【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

固结条件下软黏土孔隙的演化特征分析

黄赵星, 孙红, 葛修润

上海交通大学土木工程系, 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海 200240

摘要: 为探求软黏土固结时微观结构演化规律, 对上海软黏土的原状土和重塑土进行固结-电镜试验, 采用图像处理技术和分形理论研究孔隙比、孔隙尺度及孔隙度分维数的变化特征, 为获得三维孔隙比提出一种确定图像二值化阈值的方法. 结果表明, 利用该法获得的三维孔隙比准确性较高; 干密度影响孔隙的大小和形状, 固结压力改变颗粒间的接触形式和分布; 结构性的影响贯穿固结全过程, 压密阶段孔隙度分维数和孔隙比快速下降, 结构重组阶段孔隙度分维数开始增长, 孔隙比下降速率放缓; 新的平衡阶段孔隙度分维数逐渐降低, 结构趋于密实, 孔隙比轻微下降.

关键词: 岩土工程; 软黏土; 微观结构; 分形理论; 孔隙比; 阈值; 固结试验

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.06576

Evolution of soft clay pores under consolidation

HUANG Zhaoxing, SUN Hong, and GE Xiurun

Department of Civil Engineering, Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China

Abstract: Shanghai soft clay is studied by consolidation test and electron microscopy in order to explore microstructure evolution during consolidation. Image processing techniques and fractal theory are used to study the variation characteristics of pore ratio, pore size and porosity fractal dimension. The threshold determination method of image binarization is adopted to obtain a high accuracy of three-dimensional pore ratio. The dry density affects the size and shape of the pores and the consolidation pressure changes the contact pattern and distribution between the particles. The microstructure has a strong influence on the whole process of consolidation. In the compacting stage, the fractal dimension and the pore ratio decrease rapidly. During the microstructure rearrangement stage, the fractal dimension begins to increase, and the rate of decrease of the pore ratio slows down. In the new balance stage, the fractal dimension gradually decreases, the structure tends to be dense, and the pore ratio decreases slightly.

Key words: geotechnical engineering; soft clay; microstructure; fractal theory; pore ratio; threshold; consolidation test

天然软黏土的宏观变形特性主要受微观结构影响, 孔隙结构的变化是主要因素. 孔隙的结构是孔隙微观形态的综合反映, 主要指孔隙的大小、形状和分布等. 固结是随着孔隙水排出, 土体中有效应

力增加引起土骨架压缩的过程. 了解孔隙结构的变化对揭示软黏土的宏观特性有重要意义^[1]. 目前有许多学者对软黏土在不同固结压力下的孔隙演化规律进行了研究. 熊承仁等^[2]利用图像处理技术提取

Received: 2019-09-09; **Accepted:** 2020-03-05

Foundation: National Natural Science Foundation of China (41572255)

Corresponding author: Associate professor SUN Hong. E-mail: sunhong@sjtu.edu.cn

Citation: HUANG Zhaoxing, SUN Hong, GE Xiurun. Evolution of soft clay pores under consolidation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 576-582. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图片中的孔隙结构参数, 以了解孔隙结构特征. 张先伟等^[3]基于 SEM 和压汞实验, 探讨了黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律. 唐益群等^[4]研究了冻融对土壤孔隙结构的影响, 基于孔隙体积假设的分形计算方法能较好地反映不同种类孔隙的分布特征. 陈波等^[5]研究结构性对软黏土变形特性的影响, 随着固结压力的增大, 大孔隙和中孔隙逐渐向小孔隙转化. 陶高梁等^[6]认为小孔隙具有固有分形特征, 压缩是使大孔隙向固有特征变化的原因. 为进一步分析黏土的结构及干密度在固结过程中对孔隙调整的影响, 本研究对上海软黏土进行固结试验和电镜扫描, 利用 IPP (image-pro plus) 软件计算三维孔隙比, 提出图像二值化阈值的确定方法, 并探究了上海软黏土固结时孔隙的变化规律和分形特征, 为建立宏微观性质间的联系提供参考.

1 土样及试验方法

1.1 土样的基本物理性质

在中国上海浦东新区周浦镇用钻孔薄壁取土器进行取样, 埋深 9 ~ 11 m, 为上海第④层淤泥质黏土, 含水率 (质量分数) 为 45.49%, 孔隙比为 1.28, 干密度为 1.2 g/cm^3 , 塑限为 23.47%, 容重为 17.30 kN/m^3 . 由压实实验获得最优含水率 (质量分数) 为 23.00%, 对应干密度为 1.5 g/cm^3 .

1.2 试验方法

为反映干密度对软黏土固结特性的影响, 试验土样为原状土及干密度分别为 1.2、1.3、1.4 和 1.5 g/cm^3 的重塑试样, 各试样的编号分别为 Y、 $G_{1.2}$ 、 $G_{1.3}$ 、 $G_{1.4}$ 和 $G_{1.5}$. 重塑土采用最优含水率, 分层压实法制样. 将称好的土样分 3 层放入击实仪中击实, 每层土样约取 700 g, 每层 25 击, 击实时尽量保证土样表面均匀击实, 相交的接触面进行刨毛处理.

对原状土和重塑土进行单向固结试验, 分级加

荷, 依次施加 50、100、200、400 和 800 kPa 的固结压力, 获得各固结压力后的试样. 采取小块试样, 采用冷冻干燥法进行制备, 并利用高分辨率场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FESEM; 美国 TESCAN 公司生产, 型号为 MIRA3) 对土样进行扫描.

2 软土 FESEM 图片的微观特征

固结前不同干密度下的 FESEM 图如图 1. 上海软黏土的颗粒以片状为主, 局部分布少许书卷状颗粒. 颗粒间通过胶结键连接, 主要以点-点和边-面接触为主, 颗粒呈现簇状分布. 孔隙主要为团粒间孔隙和团粒内孔隙. 团粒间孔隙以孤立的状态存在, 连通性较好, 孔径较大, 呈椭圆形分布.

与原状土相比, 重塑土的颗粒与孔隙趋于平面分布, 簇状分布的颗粒减少, 孔隙以团粒间孔隙与颗粒间孔隙为主. 干密度为 1.2 g/cm^3 的重塑土微观结构与原状土较为相似, 但整体结构为多个片状颗粒层层叠置而成. 随着干密度的增加, 颗粒间的接触逐渐以面-面接触为主, 孔隙形态由椭圆形过渡到圆形, 团粒间的孔隙减少, 相对均匀的颗粒间孔隙增多, 孔隙大小趋于均一化, 颗粒接触的致密程度增加. 当干密度达到 1.5 g/cm^3 时, 片状颗粒相互紧密叠加, 大孔隙减少, 结构最为密实.

图 2 为不同干密度下固结压力为 400 kPa 时的 FESEM 图. 由图 2 可见, 400 kPa 下原状土的天然结构已经发生破坏, 出现多个小的团聚体, 簇状分布的颗粒明显减少, 孔隙以团粒内孔隙和颗粒间孔隙为主, 孔隙大小趋于均一化. 400 kPa 下重塑土的颗粒逐渐破碎, 成为多个小颗粒. 孔隙以颗粒间孔隙为主, 土颗粒间接触较密实. 随着干密度的增大, 大颗粒间的层层叠置程度加深, 主要为面-面接触, 出现较多片状小颗粒, 附着在大颗粒上, 大颗粒间的孔隙相应减少, 小颗粒间的孔隙逐渐增多.

图 1 固结前不同干密度下软土的 FESEM 图片

Fig. 1 FESEM photos of soft soil under different dry densities before consolidation

图 2 400 kPa 下软土的 FESEM 图片

Fig. 2 FESEM photos of soft soil under 400 kPa

总体而言,干密度和固结压力对软黏土的孔隙结构影响均较大,但影响方式不同.固结前干密度主要影响孔隙的大小和形状;随着固结压力的增大,颗粒间的接触形式和分布发生改变,从而使孔隙结构发生变化;到了固结后期,固结压力越大,孔隙间的差异越小,孔隙趋于均一化.

3 固结过程中孔隙比的变化规律

目前,对 FESEM 图的定量分析有多种方法^[7-8],但在进行二值化处理时对阈值的选择方式并不统一.张季如等^[9]采用目视分割法确定阈值;徐日庆等^[10]参考宏观孔隙比确定三维孔隙比的阈值.阈值的选择对微观参数影响较大,因此,为准确计算三维孔隙比,本研究基于徐日庆等^[10]的三维孔隙比计算公式,提出确定阈值的新方法.

3.1 三维孔隙比的计算

徐日庆等^[10]提出了以微积分思想利用 IPP 软件建立以二值灰度为平面、阈值为竖向坐标的三维模型计算三维孔隙比.设某阈值 Y_{i-1} 下的像素面积为 S_{i-1} , 阈值 Y_i 下的像素面积为 S_i . 当阈值 Y_{i-1} 与 Y_i 无限接近,可得到孔隙体积为

$$V_{3D} = \sum_{i=1}^{255} \left(\frac{S_i + S_{i-1}}{2} \right) (Y_i - Y_{i-1}) \quad (1)$$

通过换算可得到任意阈值下的三维孔隙比为

$$e_{3D} = \frac{\sum_{i=1}^{255} (S_i + S_{i-1}) (Y_i - Y_{i-1})}{2Y_m S_A - \sum_{i=1}^{255} (S_i + S_{i-1}) (Y_i - Y_{i-1})} \quad (2)$$

其中, Y_m 为任意阈值; S_A 为选取区域的像素面积.

3.2 阈值确定

根据式(2)利用 IPP 软件对所有土样的 SEM 图片进行图像处理,设定阈值步距为 2, 得到固结前不同干密度下三维孔隙比及孔隙像素随阈值的变化

曲线(图3和图4).由图3可见,三维孔隙比随阈值的增加而增大,当阈值小于 100 时,曲线斜率较小;当阈值大于 100 时,三维孔隙比随阈值呈线性增长.由图4可见,孔隙像素随阈值的变化分为 3 个阶段.阈值可表示颗粒表面至成像表面的距离,初期孔隙像素增长缓慢,此阶段阈值定点在成像表面.随着阈值的增加,阈值对应的颗粒表面离成像表面越远,曲线斜率开始增大.后期,孔隙像素增长缓慢,最终趋于平缓.本研究采用以下方法确定阈值:图4曲线后段变化明显减弱,趋近于直线,取变化率等于 2×10^{-3} 的点对应的阈值为三维孔隙比的阈值.以 $G_{1.3}$ 曲线为例,对应阈值为 188, 对应的三维孔隙比为 0.975, 宏观孔隙比为 0.990, 误差为 0.187%.

图 3 三维孔隙比随阈值变化曲线

Fig. 3 Three-dimensional pore ratio curve as function of threshold

为研究上述方法的可行性,对原状土和重塑土共 30 个土样的 FESEM 图片进行分析,将微观孔隙比与宏观孔隙比绘制在 $e-p$ 坐标图(图5).由图5可知,两者较为接近,误差较小.

3.3 固结过程中宏、微观孔隙比的变化

用卡萨格兰德法求得原状土先期固结压力为

图4 孔隙像素随阈值变化曲线

Fig. 4 Pore pixel curve as function of threshold

图5 不同干密度下土样固结时宏、微观孔隙比的变化

Fig. 5 Variation of macro- and micro-scopie void ratio for soil samples consolidated under different dry densities

120 kPa^[10]. 不同固结压力下孔隙比下降速率不同. 压力从0增至100 kPa时, 孔隙比减小0.147; 当压力大于120 kPa时, 孔隙比降速放缓; 压力从100 kPa增至200 kPa时, 孔隙比减小0.087; 后期孔隙比下降较慢, 压力从400 kPa增至800 kPa时, 孔隙比减小0.096. 重塑土的孔隙比变化与原状土也有差别, 尤其干密度较大时, 孔隙比下降量较小, 干密度为1.4 g/cm³和1.5 g/cm³的重塑土, 压力从0增至100 kPa时, 孔隙比分别减小0.052和0.029; 压力从400 kPa增至800 kPa时, 孔隙比分别减小0.081和0.058. 可见原状土和重塑土的孔隙比变化受结构性和干密度的影响. 但孔隙比的变化只反映固结时孔隙与颗粒变化的综合特征, 无法揭示微观演化机理, 需对孔隙的尺度特征及分形特征作进一步研究.

4 软黏土孔隙特征和分形维数

4.1 孔隙尺度划分

本研究利用IPP软件分析孔隙尺度, 采用目视分割法^[9]确定阈值. 由于直径 $d < 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙受固结的影响不大^[4], 故本研究主要分析 $d > 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙, 得到软黏土的孔隙分布曲线(图6).

(a) 固结前

(b) 400 kPa

图6 不同干密度下软土的孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of soft soil under different dry densities

孔隙由大到小可分为宏观孔隙、团粒间孔隙、团粒内孔隙、颗粒间孔隙和颗粒内孔隙^[11]. 本研究将上海软黏土中的孔隙作出如下划分: 宏观孔隙($d > 10 \mu\text{m}$), 主要为团粒间的孔隙; 大孔隙($2 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$), 主要为团粒内孔隙; 中孔隙($0.9 \mu\text{m} < d < 2 \mu\text{m}$), 主要为颗粒间孔隙; 小孔隙($0.1 \mu\text{m} < d < 0.9 \mu\text{m}$), 属于颗粒内孔隙; 微孔隙($d < 0.1 \mu\text{m}$).

原状土和重塑土的孔径分布曲线基本一致, 为典型的双峰孔径结构. 中孔隙峰值在1.0~1.1 μm 内, 小孔隙峰值在0.4~0.6 μm 内. 固结前原状土

与重塑土的大孔隙占比存在差异(原状土大孔隙占比为 7.9%, 重塑土的大孔隙占比为 3.2% ~ 6.4%); 当固结压力大于先期固结压力后, 大孔隙占比的差异减小, 中孔隙和小孔隙占比的差异变大. 在中孔隙方面, 原状土质量分数为 26.6%, 重塑土质量分数为 17.5% ~ 22.1%, 重塑土的干密度越大, 中孔隙的占比越低; 在小孔隙方面, 原状土质量分数为 70.1%, 重塑土质量分数为 76.7% ~ 79.6%, 且重塑土小孔隙的占比随干密度的增大而增加. 可见干密度和结构性对软黏土固结时不同孔径的孔隙含量都有影响, 且影响程度不同.

4.2 固结过程中软黏土的孔隙特征变化

图 7 为软黏土在不同固结压力下的孔径变化情况. 如图 7(a), 固结前原状土大孔隙占比为 10.6%, 中孔隙占比为 31.4%, 100 kPa 下大孔隙占比为 8.8%, 中孔隙占比为 34.5%. 可见先期固结压力之前原状土孔隙的变化主要为大孔隙和中孔隙的调整, 即团粒间的大孔隙不断压缩成团粒内的中孔隙. 先期固结压力之后, 颗粒间的小孔隙开始调整, 固结压力为 200 kPa 时, 大孔隙占比为

6.5%, 中孔隙占比为 34.6%, 小孔隙占比为 62.2%, 此时发生的变化主要为大孔隙和中孔隙向小孔隙转化. 当固结为 200 kPa 时, 在孔径为 0.7 ~ 0.8 μm 内出现明显波动. 这是因为团粒内孔隙由于颗粒间的胶结作用在重塑作用下也不发生破损, 即不易被压缩成颗粒间的孔隙, 800 kPa 时该处波动消失, 能被压缩的部分团粒内孔隙已破损成颗粒间孔隙. 如图 7(b), 重塑土团粒间大孔隙占比不大, 在固结过程中变化不大, 主要为中孔隙和小孔隙的变化. 固结压力较小时 (0 ~ 100 kPa), 主要为中孔隙向小孔隙调整过程. 干密度为 1.5 g/cm^3 的重塑土中, 孔隙和小孔隙的占比较大, 在固结前期各组分孔隙仍在调整, 后期以颗粒间的小孔隙调整为主. 与原状土相同, 不同干密度下的重塑土在固结压力为 200 kPa 时均出现波动点.

4.3 软黏土的孔隙分形特征

分形理论是分析土样微观结构的有效手段, 分形特征反映了结构的复杂性, 较大的分形维数表示更复杂的结构.

孔隙度分维数通常用小于某孔径 r 的孔隙累积数 $N(\leq r)$ 的分布特征来反映孔隙结构的变化. 以 r 为横坐标, 大于该孔径的孔隙数 $N(r)$ 为纵坐标, 在双对数坐标系中取直线部分斜率的负值为孔隙度分维值 D ,

$$D = - \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (3)$$

D 越大, 反映孔隙均一化程度越差, 孔隙间尺寸相差越大^[12].

图 8 为不同干密度下的孔隙度分维数. 由图 8 可知, 大体上孔隙度分维数呈现先下降再急速上升, 然后下降的趋势. 原状土在 200 kPa 时孔隙度分维数出现了明显拐点, 可见结构性在软黏土固结过程中对孔隙结构变化的影响较大. 在固结压力小于先期固结压力时, 土体天然结构逐渐变化, 团粒间的大孔隙逐渐被压缩成团粒内的中孔隙和颗粒间的小孔隙, 孔隙均一化程度较好, 孔隙度分维数下降; 在固结压力大于先期固结压力时, 土体天然结构已经破坏, 团粒间的中孔隙发展成颗粒间的小孔隙, 孔隙间尺寸相差变大, 孔隙分布复杂, 孔隙度分维数变大. 固结压力增大到 800 kPa 时, 孔隙度分维数缓慢降低, 孔隙分布复杂程度降低, 孔隙进入新的平衡阶段. 原状土由于孔隙结构较为复杂, 孔隙度分维数比干密度为 1.2 g/cm^3 的重塑土大. 因此, 在分析固结条件下土的结构性时, 需考虑原

图 7 不同固结压力下软土的孔径分布曲线
Fig. 7 Pore size distribution curve of soft soil under different consolidation pressures

状土固结的全过程。

图8 不同干密度下的孔隙度分维数

Fig. 8 Porosity fractal dimension at different dry densities

同原状土相比,重塑土孔隙度分维数变化的拐点在 100 kPa,主要是因为重塑土不具有原状土的天然结构,在制样时形成较弱的初始结构,经历轻微的压实后,孔隙度分维数开始增大。对比不同干密度下的孔隙度分维数可知,干密度越小,孔隙度分维数越大,孔隙结构越复杂。当干密度达到 1.5 g/cm^3 时,由于击实作用,土体初始结构密实,孔隙分布较均一,因此孔隙度分维数变化较小。

5 固结变形的宏、微观机制

微观试验的意义在于将土的宏观性质与微观结构相联系,探讨其内在规律,更进一步了解固结特性。本研究发现,原状土与重塑土在固结过程大致可分为3个阶段:①压密阶段(原状土 0~200 kPa,重塑土 0~100 kPa):当固结压力较小时,孔隙由团粒间的大孔隙发展成团粒内的中孔隙,此时孔隙度分维数迅速下降,孔隙趋于均一化,孔隙度分维数达到最低值,宏观表现为原状土与重塑土的孔隙比下降较快;②结构重组阶段(原状土 200~400 kPa,重塑土 100~400 kPa):团粒间的中孔隙逐渐发展为颗粒间的小孔隙,颗粒间孔隙逐渐增多,孔隙度分维数开始增长,小的土颗粒增多,宏观表现为孔隙比下降速率放缓。200 kPa 时孔径分布曲线上出现波动点,表示部分可压缩的团粒内小孔隙向颗粒间孔隙发展;③新的平衡阶段(400~800 kPa):该阶段大孔隙和中孔隙变化较小,随着固结压力继续增大,孔隙的发展主要为颗粒间小孔隙的调整,孔隙间孔径的差异变小,孔隙度分维数逐渐降低,结构趋于密实,宏观表现为孔隙比轻微下降。

原状土与重塑土的固结特性差异较大,这是由于重塑土不具备天然结构,固结特性不仅受固结压力的影响,还与制样时的初始干密度有关。重塑土固结时,孔隙结构变化的主要为中孔隙和小孔隙。且重塑土的干密度越大,孔径越小,初始结构越致密,孔隙分布越趋于均一化,孔隙度分维数越小,固结时变形量越小。

6 结 论

对原状土及不同干密度下的重塑土进行固结试验和电镜扫描,基于分形理论,从微观角度揭示了不同干密度下软黏土在固结过程中孔隙的变化规律,可知:

1) 计算三维孔隙比时可通过孔隙像素与阈值的曲线确定阈值,此方法有较高准确性,平均误差为 4.27%。

2) 原状土与较小干密度的重塑土固结前期主要为大孔隙向中孔隙转化,固结后期为中孔隙向小孔隙发展;较大干密度的重塑土在固结过程中的表现主要为中孔隙逐渐向小孔隙转化。部分团粒内孔隙具有较强的胶结作用,不易被压缩,当固结压力略大于先期固结压力时,孔径分布曲线上会出现波动点,这是因为部分压缩的团粒内孔隙向颗粒间孔隙发展,说明结构发生调整。

3) 根据孔隙的变化规律,软黏土的固结可分为3个阶段:①压密阶段:孔隙度分维数快速下降,孔隙比下降较快;②结构重组阶段:颗粒间孔隙逐渐增多,小的土颗粒增多,孔隙度分维数开始增长,孔隙比下降速率放缓;③新的平衡阶段:孔隙间孔径的差异变小,孔隙度分维数逐渐降低,结构趋于密实,孔隙比轻微下降。

4) 结构性影响软黏土的固结全过程。原状土天然结构导致孔隙度分维数达到最低点时的固结压力大于重塑土,孔隙度分维数在整个固结过程中都比干密度相近的重塑土小,而且 200 kPa 后原状土的分维数比干密度大的重塑土小。重塑土由于干密度增大,导致初始结构致密,孔隙度分维数变小,固结变形量变小。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41572255)

作者简介:黄赵星(1995—),上海交通大学硕士研究生。研究方向:岩土的工程性质与数值模拟。E-mail: zhaoxing1995@sjtu.edu.cn

引文:黄赵星,孙红,葛修润.固结条件下软黏土孔隙的演化特征分析[J].深圳大学学报理工版,2020,37(6):576-582.

参考文献 / References:

- [1] LIN B, CERATO A B. Prediction of expansive soil swelling based on four micro-scale properties [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(1): 71-78.
- [2] 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. 地球科学, 2007, 32(3): 415-419.
XIONG Chenren, TANG Huiming, LIU Baochen. Using SEM photos to gain the pore structural parameters of soil samples [J]. Earth Science, 2007, 32(3): 415-419. (in Chinese)
- [3] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412.
ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 406-412. (in Chinese)
- [4] 唐益群, 严婧婧. 上海冻融淤泥质软黏土孔隙结构特征分形研究[J]. 同济大学学报自然科学版, 2019, 47(5): 627-633.
TANG Yiqun, YANG Jingjing. Fractals of pore structure characteristic of muddy clay in Shanghai after artificial ground freezing [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2019, 47(5): 627-633. (in Chinese)
- [5] 陈波, 孙德安, 高游, 等. 上海软黏土的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2523-2530.
CHEN Bo, SUN De'an, GAO You, et al. Experimental study of pore-size distribution of Shanghai soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2523-2530. (in Chinese)
- [6] 陶高梁, 朱学良, 胡其志. 黏性土压缩过程临界孔径现象及固有分形特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 88-97.
TAO Gaoliang, ZHU Xueliang, HU Qizhi. Critical pore-size phenomenon and intrinsic fractal characteristic of clay in process of compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 88-97. (in Chinese)
- [7] 张英, 郅慧, 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]. 岩土力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 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]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 34(Suppl. 1): 3597-3603. (in Chinese)
- [8] 蒋明镜, 吴迪, 曹培, 等. 基于 SEM 图片的钙质砂连通孔隙分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊1): 1-5.
JIANG Mingjing, WU Di, CAO Pei, et al. Connected inner pore analysis of calcareous sands using SEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Suppl. 1): 1-5. (in Chinese)
- [9] 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, HUNGA 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)
- [10] 徐日庆, 邓玮文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2015, 34(7): 1497-1502.
XU Riqing, DENG Yiwu, XU Bo, et al. Calculation of three-dimensional porosity of soft soil based on SEM image [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 34(7): 1497-1502. (in Chinese)
- [11] 王升福, 杨平, 刘贯荣, 等. 人工冻融软黏土微观孔隙变化及分形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1254-1261.
WANG Shengfu, YANG Ping, LIU Guanrong, et al. Micro-pore change and fractal characteristics of artificial freeze-thaw soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 38(7): 1254-1261. (in Chinese)
- [12] 吴凯, 倪万魁, 刘海松, 等. 压实黄土强度特性与微观结构变化关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 62-69.
WU Kai, NI Wankui, LIU Haisong, et al. Research on the relationships between the strength properties of compacted loess and microstructural changes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 62-69. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之隼】