

基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中 微观孔隙的变化规律

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, 湖北 武汉 430071;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 为探求土体在变形过程中微结构形态的演化规律, 对湛江结构性黏土进行室内压缩试验, 通过真空冷冻升华干燥法对天然土和压缩后土制样, 进行扫描电子显微镜扫描试验和压汞试验, 基于灰度计算土的三维孔隙率, 分析压缩过程中微观孔隙的变化规律。结果表明, 较二值化处理获得的二维孔隙率, 三维孔隙率物理意义明确, 求取方法简单, 有较高准确性。湛江天然黏土孔径为 1.0~0.1 μm 的小孔隙组占优, 其孔隙体积占总孔隙体积的 73%。压缩过程中, $P > \sigma_k$ 前, 各孔径组分变化甚微。 $P > \sigma_k$ 后, 随压力的增大, 小孔隙含量表现为先增加后降低。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, 其结果可能会夸大小孔隙的分布密度而低估大孔隙的分布密度。结构性黏土压缩过程中微结构形态的演化可分为结构微调、结构破损、结构固化 3 个阶段。该研究有助于深入了解土的变形机制, 为结构性土的工程设计提供科学的依据。

关键词: 土力学; 结构性黏土; 扫描电子显微镜试验; 压汞试验; 结构屈服压力; 微观孔隙; 孔隙率

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)02 - 0406 - 07

EVOLUTION OF MICROSCOPIC PORE OF STRUCTURED CLAY IN COMPRESSION PROCESS BASED ON SEM AND MIP TEST

ZHANG Xianwei¹, KONG Lingwei¹, GUO Aiguo¹, TUO Yongfei²

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

Abstract: Compression tests for structured clay in Zhanjiang were conducted to obtain the evolution of soil microstructure in deformation process. Natural soil samples and soil samples after compression tests were prepared for SEM and MIP tests by lyophilization. Three-dimensional porosity was calculated based on gray scale, the evolution of microscopic pores in compression process was qualitatively and quantitatively analyzed. The results show that, compared with two-dimensional porosity based on binary image, the three-dimensional porosity has advantages of explicit physical significance, simple calculation method and high accuracy. Pores with diameters of 1.0 - 0.1 μm were dominant in natural clay, whose volume took up 73% of total pore volume. When $P < \sigma_k$, each pore size changed little. When $P > \sigma_k$, fine pore content firstly increased, subsequently decreased with the increase of the pressure. In the compression process, a positive correlation between the sensitivity of each pore size to external forces and pore volume content was found. The distribution density of the fine pores might be exaggerated while the one of macro-pores might be underestimated in MIP for the bottleneck effect during MIP test. The evolution of microstructure of structured clay in the compression process might be divided into three stages: fine tuning stage, damage stage and solidification stage. The study is helpful for good understanding of deformation

收稿日期: 2011 - 07 - 08; **修回日期:** 2011 - 08 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179186, 41102200); 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前沿探索性项目(SKLQ002)

作者简介: 张先伟(1982 -), 男, 2010 年于吉林大学建设工程学院地质灾害防治工程专业获博士学位, 现任助理研究员, 主要从事特殊土力学方面的研究工作。E-mail: zhangxianwei414@163.com

mechanism of soil, and provides a scientific basis for engineering design of structured clay.

Key words: soil mechanics; structured clay; scanning electron microscopy(SEM) test; mercury injection test(MIP); structure yield pressure; microscopic pore; porosity

1 引言

土体在受力条件下产生的变形是结构连结、颗粒和孔隙等要素变形的综合结果, 孔隙的变化是结构要发生变形的重要体现。孔隙率是土微观结构定量分析的一个重要参数, 孔隙率的变化直接反应土体产生形变的情况, 在工程上就是直接反应土体沉降的内在因素^[1]。因此, 研究土在压缩过程中的微观孔隙变化规律, 不仅可以解释宏观工程现象, 还可以掌握土的变形原理, 进而获取表述合理的本构关系。

土的微孔隙研究中使用最广泛的手段之一即扫描电子显微镜(SEM)试验和压汞(MIP)试验, 很多研究者采用这种方法对压缩条件下微孔隙变化进行了分析, 如: 张季如等^[2]对比较黏土固结前后的 SEM 照片, 研究软黏土固结过程中微孔隙的大小、数量及其分布的演化规律; 房后国等^[3]根据不同固结压力下海积软土所得的 SEM 照片, 分析了海积软土在固结过程中微孔隙的变化特征; F. J. Griffiths 与 R. C. Joshi^[4]研究了不同种类的黏土在固结的不同阶段中其孔隙尺寸分布情况; C. Lapierre 等^[5]根据 MIP 试验得到原状土和重塑土不同的固结压力下孔隙分布和渗透系数的数学表述; 孔令荣等^[6]的研究表明, MIP 试验得到的孔隙比与单轴卸载回弹后得到的孔隙比较接近, 证明了压汞法研究黏土的孔隙分布的有效性。虽然 2 种方法对分析土的微孔隙特征方面具有一定的优势, 但 MIP 法无法直接观察孔隙的形态特征, 需结合 SEM 照片分析才能获得准确结果; 通过 SEM 图像进行微结构研究多是二维的定性与定量分析, 得到的孔隙率不能真实反映实际情况。

本文以湛江地区结构性黏土为研究对象, 对原状样和压缩试验后试样进行 SEM 和 MIP 试验, 采用 SEM 图像的灰度值计算土的三维孔隙率, 综合分析 2 种试验结果, 探讨土体在变形过程中微结构形态的演化规律。

2 土样性质与试验方法

2.1 土样性质

试样取自湛江市某地海岸边沉积层, 埋深 7~10 m, 高质量的原状样通过固定活塞的薄壁取土器钻取所得。其基本物理力学性质指标、物理化学成分及颗粒成分如表 1, 2 所示, 由表可见, 湛江黏土具有高含水率、大孔隙比的特点, 黏粒成分含量达 49%, 黏土矿物含量达 60%, 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。湛江黏土异于其他地区软土的是其含水率低于液限, 结构屈服应力达到 400~600 kPa, 原状土的无侧限抗压强度达 150 kPa^[7]。

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 32.2 cm², 高 2 cm。让试样在不同固结压力(最大压力分别为 200, 400, 600, 1 000 和 1 200 kPa)进行分级加载的固结试验, 采用慢速固结稳定的方法^[8], 待变形稳定后进行分级卸载, 24 h 后土样变形完全稳定后, 将土样取出, 采用真空冷冻升华干燥法进行制样^[9-10]。首先将试验试样用细钢锯切成 1.0 cm×1.0 cm×1.0 cm 左右的土块, 将其在液氮(沸点为 -196 ℃)中快速冷冻 15 min, 使土中液体成为不具膨胀性的非结晶态冰, 然后在 -50 ℃ 状态下用英国制造的爱德华冷干机(Edwards freeze dryer)抽真空 8 h 以上使土中非结晶的冰升华, 从而达到土样既干

表 1 湛江黏土基本物理力学性质指标平均值

Table 1 Average values of basic physico-mechanical indexes of Zhanjiang clay

容重 γ / ($\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3}$)	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 /(10^{-8} $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	无侧限抗 压强度 q_u /kPa	灵敏 度 S_t	结构屈服 应力 σ_k /kPa	颗粒组成/%			
										>0.05 mm	0.005~0.050 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

表2 湛江黏土的物理化学分析结果与矿物组成
Table 2 Physicochemical analysis results and mineral compositions of Zhanjiang clay

pH值	易溶盐含量/%	有机质含量/%	矿物组成/%				
			绿泥石	高岭石	伊利石	石英	长石
5.20	0.504	1.06	25	10	25	35	5

燥又不变形保持原始结构形态的目的, 一般情况下, 处理后的土样非常疏松, 观察表面处理只需用吸球轻轻将浮土吹走即可。制备的样品用于 SEM 试验和 MIP 试验。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, MIP 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 。

3 压缩过程中结构变化的定性描述

本研究是在获取大量扫描图片的基础上, 对每个样品均选取代表性的视野 6 幅, 如图 1 所示, 图 1(b)~(f)是在不同固结压力 P 作用下, 压缩试验过程中土样的 SEM 照片。从中可见, 湛江原状黏土含有大量黏土矿物聚集体, 主要是书卷状的高岭石、片状的伊利石、花团状的绿泥石, 一般都由几种矿物共生集聚, 局部发现有黄铁矿颗粒附着, 构成湛江黏土的基本组构单元。湛江黏土为开放式絮凝结构, 基本单元体之间架空, 接触点数目较少, 孔隙发育且孔隙尺寸较大, 构成十分松散的骨架, 无定向排列。颗粒显示为杂乱堆积, 多以点-点、边-边及边-面接触。孔隙的存在空间形式主要是孤立孔隙与粒间孔隙。其中孤立孔隙直径较大, 分布不连续, 多呈圆形或椭圆形展布, 该类孔隙多出现于原状土中, 这类孔隙的无连通性可以解释湛江黏土低渗透性的特征。

比较原状土和压缩过程中土样的 SEM 图像可知, 压缩过程中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, 颗粒排列表现出良好的定向性。孔隙形状从原状土的多边形演变到稳定状的三角形和扁圆形, 孔隙大小趋向均一化。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, 导致结构性的丧失, 土性趋于重塑土。为了进一步分析压缩过程中微观结构的变化规律, 还需进行定性分析。

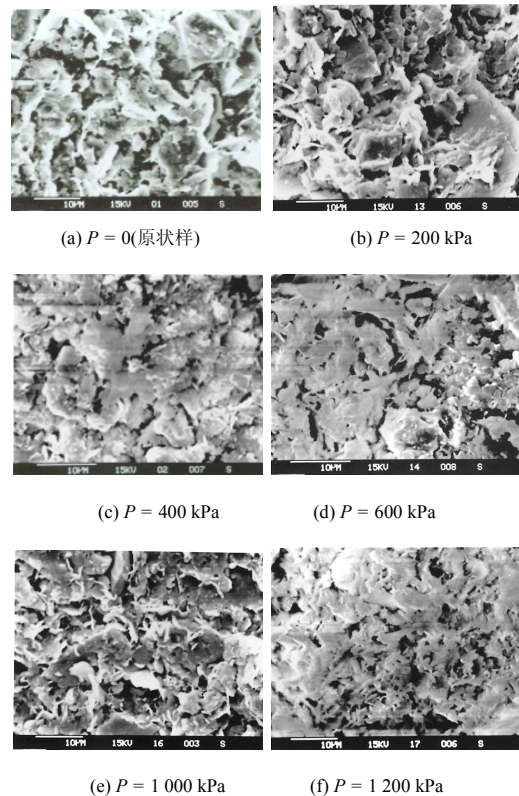


图 1 天然黏土与压缩过程中土样 SEM 图像
Fig.1 SEM photographs of natural clay sample and in process of compression soil samples

4 压缩过程中孔隙率的变化规律

4.1 二维孔隙率计算与缺点

土的微结构图像由颗粒与孔隙组成, 一般认为浅色区域为颗粒, 深色区域为孔隙。目前国内工程界求取孔隙率的方法多是根据图像灰度直方图, 人为地选取一个阈值 T , 对图像进行二值化处理, 然后将原图中阈值低于 T 的像素灰度值为 0, 否则为 1^[11-14]。然后将二值化图像中数值为 0 的当作孔隙, 数值为 1 的当作颗粒, 以像素为单位, 根据数值 0 或 1 在二值化图像中所占的个数即可获得二值化孔隙率, 由于它是根据二维图像所得, 有的人也称之为表观孔隙率 $V^{[11]}$, 可表示如下:

$$V = \frac{S_0}{S_0 + S_1} \quad (1)$$

式中: S_0 为数值为 0 的像素个数, S_1 为数值为 1 的像素个数。

但是该方法中阈值 T 的选取具有不确定性, 缺乏确定标准。图 2 为对图 1(a)采用不同阈值 T 处理得到的二值化图像。对于同一幅图片, 阈值选的越

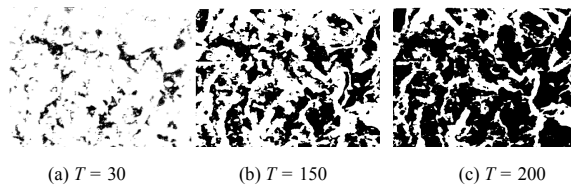


图 2 不同阈值条件下微观结构的形态特征

Fig.2 Morphological characters of soil microstructure at different threshold values

大，黑色区域面积越大，原本代表颗粒的像素点可能被误认为颗粒，得到的孔隙率越大。这也说明该方法难以保证数据的科学性与精确性。

4.2 三维孔隙率的计算方法

在数字图像中，土的 SEM 图像由像素组成，每一个像素对应一个灰度。灰度的范围为 0~255，表示亮度从深到浅，对应图像中的颜色为从黑到白。图像的灰度可理解为经过取整简化后的结构表面至成像表面的距离，灰度值越大，在图像中表现越白，即结构表面距离成像表面越近。三维孔隙率计算原理可用图 3 表示，图 3(a)表示三维空间里颗粒和孔隙构成的结构表面。从上方垂直向下进行数字成像可得结构表面的影像图，如图 3(b)所示，这个过程也相当于电子显微镜扫描成像的过程。图 3(a)所示的微结构体积等于按像素个数划分为许多个长方体之和，每一个长方体的体积就是该像素对应的灰度(见图 3(c))。所有这样的空间之和被认为是颗粒体积之和，其余部分被认为是孔隙之和^[1, 12]。三维孔隙率 V_{3D} 计算公式表示为

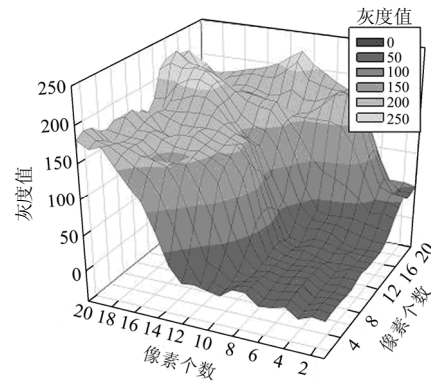
$$V_{3D} = \sum_{i=1}^N S(M - D_i) / (SMN) = \sum_{i=1}^N (255 - D_i) / (255N) \quad (2)$$

式中： S 为每一个像素的面积，选择单位像素，则 $S = 1$ ； M 为图像灰度的最大值， $M = 255$ ； D_i 为第 i 个像素对应的灰度； N 为图像像素的总个数。

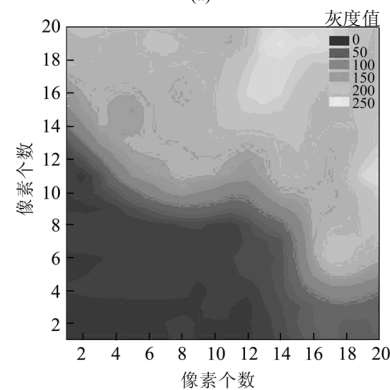
式(2)的计算原理类似于用积分的方式计算颗粒和孔隙的体积，像素单元相当于微分单元，其精度取决于 SEM 图像的拍摄精度和扫描精度^[11]。

可利用 Matlab 软件将 SEM 图像转换为 255 级的灰度图像，语法格式为： $I = \text{rgb2gray}(Y)$ ； $\text{imshow}(I)$ ， title (灰度图像)。然后提取灰度图像的灰度，其语法格式为： imixelinfo ； $\text{imview}(I)$ 。所得灰度采用编程手段利用式(2)进行计算。

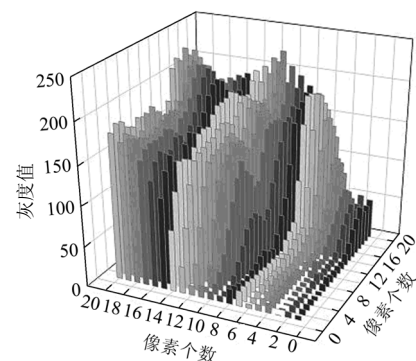
4.3 压缩过程中三维孔隙率的变化



(a)



(b)



(c)

图 3 基于灰度计算三维孔隙率原理示意图

Fig.3 Sketches of computation of soil three-dimensional porosity based on the gray scale

图 1 中各图像的像素个数为 $440 \times 360 = 158\,400$ 个，用本文的算法可得到不同固结压力作用下试样的三维孔隙率。为了验证其正确性，对采用以下 3 种方法得到的孔隙率进行对比：(1) 采用处理二值化图像得到的二值化孔隙率(阈值设定为 150)；(2) 根据测得的不同压力作用下试样孔隙比换算得到的孔隙率；(3) MIP 试验中将水银压入干燥试样中替代孔隙中的空气，计算得到的试样孔隙率，结果见图 4。

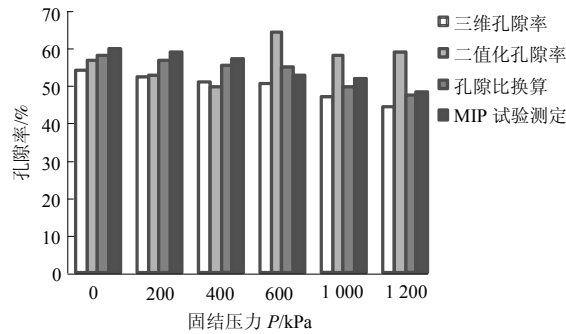


图4 采用不同方法计算得到的孔隙率

Fig.4 Porosity computed by different methods

从图4可知,采用二值化图像得到原状样和压缩试验中低压力作用下的试样的孔隙率与其他方法得到孔隙率基本相同,但当 $P > \sigma_k$ 后,所得孔隙率较大,这可能是因为土的密实度增大,结构破坏严重,孔隙体积较小,颗粒与孔隙界限变得不明显,采用二值化图像得到的孔隙率会有较大误差,而基于灰度得到三维孔隙率则有较高的准确性。从图5也可以看到,三维孔隙率随压力的增大表现出典型结构性土的分段变形特征,说明根据三维孔隙率的变化情况可较好描述结构性土压缩过程中孔隙体积的变化情况。

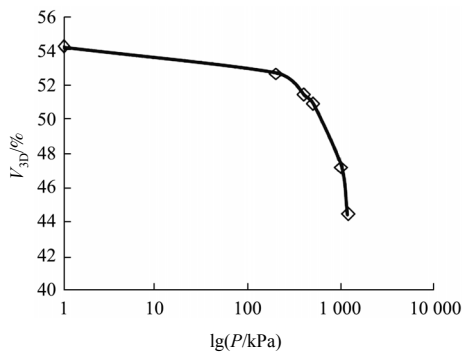
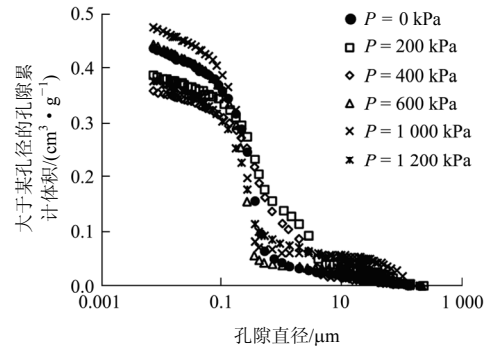


图5 三维孔隙率 V_{3D} 与固结压力 $\lg P$ 关系曲线

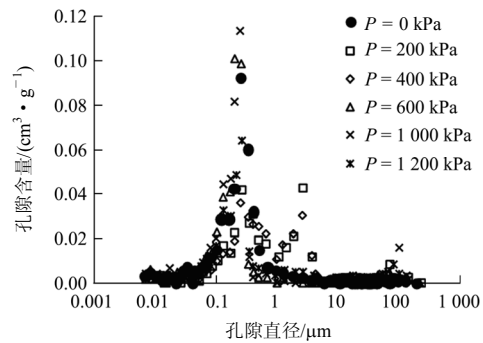
Fig.5 Relationship curve between 3D porosity and consolidation pressure

5 MIP 试验结果分析

从MIP试验得到压力与汞压入的体积关系,利用Wshbum方程^[6],通过固结压力 P 找到对应的当量直径,由此可得土的孔隙分布曲线,它能直观、定量地表示孔隙的构成分布情况。图6为压缩试验中不同固结压力下土样孔径的分布曲线,图7为各类孔隙体积随压力的变化情况。



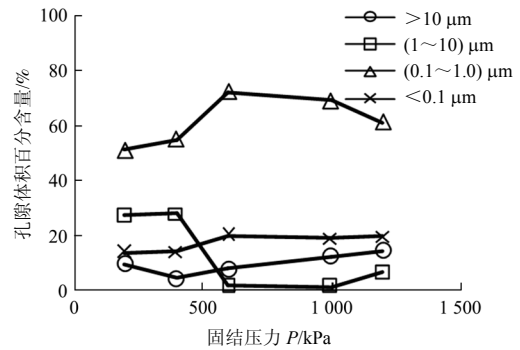
(a) 不同孔径的孔隙累计分布曲线



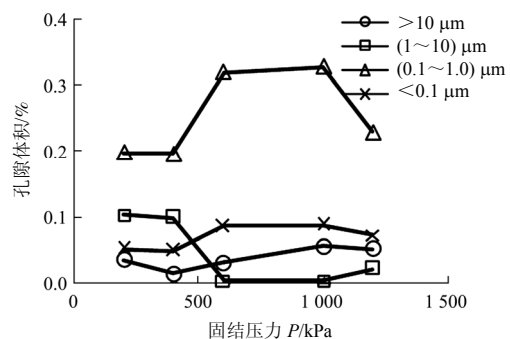
(b) 孔隙含量分布曲线

图6 不同固结压力下土样孔径分布曲线

Fig.6 Pore size distribution curves under different consolidation pressures



(a) 孔隙体积百分含量与固结压力关系



(b) 孔隙体积与固结压力关系

图7 不同固结压力下土样的各类孔隙体积变化

Fig.7 Relationships between pore size distribution and consolidation pressure

由图 6, 7 可见, 湛江天然黏土孔隙分布在 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙组分占有绝对优势, 这一区间的孔隙体积占总孔隙体积的 73% 左右。在变形初期, 试样孔径主要由孔径为 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的小孔隙组成, 其体积百分比达 51%; 在 $P < 400 \text{ kPa}$ 以内, 各孔径组分变化甚微; 当 $P > \sigma_k$ 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 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙组分刚升时, 似乎作为代偿, 孔径 $< 0.1 \mu\text{m}$ 的微孔隙体积同时下降至一低值而后趋于稳定。总之, 在整个压缩过程中, 孔径的变化对于每个孔隙组并非机会均等, 仅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。

另一方面, 压缩过程中孔隙的变化情况表明, 各孔隙组的对外加应力的敏感度与孔隙体积分含量的正相关, 也就是说, 孔径分布在 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的小孔隙组分体积分含量高, 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先破损的说法不同, 这可能缘于随着压缩过程中结构的大量破损, 结构由初始的开放式絮凝结构变为封闭式“片架-镶嵌”结构, 导致该土中的大孔隙主要分布于集聚体内孤立孔隙, 形成“墨水瓶”型孔隙, 压汞过程中存在“瓶颈”效应, 致使根据 MIP 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。这也说明得到结构性土孔隙的真实形态, 需要对 SEM 试验和 MIP 试验结果综合分析得到。

6 结构性黏土压缩变形机制分析

微观研究目的是探讨土体内部的微观结构与宏观力学表现的内在联系即相关规律, 从机制上进一步认识土的变形。根据上述分析结合宏观力学表现可对结构性黏土压缩变形机制作出解释。图 8 为固结压力为 400 和 1 200 kPa 作用下的压缩曲线, 可见湛江黏土的压缩变形过程具有典型结构性土分段性变形特征。

对 SEM 试验和 MIP 试验结果综合分析, 不难发现, 湛江黏土的变形过程表现出具有强弱胶结共存的双重介质特性, 微结构调整大致可分为 3 个阶段: (1) 结构微调阶段。当 $P < \sigma_k$, 各类孔隙的含量相对稳定, 孔隙率变化不大, 土体在宏观上的变形量较小, 微观上表现为体积分含量较大的主要孔隙

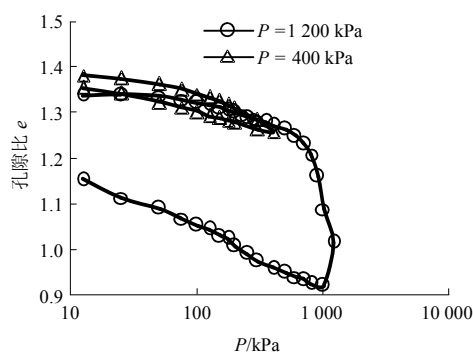


图 8 结构性黏土的压缩曲线

Fig.8 Compression curves of structured clay

间局部调整, 总体积含量基本维持恒值。(2) 结构破损阶段。当 $P > \sigma_k$, 结构连接强度较弱处发生破坏, 体积分含量较高的集聚体间孔隙先受影响, 孔隙率急剧减小。原始结构体系被破坏, 适应于变化的压力环境的新的结构形态形成, 出现结构调整复杂化的性状。(3) 结构固化阶段。出现于变形过程后期, 此时结构的差异性调整已不明显, 孔径分布大多趋于平缓, 在一般的工程压力范围内或重塑时, 孔隙不会发生明显变化。每当外力环境发生改变时, 土体新生成的现时结构适当调整, 求得更加巩固的平衡结构, 宏观变形主要靠新体系结构参数的微观调整得以实现。

7 结论

(1) 采用二值化处理 SEM 图像获得孔隙率的方法受阈值选取影响较大, 特别是土的天然结构被破坏后, 用该方法所得结果误差较大。基于灰度计算三维孔隙率的方法简单, 物理意义明确, 有较高的准确性。

(2) 湛江天然黏土以孔径 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙组占优, 其孔隙体积占总孔隙体积的 73%。 $P > \sigma_k$ 前, 各孔径组分变化甚微。 $P > \sigma_k$ 后, 随压力的增大, 孔径 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙含量表现为先增加后降低。

(3) 湛江黏土各孔隙组对外力的敏感度与孔隙体积分含量正相关, 由于含有“墨水瓶”型孔隙, 压汞过程中存在“瓶颈”效应, 可能导致 MIP 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。需根据 SEM 和 MIP 试验结果综合分析才能获得微结构真实形态。

(4) 湛江黏土为开放式絮凝结构。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, 形式逐渐变为封闭式“片架-镶嵌”结构。接触关系向面-面镶嵌的稳定及亚稳定状态转变, 颗粒排列变得有序。孔隙形状向三角形和扁圆形演变, 孔隙分布趋向均一化。整个过程可概括为3个阶段: 结构微调阶段、结构破损阶段、结构固化阶段。

参考文献(References):

- [1] 李强, 鲍苏苏. 基于灰度计算饱和黏土的孔隙率[J]. 重庆师范学院学报: 自然科学版, 2003, 20(1): 30-31.(LI Qiang, BAO Susu. The computation of the porosity of saturated clay based on the gray scale of soft microstructure graph[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2003, 20(1): 30-31.(in Chinese))
- [2] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 固结条件下软黏土微观孔隙结构的演化及其分形描述[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 394-400.(ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. Evolution of micro pore structure of soft clay and its fractal features under consolidation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 394-400.(in Chinese))
- [3] 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]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 49-56.(FANG Houguo, LIU Pinghui, YUAN Zhigang. Analysis of characteristics of microstructure change during marine soft soil consolidation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(2): 49-56.(in Chinese))
- [4] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Changes in pore size distribution due to consolidation of clays[J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 159-167.
- [5] LAPIERRE C, LEROUEIL S, LOCAT J. Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(6): 761-773.
- [6] 孔令荣, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 不同固结压力下饱和软黏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 of 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] 拓勇飞. 湛江软土结构性的力学效应与微观机制研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004.(TUO Yongfei. Research on mechanics effect and micromechanism of structural soft clay in Zhanjiang area[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [8] 南京水利科学院. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 70-85.(Nanjing Hydraulic Research Institute. Manual for geotechnical test[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 70-85.(in Chinese))
- [9] KONG L W, LUO H X, TAN L R. Fractal study of pore space distribution of red clay in China[C]// Proceedings of the 10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: International Academic Publishers, 1995: 139-142.
- [10] 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 Lingwei, LU Haibo, 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.(in Chinese))
- [11] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于SEM土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.(TANG Chaosheng, SHI Bin, WANG Baojun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565.(in Chinese))
- [12] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于GIS的黏性土SEM图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩石力学, 2008, 29(1): 251-255.(WANG Baojun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 251-255.(in Chinese))