

複数の不透水層を有する斜面中の浸透流に関する考察

電力中央研究所 正会員 ○駒 田 広 也

〃 正会員 北 原 義 浩

九 州 電 力 正会員 赤 司 六 哉

1. はじめに

原子力発電所の海岸立地、揚水発電所貯水池および送変電用開閉所などでは、その建設にあたって自然地形のままでは十分な貯水容量ならびに敷地面積が得られないため、長大な切取および盛土斜面が形成される場合が多い。これらの斜面の安定性は地下水の影響を大きく受けるため、斜面安定を検討するには、斜面内の地下水挙動を予測することが必要である。この予測法として、飽和・不飽和浸透流解析法があり、¹⁾ロックフィルダム²⁾や地層が比較的一様な岩盤から成る湛水池斜面³⁾等では、その解析法の適用性も実証されて来た。さらに、これを一歩進めて複雑な地層構造を持つ斜面に対しても、解析法の信頼性を裏付けておく必要がある。そこで、切取り斜面現場における間隙水圧および地下水位観測の結果から、斜面内に複数の地下水面が形成されていることが推定されているのを機会に、前述の浸透流解析による解析値と実測値を比較し、複数の地下水面をもつ複雑な地層構造の斜面に対する解析法の適用性を検討した。

さらに、前述の浸透流解析手法が、斜面破壊の重要な原因の一つである浸透流による浸透破壊に対しても適用可能なように、解析法の改良を試みた。

2. 解析断面の地質概要

解析対象とした斜面は、送電系統開閉所の敷地造成工事に際し、図-1および図-2に示すような切土工事によって生じた斜面である。解析対象斜面は、凝灰角礫石(上層)、凝灰角礫岩(下層)、凝灰岩および凝灰質砂岩の4層に大別でき、各層は層状で整合関係にあり、山側から掘削面に向かって $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ の緩い傾斜をなしている。凝灰角礫石は上層部と下層部に存在し、比較的固結度は高いが、凝灰岩層に比較して透水性は高い。凝灰岩は全体的に細粒で固結し、難透水層となっているためその直上で湧水箇所が多数認められる。凝灰質砂岩は固結度の高い部分も見られるが、全体的に凝灰角礫岩および凝灰岩に比べると、その固結度はやや低く、他の層に比べて最も透水性が高い。

3. 解析モデル

解析手法として、飽和・不飽和浸透流解析法¹⁾を用いた。図-2に示した地質

に従って、図-3のように2次元有限要素モデル化した。なお、水平方向の解析領域を図-3に示す125mの他に375mの2種類の解析断面とする。解析断面地盤各層の解析に用いる物性値を表-1に示す。透水係数は実測されていないので、現地踏査、ボーリングコア観察および既応の経験から推定した値である。不飽和領域におけるサクション圧は図-4の推定法を用い、不飽和透水関数は図-5を用いた。¹⁾ 図-3に示した解析断面におい

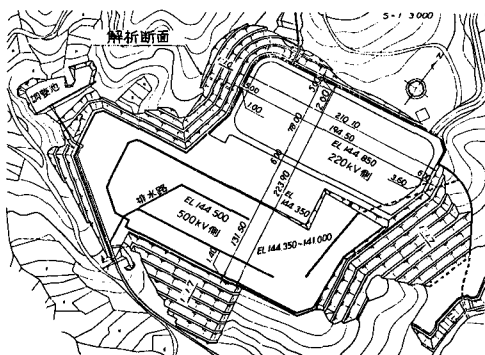


図-1 解析対象とした斜面の平面図

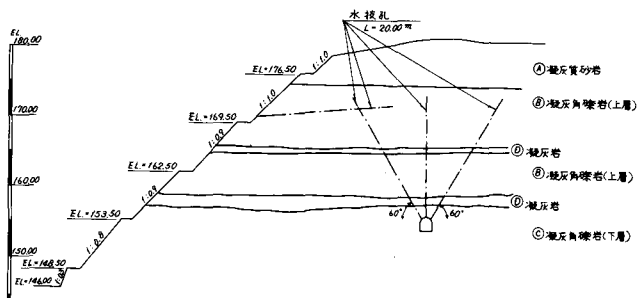


図-2 解析断面の地質図

て、斜面法尻の境界ではEL.146.0mに地下水位を有する静水圧分布、斜面背後の地盤遠方境界ではEL.175.0mに地下水位を有する静水圧分布、底部のEL.125.0mでは不透水層とする。そして、水抜孔は実際には5～10m間隔に施工されているが、今回の2次元解析では、水抜孔（水圧を0とする）を考慮した場合と考慮しない場合の2種類の検討をした。

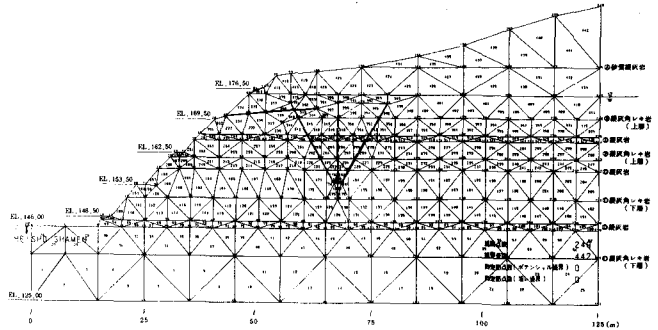


図-3 解析モデル（水平方向の解析領域は125m）

解析ケースは、表-2に示すように、解析領域の広がりおよび水抜孔の有無をパラメーターにした4種類である。なお、いずれのケースも定常状態である。

4. 解析結果

図-6に示すCase-1とCase-3の地下水位の比較より、水抜孔がない場合、解析領域の上流側境界を遠方にすると、斜面法面付近の不飽和領域が広がることになる。しかし、図-7に示すCase-2とCase-4の地下水位の比較より、水抜孔がある場合には解析領域の上流側境界を遠方にしても、水抜孔の影響が強く斜面付近の不飽和領域はほとんど変わらない。そして、図-8に示すように、不飽和領域が難透水層（透水係数が 5×10^{-6} cm/sec）の直下で広く存在しうることが解析によって判明した。

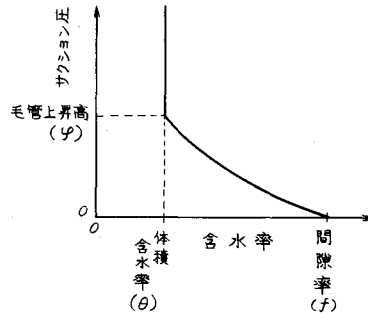


図-4 サクション圧と含水比の関係の推定

表-1 解析に用いる物性値

層	岩質	透水係数 (cm/sec)	G_s (kg/cm ³)	W (%)	γ_d (kg/cm ³)	$e = \frac{G_s}{\gamma_d} - 1$	$\theta = \frac{\gamma_d - W}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{100}$	$f = \frac{e}{1+e}$	毛管上昇高 ϕ (m)
①	凝灰質砂岩	7×10^{-3}	2.43	11.4	1.55	0.57	0.18	0.36	5
②	凝灰角レキ岩 (上層)	5×10^{-3}	2.37	18.6	1.71	0.38	0.32	0.38	5
③	凝灰角レキ岩 (下層)	1×10^{-3}	2.42	14.6	1.67	0.45	0.24	0.45	5
④	凝灰岩	5×10^{-6}	2.62	24.5	1.57	0.67	0.38	0.40	5
備考	実測されていないので現地地質およびボーリングデータより推定								図-4を参照

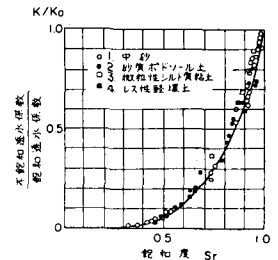


図-5 透水係数と飽和度の関係

5. 実測値と解析値の比較

図-2に示した斜面内の地下水の挙動が定常状態にあると思われる時点における地下水位および間隙水圧の実測値とこれに対応するCase-4の解析値との比較を図-9に示す。実斜面においても、実測された間隙水圧分布より、斜面内に複数個の地下水面が形成されていることが推定され、解析結果にもこの傾向は現われている。実斜面の地層構造が複雑であり、しかも推定した透水係数を用いて解析したことを考慮すれば、今回の解析に用いた浸透流解析法は、複数の地下水面が存在したり、局部的に不飽和領域が存在している場合でも、適用可能であると思われる。

6. 斜面の浸透破壊解析

集中豪雨時の斜面崩壊や湛水池水位急降下時の湛水池内斜面崩壊などの要因の一つに、浸透破壊現象があげられる。この現象は、斜面内の浸透流速が限界流速以上になり、土粒子を流出させることによって生ずるものと考えられる。ここでは、この浸透破壊現象の解析法を述べ、その解析例を示すことにする。

表-2 解析ケース

ケース	水平方向の解析領域	水抜孔
Case-1	125 m	無
Case-2	125 m	有
Case-3	375 m	無
Case-4	375 m	有

浸透破壊解析のフローを図-10に示す。まず、前述の飽和・不飽和浸透流解析によって、各有限要素の実流速 V_r を計算する。そして、この V_r が各有限要素の限界流速 V_c よりも大きければ、浸透破壊前の透水係数 K_0 を浸透破壊後の透水係数 K_f に変更して、浸透流解析で再度各要素の実流速 V_f を計算する。以上の過程を透水係数を変更する有限要素がなくなるまで繰り返す。ここに、浸透破壊に対する限界流速および浸透破壊後の透水係数は物性試験によって求める必要がある。

図-11に斜面の浸透破壊の解析モデルを示す。浸透破壊前の透水係数 $K_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、浸透破壊後の透水係数 $K_f = 1 \text{ cm/sec}$ 、浸透破壊に対する限界流速 $V_c = 3.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、間隙率 $n = 0.32$ として、サクシオン圧ならびに不飽和透水係数と含水率の関係は、図-4お

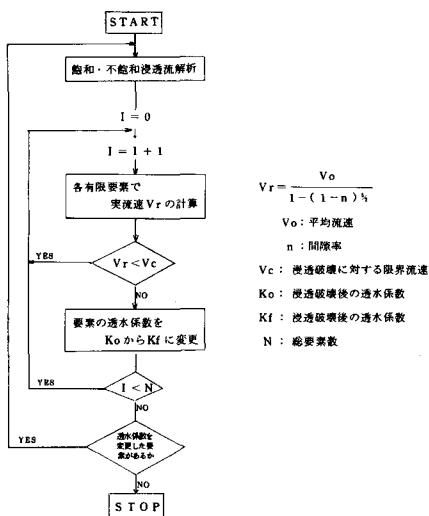


図-10 浸透破壊解析のフロー図

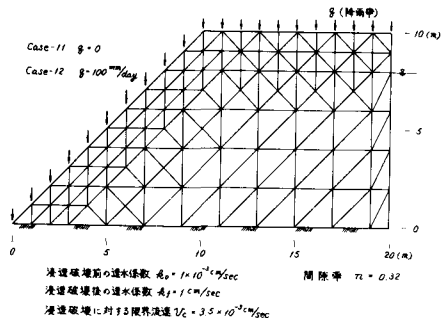


図-11 斜面の浸透破壊の解析モデル

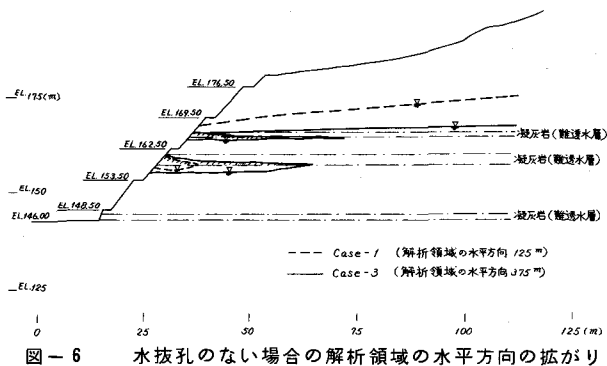


図-6 水抜孔のない場合の解析領域の水平方向の拡がりの違いによる地下水位の比較

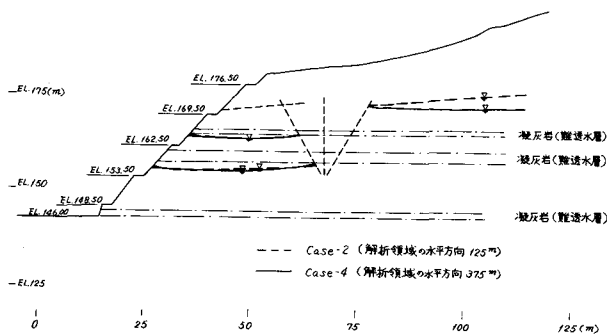


図-7 水抜孔を有する場合の解析領域の水平方向の拡がりの違いによる地下水位の比較

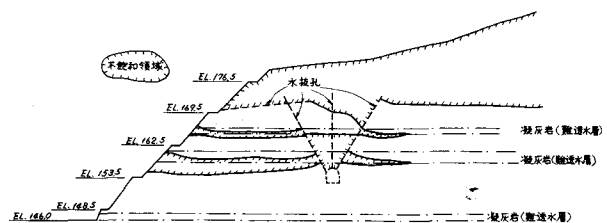


図-8 浸透流解析 (Case-4) による不飽和領域

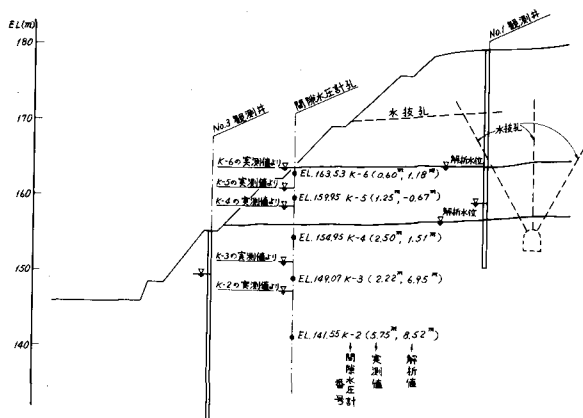


図-9 地下水位および間隙水圧の実測値と解析値 (Case-4) の比較

よび図-5を用いる。そして降雨率はCase-11として $q=0$ 、Case-12として $q=100$ mm/dayとする。なお、斜面材料の物性値は数値解析モデルを対象として設定されたものであり、実際の斜面における諸物性とは直接には関係がない。

解析結果として、浸透破壊前後の流速ベクトル分布と地下水

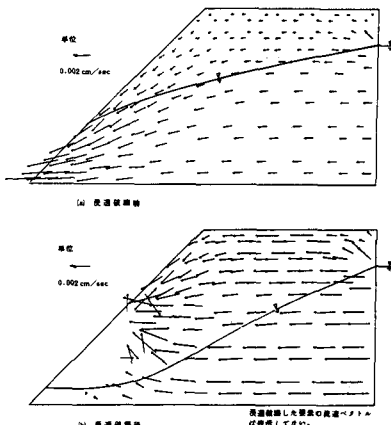


図-12 Case-11の浸透流速ベクトルと地下水面

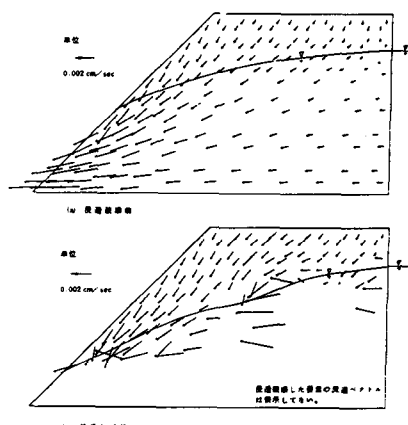


図-13 Case-12の浸透流速ベクトルと地下水面

す。降雨を考慮しないCase-11では破壊領域は斜面法尻付近にとどまっているが、降雨を考慮したCase-12では破壊領域は斜面底部全域に広がっていることがわかる。そして、図-14に示したCase-11とCase-12の地下水面の比較から、破壊領域の透水性が高いために、破壊後の地下水面が低下することがわかる。

以上、降雨を考慮した斜面の浸透破壊の解析手法を述べ、その解析結果を示した。今後、この解析に対する入力データとして、浸透破壊前後の透水係数、の変化等の斜面材料の力学的特性を検討していく必要がある。

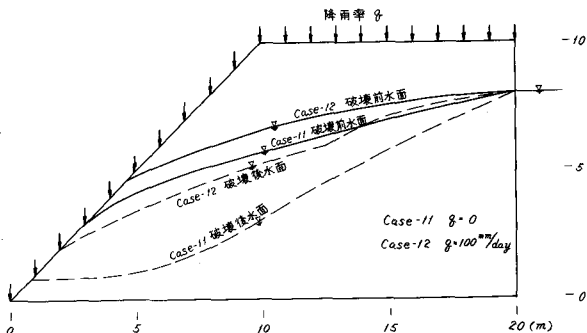


図-14 地下水面の比較

7. 結 語

飽和・不飽和浸透流解析法が、複雑な地層構造を持つ斜面に対しても、解析の信頼性を確保していることを裏付けておく目的で、実斜面内の定常浸透流について実測値と解析値との比較を行なった。実測された間隙水圧分布より、実斜面内に複雑個の地下水面が形成されていることが推定されるが、解析結果においても同様な結果が得られた。実斜面が複数の層構造からなり、しかも推定した透水係数を用いて解析したことを考慮すれば、今回の解析に用いた浸透流解析法は、複数の地下水面が存在したり、局部的に不飽和領域が存在している場合でも、十分に適用可能であると思われる。

次に、斜面内の浸透流速が限界流速以上になり、斜面材料の土粒子が流出されることを、本報告では浸透破壊とみなすことにした。この浸透破壊現象に飽和・不飽和浸透流解析手法を適用し、その解析例を示した。この解析法は集中豪雨時の斜面崩壊や湛水池水位急降下時の湛水池内斜面崩壊などの予測解析に適用可能と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 駒田 「飽和・不飽和土中の非定常浸透流解析」 電研報告 No.377015 昭和53年2月
- 2) 駒田, 西岡, 松尾 「高瀬ダム湛水過程の浸透流に関する実測値と解析値との比較検討」 電研報告 No.380010 昭和55年8月
- 3) 駒田, 宮口 「湛水池地山内浸透流に対する遮水および排水に関する考察」 電研報告 No.380026 昭和55年11月

Consideration on Seepage Flow through Multi-impermeable Layered Slope

H. Komada and Y. Kitahara

Central Research Institute of Electric Power Industry

R. Akashi

Kyushu Electric Power Co., Inc.

Synopsis

For the purpose of verifying that the developed analysis method of the seepage flow in saturated-porous media could be applied to the seepage flow through multi-impermeable layered slope, the analytical values of the steady seepage flow through a slope were compared with the observed values. It was estimated from the observed pore pressure distribution that there were a few water tables in the slope. On the other hand, the same things were estimated from the results of the numerical analysis. Considering that the analysed slope has complex layers, application of the above method to the analysis of seepage flow through the slope with a few water tables or unsaturated zone is considered to be possible.

It was considered as hydraulic fracturing that the seepage velocities became more than the critical velocity and the soil particles within the slope were swept away. The analysis on this phenomenon have been possible by developing the above analysis method of the seepage flow in saturated-unsaturated porous media. Applying the analysis method to the forecast of the fracture of slopes under heavy rain, the fracture of surrounding slopes of the reservoir under rapid draw down of the water table and etc. is considered to be possible.