

建設省四国地建 正員 ○浦上将人
 東京大学工学部 正員 高橋 裕
 東京都立大学工学部 正員 安藤義久
 東京大学大学院 学生員 盛谷明弘

1. はじめに

土中水分の浸透現象に関しては、基本式にRichardsの式を用いてモデルを作り、数値解析を行なう研究が国内外で数多い。一方、近年毛管水帯内での水分移動現象の特異性が注目を集めている。これは、浸透水が毛管水帯上端に到達すると、流入量だけ直ちに下端より地下水面に補給されるという現象で、古くからロージェ²⁾により指摘され、開発³⁾、Tominaga等⁴⁾により実験的に確認されている。しかし、この現象は既往の研究では考慮されていない。よって本研究では現象を実験的に再確認し、これを組み込んだ浸透モデルの作成を目的とする。

2. 実験の方法

(1)実験装置 本研究ではアクリル円筒カラムに標準砂(豊浦砂)を詰めた土柱を使用し、散水器により模擬降雨を行なう。その際に土柱下端からの排水量・土中吸引圧・浸潤面の位置・水温といった計測項目を設ける。土中吸引圧については図1に示すようにテンシオメーターを5深度に設置して測定する。

(2)実験条件 (a)土柱高: 50, 100cmの2種類とする。前者は毛管水帯内の水分の静水圧伝播現象の再確認に用い、解析には主に100cmの土柱を用いる。(b)降雨パターン: 表1に示す。ただし、降雨強度については湛水が生じないよう考慮し、また降雨強度は実験終了後に総排水量より計算する。

3. 毛管水帯内の静水圧伝播現象の再確認

前述のように50cmの土柱を用いて実験を行なった。その結果が図2である。降雨開始後約30秒で排水が始まり、12分後に定常状態に達した。この時の飽和毛管水帯の高さは目視により水面上約37cmと測定された。飽和透水係数は約600mm/hrであるので、毛管水帯内の水分の静水圧伝播現象を考慮しないと実験結果の説明ができない。従って、現象の再確認がされたものといえる。

4. 解析の方法

(1)支配方程式 不飽和浸透の基本式のRichardsの式を鉛直1次元解析に適用する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

θ : 体積含水率 ψ : 吸引圧 K : 透水係数 t : 時刻 z : 座標軸

式中で ψ - θ 関係、 ψ - K 関係を定めれば1変数 ψ のみで取り扱うことができる。

(a) 土柱高 50cm (b) 土柱高 100cm

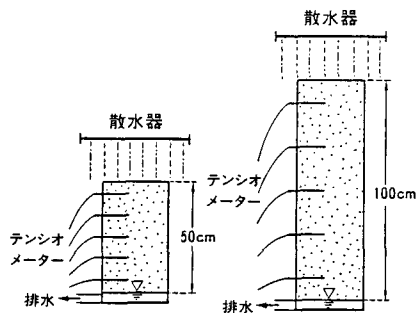


図1 実験装置の概要

表1 降雨パターン

(a) 土柱高 50cm

降雨強度 (mm/hr)	降雨継続時間 (分)
60	30

(b) 土柱高 100cm

降雨強度 (mm/hr)	降雨継続時間 (分)	
60	30	60
120	30	60

降雨強度 60mm/hr, 降雨継続時間 30分
 (飽和透水係数 $K_s = 1.718 \times 10^{-2}$ cm/s)

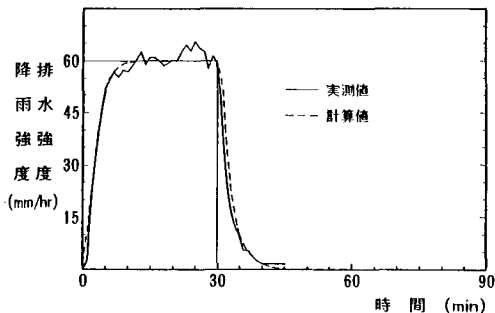


図2 50cmの土柱の実験結果

(2) $\psi-\theta$ 関係 本研究で使した標準砂に
 関しては、Brooks & Corey⁵⁾による下限含水
 率 $\theta_{\min}$ を考慮した次式の適合性が高い。

$$\frac{\psi}{\psi_e} = \left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{sat} - \theta_{\min}} \right)^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

ψ_e : 限界吸引圧 θ_{sat} : 飽和体積含水率
 排水過程の実験結果を図3に示す。

(3) $\psi-K$ 関係 (a)飽和透水係数の決定: 測
 定には実験用の土柱自体を用い、定水位法で
 行なう。水温も測定して解析には補正值を用
 いる。 (b)不飽和領域の $\psi-K$ 関係のモデル
 化: $\psi-\theta$ 関係と同様に Brooks & Coreyに
 より提案された次式を用いる。

$$\frac{K}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{sat} - \theta_{\min}} \right)^{\frac{2}{\lambda} + 3} = \left(\frac{\psi}{\psi_e} \right)^{-(2+3\lambda)} \quad (3)$$

(4)差分法による定式化 (a)メッシュの設定: 図4に示す。
 (b)差分式: 陽解法により差分化する。解析では Δt を十分短
 くし、計算誤差を生じないようにする必要がある。本研究で
 は0.02(分)を用いた。 (c)初期条件: 全土層に対し水理学
 的に連続であるとして、 $\partial \psi / \partial z = -1$ を与える。 (d)境
 界条件: $\psi_t = \Delta z / 2$, $Q_{N+1} = -R$ を与える。 (e)毛管水帯
 内の水分の静水圧伝播現象のモデルへの組み込み: 毛管水帯
 内の吸引圧、含水率等の条件を固定することで表現する。

(5)排水強度及び排水量 排水強度は Δt 間の各メッシュの
 含水率変化の総和と、その間の降雨量との差より求める。又
 排水量は排水強度を時間積分することで求める。

5. 解析結果と考察

(1)排水強度 土柱高50cm,100cmの実験値と計算値の比較を
 図2, 図5で行なっているが、再現性は良好である。

(2)浸潤面の位置 土柱高100cmの実験に対する実験値と計
 算値の比較を図6に示す。これも再現性良好である。

(3)吸引圧分布 本稿では結果を示さないが、実験値と計算
 値の間に全体的傾向の一致は見られるものの、絶対値には差
 が生じている。この相違は、 $\psi-\theta$ 関係におけるヒステリシ
 スの存在のためと解釈できる。

6. 結論

不飽和-飽和領域にわたる浸透現象に関し、毛管水帯内の
 水分の静水圧伝播現象を実験的に再確認でき、これを組み込
 んだ浸透モデルによる現象の再現性が良好である事を示した。

[参考文献] 1) L.A.Richards: Physics, 1931. 2) A.A.ロージェ (山崎不
 二夫監訳): 土壌と水, 1963. 3) 開発一郎: 地下水学会誌, 1979.

4) M.Tominaga: Report of Nat.Res. Center for Disaster Prevention,
 1980. 5) Brooks & Corey: Hydrol. Paper Coro. St. Univ., 1964.

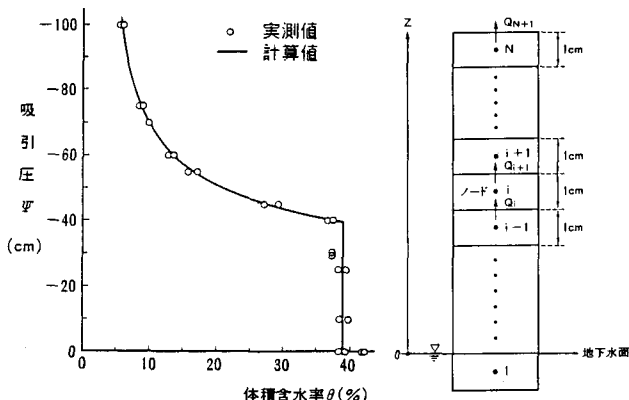
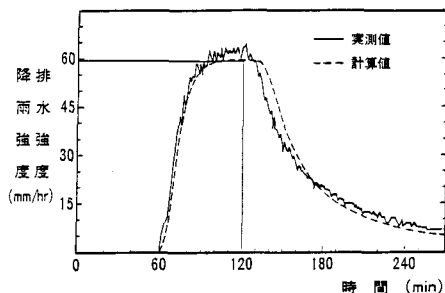


図3 $\psi-\theta$ 関係図

図4 土柱の分割図

降雨強度 59.4mm/hr, 降雨継続時間 120分
 (飽和透水係数 $K_s = 1.253 \times 10^{-2}$ cm/s)



降雨強度 111.6mm/hr, 降雨継続時間 60分
 (飽和透水係数 $K_s = 1.243 \times 10^{-2}$ cm/s)

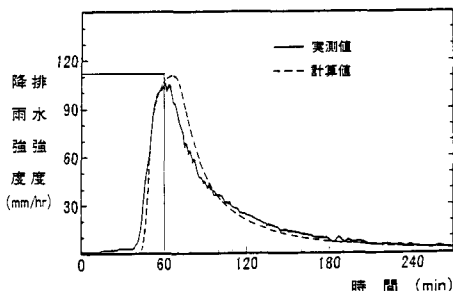


図5 排水強度の実験値と計算値の比較

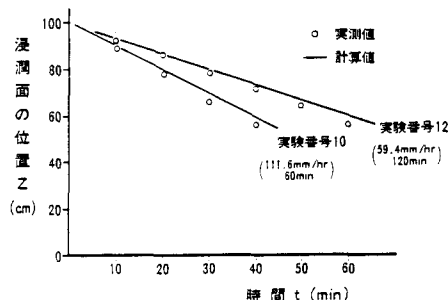


図6 浸潤面の位置の実験値と計算値の比較