

(株)間組 技術研究所 正員 草深 守人

同上 正員 向上 拓美

同上 正員 三原 正哉

1. まえがき

フィールドなどにおける浸透流の解析には、飽和部のみを解析領域とし、上部節点を移動可能な節点とした有限要素法による方法がこれまで多く採用されてきた。しかし、飽和部のみを扱う方法では、降雨や上部湛水がある場合などの不飽和浸透解析が行えず、汎用性に欠けるとともに、不飽和部の存在に基づく種々の影響(サクションなど)が考慮されない。不飽和領域を含む浸透解析に関しては、R.A. Freeze,¹⁾ S.P. Neuman²⁾らが差分法や有限要素法による計算手法を提案しており、国内では大西³⁾らが同様の解析を行っている。

当社においても、今回、S.P. Neumanらの方法を参考にし、2次元の有限要素法による飽和-不飽和浸透解析プログラムを開発し、数種のモデルに関して解析を行ったので、その結果について述べる。

2. 基礎式およびF.E.M.による定式化

飽和-不飽和領域を同時に扱う基礎式の誘導定式化に際し、次のように仮定した。

仮定①全水頭(h)は圧力水頭(ψ)と位置水頭(z)の和で表わされるものとし、間隙空気圧の影響などは無視する。

②水は非圧縮性流体とし、飽和-不飽和領域における圧力水頭変化による間隙率の変化は無視する。

③Darcyの法則は、不飽和領域においても成り立つとする。

④圧力水頭(ψ)は、飽和領域で $\psi \geq 0$ 、不飽和領域で $\psi < 0$ とする。

このとき、飽和-不飽和領域における浸透の基礎式は次式となる。

$$\nabla \cdot (IK(\theta) \nabla h) = C \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \dots \dots (1)$$

ここで

$IK(\theta)$: 透水係数テンソル, θ : 体積含水率, t : 時刻, $C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$

また透水係数テンソル $IK(\theta)$ は、次式で示されるものとする。

$$IK(\theta) = k(\theta) / k_s$$

ここで IK_s : 飽和時の透水係数テンソル

$k(\theta)$: 体積含水率の関数 ($0 \leq k(\theta) \leq 1$)

この時、 θ - ψ 、 θ - k の関係は、模式的には図-1のように表わされる。 θ - ψ の関係は、不飽和領域において、湿潤過程と乾燥過程でヒステリシスを描くと言われている^{1),2)}が、今回の計算では考慮していない。

有限要素法への定式化は、重みつき残差法の1つであるGalerkin法を用いた。

3. 数値計算例

飽和-不飽和浸透解析においては、 θ - ψ 、 θ - k の関係、および初期条件が解に大きな影響を与える。 θ - ψ 、 θ - k の関係を不飽和透水係数測定器(大起理化工業(株)製)を用いて測定した一例(細砂)を図-2に示す。測定器の制約もあり、pF3以上および毛管飽和付近の測定については問題がある。なお破線部分は推定による。

この実測された θ - ψ 、 θ - k の関係をを用いて、外水位急下降・急上昇時の堤体内の浸透、貯水池周辺の湛水

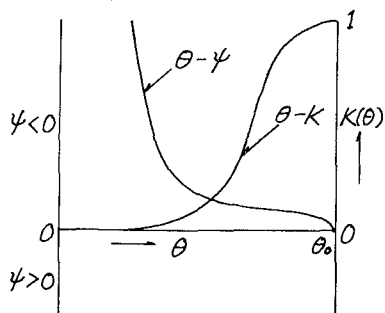


図-1 θ - ψ 、 θ - k の模式図

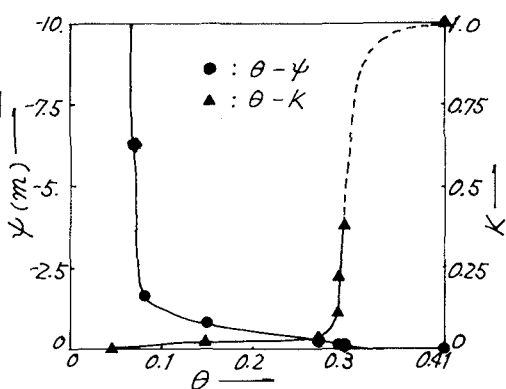


図-2 θ - ψ 、 θ - k の実測例(SAND, $k_s = 2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)

による浸透、降雨時の斜面浸透の4ケースに相当するモデルの解析を行ったので、その計算結果を示す。

図-3に堤体モデルの外水位急下降時の圧力水頭 $\psi=0$ の時間変化を示す。初期条件は、急下降前の定常時における圧力水頭分布を用い、外水位は10時間で40m下降させた。

図-4に堤体モデルの外水位急上昇時の圧力水頭 $\psi=0$ の時間変化を示す。初期条件は、急上昇前の定常時における圧力水頭分布を用い、外水位は10時間で70m上昇させた。

図-5は貯水地モデルで、一気に50cmの湛水(以後一定)を与えたときの圧力水頭 $\psi=0$ の時間変化である。モデルの左端の地下水位は3mで一定である。初期条件は、地下水位のみの定常時における圧力水頭分布を用いた。

図-6に斜面に降雨がある場合の体積含水率 θ の時間変化を示す。斜面は下端が水面に接している。初期条件は、初期地下水面 $z=-\frac{1}{2}$ までは、 $\psi=-(z_0-H)$ を与え、地下水面 $z=-\frac{1}{2}$ 以上は $\psi=\frac{1}{2}$ を与えた。ただし $\frac{1}{2}=-1.5m$ とした。

4. あとがき

今回は計算結果のみを示したが、現在初期体積含水率の測定を含めた浸透実験を準備しており、実験結果との比較は次の機会に行いたい。実際問題への応用に際しては、 $\theta-\psi$ 、 $\theta-K$ の測定方法の確立、および地盤内の初期体積含水率の把握などが問題となるが、より広範な浸透問題への適用性、あるいは土の応力変形を含む諸問題への発展性などの点で、本手法は有効と思われる。なお、開発にあたり京都大・大西助教に種々の助言を蒙った。また、土質試験は当所北村孝海氏の協力を得た。

(参考文献)

- 1) Freeze, R.A.: Three-Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin, W.R.K. Vol. 7, No. 2, pp. 347~366, 1971.
- 2) Neuman, S.P.: Saturated-Unsaturated Seepage by Finite Elements, Proc., ASCE, HY, Vol. 99, No. 12, pp. 2233~2250, 1973.
- 3) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠: 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, No. 264, pp. 87~96, 1977.

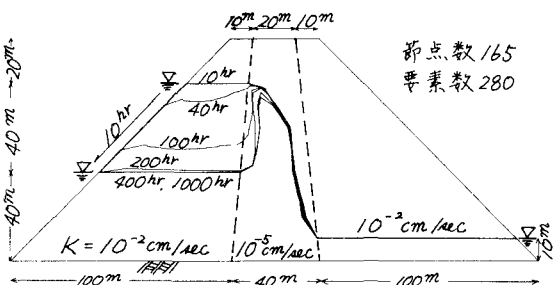


図-3 外水位急下降時の $\psi=0$ の変化

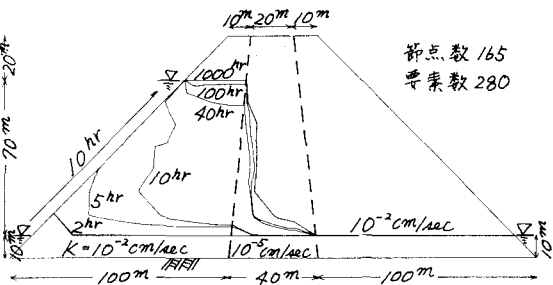


図-4 外水位急上昇時の $\psi=0$ の変化

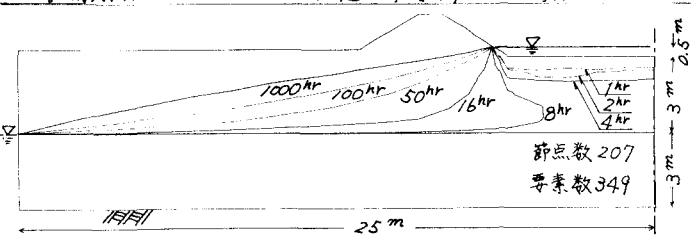


図-5 湛水時の $\psi=0$ の変化

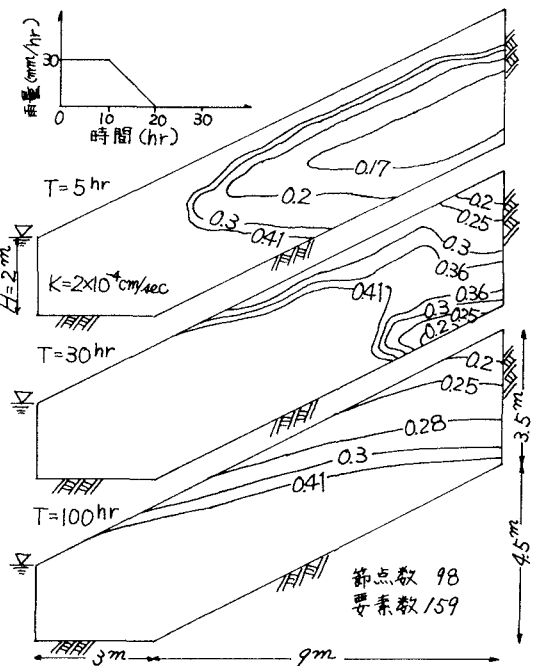


図-6 降雨時の体積含水率 θ の分布