

DOI: 10.11779/CJGE2015S2007

高吸力下广西重塑红黏土吸力与含水率关系试验研究

欧传景^{1, 2}, 韦昌富^{1, 2}, 颜荣涛^{1, 2}, 卢有谦^{1, 2}, 郭敬林^{1, 2}

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 吸力对非饱和土的性质有着重要的影响, 探讨吸力与非饱和红黏土含水率之间的关系可以有效地服务地方经济。用蒸汽平衡法研究了高吸力段(3~368 MPa)广西贺州红黏土持水特性。研究表明, 质量含水率或者饱和度随着控制吸力的增加而减小, 随着吸力的降低而增大; 本组试验在控制吸力值为21.82 MPa时, 曲线存在突变点, 此时试样吸排水速率发生比较大的变化; 脱湿曲线与吸湿曲线间存在滞回效应, 吸力值小于突变点的时候, 滞回现象明显。不同初始含水率的土样对应的吸力与含水率间关系曲线基本重合, 而吸力与饱和度间关系曲线则不重合, 主要与含水率的变化和土体的胀缩变形不成正比有关, 孔隙比和吸力间的关系曲线也进一步说明了这一点, 因此分析红黏土土水特征时要根据实际情况选用坐标变量。所获结果为当地边坡土体持水特性分析提供了基础数据, 有助于该地区工程实践的防灾减灾。

关键词: 蒸汽平衡法; 红黏土; 吸力; 含水率

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S2-0032-05

作者简介: 欧传景(1989 -), 女, 硕士研究生, 主要从事非饱和红黏土方面的研究工作。E-mail: ochuanjing2012@163.com。

Experimental tests on relationship between suction and water content of remolded lateritic clay in Guangxi under high suction

OU Chuan-jing^{1, 2}, WEI Chang-fu^{1, 2}, YAN Rong-tao^{1, 2}, LU You-qian^{1, 2}, GUO Jing-lin^{1, 2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The suction has important influence on the properties of unsaturated soil. To explore the relationship between suction and water content of unsaturated lateritic clay can serve the local economy effectively. The soil-water characteristic curves (SWCC) of unsaturated lateritic clay with different initial water contents in Guangxi are measured by using the vapor equilibrium technique under high suction rang of 3~368 MPa. The results show that the water content or the degree of saturation decreases with the increasing control suction and increases with the decreasing control suction. When the value of control suction is less than 21.82 MPa, the drying or wetting rate of soils is getting down. The hysteresis phenomenon between the drying and wetting curves is more obvious when the control suction is smaller. The relation curves between suction and water content of soil samples with different initial water contents are coincident, but those between suction and saturation are not coincident. The main cause is that the variation in water content is not proportionate to the soil swelling or shrinkage deformation, and the relation curve between suction and void ratio confirms this further. Accordingly we should choose the right coordinate variables for SWCC of lateritic clay according to the actual situation. The results provide basic data for the analysis of soil water holding characteristics in local slope, which makes a contribution to the disaster prevention and reduction of the engineering practice in this area.

Key words: vapor equilibrium technique; lateritic clay; suction; water content

0 引言

红黏土是特指碳酸盐类岩石在亚热带温湿气候条件下, 经红土化作用, 残积或局部坡积所形成的褐红、棕红等色的黏性土。源于成因环境, 这类红黏土具有区域性特征, 一般具有较高的含水率, 较低的密度,

裂隙发育, 但却有较高的强度和较低的压缩性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372078, 51309055); 广西自然科学基金创新研究团队项目(2012GXNSFGA060001, 2014GXNSFBA118236)

收稿日期: 2015-03-26

广西地处中国西南端, 广泛分布着红黏土, 它的中部及南面有相当大一部分地区为丘陵地带, 山地约占总面积71%, 且大部分地区属于亚热带季雨林气候区, 高温多雨, 湿、热同步。干湿季节交替明显会对土体强度产生较大影响, 在干燥气候条件下这类红黏土的含水率很低, 对应非常高的吸力值, 而在强降雨的时候则对应很低的吸力极小的强度。大部分山体切割强烈, 高差悬殊, 山坡坡度大部分大于30°, 这样的环境条件极易造成滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流等地质灾害。这些事件的发生, 最主要的因素是含水率的增加降低了土的吸力从而降低土的抗剪强度。

不同地区红黏土某一强度下对应不同的含水率, 合理地提出非饱和红黏土在不同状态下的强度参数是工程的客观需要。土-水特征曲线 (soil water characteristic curve, 简称 SWCC) 描述吸力与土体含水率或饱和度之间的关系, 在非饱和土力学中有重要作用, 可以用它来确定土的强度、变形和渗透特性等^[1-3]。

许多学者对红黏土吸力的量测和评估做了大量的工作, 也取得了很大的进展^[4-5]。刘小文等(2009)^[4]采用接触式滤纸法得到了不同干密度下非饱和红土的土-水特征曲线, 吸力范围为0~12 MPa, 并且拟合出了该类非饱和红土土-水特征曲线公式。谈云志等(2011)^[5]用压力板仪测定了4种不同干密度的压实红黏土试样的土-水特征曲线, 并结合试样的孔隙分布特征分析了其不同持水能力的原因。研究工作多集中在低吸力情况下土-水特征曲线的测试, 并且分析更多的是低吸力段土-水特征曲线的滞回性。本文基于蒸汽平衡法测得广西贺州红黏土脱吸湿段土-水特征曲线, 以探讨贺州红黏土吸力与含水率间的关系, 并且分析初始含水率对土-水特征曲线的影响, 为红黏土的研究提供基础实验数据, 服务地方经济。

1 试验方法与过程

1.1 试验材料

试验采用广西贺州红黏土^[6], 取自贺州市光明大道与新华西路交界处以南。基本物理指标如表1所示, 颗分曲线见图1。试验采用去离子水。

表1 红黏土物理性质指标

Table 1 Physical properties of lateritic clay

名称	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	土粒 比重	初始干密度 /(g·cm ⁻³)
红黏土	61.7	43.8	17.9	2.74	1.3

1.2 试验设备

蒸汽平衡法所需的主要设备是玻璃保湿器, 见图2。试验根据全国物理化学计量技术委员会所给出的饱

和盐溶液标准相对湿度值^[7], 选定的饱和盐溶液的相对湿度值及其对应的吸力如表2所示。

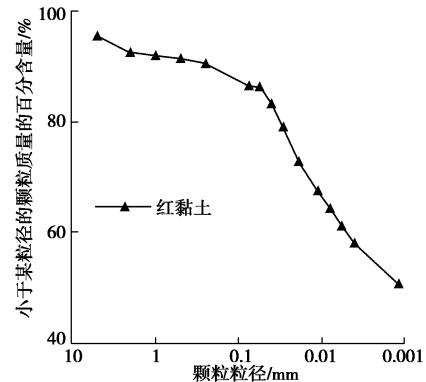


图1 红黏土颗粒分析曲线
Fig. 1 Grading curve of lateritic clay



图2 保湿器
Fig. 2 Moisturizing container
表2 饱和盐溶液及对应的吸力 (20℃)
Table 2 Saturated salt solutions and corresponding suctions (20℃)

饱和盐溶液	相对湿度/%	对应吸力值/MPa
LiBr	6.6	367.54
LiCl·H ₂ O	12.0	286.70
CH ₃ COOK	23.1	198.14
MgCl ₂ ·6H ₂ O	33.1	149.51
K ₂ CO ₃	43.2	113.50
NaBr	59.1	71.12
NaNO ₂	65.6	57.00
KI	69.9	48.42
NaCl	75.5	38.00
KCl	85.1	21.82
Na ₂ SO ₃ ·7H ₂ O	90.8	13.10
K ₂ SO ₄	97.6	3.29

1.3 试验方法与步骤

蒸汽平衡法是目前最常用的高吸力控制技术, 相对湿度与吸力之间的关系可用 Kelvin 方程表示:

$$\Psi_t = -\frac{RT}{\nu_{w0}\omega_v} \ln(RH) \quad (1)$$

式中 Ψ_t 为总吸力 (MPa), R 为通用气体常数 ($R=8.31451 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$), T 为热力学温度 (K); RH

为相对湿度(无量纲); ν_{w0} 为水的比容(m^3/kg); ω_v 为水的莫尔质量(kg/mol)。

从式(1)中可以看出,在特定温度下吸力与相对湿度是唯一对应的。当空气压力已知或者已经假定为某一值时,可通过测定给定温度条件下处于平衡状态的土体中的蒸汽压来测定土体孔隙水压力。总的土体吸力可通过测量孔隙水的蒸汽压直接确定。

试样的制样过程如下:首先配制初始含水率为30%、40%的土样,静置48 h以上。根据土工试验方法,压制同一干密度为 $1.3 g/cm^3$ 的环刀样,编号分别为H30、H40。其直径61.8 mm,高度为20 mm。经抽气4 h以上,用水饱和。静置一段时间,每个环刀样用切土刀配合钢丝锯切成8等份。

试验时控制环境温度为 $20^\circ C \pm 1^\circ C$,保湿器中配置各种饱和盐溶液,将制备好的切块饱和土样置于饱和盐溶液正上方的隔板上,密闭在玻璃保湿器中。每种溶液对应做了2个平行土样,开始脱湿试验。而对于吸湿试验则先将备好的切块土样烘干再放入玻璃保湿器中开始试验,见图2。

每隔一定的时间称量土样的重量,为减小土样的蒸发,称量过程要迅速。当土样的重量在一周期内的变化小于0.01g时,认为土样的吸力与对应饱和盐溶液的蒸汽压力达到平衡。然后取出其中一块直接用烘干法来测量含水率,另外一块用来测量体积。体积测量方法根据阿基米德浮力原理测其浮力,体积测量装置示意图如图3所示,然后推算出土块的体积。本次试验所用的非浸润性溶液是液体石蜡,密度为 $0.849 g/cm^3$ 。相关内容可参考文献[8, 9]。其中每级吸力平衡时间为2个多月,12个测点(对应12级吸力)同时平行进行,这样就大大缩短了试验时间。

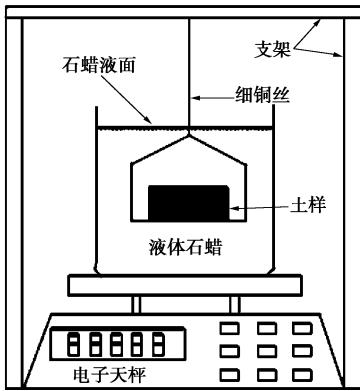


图3 体积测量装置示意图

Fig. 3 Sketch of soil clod volume measurement

2 试验结果及分析

2.1 红黏土的土-水特征曲线

贺州红黏土的土-水特征曲线如图4所示,图4(a)

表示初始含水率为40%的试样的吸力与质量含水率间的关系曲线,图4(b)为吸力与饱和度的关系曲线。

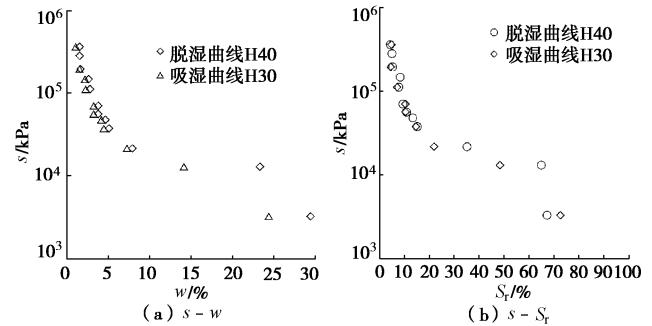


图4 红黏土土-水特征曲线

Fig. 4 SWCC of lateritic clay

通过比较发现,脱湿曲线中,土体的质量含水率或者饱和度随着吸力的增加而减小;而对于吸湿曲线,则随着吸力的降低而增加。曲线存在突变点,当控制吸力值小于 21.82 MPa 时,曲线趋于平缓。对于脱湿进程,即说明排水越来越慢,反之对于吸湿进程则说明吸水速率越来越快。说明在突变点处影响土体持水能力的主导因素有所转变。

曲线的脱湿与吸湿段之间存在的滞回效应。对某一特定含水率,脱湿曲线对应的吸力值高于吸湿曲线对应的,特别是吸力值越小,现象越明显,如小于突变点后的吸力段。这种滞回现象与非饱和土中孔隙液体的不可逆流动有关,而这种微观不可逆流动会导致能量的耗散^[10]。

另外,本次试验得到的土-水特征曲线,当吸力等于 367.54 MPa 时,脱湿段或者吸湿段土体最终含水率都很小,几乎接近于0,这与Fredlund和Xing^[11]认为的当吸力等于 1000 MPa 时,土体含水率等于0%的结论一致。

2.2 初始含水率对土-水特征曲线的影响

(1)图5给出了不同初始含水率试样的吸力与质量含水率间的关系曲线,如图5(a)表示初始含水率为30%和40%试样的脱湿曲线,图5(b)则对应吸湿曲线。

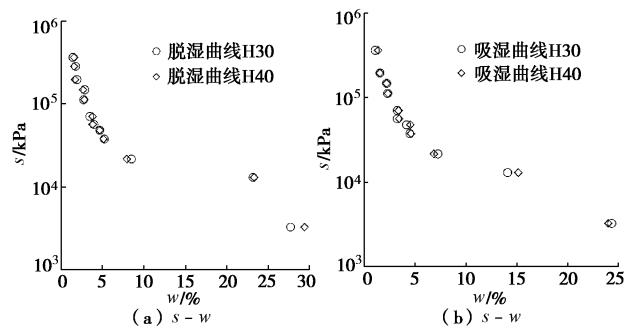


图5 吸力与含水率间关系曲线

Fig. 5 Relationship between suction and water content

由图 5 可知, 对于吸力与质量含水率间的关系曲线, 脱湿曲线或者吸湿曲线均趋于重合, 即同一级吸力对应相同的平衡含水率。图 5 中每个曲线有 10 个测点以上。这说明, 试样初始含水率对吸力与质量含水率间关系影响甚微, 或者说不影响。

下面比较吸力与饱和度间的关系曲线, 如图 6 所示。如图 6 (a) 表示初始含水率为 30% 和 40% 试样的脱湿曲线, 图 6 (b) 为对应吸湿曲线。

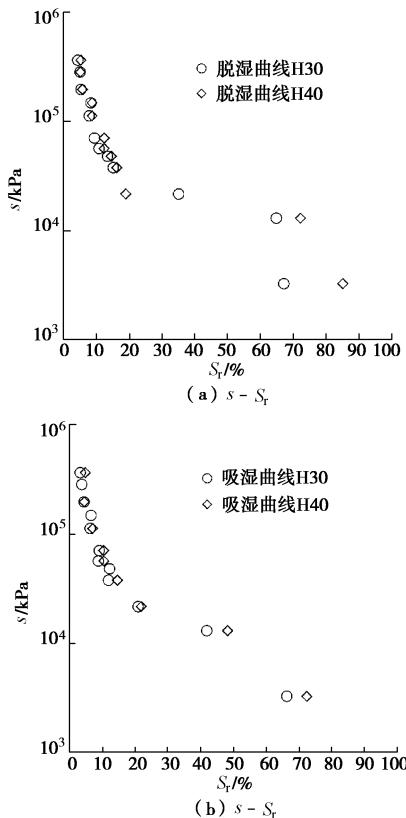


图 6 吸力与饱和度间关系曲线

Fig. 6 Relationship between suction and saturation

从测试结果来看, 脱湿或者吸湿曲线均不重合, 初始含水率较大的试样对应的曲线稍高于初始含水率较低试样对应的曲线。在控制吸力情况下, 试样所表现出来的胀缩变形包括微观结构变形和宏观结构变形, 初始含水率对所有有效孔径范围内的孔隙结构均产生影响。例如, 对于脱湿过程, 在大于某一有效孔径范围内, 土体的收缩与含水率成正比, 随着含水率的继续减小, 土体收缩变小或者不再收缩, 彼此不成正比。故此表现出不同初始含水率的土样对应的脱湿或者吸湿曲线不重合。Vanapalli 等^[12]和伊盼盼等^[13]也得出了初始含水率大的试样脱湿曲线较平缓的结论, 但并未对高吸力范围的土水特征进行试验。

(2) 在上述比较了不同初始含水率试样的吸力与含水率或者饱和度间关系曲线的基础上, 为了进一步考究, 这里展开吸力与孔隙比间关系的探讨。

图 7 给出了该红黏土试样的吸力与孔隙比间的关系曲线, 如图 7 (a) 表示初始含水率为 30% 和 40% 试样的脱湿曲线, 图 7 (b) 为对应吸湿曲线。

分析图 7 可知, 土体孔隙比小于初始孔隙比 1.1。对于脱湿进程, 脱湿试样由于失水收缩, 则干密度增大, 孔隙比减小并且小于初始孔隙比 1.1。同时红黏土具有裂隙发育的特性, 孔隙比的变化有波动。反之, 对于吸湿进程, 试样饱和切样后, 经烘箱烘干再吸湿。经过干缩效应之后, 土体干密度增大, 孔隙比变小, 而吸湿实验的膨胀量比烘干收缩量小, 故此平衡后土体的孔隙比小于初始值 1.1。另外, 孔隙比受试样初始含水率影响, 试样初始含水率越大, 试验平衡时试样的孔隙比越小。这与 Basma 等^[14]观察到试样在干湿循环过程中所呈现出的胀缩特性受初始含水率或吸力状态影响的结论一致。

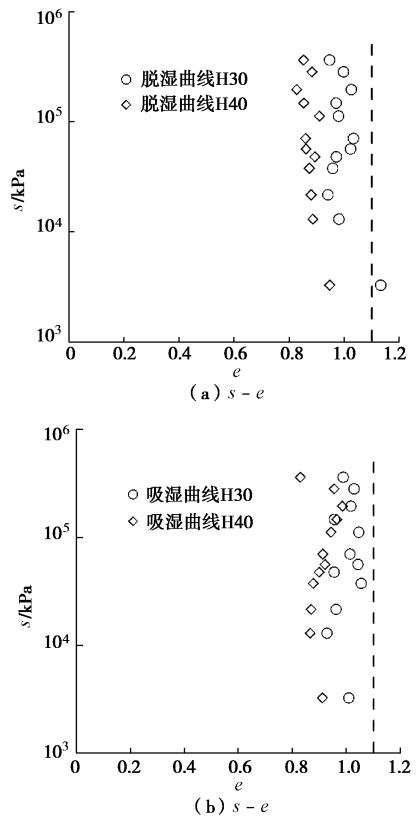


图 7 吸力与孔隙比间关系曲线

Fig. 7 Relationship between suction and void ratio

3 结 论

本文用蒸汽平衡法测得高吸力段 (3~368 MPa) 贺州红黏土的土-水特征曲线, 土体质量含水率或者饱和度随着控制吸力的增加而减小, 随着吸力的降低而增大。主要得到以下结论:

(1) 贺州红黏土的土-水特征曲线存在突变点, 当控制吸力值小于 21.82 MPa, 曲线趋于平缓; 曲线

的脱湿与吸湿段之间存在滞回效应。

(2) 在研究的吸力范围内, 试样不同初始含水率对应的吸力与质量含水率间关系曲线基本重合, 但初始含水率可以影响更小孔径范围的孔隙结构, 含水率变化与土体变形不成正比, 引起不同初始含水率土样对应的吸力与饱和度间关系曲线不重重, 表现出初始含水率较大的试样持水能力稍强, 试样的最终孔隙比小于初始孔隙比可以说明上述结果。这说明了分析红黏土土水特征时要根据实际情况选用坐标变量, 所获结果对该区域红黏土的工程实践, 如滑坡的减灾防灾工程等有借鉴作用。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, VANAPALLI S K, XING A, et al. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[C]// Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, France, 1995: 63 - 68.
- [2] FRDDLUND D G, XING A, SHANGYAN Huang. Predicting the permeability function for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**: 533 - 546.
- [3] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society American Journal, 1980, **44**: 892 - 898.
- [4] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3302 - 3306. (LIU Xiao-wen, CHANG Li-jun, HU Xiao-rong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3302 - 3306. (in Chinese))
- [5] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的持水性能与机制分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 334 - 338. (TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO ai-guo, et al. Analysis of water holding capacity and mechanism of compacted laterite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 334 - 338. (in Chinese))
- [6] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (GB50021—2001 Geotechnical engineering specification[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [7] 国际法制计量组织. OIML R121 饱和盐溶液标准相对湿度值 [S]. 全国物理化学计量技术委员会, 2000. (International Organization of Legal Metrology. OIML R121 the standard humidity value relatively of saturated salt solution[S] The Physical and Chemical Metrology Technology Committee, 2000. (in Chinese))
- [8] DELAGE P, HOWAT M D, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, **50**(1/2): 31 - 48.
- [9] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287 - 296.
- [10] WEI Chang-fu, DEWOOLKAR M M. Formulation of capillary with internal state variables[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**: 133 - 137.
- [11] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**: 521 - 532.
- [12] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, **49**(2): 143 - 159.
- [13] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富, 等. 非饱和重塑黏土在不同击实条件下的土水特征曲线试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, **9**: 82 - 85. (YI Pan-pan, NIU Sheng-kuan, WEI Chang-fu, et al. An experimental study of soil water characteristic curve of remolded unsaturated clay considering the influence of compacted[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, **9**: 82 - 85. (in Chinese))
- [14] BASMA A A, AL-HOMOUD A S, MALKAWI A I H, et al. Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays[J]. Applied Clay Science, 1996, **11**: 211 - 227.

(本文责编 明经平)