

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.06.007

# 碱激发粉煤灰和矿粉固化淤泥的胶结体孔隙分布特征

孙秀丽,王淑婷,姚君,刘文化,韩怡天,李志强,谭玉生

(江南大学环境与土木工程学院,江苏无锡214122)

**摘要:**通过压汞试验分析得到进汞曲线和孔径分布密度曲线,采用直剪试验、承载比试验测定固化淤泥胶结体的力学性质。提出采用孔隙分布系数( $\eta$ )表征固化淤泥的胶结体孔隙分布的均匀程度,建立了固化淤泥的胶结体孔隙分布系数与抗剪强度指标和CBR值之间的定量关系。结果表明,固化淤泥的胶结体孔隙分布系数与其力学指标具有密切的相关性。孔隙分布系数越小,固化淤泥的胶结体孔隙分布越均匀,抗剪强度越高,CBR值越高;孔隙分布系数越大,固化淤泥的胶结体孔隙分布越不均匀,抗剪强度和CBR值越低。

**关键词:**疏浚淤泥;固化;孔隙分布系数;压汞试验;碱激发

**中图分类号:**TU411

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2018)06-058-08

## Pore distribution characteristics of dredged sludge cementation body solidified with fly ash and mineral power under alkali stimulated conditions

SUN Xiuli, WANG Shuting, YAO Jun, LIU Wenhua, HAN Yitian, LI Zhiqiang, TAN Yusheng  
(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, Jiangsu, P.R.China)

**Abstract:** Curves of mercury injection and pore distribution density of alkali-activated dredged sludge cementation body solidified with fly ash and mineral powder were obtained by mercury intrusion porosimetry (MIP) test, and its shear strength indexes were measured by direct shear test and bearing ratio test. It's proposed to use pore distribution coefficient to characterize the uniformity of pore distribution of the cementation body, and the quantitative relationships between the pore distribution coefficient and the shear strength index and CBR values were established, respectively. The results show that the pore distribution coefficient of the cementation body is closely related to its mechanical indexes. The smaller the pore distribution coefficient is, the more uniformly the pores of the cementation body distributes, and the higher the shear strength index and CBR are, whereas the bigger the pore distribution coefficient is, the less uniformly the pores of the cementation body distributes, and the lower the shear strength index and CBR are.

**Keywords:** dredged sludge; solidification; pore distribution coefficient; MIP test; alkali activated

**收稿日期:**2017-12-25

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51609102;51709129);江苏省自然科学基金项目(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项目(LP1613)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51609102;51709129), Natural Science Fund Project of Jiangsu Province(BK20170187), State Key Laboratory of coastal and offshore engineering, Dalian University of Technology (No.LP1613)

**作者简介:**孙秀丽(1976—),女,副教授,主要从事固体废弃物安全处理处置及资源化利用方面的研究,(E-mail) sunxiuli@jiangnan.edu.cn。

疏浚淤泥处理处置问题是全世界许多国家共同面临的问题。在中国,仅珠三角地带的年淤泥疏浚量就达到  $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,法国的淤泥疏浚量达到  $2.5 \times 10^7 \sim 4.5 \times 10^7 \text{ m}^3$  (干料体积),美国航道中淤泥疏浚量达  $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中约  $5 \times 10^7 \text{ m}^3$  淤泥直接倾倒入海洋<sup>[1]</sup>。目前,对于废弃疏浚淤泥常用的处理方法是固化方法,其目的是将废弃淤泥处理成土工材料加以利用。处理后的淤泥固化土作为工程建设用土必须考虑其工程力学性质<sup>[2]</sup>。影响土体力学性质的主要因素之一就是土体的孔隙分布特征,孔隙分布均匀的土体,抗剪强度较高,孔隙分布不均匀的土体,容易发生局部剪切破坏。

已有很多学者研究了土体的孔隙分布特征及孔隙分布的影响因素。Zhang 与 Tang 研究了温度和材料的冻融过程对孔隙分布的影响<sup>[3-4]</sup>, Aly<sup>[5]</sup> 研究了材料自身的缩胀对孔隙分布的影响等。目前国内观测土体孔隙所用的方法一般为压汞法<sup>[6]</sup>,压汞法操作简单有效,试验时间较短,数十年来,压汞试验一直被广泛应用于土体、木材、混凝土等多孔材料的孔隙特征和分布等方面的研究<sup>[7-8]</sup>。随着实验技术的发展,压汞试验方法也不断改进,自动化程度更高、分析更准确,尤其是恒速压汞技术的发展与应用,可以分别测出孔隙和喉道的毛管压力曲线,更好地表征试样的孔隙结构<sup>[9]</sup>。近年来,有许多学者提出了不同的理论和方法研究土体的孔隙分布特征。孙德安等<sup>[10]</sup>用孔隙分布密度曲线研究红黏土的孔隙分布特征。张先伟等<sup>[11-12]</sup>用分形理论结合 SEM 图像定性分析结构性黏土的孔隙分布特征。李彦举<sup>[13]</sup>采用恒速压汞技术分别研究了中高渗、低渗和特低渗 3 个不同渗透率级别岩心的孔隙结构,分析了其孔隙、喉道和孔喉半径比的分布特点。

孔隙大小及其分布特征是决定土体等多孔材料物理性质、水力性质和力学性质的关键因素之一<sup>[14-15]</sup>,对土体的渗透性、变形特性及导热性均有影响<sup>[16]</sup>。目前对孔隙尺寸和大小的分类研究较多,但还没有一个合适的量化指标来反映土体内部孔隙分布特征。通过对压汞试验数据的处理与分析,提出了孔隙分布系数这一量化指标,用来表征土体的孔隙分布均匀程度,定量说明孔隙分布特征对土体宏观力学性能的影响,为建立孔隙结构与宏观力学指标的关系提供参考和依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料及配比

试验所用淤泥取自无锡市太湖疏浚淤泥白髻堆场,疏浚淤泥的物理性质指标如表 1 所示。淤泥的含水率达到 68.9%,液限达到 62.4%,根据土体的分类方法,试验用疏浚淤泥属于高含水率高液限黏土。

表 1 无锡市太湖疏浚淤泥物理特性指标

Table 1 Physical characteristics indexes of dredged silt in Wuxi, Taihu

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	有机质含量/ $\%$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$
68.9	2.66	62.4	27.7	4.4	34.7	1.19

采用粉煤灰和矿粉作为淤泥固化材料,其中粉煤灰和矿粉的主要化学成分见表 2。所用粉煤灰属于 F 类粉煤灰,粉煤灰属于潜在胶凝材料,需要通过碱性激发剂激发潜在活性产生水硬性。矿粉作为固化剂与淤泥发生反应,也可作为碱活性剂激发粉煤灰中玻璃体  $\text{SiO}_2$  的活性,与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  发生火山灰反应。水玻璃作为碱激发剂,激发固化剂的活性,水玻璃的模数为 1.0,掺量为粉煤灰和矿粉总和的 2%<sup>[17]</sup>。以粉煤灰、矿粉的掺量为变量,设置 4 个工况,试样配比如表 3 所示。

表 2 粉煤灰和矿粉的主要化学成分(质量分数/ $\%$ )

Table 2 The main chemical compositions of fly ash and slag(mass fraction/ $\%$ )

成分	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{SO}_3)$	loss
粉煤灰	50.44	32.14	6.49	0.69	5.79	1.33	0.34	1.27	0.48	2.12
矿粉	34.94	17.25	0.64	8.32	34.64	0.52	0.14	0.74	2.20	0.004

表 3 固化淤泥试样中固化剂和激发剂的比例(质量分数/%)

Table 3 The proportion of curing agent and activator in a solidified sediments sample(mass fraction/%)

工况	$w$ (淤泥)	$w$ (粉煤灰)	$w$ (矿粉)	$w$ (水玻璃)
SD25FA5MP	70	25	5	2
SD20FA10MP	70	20	10	2
SD15FA15MP	70	15	15	2
SD10FA20MP	70	10	20	2

注:FA (fly ash)指粉煤灰;MP(mineral power)指矿粉。

## 1.2 试验方法

按照表 3 所示配比,根据《土工试验规程》制样后,进行击实试验、承载比试验、直剪试验<sup>[18]</sup>。承载比试验是按照击实试验得到的含水率在试桶内制备试样,浸水 4 天后,用一个端部面积为 19.35 cm<sup>2</sup> 的标准压头,以 0.127 cm/min 的速度压入土中。记录每贯入 0.25 cm 时的单位压力,直至压入深度达到 1.27 cm 时为止。CBR 值是试验压力值与标准压力值(用高质量标准碎石由试验得到)的比值。直剪试验是将固化淤泥试样放入剪切盒内,上盒固定,下盒可沿水平方向滑动。首先施加垂直压力,然后对剪切盒的下盒逐级施加水平力,直至试样被剪坏。压汞试验测定分析试样的孔隙分布特征,压汞试验利用了汞的特殊性质,汞是液态金属,因其不仅具有导电性能,还具有液体的表面张力。在试验过程中汞在不同的压力下被注入试样的孔隙,所产生的电信号通过传感器输入计算机,系统自动记录每一级压力增量下的进汞量,按照公式(1)<sup>[19]</sup>将进汞压力换算成孔隙半径(假定孔隙为圆柱形),得到试样的孔隙分布曲线。由于传统压汞试验一般采用尺寸为 1 cm<sup>2</sup> 的薄片试样,试样的代表性受到质疑。因此,压汞试验采用的试样为直径 2 cm、高 3 cm 的小圆柱,在 -80 °C 冷冻 8 h 以上后,采用冻干的方法去除试样中的水分,再进行压汞试验。

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

式中: $p$  为进汞压力; $\sigma$  为汞的表面张力系数,通常取 0.485 N/m; $\theta$  为汞与被测固体材料的接触角,通常取 130 °; $r$  为圆柱形孔隙半径。

## 2 固化淤泥的胶结体孔隙分布系数的确定

大量理论和试验研究都已证明土体内部的孔隙大小及分布是影响其力学性质的主要因素之一,随着土体内部孔隙的增多,土体的抗压、抗拉和抗剪强度不断降低。孔隙分布的均匀性和分布规律在很大程度上影响了土体的力学性质,孔隙分布均匀性较好的土体,力学性能基本一致,而均匀性不好的土体,力学性能存在不均一性,如各向异性等。因此,笔者提出孔隙分布系数  $\eta$  来表征土体孔隙分布的均匀性,便于研究土体的工程力学性能,为后续疏浚淤泥固化土的资源化利用提供数据支持。

### 2.1 孔隙分布系数的推导

#### 2.1.1 临界孔径和极限孔径

进汞曲线一般为倒 S 形曲线,曲线开端平缓,中间陡峭,末端平缓。定义曲线开始段曲率最大并开始减小的临界点对应的孔径为临界孔径,超过该孔径后进汞量开始大量增加<sup>[11]</sup>;定义曲线结束段曲率最大并开始减小的临界点对应的孔径为极限孔径,超过该孔径后进汞累计量趋于一个恒定值。

曲线的曲率公式如下:

$$1/\rho(x) = \pm \frac{\omega''}{(1 + \omega'^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

式中: $\rho(x)$  为曲线上横坐标  $x$  对应的曲率半径; $\omega$  为压汞曲线的函数表达式。

图 1 和图 2 分别为某油田岩心样 1 和岩心样 2 的进汞曲线及函数  $\text{explinear}$ (见式(3))的拟合曲线,采用公式(2)推导临界孔径和极限孔径的理论值。

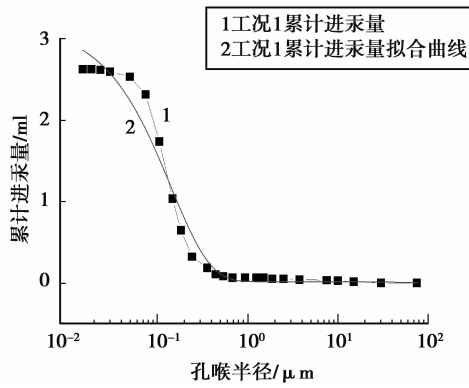


图 1 岩心样 1 的进汞曲线及拟合曲线

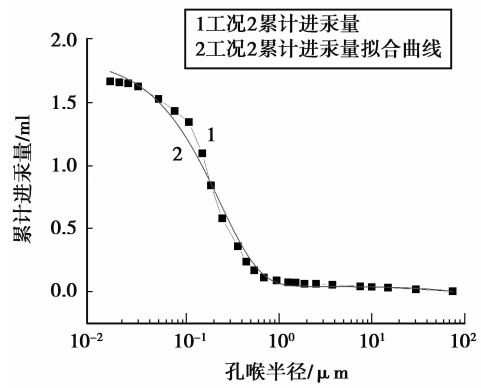


图 2 岩心样 2 的进汞曲线及拟合曲线

Fig.1 Mercury injection curve and fitting curve of core sample 1

Fig.2 Mercury injection curve and fitting curve of core sample 2

压汞曲线的拟合公式:

$$\omega = P_1 \times e^{(-X/P_2)} + P_4 \times X + P_3, \tag{3}$$

将式(3)代入到式(2),即可求出临界孔径的理论值,计算结果如表 4 所示。

表 4 岩心样 1 和 2 的临界孔径理论计算值

Table 4 Critical aperture theoretical values of core sample 1 and 2

孔隙率	工况编号	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$D_{\rho_{max}}/\mu\text{m}$
56.743	工况 1	3.159 82	0.142 3	0.017 13	$-1.77 \times 10^{-4}$	0.501 667
13.68	工况 2	1.821 48	0.227 88	0.041 01	$-5.63 \times 10^{-4}$	0.698 832

注: $D_{\rho_{max}}$ 为固化淤泥的胶结体临界孔径理论计算值。

2.1.2 临界孔径理论值和极限孔径理论值的近似值

在岩体工程研究中,体密度指单位体积岩体的内结构面的条数或结构面形心点的个数。类比岩石结构面密度中体密度的概念,采用孔隙分布密度函数,即进汞增量与对应孔喉半径的比值,来研究土体孔隙分布较为合理。

图 3 中压汞函数曲线与分布密度函数曲线有两个交点 C 点和 A 点, C、A 两点对应的孔径与临界孔径理论值和极限孔径理论值相差很小,尤其是临界孔径理论值和 C 点对应的孔径差值,可以忽略不计。因此,在满足计算精度的前提下,为计算方便,采用进汞曲线和孔径分布密度函数曲线的两个交点作为临界孔径理论值和极限孔径理论值的近似值,以避免计算临界孔径理论值和极限孔径理论值繁琐的过程。现利用岩心样 1 和岩心样 2 的数据,以及湛江黏土的试验曲线<sup>[20]</sup>来验证采用进汞曲线和孔径分布密度函数曲线的交点作为临界孔径理论值和极限孔径理论值的近似值的可行性。

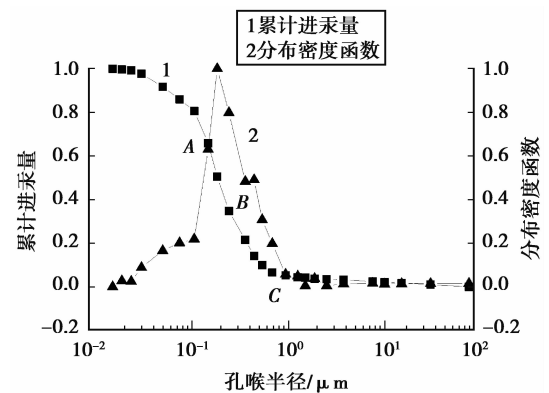


图 3 岩心样 1 的分布密度曲线与压汞试验曲线  
Fig.3 Distribution density curve and mercury injection curve of the core sample 1

图 4(a)和(b)为岩心样 1 和岩心样 2 的分布密度曲线与累计进汞曲线,取两曲线的交点对应的孔径与临界孔径理论值和极限孔径理论值进行比较,结果如表 5 所示。可以看出,交点对应的孔径与临界孔径和极限孔径的理论值相差仅为 0.2~0.3  $\mu\text{m}$ 。图 5 为湛江黏土的试验曲线<sup>[20]</sup>,从图中可以看出,分布密度函数与累计进汞量曲线的交点与临界孔径非常接近。因此,采用分布密度函数曲线与累计进汞量曲线交点作为临界孔径理

论值和极限孔径理论值的近似值是可行的。

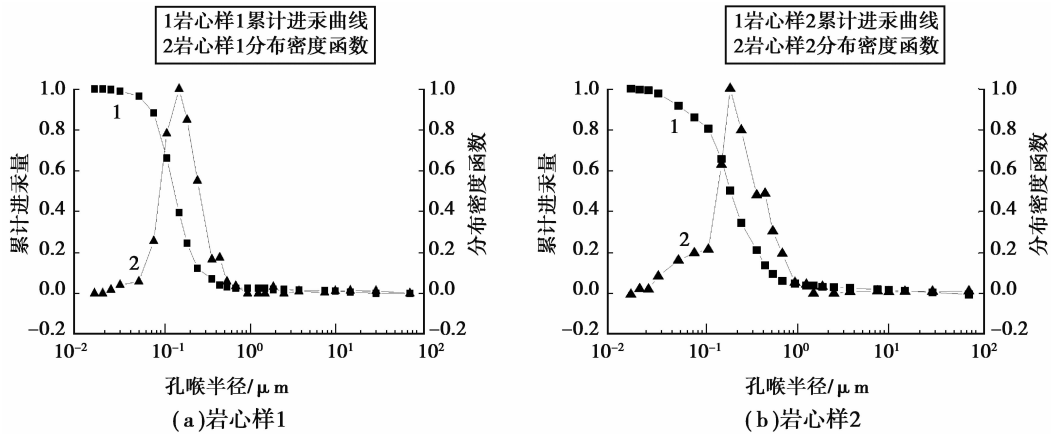


图 4 岩心样 1 和 2 的分布密度函数与累计进汞量曲线

Fig.4 The distribution density function and the cumulative mercury curve of core sample 1 and 2

表 5 岩心样 1 和 2 的极限孔径理论值与近似值

Table 5 Theoretical and approximate values of ultimate pore diameter of core sample 1 and 2

试样编号	临界孔径理论值/ $\mu\text{m}$	临界孔径近似值/ $\mu\text{m}$	差值/ $\mu\text{m}$
岩心样 1	0.501 667	0.754 923	0.253 256
岩心样 2	0.698 832	0.924 209	0.225 377

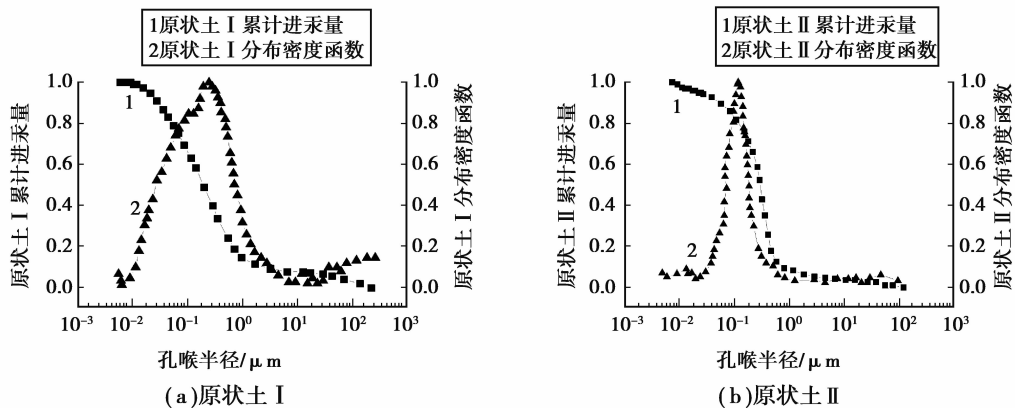


图 5 湛江黏土的分布密度函数与累计进汞量曲线

Fig.5 The distribution density function and the cumulative mercury curve of Zhanjiang clay

### 2.1.3 最可几孔径

由图 3 可以看出,当分布密度达到峰值时,对应的压汞试验曲线上  $B$  点切线斜率最大,从曲率的角度讲,  $B$  点恰好是压汞试验曲线上曲率为零的点之一(由于该函数的曲率值均大于零,当一点函数值  $y < 10^{-5}$ ,则可以认为该点曲率为零),由此得出分布密度曲线峰值对应压汞试验曲线上的  $B$  点。  $B$  点对应的孔径定义为最可几孔径,也就是分布密度曲线峰值对应的孔径<sup>[11]</sup>或进汞曲线曲率为零值点对应的孔径。

## 2.2 孔隙分布系数的确定

采用临界孔径、极限孔径和最可几孔径来计算孔隙分布系数,据此定义孔隙分布系数  $\eta$  为

$$\eta = \frac{d_c \times d_1}{(d_{mp})^2}, \quad (4)$$

其中:  $d_c$  为临界孔径,超过该孔径后进汞量开始大量增加对应的孔径;  $d_{mp}$  为最可几孔径,分布密度曲线峰值对应的孔径或进汞曲线曲率为零值点对应的孔径;  $d_1$  为极限孔径,超过该孔径后进汞累计量趋于一个恒定值

对应的孔径。

### 3 孔隙分布系数与淤泥固化土力学指标的关系

#### 3.1 孔隙分布系数

试验所得压汞曲线与分布密度曲线见图 6,可以根据试验结果得出临界孔径、最可几孔径和极限孔径。

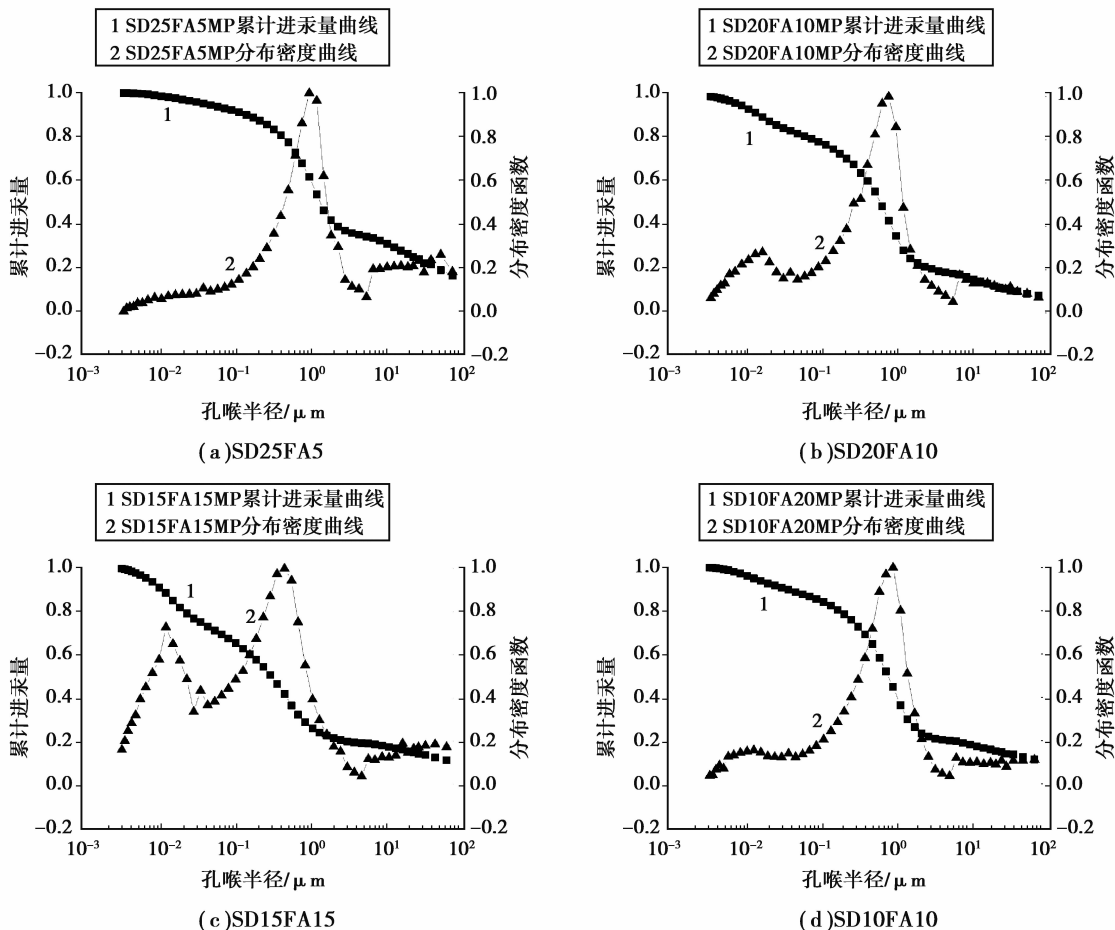


图 6 各工况试样的分布密度函数与累计进汞量曲线

Fig.6 The curves of pore distribution density function and the cumulative mercury injection of samples under each working conditions

按照公式(3)可以求得 4 个工况的孔隙分布系数  $\eta$ 。 $d_c, d_1$  和  $d_{mp}$  及相应的  $\eta$  值如表 6 所示。由表 6 可以看出,试验工况的孔隙分布系数  $\eta$  呈逐渐减小的趋势,而从压汞试验曲线的几何意义上看,当孔隙分布系数  $\eta$  值越小,说明该试样压汞曲线中间段越平缓,孔隙分布越均匀。

表 6 各工况试样的孔隙分布系数  $\eta$

Table 6 The coefficient of pore distribution- $\eta$  of sample under each working conditions

工况编号	$d_c/\mu\text{m}$	$d_1/\mu\text{m}$	$d_{mp}/\mu\text{m}$	$\eta$
SD25FA5MP	0.75	0.955	2.147	1.77
SD20FA10MP	0.441 5	0.739	2.01	1.62
SD15FA15MP	0.358	0.489	1.01	1.51
SD10FA20MP	0.517	0.959	2.39	1.34

### 3.2 孔隙分布系数与淤泥固化土抗剪强度的关系

图 7 所示为淤泥固化土的内摩擦角、黏聚力与  $\eta$  关系曲线。由图 7 可以看出,随着孔隙分布系数的增大,淤泥固化土的内摩擦角和黏聚力均呈逐渐下降的趋势。这是因为,孔隙分布系数越大,土样孔隙分布越不均匀,固化淤泥的胶结体内颗粒间的摩阻力越小,胶结体的原始黏聚力和水化产物间的胶结作用越小,土样的抗剪强度越低。

### 3.3 孔隙分布系数与淤泥固化土 CBR 值的关系

从图 8 可以看出,土样的 CBR2.5 及 CBR5.0 均随  $\eta$  的减小呈现增大的趋势,说明土样的承载比随着  $\eta$  的减小而逐渐增大,而  $\eta$  表征的是试样孔隙分布均匀程度, $\eta$  越小,孔隙分布越均匀,即固化淤泥胶结体整体均匀性更好,颗粒间的黏结力和摩阻力更强。由此可以得出结论:孔隙分布系数越小,孔隙分布越均匀,土样的承载力越高,反之则承载力越低。

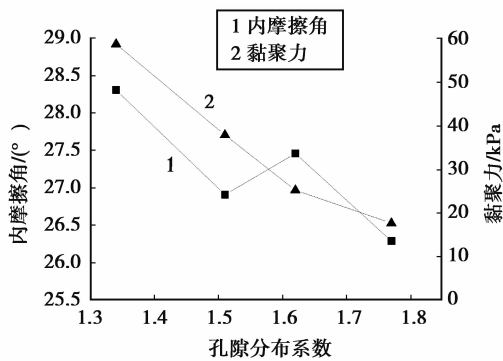


图 7 各工况试样的内摩擦角、黏聚力与  $\eta$  关系

Fig.7 The relationship between  $c, \phi$  and  $\eta$  of samples under each working conditions

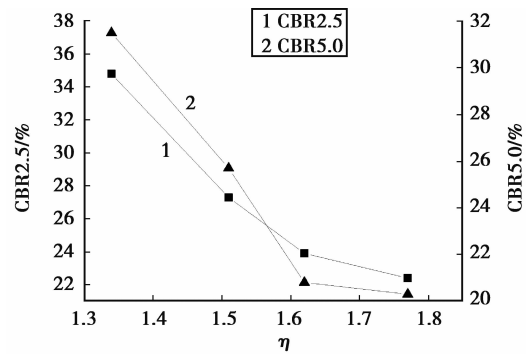


图 8 各工况试样的 CBR 值与  $\eta$  关系

Fig.8 The relationship between the CBR value and  $\eta$  of samples under each working conditions

## 4 结 论

1) 确定了表征固化淤泥的胶结体孔隙分布特征的 3 个孔径特征值点临界孔径、最可几孔径和极限孔径的理论值和近似值。

2) 提出孔隙分布系数  $\eta$ , 该指标可量化表征土体孔隙分布的均匀程度, 通过压汞试验曲线及孔隙分布密度曲线即可求出。

3) 固化淤泥的胶结体孔隙分布系数  $\eta$  越小, 胶结体孔隙分布越均匀, 抗剪强度越高, CBR 值也越高; 孔隙分布系数  $\eta$  越大, 胶结体孔隙分布越不均匀, 抗剪强度和 CBR 值越低。

4) 推导的孔隙分布系数方法还需通过大量的淤泥固化土以及其他土类的 MIP 试验加以进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 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(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(12): 3659-3664. (in Chinese)
- [2] 丁建文, 吴学春, 李辉, 等. 疏浚淤泥固化土的压缩特性与结构屈服应力[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 627-632.  
DING Jianwen, WU Xuechun, LI Hui, et al. Compression properties and structure yield stress for solidified soil composing of dredged clays[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 627-632. (in Chinese)
- [3] Tang M, Tian Y, Mu X B et al. The pore fractal characteristics of concrete materials under salt freezing conditions in cold area[J]. Advanced Materials Research, 2011(233/235): 2522-2527.
- [4] Zhang J K, Taylor, Peter C. Pore size distribution in cement pastes in relation to freeze-thaw distress[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(3): 1-6.
- [5] Aly T, Sanjayan J G. Effect of pore-size distribution on shrinkage of concretes[J]. Journal of Materials in Civil

- Engineering,2010,22(5):525-532.
- [6] Shareef N, Crawfis R. View-dependent approach to MIP for very large data[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, San Jose, CA; SPIE, 2002:13-21.
- [7] Zauer M, Hempel S, Pfriem A, et al. Investigations of the pore-size distribution of wood in the dry and wet state by means of mercury intrusion porosimetry. Wood Science and Technology, 2014, 48(6):1229-1240.
- [8] Jin S S, Zhang J X, Li S, et al. Basic study on fractal characteristic of pore structure in cement mortar[C]//Critical issues in transportation systems planning, development and management, Harbin, China; 2009, 2801-2807.
- [9] 朱华银, 安来志, 焦春艳. 恒速与恒压压汞差异及其在储层评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7):1316-1322.  
ZHU Huayin, AN Laizhi, JIAO Chunyan. The difference between constant-rate mercury injection and constant-pressure mercury injection and the application in reservoir assessment[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7):1316-1322. (in Chinese)
- [10] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2):351-356.  
SUN Dean, GAO You, LIU Wenjie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2):351-356. (in Chinese)
- [11] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2014(10):2794-2800.  
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aaiguo, et al. Experiment study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(10):2794-2800. (in Chinese)
- [12] 张英, 郗慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(S1):3597-3603.  
ZHANG Ying, BING Hui, YANG Chengsong. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP test[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(S1):3597-3603. (in Chinese)
- [13] 李彦举. 基于恒速压汞的孔隙结构特征研究[D]. 北京:中国地质大学, 2014.  
LI Yanju. Study on pore structure characteristics based on constant-rate mercury injection[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [14] Wang M, Pande G N, Kong L W, et al. Comparison of pore-size distribution of soils obtained by different methods[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17(1):1-6.
- [15] Bhattacharjee B. Influence of pore size distribution on the properties of a stabilized soil cement system[C]//Geo-China International Conference on Sustainable Civil Infrastructures, July 25-27, 2016, Shandong, China, 2016:53-60.
- [16] Shin H S, Kim K Y, Pande G N. On computation of strain-dependent permeability of rocks and rock-like porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 39(8):821-832.
- [17] 丁慧, 孙秀丽, 刘文化, 等. 固化疏浚淤泥作路基材料工程特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2):11-18.  
DING Hui, SUN Xiuli, LIU Wenhua, et al. Experimental study on engineering properties of solidified sludge as roadbed filling material[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2017, 39(2):11-18. (in Chinese)
- [18] 国家质量技术监督局. 非书资料:GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中华计划出版社, 1999.  
CSBTS State Bureau of Quality Technical Supervision. NBM:GB/T50123w1999 Code for test of soil mechanics[S]. Beijing: Chinese Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [19] Webb P A. An Introduction to the Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction and Presentation of experimental Data[J]. Micromeritics Instrument Corp, 2001:1-23.
- [20] 张先伟, 孔令伟. 利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J]. 岩土力学, 2013(S2):134-142.  
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(S2):134-142. (in Chinese)