

名古屋大学大学院 学生員 〇門 田 俊 一
名古屋大学工学部 正 員 川 本 聡 万

1. はじめに

岩盤中の浸透水によって、岩盤中の応力状態および極限強度は、大きく影響を受ける。また、岩盤の透水係数は、応力状態に大きく依存している。これは、不連続面の開口値の増減によるものである。したがって、岩盤中の応力状態と浸透水の挙動は、相互の影響を考慮して評価されねばならない。この種の工学的問題に対する数値解析には、応力解析と浸透解析に、それぞれ有限要素法を用い、これを組み合わせることにより行うものがある。今回の報告では、Morgenstern¹⁾ により採用されているモデル、すなわち、岩盤を応力に依存する透水係数を有する連続体とするモデルを用い、これに対する応力-浸透解析の方法を示した。また、この解析方法を、重力ダム基礎岩盤に適用し、応力に依存する透水係数を評価した場合の浸透水の挙動、および応力状態を解析した。その結果、浸透水の等ポテンシャル線が一樣に下流側に移行し、また、岩盤中の引張主応力領域が、ダム上流端付近に存在することが示された。

2. 応力に依存する透水係数の評価

応力に依存する透水係数の評価として、Morgensternは、岩盤中の透水係数実測データから、下記①～⑤の仮定のもとに、式(1)で示される経験式を提案している。①岩盤は等方等質である。②自由水面は、地表面と一致する。③水平応力は、鉛直応力と等しい。④鉛直応力は、土かぶり圧より得られる。⑤ packer 試験は、透水係数に影響を与えない。

$$k = \frac{A}{(\sigma_m' + T)^N} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 σ_m' : 平均有効主応力、 k : 等方的な透水係数であり、 T 、 N 、 A の値は、 k と σ_m' の実測値を、両対数紙にプロットすることにより得られる。応力の依存性は、 T が小、 N が大であるほど強くなる。

3. 浸透水圧を導入した応力解析

この種の応力解析には、種々の方法が提案されているが、今回の解析には、Zienkiewicz²⁾ が示した方法を用いた。すなわち、応力として全応力を用い、浸透水圧の岩石コアに対する作用を考慮し、応力-ひずみ関係を式(2)のように書き換えることにより、浸透水圧を応力解析に導入する。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y - \nu \sigma_z) - \left(\frac{1}{3K} - \frac{1}{3K^*} \right) P \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad \text{(2)} \quad \text{(圧縮が正)}$$

上式で、 P は浸透水圧、 E 、 ν 、 K は、岩盤のヤング率、ポアソン比、体積弾性係数であり、 K^* は、岩石コアの体積弾性係数である。また、有効応力は、全応力から浸透水圧を減じることにより得られる。

4. 応力-浸透解析 (Coupled Analysis) について

Coupled Analysisは、次に示す手順で行われる。①初期透水係数を用いて浸透解析を行い、圧力分布を求める。②この圧力を、式(2)を用いて応力解析に導入し、全応力および有効応力を求める。③②で求めた有効応力を用いて、式(1)から、新たな透水係数を評価し、浸透解析を行う。④圧力が一定の公差に収束するまで、②、③の過程をくり返す。なお、通常、収束は、4～5回のくり返し計算で得られる。

5. 適用例

前記に示した *Coupled Analysis* の適用例として、重力ダム基礎岩盤における浸透水の挙動、および応力状態を解析した。解析は、岩盤を等方等質と仮定し、三角形 *linear element* を使い、二次元平面ひずみ状態で行なった。図-1に、使用モデル、有限要素分割、材料定数データを示した。また、応力依存の透水係数として、次式を用いた。

$$k = \frac{0.016}{(\sigma_m' + 40)^2} \quad (\text{m/sec}) \quad \text{--- (3)}$$

計算は、Case1: 応力に依存しない透水係数を用いた場合の満水位(80m)における浸透解析、Case2: 自重のみに依存する透水係数を評価した場合の浸透解析、Case3: 満水位の場合の *Coupled Analysis*、Case4: Case3の応力解析に、*No-tension* 解析を導入した場合、Case5: 自重、貯水圧のみを考慮した応力解析、の5Caseについて行なった。なお、Case3、4では、自重、貯水圧も考慮されている。結果として、図-2に、Case1、2の等ポテンシャル線、図-3、4に、Case3、4の等ポテンシャル線、および引張主応力領域を示した。また、図-3、4に、Case5の引張主応力領域を重ねて示した。こゝの図より、まず、図-2、3、4の比較から、*Coupled Analysis* を行なうと、等ポテンシャル線が一律に下流側に移行することがわかる。こゝは、ダム基礎上面の引張応力によつて、透水係数が大きく評価されるためであろう。また、図-3、4より、*Coupled Analysis* を行なうと、特に、ダム本体上流端付近の岩盤に、引張応力領域が顕著であることが示される。こゝの現象は、実際のアーチダム、重力ダムで観測されている。

6. おわりに

今回の解析では、岩盤を等方等質であると仮定したが、今後の課題として、岩盤中の複雑な不連続面を考慮し、異方性的な扱いについても考慮したい。また、異方性的な応力依存の透水係数についても、考えて行きたい。なお、解析結果の詳細は、当日、会場で述べる予定である。

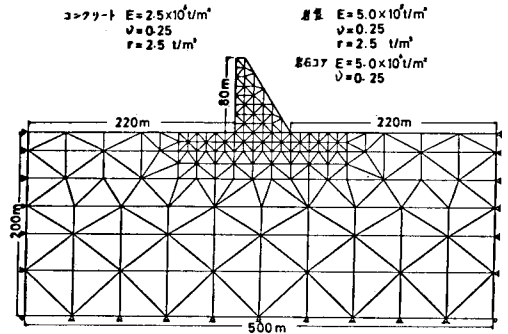


図-1 モデル図 および材料定数データ

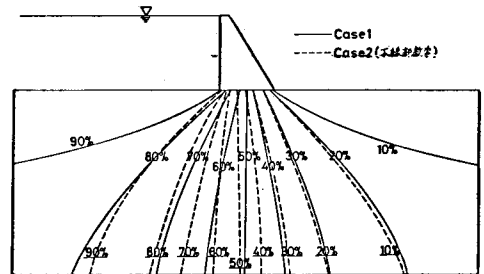


図-2 Case1 および Case2 の等ポテンシャル線

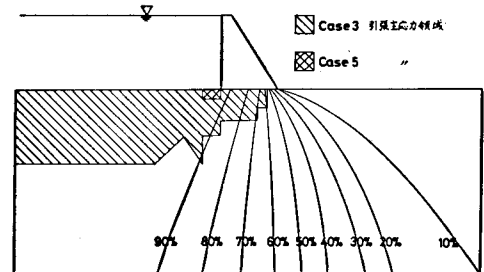


図-3 Case3 の等ポテンシャル線
および有効引張主応力領域

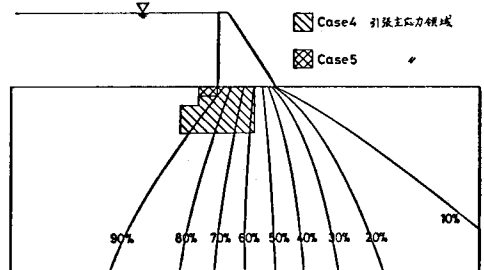


図-4 Case4 の等ポテンシャル線
および有効引張主応力領域

参考文献 1) Morgenstern, N.R., *Seepage Into an Excavation in a Medium Possessing Stress-dependent Permeability*, Proc. Int. Symp. on Percolation Through Fractured Rock, 1972. 2) Zienkiewicz, O.C., *Rock Mechanics in Engineering Practice*, 1969. 3) Widmann, R., *Analysis of an Arch Dam Taking Account of The Cracked Tension Zone, Numerical Analysis of Dams*, 1974.