

DOI: 10.11779/CJGE2020S1003

# 砂质黄土土-水特征曲线的试验研究

蔡国庆<sup>1, 2</sup>, 韩博文<sup>1, 2</sup>, 杨雨<sup>1, 2</sup>, 刘祎<sup>1, 2</sup>, 赵成刚<sup>2</sup>

(1. 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对取自浩吉铁路阳城隧道的砂质黄土土样, 采用张力计法、滤纸法和露点水势仪(WP4C)法, 得到了宽广吸力范围内不同干密度砂质黄土的土-水特征曲线(SWCC)。采用van Genuchten模型对SWCC试验结果进行拟合, 确定其进气值。基于扫描电镜试验, 对不同干密度和含水率砂质黄土的微观孔隙结构进行了观测, 从宏观角度分析了不同干密度土样SWCC的初始饱和含水率、失水速率以及进气值的变化规律。试验结果表明: 砂质黄土的体积含水率随基质吸力的增加逐渐减小; 随着干密度增加, 土体内部的孔隙结构由较多的架空孔隙转化为较均匀的中等孔隙, 初始饱和含水率和失水速率逐渐降低, 进气值逐渐增大。

**关键词:** 非饱和土; 宽广吸力范围; 砂质黄土; 土-水特征曲线; 干密度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0011-05

**作者简介:** 蔡国庆(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学及土体多场耦合理论方面的研究工作。E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn。

## Experimental study on soil-water characteristic curves of sandy loess

CAI Guo-qing<sup>1, 2</sup>, HAN Bo-wen<sup>1, 2</sup>, YANG Yu<sup>1, 2</sup>, LIU Yi<sup>1, 2</sup>, ZHAO Cheng-gang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A series of laboratory tests are conducted on sandy loess taken from Yangcheng Tunnel of Haoji Railway under different dry densities by the combination of tensiometer method, filter paper method, and dew point hydro potential meter (WP4C) method. The soil-water characteristic curve (SWCC) of sandy loess in a wide suction range is obtained, and the effect of the initial dry density is emphatically studied. The van Genuchten model is used to fit the SWCC test results under different dry densities and the air entry value of the SWCC is determined. The microscopic pore structure of sandy loess with different dry densities and water contents is studied by scanning electron microscope tests. The change rules of the initial saturated water content, water loss rate and air entry value of SWCC under different dry densities are observed from a macro-micro perspective. The test results show that the volumetric water content of sandy loess decreases with the increase of matric suction, and the pore structure of soil changes from more overhead pores to more uniform medium pores with the increase of dry density. The initial saturated water content and water loss rate gradually decrease, and the air entry value gradually increases.

**Key words:** unsaturated soil; wide suction range; sandy loess; soil-water characteristic curve; dry density

## 0 引言

黄土是形成于第四纪的多孔状多节理沉积物, 具有显著的湿陷性和结构性, 在中国广泛分布且一般处于非饱和状态。相较于其它类型黄土, 砂质黄土的粗粒含量更高, 节理和大孔隙更为发育, 遇水后表现出更强的湿陷性, 对其强度和稳定性产生较大影响, 严重时会引发黄土滑坡等重大工程事故。浩吉铁路阳城隧道上覆砂质新黄土及粉土、冲洪积砂质老黄土、黏质老黄土及砂类土和碎石类土, 局部为第三系黏性土。下伏基岩为白垩系下统洛河组砂岩, 全风化至强风化, 岩质软弱, 巨型斜层理或交错层理发育。隧道贯穿大

量砂质黄土地层, 如何在地下水与降雨等因素影响下保证砂质黄土地层的稳定并进行安全施工是一大挑战, 亟需对砂质黄土的持水特性进行更加全面的了解。土-水特征曲线将非饱和土基质吸力与含水率之间建立关系, 是反映非饱和土持水特性的重要本构关系。因此, 研究砂质黄土的土-水特征曲线, 对于分析其工程性质及解决相关工程问题都具有重要意义。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJS125);  
国家自然科学基金项目(52078031, 51722802, U1834206); 北京市  
自然科学基金面上项目(8202038)

收稿日期: 2020-06-03

近年来,学者们对于土体的土-水特征曲线及持水特性进行了一系列研究<sup>[1-11]</sup>。在众多影响土-水特征曲线的因素中,干密度对土-水特征曲线的进气值、饱和含水率以及孔隙结构均具有显著影响<sup>[8-11]</sup>。对于多孔和节理发育的黄土,研究干密度对土-水特征曲线的影响尤为重要。目前的研究大多集中于粗粒含量相对较低的黄土中,针对粗粒含量更高,大孔隙与节理更加发育的砂质黄土土-水特征曲线的研究鲜有报道。因此,有必要开展不同干密度下砂质黄土土-水特征曲线的试验研究。

针对取自浩吉铁路阳城隧道的砂质黄土土样,采用张力计法、滤纸法和露点水势仪(WP4C)法,对不同干密度砂质黄土进行了一系列土-水特征曲线室内试验,采用van Genuchten模型对不同干密度下的土-水特征曲线试验数据进行拟合,确定了土-水特征曲线的进气值。此外,还通过开展扫描电镜试验,对不同干密度和含水率砂质黄土的微观孔隙结构进行了观测,从宏微观角度分析了不同干密度下土-水特征曲线初始饱和含水率、失水速率以及进气值的变化规律。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验所用砂质黄土取自浩吉铁路阳城隧道出口处,采用筛分法与密度计法相结合对土样进行颗粒分析,土样中黏粒( $d < 0.005 \text{ mm}$ )含量为19.20%,粉粒含量( $0.005 \text{ mm} < d < 0.0075 \text{ mm}$ )为64.01%,细砂含量( $0.0075 \text{ mm} < d < 0.25 \text{ mm}$ )为16.79%。土样基本物理参数见表1。依据《土的分类标准:GBJ 145—90》可确定试验所用砂质黄土为低液限黏土。现场测得天然土样的干密度为 $1.40 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水率为6.3%。

表1 砂质黄土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of sandy loess

颗粒相对密度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P$	最优含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\gamma_{d,max} / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
2.70	24.0	12.8	11.2	12.0	1.81

### 1.2 试验仪器及方法

本文采用张力计法、滤纸法和露点水势仪(WP4C)法联合测量砂质黄土的土-水特征曲线,低吸力段采用张力计法,中、高吸力段采用滤纸法配合露点水势仪(WP4C)法进行测量。为了研究不同干密度对砂质黄土土-水特征曲线的影响,以现场测得的天然土样干密度为依据,设置了 $1.40, 1.55, 1.65 \text{ g/cm}^3$ 三种干密度进行试验。限于篇幅,详细的试验方法可参考文献[12],文中不再过多赘述。

## 2 土-水特征曲线模型的选取

为了便于对试验结果进行分析,通常采用土-水特征曲线模型对试验数据进行拟合,常用的土-水特征曲线模型有Gardner模型<sup>[13]</sup>、van Genuchten模型<sup>[14]</sup>以及Fredlund-Xing模型<sup>[15]</sup>等,模型表达式分别为

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + (\psi/a_1)^{n_1}} + \theta_r, \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a_2 \psi)^{n_2}\right]^{m_1}} + \theta_r, \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ \ln \left[ e + (\psi/a_3)^{n_3} \right] \right\}^{m_2}} + \theta_r. \quad (3)$$

式中  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_s$  饱和体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $\psi$  为基质吸力;  $a_1, n_1$  为拟合参数;  $a_2, a_3$  为与进气值有关的模型参数,  $n_2, n_3$  为与孔径分布有关的模型参数;  $m_1, m_2$  为与土-水特征曲线整体对称性有关的模型参数, 可认为  $m_1 = 1 - 1/n_2$  或  $m_1 = 1 - 1/2n_2$  或  $a_2, n_2, m_1$  相互独立。 $a_1, a_2, a_3$  统称为参数1,  $n_1, n_2, n_3$  统称为参数2,  $m_1, m_2$  统称为参数3。

采用3种模型对干密度为 $1.40 \text{ g/cm}^3$ 的试验数据进行拟合,其中饱和体积含水率和残余体积含水率分别为 $\theta_s = 50.1\%$ ,  $\theta_r = 2.1\%$ ,拟合参数见表2,拟合结果如图1所示。通过对比发现,Gardner模型的拟合效果不够理想,Fredlund-Xing模型与van Genuchten模型的拟合效果均较好,虽然Fredlund-Xing模型拟合的相关系数略高,但van Genuchten模型对砂质黄土土-水特征曲线高吸力部分的拟合效果更好,综合上述分析,本文最终选取van Genuchten模型对全部砂质黄土的土-水特征曲线试验数据进行拟合分析。

表2 SWCC模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters for SWCC models

SWCC模型	参数1	参数2	参数3	$R^2$
Gardner模型	9.409	0.791	—	0.984
van Genuchten模型	0.852	2.655	0.148	0.985
Fredlund-Xing模型	2.986	1.256	1.236	0.997

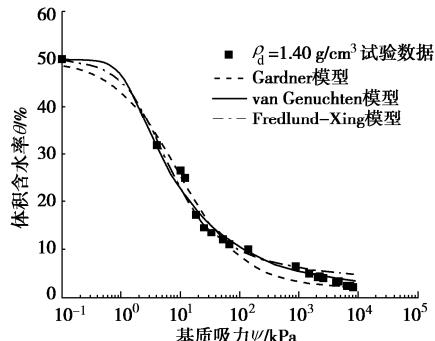


图1 SWCC模型的试验数据拟合结果

Fig. 1 Fitting results of test data of SWCC models

### 3 试验结果与分析

为了全面研究砂质黄土的持水特性, 本文从宏观和微观两个角度进行试验, 宏观角度对不同干密度土样开展土-水特征曲线试验, 微观角度对不同干密度和含水率的土样开展扫描电镜试验。

#### 3.1 砂质黄土与黄土、砂土土-水特征曲线的异同

砂质黄土介于黄土与砂土之间, 因孔隙结构, 矿物成分与粒径级配等原因使得其土-水特征曲线的特征不同于黄土与砂土, 结合本文的试验结果以及文献[8]和文献[11]的试验结果绘制了3种类型土体土-水特征曲线的对比图, 如图2所示。可以看出, 3种土体的土-水特征曲线基本为反“S”型曲线, 在中吸力段, 砂土土体水特征曲线更陡, 黄土更为平缓, 砂质黄土基本介于两者之间。图中所提供的3种土样的试验条件并不相同, 因此图2仅对3种土体土-水特征曲线特征进行初步对比分析, 更为详尽的差异则需同时对3种土体开展土-水特征曲线试验进行研究。

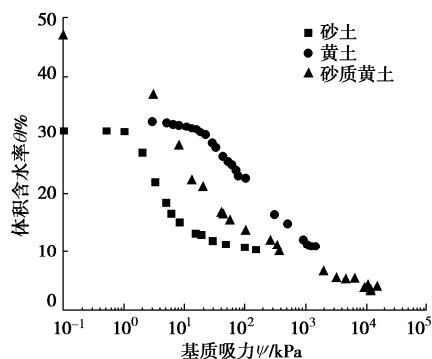


图2 砂质黄土与黄土、砂土 SWCC 的对比

Fig. 2 Comparison of SWCCs of sandy loess, loess and sandy soil

#### 3.2 不同干密度下土-水特征曲线试验结果及分析

选取干密度为1.40, 1.55, 1.65 g/cm<sup>3</sup>三组土样进行试验研究, 土样对应的饱和体积含水率 $\theta_s$ 分别为50.1%, 47.1%, 43.5%, 残余体积含水率 $\theta_r$ 分别为2.1%, 3.3%, 3.8%。图3为不同干密度下的土-水特征曲线试验结果与模型拟合结果, 模型拟合参数见表3。

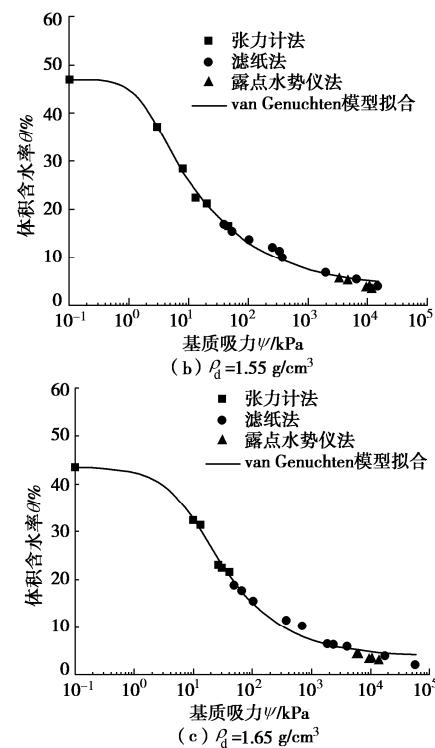
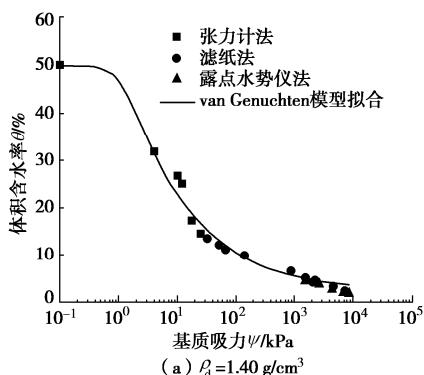


图3 不同干密度下砂质黄土的 SWCC

Fig. 3 SWCCs of sandy loess under different dry densities

表3 van Genuchten 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters for van Genuchten model

干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	参数1	参数2	参数3	R <sup>2</sup>
1.40	0.852	2.655	0.148	0.9846
1.55	0.602	2.040	0.176	0.9930
1.65	0.118	1.229	0.410	0.9897

本文选择参数1、参数2、参数3相互独立, van Genuchten<sup>[16]</sup>认为当参数3与参数2的比值较小时, 参数1等于进气值的倒数, 以此计算出干密度为1.40, 1.55, 1.65 g/cm<sup>3</sup>对应的进气值分别为1.174, 1.661, 8.475 kPa。图4为进气值与干密度的关系。从图中可以看出, 进气值是随干密度增加而增加的。

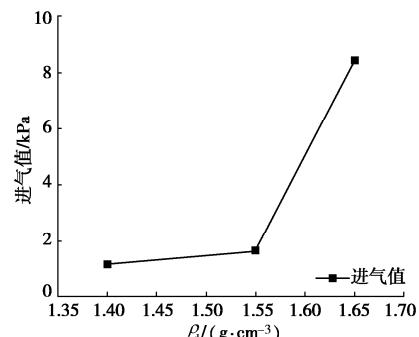


图4 砂质黄土进气值与干密度的关系

Fig. 4 Relationship between air entry value and dry density of sandy loess

图5为不同干密度下土-水特征曲线的对比, 可以看出, 体积含水率随着基质吸力的增加逐渐减小, 在干密度较低时, 饱和含水率较高, 土样的失水速率更大, 进气值较低。在干密度较高时, 饱和含水率较高, 失水速率降低, 土样的持水性能较强, 进气值较

高。随着干密度的增加, 土-水特征曲线更加平缓。

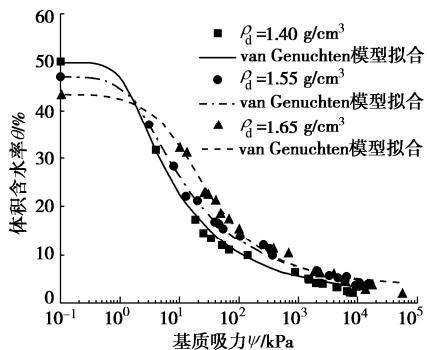


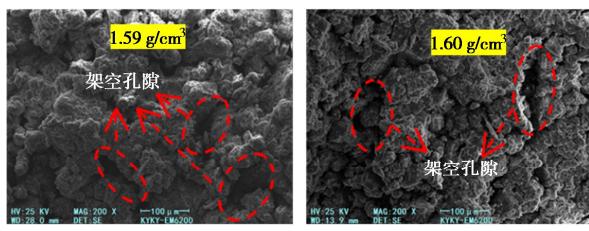
图 5 不同干密度下砂质黄土 SWCC 对比

Fig. 5 Comparison of SWCCs of sandy loess under different dry densities

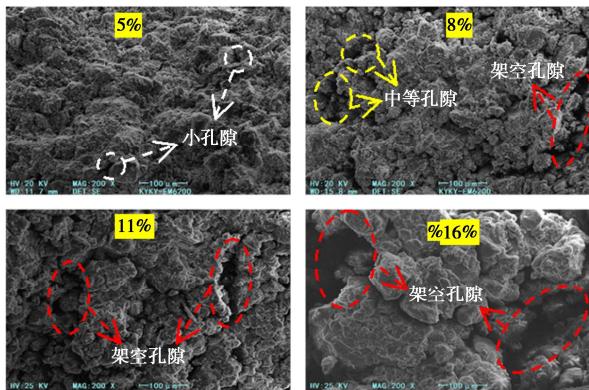
### 3.3 微观结构测试及分析

为进一步研究不同干密度条件下砂质黄土土-水特征曲线演化的内在机理, 对不同干密度和含水率的砂质黄土进行扫描电镜试验, 从微观角度出发, 对砂质黄土孔隙结构的演化规律及其影响因素进行研究。

试验结果如图 6 所示。从图 6 中可以明显看出, 在干密度较低和含水率较高时, 砂质黄土中存在明显的架空孔隙, 在干密度较高和含水率较低时, 砂质黄土中的架空孔隙较少, 多为均匀分布的中等孔隙。



(a) 不同干密度砂质黄土SEM图像



(b) 不同含水率砂质黄土SEM图像

Fig. 6 SEM images of sandy loess

结合宏观和微观两个尺度的研究结果, 可以得到: 在较低干密度下, 砂质黄土内具有明显的尺寸较大的架空孔隙, 在饱和状态下能够储存较多水分, 因此具有较高饱和含水率, 大量架空孔隙的存在使得土样在吸力较小时会以较快的速度失水, 故失水速率较大且进气值较小; 相反, 在干密度较高的砂质黄土内架空孔隙较少, 多为均匀分布的中等孔隙和小孔隙, 因此在饱和状态下储存的水量也相对较低, 饱和含水率较低, 也正是因为土样的中等孔隙和小孔隙的数量较多, 使得土体持水性能增强, 具有较低的失水速率和较大的进气值<sup>[8]</sup>。此外, 研究表明, 对于同一种土样, 其在不同吸力下的失水状态取决于土中孔隙的数量与直径<sup>[17]</sup>。不同干密度的砂质黄土其内部孔隙结构具有明显差异, 具有不同的持水特性, 干密度通过影响土体的孔隙结构来影响土-水特征曲线的变化规律。因此, 干密度是影响砂质黄土土-水特征曲线的重要因素。

## 4 结 论

采用张力计法、滤纸法、露点水势仪 (WP4C) 法, 对不同干密度下浩吉铁路阳城隧道砂质黄土的土-水特征曲线进行试验测试和模型拟合, 同时还利用扫描电镜对其微观结构演化进行了研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 土-水特征曲线试验结果表明, 随着干密度的增加, 砂质黄土的饱和含水率逐渐增加, 失水速率逐渐降低, 进气值逐渐增加。

(2) 通过扫描电镜试验, 对不同干密度和含水率砂质黄土的微观孔隙结构观测发现, 在较低干密度和较高含水率下, 砂质黄土存在明显的架空孔隙; 在较高干密度和较低含水率下, 砂质黄土内架空孔隙较少, 多为均匀分布的中等孔隙。

(3) 结合宏微观试验结果, 可以得到干密度通过影响砂质黄土的孔隙结构来影响土-水特征曲线的变化, 在较低干密度下砂质黄土内具有较多架空孔隙, 在饱和状态可储存较多水分, 饱和含水率较高, 但失水速率较快, 进气值较低, 在较高干密度下砂质黄土内架空孔隙较少, 多为均匀分布的中等孔隙, 其饱和状态下储存的水分相对较少, 饱和含水率较低, 但持水性能相对较高, 进气值较大。

## 参考文献:

- [1] 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 fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [2] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳, 等. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan, et al. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1055 - 1060. (in Chinese))
- [3] 蔡国庆, 张策, 李舰, 等. 考虑初始干密度影响的SWCC预测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 27 - 31. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, LI Jian, et al. Prediction method for SWCC considering initial dry density[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 27 - 31. (in Chinese))
- [4] 蔡国庆, 盛岱超, 周安楠. 考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程[J]. 岩土工程学报, 2013, **36**(5): 827 - 835. (CAI Guo-qing, SHENG Dai-chao, ZHOU An-nan. Approach for predicting the relative coefficient of permeability of unsaturated soils with different initial void ratios[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **36**(5): 827 - 835. (in Chinese))
- [5] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 123 - 128. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 123 - 128. (in Chinese))
- [6] 马田田, 韦昌富, 陈盼, 等. NaCl溶液对土体持水特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2831 - 2836. (MA Tian-tian, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. An experimental study of effect of NaCl solution on soil water characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2831 - 2836. (in Chinese))
- [7] 高游, 孙德安, 张俊然, 等. 考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2191 - 2196. (GAO You, SUN De-an, ZHANG Jun-ran, et al. Soil-water characteristics of unsaturated soils considering initial void ratio and hydraulic path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **41**(12): 2191 - 2196. (in Chinese))
- [8] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(6): 2445 - 2453. (ZHAO Tian-yu, WANG Jin-fang. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess soil considering density and wetting-drying cycle effects[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(6): 2445 - 2453. (in Chinese))
- [9] TOMBOLATO S, TARANTINO A. Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay[J]. Géotechnique, 2005, **55**(4): 307 - 317.
- [10] YANG H, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Factors affecting drying and wetting soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(5): 908 - 920.
- [11] GALLAGE C P K, UCHIMURA T. Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils[J]. Soils and Foundations, 2010, **50**(1): 161 - 172.
- [12] 杨雨. 水-力耦合作用下非饱和土渗流特性演化规律的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (YANG Yu. Experimental Investigation on Water Permeability of Unsaturated Soils under Hydrro-Me Coupled Conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [13] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, **85**: 228 - 232.
- [14] 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**(5): 892 - 898.
- [15] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.
- [16] GENUCHTEN M T V, NIELSEN D R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil[J]. Annales Geophysicae, 1985, **3**(5): 615 - 628.
- [17] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑黏性土的基质吸力与土水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(2): 321 - 327. (XIONG Cheng-ren, LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Relation of matric suction with moisture state and density state of remolded cohesive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(2): 321 - 327. (in Chinese))

(编校: 孙振远)