

## ダム取り付け部地山のう回浸透流に関する研究

A STUDY ON SEEPAGE THROUGH  
ABUTMENT OF DAMS

木村 勝行\*・大根 義男\*\*

By Katsuyuki KIMURA and Yoshio OHNE

## 1. ま え が き

ダムを建設することによってダムサイト周辺には新たな浸透流が起こる。この浸透流は、ダム基礎を通るものとダム取り付け部（アバットメント）をう回するものの2種に分類され、通常、前者は2次元問題として、また後者は3次元問題として取り扱われることが多い。ダム取り付け部をう回する浸透水の一部は後述するように下流側堤体内部に浸入するものと、下流側地山に浸出するものがあり、いずれも堤体や地山の安定性を低下させることになる。

飽和領域を対象とした定常浸透流問題は、ラプラスの方程式を与えられた条件下において解くことによって解決されるが、う回浸透にみられるような3次元浸透流の場合は、浸潤面の形状がほとんどの場合未知であることなどから、これを理論的に解析することは困難である。このため、この種の浸透流の解析は近似解法や模型実験あるいは数値実験によらざるを得なくなる。

現在、実ダムの設計に際して簡便的に採用されているのはダムサイト周辺の平面図上に流線網を描き、浸透性状や浸透量を見積る方法である。この方法においては、う回浸透は単に2次元平面内の問題として扱われることになるが、実際の流れはそれほど単純ではない。特に、動水勾配が最大となり水理的問題の生じやすい堤体近傍での流れを流線網によって把握することは難しいので、流線網に基づく安定性などの詳細な検討は望めないといっているであろう。

う回浸透流については、これまでに Klimentov<sup>1)</sup>、大長<sup>2)</sup>、駒田・大町<sup>3)</sup>の研究結果が発表されている。

Klimentov は、う回流の流線はダム軸と水際線との交点を中心とする同心の半円で表わせると仮定して、浸

透量を求める式を提案した。

大長は黒部川第四ダムの基盤内浸透流に対して、寒天ゲルを用いた3次元電気相似実験を行い、地山に対するカーテングラウト工に関し、浸透量や浸潤面などの面から議論している。

駒田らは堤体および堤体周辺地盤内の浸透流を3次元有限要素法により解析し、堤体下流部の地盤から流出する浸透水の流速分布を示している。

大長および駒田らの研究は浸潤面を有する3次元浸透流についての多くの情報を提供するものであるが、上述の堤体取り付け部や地山部の安定性を議論するためには、この部分の浸透特性について、さらに詳細な究明が必要である。

う回浸透流に関する研究は堤体内や堤体基礎地盤内の浸透流に関する研究に比べて数少ないが、これはう回浸透流が単に理論解を直接得ることのできない3次元問題であるというばかりでなく、堤体内や堤体基礎地盤内の浸透流のように堤体の安全性を直接的に脅かす流れでないという従来の認識にも起因していると思われる。これは過去建設されたダムの大部分が比較的堅固な地盤上に築造されたため、う回浸透流が問題となるような例は少なかった、あるいは問題となるような場合でもグラウティング工などによって十分な止水が期待できたなどの理由によるものであろう。

しかし、近年コンクリートダムに代わってフィルダムが盛んに建設されるようになり、透水性の土質地盤上や風化岩盤上にもダムを建設する機会が多くなった。このためう回浸透に起因する堤体や地山の安定性がダム設計上の新たな問題として提起されるようになった。たとえば図-1は均一型アースダムの例であるが、完成後の初めての貯水において、堤体下流側に明らかにう回浸透によると思われる影響が現われ、下流堤体内の水位が異常に上昇し、堤体の安定性を脅かした。そしてこれと同様な現象はほかにも数多く経験されている。またロックフ

\* 正会員 工修 愛知工業大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科

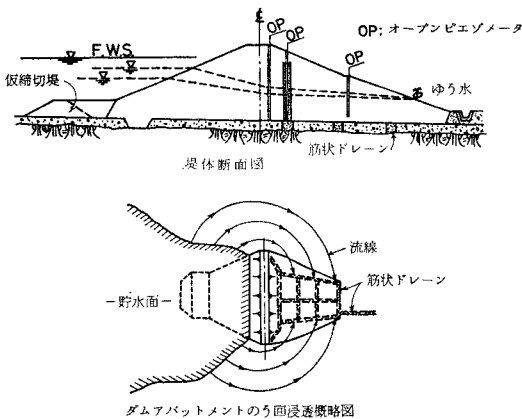


図-1 う回浸透水の下流側堤体部への浸入

イルダムの場合、コアトレンチ以外の堤敷に対しては崖錐堆積物や風化岩を完全に除去しない状態でロック部を盛り立てることが少なくないが、この場合、下流側接岸部では

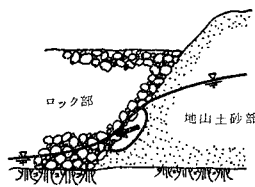


図-2 う回浸透水による地山内部侵食

う回浸透水により内部侵食が起これ、この部分が陥没し、小規模なすべりが発生したという事例がいくつか報告されている。このように最近、う回浸透に起因する事故が数多く報告されており、ダム技術者はこの問題の解決に深い関心を寄せている。

本研究は中心コア型ダムにおけるう回浸透性状の把握を目的としたものである。すなわち、モデル実験と有限要素解析(飽和・不飽和浸透)を行い、止水壁の深さや浸透領域などの境界条件と浸透流量、浸潤面形および浸出面の形状などの基本的な事項との関係を明らかにし、その結果の実際問題への適用性を議論し、さらにう回浸透流に対する2次元浸透場に対して得られる理論解の適用性についても検討した。

## 2. モデル実験

### (1) 実験装置

モデル実験は透明なアクリル樹脂板で作製した2種の実験装置を用いて行った。図-3は実験装置を模式的に示したものである。上流と下流はダム軸に挿入した止水壁によって分離され、また流入および流出面は鉛直である。下流側の流出部は鉛直な仕切り板によって8つに区分されており、浸透量はそれぞれの区分ごとに測定できる。装置Iはダム軸から上流および下流端までの距離

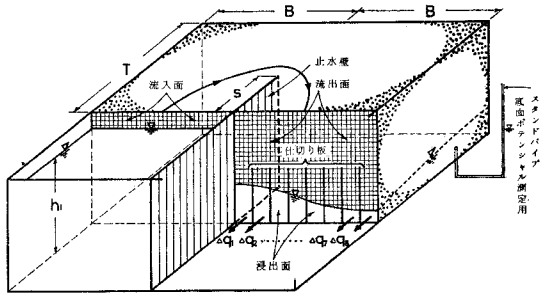


図-3 実験装置の模式図

$B=25\text{ cm}$ 、地山の奥行き  $T=45\text{ cm}$  である。また底板には直径約  $0.5\text{ mm}$  の孔を  $5\text{ cm}$  間隔(正方形配置)に設け、これにビニール管を取り付けてスタンドパイプに接続し、底面のポテンシャル観測用とした。一方、装置IIは  $B=80\text{ cm}$ 、 $T=22.5\text{ cm}$  であり、装置Iのポテンシャル観測の替わりに底面の浸透状態を観察できるように底板を透明なアクリル板製とした。両装置はともに装置内部に不透水板を設置することによって、 $B$  および  $T$  の値を自由に変えることができる構造となっている。

浸透領域には直径  $2.5\sim 5.0\text{ mm}$  のガラス球を充てし、流体として潤滑油を使用した。

実験は  $24^\circ\text{C}$  の恒温室において行ったが、このときの潤滑油の動粘性係数は  $\nu=1.5\text{ cm}^2/\text{s}$ 、透水係数は  $k=4.5\times 10^{-2}\text{ cm/s}$  であった。透水係数は定水位透水試験により求めたものであり、また透水試験は浸透方向を変えて行われたが、これによって浸透領域の透水性は等方向性( $k_h=k_v$ )であることが確認された。なおこの場合の毛管上昇高は約  $4\text{ mm}$  であった。

### (2) 測定方法

#### a) 浸透流量

ダム上流側に潤滑油を供給し、浸透量を観測した。浸透量は上記8つの各区分ごとに数回にわたって測定し、定常浸透状態を確認後、流量を求めた。

#### b) 浸潤面

流量測定後、浸透域のガラス球を上方から順次取り除き、浸潤面を露呈させ、その形を観測した。しかし、浸潤面が急激に変化する部分では露呈観測が不可能なため、図-4に示す直径  $2.5\text{ mm}$  の鋼棒(  $1\text{ mm}$  間隔に溝を刻んである)を上方から浸透域内に垂直に差し込み、油のこん跡により浸潤面の位置を求めた。

#### c) 底面のポテンシャル分布および流線

浸透流内部の底面におけるポテンシャル分布はスタンドパイ

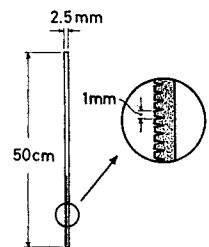


図-4 浸潤面測定用鋼棒

プにより観測した。また、流線は浸潤面上と底面において観測した。流線は白色の油絵具を潤滑油に溶いたものを使用して識別した。浸潤面上の流線は浸潤面を露呈させた際に測定し、底面の流線は装置底面を通して下方から直接観測した。

(3) 実験の妥当性の検証

a) 浸透量と浸潤面の形状について

本研究で用いたガラス球と潤滑油を組み合わせたモデル実験によって、浸透流量や浸潤面形が正しく得られるか否かを確認するために図-5に示す2次元直立堤体についての浸透実験を行った。このような直立堤体に対しては単位幅当たりの浸透流量  $q$  について理論解が得られており<sup>9)</sup>、次の式で与えられている。

$$q = \frac{k(h_1^2 - h_2^2)}{2L} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $h_1$  は上流水深、 $h_2$  は下流水深、 $L$  は堤体長、 $k$  は堤体飽和部の透水係数である。また、浸潤面およびポテンシャル分布については Wyckoff と Reed<sup>9)</sup> が電導紙を用いた電気相似実験結果を示しており、さらに浸出点については Kochina<sup>6)</sup> が理論解を得ている。

図-5には Wyckoff らが行った実験と相似の直立堤体について、モデル実験から得られた単位幅当たりの浸透流量と浸潤面形を理論解および Wyckoff らの実験結果と対比して示した。 $q/kh_1$  の値は理論値では 0.558、本実験結果では 0.560 となり、また、浸出点の高さ  $h_e$  については、上流水深  $h_1$  との比  $h_e/h_1$  が理論値では 0.43、本実験結果では 0.46 で、両者はほとんど一致しているといえよう (Wyckoff らの実験結果は理論値と一致している)。さらに、浸潤面形も Wyckoff らの実験結果と一致しており、本研究におけるモデル実験の信頼性が確認された。

b) ダルシー則について

本研究で扱うモデル実験、有限要素解析および2次元理論解析における浸透流はダルシー則が適用できることを前提としている。このためには与えられた条件下で最

大レイノルズ数は1以下<sup>7)</sup>および透水係数は一定でなければならない。実験したなかで動水勾配が最大となるのは  $T=22.5$  cm,  $B=80$  cm,  $s=7.5$  cm,  $h_1=30$  cm および  $h_2=0$  cm の場合である。動水勾配は、理論的には止水壁先端部において無限大 (特異点) となるので、これよりわずかに離れた位置 (0.5 cm 下流側) における動水勾配を調べてみると、この場合は約7となり、レイノルズ数  $Re$  は

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{0.045 \times 7 \times 0.4}{1.5} = 0.084 < 1$$

となる。ここに、 $v$  は透水係数に動水勾配を乗じた流速、 $D$  は粒子の平均径である。また透水係数については、定水位透水試験により、動水勾配を最大10としたが、流速と動水勾配は直線関係にあることが確認された。

以上により、本研究における実験条件はすべてダルシー則を満足することがわかる。

3. 有限要素解析

モデル実験はすでに述べたように、浸透現象を解明するための有効な方法の一つである。しかし、境界条件が複雑になるにつれて実験も困難になってくるので、実ダムに対する模型実験は必ずしも一般的ではない。複雑な境界条件の場合、浸透流全体にわたる情報を得るには有限要素法による数値解析が有効となる。特に、飽和・不飽和浸透解析は浸潤面の決定に節点を移動させる必要がないので、浸潤面を含む浸透問題に対して有力な手法である。ここでは、3次元モデルに対して有限要素法を用いた飽和・不飽和解析を行って、浸潤面形状などの浸透性状を明らかにした。解析法の概要は以下のとおりである。

飽和・不飽和領域においてダルシー則が成立し、かつ圧力水頭の変化による水の圧縮や間隙の変化は生じないものと仮定すると、飽和・不飽和領域内における定常浸透流の支配方程式は次式で示される<sup>8)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_r K_{ij}^s \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + K_r K_{is}^s \right) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\phi$  は圧力水頭、 $K_{ij}^s$  は飽和状態の透水係数、 $K_r$  は不飽和状態の透水係数と飽和状態の透水係数の比を表わし、飽和度の関数 ( $0 \leq K_r \leq 1$ ) である。

境界条件を与えて式(2)の解を求める手法として、ここでは Galerkin 法による重み付き残差法を用いて定式化する有限要素法<sup>9)</sup>を採用し数値解析した。本研究で定式化に用いた要素は5個の四面体から組み立てられる8節点(六面体)要素<sup>10)</sup>であり、2通りの分割方法を使って結果を平均した。

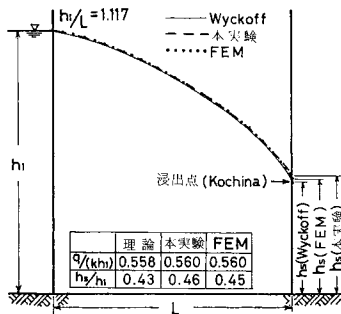


図-5 直立堤体の2次元浸透

ガラス球の飽和状態の透水係数は  $K_r s = 4.5 \times 10^{-2}$  cm/s, 毛管上昇高は約 4 mm および最大体積含水率は 0.32 である。ガラス球に対する不飽和部の透水特性である圧力水頭  $\psi$  と体積含水率  $\theta$  の関係,  $\theta$  と不飽和状態と飽和状態の透水係数比  $K_r$  との関係は現在のところ明らかにされていない。このため, ガラス球は砂と同様に粒状体であることから, まず豊浦標準砂の実験結果<sup>11)</sup>をもとに本実験で用いたガラス球の  $\psi$  と  $\theta$  の関係を仮定した。 $\theta$  と  $K_r$  の関係については,  $\theta \sim K_r$  の関係は土質の種類による差が少ないことから, 本実験のガラス球に対しても土質材料と同様, 飽和度  $S_r$  と  $K_r$  の関係を  $K_r = S_r^{3.5}$  なる式<sup>12)</sup>で表わし得ると仮定した。そして簡単な 2 次元モデルについて (図-5) 飽和・不飽和解析を行い, その結果とガラス球を用いた実験結果を対比し, 両者の結果が一致するように  $\psi \sim \theta$  関係を修正した。図

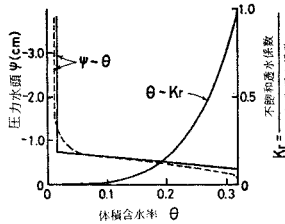


図-6 不飽和部の透水特性

5 に示す結果を得た

#### 4. 2 次元浸透流に対する理論解

う回浸透流は上下流の水位差が小さい場合, 2 次元的な流れとなることが予想される。したがって, 3 次元流と 2 次元流とを対比して議論することも重要である。浸透流を 2 次元と仮定した場合には, 複素関数論の適用によって理論解を得ることが可能となる。

図-3 において, 上流と下流の水位差がわずかである場合の流れは底面にほぼ平行となり, 厚さが  $(h_1 + h_2)/2$  の水平面内の 2 次元流とみなすことができ, 流れ場は図-7 (a) の  $z$ -平面のように表わされると考えてよい。

図-8 は, 嶋<sup>13)</sup> が等角写像法を用い, Schwarz-Christoffel 変換を適用して詳細な解析方法を示した浸透場であるが, 図-7 (a) と 図-8 は, 図-7 (a) の  $s, B$  および  $T$  がそれぞれ 図-8 の  $s', T'$  および  $B'$  に対応する同一の浸透問題であるとみなし得る。図-8 の浸透場を 図-7 (a) に対応させるための変換式は以下のようになる。

図-7 (a) の  $z$ -平面を複素ポテンシャル平面である  $w$ -平面で表わすと 図-7 (b) のようになる。Schwarz-Christoffel 変換を適用することにより,  $z$ -平面および

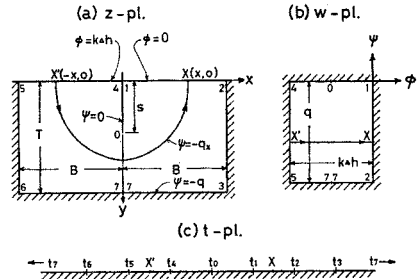


図-7 Schwarz-Christoffel 変換

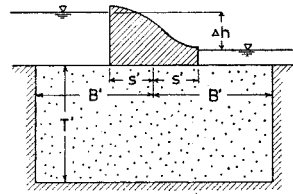


図-8 水平および垂直両方向が不透水層に囲まれている透水層の浸透流 (嶋, 1951)

$w$ -平面を 図-7 (c) の  $t$ -平面の上平面に写像する関数を求めるとそれぞれ次式となる。

$$z = \frac{B}{K(m)} F\left(\sin^{-1} \sqrt{\frac{t^2 - \beta^2}{1 - \beta^2}}, m\right) \dots \dots \dots (3)$$

$$w = \frac{k \Delta h}{2 K(\beta)} F\left(\sin^{-1} \frac{t}{\beta}, \beta\right) - \frac{k \Delta h}{2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに,  $K(m)$  は母数  $m$  の第 1 種完全楕円積分,

$$F\left(\sin^{-1} \sqrt{\frac{t^2 - \beta^2}{1 - \beta^2}}, m\right) \text{ は振幅 } \sin^{-1} \sqrt{\frac{t^2 - \beta^2}{1 - \beta^2}}$$

で母数  $m$  の第 1 種楕円積分,  $k$  は透水係数,  $\Delta h$  は上下流の水位差 ( $h_1 - h_2$ ) である。母数  $m$  および  $\beta$  はそれぞれ次式から決まる。

$$\frac{T'}{B} = \frac{K(m')}{K(m)} \dots \dots \dots (5)$$

$$\beta = \text{sn}\left(\frac{s}{T} K(m'), m'\right) \dots \dots \dots (6)$$

ここに,  $m'$  は補母数で  $m' = \sqrt{1 - m^2}$  であり,

$$\text{sn}\left(\frac{s}{T} K(m'), m'\right) \text{ は振幅 } \frac{s}{T} K(m')$$

で母数  $m'$  の Jacobi の楕円関数を表わしている。

単位厚さ当たりの浸透流量  $q$  は

$$q = \frac{k \Delta h K(\beta')}{2 K(\beta)} \dots \dots \dots (7)$$

で与えられ, したがって, 全う回浸透流量  $Q$  は式 (7) に浸透流の厚さ  $(h_1 + h_2)/2$  を乗じた次式となる。

$$Q = \frac{k(h_1^2 - h_2^2) K(\beta')}{4 K(\beta)} \dots \dots \dots (7)'$$

また, 図-7 (a) の  $x$  軸はう回浸透水が流入または流出する面となっている。止水壁から下流  $X$  点までの区間に流出する単位厚さ当たりの浸透流量  $q_x$  と  $x$  との関係

係は、 $X$  点の対応条件： $x=x, w=-iq_x (i=\sqrt{-1})$  を式 (3) と式 (4) にそれぞれ代入した次の 2 式から  $t$  を消去することによって求めることができる。

$$x = \frac{B}{K(\beta)} F\left(\sin^{-1} \sqrt{\frac{t^2 - \beta^2}{1 - \beta^2}}, m\right) \dots\dots\dots (3)'$$

$$-iq_x = \frac{k\Delta h}{2K(\beta)} F\left(\sin^{-1} \frac{t}{\beta}, \beta\right) - \frac{k\Delta h}{2} (i = \sqrt{-1}) \dots\dots\dots (4)'$$

このようにして得られる  $q_x$  に  $(h_1+h_2)/2$  を乗じるとそれが止水壁から下流  $x$  までの間に流出する浸透量  $Q_x$  となる。

### 5. 結果の検討

#### (1) モデル実験と有限要素解析

図-9 は  $T=45$  cm,  $B=25$  cm,  $s=20$  cm,  $h_1=20$  cm および  $h_2=0$  cm の場合の実験で観測された浸潤面の形状である。同図にはう回浸透域を 3. で述べた 8 節点要素に分割した有限要素法による飽和・不飽和浸透解析により得られた浸潤面も下流側についてのみ描いてある。実験により得られた浸潤面は上流側においては計算値との差がみられず、また下流側においてもほぼ一致している。

さらに、図-10 は 図-9 の底面におけるポテンシャルの実測値と計算値を比較したものであるが、この場合も両者の値はほとんど一致している。ここで示したのは実験結果および計算結果の一例であるが、このほかの場合についても同様の検討を行った結果、両者の間には有意な差が認められなかった。

以上により、モデル実験結果と有限要素法による数値解析結果は一致することが確認された。

#### (2) 浸透量

図-11 は  $\frac{2Q}{k(h_1^2-h_2^2)} (= \frac{K(\beta')}{2K(\beta)})$  と  $T/s$  との関係を実験および破線は式 (7) の 2 次元浸透流の理論解であり、図-11 中の表に示す実験の  $T/B$  および  $s/B$  の値をパラメーターとした線を描いてあるので、実線と破線の交点を実験条件に相当する位置となる。実験は  $0.5 \leq (h_1-h_2)/h_1 < 1, 1.5 \leq T/s \leq 9$  および  $1 \leq T/B \leq 1.8$  (図-11 中の表の値参照) の範囲であるが、浸透量  $Q$  は理論値と全般的によく一致している。特に注目されることは、上下流の水位差が大きくなるにつれて浸透性状は 2 次元流から 3 次元流に移っていくことが想定されるが、このような場合でも浸透量に限っては 2 次元流としての理論式によって求めた値とそれ

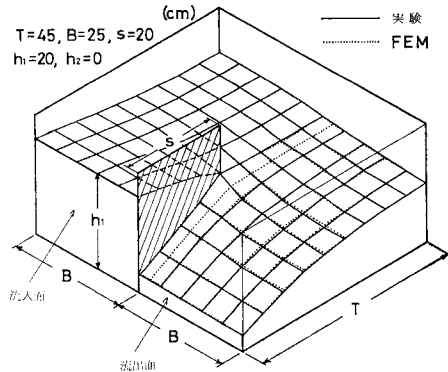


図-9 実験と計算の浸潤面

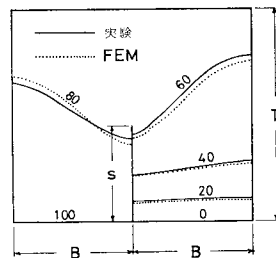


図-10 実験と計算の底面ポテンシャル

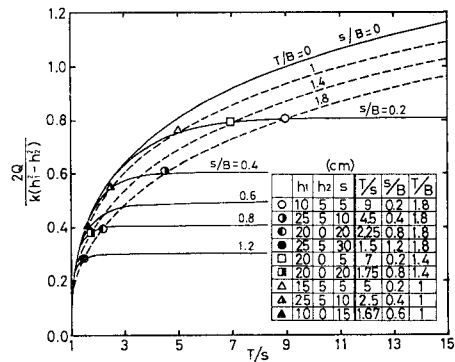


図-11 浸透流量

ほど差を生じないこと、また、これが局所的な浸透域を対象とした場合についてもいえることである。すなわち、図-12 は止水壁から下流  $x$  までの区間に流出する浸透量  $Q_x$  について、 $Q_x/Q$  と  $x/B$  の関係として示したものであり、図中の各線は式 (3)' および式 (4)' により求めた理論値を表わしている。各記号は実験結果を示したものであるが、両者の間には差がほとんどみられない。

以上のように、う回浸透場での浸透量は全体的にも、また局所的にも 2 次元理論式の適用によって推定することが可能である。そしてこのことは、従来、う回浸透流の解析法として簡便的に用いられてきた流線網による図式解法の妥当性を示すものである。すなわち、流線網に

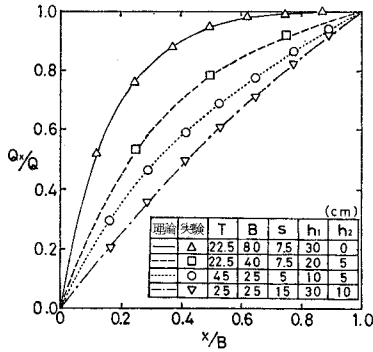


図-12 止水壁～x 間の浸透量

よる図式解法によれば、水平面内の2次元流の単位厚さ当たりの流量は流管の数を  $N_f$ 、等ポテンシャル線間の帯片の数を  $N_d$  とすると  $kdh \cdot N_f / N_d$  で与えられる。この  $N_f / N_d$  の値を式(7)の  $K(\beta) / 2K(\beta)$  の値に対応させると、式(7)は本質的には流線網による図式解法によって与えられる流量式と何ら相違するものではないことがわかる。

(3) 浸出面

う回浸透によって下流地山斜面上に形成される浸出面の形状を把握することは、う回浸透水の対策にあたって重要である。実験で観測された浸出面の形は図-13に示したごとくであり、止水壁の位置において最大高( $d_{max}$ )となって、これより下流側に漸次減少する。

図-14は実験および計算から得られた  $d_{max} / h_1$  と  $s / h_1$  との関係を示したものであるが、これらの関係を曲線で表わす

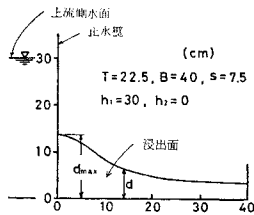


図-13 浸出面

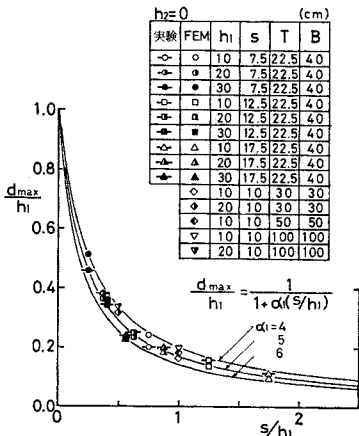


図-14 最大浸出面高

ことを試みて次式を得る。

$$\frac{d_{max}}{h_1} = \frac{1}{1 + \alpha_1 \left( \frac{s}{h_1} \right)} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $\alpha_1$  は  $T, B, s$  および  $h_1$  により定まる係数であるが、図から、実験値および計算値とも  $\alpha_1 = 4 \sim 6$  の範囲内に含まれており、平均的には  $\alpha_1 = 5$  としてよいといえよう。

図-15 は下流地山斜面上の浸出面高を  $d$  として、浸出面形状を  $d/d_{max}$  と  $x/h_1$  との関係により示したものである。浸出面を明らかにすることはすでに述べたように堤体や地山の安定性を論議するうえできわめて重要である。すなわち、ダム設計に際し、予想されるう回浸透水を堤外に安全に排除する施設が計画されるが、このためには浸潤面の位置・形状あるいは浸透量などを把握しておく必要がある。

図-13 および図-15 からわかるように、浸出面高の下流方向への低下は止水壁近くでは緩やかで、その後急になり、再び緩やかとなっている。このような特性を考慮し、浸出面形状を次式で近似する。

$$\frac{d}{d_{max}} = \frac{1}{1 + \alpha_2 \left( \frac{x}{h_1} \right)^{1.4}} \dots\dots\dots (9)$$

式中の  $\alpha_2$  も  $T, B, s$  および  $h_1$  によって定まる係数であるが、図から、浸出面形状は  $s/h_1$  の値によってほぼ分かれていることがわかり、 $s/h_1$  の影響が特に大きいことがうかがわれる。同図には式(9)の  $\alpha_2$  の値に応じた曲線を実線で示してあるが、それぞれの浸出面形を最もよく表わすと思われる  $\alpha_2$  と  $s/h_1$  の関係を示すと図-16 のようになり、両者の関係を表わす式として次式を得る。

$$\alpha_2 = 0.22 \left( \frac{s}{h_1} \right)^{-1.91} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、式(8)、(9)および(10)は  $B/s < 2$  の場合、および  $B/s > 2$  であっても  $T/s < 2$  である場合は実験値および計算値の浸出面形を十分な精度で表わし得な

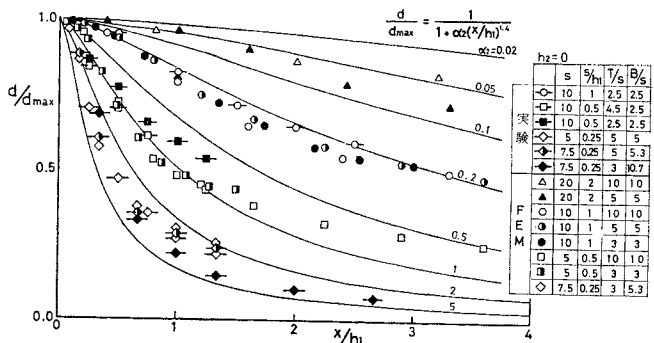


図-15 浸出面形状

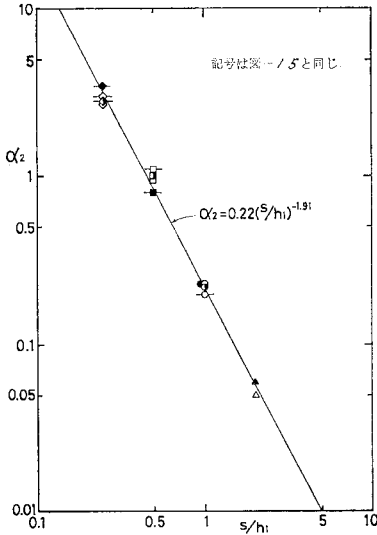


図-16 係数  $\alpha_2$  と  $s/h_1$  の関係

い。これは浸透領域の外周の不透水境界面と止水壁によってう回流が拘束された状態になるからと思われる。

(4) 浸潤面の形および流線

止水壁に沿って上流から下流に  $l$  軸 ( $0 \leq l \leq 2s$ ) をとり、止水壁面沿いに現われる浸潤面形を  $h'/h_0$  と  $l/2s$  との関係により示すと 図-17 のようになる。ここで、 $h_0 = h_1 - d_{max}$ 、 $h'$  は止水壁沿いの浸潤面高から  $d_{max}$  を減じた値である。図から明らかなように、止水壁面沿いの浸潤面は止水壁先端部を回ると急激に、しかも直線的に低下していくことがわかり、この浸潤面形状を表わす式として次の2式を得る。

$$\frac{h'}{h_0} = 1 - 1.16 \left( \frac{l}{2s} \right)^2, \quad 0 \leq \frac{l}{2s} \leq 0.5 \quad (\text{上流側}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{h'}{h_0} = 1.42 \left( 1 - \frac{l}{2s} \right), \quad 0.5 \leq \frac{l}{2s} \leq 1.0 \quad (\text{下流側}) \quad \dots\dots\dots (11)'$$

図-18 は実験により観測された浸潤面および底面上の流線を描いたものである。図から、上流側の同一鉛直線上AおよびBからう回浸透域に流入した浸潤面および底面の浸透水は止水壁から下流側へ等距離の  $a'$  および  $b'$  の位置には流出せずに、それぞれ下流方向および上流方向に偏倚して流出している。すなわち、上流側の同一鉛直線上からう回浸透域に流入した浸透水は、同一鉛直線上を下流側流出位置まで流下するのではないことがわかる。これはう回浸透流の特徴の一つであるといえよう。

ところで、前出 5.(2) における検討から、下流部に流出する局部的なう回浸透量も2次元流に対する理論解と一致するという結果を得たが、この場合、う回流は同一

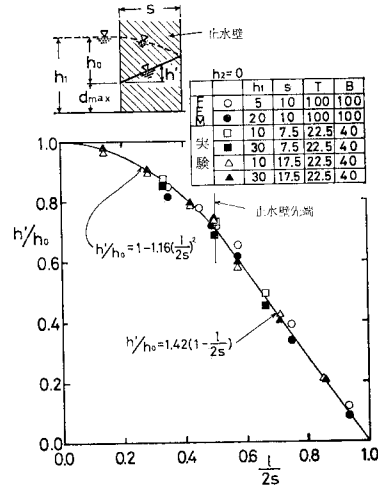


図-17 止水壁沿いの浸潤面

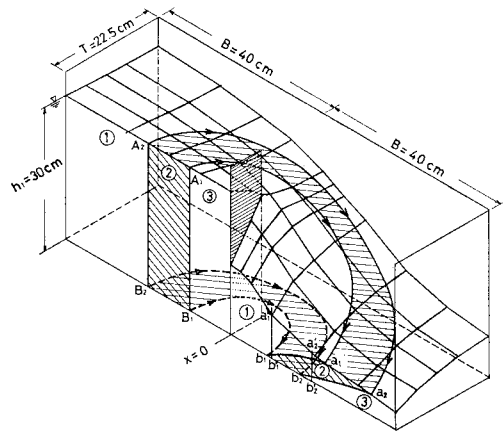


図-18 浸潤面と底面の流線

$T=22.5 \text{ cm}$ ,  $B=40 \text{ cm}$ ,  $s=7.5 \text{ cm}$ ,  $h_1=30 \text{ cm}$ ,  $h_2=0$

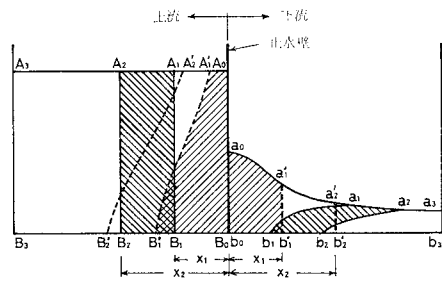


図-19 流入点と流出点

鉛直線上を流下していくという仮定を暗に含んでいたことになる。いま、この仮定が成り立たないことが明らかになったが、にもかかわらず実験と2次元理論解とが一致したことについては以下のような考察ができる。

図-19 は 図-18 の流入および流出面を示したものであり、上流  $A_1, A_2, B_1$  および  $B_2$  と下流  $a_1, a_2, b_1$  および  $b_2$  は実験で観測した流線の流入および流出位置で

ある。この観測結果に基づくと、上流側  $A_1$  および  $A_2$  の位置と止水壁をはさんで等距離の下流側  $a_1'$  および  $a_2'$  に流出する浸透水は、 $a_1'$  および  $a_2'$  が  $a_1$  (上流  $A_1$  から流入した浸透水が流出する位置) よりも止水壁寄りに位置しているので、上流側  $A_1$  と止水壁間の  $A_1'$  および  $A_2'$  から流入するということになる。同様に、上流側  $B_1$  および  $B_2$  の位置と止水壁をはさんで等距離の下流側  $b_1'$  および  $b_2'$  に流出する浸透水は、上流側の  $B_1$  と  $B_2$  間の  $B_1'$  および  $B_2$  と  $B_3$  間の  $B_2'$  から流入することになる。すなわち、下流  $a_1'b_1'b_2'a_2'$  面に流出する浸透水は上流  $A_1'B_1'B_2'A_2'$  面から流入することになるが、その流入量が  $A_1B_1B_2A_2$  面から流入する量とほぼ等しいので、それが結果的には、止水壁から等位置の面からの流入および流出する局所的な浸透量が等しくなる2次元理論解の浸透量と比較しても、何ら差が認められなかったものと推察される。また、このことの妥当性は次によっても確認することができる。すなわち、流線観測結果に基づき 図-18 に示すう回浸透域を3本の流管(流出面と流出面がそれぞれ ①  $A_0A_1B_1B_0$  と  $a_0a_1b_1b_0$ 、②  $A_1A_2B_2B_1$  と  $a_1a_2b_2b_1$  および ③  $A_2A_3B_3B_2$  と  $a_2a_3b_3b_2$  の流管)で組み立て、それぞれの流管の流入量と流出量の割合を調べてみると、流入側が ① 54.6%、② 23.8%、③ 21.6% に対して、流出側は ① 60.0%、② 20.4%、③ 19.6% と得られ、流管の形状は3次元的に複雑に変化しているものの両者はおおむね一致している。また、流出量については2次元理論解との関連から、おのおのの流管の流量はそれぞれ  $a_0b_0b_1'a_1'$ 、 $a_1'b_1'b_2'a_2'$  および  $a_2'b_2'b_3a_3$  面に流出する流量にほぼ一致することになるが、それを求めてみると 53.5%、22.7% および 23.8% となっている。2次元理論解からは、これが 52.9%、25.1% および 22.0% と得られ、3本の流管の値とほぼ一致していることがわかる。

## 6. 結 論

本研究では、中心コア型ダムのコア取り付け部の地山におけるう回浸透性状について、モデル実験や3次元有限要素法を用いて議論し、あわせてこの種の3次元浸透流に対する2次元理論解の適用性について検討した。本研究で対象とした実験・解析モデルは、ダムのコア幅を無視し、流入・流出面を鉛直とした、あるいは水平不透水性基盤を設定したなど現実の浸透域をかなり理想化したものである。したがって、ここで得られた成果が実ダムのう回浸透流をすべて表現することにはならないが、これまで判断材料がほとんどなかったう回浸透の特性を明らかにした意味で意義は小さくないと考えられる。また、この種の問題には有限要素法による解析が有効と思

われるが、実際問題を考えると境界条件や地質条件の複雑さなどがあり、精度的にも実用的にもそれほど期待し得る結果が得られるとは思われない。実ダムの設計にあたっては、精度的な面よりも、むしろ浸透特性や浸透量を概略的に把握し、その対策を行う方に主眼が置かれる。この意味で、本研究では止水壁に沿う浸潤面の形状、浸出面の形状あるいは浸透量を求める実験式などを提案したが、これらは精度というよりも、むしろ実用性を重視したものである。ここに本研究により得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 上下流および地山内の不透水面までの距離、止水壁の深さ、上流水深および下流水深が知れると、全う回浸透量あるいは下流各位置における局所的な浸透量の概略値は、2次元浸透流の理論解[式(7)']を利用して求めることができる。また、従来、う回浸透流の解析法として簡便的に用いられてきた流線網による図式解法は浸透量を概算するのに有用であることを確認した。

(2) う回浸透流による下流止水壁面における最大浸出面高を求める式[式(8)]を示し、さらに、下流地山斜面内に形成される浸出面形を表わす式[式(9)]を示した。

(3) う回浸透流の止水壁面沿いに現われる浸潤面形を表わす式[式(11)、(11)']を示した。

(4) う回浸透流の流線の流入位置と流出位置の止水壁からの距離を比べると、浸潤面上では流出点までの距離の方が長くなり、逆に、底面では流出点までの距離の方が短くなるという、う回浸透流の特徴を明らかにした。

以上により、う回浸透に関する基礎的な事項が明らかになったが、今後の課題として、1) ここではう回浸透領域を既知の不透水境界条件として与えたが、本来は地山内の地下水位に応じたう回浸透域が形成されるものである、2) 止水壁に相当するコアトレンチなどは完全な不透水性でない、3) 地山斜面は鉛直でない、ことなどが挙げられる。これらについては別に報告することにした。

本研究を遂行するにあたり、種々の助言をいただいた本学の青木徹彦助教授、四俣正俊助教授、成田国朝助教授、実験と計算に協力していただいた当時大学院生佐藤浩一氏(現日本技術開発)に深く感謝の意を表します。

なお、数値計算は愛知工業大学大型計算機センター IBM 370/138 によった。

## 参 考 文 献

- 1) ベ・ペ・クリメントフ、ゲ・ペ・プイハチェフ(外尾・永井訳): 地下水の力学, ラティス刊, pp. 222~228, 1962.
- 2) 大長昭雄: アーチダムの基盤内浸透流に関する研究, 土木学会論文集, No. 97, pp. 13~39, 1963年9月.
- 3) 駒田広也・大町達夫: フィルダムの三次元浸透流解析,



- 大ダム, No. 86, pp. 1~15, 1978.
- 4) Poluvarinova-Kochina, P.Ya. : Theory of Ground Water Movement, Princeton Univ. Press, pp. 281~282, 1962.
  - 5) Wyckoff, R.D. and D.W. Reed : Electrical conduction models for the solution of water seepage problems, Physics, Vol. 6, pp. 395~401, 1935.
  - 6) 前出 4), pp. 292~295.
  - 7) Harr, M.E. : Groundwater and Seepage, McGraw-Hill, pp. 40~42, 1962.
  - 8) Neuman, S.P. : Saturated-unsaturated seepage by finite elements, Proc., ASCE, Vol. 99, HY 12, pp. 2233~2250, 1973.
  - 9) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠 : 有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, No. 264, pp. 87~96, 1977年10月.
  - 10) O.C. ツィエンキーヴィッツ, Y.K. チューン (吉識 監訳) : マトリックス有限要素法, 培風館, pp. 82~89, 1970.
  - 11) 河野伊一郎・西垣 誠 : 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 307, pp. 59~69, 1981年3月.
  - 12) 前出 4), pp. 19~21.
  - 13) 嶋 祐之 : 堤体下部への浸透流に関する不浸透層の影響, 土木学会誌, 36-3, pp. 5~9, 1951年3月.

(1982.9.6・受付)

---