

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）

愛知工業大学大学院（学）○宇都宮 徹
愛知工業大学工学部（正） 奥村 哲夫・成田 国朝

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、短時間の放水によって貯水位が急激に降下して堤体内に多量の過剰間隙水圧が残留し、有効応力の低下により斜面崩壊等の被害が発生する事例が少なくない。この残留水圧の大きさや発生過程は、堤体の透水性（排水速度）と貯水位の降下速度の相対関係によって異なるので、水位変動における堤体内の浸潤面形状や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。

筆者らは先に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を行い¹⁾、浸透水流や間隙水圧分布に関して有益な情報を得た。本研究では遠心実験と同じ条件で FEM 飽和 - 不飽和 2 次元浸透流解析を行い、この種の問題に対する FEM 解析の適用性を調べながら、本実験及び解析結果の精度や妥当性を検討した結果を報告する。なお、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。

2. 解析手法

飽和・不飽和領域において Darcy 則が成立し、かつ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²⁾。

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

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、 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。遠心実験では、高さ 20cm、斜面勾配 1:2 の模型堤体に対して遠心加速度 30g を与えた状態で浸透実験を行っているので、本研究ではこれを実物換算して、堤高 6.0m の同一形状の堤体を解析モデルとした。図-1 は解析に用いた上流側の水位変動-時間の関係を示したものである。水位上昇速度と降下速度の決定には、両者とも遠心実験より得られた貯水圧値から水位を求め、それぞれ最小二乗法を用いてべき関数と二次関数で近似し、任意時間における貯水高を設定した。また、解析領域における不飽和部の透水特性が不明なため、図-2 に示す不飽和透水特性を仮定し、計算では湿潤過程あるいは排水過程の間に生じるヒステリシスループを無視した一価関数として取り扱うこととした。解析に用

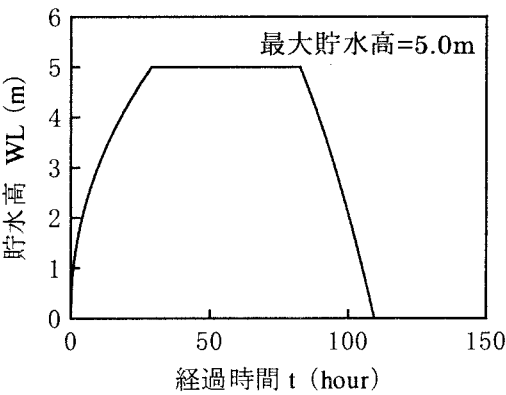


図-1 水位変動-時間の関係

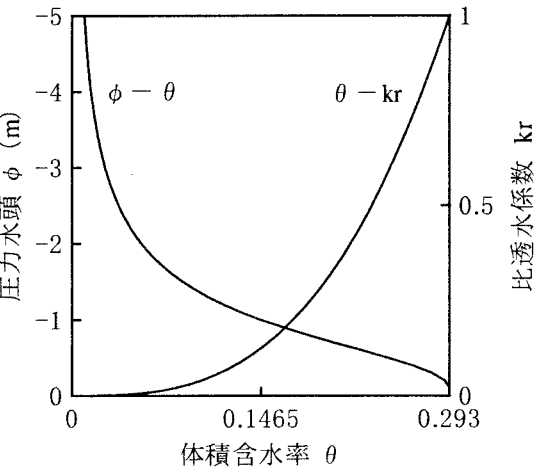


図-2 不飽和透水特性（仮定）

いたパラメータは、飽和透水係数 $k_s=2.89 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、圧力水頭の収束誤差限界 $\Delta \phi=0.05 \text{m}$ 、初期体積含水率 $\theta_i=0.148$ 、計算時間刻み $\Delta t=360 \text{sec}$ である。

3. 解析結果と考察

図-3(a)は水位上昇による堤体内の浸透状況を実験値と解析値で比較したものであり、実線の実験値は堤底部に埋設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実験値の方が若干速く、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くな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¹⁾、堤体内の浸透状況は遠心実験の各測定から概略推定できると考えられる。

図-3(b)は水位急降下時の浸潤面を比較したものであり、貯水位の降下に伴って実験値と解析値に大きな差が見られている。この点に関しては、遠心実験と同じ状況を再現するために透水係数を n 倍して解析を行ってみたが、浸潤面形状に大きな変化は現れなかった。図-4 は間隙水圧計が設置されている堤体底面において圧力水頭値 ϕ を同時刻で比較したものであり、水圧値に関しては両者に良好な相関関係が見られる。図より水位が降下して ϕ 値が小さくなるにしたがって両者の相関性が弱くなる傾向が見られるが、総じて見れば水位急降下時の間隙水圧分布は遠心実験で概略把握できると考えられる。

4. まとめ

水位変動に伴う堤体内の浸透状況を遠心実験と FEM 解析で比較した結果、水位上昇時は実験値と解析値がほぼ一致することが確認され、この種の遠心模型実験での浸透状況の把握は可能であると見て良い。一方、水位急降下時は、浸潤面形状については未だ検討の余地を残すものの、堤体内の間隙水圧分布に関しては FEM 解析で比較的精度良い評価が可能であることが示された。

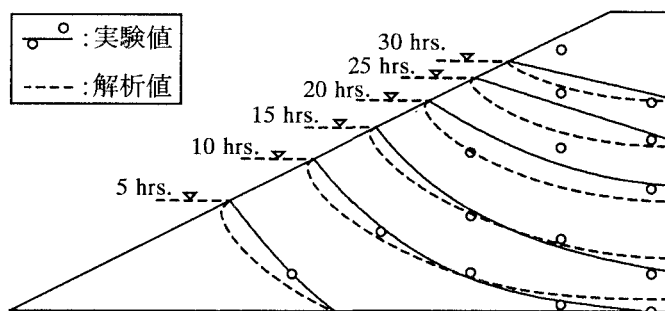


図-3(a) 水位上昇による堤体内の浸透状況

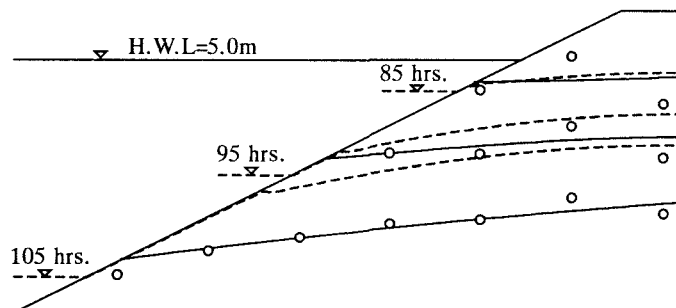


図-3(b) 水位急降下による堤体内の浸透状況

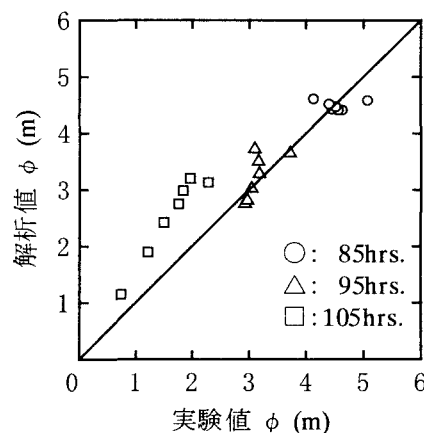


図-4 圧力水頭の相関図

<参考文献> 1) 宇都宮・奥村・成田：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，pp.299-300, 1999. 2) 赤井他：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. 3) 木村・大根・佐藤：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.1161-1162, 1980.