

流線網図法を適用した地下水流動計算の手法について

熊本工業大学 正員 武上成比古

はじめに アースダムの浸透流, フローテングダム法流の洗掘, 深井戸影響圏の拡大, 暗渠排水効果等の地下水流動が関与する水理では, 与えられた任意の形状の流れの場における外界の非定常な水文変化に対応した流動計算が求められる。加えて全体の流動状態を表わす流線, ポテンシャル線分布や流入流出端の境界値設定等についての図形による認識が望まれる。この目的を達するためには流動の場の有限要素分割, 計算値の座標値変換, 図式解といったコンピュータグラフィックの活用や解析次元の1次元への変換等の工夫が必要になる。以下は自然界における地下水流動の實際に基づき, 流線網図法を援用して開発した実用を目的とした計算モデルである。

1. 地下水流動の特性

地下水流動現象は広域地下水帯の1つの部分から他の部分への飽和浸透流としての流体の移動を表わしており, 流入端から流出端へ, 流速変化に伴い伸び縮みを生じ, 流れの方向に直角には流体の交換のない流れである。図-1に見るような盛土地における浸透流路網の発生は暴雨時の地下水位による上, 下流端のピエゾ水圧差と下端不透水層の存在によるもので, 常時には重力方向からの雨水の供給と河川水位低下による流動の促進がある。

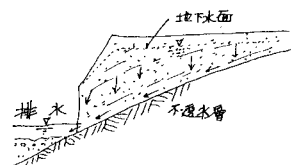


図-1 浸透流路網の発生

2. 浸透問題解析の手法

図-2はいくつかの水工事例で規定される流入, 流出の境界面および流線網を表わしているが, 外界の非定常な水文変化の影響は下流水平方向における水位低下が流線方向とそれに直交する重力方向の流動を促進する結果となる。すなわち定常流の条件によつてポテンシャル分布を求め, これとは別に流線方向とそれに直角な方向の非定常な流れを計算し, それによるポテンシャル変化値を当初の定常流のポテンシャル分布に加える手法が考えられる。

この計算モデルは表-1の浸透問題の解法における, 4を用いている。流入・流出の境界面を等分し相互に結び任意形状の流線をえがき, それぞれを流線方向に等分するポテンシャル線を求め, これによる固々の有限要素分割について流動計算を行い, その流動量計算値のポテンシャル線に沿う計算値を等分割して改めて流線網図を定めるものである。すなわち固々の流線に沿う要素について連続の条件を満たすポテンシャル分布を定め, 流線

表-1 浸透問題の解法

実験的手法	解析モデル	実験水槽を用い降雨条件, 上下流端水位を与え, 定常流, 非定常流のHを測定する。層位の分布と流動ポテンシャルを算出する。
1	電気相似法	
特性曲線法	カウチの方法 等価画像法	堤体浸透流等の自由地下水面を地物線等の特性曲線にて近似する。 ラプラス方程式の解を求める複素変数を用いる。
2		
直接解法	井戸公式 排水溝公式	縦軸(井戸), 横軸(排水溝)を2次元の平面(2次元)ポテンシャル分布を求める。地下水流, 排水工設計に多用される。
3		
近似解法	流線網図法 有限要素法	流線網図を求め得たとして通過流量を求める解法に近似する。等ポテンシャル線と等流線とを不整形断面に分割する諸要素についての解析結果を重ね合わせ, 全体の流動ポテンシャルを求める。
4		

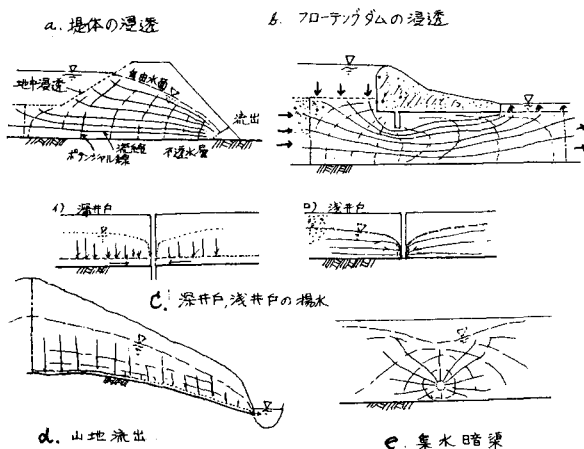
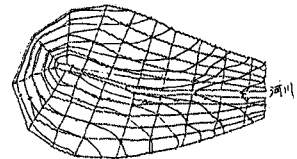


図-2 地下水流動の場

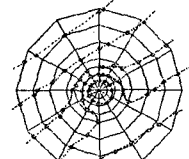
上にポテンシャル等高線をプロットし、これを流れる場合全体につけておくことによって連続式の条件についての図式解を得ている。図-3は山地流出と揚水井についての初期定常流のポテンシャル分布を地表に平行な面とし、排水(横軸)、揚水(縦軸)によって分割した有限要素について水位低下による地下水位変化の上流への伝播を計算したものである。

3. フローティングダムの浸透流

i) 流線網図の作成 図-4は流入、流出境界線を等分し相互に結んだ流線をえがき、これを等分割することによってポテンシャル線を求め、次に作図による国々の要素についての流動計算からポテンシャル線を流動量で等分割する点を求め、印でプロットしたものである。図-5は求められた有限要素分割、図-6はそれぞれのx方向、y方向の中心線を結んだ線であり、この線に沿ってポテンシャル分布を求める。



山地流出・降雨後の地下水位



深井・揚水井: 24時間揚水後の地下水位

図-3 流動計算事例

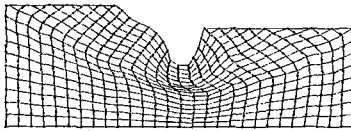


図-4 流線・ポテンシャル線の等分割

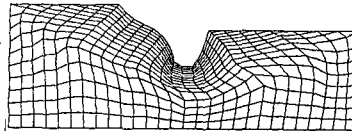


図-5 有限要素分割

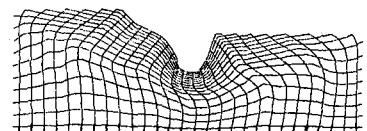


図-6 流動計算軸

ii) 定常流計算 流動はダルシー則に従うものとし、 k_x, k_y : 透水系数、 P_x, P_y : x, y軸方向の流動ポテンシャル、 dA : 要素面積、 dx, dy : 図-6の要素別x, y方向流路長としたとき流動量 Q_x, Q_y は

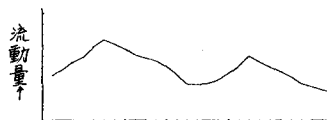
$$Q_x = k_x \frac{P_x}{dx} \frac{dA}{dx}, \quad Q_y = k_y \frac{P_y}{dy} \frac{dA}{dy} \quad \text{----- (1)}$$

この流動計算において $i=1, 2, \dots, nx, j=1, 2, \dots, ny$ とし $Q_{i,j}$: x軸上の要素別流量、 $P_{i,j}$: 流動ポテンシャル、 $K_{i,j}$: 要素別に固有な配列変数とすれば $Q_{i,j} = P_{i,j} \cdot K_{i,j}$ であり、これから $\sum_{i=1}^{nx} P_{i,j} = \sum_{i=1}^{nx} Q_{i,j} / K_{i,j}$ において $Q_{i,j}$ の平均値 Q_{mean} を求め、微小値 ΔQ を与え、流線に沿うx軸方向について

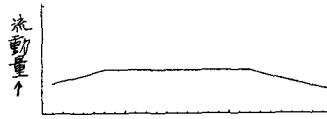
$$\sum_{i=1}^{nx} P_{i,j} = \frac{Q_{mean} - \Delta Q}{\sum_{i=1}^{nx} K_{i,j}} \quad \text{----- (2)}$$

によって求められた値が境界条件によって与えられた上下流ポテンシャル差に等しくなるとき連続の条件が満足される。図-7-1は図-5による流動量計算値の分布を示し、図-7-2は計算結果の流動量分布を示す。

iii) 非定常流計算 下流端水位低下による(1)式の Q_x, Q_y を計算し、求められた流動ポテンシャルを図-8-1の定常流ポテンシャルに加え、図-8-2に示す流入・流出端境界間のポテンシャル分布を得る。 $k_x=0.005$, $k_y=0.0025 \text{ m/s}$, 計算時間/sec 毎、10分間、流入、流出端ポテンシャル差は 2.0 ~ 4.0m



→ $i=1, 2, \dots$ - 1 (図-5の場合)

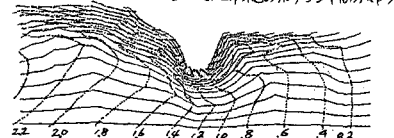


→ $i=1, 2, \dots$ - 2 (定常流)

図-7 x軸方向流動量



- 1 (定常流のポテンシャル分布)



- 2 (下流水位低下による分布)

図-8 流動ポテンシャル分布の変化

4. あらび この手法は図-7-2に示すように被圧地下水の部分の連続条件を解くことに基いている。また、図-5に示すようにx軸、y軸方向の分割数を工夫し要素の形状を長方形に類似させ計算精度をあげている。