

基于滤纸法的裂隙膨胀土土水特征曲线试验

吴珺华¹,袁俊平^{2,3},杨松⁴

(1.南昌航空大学土木建筑学院,江西 南昌 330063; 2.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;
3.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098; 4.云南农业大学水利水电与建筑学院,云南 昆明 650201)

摘要:针对传统测量吸力试验方法存在的缺陷,采用滤纸法进行了裂隙膨胀土的吸力测定试验,得到了裂隙膨胀土的土水特征曲线,该曲线形态与无裂隙膨胀土的基本相同,均可分为3个阶段,为倒“S”形。相同含水率条件下,脱湿路径下制备的试样基质吸力比吸湿路径下的大,存在明显的滞回现象,可用已有的土水特征曲线计算模型进行拟合分析。试验结果表明,滤纸法可获得任意状态下土体的吸力,不干扰土体的初始状态,可作为测量裂隙膨胀土等特殊土吸力的一种有效方法。

关键词:膨胀土;裂隙;滤纸法;基质吸力;土水特征曲线

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2013)05-0061-04

Experimental study on SWCC of expansive soil with cracks using filter paper method//WU Junhua¹, YUAN Junping^{2,3}, YANG Song⁴/(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To overcome the shortage of traditional suction test methods, the filter paper method was applied to measure the matric suction of expansive soil with cracks and the corresponding soil water characteristic curve (SWCC) was obtained. The characteristics of expansive soil with cracks are found to be similar with the characteristics of the soil without cracks. The SWCC is composed of three parts and is shown as an inverted ‘S’ shape. Under the same water content conditions, the matric suction of expansive soil under the conditions of drying is greater than that under the condition of wetting. The drying and wetting curves form a hysteretic loop and a hysteretic phenomenon is clearly shown. The test results can be fitted and analyzed by existing calculation models of SWCC. It is revealed that the filter paper method can be used to obtain the soil suction under any status avoiding the interference to the soil original status. It is an effective method to measure the suction capacity of expansive soil with cracks and other special soils.

Key words: expansive soil; cracks; filter paper method; matric suction; SWCC

土水特征曲线(SWCC)是土体基质势与饱和度的关系曲线,表示土体水的能量与数量之间的关系,反映了土体的持水性能^[1]。土水特征曲线能很好地反映非饱和土的工程力学特性,一直是非饱和土的研究重点。膨胀土的饱和度-吸力随外界条件变化而变化,同时导致土体强度、变形、渗流等性质发生改变。已有学者对膨胀土进行了相应的试验研究,系统分析了膨胀土矿物成分、结构构造、应力状态、应力历史等因素对土水特征曲线的影响^[2-9]。由于膨胀土在干湿循环作用下易产生胀缩裂隙,此时土体的持水性能与完整土体的相比大不相同,而目前关于裂隙膨胀土的吸力研究并不多见。本文采用

滤纸法测量裂隙膨胀土的基质吸力,得到了裂隙膨胀土的土水特征曲线,可为深入研究裂隙膨胀土性质提供试验参考。

1 试验方法

目前有多种方法来直接或间接测量土体的吸力,包括湿度计法、张力计法、轴平移法、热传导法、滤纸法等。滤纸法可用于测定土中的吸力,该方法具有价格低廉、操作简单、量程大和精度高等优点,且可测量较大的吸力范围^[10],已广泛应用于岩土工程^[11-13]。该方法遵循热力学平衡原理,当土体-滤纸-空气间的水气达到平衡时,由滤纸的平衡含水率来

基金项目:南昌航空大学博士启动基金(EA201211115);国家自然科学基金(51008117,51209182)

作者简介:吴珺华(1985—),男,江西吉安人,讲师,博士,主要从事非饱和土基本理论及边坡稳定研究。E-mail:wjh0796@163.com

反映土体的吸力值^[14]。当滤纸与土体直接接触时,滤纸的平衡含水率相当于土体的基质吸力;当滤纸与土体不接触时,滤纸的平衡含水率相当于土体的总吸力^[10]。

本文试验的试样是在失水至不同含水率条件下获得的,伴随着裂隙的演化,不同含水率的试样裂隙的发育程度也不一样。由于采用常规试验仪器(压力板仪、非饱和固结仪等)进行测量时,得到的是初始状态相同试样的一系列试验点,而此处不同时刻的试样,含水率和裂隙形态均不相同,即初始状态并不相同。若采用常规试验仪器进行测量,一方面试样受到限制难以形成裂隙,不能完全反映干湿循环产生的裂隙特征;另一方面,若直接采用裂隙试样进行试验,试验结果只能大致反映初始试样的特征,并不能获得由于含水率变化会引起裂隙形态变化这一特征对基质吸力的影响。事实上,随着干湿循环的进行,裂隙逐渐演化,吸力受含水率及裂隙形态的共同影响。由于滤纸法可获得任意状态下土体的吸力,原理清晰,试验设备简单,不干扰土体的状态,适用于大批量的作业,因此本文采用滤纸与试样直接接触来测量不同含水率下裂隙膨胀土试样的基质吸力。

2 试验过程

2.1 滤纸率定

采用滤纸法测量试样的基质吸力,首先要得到滤纸的率定曲线,即滤纸含水率与对应吸力之间的定量关系。试验采用 Whatman No. 42 型标准滤纸,其率定关系见式(1)^[15],该型滤纸的含水率 ω 与吸力 u_s 的关系曲线为双折线。

$$\lg u_s = \begin{cases} 4.84 - 0.062\omega & \omega \leq 47 \\ 6.05 - 2.48\lg \omega & \omega > 47 \end{cases} \quad (1)$$

2.2 试样制备

采用轻型击实仪制备的试样,在人工干湿循环条件下,既可以保证裂隙发育良好,又能大幅度降低制样的工作量。土样基本参数为:液限 42.7%,塑限 19.2%,塑性指数 24,自由膨胀率 56.8%,最大干密度 1.81 g/cm³,相对密度 2.74,试样干密度 1.68 g/cm³。试样制备过程如下:

a. 采用轻型击实仪将配制好的土料制成大圆状样,高度控制在 40 mm。击实完成后,采用螺旋式千斤顶将试样推出,并将表面整平。然后将试样置于抽气饱和装置中抽气饱和,抽气完成后放置水中。至此一个圆状样制备完毕。

b. 将饱和和试样从饱和装置中移出,并置于室内恒温(20℃)环境下。采用微型电风扇吹试样表面,

风扇叶面与试样表面平行,距试样表面为 600 mm。定期称量试样质量以确定含水率,当试样质量基本不变时,表明失水过程结束。对于浸水过程,通常采用试样失水稳定后再抽气饱和的方法来模拟^[16]。实际上,雨水通常只从试样表面浸入,上述方法并不完全符合降雨过程中水分浸入试样的特点。试验采用喷壶喷洒试样表面的方法模拟自然降雨过程,当表面积水在 30 min 内不再浸入试样内部时停止喷水,然后用塑料薄膜将其密封至少 24 h。至此一个干湿循环完成,重复上述步骤即为多次干湿循环。图 1 为经历不同干湿循环次数后,试样表面裂隙的演化情况。随着干湿循环次数的增加,主裂隙首先生成,形态特征明显;当循环至一定次数后,主裂隙边缘土颗粒剥落,形态逐渐模糊,并有新的小裂隙生成,土体表面破碎程度加剧,这与实际情况下的裂隙发育过程较一致。因此采用上述方法能很好地模拟土体受干湿循环作用而产生的裂隙。

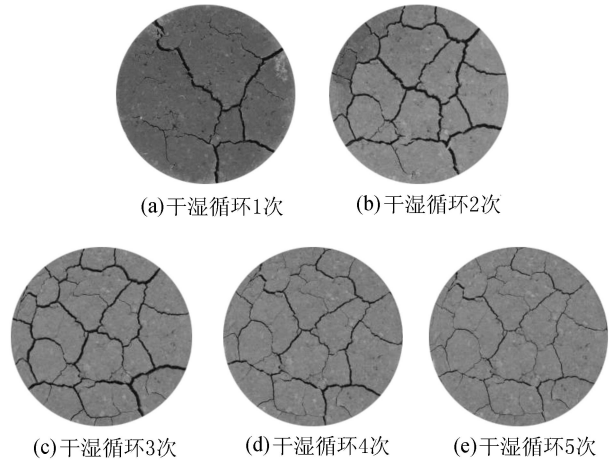


图 1 干湿循环下膨胀土裂隙发育过程

c. 当试样含水率达到试验指定要求后,将两环刀内侧涂抹凡士林,背靠背地置于试样中心,刀口朝下。在上部环刀顶部放置大的平整金属块,用螺旋式千斤顶缓慢地将环刀压入试样约 30 mm。压入速率不宜过大,尤其对于含水率低的试样,其表现出较高的硬度和较大的脆性,压入太快容易导致试样产生脆性断裂而无法获得完整样。不同压入速率的试验结果表明,低含水率试样压入速率宜为 0.3 ~ 0.5 mm/s,高含水率试样压入速率宜为 0.7 ~ 1.0 mm/s。压入指定深度后,将上部环刀移开,削去下部环刀外侧土样测含水率。将环刀及内部试样称量,由实测含水率可获得试样的初始干密度和饱和度。

2.3 试验方案与步骤

由于时间的限制,未进行不同干湿循环次数下的试验,试样为经历 3 次干湿循环后的试样。为研

究不同水分变化路径对裂隙膨胀土吸力的影响,分别进行了脱湿路径、吸湿路径下的滤纸法测吸力试验。采用接触法测量试样的基质吸力,每组取相同试样2个及干滤纸3张。滤纸尺寸小于试样(1张直径为55 mm,另2张直径为58 mm,均小于试样直径60 mm),将小直径的滤纸夹在2张大直径滤纸之间并置于下部试样的顶部,然后将上部试样置于滤纸上方紧密接触(图2)。用塑料膜将整体包裹后蜡封,置于恒温环境下至少7 d^[13],保证滤纸与试样达到水分交换平衡。取滤纸过程需要2人配合完成,一人将上下试样分开,另一人迅速用镊子将滤纸夹出,装入铝盒中密封并称量。称量完成后打开盒盖放入烘箱中,连续烘干10 h。烘干完成后,在烘箱里将盒盖盖好后取出并称量。根据铝盒的质量可以准确地得到滤纸的含水率,由式(1)即可计算得到该试样的基质吸力。同时采用蜡封法测量上下试样的体积,称量上下试样的质量,以获得试样的体积含水率,即可得到试样的土水特征曲线。试验方案见表1。

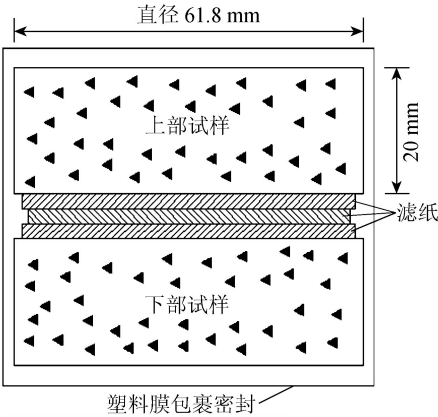


图2 滤纸法示意图^[10]

表1 滤纸法试验方案

脱湿			吸湿		
编号	试样初始含水率/%	试样体积含水率	编号	试样初始含水率/%	试样体积含水率
1	4.07	0.062	1	4.14	0.063
2	4.80	0.073	2	4.99	0.076
3	6.31	0.096	3	6.31	0.096
4	8.65	0.132	4	8.65	0.132
5	12.02	0.183	5	9.50	0.145
6	15.51	0.236	6	12.02	0.183
7	19.12	0.291	7	13.27	0.202
8	20.70	0.315	8	15.51	0.236
9	21.22	0.323	9	18.92	0.288
10	22.21	0.338	10	20.96	0.319

3 试验结果与分析

根据试验得到的滤纸含水率,由式(1)计算得到不同含水率的滤纸所对应的基质吸力,结果见表2。结合表1中试样的体积含水率,可得到不同水

分变化路径下试样的土水特征曲线(图3)。图3表明,采用滤纸法可获得大吸力范围下裂隙试样的土水特征曲线。裂隙试样的土水特征曲线形态都可分为3个阶段,为明显的倒“S”形,和无裂隙膨胀土试验结果^[17]基本相同。吸湿和脱湿条件下获得的土水特征曲线,其低含水率和高含水率时的基质吸力基本相同。相同含水率条件下,脱湿路径下获得的裂隙试样的基质吸力比吸湿路径下的大,存在明显的滞回现象,这与已有结论一致^[1,8,10]。此外,对一些受水分作用影响明显的特殊性土(裂隙土、黄土等),传统的吸力测量方法不能完全真实地反映其持水特性,而滤纸法不干扰试样的初始形态,试验条件的要求不高,故其可作为测量该类特殊土吸力的一种有效方法。

表2 滤纸法测吸力试验结果

脱湿			吸湿		
编号	滤纸含水率/%	基质吸力/kPa	编号	滤纸含水率/%	基质吸力/kPa
1	2.15	50 861.83	1	2.76	46 675.25
2	9.70	17 323.15	2	14.32	8 955.38
3	19.72	4 141.19	3	20.66	3 621.47
4	27.05	1 454.86	4	28.71	1 147.38
5	33.14	610.03	5	31.09	816.89
6	37.03	350.16	6	35.70	423.55
7	40.34	218.17	7	38.63	278.68
8	44.17	126.33	8	40.70	207.32
9	46.71	81.27	9	45.57	103.39
10	103.27	11.36	10	53.35	58.44

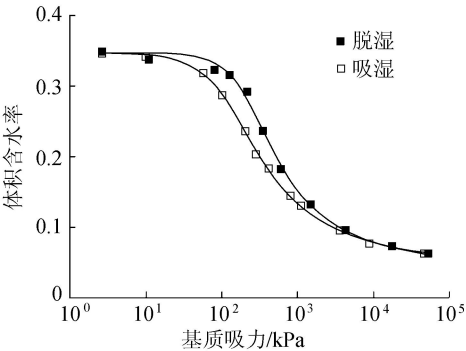


图3 滤纸法测吸力试验结果及拟合曲线

得到不同体积含水率下试样的基质吸力后,需要用土水特征曲线计算模型进行分析。本文采用Fredlund^[17]提出的式(2)对结果拟合:

$$\theta_r = \frac{\theta}{\theta_s} = \left\{ \ln \left[2.71828 + \left(\frac{\psi}{aP_a} \right)^b \right] \right\}^{-c} \quad (2)$$

式中: θ_r 为标准化的体积含水率; ψ 为基质吸力,kPa; θ 为基质吸力为 ψ 时的体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率,取0.347; P_a 为标准大气压,101.3 kPa,目的是使参数 a 无量纲化; a 、 b 、 c 为拟合参数。脱湿条件下, $a=2.104$, $b=1.872$, $c=0.746$;吸湿条件下, $a=1.103$, $b=1.544$, $c=0.765$,拟合曲线见图3,

可以看出拟合结果与实测值吻合较好。基于滤纸法得到的裂隙膨胀土的土水特征曲线,可采用传统的土水特征曲线计算模型进行拟合分析。

4 结 论

a. 干湿循环条件下,裂隙不断演化,膨胀土的吸力受含水率及裂隙形态的共同影响。采用滤纸法可有效测量裂隙膨胀土的基质吸力。裂隙试样的土水特征曲线形态与无裂隙试样的基本相同,土水特征曲线亦可分为3个阶段,为倒“S”形。相同含水率条件下,脱湿路径下制备的试样的基质吸力比吸湿路径下的大,存在明显的滞回现象。

b. 基于滤纸法得到的裂隙膨胀土的土水特征曲线,可采用已有的土水特征曲线计算模型进行拟合分析,为后续深入研究提供理论基础。

参考文献:

[1] 尚云东,耿丙彦. HTAB 改良膨胀土性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (9): 138-143. (SHANG Yundong, GENG Bingyan. Experimental study of the performance of expansive soils improved with HTAB[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (9): 138-143. (in Chinese))

[2] KHATTAB S A A, TAIE A I, KH I L. SWCC for lime treated expansive soil from Mosul City[J]. Geotechnical Special Publication, 2006, 1671-1682.

[3] PUPPALA A J, PUNTHUTAECHA K, VANAPALLI S K. Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6) : 736-751.

[4] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Use of the grain-size distribution for estimation of the SWCC [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 1103-1117.

[5] SIMMS P H, YANFUL E K. Predicting SWCC of compacted plastic soils from measured pore-size distributions[J]. Geotechnique, 2002(4): 269-278.

[6] 黎伟,刘观仕,姚婷. 膨胀土裂隙特征研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (4): 78-82. (LI Wei, LIU Guanshi, YAO Ting. Research progress in crack features of expansive soils[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 78-82. (in Chinese))

[7] AUBERTIN M, MBONIMPA M, BUSSIÈRE B. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40: 1104-1122.

[8] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (3): 28-31. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental

Study on swell-shrink performance of expansive soil due to moisture change[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 28-31. (in Chinese))

[9] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33: 379-392.

[10] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997.

[11] WU Junhua, YUAN Junping, NG C W W. Theoretical and experimental study of initial cracking mechanism of an expansive soil due to moisture-change [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(5): 1437-1446.

[12] HOUSTON S L, HOUSTON W N, WAGNER A M. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2): 185-194.

[13] 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 Fuqing, LIU Sihong, 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))

[14] SPOSITO G. The thermodynamics of soil solutions [M]. New York: Oxford University Press, 1981.

[15] CHANDLER R J, CRILLY M S. A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings [C] // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. New York: ASCE, 1992: 82-89.

[16] 张家俊. 干湿循环条件下裂隙、体变与渗透特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[17] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.

(收稿日期: 2012 - 11 - 02 编辑: 熊水斌)

