入法と解析注入法を比較すると、A、B、Cタイ プの変化に対し、大きな注入差は認められない。また、非 定常の初期段階では実測値との差が認められるが、Van-Genuchten の提案式を用いた $\phi \sim \theta \sim k_r$ は、既往のローム 層データ¹¹⁾に近似した形となっており妥当性が高いと思わ れる。

図ー12は不飽和浸透による地下水面の上昇を実測値と比較したものである。この図はCタイプの解析水位が実測値に近似すること, また $\phi \sim \theta \sim k_r$ の特性により地下水面の変化速度が異なってくることを示している。

図一12中のA, B, Cタイプは解析上, 飽和度100%, 負の水頭値が0に近似する浸潤面であり, 2領域が示され ている。多段式地中比抵抗測定器で実測した浸潤面は,連 続した逆S字曲線を示し,解析結果とは異なっている。こ の原因としては,地中比抵抗器の比抵抗変化曲線は飽和度 がある値に達すると一定値となり,完全飽和状態と区別が できなくなるためと考えられる。

なお、解析に用いた ローム層の 飽和透水係数 (k_s) は米 国開拓局が提案したドライオーガー法¹²⁾を用いて実測注入 量から試算し、 $k_s=2.1\times10^{-3}$ cm/s を用いた。この結果解 析注入量と試験注入量とが近似することから、ドライオー ガー法を k_s 値の推定に用いることは有効であると思われ る。

今後は、 テンションメーター等を用いた $\psi \sim \theta \sim k_r$ の逆

June, 1989

解析を実施したいと考えている。

5. あとがき

本報告で紹介した三つの試験法は,地盤の透水性定数を 求める原位置試験法であるが,その結論を簡単にまとめる と,以下のようになる。

- (1) スラグテストは、我が国では普及していないが、ボ ーリング孔を利用した透水試験法として、Hvorslev の理論条件を満足する点において、優れた方法である。 従来、注入法と回復法とによる試験結果は、一致しな いといわれてきたが、スラグテストによれば両者は非 常によく一致した。
- (2) ボーリング孔で地下水の流速流向を測定し、地下水 位等高線などから動水勾配を求めると、実測値に近い 手法で透水係数が求められる。この方法で得た透水係 数は現実的な値を示した。
- (3) トレンチから注入試験を実施し、この試験結果を用いて、FEM 飽和一不飽和浸透解析より不飽和浸透特性を導く逆解析を試みた。そして、非線形を示す不飽和浸透特性は Van-Genuchten の提案式中のパラメーターを逆解析で決定することにより、求めることができる。

参考文献

- M. Juul Hvorslev: Time Lag and Soil Permeability in Ground-water Observations, Waterways Experiment Station Corps of Engineers, U.S. Army, pp.9~10, 1951.
- Hilton H. Cooper, Jr, John D. Bredehoeft and Istanos S. Papadorulos: Response of a Finite-Diameter Well to an Instantaneous Charge of Water, Water Resources Research, Vol.3, No.1, pp.263~269, 1967.
- 3) 小松田精吉・菊地敏則・津田豊:単一孔で測定できる地下水の流向流速計の開発意義と問題点、原位置透水試験法および地下水調査に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.131~138, 1985.
- 建設省評価書,地下水流向流速計の開発:建技評第83401~ 第83403,1984.
- 5) 榧根 勇・小林正雄・小松田精吉・平田洋一:琵琶湖へ流入 する地下水の流向,流速測定,地下水と井戸とポンプ, Vol. 26, No.7, pp.2~10, 1984.
- 6) 小林正雄:びわ湖底漏出地下水の直接測定による漏出量と水 質について、ハイドロジー、No.13、pp.51~59、1983.
- 7) 西垣 誠・竹下祐二:有限要素法による飽和一不飽和浸透解 析手法,浸透問題の数値解析法,土質工学会中国支部講習会, 1987.8.
- 8) 平山光信・津田宏一・吉村 淳:地下浸透工法の原位置試験 結果と解析,第23回土質工学研究発表会,pp.1839~1840, 1988.
- Van-Genuchten, M. Th: Aclosed-from equation for predicting tje hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 144, pp. 892~898, 1980.
- Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Res. Res, Vol. 12, pp.513~522, 1976.
- 11) 西垣 誠・楠見和紀:不飽和土の浸透特性の評価に関する考 察,不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム,土質工 学会, pp.179~186, 1987.
- 12) 土質工学会:オーガー孔を利用する方法,土質調査法,土質 工学会, pp.371.

(原稿受理 1898.3.16)