

# 一种确定原状土样非饱和水力 传导度的方法\*

邵爱军<sup>1</sup> 沈荣开<sup>2</sup> 张瑜芳<sup>2</sup> 杨劲松<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008) (2 武汉水利电力大学, 武汉 430072)

**摘要** 提出了一种新的求参方法——“同定参数法”, 按该方法求原状土样参数的原理设计制作了求参装置, 在求参过程中, 通过迭代法修正水分特征曲线, 求得原状土样非饱和水力传导度。

**关键词** 原状土样, 水分特征曲线, 非饱和水力传导度

**中图分类号** S152.72

水力传导度的测定, 常用方法可分为两大类, 直接方法和间接方法。其中直接方法又可分为室内试验法和野外试验法, 如稳定入渗法与稳定蒸发法, 非稳定流瞬时剖面法, 压力板或压力膜出流法, 零通量面法, 野外瞬时剖面法等<sup>[1,2],(1)</sup>。间接方法是利用直接方法求得的参数间接地计算水力传导度  $K(\theta)$ , 如 CD 法, 水分特征曲线法等。CD 法是利用求出的扩散度  $D(\theta)$ , 从水分特征曲线  $h(\theta)$  求出容水度  $C(\theta) = d\theta/dh$ , 利用  $K(\theta) = C(\theta)D(\theta)$  计算  $K(\theta)$ 。水分特征曲线法<sup>[3]</sup>是把描述土壤水分特征曲线的幂函数方程代入 Burdine 或 Mualem 的预报土壤水力传导度的模型后, 得到相对水力传导度的分析解, 然后用实验资料拟合水分特征曲线求得  $K(\theta)$ 。上述方法各有优缺点, 有的试验观测较为繁琐, 一般情况下一次试验只能求得一个参数。而本文提出的“同定参数法”, 在求  $K(\theta)$  的同时, 还可求得  $h \sim \theta$  曲线, 可谓一举两得。

## 1 基本原理及试验装置

“同定参数法”是根据 Wind<sup>[4]</sup>论文的基本思想提出的, 其理论基础为达西定律 (Darcy's Law)。用垂直圆筒取原状土, 然后使其饱和, 让水分从顶面蒸发, 在土柱的不同深度上安装负压计, 每天测定土柱的总重量和观测负压计的读数。由实测数据计算出不同深度上的水分通量和水势梯度。这样,  $K(\theta)$  可用下式来计算:

$$q = -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \quad (1)$$

\* 该研究得到国家自然科学基金“八五”重大项目 (49391604) 的资助

收稿日期: 1999-01-07; 收到修改稿日期: 1999-06-25

(1) 张瑜芳. 土壤水动力学. 武汉水利电力大学研究生教材, 1987

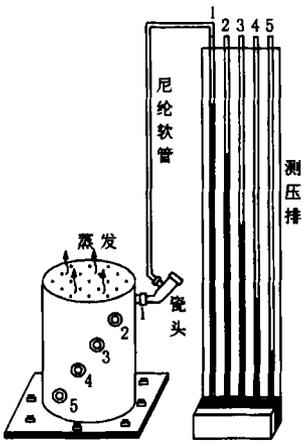


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram showing experimental device

式中  $q$  为水分通量,  $\partial h/\partial z$  为负压梯度。

根据取原状土的要求, 选用无缝钢管, 直径 10.5cm, 高度 25cm。通过管壁安装 5 支负压计, 垂距 5cm, 其中上下两支距顶底面各为 2.5cm。为了保持土的原状, 以防沿一个方向对土破坏严重, 负压计螺旋状布置于土柱上, 见图 1。与以前装置相比, 该装置比较小巧, 不仅能做扰动土的参数, 更重要的是可以做原状土的参数。

“同定参数法”简单实用, 且有较高的精度, 每天只需观测负压和称重一次, 试验时间对于壤土一般 10 天左右, 本试验需要称重量较大的电子天平。

## 2 用迭代法修正水分特征曲线

该方法形似简单, 但仍有许多问题。一般情况下, 用水分特征曲线  $h(\theta)$  计算出土柱中的水分总量与称重法实测得到的水分总量并不一致, 因此, 须修正  $h(\theta)$  曲线, 使得计算出的总水分含量与称重实测的总水分含量一致。这样才有可能使得  $K(\theta)$  的计算较为准确。本文只进行主脱湿曲线<sup>[5]</sup>的修正。

用数字电子天平测定的总水分含量是相当准确的, 误差存在于负压计和水分特征曲线上。在试验前严格挑选性能相同的瓷头, 假定: (1) 称重测定的总水分含量准确; (2) 负压计测定的负压准确; (3) 假定两测点 ( $\leq 5\text{cm}$ ) 间的含水率线性变化。在上述基本假定的前提下, 水分特征曲线的修正步骤如下: (1) 作一条假想的水分特征曲线作为初始曲线; (2) 由初始曲线反求出各测点负压值所对应的含水率  $\theta_{i,j}^0$ ; (3) 计算修正系数  $q_j = W_r/W_{jc}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ , 为观测次数),  $W_r$  为实测的总含水量, 由称重得到,  $W_{jc}$  为计算出的总含水量, 由水分特征曲线计算求得; (4) 计算含水率修正值  $\theta_{i,j}^1$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ , 为负压计测点个数), 得第一次修正的水分特征曲线; (5) 迭代修正, 在第一次修正的基础上再进行修正, 依此类推得第  $P$  次迭代修正值  $\theta_{i,j}^p = \theta_{i,j}^{p-1} \times q_j^{p-1}$ , 以及第  $P$  次修正的水分特征曲线,  $\theta_{i,j}^p$  为含水率的修正值 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_{i,j}^{p-1}$  为含水率的计算值, 由水分特征曲线求得, 因负压值为实测值, 所以修正时负压值固定不变, 只修正含水率; (6) 收敛标准 (见图 2),  $\text{Max}|\theta_{i,j}^p - \theta_{i,j}^{p-1}| < \varepsilon$ , 一般取  $\varepsilon = 0.01$ , 经过 4~5 次迭代则可满足上述标准, 从而求得水分特征曲线。

## 3 $K(\theta)$ 的计算

为计算  $K(\theta)$ , 首先需计算水势梯度。水势梯度  $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (h - z) = \frac{\partial h}{\partial z} - 1$  ( $z$  向下为

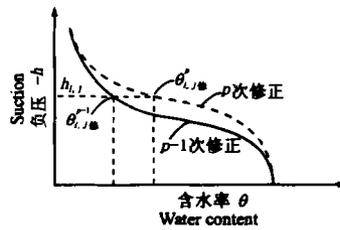


图2  $p-1$ 次与 $p$ 次 $h(\theta)$ 曲线  
Fig.2  $h(\theta)$  curves of correction

正),当 $\Delta z$ 较小时 $\frac{\partial \varphi}{\partial z} \approx \frac{\Delta h}{\Delta z} - 1$ ,所以只需计算负压梯度 $\frac{\Delta h}{\Delta z}$ 。

根据负压计读数绘出剖面负压曲线(见图3),由作图法可求得任一断面 $z_i$ 处 $t_1$ 和 $t_2$ 时刻的负压梯度,由此可得 $\Delta t(t_2 - t_1)$ 时段内负压梯度的平均值:

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta z}\right)_{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\Delta h}{\Delta z}\right)_{t_1} + \left(\frac{\Delta h}{\Delta z}\right)_{t_2} \right] \quad (2)$$

$$\text{式中: } \left(\frac{\Delta h}{\Delta z}\right)_{t_1} = \frac{h_{i+1}(t_1) - h_{i-1}(t_1)}{2\Delta z};$$

$$\left(\frac{\Delta h}{\Delta z}\right)_{t_2} = \frac{h_{i+1}(t_2) - h_{i-1}(t_2)}{2\Delta z}.$$

然后计算通量。根据修正好的水分特征曲线, $t_1$ 和 $t_2$ 时刻含水率的分布可由负压分布通过 $h \sim \theta$ 关系换算得到。 $t_2 - t_1$ 时段内任一断面 $z_i$ 处的土壤水分通量可表示为:

$$q(z_i) = E_0 - \frac{1}{\Delta t} \left[ \int_0^{z_i} \theta(t_2) dz - \int_0^{z_i} \theta(t_1) dz \right] \quad (3)$$

上式中,土柱顶面蒸发率 $E_0$ (与 $z$ 坐标轴正向相反为一负值)由称重测得。右端方括号内的值由 $t_1$ 和 $t_2$ 时刻含水率的分布求得。式(3)表明,一定深度 $z_i$ 处的通量等于蒸发率减掉在那个深度上土壤损失掉的水分。

取一系列 $z$ 断面,按上述方法分别求出 $q(z)$ 和 $\frac{\Delta h}{\Delta z}$ ,则 $K(\theta)$ 由下式计算:

$$K(\theta) = - \frac{q(z)}{\frac{\Delta h}{\Delta z} - 1} \quad (4)$$

## 4 实际算例

土样为中壤土,干容重 $\gamma = 1.38\text{g/cm}^3$ 。取土时清除10cm表土层,将钢管均匀地打入土里取得原状土。试验前让水将土样饱和,然后将土柱底部封严,让其顶面蒸发。试验开始于1993年5月18日,5月28日结束,历时10天。试验期间,每天对土柱称重和观测负压一次。

求参中关键的一步是修正水分特征曲线,所以首先根据实测数据进行修正,通过两次迭代修正达到了精度要求 $\epsilon < 0.01$ 。经过修正,点的分布愈来愈集中于一条光滑曲线上(见图4、图5、图6)。

为了检验水分特征曲线的可靠性,根据最终修正曲线计算出的土柱总含水量与实测土柱总含水量比较,两者几乎完全一致,最大绝对误差1.14g,相对误差为 $10^{-4}$ 数量级<sup>(1)</sup>。

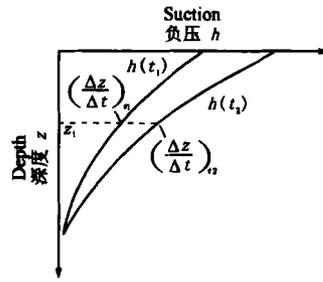


图3 剖面负压曲线

Fig.3 Tension curves in profile

(1) 邵爱军,覆盖条件下田间土壤水分运动的数值模拟.武汉水利电力大学研究生论文,1994

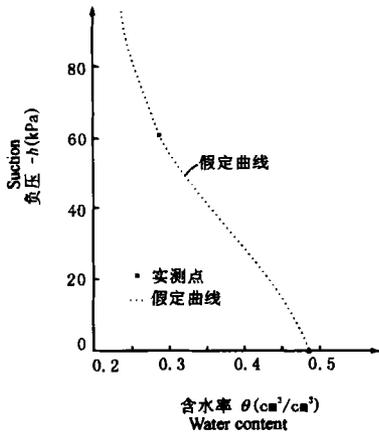
图4 假定 $h\sim\theta$ 曲线

Fig.4 Assumed curve

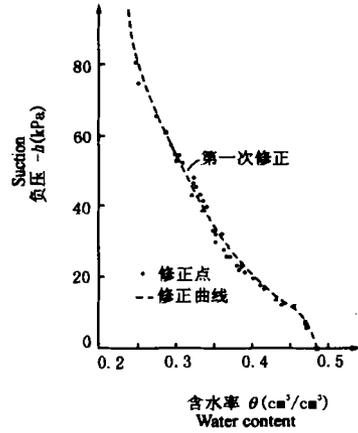
图5 第一次修正 $h\sim\theta$ 曲线

Fig.5 First corrected curve

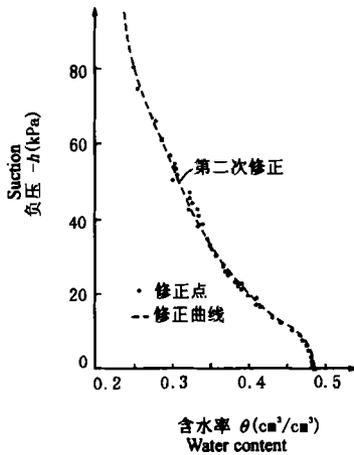
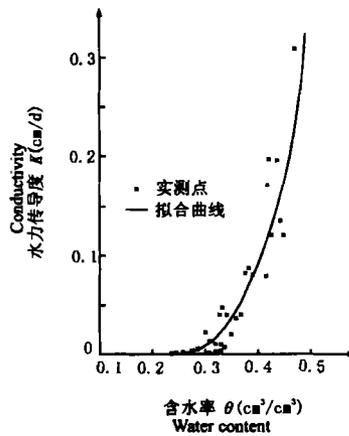
图6 第二次修正 $h\sim\theta$ 曲线

Fig.6 Second corrected curve

图7  $K\sim\theta$ 曲线Fig.7  $K\sim\theta$  curve

由剖面负压曲线计算出的平均负压梯度和由剖面含水率曲线计算出的水分通量,则可求出  $K(\theta)$ 。根据计算结果拟合的  $K\sim\theta$  曲线见图 7。拟合的经验公式为:

$$K(\theta) = 1.37024 \times 10^{-5} e^{23.13014\theta} \quad (5)$$

其中:  $R = 0.8857$ ,  $n = 30$ 。

本次试验在装置上作了一些改进,负压计螺旋状布置于土柱上,以防沿某一方向对土柱的严重破坏,较好地保持了土的原状。为了使假想曲线尽可能快地逼近真实曲线,加快迭代速度,试验结束时取土测定含水率,然后标在图上,并使假定曲线通过这些点,结果加快了迭代速度(两次修正达到了精度要求)。

## 参 考 文 献

1. 张蔚榛主编. 地下水与土壤水动力学. 北京: 中国水利水电出版社, 1996, 226~229

2. 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988, 220~261
3. 邵明安, 李开元, 钟良平. 根据土壤水分特征曲线推求土壤的导水参数. 中国科学院, 水利部西北水土保持研究所集刊, 1991, 13: 26~32
4. Wind G P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. International Association of Scientific Hydrology Proceedings of the Wageningen Symposium, 1966
5. 沈荣开. 非饱和土壤水运动滞后效应的研究. 土壤学报, 1993, 30(2): 208~216

## A METHOD FOR DETERMINING UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF UNDISTURBED SOIL SAMPLE

Shao Ai-jun<sup>1</sup> Shen Rong-kai<sup>2</sup> Zhang Yu-fang<sup>2</sup> Yang Jin-song<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072*)

### Summary

A new experiment method for determining parameters of soil water movement is put forward, which is that two parameters are determined in the same one experiment. According to the principle of determining undisturbed soil sample parameters, a new device is designed and introduced. Through successive correction of the assumed soil water characteristic curve by iteration method, unsaturated hydraulic conductivity of the undisturbed soil sample is obtained. At the same time, the soil water characteristic curve of the soil sample is also obtained.

**Key words** Undisturbed soil sample, Soil water characteristic curve, Unsaturated conductivity