文章编号：1000-8608(2018)05-0456-08

疏浚淤泥固化土宏微观孔隙结构特征及其对渗透性影响

姚　君，孙秀丽*，刘文化，沈　起

（江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡　214122）

摘要： 采用压汞试验、渗透率试验和孔隙度试验等方法，研究疏浚淤泥固化土(DSSS)的孔隙度、微观孔隙结构特征、渗流特征及其相互关系.压汞试验结果显示，DSSS的孔隙体积频率分布曲线均为典型的双峰曲线，存在两个集中的孔喉半径区间：0.02～0.04 μm和3～30 μm.基于DSSS水化反应生成的致密水化产物和孔隙体积频率分布曲线，将DSSS的孔隙直径进行分组，微孔组和中孔组处于峰值区间，微孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐增大，中孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐减小.另外，孔隙度和渗透率试验结果显示，DSSS有效孔隙度随养护龄期逐渐减小主要发生在固化28 d前，28 d后DSSS有效孔隙度基本保持不变，而DSSS渗透系数仍在降低，在该阶段50%以上的中孔向小孔和微孔转化.因此，提出采用有效孔隙度作为表征DSSS的宏观孔隙特征参数，采用孔径和体积频率值作为表征微观孔隙特征参数，并采用毛细模型建立宏微观孔隙结构参数和渗透性之间的定量关系.

关键词： 固化土；有效孔隙度；压汞试验；渗透率；孔隙结构；毛细模型

中图分类号： TU41　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201805003

0　引　言

宏细微观孔隙结构是影响土体强度、变形、渗透等工程特性的重要内在因素，通过微观试验研究可以认识土的许多工程特性的本质[1].疏浚淤泥固化土广泛用于路基、基坑回填、人工岛、堤坝加固工程等方面，其工程特性包括强度和变形均受到国内外学者的高度重视，在疏浚淤泥固化土的强度影响因素及微观机理方面涌现了大量的研究成果[2-5].疏浚淤泥及固化材料在固化过程中由于物理化学反应，固相的微观组成和结构均发生变化，土体颗粒间的联结强度增强，颗粒在空间上重新排列组合，宏细微观孔隙尺寸、孔隙连通性及分布规律也会发生变化，总体上会降低其渗透性.孔令荣等[6]研究了上海软黏土在固结压力下微观孔隙与渗透性的关系，采用水头半径影响模型表达了渗透系数与孔隙的定量关系.宏细微观孔隙之间的相互转化及分布规律是影响疏浚淤泥固化土渗透性的根本原因，但对其转化规律及对渗透性的影响等方面的成果较少，还需要通过大量试验进行深入研究.

国内外土体微观孔隙结构通常借助于扫描电镜法、压汞法(mercury intrusion porosimetry，简称MIP)和CT扫描等手段进行研究[7-9]，其中MIP是定量研究微观孔隙结构最常用的一种方法.MIP测定孔径的范围较其他方法宽很多，一般可测量的孔径范围为4 nm～200 μm，可以反映大多数材料的孔隙结构状况[10].本文采用压汞试验研究不同初始密度及不同养护龄期下，疏浚淤泥固化土的孔隙尺寸、孔隙分布特征及孔隙间的转化规律，结合孔隙度和渗透率试验，研究宏细微观孔隙结构特征对疏浚淤泥固化土渗透性的影响规律.

收稿日期： 2017-12-27；　**修回日期：** 2018-05-22.

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51609102，51709129)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20170187)；大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金资助项目(LP1613)；国家级大学生创新训练项目(201510295065).

作者简介： 姚　君(1992-)，女，硕士生，E-mail：947407269@qq.com；孙秀丽*(1976-)，女，副教授，硕士生导师，E-mail：sunxiuli@jiangnan.edu.cn.

1　试验材料及测试方法

1.1　试验材料

疏浚淤泥为无锡市太湖疏浚淤泥，其含水率为 68.9%，液塑限均较高，分别为 62.4% 和 27.7%；通过 X 射线荧光分析仪得到淤泥主要化学成分如表 1 所示；采用激光粒度分布仪法和比重计法分别测定疏浚淤泥的粒径分布，绘制颗粒级配曲线如图 1 所示. 主要固化材料为粉煤灰与矿粉，采用激光粒度分布仪测定粒径分布，绘制颗粒级配曲线如图 2 所示. 粉煤灰为 F 级，偏深灰色，比表面积为 800 m^2/kg；矿粉为 S95 级，呈灰白色，比表面积为 400 m^2/kg，均由无锡市某厂家提供，其化学成分如表 1 所示. 激发剂水玻璃是由上海某化工厂生产的化学试剂九水硅酸钠，常温下呈白色或灰白色粉末状或块状固体，60 ℃加热时呈无色半透明黏稠状液体，化学式 $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$，相对分子质量 284.20，模数 1.0.

表 1　疏浚淤泥、粉煤灰和矿粉的化学成分

Tab. 1　The chemical composition of dredged silt, fly ash and slag　　%

材料	$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(MgO)$	$w(CaO)$	$w(K_2O)$	$w(SO_3)$	$w(Na_2O)$	$w(TiO_2)$	$w(LOSS)$
疏浚淤泥	65.28	15.06	5.34	1.15	0.91	2.30	0.16	0.95	0.99	7.48
粉煤灰	50.44	32.14	6.49	0.69	5.79	1.33	0.48	0.34	1.27	2.12
矿粉	34.94	17.25	0.64	8.32	34.64	0.52	2.20	0.14	0.74	0.004

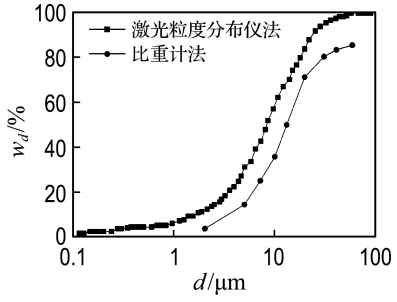


图 1　疏浚淤泥的颗粒级配曲线

Fig. 1　Grain size distribution curve of dredged silt

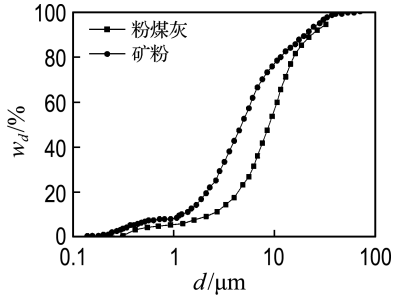


图 2　粉煤灰和矿粉的颗粒级配曲线

Fig. 2　Grain size distribution curve of fly ash and slag

本试验所有试样采用疏浚淤泥、矿粉、粉煤灰质量比为 60∶35∶5，水玻璃含量为总质量的 7%. 在水平试验台上，采用击实法制样：将混合均匀的混合料与水搅拌均匀，静置后放入塑料密封袋内 24 h，根据确定的试样密度，称取土样质量，分为两层分别击实，一层击实完毕将表面刮毛后再击实下一层，制得直径 6.18 cm、高 4.00 cm、体积 120 cm^3 的圆柱体试样. 本次试验配制 4 个不同密度(1.2、1.3、1.4 和 1.5 g/cm^3)的试样，在温度(20±2) ℃、湿度 95%条件下分别养护 3、7、28 和 90 d.

1.2　测试方法

(1)压汞试验

压汞法的基础是经典的瓦什伯恩(Washburn)方程，汞对一般固体不润湿，欲使汞进入孔需施加外压，外压越大，汞能进入的孔半径越小. 在压汞过程中，随着压力的升高，汞被压至试样的孔隙中，所产生的电信号通过传感器输入计算机中进行数据处理，模拟出相关图谱，从而通过式(1)计算出孔隙率. 常用压汞试样尺寸很小，只有1 cm^3，为提高试样的均匀性和代表性，本次试验压汞试样为直径 2.5 cm、高 1.0 cm 的圆柱体，在 −50 ℃、真空条件下冻干后，进行压汞试验.

$$v=\left(\frac{V_a}{V_b}+\frac{V_a-V_b}{V_c-V_b}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中：V_a 为在一定压力下注入汞的体积，V_b 为汞注入后稳定状态下的体积，V_c 为测定中最大压力下汞的体积.

(2)渗透率试验

本试验渗透率 k 采用皂膜流量计法，测量皂膜经过玻璃管内一段体积的起止时间，计算出流量，根据下式计算：

$$k=2Q_0 p_0 \mu \frac{L}{A}((p_1+p_2)^2-p_2^2)\times 0.1 \tag{2}$$

式中：Q_0 为气体流量，mL/s；p_1 为岩心前压，MPa；p_2 为大气压，MPa；p_0 为标准大气压；μ 为测试气体黏度，Pa·s；L 为试样高度，mm；A 为试样截面积，cm^2；k 为试样渗透率，10^{-3} μm^2.

渗透率 k 与渗透系数 K 采用下式进行转换：

$$K=\frac{k\gamma}{\mu}=\frac{kg}{\upsilon} \tag{3}$$

式中：K 为渗透系数，m/d 或者 cm/s；k 为孔隙介质的渗透率，10^{-3} μm^2，它只与固体骨架的性质有关；μ 为黏度，Pa·s；υ 为运动黏度；γ 为容重；g 为重力加速度.

渗透率测试所用试样均为直径 2.5 cm、高 2.7 cm 的圆柱体，在－50 ℃冻干后进行试验，试样如图 3 所示. 本试验所用冻干机为压盖型冷冻干燥机，所取试样完全可以冻干. 真空冷冻干燥法利用液氮使试样中的液态水变成非结晶态冰，不产生体积膨胀，然后在真空低温条件下让冰升华排出，获得干燥样品，对试样孔隙变化几乎无影响.

图 3 冻干后试样

Fig. 3 Freeze dried sample

(3)孔隙度试验

这里引入有效孔隙度这一概念来描述疏浚淤泥固化土的孔隙大小. 有效孔隙度是指那些互相连通的，在一般压力条件下，允许流体在其中流动的孔隙体积之和与试样总体积的比值，以百分数表示. 显然，同一试样有效孔隙度小于其总孔隙度，本文中试验所测得的孔隙度均为有效孔隙度.

采用 KX-07F 型气体孔隙度仪测定试样孔隙度，试样尺寸和渗透率试验相同. 根据波义耳定律，在恒定温度下，样品室体积一定，放入试样的固相(颗粒)体积越小，则样品室中气体所占体积越大，与标准室连通后，平衡压力越低；反之，当放入样品室内的试样固相体积越大，平衡压力越高. 绘制标准块的体积(固相体积)与平衡压力的标准曲线，测定待测试样平衡压力，根据标准曲线反求试样固相体积. 按下式计算试样孔隙度：

$$\phi=\frac{V_f-V_s}{V_f}\times 100\% \tag{4}$$

式中：V_s 为试样固相体积，cm^3；V_f 为试样表观体积，cm^3.

2 疏浚淤泥固化土微观孔隙结构特征

2.1 疏浚淤泥固化土的有效孔隙度

孔隙水通过有效孔隙形成的通道在疏浚淤泥固化土中发生渗流，封闭的孔隙或不连通孔隙则无法发生渗流，采用有效孔隙度这一指标评价宏观孔隙量对渗透的影响更加合理. 图 4 为不同初始密度试样的有效孔隙度随龄期的变化曲线. 由图 4 可以看出，不同初始密度试样的有效孔隙度随龄期的变化规律基本一致，均随着养护龄期的增加，呈下降趋势；初始密度为 1.2、1.3、1.4 和 1.5 g/cm^3 试样初始有效孔隙度分别为 60.1%、52.4%、49.6%和 43.6%，养护至 28 d 有效孔隙度降低较多，分别降低了 2.9%、1.4%、5.0%和 7.0%；养护时间大于 28 d，有效孔隙度基本保持不变. 养护 28 d 内疏浚淤泥固化土中物理化学反应进行得较快，水化反应生成新的物相填充了原有的孔隙，改变了原有的孔隙结构，降低了有效孔隙含量. 初始密度越大有效孔隙度随龄期的增加降低幅度越大，这是由于初始密度越大，初始孔隙少，水化反应生成相同数量的水化产物的情况下，孔隙减少的比例相对越大，并且相互连通的孔隙减少比例更大. 疏浚淤泥固化土作为建筑填土、路基、堤坝工程等工程用土时，增加初始密度更有利于降低土体的孔隙度.

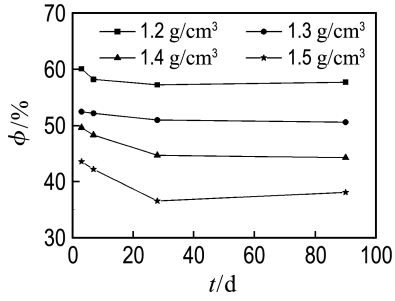


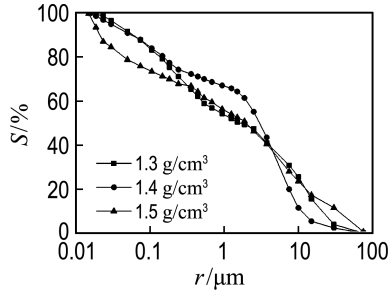
图 4 试样有效孔隙度随养护龄期的变化

Fig. 4 The variation of effective porosity of sample with curing age

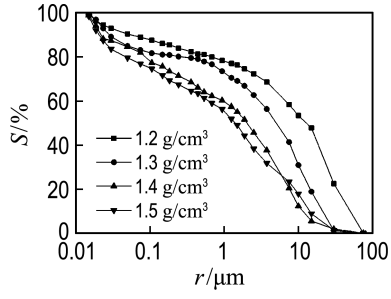
2.2 疏浚淤泥固化土的孔隙分布特征

有效孔隙度这一宏观指标还不足以反映疏浚

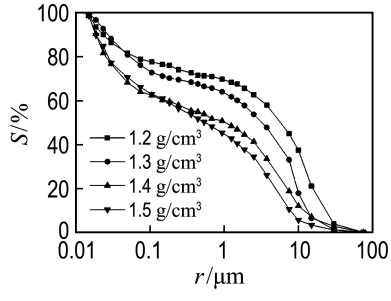
淤泥固化土的微观孔隙特征，本文采用压汞试验测定疏浚淤泥固化土的孔隙分布特征，得到不同初始密度、不同养护龄期试样的孔隙分布曲线，如图 5、6 所示. 由图 5、6 可以看出，各工况试样的孔隙半径分布在 0.01～100 μm；随着试样初始密度和养护龄期的增加，孔隙分布曲线均向左移，试样的孔隙分布发生了很大变化. 初始密度较小和龄期较短时试样中的孔隙以团粒间的孔隙为主；随着初始密度和养护龄期的增加团粒间的孔隙逐渐减少，团粒和颗粒内孔隙逐渐增多，这是由于试样中原有孔隙被水化产物填充，试样变得密实，初始密度越大、养护龄期越长，大孔减小的比例越大，大小孔径间的转化随初始密度和养护龄期的变化越明显. 初始密度较小的试样，由于试样比较松



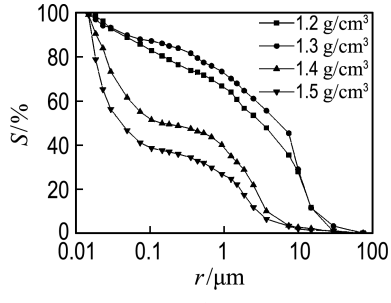
(a) 龄期 3 d



(b) 龄期 7 d



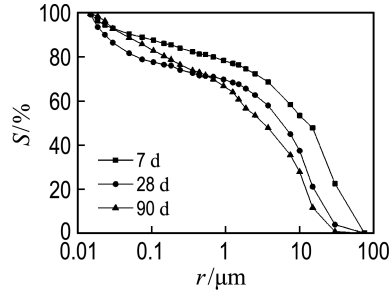
(c) 龄期 28 d



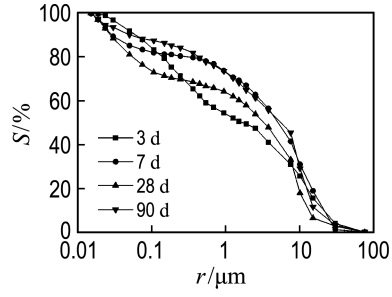
(d) 龄期 90 d

图 5　不同初始密度试样孔隙分布曲线

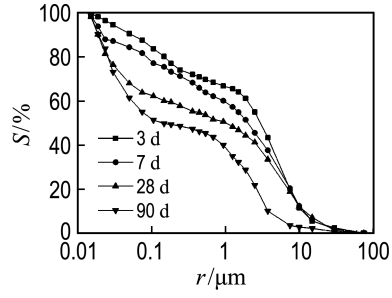
Fig. 5　Pore size distribution curves of samples with different initial densities



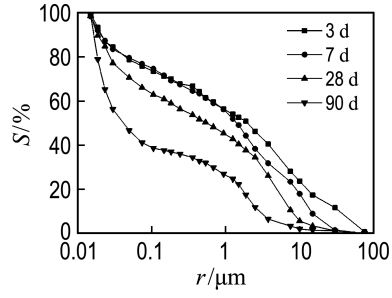
(a) 初始密度 1.2 g/cm³



(b) 初始密度 1.3 g/cm³



(c) 初始密度 1.4 g/cm³



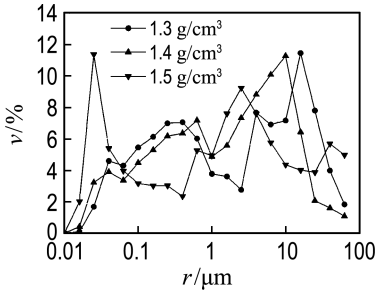
(d) 初始密度 1.5 g/cm³

图 6　不同养护龄期试样孔隙分布曲线

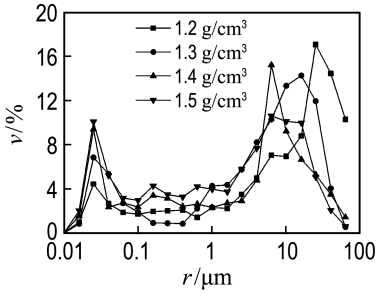
Fig. 6　Pore size distribution curves of samples with different curing ages

散,在较短养护龄期时(3 d)水化产物生成量较少,在冻干的过程中试样的结构容易扰动.另外,在压汞试验过程中,由于压力的作用导致颗粒间或团粒间孔隙的坍塌、扩张和收缩,骨架孔隙分布测量的误差相对较大.

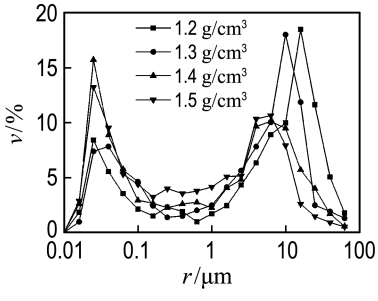
将孔隙累计分布曲线整理后得到疏浚淤泥孔隙体积频率分布曲线,如图 7 所示.由图可以看出,不同初始密度试样的孔隙体积频率分布曲线均为典型的双峰曲线,孔径分布有两个典型的区段:0.02～0.04 μm 和 3～30 μm,每个区段峰值称为最可几孔径,也就是每个区段频率最大的孔径.目前,国内外对土体内部孔隙尺寸的分组没有统一的分类标准,不同学者针对不同的土类进行了不同的孔隙分组[9,11-12].本文结合疏浚淤泥固化土的固化机理分组如下:固化过程中固化材料发生化学反应,反应产物之间相互连接或与原有土颗粒包裹形成较大的团粒,团粒间的孔隙称为大孔和中孔;团粒内颗粒与水化产物间的孔隙称为小孔;水化产物内或颗粒内孔隙称为微孔;介于微孔和小孔间的孔隙为介孔.根据孔隙分布特征来看,试样中孔隙半径分布在 0.01～100 μm,孔隙的大小覆盖微孔到大孔的范围.为了明确各类孔隙对试样渗透性的影响,探究不同类孔隙间的相互转化对试样渗透性的影响,将疏浚淤泥固化土的孔隙直径进行如下分组:大孔组,$r>60$ μm;中孔组,6 μm$<r\leqslant$60 μm;小孔组,0.6 μm$<r\leqslant$6 μm;介孔组,0.06 μm$<r\leqslant$0.6 μm;微孔组,$r\leqslant$0.06 μm.根据孔径分组,孔隙体积频率分布曲线的两个最可几孔径分别为微孔组和中孔组,并且微孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐增大,中孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐减小.这是因为,随着养护龄期的增长,矿粉与水玻璃等材料进行水化反应,生成的产物逐渐填充试样中的孔隙,使得试样越来越致密,造成中孔组逐渐减少、微孔组逐渐增多.



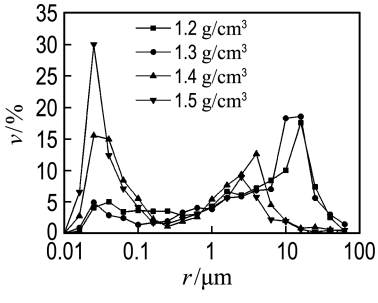
(a) 龄期 3 d



(b) 龄期 7 d



(c) 龄期 28 d

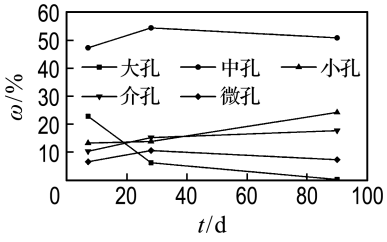


(d) 龄期 90 d

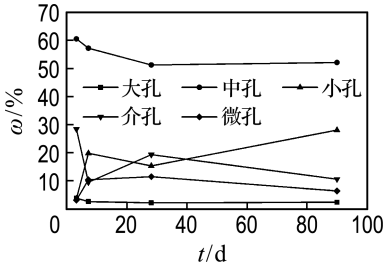
图 7 不同初始密度试样孔隙体积频率分布曲线

Fig. 7 Frequency distribution curves of pore volume of samples with different initial densities

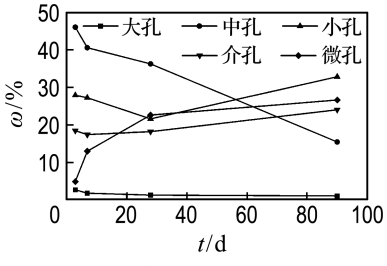
根据孔径分组得到相同初始密度试样的各组孔径随养护龄期增长的变化曲线,如图 8 所示.不同初始密度试样除了密度较小一组试样(1.2 g/cm³)以外,其余各组试样的大孔所占比例均很小,中孔比例较大;随着养护龄期的增长,大孔和中孔呈逐渐减少的趋势,小孔、介孔和微孔呈逐渐增多的趋势,密度为 1.4 和 1.5 g/cm³ 试样的中孔减少幅度最大,微孔增大幅度最大.说明随着养护龄期的增加,不但总有效孔隙度发生变化,而且不同孔径组之间发生相互转化,对于初始密度较大的两组试样(1.4 和 1.5 g/cm³),更多的中孔组孔隙向微孔组转化,孔隙分布趋于均匀化,这是由于随着水化产物逐渐增多,土样变得更加密实,团粒间的孔隙逐渐被团粒内和颗粒间的孔隙取代.



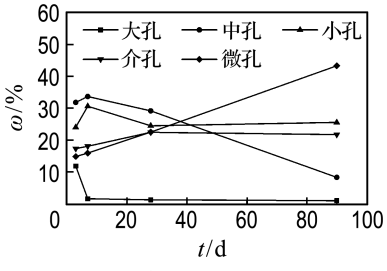
(a) 初始密度 1.2 g/cm³



(b) 初始密度 1.3 g/cm³



(c) 初始密度 1.4 g/cm³



(d) 初始密度 1.5 g/cm³

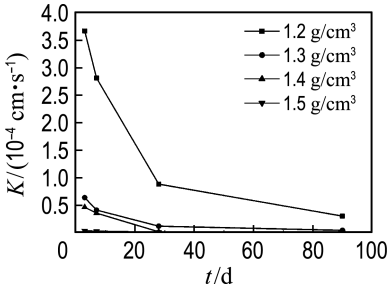
图 8　孔径随养护龄期的变化

Fig. 8　The variation of pore size with curing age

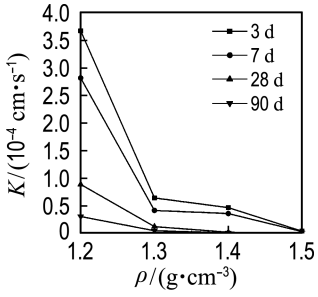
3　疏浚淤泥固化土宏微观孔隙特征与渗透性的关系

3.1　疏浚淤泥固化土渗透性

图 9(a)是不同初始密度试样渗透系数随养护龄期的变化曲线，由图可以看出不同初始密度试样的渗透系数随养护龄期的变化趋势一致，均随养护龄期的增长逐渐减小. 注意到 28 d 到 90 d 这个阶段试样的渗透系数仍在降低，由有效孔隙度随养护龄期的变化规律(图 4)可以看出，在 28 d到 90 d 各试样的有效孔隙度已不再发生变化，说明养护后期渗透系数的降低并不是由于有效孔隙度的减小引起的，而是由于孔隙结构和分布规律的改变造成的. 图 9(b)是试样渗透系数随初始密度的变化曲线，由图可以看出相同龄期条件下，渗透系数随初始密度的增大逐渐减小，初始密度从1.2 g/cm³ 增加到 1.3 g/cm³ 时，渗透系数降低速率较大，初始密度从 1.3 g/cm³ 增加到 1.5 g/cm³ 时渗透系数降低速率减缓. 这是由于大孔和中孔相对小孔和微孔来讲对渗透系数的影响更大.



(a) 随养护龄期的变化



(b) 随初始密度的变化

图 9　渗透系数随养护龄期和初始密度的变化

Fig. 9　The variation of permeability coefficient with curing age and initial density

3.2　疏浚淤泥固化土宏微观孔隙结构参数与渗透系数的定量关系

由压汞试验、孔隙度和渗透率试验可知，土体的渗透性和宏微观孔隙特征具有密切的联系，根据上述试验结果及分析，提出采用有效孔隙度作为表征土体宏观孔隙特征参数，采用孔径和体积频率值表征微观孔隙特征参数，并根据 Poiseuille 等式(见式(5))结合达西定律得到不同孔隙半径的毛细模型[13]，见式(6).

$$q=\pi\gamma i r^4/8\mu \tag{5}$$

$$k=\frac{n\gamma}{32\mu}\sum_j f(d_j)d_j^2 \tag{6}$$

式中：γ 为液体重度，水的重度取 9.8 kN/m³；i 为水力梯度；r 为毛细管半径；μ 为液体的黏度，Pa·s；n 为有效孔隙度；$f(d_j)$为某一孔径孔隙体积的频率值；d_j 为某一孔喉半径.

土体渗透系数与宏观有效孔隙度和微观参数均成正比,毛细模型计算值与实测值比较如表2所示,当渗透系数数量级大于10^{-5}时误差较小,当渗透系数数量级在10^{-7}～10^{-6}时计算值与实测值之间存在误差,计算值比实测值偏大约一到两个数量级.采用毛细模型可以很好地反映疏浚淤泥固化土宏微观孔隙特征对渗透性的影响,由于流体在微孔中渗流要考虑到非线性渗流的影响,在评价微孔对渗透性的影响时存在一定误差.

表2 渗透系数的实测值和毛细模型计算值

Tab.2 Permeability coefficient obtained from test and capillary model

初始密度/($g\cdot cm^{-3}$)	渗透系数实测值/($cm\cdot s^{-1}$)			
	3 d	7 d	28 d	90 d
1.2	3.67×10^{-4}	2.81×10^{-4}	8.84×10^{-5}	3.01×10^{-5}
1.3	6.38×10^{-5}	4.11×10^{-5}	1.18×10^{-5}	4.22×10^{-6}
1.4	4.63×10^{-5}	3.55×10^{-5}	1.56×10^{-6}	5.56×10^{-7}
1.5	3.47×10^{-6}	2.66×10^{-6}	7.45×10^{-7}	4.47×10^{-7}
初始密度/($g\cdot cm^{-3}$)	渗透系数计算值/($cm\cdot s^{-1}$)			
	3 d	7 d	28 d	90 d
1.2	2.60×10^{-4}	2.48×10^{-4}	8.89×10^{-5}	4.88×10^{-5}
1.3	6.32×10^{-5}	6.02×10^{-5}	4.11×10^{-5}	5.65×10^{-5}
1.4	3.05×10^{-5}	1.29×10^{-4}	2.48×10^{-5}	8.52×10^{-6}
1.5	7.71×10^{-5}	2.94×10^{-5}	1.26×10^{-5}	6.99×10^{-6}

4 结 论

(1)疏浚淤泥固化土养护龄期大于28 d后,有效孔隙度不再发生变化,对渗透性的影响主要是由于孔径的转化及分布规律的变化造成的,50%以上的中孔转化为小孔、介孔和微孔,初始密度越大,这种影响越明显.

(2)本次试验疏浚淤泥固化土孔喉半径分布在0.01～100 μm,孔隙体积频率分布曲线为典型的双峰曲线,峰值区域孔喉半径范围为微孔组0.02～0.04 μm和中孔组3～30 μm.微孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐增大,中孔组的最可几孔径随着初始密度和养护龄期的增加逐渐减小.

(3)提出采用有效孔隙度作为表征疏浚淤泥固化土宏观孔隙特征参数,采用孔径和体积频率值作为表征微观孔隙特征参数,采用毛细模型将宏微观孔隙结构参数与渗透系数建立定量关系.

(4)初始密度较小的试样,结构比较松散,在较短养护龄期时,水化产物生成量较少,在冻干过程中结构容易扰动,压汞试验过程中易发生颗粒间或团粒间孔隙的坍塌、扩张和收缩,骨架孔隙分布测量的误差相对较大.

(5)采用毛细模型可以很好地反映疏浚淤泥固化土宏微观孔隙特征对渗透性的影响,由于流体在微孔中渗流要考虑到非线性渗流的影响,在评价微孔对渗透性的影响时存在一定误差,微孔结构对非线性渗流的影响还需要进一步研究.

参考文献:

[1] 丁建文,洪振舜,刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12):3591-3596, 3603.
DING Jianwen, HONG Zhenshun, LIU Songyu. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, **32**(12): 3591-3596, 3603. (in Chinese)

[2] HUANG Yingbao, ZHU Wei, QIAN Xuede, *et al*. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials [J]. **Engineering Geology**, 2011, **119**(3/4):112-119.

[3] 王东星,徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(12):3659-3664.
WANG Dongxing, XU Weiya. Research on strength and durability of sediments solidified with high volume fly ash [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, **33**(12):3659-3664. (in Chinese)

[4] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment [J]. **Soils and Foundations**, 2001, **41**(5):129-143.

[5] 丁建文,张 帅,洪振舜,等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9):2817-2822.
DING Jianwen, ZHANG Shuai, HONG Zhenshun, *et al*. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, **31**(9):2817-2822. (in Chinese)

[6] 孔令荣,黄宏伟,张冬梅,等. 不同固结压力下饱和软粘土孔隙分布试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(6):1036-1040.
KONG Lingrong, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei, *et al*. Experiment study on relationship between pore distribution and different stress levels due to consolidation of soft clays [J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, **3**(6):1036-1040. (in Chinese)

[7] 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.

[8] HONG Zhenshun, TATEISHI Y, HAN Jie. Experimental study of macro- and microbehavior of natural diatomite [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, **132**(5):603-610.

[9] 陈　悦,李东旭. 压汞法测定材料孔结构的误差分析[J]. 硅酸盐通报, 2006, **25**(4):198-201, 207.
CHEN Yue, LI Dongxu. Analysis of error for pore structure of porous materials measured by MIP [J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2006, **25**(4):198-201,207. (in Chinese)

[10] TANAKA H, LOCAT J. A microstructural investigation of Osaka Bay clay: the impact of microfossils on its mechanical behaviour [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, **36**(3):493-508.

[11] 胡学涛,梁　冰,陈亿军,等. 冻融循环对固化污泥力学及微观结构特性影响[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5):1317-1323.
HU Xuetao, LIANG Bing, CHEN Yijun, *et al*. Mechanical and microstructural properties changes of solidified sewage sludge due to cyclic freezing and thawing [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, **37**(5):1317-1323. (in Chinese)

[12] 党发宁,刘海伟,王学武,等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(9):1909-1917.
DANG Faning, LIU Haiwei, WANG Xuewu, *et al*. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, **34**(9):1909-1917. (in Chinese)

[13] GARCIA-BENGOCHEA I, ALTSCHAEFFL A G, LOVELL C W. Pore distribution and permeability of silty clays [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1979, **105**(7):839-856.

Macro and micro pore structure characteristics of dredged silt solidified soil and its effect on permeability

YAO Jun, SUN Xiuli*, LIU Wenhua, SHEN Qi

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The porosity, micro pore structure characteristics, permeability properties of dredged silt solidified soil (DSSS) and their relationships are investigated by using mercury intrusion porosimetry (MIP) test, permeability test and porosity test. The results of MIP tests show that the frequency distribution curve of pore volume of DSSS presents a typical bi-peak distribution, and the two concentrated pore throat radius intervals are 0.02-0.04 μm and 3-30 μm. The pore diameter of DSSS is divided into groups according to the compact structure of hydration product of DSSS and the frequency distribution curve of pore volume. The micropore group and the mesopore group are in the peak interval. The most possible aperture of the micropore group increases with the increase of initial density and curing age. The most possible aperture of the mesopore group decreases with the increase of initial density and curing age. Besides, the results of porosity test and permeability test show that the effective porosity of DSSS gradually decreases with curing age during the first 28 days and the effective porosity remains unchanged after curing for 28 days. While, the permeability coefficient of DSSS still decreases after curing for 28 days, and over 50% of the mesopores at this stage are transformed into small pores and micropores. Hence, the effective porosity, the pore size and volume frequency value are proposed to present the characteristic parameters of macroscopic and microscopic pore structure of DSSS respectively, and a capillary model is used to quantitatively correlate the permeability with macro and micro pore structure parameters.

Key words: solidified soil; effective porosity; mercury intrusion porosimetry (MIP) test; permeability; pore structure; capillary model