

ファジィ理論を利用した定常浸透流の観測に基づく 飽和透水係数の同定

大野 研

三重大学生物資源学部

Identification of Coefficients of Permeability Based on Observations of Steady-state Seepage Using the Fuzzy Theory

Ken OHNO

Faculty of Bioresources, Mie University

Abstract

When the earth structures, which retain water, are constructed, it is extremely problematic to find out the permeability which the earth structures have. Laboratory and *in-situ* permeability tests do not always represent actual fields. So, many methods, which identify coefficients of permeability, have been developed. Usually, a limited number of data is observed and only a small amount of information is obtained.

The method, which identifies the coefficients of permeability of existing fill-type dams, has been developed by using the fuzzy theory. The observed data have not only stochastic sources of error but also many fuzzy ones. The available information (e.g., engineering judgement) can be utilized in addition to observed data if the fuzzy theory is employed.

The identified coefficients of permeability represents very well the observed seepage behavior. The comparison between the coefficients of permeability measured in laboratory and *in situ*, and identified ones are performed, too. The measured coefficients of permeability in the laboratory are much smaller than the measured ones *in situ*. The measured coefficients of permeability *in situ* are nearer to the identified ones. If many comparisons between the coefficients of permeability obtained by different methods are performed, reliance of earth structure will be increased.

Key words: permeability · seepage · parameter identification · fuzzy theory

緒 言

浸透流の数値解析手法の発展に伴い、浸透特性を把握することが、土構造物の設計・施工において重要になってきている。しかし、室内透水試験や現場透水試験（揚水試験や、ボーリング孔や井戸を用いた注水試験や回復

試験など）で得られる浸透特性は、必ずしも実際の現場の浸透特性を適切に表しているとは考えられず、解析的な方法で浸透特性を同定する方法の開発が望まれている。したがって、浸透流の観測を基にして、浸透特性を同定するいくつかの方法（逆解析法）が提案されてきている^{1), 2), 3), 4)}。

逆解析法は、大きく分けて直接法と間接法に分けられる。直接法は、浸透流を支配する方程式を逆定式化する

もので、間接法は、計算して得られる浸透流の挙動が観測されたものに近くなるように浸透特性を改良していくものである。直接法は、観測誤差と地盤や土構造物のモデル化の誤りが無視できるほど小さければ、良い解を与えると思われる。しかし、実際にはそれらの誤差が無視できることは少ないと思われるので、間接法の方が実用的である。

間接法は観測誤差やモデル化の誤りに対処できるように、最小2乗法のような確率的な基準を持っているのが普通である。もし、十分な数の観測値が得られるのなら、これらの方法は非常に有効である。しかし通常、多量の観測値を得ることは困難である上に、それらの観測値には観測ミスや計器の故障など確率的には扱いにくい誤差が含まれる（もちろん、これらの誤差も多量の観測値が存在すれば、確率論に基づき取り扱うことが可能な場合もある）。

そこで、確率的には取り扱いにくい誤差を処理し、さらに、技術者の知識や経験を情報として取り扱い、情報不足（観測値が少ないこと）から生じる逆解析の信頼性の低さを補うために、ファジィ理論を導入することにする。

以下に、ファジィ理論を用いた逆解析法（間接法）を開発し、実際の土構造物の間隙水圧と浸透流量の観測に基づき、飽和透水係数を同定することより、その有効性を示す。

解析方法

2.1 支配方程式

飽和浸透流の支配方程式は、よく知られているように次式である。

$$k \Delta h = q^{uni} \quad (1)$$

ここで、 k : 飽和透水係数、 Δ : ラプラス、 h : 全水頭、 q^{uni} : 単位体積中の湧水量または排水量である。したがって、 h および q^{uni} が決定されると、 k が求まることになる。ただしここでは、(1)式を解くのに有限要素法を用いる。

2.2 逆解析のための前提

まえがきにも述べたように、少ない観測値に基づいて、

逆解析を行う場合には、技術者の知識を有効に利用することができれば、逆解析の信頼性は上昇することになる。

そこで、逆解析を行なう前に、技術者の知識に基づいて、同定すべき飽和透水係数を、ある程度推定できると考える。逆解析を行う際には、室内実験や現場実験によって、飽和透水係数が測定されているであろうから、この仮定は無理なものではない。

ここで推定された飽和透水係数を、今後「確からしい飽和透水係数」と呼ぶ。この「確からしい飽和透水係数」は、ファジィ集合であると考え、そのメンバーシップ関数は、ファジィ集合において標準的な関数である π 関数で表されていると考える。

次に π 関数の式を示し、Fig. 1 にその形を示す。

$$\pi(u; \zeta, \tau) = \begin{cases} 0, & u \leq \tau - \zeta \\ 2(u - \tau + \zeta)^2 / \zeta^2, & \tau - \zeta \leq u \leq \tau - \zeta / 2 \\ 1 - 2(u - \tau)^2 / \zeta^2, & \tau - \zeta / 2 \leq u \leq \tau + \zeta / 2 \\ 2(u - \tau - \zeta)^2 / \zeta^2, & \tau + \zeta / 2 \leq u \leq \tau + \zeta \\ 0, & u \geq \tau + \zeta \end{cases} \quad (2)$$

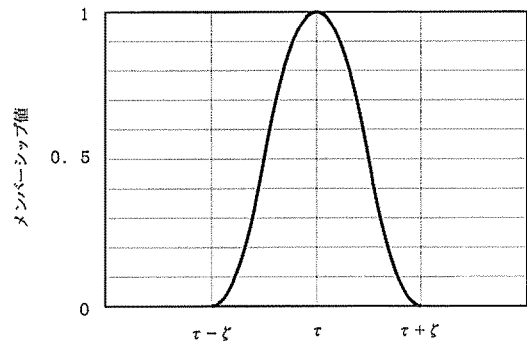


Fig. 1. π function.

π 関数は、Fig. 1 から分かるように τ 点で 1 となり、 $(\tau - \zeta)$ 点と $(\tau + \zeta)$ 点で 0 となる。すなわち、 τ 点はあるファジィ集合に完全に属し、そこから両側に ζ の幅はそのファジィ集合に属する可能性があることを示す。

ただし、「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合のメンバーシップ関数を、 π 関数で表す際には、 u に $\log_{10} k$ を代入することとする。これは、均一地盤と考えられている場所で行われた現場透水試験の結果の飽和透

水係数が対数正規分布するという知識⁵⁾とアンケートの結果得られた「技術者は透水係数をオーダーの単位で捉えている」という知識⁶⁾に基づいている。

以後、ファジィ集合で定義される変数は大文字で表すこととし、「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合を、 $K^{exp_1}, K^{exp_2}, \dots$ で表すことにする。

2.3 逆解析問題の定義

2.2で行った前提に基づき、間隙水圧(全水頭)と浸透流量(断面流量)の観測から飽和透水係数を同定する問題を、次式で示す多目的非線形計画問題で定義する。

$$\begin{aligned} \min f_1(k_1, k_2, \dots) &= \text{ABS}(h^{cal}_1(k_1, k_2, \dots) - h^{obs}_1) \\ \min f_2(k_1, k_2, \dots) &= \text{ABS}(h^{cal}_2(k_1, k_2, \dots) - h^{obs}_2) \\ &\vdots \\ \min f_{n+1}(k_1, k_2, \dots) &= \text{ABS}(q^{cal}_1(k_1, k_2, \dots) - q^{obs}_1) \\ \min f_{n+2}(k_1, k_2, \dots) &= \text{ABS}(q^{cal}_2(k_1, k_2, \dots) - q^{obs}_2) \\ &\vdots \end{aligned}$$

subject to

$$k_1 \in K^{exp_{1a}}, k_2 \in K^{exp_{2a}}, \dots \quad (3)$$

ただし、ABS: 絶対値、 h と q の添字: 観測点(n : 全水頭の観測点の総数)、 k の添字: 材料の種類を示す。また、 h^{cal} : 計算全水頭、 h^{obs} : 観測全水頭、 q^{cal} : 計算断面流量、 q^{obs} : 観測断面流量、 $K^{exp_{ma}}$: 材料 m の「確からしい透水係数」の a -レベル集合である。

次式に示す通常の集合(非ファジィ集合で、クリスプ集合と呼ぶ)を、ファジィ集合 X の a -レベル集合と呼び、 X_a と書く。

$$X_a = \{x | \mu_X(x) \geq a\}, \quad 0 < a \leq 1 \quad (4)$$

ここで、 μ_X : ファジィ集合 X のメンバーシップ関数である。Fig. 2に、あるファジィ集合 X のある値 a に対する a -レベル集合を示す。レベル集合は、ファジィ集合をクリスプ集合に結び付ける重要な考えである。

一般にファジィ集合 X は a -レベル集合を用いて、次式で書くことができる(分解定理)。

$$X = \bigcup_a X_a, \quad 0 < a \leq 1 \quad (5)$$

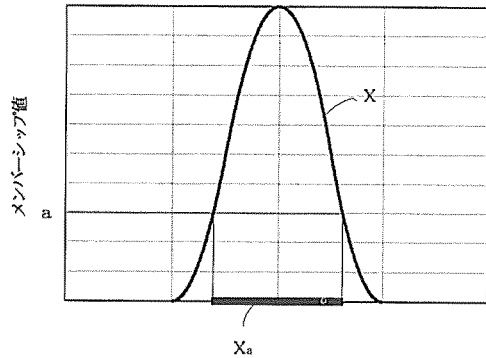


Fig. 2. a -level set X_a of a fuzzy set X .

ここで、 \cup : 集合和、 aX_a : スカラ a とレベル集合 X_a の代数積である。

K^{exp_a} の a -レベル集合は K が π 関数で表されており、凸集合であることが明白なので、

$$K^{exp_a} = \bigcup_b \left(\sup_{k \in K^{exp_b}} k \cup \inf_{k \in K^{exp_b}} k \right) \quad \text{ただし, } b \in \{x | 1 \geq x \geq a, x \text{ は実数}\} \quad (6)$$

とも定義される。そこでこれを、

$$K^{exp_a} = \bigcup_{b'} \left(\sup_{k \in K^{exp_{b'}}} k \cup \inf_{k \in K^{exp_{b'}}} k \right) \quad \text{ただし, } b' \in \{x | 1 \geq x \geq a, (x - \gamma) / \xi \text{ は整数}\} \quad (7)$$

と離散的に近似することにする。ここで、 γ と ξ : 任意の正の実数である。 ξ が小さいほど近似の精度が良いことになり、 γ は離散的近似の位置をずらすのに使う変数である。

上で述べた近似を解説するために、Fig. 3(a)に示すファジィ集合を考える。(6)式の定義にしたがうと、Fig. 3(a)のファジィ集合の $a = 0.2$ の時のレベル集合(0.2-レベル集合)は、Fig. 3(b)に示す太線の部分の横軸座標の集合である。(7)式の定義に従うと、 $\gamma =$

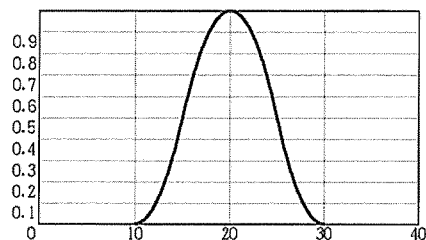


Fig. 3(a). A fuzzy set.

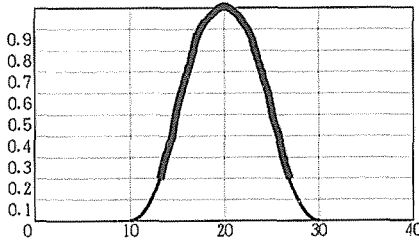


Fig. 3(b). 0.2-level set of a fuzzy set.

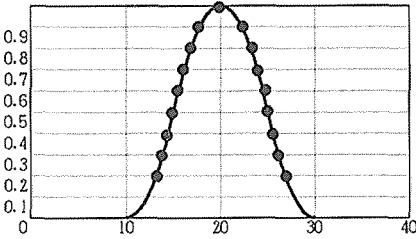


Fig. 3(c). Discrete approximation of 0.2-level set of a fuzzy set.

0.0, $\xi = 0.1$ のときの 0.2-レベル集合は, Fig. 3 (c) の ● 部分の横軸座標の実数の集合である。すなわち, Fig. 3 (c) に示す集合は, Fig. 3 (b) に示す集合の離散的な近似であると考えられる。

(6)式を(7)式で離散的に近似したために, 目的関数 f_i が取りうる値のベクトル f の全組合せを計算することができることになる。

2.4 最適解の判断基準

2.3でベクトル f の全組み合わせが計算できるようになったので, 後はこの中で最適なものを選べば解を得たことになる。最適解は, 全ての目的関数の値が最小になるものであるが, そのような解が得られることは少ない。したがって, 満足度が高い解であることを判断するためには, 目的関数を小さくするという以外に何らかの基準が必要となる。そこでその基準として, 菅野のファジィ積分⁷⁾を用い, 総合的な一致度を計算することにする。

菅野のファジィ積分は, 一般的に次式のように定義されている。

$$\begin{aligned} f_{\Omega} \mu(u) \circ g_z(\cdot) \\ = \sup_{D' \subset \Omega} \left(\inf_{u \in D'} \mu(u) \wedge g_z(D') \right) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, μ : ファジィ集合 U を 0 以上 1 以下の実数値に

対応づけるなんらかの関数, $u: U$ の要素, $\Omega, \Omega': U$ の部分集合, g_z : ファジィ測度である。

(8)式中のファジィ測度について, 以下で簡単な説明を加える。ファジィ測度は, 次の3つの条件を満たす集合関数である。すなわちある全体集合 u^{univ} (ただし, この全体集合の部分集合の集合はボレル集合体であるとする)において, その任意の部分集合 u^{sub}_n を考えたとき,

(1) $0 \leq g_z(u^{\text{sub}}_n) \leq 1$ で, $g_z(\phi) = 0$ かつ $g_z(u^{\text{univ}}) = 1$ である。

(2) $u^{\text{sub}}_1, u^{\text{sub}}_2$ にたいして, $u^{\text{sub}}_1 \cap u^{\text{sub}}_2 = \phi$ の時,

$$g_z(u^{\text{sub}}_1 \cup u^{\text{sub}}_2) = g_z(u^{\text{sub}}_1) + g_z(u^{\text{sub}}_2) + z g_z(u^{\text{sub}}_1) g_z(u^{\text{sub}}_2), \quad -1 < z < \infty$$

(3) $u^{\text{sub}}_n, 1 \leq n < \infty$ に対して, $\{u^{\text{sub}}_n\}$ が単調列の時,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_z(u^{\text{sub}}_n) = g_z(\lim_{n \rightarrow \infty} u^{\text{sub}}_n)$$

である。ここでは, z を 0 としたときのファジィ測度 $g_{z=0}$ を各観測値の重視度とする。

また, μ 関数は各観測値と計算値の一致度として, 次式で定義する。

$$\mu(e_i) = (\varepsilon - e_i) / \varepsilon \quad (9)$$

$$e_i = \text{ABS}((h^{\text{cal}}_i - h^{\text{obs}}_i) / h^{\text{obs}}_i) \quad (10)$$

$$e_{n+j} = \text{ABS}((q^{\text{cal}}_j - q^{\text{obs}}_j) / q^{\text{obs}}_j) \quad (11)$$

ここで, $\varepsilon: 0 \leq \varepsilon \leq 1$ の任意の実数, n : 全水頭の観測点の総数, 添字 i, j : 観測点を表す。(10)式, (11)式に示す e は, 計算値と観測値の相対的なずれを表し, 不一致度とも呼べるものである。これと任意の実数との相対的なずれを出したのが(9)式であり, 不一致度が一致度に変換されることになる。

この結果, 次式で示される各観測点での一致度のファジィ積分の答えは, 観測値と計算値の総合的な一致度となる。ただし, この際有限集合 $u^{\text{univ}} = \{e_1, \dots, e_m\}$ 上の関数 $\mu(e_i)$ が, $\mu(e_1) \geq \mu(e_2) \geq \dots \geq \mu(e_m)$ になるように, 番号を付け直されているものとする (ここで, m : 全水頭と断面流量の観測点の総数)。

$$\begin{aligned} f_{u^{\text{univ}}} \mu(e_i) \circ g_z(\cdot) \\ = \max_{i=1}^m (\min(\mu(e_i), \kappa(e_i))) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \kappa(e_i) &= g_z(e_i) + \kappa(e_{i-1}) + z g_z(e_i) \kappa(e_{i-1}), \\ \kappa(e_1) &= g_z(e_1) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで計算された総合的な一致度の一番大きなケースが、上記多目的非線形計画問題の答えである。すなわち、2.3で定義した逆解析問題は、総合的な一致度最大化問題と考えられることになる。

2.5 同定された飽和透水係数

2.3で定義した多目的非線形問題を、2.4で定義した判断方法によって判断すると、次式によって同定された飽和透水係数の組合せの集合 ν が確定的に求まることになる。

$$\nu = \{ (k_1, k_2, \dots) \mid f_{\text{min}} \mu(e_i(k_1, k_2, \dots)) \text{ が最大} \} \quad (14)$$

しかし、(7)式で「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合の a -レベル集合を、離散的に近似したことから発生する不確実性と、いくつかの飽和透水係数の組合せの総合的な一致度が同じ値になるという可能性が存在する。そこで、(14)式で求めた飽和透水係数 k の最大値と最小値を含むようなファジィ集合の組合せの集合 N を求めるのが合理的である。

そこで、「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合の中から、求めた k の最大値より大きい値の中の最小値 $k^{\text{max}+}_i$ を次式により求める (添字 i : 材料の種類)。

$$k^{\text{max}+}_i = \min_{k_i \in k^{\text{big}}_i} k_i \quad (15)$$

$$k^{\text{big}}_i = \{k_i \mid k_i \in K^{\text{exp}}_{ia}, k_i > k^{\text{max}}_i, a = \min_{0 < x} x\} \quad (16)$$

$$k^{\text{max}}_i = \{k_i \mid (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots) \in \nu, k_i \text{ が最大}\} \quad (17)$$

同様に「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合の中から、求めた k の最小値より小さい値の中の最大値 $k^{\text{min}-}_i$ を次式により求める。

$$k^{\text{min}-}_i = \max_{k_i \in k^{\text{small}}_i} k_i \quad (18)$$

$$k^{\text{small}}_i = \{k_i \mid k_i \in K^{\text{exp}}_{ia}, k_i < k^{\text{min}}_i, a = \min_{0 < x} x\} \quad (19)$$

$$k^{\text{min}}_i = \{k_i \mid (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots) \in \nu, k_i \text{ が最小}\} \quad (20)$$

これらの最小値と最大値の平均を求めた飽和透水係数の中央値 (τ_i)、最小値と最大値の差の平均を求めた飽和透水係数の幅の差 (ζ_i) と考え、次の式を定義する。

$$\zeta_i = (\log_{10} k^{\text{max}+}_i - \log_{10} k^{\text{min}-}_i) / 2 \quad (21)$$

$$\tau_i = (\log_{10} k^{\text{max}+}_i + \log_{10} k^{\text{min}-}_i) / 2 \quad (22)$$

ここで定義した ζ_i と τ_i を使って、同定された飽和透水係数 k のファジィ集合の組合せの集合 N を次式で定義する。

$$N = \{ \bigcup \pi(\log_{10} k_1; \zeta_1, \tau_1) \mid k_1, \bigcup \pi(\log_{10} k_2; \zeta_2, \tau_2), \dots \} \quad (23)$$

ここで、 \bigcup : 集合和を表す。ファジィ理論においては、例えば $\pi(\log_{10} k_1; \zeta_1, \tau_1) \mid k_1$ は、ある要素 k_1 に対して、メンバーシップ値 $\pi(\log_{10} k_1; \zeta_1, \tau_1)$ が対応していることを表すので、 $\bigcup \pi(\log_{10} k_1; \zeta_1, \tau_1) \mid k_1$ は、その集合和からなるファジィ集合を表す。

解 析 例

ある既存フィルダムの間隙水圧と浸透流の観測値を基に、そのダムの飽和透水係数を本逆解析手法で同定し、設計飽和透水係数、現場透水試験による飽和透水係数と比較する。そのダムの標準断面図は、Fig. 4に示すもので、2種類の遮水材からなるゾーン型のものである。

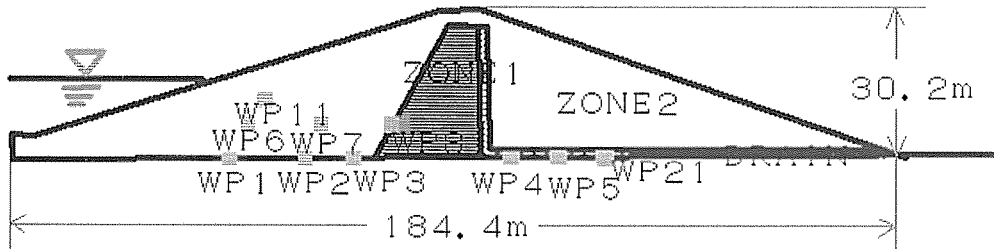


Fig. 4. The fill-type dam's standard cross section and underground instrument's positions.

3.1 設計飽和透水係数

ゾーン1の設計飽和透水係数は、 1.0×10^{-6} cm/s であり、ゾーン2の設計飽和透水係数は、 5.0×10^{-5} cm/s である。これらは、室内透水実験から求められたものと考えられるので、要素の飽和透水係数としてはかなり信頼性が高いものと思われる。

3.2 現場透水試験による飽和透水試験

ダム施工時の施工管理のために行なう、現場透水試験の透水係数を調査する。

ゾーン1に関しては、58個の測定があり、その平均は 4.1×10^{-5} cm/s、標準偏差は 1.5×10^{-5} cm/s である。分布形を対数正規分布と仮定すると、平均は 3.8×10^{-5} cm/s、標準偏差は 0.16 (オーダー) である。

ゾーン2に関しては、88個の測定があり、その平均は 3.0×10^{-4} cm/s、標準偏差は 3.0×10^{-4} cm/s である。分布形を対数正規分布と仮定すると、平均は 1.9×10^{-4} cm/s、標準偏差は 0.66 (オーダー) である。

現場透水試験による飽和透水係数は、設計透水係数よりも1オーダー以上大きくなっていることが、注目される。

3.3 逆解析による飽和透水係数

2節で提案した方法にしたがって、Fig. 4のダムについて、ゾーン1とゾーン2の飽和透水係数を同定する。

観測データとしては61年度と62年度半期のダム貯水位、間隙水圧計による水圧観測、流量の観測を用いる。逆解析の前処理として、ダム水位と各観測値との間の相関をとり、回帰計算をする。そして得られた回帰直線の値を、各貯水位での観測値とする。これは、降雨の影響、ダムの貯水位の変化による浸透流の非定常的挙動の影響等を打ち消すためである。また、観測装置の異常の発見にも役立つ。Fig. 5に回帰の一例を示す。

3.1で得られている飽和透水係数に基づいて、ゾーン1の「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合 K^{exp}_1 とゾーン2の「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合 K^{exp}_2 を次式のように仮定する。

$$K^{\text{exp}}_1 = \int \pi(\log_{10} k_1; 2.0, \log_{10}(1.0 \times 10^{-6})) | k_1 \quad (24)$$

$$K^{\text{exp}}_2 = \int \pi(\log_{10} k_2; 1.0, \log_{10}(5.0 \times 10^{-5})) | k_2 \quad (25)$$

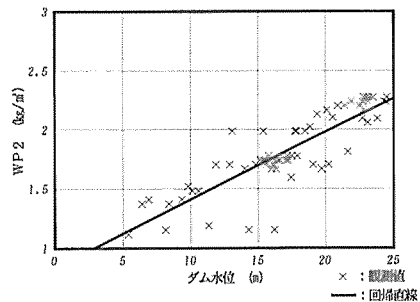


Fig. 5. An example of the regression analysis.

即ち、ゾーン1の「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合は、設計飽和透水係数である可能性が一番高く、それを中心として2オーダーの幅を持つと仮定する。ゾーン2の「確からしい飽和透水係数」のファジィ集合も、設計飽和透水係数である可能性が一番高く、それを中心として1オーダーの幅を持つと仮定する。これは、飽和透水係数が小さい方がばらつきが大きいであろうという判断に基づいているが、3.2での現場透水試験による飽和透水係数のばらつき具合とは矛盾する(3.2では、ゾーン2の飽和透水係数の方が大きくばらついている)。

Fig. 4には埋設されている間隙水圧計の位置も示してある。この10個の間隙水圧計の観測値と堤体全体を通る流量の1つの観測値を使用して、6つの貯水位に対してゾーン1とゾーン2の飽和透水係数を同定する(ただし、ドレーンの透水係数は、 5.0×10^{-4} cm/sに固定した)。

Table 1に、その同定結果を示す。ただし、流量の重視度 g_z は間隙水圧観測の2倍とした。Table 1から分かるように、同定された飽和透水係数は、貯水位が低いところではゾーン1で 3.57×10^{-5} cm/s 程度、ゾーン2で 2.99×10^{-4} cm/s 程度と得られている。貯水位が高くなると若干異なった値を同定している。同定の対象に選んだダムは自己流域が小さく、取水路から導水するダムであるので、水利権の関係もあり、下流側の施設が完成するまでは、自己流域の水だけ貯水したことが数回あった。同定に用いた観測データは、試験湛水時のものため、不飽和の影響が考えられるが、その影響が低い貯水位の時には表れず、高い貯水位の時に表れたとも考えられる。しかし、いずれにしても同定された飽和透水係数は、現場透水試験により求めた飽和透水係数に非常に近い値となった。

解析前に予測した「確からしい飽和透水係数」のファ

Table 1. Identified coefficients of permeability

貯水位 (m)	ゾーン 1 の飽和透水係数 (cm/s)	
7.7	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (3.57 \times 10^{-5})) k_1$
10.5	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (3.57 \times 10^{-5})) k_1$
13.3	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (3.57 \times 10^{-5})) k_1$
16.2	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (2.33 \times 10^{-5})) k_1$
19.1	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (1.66 \times 10^{-5})) k_1$
22.0	$\int \pi$	$(\log_{10} k_1; 0.2, \log_{10} (1.28 \times 10^{-5})) k_1$

貯水位 (m)	ゾーン 2 の飽和透水係数 (cm/s)	
7.7	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (2.99 \times 10^{-4})) k_2$
10.5	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (2.99 \times 10^{-4})) k_2$
13.3	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (2.99 \times 10^{-4})) k_2$
16.2	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (2.99 \times 10^{-4})) k_2$
19.1	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (1.03 \times 10^{-4})) k_2$
22.0	$\int \pi$	$(\log_{10} k_2; 0.1, \log_{10} (2.41 \times 10^{-4})) k_2$

ジィ集合と同定された飽和透水係数のファジィ集合の関係を、貯水位 16.2 m の場合に例にとり図示すると Fig. 6 のようになる。この図に示すように、解析前の不確かさが減少する（ファジィ集合の幅が狭くなる）のが本方法の特徴である。

なお、本逆解析法が、観測データをよく表現する飽和透水係数を同定したかを確認するために、貯水位 16.2 m の場合を例にとり、同定された飽和透水係数のメンバーシップ値 1.0 を持つ値を用いて、計算を行った。

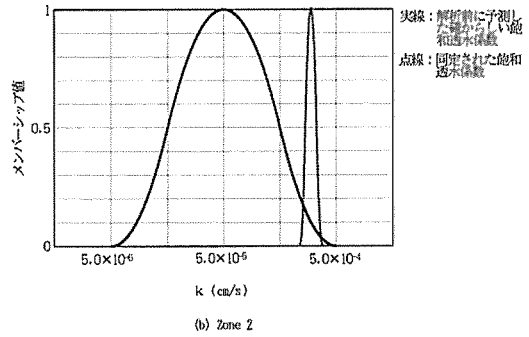
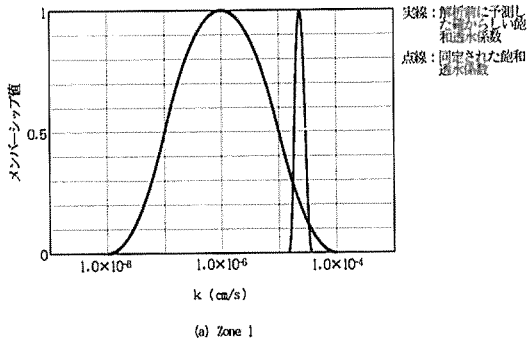


Fig. 6. The comparison between the coefficients of permeability which are expected to be valid before identification and the identified ones at 16.2 m's storage level.

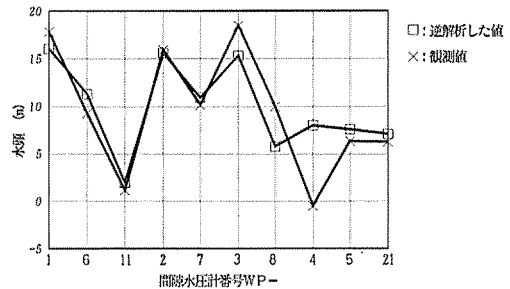


Fig. 7. The comparison between the observed pore pressures and the ones calculated by the identified coefficients of permeability which have membership values of 1.0.

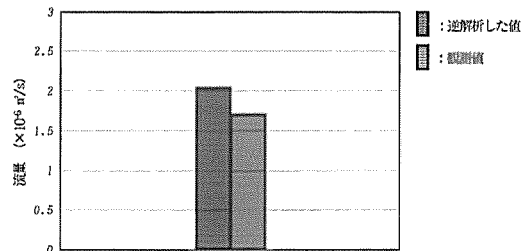


Fig. 8. The comparison between the observed discharge and the one calculated by the identified coefficients of permeability which have membership values of 1.0.

有限要素法により計算した水圧と観測水圧（どちらも水頭表示）の比較を Fig. 7 に、計算した流量と観測流量の比較を Fig. 8 に示す。どちらもよく一致している。特に、間隙水圧計 WP 4 は、異常なデータを観測してい

と思われるが、それにも係わらず他の観測値を計算値が適切に表現していることに、誤差に強い本逆解析法の特徴がでていると思われる。

ま と め

定常浸透流の観測値（間隙水圧、漏水量、貯水位）から、飽和透水係数を同定する方法を開発し、実際のフィルダムについて、設計飽和透水係数、現場透水試験による飽和透水係数、逆解析による飽和透水係数を比較した。

逆解析の結果、観測値をよく再現する飽和透水係数が求まった。そして、その値は逆解析を行う貯水位によって若干の違いはあったものの、現場透水試験により求まった飽和透水係数に非常に近い値になった。逆解析により求まった飽和透水係数が、現場透水試験による飽和透水係数に近い値を示したことは、この一例に限れば施工技術者にとって、心強い結果である。しかし、その値は施工前に予測したものより大きいのであるから、場合によってはダムの原設計に対して配慮が必要である。

なお、ここで開発した飽和透水係数の逆解析法には、次に示す3つの利点があると思われる。

1) 逆解析問題を多目的非線形計画問題としているため、観測値の各種ノイズに影響されることが少ない。

2) 同じく多目的非線形計画問題として問題を解いているためと総合判断に菅野のファジィ積分を用いているために、多種類の種類の観測値（今回の場合は水圧と流量）を総合して同定ができる。

3) 設計透水係数、施工管理値などの既に蓄積した当該土構造物の透水係数に関するデータおよび透水係数に関する技術者の知識を逆解析に生かすことができる。

この利点のうち、特に2)と3)は、逆解析に用いる情報の量を増やすことになり、逆解析の信頼性を上げることになる。

今後も、この逆解析法により求まる飽和透水係数、室内実験により求まる飽和透水係数、現場透水試験により求まる飽和透水係数を比較していけば、土構造物のよりよい設計に役立つ、信頼性の高い飽和透水係数に関する知識が蓄積されていくことになる。

参 考 文 献

- 1) 村上 章・長谷川高士：Kalmanフィルタ・有限要素結合解法による非定常問題同定・推定同時解析，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.1501—1502, 1985
- 2) 河野伊一郎他：揚水試験による不飽和浸透特性の算定法，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.1833—1834 (1988)
- 3) Katsuhiko Arai et al. : Parameter Estimation of Unconfined Aquifer by Measuring Change of Groundwater Level, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 4, pp. 129—134 (1985)
- 4) Wiliam W-G, Yeh : Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology : The Inverse Problem, Water Resources Reserch, Vol. 22, No. 2, pp. 95—108 (1986)
- 5) Freeze, R. A. : A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, Water Resources Research, Vol. 11, No. 5, pp. 725—741 (1975)
- 6) 大野 研・近藤 武：ファジィ集合理論による透水試験結果の評価，土と基礎，Vol. 36, No. 9, pp. 31—35 (1988)
- 7) 浅居喜代治・C. V. ネゴイタ：あいまいシステム理論入門，オーム社，pp. 133—146 (1988)