

DOI: 10.11779/CJGE201502020

红黏土的土水特性及其孔隙分布

孙德安^{1,2}, 高游¹, 刘文捷¹, 韦昌富², 张升³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 以桂林红黏土为研究对象, 采用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法3种方法研究在全吸力范围内原状样和压实样的土水特性, 并结合压汞试验研究其孔隙分布。试验结果表明: 当吸力约小于10 MPa时原状样的土水特征曲线略低于压实样, 主要原因是原状样内部裂隙随吸力的增加而不断发展; 当吸力约大于10 MPa时两者的土水特征曲线几乎重合。原状和压实桂林红黏土样的土水特征曲线与典型的土水特征曲线不同, 即在过渡段均不是单一直线。此外, 原状样为单峰孔隙结构, 压实样则为双峰孔隙结构, 原状样的最终收缩变形量比压实样大。不同干密度的压实样内部颗粒间孔隙分布几乎相同, 而积聚体间孔隙或积聚体内孔隙相对较大孔隙存在差异; 由此可解释在高吸力范围内不同干密度压实样的含水率与吸力关系土水特征曲线几乎重合; 以饱和度与吸力关系表示时, 干密度越大, 土水特征曲线越高。

关键词: 土水特征曲线; 红黏土; 压汞试验; 孔隙分布; 原状样

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)02-0351-06

作者简介: 孙德安(1962-), 男, 教授, 主要从事土力学的研究。E-mail: sundean@shu.edu.cn。

Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay

SUN De-an^{1,2}, GAO You¹, LIU Wen-jie¹, WEI Chang-fu², ZHANG Sheng³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The pressure plate method, filter paper method and vapor equilibrium technique with saturated salt solution and mercury intrusion porosimetry tests on Guilin lateritic clay are used to investigate the soil-water characteristics and pore-size distribution of undisturbed and compacted specimens in full suction range. The test results show that the undisturbed specimen has lower water content and saturation degree than the compacted one in the suction ranging from 0 kPa to 10 MPa because of the development of internal crack of undisturbed specimen with the increasing suction. When the suction is higher than 10 MPa, the soil-water characteristic curves (SWCC) coincide with each other. In the transition zone, the SWCCs of the undisturbed and compacted specimens are different from the typical ones. The undisturbed natural specimens exhibit a unimodal pore-size distribution, and the compacted ones usually have a double-porosity microstructure. The stability of shrinkage of the undisturbed natural specimen is larger than that of the compacted one. The compacted specimens with different dry densities also have the same pore-size distribution between particles, while the inter-aggregate pore distribution differ between the compacted specimens with different dry densities. It explains that when it is expressed by the relation between suction and water content, the SWCC is independent of dry density in the high suction range. When it is expressed by the relation between suction and saturation degree, the SWCC with high dry density is higher than that with the small one.

Key words: soil-water characteristic curve; lateritic clay; mercury intrusion porosimetry; pore-size distribution; undisturbed specimen

0 引言

红黏土作为一种典型特殊土, 是碳酸盐类岩石在亚热带温湿气候条件下风化, 再经过残积或坡积而形成的高塑性黏土; 主要分布在广西、贵州、云南、广

东以及湖南等省^[1]。红黏土的工程性质不同与一般黏

基金项目: 科技部973项目(2014CB047001); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金项目(13-KF-03)

收稿日期: 2014-05-16

土, 具有较高地基承载力、较低压缩性、高收缩性、低膨胀性等特点^[2]。这就引起了众多学者对红黏土展开了大量研究, 赵颖文等^[3]研究了击实红黏土的力学特性、胀缩性能、孔径分布特征与含水率之间的关系; 杨庆等^[4]研究了非饱和红黏土与膨胀土的强度特性以及与一般黏性土的差别, 并探讨了抗剪强度指标与含水率之间的关系; 谈云志等^[5]研究了不同干密度的压实试样在脱湿路径下对土水特性的影响; 刘小文等^[6]采用滤纸法对压实红黏土进行吸力量测, 探讨了基质吸力与含水率及干密度的关系。中国对击实或压实红黏土的土水-力学特性研究取得了较好的成果。然而, 压实或击实样是无法真正模拟原状样的真实状态, 如应力历史、裂隙的发展、内部孔隙分布等方面, 原状样与压实或击实样都存在差异。文献[7]研究了贵港原状样红黏土脱湿过程的无侧限抗压强度, 指出原状红黏土内部的网状裂隙十分发育, 明显影响了土体的无侧限抗压强度。为了能够更准确地理解红黏土的土水与力学特性, 有必要通过试验对原状样与压实或击实样的土水-力学特性进行比较分析。

本文采用压力板法(吸力范围 0~1.5 MPa)、滤纸法(吸力范围 0.5~40 MPa)和饱和盐溶液蒸气平衡法(吸力范围 3~367 MPa), 量测不同吸力范围内原状和压实桂林红黏土试样的土水特性, 最终得到了全程吸力范围内的土水特征曲线, 并与相近初始干密度的压实样在全程吸力范围内的土水特征曲线进行对比; 结合压汞试验所测的孔隙分布对其进行比较与分析。

1 试验概况

1.1 试验材料

本试验所用的红黏土取自广西桂林市南部的桂林理工大学雁山校区。经 X 衍射分析法知其矿物成分主要为高岭石(56.59%)、三水铝石(11.44%)、针铁矿(15.61%), 还含有一定量的石英(12.45%), 且小于 2 μm 的颗粒含量较高, 约占总量的 50.8%^[8]。试验所用的试样包括原状样和压实样。原状样的直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm 环刀试样(初始含水率为 32.1%, 初始干密度约为 1.4 g/cm³); 压实样制作先将土样风干、碾碎、过 2 mm 筛, 配制成目标含水率, 再通过控制初始干密度的方法进行压实, 最后制成的与原状样相同尺寸的环刀压实试样。桂林红黏土的物理性质指标: 天然含水率为 32.1%, 土粒比重为 2.744, 最大干密度为 1.52 g/cm³, 最优含水率为 28%, 液限为 77.8%, 塑限为 42.1%, 塑性指数为 35.7。力学性质指标: 自由膨胀率为 32.5%, 线缩率为 1.7%, 体缩率为 1.7%, 收缩系数为 0.317, 黏聚力为 57.07 kPa, 内摩

擦角为 21.9°, 可看出该红黏土的液塑限都较高, 属于高液限黏土。

1.2 试验方法

压力板试验: 所用的仪器为美国 GCTS 公司产的 SWC-150 土水特征压力仪, 配有 15bar 陶土板和增压阀, 最大气压可以加至 1.5 MPa。将制好的环刀试样放入 SWC-150 土水特征压力仪的压力室中, 逐级施加吸力至 1.2 MPa。

滤纸法试验: 取 7 个原状试样, 初始含水率约为 32%, 初始干密度约为 1.4 g/cm³, 对 7 个原状试样进行不同程度的风干, 使其含水率范围在 7%~32% 之间。再放入密封性非常好的 Lock&Lock 盒, 底部放 3 张滤纸、然后紧贴滤纸放置试样, 土样上方用滤网隔开后再放一张滤纸, 最后放入恒温室内。两周后待滤纸与试样中水分达到平衡后, 测量试样的体积、含水率以及滤纸含水率。压实样的制作方法、步骤及最后所采用的 Whatman No.42 号滤纸率定曲线与文献[9]所采用的方法相同。

饱和盐溶液蒸气平衡法: 将制备好的环刀样抽气饱和后切成小块, 放入过饱和的盐溶液上方, 进行脱湿试验; 每个试样平均切成 8 小块, 每种溶液上方放置两小块饱和样, 一块用于测量吸力平衡后的含水率, 另一块根据阿基米德原理测量其体积。即, 先将土块在液体石蜡中预浸润 15 min, 使石蜡充满其表面的孔隙, 取出后擦去表面多余的石蜡。然后将其放入不规则土样体积量测装置的铝盒内, 并浸没于液体石蜡中。天平显示的变化量即为被土块排开的液体石蜡重量, 由液体石蜡的密度可得到土块体积。试验中所用的饱和盐溶液和对应的吸力值^[10], 如表 1 所示。

表 1 饱和盐溶液及对应吸力值(20℃)

Table 1 Saturated salt solution and corresponding suctions

饱和盐溶液	RH/%	总吸力/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
KI	69.9	48.42
NaCl	75.5	38.00
KCl	85.1	21.82
K ₂ SO ₄	97.6	3.29

2 土水特性试验结果

2.1 全吸力范围原状样的土水特征曲线

图 1 表示用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法测得的原状样在初始干密度约为 1.4 g/cm³ 时全吸力范围内的脱湿土水特征曲线, 分别用吸力与含

水率、饱和度、孔隙比关系表示。由图 1 可知, 3 种方法测得的土水特征曲线在吸力重合区域内能较好的重合; 原状样的进气值约 10 kPa, 且吸力在 1.0~1.0 MPa 范围内含水率和饱和度都随吸力增大略微下降, 孔隙比也略微减小(即试样发生微小收缩变形)。当吸力在 1.0~10 MPa 范围时随吸力增大含水率和饱和度下降明显, 孔隙比变化较大(即试样收缩显著)。吸力大于 10 MPa 时, 含水率、饱和度、孔隙比的变化都很小, 几乎趋于稳定。图 1 (c) 中由滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法测得的孔隙比在吸力重合区域内不是完全相同, 这是因为原状试样内网状裂隙十分发育, 且在高吸力条件下试样容易会发生干裂, 体积测量不是很准。而且盐溶液试验不是同一试样, 各试样的密度有一定的差异。

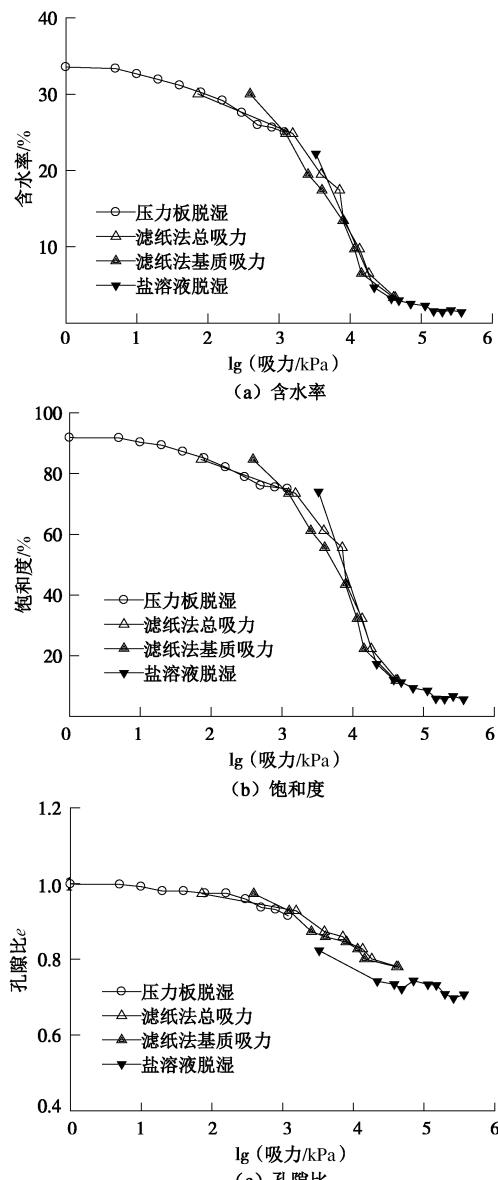
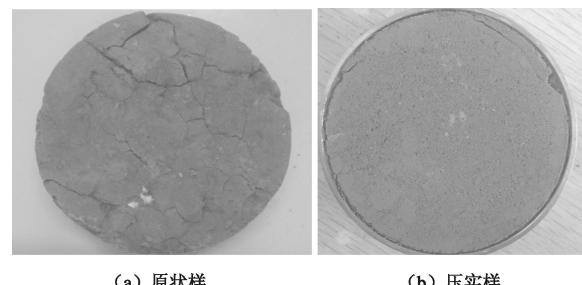


图 1 全程吸力范围内原状红黏土的土水特征曲线及孔隙比变化

Fig. 1 SWCCs and void ratios of undisturbed lateritic clay in full suction range

图 2 为风干后原状样和压实样的图片, 可见在风干后原状样出现很多裂隙且容易形成碎块而脱落, 而压实样则不同, 风干后整体性还较好。



(a) 原状样 (b) 压实样

图 2 风干后的原状样和压实样

Fig. 2 Undisturbed and compacted specimens after air-drying

此外, 原状红黏土试样全吸力范围内土水特征曲线的过度阶段并不是一条直线, 而是由两个线性段组成: 前一段的吸力小于 1.0 MPa, 曲线较平缓下降; 后一阶段的吸力大于 1.0 MPa, 曲线下降明显。

2.2 原状样与压实样的土水特征曲线

图 3 表示用 3 种方法测得原状样与初始干密度相近的压实样在全吸力范围内的脱湿土水特征曲线, 分别用吸力与含水率、饱和度、孔隙比关系表示。

由图 3 (a) 和 (b) 可知, 压实样的进气值约为 20 kPa 略大于原状样的进气值。且压实样的土水特征曲线与典型的土水特征曲线也存在差异, 土水特征曲线的过渡段由 3 条不同斜率的线段构成, 中间一段较平缓。当吸力小于 10 MPa 时压实样的土水特征曲线略高于原状样, 主要是原状样内部网状裂隙随着吸力的增加而不断发育, 如图 2 所示。当吸力大于 10 MPa 时两者的土水特征曲线几乎重合, 此时原状样内部裂隙发育几乎稳定, 土水特性主要由试样内部微观的孔隙分布决定。

由图 3 (c) 可知, 随着吸力的增大, 原状样最终稳定时的孔隙比比压实样小, 即在相近初始孔隙比条件下在脱湿过程中原状样较压实样发生了较大的收缩变形。在脱湿全过程中压实样的孔隙比都高于原状样, 特别是吸力大于 1 MPa 时更明显。从孔隙比的大小角度看, 压实样的土水性应差才对, 但结果恰好相反(见图 3 (a)); 这主要是原状样从饱和状态下到高吸力的过程中试样内网状裂隙在不断的发展。由此可见, 裂隙的发育对土水特性也会产生很大的影响。此外, 图 3 (c) 中压实样滤纸法的孔隙比几乎不变。因为压实样是控制相同的干密度、不同含水率进行压实, 且在整个试验过程中试样的孔隙比变化不大, 几乎平行于吸力轴。

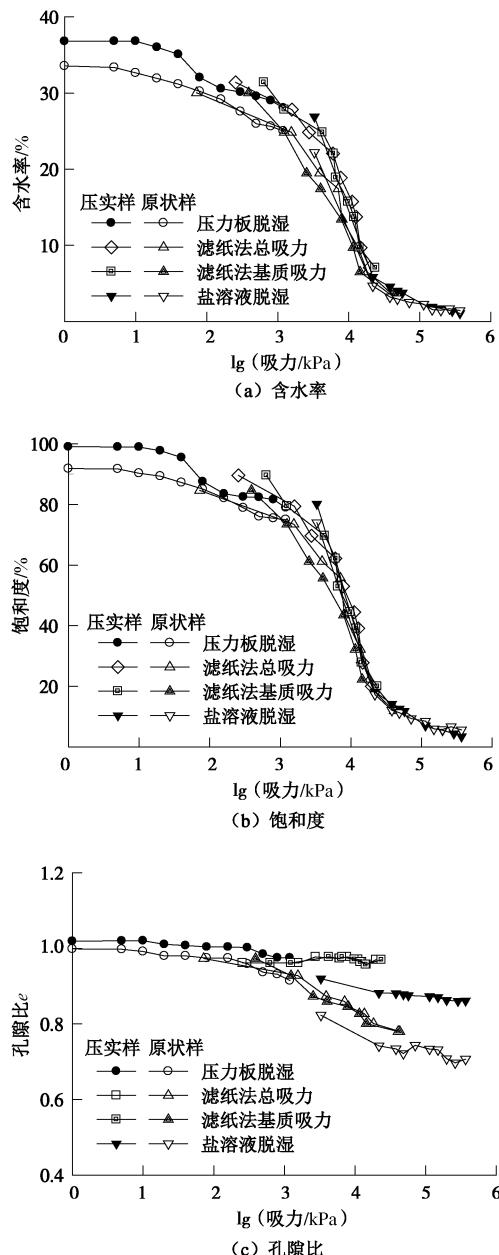


图3 全程吸力范围内原状样和压实样的土水特征曲线及孔隙比变化

Fig. 3 SWCCs and void ratios of undisturbed and compacted specimens in full suction range

3 压汞试验结果分析

3.1 压汞试验

压汞法是基于毛细管现象设计的，在测试土样孔隙中，低压作用下，水银仅压入到土样的较大微孔隙内；高压作用下，水银才压入土样较小的微孔隙。假设为孔隙圆柱形，为了克服水银和固体之间的内表面张力，则外加压力 $p(d)$ 和 d 的关系满足著名的 Washburn 方程^[11]，即

$$p(d) = \frac{-4T_s \cos \theta}{d} \quad , \quad (1)$$

式中， $p(d)$ 为外加压力 (Pa)， d 为试样孔隙直径 (m)， T_s 为汞表面张力 (N/m)， θ 为汞与固体表面接触角。

压汞试验中试样采用风干的干燥方法会使其产生不同程度的收缩变形^[12-13]。随吸力的增加，红黏土会产生明显的收缩变形，故研究其高吸力下原状样和压实样收缩特性更加有意义；而风干方法得到试样的内部孔隙分布与高吸力状态下试样的孔隙分布相近。因此，本研究取 3 个试样进行压汞试验，试验前对土样进行风干。两个压实样初始孔隙比分别为 1.74 和 1.00；原状样的初始孔隙比约为 0.97。压汞试验仪是 Micromeritics AutoPore IV，低压范围为 4~207 kPa 和高压范围为 207~413700 kPa。

3.2 压汞试验的结果分析

图 4 表示压实样与原状样的孔径与相应累计汞压入体积量之间的关系曲线。由图可知，两个压实样的累计汞压入体积量曲线中存在两个明显增加阶段，即试样的孔隙主要集中在这两个孔径区域范围内，也就是孔隙分布所谓的双峰孔隙结构。试样中每一个大小的孔径与吸力值存在着对应关系。给试样施加吸力，使其增加至某一孔径所对应的吸力时，此孔隙中的水分将会排出；若孔径大小在小范围内对应的孔隙体积量较大，吸力增加到此孔径范围内所对应的吸力值时试样就会出现明显的脱湿现象，土水特征曲线就会出现明显的下降段。

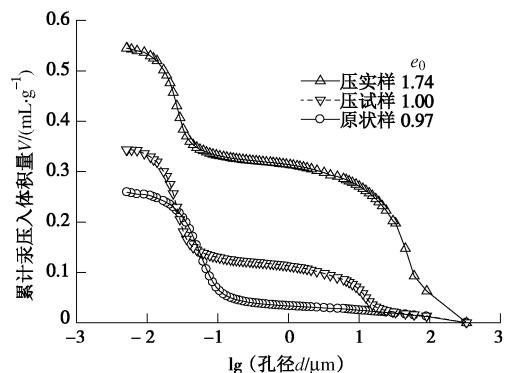


图4 孔径与累计汞压入量关系曲线

Fig. 4 Relationship between diameter and cumulative intruded volume

图 4 中压实样累计汞压入体积量曲线中存在两个明显增加阶段，中间一段平缓，即可推测土水特征曲线存在两下降段和一段平缓段，与图 3 压实样土水特征曲线的试验结果是一致的。这也就解释了压实样在全吸力范围内土水特征曲线过渡段分为 3 段斜率的直线。原状样的孔径分布主要集中在 0.01~0.1 μm 之间，其累计汞压入体积量急剧增加，孔隙分布为单峰孔隙结构。此外，初始孔隙比相近的压实样和原状样经风干后压实样的最终累计汞压入体积量值比原状样大，

说明风干过程中引起原状样的收缩变形更大; 与图 2 (c) 中在高吸力条件下原状样的孔隙比要比压实样小的结果一致。若按 Kodikara 等^[14]对土体内部微孔隙的划分: 颗粒间孔隙 ($0.004\sim 1\text{ }\mu\text{m}$)、积聚体内孔隙 ($1\sim 30\text{ }\mu\text{m}$)、积聚体间孔隙 ($10\sim 1000\text{ }\mu\text{m}$), 则原状样内部主要存在颗粒间孔隙; 而对于压实样还存在一定量的积聚体间孔隙或积聚体内孔隙相对较大的孔隙。

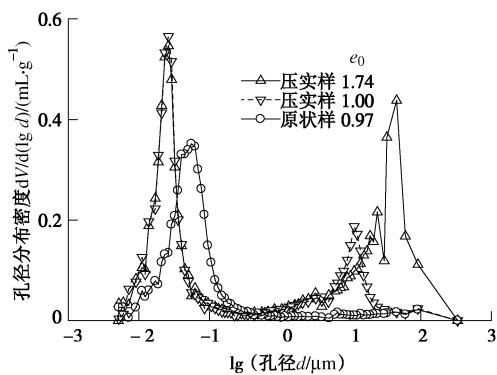


图 5 孔径与孔径分布密度关系曲线

Fig. 5 Relationship between diameter and density of pore-size distribution

图 5 表示压实样和原状样由压汞试验测得的孔径与孔径分布密度的关系图, 反映了试样中相应孔径时的孔隙体积所占的比例大小。由图可知, 原状样的孔隙分布为单峰孔隙结构, 这主要是原状样在自然条件下经历了无数次的干湿循环而产生胀缩变形, 使积聚体间孔隙或积聚体内孔隙相对较大的孔隙逐渐消失, 而形成相对均匀的单峰孔隙结构。两个压实样的孔隙分布为双峰孔隙结构, 孔径在小于 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 时两个不同干密度试样的孔径分布情况几乎一致, 而孔径在 $5\sim 500\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的孔径分布存在差异。也就是说, 压实样孔隙比的大小影响积聚体间孔隙或积聚体内相对较大孔隙的分布量, 而对于颗粒间孔隙分布量几乎不产生影响。这也解释了用相同土样制成不同孔隙比的压实样在高吸力条件下所测得的土水特征曲线(以含水率与吸力关系表示)几乎重合。如果用饱和度与吸力关系整理高吸力下的土水特征曲线的话, 初始孔隙比大的饱和度要小。这主要饱和度考虑了土体体积, 孔隙比大的试样, 其积聚体间孔隙量要多, 故饱和度变小。

图 6 (a) 和 6 (b) 为用饱和盐溶液蒸气平衡法测得的两种初始孔隙比红黏土压实样在吸湿过程的土水特征曲线。从图 6 (a) 可知, 含水率与吸力关系的土水特征曲线几乎重合, 而从图 6 (b) 的饱和度与吸力关系曲线可知, 两者则明显不同。这一现象也就可以结合两压实样内部孔隙分布得到很好的解释。

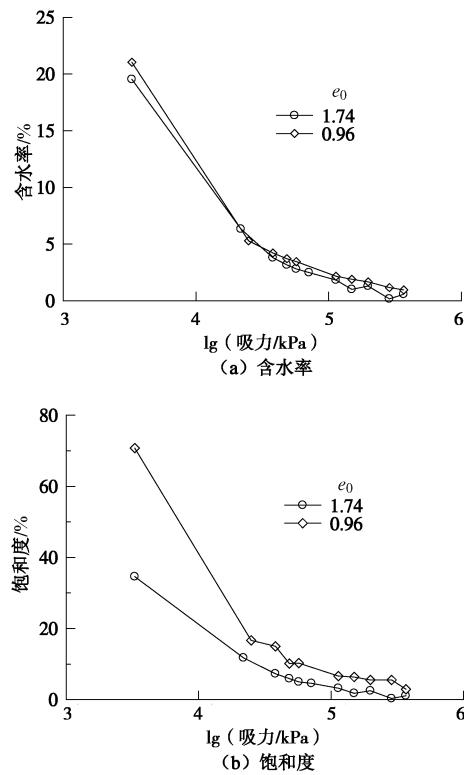


图 6 两种密度下压实红黏土的吸湿土水特征曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curves of compacted lateritic clay with two dry densities in wetting

4 结 论

(1) 原状样和压实样全程吸力范围内的土水特征曲线, 与典型的土水特征曲线相比, 其过渡段不是单一直线。原状样的过渡段由两不同斜率的直线组成, 主要受其内部发育的裂隙及单峰孔隙分布结构的影响; 压实样的过渡段由 3 段不同斜率直线组成, 主要由试样内部双峰孔隙分布结构决定的。

(2) 原状样随着吸力的增大, 试样内部微裂隙不断发展, 使吸力约小于 10 MPa 时原状样的土水特征曲线略低于压实样; 吸力约大于 10 MPa 时两者的土水特征曲线几乎重合, 此时原状样内部裂隙发育几乎稳定, 土水特性主要由试样内部微观的孔隙分布决定。

(3) 原状样孔隙分布为单峰孔隙结构, 其内部主要存在颗粒间孔隙及十分发育的网状裂隙。压实样则为双峰孔隙结构, 其内部主要存在颗粒间孔隙及一定量的积聚体间孔隙和积聚体内孔隙相对较大的孔隙。

(4) 不同干密度的压实样内部孔隙分布中颗粒间孔隙分布几乎相同, 积聚体间孔隙或积聚体内孔隙相对较大孔隙存在差异。此孔隙分布特征可以解释以下宏观试验结果: 在高吸力范围内不同干密度压实样的土水特征曲线以含水率与吸力关系表示曲线几乎重合, 以饱和度与吸力关系表示时, 干密度越大, 土水

特征曲线越高。

参考文献:

- [1] 姜洪涛. 红黏土的成因及其对工程性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2000, 3: 33 - 37. (JIANG Hong-tao. Origin of red clay and its effects on engineering property[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, 3: 33 - 37. (in Chinese))
- [2] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 33(4): 458 - 462. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Fundamental property and micro structure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 33(4): 458 - 462. (in Chinese))
- [3] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369 - 373. (ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behavior of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 369 - 373. (in Chinese))
- [4] 杨 庆, 贺 洁, 莲茂田. 非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 13 - 16. (YANG Qing, HE Jie, LUAN Mao-tian. Comparative study on shear strength of unsaturated red clay and expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 13 - 16. (in Chinese))
- [5] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的土水性能与机制分析[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] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及干密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302 - 3306. (LIU Xiao-we, 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))
- [7] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2593 - 2598. (ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2593 - 2598. (in Chinese))
- [8] 吕海波, 曾召田, 尹国强, 等. 广西红黏土矿物成分分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 651 - 656. (LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, YIN Guo-qiang, et al. Analysis of mineral composition of red clay in Guangxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 651 - 656. (in Chinese))
- [9] 孙德安, 孟德林, 孙文静, 等. 两种膨润土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 973 - 978. (SUN De-an, MENG De-lin, SUN Wen-jing, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 973 - 978. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921, 7(4): 115 - 116.
- [12] 张 平, 房营光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 388 - 391. (ZHANG Ping, FANG Ying-guang, YAN Xiao-qing, et al. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 388 - 391. (in Chinese))
- [13] SASANIAN S, NEWSON T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents [J]. Engineering Geology, 2013, 158: 15 - 22.
- [14] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Change in clay structure behaviour due to wetting and drying[C]// Proceedings of 8th Australian-Zealand Conference on Geomechanics. Hobart, 1999: 179 - 185.