

文章编号: 1000-7598 (2010) 07-2289-06

# 压实红黏土水分传输的毛细效应与数值模拟

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

(1.三峡大学 土木与建筑学院 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

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:** 当路基处于地下水水源丰富且水位较高的区域时, 容易受到地下水的毛细上升侵蚀作用。为治理因水分毛细上升而引起的路基病害, 需了解其毛细上升规律。在水平吸渗试验原理的基础上略加改进, 自制了一套毛细上升试验装置, 进行了三种不同初始干密度试样的试验。结果表明, 毛细上升高度与含水率的关系类似于土-水特征曲线; 试样的干密度越大, 在相同的时间内毛细上升高度越小; 水分因毛细效应的扩散能力随初始含水率的变化存在一个最优含水率点。最后, 利用有限元方法模拟了水分在不同时刻沿着试样高度的分布规律, 并对比分析了试验终了时刻的计算值与实测值, 二者之间的分布规律比较一致。

**关键词:** 红黏土; 路基; 压实; 水分传输; 毛细效应

中图分类号: O 241

文献标识码: A

## Capillary effect of moisture transfer and its numerical simulation of compacted laterite soil

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

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of 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 410015, China)

**Abstract:** When subgrade lies in areas which have abundant groundwater and high water level, it was vulnerable to erosion. For treatment subgrade diseases caused by water capillary rise, it is needed to acquire the law of capillary rise in the soil. Based on improving the horizontal absorption test, a set of capillary rise test apparatus has been made to conduct three groups of initial dry density specimen experiment. The results show that the relationship between capillary rise height and water content similar to the soil water characteristic curve; with the dry density of specimen increasing, the capillary rise height became smaller within the same time interval; there was an optimum moisture content during the diffuse capacity changed with the initial water content. Finally, The distribution regularity of moisture distribution along with the height of samples is simulated with FEM. comparing the calculated results with the measured field data, it is proved that the calculated results can be fitted well with the measured field data.

**Key words:** laterite; subgrade; compaction; special soil; moisture migration; capillary effect

## 1 前 言

修筑在地表的路基受地下水的作用是一个长期反复的过程。特别是在地势低洼或地下水比较丰富的地段, 对于具有水敏性的红黏土, 地下水位的涨落对其影响更加剧烈, 而红黏土大多分布在炎热多雨地区。因此, 地下水对红黏土路基的作用问题需要得到关注<sup>[1-4]</sup>。地下水对路基的影响, 其本质是

非平衡基质势与毛细效应引起水分迁移后土体强度发生了弱化。了解红黏土路基中地下水分毛细上升的规律是有效分析和治理路基病害的根据。等温水分扩散系数可以评价地下水在路基中的毛细上升性状。直接利用该系数的物理定义求解存在很多难以测量的物理量, 通过试验方法确定成为一种有效手段。对此前人做了大量的研究工作, Bruce 等<sup>[5]</sup>利用水平吸渗试验测试了该系数; Cassel 等<sup>[6]</sup>利用  $\gamma$  射

收稿日期: 2009-11-03

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200631878530); 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. SKLZ0803)。

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研究工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

线连续 3 个月测试了水平封闭土柱含水率随时间的变化规律，计算了其等温水分扩散系数；国内，原武汉水利电力大学、清华大学水利系、中国科学院武汉岩土力学研究所<sup>[7]</sup>等单位利用同样的方法进行了这方面的测试工作，很显然土样水平放置时没有考虑重力对水分迁移的影响。但地下水向路基迁移是一个竖直上升的过程，重力的影响能否忽略还有待商榷。

为此，在水平吸渗试验与饱和渗透试验方法基础上略加改进，制作了一套原理简明、操作简单的毛细上升试验装置。在此基础上历时 4 个月，进行了 3 种不同干密度试样的毛细上升试验。由于缺乏测量瞬态含水率的仪器，论文采用 Bruce 推荐的计算方法和试验结束时的含水率分布规律推求等温水分扩散系数，并通过数值模拟的手段再现了水分随时间变化的瞬态分布规律。

## 2 试验仪器与试验方法

### 2.1 试验仪器改装

通过毛细上升试验可以获得求解非饱和土的等温水分扩散系数数据，根据试验需要设置了一套原理简单、操作方便的试验装置。装置的基本组成部分，如图 1 所示。

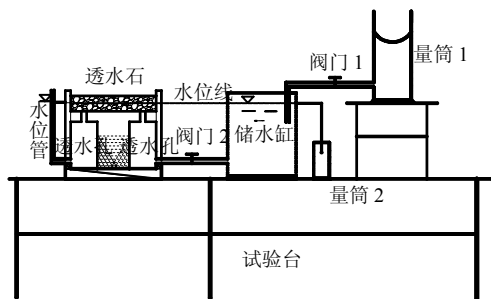


图 1 毛细上升试验装置  
Fig.1 Capillary rise test apparatus

该试验装置从常水头渗透试验演化而来，通过加工一些零部件组装而成，只是储水容器需要有刻度，主要包括两大部分：①水源部分；②承土部分。量筒 1（500 ml）是保证出水缸始终保持恒定的水头，而量筒 2（500 ml）是测量未被土壤吸收的水量，二者的差值则视为在某一个时间段内水分的毛细上升量，开始计数前需要用水充满所有管路。量筒 1 与储水缸之间用注射滴管进行连接，通过滴管的开关动态地调整供水速度。左侧的承土部分（内径 5 cm）下方有过水通道与透水石充分接触，水分可以不间断地供给。透水石主要有两个作用：①通

过透水石可以让水分很均匀地传输给试样；②试样底部长时间受水分的浸泡很容易变得很松散，透水石可以防止土颗粒堵塞过水通道。

### 2.2 试验方案

毛细上升试验历时较长，试验仪器周转比较慢。本文暂未开展考虑不同初始含水率对不同压实度土体的毛细上升影响试验。因为路基土料一般都在最优含水率点附近填筑，故选择最优含水率点作为试验试样的初始含水率，击实试验确定的最优含水率为 24.1%。选取某高速公路 K27 桩号的重塑红黏土从天然含水率风干至最优含水率，利用手提击样器制作了 3 种干密度（1.58、1.48、1.38 g/cm<sup>3</sup>）试样，土样的基本物性指标见文献[4]。为了体现不同压实度对毛细上升作用的影响，试样的干密度没有按照路基要求的 96、94、93 区对应的干密度制作，而是拉开了一定的幅度。在实际应用中可以根据插值法获取相应压实度对应的参数。

### 2.3 土样制样方法

供毛细上升试验用的试样土柱直径为 5 cm、长为 100 cm，按照控制干密度的方法击实制样。在击实过程中通过测量击实后的土样高度来确定是否达到预定的压实度，为保证试样的均匀性，每层压实后厚度预设 2 cm。成型试样的模具为高强度透明亚克力有机玻璃管，管内直径 5 cm、壁厚 0.5 cm、长为 100 cm。因试样较高，在击实成型过程中需要分两部分进行，先用一根带顶帽、长 50 cm 的不锈钢撑杆套在玻璃管内，使得击实平面从玻璃管中部开始，然后利用等内径面积的击样器按照预定的厚度击实成型，每层击完后要拉毛后进行下一层的击实，当击好这一半后倒立玻璃管，把不锈钢撑子拿出，逐层击实另一半。成型后的试样，如图 2 所示。

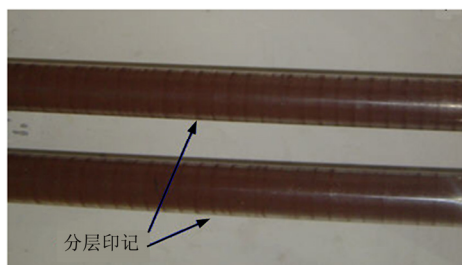


图 2 成型后的试样  
Fig.2 Moulded samples

不锈钢撑子顶部的顶帽与有机玻璃管的接触是一个非常关键的部位，不能太松，否则土颗粒容易从夹缝中漏掉，也不能太紧，不然因玻璃管内径的不均匀性而卡住，但在顶帽的四周加了一个“O”

型环氧树脂橡皮圈可以同时解决上面两个问题，如图 3 所示。试验结束后需要了解玻璃管内不同部位的含水率，配套制作了一根长为 100 cm、直径为 2 cm 的薄壁不锈钢管用作取样器，然后利用烘干称重法测量含水率。

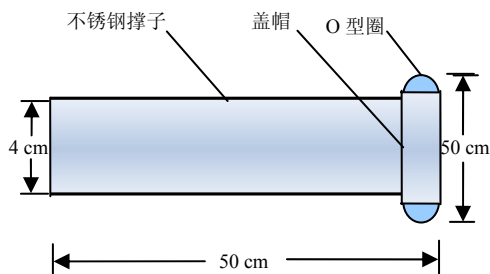


图 3 不锈钢撑杆  
Fig.3 Stainless steel pole

### 2.4 试验步骤

(1) 试验开始前，充分饱和好透水石，并且使得储水缸内水面和透水石的中部位置处于同一水平面上，可以通过观察透水石旁边的水位管来判断。关闭阀门 1 后记下量筒 1 和量筒 2 的刻度。

(2) 把按照上节介绍的方法制备好土柱放置在试验装置的透水石上，同时记下试验开始时间。为了防止水分从接触处(试样玻璃管与承土台连接处)挥发或不慎溢出，需利用硅胶进行密封处理。同时，为防止气体进入试样和承土台之间而阻止水分自由上升，在硅胶密封时埋入注射器的针头使得内外连通，供排气所用，接出来的管子用阀门进行控制开关。

(3) 试验开始开始后，徐徐打开阀门 1，出水量的多少需要根据试样吸附量适时调整。如果量筒 2 水上升较快说明量筒 1 出水量比实际需求量大，应调小阀门 1。

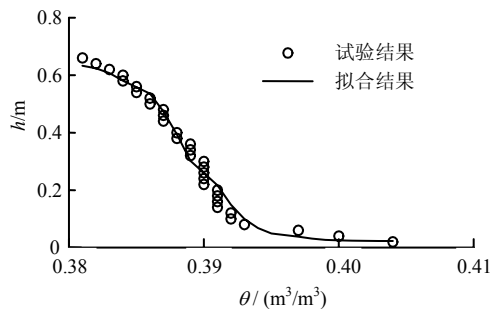
(4) 当量筒 1 水量减少量与量筒 2 水量增加量接近时，可以判断初始含水率较高的试样吸水量是否达到稳定状态，另外对于初始含水率较低的试样可以通过浸润峰面的上升位置加以判断。

## 3 试验结果与分析

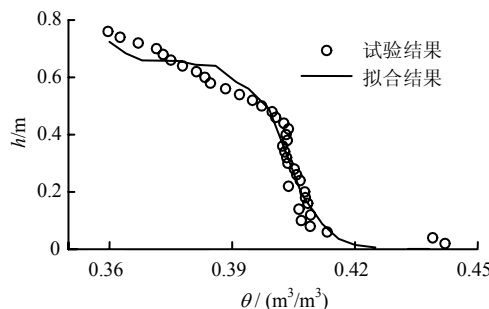
### 3.1 水分分布特征

试验总共进行了 4 个月，按照上述试验方案得到 3 种不同干密度试样水分沿高度的分布规律(见图 4)。毛细上升高度与含水率的关系类似与土-水特征曲线呈反“S”形，干密度越大的试样，在相同的时间内毛细上升高度比较小(见图 4)。Jackson<sup>[8]</sup>

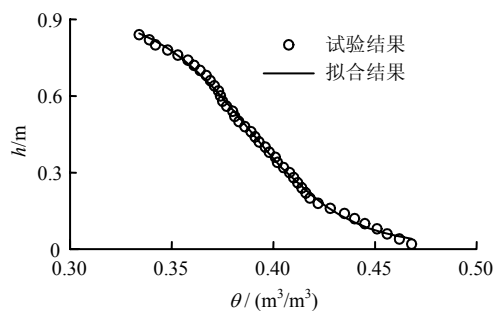
指出，扩散系数随着孔隙比的减小而减小。这是因为干密度越大，其孔隙越小，虽然毛管力比较大，但是缺乏畅通的过水通道，使得水分上升的速度比较慢。所以，路基填筑时对土体进行压实有效地改变了水分上升的通道，从而抑制毛细上升的高度。



(a)  $\rho_d=1.58 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d=1.48 \text{ g/cm}^3$



(c)  $\rho_d=1.38 \text{ g/cm}^3$

图 4 含水率沿高度的分布  
Fig.4 Water content distribution vs. height

### 3.2 等温水分扩散系数确定

等温水分扩散系数为

$$D(\theta') = -\frac{1}{2t_0} \left( \frac{dz}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta'} + K(\theta') \right) \int_{\theta'}^{\theta''} z(\theta, t_0) d\theta \quad (1)$$

详细的推导过程见参考文献[4]第四章 4.2 节，按照式 (1) 计算扩散系数  $D(\theta)$  的方法，对图 4 中

含水率沿高度的分布曲线先拟合, 然后对拟合后的数据分别进行微分和积分。通过计算得到了水分扩散系数与含水率的关系, 如图5所示。

可以看出, 扩散系数随含水率的变化呈单峰形状, 故拟采用高斯公式(2)对其试验数据进行拟合:

$$D(\theta) = D_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(\theta-\kappa)^2}{w^2}} \quad (2)$$

式中:  $D_0$ 、 $A$ 、 $w$ 、 $\kappa$  均为拟合参数。

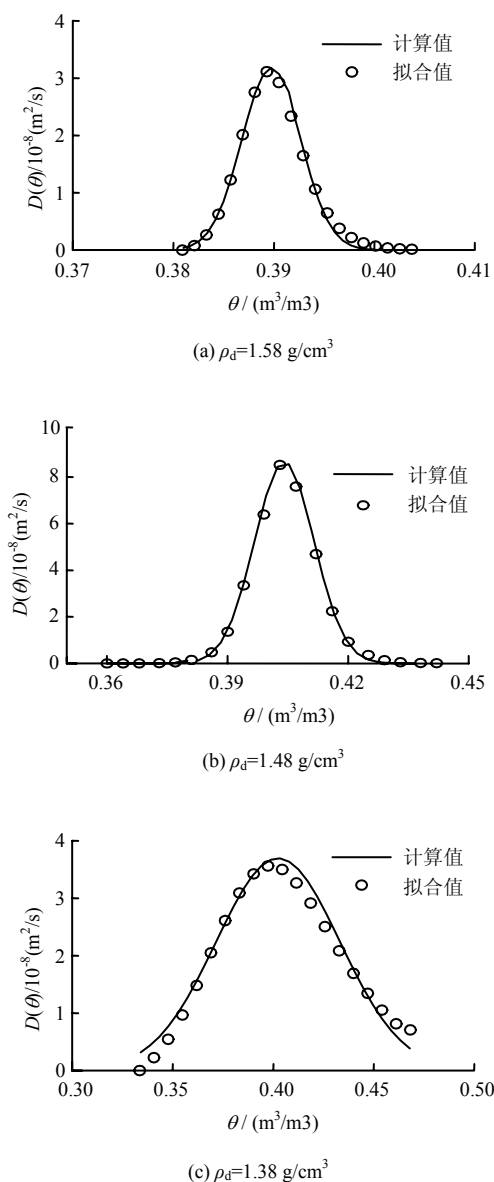


图5 扩散系数与体积含水率的关系

Fig.5 Diffusion coefficient vs. volume water content

扩散系数公式参数的拟合结果, 如表1。

从图5可知, 水分因毛细效应扩散的能力随含水率的变化存在一个最优的含水率点, 孔隙中的水分太多或太少都不利于水分的扩散, 这与不同干密

度土体的孔隙分布模式及其水分存在状态紧密相关。

表1 拟合参数

Table 1 Fitting parameters

干密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	扩散系数公式参数				相关系数
	$D_0$	$\kappa$	$w$	$A$	
1.58	0	0.389 7	0.005 9	$1.2 \times 10^{-10}$	0.992
1.48	0	0.404 1	0.014 8	$8.0 \times 10^{-10}$	0.999
1.38	0	0.402 4	0.061 7	$1.4 \times 10^{-9}$	0.977

#### 4 压实红黏土水分毛细上升数值模拟

为了解土体因毛细作用后其水分的分布规律, 需要实时动态地监测试样中水分的变化性状, 传统的烘干称重法测含水率显然在该试验中不具有可操作性。随着测试技术的革新, 先后出现了 $\gamma$ 射线和时域反射仪(TDR)等无损或接触式测量方法, 李锐<sup>[9]</sup>利用TDR研究了路基膨胀土及其石灰处置土在毛细作用下的水分变化情况, 取得比较理想的试验结果, 但试验仪器比较昂贵。另外, 试样的初始含水率比较高(24.2%), 故不能通过观察浸润峰面的推进位置来判断水分往上迁移的高度。可见, 利用试验方法了解水分瞬态分布具有局限性, 数值方法成为了新的解决途径。可以通过对比分析试验结束时刻的含水率与计算值之间的吻合程度来验证模拟结果的可靠性。

数值模拟时采用的数学模型为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (3)$$

式中:  $D(\theta)$  为等温扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $K(\theta)$  为非饱和导水系数( $\text{cm}/\text{s}$ )。

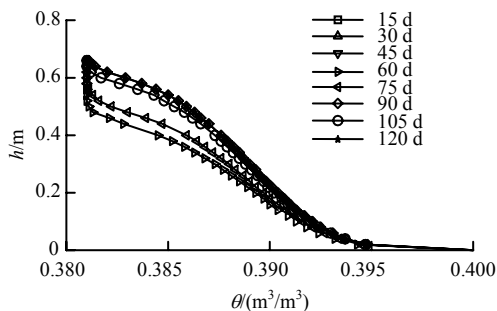
试样底部边界含水率取饱和和体积含水率 $\theta_s$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ); 试样圆柱其他边界绝湿; 非饱和导水系数由文献<sup>[4]</sup>第3章3.4节的结果插值后得到, 不同干密度对应的非饱和导水系数分别为

$$K(\theta) = 8.07 \times 10^{-7} \left( \frac{\theta}{0.406} \right)^{14}, (1.58 \text{ g/cm}^3) \quad (4)$$

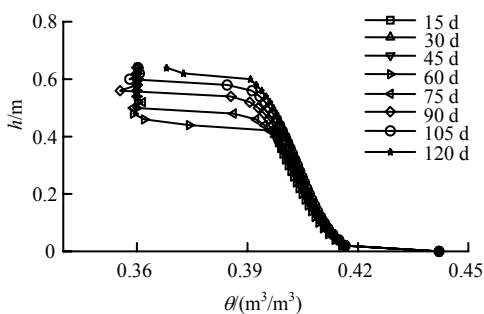
$$K(\theta) = 2.14 \times 10^{-6} \left( \frac{\theta}{0.44} \right)^{9.11}, (1.48 \text{ g/cm}^3) \quad (5)$$

$$K(\theta) = 2.66 \times 10^{-5} \left( \frac{\theta}{0.485} \right)^{5.1}, (1.38 \text{ g/cm}^3) \quad (6)$$

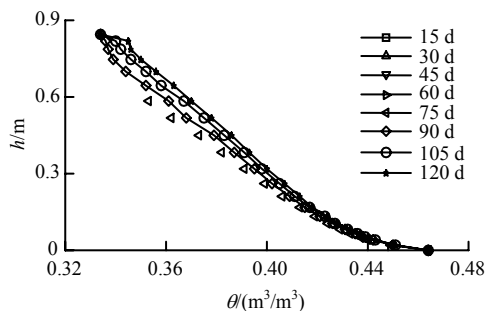
计算时间全部为试验实际时间120 d利用多场物理模型耦合有限元软件, 对不同时刻含水率沿着试样高度分布的规律进行了模拟。模拟的结果, 如图6所示。



(a)  $\rho_d=1.58 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d=1.48 \text{ g/cm}^3$

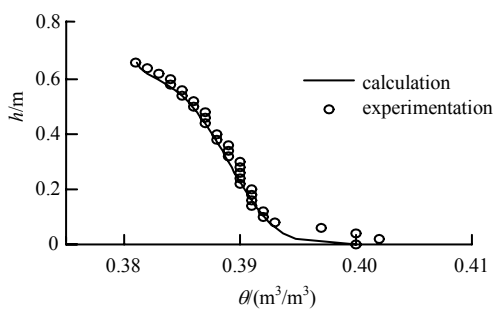


(c)  $\rho_d=1.38 \text{ g/cm}^3$

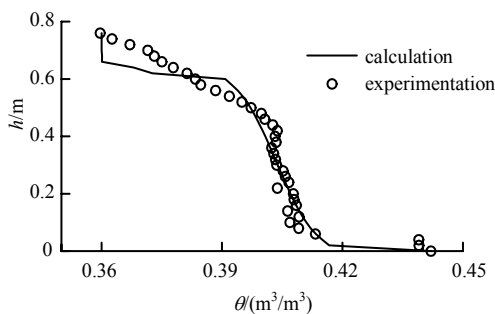
图 6 体积含水率沿高度的瞬态分布  
Fig.6 Volume water content transient distribution vs. height

数值模拟结果再现了水分因毛细效应而不断向上迁移的过程。3 种密度试样在试验阶段的前期上升比较快，30 d 内的上升速度最大，相同的时间内密度小的试样上升高度最大。经毛细水作用后，试样底部土体再经过长时间的水分迁移，其含水率变化不大，但对于上部含水率比较低的土体，因为水势的作用水分不断往上再次迁移，所以湿润峰面不断上移。

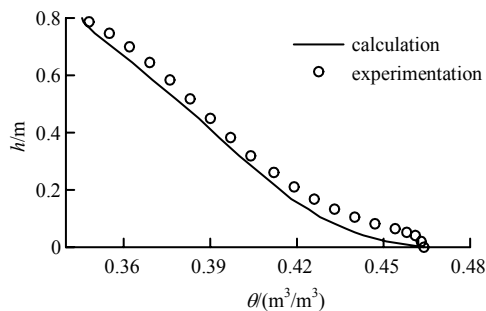
试验结束时，把试样取出采用烘干称重法确定不同高度处试样的含水率。数值模拟结果与实测数据的对比，如图 7 所示。



(a)  $\rho_d=1.58 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d=1.48 \text{ g/cm}^3$



(c)  $\rho_d=1.38 \text{ g/cm}^3$

图 7 含水率实测值与计算值对比  
Fig.7 Measured values of water content compared with calculated ones

实测数据与模拟结果在试样的边界位置有一定的出入，但试样的中间部位数据二者之间吻合得较好。所以，利用数值方法模拟水分毛细上升的瞬态过程是一种可靠的分析手段。

### 5 结 论

(1) 毛细上升高度与含水率的关系类似与土-水特征曲线呈反“S”形。干密度越大的试样，在相同的时间内毛细水上升高度越小。干密度越大，孔隙越小，虽然毛管力比较大，但缺乏畅通的过水通道，使得水分上升的速度比较慢。所以，路基填筑时对土体进行压实有效地改变水分上升的通道，

从而抑制毛细上升的高度。

(2) 水分因毛细效应扩散的能力随含水率的变化存在一个最优的含水率点, 孔隙中的水分太多或太少都不利于水分的扩散。

(3) 数值模拟结果表明, 试样在试验的前期毛细水上升比较快, 30 d 内的上升速度最大, 相同的时间内密度越小的试样水分上升得越高。经毛细水作用后, 试样底部土体再经过长时间的水分迁移, 其含水率变化不大, 但对于上部含水率比较低的土体, 因为水势的作用水分不断往上再次迁移, 所以湿润峰面不断上升。

### 参考文献

- [1] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568—572.  
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 568—572.
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369—373.  
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 369—373.
- [3] 谈云志. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(5): 725—729.  
TAN Yun-zhi. Study on the triaxial tests of unsaturated lateritic soil[J]. **Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)**, 2009, 32(5): 725—729.
- [4] 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.
- [5] BRUCE R R, KLUTE A. The measurement of soil moisture diffusivity[J]. **Soil Science Society of American Proceedings**, 1956, 20: 458—462.
- [6] CASSEL D K, WARRICK A W, NIELSEN D R. Soil-water diffusivity values based upon time dependent soil-water content distributions[J]. **Soil Science Society of American Journal**, 1968, 32: 774—777.
- [7] 任奋芝. 温度梯度作用下非饱和土壤水分运动试验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1991.
- [8] JACKSON R D. Porosity and soil-water diffusivity relations[J]. **Soil Science Society of American Proceedings**, 1965, 27: 123—126.
- [9] 李锐. 毛细水对膨胀土路基的影响研究及其处置对策[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [10] XU Lian-min, WANG Xing-ran. Numerical simulation of shear band in clayey soils using finite deformation theory[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 125—129.
- [11] 徐连民, 朱合华, 中井照夫, 等. 超固结黏土的剪切带数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 61—66.  
XU Lian-min, ZHU He-hua, NAKAI Teruo, et al. Numerical simulation of shear band in overconsolidated clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 61—66.
- [12] 姚仰平, 侯伟, 周安楠. 基于 Hvorslev 面的超固结土本构模型[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(11): 1417—1429.  
YAO Yang-ping, HOU Wei, ZHOU An-nan. Constitutive model for overconsolidated clays[J]. **Science in China (Series E)**, 2007, 37(11): 1417—1429.
- [13] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: Three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. **Geotechnique**, 2009, 59(5): 451—469.
- [14] MATSUOKA H, YAO Y P, SUN D A. The Cam-clay model revised by the SMP criterion[J]. **Soils and Foundations**, 1999, 39(1): 81—95.
- [15] 孙德安, 甄文战, 黄文雄. 三维弹塑性模型在路堤软基固结分析中应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 669—674.  
SUN De-an, ZHEN Wen-zhan, HUANG Wen-xiong. Application of 3D elastoplastic model to analysis of consolidation behavior of embankment on soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 669—674.

上接第 2258 页