

傾斜不透水層上の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)

On the Seepage Flow in a Fill Dam Built on Inclined Impervious Base

Akito NAKAZAKI and Kazuo SHINO
(Laboratory of Construction Engineering, Faculty of Agriculture)

Abstract : In Japan, most fill dams are constructed on the inclined impervious bases by reason of steep slope in topography. Hence it occurs that it is necessary to examine the seepage flow in fill dam built on the inclined impervious bases.

In this paper, two dimensional characteristic of seepage in a dam built on the inclined impervious base is discussed by using finite element method. It is assumed that characteristics of a dam are homogeneous and isotropic. The discharge per unit length of dam and the discharge point of the free surface are calculated for various angles of inclined base and of upstream and downstream slope of dam.

I. まえがき

フィルダムの安定を論ずる場合の水圧条件の決定、ダム内の浸透流に対する安定性や排水対策工の検討のために、浸潤線の位置や浸透流量を知る必要がある。

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、それらを求める手順が簡単で、実際と比較的よく適合するということから、Casagrandeの方法がよく利用されており、土地改良事業計画設計基準¹⁾でもこの方法で求めることが示されている。しかしながら、Casagrandeの方法を始めいずれの方法も、フィルダムが水平な不透水層の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、一般に、フィルダムを水平な不透水層の上に築造することはありえず、傾斜不透水層の上に構築することになる。

このように、フィルダムが傾斜した不透水層の上にある場合の浸潤線の位置及び浸透流量が、不透水層の勾配によってどのような影響を受けるかについての研究は、既に中崎^{2),3)}、渡辺ら⁴⁾によって取上げられているが、詳細にわたっての検討がなされるまでにはいたっていない。

したがって、ここでは傾斜した不透水層上にある均一材料で構築された多種のダム形及び貯水位のフィルダムについて、FEM(有限要素法)を利用して浸潤線の位置及び浸透流量を計算し、フィルダム内の浸透流が不透水層の勾配にどのような影響を受けるかを考察することにした。

II. ダム形とFEMのための要素分割

上・下流斜面を延長し、その交点(便宜上、以下この点を堤頂という)の下流斜面先からの高さ H_d (以下、これをダム高という)を1とし長さの単位とした。

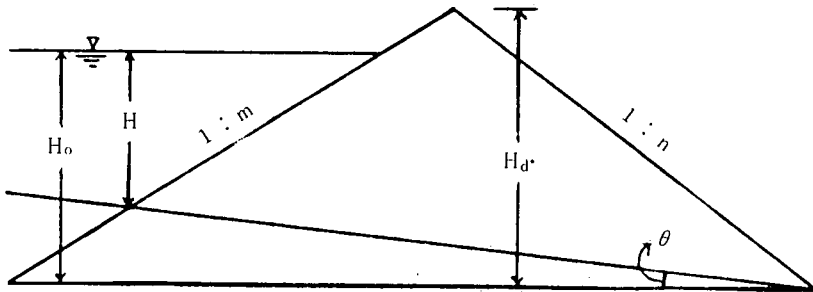


図-1 ダムの模式図

ダム形は上・下流斜面勾配 m と n がともに 2.0, 2.5 及び 3.0, m と n がそれぞれ 2.5 と 2.0, 3.0 と 2.5 の5通りとし、貯水位 H_0 (下流斜面先からの高さ) が、ダム高 H_d に対し、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、不透水層の勾配を4~8通りに変化させた。

なお、堤体は均一材料で築造され、等方性であるとした。

FEMによって計算を行うための要素分割は次のように行った。まず、ダム底面を後述のように適当な数に等分割し、最下流端の分割区間をさらに2等分し、それぞれの分割点と堤頂を結ぶ。これらの分割線のそれぞれの間が、傾斜した不透水層面と浸潤線によって区切られた部分を、できるだけ正方形に近い四辺形になるように4分割し、これらをさらに2つの三角形に分割した。ここで、三角形の形がいびつにならないように、ダム中心線を境として上・下流側で分割方法を変えた。

なお、ダム底面の分割数は浸透領域の形状によって変わるもので、不透水層と浸潤線の間がダム底面に比べて小さい場合は、分割線の間を4分割して、各分割部をできるだけ正方形に近い形にするためには分割数を増大しなければならない。

また、浸出点は、下流斜面より1つ上流の分割線上の浸潤線を示す点において、その点の上流側で与えられている浸潤線の下流側への延長線と下流斜面に平行な線との交角の2等分線を引き、これと下流斜面との交点を浸出点とするという、河野の方法⁵⁾によって求めた。

このようにして、浸透領域を三角形要素に分割した結果の数例を図に示すと図-2のようである。

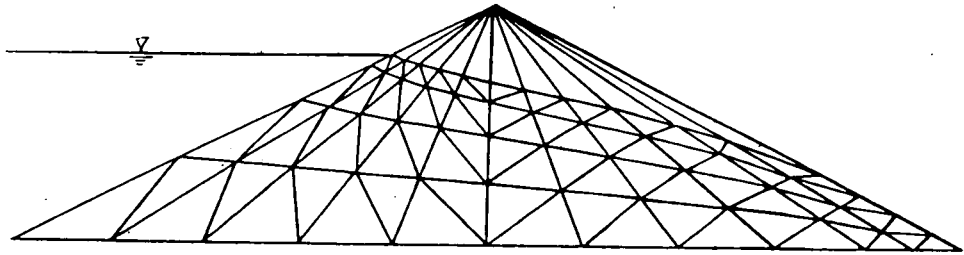
Ⅲ. FEMと Casagrande の方法によって求めた浸潤線及び浸透流量の比較検討

1. 浸潤線について

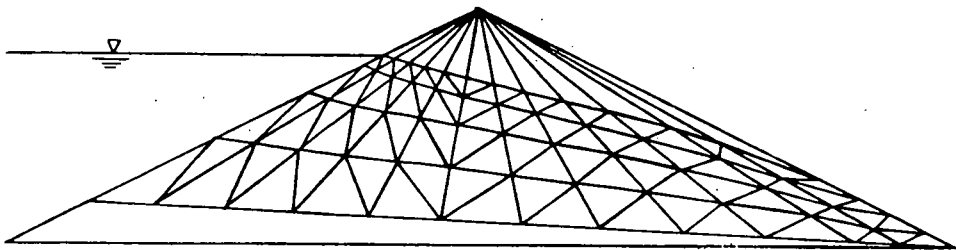
前述の5通りのダム形と4通りの貯水位について、不透水層が水平な場合の浸潤線をFEMと Casagrande の方法によって求めたが、そのうちの例として、上・下流斜面勾配 m と n が 2.0 と 2.0, 2.5 と 2.5 及び 2.5 と 2.0 で、貯水位 H_0 が 0.8 の場合を図示すると図-3のようである。

これらの図からみて、FEMによって求めた浸潤線の方がやや高いが、全般的にみると上流側から下流側に進むに従って差が小さくなる傾向がみられる。このことは川本ら⁶⁾による結果とも一致している。

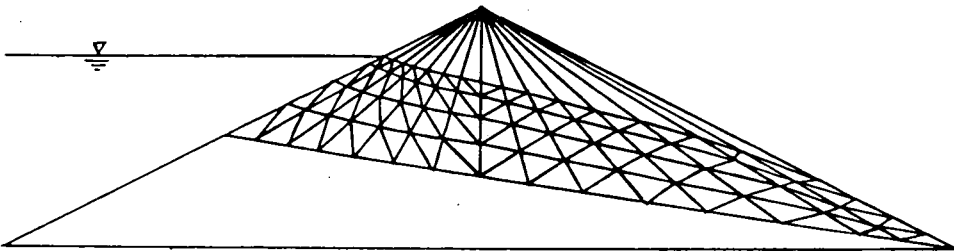
なお、各ダム形の他の貯水位の場合についても同様の結果がみられた。



(a) $m = n = 2.0$, $H_0 = 0.8$, $\tan \theta = 0.0$



(b) $m = n = 2.0$, $H_0 = 0.8$, $\tan \theta = 0.05$



(c) $m = n = 2.0$, $H_0 = 0.8$, $\tan \theta = 0.15$

図-2 三角形要素分割図

2. 浸透流量及び浸出点の高さについて

前と同様のダム形及び貯水位の場合について、FEMと Casagrande の方法によって求めた浸透流量と浸出点の高さを一括して表示すると表-1 のようになる。

なお、以下の表及び図における浸透流量 q は無次元化された値であって、実際のダムの単位長さ当り浸透流量 Q は

$$Q = q \cdot k \cdot H_d$$

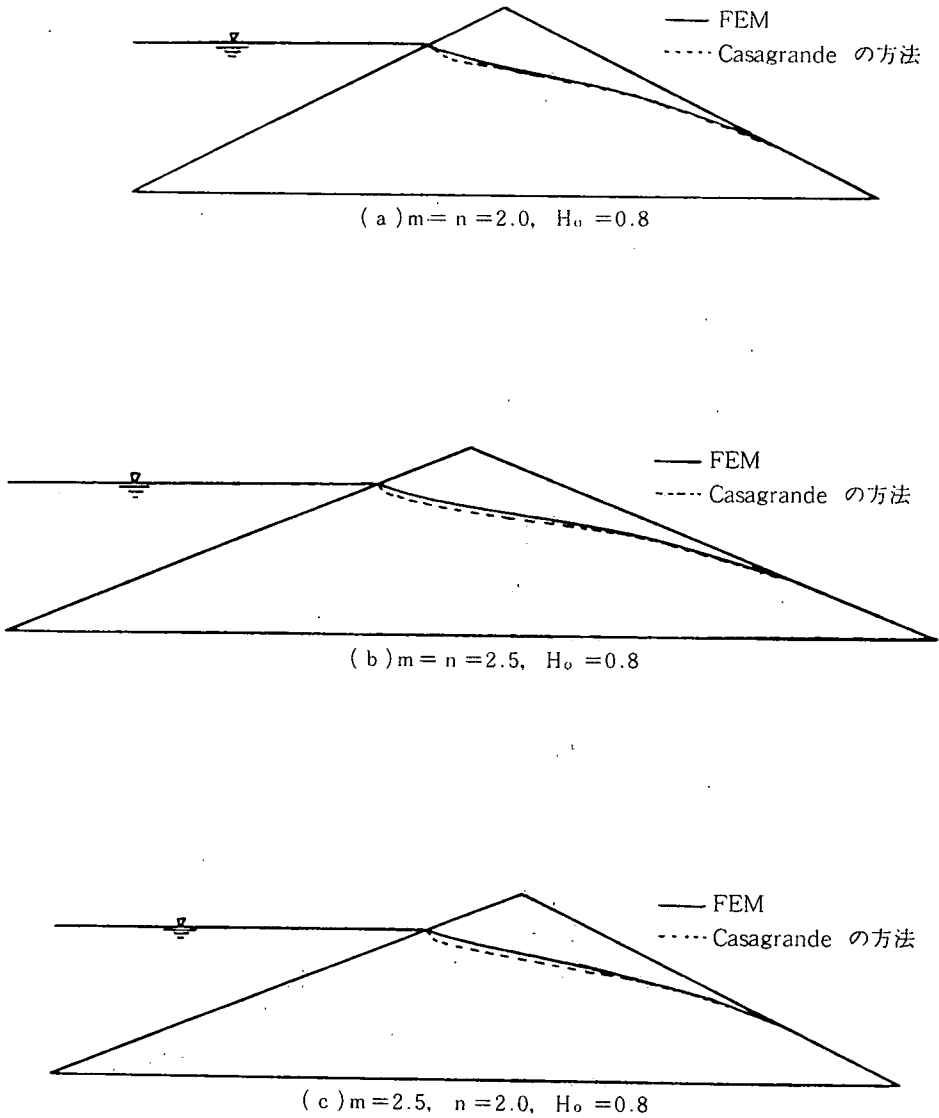


図-3 FEM と Casagrande の方法によって求めた浸潤線

によって求められる。ここに、 k は透水係数、 H_0 は長さの単位とした高さの現実のダムにおける高さである。また、実際の浸出点の高さは h に現実の H_0 を乗ずることによって求められる。

この表より、浸透流量について、FEMによって求めた値が Casagrande の方法による値より 7~24%ほど大きくなっているが、貯水位の高い場合にその差が大きくなる傾向がみられる。この傾向は渡辺ら⁷⁾の結果にも認められる。

また、浸出点の高さについてもFEMによる結果が 8~21%ほど高くなっており、この場合も貯水位が高いときにその差が大きくなっている。

しかしながら、FEMが近似的数値計算であり、Casagrande の方法が半理論解（基本放物線と

表一 FEMとCasagrandeの方法によって求めた浸透流量(q)と浸出点の高さ(h)

m	n	H_0	FEM q_f	Casagrande の方法 q_c	q_f/q_c	FEM h_f	Casagrande の方法 h_c	h_f/h_c
2.0	2.0	0.5	0.0403	0.0377	1.07	0.093	0.086	1.08
"	"	0.6	0.0622	0.0565	1.10	0.144	0.131	1.10
"	"	0.7	0.0918	0.0801	1.15	0.212	0.190	1.12
"	"	0.8	0.1320	0.1090	1.21	0.305	0.266	1.15
2.5	2.5	0.5	0.0324	0.0302	1.07	0.093	0.083	1.12
"	"	0.6	0.0503	0.0453	1.11	0.143	0.127	1.13
"	"	0.7	0.0744	0.0644	1.16	0.209	0.184	1.14
"	"	0.8	0.1077	0.0878	1.23	0.297	0.258	1.15
3.0	3.0	0.5	0.0271	0.0252	1.07	0.094	0.082	1.15
"	"	0.6	0.0422	0.0378	1.12	0.143	0.124	1.15
"	"	0.7	0.0626	0.0538	1.16	0.207	0.180	1.15
"	"	0.8	0.0912	0.0735	1.24	0.291	0.254	1.15
2.5	2.0	0.5	0.0371	0.0343	1.08	0.086	0.078	1.10
"	"	0.6	0.0578	0.0518	1.12	0.135	0.120	1.13
"	"	0.7	0.0860	0.0740	1.16	0.202	0.174	1.16
"	"	0.8	0.1250	0.1016	1.23	0.293	0.244	1.20
3.0	2.5	0.5	0.0303	0.0280	1.08	0.088	0.077	1.14
"	"	0.6	0.0473	0.0422	1.12	0.136	0.118	1.15
"	"	0.7	0.0707	0.0603	1.17	0.202	0.171	1.18
"	"	0.8	0.1031	0.0829	1.24	0.291	0.241	1.21

貯水面との交点の取り方が本質的な問題として残る。)であることを考慮すれば、両者によって求められた浸透流量と浸出点の高さは比較的良好に一致するといえるものと考えられる。

IV. 不透水層の勾配が浸透流に及ぼす影響について

1. 浸潤線について

IIで述べたダム形、貯水位及び不透水層の勾配の各場合の総計118通りについて浸潤線の位置をFEMによって求めたが、不透水層が傾斜することによって、浸潤線の位置がどのように変化するかをみるために、いま1例として $m = n = 2.0$ 、 $H_0 = 0.8$ で不透水層の勾配 $\tan \theta$ が0.0と0.25の場合について図示すると図-4のようになる。なお、不透水層の勾配がこの中間の場合の浸潤線の位置は、図の2つの浸潤線の間であり、勾配の大きい方が低くなった。

この図から、不透水層が傾斜することによる浸潤線の位置の差異は上流側ではほとんどなく、不透水層の勾配が大きくなるにつれてダム中央部付近から下流に向かって大きく低下することが認められる。なお、他のダム形、貯水位のいかんにかかわらずこれと同様のことが認められた。

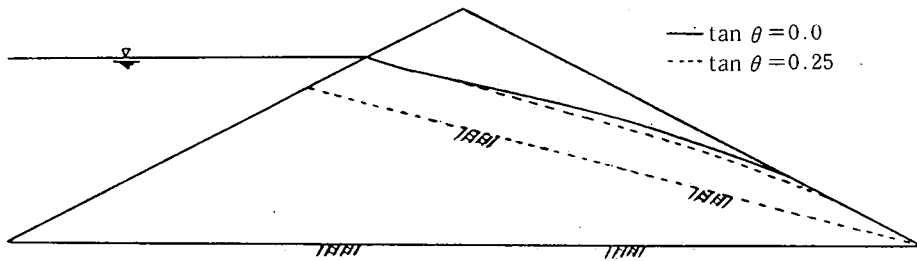


図-4 不透水層の傾斜による浸潤線の位置の変化
($m=n=2.0, H_0=0.8$ の場合)

2. 浸透流量について

前述の118通りについて浸透流量を求めたが、その結果をダム形ごとに、横軸に H/H_0 、縦軸に q/q_0 (q_0 は不透水層が水平な場合の浸透流量) をとって図に描くと、すべてのダム形について H_0 の値のいかんにかかわらずそれぞれ1つの曲線として表わされた。

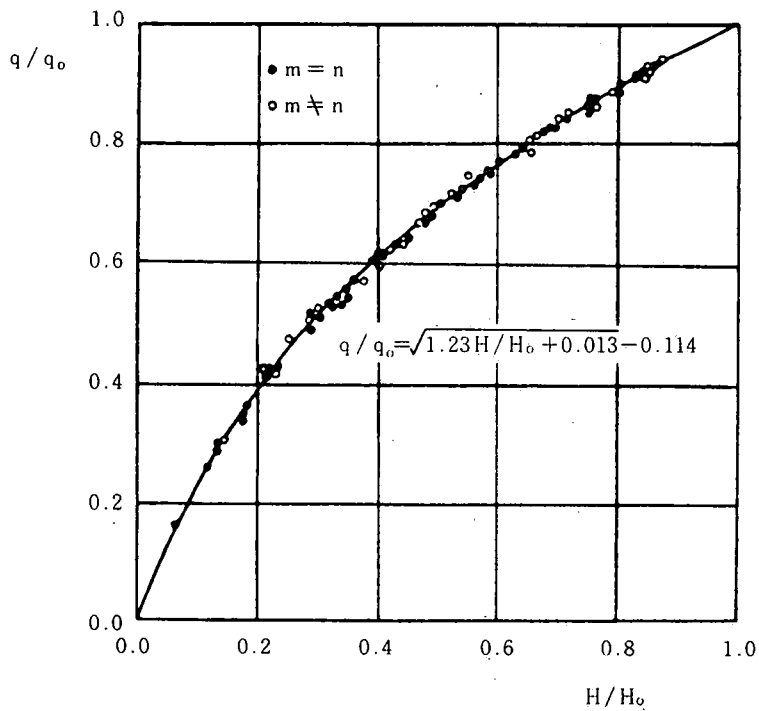


図-5 H/H_0 と q/q_0 との関係

これら各ダム形についての5通りの図を重ね合わせ、図中のシンボルを $m = n$ と $m \neq n$ の2通りで表わすことにして図示したのが図-5である。

この図にみられるように、ダム形及び H_0 が異なっても H/H_0 の変化による q/q_0 の変化の様子は1つの曲線で表わされることがわかる。

したがって、ここで計算を行った上・下流斜面勾配の範囲内では、 m と n の大きさとその関係、貯水位 H_0 のいかにかわからず、不透水層の傾斜の割合によって決まる H/H_0 と q/q_0 との関係は

$$q/q_0 = \sqrt{1.23 (H/H_0) + 0.013} - 0.114$$

で表わされる。

3. 浸出点の高さについて

浸潤線及び浸透流量の場合と同じダム形、貯水位及び不透水層の勾配のときの浸出点の高さ h を求め、 H/H_0 に対する h/h_0 (h_0 は不透水層が水平な場合の浸出点の高さ) の関係を、横軸に H/H_0 、縦軸に h/h_0 をとって図に描いたが、この両者の関係は各ダム形とも各 H_0 ごとにそれぞれ1つの曲線で表わされた。これら各ダム形について得られた5通りの図を重ね合わせ、前図と同様に図中のシンボルを $m = n$ 、 $m \neq n$ の2通りで表わして図示したのが図-6である。

この図にみられるように、 H/H_0 と h/h_0 との関係はダム形に関係なく、 H_0 によってそれぞれ1つの曲線で表わされ、 H/H_0 に対する h/h_0 は H_0 が大きい程大きくなる。

すなわち、貯水位が大きい程、不透水層の勾配による浸出点の高さの低下の割合が小さいことが認められる。

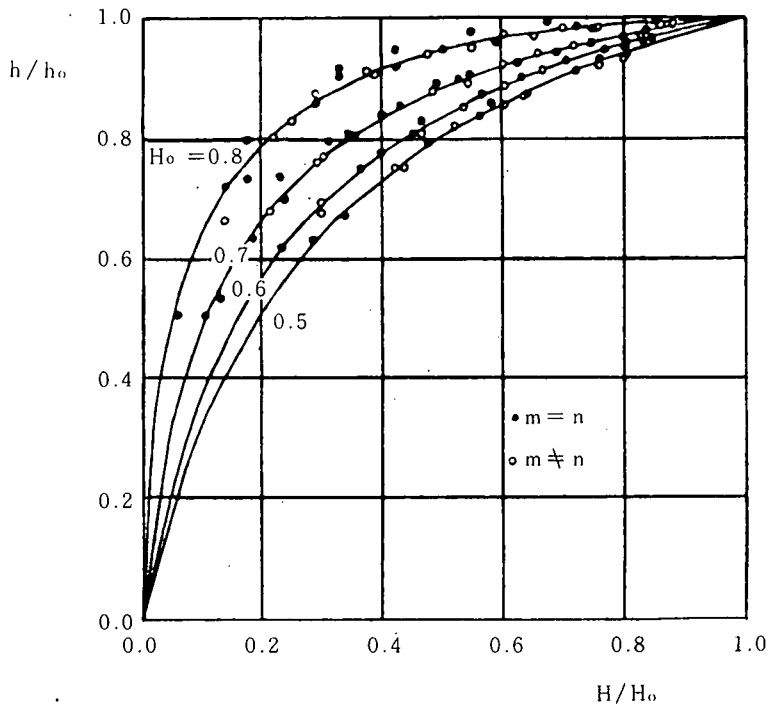


図-6 H_0 をパラメータとする H/H_0 と h/h_0 との関係

V あとがき

不透水層の傾斜がフィルダム内の浸透流に及ぼす影響を知るために、FEMを利用して、ダム内の浸透流についての解析を行った。

計算に使用したダム形は、上・下流斜面勾配 m と n が、2.0 と 2.0, 2.5 と 2.5, 3.0 と 3.0, 2.5 と 2.0 及び 3.0 と 2.5 の 5 通りとした。これら各ダム形での貯水位がダム高に対して、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、不透水層の勾配を 4～8 通りに変化させ、浸潤線の位置及び浸透流量を計算した。なお、堤体は均一材料で構築されており、透水係数は等方性として取扱った。

この計算された結果を考察することによって、次のことがわかった。

1. FEMと Casagrande の方法によって求められた浸潤線の位置及び浸透流量を比較すると、前者による浸潤線の位置がやや高く、浸透流量もいくらか大きい。両者による結果は比較的よく一致するといえる。

2. 不透水層が傾斜することによる浸潤線の位置は、ダム内上流側ではほとんど差異がなく、ダム中央付近から下流側において傾斜の増大とともに低下する。

3. ここで計算した上・下流斜面勾配の範囲内では、斜面勾配 m , n の大きさとその関係及び貯水位 H_0 のいかにかわからず、不透水層の勾配によって決まる H/H_0 と q/q_0 の関係は

$$q/q_0 = \sqrt{1.23 (H/H_0) + 0.013} - 0.114$$

で表わされる。

4. 貯水位が大きい程、不透水層の勾配による浸出点の高さの低下の割合が小さい。

おわりに、本研究を行うに当って、高知大学情報処理センターを利用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 農水省構造改善局：土地改良事業設計基準（設計ダム），pp. 193～200, 1981。
- 2) 中崎昭人：リラクゼーションメソッドによって求めた堤体内浸透流について（1）土と基礎14巻7号，pp. 26～34, 1966。
- 3) 中崎昭人：傾斜不透層上の台形断面堤体内の浸透流量に関する実験的研究。鳥取農学会報19巻 pp. 150～160, 1967。
- 4) 渡辺 忠，吉武美孝：非均質性を考慮したフィルダムの浸透流解析，農士学会中四国支部講演要旨 pp. 10～12, 1981。
- 5) 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21巻8号，pp. 13～19, 1973。
- 6) 川本眺万他：堤体および基礎における浸透流の有限要素解析について，土と基礎18巻12号，pp. 19～26, 1970。
- 7) 渡辺 忠，吉武美孝：フィルダムの浸透流解析に対する Casagrande の方法の適用性について，農士学会誌46巻5号，pp. 22～30, 1978。

（昭和58年9月21日受理）

（昭和59年1月31日発行）