

III-370 非定常浸透流解析（差分法）による逆解析の一手法について

東電設計㈱ 土木本部 正員 宮田 美幸
同上 水力第2部 高橋 信之

1. はじめに

ダム設計において、基礎岩盤の透水性を把握することは非常に重要である。岩盤の透水性は、ルジオンテスト、定水位透水試験、トレーサー調査等により推定されているが、これらの測定値が透水係数を適確に表わしているとは言い難いのが現状である。また、フィルダムコアの仕上がり透水係数を推定することも重要な問題の一つである。

従来、透水係数を浸透流解析により推定する方法として、透水係数をパラメトリックに変化させて浸透流解析を行ない、計算値と実測値の水位および流量を一致させるというシミュレーション計算が行なわれてきた。しかし、この方法では、①設定した透水係数の範囲で、計算値と実測値の水位および流量が一致しない②シミュレーションの試算回数が多い等の問題が生じる場合があった。

今回、岩盤、フィルダムコア等の透水係数を推定する方法として、非定常浸透流解析（差分法）による逆解析の一手法を考案したので、報告する。

2. 非定常浸透流解析（差分法）による逆解析プログラム

2-1 基礎方程式

$T=T_1$ 時刻および $T=T_2$ 時刻における水面形が既知の場合の透水係数および水頭分布を求める方法を以下に説明する。基礎方程式の一覧表を表-1に示す。①～④は、定常の浸透流解析に用いられる式である。⑤水位変動点では、 $T=T_1$ 、 $T=T_2$ 時刻における計算上の水位上昇速度の平均値が、実測値の水位上昇速度（ $\Delta\eta/\Delta t$ ）に等しいと考慮して式を成立させた。なお、未知透水係数がN種類ある場合、水位変動点をN点選定し、（未知数）＝（式の数）とする。

計算は、①～⑤式を連立させて解くが、②、⑤式は未知の透水係数および水頭の2次式となっているため、Newton-Raphson法により連立2次方程式を解く。

2-2 計算手順

計算のフローを図-1に示す。計算手順は、はじめに透水係数の第1近似値を設定し(1)、 $T=T_1$ 、 $T=T_2$ 時刻において定常の浸透流解析を実施し、水頭の第1近似値を求める(2)。次に透水係数、水頭の近似値を用いて、①～⑤式を作成し、Newton-Raphson法により近似値の補正値を求める(3)。補正値が許容誤差より大きい場合は、近似値を修正し、近似値の精度を高め、再び①～⑤式を作成し、補正値を求める(4)、(5)、(3)。以下、この手順を補正値が許容誤差以下となるまで繰り返す。

3. 計算例

計算例として、図-2に示す境界条件をもつ鉛直断面を想定した。ただし、 $T_2=1$ 時間後の水面形は、 k_1 、 k_2 、 k_3 を各々1, 5, 10×10^{-5} cm/sとして非定常浸透流解析を行なって求めたものである。ここでは、 T_1 ：初期および T_2 ：1時間後の水面形を既知として、 k_1 、 k_2 、 k_3 を未知として逆解析を行ない、上記の透水係数になるかどうかで、本解析手法の妥当性を検証する。

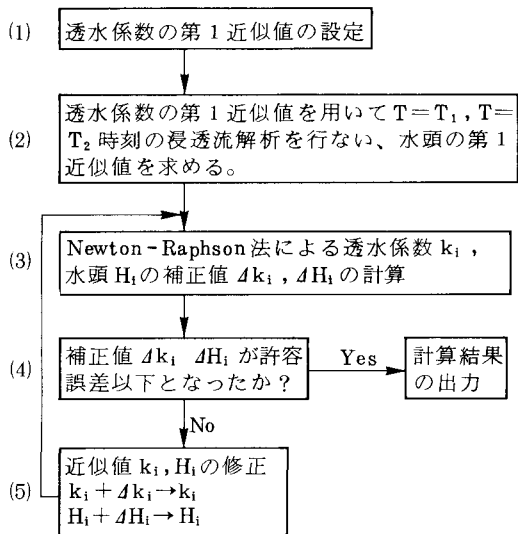


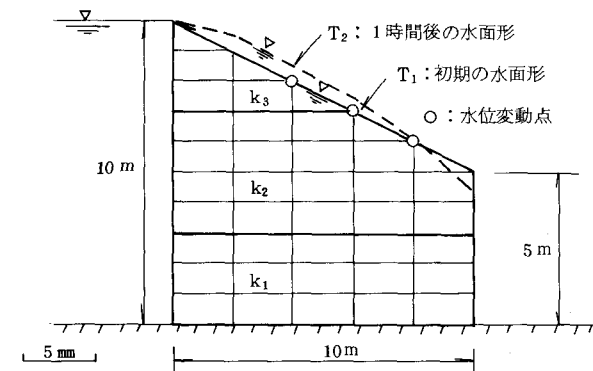
図-1 計算のフロー

表-1 基礎方程式一覧表

分類	基礎方程式	格子図	差分式
①一様な透水係数の層	$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$ ϕ : 速度ポテンシャル(=KH) K: 透水係数, H: 全水頭		$\frac{H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} = 0$
②透水係数の異なる層の境界	$-\left(\frac{\partial \phi}{\partial n}\right)_I = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial n}\right)_{II}$ n: 層の境界の法線方向 I: 第I層 II: 第II層		$K_I \left(\frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{\Delta x} \sin \theta + \frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{\Delta y} \cos \theta \right) = K_{II} \left(\frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{\Delta y} \cos \theta + \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{\Delta x} \sin \theta \right)$
③不透水層との境界	$-\left(\frac{\partial \phi}{\partial n}\right) = 0$ n: 不透水層の法線方向		$\frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{\Delta y} \cos \theta + \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{\Delta x} \sin \theta = 0$
④水頭が既知の点	$\phi = k_i \times H_0$ H_0 : 既知の水頭値		$H_{i,j} = H_0$
⑤水位変動点	$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{dy}{dx}$ $d\eta/dt$: 実測の水面上昇速度 i, j: $T=T_1$ 時刻の格子番号 I, J: $T=T_2$ 時刻		$\frac{d\eta}{dt} = \frac{k_i}{2} \left(-\frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{\Delta y} - \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{\Delta x} \cdot \frac{dy}{dx} \right)$

表-2 計算結果

ケース	透水係数の第1近似値 (10^{-5} cm/s)			透水係数の計算結果 (10^{-5} cm/s)		
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
1	1	5	10	1.02	5.03	10.01
2	0.1	0.1	0.1	7.71	22.23	12.14
3	1	1	1	"	"	"
4	5	5	5	1.02	5.03	10.01
5	10	10	10	"	"	"
6	100	100	100	"	"	"
7	1000	1000	1000	"	"	"
8	10^4	10^4	10^4	"	"	"
9	10^6	10^6	10^6	"	"	"
10	100	50	10	"	"	"
11	10	5	1	7.71	22.23	12.14



水位変動長さのスケール

図-2 計算モデル

種々の透水係数の第1近似値に対する透水係数の計算結果を表-2に示す。表-2より、透水係数は2組の解が求まり、ケース2、3、11以外は正解に収束している。2組の解は、いずれも連立2次方程式の解と考えられるが、実際の問題では、工学的な判断により採用する値を決める。なお、本計算の繰り返し回数は、全ケース共10回程度で収束した。また、本解析手法の透水係数は、間隙内の実透水係数である。

4. おわりに

今回提案した解析手法により、異なる2つの時刻における水面形が設定された場合、透水係数を算定することがある程度可能なことが判った。しかし、①本計算例は簡単なモデルである②透水係数の第1近似値の設定の違いにより、異なる透水係数に収束することがある③水位変動点の選定方法④水面形の若干の違いによる透水係数への影響の把握等、今後これらの点について検討していく予定である。