

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.05.001

非饱和高液限土土-水特性试验研究

陈永辉^{1,2}, 李秉宜^{1,2}, 孔庆东^{1,2}, 赵泽涛^{1,2}, 夏波³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 金华市金义市新区管委会, 浙江 金义 321037)

摘要: 为研究非饱和高液限土土-水特性及其不同条件下土-水特性试验的适用性, 分别采用滤纸法、非饱和土固结仪法和现场试验法对公路边坡工程中非饱和高液限土进行测量土-水特征曲线的试验研究。结果表明: 滤纸法测得的土-水特征曲线与室内方法存在差距, 大部分在室内测得土-水特征曲线的回滞圈内, 对曲线进行拟合得到含水率与基质吸力对数呈线性关系; 室内非饱和土固结仪法试验得到的土-水特征曲线出现滞回效应, 曲线利用 VG 模型可较好地拟合; 现场监测得到的土-水特征曲线(SWCC)与室内试验方法的结果存在差距, 但大部分在吸湿曲线和脱湿曲线之间, 更接近吸湿曲线, 曲线受土体上覆应力影响, 上覆应力越大曲线越陡, 且基质吸力与含水率成负相关, 二者不存在滞后现象, 曲线可利用线性函数较好地拟合。

关键词: 高液限土; 非饱和土; 土-水特征曲线; 基质吸力; 含水率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)05-0001-05

Experiments on Soil Water Characteristics of Unsaturated High Liquid Limit Soil

CHEN Yonghui^{1,2}, LI Bingyi^{1,2}, KONG Qingdong^{1,2}, ZHAO Zetao^{1,2}, XIA Bo³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Jinyi New District Management Committee of Jinhua City, Jinyi, Zhejiang 321037, China)

Abstract: To acquire the unsaturated soil water characteristics of high liquid limit and its applicability of soil water characteristic test under different conditions, the soil water characteristic curve of unsaturated high liquid limit soil in highway slope engineering was tested by filter paper method, unsaturated soil consolidation method and field test method. The results show that there is a gap between the soil water characteristic curve measured by filter paper method and interior method, most in hysteresis circle of water characteristic curve of soil measured indoor and the fitting curves showed a linear relationship with the water content and matrix suction in logarithm; Soil water characteristic curve obtained from indoor unsaturated soil consolidation test instrument appeared hysteresis effect, which can be better fitting by using the VG curve model; Soil water characteristic curve (SWCC) monitoring data from outdoor exists a gap with the experiment results, but most are between the moisture absorption curve and desorption curves, and closer to the moisture absorption curve, which can be influenced by soil overburden stress, the greater overburden stress, the steeper the curve, and the matrix suction and water content was negatively correlated, there is not hysteresis between the curves, also the curves can be fitted well by a linear function.

Keywords: high liquid limit soil; unsaturated soil; soil water characteristics; matric suction; moisture content

公路建设中不可避免地会遇到大量的高液限土, 高液限土吸湿、持水能力强, 土体结构遇水后易

收稿日期: 2017-05-14

修稿日期: 2017-06-16

基金项目: 中央高校基本费项目(2016B43314); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2015J06)

作者简介: 陈永辉(1972—), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理与环境岩土等方面的教学和科研工作。

E-mail: yonghuich@163.com

通信作者: 李秉宜(1990—), 男, 江苏苏州人, 博士研究生, 研究方向为地基加固、软基处理。E-mail: bylee17@163.com

破坏,工程性质差,如果在利用和治理上处理不当,将引起路基不均匀沉降、边坡滑坡和滑塌等事故。目前土体强度理论大多将非饱和土简化为饱和状态计算,而对于高液限土边坡处于非饱和状态时,土体基质吸力对土体强度有影响,研究高液限土的土-水特征对高液限土边坡治理具有重要意义。土中基质吸力反映了处于非饱和状态下土的持水能力、土中水气运移规律及非饱和土强度等工程特性,是研究非饱和土性质的关键。土-水特征曲线是表征土体基质吸力与含水率变化之间的关系^[1],由土-水特征曲线的特征值可以推导非饱和土的渗透性、抗剪强度、持水系数等参数^[2-4],是非饱和土研究的重要内容。

目前对膨胀土土-水特征研究较多,但对无膨胀性高液限土的土-水特征及土-水特征曲线试验研究较少。室内试验获得 SWCC 的方法主要有轴平移技术、电位计法、滤纸法等^[5-8],现场获得 SWCC 主要通过张力计进行试验。孙德安等^[9]采用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液法对桂林红黏土进行了土-水特征曲线试验研究。孙志杰^[10]给予土水特征曲线试验分析降雨对土质边坡含水率的影响,结果表明降雨入渗深度与土体渗透性有关。褚进晶等^[11]对扬州地区黏性土进行了土-水特征曲线试验研究,试验表明土的初始干密度越大,进气值越大,脱水速率越小。宋亚亚等^[12]给予非饱和土固结仪研究了应力作用下非饱和和重塑黏土土-水特征曲线研究,结果表明竖向应力越大,试样的空气进入值越大,曲线越平缓。基质吸力与含水率紧密联系,通过土-水特征曲线表达。基于这种关系,不少学者研究了利用土-水特征曲线来预测抗剪强度中基质吸力的贡献^[1,13-15]。

本文分别采用滤纸法、非饱和土固结仪法和现场测试法获得高液限土的土-水特征曲线,并比较三种方法的适用性,为在不同条件下获得高液限土的土-水特征曲线提供参考;对滤纸法和非饱和土固结仪法得到的土-水特征曲线进行函数拟合,分析现场张力计法得到的土-水特征曲线的影响因素及基质吸力与含水率变化规律。

1 试验材料

试验土样取自浙江龙浦高速公路 K15 + 650 附近,其基本物理性质指标见表 1,级配曲线见图 1。土样初始含水率约为 36.8%,初始干密度约为 1.3 g/cm³,将土样不同程度风干至含水率范围在 6% ~ 36% 之间,密封储存备用。

表 1 原土物理力学性质指标

含水率 /%	天然密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙 比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%
36.8	1.73	1.23	87.2	43.3	30.6

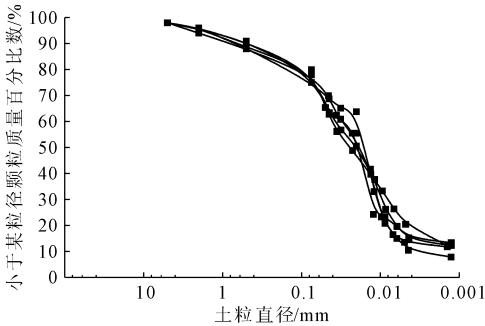


图 1 高液限土粒径分布曲线

2 试验方法

2.1 滤纸法

试验步骤:利用所取土样取环刀 2 个,进行称量,计算土样的密度,并取土样进行含水率的量测。然后,用镊子取 3 张经过烘箱烘烤的“双圈”牌 No.203 型滤纸,利用高精度电子天平量取中间的滤纸重量,用镊子把 3 张滤纸夹到两个环刀的中间,并用胶纸将两个环刀缠紧,放到密封罐中进行静置 10 d,确保滤纸的吸水率达到稳定。10 d 后取出试样,将胶带纸去掉,并用镊子取中间的滤纸进行量测,为尽量减少滤纸与周围空气接触而发生水分变化,要求整个时间必需在 30 s 内完成。得到试验完成后中间滤纸的质量,利用标定曲线,计算得到基质吸力值,同时利用烘干法测得土的含水率。分别在土中加入不同量的水,配成不同含水率的试验,重复上述步骤,得到不同含水率与吸力的关系。

2.2 非饱和土固结仪法

土水特征曲线试验仪器采用河海大学与江苏永昌科教仪器制造有限公司联合研制的 FGJ-20 型非饱和土固结仪。该仪器由台架、气压室、压缩容器、竖向加载装置、排水及体测量测系统、位移量测系统等部分组成,采用轴平移技术来控制试样的吸力。试样尺寸为直径 Φ61.8 mm × 高 H20 mm,水平面积 A = 30 cm²。

试验前先将陶土板饱和,排除管道内积聚的气泡后完成装样,待稳定后,逐级施加 0.1 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、300 kPa、150 kPa、80 kPa、50 kPa、10 kPa、0.1 kPa 的基质吸力。通过轴平移技术,保持孔隙水压力为

零,改变孔隙气压力来控制基质吸力。每一级吸力达到平衡后,通过体变管中水体积的变化测量土样含水率的变化。由于非饱和固结仪兼有吸力控制、水体积量测的功能,故本文研究吸力控制、水体积量测在同一台仪器中进行。

土样制备、实验仪器准备等工作完成之后,即可进行装样,开始试验。具体步骤如下:

(1) 设置对比管,分别记录百分表、体变管、对比管的初始读数。

(2) 将非饱和土固结仪的管线连接好后,把饱和的陶土板和饱和土样依次放入的压力室内。

(3) 往体变管中加水,观察管线内有无明显气泡,直至底盘和软管中都没有气泡即完成加水排气过程,关闭止水阀门。

(4) 调节体变管中液面至试样的 1/2 处,保持 24 h。

(5) 使体变管中液面下降 1 cm,即相当于施加了 0.1 kPa 的基质吸力,观察并记录每台仪器体变管内的液面变化以及对比管中的示数,直至 24 h 内变化小于 0.1 ml,可认为土样达到吸力平衡,同时记录百分表的读数。

(6) 使体变管中液面相对于初始状态下降 10 cm,即相当于施加了 1 kPa 的基质吸力,观察并记录每台仪器体变管内的液面变化以及对比管中德示数至平衡状态,同时记录百分表的读数。

(7) 将体变管液面加回初始状态,打开空气压缩机和各台仪器的进气阀门,通过调节旋钮依次施加 10 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、300 kPa、200 kPa、100 kPa 的气压,即相当于施加了同等大小的基质吸力,观察并记录每台仪器体变管的液面变化以及对比管中的示数至平衡状态,同时记录百分表的读数。

(8) 将气压减为 0,关闭空气压缩机和各台仪器的进气阀门,先后重复操作第 7 步和第 5 步。

(9) 打开压力室,分别取一定量的土样置于称量过空盒质量的铝盒中,称量盒加湿土的质量。

(10) 将盒置于烘箱内,设定在 105℃ ~ 110℃ 的恒温下烘至恒重。

(11) 将铝盒从烘箱中取出,盖上盒盖,冷却至室温后称量盒加干土的质量,并计算含水率。

2.3 现场试验法

为了研究非饱和高液限土边坡由于降雨影响造成边坡失稳的机理及不同深度下基质吸力与含水率变化规律,在边坡表面进行降雨监测和降雨时基质

吸力数据收集。本试验选取龙浦高速公路 K16 + 560—K16 + 600 路段护坡作为试验边坡。现场量测主要通过张力计联合 TDR 法。

工作原理:张力计可通过传感器和土中水的直接交换,可以测量出孔隙压力。负压力可通过高进气值陶瓷材料的饱和孔隙传送,因此,水可以在张力计中自由运动,直至传感器中的内压与土孔隙水的基质势相等为止。如果土体被吸湿,水流将朝相反方向(即从土向测量系统)流动,直至新压力达到一个新的平衡。因为传感器顶端可以让溶液渗透通过,孔隙水的渗透势能对压力测量结果不产生任何影响。如果考虑了重力势能作用(即对传感器探头和压力计两者之间的高程差进行修正),该方法可以直接用来测量基质吸力。TDR 仪通过测量土壤含水率变化引起电磁信号在 TDR 探头上传递速度的变化来量测土壤水分。两者联合可测定现场边坡基质吸力与含水率变化。

在边坡设置翻斗式雨量计,每天收集一次降雨量,监测当地雨水情况。在边坡表面分别埋设 3 根张力计(监测基质吸力),张力计的埋设深度分别为 30 cm,每天采集一次数据,绘制基质吸力曲线;埋设含水率探头,埋设 3 个,埋设深度也保持 30 cm,使得基质吸力和体积含水率保持在同一个深度。

3 试验结果

3.1 滤纸法

每组试验,测得滤纸含水率。国内学者对“双圈”牌 No. 203 型滤纸的含水率与吸力关系进行标定^[16],得到 No. 203 型滤纸率定方程即式(1),利用试验所得滤纸含水率,根据下式进行计算得到滤纸法得到的吸力。

$$\begin{cases} \lg S = 5.493 - 0.076w_f, w_f \leq 47\% \\ \lg S = 2.470 - 0.012w_f, w_f > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

得到 6 组不同体积含水率下土样的基质吸力(见表 2)。

表 2 滤纸法计算结果

组别	土样体 积含水 率/%	滤纸 含水 率/%	判断所 属分段	lgS	基质吸力 S/kPa
1	39.6	118.18	> 47	1.05	11.27
2	38.2	88.31	> 47	1.41	25.72
3	35.6	66.76	> 47	1.60	39.70
4	28.6	35.16	< 47	2.82	662.15
5	23.7	33.50	< 47	2.95	885.23
6	16.1	24.28	< 47	3.65	4445.18

3.2 非饱和土固结仪法

在 0 ~ 400 kPa 范围内进行了高液限土的非饱和土固结试验,获得脱湿和吸湿两条曲线,见图 2。在脱湿曲线上求得该种高液限土进气值约为 50 kPa。吸湿与脱湿曲线有较大差距,产生了滞回效应,曲线存在较大滞回环。

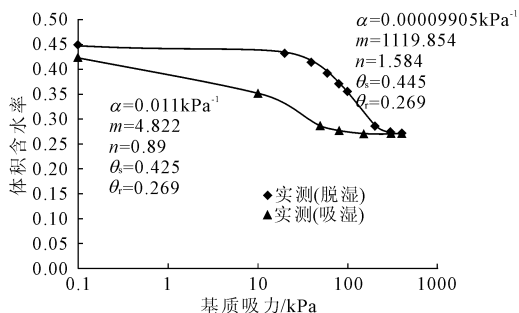


图 2 室内土-水特征曲线参数拟合

3.3 现场试验法

2014 年 11 月对试验边坡进行监测,观测期间降雨量如图 3 所示。经过 21 d 观测得到基质吸力与含水率随时间变化图,选取边坡 30 cm 与 60 cm 深处分析,分析结果如图 4 和图 5 所示。

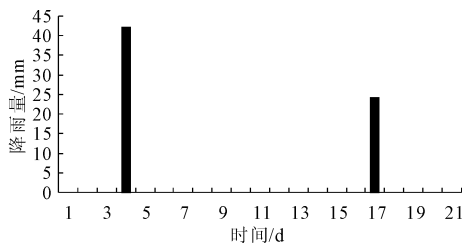


图 3 观测期间降雨量

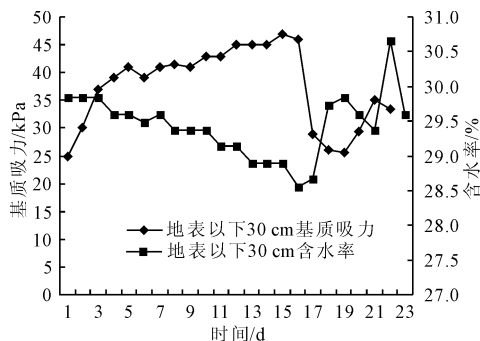


图 4 30 cm 处含水率与基质吸力变化

本观测期降雨量较大,持续时间短,相应地,基质吸力与含水率都在较小范围变化。观测发现,现场测得的基质吸力与含水率变化保持一致,二者没有存在滞后现象。

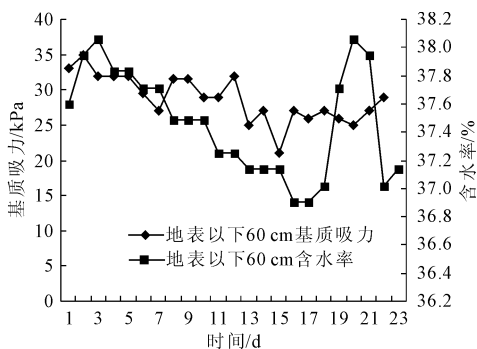


图 5 60 cm 处含水率与基质吸力变化

4 试验结果分析

4.1 滤纸法

绘制土-水特征曲线如图 6 所示。

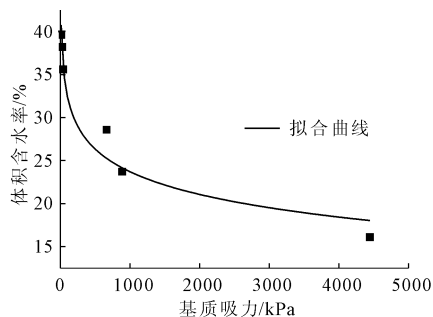


图 6 滤纸法高液限土-水特征曲线

随着含水率的增加,基质吸力逐渐减小,用对数函数进行拟合,得 $\theta = -3.80 \ln(S) + 49.95$, $R^2 = 0.960$ 。

滤纸法在量测土基质吸力的试验时,较为方便,在准备充分的条件下,可同时进行多组试验,得到土-水特征曲线上的各个点,绘制完整的曲线,大约需要 10 d 的试验周期。

4.2 非饱和土固结仪法

为了建立土-水特征曲线的数学模型,引入一个无量纲的含水率变化量^[5],由

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

其中, θ 为对应体积含水率; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率。

Van Genuchten(1980) 提出了一个平滑的、封闭的参数数学模型,用于拟合土-水特征曲线,其表达式如下:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (3)$$

式中, α , m 与 n 均为拟合参数。该模型的数学表达式包含了曲线中转折点的信息。将上式带入,得:

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

为了更好的拟合此曲线,将 θ_s 与 θ_r 也作为待定系数。通过 SPSS 软件进行参数拟合,得到各参数,见表 3。

表 3 VG 模型参数拟合土 - 水特征曲线结果						
曲线类别	α/kPa^{-1}	m	n	θ_s	θ_r	R^2
脱湿曲线	0.0009905	1119.854	1.584	0.455	0.269	0.997
吸湿曲线	0.0110000	0.890	4.822	0.425	0.269	0.998

通过相关系数与拟合曲线图(见图 2),可以发现 VG 模型能很好的拟合该曲线。得到的饱和体积含水率与实际测量值接近。VG 模型中, α 与进气值有关, n 与粒径有关, m 与曲线的对称性。为了简化, Van Genuchten 提出用 $m = 1 - \frac{1}{n}$ 或 $m = 1 - \frac{1}{2n}$ 进行参数简化,只需得到其中一个参数,但降低了使用范围。本研究中高液限土的土 - 水特征曲线发现,吸湿曲线拟合中 $m = 0.890, n = 4.822$,能较好地利用 $m = 1 - \frac{1}{2n}$ 进行简化,而脱湿曲线由于曲线的对称性较弱,不适合用该方法简化。

4.3 现场试验法

将 20 d 观测数据整理得到三个边坡深度的土 - 水特征曲线(见图 7),并对曲线利用函数拟合,分析结果如下:

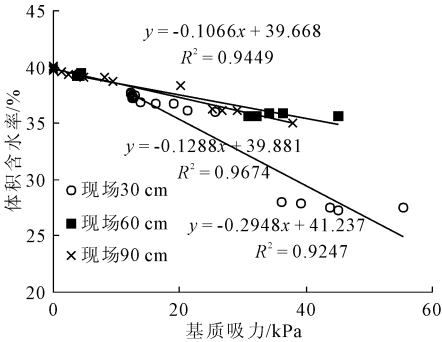


图 7 边坡现场试验得到土 - 水特征曲线

现场试验三个不同深度处得到的土 - 水特征曲线有明显不同。30 cm 处的曲线较陡,并且在基质吸力 20 kPa 与 38 kPa 之间时,曲线较陡,即随着在较小的范围内,对应体积含水率的变化较大;60 cm 与 90 cm 深度处的曲线则比 30 cm 处的更平缓;而 60 cm 处的曲线比 90 cm 处的更陡。这是由于土 - 水特征曲线的陡缓与土体承受的上覆应力有关。由图 4 和图 5 可以发现上覆应力越小,曲线越平缓,而上覆应力较大的土体,则变化较陡,即在进气值后的

曲线斜率越大。
现场得到 SWCC 与室内存在差距,但大部分在吸湿曲线和脱湿曲线之间,更接近吸湿曲线,这是因为现场土在天然环境中经历过许多干湿循环,并且曲线的形态与上覆应力有关。

经分析,两侧边坡的土 - 水曲线可较好地用线性函数拟合,拟合结果见图 7。在现场试验时,可考虑利用线性函数进行土 - 水特征曲线的预测与取值。

为对比滤纸法、室内非饱和土固结仪法以及现场测试法,将三种方法的土 - 水特征曲线结果绘制在同一图中,如图 8 所示。

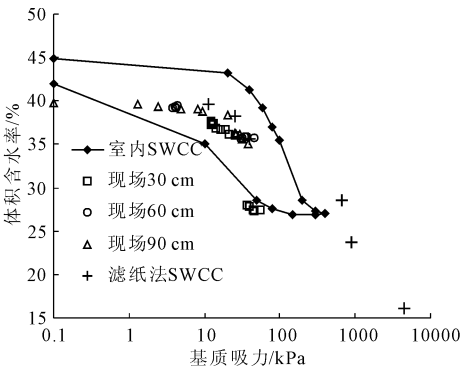


图 8 不同方法得到的土 - 水特征曲线

由图 8 对比发现,滤纸法及现场试验法的土 - 水特征曲线大部分都在室内非饱和土固结仪所得的土 - 水特征曲线的吸湿曲线与脱湿曲线之间,即滞回圈内。滤纸法由于人为操作及不可控因素多,与室内试验结果存在差距。现场试验由于受到场地及气候因素,所测试范围较小,曲线形态受土体上覆土压力所影响。三种方法中滤纸法和现场张力计法最为简便,张力计法更为直观,适合用于现场及时监测。非饱和土固结仪法更准确,通过对曲线拟合可以得到曲线参数也更为准确。

5 结 论

- (1) 经分析,滤纸法测得的土 - 水特征曲线含水率与基质吸力对数成线性关系;非饱和土固结仪法得到的土 - 水特征曲线可利用 VG 模型拟合,吸湿曲线与脱湿曲线存在滞回效应。
- (2) 滤纸法由于受到温度和人为操作的因素,和非饱和土固结仪得到的曲线存在偏差,但总体趋势一致,在条件不允许的情况下,可以考虑这种方法测得曲线参数。

(3) 现场张力计试验测得的土-水特征曲线(SWCC)与室内张力计试验方法的结果存在差距,土-水特征曲线与土体上覆应力有关,上覆应力越大,曲线越陡。现场土-水特征曲线可用线性函数较好地拟合,在现场条件有限时可考虑用线性函数进行土-水曲线预测与取值。

参考文献:

- [1] Oh S, Lu N, Yun K K, et al. Relationship between the soil-water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from residual soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(1):47-57.
- [2] 董倩,侯龙,赵宝云.基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响[J].中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10):4017-4021.
- [3] 梅岭,姜朋明,李鹏,等.非饱和土的土水特征曲线试验研究[J].岩土工程学报, 2013, 35(S1):124-128.
- [4] 倪晓雯,李春良.土水特征曲线在边坡稳定分析中的应用[J].建筑技术, 2015(S2):154-159.
- [5] 谷琪,王家鼎,全云莉,等.滤纸法测非饱和黄土土水特征曲线试验及拟合研究[J].土壤通报, 2016, 47(3):588-593.
- [6] 陈高峰,杨帅东,苏涛,等.基于非饱和土固结仪的土水特征曲线试验研究[J].人民珠江, 2016, 37(11):51-54.
- [7] 贺建清,罗婉,蒋鑫,等.非饱和高液限红粘土土-水特征试验研究[J].自然灾害学报, 2014, 23(6):249-255.
- [8] 秦鸿飞.非饱和膨胀土土水特征曲线试验研究[J].河南水利与南水北调, 2013(18):81-82.
- [9] 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.
- [10] 孙志杰.降雨对非饱和土质边坡含水率的影响分析[J].水利与建筑工程学报, 2015, 13(6):75-78.
- [11] 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.
- [12] 宋亚亚,卢廷浩,季李通.应力作用下非饱和重塑黏土土水特征曲线研究[J].水利与建筑工程学报, 2016, 14(2):147-150.
- [13] 方庆军,崔猛.干湿循环作用下高液限土抗剪性能试验研究[J].施工技术, 2015(1):84-88.
- [14] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报, 2014, 36(2):201-272.
- [15] 李哲,司高华,刘东旭.黏土土水特征曲线的实验研究及理论分析[J].环境科学与技术, 2013, 36(S2):109-112.
- [16] 白福青,刘斯宏,袁骄.滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J].岩土力学, 2011, 32(8):2336-2340.