

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909015

高分解度泥炭土-土水特征曲线研究*

桂跃, 刘锐, 赵振兴, 张秋敏, 刘声钧, 吴承坤

(昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650504)

摘要: 为了明确非饱和泥炭土的土水特征及其影响因素, 以原状泥炭土和人工调配的5种不同有机质含量的重塑泥炭土为研究对象, 采用滤纸法测试其基质吸力, 绘制出相应的土水特征曲线, 分析泥炭土原状样和重塑样土水特性的差别, 以及不同有机质含量对于泥炭土土水特性的影响; 选用 Gardner 模型、Van Genuchten 模型和 Fredlund & Xing 模型对试验结果进行拟合, 比较3种模型对泥炭土的适用性; 最后分析比较高分解度泥炭土的土水特征曲线与其他土类的差异。试验结果表明: 有机质含量相同时, 原状土样的进气值和残余值小于重塑土样的进气值和残余值, 说明原状土样的持水能力弱于重塑土样; 有机质含量对泥炭土的土水特征曲线有很大影响, 随着土中有机质含量的增加, 土的持水能力变强, 土样的进气值从 155 kPa 增长到 1 486 kPa, 残余值从 4 796.7 kPa 增长到 35 101.5 kPa; 3种模型拟合优良度依次为 Van Genuchten 模型、Fredlund & Xing 模型、Gardner 模型; 通过对比, 发现高分解度泥炭土持水能力最强, 其特征值大于膨润土。

关键词: 泥炭土; 滤纸法; 土水特征曲线; 有机质; 基质吸力

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0622-07

Study on Soil Water Characteristic Curve of Peaty Soil with High Degree of Decomposition

GUI Yue, LIU Rui, ZHAO Zhenxin, ZHANG Qiumin, LIU Shengjun, WU Chengkun
(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to clarify the soil-water characteristics of unsaturated peat soil and the influencing factors, the remolded peat soil specimens with five different organic matter contents were prepared using undisturbed and artificially blended peat soil. The matric suction was measured using the filter paper method and the corresponding soil-water characteristic curves were obtained. The soil-water characteristic curves are used to analyze the difference of water characteristics between peat soil and remolded soil, and the effect of different organic matter contents on the soil-water characteristics of peat soil. The Gardner model, Van Genuchten model and Fredlund & Xing model are used to fit the test results. The applicability of the three models to peat soil was compared. Finally, the difference of the soil-water characteristic curves between peat soil with high degree of decomposition and other soils was compared. The test results show that when the organic matter content is the same, the air intake value and residual value of the undisturbed soil sample are smaller than those of the remolded soil sample, indicating that the water holding capacity of the undisturbed soil sample is weaker than that of the

* 收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568030, 51768027, 41662021)资助

作者简介: 桂跃(1982—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事软土力学及基坑工程等教学与研究。E-mail: gydrgui@kmust.edu.cn

remolded soil sample; The organic matter has a great influence on the soil-water characteristic curve of the peat soil. With the increase of organic matter content in soil, the water holding capacity of soil becomes stronger. The intake value of the soil sample increased from 155 kPa to 1486 kPa, and the residual value increased from 4796.7 kPa to 35101.5 kPa. The fitting accuracy from high to low follows the order: Van Genuchten model, Fredlund & Xing model and Gardner model. By comparison, it is found that the peat soil with high degree of decomposition has the strongest water holding capacity and its characteristic value is larger than that of bentonite.

Keywords: peat soil; filter paper method; soil-water characteristic curve; organic matter; matric suction

引言

非饱和土研究对象通常为一般黏性土、粉土、砂土,以及红黏土、膨胀土、黄土等特殊土,主要研究内容之一为测试土体的基质吸力,并得出土水特征曲线(SWCC曲线)。如J.M.Fleureau等^[1]对Jossigny粉土和FoCa膨润土进行了土水特性研究,得到了两者的土水特征曲线。W.P.M.Black^[2]对比Cloumbia砂土和Palontina粘土,研究了矿物成分对土水特征曲线的影响。陈东霞等^[3]用滤纸法测试厦门花岗岩残积土的土水特征曲线,得出修正Gardner模型适宜描述其SWCC曲线的结论。孔令伟等^[4]采用GDS对不同围压下的砂土进行土水特征试验,通过SWCC曲线预测了含浅层气砂土中气藏压力的状况。蔡国庆等^[5]测出了全吸力范围内红黏土的土水特征曲线,分析初始孔隙比和孔隙结构对SWCC的影响。吴珺华等^[6]就干湿循环作用下膨胀土基质吸力的变化问题,参考G.Fredlund等^[7]土水特征曲线模型,建立了干湿循环效应下膨胀土的SWCC曲线模型。上述研究都关注了土水特征曲线,这是由于非饱和土的性质,如渗透特性、强度特性和持水能力等都和土水曲线有联系^[7-9],非饱和土中的水分和气泡的形态随土体含水率的变化而变化,这些都是致使非饱和土的性质多变的重要原因。因此,SWCC曲线是非饱和土研究的重点。

泥炭土因富含有机质,普遍具有强度低、压缩性高、孔隙比大的特征,是工程上的特殊土。目前,工程领域内对泥炭土的研究主要集中在饱和土状态,如饱和泥炭土的变形和强度特性等^[10];对于其非饱和状态的研究只是在农业方面有涉及,如高会议等^[11]通过研究泥炭土的土水特征曲线来指导作物的科学灌溉。这是由于泥炭土多分布于湖河濒

岸或沼泽地区,较高的地下水使其通常处于饱和状态。但是,某些特殊情况,如大量开采地下水、基坑工程降排水、极端旱涝的气候等,会导致局部区域地下水位大幅升降变化^[12]。此外,泥炭土中的有机质在降解时产生生物气体,如甲烷、二氧化碳等^[13],也会使得泥炭土层处于非饱和状态;因此,开展非饱和状态泥炭土的相关研究很有必要。

为了明确泥炭土的土水特征及相关影响因素,本文以原状泥炭土和人工调配重塑泥炭土为研究对象,通过系统的室内试验,研究了高分解度泥炭土—土水特征曲线,对认识泥炭土的非饱和特性有一定的参考意义。

1 泥炭土的基本性质及试样制备

泥炭土取自昆明市滇池路与广福路交叉口处,其物理性质指标详见表1。根据测试结果,所取土样残余纤维含量较低,参照ASTM(D4427-13)^[14]标准,其属于高分解度泥炭土。通过XRD矿物分析,该土样矿物质成分主要为伊利石和石英,其中伊利石含量为75%~85%,石英占10%~20%,如图1所示。

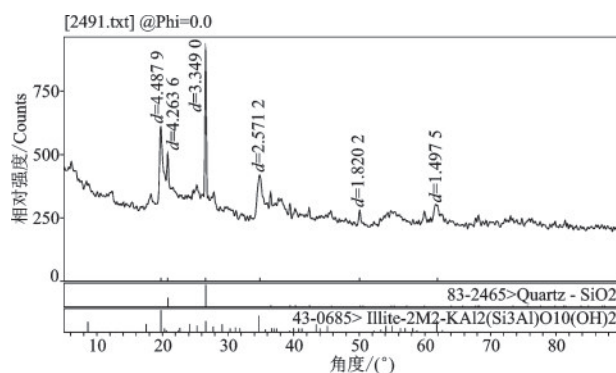


图1 泥炭土X光衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction pattern of the peat soil

如图2所示,以天然原状泥炭土为基质土,通过加入伊利石和石英混合物调配泥炭土,实现人为改变有机物质在泥炭土中的占比。调配土样及制备试样的具体方法如下:

(1)按照一定的比例,将伊利土+石英混合物(固定 $m_{\text{伊利土}}:m_{\text{石英}}=4:1$)加入泥炭土,配制出不同有机质含量的泥炭土。有机质含量分别为16.7%、25%、33.3%、37.5%、50%,对应编号为R1、R2、R3、R4、R5,如图3所示;另取天然泥炭土削切制备原状样,编号为I5,如图2所示。



图2 原状泥炭土
Fig.2 Undisturbed peat soil

(2)将调配好的土样调成1.5~2倍液限的泥浆,充分搅拌后闷料24 h;再倒入高40 mm,直径61.8 mm的环刀容器内;利用常规一维固结仪对泥浆进行预压固结,分级加载至50 kPa(取样点上覆土压力约为50 kPa),将每小时变形小于0.01 mm作为制样完成的标准。预压之后,取出土样,削成高度为2 cm、直径61.8 mm的环刀样,后期进行基质吸力试验。

(3)利用制样余土,测试试样的物理性质,结果详见表1。



图3 5种重塑泥炭土试样
Fig.3 Five kinds of remolded peat soil

表1 土样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil samples

编号	含水率 $w/\%$	孔隙比 e_0	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	比重 $G_s/(g\cdot cm^{-3})$	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	有机质含量/ $\%$	纤维含量 $w_f/\%$
R1	87.2	2.2	136.1	76.2	2.39	1.4	16.7	7.0
R2	111.2	2.5	150	77.0	2.25	1.36	25	10.6
R3	150.1	2.9	200.3	96.8	2.04	1.29	33.3	14.1
R4	180.5	3.3	292	114	1.91	1.25	37.5	15.8
R5	205.4	3.8	387	136	1.66	1.10	50	21.1
I5	233.3	4.0	387	136	1.65	1.07	50	21.1

2 试验方法与步骤

采用脱湿法进行泥炭土基质吸力的测量,具体操作过程如下:

(1)将制备好的试样放在阴凉处缓慢风干,风干过程中定期称量土样质量并计算土样含水率;当达到试验含水率时再放入保湿缸内静置1 d以上,使土样内的水分均匀。

(2)将试样上下2层叠放,之间摆放3层国产双圈牌 No.203 滤纸,中间层测试滤纸的直径为50 mm,上下层保护滤纸的直径为61.8 mm,保护中间层测试滤纸不被土样污染。

(3)将处理好土样收纳进密封罐,再用保鲜膜将罐体包裹严实,将其放置在恒温环境下。经过7 d,土样和滤纸的水分平衡后,将滤纸取出并快速测量,换算出滤纸的含水率。

(4)利用公式(1)^[15]计算土样的基质吸力。

$$\begin{cases} \lg(S_m) = -0.076w_{fc} + 5.493 & w_{fc} \leq 47\% \\ \lg(S_m) = -0.012w_{fc} + 2.470 & w_{fc} > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_m 为基质吸力; w_{fc} 为滤纸的平衡含水率。

3 试验结果与分析

3.1 典型土水特征曲线介绍

非饱和土的SWCC曲线的形态较为复杂,可分

为三个区:边界效应区、过渡区和残余区^[16]。可用典型特征参数来反映其基本特性,吸力进气值和残余值是典型代表:进气值表示空气将土体孔隙中的重力水排出时对应的基质吸力;残余值表示重力水开始进入土体孔隙时对应的基质吸力。

3.2 原状土样和重塑土样 SWCC 比较

由图4可知,泥炭土原状样(I5)、重塑样(R5)的SWCC曲线与典型土水特征曲线的形态基本一致。还可以看出,泥炭土原状样的进气值与残余值均小于重塑土样;重塑土SWCC曲线的斜率略大于原状土。这是由于,重塑土和原状土虽然孔隙比相近,但是重塑土内部的孔隙分布均匀,而原状土是经过自然沉积形成的,孔隙分布不均、连通性好,空气容易进入土体内部,使土中水分散失较快,原状土样更快到达残余含水率。陈振新等^[17]测试上海软土、孙德安等^[18]研究红黏土土水特征曲线时也有类似的试验现象。

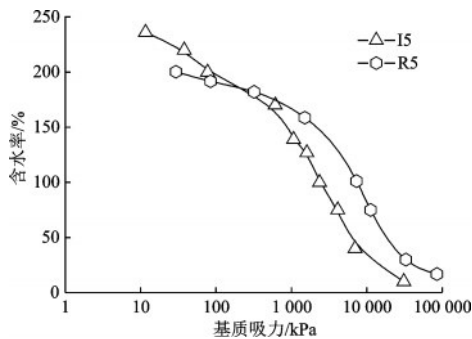


图4 土样 I5 和 R5 的土水特质曲线

Fig.4 Soil-water characteristic curves of soil samples I5 and R5

3.3 有机质含量对泥炭土土水特性的影响

从图5中可以看出,相同含水率时,随着有机质含量增大,泥炭土的基质吸力增大。同时,5种土样的进气值大小也受到有机质含量的影响,随着有机质含量的增加土样的进气值变大,从R1到R5,其进气值分别为155、586.3、965.7、1 132.4、1 486.3 kPa,表明其持水能力逐渐增强。残余值也基本满足类似的规律。

一般黏性土的土水特征曲线所研究的含水率为0~100%,在含水率为100%左右时,其基质吸力值很小,甚至为零。但由测试结果可见R2到R5在100%含水率左右时,还具有较大的吸力,如R5的

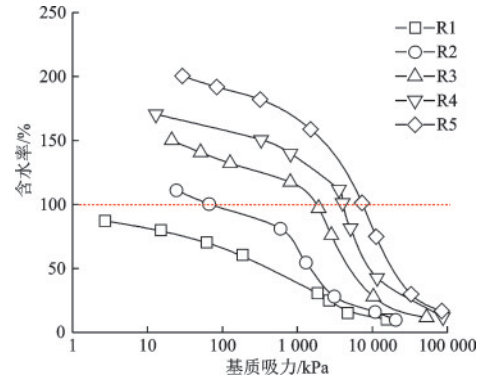


图5 R1-R5 土样的土水特征曲线

Fig.5 Soil-water characteristic curves of soil samples R1-R5

含水率在100%左右时,基质吸力能达到7288 kPa左右。因此,泥炭土的土水特性较其他种类土是十分特别的,即使在较高含水率条件下依然具有较大的基质吸力。

3.4 泥炭土土水特征曲线模型拟合

目前,针对土的SWCC曲线拟合数学模型较为常见的有三种:Gardner(1937)模型^[9]、Van Genuchten(1980)模型^[8]以及Fredlund&Xing(1994)模型^[7]。

Gardner模型是1937年由R.Gardner^[9]提出的两参数模型,具体模型为:

$$\theta_w = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a\psi^b} + \theta_r \quad (2)$$

式中, θ_w 为体积含水率(%); θ_s 和 θ_r 分别为饱和、残余体积含水率(%); ψ 为基质吸力(kPa); a 为与进气值相关的参数(kPa); b 为基质吸力大于进气值后和土样脱湿速率相关的参数。

由M.T.H.Van Genuchten^[8]于1980年提出的三参数模型来拟合非饱和土水特征曲线,具体模型为:

$$\theta_w = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^c]^b} + \theta_r \quad (3)$$

式中, θ_w 为体积含水率(%); θ_s 和 θ_r 分别为饱和、残余体积含水率(%); ψ 为基质吸力(kPa); a, b, c 均为拟合参数, a 为与土的进气状态相关; b 为与土体特征曲线的对称性相关; c 为与土的孔隙分布相关。

Fredlund&Xing模型G.由Fredlund等^[7]在1994年提出的三参数模型,具体模型为:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{[1 + (\psi/a)^c]^b} + \theta_r \quad (4)$$

式中, θ_w 为体积含水率(%); θ_s 为饱和体积含水率(%); θ_r 为残余体积含水率(%); ψ 为基质吸力

(kPa); a, b, c 为拟合参数。

利用3种模型对本次试验结果进行拟合,结果如图6所示;饱和、残余体积含水率统计结果见表2。

由表2可知,3种模型的拟合相关系数均大于0.9,拟合优良程度依次为 Van Genuchten 模型、

Fredlund & Xing 模型、Gardner 模型;拟合结果表明, Van Genuchten 模型对5种重塑土样的拟合效果较好,原状土样采用 Fredlund & Xing 模型拟合效果较好。随着有机质含量的增加,饱和、残余体积含水率增大。

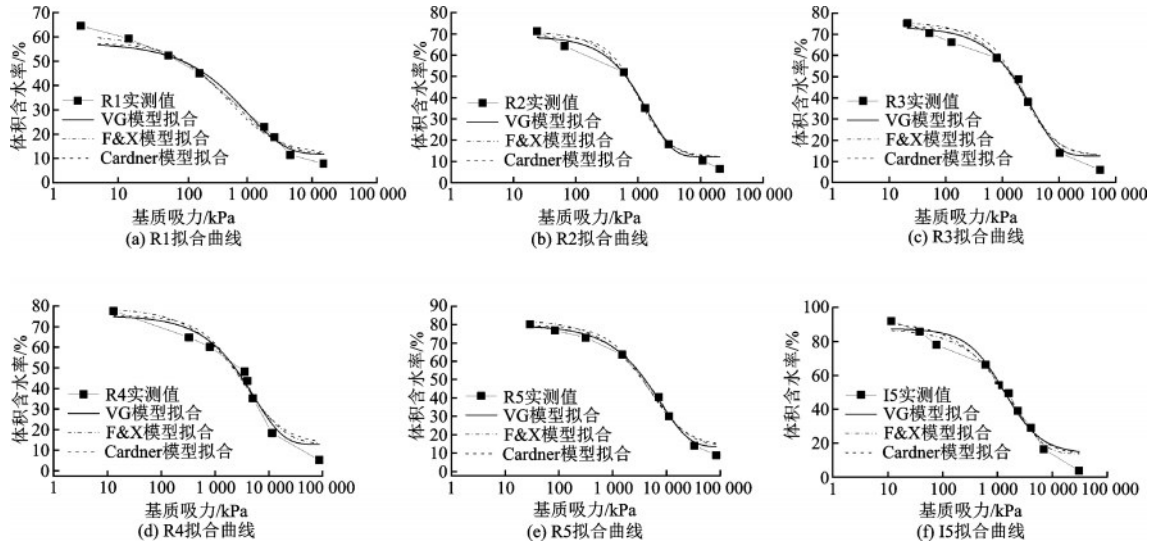


图6 R1-I5的VG、Cardner和Fredlund & Xing模型拟合

Fig.6 Fitting results of VG, Cardner and Fredlund & Xing models for R1-I5

表2 饱和、残余体积含水率及模型拟合对比

Table 2 Comparison of saturated volumetric moisture content, residual volumetric moisture content, and model fitting results

编号	$\theta_s / \%$	$\theta_r / \%$	相关系数 R^2		
			Gardner模型	VG模型	F&X模型
R1	11.63	45.85	0.979	0.987	0.987
R2	12.12	56.68	0.984	0.987	0.984
R3	12.58	60.62	0.971	0.982	0.971
R4	12.67	62.63	0.943	0.965	0.955
R5	13.29	66.11	0.982	0.994	0.986
I5	13.82	73.57	0.968	0.972	0.974

表3 不同种类土的吸力范围、进气值和残余值

Table 3 Suction ranges, intake values, and residual values of different types of soil

土样名称	吸力范围	进气值	残余值
砂土 ^[19]	1~161	2.5	20.7
黄土 ^[20]	1~330	8.2	51.4
上海软土 ^[21]	8~309 000	120~250	21 852
桂林红黏土 ^[22]	5~295 564	20	4 796
膨润土 ^[23]	153~63 720	325	8 819
粉质粘土 ^[24]	0.2~4 725	52.1	1 939
Palontina 黏土 ^[2]	0.15~898.6	2.9	106.1
Cloumbia 砂土 ^[2]	1.4~44.6	1.7	30.3
R1	2.71~15 546	155	4 796.7
R2	24.22~20 481	586.3	3 034.2
R3	21~53 439	965.7	11 136.7
R4	13~87 524	1 132.4	21 286
R5	29~84 749	1 486	35 101.5
I5	11~30 846	675.6	7 468

单位:kPa

3.5 泥炭土与其他土类SWCC曲线对比

从国内外文献中获取不同区域不同种类土的土水特征曲线及相关数据(见表3),和泥炭土进行比较,从而对泥炭土土水特征有更为直观的认识。

由图7可知泥炭土的体积含水率明显高于其他种类的土。一般来说,土颗粒粒径越小,土体的持水能力越强,土的进气值越大,残余含水量也越高。

如砂土颗粒较大,所以相对于粉土和粘土,其进气值、残余值都较小;膨润土的进气值和残余值一般

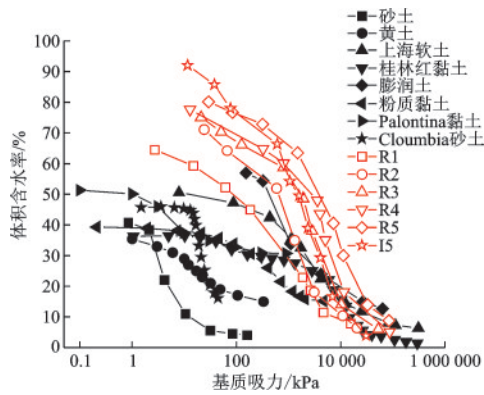


图7 泥炭土与其他种类土的土水特征曲线

Fig.7 Soil-water characteristic curves of peat soil and other types of soil

是最高的。此外,土的矿物成分对土水特征曲线也有一定影响,如膨润土中蒙脱土、伊利土等亲水性强的矿物成分较多,使其通常表现出吸力较大、残余含水率较高的特点。

高分解度泥炭土的成分比一般土复杂,既含有无机矿物,也含有大量有机质,有机质主要为腐殖质;有机质颗粒比无机矿物颗粒的粒径小,分子结构疏松,微小孔隙多,持水性和吸附性都较强。有机质颗粒吸附在无机粘土矿物颗粒表面,形成特殊的架空絮状结构。另外,有机质颗粒本身带有较多负电荷,使它具有吸附阳离子的性质。因此,随着土中的有机质含量的增加,土的持水能力增强,土的进气值增大,残余含水率亦随之增加,边界效应区曲线逐渐变缓,脱水的速率变小。

4 结论

(1)泥炭土原状土样的进气值和残余值均小于重塑土样,持水能力相对略差。

(2)有机质含量对土样的土水特征曲线有很大影响,随着有机质含量的增加,R1—R5进气值从155 kPa增大到了1 486 kPa,残余值从4 796.7 kPa增大到了35 101.5 kPa。

(3)拟合度分析表明, Van Genuchten模型对5种重塑土样的拟合效果较好,原状土样采用 Fredlund & Xing模型拟合效果较好。

(4)相较一般黏性土、粉土、砂土及黄土、红黏土等非有机质土,泥炭土的进气值和残余含水率较大,表明其具有的持水能力较强。

参考文献:

- [1] Fleureau J M, Vebrugge J C, Huerpog J. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6):1341-1357.
- [2] Black W P M. A method of estimating the California bearing ratio of cohesive soils from plasticity data [J]. Geotechnique, 1962, 12(4):271-282.
- [3] 陈东霞, 龚晓南. 非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(7):1885-1891.
Chen D X, Gong X N. Experiment and modeling of soil-water characteristic curve of unsaturated residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7):1885-1891. (in Chinese)
- [4] 孔令伟, 钟方杰, 郭爱国, 等. 杭州湾浅层储气砂土应力路径试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2209-2214.
Kong L W, Zhong F J, Guo A G, et al. Experimental study of stress path of shallow gassy sand of Hangzhou Bay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2209-2214. (in Chinese)
- [5] 蔡国庆, 刘祎, 徐润泽, 等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增2):13-16.
Cai G Q, Liu Y, Xu R Z, et al. Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 2):13-16. (in Chinese)
- [6] 吴珺华, 杨松. 滤纸法测定干湿循环下膨胀土基质吸力变化规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15):126-132.
Wu J H, Yang S. Changes of matric suction in expansive soil under drying-wetting cycles using filter paper method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15):126-132. (in Chinese)
- [7] Fredlund G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521-532.
- [8] Van Genuchten M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [9] Gardner R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range [J]. Soil Science, 1937, 43(4):277-283.
- [10] 桂跃, 余志华, 刘海明, 等. 高原湖相泥炭土次固结特性及机理分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8):1390-1398.

- Gui Y, Yu Zh H, Liu H M, et al. Secondary consolidation properties and mechanism of plateau lacustrine peaty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1390-1398. (in Chinese)
- [11] 高会议, 王益权. 泥炭配合基质水分特征曲线的特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 60-64.
Gao H Y, Wang Y Q. The study on characteristics of water characteristic curve of mixed struma of the peat and soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 60-64. (in Chinese)
- [12] 孟国涛. 昆明南市区地面沉降研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003: 21-31.
Men G T. Research on ground subsidence in kunming south urban district[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2003: 21-31. (in Chinese)
- [13] Paula C, Daveyl J, Astley H. Estimating greenhouse gases emissions from horticultural peat soils using a DNDC modelling approach[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233(MAR.1): 681-694.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard classification of peat samples by laboratory testing[S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [15] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933.
Bai F Q, Liu S H, Yuan J. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928-933. (in Chinese)
- [16] 叶为民, 白云, 金麒, 等. 上海软土土水特征的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 260-263.
Ye W M, Bai Y, Jin Q, et al. Lab experimental study on soil-water characteristics of Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 260-263. (in Chinese)
- [17] 陈振新, 孙德安. 非饱和上海软土的土-水和变形特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(1): 98-103.
Chen Zh X, Sun D A. Soil-water and deformation characteristics of unsaturated shanghai soft clays[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2012, 18(1): 98-103. (in Chinese)
- [18] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351-356.
Sun D A, Gao Y, Liu W J, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 351-356. (in Chinese)
- [19] 田湖南, 孔令伟. 细粒对砂土持水能力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 56-60.
Tian H N, Kong L W. Experimental research on effect of fine grains on water retention capacity of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 56-60. (in Chinese)
- [20] 王娇, 邵生俊, 陈攀. 非饱和重塑黄土的土水特性及压缩屈服与湿陷性的研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增2): 217-222.
Wang J, Shao Sh J, Chen P. Experimental study of soil water properties, compression yield and collapse deformation of unsaturated remolded loess. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup 2): 217-222. (in Chinese)
- [21] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 347-349.
Ye W M, Tang Y Q, Cui Y J. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2005, 27(3): 347-349. (in Chinese)
- [22] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3345-3351.
Sun D A, Liu W J, Lyu H B. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3345-3351. (in Chinese)
- [23] 孙德安, 孟德林, 孙文静, 等. 两种膨润土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 973-978.
Sun D A, Meng D L, Sun W J, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 973-978. (in Chinese)
- [24] 兰天, 秦卫星, 胡惠仁, 等. 黏粒含量对粉质黏土土水特性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 128-132.
Lan T, Qin W X, Hu H R, et al. Experimental study on impacts of clay content on soil-water characteristics of silty clay[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 128-132. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)