

文章编号: 1000-7598(2014)10-2794-07

不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究

张先伟¹, 孔令伟¹, 郭爱国¹, 拓勇飞²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘要: 为探讨结构性土变形的微观机制, 以湛江地区结构性黏土为研究对象, 对原状土和压缩试验后土样进行压汞试验, 分析不同固结压力下土的孔隙分布、孔径大小以及孔隙结构特征参数的变化规律, 辅以 SEM 图像进行孔隙形态的定性分析, 并从分形理论角度对此解释与验证。结果表明, 湛江黏土各孔隙组对外力的敏感度与孔隙体积含量正相关。由于压汞过程存在瓶颈效应以及边-面-角的空间接触形式, 其结果可能会夸大真实小孔隙的分布密度而低估大孔隙的分布密度。结构性对压缩过程中孔隙分布影响较大, 当固结压力增大至结构屈服压力后, 孔径为 0.01~0.50 μm 的孔隙组变化明显, 孔隙的连通性变差, 孔径分布向小孔径范围移动, 孤立式孔隙增多, 大、中孔隙的界限变得不明显。湛江黏土孔隙具有多重分形特征, 据此确定微裂隙、粒间孔隙和孤立孔隙孔径的分界点为 0.01 μm 与 0.50 μm, 同时给出了湛江黏土的孔径界定标准。

关键词: 结构性黏土; 孔隙; 压汞试验; 固结压力; 分形维数

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Experiment study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures

ZHANG Xian-wei¹, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹, TUO Yong-fei²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: Mercury injection test on Zhanjiang natural soft clay and compressed soil is conducted to obtain the microscopic deformation mechanism of structured soft clay. Evolutions of pore distribution, size, and structural characteristic parameters under different consolidation pressures are analyzed; the pore morphology is further quantitatively analyzed by SEM image, which is explained and testified by fractal theory. The results show that, a positive correlation is shown between the sensitivity of each pore size to external forces and pore volume content. The distribution density of the fine pores might be exaggerated while the one of macro pores might be underestimated in mercury injection test for the bottleneck effect. Pore distribution is affected by structure. When consolidation pressure increases to yield pressure, pores of 0.01-0.50 μm are changing obviously, pore connectivity becomes worse, pore size decreases, isolated pores increase, and limits between pore sizes become unobvious. Zhanjiang soft clay has multi-fractal characteristics, the limits for determining micro-pores, interparticle pores and isolated pores are 0.01 μm and 0.50 μm. Pore size division standard is given.

Key words: structural clay; pore; mercury injection test; consolidation pressure; fractal dimension

1 引言

一般来说, 土的结构性是指组成土结构的最基本要素即颗粒和孔隙的大小、形状、排列及它们之间的接触和联结关系的总称。事实表明, 土的工程性状在很大程度上受到其微观结构系统控制, 土体所表现出来的各种变形及强度特性归根结底是其内部结构要素调整和演化的综合反映。孔隙在外力下

的变化是结构要发生变形的重要体现, 因此, 很多研究者通过土体在不同受力条件下孔隙的演化规律以获得土的变形机制, 如房后国等^[1]通过不同固结压力下海积软土的电镜照片, 分析了海积软土在固结过程中微结构的变化特征; 王常明等^[2]通过海积软土宏观力学与微观结构间相互关系, 利用结构因子建立外荷作用下结构演化模式; Griffiths 等^[3]研究了不同种类的黏土在固结的不同阶段中其孔隙尺寸

收稿日期: 2013-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41102200, No. 51179186)。

第一作者简介: 张先伟, 男, 1982年生, 博士, 助理研究员, 主要从事特殊土的力学特性研究工作。E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn

分布情况。目前,对土微观结构形态的研究多采用扫描电子显微镜成像(SEM)试验,得到微观结构的二维图像,难以完全准确地定量描述土体在不同受力环境下的结构差异与变化。而土微观结构的另一种研究方法—压汞试验,能定量测出孔隙分布与大小,具有一定的准确性。对于结构性黏土而言,孔隙分布的变化时土体破坏的一个重要表现形式,探讨孔隙分布与结构强度之间的关系对于理解土体力学性质的变化具有一定的实际意义^[4]。

基于以上原因,本文对湛江地区强结构性原状土和不同固结压力下的压缩试验后土样进行压汞试验,对比分析土体结构变化前后的孔隙分布、孔径大小以及其他孔隙结构特征参数的变化规律,同时辅以 SEM 图片进行直观、定性分析,并从分形理论角度对此进行解释与验证,从而建立与其对应的

宏观力学性质的联系。

2 土样性质与试验方法

2.1 土样性质

以强结构性著称的湛江黏土具有独特的力学性质与工程问题,引起了学术界和工程界的广泛关注^[5-7]。文中选取湛江市某地海岸边深为 7~10 m 的沉积层,通过薄壁取土器钻取得到的原状样,在取样、运输和试验过程中尽量避免对土样的扰动。其黏土物理特性如表 1 所示。由表可见,湛江黏土具有高含水率、大孔隙比、低渗透性、富含黏粒成分,说明湛江黏土是一种高灵敏、具有较强结构性的土,力学性质优于一般软土。但不同于其他地区软土的是其含水率低于液限,无侧限抗压强度达 150 kPa,结构屈服应力达到 400~600 kPa。

表 1 湛江黏土基本物理力学性质指标平均值与颗粒组成

Table 1 Physico-mechanical average indexes and grain size distribution of Zhanjiang soft clay

重度 γ (kN/cm ³)	含水率 w/%	孔隙比 e	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	塑性 指数 I_p /%	竖向渗透系 数 $K \times 10^{-8}$ (cm/s)	无侧限抗 压强度 (kPa)	灵敏度	结构屈服应 力 σ_k /kPa	颗粒组成/%			
										>0.05 /mm	0.005~0.05 /mm	0.002~0.005 /mm	<0.002 /mm
17.7	48.6	1.4	60.0	23.0	38.0	1.64	150	5~7	400~600	15	36	23	26

2.2 试验仪器与方法

采用高压固结仪进行固结压缩试验,土样面积为 32.2 cm²,高为 2 cm。让试样在不同固结压力(最大压力为 200、400、600、1 000、1 200 kPa)进行固结试验,采用慢速固结稳定的方法^[8],待变形稳定后,24 h 内卸载,待土样变形完全稳定后将土样取出,为了使土样达到既干燥又不变形保持原始结构形态的目的,采用真空冷冻升华干燥法进行制样,具体方法见文献[9]。制备好的样品用于压汞试验和 SEM 试验。压汞试验采用美国麦克公司生产的 9310 型微孔结构分析仪,其测定的孔径范围为 0.006~300 μm ; SEM 试验仪器为英国剑桥仪器公司生产的 S-250MK III 型扫描电子显微镜。

3 压汞试验结果分析

3.1 压汞试验原理

压汞试验测定土中孔隙分布依据是非浸润性液体在没有压力作用时不会流入固体孔隙,圆柱形孔隙注入液体所需压力大小根据 Washburn 公式:

$$P_m = -2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

式中: P_m 为施加的压力; σ 为导入液体的表面张力,本次试验取 485.00 dyn/cm; θ 为导入液体与固体材

料的接触角,本次试验取 140°; r 为圆柱形孔隙半径。从压汞试验得到压力与汞压入的体积关系,利用 Washburn 方程,通过压力 P_m 找到对应的当量直径 d ,由此可转换得到土中孔隙分布、比表面积、孔隙度以及临界孔径、最可几孔径等孔隙特征参数,如表 2 所示。

3.2 进出汞曲线

图 1 为原状土的进出汞体积随压力关系曲线,其中 $1 \text{ PSI} = 6.895 \text{ kPa}$,可见,进汞曲线两端平缓,中间陡峭,退汞曲线呈现随压力减小出汞体积线性减小。在一定压力范围内,进-出汞曲线并不重合,说明一些汞永久性地残留在土孔隙中。事实上,出汞曲线与进汞曲线的路径并不一致,对于某一给定的压力值,出汞曲线对应的体积值比进汞曲线上的体积值要大^[10]。

图 2 为进汞体积增量及其百分比随压力关系,同样可见,随着进汞压力增大,进汞体积增量具有阶段性变化。开始阶段进汞体积速率缓慢,达到某一门槛压力值时(图 2 对应压力为 2 067 kPa,对应孔径为 0.7 μm),开始迅速增大并达到峰值(对应孔压为 5 500 kPa,对应孔径为 0.3 μm ,峰值大小为 0.092 cm³/g),然后迅速变缓,此后即使压力明显增加,孔隙体积增长也较缓慢。产生这种现象的原因

主要是强结构性软土存在着墨水瓶型孔隙，导致当汞压入窄小孔隙时有瓶颈效应。此外，由于湛江黏土的孔隙结构是由不同形状、大小不一的孔联结而形成的一种网格，因其边-面-角的空间接触形式的絮凝结构导致孔隙内部孔径尺寸是分布不均匀的，进而将其概化为由窄道或细颈、宽通道、空腔等孔

隙交叉联结形成的三维孔隙网络。当汞要进入相应有一定进汞压力的孔隙，必须先通过相应有更高进汞压力的孔口；而退汞时，与进攻路径明显不同，是与不同孔径组相联系的，造成退汞时连续的汞线条出现断裂，在许多空腔中截留下汞小球，进而产生退汞曲线的滞后效应。

表 2 不同固结压力下孔隙结构特征参数

Table 2 Characteristic parameters of pore structure of soft clay in different consolidation pressures

固结压力 /kPa	总孔隙体积 /(cm ³ /g)	孔隙率 /%	比表面积 /(m ² /g)	最可几孔径 /μm	临界孔径 /μm	平均孔径 /μm	孔隙体积分布/(cm ³ /g) (孔隙体积百分含量/%)			
							大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
							d>10 μm	1 μm<d<10 μm	0.1 μm<d<1 μm	d<0.1 μm
原状样	0.437 9	59.99	16.618	1.0	0.016 5	0.105 4	0.020 4 (4.7)	0.021 6 (4.9)	0.318 7 (72.8)	0.077 2 (17.6)
200	0.387 9	59.41	11.177	1.1	0.015 3	0.138 8	0.035 3 (9.1)	0.103 5 (26.7)	0.197 4 (50.9)	0.051 7 (13.3)
400	0.359 2	57.65	10.699	1.1	0.014 4	0.134 3	0.014 8 (4.1)	0.098 9 (27.5)	0.196 0 (54.6)	0.049 5 (13.8)
600	0.441 7	53.10	18.736	0.3	0.009 6	0.094 3	0.032 3 (7.3)	0.004 8 (1.1)	0.318 4 (72.1)	0.086 2 (19.5)
1 000	0.475 3	52.10	18.527	0.3	0.009 0	0.102 6	0.056 6 (11.9)	0.004 3 (0.9)	0.326 8 (68.8)	0.087 6 (18.4)
1 200	0.377 0	48.48	16.542	0.3	0.008 6	0.109 4	0.052 2 (13.8)	0.022 6 (6.0)	0.229 5 (60.9)	0.072 7 (19.3)

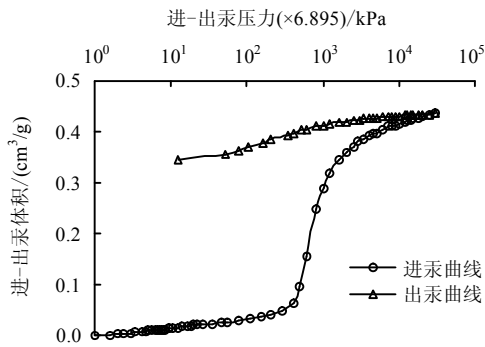


图 1 进-出汞体积与压力关系曲线

Fig.1 Relations between volume of intrusion (extrusion) and pressure of mercury intrusion

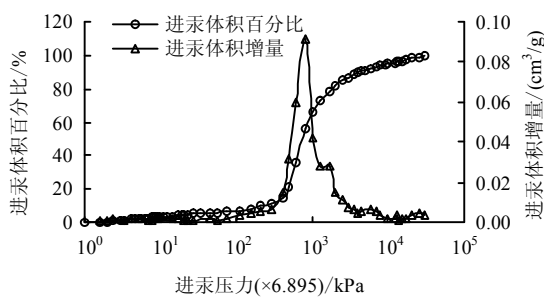


图 2 进汞体积增量及其百分比随压力关系

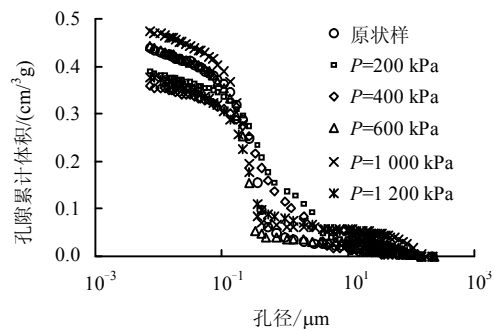
Fig.2 Relations between volume increment (percent) and pressure of mercury intrusion

3.3 孔隙分布曲线

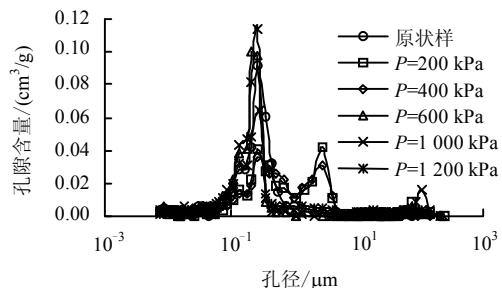
绘制不同固结压力下孔隙的分布曲线和各类孔隙随压力的变化情况如图 3、4 所示。

由于孔隙分布曲线可直观、定量表示出孔隙的构成分布情况。一些研究者据此得到了孔径的划分界限。压汞试验中，国际上定义孔径 $d > 0.05 \mu\text{m}$ 为大孔隙， $0.002 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 为中孔隙， $< 0.002 \mu\text{m}$ 为微

孔隙^[10]。王清等^[11]根据黄土孔隙分布曲线及分形理论，确定微、小、大孔隙界限，依据 $0.02 \mu\text{m}$ 、 $0.80 \mu\text{m}$ 两个孔径节点来划分。雷华阳等^[4]认为，结构性软土在交通荷载作用下的孔径划分界限为 $0.01 \mu\text{m}$ 、 $0.50 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 。本文为了分析方便，结合图 3 结果，将湛江黏土孔隙分为以下几类：大孔隙，孔径 $d > 10.0 \mu\text{m}$ ；中孔隙， $1.0 \mu\text{m} < d < 10.0 \mu\text{m}$ ；小孔隙， $0.1 \mu\text{m} < d < 1.0 \mu\text{m}$ ；微孔隙， $d < 0.1 \mu\text{m}$ 。按此划分标准将不同固结压力下孔隙分布结果汇于表 2。



(a) 不同孔径的孔隙累计分布曲线



(b) 孔隙含量分布曲线

图 3 不同固结压力下土样孔径分布曲线
Fig.3 Pore size distribution curves in different consolidation pressures

从图 3、4 可见，湛江天然黏土孔隙分布在 1.0~0.1 μm 的孔隙组分占有绝对优势，孔隙体积占总孔隙体积的 73%。在变形初期，微孔隙主要由孔径为 1.0~0.1 μm 的小孔隙组成，体积百分比达 51%，在 $P < 400$ kPa 以内，各孔径组分变化并不明显。当 $P > \sigma_k$ (屈服应力) 后，小孔隙组含量剧增至 72%，而后随着压应力的增大呈降低趋势。分析还发现，当 1.0~0.1 μm 的孔隙组分剧升时，似乎作为代偿，孔径 < 0.1 μm 的微孔隙体积同时下降至一低值而后趋于稳定。这说明在外力作用下，孔径的变化对于每个孔隙组并非机会均等，仅是部分孔隙作出相应的调整，这种调整使原有的粒径分配形式被打破，代之以新的、与对应压力相适应的结构形态。

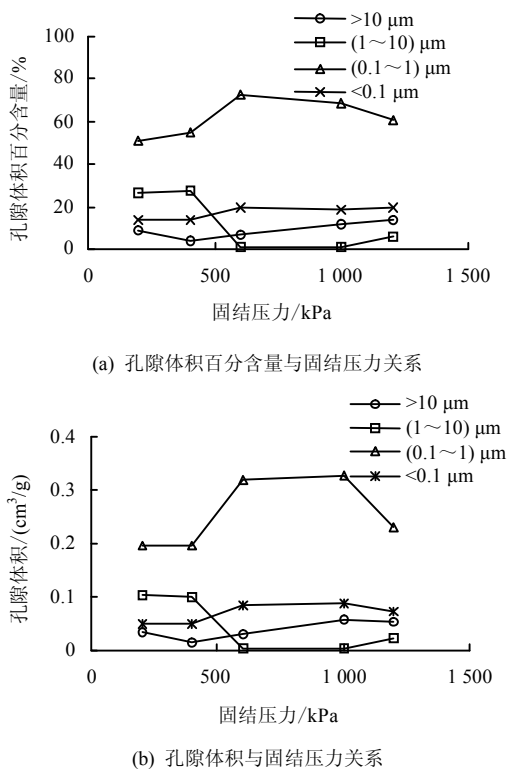


图 4 不同固结压力下土样的各类孔隙随压力变化
Fig.4 Relations between pore size distribution and pressure in different consolidation pressures

进一步分析发现，各孔隙组对外加应力的敏感性与孔隙体积含量正相关，也就是说，孔径 $d=1.0\sim 0.1$ μm 的孔隙组分体积含量高，则该孔径组分在外加应力下优先结构调整。这与以往认为的土体结构破损中总是大孔隙改变的说法不同，这可能缘于随着压力的增大，导致土中的大孔隙主要是集聚体内孤立孔隙，形成墨水瓶型孔隙，压汞过程中存在瓶颈效应，致使根据压汞试验测试的孔隙分布结果夸大了真实小孔隙的分布密度，而低估了真实大孔隙

的分布密度。因此，为了获得土中孔隙的真实形态，还需通过 SEM 试验加以辅助分析。

3.4 比表面积变化规律

通过压汞试验还可获得孔隙的比表面积分布情况，如图 5 所示。开始阶段进汞压力较小时，累计比表面积增长速率较大，压力达到某一值时逐渐减缓。分析还发现，大固结压力作用下土样为获得相同累计比表面积，需要的进汞压力要远小于小固结压力作用下土样，说明固结压力增大，孔隙率逐渐减小，需进汞压力较大，所得总孔隙表面积也增大。同样结论从图 6 中也可获得，当孔径 $d < 0.3$ μm 时，累计比表面积变化受固结压力影响较大。如 $P=200$ kPa 作用下，获得累计比表面积为 10 m²/g 需要孔径 $d < 0.1$ μm 的孔隙累加得到；而 $P=1\ 200$ kPa 作用下，为获得相同累计比表面积需要 $d < 0.03$ μm 的孔隙累加得到。但当孔径 $d > 0.3$ μm 时，累计比表面积变化受固结压力影响不大。

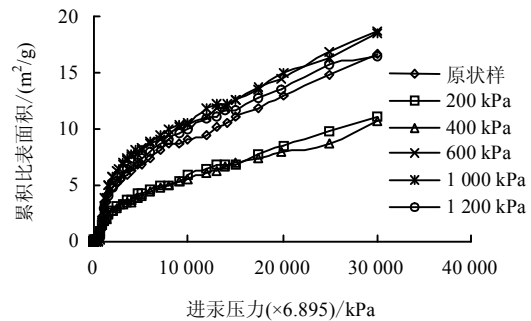


图 5 不同固结压力下累计比表面积与进汞压力关系
Fig.5 Relations between specific surface of accumulation and pressure of mercury intrusion in different consolidation pressures

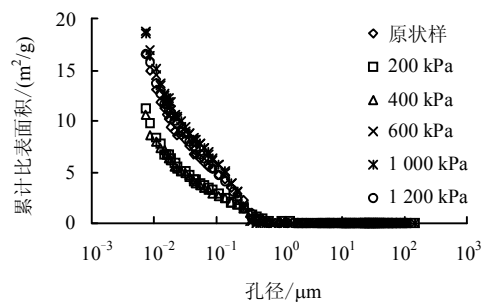


图 6 不同固结压力下累计比表面积与孔径关系
Fig.6 Relations between specific surface of accumulation and pores diameter in different consolidation pressures

此外还发现，以 $P = \sigma_k$ 为界，不同固结压力下试样的累计比表面积变化规律明显不同。图 5、6 中， $P=200、400$ kPa 曲线形状基本一致，但明显异于 $P=600、1\ 000、1\ 200$ kPa，表明湛江软土结构被

破坏后，孔隙分布情况发生明显变化。

3.5 其他孔隙特征参数

最可几孔径和临界孔径的概念能较好地反映黏土中孔隙连通性和孔径分布。微分曲线 ($dV/dd-d$ 曲线, 见图 7) 与横轴包围的面积表示总孔隙体积, 在一定孔径范围内, 曲线峰值对应的孔径即为最可几孔径, 它表示为土中小于该孔径则不能形成连通的孔道, 亦即为出现几率最大的孔径^[12]。临界孔径是将较大孔隙连通起来的各孔的最大孔级, 即图 3 (a) 中开始大量增加孔隙体积对应的孔径。得到不同固结压力下的孔隙特征参数, 见表 2 和图 8。

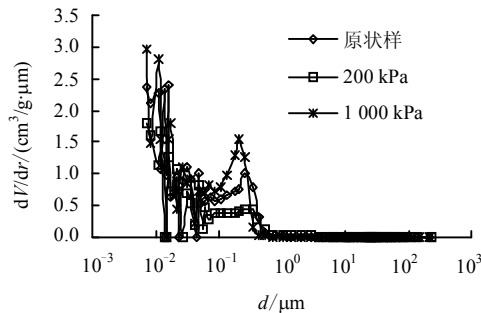


图 7 不同固结压力下孔径分布微分曲线
Fig.7 Pore size distribution differential curves in different consolidation pressures

从图 8 可见, 当 $P > \sigma_k$ 后, 最可几孔径和临界孔径迅速变小。最可几孔径和临界孔径在 $P < \sigma_k$ 前的平均值是 $P > \sigma_k$ 后的平均值的 1.6 倍和 3 倍左右。说明随着固结压力的增大, 特别是 $P > \sigma_k$ 后, 随着结构强度丧失, 颗粒的逐渐破损, 微观结构孔隙的连通性变差, 孔径分布向小孔径范围移动, 这也导致土中孤立式孔隙增多, 压汞过程中瓶颈效应更加明显。

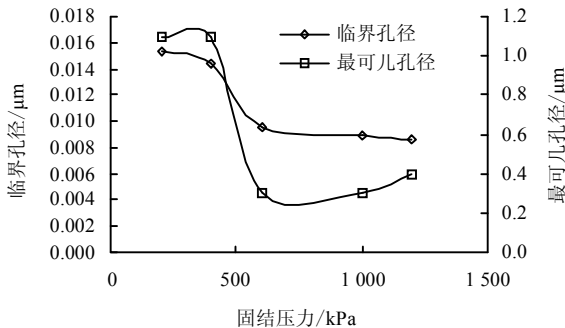


图 8 不同固结压力下孔隙特征参数
Fig.8 Characteristic parameters of pore in different consolidation pressures

4 SEM 试验结果分析

为了直观观察孔隙形态, 下面对原状样和不同

固结压力下土样的 SEM 进行定性分析, 如图 9 所示。

湛江天然黏土为开放式絮凝结构, 结构单元体成架空形式, 排列松散, 无明显定量排列。颗粒显示为杂乱堆积, 多以点-点、边-边及边-面接触。孔隙发育明显且孔隙尺寸较大, 存在形式主要是孔隙直径大, 分布不连续的孤立孔隙; 分布较广, 性状复杂的粒间孔隙; 黏土矿物晶层或晶体间的微小孔隙或微裂隙。

湛江黏土在压缩过程中, 随着固结压力的增大, 颗粒的接触关系逐渐过渡至面-面镶嵌的稳定及亚稳定状态, 颗粒排列趋向有序性。孔隙大小趋向均一化, 形状从原状土的多边形演变到稳定状的三角形和扁圆形。结构性土的土粒间力宏观表现为结构屈服应力 σ_k , 较原状土和低固结压力作用下的空架结构, 当 $P > \sigma_k$ 后, 结构主要变为封闭式片架-镶嵌结构, 结构中存在大量孤立孔隙, 连通性较差, 这与根据压汞试验分析结果是一致的。

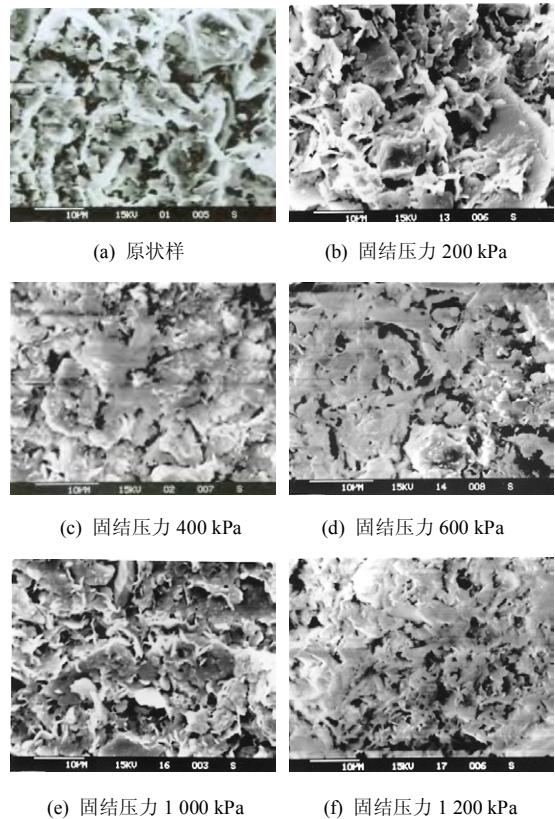


图 9 天然黏土与不同固结压力下土样 SEM 图像
Fig.9 SEM photographs of primary soft clay sample and soil sample in different consolidation pressures

5 不同固结压力下孔隙的分维描述

5.1 土的孔隙分布的分形特征

由于土的孔隙的复杂性, 用传统的几何学法难

以准确描述孔隙分布情况。鉴于介质孔隙结构具有分形特征，可用分形几何来描述其孔隙分布特征。

设土孔径大于 d 的孔隙数目为 $N(\geq d)$ ，若

$$N(\geq d) = \int_d^\infty (d') dd' \propto d^{-D} \quad (2)$$

式中： D 为分形维数； $J(d')$ 为孔径 d' 的分布密度函数。

设 $V(d)$ 为孔径小于 d 的孔隙体积， V 为孔隙的总体积，若 $dV(d) \propto dNd^3$ ，故

$$d^{b-1} dd \propto d^{-D-1} r^3 dd \quad (3)$$

所以维数 $D=3-b$ 。绘制 $V(d)$ 与 d 的双对数曲线，根据其直线段斜率 k 可得到相应分维 $D^{[4, 13]}$ 。不同固结压力下孔隙的分形曲线见图 10。

为了便于分析，根据图 10 中曲线弯折情况将分形曲线划分为 4 个阶段（见表 3），从图 10 与表 3 可见，孔隙分形曲线在双对数坐标下具有良好线性关系，相关系数普遍在 0.93 以上，孔径在 $d>0.5 \mu\text{m}$ 这一范围内的孔隙对土的物理力学性质起主导作用，计算得到分维 $D=2\sim 3$ 。从图中还可见，在孔径 $d=0.01 \mu\text{m}$ 、 $0.50 \mu\text{m}$ 处分形曲线有明显拐点，说明湛江软土的孔隙结构具有多重分形特征，一些研究也表明，某些天然软黏土的微观孔隙都有多重分形特征^[4, 11, 13]。可以认为，分形曲线拐点对应的孔径是一个标度界限，即土中孔隙在不同层次上的特征反映，结合压汞试验和 SEM 结果分析，从孔隙存在形式来说可认为 $d=0.01 \mu\text{m}$ 、 $0.50 \mu\text{m}$ 是微小孔隙或微裂隙、粒间孔隙和孤立孔隙的分界点。因此，对前面已给出的孔径划分界限重新定义：大孔隙，孔径 $d>8.0 \mu\text{m}$ ；中孔隙， $0.5 \mu\text{m}<d<8.0 \mu\text{m}$ ；小孔隙， $0.01 \mu\text{m}<d<0.50 \mu\text{m}$ ；微孔隙， $d<0.01 \mu\text{m}$ 。前面提出的划分标准是根据前人资料统计定性得到的，而后者是在大量的试验资料基础上，通过先进的计算方法处理后定量得到的，更具有一定的科学依据。

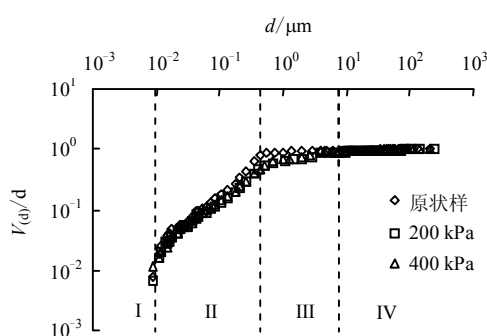
分析图 10 可知，湛江黏土的分形曲线随着孔径的增大，曲线斜率逐渐变小，且当 $P>\sigma_k$ 后（见图 10 (b)），直线段 III 与直线段 IV 的曲线斜率趋于一致，说明固结压力较大时，大孔隙与中孔隙的界限变得不明显，孔隙分布趋于一致。从表 3 和图 10 可见，不同固结压力下，直线段 II 的曲线斜率变化最明显，即孔径范围在 $0.01 \mu\text{m}\sim 0.5 \mu\text{m}$ 的孔隙变化较大，这与压汞试验结果是基本吻合的。此外，以 $P=\sigma_k$ 为界，不同固结压力下分形曲线斜率明显不同，直线段 II 和直线段 III 的曲线表现最明显，

这也表明结构特性对压缩过程中孔隙分布演化影响很大。

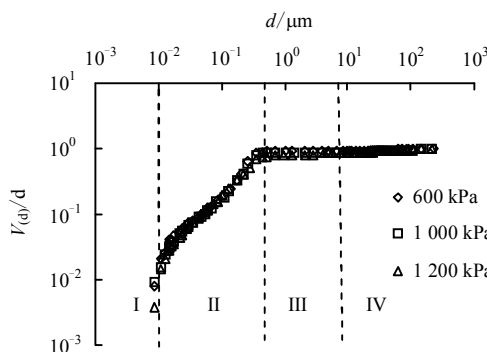
表 3 不同固结压力下各类孔径分维数

Table 3 Fractal dimensions of different types of pore size in different consolidation pressures

固结压力 /kPa	分维值			
	直线段 I $d<0.01 \mu\text{m}$	直线段 II $0.01 \mu\text{m}<d<0.5 \mu\text{m}$	直线段 III $0.5 \mu\text{m}<d<8 \mu\text{m}$	直线段 IV $d>8 \mu\text{m}$
原状样	-2.048 0	1.287 1	2.993 0	2.999 8
200	-1.344 5	1.924 0	2.967 4	2.999 7
400	-1.366 1	1.926 2	2.967 0	2.999 8
600	-1.345 9	0.787 2	2.998 9	2.999 5
1 000	-1.265 4	0.899 7	2.999 7	2.999 3
1 200	-1.209 7	1.179 9	2.997 8	2.999 3



(a) 原状样与固结压力 200 kPa、400 kPa 下的固结土样



(b) 固结压力 600 kPa、1 000 kPa、1 200 kPa 下的固结土样

图 10 不同固结压力下孔隙的分形曲线
Fig.10 Fractal curves of pores in different consolidation pressure

6 结 论

(1) 湛江黏土各类孔隙对外力的敏感度与孔隙体积含量正相关。由于含有墨水瓶型孔隙，压汞过程中存在瓶颈效应以及边-面-角的空间接触形式，可能导致压汞试验结果夸大了真实小孔隙的分布密度，而低估了真实大孔隙的分布密度。

(2) 湛江黏土为开放式絮凝结构，孔隙以孤立孔隙、粒间孔隙和微裂隙形式存在。颗粒定向排列无序，接触形式多为点-点、边-边及边-面接触。压

缩过程中,形式逐渐变为面-面接触的封闭式片架-镶嵌结构,颗粒排列变得有序。

(3) 结构性对湛江黏土压缩过程中孔隙的变化影响较大。在 $P < \sigma_k$ 前,各孔径组分变化甚微。当 $P > \sigma_k$ 后,孔径为 $0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 的孔隙组变化明显,孔隙的连通性变差,孔径分布向小孔径范围移动,孤立式孔隙增多,大孔隙与中孔隙的界限变得不明显。

(4) 湛江软土微观孔隙具有多重分形特征,孔径 $d=0.01 \mu\text{m}$ 、 $0.50 \mu\text{m}$ 是微裂隙、粒间孔隙和孤立孔隙的分界点,并由此定义了湛江结构性黏土孔隙的划分界限。

参 考 文 献

- [1] 房后国, 刘娉慧, 袁志刚. 海积软土固结过程中微观结构变化特征分析[J]. 水文地质与工程地质, 2007, 2: 49—56.
FANG Hou-guo, LIU Ping-hui, YUAN Zhi-gang. Analysis of characteristics of microstructure change during marine soft soil consolidation[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2007, 2: 49—56.
- [2] 王常明, 肖树芳, 夏玉斌. 海积软土固结变形的结构性模型研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(4): 363—367.
WANG Chang-ming, XIAO Shu-fang, XIA Yu-bin. Research on structured model of consolidation of marine soft soil[J]. **Journal of Changchun University of Science and Technology**, 2001, 31(4): 363—367.
- [3] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Changes in pore size distribution due to consolidation of clays[J]. **Geotechnique**, 1989, 39: 159—167.
- [4] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土的孔径分布试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 6—11.
LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Pore size distribution test of structural soft Soil under traffic loading[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2009, 22(2): 6—11.
- [5] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82—88.
KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of a structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (9): 82—88.
- [6] 张先伟, 孔令伟, 王静. 针对黏性土胶质联结特征的 SEM-EDS 试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 195—203.
ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, WANG Jing. Experimental study of SEM-EDS for cementation bond characteristics of Zhanjiang clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp. 2): 195—203.
- [7] 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, 34(增刊 2): 134—142.
ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp. 2): 134—142.
- [8] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [9] 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—498.
WANG Qing, WANG Jian-ping. A Study on fractal of porosity in the soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(4): 496—498.
- [10] 唐益群, 赵书凯, 杨坪, 等. 饱和软黏土在地铁荷载作用下微结构定量化研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 98—103.
TANG Yi-qun, ZHAO Shu-kai, YANG Ping, et al. Quantitative analysis of the microscopic behavior of saturated soft clays under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(8): 98—103.
- [11] KONG L W, LUO H X, TAN L R. Fractal study on pore space distribution of red clay in China[C]//Proc.10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: International Academic Publishers, 1995: 139—142.
- [12] 尹红宇. 混凝土孔结构的分形特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [13] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3): 127—130.
LIU Song-yu, ZHANG Ji-wen. Fractal approach to measuring soil porosity[J]. **Journal of Southeast University**, 1997, 27(3): 127—130.