

## 水位急低下に伴う浸透挙動と安定性評価について

### Seepage Behavior and Safety Evaluation in Embankment Dam during Rapid Draw-down

成田国朝<sup>†</sup>, 木村勝行<sup>†</sup>

Kunitomo NARITA, Katuyuki KIMURA

**Abstract** Finite element saturated and unsaturated seepage flow analysis was done in this paper to study distribution of the residual pore water pressure generated in an embankment dam during a rapid draw-down and its influence on safety evaluation in the up-stream slope. Parametric studies were conducted on several model fills with different inclinations of slope by varying the decreasing rate of the reservoir level, to understand the mechanism of seepage flow during draw-down and variation with time of the residual pore water pressure accumulated in the embankment. Instability of slopes was then examined for two different patterns of failure, sliding failure due to a large pore water pressure and seepage failure due to a large hydraulic gradient. The results of slope stability analysis for circular slip surfaces revealed that the procedure of pore water pressure evaluation currently adopted in the design gives a safe side value of safety factor by around 10 to 20% as compared with the computed results.

#### 1. はじめに

アースダムや河川堤防のような水利構造物の破壊形態には、堤体を構成する土塊の円弧状の運動を伴うすべり破壊と、斜面表面の土粒子の流亡から発達して内部への貫孔作用を伴う浸透破壊が主要なものとして挙げられる。前者は貯水位の急低下や降雨浸透などによって斜面内の間隙水圧が高まることによる直接的な原因になるが、後者は主として間隙水圧が場所的に急激に変化することに起因して発生する。ただし、これらの浸透挙動や破壊形態を明瞭に区分し、予測することは容易ではなく、水位変動や降雨などの外的な作用条件や、築堤材料の特性、更に斜面の形状など、複雑な要因の相互関係を考慮して現象を追究する必要がある<sup>1)2)3)</sup>。

本研究は、発電や灌漑を用途としたフィルダムにおける貯水位の急低下問題を対象として、水位低下に伴う堤体内の浸透挙動をFEM飽和-不飽和浸透解析で明らかにし、間隙水圧の蓄積・消散過程の時間的・空間的変動が斜面のすべり破壊や浸透破壊にどのような関連性を有するかを議論するものである。具体的には、以下の項目に

関して考察を進める。

- (1) 水位低下に伴う堤体内の浸透挙動と水位低下速度や斜面勾配が現象に及ぼす影響
- (2) 水位低下時の間隙水圧及び安全性の評価におけるFEM解と現行設計の相違
- (3) 間隙水圧の場所的な変化に伴う浸透破壊の可能性と安全性の評価方法

#### 2. 解析概要

##### 2・1 透水特性曲線

FEM飽和-不飽和浸透流解析<sup>4)5)</sup>では、不飽和領域における透水特性を表す物性値の設定が必要である。一般に、水分保持曲線は図-1に示したように逆S形状を呈し、また湿潤過程(wetting)と排水過程(drying)が同一経路を通らず、ヒステリシスを生じることが知られている。図で、横軸は体積含水率 $\theta (=V_w/V)$ 、縦軸は負の圧力水頭 $\phi$ であり、水分保持曲線は最小含水量 $\theta_r$ と飽和体積含水率 $\theta_s$ の間で変化する。また、 $\phi_{cr}$ は限界毛管水頭と呼ばれる。水分保持曲線と交差する曲線は不飽和透水係数 $k$ と $\theta$ の関係であり、縦軸は飽和透水係数 $k_s$ に対する比率として、透水係数比 $k_r = k/k_s$ で表している。

<sup>†</sup> 愛知工業大学工学部都市環境学科(豊田市)

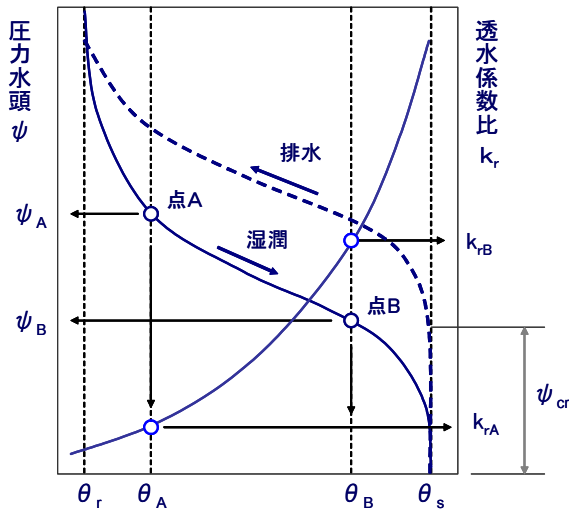


図-1 水分保持曲線

水分保持曲線を実験的に求める方法は既に二、三提案されているが<sup>6)7)</sup>、いずれにしても精度よいデータを得るにはかなり困難を伴うとされている。そこで、本研究ではθ軸上に2つのθ値(θ<sub>A</sub>, θ<sub>B</sub>)をとり、各々に対応する両曲線上の値(ψ<sub>A</sub>, ψ<sub>B</sub>)及び(k<sub>rA</sub>, k<sub>rB</sub>)が以下の式を満たすように曲線を定めることとした。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \alpha(\psi_{cr} - \psi)^\beta} \quad (1)$$

$$k_r = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^m, \quad m = a \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) + b$$

### 2・2 解析モデル

本研究では、図-2に示すような左右対称の溜め池堤体を対象とし、条件を幾つか変えて数値計算を行う。堤高H=20m、天端幅B=5mは一定とし、満水位H<sub>w</sub>=18mから所定の速度で水位が低下すると考える。堤体土の性質は、同種の問題に対して行った遠心載荷実験<sup>8)</sup>の堤体材料の物性値を参考に決定した。すなわち、水分保持曲線については、問題の性質から排水過程だけを対象に、最小含水量θ<sub>r</sub>=0.025、飽和体積含水率θ<sub>s</sub>=0.310、限界毛管水頭ψ<sub>cr</sub>=-0.6m(重力場での毛管上昇実験の計測値)、飽和透水係数k<sub>s</sub>=1.28×10<sup>-6</sup>m/s(透水試験による)とし、図-1の(θ<sub>A</sub>, θ<sub>B</sub>)=(0.109, 0.233)に対応する

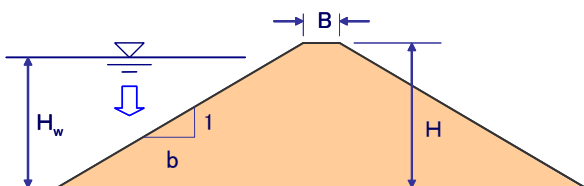


図-2 解析モデル

ψ, k<sub>r</sub>値を(ψ<sub>A</sub>, ψ<sub>B</sub>)=(-3.4m, -2.4m)及び(k<sub>rA</sub>, k<sub>rB</sub>)=(0.125, 0.525)と設定して、図-3のように決定した。なお、2点を設定して得られた式(1)の係数は、(α, β)=(0.03092, 4.224)および(a, b)=(0.7901, 1.469)であった。

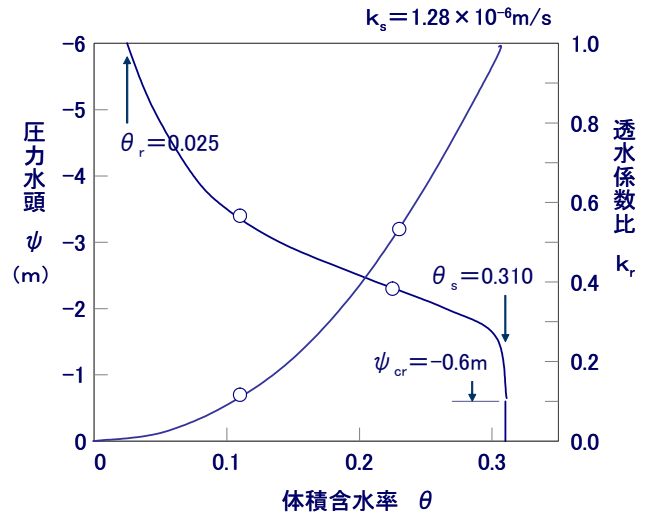


図-3 計算に使用した水分保持曲線

### 2・3 計算内容

発電用のダムで計測された水位の低下速度sの範囲は、s=1~3m/hr程度である<sup>9)</sup>。また、河川における水位急低下として報告された速度は、この1/100程度であり、s=0.6~2.5cm/hrとされている<sup>10)</sup>。これらの値を参考に、本研究では低下速度をs=23~92cm/hr(飽和透水係数k<sub>s</sub>=1.28×10<sup>-6</sup>m/sの比率でs/k<sub>s</sub>=50~200)の範囲で変化させ、低下速度が浸透挙動に及ぼす影響を調べた。また、斜面勾配を1:b=1:1.5, 1:2.0, 1:2.5に変えて計算し、浸透挙動や堤体の不安定化に及ぼす影響を調べた。図-4は計算時に設定した水位~時間関係であり、低下過程を2次曲線で表現し、初期水位(H<sub>w</sub>=18m)から水位3mまで低下する状況に着目した。

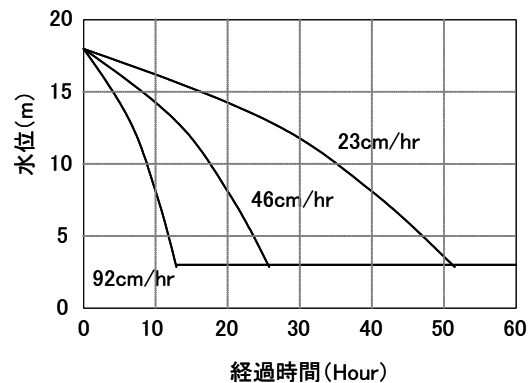


図-4 水位低下過程

3. 計算結果と考察

3・1 堤体内の浸透挙動

図-5は、斜面勾配1:2の堤体において、定常浸透状態 ( $H_w=18m$ ) から  $s=46cm/hr$  ( $s/k_s=100$ ) の速度で水位低下が生じたとして、5m低下ごとに全水頭の等値線を描いたものである。貯水位の低下に伴い上流側の全水頭値が徐々に低下し、等水頭線の間隔が密になって、上流側への浸透が発達する様子が見られる。また、(c), (d)で、上流側の浸潤面の動きが貯水位の低下に追い付かず、堤体の不安定化に影響を及ぼす残留水圧の蓄積や水頭値の落差に伴う激しい水流の発生が想定される。

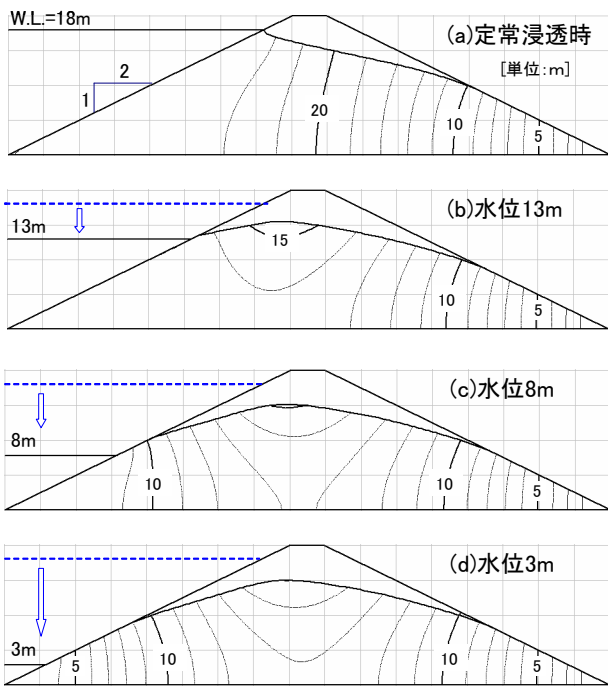


図-5 堤体内の全水頭分布

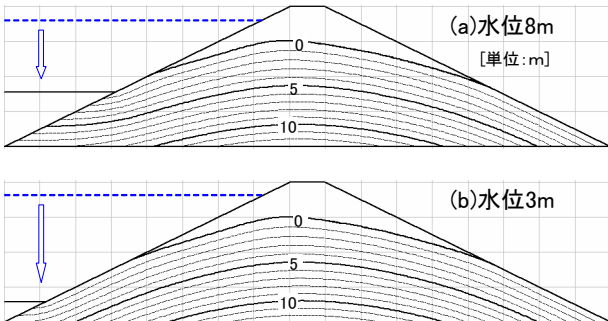


図-6 堤体内の圧力水頭分布

水位低下に伴う堤体内の残留水圧の様子を調べるために、図-6では貯水位8m及び3mの場合について圧力水頭の分布を描いた。堤体内での排水が貯水位低下に追いつ

けず、堤体中央部で間隙水圧の大きさや分布がほとんど変化しない。このため、貯水圧の押しさえ効果の消失と残留(過剰)間隙水圧の増加により、すべり破壊を伴う斜面の不安定化の促進が懸念される。

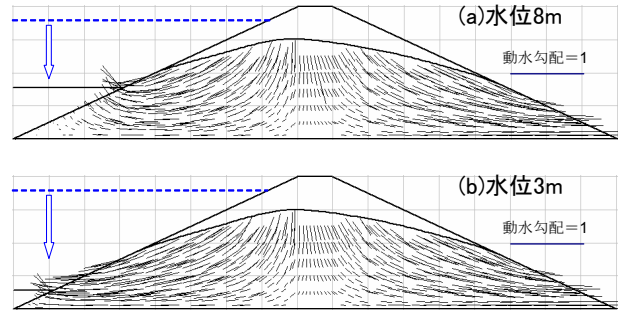


図-7 動水勾配と浸透水流

図-7は、上と同じ浸透状況において、堤体内の各点における動水勾配の値と水流方向の分布を描いたものである。すなわち、各点において動水勾配の値に対応する長さの直線を水流方向に描いている。ここで、FEM解から各点(要素)の動水勾配の値と水流方向を求める方法は、以下のように別報<sup>11)</sup>で説明した。

図-8において、三角形要素の3節点  $i, j, k$  の全水頭値を  $(h_i, h_j, h_k)$ 、その平均値を要素の代表値  $h_G$  とする。内挿により  $h_G$  に等しい全水頭値を有する三角形边上の2点  $M(x_1, z_1)$ 、 $N(x_2, z_2)$  を定めると、 $MN$  線は等水頭線になる。節点  $i$  と  $MN$  線間で  $h_i - h_G$  が水頭差、点  $i$  から  $MN$  線に下した垂線  $\delta_i$  が浸透距離となるから、動水勾配が下式で定まる。

$$i(i) = \frac{|h_i - h_G|}{\delta_i} \quad (2)$$

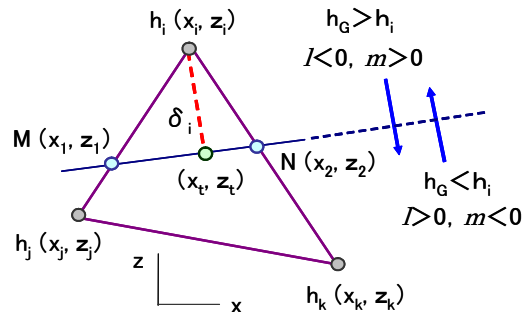


図-8 動水勾配と水流方向の算出

このとき、 $h_G$  と  $h_i$  の大小関係で流れの方向が決まり、その方向余弦  $(l, m)$  は  $sign$  を水頭差  $(h_i - h_G)$  の符号として、以下で与えられる。

$$l = \frac{x_l - x_i}{\delta_i} \times \text{sign} \quad m = \frac{z_l - z_i}{\delta_i} \times \text{sign} \quad (3)$$

他の 2 節点 j, k でも同様な計算を行い, 3 節点の平均値をもってその要素の代表値とする。

さて, 図-7 では, 貯水位の低下に伴い上流側への浸透流が生起し, これが更なる水位低下に伴って発達する様子が見られる。また, 貯水面付近で水流が集中する傾向が顕著になり, 浸食等の浸透破壊を伴う斜面の不安定化が懸念される。

浸透挙動に及ぼす斜面勾配の影響を調べるために, 水位低下速度  $s = 46\text{cm/hr}$  を一定とし, 勾配を変化させて同種の計算を行った。図-9 は勾配 1:1.5 の場合の計算で, 水位 3m 時の全水頭と水流の分布を描いたものである。図-5, 7 と比較して知れるように, 分布形状等に見られる浸透の様子は, 勾配が変化しても大きく変わらない。しかし, 同じ鉛直方向の現象変化(水位変化)に対して, 急傾斜の場合は水平距離が小さいので, 水流がより激しく現れ, 斜面の不安定化が増すことが考えられる。この様子を見るために, 図-10 に示したように, 堤体内の浸潤面の頂点と, 上流水位と斜面の交点との間で水位差  $\Delta h$  と水平距離の差  $\Delta x$  をとり, その比  $\Delta h / \Delta x$  を平均動水勾配と称して斜面勾配との関係を調べた。平均動水勾配の値は, 貯水位の低下に伴い増加し, また急斜面ほど大きくなる事が知れる。

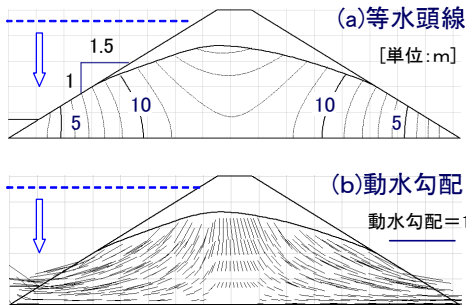


図-9 急傾斜時の浸透 (水位 3m)

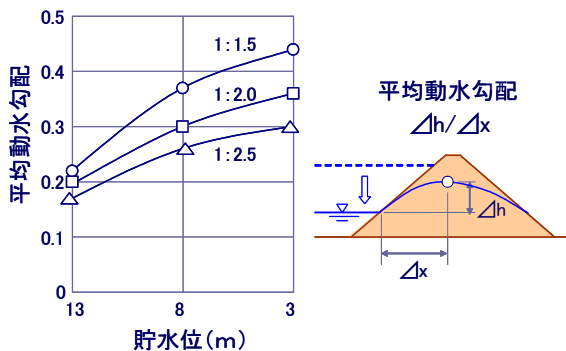


図-10 斜面勾配の影響

図-11 は浸透挙動に及ぼす水位低下速度  $s$  の影響を調べるために, 斜面勾配 1:2.0 の場合について,  $s = 23, 46, 92\text{cm/hr}$  と変化させて計算し, 貯水位 3m 時の全水頭値の分布を重ねて示したものである。低下速度が 4 倍異なるが, この程度では浸透挙動への影響はかなり小さいことが知れる。図-12 は, 低下速度  $s = 46\text{cm/hr}$  を一定として飽和透水係数  $k_s$  を変え, 低下速度比 ( $s / k_s$ ) としての影響を調べたものである。すなわち, 透水係数の精度よい測定は困難であるから, 本計算例で用いた  $k_s = 1.28 \times 10^{-6}\text{m/s}$  ( $s / k_s = 100$ ) を 5 倍 ( $s / k_s = 20$ ) あるいは 1/5 倍 ( $s / k_s = 500$ ) に過大・過小評価した場合を想定してみた。図は堤体中心軸上の 1/2 堤高位置において水位低下に伴う全水頭値の変動を見たものであるが,  $s / k_s = 20, 500$  と最大 25 倍の変化を与えても貯水位 3m 時の水頭値は 0.5m 程度の差しかなく, 低下速度の影響はやはり小さいことが分かる。

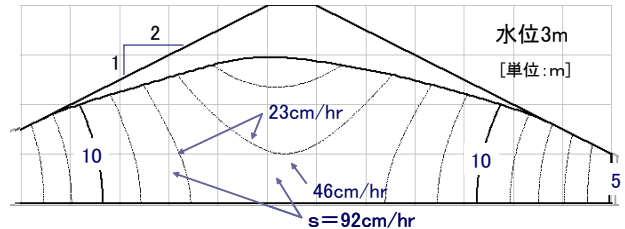


図-11 水位低下速度の影響 (1)

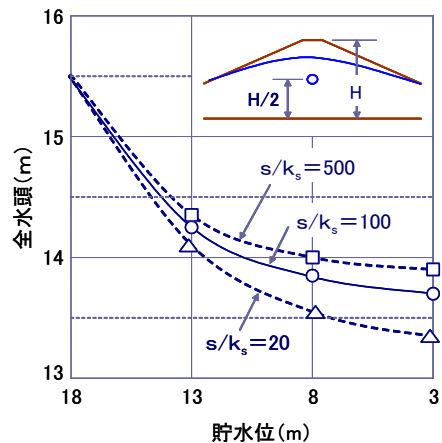


図-12 水位低下速度の影響 (2)

### 3・2 斜面の不安定化 (すべり破壊)

貯水位の低下に伴い上流側への浸透が発生し, 浸潤面が低下する。しかし, 堤体内の浸透の遅れにより浸潤面が速やかに低下せず, 飽和域の残存に伴って間隙水圧が残留する。図-13 のように堤体内に円弧すべり面を描いたとき, すべり面に働く間隙水圧は, 低下水位に対応する静水圧と, 残存飽和域に対応する過剰静水圧に区分できる。このとき, 堤体内で水位低下が全く生じないとす

る現行設計では、過剰静水圧を過大評価する（安全側の計算）ことになる。そこで、前節で得たFEM解を用いて簡便分割法による安定計算を行い、過剰静水圧と安全率の評価について現行設計との比較を行った。

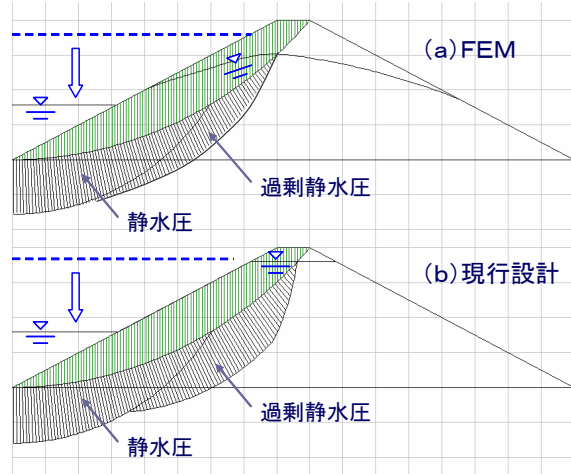


図-13 すべり面に働く間隙水圧

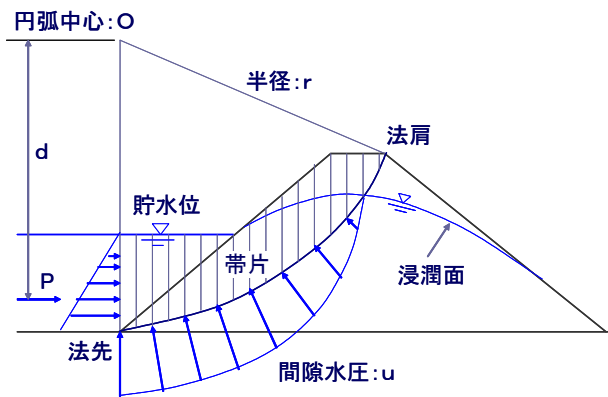


図-14 円弧すべり面

安定計算で対象とするすべり面は、法先と法肩の2点を通り、法先直上に中心点を有する図-14の円弧とした。計算では貯水部分まで含めてすべり面上の土塊を帯片分割し、その前面に貯水による水圧を負荷する方法を採った。貯水圧の合力をP、円弧中心OからPの作用位置までの距離をdとすると、安全率は次式で与えられる。

$$F_s = \frac{\sum \{c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi'\}}{\sum W \sin \alpha - (P \times d) / r} \quad (4)$$

図-15は斜面勾配1:2、低下速度s=46cm/hrの計算で、3つの貯水位におけるすべり面上の間隙水圧分布を描いたものである。図で間隙水圧の大きさは、すべり面に直交する水頭値と同じ長さの直線で表し、静水圧と過剰静水圧の間は曲線で区分している。図から、水位低下に伴いすべり面上の間隙水圧は減少するが、静水圧に対する過剰水圧の割合が急激に大きくなるのが知れる。

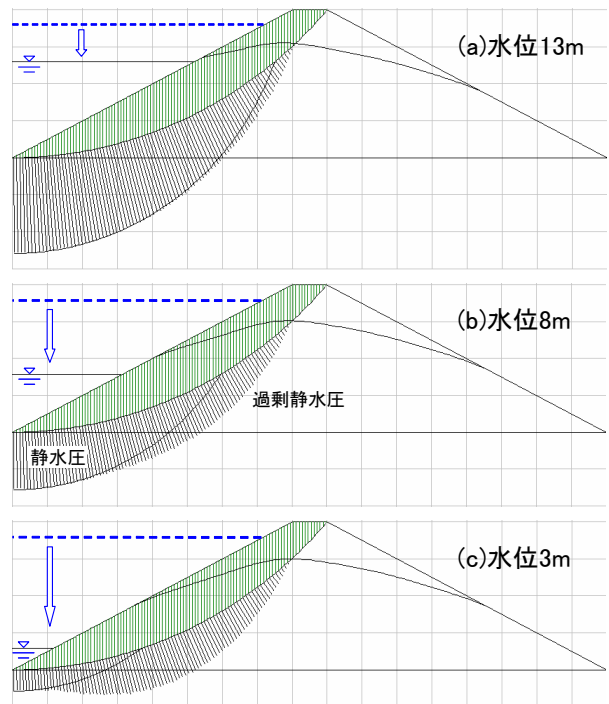


図-15 すべり面上の間隙水圧

FEM計算で対象とした遠心模型実験の堤体土の強度定数は、三軸圧縮試験の結果を参考に端数を捨てて概略値で表すと、 $c' = 20 \text{ kPa}$ 、 $\phi' = 30^\circ$ である。この値を用いて種々の計算条件に対して安定計算を実施した結果を以下に整理する。表-1は図-15と同じ条件の4つの水位段

表-1 間隙水圧と安全率の差

水位 (m)	18	13	8	3
U (FEM)	5.32	3.61	2.34	1.68
U (設計)	5.58	3.99	2.93	2.39
Uの差 (%)	4.90	10.3	25.3	42.2
$F_s$ (FEM)	2.03	1.71	1.48	1.36
$F_s$ (設計)	1.88	1.55	1.28	1.13
$F_s$ の差 (%)	7.71	10.4	15.6	20.1

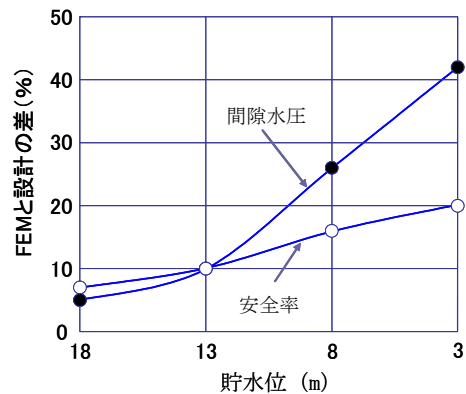


図-16 FEMと現行設計の差



階（水位 18m は定常浸透時）の安定計算において、FEM 解を用いた場合と現行設計による場合について、すべり面上の間隙水圧  $U$  と安全率  $F_s$  の大きさを比較したものである。ここで、 $U$  とは、間隙水圧の値をすべり面に沿って積分して合力として表した値であり、分布の面積に相当する（単位：kN/m）。また、図-16 は表-1 で求めた FEM と現行設計の差を貯水位との関係で整理したものである。これらの図表から、貯水位の低下に伴い両者の差が徐々に拡大する傾向が見られるが、安全率の差より間隙水圧の差の方が、より顕著に急激な変化を示すことが知れる。

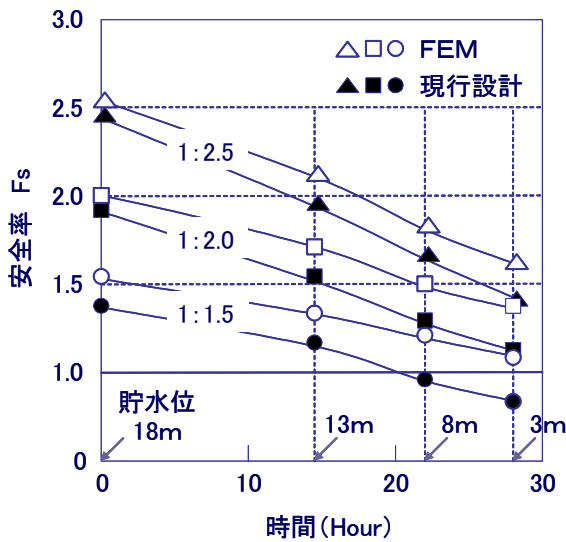


図-17 安全率の変遷

図-17 は水位低下に伴う安全率の変化を、斜面勾配を変えて調べたものであり、横軸に定常浸透状態からの経過時間と水位段階をとっている。当然のことながら、斜面勾配が急なほど安全率の値が小さいが、水位低下が進むにつれて FEM と現行設計の安全率の差が徐々に拡大する様子が見られる。また、勾配が急なほど、この差が若干ながら大きくなる様子が伺われる。

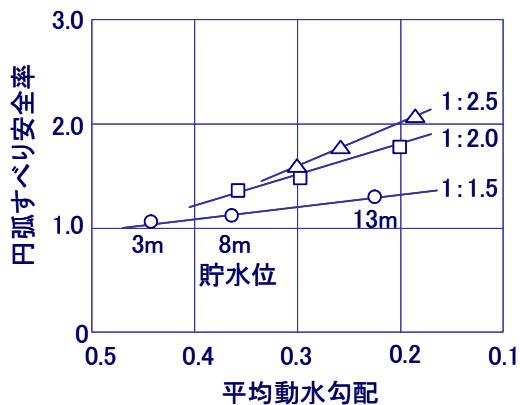


図-18 平均動水勾配と安全率

図-18 は、図-10 で定義した平均動水勾配と図-17 に示した円弧すべり安全率 (FEM) との関係性を、3つの貯水位について調べたものである。貯水位の低下に伴い平均動水勾配（不安定化の指数）が増加し、安全率は低下するが、両者の関係性は各斜面勾配においてほぼ直線的に変化することが分かる。また、斜面が急になるほど平均動水勾配の変動が大きくなるが、安全率への影響はかえって小さく現れることが知れる。

### 3・3 斜面の不安定化（浸透破壊）

堤体内を浸透した水が上・下流斜面から浸出するとき、土粒子に働く透水力と摩擦抵抗力のバランスの欠如により、土粒子が洗い出され、侵食（erosion）が発生する。以下に、この浸透破壊に対する安全性の評価法を提案し、水位低下に伴う各種の因子が浸透破壊に及ぼす影響について考察を加える。

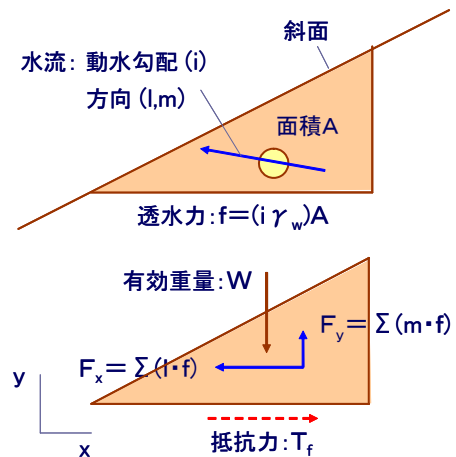


図-19 浸透破壊の検討

例えば、図-19 に示したように、斜面に沿って三角形の土塊を考える。この領域内にある要素の動水勾配  $i$  と水流方向を表す方向余弦  $(l, m)$  は、前節の図-8 の計算で得られるから、要素に働く透水力が  $f = (i \gamma_w) A$ 、これを  $x, y$  方向に分解したのち加算すれば、三角形領域に働く透水力 ( $F_x, F_y$ ) が定まる。 $F_x$  は土塊を滑動させる力として、 $F_y$  は土塊の有効重量  $W$  を加減する力として働く。従って三角形領域のすべりに関する安全率は次式で表される。ここで、 $B$  は三角形領域の底幅である。

$$F_s = \frac{T_f}{F_x} = \frac{c' B + (W - F_y) \tan \phi'}{F_x} \quad (5)$$

図-20 は斜面勾配 1:2、低下速度  $s = 46 \text{ cm/hr}$  の計算結果を用いて、上流側に貯水面を挟む底幅  $B = 10 \text{ m}$  の三角形、下流側法尻に同じ大きさの三角形を考え、3つの貯水位に対して式(5)の浸透破壊安全率の変動を調べた

ものである。ここで、強度定数 ( $c'$ ,  $\phi'$ ) の値は円弧すべり計算に用いた  $c' = 20\text{kPa}$ ,  $\phi' = 30^\circ$  とし、有効重量  $W$  の計算に用いる単位体積重量は  $\gamma_t = \gamma_{\text{sat}} = 20\text{kN/m}^3$  とした。上流側の浸潤面は、WL13m では貯水位とほぼ連動して降下するが、WL8m 及び 3m になると降下がかなり遅れ、動きも小さくなる。したがって、貯水位の低下とともに内外の水位差が大きくなり、水流も強くなるので、浸透破壊の安全率が急激に低下する様子が見られる。これに対し、下流側の安全率はほぼ一定であり、大きな変動は見られない。

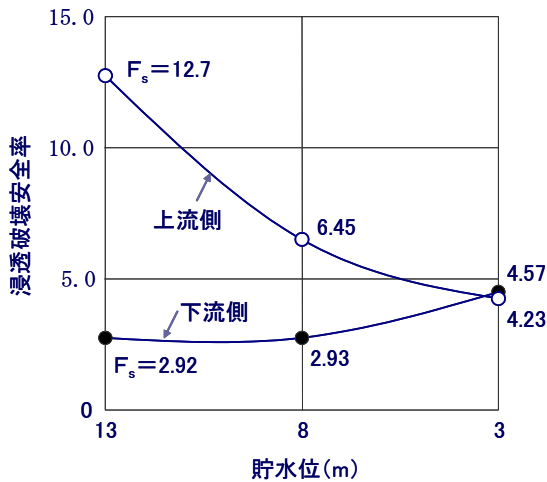
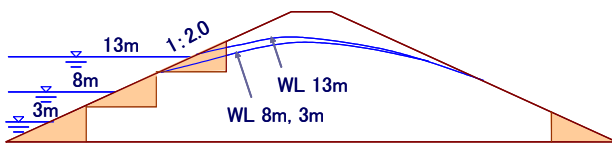


図-20 浸透破壊安全率

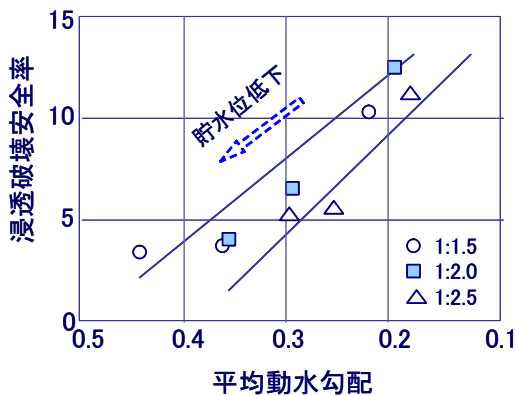


図-21 平均動水勾配と安全率

図-21 は図-10 で定義した平均動水勾配と浸透破壊に関する安全率との関係を、斜面勾配を変えて調べたものである。図-18 の円弧すべり安全率の場合と異なり、勾配 1:2.0 以外は直線関係が明瞭に見られないが、全体

的には、動水勾配の増加（貯水位の低下）とともに安全率が低下する傾向を示している。

図-7に見られるように、上流斜面から排出される浸透流では、貯水面を挟んだ一定幅の範囲に動水勾配の大きな水流が集中する傾向が見られる。したがって、浸透破壊の検討においても、図-19のような三角形の領域を考えるより、斜面に平行な領域を考える方が適切のように思われる。図-22は斜面に沿って①の三角形と②の平行四辺形を組み合わせた四辺形の破壊領域を設定したものである。透水力の計算方法は図-19と同様であるが、有効重量  $W$  も含めて領域①、②で別々に算出し、それぞれの領域ですべり抵抗力 ( $T_{f1}$ ,  $T_{f2}$ ) を求める。浸透破壊に関する安全率は、これらの抵抗力の水平成分を合算した合力  $T_f$  と水平浸透力の合力  $F_x$  の比として、以下のように与えられる。

$$F_s = \frac{T_f}{F_x} = \frac{T_{f1} + T_{f2} \cos \theta}{F_{x1} + F_{x2}} \quad (6)$$

$$T_{f1} = c' L_1 + (W_1 - F_{y1}) \tan \phi'$$

$$T_{f2} = c' L_2 + (W_2 - F_{y2}) \cos \theta \tan \phi'$$

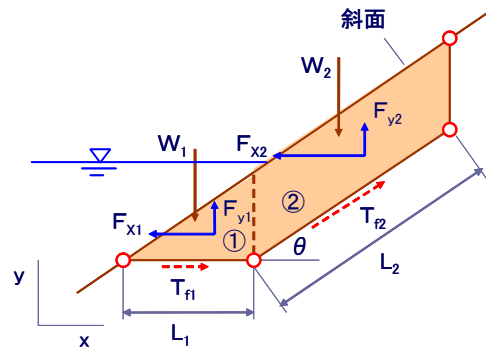


図-22 斜面に沿う破壊領域

図-23は斜面勾配 1:2、低下速度  $s = 46\text{cm/hr}$  の計算結果を用いて、斜面表面に沿って貯水面を挟む幾つかの四辺形領域を考え、浸透破壊を検討したものである。領域の大きさは水平・鉛直方向に各3段階変え、堤体内部への拡大を①, ②, ③、深さ方向への拡大を㊶, ㊷, ㊸として表している。図から、深さ方向に領域を拡大すると水流の強さが平均化されて安全率が増加すること、逆に領域が浅いほど貯水面近傍の水流の強さが強調されて安全率が低下することが分かる。ただし、深さの拡大に伴う安全率の変動はそれ程大きくなく、10%程度と考えてよい。一方、堤体内部への拡大に伴い安全率は急激に低下するが、底幅の増大に伴い一定値に漸近する傾向を示し、本例の計算範囲では、浸透破壊の検討に際し  $L_1 = 6 \sim 8\text{m}$  程度の領域を考えればよいと判断される。

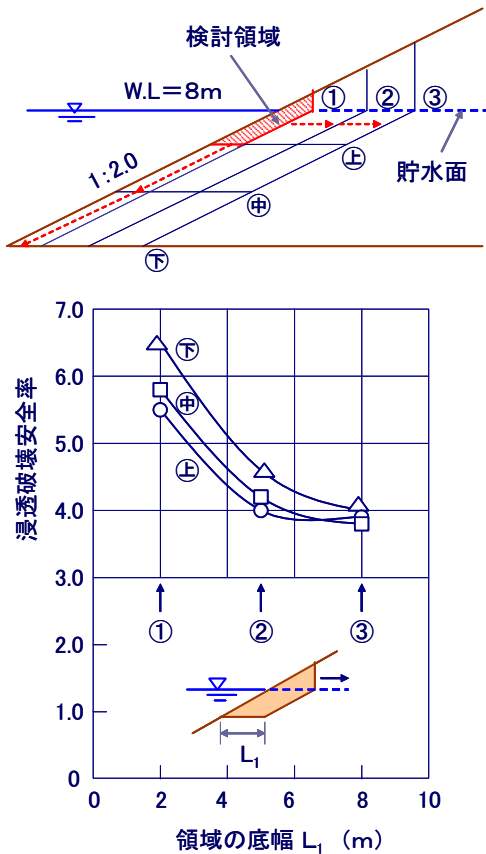


図-23 検討領域の大きさと安全率

#### 4. 結論

本研究で得られた成果と知見を整理すると、以下のよう  
にまとめられる。

- (1) 水位急低下時の浸透挙動に関し FEM 解析を行ったところ、堤体内では排水の遅れが生じて間隙水圧が残留すること、上流側への浸透流が発生して貯水面付近で水流が集中することなど、堤体の不安定化に影響する浸透流の様相が明確になった。また、これらの浸透挙動に対して、斜面勾配の相違は比較的鋭敏に反映されるが、水位低下速度による影響はかなり小さいことが判明した。
- (2) 水位低下に伴う斜面の不安定化を、円弧すべり面に働く間隙水圧と安全率の大きさに着目して調べ、FEM 解と現行設計による評価を比較した。間隙水圧の評価において現行設計がかなり過大評価の傾向にあることは明確に見られたが、安全率の値としては FEM 解と 10~20% 程度の差にしか現れないことが知れた。
- (3) 水位低下に伴う斜面の不安定化を、堤体内の動水勾配と水流方向の分布状況を踏まえて、浸透破壊として検

討する一手法を提案した。浸透破壊を想定する領域を堤体内部へ拡大する場合と深さ方向に拡大する場合について二、三試算し、安全率の変動を調べることで、検討領域の適切な採り方について一定の方向付けが行えた。

謝辞 本論文は平成 19 年度の卒業研究を整理し、報告としてまとめたものである。研究を進めるに当たって、データ解析に積極的に携わってくれた 4 年次学生、白井佑典君及び横井聖治君に、ここに謝意を表したい。

#### <参考文献>

- 1) 山口柏樹, 大根義男: フィルダムの設計および施工, 技報堂出版, 1973.
- 2) R. C. Hirschfeld and S. J. Poulos: Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, 1972.
- 3) 大根義男, 木村勝行: ダムの浸透性について, ダム日本, No. 388, pp. 47-62, 1977.
- 4) 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, 第 264 号, pp. 87-96, 1977.
- 5) 木村勝行: フィルダム取り付け地山部における浸透流に関する水理学的研究, 1990.
- 6) T. Sugii, K. Yamada and M. Uemura: Measuring Hydraulic Properties for Unsaturated Soils with Unsteady Method, Proc. Asian Conf. on Unsaturated Soils, pp. 439-444, 2000.
- 7) K. KIMURA, T. OKUMURA, K. NARITA and Y. OHNE: Centrifuge Tests on Moisture and Permeability in Sand, MLWR, pp. 57-61, 2001.
- 8) 宇都宮徹, 成田国朝, 奥村哲夫: 貯水位変動に伴う斜面内の浸透挙動に関する研究, 愛知工業大学研究報告, 35 号 B, pp. 119-126, 2000.
- 9) 工藤アキヒコ, 西垣誠, 鳥居剛, 浅田昌蔵: ロックフィルダムの上流側ロックゾーンの浸透特性が水位急低下時の残留水圧に及ぼす影響, ダム工学 13 (3), pp. 137-151, 2003.
- 10) C. S. Desai: Drawdown Analysis of Slopes by Numerical Method, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT7, 1977.
- 11) 成田国朝, 木村勝行: 透水力を考慮した斜面の安定解析, ダム工学, Vol. 16, No. 1 (61), pp. 55-59, 2006.

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)