

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201903005

原状扬州黏性土压缩特性与孔径分布

孙德安¹, 汪健¹, 何家浩¹, 徐永福²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 研究土体压缩特性与孔径分布的关联性是探索土体宏观微观关系的途径之一。文章以扬州黏性土为研究对象, 对不同深度的原状样同时进行压缩试验和压汞试验, 重点研究了初始孔隙比相近而压缩特性不同的土层的孔隙结构以及各深度土层经历加卸载后的孔隙结构变化。试验结果表明: 不同深度原状扬州黏性土的孔径分布均为单峰结构, 孔径大小主要分布在 $0.2 \sim 5 \mu\text{m}$, 其压缩特性与孔径分布密切相关, 孔径分布越集中, 土的压缩性越小。12, 15, 18 m 深度土样的孔径分布范围相对其他深度的更大, 小孔隙占比更高, 具有更大的压缩性和更强的结构性。初始孔隙比相近的不同深度的土样因孔径分布不同其压缩性也不同。在经历一个加卸载后, 各深度土样的中孔隙占比均减小, 孔径分布都向小孔径孔隙方向移动, 且大孔隙占比变化都不大, 而 12, 15, 18 m 累计孔隙体积减小量更多, 使得这三层土样的中孔隙占比减小更明显。本文为黏性土的工程特性和微观结构的关联性探究提供了参考数据。

关键词: 扬州黏性土; 原状土; 压缩特性; 压缩试验; 压汞试验; 孔隙结构; 孔径分布

中图分类号: P642.13⁺9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)01-0111-06

Compression characteristics and pore-size distributions of the undisturbed Yangzhou clayey soils

SUN De'an¹, WANG Jian¹, HE Jiahao¹, XU Yongfu²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The study of the correlation between compression characteristics and pore size distributions (PSDs) is one of the ways to explore the macroscopic and microscopic relationship of soils. To study the pore structure at different depths with similar initial void ratio and different compression characteristics and the pore structure changes at all different depths after undergoing a loading and unloading, a series of compression and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests were simultaneously conducted on the undisturbed Yangzhou clayey soils at different depths. The test results show that the PSD of the undisturbed Yangzhou clayey soils at depth from 3 to 21 m is unimodal. The pore-size mainly distributes between 0.2 and $5 \mu\text{m}$. The compression performance is closely related to the PSD, and the more concentrated the PSD, the smaller the compressibility. The soil samples at depths 12, 15 and 18 m have wider PSD, much more small pores, greater compressibility and stronger structure than other depths. The compressibility at different depths with similar initial void ratio is different with different PSDs. After undergoing a loading and unloading, the proportion of the medium pores in each soil layer decreases, the PSD moves toward the small pore diameter, and the proportion of the large pores does not change much, while the cumulative pore volume decreases at depths 12, 15 and 18 m are larger, so the decrease in the proportion of the medium pores at the 12, 15 and 18 m soil samples is more pronounced. The research results are of reference value for the study of the correlation between the engineering

收稿日期: 2019-03-03; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672172)

第一作者: 孙德安(1962-), 男, 教授, 主要从事土力学方面的研究和教学工作。E-mail: sundean@shu.edu.cn

characteristics and microstructure of clayey soils.

Keywords: Yangzhou clayey soil; undisturbed soil; compression characteristics; compression test; mercury intrusion porosimetry (MIP) test; pore structure; pore-size distribution (PSD)

土体的宏观力学特性与土体内的微观孔隙结构有很大关系。土体在外荷载作用下,内部微观孔隙结构发生变化,从而综合反映在土体的变形和强度特性上。目前,研究土体微观结构的常用方法有扫描电子显微镜成像(SEM)和压汞(MIP)试验等。施斌等^[1]通过对我国四种典型黏性土(太平洋中部洋底软泥、广西南明和安徽潘集膨胀土以及柳州龙船山红黏土)进行SEM扫描,并结合Videolab图像系统,分析了我国典型黏土微观结构的形态演化及其分布规律。成玉祥^[2]、张先伟^[3]和Buttress^[4]也采用SEM测试,对土体微观结构和宏观力学行为进行了研究。与SEM测试相比,压汞试验可以准确地定量描述土体在外部因素作用下内部微观结构的变化。崔素丽等^[5]通过压汞试验发现黄土经过水泥窑灰改性后,其强度等特性增强,是因为团聚体间的孔隙消失,转化成为团聚体内的孔隙,且总孔隙比降低,土体因此更加密实;谈云志等^[6]分析了不同干密度红黏土试样孔径分布范围的差异,总结出常规压实作用下,土体某一较大孔径的孔隙含量变化较大,而小孔径的孔隙含量变化不大的结论;张云等^[7]研究了太仓浅部淤泥质土在固结过程中的孔隙结构,查明土中孔隙主要为中孔隙和小孔隙,随固结压力增大,土中的中孔隙明显减小,但当固结压力超过一定值后,土中以小孔隙为主,随固结压力增大,孔径分布变化不明显;Griffiths和Joshi^[8-9]对压缩过程中不同黏土的微观结构变化进行了研究,表明在压缩过程中黏土的变形主要是最大孔隙的体积减少造成的,而在次固结时,黏土则是由于中孔隙向小孔隙转移而发生变形;Ninjarav等^[10]发现釜山黏土在压缩过程中,体积压缩主要是大孔径孔隙减少造成的。目前研

究大多局限于单一深度土层(如文献[11-13]),对于不同深度(同一剖面)的原状样及回弹样的孔径分布研究相对较少,而且针对初始孔隙比相近土层表现的不同压缩特性,从孔隙结构特征的研究也较少。

基于上述研究不足,本文对薄壁取样获得的深度范围在3~21 m的原状扬州黏性土进行了压缩试验和压汞试验,分别研究了不同深度原状扬州黏性土压缩特性和结构性的差异与经历加卸载后内部微观孔隙结构的变化。本文的研究对于正确认识扬州地区黏性土的工程特性和微观结构,合理分析工程实践中的变形与强度等问题具有参考意义。

1 试验概况

1.1 试验土样

试验用土样取自京沪高速公路扬州地区922k—923k段,取土深度3~21 m,属于典型的黏性土。为获得高质量扰动小的原状土样,采用薄壁取土器结合快速静压低速拔起的方法,并蜡封储存在一定温度和湿度的密闭容器中,在取样、运输以及试验过程中最大限度避免土样的扰动。

不同深度扬州黏性土的基本物理参数指标见表1。由表可知,土样的塑性指数均大于10,故7种深度的土样都为黏性土,其中12 m和15 m土样的塑性指数大于17。图1为颗粒级配累积曲线,由图可知12 m和15 m深度土样的黏粒含量较高,属于黏土。所有土样的比重在2.72~2.74之间,但不同深度土的初始含水率和孔隙比有较大差异,其中12 m和15 m土样初始含水率高、初始孔隙比较大。表1的结构屈服应力数值表示了前期固结压力与结构强度之和。

表1 不同深度扬州黏性土的基本物理性质指标

Table 1 Physical index of the Yangzhou clayey soils at different depths

取样 深度/m	密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	初始含 水率 $w/\%$	比重 G_s	初始孔 隙比 e_0	饱和度 $S_{a0}/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	结构屈服 应力 σ_k/kPa
3	1.93	27.1	2.72	0.77	94.2	33.5	22.0	11.5	32.4
6	1.87	33.7	2.72	0.90	95.5	34.4	23.3	11.1	56.5
9	1.83	40.4	2.73	1.13	97.9	34.2	21.8	12.4	85.7
12	1.75	46.2	2.74	1.27	99.7	47.6	22.4	25.2	115.4
15	1.69	46.5	2.74	1.30	97.1	49.3	23.5	25.8	137.6
18	1.83	38.8	2.72	1.11	95.9	36.1	20.1	16.0	153.4
21	1.99	27.0	2.72	0.76	95.0	31.3	18.1	13.2	183.8

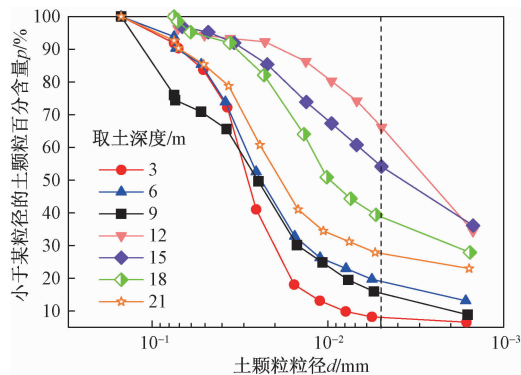


图1 不同深度扬州黏性土的颗粒级配累积曲线

Fig.1 Grain size distribution curves of the Yangzhou clayey soils at different depths

1.2 试验内容

1.2.1 压缩试验

采用杠杆比为1:12的GJZ单杠杆式三联中压固结仪进行压缩试验,试样直径 d 为61.8 mm,高 h 为20.0 mm。让试样在不同荷载(荷载等级为1,3,6,12.5,25,50,100,200,400,800,1 600 kPa)下进行压缩试验,采用慢速固结加载的方法^[14],每级加载时间为24 h。待加载至1 600 kPa后按与加载路径相同的荷载等级卸载至3 kPa。

将制备好的原状环刀试样装入中压固结仪中,按压缩试验设置的加载路径分级加载。经过最大固结压力1 600 kPa回弹至3 kPa时,待土样变形稳定后,将固结仪容器中的水吸干并卸载,及时将试样从固结仪中取出。选取原状样与回弹样具有代表性的中间部分土样,采用真空冷冻升华干燥法进行制样(具体方法见文献[15-16]),以备压汞试验时使用。

1.2.2 压汞试验

采用Micromeritics AutoPore IV压汞试验仪(压力范围:低压4~207 kPa,高压207~413 700 kPa)对制备好的试样进行压汞试验。压汞试验是基于汞对多孔固体具有非浸润性的原理。汞须通过外界压力才能进入到土体孔隙中,且施加压力越大,水银所能填充的孔隙直径越小。假设土体中的孔隙为圆柱形孔,为了克服水银与土体孔隙之间的表面张力,外加压力 $P(d)$ 与孔隙直径 d 之间有着一一对应的关系,即满足Washburn方程^[17]:

$$P(d) = \frac{-4T_s \cos\theta}{d} \quad (1)$$

式中: $P(d)$ ——外加压力/Pa;

d ——试样孔隙直径/m;

T_s ——汞的表面张力,取0.485 N/m;

θ ——汞对材料的浸润角,取130°。

根据压缩试验中孔隙比与固结压力的关系可得到不同深度扬州原状黏性土的压缩曲线,由压汞试验测得压力与进汞量间的关系,可获得原状样与回弹至3 kPa试样孔径在0.005~300 μm 的分布情况。

2 试验结果与分析

2.1 压缩试验结果与分析

图2为不同深度原状扬州黏性土的压缩曲线。从图中可以看出12,15,18 m的压缩曲线呈现明显的阶段式变化,即当压力达到结构屈服应力之前,土体天然沉积过程中形成的结构强度将抵御土体变形的发展,压缩曲线较为平缓;当固结压力超过结构屈服应力后,由于结构强度被破坏,孔隙比迅速减小,压缩曲线呈陡降型,说明12,15,18 m土样结构性较强。从图2还可以看出,不同深度扬州黏性土的压缩性呈较大差异,其中12,15,18 m相对其它深度的土样,孔隙比减小更多,体积压缩更明显,压缩性更高;而且初始孔隙比相近但深度不同的土样(3 m和21 m,9 m和18 m)的压缩性也表现不同。由于不同深度土样的孔径分布不同引起压缩性不同,将在压汞试验结果分析中具体讨论其原因。

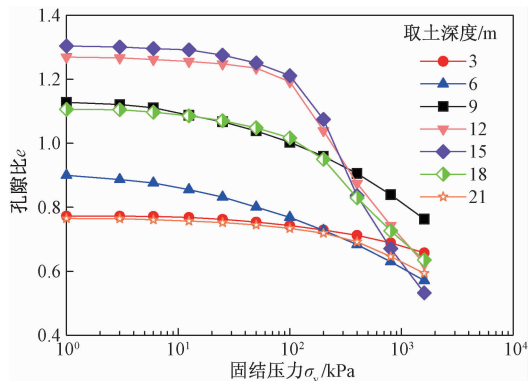


图2 不同深度扬州黏性土的压缩曲线

Fig.2 Compression curves of the Yangzhou clayey soils at different depths

2.2 压汞试验结果与分析

2.2.1 原状扬州黏性土的孔径分布

图3为不同深度原状扬州黏性土的压汞试验结果。从图3(a)可以看出各层原状扬州黏性土的孔径分布为典型的单峰结构,而且3,6,9,21 m土样的孔径分布较12,15,18 m土样的更为集中,分布范围更窄。3,6,9,21 m土样孔径集中分布范围在1~5 μm ,而

12, 15, 18 m 土样孔径集中分布范围在 $0.2 \sim 5 \mu\text{m}$ 。12, 15, 18 m 土样由于孔径小的孔隙较多,所以在图 3(b)中其累计进汞量明显高于其它深度土样。

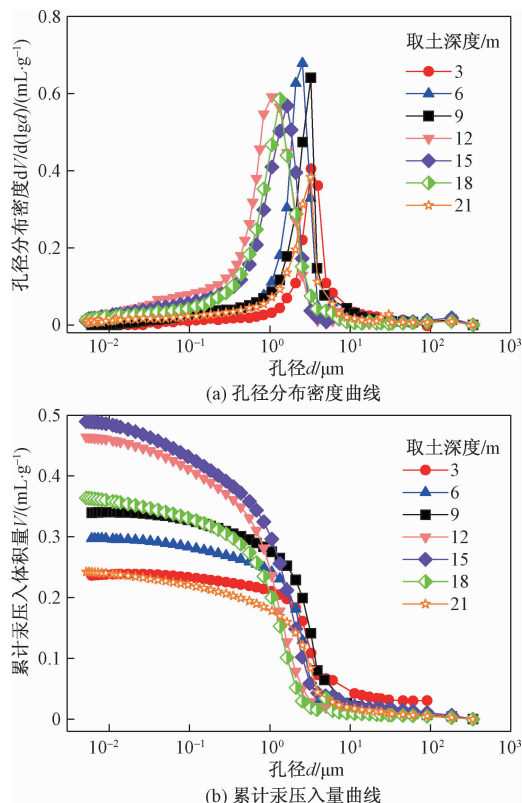


图3 不同深度扬州黏性土原状样压汞试验结果

Fig.3 MIP results of the undisturbed Yangzhou clayey soils at different depths

图3还表示了初始孔隙比相近的土样(3 m和21 m, 9 m和18 m)的孔径分布。由图可知,尽管两组土样各自的孔径分布峰值大小相差不大,但各组两土样的孔径集中分布范围却有细微差别。从图可知,3 m与21 m土样以及9 m与18 m土样在大于 $7 \mu\text{m}$ 范围孔径分布基本相同,这对应图2中固结压力小于200 kPa时每组土样的压缩性各自相同。在孔径小于 $7 \mu\text{m}$ 范围内3 m与21 m土样的差别不大,而9 m与18 m土样的差别明显;这就可解释图2中在固结压力大于200 kPa时,3 m与21 m土样压缩性差别较小,而9 m与18 m土样的压缩性差别明显。

目前对于黏土孔径的划分界限研究成果较多^[18-20],但仍没有统一的标准,结合图3的压汞试验结果,为方便分析,本文将扬州原状黏性土的孔径划分界限定为 $0.1, 1.0, 10.0 \mu\text{m}$,即孔径 $d \geq 10.0 \mu\text{m}$ 为大孔隙; $1.0 \leq d < 10.0 \mu\text{m}$ 为中孔隙; $0.1 \leq d < 1.0 \mu\text{m}$ 为小孔隙; $d < 0.1 \mu\text{m}$ 为微孔隙。按此划分标准,表2

给出了原状扬州黏性土各孔径组的体积含量。可以看出,3, 6, 9, 21 m土样的孔隙主要集中分布在中孔隙,而12, 15, 18 m土样还有部分小孔隙,小孔隙占的比例相对较大。

综合以上,从孔径分布的角度可解释12, 15, 18 m深度的原状扬州黏性土较其它4个深度土样的压缩性更大,也可解释初始孔隙比相近的土样(3 m和21 m, 9 m和18 m)压缩性的不同。

2.2.2 压缩回弹后原状扬州黏性土的孔径分布

图4为原状扬州黏性土经过最大固结压力1600 kPa后回弹至3 kPa试样的压汞试验结果。从图4(a)可以看出,经历一个加卸载后,孔径分布密度曲线的峰值较原状土样的明显减小。比较图3(b)与图4(b)可知,累计进汞量较原状土样的也明显减小,说明经过加卸载后原状扬州黏性土的孔隙体积减小,孔径也相应减小。

图5为原状样与回弹样的孔径分布密度对比图(以6 m和15 m深度为例),其中回弹样为经过最大固结压力1600 kPa后回弹至3 kPa的试样。经过加

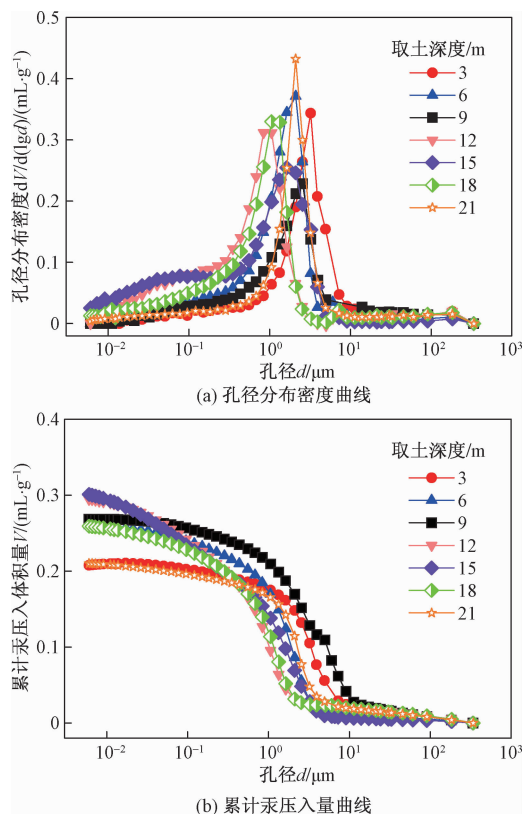


图4 受1600 kPa固结压力后卸载至3 kPa的扬州黏性土原状样压汞试验结果

Fig.4 MIP results of the undisturbed Yangzhou clayey soils undergoing 1600 kPa consolidation stress to 3 kPa

卸载后,各层原状扬州黏性土孔径分布密度曲线的峰值均明显减小,虽然孔径分布范围大小基本不变,但都向小孔径孔隙方向移动。表 2 同时给出了原状扬州黏性土受 1 600 kPa 固结压力后回弹至 3 kPa 试样各孔径组的占比,对比可以看出经历一个加卸载后,各深度土样的中孔隙占比均减小,孔径分布都向小孔径孔隙方向移动,且大孔隙占比变化都不大,而 12,15,18 m 累计孔隙体积减小量更大,使得这三层土样的中孔隙占比减小更明显。

3 结论

- (1)取土深度 3 ~ 21 m 的扬州原状黏性土的孔径分布均为单峰结构,孔径大小主要分布在 0.2 ~ 5 μm,其压缩特性与孔径分布密切相关,孔径分布越集中,土的压缩性越小。
- (2)12,15,18 m 深度土样的孔径分布范围相对其他深度的更广,小孔隙占比更高,具有更大的压缩性和更强的结构性。初始孔隙比相近的不同深度的土样因孔径分布不同其压缩性也不同。经历一个加卸载后,各深度土样的中孔隙占比均减小,孔径分布都向小孔径孔隙方向移动,且大孔隙占比变化都不大,而 12,15,18 m 累计孔隙体积减小量更多,使得这三层土样的中孔隙占比减小更明显。

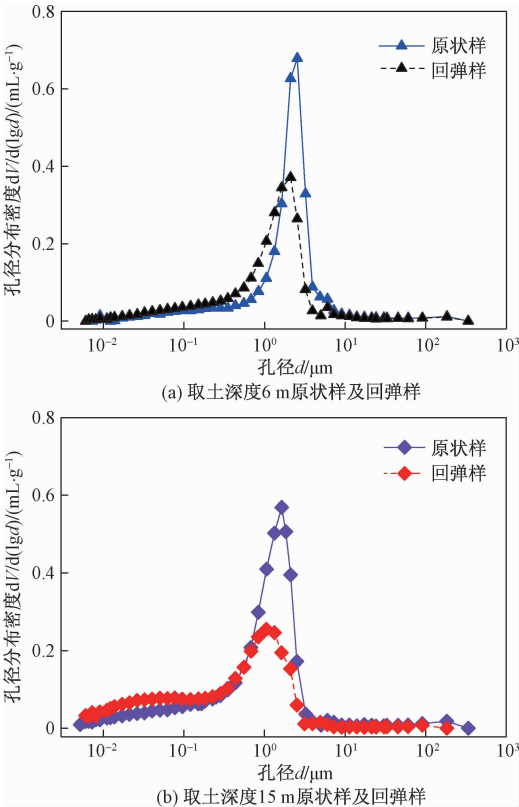


图 5 扬州黏性土原状样及回弹样孔径分布密度对比
Fig.5 Comparison of the pore-size distributions of the undisturbed and rebounded Yangzhou clayey soils

表 2 扬州黏性土原状样及其受 1 600 kPa 固结压力后并回弹至 3 kPa 的孔径分布

取样		累计孔隙体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	孔隙体积分布/(cm ³ ·g ⁻¹)(孔隙体积百分含量/%)			
深度/m	固结压力/ kPa		微孔隙 d<0.1 μm	小孔隙 0.1 μm≤d<1.0 μm	中孔隙 1.0 μm≤d<10.0 μm	大孔隙 d≥10.0 μm
3	原状样	0.199	0.007(3.5)	0.014(7.0)	0.148(74.4)	0.030(15.1)
	回弹至 3 kPa	0.187	0.004(2.1)	0.024(12.8)	0.134(71.7)	0.025(13.4)
6	原状样	0.297	0.010(3.4)	0.044(14.8)	0.226(76.1)	0.017(5.7)
	回弹至 3 kPa	0.260	0.019(7.3)	0.068(26.2)	0.162(62.3)	0.011(4.2)
9	原状样	0.283	0.008(2.8)	0.045(15.9)	0.207(73.1)	0.023(8.1)
	回弹至 3 kPa	0.268	0.011(4.1)	0.047(17.5)	0.183(68.3)	0.027(10.1)
12	原状样	0.464	0.052(11.2)	0.176(37.9)	0.221(47.6)	0.015(3.2)
	回弹至 3 kPa	0.294	0.064(21.8)	0.166(56.5)	0.048(16.3)	0.016(5.4)
15	原状样	0.490	0.058(11.8)	0.136(27.8)	0.272(55.5)	0.024(4.9)
	回弹至 3 kPa	0.301	0.083(27.6)	0.118(39.2)	0.090(29.9)	0.010(3.3)
18	原状样	0.364	0.035(9.6)	0.126(34.6)	0.190(52.2)	0.013(3.6)
	回弹至 3 kPa	0.259	0.042(16.2)	0.162(62.5)	0.036(13.9)	0.019(7.4)
21	原状样	0.202	0.017(8.4)	0.033(16.3)	0.135(66.8)	0.017(8.4)
	回弹至 3 kPa	0.170	0.015(8.8)	0.039(22.9)	0.101(59.4)	0.015(8.8)

参考文献(References):

[1] 施斌,李生林,TOLKACHEV M. 粘性土微观结构 SEM 图象的定量研究[J]. 中国科学(A 辑), 1995, 25(6): 666 - 672. [SHI B, LI S L, TOLKACHEV M. Quantitative study of SEM images of cohesive soil microstructure [J]. Chinese Science (Series A), 1995, 25(6): 666 - 672. (in Chinese)]

[2] 成玉祥,杜东菊,李忠良. 结构性吹填土剪切破坏的微结构效应[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 32 - 35. [CHENG Y X, DU D J, LI Z L. Micro-structural effect of shear failure in structured hydraulic fill [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(1): 32 - 35. (in Chinese)]

- [3] 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 X W, KONG L W, WANG J. Experimental study of SEM-EDS for cementation bond characteristics of Zhanjiang clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (Sup2): 195 - 203. (in Chinese)]
- [4] BUTTRESS A J, GRENFELL J A, AIREY G D. Accelerated swell testing of artificial sulfate bearing lime stabilised cohesive soils [J]. Materials and Structures, 2015, 48(11): 3635 - 3655.
- [5] 崔素丽, 黄森, 韩琳, 等. 水泥窑灰改性黄土的湿陷性和强度特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 73 - 78. [CUI S L, HUANG S, HAN L, et al. A study of the collapsibility and strength property of loess stabilized by cement kiln ash [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 73 - 78. (in Chinese)]
- [6] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1427 - 1430. [TAN Y Z, KONG L W, GUO A G, et al. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1427 - 1430. (in Chinese)]
- [7] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 江苏太仓浅部淤泥质土层的工程地质特征[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 43 - 47. [ZHANG Y, XUE Y Q, WU J C, et al. Engineering geological characteristics of shallow mucky soil in Taicang area, Jiangsu Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 43 - 47. (in Chinese)]
- [8] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Change in pore size distribution due to consolidation of clays [J]. Géotechnique, 1989, 39(1): 159 - 167.
- [9] GRIFFITHS F J, JOSHI R C. Change in pore size distribution owing to secondary consolidation of clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 20 - 24.
- [10] NINJGARAV E, CHUNG S G, JANG W Y, et al. Pore size distribution of Pusan clay measured by mercury intrusion porosimetry [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2007, 11(3): 133 - 139.
- [11] 任克彬, 王博, 李新明, 等. 制样方法对粉土力学特性及孔隙特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 842 - 851. [REN K B, WANG B, LI X M, et al. Influence of the compaction procedure on mechanical behaviors and pore characteristics of silts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 842 - 851. (in Chinese)]
- [12] OUALMAKRAN M, MERCATORIS B C N, FRANÇOIS B. Pore-size distribution of a compacted silty soil after compaction, saturation, and loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(12): 1902 - 1909.
- [13] ALONSO E E, PINYOL N M, GENS A. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling [J]. Géotechnique, 2013, 63(6): 463 - 478.
- [14] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. [Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute. Manual of geotechnical testing [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)]
- [15] 张平, 房营光, 闫小庆, 等. 不同干燥方法对重塑膨润土压汞试验用土样的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 388 - 391. [ZHANG P, FANG Y G, YAN X Q, et al. Study of different dry methods for drying remolded bentonite sample with mercury intrusion test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 388 - 391. (in Chinese)]
- [16] 刘汉民, 孟斌, 吴恒, 等. 冷冻与置换干燥法制备海积软土压汞试样的制备效果对比试验 [C]//第十七届中国海洋(案)工程学术讨论会论文集. 南宁: 海洋出版社, 2015. [LIU H M, MENG B, WU H, et al. Comparative experiment on preparation of mercury intrusion samples from sea soft soil by freezing and displacement drying method [C]. Proceedings of the 17th China Ocean (Case) Engineering Symposium. Nanning: Ocean Press, 2015. (in Chinese)]
- [17] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921, 7(4): 115 - 116.
- [18] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 573 - 578. [LU H B, WANG R, ZHAO Y L, et al. Study of structure characteristics evolution of soft clay by pore size distribution test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 573 - 578. (in Chinese)]
- [19] 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 H Y, JIANG Y, LU P Y, 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. (in Chinese)]
- [20] KONG L W, LUO H X, TAN L R. Fractal study on pore space distribution of red clay in China [C]//10th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: International Academic Publishers, 1995: 139 - 142.