

東電設計(株)	土木本部	正員	宮田 美幸
同 上	水力第2部		高橋 信之
前田建設工業(株)	土木設計部		梨本 裕
同 上	電算センター		矢島 充郎

1. はじめに

岩盤における浸透流の挙動を把握するためには、節理、層理、破碎帯、断層などの不連続面を含む岩盤を巨視的に等価な粒状多孔体に置き換え、ダルシー則を適用して連続体解析を行うのが一般的である。これに対して、最近、不連続面を滑らかな不透水平行壁に置き換える不連続体解析も行われるようになってきた。これらの連続体解析と不連続体解析は、モデル化が異なるだけで、解析方法自体はほとんど同じとみなすことができ、どちらも浸透流は層流状態にあると仮定している。しかし、岩盤の不連続面は相対粗度が非常に大きな水路を形成しており、相対粗度が大きいと低いレイノルズ数で乱流状態に変化することが知られている。従って、浸透流の状態が層流か乱流かによって水頭分布等がどれだけ異なるか知っておく必要がある。著者らは、この目的のために、乱流状態を考慮した岩盤浸透流解析プログラムを開発したので、この内容と、これを用いた解析例を以下に報告する。

2. 乱流状態を考慮した岩盤浸透流解析プログラム

2-1. 基礎方程式

不連続面(割れ目)内の浸透現象はLouisにより理論的、実験的に検討されている。それによると単一の不連続面内の浸透則は次のように表わされる。

層流 $v = K_f \cdot I_f \cdots \cdots (1)$ v : 平均流速 K_f : 不連続面の透水係数 I_f : 動水勾配

乱流 $v = K_f \cdot I_f^\alpha \cdots \cdots (2)$ α : 非線形性の度合(層流 1.0、完全な乱流 0.5)

(2)式に従うと、2次元定常の場合、乱流状態にある浸透流の基礎方程式は次のように表わされる。

$$Kx \cdot (\partial H / \partial x)^{\alpha-1} \cdot (\partial^2 H / \partial x^2) + Ky \cdot (\partial H / \partial y)^{\alpha-1} \cdot (\partial^2 H / \partial y^2) = 0 \cdots \cdots (3) \quad H: \text{全水頭値}$$

2-2. 差分法による数値解法

単純な解析モデルを考えているので、数値解法はプログラミングの容易な差分法を用いた。

x 、 y の座標軸方向に一定間隔 Δx 、 Δy をもつ座標線群をつくると、格子点(x_i 、 y_j)において

$$\partial H / \partial x = (H_{i+1,j} - H_{i-1,j}) / 2\Delta x \cdots (4) \quad \partial^2 H / \partial x^2 = (H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}) / (\Delta x)^2 \cdots (6)$$

$$\partial H / \partial y = (H_{i,j+1} - H_{i,j-1}) / 2\Delta y \cdots (5) \quad \partial^2 H / \partial y^2 = (H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}) / (\Delta y)^2 \cdots (7)$$

が成立する。ただし、 $H_{i,j}$ は格子点(x_i 、 y_j)の全水頭値である。

(4)～(7)式を(3)に代入すると次のようになる。

$$Kx \cdot \{(H_{i+1,j} - H_{i-1,j}) / 2\Delta x\}^{\alpha-1} \cdot (H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}) / (\Delta x)^2 + Ky \cdot \{(H_{i,j+1} - H_{i,j-1}) / 2\Delta y\}^{\alpha-1} \cdot (H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}) / (\Delta y)^2 = 0 \cdots (8)$$

(8)式で表わされる連立方程式は、 $\alpha = 1$ のとき、与えられた境界条件のもとに、簡単に解くことができる。このことに着目して、 $\alpha \neq 1$ のときは、次の手順で解く。

① $\alpha = 1$ として、(8)式を解く。

② ①で求められた $H_{i,j}$ を用いて、 $Kx \cdot \{(H_{i+1,j} - H_{i-1,j}) / 2\Delta x\}^{\alpha-1} = A$
 $Ky \cdot \{(H_{i,j+1} - H_{i,j-1}) / 2\Delta y\}^{\alpha-1} = B$ を計算する($\alpha \neq 1$)。

③ $A \cdot (H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}) / (\Delta x)^2 + B \cdot (H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}) / (\Delta y)^2 = 0$ を解く。

④ ③で求められた $H_{i,j}$ を用いて、 A 、 B を計算し、③の連立方程式を解く。

⑤ ③と④の $H_{i,j}$ の差が許容誤差以下になるまで、③→④→③をくり返す。

3. 解析例

解析モデルとして図-1、2に示すような境界条件をもつ等方等質な鉛直不連続面を想定し、全体が層流 ($\alpha = 1$) になっている場合と完全な乱流 ($\alpha = 0.5$) になっている場合の水頭分布の違いを知ることを主眼に解析を行った。ただし、透水係数はどちらの場合も 1.0 m/s とし、また、 $\Delta x = \Delta y = 1\text{ m}$ とした。

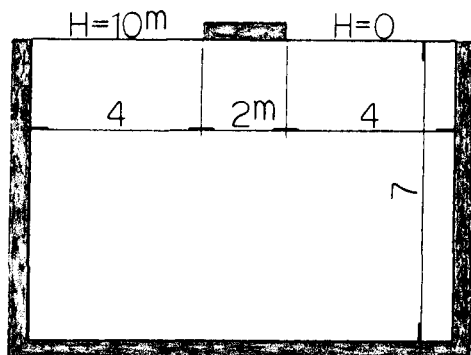


図-1 解析モデル1

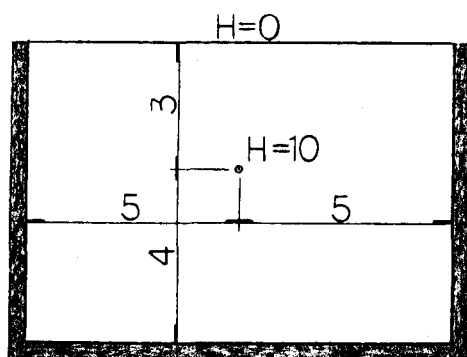


図-2 解析モデル2

モデル1の水頭分布を図-3に、モデル2の水頭分布を図-4に示す。実線は層流、鎖線は乱流の場合の等水頭線である。浸透流の状態が乱流の場合は、層流の場合に較べて、モデル1の流入境界（水頭既知境界）とモデル2の流入点（水頭既知点）の付近で、等水頭線の分布が密になっている。換言すると、どちらのモデルにおいても、乱流の方が層流の場合よりも動水勾配の変化が大きい。この傾向はモデル2において著しい。ただし、モデル1においても水頭値の最大差は 0.69 m になっている。以上の結果から、流速の変化が大きいと予想される不連続面ほど、浸透流の状態が層流が乱流かによって水頭分布が大きく異なると考えられる。なお、この解析においては、水頭値の許容誤差を 0.1 m としたが、くり返し計算はモデル1で4回、モデル2で7回であった。

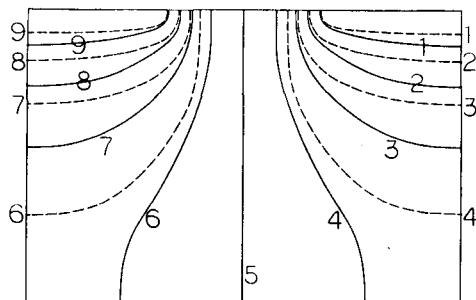


図-3 モデル1の水頭分布

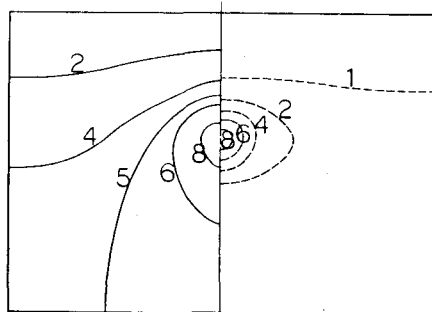


図-4 モデル2の水頭分布

4. おわりに

ここに報告した解析は、浸透流の状態が解析領域全体に一樣であると仮定して行ったが、実際は層流の部分と乱流の部分が混在しているはずである。この点については、今後、プログラムを改良しながら検討していく予定であるが、この解析結果は、岩盤構造物の安定性を検討する上で、場合によっては乱流状態を考慮した浸透流解析が必要であることを示唆していると思われる。

参考文献

- 1) G. Gudehus 編著：地盤力学の有限要素解析2 第14章、森北出版
- 2) 川本隼ら：亀裂性岩盤内の浸透流の解析について 発電水力 No. 147
- 3) 大西有三ら：有限要素法による不連続性体の応力・変形・浸透流解析 土木学会論文報告集 (322)
- 4) C. Louis : A study of groundwater flow in jointed rock , Imperial College R.M.R.R. No.10