

水位急低下時の浸透挙動と破壊評価に関する解析的検討

Analytical Study on Seepage Behavior and Safety Evaluation in Embankment Dam during Rapid Draw-down

安藤雅樹[†], 成田国朝^{††}, 木村勝行^{††}, 奥村哲夫^{††}

Masaki ANDO, Kunitomo NARITA, Katsuyuki KIMURA, Tetsuo OKUMURA

Abstract Finite element saturated and unsaturated seepage flow analysis was done in the present paper to evaluate 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 upstream slope. Applicability and accuracy of F.E. solutions was first examined by comparing the results of computation with those from centrifuge model tests. Parametric studies were then 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. Slope stability analysis carried out for several circular sliding surfaces revealed that the procedure of pore water pressure estimation currently adopted in the design gives a safe side value as compared with the computed results.

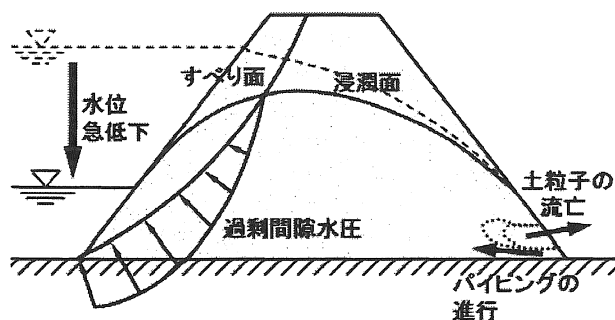
1. はじめに

アースダムや河川堤防のような水理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¹⁾²⁾³⁾(図-1)。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。

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) FEM 解析による遠心模型実験結果の照査、及び解析の精度と適用限界
- (2) 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
- (3) 水位低下に伴う間隙水圧の時間的・空間的な変化と破壊形態との関連性
- (4) 水位低下時の間隙水圧評価における現行設計と FEM 解析結果の相違



[†] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学工学部都市環境学科 (豊田市)

図-1 堤体破壊の形態

2. 解析概要

2・1 解析手法の概要

FEM飽和-不飽和浸透流解析⁴⁾⁵⁾(以下、浸透解析)により、水位急低下時の解析を行う。飽和-不飽和を対象とした浸透解析では、位置水頭と圧力水頭の和である全水頭が、飽和領域では正值(+)、不飽和領域では負値(-)をとるとし、浸潤面は圧力水頭がゼロの点を結んだ面で定義する(図-2)

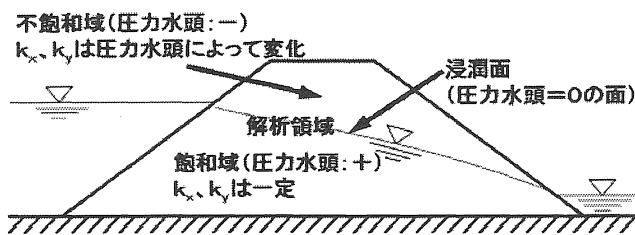
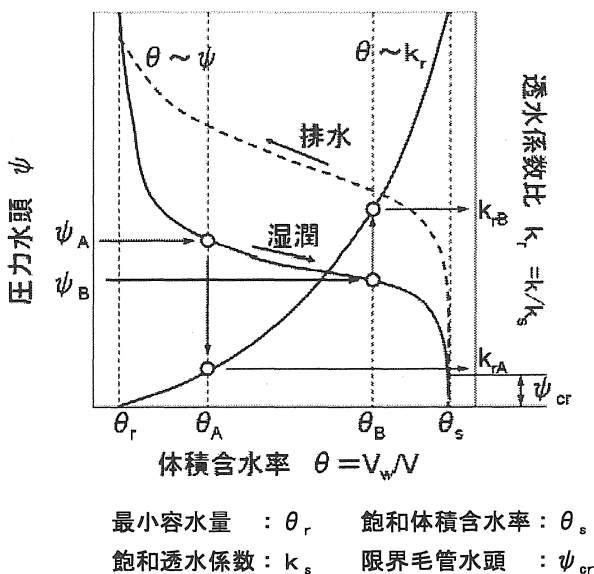


図-2 飽和-不飽和浸透解析

2・2 水分保持曲線

水分保持曲線は一般に、図-3に示すような逆S字形状を呈する。また、浸透過程(Wetting)と排水過程(Drying)において同一経路を取らず、ヒステリシスを生じることが知られている。土中の圧力水頭が限界毛管水頭(ψ_{cr})以下になると排水を開始する。この限界毛管水頭は、透水係数と同様に、土の粒径分布や締め固めの状態に依存する数値である。一方、不飽和土の透水係数は土の飽和度に依存する関数であり、負の圧力水頭 ψ や体積含水率 θ の関係として表現される⁶⁾⁷⁾⁸⁾。



最小含水量 : θ_r 飽和体積含水率 : θ_s
 飽和透水係数 : k_s 限界毛管水頭 : ψ_{cr}

図-3 水分保持曲線

2・3 斜面破壊の評価

浸透に伴う堤体の破壊問題では、前述のように過剰間隙水圧による円弧上のすべり破壊と、貫孔作用を伴う浸透破壊があげられる。前者のすべり破壊は、すべり面上で間隙水圧を考慮した安定計算を行い、安全率を指標として評価する。後者の浸透破壊は、FEM解析結果から動水勾配と浸透方向を求め、浸透力として安定計算に取り込まれる。すべり破壊の安定計算には、図-4に示したように円弧すべり土塊を鉛直線で区切り、いくつかの帯片に分割して安全率を算出する簡便分割法を使用する。この場合、すべり面内に含まれる貯水部も帯片の一部に考慮して計算を行う。

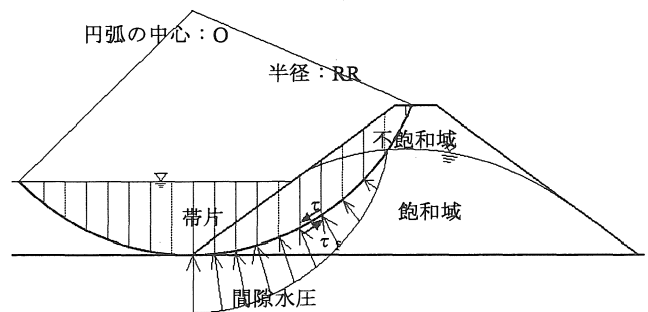


図-4 分割法による安定計算

3. 計算結果と考察

3・1 解析精度と適用限界

遠心载荷模型実験の結果とFEM浸透解析の結果を比較検討し、浸透解析の精度と適用限界を検討した。今回解析対象とした遠心模型実験の概要を図-5に、模型に使用した材料の物性値を表-1に示す⁹⁾¹⁰⁾。

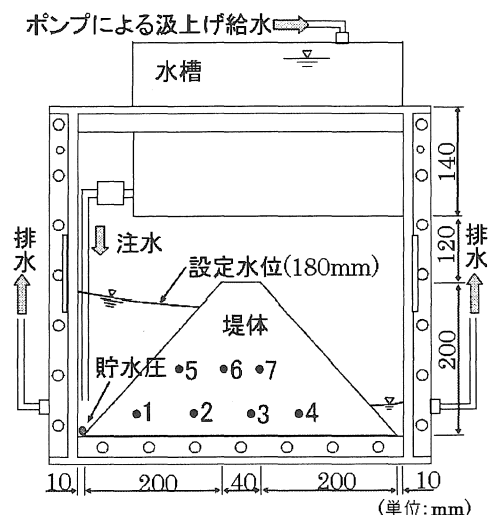


図-5 遠心模型実験の概要

表-1 模型堤体の物性値

土粒子密度	[g/cm ³]	2.679
最大乾燥密度	[g/cm ³]	1.902
最適含水比	[%]	12.8
D値	[%]	95
乾燥密度	[g/cm ³]	1.807
透水係数	[cm/s]	1.28 × 10 ⁻⁴
初期含水比		9.2
初期体積含水率		0.166
飽和体積含水率	[%]	0.310
遠心加速度	[G]	30

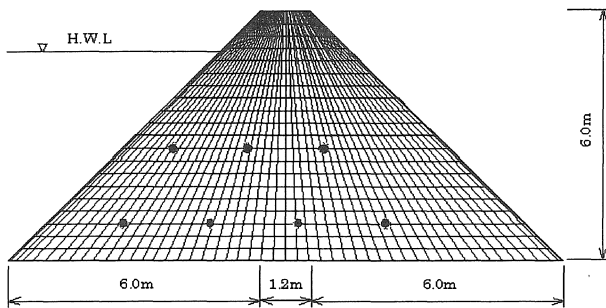


図-6 FEM解析モデル

表-2 解析パラメータ

		Wetting	Drying
最小容水量	θ_r	0.025	
飽和体積含水率	θ_s	0.310	
飽和透水係数	k_s	1.28 × 10 ⁻⁶ [m/s]	
限界毛管水頭	ψ_{or}	-0.6 [m]	
水分保持曲線	ψ_a	-1.2 [m]	-3.4 [m]
	θ_a	0.155	0.1085
	k_{ra}	0.23	0.125
	ψ_b	-0.8 [m]	-2.4 [m]
	θ_b	0.2635	0.2325
	k_{rb}	0.67	0.525

この実験では、図-5に示したように、堤体内に7個、貯水部に1個の間隙水圧計を配置し、水位変動による間隙水圧の経時変化を計測している。模型堤体の高さは20cmであり、遠心加速度30Gの下で実験を行っているので、高さ6m相当の実物堤体を対象としている。また、時間も実物では模型スケールの2乗倍(30²倍)になるので、これに合わせて浸透解析を行う¹¹⁾¹²⁾。

浸透解析に用いた有限要素モデルは、図-6のように、堤高6m、斜面勾配1:1の堤体であり、浸透特性を表す物性値には表-2に示す値を採用した。表-2の数値から、

水分保持曲線は図-7のように描ける。そこで、ヒステリシスを考慮する計算と考慮しない計算を行い、比較してヒステリシスの効果を調べる。ヒステリシスを考慮する場合は、水位低下開始前まではWetting側の $\theta-\psi$ 曲線を、開始後はDrying側の曲線を用いて計算する。考慮しない場合は、解析開始から終了までWetting側のみで解析を行う。なお、模型実験の水位低下を再現して、水位変化は図-8に示す通りとした。

図-9は間隙水圧計の測定値に基づいて堤体内の浸潤面を推定したものであり、黒丸が間隙水圧計の位置、直

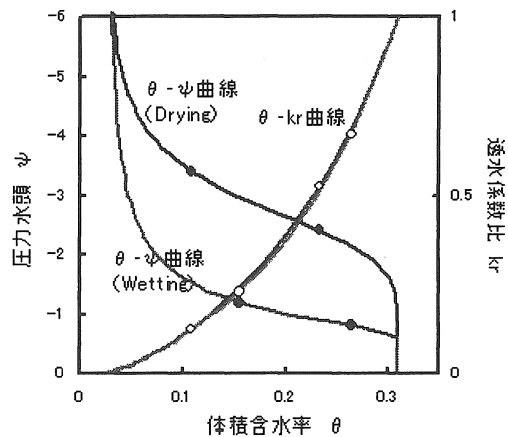


図-7 水分保持曲線

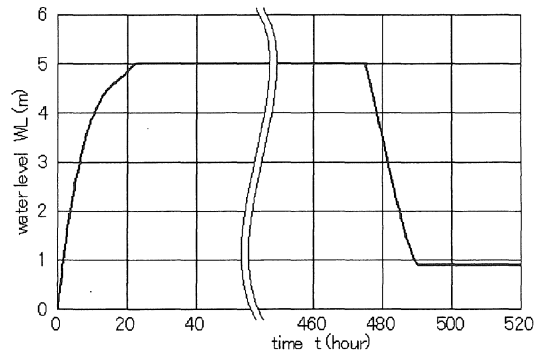


図-8 経過時間-水位の関係

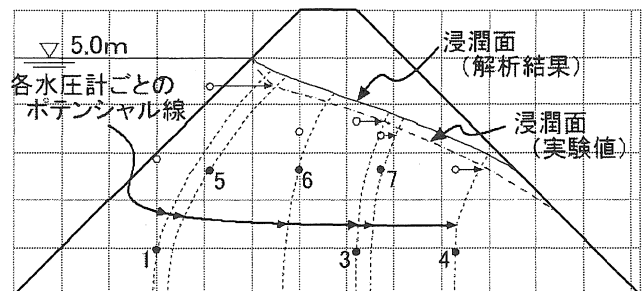


図-9 浸潤面形状の比較

上の白丸が全水頭の値を表す。また、各水圧計の全水頭値から試行錯誤で求めた等ポテンシャル線を点線で、浸潤面の形状を一点鎖線で示す。この試行錯誤に際し、水圧計 No.3、4、5、7 は的確な数値を示しているものとして浸潤面を求めた。一点鎖線の上にある実線は解析から得られた浸潤面である。二つの浸潤面の差は 0.2m 程度、初期貯水位 5m と比較すると 4% 程度の誤差であり、解析結果が実験値を比較的良く近似していることが分かる。

解析結果より水位低下直前、中間水位、低下終了直後のそれぞれの浸潤面を図-10 に表示した。ヒステリシスを

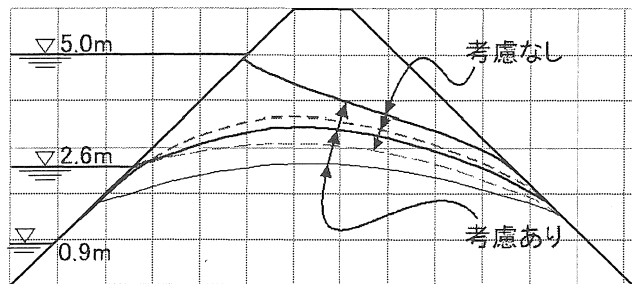


図-10 ヒステリシスによる浸潤面の違い

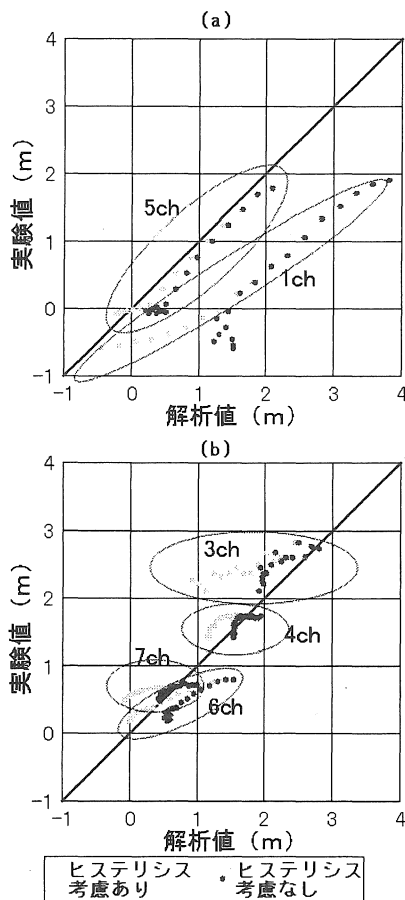


図-11 間隙水圧の比較

を考慮した場合と考慮しない場合で、浸潤面形の違いが顕著に現れている。これは、考慮しない場合は不飽和領域の体積含水率及び透水係数を過小評価して解析を行っているためと考えられる。

図-11 は縦軸に実験値、横軸に解析値をとり、各点の間隙水圧を水頭値として比較したものである。先に検討した浸潤面と比較すると、間隙水圧の値に関しては、ヒステリシス考慮の有無で大きな差は現れないことが分かる。また、実験値との関係も多少のバラツキはあるが、比較的良い近似をしていると考えられる。

3・2 水位低下に関するパラメータ解析

前節で FEM 解析の結果が実験結果を精度良く評価することが確認できたので、以下では、水位低下に伴う浸透挙動を、各種パラメータを変化させて調べる。解析では前節で用いた模型堤体の物性値をそのまま用いることとした。ただし定常流から水位低下する乾燥側の解析のみを対象としたので、水分保持曲線は Drying 側のみを使用した。

表-3 水位低下の計算数値

飽和透水係数 k_s	1.28×10^{-6} [m/s]
水位低下速度 s	80 [cm/hr] ($s/k_s \doteq 180$) 40 [cm/hr] ($s/k_s \doteq 90$) 20 [cm/hr] ($s/k_s \doteq 45$)
斜面勾配	1:1.5, 1:2.0, 1:2.5

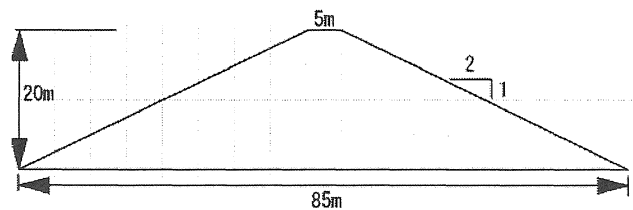


図-12 解析モデル

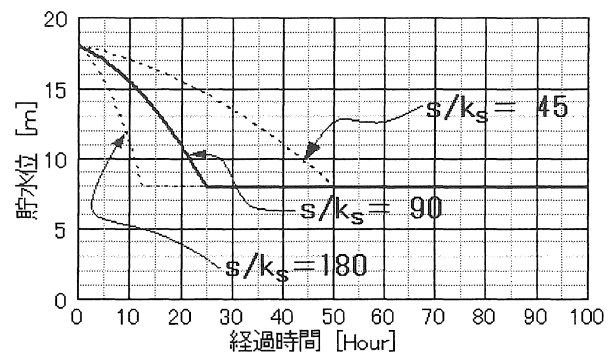


図-13 経過時間-水位の関係

今回の計算ケースを表-3にまとめた。水位低下速度 (s) が堤体内の浸透特性に及ぼす影響を検討するために、透水係数 (k_s) との比で低下速度の程度を表すこととし、低下速度比 (s/k_s) を3段階変化させて解析を行う¹³⁾。また、斜面勾配も3段階変化させて計算し、その影響を考察した。解析モデルを図-12に示した。斜面勾配を変化させる場合は、堤高と天端幅を一定とし、堤底幅を変化させることとした。また、経過時間と水位の関係は、図-13に示した通りである。

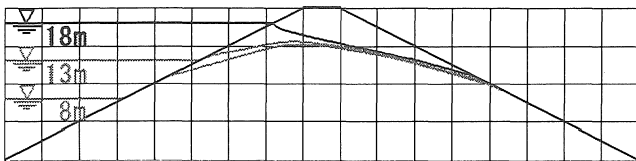


図-14 堤体内の浸潤面の変化

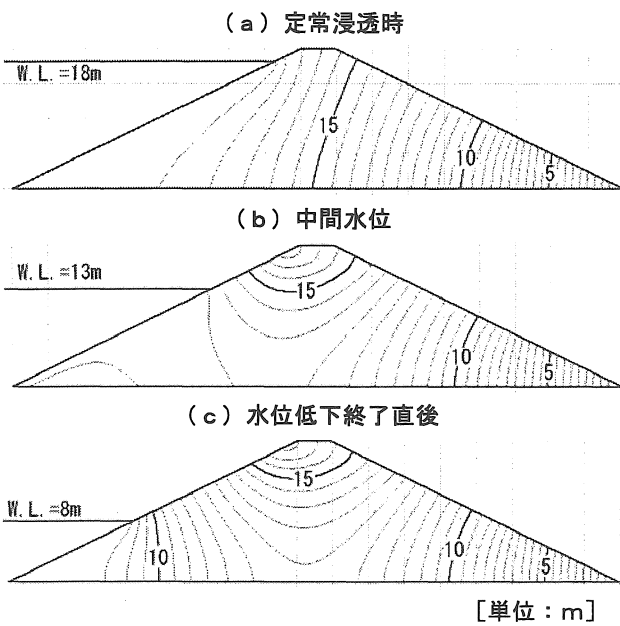


図-15 全水頭等値線

以下では、斜面勾配 1:2、低下速度比 90 の計算を標準ケースと呼ぶ。図-14 は、水位低下直前、中間水位、低下終了直後の浸潤面を重ねて描いたものである。図から、貯水位の変化に伴って上流側の浸透挙動に直ちに影響が見れるが、下流側では浸潤面の変化がほとんど起こらないことが見てとれる。

図-15 は貯水位の3段階に対して、全水頭の等値線を描いたものである。定常浸透時から中間水位にかけては上流側の等ポテンシャル線の間隔が広く、貯水側への浸透はあまり生じていない。しかし、水位低下終了直後は上流側でも等ポテンシャル線の間隔が狭い部分が現れており、浸透破壊の発生が想定される。図-16 は水位低下終了直後と終了 10 時間後の堤体内各点の動水勾配の大きさと流水方向をベクトルで表したものである。下流側と同様に上流側でも水位が低下した影響で動水勾配が大きい値を示しており、特に貯水面付近で大きくなる様子が見てとれる。また、この状態は図-16 (b) から分かるように、長時間続くことが考えられる。

図-17 は、水位低下速度の変化に伴う全水頭分布の相違を調べるために、水位低下終了時について全水頭の等値線を重ね合わせて示したものである。水位低下速度が 20~80cm/hr と 4 倍異なるが、水頭値に関しては低下速度の影響がほとんど現れないことが知れる。特に下流側の堤体内の圧力水頭には、低下速度による相違がほとんど見受けられない。

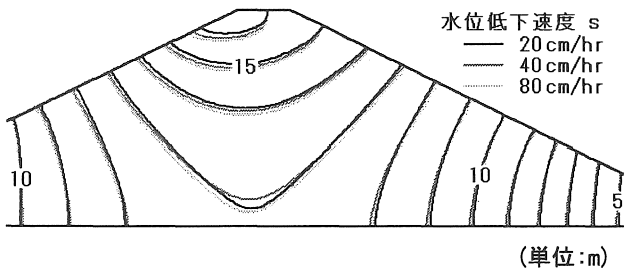


図-17 水位低下速度による全水頭の差

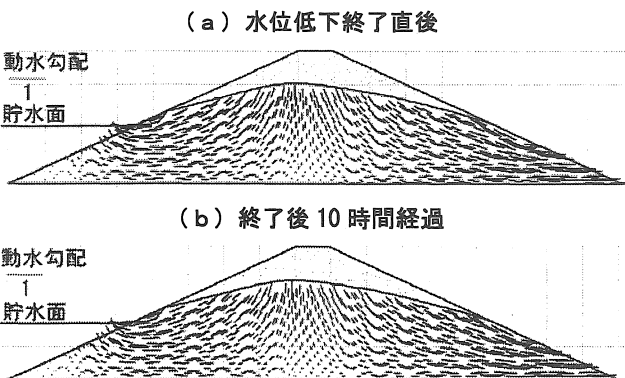


図-16 動水勾配

斜面勾配が浸透挙動に及ぼす影響を調べるために、低下速度比 90 の場合について勾配を3種類変えて計算を行った。水位低下終了時点の全水頭の等値線を図-18に示す。図から斜面勾配が緩いほど堤底中央の全水頭が大きくなることが知れる。これは、勾配が緩いほど斜面表面から堤底中央までの距離が長くなるため、間隙水圧の消散に遅れが生じるためと考えられる。図-19 は水位低下終了時点の動水勾配と水流のベクトル分布である。前図では勾配が急なほど下流側の等値線が狭く見えるが、本図では勾配が緩いほど動水勾配の値が若干大きくなり、水流が早い傾向がうかがえる。

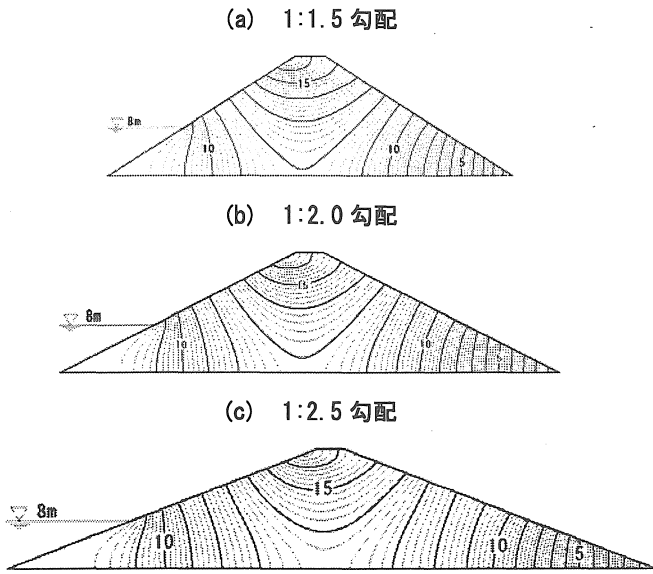


図-18 水位低下終了時の全水頭等値線図

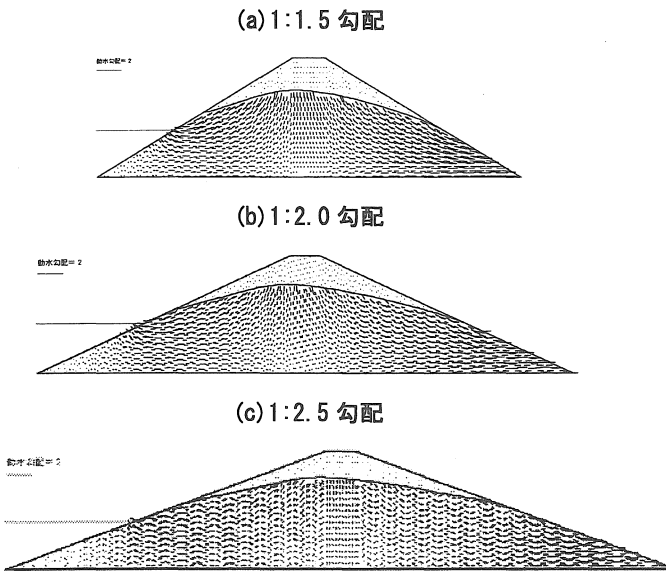


図-19 水位低下終了時の動水勾配

3・3 斜面安定における現行設計法との比較

前節の FEM 浸透解析で得られた間隙水圧や動水勾配の値を用いて簡便分割法による安定計算を行い、現行設計法との比較を行った。想定したすべり面は、法先直上に円弧中心があり、法先と天端の中央部を通る円弧とした。図-20 は標準ケース (斜面勾配 1:2、低下速度比 90) における水位低下直前、中間水位、低下終了直後のすべり面 (円弧半径 55m) 上の間隙水圧分布を示す。間隙水圧が水位低下に伴い減少する様子が見られる。

現行設計法に基づく水位急低下時の安定計算では、堤体内の初期水位が貯水低下後も残留すると仮定して間隙

水圧を評価する。すなわち、図-21 に示すように、水位低下後の浸潤面は、貯水面から上流側斜面に沿って初期水位に達するものとし、すべり面上の間隙水圧は、すべり面から浸潤面までの直上水圧で計算する。

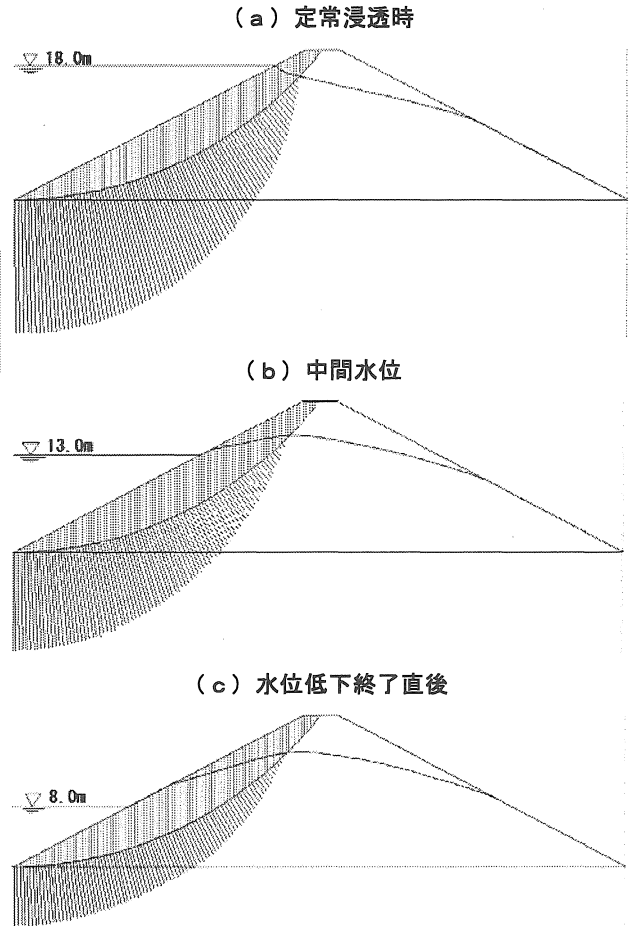


図-20 標準ケースの安定計算

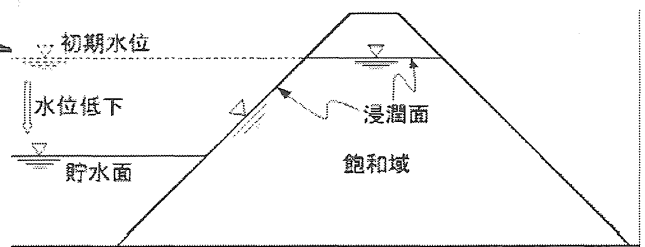


図-21 現行設計の浸潤面

図-22 は水位低下終了時の間隙水圧分布について、現行設計法による計算値と FEM 浸透解析で得られた結果を重ね合わせたものである。現行設計法による間隙水圧分布は下部で折れ曲がりが見られるが、これは水位低下後の静水圧と、それを超過する残留水圧 (過剰水圧) の境界を表している。いずれにしても、すべり面上部で現行設計法の間隙水圧が大きく超過することが分かる。

標準ケースにおける安定計算の結果を、水位の3段階（水位低下開始からの時間で示す）について表-4にまとめた。堤体土の強度特性は、遠心実験材料の三軸圧縮試験結果を参考に、 $c=20\text{kPa}$ 、 $\phi=30^\circ$ とした。表中の間隙水圧とは、すべり面に作用する間隙水圧を円弧に沿って積分し、単位奥行き当りの合力として表したものである。この値ですべり面上の間隙水圧分布の大きさが数値的に比較できるが、更に両者の差を比率で表してある。また、これらの間隙水圧分布を用いて計算した簡便分割法の安全率の値と、両計算の差を比率で整理した。当然のことであるが、水位低下が進むにつれてFEM計算と現行設計の間隙水圧評価に大きな差が現れ、これが安全率の値にも影響している。ただし、水位低下が間隙水圧に及ぼす影響と、安全率に及ぼす影響は一律ではなく、前者の方がより鋭敏な影響を受けるようである。

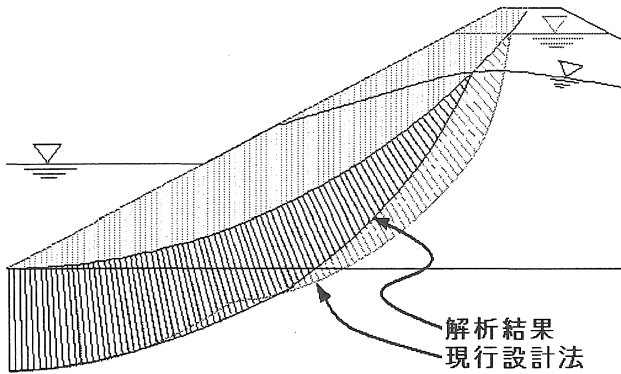


図-22 想定すべり面上の過剰間隙水圧

表-4 標準ケースの安全率

時間 (hr)	0	16	25
間隙水圧 (FEM)	5.099	3.403	2.176
間隙水圧 (現行)	5.299	3.681	2.622
間隙水圧の差	3.85%	7.85%	18.6%
安全率 (FEM)	1.974	1.746	1.516
安全率 (現行)	1.840	1.589	1.319
安全率の差	7.03%	9.42%	13.9%

図-23 は斜面勾配の影響を調べるために、低下速度比90の場合について勾配を3種類変えて安定計算を行った結果を整理したものである。横軸には水位低下開始からの時間と貯水面の高さをとっている。水位低下が進むに従って安全率が低下する傾向は斜面勾配によって多少差異があり、勾配が緩いほど安全率の低下率が若干大きいように思われる。

浸透流がある土中の応力状態に関しては、全重量と間

隙水圧のベクトル和は有効重量と透水力のベクトル和に等しいことが知られている。通常的设计計算では、土塊の全重量(浸潤面下の土塊に飽和単位体積重量を用いる)と円弧すべり面に沿って働く間隙水圧を用いて安定性を評価する手法が採られるが、この安定計算は前者の考え方に基づくものである。一方、後者の考え方を採る場合は、浸潤面下の土塊に水中単位体積重量を用いて土塊の有効重量を計算し、かつ水流方向に透水力に相当する物体力を取り入れて安定計算を行うことになる。

	FEM	現行設計
勾配 1.5	●—●—●—	○- -○- -
勾配 2.0	■—■—■—	□- -□- -
勾配 2.5	▲—▲—▲—	△- -△- -

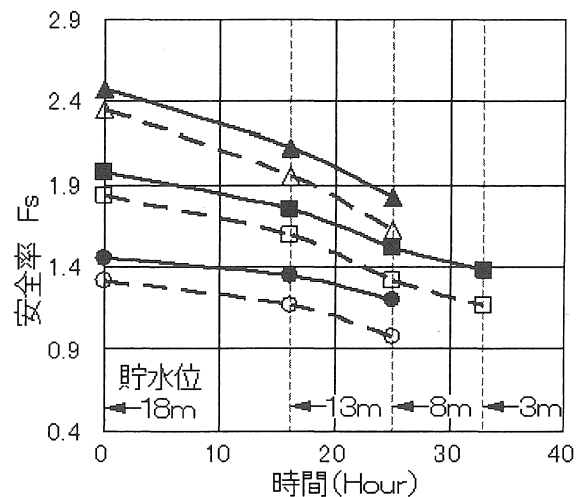


図-23 安全率と斜面勾配

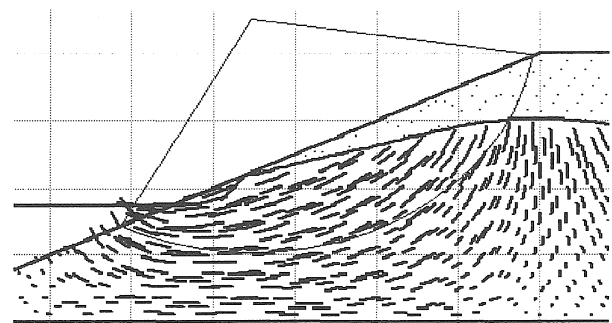


図-24 透水力を考慮した想定すべり面

図-24 は、標準ケースの水位低下終了直後(図-15(c))の状態について、堤体内の動水勾配の値と水流方向の分布を示したものである。浸透力の影響が大きいと思われる図示の水流方向に沿う円弧すべり面を想定し、上記の

二つの方法で安全率を計算してみた。この結果、すべり面上の間隙水圧を取り入れた計算では安全率: $F_s=1.528$ 、透水力を考慮した計算では安全率: $F_s=1.587$ となり、その差は 3.8% で大差ないことが知れた。ただし、透水力を考慮した安定計算を図-20 のすべり面で行うと、間隙水圧を用いて計算した安全率の 1.1~1.4 倍大きい安全率が得られることが知れた。

4. 結論

本研究により得られた研究成果をまとめると、以下のよう整理される。

- (1)提案する物性値(水分保持曲線)を用いれば水位低下に伴う浸潤面や間隙水圧の変化が比較的良好な精度で評価できること、及び水分保持曲線のヒステリシスが計算結果に及ぼす影響は小さいことが知れた。
 - (2)斜面勾配が緩いほど堤体内の浸潤面の低下が遅れ、下流側の浸出部の流速が大きくなって浸透破壊し易いこと、及び水位低下速度が4倍程度変化しても堤体内の浸透挙動に及ぼす影響は小さいことなどが知れた。
 - (3)水位低下に伴う円弧すべり面上の間隙水圧分布について、FEM解析結果と現行設計法による評価結果を比較したところ、現行設計法では間隙水圧を過大評価し、その程度は水位低下速度が速くなるほど著しいことが判明した。
- <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) 河上房義 鑑訳: アースダムとアースロックダム<設計と施工>, 森北出版, 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) K. KIMURA, T. OKUMURA, K. NARITA and Y. OHNE, "Centrifuge Tests on Moisture and Permeability in Sand", MLWR, pp. 57-61, 2001.
 - 7) K. KIMURA, T. OKUMURA, K. NARITA and Y. OHNE, "Behavior of Seepage Flow in Embankment Developed by Rainfall", Int. Conf. on Geotechnical and Geological Eng., 2000.
 - 8) K. NARITA, T. OKUMURA, K. KIMURA and Y. OHNE, "Centrifuge Tests on Seepage Behavior in Embankment Dam during Rapid Draw-Down", 4th Int. Conf. on Dam Engineering, pp. 657-666, 2004.
 - 9) 宇都宮徹: 貯水位変動に伴う斜面内の浸透挙動に関する研究, 愛知工業大学修士論文, 2000.
 - 10) 大森康次: 水位急降下時のフィルダムの安定性に関する研究, 愛知工業大学修士論文, 2002.
 - 11) 定岡直樹: 降雨時の盛土斜面の安定性に関する研究, 愛知工業大学修士論文, 2000.
 - 12) 萩田誠実: 盛土斜面内の降雨浸透流に関する研究, 愛知工業大学修士論文, 2002.
 - 13) 工藤アキヒコ: 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位に及ぼす影響, ダム工学 13(3), pp. 137-151, 2003.

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)