

DOI: 10.11779/CJGE2018S1030

# 延安某工地填土的渗水和持水特性研究

张 龙<sup>1</sup>, 陈正汉<sup>2</sup>, 倪胜霞<sup>3</sup>, 刘争宏<sup>1</sup>, 于永堂<sup>1</sup>, 郑建国<sup>1</sup>

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 401331;  
3. 延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

**摘要:** 随着中国城市化进程的不断推进, 工程中涉及到的填土日益增多。为了研究非饱和填土的渗水和持水特性, 共做了两类试验: 一类是考虑不同干密度的非饱和水平土柱入渗试验; 另一类为控制净平均应力为0的非饱和土三轴收缩试验。两种试验分别包含3种干密度, 分别为1.40, 1.50, 1.60 g/cm<sup>3</sup>。试验结果表明: 饱和度达到0.65左右时, 扩散率近似由两条直线组成; 当饱和度低于0.65时, 干密度的不同对扩散率影响不大, 当饱和度高于0.65时, 扩散率存在较大差异; 非饱和填土的渗透系数与饱和度的半对数关系近似成直线, 且随着饱和度的增大干密度的影响逐渐减小。

**关键词:** 填土; 水平土柱入渗试验; 三轴试验; 扩散率; 渗透系数

中图分类号: TU411.3; TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0183-06

作者简介: 张 龙(1988-), 男, 河北藁城人, 硕士研究生, 主要从事非饱和土与特殊土力学研究。E-mail: 709194126@qq.com。

## Seepage and water retention characteristics of fill in a construction site in Yan'an

ZHANG Long<sup>1</sup>, CHEN Zheng-han<sup>2</sup>, HU Sheng-xia<sup>3</sup>, LIU Zheng-hong<sup>1</sup>, YU Yong-tong<sup>1</sup>, ZHENG Jian-guo<sup>1</sup>

(1. China Jikan Research Institute of Engineering and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China; 3. School of Architecture and Engineering of Yan'an University, Yan'an 716000, China)

**Abstract:** With the urbanization in China, there are more and more projects involved with miscellaneous fill. In order to study the seepage and water retention characteristics of unsaturated soils, two kinds of tests are made. One is the horizontal soil column infiltration test with different dry densities, and the other is the triaxial shrinkage test with controlled net mean stress at 0. Both of them include 3 dry densities, 1.40, 1.50 and 1.60 g/cm<sup>3</sup>. The test results show that when the saturation is about 0.65, the semi-logarithmic relationship between the saturation and the diffusivity is approximated to be two straight lines. Besides, when the saturation is less than 0.65, the difference of dry density has little effect on the diffusivity. When the saturation is higher than 0.65, there is a large difference in the diffusivity. The semi-logarithmic relationship between the permeability coefficient and the saturation of unsaturated miscellaneous fill is approximately linear, and with the increasing saturation, the density has less effect on the permeability.

**Key words:** fill; horizontal column infiltration test; triaxial shrinkage test; diffusivity; permeability coefficient

## 0 引言

非饱和土的渗水和持水特性是非饱和土研究中的重要组成部分, 水分在土体中的入渗涉及到岩土、交通、水利等重要领域, 对于非饱和土渗水规律的研究, 前人已经做了大量研究工作, 并取得了重要研究成果。Hendrayanto等<sup>[1]</sup>进行了现场试验测定非饱和渗透系数的研究。王文焰等<sup>[2]</sup>研制了一套室内一维土柱入渗装置系统。陈正汉等<sup>[3]</sup>利用伽马射线对水平土柱进行了渗水系数的测定。魏新平等<sup>[4]</sup>运用水平土柱的瞬时剖面法测定了非饱和渗透系数。李永乐等<sup>[5]</sup>、高永宝

等<sup>[6]</sup>、王铁行等<sup>[7]</sup>、徐永福等<sup>[8]</sup>对非饱和渗透系数的测定试验进行了很多有益的改进和研究。土-水特征曲线是用来描述非饱和土中基质吸力与体积含水率、质量含水率或饱和度等之间关系的重要曲线。褚进晶等<sup>[9]</sup>对不同干密度黏土的土-水特征曲线进行过试验研究。陈正汉等<sup>[10]</sup>提出了含水率-净平均应力-吸力的3变量

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672330, 51309199); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTDZ03-01, 2016KTZDSF04-05-01); 国机集团重点研发项目(SINOMACH2017科249号)

收稿日期: 2017-06-11

形式的土-水特征曲线,能反映基质吸力和净平均应力同时变化对水分变化的影响,苗强强等<sup>[11]</sup>进一步对比了考虑净平均应力后土-水特征曲线的差别。方祥位等<sup>[12]</sup>提出了含水率-净平均应力-基质吸力-剪应力的4变量形式的广义土-水特征曲线,能同时反映3个变量对土体中水分的影响,宋亚亚等<sup>[13]</sup>对考虑4变量的广义土-水特征曲线进行了试验研究。扩散率、容水率和渗透系数是非饱和土渗水特性的重要参数,但这些参数是随着渗水过程不断变化的<sup>[14]</sup>,土的体积含水率、基质吸力等因素都对其都有影响。随着中国的城市化进程不断推进,城市规模在不断扩大,工程中涉及到的填土日益增多,而填土的工程性质十分复杂,其渗水和持水特性与一般的素填土有很大差别,对其渗水和持水特性进行研究有一定的现实意义。

本文采用水平土柱试验和非饱和土三轴收缩试验对延安新区某工地不同干密度的非饱和填土渗水特性和持水特性进行试验研究,得出了包括扩散率、容水率、渗透系数在内的多个水分运动参数,为该工程的渗流-变形分析提供了基础资料。

## 1 研究方法

### 1.1 试验方案

土样取自延安新区某工地,风干后过筛,重塑制样。两种试验的试验方案分述如下:

非饱和土水平土柱试验制备3个土样,干密度分别为1.40, 1.50, 1.60 g/cm<sup>3</sup>;试样直径100 mm,长1000 mm。由于试样的尺寸比较大,在制备土样时分层击实,在土筒侧面按50 mm等距离划分,每段按设计干密度装土,用夯锤夯实,分层处打毛以保证土样的连续性。试验时,当湿润锋距试样进水端90 cm时,停止供水,同时数据采集系统停止采集数据,拔出传感器用专门的取土工具从孔洞取土,测得含水率,与传感器测得计算的体积含水率进行校核。

非饱和土三轴收缩试验包括3个干密度,与水平土柱试验相对应,分别为1.40, 1.50, 1.60 g/cm<sup>3</sup>。土样用专门的制样设备分层压实,土样高为8 cm,直径为3.91 cm。试验前将土样抽气饱和,3个试验均控制净平均应力为0 kPa,吸力分别为20, 40, 60, 100, 140, 180, 240, 300 kPa,每次加载均在本次体变和排水稳定后进行,稳定标准为:在2 h内,试样体积和排水量变化分别小于0.001, 0.006 cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验仪器与设备

#### (1) 非饱和土水平土柱入渗试验仪器

非饱和土水平土柱入渗试验装置如图1所示。该套系统由4部分组成。

a) 土筒采用外径120 mm,内径100 mm的有机玻璃筒,筒长1000 mm,筒两端有法兰封堵,进水端法兰外接水室,水室内外径与土筒一致并留有进水和出水孔。土筒中间部分开孔以便传感器的插入,孔距150 mm,两端距筒边缘200 mm。土筒做完每个试验清洗后可重复使用。

b) 供水装置用马氏瓶提供稳定水头,水头高度以水平放置土样横截面中心为基准。

c) 数据采集部分采用DT80远程监测系统,如图2所示。是由澳大利亚(ICT)生产北京数泰科技有限公司组装而成的一套远程监测系统,输出电压量程(土30v),多通道传感器串口可连接不同形式传感器,输出精度高。

d) 5支MP406水分传感器,探针长度60 mm,间距14 mm,可量测范围0~100VSW%,精度±1%,反应时间小于0.5 s,输入电压7~18 VDC,输入信号0~1200 mV对应含水率为0~100 VSW%。传感器另一端接入DT80远程监测系统。



图1 非饱和土水平土柱入渗试验装置

Fig. 1 Installation of horizontal soil column infiltration test



图2 DT80 远程监测系统

Fig. 2 DT80 remote monitoring system

## (2) 三轴收缩试验仪器与装置

为了研究填土的持水特性, 对常规的非饱和土三轴仪做了一些改进, 包括: ①排水管用直径为 4 mm 的尼龙管代替, 尼龙管下固定有直尺, 这样精度可达 0.006 cm<sup>3</sup>; ②气压力用精密调压阀控制, 气压更稳定; ③非饱和土三轴仪的内外压力室压力分别用两个 GDS 压力-体积控制器进行控制, 压力量测精度为 1 kPa。

改进后的非饱和土三轴仪如图 3 所示。



图 3 改进的非饱和土三轴仪

Fig. 3 Improved triaxial apparatus for unsaturated soils

### 1.3 仪器标定

试验前需对水分传感器三轴仪压力室进行标定。

#### (1) 水分传感器标定

试验开始前需对水分传感器进行标定, 5 个水分传感器可同时输出电信号, 由电信号对应的读数可转化为相应的体积含水率, 标定结果如图 4 和表 1 所示。标定结果表明输出电信号和体积含水率的关系成线性, 其中  $a$  为截距,  $b$  为斜率,  $R$  为相关系数。电信号输出频率间隔为 10 min。

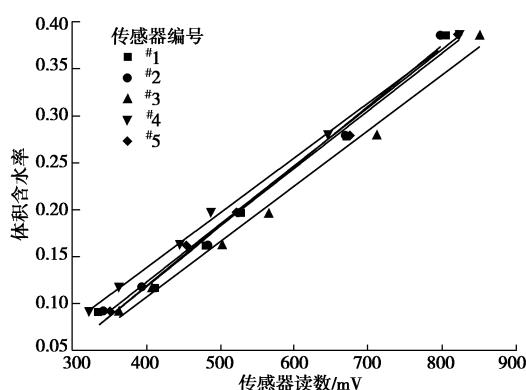


图 4 传感器标定结果

Fig. 4 Calibrated results of transducers

#### (2) 压力室标定

试验前需对压力室及其通水管道进行标定, 以消

除压力室和管路由于受到压力而体积发生变化造成的误差。标定开始前先要使陶土板饱和, 并使压力室内的通气管充满水, 然后关闭排水阀和通气管阀门, 就可进行标定; 标定时对内、外压力室同时同步施加等值压力增量, 从围压等于 100 kPa 开始, 每次增加 25 kPa, 直到围压等于 400 kPa 为止。标定两次, 取其平均值作为以后校正试样体积变化的依据。标定结果如表 2 所示。

表 1 传感器标定拟合结果

Table 1 Calibrated results of transducers through curve fitting

传感器编号	$a$	$b$	$R$
#1	-0.13478	$6.32 \times 10^{-4}$	0.99562
#2	-0.13851	$6.41 \times 10^{-4}$	0.99585
#3	-0.12903	$5.90 \times 10^{-4}$	0.99617
#4	-0.09549	$5.84 \times 10^{-4}$	0.99943
#5	-0.11945	$6.07 \times 10^{-4}$	0.99829

表 2 内压力室标定结果

Table 2 Calibration value of pressure chamber

压力 /kPa	第 1 次标定 值/mm <sup>3</sup>	第 2 次标定 值/mm <sup>3</sup>	标定平均值 /mm <sup>3</sup>
100	324	315	319.5
125	371	369	370
150	413	413	413
175	453	455	454
200	492	493	492.5
225	528	532	530
250	563	566	564.5
275	599	603	601
300	632	638	635
325	668	674	671
350	703	709	706
375	738	746	742
400	772	780	776

### 1.4 计算方法简介

忽略重力作用下, 一维水平流动微分方程和定解条件为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\theta = \theta_a \quad (x > 0, t = 0), \quad (2)$$

$$\theta = \theta_b \quad (x = 0, t > 0). \quad (3)$$

式中  $D(\theta)$  为扩散率;  $x$  为距离左端土面的距离 (cm);  $\theta_a$  和  $\theta$  分别为土样起始体积含水率和  $t$  时刻对应的体积含水率;  $\theta_b$  为土柱进水端土体饱和体积含水率。该方程为非线性偏微分方程, 求解比较困难, 采用 Boltzmann 变换, 可将其转化为常微分方程求解, 推导过程详见文献[1], 解出  $D(\theta)$  值计算公式:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2(d\theta/d\lambda)} \int_{\theta_a}^{\theta} \lambda d\theta \quad , \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为 Boltzmann 变换参数,  $\lambda = xt^{1/2}$  ( $t$  为入渗时间 (min))。在  $t$  时刻测得土柱含水率分布, 并计算出各测点的  $\lambda$  值, 可以绘出  $\theta - \lambda$  关系曲线。曲线上取点列表计算得出  $D(\theta)$  与  $\theta$  和  $\lambda$  的代数表达式:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2(d\theta/d\lambda)} \sum_{\theta_a}^{\theta} \lambda d\theta \quad . \quad (5)$$

式中,  $\Delta\lambda$  和  $\Delta\theta$  分别为两测点的 Boltzmann 变换参数和体积含水率之差。通过式 (5) 可列表计算扩散率  $D(\theta)$ 。

体积含水率  $\theta$  与饱和度  $S_r$  在忽略变形情况下两者相互转换:

$$S_r = \frac{(\theta/\rho_d) \cdot d_s \cdot \rho_w}{e} \quad , \quad (6)$$

式中,  $d_s$  为土粒相对密度, 试验测定为 2.70,  $e$  为孔隙比,  $\rho_w$  为水的密度。

容水率  $C(\theta)$  为土水特征曲线的斜率, 计算式为

$$C(\theta) = -d\theta/ds \quad , \quad (7)$$

式中,  $s$  为吸力 (kPa)。

渗透系数容水率扩散率有如下关系:

$$K(\theta) = D(\theta) \cdot C(\theta) \quad . \quad (8)$$

求得容水率  $C(\theta)$  和扩散率  $D(\theta)$  就可以按照式 (8) 得到渗透系数  $K(\theta)$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水平土柱试验结果与分析

不同干密度土样  $\theta - \lambda$  关系曲线平滑处理后如图 5 所示。由入渗端到湿润锋,  $\lambda$  值逐渐增大, 随着  $\lambda$  值的增大, 体积含水率减小, 且开始段比较平稳接近饱和含水率, 随着  $\lambda$  的继续增大, 体积含水率值发生陡降, 且陡降区间很小。这说明湿润锋附近土样体积含水率值变化剧烈, 且在渗水过程中某一截面体积含水率达到一定值后, 试样的体积含水率急剧降低到初始值, 该转变的体积含水率值为 0.325 左右。

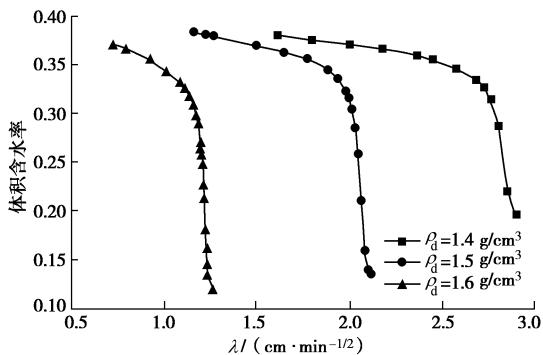


图 5 不同干密度的填土  $\theta - \lambda$  关系曲线

Fig. 5 Relationship between  $\theta$  and  $\lambda$

曲线上取点通过式 (5) 列表计算求得的扩散率  $D(\theta)$  与饱和度  $S_r$  的半对数关系如图 6 所示。由图 6 可知, 在考虑干密度影响下扩散率与饱和度之间关系时, 当饱和度达到 0.65 左右时, 扩散率近似两条直线段组成, 可表示为

$$\lg D = A_1 + B_1 S_r (S_r \leq 0.65) \quad , \quad (9)$$

$$\lg D = A_2 + B_2 S_r (S_r > 0.65) \quad , \quad (10)$$

式中,  $A_1$  和  $B_1$ ,  $A_2$  和  $B_2$  为材料参数, 与土的物理力学指标有关,  $S_r$  为饱和度。材料参数取值如表 3 所示。

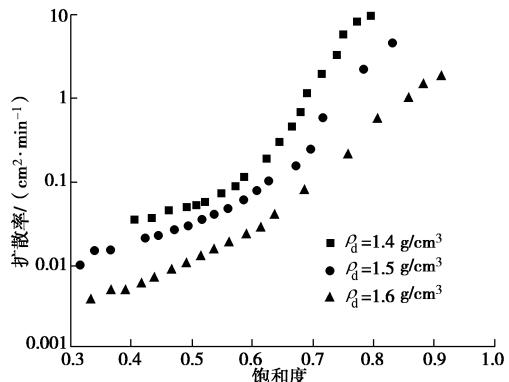


图 6 不同干密度填土的扩散率与饱和度关系

Fig. 6 Relationship between diffusion rate and saturation of miscellaneous fill with different dry densities

表 3 不同干密度填土材料参数取值

Table 3 Values of material parameters of miscellaneous fill with different dry densities

干密度 (g·cm⁻³)	$S_r \leq 0.65$		$S_r > 0.65$	
	$A_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$
1.40	-2.57	2.69	-7.42	10.79
1.50	-2.87	2.85	-6.38	8.43
1.60	-3.46	3.12	-5.35	6.26

### 2.2 各向等压试验结果与分析

各向等压试验中吸力  $s$  与对应饱和度  $S_r$  关系如图 7 所示。由图 7 可知, 干密度对重塑土样的土水特征曲线影响较大, 相同吸力下, 干密度越大, 对应的饱和度越大, 这表明填土的持水能力与干密度有关, 干密度越大持水能力越强, 但随着吸力的减小, 干密度对持水能力的影响也在逐渐减小。由图 7 可知, 当土样吸力小于 25 kPa 时, 3 种干密度土样的饱和度很接近。通过

$$s(S_r) = \alpha e^{\beta S_r} \quad (11)$$

进行拟合, 可得到结果如表 4。

表 4 填土的土水特征曲线拟合参数值

Table 4 Values of fitting parameters of SWCC of miscellaneous fill

干密度/(g·cm⁻³)	$\alpha$	$\beta$
1.40	12257.04	-9.04
1.50	$2.17 \times 10^5$	-13.56
1.60	$1.97 \times 10^6$	-14.46

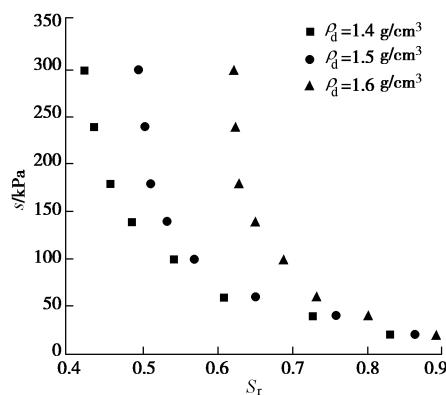


图 7 不同干密度填土的土水特征曲线

Fig. 7 SWCCs of miscellaneous fill with different dry densities

### 2.3 渗透系数分析

通过式(6), 可将式(8)可以写成

$$K(S_r) = D(S_r) \cdot C(S_r) \quad (12)$$

将容水率  $C(\theta)$  转换为  $C(S_r)$

$$\text{因为 } \theta = S_r n \quad (13)$$

忽略在收缩试验过程中土的孔隙率变化, 则

$$C(\theta) = -d\theta/ds = -ndS_r/ds \quad (14)$$

利用式(14)可以求得容水率  $C(S_r)$ 。

将式(9)~(11), (13)、(14)代入式(12)中, 就可得到非饱和填土的渗透系数, 非饱和填土渗透系数与饱和度的半对数关系如图8所示。

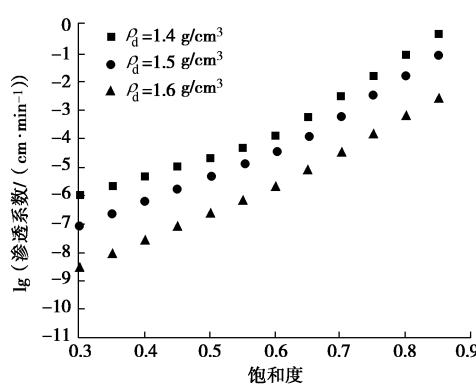


图 8 填土渗透系数与饱和度的半对数

Fig. 8 Semi logarithmic relationship between permeability coefficient and saturation of miscellaneous fill

由图8可知, 干密度对非饱和填土渗透系数变化影响较大, 干密度越小, 相同饱和度下的非饱和填土渗透系数越大, 但随着饱和度的增大, 干密度对渗透系数的影响在减弱; 干密度相同时, 饱和度越大渗透系数也越大, 这是因为土中空气占据了一定的孔隙通道, 当饱和度较高时空气占据的孔隙通道越少; 非饱和填土的渗透系数与饱和度的半对数关系近似成直线, 且随着饱和度的增大干密度的影响逐渐减小。通过对渗透系数与饱和度的半对数关系按下式拟合:

$$\lg K = m + nS_r \quad (15)$$

可得相关参数如表5所示。

表 5 填土的土水特征曲线拟合参数值

Table 5 Values of fitting parameters of SWCC of miscellaneous fill

干密度/(g·cm⁻³)	m	n	R
1.40	0.38375	0.63921	0.98092
1.50	0.24861	0.41411	0.99268
1.60	0.14837	0.24713	0.99422

### 3 结 论

(1) 对于非饱和填土, 饱和度达到 0.65 左右时, 扩散率近似由两条直线组成, 当饱和度低于 0.65 时, 干密度对扩散率影响不大; 当饱和度高于 0.65 时, 干密度对扩散率存在较大影响。

(2) 填土的持水能力与干密度有关, 干密度越大持水能力越强, 但随着吸力的减小, 干密度对持水能力的影响也在逐渐减小。

(3) 非饱和填土的渗透系数与饱和度的半对数关系近似成直线, 且随着饱和度的增大干密度的影响逐渐减小。

### 参考文献:

- [1] HENDRAYANTO, KOSUGI K, MIZUYAMA T. Field determination of unsaturated hydraulic conductivity of forest soils[J]. Journal of Forest Research, 1998(3): 11 - 17.
- [2] 王文焰, 张建丰. 室内一维土柱入渗试验装置的研究及应用[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 447 - 451. (WANG Wen-yan, ZHANG Jian-feng. Study and application of infiltration experimental equipment for one-dimensional soil column in laboratory[J]. ACTA Pedologica Sinica, 1991, 28(4): 447 - 451. (in Chinese))
- [3] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 9 - 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluids motion, suction and pore pressures in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [4] 魏新平, 王文焰. 用水平土柱测定非饱和土壤水扩散率的瞬时剖面法[J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 61 - 62. (WEI Xin-ping, WANG Wen-yan. Use horizontal soil column to determine unsaturated soil diffusion coefficient with instantaneous profile method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(9): 61 - 62. (in Chinese))
- [5] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研

- 究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (LI Yong-le, LIU Cui-ran, LIU Hai-ning, et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (in Chinese))
- [6] 高永宝, 刘奉银, 李 宁. 确定非饱和土渗透特性的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(18): 3258 - 3261. (GAO Yong-bao, LIU Feng-yin, LI Ning. A new method for determination of permeability of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(18): 3258 - 3261. (in Chinese))
- [7] 王铁行, 卢 靖, 张建锋. 考干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificiality compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (in Chinese))
- [8] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 160 - 164. (XU Yong-fu, LAN Shou-qi, SUN De-an, et al. New apparatus for measurement of stress effect on permeability of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 160 - 164. (in Chinese))
- [9] 褚进晶, 田 飞, 闻 玮. 扬州地区黏性土土水特征曲线试验研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, **13**(2): 73 - 77. (CHU Jin-jing, TIAN Fei, WEN Wei. Experimental Research and application of soil-water characteristic curve of cohesive soil in Yangzhou Area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, **13**(2): 73 - 77. (in Chinese))
- [10] 黄 海, 陈正汉, 李 刚. 非饱和土在  $p - s$  平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 316 - 321. (HUANG Hai, CHEN Zheng-han, LI Gang. A study on yield locus of unsaturated soils on  $p - s$  plane and soil-water characteristic curve[J]. Rock and Mechanics, 2000, **21**(4): 316 - 321. (in Chinese))
- [11] 苗强强, 张 磊, 陈正汉, 等. 非饱和含黏砂土的广义土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 102 - 106. (MIAO Qiang-qiang, ZHANG Lei, CHEN Zheng-han, et al. Experimental study of generalized SWCC of unsaturated sand and containing clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 102 - 106. (in Chinese))
- [12] 方祥位, 陈正汉, 申春妮. 重塑非饱和黄土等  $p$  剪切试验[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(9): 124 - 128. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni. Test with controlled net mean stress equaling constant of a remolded unsaturated loess[J]. Journal of Chongqing University, 2004, **27**(9): 124 - 128. (in Chinese))
- [13] 宋亚亚, 卢廷浩, 季李通. 应力作用下非饱和土土-水特征曲线研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, **10**(6): 147 - 150. (SONG Ya-ya, LU Ting-hao, JI Li-tong. Research on soil-water characteristic curve of unsaturated soil under stress state[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, **10**(6): 147 - 150. (in Chinese))
- [14] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 92 - 94. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Shen-chuan. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 92 - 94. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)