

# 珠海海积软土孔隙分布与应力水平的关系研究

彭立才<sup>1,3</sup>, 蒋明镜<sup>1,2</sup>, 林奕禧<sup>3</sup>, 黄良机<sup>3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 珠海市建设工程质检站, 广东 珠海 519015)

**摘要:** 采用压汞法研究了不同固结压力作用下具有强结构性的珠海海积软土的微观孔隙入口孔径分布与应力水平的关系, 通过 X-射线衍射试验(XRD)对其黏土矿物含量进行定量分析, 并与加拿大 Regina 黏土进行了对比. 研究表明: 珠海天然海积软土的孔隙入口孔径分布为主单峰分布; 当应力水平小于结构屈服应力时, 其孔隙入口孔径分布和微观结构与应力水平无关; 当应力水平达到结构屈服应力时, 大中孔隙(200 nm)的含量明显减少, 而小孔隙(20~200 nm)含量则基本不变; 在屈服后阶段, 小孔隙含量锐减, 整体孔隙空间的孔径趋于均匀. 最后, 初步分析了珠海海积软土和 Regina 黏土孔隙分布差异的原因是颗粒组成分布和黏土矿物成分的不同.

**关键词:** 结构屈服压力; 压汞试验; 海积软土; 孔隙结构  
**中图分类号:** TU 435 **文献标识码:** A

## Relationship Between Entrance Pore Distribution and Stress Level of Marine Clay in Zhuhai

PENG Licai<sup>1,3</sup>, JIANG Mingjing<sup>1,2</sup>, LIN Yixi<sup>3</sup>, HUANG Liangji<sup>3</sup>  
(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Zhuhai Center for Supervision and Inspection on Quality of Infrastructure Engineering, Zhuhai 519015, China)

**Abstract:** In this study, the mercury intrusion porosimetry (MIP) tests were performed on the natural marine clay to investigate the relationship between the change in entrance pore size distribution and the applied stress level. Quantitative analysis was made on clay mineral content of Zhuhai clay through X-ray diffraction tests (XRD). In addition, the measured data was compared to the experimental data obtained Regina clay, Canada. The results show that the entrance pore

size distribution of marine clay in Zhuhai demonstrate a continuous unimodal distribution. And the entrance pore size distribution varies little when the stress level is smaller than the gross yielding stress, but changes significantly when the applied stress is in the vicinity of the gross yielding stress. In the latter case, the large pores ( $r > 2\ 000\ \text{nm}$ ) and the medium pores ( $2\ 000\ \text{nm} > r > 200\ \text{nm}$ ) become smaller while the micropores ( $200\ \text{nm} > r > 20\ \text{nm}$ ) vary little. When the applied stress is larger than the gross yielding stress, micropores space volume decreases rapidly, and the pore size gradually becomes uniform with the increase in applied stress level. Finally, the differences in pore size distribution between Zhuhai clay and Regina clay can be attributed to different clay content and mineral.

**Key words:** gross yielding stress; mercury intrusion porosimetry; marine clay; pore structure

珠海位于我国广东省南部, 珠江出海口西岸, 濒临南海, 海岸线长达 731 km, 分布着大量的海洋相沉积软黏土. 它具有厚度大、含水率高、黏粒含量高、压缩性高、强度低、渗透性小等特点. 其独特的地质、地理特性, 使得珠海软土成为我国所报道工程中最软的软土. 因此对其微观结构进行研究, 探讨与强度的关系, 并对其成因进行分析, 无论是对丰富软土强度理论, 还是对指导工程实践都具有重要的意义.

近年来, 软土微观结构及其与工程性质的关系研究有了较大的进展. 国外, Delage 等<sup>[1]</sup>在压汞试验中运用冻干土样的方法来研究 Champlain 黏土土样固结过程中的孔隙变化, 并和电镜扫描(SEM)得到的图片对比分析来研究黏土孔隙的变化规律; Lapierre 等<sup>[2]</sup>根据压汞试验分别得到原状土和重塑

收稿日期: 2008-09-16  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679057); 上海市浦江人才计划资助项目(06PJ14088); 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA112102); 珠海市政府科技计划资助项目(PA200310064)  
作者简介: 彭立才(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为软土工程和桩基工程检测. E-mail: licaipeng@163.com  
蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 博士后, 主要研究方向为结构性黏土宏观试验和数值分析. E-mail: mingjingjiang@tongji.edu.cn

土在不同固结压力下的孔隙分布和渗透系数的数学表述,发现对于同一种土,原状土和重塑土的孔隙和渗透系数没有统一的数学表述;Delage 等<sup>[3]</sup>运用压汞试验的方法分析了不同含水量和密度的膨润土孔隙分布特点及其时效变化规律.国内的蒋明镜和沈珠江<sup>[4-5]</sup>对人工制备结构性黏土和结构性黄土的剪切带形成进行了宏微观试验分析;吕海波等<sup>[6]</sup>对固结过程中湛江土体孔隙进行了分析;王清和王剑平<sup>[7]</sup>运用分形理论对软土固结和黄土湿陷性微结构效应进行研究;蒋明镜等<sup>[8-9]</sup>通过离散元数值法 (DEM)对结构性砂土进行了模拟应用研究.

本文选取珠海地区有代表性海积相软土作为研究对象,开展其强度试验,并采用压汞法,对软黏土在不同固结压力下的孔隙入口孔径分布特征变化进

行分析,同时取土样做 X 射线衍射试验,定量分析其黏土矿物成分,最后对珠海海积软土的微观结构成因进行了分析,并与加拿大 Regina 黏土作了对比.

1 土样的基本物理力学性质

土样取自珠海保税区附近的某工地,试验中所用的土样取自地下 19~20 m 深处,为全新世晚期的海相淤泥土,是近代海退所形成的浅海堆积土,分布范围广,厚度大,最深处甚至有 60~70 m 厚,为珠海地区最主要的软土层,呈软塑或流塑状态,其物理力学性质参数见表 1.在单向压缩试验中测得此层土样的结构屈服应力为 205 kPa.

表 1 土体的物理力学参数  
Tab.1 Physico-mechanical parameters of soil layers

力学参数	取土深度/ m	初始孔隙比 $e_0$	天然含水量 $w/\%$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	凝聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	结构屈服强度 $\sigma_k/\text{kPa}$
数值	19.5~20.0	1.54~1.73	53.41~64.35	54.73	28.92	16.3~16.6	5.8	13.6	205

2 微观结构试验与原理

2.1 样品制备及脱水

本次现场取样严格按照规范要求,采用上海金勘公司的 TB100A 不锈钢敞口薄壁取土器进行钻孔取样,将取得的原状土样在土工实验室按不同的组合加压方式分别做压缩实验.待土样在预定压力下达到稳定时分级卸荷;然后,用透水石将土样从环刀里小心推出,用细钢丝锯将土样切成小条,以备压汞试验(MIP)时使用,在此过程中要尽量避免对土样产生扰动.

许多研究表明,对于大部分土,传统的风干或烘干法制样会导致试样发生显著的收缩,孔隙含量大大减少,严重时只有冷冻干燥法的 1/3.冷冻干燥法是利用低温制冷剂(如液氮)快速将土中水分冷冻,使孔隙中的水分直接变成不具膨胀性的晶体,抽真空使其由结晶状态直接升华,从而保证土中孔隙不因脱水发生收缩.本次试验试样脱水采用冷冻干燥法,将受到不同压缩量的土样切成小条,放入液氮(沸点 - 196  $^{\circ}\text{C}$ )中快速冷冻 20 min,然后用德国 CHRIST ALPHA2-4 冻干机抽真空 16 h 以上,使土中非结晶水的冰冷升华,从而达到土样既干燥又不变形的目的,所制备样品用于压汞试验.本文研究

中,X-射线衍射试验样品的制备在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,测试在 PANalytical(上海)实验室完成,压汞试验在同济大学先进土木材料教育部重点实验室完成.

2.2 X-射线衍射试验

矿物成分控制着土颗粒的大小、形状和表面特征.这些特征本身以及与液相的相互作用决定了土的塑性、膨胀、压缩、强度和渗透性等性状.因此,本次研究选取了保税区 20 m 处 2 个土样进行 X-射线衍射试验.

黏土矿物分析使用黏土粒级矿物( $<2\text{ }\mu\text{m}$ )定向薄片的 X-射线衍射方法(XRD).黏土矿物的鉴定和解释主要依据 2 种测试条件下获得的 XRD 叠加波谱的综合对比,每个波峰参数的半定量计算使用 MacDiff 软件在乙二醇曲线上进行.

2.3 压汞试验原理

压汞法试验是基于非亲水性液体只有在外加压力的作用下才会进入其内部孔隙这一原理进行的.外加压力计算如下:

$$p = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \tag{1}$$

式中: $p$  为施加压力; $\gamma$  为导入液体的表面张力,本次试验取  $0.480\text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ; $\theta$  为导入液体与固体材料的接触角; $r$  为孔入口半径.

利用压汞仪将水银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,由 Washburn 方程将压力换算成孔隙半径,便得出了土中孔隙分布结果.为了进一步解释压汞试验数据,Juang 等<sup>[10]</sup>提出了孔隙密度函数(PSD)的定义,如下式:

$$f(\lg r_i) = \frac{dV_i}{d\lg r_i} \quad (2)$$

式中:  $V$  代表孔隙体积;  $r$  是孔隙入口半径;  $i$  是指压汞试验过程的某一压力段.

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 结构屈服前后微观孔隙空间分布规律

对于结构性土,结构屈服强度(即 gross yielding stress,也称之为固结屈服强度<sup>[8-9]</sup>)是一个重要参数.结构性土屈服破坏的概念对于建立结构土本构关系

和损伤变量的选取具有参考价值.本研究采用的海相软土的结构屈服强度为 205 kPa,为了研究结构屈服前状态、临界结构屈服状态、结构屈服后状态的微观孔隙空间分布的变化,分别取 0,50,100,200,400,600,800 kPa 固结稳定后的土样进行压汞试验.

由压汞法量测得到的孔隙入口孔径的分布比较结果见图 1.图 1a 是屈服前应力状态下不同应力水平作用下的孔隙入口孔径分布的比较结果.从图中可以看出,珠海海积软土的孔隙入口孔径分布为主单峰分布,主峰的峰值位置在 232 nm.外加应力为 0,50 和 100 kPa 的孔隙入口孔径分布曲线几乎完全一样.这表明珠海海积软土在屈服前应力状态的孔隙入口孔径分布与应力水平无关,微观结构不随应力水平的增大而改变.这一微观研究结果,与宏观力学性状分析得到的理想结构土的屈服前状态力学性状与应力水平无关的结论是一致的<sup>[11]</sup>.

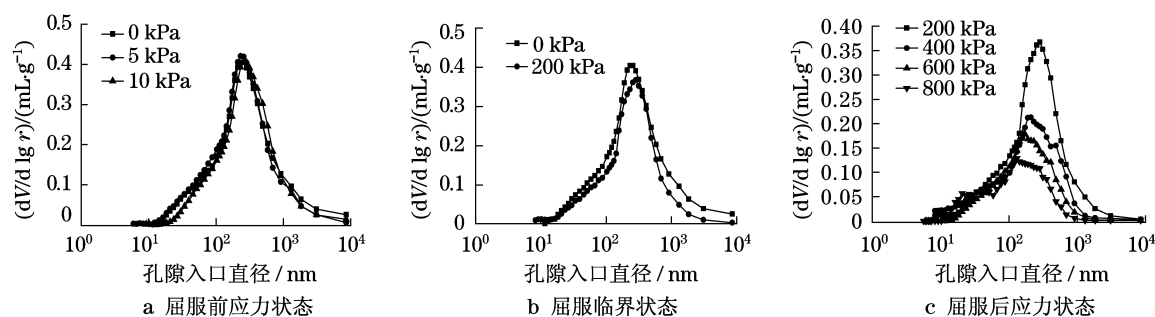


图 1 不同应力状态下孔隙入口孔径分布曲线

Fig.1 Entrance pore size distribution in different states

图 1b 给出了珠海海积软土天然状态下(0 kPa)与加压到临界屈服状态(200 kPa)时试样的孔隙入口孔径分布曲线的比较结果.从图中可以看出,珠海海积软土在加压到临界屈服状态时,土样的孔隙体积与天然状态下的孔隙体积基本相同,但大中孔隙<sup>[7]</sup>( $r > 200$  nm)的含量明显减少,而小孔隙( $20 \text{ nm} < r < 200 \text{ nm}$ )含量则基本不变.这一结果说明土体在外加应力达到临界屈服状态时,土体的微观孔隙内部空间分布发生了变化,即孔隙总体积变化不大,大中孔隙被压碎变成小孔隙.这一微观研究结果与蒋明镜等<sup>[12]</sup>基于宏观性质特性、土的结构破坏的概念是一致的.

图 1c 给出了临界屈服状态 200 kPa 时的孔隙入口孔径分布与处于屈服后应力状态(400, 600, 800 kPa)试样的孔隙入口孔径分布的比较图.由图可见,随着外加应力的增大,其微观孔隙空间体积逐

渐减少,中大孔隙由于在屈服临界阶段已经被压碎,中大孔隙含量变化不大,但小孔隙含量却锐减,主峰的峰值位置也由原来的 232 nm 移动到 800 kPa 时的 135 nm 的位置;同时还发现在 800 kPa 时,孔隙入口孔径分布呈双主峰分布.整体孔隙空间的孔径趋于均匀.

#### 3.2 讨论

自然界中的土是由各种大小不同的颗粒组成的.由于成因类型和形成历史的不同,其性质及性状极其复杂多变.对于黏性土来讲,其中黏粒的含量和黏土矿物成分对土的性质起着决定性的影响.

图 2 给出了加拿大 Regina 黏土在天然状态下、600 kPa 固结后和 2 500 kPa 固结后的孔隙入口孔径分布图,系由文献[13]中的数据整理得出.由图中可以明显看出,2 种黏土在固结前孔隙分布变化都不大,峰值位置基本不变,只是大孔隙含量减少;2 种黏土在

固结后孔隙入口孔径分布都发生了重大变化,峰值位置发生了转移,大孔隙含量明显减少.但 Regina 黏土孔隙分布又具有明显不同于珠海海积软土的特点,首先其孔隙分布为多主峰分布,主峰峰值位置在 5  $\mu\text{m}$  左右,次峰峰值位置分别在 0.1  $\mu\text{m}$  左右和100  $\mu\text{m}$  左右;其次,在 2 500 kPa 固结后,主次峰峰值位置发生了转移,主峰峰值位置由原来 5  $\mu\text{m}$  左右变成了 0.08  $\mu\text{m}$  左右,次峰峰值位置在 10  $\mu\text{m}$  左右,孔径在 1~100  $\mu\text{m}$  间孔隙含量明显减少,表示土体内部结构发生了剧烈变化,孔隙结构进行了重新分布.

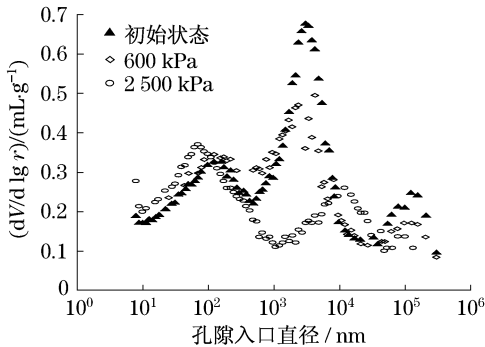


图 2 Regina 黏土在屈服前后应力状态的孔隙入口孔径分布(由文献[13]中的数据整理得出)  
Fig.2 Entrance pore size distribution in pre-yield and post-yield state for Regina clay(re-plotted from the data in reference[13])

为了弄清珠海海积软土和 Regina 黏土孔隙分布差异的原因,本研究对比分析珠海软土和 Regina 黏土的颗粒组成分布和黏土矿物成分(如表 2 和表 3).通过比较可以看出,珠海软土的黏粒含量(质量分数)为 23.0%,明显少于 Regina 黏土的黏粒含量(46.0%),Regina 黏土颗粒更细,具有极大的表面积和带电性,当其与水相遇时,将产生复杂的物理化学变化,就会形成具有胶体分散系的一些特征.此外,珠海软土和 Regina 黏土的矿物成分具有明显的差异,珠海软土黏土矿物成分(质量分数)主要由高岭石(41%~42%)、绿泥石(20%~25%)和伊利石(31%~35%)组成,蒙脱石含量一般小于 5%;而 Regina 黏土矿物成分主要为蒙脱石(28%)和伊利石(29%)组成,高岭石含量很少(10%).

表 2 2 种黏土的颗粒组成分布(质量分数)  
Tab.2 Particle diameter distribution of both clays

土类型	粒径/mm		
	0.074~0.250	0.002~0.074	<0.002
珠海软土	0.070	0.70	0.23
Regina 黏土 <sup>[13]</sup>	0.030	0.51	0.46

表 3 2 种黏土的黏土矿物组成(质量分数)  
Tab.3 Mass percentage of clay

样品	mineral of both clays				%
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	
珠海软土-1	2	31	42	25	
珠海软土-2	4	35	41	20	
Regina 软土 <sup>[13]</sup>	28	29	10		

从前人的研究结果中可以知道,高岭石晶胞之间是氧原子和氢氧根连接,形成氢键,性质较稳定;而蒙脱石 2 层之间是以氧原子与氧原子相连,靠分子间的力(范德华力)相互作用连接,连接力很弱,水分子容易进入晶胞之间,使晶胞距离增大.因而,珠海软土的孔隙分布就形成了以小孔隙为主的单峰分布;而 Regina 黏土孔隙分布就形成了以主峰峰值位置在 5  $\mu\text{m}$  左右,次峰峰值位置分别在 0.1  $\mu\text{m}$  左右和 100  $\mu\text{m}$  左右的多主峰分布.

4 结论

- (1) 珠海天然海积软土的孔隙入口孔径分布为主单峰分布,主峰的峰值位置在 232 nm.
- (2) 当应力水平小于固结屈服应力时,珠海海积软土的孔隙入口孔径分布与应力水平无关,微观结构不随应力水平的增大而改变.
- (3) 当应力水平达到固结屈服应力时,大中孔隙的含量明显减少,而小孔隙含量则基本不变.
- (4) 在屈服后阶段,小孔隙含量锐减,主峰的峰值位置也由原来的 232 nm 移动到 135 nm 的位置,整体孔隙空间的孔径趋于均匀,逐渐趋于重塑土的微观孔隙空间结构,
- (5) 最后,与加拿大 Regina 黏土进行比较,初步分析了珠海海积软土和 Regina 黏土孔隙分布差异的原因是颗粒组成分布和黏土矿物成分的不同.

当然,微观研究的目的是解决宏观问题,即解决工程问题.从本次的研究成果中可以看到,结构屈服前后微观孔隙的峰值位置(即最可几直径)变化最明显;也就是说,最可几直径随固结压力的变化规律可以反映出软土的结构性.因此,下一步的工作重点是从理论上探讨将微观结构参数指标引入到宏观本构模型中.另一方面,在工程应用方面,在软土地基处理过程中,可以通过对施工现场取土进行压汞试验,分析软土地基处理前后的微观孔隙参数指标变化,来判断软土地基处理的效果.

参考文献:

[ 1 ] 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):21.

[ 2 ] Lapierre C, Locat J. Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990 (27):761.

[ 3 ] Delage P, Marcial D, Cui Y J, et al. Ageing effects in a compacted benonite; a microstructure approach [J]. Geotechnique, 2006, 56(5):291.

[ 4 ] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黏土剪切带的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2):102.

JANG Mingjing, SHEN Zhujiang. Microscopic analysis of shear band in structured clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2):102.

[ 5 ] 蒋明镜, 沈珠江, Adachi T, 等. 人工制备湿陷性黄土的微结构分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4):486.

JANG Mingjing, SHEN Zhujiang, Adachi T, et al. Microanalysis on artificially-prepared structured collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4):486.

[ 6 ] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4):573.

LÜ Haibo, WANG Ren, ZHAO Yanlin, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4):573.

[ 7 ] 王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4):496.

WANG Qing, WANG Jianping. A Study on fractal of porosity in the soils [J]. Chinese Journal of Geotechnique Engineering, 2000, 22(4):496.

[ 8 ] Jiang M J, Leroueil S, Konrad J M. Yielding of microstructured geomaterial by DEM analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics:ASCE, 2005, 131(11):1209.

[ 9 ] Jiang M J, Yu H S, Harris D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. Int Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30:723.

[10] Juang C H, Holtz R D. A prebabilistic permeability model and the pore-sized density function[J]. Int Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1986, 10:543.

[11] Hong Z, Tsuchida T. On compression characteristics of ariake clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5):807.

[12] Jiang M J, Hongo T, Fukuda M, et al. Preúfailure behavior of deep-situated osaka clay[J]. China Ocean Engineering, 1998, 12 (4):453.

[13] Simms P H, Yanful E K. Estimation of the soil-water characteristic curve of a clayey till using measured pore-size distributions[M]// T Cassia de Brito GALVÃO. Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. Belo-Horizonte: The International Society For Environmental Geotechnology (ISEG), 2000:246 - 260.

• 下期文章摘要预报 •

具有衬砌的圆形水工隧洞弹塑性应力统一解

张常光, 张庆贺, 赵均海

针对具有衬砌的圆形水工隧洞, 假定衬砌与围岩位移连续, 考虑不同工况下主应力顺序、岩石应变软化和中间主应力等综合影响, 采用统一强度理论和弹脆塑性软化模型, 推导衬砌和围岩弹塑性应力统一解. 选取不同的统一强度理论参数, 可得到一系列应力场公式及塑性区半径与内压力的关系. 通过工程算例分析知, 考虑第一主应力的变化是正确的, 更符合工程实际, 并得出统一强度理论参数、软化特性参数对衬砌和围岩切向应力的影响规律. 研究表明, 统一强度理论参数和软化特性参数对衬砌与围岩塑性区切向应力的影响显著.