

DOI: 10.11779/CJGE2018S1018

接触面滑坡滑带土吸力的滤纸法测试

谌文武^{1, 2}, 刘鹏¹, 刘伟¹, 林高潮¹, 许贺¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 吸力是控制非饱和土状态的一个决定性因素, 滤纸法就是一种间接测量吸力的方法, 具有成本低、测量范围大、测量精度高等优点。滤纸法测试土样取自甘肃省天水市一黄土-泥岩接触面滑坡的滑带土, 该土样的强度对含水率变化非常敏感, 因此对该滑带土的非饱和特性的研究至关重要。试验中首先测定了该滤纸干湿两种状态下的平衡时间, 然后对试样分别采用干湿两种状态下的双圈牌 203 和 Whatman No.42 型滤纸进行了对比试验, 运用接触式和非接触式方法分别测定试样的基质吸力和全吸力。通过分析对比低吸力段滤纸含水率, 确定了滤纸法测试该类土的下限吸力值。采用 Oringin 软件对试样全阶段基质吸力曲线拟合, 确定了相应的拟合参数和合适的拟合方程。为进一步研究和治理该滑坡提供了参考价值。

关键词: 黄土-泥岩滑坡; 滑带土; 吸力; 土水特征曲线; 滤纸法

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0112-06

作者简介: 谌文武(1966-), 男, 河南信阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害与文物保护方面工作。E-mail: sungp@lzu.edu.cn。

Suction tests on sliding soil in interface landslide based on filter paper method

CHEN Wen-wu^{1, 2}, LIU Peng¹, LIU Wei¹, LIN Gao-chao¹, XU He¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in West China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Suction is a decisive factor to control the state of unsaturated soils. The filter paper method is an indirect method for measuring suction, which has the advantages of low cost, large measuring range and high precision. The soil samples are collected from a loess-mudstone landslide in Tianshui, Gansu Province. The strength of soil samples is very sensitive to change of soil water content, so the study on the properties of unsaturated soils of the sliding soil is essential. The equilibrium time of the filter paper is measured under wet and dry conditions. Then, the samples are tested by double-circle 203 and Whatman No. 42 filter papers under dry and wet conditions. The contact and Non-contact methods are used to measure the matrix suction and total suction respectively. The lower suction value of this kind of soil is determined by analyzing and comparing the moisture content of filter papers in low suction section. The Oringin software is used to fit the matrix suction curve of the samples, and the corresponding fitting parameters and equation are determined so as to provide a reference for further study and treatment of the landslide.

Key words: loess-mudstone landslide; sliding soil; suction; SWCC; filter paper method

0 引言

经典土力学均是以饱和土体为研究对象, 而在工程实践中, 遇到的诸如膨胀土的胀缩、黄土的湿陷、残积土上工程设计等大多数工程地质问题都是非饱和土力学问题^[1]。与饱和土体相比, 非饱和土最大的特点就是存在与土的含水率相关的吸力, 吸力是控制非饱和土状态的一个决定性因素, 但是在工程实践中难以准确的测量^[2]。滤纸法作为一种间接量测土体吸力的测试方法, 具有成本低、操作简单、量测范围大、精度高等优点, 因此自 Gardner 等^[3]于 1937 年首次提

出后就被广泛的应用。目前, 国外有关滤纸法的研究较多采用 Whatman's No.42 和 Schleicher & Schuell No.589-WH 两种型号的滤纸, 相关研究已经比较成熟, 但国内关于滤纸法的研究还是较多的集中在滤纸的率定方面^[4-6], 并且已有的研究中, 很少提到滤纸法测试中涉及到的平衡时间、密封环境、测试中试样的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目
(2014CB744701)

收稿日期: 2018-02-24

变化情况、不同测试方法的影响以及原状样的测试方法等问题。

滑坡是否活动通常受滑带土的应力状态和强度变化影响, 这些变化最终取决于滑带土的特性^[7], 同时滑坡的发生又离不开水的参与, 因此开展滑带土的非饱和特性研究成为了现在研究滑坡的热点, 无论是研究其持水特性, 还是非饱和强度问题, 都离不开土体吸力的测定及土水特征曲线的研究^[8]。同时由于其独特的结构性, 测试时更多地选择滑带土的原状试样进行。但是对于高黏粒含量的滑带土, 由于其失水收缩性质显著, 其原状土体试验过程中必然伴随着土样体积的改变, 因此难以获得准确的吸力值。试验中通过采用体积含水率代替质量含水率的方式可以有效的减少试样收缩带来的影响^[9-10]。本研究采用滤纸法测试了具有明显胀缩性滑带土的土水特征曲线, 通过与轴平移方法测得的曲线对比, 提出了滤纸法测试胀缩性滑带土的有效方法和相关的注意事项。

1 试验原理和方法

1.1 压力板试验

压力板试验采用的仪器为英国 GEO-experts 公司生产的土水特征压力仪, 配有 15bar 陶土板。将制备好的 3 个平行滑带土试样, 饱和后放入压力板仪的压力室中, 逐级施加压力至 700 kPa, 测定每级压力下试样的含水率, 然后绘制试样的土水特征曲线, 可用来与滤纸法测得的土水曲线进行对比分析。

1.2 滤纸法试验

该方法遵循热力学平衡原理, 通过将土体和滤纸密闭于蜡封环境中, 使土体-滤纸-空气间的水气达到平衡, 由滤纸的平衡含水率来反映土体的吸力值。在恒定温度 T 下, 由于土体中水分与空气中水分存在自由能差, 水分之间互相迁移直至达到稳定状态。土中的总吸力为^[11]

$$\psi = -\frac{RT}{V} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1)$$

式中, ψ 为总吸力, R 为通用气体常数, T 为绝对温度, V 为纯水的摩尔体积, P/P_0 为相对湿度, 其中, P 为孔隙水部分蒸气压, P_0 为同温度下纯水平面上方的饱和蒸气压。

2 试验方案

2.1 试样参数及制备

本研究选择的试样为甘肃省天水市某滑坡滑带土, 该滑坡为一典型的黄土-泥岩滑坡。取土位置为一揭露地下水的探坑底部, 土样为黄土、泥岩(呈红

色或绿色)混合物, 本例中滑带土与天水其他位置滑带土主要成分对比已有刘伟^[12]通过 XRD 矿物成分分析测得, 详见表 1。滑带土的基本物理参数: 天然含水率=25.44%, 天然密度=1.95 g/cm³, 干密度=1.54 g/cm³, 比重=2.74, 饱和含水率=28.22%, 塑限含水率=22.78%, 液限含水率=40.06%, 塑性指数=17.28。采用直径和高度分别为 4, 1 cm 的小环刀直接在野外取回的原状土柱上切取, 并放入保湿器中待用。

土的颗粒曲线见图 1, 从颗粒曲线中可见粒径 0.075~0.005 mm 之间的颗粒占 71%, <0.005 mm 颗粒占 27.57%, 结合土的液塑限值, 该土可定名为低液限黏土。

表 1 接触面滑坡滑带土主要矿物成分

Table 1 Main mineral composition of sliding zone soil on contact surface (%)

成分	样品 (%)			
	天水黄土	本例滑带土	相似滑坡 滑带土-1	相似滑坡 滑带土-2
角闪石	4.4	4.5	3.2	3.5
黏土矿物	24.9	26.7	24.8	23.3
硬石膏	0.9	0.7	1.6	0.8
石英	36.1	40.5	40.5	44.3
钾长石	3.7	6.5	9.0	1.8
斜长石	14.0	12.2	17.2	15.0
方解石	11.6	6.2	2.3	7.4
辉石	2.2	2.7	—	3.5
其他	2.3	—	1.4	0.4

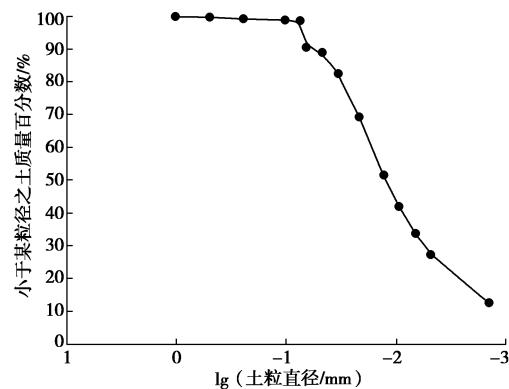


图 1 滑带土颗粒曲线

Fig. 1 Grain-size curve of sliding soil

2.2 试验用具

试验所用的仪器设备包括: ①电子天平, 精度为 0.0001g; ②烘箱, 控制温度(105)±5℃; ③恒温箱(±1℃); ④锡箔纸; ⑤称量铝盒; ⑥滤纸; ⑦温度计、镊子、橡皮手套、绝缘胶带、保鲜膜、石蜡等。

试验所用的滤纸为两种, 一种是国产双圈牌

No.203 型(滤纸灰分质量分数 $\leq 0.009\%$), 另一种是进口的 Whatman No.42 型滤纸(灰分的质量分数 $\leq 0.007\%$)。

2.3 试验步骤

本次试验所用土样为滑带土原状样, 结构性较强, 且具有一定的收缩性, 据此试验方案如下:

(1) 对部分野外取得的滑带土试样风干、碾散, 进行常规物理性质试验。

(2) 将滤纸裁剪成合适大小, 并在烘箱中以35℃烘干3 h, 吸湿试验滤纸可以直接使用, 脱湿试验需先将滤纸浸湿在进行操作(注意应保证中间层测试滤纸稍小, 且戴手套操作)。

(3) 首先分别测定天然含水率试样在干滤纸和湿滤纸试验中在6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 d的含水率。

(4) 取所有天然含水率试样, 按照如图3所示方式叠置, 以测试其是否为平行试样。

(5) 用保鲜膜包紧试样组, 并用锡箔纸裹紧, 用胶带进行固定, 采用蜡封的方式将其包裹紧密, 保证其不透气, 放入培养箱中在25±1℃的温度下养护。

(6) 待试样组达到平衡后, 取出试样, 拆开石蜡, 立即对中间层滤纸称重(5 s内), 并对环刀试样称重。

(7) 随后将环刀试样放在土工筛上风干, 并对其重量时时监测, 至其含水率达到下一设定的值, 此时按照(4)~(7)步的步骤重复上述操作。

(8) 步骤(6)测定2~3个点后, 取测试后筛选出的平行试样, 在室内环境中将试样风干为4%~22%的含水率梯度, 含水率间隔为2%, 按照(4)、(5)、

(6)、(7)步的操作分别对不同含水率试样进行双圈牌干滤纸、双圈牌湿滤纸, Whatman干滤纸, Whatman湿滤纸试验。

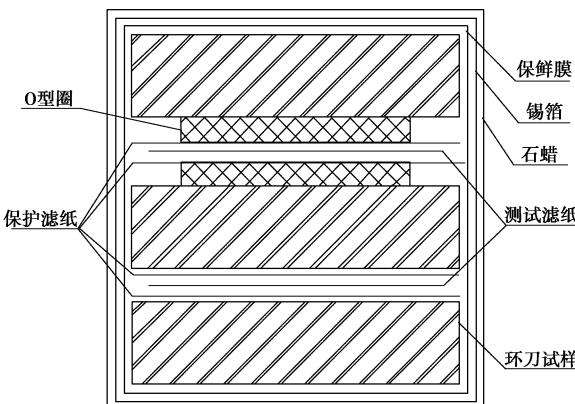


图2 滤纸法测试试样组

Fig. 2 Test sample set of filter paper method

3 试验结果

3.1 平衡时间测定

因为滤纸的平衡时间与试样含水率有关, 含水率越高, 吸力越小, 滤纸达到平衡的时间就越长, 因此平衡时间试验采用本组试样中最高含水率试样(即26%)。同时分别进行了滤纸脱湿和吸湿两组试验, 测定滤纸含水率随平衡时间的变化, 见图3。试验结果表明, 滤纸脱湿法达平衡的时间大于吸湿法, 吸湿法在14 d后基本达到平衡状态, 而采用湿滤纸时需要18 d达到平衡状态。因此本次试验所用的试样合适的平衡时间为湿滤纸脱湿法20 d, 干滤纸吸湿法15 d。

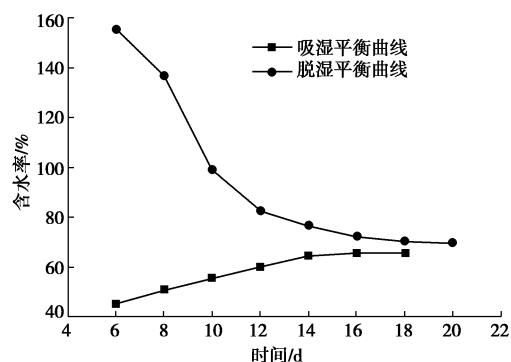


图3 滤纸含水率随平衡时间的变化

Fig. 3 Variation of moisture content of filter papers with equilibrium time

3.2 试样收缩校正

在试验的过程中, 野外取回的试样是近于饱和的试样, 试验前将切好的环刀试样放置在室内环境中, 达到不同的含水率状态, 在这个过程中可以看到试样随含水率的降低收缩十分明显。试样脱水的过程中其质量含水率难以表征体积变化情况, 因此在进行试验前需要先对其实体积变化进行量测, 试验采用游标卡尺对不同含水率的试样进行量测, 得到了试样干密度随质量含水率的变化情况见图4。

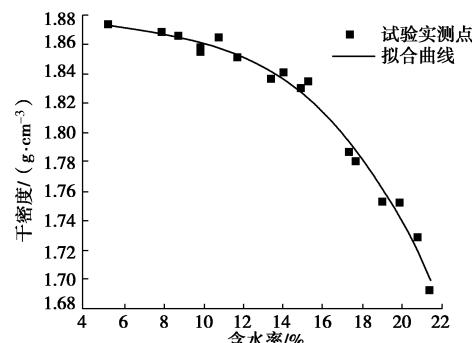


图4 试样失水收缩校正曲线

Fig. 4 Calibration curves of water loss contraction of samples

采用三次方程对数据点进行拟合, 得到拟合方程:

$$\rho_d = a\theta^3 + b\theta^2 + c\theta + d \quad (2)$$

式中, 系数 $a=-3.58 \times 10^{-5}$, $b=5.77 \times 10^{-4}$, $c=-4.63 \times 10^{-3}$, $d=1.886$, ρ_d 为试样干密度, θ 为试样质量含水

率。相关系数 $R^2=0.981$ 。根据该公式可以得到不同质量含水率时试样的干密度, 进而得到试样的体积含水率, 采用修正后的体积含水率描述试样的土水特征曲线可以减小试样收缩带来的误差。

3.3 率定方程

参照 ASTM 标准^[13], 滤纸基质吸力与全吸力率定曲线采用同一公式。本次试验双圈牌 No.203 型滤纸率定曲线为唐栋等^[6]在国内已有率定曲线的基础上整合所得见下式:

$$g\psi = \begin{cases} 5.2964 - 0.071\theta & (\theta < 47) \\ 2.6784 - 0.0015\theta & (\theta \geq 47) \end{cases} \quad (3)$$

Whatman No.42 型滤纸则采用 Fawcett & Collis-George 得到的率定曲线为

$$g\psi = \begin{cases} 5.601 - 0.0839\theta & (\theta < 45.3) \\ 2.642 - 0.01519\theta & (\theta \geq 45.3) \end{cases} \quad (4)$$

式中 ψ 吸力值 (kPa); θ 为滤纸质量含水率*100%。

3.4 试样吸力值测定

(1) 滤纸法测试上限含水率确定

滤纸法可测试的吸力范围非常大, 但由于目前测试方法限制其测试范围仍难以确定。

鉴于较高的含水率时试样吸力值很小, 难以比较, 因此试验通过比较不同状态试样对应的滤纸含水率, 分析滤纸在高含水率时其测试结果的波动性见图 5。结果表明, 试样含水率超过 26% 后, 滤纸含水率值波动明显, 此时滤纸质量含水率约为 100%。由于滤纸含水率很低, 通过率定方程计算得出的结果在对数坐标中依然非常接近见图 5。但其波动性较大, 结果不可信, 因此本试样滤纸法测试的上限含水率为 26%。

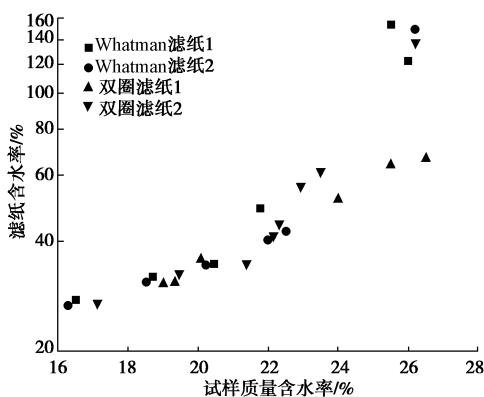


图 5 不同试样对应滤纸含水率

Fig. 5 Moisture contents of filter papers for different samples

(2) 滤纸法测试滞后性讨论

滤纸法测试基质吸力时, 其脱湿滞后性是否存在一直饱受争议, 部分学者认为脱湿和吸湿过程得到的吸力率定曲线不一致^[14-15], 但是 Leong 等^[16]通过试验证明, 只要滤纸平衡时间足够长, 经过脱湿和吸湿过

程在相同吸力下滤纸的含水率相近。本次试验中也分别进行了滤纸吸湿脱湿的试验, 通过平衡测试发现滤纸脱湿的过程所需时间明显大于滤纸吸湿的试验, 因此延长平衡时间有助于测得更精确滤纸脱湿吸力值。但当大于 22 d 时可发现滤纸上会有霉菌类物质出现, 影响测试结果, 因此本次试验以 20 d 为周期测试试样脱湿和吸湿, 试验结果见图 6。

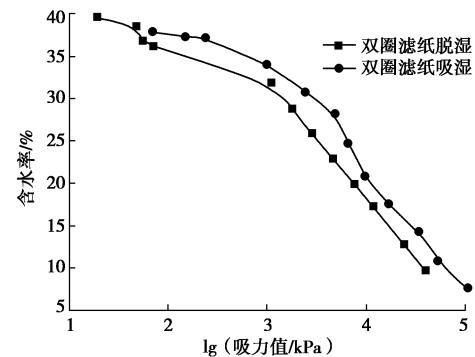


图 6 双圈滤纸吸湿和脱湿基质吸力对比

Fig. 6 Comparison between absorption and desorption matrix suction of double-circle filter papers

从试验结果看试样滤纸脱湿吸力值与吸湿吸力值形式大体相近, 在较低吸力时还有所重合, 并没有回滞环的出现, 从曲线形式看延长测试时间, 脱湿吸力值应与吸湿吸力值相近。因此滤纸法脱湿与吸湿测得试样吸力值相近。因此采用滤纸法无法测出试样的土水特征曲线回滞环。

(3) 试验结果散点图

采用上述率定公式得到的滤纸吸湿时不同含水率下试样的吸力值散点图见图 7, 可以看出双圈牌滤纸和 whatman 滤纸得到的试验结果相近, 尤其是在较高的吸力值时 (大于 4000 kPa)。

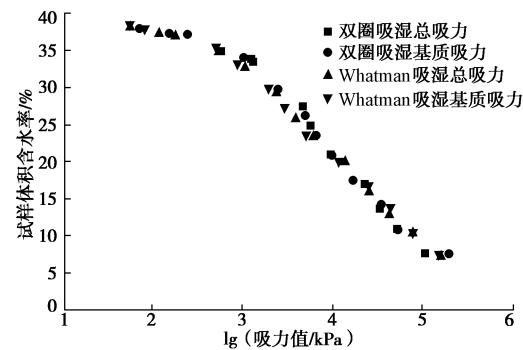


图 7 滤纸测定吸力散点图

Fig. 7 Scatter plot of suction tested by filter papers

通过对采用接触式和非接触式方法测定的试样基质吸力和总吸力进行对比, 可以发现无论是双圈牌滤纸还是 Whatman 型滤纸, 基质吸力与总吸力均非常相近, 只有在较低的吸力范围内 (小于 100 kPa) 基质吸

力才明显小于总吸力值。

同时为验证滤纸法测试结果的准确性, 试验前将3个滑带土平行式样放入压力板仪中, 由于试验条件的限制仅进行了低吸力段(小于700 kPa)土水特征曲线的测试。最后将压力板仪得到的3组试验结果处理, 将其平均值与两种滤纸法测得的基质吸力做对比, 从试验结果来看, 本次滤纸法测试的可靠性较高, 在低吸力段与轴平移技术得到的试样吸力值基本一致, 误差在±1%以内。试验结果对比见图8。

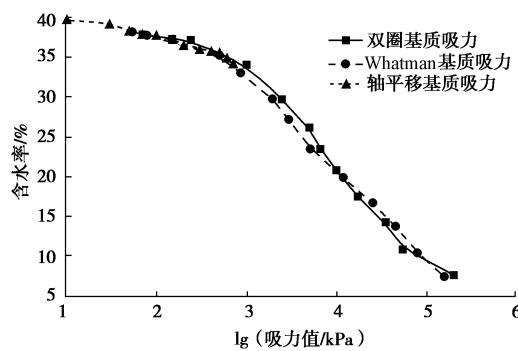


图8 轴平移测试基质吸力对比

Fig. 8 Comparison of matrix suction tested by axis translation

3.5 土水特征曲线拟合

拟合采用目前通用的 Van Genuchten 模型^[17]和 Fredlund & Xing 模型^[18]:

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m + \theta_r, \quad (5)$$

$$\theta = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + 10^6 / \psi_r)} \right] \theta_s \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi / a)^n)} \right]^m. \quad (6)$$

式中 θ 为体积含水率, θ_s 为饱和含水率, θ_r 为残余含水率, ψ 为吸力 (kPa), ψ_r 为残余含水率状态时的吸力值 (kPa), a , m 和 n 为模型的拟合参数, e 为自然对数常量。

因为试样基质吸力和总吸力值相近, 因此拟合过程仅对两种滤纸测试的基质吸力进行拟合, 采用 Origin 软件对试验得到的数据进行拟合, 拟合曲线见图9, 10, 相关参数见表2, 3。从拟合结果看, 采用两种拟合模型对滑带土试验数据进行拟合时, 相关系数都能达到0.99以上, 但是FX模型在拟合Whatman滤纸时a值偏高, 不符合模型的物理意义。故VG模型在拟合该类土的土水特征曲线时效果较好。

表2 双圈牌滤纸基质吸力拟合参数

Table 2 Fitting parameters of matrix suction of double-circle filter papers

模型	a	m	n	R^2
VG	6.82×10^{-4}	0.23	1.30	0.998
FX	1326	0.39	0.82	0.993

表3 Whatman 滤纸基质吸力拟合参数

Table 3 Fitting parameters of matrix suction of Whatman filter papers

模型	a	m	n	R^2
VG	1.26×10^{-3}	1.12	0.11	0.997
FX	3455	1.39	0.67	0.999

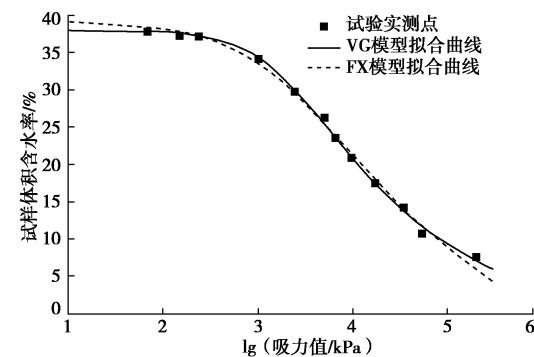


图9 双圈牌滤纸基质吸力拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of matrix suction of double-circle filter papers

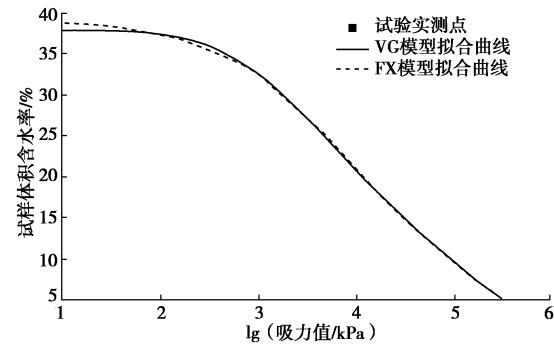


图10 Whatman 滤纸基质吸力拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of matrix suction of Whatman filter papers

4 结论

本文采用滤纸法对滑带土试样进行土水特征曲线的测试, 重点研究了收缩性土试验特点, 比较不同函数模型拟合效果, 得到了如下主要结论:

(1) 采用本文滤纸法进行试验时, 利用平躺对称式放置试样, 并定期对试样进行颠倒放置, 可以增加试验结果的准确性, 推荐采用的试样滤纸脱湿法平衡时间为20 d, 滤纸吸湿法平衡时间为15 d。

(2) 对于具有一定收缩性的试样, 试样的体积变化会对试验造成一定的影响, 可以对不同含水率的原状试样进行干密度与-含水率关系的校正, 采用体积含水率描述的土水特征曲线描述其非饱和特性更符合实际情况。

(3) 采用滤纸法对本次试验中的滑带土试样进行测试时, 滤纸的上限含水率为100% (质量含水率),

所能测得的上限吸力值分别为双圈牌滤纸 15 kPa, Whatman 滤纸 10 kPa。

(4) 采用滤纸法测试样的吸力值, 因为滤纸的特殊性质, 不能测出回滞环, 在时间足够长的情况下, 其滤纸脱湿吸力值与吸湿吸力值曲线形式相近。

(5) 对于具有一定黏性的滑带土, 采用 VG 模型进行土水特征曲线拟合能够更好的描述其非饱和性质。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Wiley, 1993.
- [2] HOUSTON S L, HOUSTON W N, WAGNER A M. Laboratory filter paper suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(2): 185 - 194.
- [3] GARDNER R, GARDNER R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range[J]. Soil Science, 1937, **43**(4): 277 - 284.
- [4] 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 Fu-qing, LIU Si-hong, YUAN Jiao. 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))
- [5] 蒋 刚, 王 刖, 邱金营. 国产滤纸吸力-含水率关系率定曲线的研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 72 - 75. (JIANG Gang, WANG Zhao, QIU Jin-ying. Suction calibration curve of homemade filter paper[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 72 - 75. (in Chinese))
- [6] 唐 栋, 李典庆, 金浩飞, 等. 国产“双圈”牌滤纸吸力率定曲线研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, **49**(1): 1 - 8. (TANG Dong, Li Dian-qing, KIM Ho-bi, et al. Research on calibration curves of home-made “Double Circle” filter papers[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, **49**(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [7] 刘小丽, 邓建辉, 李广涛. 滑带土强度特性研究现状[J]. 岩土力学, 2004, **25**(11): 1849 - 1854. (LIU Xiao-li, DENG Jian-hui, LI Guang-tao. Shear strength properties of slip soils of landslides: an overview[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(11): 1849 - 1854. (in Chinese))
- [8] 王君鹭, 唐辉明, 倪卫达. 黄土坡滑坡滑带土非饱和力学特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(2): 211 - 218. (WANG Jun-lu, TANG Hui-ming, NI Wei-da. Unsaturated mechanical property test of sliding-zone soil of Huangtupo landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(2): 211 - 218. (in Chinese))
- [9] 李志清, 胡瑞林, 王立朝, 等. 非饱和膨胀土 SWCC 研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5): 730 - 734. (LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WANG Li-chao. Study on SWCC of unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 730 - 734. (in Chinese))
- [10] XU Y, SUN D. Determination of expansive soil strength using a fractal model[J]. Fractals, 2001, **9**(1): 51 - 60.
- [11] BOHN Hinrich. The thermodynamics of soil solutions[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1981, **63**(24): 538 - 538.
- [12] 刘 伟. 黄土-泥岩接触面滑坡滑带土变形特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. (LUI Wei. Study on deformation characteristics of slip surface of loess-mudstone interface landslide[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese))
- [13] ASTM Standard D5298-10. Standard test method for the measurement of soil potential (suction) using filter paper[S]. 2010.
- [14] MARINHO F A M, OLIVEIRA O M. The filter paper method revisited[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(3): 250 - 258.
- [15] AL-KHAFAF S, HANKS R J. Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential[J]. Soil Science, 1974, **117**(4): 194-199.
- [16] SUITS L D, SHEAHAN T C, LEONG E C. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 322 - 333.
- [17] 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.
- [18] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 - 532.

(本文责编 胡海霞)