

基于分形理论的疏浚淤泥固化土孔隙结构定量化研究

孙秀丽*, 宋碧颖, 刘文化, 沈起, 姚君

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 在分析疏浚淤泥固化土试样累计进汞曲线及 SEM 照片的基础上, 基于分形理论, 求得疏浚淤泥固化土孔隙结构的分形维数, 确定了分形维数与微观结构参数、宏观力学性质以及固化材料比例之间的关系. 研究结果表明: 疏浚淤泥固化土微观孔隙结构具有明显的分形特征, 其分形维数在 2.8~3.2. 并且, 疏浚淤泥固化土的分形维数与平均孔径、孔表面积、承载比、黏聚力、内摩擦角以及矿粉掺量之间均具有很好的相关性: 分形维数越大, 疏浚淤泥固化土的平均孔径越小, 比表面积越大, 压缩指数越小, 承载比、黏聚力和内摩擦角越大; 分形维数随着配比中矿粉掺量的增加逐渐增大. 采用分形维数可很好地定量描述疏浚淤泥固化土孔隙结构特征及力学特性, 也可为疏浚淤泥固化土宏观特性分析及模型的建立提供数据支持.

关键词: 疏浚淤泥; 孔隙结构; 力学性质; 压汞试验; 分形维数

中图分类号: TU41

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201802007

0 引言

孔隙结构是探究多孔材料微观结构的一项重要研究内容, 它对密实度、强度、耐久性等一系列工程性质具有重大影响. 因此, 探究疏浚淤泥固化土孔隙结构的特征对分析宏观性能下的微观机理有着重要意义. 根据 SEM 照片可知, 疏浚淤泥固化土的内部孔隙结构极其复杂无序, 无法用传统意义上的研究方法定量描述. 近年来, 分形理论不断发展与完善, 已有学者发现一些多孔材料具有明显的分形特征^[1-8], 可以采用分形维数描述材料的微观结构特征以及微观孔隙结构与宏观特性指标之间的关系. 但是, 由于采用的测试理论不同, 选用的参数模型各异, 对分形维数理解有偏差, 最终研究结果相去甚远^[9]. 本文采用压汞试验研究疏浚淤泥固化土的分形特征, 并结合填充维数的概念计算不同配合比下的分形维数, 探究分形维数与微观结构参数以及疏浚淤泥固化土宏观力学性质之间的关系.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥为太湖疏浚淤泥, 风干后含水

率 68.9%, 密度 2.66 g/cm³. 本文采用粉煤灰和矿粉作为固化剂, 需要通过碱性激发剂激发潜在活性产生水硬性^[10], 因此将水玻璃作碱活性剂, 用于激发固化剂的活性. 粉煤灰是 F 类粉煤灰, 颗粒粒径主要集中在 5~20 μm. 矿粉为工厂废弃矿渣, 既可充当固化剂与淤泥发生反应, 又可充当碱活性剂, 其铝、钙、硅的氧化物还可以作为土骨架的组成部分, 提高承载力. 矿粉的颗粒粒径主要集中在 2~5 μm. 以粉煤灰和矿粉的掺量为对比参量, 设置 4 个配比, 具体见表 1, 淤泥和水玻璃掺量比例不变, 分别为混合料总干质量的 70% 和 2%.

表 1 疏浚淤泥固化土各组分含量

Tab. 1 Content of each component of dredged silt solidified soil

编号	试样	w _{ds} /%	w _{fa} /%	w _{mp} /%	w _{wg} /%
1	SD30FA0MP	70	30	0	2
2	SD25FA5MP	70	25	5	2
3	SD20FA10MP	70	20	10	2
4	SD10FA20MP	70	10	20	2

1.2 试验方法及原理

1.2.1 力学试验方法 根据《公路土工试验规

程》(JTG E40—2007)规定的相关试验要求与步骤,分别对上述 4 种配比进行成样,在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下养护 28 d, 然后进行固结试验、承载比试验和三轴试验,测试疏浚淤泥固化土的力学特性。

1.2.2 压汞试验方法及原理 取 4 种配比试样,制成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的试块,采用冷冻干燥的方法去除试样中的水分,再进行压汞试验。根据汞对一般固体不润湿的特性,欲使汞进入土体孔隙需施加一定的压力,压力越大,汞进入土体孔隙半径越小。测量不同压力下进入土体孔隙中汞的量即可知相应孔隙大小的孔体积。通过式(1)和式(2)计算出试样的孔隙率 ϵ 和孔表面积 S 。

$$\epsilon = (V_p/V_s + (V_p - V_s)/(V_m - V_s)) \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{\gamma/\cos\theta} \int_0^\epsilon p d\epsilon \quad (2)$$

式中: V_p 为在一定压力下注入汞的体积; V_s 为汞注入后稳定状态下的体积; V_m 为测定中最大压力下的汞体积; γ 为汞的表面张力; θ 为接触角; p 为进汞压力。

2 结果与分析

2.1 压汞试验数据分析

根据压汞试验数据的整理,测定各工况土样的累计进汞量(V_c),可得到各工况疏浚淤泥固化土的累计进汞曲线(如图 1 所示)。纵向对比各曲线发现,SD30FA0MP 的进汞量最大,SD25FA5MP 次之。从曲线整体趋势来看,累计进汞曲线大致被 $0.1\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 分成了 3 段:孔隙半径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的曲线较为平缓,说明这一区间的孔隙含量较少;孔隙半径大于 $0.1\ \mu\text{m}$ 小于 $1\ \mu\text{m}$ 的曲线斜率最大,说明这一区间孔隙含量最多;孔隙半径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的曲线斜率较小,说明这一区间的孔隙含量也较少。

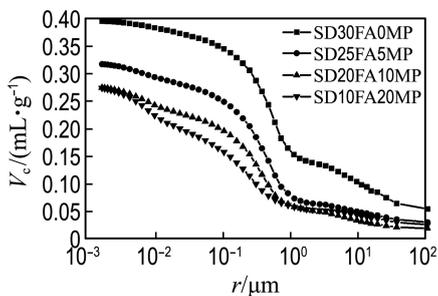


图 1 各工况疏浚淤泥固化土的累计进汞曲线

Fig. 1 Cumulative mercury injection curves of dredged silt solidified soil under different conditions

2.2 力学试验结果

通过固结试验得到各工况试样的压缩指数(C_c),通过承载比试验得到各工况试样的加州承载比(R_{cb}),通过三轴试验得到各工况试样的强度指标黏聚力(c)和内摩擦角(φ),如表 2 所示。

表 2 各工况疏浚淤泥固化土的力学指标

Tab. 2 Mechanical indexes of dredged silt solidified soil under different conditions

编号	试样	C_c	$R_{cb}/\%$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
1	SD30FA0MP	0.24	22.4	7.51	24.01
2	SD25FA5MP	0.22	23.9	8.76	25.43
3	SD20FA10MP	0.21	34.8	11.98	26.52
4	SD10FA20MP	0.19	—	15.58	29.78

2.3 疏浚淤泥固化土的分形维数

分形理论认为,土壤具有分形的特点^[11],可以用分形维数 D 来描述孔隙结构特征。疏浚淤泥固化土的孔隙形貌特征如图 2 所示,图 2(a)中试样较疏松,大孔隙较多,孔隙不均匀,孔隙率大;图 2(b)中试样趋于密实,孔隙较大,但较均匀,水化产物间的联结较紧密,孔隙率降低;图 2(c)中试样更加密实,孔隙较小,且较均匀,孔隙率进一步降低;图 2(d)中试样进一步密实,孔隙很小,且很均匀,孔隙率很小。根据各工况试样 SEM 照片中孔隙的形态,本文采用 Tricot 提出的填充维数的概念,即用半径小的互不相交的小球尽可能稠密地填充孔隙的方法,计算疏浚淤泥固化土的分形维数。

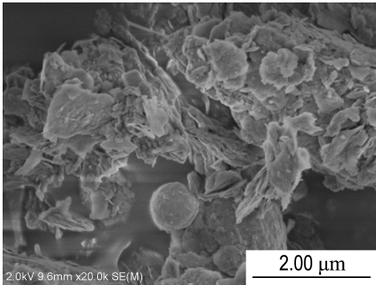
$$D = -\lg N / \lg r \quad (3)$$

引入压汞试验的数据,则上式中, r 为一定压力 p 对应的孔隙半径, N 为此压力下孔隙半径大于等于 r 的孔隙数目, D 即所求的分形维数(填充维数)。倘若疏浚淤泥固化土的 $\lg N - \lg r$ 曲线具有良好的线性关系,则可以证明其具有分形特征,且斜率的相反数就是分形维数 D 。

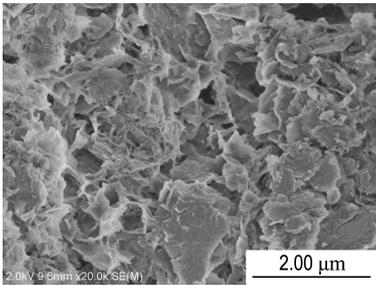
通过压汞分析软件的数据接口,将一定压力 p 下的累计进汞量和对应的孔径输出到 Excel 软件,利用 Excel 自带的函数功能,计算该压力下的进汞量 ΔV 和孔隙半径 r ,求出孔隙半径为 r 的孔隙数 $\Delta N_r = \Delta V / \frac{4}{3} \pi r^3$,累计孔隙数 $N = \sum_{i \geq r} \Delta N_i$,最后,对 r 和 N 取对数,即可得到 $\lg N$ 和 $\lg r$ 。在 Origin 软件中做出 $\lg N - \lg r$ 的散点图,利用线性拟合的功能,确定 $\lg N - \lg r$ 的拟合曲线表达式和相关系数。若相关系数大于 0.95,说明拟合曲线有良好的相关性,该试样具有明显的分形特征,直

线斜率的相反数就是分形维数 D 。4 种工况的线性拟合情况见图 3 和表 3。

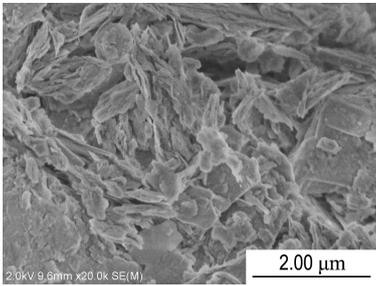
SD25FA5MP、SD20FA10MP、SD10FA20MP 的 D 分别为 2.871 1、3.051 1、3.097 4、3.172 7。疏浚淤泥固化土的分形维数在 2.8~3.2，大于 Hu^[12] 研究得到的蒸压混凝土的分形维数 (0~3)，小于李永鑫等^[7] 研究的粉煤灰-水泥浆体的孔分形维数 (3.3~3.5)，这可能与选取的模型参数不同有关。从本质上看，分形维数表征的是固化土



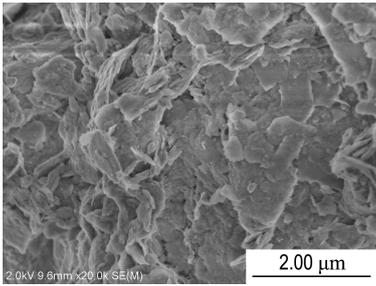
(a) SD30FA0MP



(b) SD25FA5MP



(c) SD20FA10MP

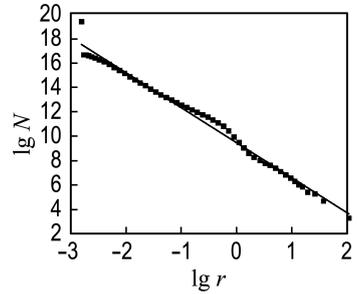


(d) SD10FA20MP

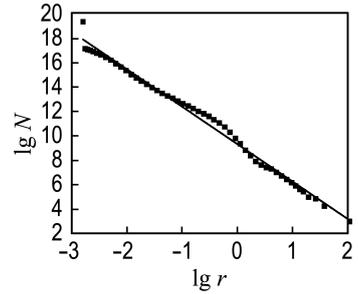
图 2 各工况疏浚淤泥固化土的 SEM 照片

Fig. 2 SEM photos of dredged silt solidified soil under all conditions

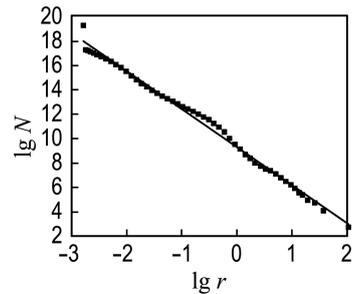
4 种工况 $\lg N$ - $\lg r$ 拟合曲线的相关系数均大于 0.98，具有良好的相关度。因此，可以说明疏浚淤泥固化土的孔隙结构具有明显的分形特征，且填充维数的概念能够满足本试验数据的处理。计算各工况的分形维数，得到 SD30FA0MP、



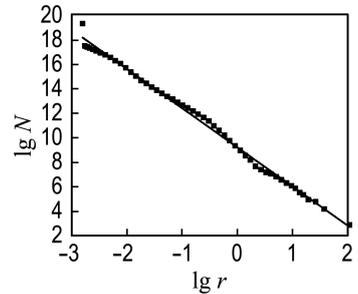
(a) SD30FA0MP



(b) SD25FA5MP



(c) SD20FA10MP



(d) SD10FA20MP

图 3 各工况疏浚淤泥固化土的 $\lg N$ - $\lg r$ 曲线

Fig. 3 Curves of $\lg N$ - $\lg r$ of dredged silt solidified soil under all conditions

表 3 各配比 lg N-lg r 线性拟合的具体参数

Tab. 3 Parameters of linear fitting of lg N-lg r under all conditions

编号	试样	斜率	截距	分形维数 D	相关系数
1	SD30FA0MP	-2.87	9.47	2.87	0.99
2	SD25FA5MP	-3.05	9.29	3.05	0.99
3	SD20FA10MP	-3.10	9.25	3.10	0.99
4	SD10FA20MP	-3.17	9.20	3.17	0.99

孔结构空间分布形态的复杂程度, D 越大, 表明孔结构分布形态越复杂. 当 $D > 3$ 时, 说明孔结构分布形态相当复杂无序, 已经超出欧氏三维空间的范畴, 仅能用分形维数来阐明.

从上述数据中可以看出, 不同配比试样的孔隙结构有着不同的分形维数, 而且, 分形维数随着矿粉含量的增加而增大. 这可能是由于矿粉含量高水化产物增多, 试样中的微孔增多, 增加了孔结构的复杂性.

2.4 分形维数与疏浚淤泥固化土微细观孔参数的关系

2.4.1 分形维数与平均孔径的关系 将分形维数与平均孔径的关系点进行线性拟合, 发现随着分形维数的增大, 平均孔径有减小的趋势, 且两者具有良好相关性(见图 4), 相关系数为 0.975 7. 说明在一定情况下, 可以将分形维数 D 作为一个推测孔径大小的参数.

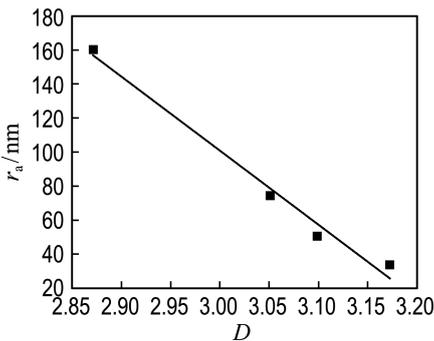


图 4 疏浚淤泥固化土分形维数与平均孔径的关系曲线

Fig. 4 Curve of fractal dimension and average pore diameter of dredged silt solidified soil

2.4.2 分形维数与孔表面积的关系 由图 5 可知, 随着分形维数的增大, 孔表面积增大. 在相同孔隙率的情况下, 孔表面积越大, 说明孔径小的孔隙越多, 孔的内表面越粗糙. 因此, 分形维数在一定程度上可以描述孔的空间分布与内表面粗糙度.

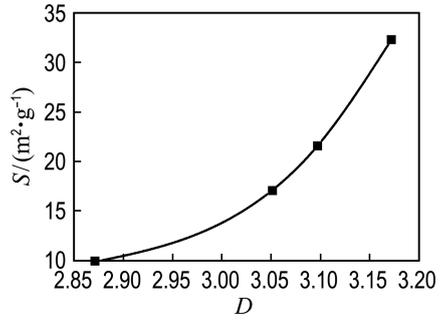


图 5 疏浚淤泥固化土分形维数与孔表面积的关系曲线

Fig. 5 Curve of fractal dimension and pore surface area of dredged silt solidified soil

2.5 分形维数与疏浚淤泥固化土宏观力学性质的关系

2.5.1 分形维数与土的压缩性的关系 地基土在正常荷载作用下, 主要发生压缩变形. 土的压缩性常用土的压缩指数来表征. 压缩指数越大, 说明土的压缩性越大. 由图 6 可得, 分形维数越大, 压缩指数越小, 疏浚淤泥固化土的压缩性越小.

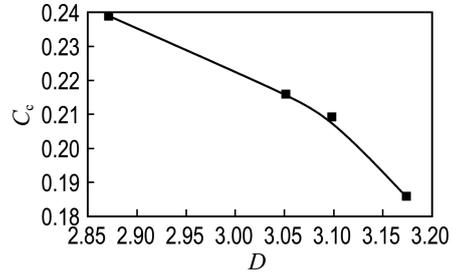


图 6 疏浚淤泥固化土分形维数与压缩指数的关系曲线

Fig. 6 Curve of fractal dimension and compression index of dredged silt solidified soil

2.5.2 分形维数与土的承载力的关系 土的承载力是路基土最重要的宏观力学特征之一. 本试验的疏浚淤泥固化土用作公路路基填料, 故用加州承载比来表征承载能力. 由图 7 可知, 加州承载比随着分形维数的增大而增大. 这表明分形维数可以在一定程度上描述疏浚淤泥固化土的承载能力.

2.5.3 分形维数与土的抗剪强度的关系 土的抗剪强度由黏聚力和内摩擦角组成. 黏聚力是土颗粒间的静电引力、胶结力, 内摩擦角是土粒间的摩擦力和咬合力^[13]. 由图 8 可知, 黏聚力和内摩擦角都随着分形维数的增大而增大. 这说明分形维数能在一定程度上描述疏浚淤泥固化土的抗剪强度, 抗剪强度随着分形维数的增大而增大.

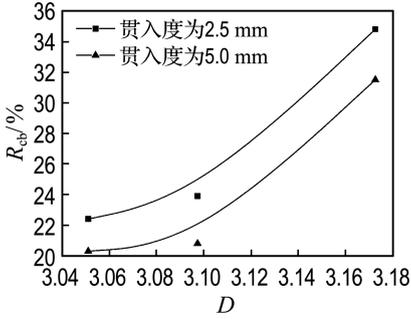


图7 疏浚淤泥固化土分形维数与加州承载比的关系曲线

Fig.7 Curves of fractal dimension and CBR of dredged silt solidified soil

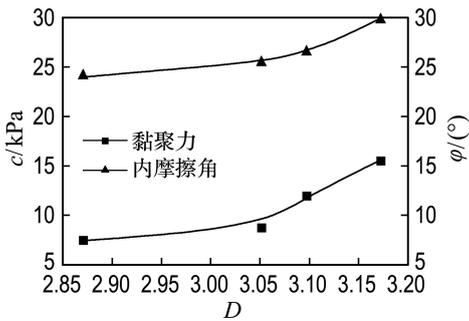


图8 疏浚淤泥固化土分形维数与黏聚力、内摩擦角的关系曲线

Fig.8 Curves of fractal dimension and cohesive force and internal friction angle of dredged silt solidified soil

2.5.4 分形维数与粉煤灰和矿粉掺量的关系
疏浚淤泥固化土的微观孔隙结构和宏观力学性质与固化材料的配比密切相关,如图9所示,矿粉掺量与分形维数正相关,而粉煤灰掺量与分形维数

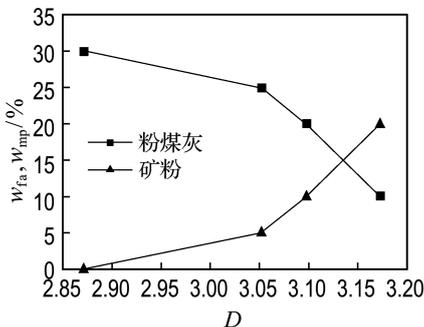


图9 疏浚淤泥固化土分形维数与粉煤灰和矿粉掺量的关系曲线

Fig.9 Curves of fractal dimension and content of fly ash and mineral powder of dredged silt solidified soil

负相关.这是因为,在水玻璃的激发下矿粉水化活性高于粉煤灰水化活性,随矿粉掺量的增加,水化产物间的联结逐渐增强,试样的孔隙率和孔径均较小,疏浚淤泥固化土的强度逐渐增大.因此,分形维数不但与固化土的孔隙特性和强度特性具有很好的相关性,还与固化土配比组分的含量具有很好的相关性.

3 结论

(1)疏浚淤泥固化土的孔隙结构具有明显的分形特征,疏浚淤泥固化土孔隙结构的分形维数在2.8~3.2.

(2)疏浚淤泥固化土孔隙结构的分形维数与平均孔径有着良好的负相关性,分形维数越大,平均孔径越小;孔表面积与分形维数也有着密切关系,孔表面积随着分形维数的增大而增大.因此分形维数可以从一定程度上表征孔隙结构的特性.

(3)分形维数越大,土的压缩性越小,承载能力、抗剪强度越大.这表明分形维数越大,土的力学性质越好,分形维数可将疏浚淤泥固化土的孔隙结构特征与土的宏观力学性能建立联系.

(4)分形维数表征的是固化土孔结构空间分布形态的复杂程度,它的出现为研究多孔材料提供了一种新思路.但是其具体物理意义仍有待探讨,多种计算方法之间的差异性与适用性还需进一步研究.

参考文献:

- [1] TANG Zhaohui, DONG Xinxin, CHAI Bo, *et al.* Evaluation of particle size distribution of coal gangue through fractal method in Dongkuang Mine, Heshan, China [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, **26**(8):06014018.
- [2] SAPORA A, CORNETTI P, CHIAIA B, *et al.* Nonlocal diffusion in porous media: A spatial fractional approach [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, **143**(5):D4016007.
- [3] MA Hongyan, TANG Shengwen, LI Zongjin. New pore structure assessment methods for cement paste [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, **27**(2):A4014002.
- [4] XIANG G S, JIANG H, XU Y F. Surface fractal dimension of bentonite from nitrogen adsorption [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2014, **236**: 286-292.
- [5] VALLEJO L E. Fractal evaluation of the evolution

- of the void system in a simulated granular material under direct shear [C] // **Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016 — Proceedings of the Joint Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016**. Phoenix; American Society of Civil Engineers, 2016;560-568.
- [6] 王欣, 齐梅, 李武广, 等. 基于分形理论的页岩储层微观孔隙结构评价[J]. 天然气地球科学, 2015, **26**(4):754-759.
WANG Xin, QI Mei, LI Wuguang, *et al.* Micro-structure evaluation of shale gas reservoir based on fractal theory [J]. **Natural Gas Geoscience**, 2015, **26**(4):754-759. (in Chinese)
- [7] 李永鑫, 陈益民, 贺行洋, 等. 粉煤灰-水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系[J]. 硅酸盐学报, 2003, **31**(8):774-779.
LI Yongxin, CHEN Yimin, HE Xingyang, *et al.* Pore volume fractal dimension of fly ash-cement paste and its relationship between the pore structure and strength [J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2003, **31**(8):774-779. (in Chinese)
- [8] 丁雪兴, 严如奇, 贾永磊. 基于基底长度的粗糙表面分形接触模型的构建与分析[J]. 摩擦学学报, 2014, **34**(4):341-347.
DING Xuexing, YAN Ruqi, JIA Yonglei. Construction and analysis of fractal contact mechanics model for rough surface based on base length [J]. **Tribology**, 2014, **34**(4):341-347. (in Chinese)
- [9] 金珊珊, 张金喜, 李爽. 混凝土孔结构分形特征的研究现状与进展[J]. 混凝土, 2009(10):34-37, 42.
JIN Shanshan, ZHANG Jinxi, LI Shuang. Current situation and development of fractal characteristic of pore structure of concrete [J]. **Concrete**, 2009(10):34-37, 42. (in Chinese)
- [10] ASTM International. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete; ASTM C618-17 [S]. West Conshohocken; ASTM International, 2017.
- [11] BONALA M V S, REDDI L N. Fractal representation of soil cohesion [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, **125**(10):901-904.
- [12] HU W. Modeling the influence of composition and pore structure on mechanical properties of autoclaved cellular concrete [D]. Pittsburgh; University of Pittsburgh, 1997.
- [13] 蔡建. 原状土的抗剪强度研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7):1965-1971.
CAI Jian. Study of shear strength for intact soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, **33**(7):1965-1971. (in Chinese)

Quantitative study of pore structure of dredged silt solidified soil based on fractal theory

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

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

Abstract: On the basis of analyzing the cumulative mercury injection curves and SEM photos of dredged silt solidified soil samples, the fractal dimension of pore structure of dredged silt solidified soil is calculated by using the fractal theory, and the relationship between fractal dimension and microstructure parameters, macro mechanical properties and proportion of curing agents is established. The results show that the micro pore structure of dredged silt solidified soil has obvious fractal characteristics, and its fractal dimension is between 2.8-3.2. The fractal dimension of dredged silt solidified soil has a good correlation with average pore diameter, pore surface area, bearing ratio, cohesive force, internal friction angle and the content of mineral powder. With the increasing of the fractal dimension, the average pore diameter of solidified soil and the compression index decrease, and pore surface area, bearing ratio, cohesive force and internal friction angle increase. The fractal dimension increases with the increasing of mineral powder content. The fractal dimension can be used to describe quantitatively the pore structure characteristics and mechanical properties of dredged silt solidified soil. It can also provide data support for the analysis of macro and micro characteristics of dredged silt solidified soil and the establishment of the model.

Key words: dredged silt; pore structure; mechanical properties; mercury injection test; fractal dimension