

貯水位変動に伴う斜面内の浸透挙動に関する研究

Seepage flow behavior in slopes due to water level change in the reservoir

宇都宮徹[†], 成田国朝^{††}, 奥村哲夫^{††}

Toru UTSUNOMIYA, Kunitomo NARITA and Tetsuo OKUMURA

ABSTRACT : Fill-type dams for power generation and irrigation purposes have often experienced severe damages of slope failure due to a rapid draw down of the reservoir water in seasons of full operation. This paper concerns seepage flow behavior in earth slopes, development of the phreatic surface and distribution of pore water pressure in the dam body and their influence on slope instability, due to the change in the upstream water level in the reservoir. Centrifuge model tests and associated FEM saturated-unsaturated seepage analyses were carried out on several model earth fills to discuss and propose an appropriate procedure of stability evaluation of slopes. The results showed that a close agreement is achieved between the behavior in centrifuge model tests and that in FEM analyses, and that the FEM seepage analysis procedure can be used as a useful tool to predict the actual behavior of earth fill dams.

1. はじめに

発電や灌漑を用途としたフィルタイプのダムでは、短時間の放水などにより貯水位が急激に降下するときがある。このとき、水位降下速度と堤体の透水性（水の排水速度）との相対関係により、浸潤面の降下が遅ければ、堤体内には排水遅れによる多量の残留水圧が発生することとなる。この残留水圧が大きいと土の有効応力（土粒子間の接触圧）が小さくなるため、土のせん断抵抗力が低下し、最終的に斜面崩壊等の被害が発生する事例が少なくない。また、残留水圧の大きさや発生過程は、降下速度や堤体の透水性の相互関係によって異なるため、水位変動における堤体内の浸透状況、あるいは間隙水圧分布の刻々の変化を実験や解析を通じて把握しておくことは、ダムの機能保全を図る上で極めて重要なこ

とと考えられる。

本研究では、貯水位変動に伴う堤体内の浸潤面形状や間隙水圧挙動、これに起因する斜面の安定性を遠心模型実験で再現し、水位変動速度の相違と間隙水圧分布の変動特性を明確にしながら、設計・施工上の基礎資料を得ることを目的としている。具体的には以下の項目に的を絞って研究を進めた。

- (1) 遠心模型実験による水位変動に伴う堤体内の浸潤面形状の把握
- (2) 水位降下時における間隙水圧の蓄積・消散・残留挙動の解明
- (3) 水位急降下に伴う斜面の安定性の検討

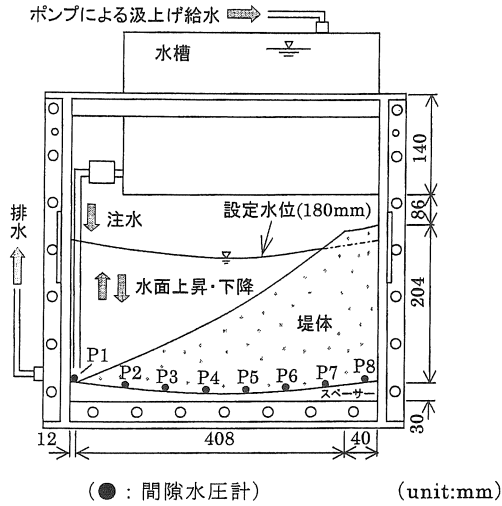
2. 実験概要

2.1 水位変動に伴う堤体内の浸透挙動

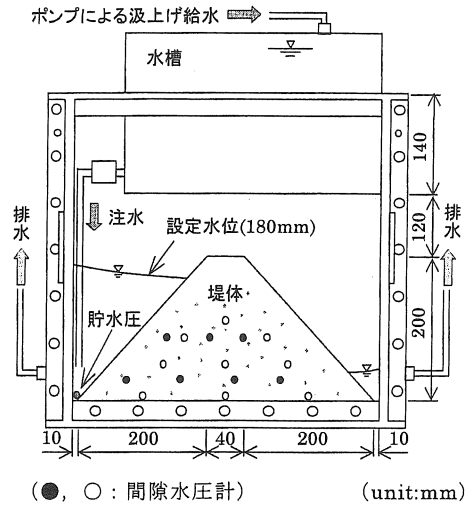
CASE.1 は貯水位が上昇・降下したときの浸潤面形状を調べるための実験である。図-1に実験装置の概要図を示す。アルミ製土槽コンテナ内に間隙水

[†] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 土木工学科（豊田市）



(● : 間隙水圧計) (unit:mm)
 図-1 実験概要図 (CASE.1)



(●, ○ : 間隙水圧計) (unit:mm)
 図-2 実験概要図 (CASE.2)

圧計 P1~P8 を設置しながら、3cm×7 層で均一に締固めた後、高さ 204mm、斜面勾配 1:2 の堤体模型を作製した。

実験では、遠心加速度 30g まで加速した状態（実物で 6.0m 程度の堤体に相当）で、貯水池に設定水位高 180mm 一定になるまで注水して飽和した後、水位を急降下させながら堤体内の浸透状況を追跡した。

2.2 水位降下に伴う堤体内の間隙水圧挙動

CASE.2 は降下速度の違いにおける堤体内の間隙水圧分布の変化を調べるための実験であり、図-2 に概要図を示す。土槽内に間隙水圧計を設置しながら均一に締固めた後、堤高 200mm、斜面勾配 1:1 の堤体模型を作製した。なお、図より間隙水圧計：●は CASE.2-1、○は CASE.2-2 の配置を表している。

実験では、遠心加速度 30g まで加速した状態（実物で 6.0m の堤体に相当）で、設定水位 180mm で一定となる状態を保ちながら注水を続け、堤体内に設置した間隙水圧計の値に変動が見られなくなったことを確認した後（ほぼ定常浸透状態）、水位を急降下させながら堤体内の間隙水圧の経時変化を計測した。

なお、実験に用いた試料土は、CASE.1, CASE.2 ともに粘土質砂 (SC) であり、その力学的性質と遠心場における最大貯水位と注水・排水時間を表-1 にまとめた。

表-1 試料土の物性値と実験条件

| | CASE.1 | CASE.2 | |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | | 1 | 2 |
| 土粒子密度 (g/cm ³) | 2.602 | 2.619 | |
| 最大乾燥密 (g/cm ³) | 1.937 | 1.902 | |
| 最適含水比 (%) | 11.9 | 12.8 | |
| D 値 (%) | 95 | 95 | |
| 乾燥密度 (g/cm ³) | 1.840 | 1.807 | |
| 透水係数 (cm/s) | 2.89×10 ⁻³ | 1.28×10 ⁻⁴ | |
| 初期含水比 (%) | 8.4 | 9.2 | |
| H.W.L (cm) | 18 | 18 | 18 |
| 注水時間 (sec) | 116 | 88 | 130, 610 |
| 排水時間 (sec) | 106 | 68 | 224 |

3. 解析手法

3.1 飽和-不飽和 2 次元 FEM 解析

飽和～不飽和解析領域において、Darcy 則が成立し、かつ土の間隙水圧の変化による水の圧縮や間隙の変化がないものと仮定すると、飽和～不飽和領域の浸透流を支配する基礎方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} + k_y) + q - c \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

ただし、 $c = \frac{\partial \theta}{\partial \phi}$: 比水分容量

ここに、 k_x, k_y は x, y 方向の透水係数、 q は土の

単位体積中に生じる湧出量あるいは排水量、 ϕ は圧力水頭、 θ は体積含水率、 t は時間である。基礎方程式の有限要素解析への定式化には Galerkin の重み付き残差法を用い、数値計算では時間項に中央差分法を適用して解（圧力水頭）が計算時間刻み毎に許容収束条件を満たすまで反復計算を行った。境界条件は貯水面および浸出面で圧力水頭が既知、不透水面で法線流速が既知として与えた。また、遠心模型実験では、両 CASE とも模型堤体に対して遠心加速度 $30g$ を与えて浸透実験を行っているの、本研究ではこれを実物換算して、同一形状の堤体を解析モデルとした。

図-3は、解析に用いた不飽和領域における透水特性曲線（圧力水頭 ψ -体積含水率（飽和度） θ -比透水係数 kr ）の関係を表したものである。実験では粘土質砂を使用しているが、不飽和領域の浸透特性が不明なため、使用した二種類の試料土に対して Van-Genuchten の提案式により仮定したものをを用いた。実線は CASE.1 を、破線は CASE.2 を表している。また、遠心模型実験と同条件の下で解析を行うため、任意時間における貯水高の設定には、各 CASE の遠心模型実験により得られた貯水圧の値から水位を算出し、最小二乗法を用いて定式化したものを使用した。その他の解析に用いたパラメータは、飽和透水係数 $k_s=2.89 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ (CASE.1), $1.28 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ (CASE.2)、圧力水頭の収束誤差限界 $\Delta\phi=0.05\text{m}$ 、初期条件は、 $\theta_i=0.154$ (CASE.1), 0.166 (CASE.2)、計算時間刻み $\Delta t=360\text{sec}$ である。

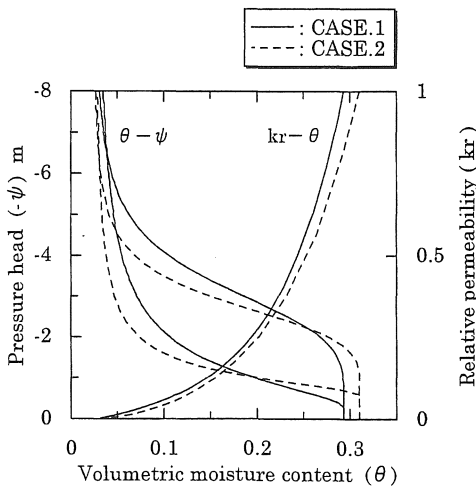


図-3 不飽和浸透特性（仮定）

3. 2 斜面安定解析

図-4は本研究で用いた安定計算の概要を表したものである。想定した円弧すべりでは、すべり面上の τ 、 τ_f が一定ではないので、図のように円弧で囲まれるすべり土塊を幾つかの帯片に分割し、各帯片で力のつり合いから τ_f を求め、全体的には滑動・抵抗のモーメントつり合いを考慮して安全率を算出した。計算ではすべり土塊を 200 分割し、外水面の降下に伴う貯水圧は、上流側斜面に作用する抵抗モーメントとして取り込むこととした。また、堤体内の間隙水圧分布を取り入れた有効応力法による簡易ピシヨップ法で安定解析を行い、すべり面上に作用する間隙水圧は FEM 解析によって算出したものを用いた。なお、安定解析を行ったのは CASE.2-1,2 で、各帯片の水の重量は $\gamma_w=1.0\text{g/cm}^3$ 、土の重量は飽和領域で $\gamma_{sat}=2.117\text{g/cm}^3$ 、不飽和領域で $\gamma_i=1.973\text{g/cm}^3$ である。また、土の強度定数は CASE.2 の実験で使用した試料土を対照に行った三軸 CU 試験より $c'=22.6\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=27.2^\circ$ であり、飽和領域-不飽和領域で一定であるものとした。

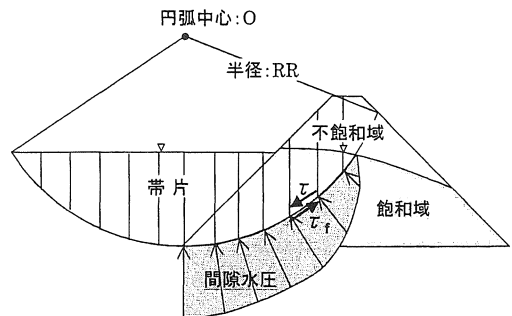


図-4 安定計算の概要図

4. 結果および考察

4. 1 水位変動に伴う浸透挙動の把握

図-5は水位上昇時の堤体内の浸潤面形状を実験値と解析値で比較したものであり、実線の実験値は堤体底部に設置した間隙水圧計の測定値を水柱高に換算し水平流を仮定して求めた概略浸潤面、破線は FEM 解析で得られた自由水面としての浸潤面である。ただし、実験値は $30g$ の遠心場に対する換算として、長さを 30 倍、時間を 30^2 倍して示している。図から両者はかなり良い精度で対応していると考えられるが、各時間において浸潤面上昇は

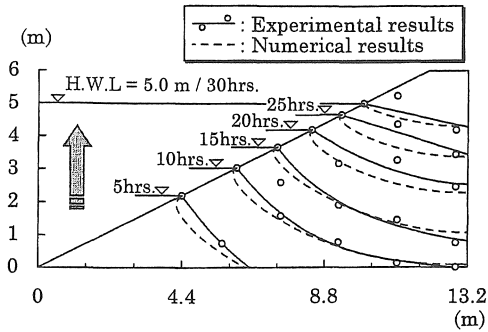


図-5 水位上昇時における堤体内の浸透状況

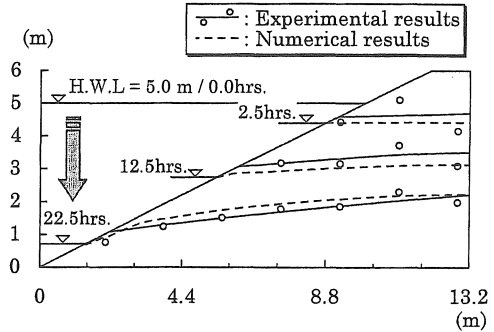


図-6 水位降下時における堤体内の浸透状況

実験の方が若干速く、浸透速度が大きいことが見て取れる。実験の浸潤面は水平流を仮定して描いているので、流線網の考え方からすれば真の浸潤面より左側に位置しているはずである。したがって、真の実験値と解析値との差は図より更に開くことが想像されるが、 n_g の遠心場では透水係数が見かけ上 n 倍になっていることを考慮すると、その相殺で両者の対応性が結果的に良かったものと判断される。水位上昇時は写真撮影でも浸潤面形状が良好に確認されており、堤体内の浸透状況は遠心模型実験の各測定から概略推定できると考えられる。

図-6は水位急降下時において実験値と解析値を比較したものである。図より、両者ともかなり良い精度で水位降下時の浸潤面形状を網羅していると考えられる。破線の方が浸潤面の降下が速く、浸透速度が大きい傾向が見られる。水位が降下すると堤体内は排水が開始され、飽和状態から不飽和状態になった後も毛管水流が発生して排水が逐次行われる。この状態における浸透の抵抗（不飽和透水係数）が図-3の仮定では小さいため、図-6のように破線が若干、浸透が速くなったものと考えられる。また、実験では堤体模型に作用する水圧が過大であり、かつ貯水位の降下が加速的になることから、解析より実験の方が損失水頭、すなわち動水勾配が一時的に増加することが推測できる。この影響から浸潤面の降下が時間とともに速くなるのが考えられるが、図より、そのようなことを考慮しなくてもよい結果が得られたと見て良い。

図-7は間隙水圧計が設置されている堤体底面部において、圧力水頭値を同時刻で比較した相関図である。図より、水位が降下して ψ 値が小さくなると両者の相関性がさらに強くなる傾向が見られ、良好

な相関関係がある。相関係数は 0.972 であり、圧力水頭値に関しては、実験値とほぼ一致したことが確認できた。以上のことから、水位急降下時における堤体内の浸潤面形状は実験結果とほぼ一致し、推定は可能である。また、圧力水頭値は良好な結果が得られていることから、水位急降下に伴う間隙水圧分布は遠心模型実験で概略把握できると考えられる。

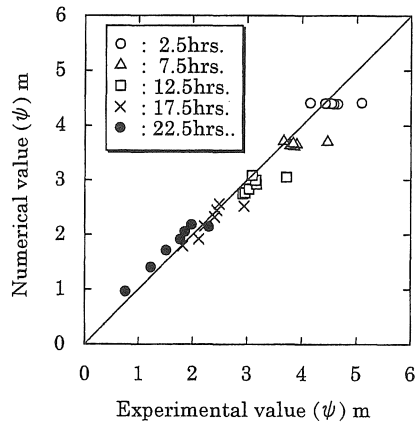
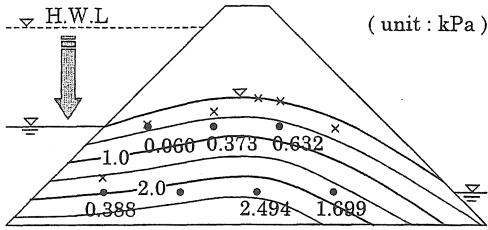


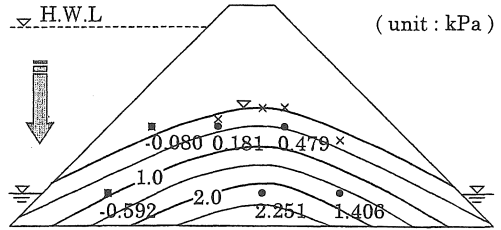
図-7 圧力水頭の相関図

4. 2 水位急降下時の堤体内の間隙水圧挙動

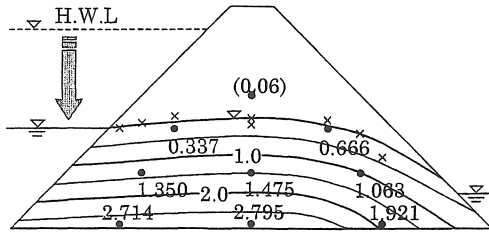
CASE.2-1,2 は降下速度の違いによる堤体内の間隙水圧分布を比較するための実験であり、図-8、9は、水位 = 1 / 2 と水位降下直後の 2 ケースにおける等間隙水圧線を表したものである。両ケースの等間隙水圧線は、堤体内に設置した間隙水圧計の値を水柱高 (×印) に換算した後、各点を概略的に連ねた線を浸潤面と設定し、各ケースにおける流線網から描いた。また、各図の●印は間隙水圧計の埋設位置を表しており、添字の値は水位 = 1 / 2 と水位降下直後のときにおける測定値を示している。なお、



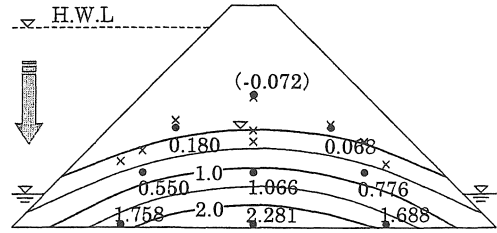
(a) CASE.2-1 の等間隙水圧線



(a) CASE.2-1 の等間隙水圧線



(b) CASE.2-2 の等間隙水圧線



(b) CASE.2-2 の等間隙水圧線

図-8 水位 = 1 / 2 の間隙水圧分布

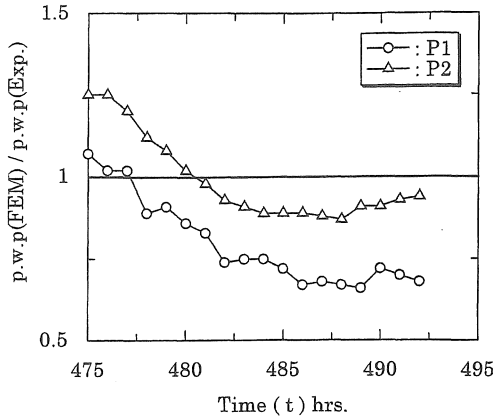
図-9 水位降下直後の間隙水圧分布

各図とも遠心場の値として表している。図-8より満水位から水位 = 1 / 2 になるまで要した時間は、遠心場で CASE.2-1 は 32sec、CASE.2-2 は 132sec で降下時間におよそ 100sec (実物換算で 39hour) の誤差が生じている状態に相当しているが、両者を比較すると明確な差が見られるとは言い難い。しかしながら、各図の堤体中心部付近に着目すると、水位の降下が速い図(a)では等間隙水圧線が若干、上部方向へ凸の形状をしていることが見て取れる。これは降下速度の相違により堤体内に残留水圧がわずかではあるが発生したと考えられる。

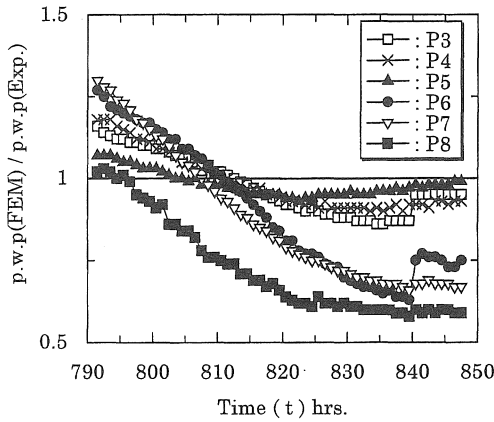
水位降下直後に関しては、図-9より降下時間は CASE.2-1 で 68sec、CASE.2-2 で 224sec である。図-8より図-9の方が各 CASE ともに間隙水圧分布に大きな変化が見られ、降下速度の違いによる堤体内の間隙水圧挙動に明確な差が生じていることが分かる。図-9において、先と同様に堤体中心部付近で比較すると、図(a)では最大で 2.5kPa の間隙水圧が残留しているのに対し、図(b)は 2.0kPa の間隙水圧の残留が生じていることが見て取れる。各 CASE における降下時間の差は、およそ 156sec で実物換算すると 39hour に相当し、この相対関係によって間隙水圧の消散が遅くなり、図(a)の方が高い残留水圧が発生したと考えられる。この残留水圧

は模型堤体の強度を低下させ、上流側斜面の安定性を損なう恐れがあるが、実験結果からいえば土の強度の方が大きかったため、斜面破壊に至らしめるほど残留水圧は高くなかったと想定できる。また、この種の遠心模型実験では、間隙水の移動が n^2 倍に短縮されることから動水勾配が実物の n 倍となり、堤体内の浸透が速くなると考えられるが、図-9における間隙水圧分布でも図(a)の方が堤体内に残留している間隙水圧が高いことは明瞭であり、実ダムの水位急降下現象を良好に再現していると考えられる。したがって、水位降下時の堤体内の間隙水圧挙動は遠心模型実験で概略把握できるものと考えられる。

図-10は水位降下時における堤体内の間隙水圧の経時変化を実験値と FEM 解析で比較したものである。図(a)は CASE.2-1、(b)は CASE.2-2 で、両図とも間隙水圧比と時間の関係を表している。ここでは、間隙水圧比を降下開始から同時刻における遠心実験で得られた間隙水圧値 (p.w.p(Exp.)) と解析値 (p.w.p(FEM)) の比として示すこととする。なお、各 CASE の間隙水圧計の配置図を図-11に示す。各図より降下開始付近で解析値の方が高いが経過時間とともに実験値との差は緩和され、降下直後に近づくにつれて徐々に実験値が高くなる傾向を



(a) CASE.2-1 の間隙水圧挙動



(b) CASE.2-2 の間隙水圧挙動

図-10 水位降下時の時間-間隙水圧比の関係

示している。解析では不飽和透水特性を仮定して計算を行っているため、実験で用いた試料土が相対的に排水し易い傾向があったことが考えられる。しかしながら、前述のように水位降下時の間隙水圧分布は FEM 解析で良好に評価できる結果が得られていることから、遠心模型実験における不飽和領域の浸透特性をさらに詳細に求めることができれば、FEM 解析で比較的良好な評価が可能である。

4. 3 水位急降下時における安定性の検討

図-12は計算に用いた仮定したすべり面を表したもので、図示のすべり円弧を対照に安全率 (Fs) を算出した。図-13は CASE.2 において Fs-時間-排水率の関係を表したものである。実線は

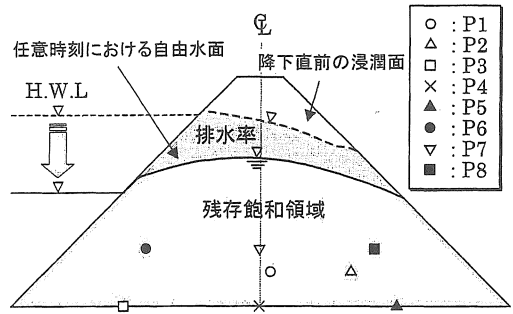


図-11 間隙水圧計の配置図

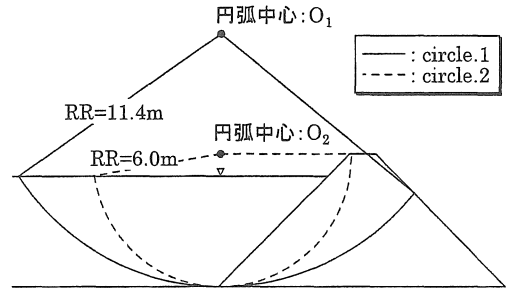


図-12 仮定したすべり面

CASE.2-1、破線は CASE.2-2 で、各 CASE とも水位降下開始を 0.0hrs.とした。なお、Fs はすべり面上に作用する任意時刻の間隙水圧分布を FEM 解析により求めて算出したものである。また、ここでの排水率は、図-11より降下直前の飽和領域の面積比率を初期値として、図中の排水率は初期値と残存飽和域の差により算出した。図-13から、実線は降下開始より僅か 10hour ですでに約 40% 近く減少しているのに対して、破線では約 10% 程度に留まっているのを見て取れる。これは水位の降下速度が CASE.2-2 の約 1/3 に相当する大きさであるため、水位降下に伴う斜面内では排水遅れによる間隙水圧が蓄積し、安全率の低下に過大な影響を及ぼしたと考えられる。また、CASE.2-1 は 10hour を過ぎたあたりから安全率の低下が見られなくなっているが、排水率の変動からも明らかなように堤体内の間隙水圧が消散されたことによるものと推測される。逆に破線では水位の降下が遅いため、安全率の低下が緩やかであることが確認できる。一方、すべり面の相違に関しては、circle.1, 2 も水位降下が進行するに連れて同様な形状をしており、すべり半径が大きいほど Fs が小さいことが分かった。また、排水率に関しては水位の降下が速い方が増加す

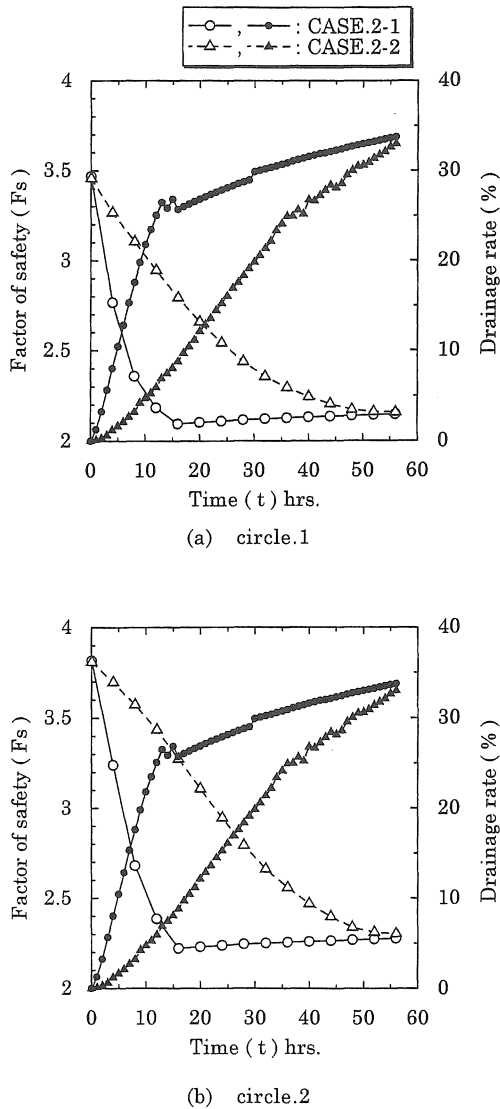


図-13 安全率-時間-排水率の関係

る傾向に見られるが、CASE.2-1 で降下完了時（17hour）を過ぎたところよりほぼ一定となっている。これは、貯水位の降下速度の大小による損失水頭（動水勾配）が排水（間隙水圧の消散）に密接な関係があると考えられる。また、従来手法である水位急降状態における安全率は 1.62 で、各 CASE と比較すると 0.5~2.0 程度大きい値を取るが、本研究のようなすべり面上の間隙水圧分布を指定した手法では、降下速度の大小、あるいは堤体の透水性の相違によって安全率が求まるので、常に安定性を保てる状態でダムとしての機能を果たすことが可能

であると推定される。以上のことから、場所的な間隙水圧分布を指定した安定計算では、水位急降状態での安全率より大なる値を示すが、水位降下に伴う刻々の安全率の変化を推定することができ、ダムの機能保全を図る上で良好な手法である。

5. 結論

本研究では、貯水位変動に伴う堤体内の浸透挙動に関して、遠心模型実験による再現性、実験結果と FEM 解析の適合性、および水位降下時における斜面の安定性について検討を行ってきた。結果を以下にまとめた。

- (1) 水位上昇時における堤体内の浸潤面形状は、遠心模型実験で得られた間隙水圧計の値から推定でき、同条件の下で行った飽和-不飽和 2 次元 FEM 解析の結果とほぼ同一形状を示した。一方、水位降下時では、浸潤面を間隙水圧値から推定したにもかかわらず、解析結果とほぼ一致しており、遠心模型実験での把握は可能である。
- (2) 水位降下時における堤体内の間隙水圧挙動は、堤体の透水性が一定の場合、降下速度が支配的であり、間隙水圧の蓄積・消散・残留は遠心模型実験で把握できる。
- (3) 斜面の安定性は、すべり面上の間隙水圧分布を指定した手法によって水位降下に伴う安全率の変化を推定でき、ダムの機能保全を図る上で良好な手段であると考えられる。なお、計算結果より安全率は貯水圧が多大な影響を及ぼすことが確認できている。
- (4) 堤体内の間隙水圧値を実験と解析で比較した結果、良好な傾向が得られたとは言い難く、遠心模型実験における不飽和部の浸透特性をさらに詳細に求めることが今後の検討課題として残された。

謝辞

本研究は文部省科学研究費補助金の援助を受けた研究であることを付記し、謝意を表する。

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) 山口 柏樹: 土質力学 (全改訂), 技報堂出版, 1984
- 3) 土質工学会: 講座・遠心模型実験, 土と基礎, vol. 35-36, 1987-1988
- 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, pp. 87-96, 1977
- 5) 西垣 誠, 楠見 和紀: 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 179-186, 1987
- 6) 木村 勝行, 大根 義男, 佐藤 浩一: 貯水位の変動に伴う堤体内の浸潤面について, 第 15 回土質工学研究発表会, pp. 1161-1164, 1980
- 7) 宇都 宮徹, 奥村 哲夫, 成田 国朝: 外水面の変動に伴う堤体内の浸透挙動に関する遠心模型実験, 平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 299-300, 1999
- 8) 宇都 宮徹, 奥村 哲夫, 成田 国朝: 外水面の変動に伴う堤体内の浸透挙動に関する遠心模型実験 (その 2), 平成 11 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 257-258, 2000
- 9) 口石 孝幸: 非定常-飽和・不飽和浸透流に対する有限要素解析の解, 愛知工業大学修士論文, 1997
- 10) 奥村 哲夫, 成田 国朝, 大根 義男: 遠心裁可模型実験に関する基礎実験, 愛知工業大学研究報告, No. 29, pp. 79-88, 1994

(受理 平成12年3月18日)