

膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究

闫小庆^{1,2}, 房莹光^{1,2}, 张平^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 土体的微观孔隙结构特征对其渗透性有着显著的影响, 膨润土具有很强的防渗性能, 在土中加入膨润土可改变其孔隙尺度分布和结构特征而降低土的渗透性。采用压汞仪法(MIP)试验研究了掺加不同比例的膨润土的细颗粒土的微观孔隙结构特征。试验结果表明: 只要加入少量的膨润土便可使土体的大孔隙的数量急剧减少; 随着膨润土的含量的增多, 孔隙尺度分布逐渐发生变化, 中孔隙的数量逐渐减少, 小孔隙、微孔隙和超微孔隙的数量逐渐增多, 孔隙分布密度函数由三峰态转变为双峰态, 峰值所对应的孔隙直径减小。实验结果也证明了同一孔隙比的土样的孔隙特征的多样性, 因此工程中采用的表达土的孔隙含量的宏观参数孔隙比并不能完整描述土体的孔隙特征, 需要引入其他微观参数对土的孔隙特征进行描述。文中的研究对防渗工程设计与施工具有参考价值。

关键词: 膨润土; 微观孔隙; 孔隙尺度; 孔隙分布特征; 压汞仪法; 渗透性

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2011)08 - 1302 - 06

作者简介: 闫小庆(1981 -), 女, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: YXQingSCUT@Gmail.com。

Experiment study on the effects of bentonite on the micropore structure characteristics of soil

YAN Xiao-qing^{1,2}, FANG Ying-guang^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Key

Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The micropore structure characteristics have significant influence on permeability of the soil, and bentonite is high anti-seepage material, which is added into the soil to reduce the permeability by changing the pore-scale distribution and pore characteristics of the soil. The micropore structure characteristics of the soil added with different bentonite contents are measured by the mercury intrusion porosimetry (MIP). The test results show that just adding a little bentonite can reduce the quantity of the large pore abruptly. With the increase of bentonite content, the pore-scale distribution changes gradually, the quantity of the middle pore increases, the quantities of the small pore, the micropore and the supermicro-pore increase gradually, and the pore size distribution density function changes from three-model to bi-model while the pore diameter size corresponding to the peak decreases. It is proved that the pore characteristics of the same void ratio are various according to the test results, so the void ratio which is a macroscope parameter can not represent the pore characteristics of the soil perfectly and it is necessary to introduce other microscope parameters to describe the pore characteristics of the soil. The conclusions have certain referential value for the design and construction of the anti-seepage (infiltration) projects.

Key words: bentonite; micropore; pore scale; pore distribution characteristic; mercury intrusion porosimetry; permeability

0 引言

土体的孔隙作为渗流通道, 其孔隙的大小及其连通性、曲折性以及在中土中所占体积比例等因素直接影响土体的渗透性, 即土体的渗透特性主要取决于土的孔隙率和孔隙尺度分布以及孔隙微细观特征。

膨润土作为一种重要的黏土矿物, 由于其主要含蒙脱石等细颗粒的黏土矿物成分, 而蒙脱石矿物成分又具有特殊的层面结构, 使得其颗粒具有很大的比表

面积和很强的阳离子交换特性, 而使膨润土具有极强的吸水膨胀性、可塑性、低渗透性等特性^[1-3]。因此, 膨润土经常作为防渗性能改良剂而掺入土体中^[4-5], 以减少土体中的孔隙, 并改变孔隙的结构和尺度分布特征, 从而降低其渗透性。膨润土优良的抗渗改良作用

基金项目: 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主项目(2008ZA11)

收稿日期: 2010 - 05 - 11

使其在水利、土木工程的防渗工程中广泛使用。

目前获得多孔材料微观孔隙结构特征的实验方法有压汞试验法(MIP)、吸附法、核磁共振法、X 射线衍射法、光学显微镜法、扫描电子显微镜法 (SEM)、CT 扫描法、等温吸附法等^[6-7]。其中压汞仪法是研究土体内孔隙定量分布的非常有效的方法之一, 本文采用压汞仪法(MIP)试验方法, 研究了击样制备同一孔隙比条件下掺加不同比例膨润土的极细颗粒土的微观孔隙结构特征, 分析了膨润土掺入量对大孔隙比例、孔隙尺度分布范围等土体孔隙特征的影响。文中的研究对防渗工程设计与施工具有参考价值。

1 实验方法

1.1 试验土样的制备

本文试验采用高纯度超细粉末人工膨润土、石英制作测试试样。经激光粒度分析测试, 膨润土的平均粒径为 3.051 μm , 石英 3.920 μm 。膨润土的主要指标参数: 比重为 2.58, 平均粒径为 10 μm , BET 比表面积为 39.8 m^2/g , BGME 比表面积为 455.8 m^2/g , 塑限为 59%, 液限为 271.7%, 塑性指数为 212.7。试样编号及组成见表 1, 试样中膨润土的重量掺入比分别为 0%, 2%, 4%, 10%, 20%, 而各试样制备的孔隙比相同。试样按照《土工试验方法标准》^[8]的击样法进行制备, 试样制作主要步骤如下: 在温度为 105 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘干膨润土和石英; 用烘干土和去离子水配制含水率约为其塑限的 0.885 的土样, 并用保鲜膜装好密封后置于保湿缸至少 24 h; 从保湿缸取出土样, 测定含水率; 采用尺寸为 ϕ 61.8 mm, 高 20 mm 的环刀用击样法制样, 控制试样的孔隙比约为 0.8。

表 1 试样编号及组成

Table 1 Number and compositions of soil samples

土样编号	S1	S2	S3	S4	S5
膨润土含量/%	0	2	4	10	20
石英含量/%	100	98	96	90	80
设计孔隙比	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

1.2 压汞仪法(MIP)

压汞法是在一定的压力下将汞压入到介质中, 根据压力和压入汞的体积换算出各类孔隙的大小, 压汞试验方法是研究土体内孔隙特征的有效的方法之一。压汞法测量的基本原理是根据基于圆柱型孔隙模型的 Washburn 公式, 该公式建立了注入汞所需的压力和孔隙半径之间的关系为^[9]

$$p = -\frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (1)$$

式中, p 为所需压力, r 为孔隙半径, σ 为汞的表面张力系数, 纯汞的 σ 值为 0.41~0.515 N/m; θ 为汞对材

料的浸润角, 根据相关文献^[6, 10-11], 取 $\sigma = 0.484 \text{ N/m}$, $\theta = 130^{\circ}$ 。

本实验采用美国 Micromeritics 公司生产的型号为 Autopore IV 9510 的全自动孔径分布压汞仪, 见图 1 (a)。该方法可测定的孔直径范围一般为 3 nm~350 μm 。

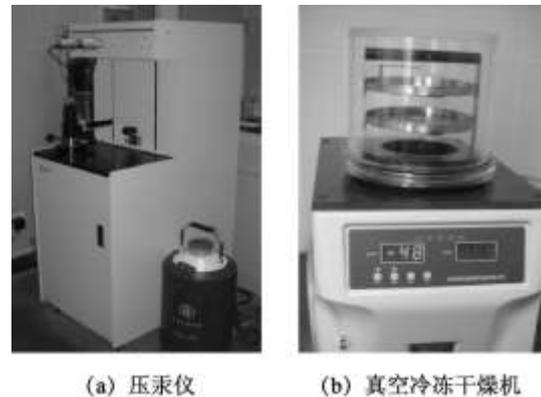


图 1 实验设备

Fig. 1 Experimental devices

压汞实验的操作分为低压分析 (0~30 psia)、高压分析 (30~60000 psia)。一般的程序: 首先要干燥样品试块, 使得孔隙中不含水分; 然后称重, 装入膨胀计中抽真空, 利用管中的真空状态产生的负压导入汞, 使试管充满汞。利用压汞仪将汞用不同压力注入到土中孔隙, 记录每一级压力增量时的进汞量, 再由 Washburn 公式将压力换算成孔隙半径, 便得到土中孔隙分布结果。整个实验测试操作过程按照相关操作规程的要求进行^[11-12]。

1.3 土样干燥方法

压汞试验的土样必须经过干燥, 干燥方法的选取对土样孔隙有一定影响。土样的干燥方法中国还没有相关规程, 根据相关文献, 土样干燥的方法主要有风干法、烘干法和冷冻干燥法^[4, 13-16]。研究表明, 对于大部分土, 传统的风干法或烘干法干燥制样会导致试样发生显著的收缩, 使孔隙含量减少。对于细粒土, 烘干法因三相界面毛细作用引起试样的收缩和破裂从而会导致原状的结构歪曲。

本实验为了保证在干燥过程中土样孔隙尽量保持原状而采用冷冻干燥法(freeze drying)。该技术的原理是采用低温的制冷剂 (本文采用液氮, 沸点 -196 $^{\circ}\text{C}$) 将切好的土样中的水分快速冷冻约 3 min, 使土样孔隙中的水分直接变成不具膨胀性的非结晶态冰, 然后通过真空升华来进行干燥 (一般使试样温度回升到 -50 $^{\circ}\text{C}$ 至 -100 $^{\circ}\text{C}$, 抽真空 24 h 以上), 从而保证土中孔隙不因脱水发生收缩。本实验采用的真空冷冻干燥机见图 1 (b)。这一方法被普遍认为效果好, 能很好地保证压汞试验结果的可靠性。为使土样冷冻均匀, 土

样应在放入液氮前用低表面张力的异戊烷浸泡，置换样品中的水。

2 试验结果与分析

2.1 孔隙特征测试结果

本次实验中，每个样品制备了2个环刀土样，取3个压汞样，其中2个压汞样取自相同环刀。图2为土样S5的3个压汞结果图的累计进汞曲线和增量进汞曲线，其中土样S5-1和土样S5-2是取用同一个环刀，用同样的膨胀计做的结果，土样S5-3取自不同环刀，并采用不同的膨胀计做的压汞实验。土样S5-1、S5-2和S5-3压汞得到的孔隙比与三相比指标计算得到的孔隙比的相对误差分别为0.42%，2.58%和15.95%，其中压汞测得的孔隙比通过压力与进汞量换算得出。试验结果分析表明，使用同一个环刀和同样膨胀计所得的试验结果基本一致，实验的重复性较好。

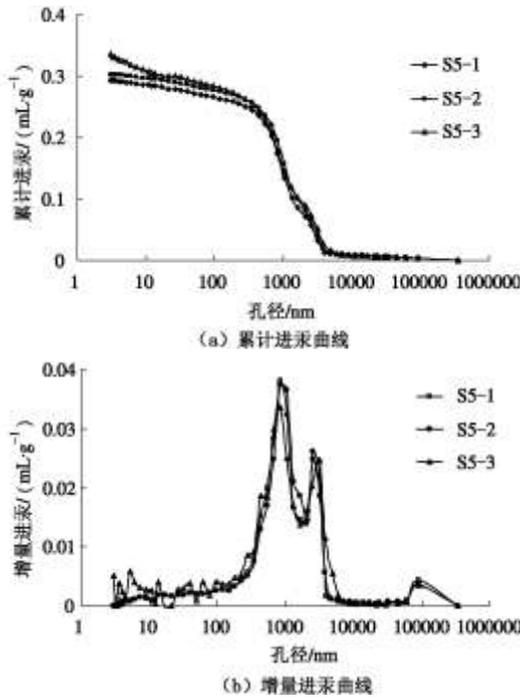


图2 土样S5压汞测试结果

Fig. 2 Test results of soil sample S5

本文采用进行分析的数据控制其孔隙比的相对误差控制在10%以内，并采用3个压汞实验结果中误差最小的结果，本实验选用分析的压汞实验结果的孔隙比误差分析如表2所示。

表2 分析用的土样孔隙比相对误差

Table 2 Relative errors of void ratio of soil

土样编号	设计孔隙比	配土孔隙比	压汞孔隙比	相对误差/%
S1	0.800	0.799	0.844	5.64
S2	0.800	0.781	0.736	5.67

S3	0.800	0.788	0.745	5.47
S4	0.800	0.793	0.780	1.67
S5	0.800	0.795	0.791	0.42

5种试样的孔隙特征测试结果如图3所示，其中，孔隙分布为大于某孔直径体积累积百分比含量，孔隙密度为某孔直径体积百分比含量。从图3(a)可见孔隙分布曲线由外向内分别为土样S1、S2、S3、S4和S5，随着膨润土含量增加呈规律性的内移，图3(b)显示土样的孔隙分布范围集中在0.1~100 μm之间并呈峰态分布。图3显示，5种土样虽然具有相近的孔隙比，其孔隙分布曲线和孔隙密度曲线大不一样，这说明同一孔隙比的土样孔隙特征的多样性。

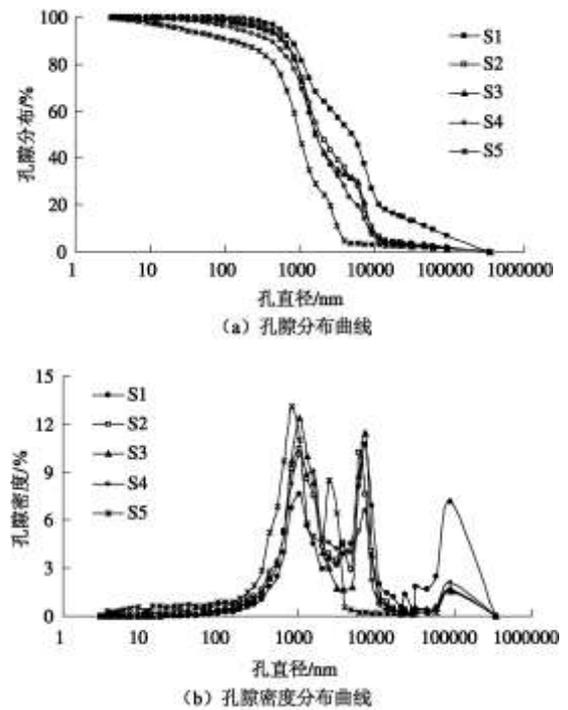


图3 孔隙分布特征曲线

Fig. 3 Pore distribution characteristic curves

2.2 孔隙特征曲线渐变图

为了更加清楚的看到土样孔隙分布的变化过程，图4(a)~(d)依次给出相邻膨润土百分含量的土样的孔隙分布密度曲线，这里可以清晰的看到孔隙分布密度曲线随着膨润土含量的变化过程。

图4(a)为土样S1和S2的孔隙土样分布密度比较图，从图可以看出土样S1为纯石英土，其孔隙分布密度曲线呈明显的三峰态分布，其峰值孔径分别为100, 7, 1 μm左右。S2为添加了2%膨润土含量的土样，从密度曲线上看，对应孔径为100 μm的峰值急剧变小了，说明膨润土含量对100 μm数量级的孔的数量影响很大。图4(b)为膨润土含量为2%和4%的土样孔隙分布密度的比较，虽然膨润土含量也增加了2%，但是孔隙分布密度曲线变化不明显，其中对应孔

径为 100 μm 的峰值幅度几乎没有变化。当土样的膨润土含量由 4% 增加到 10% 后, 从图 4 (c) 可见, 100 μm 数量级峰值幅度变化依然很小, 而对应孔径为 7 μm 和 1 μm 的峰值幅度有所减少。当膨润土含量由 10% 增加到 20% 后, 图 4 (d) 显示孔径为 100 μm 的峰值幅度依然变化小, 但是 10 μm 数量级的孔隙和 1 μm 数量级的孔隙含量在继续增多, 其峰值所对应的孔直径变小。综上所述, 加入少量的膨润土约 2% 便可使土体的 100 μm 数量级的大孔隙的含量急剧减少, 但随着膨润土含量的增加, 100 μm 数量级的孔隙的含量减少缓慢, 孔隙分布密度曲线三峰态曲线逐渐向二峰态曲线过渡, 峰值所对应的孔隙直径减小, 小孔隙的比例逐渐增多。

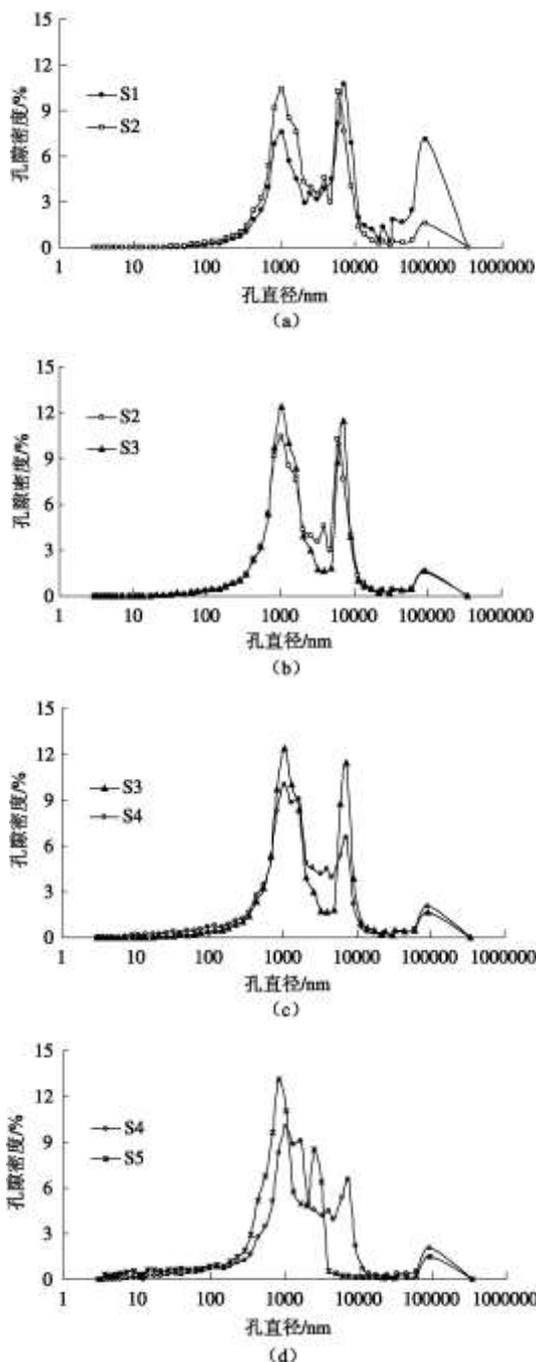


图 4 孔隙密度分布渐变图

Fig. 4 Gradual change of pore diameter density distribution

2.3 孔隙特征与膨润土含量的关系

本文根据孔隙密度曲线的峰值所对应的孔径范围, 参考相关文献对孔隙的分类^[13-19], 将土中孔隙划分为 5 类: ①大孔隙 ($D > 30000 \text{ nm}$), 主要为团粒间的孔隙; ②中孔隙 ($3000 \text{ nm} < D < 30000 \text{ nm}$), 主要为团粒内孔隙; ③小孔隙 ($300 \text{ nm} < D < 3000 \text{ nm}$), 主要为颗粒间和一部分为团粒内的孔隙; ④微孔隙 ($30 \text{ nm} < D < 300 \text{ nm}$), 属于颗粒间孔隙; ⑤超微孔隙 ($D < 30 \text{ nm}$), 主要为颗粒内孔隙。其中, 第⑤类孔隙用压汞的方法较难获得精确的数据。

根据上述土的孔隙划分标准, 得到不同土样的各类孔隙的百分含量如表 3 和图 5 所示。其中, 孔隙体积含量最多的为小孔隙, 孔隙体积含量第 2 多的为中孔隙, 这 2 种孔隙基本为团粒内孔隙, 随着膨润土含量的增多, 中孔隙的含量减少而小孔隙的含量增多, 说明团粒内孔隙直径随着膨润土含量的增多而逐渐变小。微孔隙和超微孔隙体积含量少, 这两种孔隙基本为颗粒间和颗粒内孔隙, 它们的孔隙体积含量随着膨润土含量增多而增多。大孔隙主要为团粒间的孔隙, 加入少量的膨润土约 2% 便可使团粒间的孔隙含量急剧减少, 随着膨润土含量的增加, 团粒间的孔隙含量变化不大。由此可见, 土中加入膨润土改变了土体的孔隙尺度分布和结构特征。膨润土微小颗粒的填充和吸水膨胀性使大孔隙急剧减少; 同时, 膨润土微细颗粒的“阻塞”和吸水膨胀的“挤压”可使孔隙连通性降低而曲折性增加。土体孔隙尺度和孔隙结构特征对其渗透性有着显著的影响, 掺入少量膨润土便使大孔隙明显减少而使土体的渗透性大为降低, 因此膨润土是良好的土体抗渗改良剂。上述同一孔隙比试样的实验结果说明了孔隙特征的多样性, 单独采用工程中表达土体孔隙性的宏观参数孔隙比并不能完整描述土体的孔隙特征, 需要引入诸如孔隙尺度及其分布特性和分布范围、孔隙连通性、曲折性等其他微观参数才能较好地描述土体的孔隙特征, 这也是今后研究土体微观孔隙特征与土体渗透性、固结压缩变形等特性的重要课题。

表 3 不同土样的孔隙含量

Table 3 Pore contents of different soil samples %					
土样编号	S1	S2	S3	S4	S5
大孔隙	13.433	2.977	3.124	3.502	2.068
中孔隙	43.808	36.352	32.008	28.719	11.211
小孔隙	40.353	56.401	59.759	58.650	71.888
微孔隙	2.406	4.249	4.891	7.685	10.083

超微孔隙	0.000	0.019	0.218	1.443	4.750
------	-------	-------	-------	-------	-------

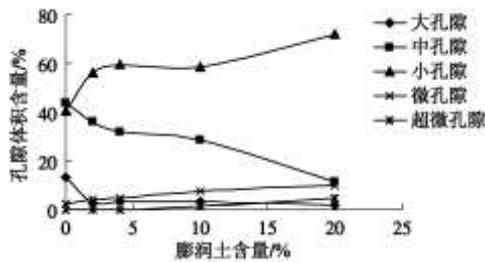


图5 不同孔隙含量随膨润土含量变化曲线

Fig. 5 Relationship between pore content and bentonite content

2.4 试验误差分析

土样的孔隙比是表达土样孔隙特征一个重要的宏观参数指标,但是由压汞计算得到的孔隙比和三相计算的孔隙比相差比较大,有许多文献对于这个误差进行了分析^[4, 17-19],文献[17]认为是回弹造成的,文献[18, 19]是认为压汞测量孔隙范围的限制造成,假如完全无误差,理论上压汞结果得到的孔隙比应该稍小于三相计算的孔隙比。笔者根据相关文献归纳了误差的原因的环节应该有如下6个。

(1) 土样物理力学参数误差。比重、含水率的试验含有误差,这导致了三相计算的孔隙比与真实孔隙比之间的误差。

(2) 环刀土样的制样过程引入的误差。制备的环刀土样不能保证每个都绝对一致,且同一个环刀土样也不能保证内部完全均匀一致。

(3) 压汞土样制备过程引入的误差。如当土样从环刀里面取出后,没约束而释放应力,产生微小膨胀;在切样的过程中,刀的“涂抹效应”破坏土样孔隙;另外在干燥的过程中,尽管采取了冷冻干燥,加异戊烷浸泡等一系列措施,仍不能完全保证土样孔隙没有一点变化。

(4) 压汞仪器产生的误差。仪器本身会产生误差,如选不同的膨胀计,结果也会有微小区别。

(5) 压汞试验计算参数的误差。如接触角,表面张力等参数的取值误差。

(6) 压汞实验的局限性。理论的假设圆柱型孔隙模型与实际是有差别的,测量的是进汞直径所对应的体积含量;压汞实验可测量孔直径范围决定了该实验对大孔隙测试有效,压汞对于小于3 nm直径的孔测不到;在高压分析过程中孔可能会坍塌,汞也具有轻微压缩性。

综上所述,误差不可避免,本文采用进行分析的数据控制其孔隙比的相对误差在10%以内。另外数据

的分析比较采用归一化处理。

3 结 论

本文采用压汞仪法(MIP)试验,研究了击样制备的同一孔隙比条件下掺加不同比例的膨润土的级细颗粒土的微观孔隙结构特征,分析了膨润土含量对土体孔隙特征的影响,得到如下3点主要结论。

(1) 孔隙分布密度函数呈三峰孔隙模型,随着膨润土的含量的增多,三峰态曲线逐渐向二峰态曲线,峰值所对应的孔隙直径减小,小孔隙的比例逐渐增多。

(2) 根据土样的孔隙特征曲线和孔隙尺度等级,本文把所研究土体的孔隙分为大孔隙、中孔隙、小孔隙、微孔隙和超微孔隙5个层次。极少量的膨润土的含量即可显著减少颗粒团之间孔隙(大孔隙)含量;随膨润土的含量继续增加,大孔隙含量不再继续明显变化,中孔隙的数量则逐渐减少,而小孔隙、微孔隙和超微孔隙的数量逐渐增多。

(3) 同一孔隙比试样的实验结果说明了孔隙特征的多样性,单独采用工程中表达土体孔隙性的宏观参数孔隙比并不能完整描述土体的孔隙特征,需要引入诸如孔隙尺度及其分布特性和分布范围、孔隙连通性、曲折性等其他微观参数才能较好地对土的孔隙特征进行描述。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, Second Edition, 1993.
- [2] YE Wei-min, CUI Yu-jun, QIAN Li-xin, et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2009, 108(3-4): 169 - 176.
- [3] 陈 宝, 叶为民, 等. 高庙子膨润土的水土特征曲线(英文)[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 788 - 793. (CHEN Bao, YE Wei-min, et al. Bentonite Soil-Water characteristic curves of Gaomiaozi[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 788 - 793. (in Chinese))
- [4] CHAPUIS R P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 47 - 57.
- [5] SIVAPULLAIAH P V, SRIDHARAN A, STALIN V K. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(2): 406 - 413.
- [6] ROMERO E, SIMMS P H. Microstructure investigation in unsaturated soils: a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and

- environmental scanning electron microscopy[J]. Journal of Geotechnical and Geological Engineering, ASCE, 2008, **26**(6): 705 - 727.
- [7] CHENG X H, HANS J, et al. A combination of ESEM, EDX and XRD studies on the fabric of dutch organic clay from Ostva ardersplassen (netherlands) and its geotechnical implications[J]. Applied Clay Science, 2004, **25**: 179 - 185.
- [8] GB/T50123—1999 土工试验方法标准 [S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [9] 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 USA, 1921, **7**(4): 115 - 116.
- [10] PENUMADU D, DEAN J. Compressibility effect in evaluating the pore-size distribution of kaolin clay using mercury intrusion porosimetry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(2): 393 - 405.
- [11] ASTM D4404-84 Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry[R]. 2004.
- [12] GB/T 21650.1-2008, 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 1 部分: 压汞法(2008) [S]. 2008. (GB/T 21650.1-2008, Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-Part 1: Mercury porosimetry (2008) [S]. 2008. (in Chinese))
- [13] DELAGE P, LEFEBVRE G. Study of the structure of a sensitive champlain clay and of its evolution during consolidation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, **21**(1): 21 - 35.
- [14] DE KIMPE C R. Effect of air drying and critical point drying on the porosity of clay soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, **21**(1): 181 - 185.
- [15] SHEAR D L, OLSEN H W, NELSON K R. Effects of desiccation on the hydraulic conductivity versus void ratio relationship for a natural clay[M]. Washington: National Academy Press, 1993: 1365 - 1370.
- [16] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Changes in clay structure and behavior due to wetting and drying[C]// Proceedings of the 8th Australian-New Zealand conference on Geomechanics, 1999: 179 - 186.
- [17] LAPIERRE C, LEROUEIL S, LOCAT J. Mercury intrusion and permeability of louisville clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(6): 761 - 773.
- [18] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted benonite: a microstructure approach[J]. Géotechnique, 2006, **56**(5): 291 - 304.
- [19] LI X, ZHANG L M. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(2): 129 - 141.

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
 封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
 后插 2 常州金土木工程仪器有限公司
 后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司
 后插 4 徕卡测量系统贸易(北京)有限公司