

文章编号: 1000-7598(2010)05-1427-04

压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究

谈云志^{1,2}, 孔令伟², 郭爱国², 万智³

(1.三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3.湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘要:为研究压实作用对红黏土孔隙分布的影响,采用液氮冻干法对经过压力板仪脱至残余含水率后的压实试样进行干燥,继而利用孔隙仪测试其孔隙分布特征。结果表明,不同干密度试样的孔隙分布特征在孔径 $d > 10 \mu\text{m}$ 范围内差异性比较明显,干密度越大分布在该范围内的孔隙越少,但所有试样的大部分孔隙主要分布在孔径 $d < 0.1 \mu\text{m}$ 的范围内,并且分布密度十分相似。换言之,常规压实作用只能改变土体某一较大孔径范围内的孔隙,而对小孔径的孔隙改变不大,这也对于说明红黏土路基填料的压实,常规的压实作用对提高土体的压实度幅度有一定范围。

关键词:红黏土; 孔隙分布; 压实

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil

TAN Yun-zhi^{1,2}, KONG Ling-wei², GUO Ai-guo², WAN Zhi³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Education Ministry, China Three Gorges University, Yichang Hubei, 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: To investigate the effect of compaction on the pore size distribution characteristic of laterite soil, the compacted soil samples which were firstly subjected to pressure plate to dehydrated to their residual water content were dried by liquid nitrogen freeze-drying method; and then the corresponding pore size distribution was measured. The results show that, among samples with different dry density, the differences of characteristics of pore size distribution are obvious in the case that the pore size is larger than $10 \mu\text{m}$. And the greater the dry density is, the fewer the pores of soil in this scope. However, most of pores of samples are mainly distributed in the range where pore size is finer than $0.1 \mu\text{m}$ and their pore distribution density are almost the same, which means that conventional compaction of soil can only change the larger pore size, no significant change for the smaller one. This also indicates that the conventional compaction has a limit effect on the compactness of the roadbed which was filled with laterite soil.

Key words: laterite soil; pore distribution; compaction

1 前言

土体的微观结构与土体的传热传质、持水性能及其变形等特性密切相关。通过压汞试验(mercury intrusion porosimetry, MIP)获取土体的孔隙尺寸分布(pore size distribution, PSD)特征,是一种研究土体微观结构比较成熟的方法。Garcia-Bengochea^[1]等(1979年)通过土体的孔隙分布数据,提出了预测饱和渗透系数的方程。Delage&Lefebvre^[2](1984年)

利用孔隙计,研究灵敏性原状黏土固结过程中结构的演化规律,并针对该黏土提出了自由孔隙和残存孔隙两个概念。Griffiths&Joshi^[3](1989年)研究了不同种类的黏土在固结的不同阶段中其孔隙尺寸分布情况。Prapaharan等^[4](1985年)通过压实黏土的孔隙分布特征数据,预测其土-水特征曲线。由此可见,压汞试验得出的孔隙尺寸分布曲线不仅可以表征内部孔隙的形态,还可以分析与孔隙相关的特征变量,如渗透系数、压缩系数、持水特征等。论文

收稿日期: 2009-07-18

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(No. 200631878530); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ0803)。

第一作者简介: 谈云志,男,1979年生,博士,主要从事非饱和土力学方面的研究工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

旨在通过压汞试验了解压实作用孔隙分布特征的影响, 可供现场路基的压实机参考。

2 试样和试验方法

2.1 试样

试验土样取自厦门至成都高速公路湖南省郴州段, 红黏土的基本物理特性见表1。

表1 试验用红黏土的物理性质指标
Table 1 Physical property indexes of laterite soil

天然含水率/%	天然湿密度/(g/cm ³)	土的相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数	自由膨胀率/%
30.9	1.80	2.65	61	35	26	28.5

通过控制干密度的方法, 制备了4种干密度(1.58、1.51、1.44 g/cm³和1.37 g/cm³)的环刀样。制作方法: 先根据最优含水率配置土样, 用塑料袋密封放置保湿缸内静置7 d, 再根据干密度和初始含水率, 计算每个试样的湿土质量。把称后的土样倒入预先定制好的钢模内进行静压, 钢模的内直径与试样直径相同, 两端用垫块填充(垫块直径与钢模内径相同), 当千斤顶把2个垫块完全压平的时候, 试样刚好达到预定的密度。静压完成后不能立刻卸掉千斤顶, 要让施加的力稳定一段时间防止试样回弹。最后, 用其他垫块从底部把试样慢慢顶出。成型后试样要用密封袋封装好, 再次放入保湿缸内静置以备供试验所用。把上述制作好的试样在完成土-水特征曲线试验后, 将环刀内不同干密度的土样推出后切成边长大约为1 cm的立方体土块, 将其在液氮中(沸点-196℃)快速冷冻15 min, 使土中液态水形成不具有膨胀性的非结晶态冰。最后, 利用冷干机在-50℃的环境下抽真空8 h, 使土中非结晶冰直接升华干燥, 以避免直接干燥带来的体积收缩。

2.2 试验方法

压汞法测试土体孔隙分布是基于非浸润性液体在没有外压力作用下不会自主流入固体孔隙内部的原理, 该方法是研究土壤等多孔介质微观结构的手段之一。汞对土体来说属于非浸润型的流体, 即土体表面和汞分子之间具有排斥性。把试样浸入水银中, 通过对水银施加压力迫使水银逐渐进入到试样孔隙内。水银浸入孔隙所需的压力与孔隙直径存在对应关系。Washburn^[5](1921年)据此提出如下公式:

$$P = 4T_s \cos \theta / d \quad (1)$$

式中: P 为绝对压力(kPa); T_s 为水银的表面张力

(0.484 N/m); θ 为水银和土之间的接触角(140°); d 为当量孔隙直径(μm), 假设孔隙形状为柱状, 如为扁平形状则当量直径 d 等于2倍的颗粒间距离。

采用美国麦克公司生产的9310型测孔仪进行压汞试验, 该测孔仪可以测量孔隙直径范围从0.006~300 μm 。从压汞试验得到压力与汞压入的体积关系, 利用Washburn方程, 通过压力 P 找到对应的当量直径 d , 由此可转换为孔隙直径与表观孔隙的分布曲线。

3 试验结果及分析

3.1 孔隙体积的累积分布曲线

孔隙累积分布曲线类似颗粒级配曲线, 描述了大于某孔径的所有孔隙体积累积量与孔径之间的关系。由于大孔隙与小孔隙的直径大小相差5个数量级, 为便于分析试验结果孔隙直径采用对数刻度表示。4种不同初始干密度试样经过压力板仪脱水至残余含水率后的孔隙累积分布如图1所示。从图1中可看出, 不同初始干密度试样的孔隙分布特征有很大的差异, 初始干密度越大, 孔隙的总体积越小, 所以初始干密度较大的孔隙累积分布曲线总是整体位于初始干密度较小的分布曲线下方。以孔径0.1 μm 和10 μm 为界限孔隙直径, 可将上列孔隙累积分布曲线大致分为3个范围, 即 $d < 0.1$, $0.1 < d < 10$, $d > 10 \mu\text{m}$ 。不同孔径范围内的孔隙体积分布情况, 见表2。

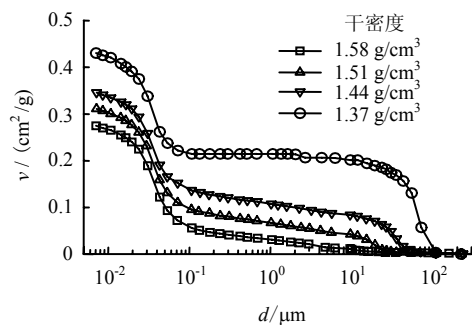


图1 孔隙累积分布曲线
Fig.1 Cumulative pore distribution curves

表2 压实红黏土的孔隙分布特征
Table 2 Pore distribution characteristics of compaction laterite soil

干密度/(g/cm ³)	平均孔径/ μm	不同孔径范围孔隙体积/%				
		<0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	>10
1.58	0.035	3	75	10	8	4
1.51	0.040	2	67	10	8	13
1.44	0.044	3	57	9	6	25
1.37	0.053	2	46	2	2	48

4 种干密度 (1.58、1.51、1.44、1.37 g/cm³) 试样, 在孔径 ($d < 0.1 \mu\text{m}$) 范围内的孔隙体积占总孔隙体积的比例分别为 78%、69%、60%、48%; 在孔径 ($0.1 < d < 10 \mu\text{m}$) 的范围内分别为 18%、18%、15%、4%; 在孔径 ($d > 10 \mu\text{m}$) 范围内则分别为 4%、13%、25%、48%。不同干密度试样的孔隙分布差异主要体现在孔径 ($d > 10 \mu\text{m}$) 的范围内, 而试样的孔隙体积则主要分布在孔径 ($d < 0.1 \mu\text{m}$) 的范围内。不同孔径范围内的孔隙体积占总孔隙体积的比例多少, 在孔隙累积分布曲线上表现为该孔径范围内曲线斜率的大小, 斜率越大, 说明所占的孔隙比例越多; 斜率越小, 则表明所占的孔隙比例越少。

3.2 孔隙的孔径分布曲线

孔隙的孔径分布曲线可以利用 Origin 数据处理软件对孔隙的累积分布曲线进行求导数即可得到, 反映了不同孔径对应下的孔隙体积大小。4 种不同初始干密度 (1.58、1.51、1.44、1.37 g/cm³) 试样的孔径分布曲线如图 2 所示。孔径分布曲线图中的峰值大小代表该孔径对应的孔隙体积多少。4 种不同干密度试样的孔径分布曲线均出现了两种比较典型的峰值。峰值的大小和对应的孔径值, 见表 3。峰值①处不同干密度试样对应的孔径及其孔隙分布密度差别不大, 但峰值②处对应的孔径差别非常悬殊, 最大孔径直径是最小孔径直径的 17 倍, 前者对应的孔隙分布密度也是后者的 12 倍, 说明常规的压实作用只能改变土体的大孔径孔隙, 而土体的大部分孔隙都属于微观孔隙, 表明常规压实作用只能在很小的范围内提高土体的压实度。

通过分析压实红黏土的孔隙累积分布曲线和孔径分布曲线可知, 土体干密度的变化主要是由于孔径 ($d > 10 \mu\text{m}$) 范围内孔隙变化引起。换言之, 压实的作用主要只能改变孔径 ($d > 10 \mu\text{m}$) 范围内的孔隙。赵颖文认为^[6]红黏土不同的微观结构层次具有不同的结构强度。在相同外力作用下, 某一微观结构层次的结构强度破坏, 则该结构层次下的孔隙控制土体的力学特性, 属于活性孔隙, 而另一层次的结构强度未破坏, 相应的孔隙保持原有的状态, 没有对土体的力学性状产生较大影响, 属于惰性孔隙, 因而红黏土不同微观层次下的孔隙对土体的宏观工程特征产生不同的影响, 据此可以认为孔径 ($d > 10 \mu\text{m}$) 范围内的孔隙为活性孔隙, 而孔径 ($d < 10 \mu\text{m}$) 范围内的孔隙为惰性孔隙。

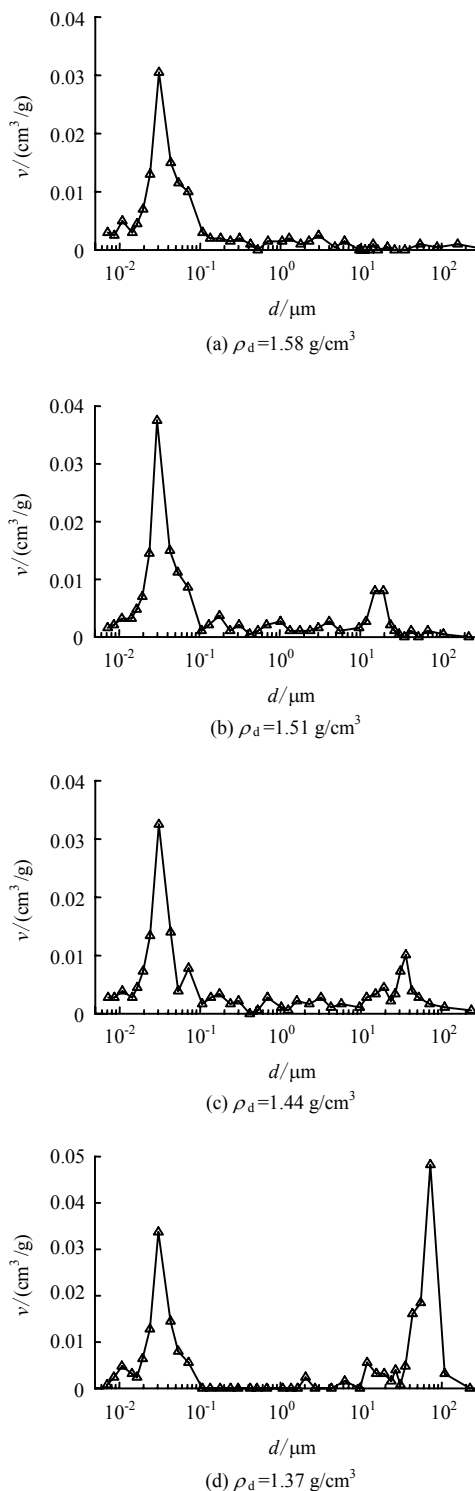


图 2 不同孔隙的孔径分布曲线
Fig.2 Different pore size distribution curves

表 3 孔径分布曲线峰值特征
Table 3 Peak characteristics of pore size distribution curves

干密度 /(g/cm ³)	峰值①		峰值②	
	孔径 /μm	分布密度 /(g/cm ³)	孔径 /μm	分布密度 /(g/cm ³)
1.58	0.035 9	0.036 5	3.624	0.004 5
1.51	0.029 7	0.037 5	19.503	0.008 0
1.44	0.036 0	0.035 3	35.960	0.010 1
1.37	0.035 8	0.042 6	60.940	0.055 4

红黏土的孔隙十分发育,形成以小孔隙与微孔隙为主同时兼有一定的大、中孔隙,比一般黏土孔隙比高。红黏土的结构单元主要为不规则的集聚体,在漫长的红土化过程中集聚体表面和集聚体之间因游离氧化铁的胶结作用连成更大的聚合体,形成凝块状和絮凝状结构^[7-10]。根据红黏土的微观结构特征可以将其孔隙分为主要的两大类^[11-14]:(1)聚集体内孔隙:主要指微聚体内的孔隙,这类孔隙数量多、体积小、稳定性较高;(2)聚集体之间孔隙:主要指聚集体、碎屑颗粒、微块体之间的孔隙,这类孔隙的数量相比前者要少但体积大,稳定性与聚集体之间的联结方式有关,若是松散堆积联结则稳定性差,若是穿插镶嵌联结则稳定性强。所以,上述压实红黏土孔径($d < 1 \mu\text{m}$)范围内的孔隙可视为聚集体内孔隙;孔径($1 < d < 10 \mu\text{m}$)范围内的孔隙为稳定性较强的聚集体之间孔隙,而孔径($d > 10 \mu\text{m}$)范围内的孔隙则为稳定性较差的聚集体之间孔隙。

4 结 论

(1)通过分析压实红黏土的孔隙体积累积分布曲线可知,4种干密度(1.58、1.51、1.44 g/cm^3 和1.37 g/cm^3)试样,在孔径($d < 0.1 \mu\text{m}$)范围内的孔隙体积占总孔隙体积的比例分别为78%、69%、60%、48%;在孔径($0.1 < d < 10 \mu\text{m}$)的范围内分别为18%、18%、15%、4%;在孔径($d > 10 \mu\text{m}$)范围内则分别为4%、13%、25%、48%。可见压实的作用主要只能改变孔径($d > 10 \mu\text{m}$)范围内的孔隙。

(2)孔隙孔径分布曲线存在2个峰值,峰值①处不同干密度试样对应的孔径及其孔隙分布密度差别不大,但峰值②处对应的孔径差别非常悬殊,最大孔径直径是最小孔径直径的17倍,前者对应的孔隙分布密度也是后者的12倍。

(3)根据红黏土的微观结构特征可以将其孔隙分为主要的两大类:聚集体内孔隙和聚集体之间孔隙。压实红黏土孔径($d < 1 \mu\text{m}$)范围内的孔隙可视为聚集体内孔隙;孔径($1 < d < 10 \mu\text{m}$)范围内的孔隙为稳定性较强的聚集体之间孔隙,而孔径($d > 10 \mu\text{m}$)范围内的孔隙内的孔隙则为孔隙为稳定性较差的聚集体之间孔隙。

参 考 文 献

[1] GARCIA-BENGOCHEA, LOVELL I, ALTSHAEFFL A G. Pore distribution and permeability of silty clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1979, 105: 839-855.

[2] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21: 21-35.

[3] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Changes in pore size distribution due to consolidation of clays[J]. *Geotechnique*, 1989, 39: 159-167.

[4] PRAPAHARAN S, ALTSHAEFFL A G, DEMPSEY B J. Moisture curve of compacted clay: Mercury intrusion method[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1985, 111: 1139-1143.

[5] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[C]// *Proceedings of the National Academy of Sciences*. American: National Academy of Sciences, 1921.

[6] 赵颖文. 中国西南地区红黏土的强度与水理性特征研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.

[7] 程昌炳, 康哲良, 徐昌伟. 针铁矿与高岭土“胶结”本质的微观结构初探[J]. *岩土力学*, 1992, 13(2-3): 122-127.

CHEN Chang-bing, KANG Zhe-liang, XU Chang-wei. The preliminary microcosmic study on the cementation nature of kaolin with goethite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(2-3): 122-127.

[8] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J]. *岩土力学*, 1993, 14(4): 25-39.

KONG Ling-wei, LUO Hong-xi. Effect of the conversion in form of free iron oxide on the engineering property of the red clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1993, 14(4): 25-39.

[9] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 42-47.

KONG Ling-wei, LUO Hong-xi, YUAN Jian-xin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 42-47.

[10] 孔令伟, 罗鸿禧, 谭罗荣. 红土胶结问题的讨论[C]//中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会论文集. 武汉: 科学出版社, 1994.

[11] MADU R M. An investigation into the geotechnical and engineering properties of some laterites of eastern Nigeria[J]. *Engineering Geology*, 1977, 11: 101-125.

[12] 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, 23(4): 458-462.

TAN Luo-rong; KONG Ling-wei. Fundamental property and microstructure model of red clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 458-462.

[13] 罗鸿禧, 周芳琴, 张文敏. 红土的某些微观特性[C]//第二届全国红土工程地质研讨会论文集. 贵州: 贵州科学出版社, 1991.

[14] 孔令伟. 红黏土的微观特性与胶结形状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1993.