

DOI: 10.11779/CJGE2021S2009

# 钙质软土的真空预压与电渗固结室内试验研究

王竟州<sup>1</sup>, 丁选明<sup>\*1, 2</sup>, 蒋春勇<sup>1</sup>, 方华强<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 中国南海及“一带一路”沿线国家分布着大量以细颗粒含量为主的钙质软土, 如何进行排水固结是值得研究的课题。以重塑钙质软土为研究对象, 采用电动土工材料(EKG)电极, 进行了真空预压与电渗固结室内试验, 得到了试验表观现象、排水与土体含水率的关系、电渗固结试验过程中电流与离子的关系以及真空预压后土样的一维压缩特性, 并对两种加固方法在钙质软土排水固结中的适用性进行了探讨。试验结果表明: 相比于电渗固结, 真空预压固结是一种高效率, 处理效果均匀, 且处理后钙质软土承载性能明显提高的排水固结方法。

**关键词:** 钙质软土; 真空预压固结; 电渗固结; EKG 电极; 试验研究

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0036-05

**作者简介:** 王竟州(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事钙质软土的排水加固方法与固结机理方面的研究工作。E-mail: wangjingzhou@cqu.edu.cn。

## Laboratory tests on vacuum preloading and electro-osmotic consolidation of calcareous soft soil

WANG Jing-zhou<sup>1</sup>, DING Xuan-ming<sup>1, 2</sup>, JIANG Chun-yong<sup>1</sup>, FANG Hua-qiang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for

Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The calcareous soft soil mainly with fine particle content is distributed in the South China Sea and countries along the the Belt and Road. How to drain and consolidate is a subject worthy of study. Taking the remolded calcareous soft soil as the research object, the vacuum preloading and electro-osmotic consolidation tests are carried out with electro-kinetic geosynthetic (EKG) electrode. The apparent phenomena of the tests, the relationship between drainage and water content of soil, the relationship between current and ions during the electro-osmotic consolidation tests and the one-dimensional compression characteristics of soil samples after vacuum preloading are obtained. The applicability of the two reinforcement methods in drainage consolidation of the calcareous soft soil is discussed. The results show that compared with the electro-osmotic consolidation, the vacuum preloading consolidation is a drainage consolidation method with high efficiency, uniform treatment effect and significantly improved bearing capacity of the calcareous soft soil after treatment.

**Key words:** calcareous soft soil; vacuum preloading consolidation; electro-osmosis consolidation; electro-kinetic geosynthetic electrode; laboratory test

## 0 引言

随着“海洋强国”战略和“一带一路”倡议的推进, 中国南海和“一带一路”沿线国家正进行着陆域吹填活动, 陆域吹填区域存在着大量的珊瑚碎屑地基。在远海吹填造陆的过程中, 常用的大型绞吸式挖泥船对珊瑚礁的粉碎并不均匀, 颗粒更细、更均匀的钙质软土, 由于重量较小被吹填到离泵较远的位置, 同时沉积速度也更慢, 导致人工岛的吹填土在水平与垂直的空间上分布不均匀, 这样的情况往往难以避免。另外, 在实际工程中, 吹填不是一次性而是分层完成的, 这就导致钙质软土在人工岛礁的各处形成夹层。由于

从海水中吹填出来的钙质软土往往具有较高含水率, 不同于钙质砂, 钙质软土较小的粒径降低了其渗透系数, 使排水固结变得缓慢, 这将使钙质软土富集的人工岛区域具有更大的工后沉降。如果采取合理的排水加固方法, 钙质软土将会具有更好的物理力学性质, 从而消除吹填土地基的软硬不均匀隐患。

在钙质软土现有的主要研究中, 刘明等<sup>[1]</sup>分析了印度洋底钙质软泥的物质组成, 发现其富含 CaO 和

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878103)

收稿日期: 2021-08-17

\*通信作者(E-mail: dxmhhu@163.com)

Sr. 刘崇权等<sup>[2]</sup>通过颗粒类型、泥灰质含量、胶结状况以及孔隙度来描述钙质土的骨架结构，并总结了钙质土孔隙比高、相对密度大、 $\text{CaCO}_3$ 含量高的物理力学性质。沈扬等<sup>[3]</sup>根据斯托克公式推导了不同初始浓度下南海珊瑚泥等速沉积阶段的理论沉速。朱长歧等<sup>[4]</sup>发现了钙质土的电导率与渗透性之间的相关关系，并推导了两者之间的经验公式。王建平等<sup>[5]</sup>采用真空预压与强夯相结合的方法对珊瑚碎屑质土进行加固，在3遍循环处理后效果良好。现有的报道中，对钙质软土的物质组成、骨架结构、渗透特性、物理力学性质和工程响应从微观到宏观的研究正处于起步阶段，对其排水固结方法的研究所见甚少。

笔者试图借鉴前人对软土加固的思路和方法来探究该问题，发现真空预压、电渗固结为可行的方法。真空预压方面，叶柏荣等<sup>[6]</sup>针对当时软土真空预压的过程中出现的问题改进了真空装置以及覆膜工艺，并进行了现场原位试验，加固效果十分显著。一直发展到近年来越来越多的学者<sup>[7-8]</sup>使用塑料排水板作为竖向排水体进行室内真空预压固结试验，均得到了较好的效果。电渗方面，不少文献报道了以土样自身的对比<sup>[9]</sup>以及以通电方式、电极间距<sup>[10]</sup>与电极材料<sup>[11]</sup>等外部因素为变量的室内电渗固结试验，在室内试验层面上验证了其适用性。钙质软土是否也能通过真空预压、电渗固结的方式进行排水加固，是本文拟解决和探讨的问题。故本文根据绞吸式挖泥船的粉碎原理研发出了一种钙质软土的室内制备方法，并研制出了一套可以同时支持真空预压与电渗固结室内试验的装置，通过室内试验的方法，对该问题进行研究。

## 1 试验方案设计

### 1.1 钙质软土的制备与性质

为了在后续研究中保持试样的一致性，通过人工制备了大量钙质软土。将粒径均小于2 mm钙质砂自然风干后，每40 kg倒入振动磨中粉碎50 min，再添加质量不超过5%的高岭土作为添加剂，得到人工制备的钙质软土。将自来水与钙质软土按60%含水率的配比依次倒入不锈钢桶中，采用手持式搅拌机搅拌均匀制得重塑土样，其为流泥状，承载力几乎为0。其液限为28.0，塑限为17.0，级配曲线如图1所示。制得的钙质软土土样与相同含水率的天然钙质软土在颗粒级配、干密度、孔隙比与渗透系数等土性参数方面基本相同。

### 1.2 试验装置与设备

如图2所示，真空预压固结试验采用内径30 cm，高为33 cm的有机玻璃模型桶，土样填装完成后用透明物业塑料袋作为模型桶密封膜，试验时桶底渗水通

道关闭。真空排水通道采用电动土工材料(EKG)电极，长27 cm，其表面包裹有土工布。导电排水板宽10 cm，厚5 mm，底部的土工布用订书钉密封。导电排水管内径17 mm，外径28 mm，表面的土工布用扎带密封绑扎。于模型桶圆心插入1根导电排水管，圆周环向按正方形插入4片导电排水板。导电排水管与导电排水板间距13 cm，导电排水板外边缘与桶内壁留有2 mm左右的空隙。

电渗固结试验时将导电排水板作为阳极，导电排水管作为阴极。桶底设透水石，渗水通道开启。稳压直流电源最高可提供80 V电压、20 A电流。

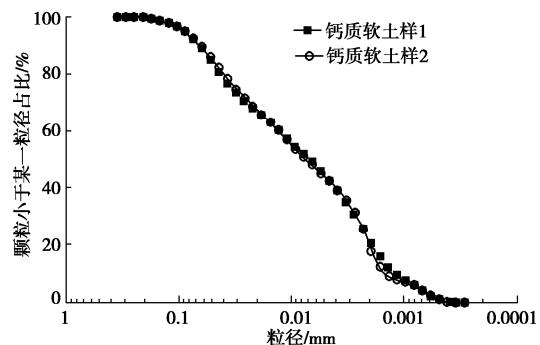


图1 钙质软土的级配曲线

Fig. 1 Grading curves of calcareous soft soil

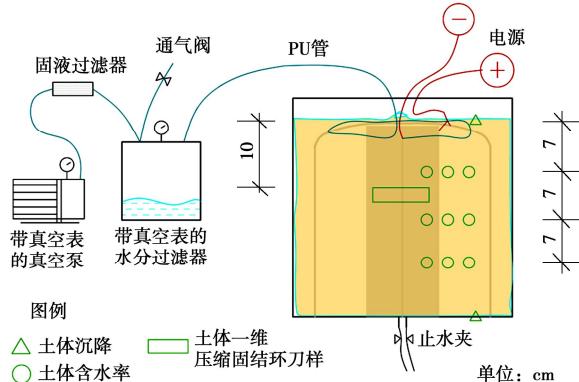


图2 设备连接与测点布设图

Fig. 2 Device connection and layout of measuring points

### 1.3 试验内容与步骤

真空预压固结试验时，真空泵的真空度设置为 $-70\sim-80$  kPa。每隔一定时间利用粘贴于模型桶壁两EKG电极板之间的直尺测量钙质软土的沉降。待水分过滤器的真空表示数归零后，将土体排出的水倒出测量排水体积。由测量间隔内的排水量除以测量时间间隔作为该段时间内的平均排水速率。当排水速率小于20 mL/h时则认为试验效果已不明显，终止试验。试验结束后，解开密封膜，利用取土钻依次下钻如图2所示深度取样，放入68℃烘箱中烘干10 h及其以上测量土体含水率。取样结束后，使用环刀取如图2所示

位置处的钙质软土样进行快速固结试验，施加的竖向荷载分别为 12.5, 50, 100, 200, 400, 800 kPa, 每级荷载施加 1.5 h, 使用百分表记录其在各级荷载下的竖向变形量。

电渗固结试验时，稳压直流电源的电压设为 13 V, 利用电源读取电路中的电流。每隔一定时间利用粘贴于模型桶壁两 EKG 电极板之间的直尺测量钙质软土的沉降。通过测量排水通道下烧杯中的水来测量排水体积、pH 与电导率。由测量间隔内的排水量除以测量时间间隔作为该段时间内的平均排水速率。当排水速率小于 5 mL/h 时则认为试验效果已不明显，终止试验。试验结束后，利用取土钻依次下钻如图 2 所示深度取样，放入 68℃烘箱中烘干 10 h 及其以上测量土体含水率。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 表观现象

真空预压组的膜下真空气度在 -78 kPa 左右，电渗组电压维持 13 V 不变，认为试验输入条件稳定。各工况的钙质软土表面竖向沉降如图 3 所示，钙质软土产生肉眼可见的明显沉降。真空预压使钙质软土在 7 h 内沉降达到 10 cm, 电渗使钙质软土在 14 h 内沉降不足 2 cm, 真空预压相比电渗而言能在更短时间内达到更大的沉降。

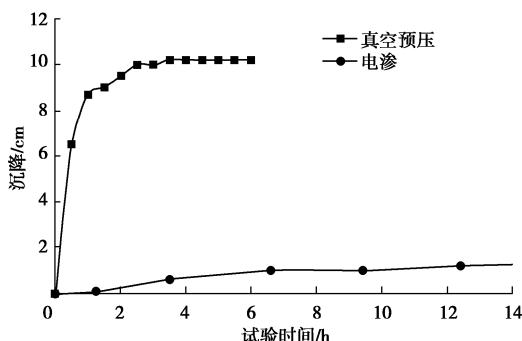


图 3 沉降-试验时间曲线

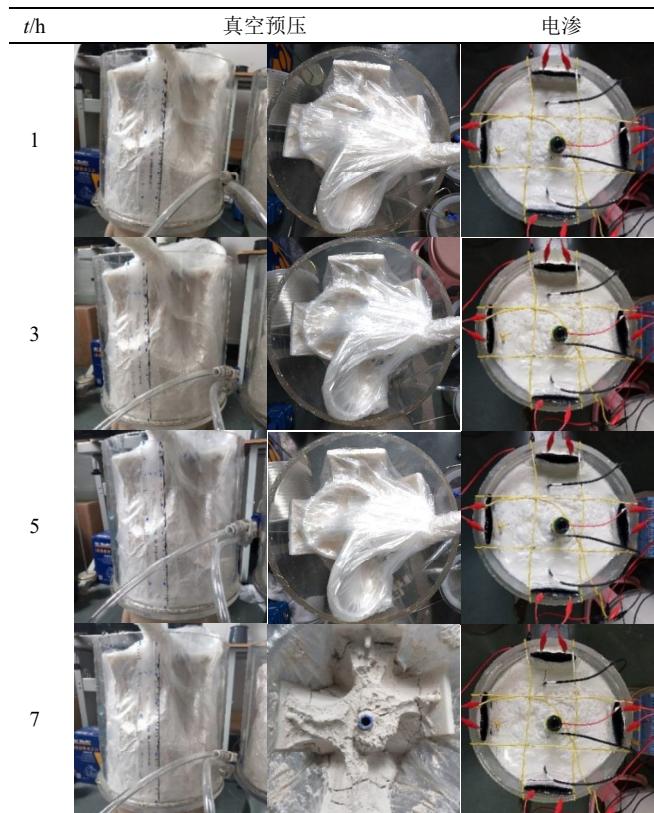
Fig. 3 Settlement-test time curves

在真空作用下钙质软土沿径向产生明显的沉降收缩，如表 1 所示。从 0.5 h 开始，真空预压组的导电排水板间的钙质软土沿径向与模型桶侧壁分离，共 4 处。从 1 h 起，真空预压组的钙质软土不再与模型桶壁接触。随着试验的进行，径向的收缩不断地发展，其中 0~1 h 最为明显，1~3 h 次之，3~7 h 基本稳定。在试验结束后(7 h)，真空预压组由于不均匀沉降在土体表面形成了张拉裂缝。直至真空预压组试验结束，电渗组也没有明显的裂缝与沉降收缩现象出现，说明在整个试验过程中，真空预压是剧烈而快速的，电渗是平

稳而缓慢的。

表 1 试验过程中的沉降收缩现象

Table 1 Settlement shrinkage during tests



### 2.2 排水与土体含水率

排水量随时间的变化曲线如图 4 所示。真空预压使钙质软土在 7 h 内累积排水量约 7500 mL, 电渗使钙质软土在 14 h 内累积排水量约 3700 mL, 真空预压组即使只拥有上表面一个排水面，相比电渗而言也能在更短的时间内排出更多的水。排水速率 - 时间曲线进一步佐证了上述结论，排水速率是呈类似于指数或对数规律递减的。

含水率取样烘干后测量的结果如表 2 所示。其中经过试验前的 24 h 静置，钙质软土的含水率平均降低了 10%左右。在电渗 36 h 后，土体的含水率平均降低了 10%左右。真空预压单独作用 7 h 后，土体的含水率降低 25%左右。沿模型桶的轴向，真空预压组钙质软土的含水率均低于电渗组，说明真空预压在土体含水率上的处理效果要好于电渗。真空预压组钙质软土的含水率由浅到深逐渐增高，这与电渗组所反映出的规律刚好相反，主要是因为真空预压组的排水表面在顶表面，电渗组的排水表面在底表面。从轴向的差异量来看，电渗组最大的顶、底含水量差异高达 10%左右，而真空预压组最大的顶、底含水量差异在 3%左右，说明经真空预压处理后的钙质软土沿深度方向含水分布更均匀。沿模型桶的径向，真空预压组钙质软土的含水率差别不大，比较均匀。电渗组含水率由外

围向中心逐渐增高。这是因为持续的正向通电(外正内负)使水流朝着中心导电排水管流动,并在桶中心富集。

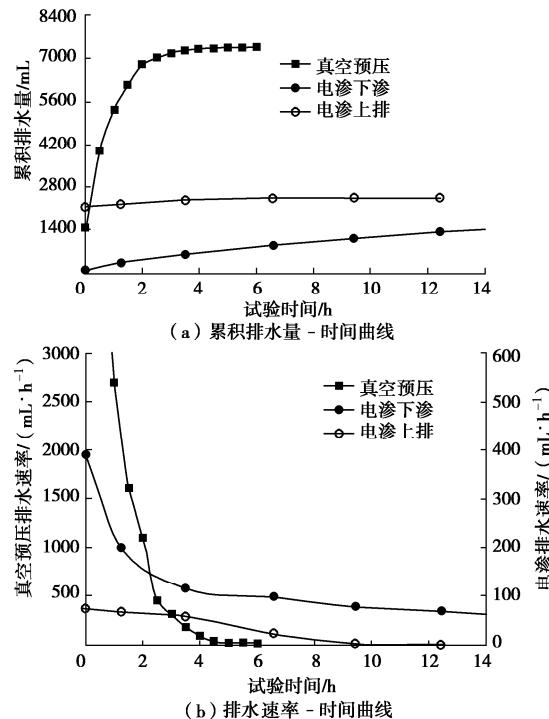


图 4 排水量变化曲线

Fig. 4 Change curves of drainage

表 2 钙质软土取样含水率降低量

Table 2 Reduction of water content in calcareous soft soil samples

取样位置	真空预压组			电渗组		
	外围	中部	圆心	外围	中部	圆心
浅层	35.1	34.7	34.8	19.3	20.2	7.7
中层	34.5	34.1	34.4	21.3	23.5	13.9
深层	35.0	34.5	34.1	29.0	30.1	12.3

### 2.3 电渗固结试验实时电流、pH 与电导率

电流在 0~4 h 由 0.24 A 增大至 0.3 A, 在随后的 36 h 中减小为 0.24 A, 认为可能是由于水与离子需要迁移一段合理的时间才能形成联通阴阳两极的通路, 或者说这样的通路数量才能达到最大化。而水与离子在电渗的过程中不断消耗导致了试验后期电流的不断降低。

pH、电导率随时间的变化曲线如图 5 所示, 排水呈碱性, pH 的快速上升主要是排水速率的快速下降引起的。电导率呈现出先增大后减小再增大的趋势。曲线的先增后减一方面可以部分从电流的先增后减得到印证, 电导率越大, 理应电流越大。但是两者受含水率影响的变化不同, 这是电导率与电流在曲线形状上差异的原因。另一方面, 在通电过程中, 离子迁移速度比水快, 故通电伊始, 离子在水中迅速移动, 顺着

水排出, 导致电导率升高; 同时离子不断离开土体, 使土中液体离子数量下降, 昭示着这种电导率的上升不会无限进行下去, 在合适的时间点会因为这一原因导致电导率的下降; 在电渗后期, 电导率的再次上升的主要原因是排水速率的下降。即使模型桶中的离子数量已然不多了, 但是单位时间内排水体积的锐减使离子浓度有了较大的攀升。

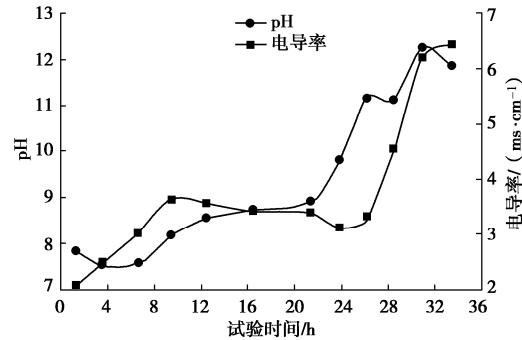


图 5 pH、电导率变化曲线

Fig. 5 Change curves of pH and conductivity

### 2.4 真空预压固结试验后的固结效果检验

经真空预压处理后的钙质软土, 取如图 2 所示的环刀样进行一维压缩试验, 在各级荷载下快速压缩固结变形稳定时的沉降量、孔隙比与荷载之间的关系如图 6 所示。

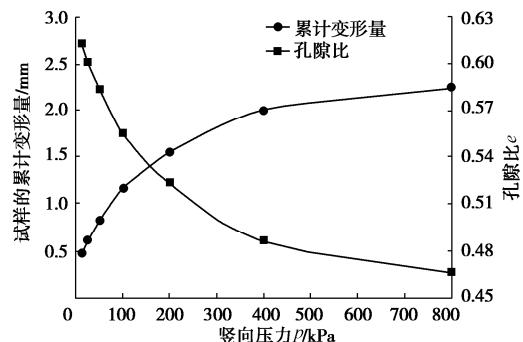


图 6 一维压缩变形及孔隙比的变化曲线

Fig. 6 Change curves of 1D compression consolidation deformation and porosity ratio

可以看出随着荷载的增加, 沉降与孔隙比趋于稳定。在 200 kPa 的压力作用下, 钙质软土的沉降量在 1.5 mm 左右, 即产生 7.5% 的应变量。在 800 kPa 的压力作用下, 钙质软土的沉降量在 2 mm 左右, 即产生 10% 的应变量, 钙质软土的孔隙比基本不再变化。计算出其压缩模量  $E_s$  为 6 MPa, 认为经真空预压处理后的钙质软土承载性能得到明显提高。

## 3 结论

通过钙质软土的真空预压、电渗固结试验结果的对比与分析, 得出以下 3 点结论。

(1) 对于钙质软土而言, 真空预压与电渗相比, 能在更短的时间内排出更多的孔隙水, 产生更大的沉降, 且会产生显著的的体积收缩现象, 是一种高效率、处理效果更好的排水固结方法。

(2) 随着钙质软土电渗固结试验的进行, 其电流先升后降。钙质软土中排出的水呈碱性, 通电时间越长碱性越强, 同时电导率也越大。

(3) 真空预压加固处理后, 钙质软土的含水率由 60%降低至 25%左右, 钙质软土压缩模量达到 6 MPa, 承载性能得到明显提高。

## 参考文献:

- [1] 刘 明, 孙晓霞, 石学法, 等. 印度洋钙质软泥和硅质软泥稀土元素组成和富集机制[J]. 海洋学报, 2019, **41**(1): 58 – 71. (LIU Ming, SUN Xiao-xia, SHI Xue-fa, et al. Composition and enrichment of rare earth elements in calcareous and siliceous ooze in the Indian Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, **41**(1): 58 – 71. (in Chinese))
- [2] 刘崇权, 杨志强, 汪 稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, **16**(4): 74 – 84. (LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, **16**(4): 74 – 84. (in Chinese))
- [3] 沈 扬, 冯照雁, 刘汉龙, 等. 初始浓度对南海珊瑚泥沉积浊液面沉速特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 22 – 26. (SHEN Yang, FENG Zhao-yan, LIU Han-long, et al. Experimental study on effects of initial concentration on settling velocity characteristics of turbid surface of South China Sea coral mud[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 22 – 26. (in Chinese))
- [4] 朱长歧, 崔 翔, 胡明鉴, 等. 钙质土电导率和渗透性的相关研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 142 – 148. (ZHU Chang-qi, CUI Xiang, HU Ming-jian, et al. Study of electric conductivity and permeability of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 142 – 148. (in Chinese))
- [5] 王建平, 张宏波, 周 涛, 等. 高真空击密法加固珊瑚碎屑淤泥质土场地试验研究[J]. 工业建筑, 2015, **45**(2): 85 – 89, 183. (WANG Jian-ping, ZHANG Hong-bo, ZHOU Tao, et al. Experimental study of improvement on ground of coral debris mixed with mucky soil by high vacuum densification method[J]. Industrial Construction, 2015, **45**(2): 85 – 89, 183. (in Chinese))
- [6] 叶柏荣, 陆舜英, 唐羿生, 等. 袋装砂井: 真空预压法加固软土地基[J]. 港口工程, 1983, **3**(1): 26 – 30. (YE Bai-Rong, LU Shun-ying, TANG Yi-sheng, et al. Bag sand-well-vacuum preloading method for reinforcing soft soil foundation[J]. Port Engineering, 1983, **3**(1): 26 – 30. (in Chinese))
- [7] 鲍树峰, 娄 炎, 董志良, 等. 新近吹填淤泥地基真空固结失效原因分析及对策[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1350 – 1359. (BAO Shu-feng, LOU Yan, DONG Zhi-liang, et al. Causes and countermeasures for vacuum consolidation failure of newly-dredged mud foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1350 – 1359. (in Chinese))
- [8] 杨爱武, 潘亚轩, 曹 宇, 等. 吹填软土低位真空预压室内试验及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, **40**(2): 539 – 548. (YANG Ai-wu, PAN Ya-xuan, CAO Yu, et al. Laboratory experiment and numerical simulation of soft dredger fill with low vacuum pre-compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(2): 539 – 548. (in Chinese))
- [9] KOROLEV V A, NESTEROV D S. Influence of electro-osmosis on physicochemical parameters and microstructure of clay soils[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2019, **54**(6): 560 – 571.
- [10] 谢新宇, 郑凌透, 谢康和, 等. 电势梯度与电极间距变化的滨海软土电渗模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(1): 108 – 114, 121. (XIE Xin-yu, ZHENG Ling-wei, XIE Kang-he, et al. Experimental study on electro-osmosis of marine soft soil with varying potential gradient and electrode spacing[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(1): 108 – 114, 121. (in Chinese))
- [11] 陶燕丽, 龚晓南, 周 建, 等. 电渗作用下软土细观孔隙结构[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, **40**(3): 110 – 116. (TAO Yan-li, GONG Xiao-nan, ZHOU Jian, et al. Mesoscopic pore structure of soft soil during electro-osmosis[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, **40**(3): 110 – 116. (in Chinese))

(编校: 孙振远)