

文章编号: 1000-7598(2011)增刊 1-0334-05

# 压实红黏土的持水性能与机制分析

谈云志<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>2</sup>, 郭爱国<sup>2</sup>, 万智<sup>3</sup>, 张华<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 4430022; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

**摘要:** 了解压实红黏土的持水性能是预防路基土体开裂和失稳的基础。首先, 利用 15 bar 压力板仪研究了 4 种干密度压实试样脱湿路径下的土体持水特征曲线。发现持水曲线随着干密度减小, 曲线中间部分呈现水平台阶状, 且干密度越小水平台阶的长度越长。然后, 结合相同干密度试样的孔隙分布特征曲线, 从微观结构的视角分析了压实土体不同持水性能的原因。最后, 通过数据拟合的方法建立了不同压实度土体的持水特征曲线方程。

**关键词:** 红黏土; 持水性能; 孔隙分布; 压实

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Analysis of water holding capacity and mechanism of compacted laterite soil

TAN Yun-zhi<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>2</sup>, GUO Ai-guo<sup>2</sup>, WAN Zhi<sup>3</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410005, China)

**Abstract:** It is necessary to understand the water holding capacity of laterite soil, which is the basis of preventing cracking and instability of the soil subgrade. Firstly, soil water characteristic curves (SWCCs) of compacted samples with four different dry densities were investigated by using 15 bar pressure plate apparatus. Test results show that there has appeared a plateau stage in the soil water characteristic curve with the decreasing of dry density. What's more, the length of the plateau stage is intimately related to the dry density of samples, the lower the dry density is, the longer the length of the plateau stage is. Then, combined with pore distribution curves of the four samples, reasons for their different water holding capacities are investigated from the viewpoint of microstructure. Finally, SWCC equations for soil of different compactnesses are established through data fitting.

**Key words:** laterite soil; water-holding capacity; pore size distribution; compaction

## 1 引言

受气候的四季交替作用, 处于路基表层的土体常年处于干湿循环运行状态。红黏土属于典型的特殊土, 其力学性能强烈地受含水率的变化影响。在干旱季节由于大气的剧烈蒸发效应, 土体易失水开裂; 遇强降雨或梅雨季节, 又会出现泥化而导致土体抗剪强度降低。所以, 深入研究压实土体的持水性能对预防路基边坡土体的开裂和失稳具有重要的指导意义。土-水特征曲线是了解非饱和土持水性能的重要途径<sup>[1]</sup>, 该曲线描述了非饱和土中基质吸力( $\psi$ )与重力含水率( $w$ )、体积含水率( $\theta$ )、饱和

度( $S_r$ )或有效饱和度( $\theta$ )之间的关系。结合饱和土的相关参数可预测非饱和土的渗透系数<sup>[2-4]</sup>、水分扩散系数及剪切强度等<sup>[5]</sup>。

本文利用压力板仪和孔隙分析仪分别研究不同压实度试样的持水特征和孔隙分布模式, 试图从微观结构角度揭示其持水机制。

## 2 试验概况

### 2.1 试样及试验仪器

试验土样取自某高速公路桩号土样, 为红褐色黏土, 土的基本物理特性见表 1。

根据文献[6]中击实试验确定的最大干密度为

收稿日期: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51009084); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No.kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No.SKZLZ0803); 三峡大学人才科研启动基金(No.0620090035); 湖南省交通科技项目(No.200544)。

第一作者简介: 谈云志, 男, 1979年生, 博士, 主要从事非饱和土力学方面的教学与科研工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

1.58 g/cm<sup>3</sup>，利用千斤顶压制了4种不同压实度的环刀试样，干密度分别为1.58、1.51、1.44、1.37 g/cm<sup>3</sup>，其压实含水率为27.2 %。抽真空浸水饱和后放入由美国Soilmoisture公司生产的15 bar压力板内进行土-水特征曲线试验，见图1。

表 1 试验用红黏土的物理性质指标  
Table 1 Physical property indexes of laterite soil

天然含水率 /%	天然湿密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	土粒相对密度	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	自由膨胀 /%
30.9	1.80	2.65	61.0	35.0	26	28.5



图 1 压力板仪  
Fig.1 Pressure plate apparatus

### 2.2 试验步骤

①将 15 bar 高进气值陶土板放入抽真空容器进行抽真空饱和，抽真空时间 3 h 左右；②饱和好的陶土板擦干表面水分后放入压力容器中，并保持板面处于水平状态，联结好排水管路；③将已备好的饱和环刀试样放在陶土板上，并使试样与陶土板尽可能紧密接触；④密封压力容器，施加指定吸力所对应的气压。为避免用反复称重来判断某一基质吸力下水分是否达到排水稳定，对黏土在低吸力范围内 (0~200 kPa) 取 7 d 为稳定时间，大于该范围取 10 d，然后施加下一级吸力。

### 3 试验结果及分析

由于红黏土具有脱水收缩现象，体积必然会发生一定的改变。为此，应对试验曲线进行校正。校正方法<sup>[7]</sup>是采用收缩试验成果来校正脱湿土样的实际体积含水率  $\theta_{wi}$ ，见式 (1)、(2)

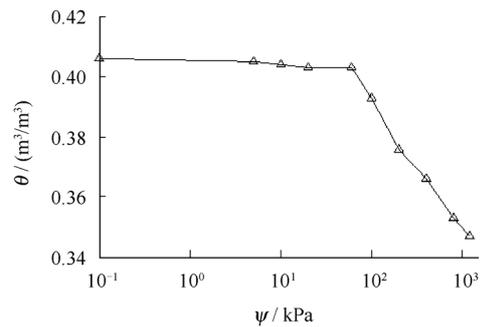
$$\theta_{wi} = w_i \frac{m_{dry}}{V_0 \rho_w} \frac{1}{1 - (\lambda_v + 2\lambda_h)(w_0 - w_i)}, w_s < w_i \leq w_0 \quad (1)$$

$$\theta_{wi} = w_i \frac{m_{dry}}{V_0 \rho_w} \frac{1}{1 - (\lambda_v + 2\lambda_h)(w_0 - w_s)}, w_i \leq w_s \quad (2)$$

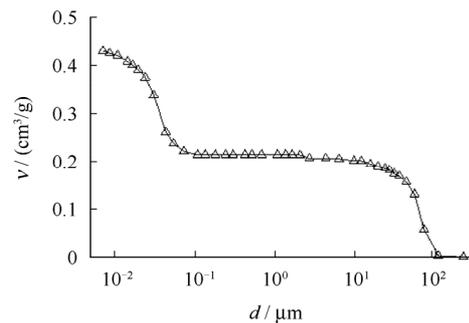
式中： $m_{dry}$  为试样干重(g)； $w_0$  为收缩试验初始饱和含水率(%)； $w_i$  为所校正体积含水率所对应的重力

含水率(%)； $w_s$  为缩限(%)；假设土体三向均匀收缩，即收缩系数  $\lambda_v = \lambda_h$ ； $V_0$  为初始体积； $\rho_w$  为水的密度。

采用式 (1) 对 4 种初始干密度试样的土-水特征曲线进行修正，其修正后的结果见图 2(a)、3(a)、4(a)、5(a)，图中吸力坐标采用对数刻度；为便于研究不同压实土体的持水特征，利用其对应的孔隙累积分布曲线进行对比分析<sup>[8]</sup>，如图 2(b)、3(b)、4(b)、5(b)所示，图中  $d$  代表平均孔隙直径， $v$  代表单位质量土体的孔隙体积。



(a) 土-水特征曲线



(b) 孔隙累积分布曲线

图 2 土-水特征与孔隙分布曲线( $\rho_d = 1.58 \text{ g/cm}^3$ )  
Fig.2 Soil-water characteristic curve and pore size distribution curve ( $\rho_d = 1.58 \text{ g/cm}^3$ )

开始施加气压力对环刀试样进行脱水前，试样经过抽真空浸水饱和，因此，初始含水率为饱和含水率。试样的干密度越大其孔隙体积就越小，所以饱和含水率也越小。干密度为 1.58、1.51、1.44、1.37 g/cm<sup>3</sup> 的试样初始体积含水率  $\theta$  分别为 0.51、0.54、0.62、0.70 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。压力板仪的陶土板最大进气值只有 15 bar，而红黏土残余含水率对应的吸力较高，本次试验土样未能通过压力板直接测出土样的残余含水率。

从图 2(a)、3(a)、4(a)、5(a)可以看出，该压实红黏土的土-水特征曲线与其他黏土的土-水特征曲线有很大不同，特别是干密度较小的情况更加突出，如干密度  $\rho_d$  为 1.37、1.51 g/cm<sup>3</sup> 的情况。在吸力增大的过程中出现了类似于进气值前和残余含水率后

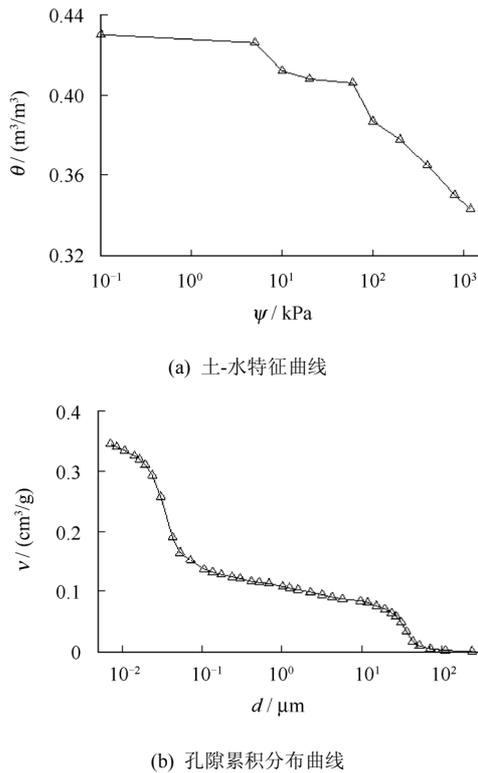


图3 土-水特征与孔隙分布曲线 ( $\rho_d = 1.51 \text{ g/cm}^3$ )  
 Fig.3 Soil-water characteristic curve and pore size distribution curve ( $\rho_d = 1.51 \text{ g/cm}^3$ )

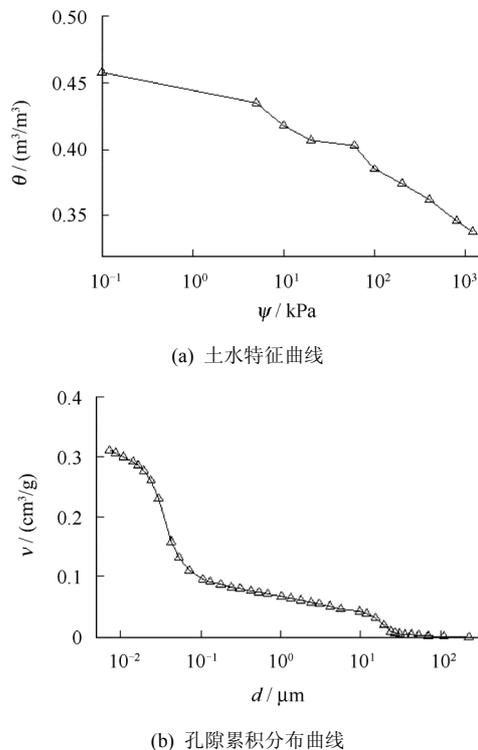


图4 土-水特征与孔隙分布曲线 ( $\rho_d = 1.44 \text{ g/cm}^3$ )  
 Fig.4 Soil-water characteristic curve and pore size distribution curve ( $\rho_d = 1.44 \text{ g/cm}^3$ )

的水平阶段，大致处于吸力 10~ 100 kPa 的范围之间。水平阶段的情况与试样的干密度有很大关系，干密度越小水平阶段持续越长；该水平阶段对应的

体积含水率分别为 0.50、0.48、0.45、0.45  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ，与其各自的饱和含水率相比，干密度越小水分的脱湿幅度越大。

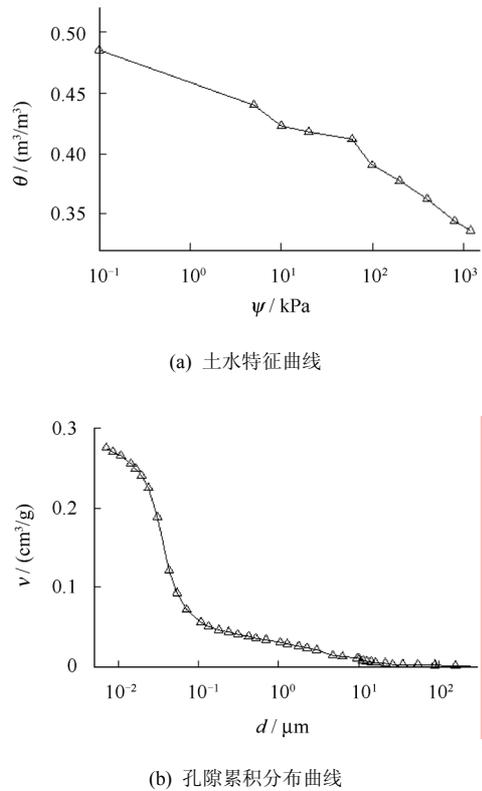


图5 土水特征与孔隙分布曲线( $\rho_d = 1.37 \text{ g/cm}^3$ )  
 Fig.5 Soil-water characteristic curve and pore size distribution curve ( $\rho_d = 1.37 \text{ g/cm}^3$ )

Briggs<sup>[9]</sup>根据水的形态将水分为重力水、毛细水与吸附水 3 类，压实土体的水分在脱湿过程中形态的变化与土体的孔隙及水分的初始赋存状态相关。一般说来，受土体孔隙大小的限制（除宏观的裂隙和孔洞），土体水分主要以毛细水和吸附水的形态存在。Vanapalli 等<sup>[10]</sup>将土体的减饱和过程分为 3 个阶段：①边界效应段；②过渡段；③非饱和残余段。边界效应段范围内孔隙水分呈连通状态；过渡段内处于水连通变化到气连通状态；非饱和残余阶段水分呈吸附状态。压实土体处于非饱和过渡阶段时其水分主要以毛细水形态存在，根据毛细上升理论推导的基质吸力与弯液面半径模型，表明二者成反比例函数关系，而弯液面半径与孔隙半径密切相关。压实红黏土的孔隙形式主要存在两大类：①集聚体内孔隙；②集聚体之间孔隙。两类孔隙的孔径大小差别很大<sup>[6]</sup>。由于后者的孔径较大，施加很小的气压力，土体很快就能达到水气平衡状态；当施加的气压力大于前者最小孔径对应的吸力，而又小于后者最大孔径对应的吸力时，基本处于不排水状态，

在土-水特征曲线上就出现了水平阶段；当气压力进一步逐级增大，将会使集聚体内孔隙的水分相应地减少直至达到残余状态。吸力在 0~20 kPa 范围内的土-水特征曲线代表了集聚体之间孔隙的持水特征；吸力大于 20 kPa 范围的土-水特征曲线则反映了集聚体内孔隙的持水性能。

对比分析同一干密度试样的两种曲线可知，土-水特征曲线出现水平阶段与土体的孔隙赋存特征具有对应关系。图 2(a)、3(a)、4(a)、5(a)中吸力在 0~20 kPa 范围内的土-水特征曲线与吸力大于 20 kPa 范围内的曲线相似，但由于受压力板仪进气压力控制精度的限制，吸力在 0~20 kPa 范围内数据不够多，故图 2(a)中该范围内的曲线相似性较差。与之对应，图 2(b)、3(b)、4(b)、5(b)中孔径  $d > 10 \mu\text{m}$  的孔隙体积分布与孔径  $d < 10 \mu\text{m}$  范围内的孔隙体积分布特征相似。基于土体孔隙尺寸分布决定土体持水性能的观点，可以认为，该压实试样孔径  $d > 10 \mu\text{m}$  范围内的孔隙主要控制 0~10 kPa 范围的持水能力；而孔径  $d < 10 \mu\text{m}$  范围内的孔隙则主要控制吸力大于 10 kPa 范围的持水能力。

### 4 拟合方程与参数的确定

Ahuja 等<sup>[11]</sup>在 Gardner<sup>[12]</sup>提出的经验模型基础上提出了式 (3)，Haverkamp 等<sup>[13]</sup>利用该式成功地拟合了土-水特征曲线试验数据。

$$\theta(\psi) = \theta_s / [1 + (\alpha\psi)^p] \quad (3)$$

式中： $\theta_s$  为饱和体积含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )； $\alpha$ 、 $p$  为通过对试验数据进行拟合得到的参数。

Van Genuchten<sup>[4]</sup>对式 (3) 进行了简单的修改，提出了如下修正公式：

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^p} \right]^m + \theta_r \quad (4)$$

式中： $\theta_r$  为残余体积含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )； $m$  为通过对试验数据进行拟合得到的参数。

为使模型更实用，令  $m = 1$ ，式 (4) 简化为

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n] + \theta_r \quad (5)$$

利用 Origin 软件拟合上述数学模型，结果见表 2。各拟合参数与干密度的关系如图 6 所示。

根据压实度 (96%、94%、93%、87%) 对应的干密度进行插值，确定不同压实度下的参数，然后代入式 (3) 得

表 2 土-水特征曲线参数  
Table 2 Parameters of soil water characteristic curves

干密度 / ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\theta_s / (\text{m}^3/\text{m}^3)$	$\theta_r / (\text{m}^3/\text{m}^3)$	$\alpha / 10^{-3}$	$p$
1.58	0.406	0.328	4.03	1.527
1.51	0.432	0.323	5.23	0.842
1.44	0.458	0.316	10.99	0.657
1.37	0.485	0.301	14.67	0.590

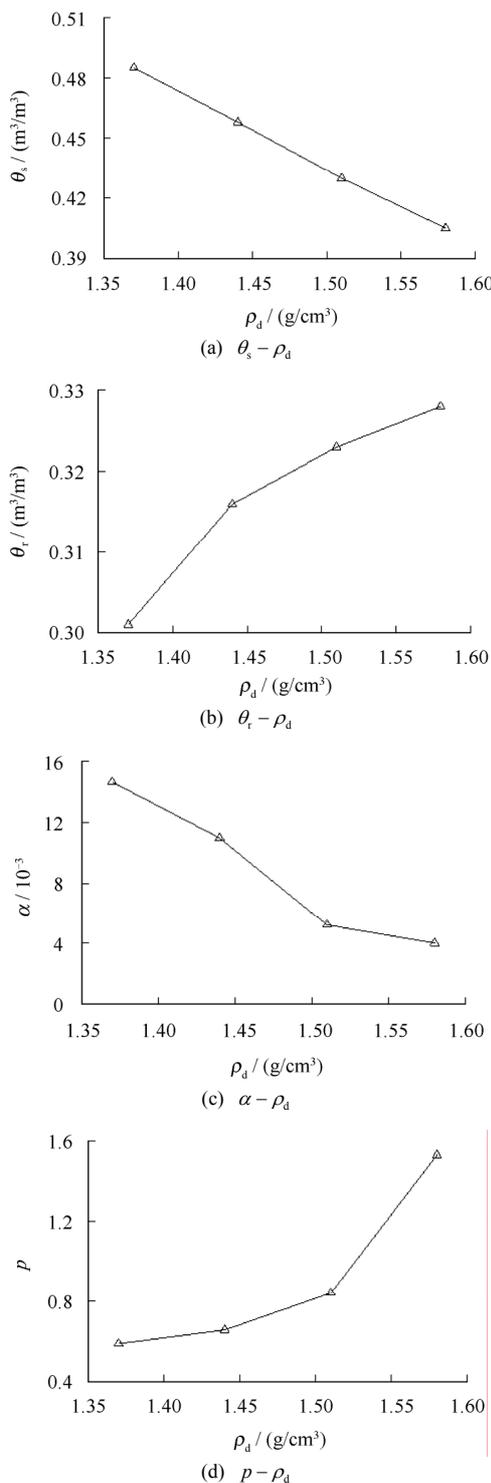


图 6 拟合参数与干密度的关系  
Fig.6 Relationships between fitting parameters and dry density

$$\theta(\psi) = \frac{0.106}{1 + (0.00572\psi)^{0.895}} + 0.325 \quad (6)$$

$$\theta(\psi) = \frac{0.121}{1 + (0.00705\psi)^{0.752}} + 0.321 \quad (7)$$

$$\theta(\psi) = \frac{0.131}{1 + (0.00823\psi)^{0.694}} + 0.319 \quad (8)$$

$$\theta(\psi) = \frac{0.184}{1 + (0.01467\psi)^{0.590}} + 0.301 \quad (9)$$

## 5 结 论

(1) 压实红黏土的土-水特征曲线与其他黏土的土-水特征曲线有很大不同,特别是干密度较小的情况更加突出,如干密度 $\rho_d$ 为1.37、1.51 g/cm<sup>3</sup>的情况。在吸力增大的过程中出现了类似于进气值前和残余含水率后的水平阶段,大致处于吸力10~100 kPa的范围之间。水平阶段的情况与试样的干密度有很大的关系,干密度越小,水平阶段越长;该水平阶段对应的体积含水率分别为0.42、0.41、0.41、0.40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,与其各自的饱和含水率相比,干密度越小水分的脱湿幅度越大。

(2) 压实红黏土的集聚体内孔隙和集聚体之间孔隙的孔径大小差别很大,由于后者的孔径较大,施加很小的气压力,土体很快就能达到水气平衡状态;当施加的气压力大于前者最小孔径对应的吸力,而又小于后者最大孔径对应的吸力时,基本处于不排水状态,在土-水特征曲线上就出现了水平阶段;当气压力进一步增大,将会使集聚体内孔隙的水分相应地减少直至达到残余状态。吸力在0~20 kPa范围内的土-水特征曲线代表了集聚体之间孔隙的持水特征;吸力大于20 kPa范围的土-水特征曲线则反映了集聚体内孔隙的持水性能。

(3) 土-水特征曲线出现水平阶段与土体的孔隙赋存特征具有对应关系。吸力0~20 kPa范围的土-水特征曲线与吸力大于20 kPa范围内的曲线相似;与之对应,孔径 $d > 10 \mu\text{m}$ 的孔隙体积累积分布与孔径 $d < 10 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙体积累积分布特征相似。基于土体孔隙尺寸分布决定土体持水性能的观点,可以认为,该压实试样孔径 $d > 10 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙主要控制0~10 kPa范围的持水能力;而孔径 $d < 10 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙则主要控制吸力大于10 kPa范围的持水能力。

## 参 考 文 献

[1] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1-5.

WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun, et al. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 1-5.

[2] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1964.

[3] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, (31): 533-546.

[4] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44: 892-898.

[5] VANAPALLI S K, FREDKUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(2): 143-160.

[6] 谈云志. 压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.

[7] 张华, 陈守义, 姚海林. 用收缩试验资料间接估算压力板试验中的体积含水率[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 20-26.

ZHANG Hua, CHEN Shou-yi, YAO Hai-lin. Estimation of volumetric water content in the pressure plate test by use of shrinkage test data[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 20-26.

[8] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1427-1430.

TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1427-1430.

[9] BRIGGS L J, SHANTZ H J. Relative water requirements of plants[J]. **Journal Agriculture Research**, 1914, 3: 1-63.

[10] VANAPALLI S K. Simple test procedures and their interpretation in evaluating the shear strength of unsaturated soils[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1994.

[11] AHUJA L R, SWARTZENDRUBER D. An improved form of soil-water diffusivity function[J]. **Soil Science Society of America Proceedings**, 1972, (36): 9-14.

[12] GARDNER W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. **Soil Science Society of America Proceedings**, 1956, 21: 317-320.

[13] HAVERKAMP R, VAUCLIN M, TOUMA J, et al. A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration[J]. **Soil Science Society America Journal**, 1977, 41: 285-294.