

傾斜不透水層上の異方性フィルダム内の浸透流について

中 崎 昭 人・篠 和 夫

(農学部構築工学研究室)

Seepage Flow of an Earth Dam with Anisotropy on an Inclined Impervious Base

Akito NAKAZAKI and Kazuo SHINO

(Laboratory of Construction Engineering, Faculty of Agriculture)

Abstract: In our country, there are so many earth dams. Most of all those dams are built on an inclined impervious base because of a steep slope of the river bed. In spite of this fact, seepage flow of an earth dam is ordinarily discussed under the assumption that the river bed is usually level.

So, this paper discusses a seepage flow of the earth dam on an inclined impervious base. Further, the seepage characteristic of dam is treated as anisotropic.

Finite element method is used to obtain the situation of free surface, exit point and quantity of seepage. Results obtained are compared with the results under the condition that the impervious base is assumed level. Parameters used are gradient of dam slope, gradient of impervious base, water level and the ratio k_v/k_h , where k_v and k_h are coefficient of permeability of vertical and lateral direction, respectively.

Results are as follows: Free surface lowers with increasing gradient of impervious base. Each k_v/k_h , relation between q/q_0 and H/H_0 is expressed in terms of the curve of second degree, where H_0 and q_0 are water level and quantity of seepage, respectively, in the condition which the impervious base is level and H and q are same as before in the condition which impervious base are inclined.

ま え が き

フィルダムの安定を論ずる際に浸潤線の位置及び浸透流量を知ることは、不可欠の事柄である。フィルダム内の浸潤線の位置や浸透流量を求める方法は多いが、その中でも比較的簡単で、実際とよく適合するということから、Casagrandeの方法が広く利用されている。しかしながら、この方法は、フィルダムが水平な不透水層上にある場合についての解を与えるものである。

わが国のように地形が狭小で傾斜が比較的急なところでは、フィルダムを水平な不透水層上に築造することは一般にありえず、傾斜した不透水層上に構築することになる。例えば、太田川の明神ダムでは、河床勾配 $\tan \theta$ が平均約0.125である¹⁾。

また、一般的にローラーによる締固めの結果、盛土が水平な層状になり、鉛直方向の透水係数 k_v と水平方向の透水係数 k_h とに差異が生じて、フィルダムは、いわゆる異方性となる。異方性の程度として、例えば、タンピングローラーで締固めた場合は、 k_v/k_h が1/2~1/10程度、タイヤロー

ラーによる場合は、1/20~1/30程度になるといわれている²⁾。

従って、本研究では、異方性フィルダムが、傾斜した不透水層上に設けられた場合の浸潤線の位置及び浸透流量を、有限要素法を用いて求め、不透水層の傾斜度及び透水係数比がそれらに及ぼす影響を明らかにすることにした。

有限要素法による解法

周知のように、2次元定常浸透流は微分方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad \dots\dots(1)$$

を、境界条件

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi(x, y) \\ k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} l_y + q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 l_x, l_y : 境界上の外向き方向余弦、 q : 単位面積当り流出入量、
 の元で解くことに帰着するが、その有限要素表現は

$$K\phi = Q \quad \dots\dots(3)$$

と表される。ここに、 K : 透水行列、 ϕ : ポテンシャル、 Q : フラックスベクトル、である。

(3)式中の透水行列 K に含まれる透水係数 k_x, k_y は、 x, y 座標軸が異方性の軸と一致する場合にのみ用いることができる。本論文で扱う異方性もこの場合に相当するが、ここでは、水平座標を $\sqrt{k_x/k_y}$ 倍に縮めた変換面について、透水係数が $\sqrt{k_x \cdot k_y}$ 倍の等方性として解を求めた(この部分については文献3)を参照されたい)。

また、浸出点の決定は、河野の方法⁴⁾によった。

計 算 方 法

図1に示すように、フィルダムの上・下流斜面を延長し、その交点の、下流斜面先からの高さを H_a とし、同様に貯水位の下流斜面先からの高さを H_0 とする。

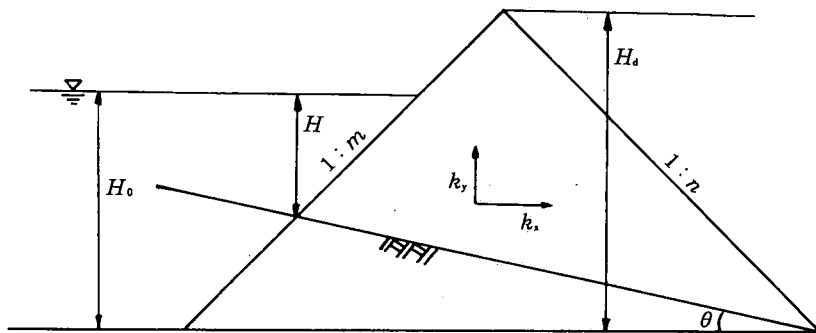


図-1 ダムの形状図

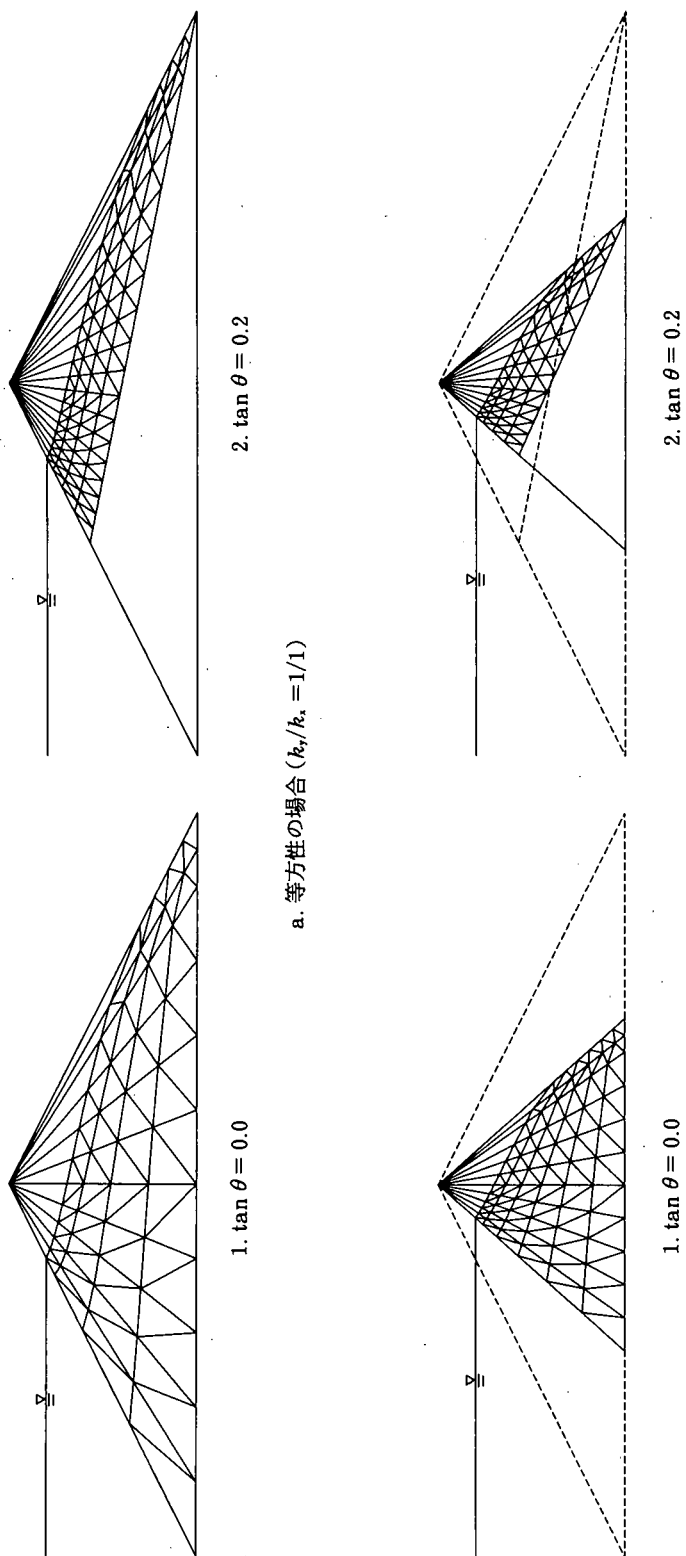


図-2 有限要素分割の1例

上・下流斜面勾配 (m, n) が $(2.0, 2.0)$, $(2.5, 2.0)$, $(2.5, 2.5)$, $(3.0, 2.5)$, $(3.0, 3.0)$ 及び $(3.5, 3.0)$ の6通りの断面形について、貯水位 H_0/H_d が、0.5, 0.6, 0.7及び0.8の高さにある場合のそれぞれについて不透水層の勾配 $\tan \theta$ を4～6通りに変化させ、さらに、透水係数比 k_r/k_s を1/1, 1/2, 1/5, 1/10, 1/20及び1/30の6通りに変化させて、それぞれの場合についてフィルダム内の浸透流を計算した。

図2には、等方性の場合と異方性の場合の1例(透水係数比1/5)について、それぞれ不透水層の勾配 $\tan \theta$ が0.0と0.2の場合についての要素分割を示した。

図中、異方性の場合には、解析のために縮小した断面を実線で、相当する原断面を破線でそれぞれ示してある。

計算結果とその考察

1. 浸潤線について

上・下流斜面勾配が $(2.0, 2.0)$, H_0/H_d が0.8で、 $\tan \theta$ を0.0あるいは0.2とした場合の、 k_r/k_s が1/1と1/30との浸潤線を比較したものが図3である。

これらの図から、透水係数比の変化に関わらず、上流側の浸潤線は不透水層の傾斜の変化によってほとんど変化さないが、下流側にいくに従い、不透水層が傾斜すると、浸潤線も若干下側に変化することがわかる。また、図3aと同bとを比較すれば、不透水層の傾斜が同じであれば、透水係数比が小さいと流入直後から浸潤線が高く、下流にいくにつれてその差が増大する傾向がみられることも指摘できる。これについては、不透水層が水平である場合について、沢田等⁹⁾が報告している。

2. 浸出点について

各透水係数比ごとの各ダム形について、それぞれ横軸に不透水層が傾斜している場合の貯水深、不透水層が水平の場合の貯水深に対する比 H/H_0 、縦軸に、下流法先の位置から計った不透水層が

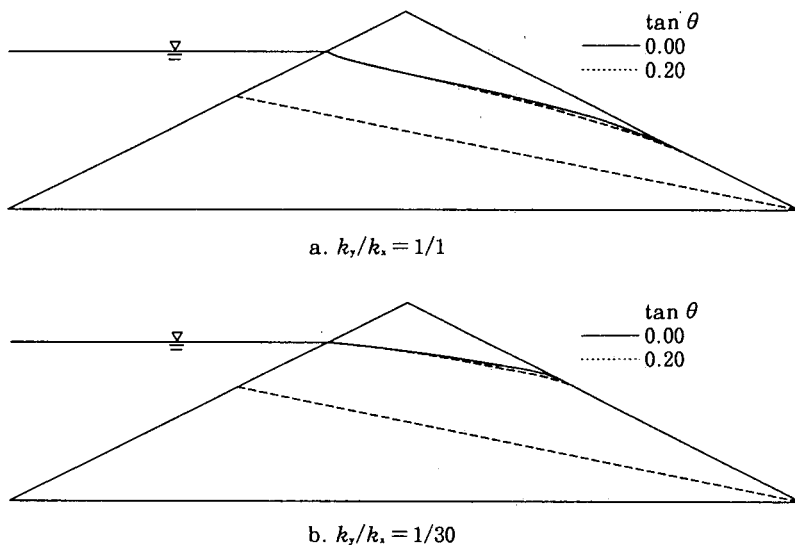


図-3 不透水層の傾斜による浸潤線の違い

傾斜している場合の浸出点の高さの、不透水層が水平の場合の浸出点の高さに対する比 y/y_0 をとり、 H_0/H_a をパラメータとして図を描くと、例えば、 k_y/k_x が $1/1$ で (m, n) が $(2.0, 2.0)$ の場合には図4のようになる。

ところが、ここに図示した関係は同一の透水係数比の場合には、ここで扱った6通りの上・下流斜面のダム形では余り変化しない。従って、各透水係数比ごとに各ダム形をまとめてプロットしたものが図5である。

これらの図から、透水係数比が小さくなるとややばらつきが大きくなるものの、 H_0/H_a の値ごとにほぼ1本の関係曲線で表され、 H_0/H_a が減少するにつれて y/y_0 が減少するが、 H/H_0 が大きいときの y/y_0 の減少割合が小さく、 H/H_0 が小さくなると y/y_0 の減少割合が増大すること、同一の H/H_0 に対する y/y_0 の値は、 H_0/H_a が大きいほど大きい値を示すこと、等が分かる。

3. 浸透流量について

各透水係数比ごとの各ダム形について、それぞれ横軸に H/H_0 、縦軸に q/q_0 (ここに、 q : 各ダム形における浸透流量、 q_0 : 不透水層が水平である場合のそのダム形における浸透流量) をとり、 H_0/H_a をパラメータとしてそれらの関係をプロットすると、 H_0/H_a の値の如何に関わらず、透水係数比、ダム形の組合せごとにほぼ1つの曲線で表される。従って、各 k_y/k_x ごとに全ダム形について上の関係をプロットすると図6のようになる。

これらの図から、透水係数比が小さくなるとややばらつきが大きくなるものの、 H/H_0 が1及び0のとき、それぞれ q/q_0 が1及び0を示すような2次関係として、 H/H_0 と q/q_0 の関係が示されることが分かる。

そこで、この2次曲線を

$$\frac{q}{q_0} = \sqrt{a\left(\frac{H}{H_0}\right) + \frac{(a-1)^2}{4}} - \frac{(a-1)}{2} \quad \dots\dots(4)$$

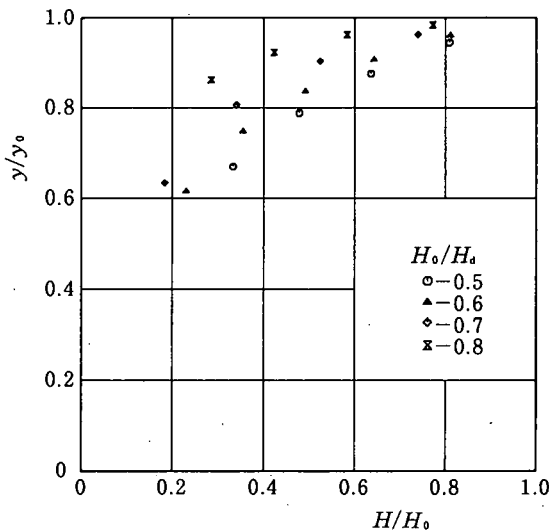


図-4 H_0/H_a をパラメータとした場合の H/H_0 と y/y_0 との関係 ($k_y/k_x = 1/1, m = 2.0, n = 2.0$)

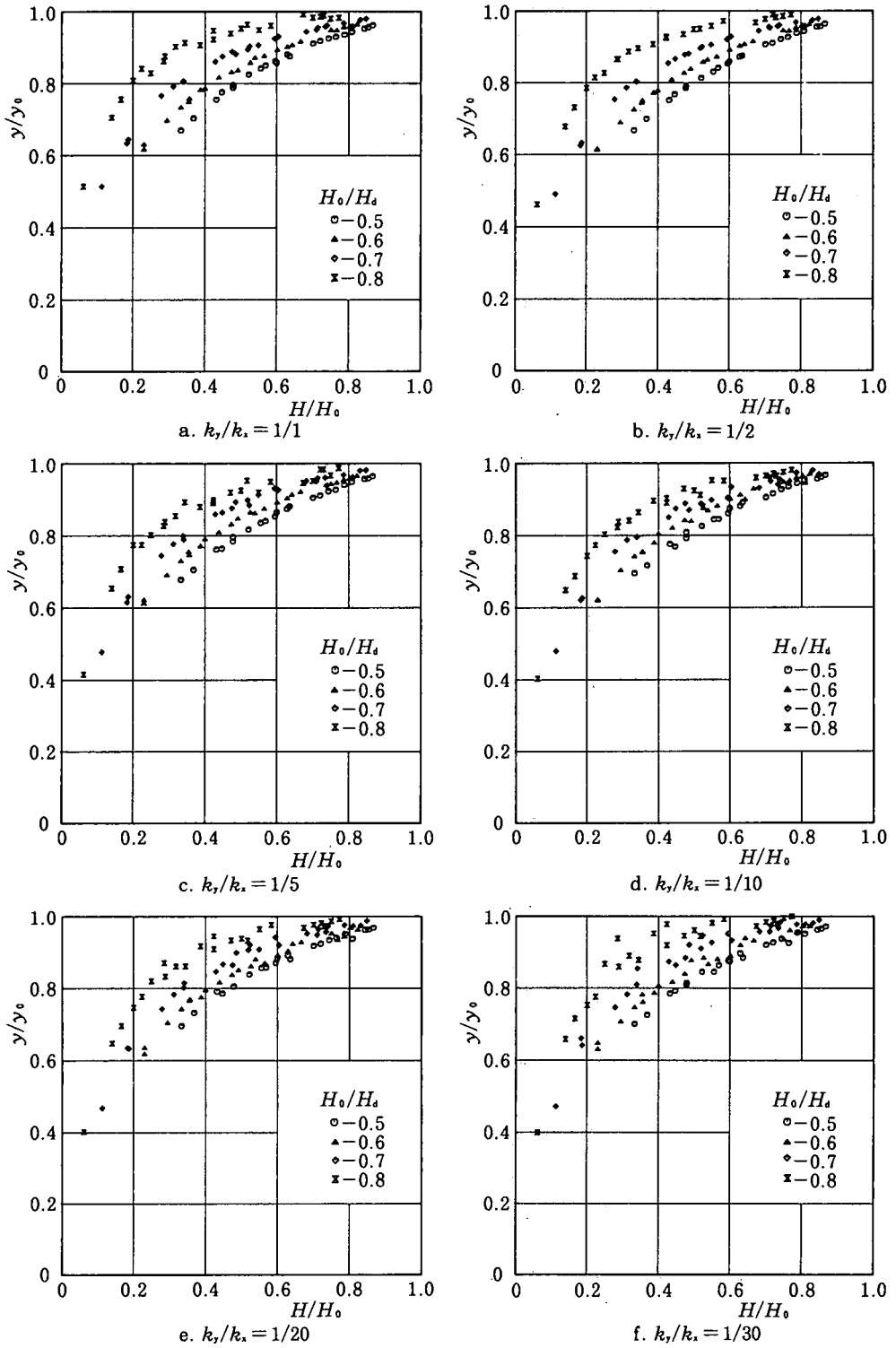
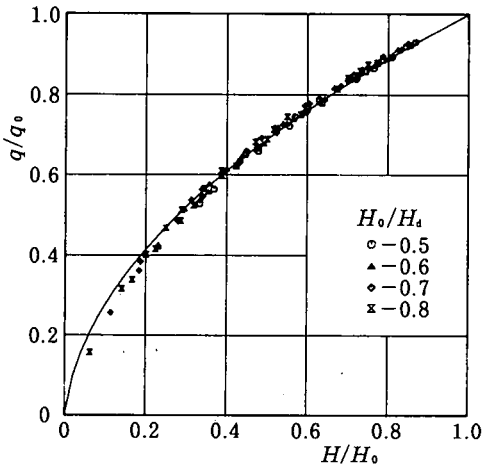
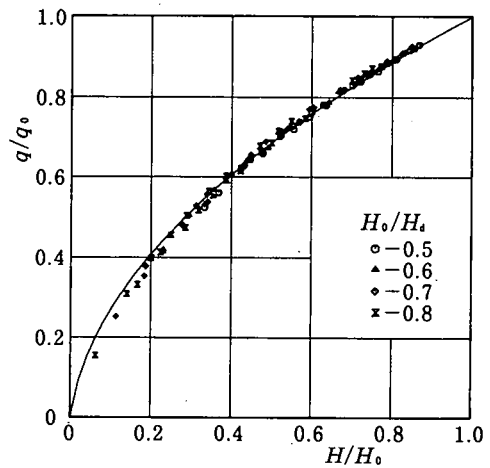


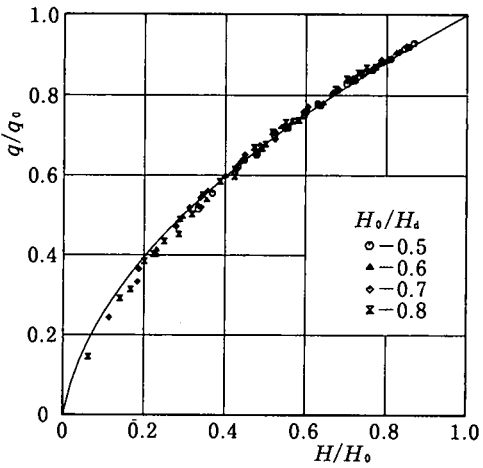
図-5 H_0/H_s をパラメータとした場合の H/H_0 と y/y_0 との関係



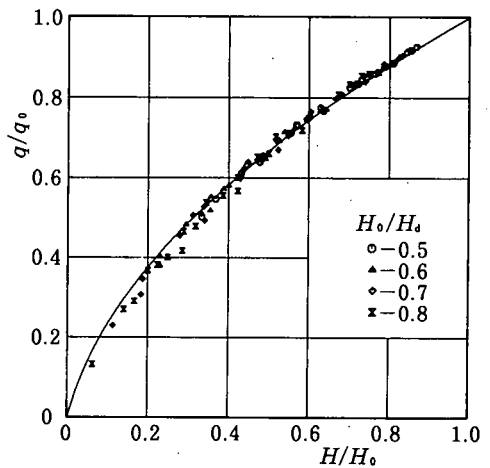
a. $k_y/k_x = 1/1$



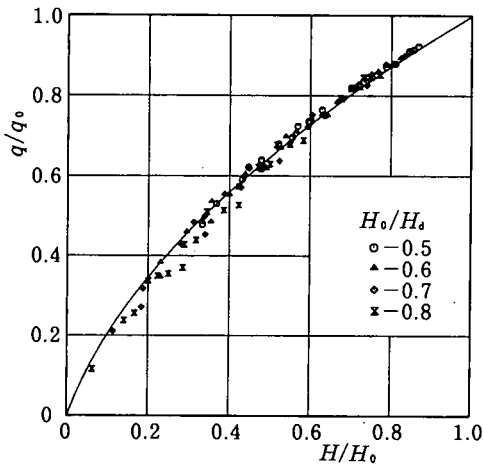
b. $k_y/k_x = 1/2$



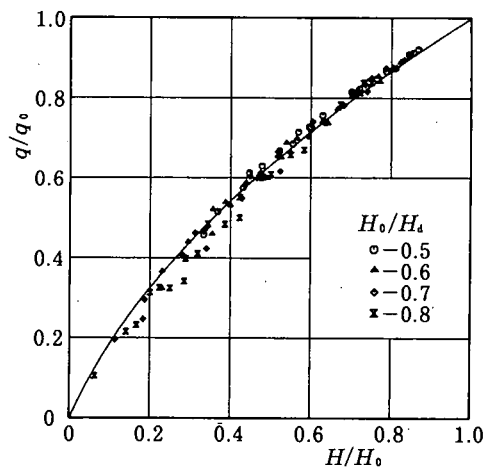
c. $k_y/k_x = 1/5$



d. $k_y/k_x = 1/10$



e. $k_y/k_x = 1/20$



f. $k_y/k_x = 1/30$

図-6 H_0/H_d をパラメータとした場合の H/H_0 と q/q_0 との関係

として各透水係数比ごとの a の値を求めた。この a の値は下表に示すように k_y/k_x によって異なるので、両者

k_y/k_x	1/1	1/2	1/5	1/10	1/20	1/30
a	1.13	1.16	1.22	1.33	1.55	1.76

の関係を最小自乗法によって求めると次式となる。

$$a = 1.118 + 0.02134 \frac{k_x}{k_y} \quad (5)$$

即ち、(5)式によって k_y/k_x の値に対する a の値を求め、それを(4)式に代入すると、与えられた k_y/k_x と H/H_0 による q/q_0 の値を求めることができる。このようにして求められた曲線を図6中に示してある。この曲線と有限要素法によって得られた値とは次のような関係にある。即ち、 H/H_0 が小さいときに有限要素法によって求めた q/q_0 が曲線とずれ、小さくなるが、 H/H_0 が比較的大きいときは、両者はよく一致している。

このことから、実用的範囲内では(4)、(5)式によって比較的良好に浸透流量を求めることができる。

ま と め

傾斜不透水層上に築造された異方性フィルダム内の浸透流を有限要素法を用いて求め、浸潤線の位置及び浸透流量を得た。その結果、以下のことが分かった。

1. 不透水層の傾斜による浸潤線の変化は、堤体内上流側ではほとんど変化が無いが、下流側にいくにつれて差異が生じ、不透水層の傾斜と共にその位置が低くなる傾向がみられる。また、透水係数比による浸潤線の変化は、透水係数比が小さい場合に流入直後から浸潤線が高く、下流となるにつれてその差が増大する傾向がみられる。従って、浸出点の位置もこの傾向に従うことになる。

2. ダム形及び H_0/H_0 のいかんに関わらず、 H/H_0 と q/q_0 との関係はそれぞれ k_y/k_x ごとに1つの2次曲線で近似し得ることが分かったので、それを(4)、(5)式に示した。

以上の研究には、本研究室専攻生の渡辺誠毅君の協力を得た。記して謝意を表します。また、本研究の計算には、高知大学情報処理センターのFACOM-M140Fを使用したことを付記する。

引 用 文 献

- 1) 南 一良：南原ダムおよび明神ダムのコア材料，大ダム，No.81, p.35 (1977).
- 2) 沢田敏男他：水利施設工学Ⅱ，p.24, 朝倉書店(1972).
- 3) 中崎昭人・篠 和夫：異方性地盤上の取水ダム底面上流端に設けた止水壁の揚圧力低減効果について，高大学研報 Vol.35, 自然科学, 93-104 (1986).
- 4) 河野伊一郎：有限要素法による堤体浸透問題の解析，土と基礎，Vol.21, No.8, 13-19 (1973).
- 5) 沢田敏男・吉武美孝：有限要素法による堤体及び基礎における浸透流解析，農土論集 No.47, 16-21 (1973).