

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.016



电渗作用下软土细观孔隙结构

陶燕丽^{1,2a,2b}, 龚晓南^{2b}, 周建^{2b}, 罗战友^{1,2b}, 祝行¹

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023;

2. 浙江大学 a. 软弱土与环境土工教育部重点实验室; b. 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘要:软土细观孔隙结构变化是其宏观变形的根本原因。为了探索电渗中软土细观孔隙结构变化以及与宏观变形之间的关联机制,采用杭州软土开展电渗试验,监测了电渗中土体孔隙结构分布特征和含水量,从定性和定量两个方面对试验结果进行分析。研究发现,电渗过程中,粘土颗粒重新排列形成面-面接触的片堆结构,土体孔隙比降低,孔隙空间形态变光滑,结构复杂性减弱。通过含水量计算所得孔隙比较实测孔隙比小,说明电渗排水量大于土体收缩量,这是因为,电渗本质为离子带动水分子的迁移,不能直接引起土骨架压缩。实际工程中,电渗法应与堆载、真空预压等联合使用。

关键词:电渗法;细观孔隙结构;孔隙比;电渗排水量;土体收缩量

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0110-07

Mesoscopic pore structure of soft soil during electro-osmosis

Tao Yanli^{1,2a,2b}, Gong Xiaonan^{2b}, Zhou Jian^{2b}, Luo Zhanyou^{1,2b}, Zhu Hang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou

310023, P. R. China; 2a. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education;

2b. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: Variation of mesoscopic pore structure for soft soils is the primary cause of the macroscopical deformation. In order to study the variation of mesoscopic pore structure of soft soil as well as the correlative mechanism with macroscopical deformation during electro-osmosis, some electro-osmotic experiments were performed using Hangzhou soft soils. Pore structure distribution features and water contents of the soils were monitored during the experiments. The results were explained from the qualitative and quantitative perspectives. Clay particles were re-arranged into sheet-packed structure with plane-plane surfaces. The soil pore contracted, with resulted to decreasing of the void ratio, meanwhile the pores turned smoother in spatial forms and less complex in structure. Moreover, void ratios of the soil were

收稿日期:2017-10-02

基金项目:国家自然科学基金(41572299, 51478425, 51708507);浙江省自然科学基金(LQ17E090001);浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室开放基金(2016P01);浙江科技学院人才建设经费项目(F701104F05)

作者简介:陶燕丽(1989-),女,博士,主要从事地基处理及环境岩土工程研究, E-mail: tmgctyl@163.com。

周建(通信作者),女,教授,博士生导师, E-mail: zjelim@zju.edu.cn。

Received:2017-10-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41572299, 51478425, 51708507); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ17E090001); Program of Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University (No. 2016P01); Program of Talent Construction (No. F701104F05)

Author brief: Tao Yanli (1989-), PhD, main research interests: ground improvement, environmental geotechnics, E-mail: tmgctyl@163.com.

Zhou Jian (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zjelim@zju.edu.cn.

computed through water content and the results were smaller than the measured values, which illustrated the electro-osmotic dewatering was larger than compression amount of soil. The fundamental cause goes to the fact that electro-osmosis derives from the migration of water dragged by ions and fails to generate compression of the soil skeleton directly. Electro-osmosis is recommended to be combined with surcharge and vacuum preloading in real practice.

Keywords: electro-osmosis; mesoscopic pore structure; void ratio; electro-osmotic dewatering; compression amount of soil

经济的飞速发展使得土地资源短缺日趋严重,围海造陆工程因此得以蓬勃发展,但由此产生大量吹填土或疏浚土堆积形成软土地基亟需有效处理。传统地基处理方法,如堆载预压或真空预压,受限于软土的水力渗透系数,往往难以达到预期目标,所以,寻求有效的新工艺或新方法对于围海造陆工程的顺利开展具有重大意义。电渗法通过在插入土体的电极上通电,加速土体排水固结,被认为是处理高含水量、低渗透性软土地基很有效的方法^[1-4]。研究电渗法对吹填土或疏浚土等软土的加固作用成为热点之一^[5-7]。

土体内部孔隙结构特征及分布情况是其宏观变形的根本原因,也是决定土体物理力学性质的重要因素,这方面研究可通过电镜扫描试验开展^[8-10]。Delage^[11]通过电子显微镜(SEM)研究了加拿大土壤敏感性与微观结构的联系;Lee等^[12]采用SEM技术研究了尾矿与粉煤灰混合物的孔隙结构;Chai等^[13]通过SEM技术观察土体孔隙结构研究日本Ariake粘土的渗透性能。已有文献中,SEM技术大多用于土体变形、强度或渗透特性的研究,较少用于电渗法中。张碧龙等^[14]通过试验研究了软土在真空预压-电渗联合作用下孔隙结构的变化;而单独电渗作用下软土孔隙结构的变化机制还未有报道。特别指出,已有文献对土体孔隙结构尺度的描述并不一致,如王子健等^[9]视其为细观尺度,曹洋等^[10]、Delage^[11]、Lee等^[12]、Chai等^[13]、张碧龙等^[14]视其为微观尺度。在细观力学中,细观结构被定义为光学或常规电子显微镜下可见的材料细微结构^[15],据此定义,土体孔隙结构应属细观尺度,因此,本文采用“细观孔隙结构”的描述。

综上,研究电渗过程中土体孔隙结构变化是从细观尺度上对土体变形机制和加固机理的揭示,已有文献在这方面少有报道。因此,本文采用杭州软土开展室内电渗试验和细观孔隙结构试验,监测了电渗中土体孔隙结构分布特征和含水量变化,研究电渗作用下软土细观结构变化,探索土体细观结构和宏观性质的关联机制,目的是基于细观孔隙结构

揭示电渗法对软土的加固机理。

1 电渗试验

1.1 试验设计

为了实现试验结果的互为佐证,分别采用铁和铜电极开展两组电渗试验(记为T1和T2)。试验土取自杭州市董家路一基坑工程,其基本物理力学参数见表1。将所取土样与水拌合形成饱和和重塑土样来模拟疏浚土。参考已有文献^[1-7]中的数据,设置试验参数为:T1和T2试验土体初始含水量分别为99.7%和99.2%,电源电压30V,相应的电势梯度为1.58V/cm,通电到29h时,排水量已连续5h低于总排水量的5%,故设置通电时间29h。试验后分别在离阳极板、阴极板5cm处取土,作为含水量监测和细观孔隙结构试验试样。

表1 原状土的基本物理指标

Table1 Physical parameters of original soil in this research

质量含水量/%	土粒比重	孔隙比	液限/%	塑限/%	颗粒组成		
					砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%
58.3	2.75	1.76	45.4	24	7	32	61

1.2 试验设备

试验主体设备如图1所示,主要由试验模型箱、直流电源、电线等组成。模型箱(图1)为一有机玻璃箱,外边缘尺寸为230mm×110mm×105mm,由主槽和辅槽组成;主槽用来装载试验土体,内部尺寸为190mm×100mm×100mm;辅槽用来收集试验排出的水,其下设有小孔,在小孔下放一烧杯,试验时汇聚到小槽的水会通过小孔流到烧杯中而排出。试验采用板状电极,其尺寸为100mm×100mm×4mm,阴极板上均匀打设若干直径5mm的小孔以利于排水。试验采用GWSPD-3606型电源提供稳压直流电。

关于电渗中土体细观结构和宏观性质变化,前者通过土体孔隙结构体现,后者通过含水量体现。土体细观孔隙结构通过细观结构试验监测,需要用到的设备软件有:日立S-3500N扫描电子显微镜、孔

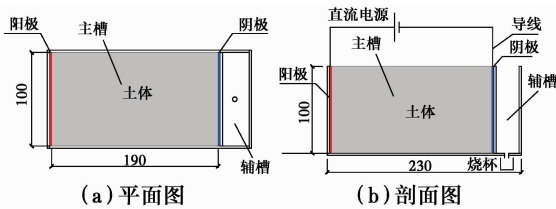


图 1 电渗装置示意图

Fig. 1 The device diagram for electro-osmosis

隙分析软件(PCAS)。土壤含水量测试遵照《土工试验教程》(SL 237—1999),需要用到的试验设备有:土样盒、烘箱、电子天平。

1.3 试验步骤

电渗试验步骤为:1)取适量原状土和水,用电动搅拌机充分搅拌均匀,制成重塑土样,静置一昼夜后测量重塑土样含水量;2)连接导线、电源和电极,在阴极包裹土工布,润湿电极后放入试验箱两端;3)分层装填土样,并在出水口放置烧杯以盛装排水;4)调节电源输出到所需电压,接通电路,开始试验;5)通电 29 h,停止试验,断开电源,停止试验;6)对试验后土体取样进行含水量监测和细观结构试验;7)试验结束,拆除装置。

2 土体细观孔隙结构试验

2.1 试验原理

细观孔隙结构试验由电镜扫描和孔隙分析两部分构成。首先,利用扫描电镜监测土体孔隙结构得到孔隙结构放大 SEM 图像,然后,采用孔隙分析软件对孔隙形态进行定性和定量分析,得到孔隙结构参数,用于土壤细观结构分析比较。其中,孔隙分析采用刘春等^[13]开发的 PCAS 软件,该软件采用细观定量测试技术,利用分形几何学有关理论对土体孔隙结构进行定量分析,其实用性已得到众多文献^[8-10,14-15]的验证。

2.2 试样制备

试验前取重塑土、试验后分别在各试验距阳极和阴极板 5 cm 处取土开展电镜扫描试验。由于 T1 和 T2 试验采用同一批重塑土,土样含水量相差仅为 0.5%,可视为相同土样,故试验仅对 T1 试验前重塑土取样开展孔隙结构监测。

取样时,用超薄刀片小心切取试样,逐渐切削土样制成 5 mm×5 mm×10 mm(高度×宽度×长度)的样品,放入铝盒内并加入液氮在 -190 °C 下冷冻,在液氮挥发完之前将土样移入真空干燥仪内,在 -44 °C 下进行抽真空干燥 24 h,直接升华土中非结晶冰。冻干后,小心将土样掰断,尽量保持断面平

整,并作为电镜扫描的观察面。

2.3 电镜扫描

对制备好的试样观察面进行喷金镀膜,以增强其导电性、方便扫描;然后将试样放在扫描电镜观察台上,先在 500 倍的较低放大倍数下观察,选取合适区域;再提高放大倍数至合适值,得到代表性 SEM 图像,作为孔隙结构分析对象。

2.4 定量分析

采用 PCAS 软件对 SEM 图像进行二值化和矢量化分析,以实现对其孔隙结构的定量评价。特别指出,软件参数输入对分析结果具有较大影响,试验通过统一输入参数控制各试验分析过程。具体定量评价过程主要从 3 个方面展开:

1)对结构单元体或孔隙尺度及其分布特征的评价,如结构单元体或孔隙面积、周长、粒径、孔径、表观孔隙比及基于分形理论得到的孔隙度分维值等。

2)对结构单元体或孔隙排列特征的定量评价,如方向角、定向角、定向频率、概率熵及定向分维数。

3)对结构单元体或孔隙形态特征的定量评价,如圆形成度、各项异性率、形状系数及孔隙形态分形维数等。

针对以上 3 个方面,将分别采用表观孔隙比、平均孔隙面积、概率熵和孔隙形态分形维数 4 个典型指标,以研究土体孔隙大小变化、孔隙结构的有序性以及孔隙形态变化情况,实现孔隙结构的定量分析。表 2 给出了各指标的定义。

表 2 土体细观结构定量评价指标

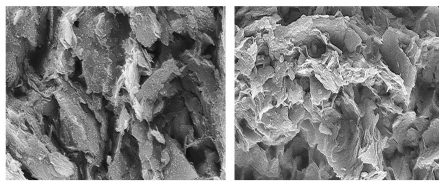
Table 2 Quantitative evaluation indices for the soil mesostructure

定量评价指标	定义	特性
表观孔隙比 e_t	$e_t = S_v / S_s$, SEM 图像上孔隙面积 (S_v) 与颗粒面积 (S_s) 的比值	二维参数,能间接反映三维空间孔隙比变化
平均孔隙面积 S_a	$S_a = \sum_{i=1}^n S_{vi} / n$, S_{vi} 为 SEM 图像上第 i 个孔隙面积; n 为孔隙数	二维参数,能间接反映三维空间孔隙体积变化
概率熵 H_m	$H_m = - \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M} \cdot \frac{\ln(\frac{m_i}{M})}{\ln n}$	反应结构单元体有序性,描述孔隙的整体排列情况,取值范围 0~1. H_m 越大,孔隙排列越混乱,有序性越差
孔隙形态分形维数 D_m	$D_m = K_m \times 2$, K_m 双对数坐标下孔隙等效面积与周长拟合直线的斜率	D_m 越大,孔隙结构越复杂,孔隙的空间形貌特征偏离光滑表面的程度越远

3 试验结果与分析

3.1 孔隙结构定性分析

取重塑土样和代表性电渗土样进行电镜扫描。为了获得对比明显的结果,扫描放大倍数取值 2 000,重塑土样采用 T1 试验前土体,代表性电渗土样选用 T1 试验后阳极附近土体,所得重塑土样和电渗土样 SEM 图像分别如图 2(a)、(b)所示。试验前重塑土样细观上主要为片状结构面-边排列形成片架型凝聚结构,电渗土样中片状结构重新定向排列,形成面-面接触的片堆型凝聚结构。可见,电渗作用对土体细观结构组成和排列具有重要影响。



(a) 重塑土样 (b) 电渗土样

图 2 SEM 图像

Fig. 2 Schematic diagram of the SEM picture

定性分析结果表明:电渗过程中,粘土颗粒由片状结构面-边为主的排列方式转变为片状结构面-面排列,这可能与电场的存在有关。原土样中,粘土颗粒在范德华力、库仑力等作用下处于平衡状态,在外加电场作用下,这种平衡状态被打破,粘土颗粒重新定向排列,而电场力在量级上比范德华力等内力大得多,使得粘土颗粒集聚逐渐形成以电场力为导向的面-面接触型片堆结构。

3.2 孔隙结构定量分析

通过电镜扫描得到 T1 试验前重塑土样、T1 和 T2 试验后阳极和阴极处土样 SEM 图像,采用 PCAS 软件对 SEM 图像进行二值化和矢量化处理,分析得到电渗前后土体表观孔隙比、平均孔隙面积、孔隙形态分维数和孔隙概率熵,分别绘于图 3~图 6 中,以便更直观地比较分析。

图 3 和图 4 显示,表观孔隙比和平均孔隙面积呈现类似的变化规律,即电渗后土体表观孔隙比和平均孔隙面积较重塑土样低,且各试验阴极土体数值比阳极土体要高;电渗过程中,土体表观孔隙比和平均孔隙面积均会降低,阳极处土体的降低幅度更为明显。图 5 表明,电渗土体孔隙形态分维数较重塑土小,说明经电渗处理后,土体孔隙的空间形态有变光滑的趋势,结构复杂性减弱。图 6 中电渗土样

与重塑土样孔隙概率熵相近,可见,电渗作用对土体孔隙结构有序性的影响并不明显。

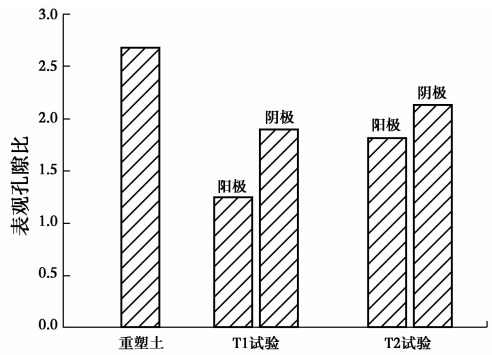


图 3 表观孔隙比

Fig. 3 Apparent void ratio

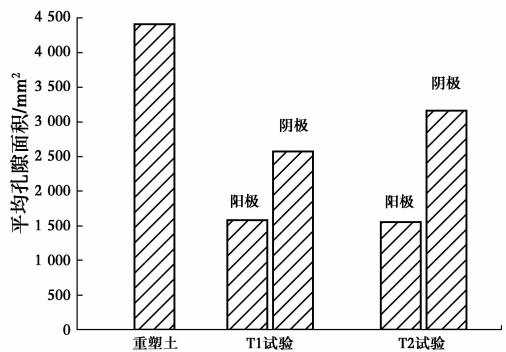


图 4 平均孔隙面积

Fig. 4 Average pore area

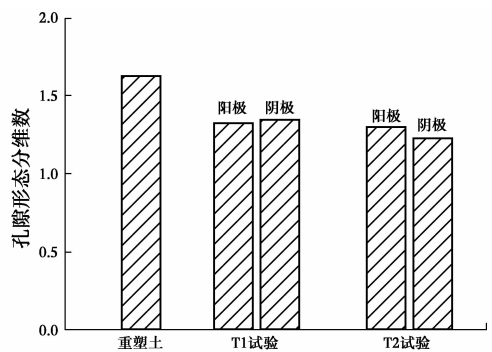


图 5 孔隙形态分维数

Fig. 5 Pore fractal dimension

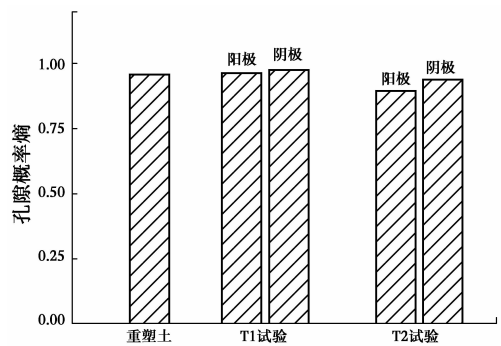


图 6 孔隙概率熵

Fig. 6 Pore probability entropy

3.3 表观孔隙比与计算孔隙比

通过孔隙结构分析得到表观孔隙比,所得数据反映了一定面积上孔隙集度情况,可视其为实测孔隙比。另外,可根据土体 3 项指标换算关系,通过含水量计算孔隙比,其计算式为

$$e = \frac{\omega d_s}{S_r} \quad (1)$$

式中: e 为孔隙比; ω 为含水量; S_r 为饱和度; d_s 为土颗粒比重。以下对实测表观孔隙比和计算孔隙比进行比较。

为了得到电渗后土体含水量数据,试验结束后分别在距离阳极和阴极 5 mm 处表层、中层和下层取样,取各处所得数值平均值作为该处含水量数值,得到 T1 试验阳极和阴极处含水量分别为 40.2% 和 64.0%, T1 试验分别为 49.0% 和 69.7%。若假设试验中排水量与土体孔隙压缩量相等,即土体饱和,则有 $S_r = 1, G_s = 2.75$, 根据上述含水量数据和式(1)计算孔隙比,将计算结果与表观孔隙比进行比较,如图 7 所示。

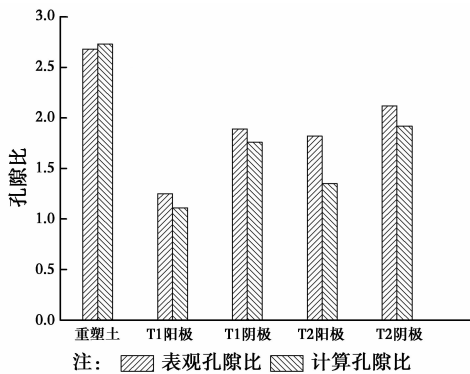


图 7 表观孔隙比与计算孔隙比

Fig. 7 Apparent and calculated void ratio

由图 7 可知,对于重塑土,表观孔隙比与计算孔隙比相近,说明试验结果可靠,而各组试验,不管是阳极处还是阴极处,计算孔隙比均小于表观孔隙比,即根据孔隙结构监测所得孔隙比大于通过含水量计算结果。Bergado 等^[16]通过实验得到类似的结果,他们采用导电 PVD 材料开展两种模型尺寸的室内电渗试验,监测了土体沉降和含水量的变化情况,并分别根据沉降和含水量计算得到土体的孔隙比,结果表明,根据含水量计算的孔隙比数值比根据沉降计算的要小。由于土颗粒和孔隙水不可压缩,土体沉降来源于孔隙压缩、孔隙比降低,沉降实为孔隙变化引起的宏观尺度上的响应,根据沉降计算结果和根据孔隙结构分析结果均代表土体实际孔隙变化。

此试验和 Bergado 等^[16]从不同角度得到类似结果,即电渗过程中,根据孔隙结构或沉降分析所得孔隙比较根据含水量计算结果大。

4 讨论

以上分析结果表明,电渗过程中随着水分的排出,孔隙得到压缩,孔隙比降低,同时,孔隙空间形态变光滑,结构复杂性减弱。同一组试验,阳极土体电渗作用比阴极土体明显,宏观上表现为含水量更小,微观上表现为孔隙比和孔隙面积降幅更大。但孔隙体积的减小与电渗排水量并不相等,这一点通过比较表观孔隙比和计算孔隙比可以看出,根据孔隙结构分析或沉降计算所得孔隙比较根据含水量计算结果大。因含水量和土颗粒比重固定,由式(1)分析可知,计算结果偏小唯一原因是饱和度偏大。可见,电渗过程中土体并不饱和,土体含水量的减少源于排水,孔隙比的降低或沉降宏观上表现为土体收缩,可见,电渗排水并不等效为土体收缩,即土体收缩量小于电渗排水量。

电渗中土体收缩量小于排水量,这与电渗的本质息息相关。图 8 给出了理想状态下电渗法与重力式方法对土体孔隙结构的影响。这里的理想状态指的是不考虑二者互相作用。对于重力式加固方法,如堆载或真空预压等,自由水和毛细水在超孔隙水压力作用下被排出,土体孔隙产生重分布,土体体积得到收缩(图 8(b))。不同于重力式方法,电渗法加固软土的本质在于离子带动水分子的迁移运动,这种迁移运动的源动力为施加在电极两端的电压所产生的电场力,因而,若假设土体自重为 0,笔者认为,电渗过程中土体孔隙将不产生压缩,只表现为水分在孔隙中的穿梭运动(图 8(c));这也是上述电渗排水量大于土体收缩量的根本原因。然而,实际电渗过程中,土体自重不可忽略,水迁移同时土体孔隙在重力作用下产生压缩,因而,随着电渗过程的开展,土体孔隙比和平均孔隙面积也会降低。

从机理上看,电渗的本质是离子带动水分子的迁移,与土骨架压缩并无直接关联。然而,土体收缩或沉降是地基处理的最终目的,如何实现电渗排水的同时土骨架有效收缩是电渗处理的关键之一。若将电渗法与外荷载联合作用,利用电渗法主动排水,外荷载引起超孔隙水压力、压缩土骨架,将能大大缓解电渗排水量与土体收缩量之间的差值,起到“优势互补”、“扬长避短”的作用。因此,实际工程中,电渗

法需与堆载、真空预压等联合使用。

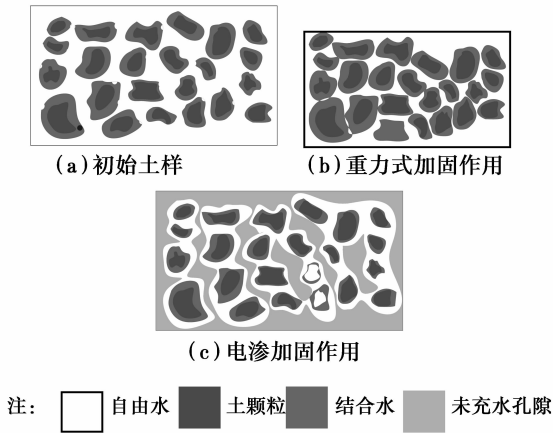


图8 电渗和重力式方法对土体孔隙结构的作用
Fig. 8 Effects of electro-osmosis and mechanical technique on the soil pore structure

5 结论

采用杭州软土开展电渗试验,研究电渗过程中土体细观孔隙结构变化及其与土体宏观变形之间的关联机制,从细观孔隙结构角度揭示电渗加固机理,得到以下结论:

- 1)电渗过程中,在电场力作用下,粘土颗粒重新定向排列,形成片状结构面-面接触的片堆结构。
- 2)电渗过程中,随着水分的排出,孔隙收缩,孔隙比降低,同时,孔隙空间形态变光滑,结构复杂性减弱。
- 3)电渗过程中孔隙收缩量小于排水量,根本原因源于电渗本质,即离子带动水分子的迁移运动。
- 4)实际工程中,电渗法需与堆载或真空预压等工法联合使用,以减少电渗排水量与土体收缩量的差值,实现电渗法“主动排水”,堆载或真空预压“压缩土骨架”的优势互补作用。

参考文献:

[1] 洪何清, 胡黎明, GLENDINNING S, 等. 外荷载作用下的软粘土电渗试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 808-812.
HONG H Q, HU L M, GLENDINNING S, et al. Electro-osmosis experimental of soft clay with external loading [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 808-812. (in Chinese)

[2] CASSARANDE L. Electro-osmosis in soils [J]. Geotechnique, 1949, 1(3): 159-177.

[3] 焦丹, 龚晓南, 李瑛. 电渗法加固软土地基试验研究[J].

岩石力学与工程学报, 2011, 30(Sup1): 3208-3216.

JIAO D, GONG X N, LI Y. Experimental study of consolidation of soft clay using electro-osmosis method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup1): 3208-3216. (in Chinese)

[4] JONES C J F P, LAMONT-BLACK J, GLENDINNING S. Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4): 381-390.

[5] 陈雄峰, 荆一凤, 吕鑑, 等. 电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 54-58.
CHEN X F, JING Y F, LV J, et al. The research of environmental dredged sludge dewatering in Taihu Lake by electro-osmosis [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5): 54-58. (in Chinese)

[6] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软粘土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 95-99.
WANG X Q, ZOU W L. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 95-99. (in Chinese)

[7] 沈扬, 陶明安, 刘志浩, 等. 电渗复合真空预压覆水预压法加固吹填土地基的应用研究[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(3): 43-46.
SHEN Y, TAO M A, LIU Z H, et al. Application and research of combination of electro-osmotic method and vacuum-overlying water preloading method for strengthening dredger fill [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2012, 29(3): 43-46. (in Chinese)

[8] LIU C, SHI B, ZHOU J. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials [J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97-106.

[9] 王子健, 刘斯宏, 王怡舒, 等. 不同应力路径下颗粒材料细观结构分析[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 771-778.
WANG Z J, LIU S H, WANG Y S, et al. Analysis on microstructure of granular materials under different stress paths [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 771-778. (in Chinese)

[10] 曹洋, 周建, 严佳佳. 考虑循环应力比和频率影响的动荷载下软土微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 735-743.
CAO Y, ZHOU J, YAN J J. Study of microstructures

- of soft clay under dynamic loading considering effect of cyclic stress ratio and frequency [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 735-743. (in Chinese)
- [11] DELAGE P A. Microstructure approach to the sensitivity and compressibility of some Eastern Canada sensitive clays [J]. *Géotechnique*, 2010, 60 (5): 353-368.
- [12] LEE J K, SHANG J Q. Evolution of thermal and mechanical properties of mine tailings and fly ash mixtures during curing period [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51: 570-582.
- [13] CHAI J, JIA R, NIE J, et al. 1D deformation induced permeability and microstructural anisotropy of Ariake clays [J]. *Geomechanics & Engineering*, 2015, 8(1): 81-95.
- [14] 张碧龙,李洪艺,张澄博. 珠三角软土在真空预压联合电动加固下微观结构变化研究[J]. *岩土工程技术*, 2015, 29(2): 90-94.
- ZHANG B L, LI H Y, ZHANG C B. Study on microscopic characters of soft soil in the pearl river delta vacuum preloading and electro-kinetics experiment [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2015, 29 (2): 90-94. (in Chinese)
- [15] 张研,韩林. 细观力学基础[D]. 北京: 科学出版社, 2014.
- ZHANG Y, HAN L. Foundation of mesomechanisc [D]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [16] BERGADO D T, BALASUBRAMANIAM A S, PATAWARAN M A B, et al. Electroosmotic consolidation of soft Bangkok clay using copper and carbon electrodes with PVD [J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(3): 277-288.

(编辑 王秀玲)