

DOI: 10.11779/CJGE2019S2004

全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线

蔡国庆^{1,2}, 刘伟², 徐润泽³, 李舰², 赵成刚^{2,4}

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;
3. 济南高新控股集团有限公司, 山东 济南 250101; 4. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 采用轴平移法、滤纸法以及饱和盐溶液蒸汽平衡法 3 种方法相结合, 对单峰(泥浆土)和双峰(压实土)孔隙结构的重塑红黏土土样进行了一系列室内试验, 研究了全吸力范围内($0\sim286.7\text{ MPa}$)孔隙结构和初始孔隙比对土-水特征曲线(SWCC)的影响, 分析了干湿循环下两种土的滞回性及体积变化规律。试验结果表明: 不论泥浆土还是压实土, 初始孔隙比对 SWCC 的影响均主要体现在低吸力阶段; 孔隙结构对 SWCC 影响显著, 压实土和泥浆土的 SWCC 分别呈现“双台阶”和“单台阶”特征; 初始孔隙比相同时, 泥浆土的进气值更大, 持水性能更好; 干湿循环下压实土的滞回性明显小于泥浆土, 但泥浆土的体变更大。

关键词: 非饱和土; 全吸力范围; 红黏土; 土-水特征曲线; 干湿循环

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)S2-0013-04

作者简介: 蔡国庆(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学及土体多场耦合理论方面的研究工作。E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn。

Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range

CAI Guo-qing^{1,2}, LIU Yi², XU Run-ze³, LI Jian², ZHAO Cheng-gang^{2,4}

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Jinan Hi-tech Holding Group, Jinan 250101, China;
4. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A series of laboratory tests using the axial translation method, filter paper method and vapor equilibrium method on red clay including a unimodal (slurry) and a bimodal (compacted soil) pore-size distribution are performed to investigate the influences of the initial void ratio and pore structure on the soil-water characteristic curves (SWCCs) in the full suction range of $0\sim286.7\text{ MPa}$ as well as the hysteresis effect and volume variation during wetting-drying cycles. The test results show that whether the slurry or compacted soil, the influences of the initial void ratio on the SWCCs are mainly reflected in the lower suction range. The pore structure has significant influences on the SWCCs, and the SWCC of compacted soil and slurry are characterized by "double steps" and "single step". The air entry value and water holding capacity of slurry are greater compared to those of compacted soil with the same initial void ratio. The hysteresis effect of the compacted soil is obviously smaller than that of slurry, but the volume variation of slurry is larger during wetting-drying cycles.

Key words: unsaturated soil; full suction range; red clay; soil-water characteristic curve; drying-wetting cycle

0 引言

边坡和路基表层的红黏土为非饱和土, 对季节和气候与环境湿度变化极其敏感, 常年处在干湿循环运行状态下, 所以其持水特性不容忽视。同时, 含水率的变化对其抗剪强度和压实特性影响很大。土-水特征曲线(soil water characteristic curve)是非饱和土最重要的特征之一, 可以用来预测土体的抗剪强度和渗透性能等。因此, 研究红黏土土-水特征曲线对于进一步解决红黏土地区的基础设施(边坡、路基等)性能在

复杂气候条件下的劣化及灾变问题具有重要意义。

近年来, 学者们对红黏土的 SWCC 陆续展开了相关研究^[1-4]。在 SWCC 的影响因素中, 孔隙比是最重要和最直接的因素。此外, 孔隙结构也是影响土体水土特性的重要因素。Sun 等^[4]的研究发现, 原状和重塑红黏土孔隙分布曲线的不同造成了两者 SWCC 的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51722802, 51678041); 河南省交通运输厅科技计划项目(2017B4)

收稿日期: 2019-04-29

差异。但现有研究未涉及击实、压实法制样和泥浆预固结法制样红黏土 SWCC 的差异性。而 Burton 等^[5]、Gao 等^[6]、Liu 等^[7]试验结果表明, 不同的制样方法制成的土样, 其孔隙结构存在明显差异。因此, 在研究红黏土的 SWCC 时, 有必要考虑初始孔隙比的影响, 并将击实、压实法制样和泥浆预固结法制样红黏土 SWCC 进行对比分析。

本文采用轴平移法、滤纸法和饱和盐溶液蒸汽平衡法 3 种不同吸力控制技术, 对单峰孔隙结构(泥浆预固结法制备)和双峰孔隙结构(击实法制备)的三种不同初始孔隙比的重塑土样进行了一系列“干化-湿化”土-水特征曲线室内试验, 研究了全吸力范围内初始孔隙比和孔隙结构对 SWCC 的影响, 并分析了干湿循环过程中不同孔隙结构土样的体积变化规律。

1 试验材料及制备

1.1 试验材料

本试验所用红黏土取自广西桂林市郊桂林理工大学雁山校区, 采用筛分法和密度计法结合测得, 该类型土的黏粒(小于 2 μm)成分约占 49.6%。由试验测得的桂林红黏土的物理指标示于表 1。矿物成分为: 高岭石 16.4%, 三水铝石 43.4%, 针铁矿 22.3%, 石英 17.9%。

表 1 桂林红黏土的基本物理参数

Table 1 Physical indices of the Guilin red clay

颗粒相 对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指 数 I_p	天然含 水率 $w_0/\%$	最优含 水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\gamma_{d,max}$ ($g \cdot cm^{-3}$)
2.74	67.3	38.1	29.2	34.52	26	1.48

利用压汞法, 对实验室制备完成后的土样(试样制备方法如 1.2 节所述)进行微观结构测试, 得到初始孔隙比为 1.7 的饱和红黏土的孔径分布曲线, 如图 1 所示, 其中 d 为孔径, V 为孔隙体积。由图 1 可知, 泥浆土和压实土分别呈现“单峰”和“双峰”曲线特征。这表明, 泥浆土的孔隙大小较为均匀, 而压实土则具有集聚体间大孔隙和集聚体内小孔隙, 并且泥浆土的峰值对应孔径介于压实土双峰的孔径之间。

1.2 试样制备

试验所用重塑土样为泥浆土样和压实土样。泥浆土样是将碾碎、过筛, 按照既定密度称量好的土样倒入自制制样装置, 加入 2 倍液限值的蒸馏水, 经搅拌后形成泥浆。通过砝码和千斤顶施加固结荷载。待固结(3~5 d)完成后, 利用取土器取出即可。对于压实土样, 采用分层击实法制备。谈云志等^[3]研究发现, 压实红黏土与其他黏土的 SWCC 有很大不同, 特别是干密度较小时比较突出。因此, 本文试验设置 3 种较

低的干密度进行研究, 分别为 1.0, 1.1, 1.2 g/cm³, 对应的初始孔隙比 e_0 为 1.7, 1.5, 1.3。

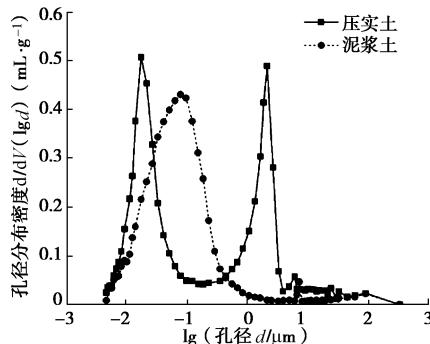


图 1 泥浆土和压实土孔径分布图

Fig. 1 Pore-size distribution of slurry and compacted soil

2 试验方法

本试验将轴平移法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法 3 种不同吸力控制技术相结合, 以实现全吸力范围内“干化-湿化”SWCC 室内试验的获取。并测量了 3 种吸力控制技术下的泥浆土和压实土样的体变。

轴平移法所用仪器为 GDS 非饱和土双压力室三轴仪, 控制干湿循环吸力范围为 10~200 kPa。施加的干化吸力路径为 10→50→100→200 kPa。之后利用饱和盐溶液蒸气平衡法施加高吸力范围内的干化和湿化路径后, 再次施加湿化路径 200→100→50 kPa。

滤纸法如下所述, 将压实土样和泥浆土初始含水率分别控制在 34% 和 40%。利用风扇扇风模拟干化过程, 之后使用加湿器喷雾于土样表面模拟湿化过程。不定时测量含水率, 并取不同含水率的土样进行装样, 使滤纸和土样紧密接触并密封, 恒温放置 14 d 后, 测定滤纸的含水率。基质吸力依据 Leong 等^[8]基于试验结果给出的 Whatman No.42 滤纸率定曲线方程计算。

选择 9 种饱和盐溶液($LiCl \cdot H_2O$ 、 CH_3COOK 、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 、 K_2CO_3 、 $NaBr$ 、 KI 、 $NaCl$ 、 KCl 、 K_2SO_4)施加吸力并测试平衡后的含水率和吸力^[9]。首先直接将饱和土样放入密封性好的干燥容器上部进行脱湿平衡。吸湿试验是将土样干化至含水率小于 1% 后, 继续在干燥器内进行吸湿平衡。在此期间内控制实验室温度为常温。平衡 2 个月以后, 取出测量即可, 从而得到 3~286.7 MPa 吸力范围内的 SWCC。

土样体变的测试方法为: 低吸力时土样体变由 GDS 双压力室三轴仪直接测得。高吸力时土样体变在土样平衡后, 用游标卡尺测量其高度与半径(在不同的方向测量 3 组求平均值), 计算当前土样体积, 并与土样初始体积之比。

3 试验结果及分析

3.1 初始孔隙比对土-水特征曲线的影响

图 2(a), (b) 分别为 3 种初始孔隙比 e_0 压实土、泥浆土干湿循环过程中的 SWCC。由图可见, e_0 对进气值和低吸力范围内脱水速率有较大影响。无论压实土还是泥浆土, 干化过程中, 在低吸力范围内, e_0 越小, 进气值越大, 脱水速率越慢, 持水性能越好。随着吸力的增加, 3 种 e_0 的土体的脱水速率基本相同。高吸力范围内, 3 条曲线几乎重合。湿化过程中呈现相似的规律: e_0 越小, 持水性能越好。

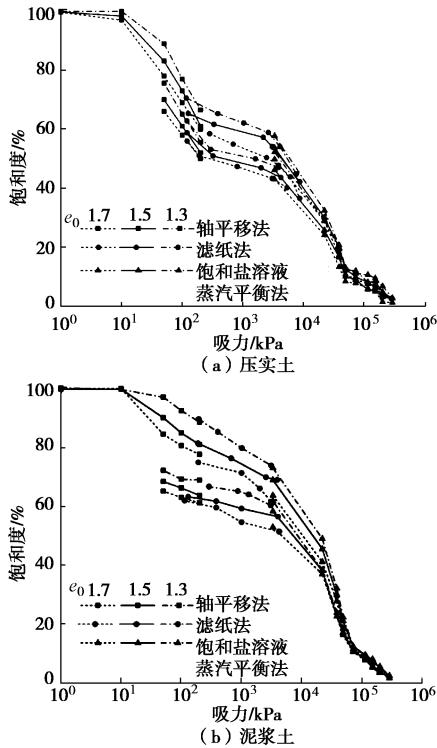


图 2 不同初始孔隙比的土-水特征曲线

Fig. 2 SWCCs with different initial void ratios

如 1.1 节所述, 据压汞测试结果可知, 压实土具有聚集体间大孔隙和聚集体内小孔隙。 e_0 不同的土样差别主要在于大孔隙, 低吸力范围内失水和吸水现象主要受大孔隙控制。故 e_0 显著影响了低吸力范围内的土-水特征曲线。高吸力范围失水和吸水现象主要由小孔隙控制, 故而该范围内的曲线差别不大。

类似地, 泥浆土孔隙分布均匀, 应呈现典型的土水特征曲线, 即单一进气值的光滑曲线。但由 $e_0=1.7$ 的曲线可见, 在低吸力范围内, 泥浆土出现大量的失水现象, 使得曲线斜率有所改变。 $e_0=1.3$ 的曲线这种现象并不明显。这是由于泥浆土孔隙均匀, 连通性好, 结构稳定性较差, 吸力增加会产生微裂隙, 因而与典型的土水特征曲线有一定的差别。 e_0 越大, 泥浆土微观结构更不稳定, 失水过程中更容易产生微裂隙, 使

得与单一进气值的土水特征曲线差别越大。图 3 为 200 倍、1000 倍扫描电镜下的泥浆土, 可以发现泥浆土中存在微裂隙。

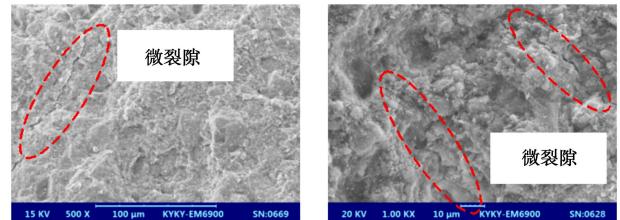


图 3 扫描电镜法 200, 1000 倍下泥浆土微裂隙

Fig. 3 Micro-cracks of slurry at 200, 1000 magnifications observed by SEM

3.2 孔隙结构对土-水特征曲线的影响

图 4 为初始孔隙比 $e_0=1.7$ 的压实土与泥浆土干湿循环 SWCC。由图 4 可见, 初始孔隙比相同时, 压实土和泥浆土 SWCC 分别呈现“双台阶”和“单台阶”特征, 泥浆土的进气值更大, 持水性能更好。

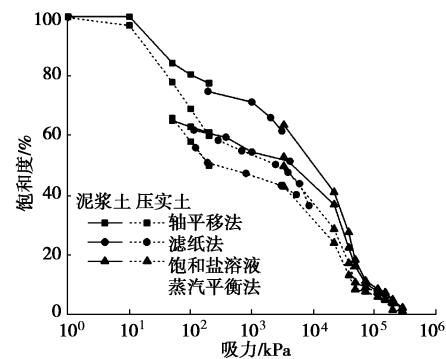


图 4 不同孔隙结构的土-水特征曲线 ($e_0=1.7$)

Fig. 4 SWCCs with different pore structures

压实土的 SWCC 呈现“双台阶”特征, 可分为三段。在 0~200 kPa 的低吸力范围和 2~286.7 MPa 高吸力范围内, 脱水或吸水速率较快。在 200 kPa~2 MPa 吸力范围内, 属于过渡段, 脱水或吸水速率慢。泥浆土的 SWCC 呈现“单台阶”特征, 可分为两段。在 0~2 MPa 的吸力范围内, 脱水或吸水速率较快。在 2~286.7 MPa 的吸力范围内, 脱水或吸水速率较慢。这是由于, 压实土具有聚集体间大孔隙和聚集体内小孔隙。压实土低吸力范围内失水和吸水现象主要受大孔隙控制, 高吸力范围内失水和吸水现象主要受小孔隙控制。中间平缓段是过渡阶段, 此时大孔隙内主要是空气, 小孔隙开始排水, 但吸附水的排出较为缓慢。

初始孔隙比相同时, 泥浆土的进气值更大。这是因为泥浆土孔隙均匀, 孔径介于压实土的大、小孔隙之间。泥浆土的 SWCC 总是在压实土的右上方, 即前者持水性能更好。泥浆土的孔隙主要由孔径小于 1 μm

的微观孔隙构成。但也会产生一定数量的网状微裂隙，使得测得的泥浆土 SWCC 与典型单一进气值的曲线存在差别。与压实土的 SWCC 相比，可以看出泥浆土低吸力范围内由于微裂隙造成的失水量是很小的。

由于压实土和泥浆土在干湿循环过程中体变不同，使得压实土的干湿循环滞回性小于泥浆土。图 5 (a), (b) 分别为压实土和泥浆土在干湿循环过程中的孔隙比变化图，可见压实土在干湿循环过程中孔隙比变化较小，而泥浆土变化较大。造成差异的主要原因是泥浆土孔隙大小比较均匀，连通性好，结构稳定性较差，在干湿循环中更容易产生一定数量的微裂隙。

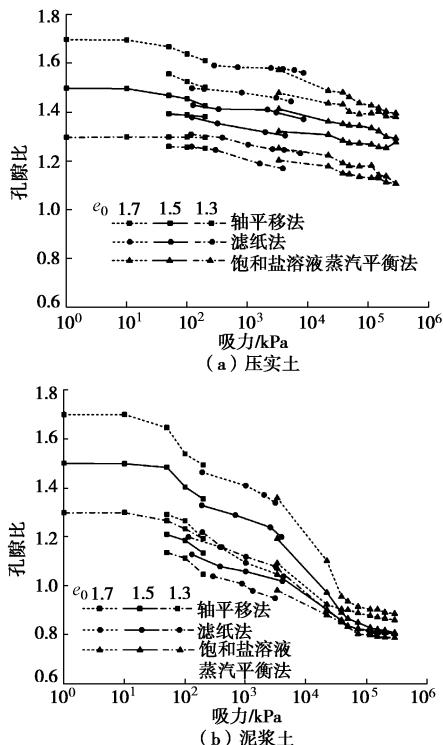


图 5 干湿循环过程的孔隙比变化

Fig. 5 Change of volume during drying-wetting cycles

4 结 论

(1) 初始孔隙比对土-水特征曲线的影响主要体现在吸力较低阶段，对吸力较高阶段影响不大。主要原因为：对于压实土，孔隙比主要由大孔隙贡献，而低吸力阶段的失水吸水现象主要受小孔隙控制。对于泥浆土，孔隙大小比较均匀。但会产生一定量的网状微裂隙，使得测得的泥浆土的土-水特征曲线与单一进气值的典型曲线有一定的差别。不同孔隙比产生不同数量的微裂隙，造成的差异程度不同。

(2) 孔隙结构对土-水特征曲线影响显著，压实土和泥浆土的土-水特征曲线分别呈现“双台阶”和“单台阶”特征。在初始孔隙比相同的情况下，泥浆土的

进气值更大，持水性能更好。与压实土的土水特征曲线相比，可以看出泥浆土低吸力范围内由于网状微裂隙造成的失水量是很小的。

(3) 在干湿循环过程中压实土的滞回性明显小于泥浆土，这是由于两者体变不同。泥浆土的体变较大，主要原因是其孔隙结构连通性较好，稳定性较差，在干湿循环中产生一定数量的微裂隙。

参考文献：

- [1] WANG M, XU P, LI J, et al. Microstructure and Unsaturated Geotechnical Properties of Net-like Red Soils in Xuancheng, China[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2014, **43**(2): 20140052.
- [2] MA S K, HUANG M S, HU P, et al. Soil-water characteristics and shear strength in constant water content triaxial tests on Yunnan red clay[J]. Journal of Central South University, 2013, **20**(5): 1412 – 1419.
- [3] 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**(S1): 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))
- [4] SUN D A, YOU G, ZHOU A N, et al. Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2016, **75**(2): 781 – 791.
- [5] BURTON G J, PINEDA J A, SHENG D C, et al. Microstructural changes of an undisturbed, reconstituted and compacted high plasticity clay subjected to wetting and drying[J]. Engineering Geology, 2015, **193**: 363 – 373.
- [6] GAO Y, SUN D A, ZHOU A N. Hydro-mechanical behaviour of unsaturated soil with different specimen preparations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(6): 909 – 917.
- [7] LIU X, BUZZI O, YUAN S, et al. Multi-scale characterization of retention and shrinkage behaviour of four Australian clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(5).
- [8] LEONG E C, HE L, RAGARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 1 – 12.
- [9] GREESPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1977, **81**(1): 89 – 96.

(责编：孙振远)