

# 虹吸联合堆载预压排水固结效果模型试验

陈柯星<sup>1</sup>, 郎凌嘉<sup>1</sup>, 王旭<sup>2</sup>, 吴朝峰<sup>1</sup>, 周天翊<sup>1</sup>, 孙红月<sup>2\*</sup>

(1. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 软土具有高压缩性、高含水量、低渗透性和低强度等特点, 排水固结是提高软土地基强度、减小工后沉降的重要手段。本文突破传统的井孔排水理念, 利用虹吸免动力实现水体跨越输送的物理特性, 提出了一种井点抽水控制管虹吸的排水方案, 以解决低渗透软土无法直接动力抽排地下水的物理制约问题。为了验证虹吸联合堆载预压方法的有效性, 本文采用室内物理模型试验, 通过测试虹吸排水流量变化情况、排水引起软土内部孔隙水压力变化特征、土体表面沉降变形特性, 分析应用虹吸联合堆载预压的作用效果。试验证明在单纯虹吸排水、单纯堆载预压固结以及虹吸联合堆载预压固结3种工况中, 虹吸联合堆载预压固结方法下的土体排水流量最大, 虹吸对于降低软土体内的地下水作用显著, 可将模型箱内软土中的水位下降至模型箱底部。通过80 d的排水固结试验, 单纯虹吸排水引起的沉降值约为8 mm, 仅堆载预压引起的沉降为12 mm, 虹吸联合堆载预压引起沉降为16 mm, 证明了虹吸联合堆载预压固结方法的优势。

**关键词:** 软土; 排水固结; 虹吸排水; 堆载预压; 虹吸联合堆载预压排水; 模型试验

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0477-06

## Consolidation model test of siphon drainage with preloading

CHEN Ke-xing<sup>1</sup>, LANG Ling-jia<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>, WU Chao-feng<sup>1</sup>, ZHOU Tian-yi<sup>1</sup>, SUN Hong-yue<sup>2\*</sup>

(1. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

**Abstract:** Due to the high compressibility, high water content, low permeability and limited strength in soft soil, drainage consolidation proves to be a crucial approach for enhancing the strength of foundation in soft soil and diminishing construction-induced settlement. In contrast to conventional methods, siphons exploit their physical properties to transport water without requiring power. Utilizing a water collection scheme that employs a network of well pipes using siphon technology proves to be an effective strategy for overcoming the physical barriers presented by low-permeability soft soil, allowing water to be transported directly. This work assesses alterations in siphon drainage flow, variations in pore water pressure induced by drainage in soft soil, and the settlement and deformation characteristics of the soil surface through siphon-combined preloading model tests. Findings reveal that in model tests conducted under three distinct conditions, solely siphon drainage, exclusive preloading consolidation, and the combination of siphon drainage with preloading consolidation, the combination of siphon drainage with preloading consolidation demonstrates the highest soil drainage flow. Siphon plays a significant role in reducing the groundwater in the soft soil, and it can reduce the water level in the model box to its base. After 80 days of drainage and consolidation, the settlement value caused by siphon drainage is about 8 mm, the settlement caused by only preloading is 12 mm, and the settlement caused by siphon-combined preloading is 16 mm. Experimental findings substantiate the advantages of the siphon-combined preloading consolidation method.

**Key words:** soft soil; drainage consolidation; siphon drainage; preloading; siphon drainage with preloading; model test

## 0 引言

我国东部沿海和江河三角洲地区广泛分布软

土, 这些区域人口密集、经济发展迅速, 需要建设大量工程。由于软土具有高压缩性、高含水量、低渗透性和低强度等特性, 为防止产生工后沉降灾

收稿日期: 2022-12-06

作者简介: 陈柯星(1986—), 男, 浙江诸暨人, 硕士, 工程师, 主要从事电力行业土木工程等工作。E-mail: kx\_zepdi@126.com。

\*通信作者: 孙红月(1970—), 女, 浙江诸暨人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害防治方面的教学和科研工作。E-mail: shy@zju.edu.cn。

害,软土地区工程建设需要进行地基处理。目前软土加固处理最常用的方法有堆载预压法、真空预压法等(刘松玉等<sup>[1]</sup>,何忠意等<sup>[2]</sup>,CHU等<sup>[3]</sup>),由于处置过程中的软土地下水位始终处于近地表处,存在完成排水固结时间长、加固深度浅等问题。

软土加固处理的关键是快速排出土体中的地下水。目前软土排水主要有两种形式:加载形成超孔隙水压力挤出软土中的地下水,如堆载预压和真空预压等(穆永亮等<sup>[4]</sup>,何忠意等<sup>[2]</sup>);利用动力抽出软土中的地下水,如井点抽水等(王春明<sup>[5]</sup>,YAN等<sup>[6]</sup>)。受软土低渗透性和低水力梯度的影响,通过加载挤出地下水的过程十分缓慢;直接抽排地下水,则因软土的渗透系数小,使得排水的工作效率低(祝关翔等<sup>[7]</sup>,杨光华<sup>[8]</sup>,曾华健等<sup>[9]</sup>,徐宏等<sup>[10]</sup>)。探索经济有效的软土排水固结新方法,仍是软土地区工程建设迫切需要解决的问题。

## 1 降低软土地下水位的虹吸排水方法

目前人工降低软土地基地下水位的措施主要是井点降水,比较常见的井点降水类型有:轻型井点降水、喷射井点降水、管井井点降水、电渗井点降水等。但软土的渗透系数一般小于 $10^{-6}\text{cm/s}$ ,除电渗井点降水外,其他井点降水方法均不适用。但电渗井点降水使用成本高、能耗大,目前只用于特殊基坑排水工程中。因此,为降低软土地基地下水位,需要探索新的排水方法。

虹吸具有免动力实现水体跨越流动特性,可适应低渗透软土地基地下水位控制的需要。但软土地区一般无法获得驱动虹吸流动的自然水位差,需要人工形成低水位点才能构建虹吸排水系统。因此,采用井点抽水控制群管虹吸是可行的方法。在待降低地下水位的地基土中插入虹吸排水管,并将虹吸管的出水口引入集水井中,利用水泵抽水降低集水井的地下水位,使地基土中的地下水通过虹吸管流入集水井,再由水泵将集水井中的水抽排到地表。利用虹吸集水的“杠杆作用”,解决无法直接动力抽排软土地下水的物理制约问题。

目前虹吸排水方法在软土地基处理领域的应用研究仍处于探索阶段,需要进行相应的试验研究和理论分析,确定相应的设计参数,为虹吸排水技术的现场应用奠定基础。

## 2 试验模型与试验方案

### 2.1 试验方案与模型结构

通过模型试验,研究虹吸联合堆载预压处理软土地基的加固效果,分别开展虹吸排水、堆载预压和虹吸联合堆载预压的对比模型试验,各试验工况及编号如表1所示。

表1 模型试验工况及编号

试验编号	虹吸排水	堆载预压
Test1	有	无
Test2	无	有
Test3	有	有

模型结构示意图与测点布置见图1,试验模型的监测系统由3部分构成,分别为测压管、百分表和量筒。测压管用于监测试验过程中土体内部的孔隙水压力变化,百分表用于监测模型土体表面的沉降变形,量筒用于监测排水量。

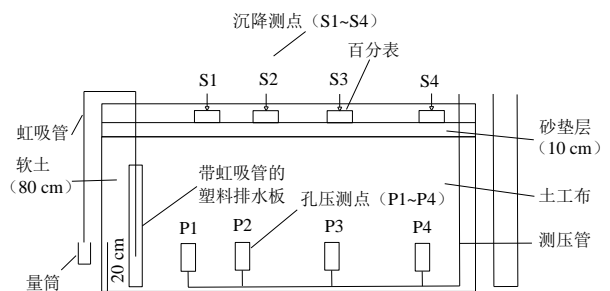


图1 模型结构示意图与测点布置图

Fig. 1 Schematic diagram of model structure and layout of measuring points

测压管采用内径6.5 mm的聚氨酯管,插入土体一端包裹土工布,以避免土颗粒进入测压管而发生堵塞,并将其固定于模型箱的底部,测压管编号及测点与带虹吸管的排水板中心距离如表2所示,实验模型中软土高度为80 cm。

采用量程为0~50 mm的数显百分表监测模型土体表面沉降变形。布置的表面沉降测点编号及其距排水板中心距离如表3所示。

表2 测压管编号及测点距排水板中心距离

测压管编号	P1	P2	P3	P4
距排水板中心距离/cm	5	15	30	50

表 3 表面沉降测点编号及其距排水板中心距离

Table 3 Number of surface settlement measuring point and its distance from drainage board

表面沉降测点编号	S1	S2	S3	S4
距排水板中心距离/cm	10	20	35	55

由于软土的渗透系数低, 试验过程的排水流量小, 采用 10 mL 量筒进行流量的测定, 以确保监测精度。

为了便于模型土体填制, 将取自杭州某基坑工程的软土样先浸泡, 软化后打碎制成泥浆再倒入模型箱中。对有虹吸排水的 2 个工况, 当泥浆在模型箱中静置 10 d, 基本完成自重固结后, 再插入带 PU 虹吸管的塑料排水板, 并在土体表面铺设土工布, 再静置 1 d。PU 虹吸管进水口一端与排水板一起放在模型一侧距箱底 10 cm 位置处, 出水口端放置在量筒内, 且虹吸管出水口高度设置为距离模型箱底部 20 cm (堆载工况时设置为 25 cm) 高度处。启动虹吸后, 通过测量量筒内的水量来确定虹吸排水的排水量。对有堆载的 2 个工况, 记录测压管初始读数后, 再在土体表面铺设厚度 10 cm 的标准砂料, 产生的荷载约为 2 kPa。

### 2.2 试验过程

在模型表面堆载砂料过程中, 采用视频方式实时记录测压管水柱变化过程。完成模型表面砂料堆载后, 放置沉降标, 安装百分表并记录初始读数。

对于有虹吸的试验模型, 启动塑料排水板中的虹吸管排水进行相应的排水固结试验, 用量筒记录不同时间的排出水量。在模型试验初期, 测压管、土体表面沉降以及排出水量每隔 2 h 记录一次, 2 d 过后, 每隔 1 d 记录一次。

## 3 模型试验结果分析

### 3.1 排水流量监测结果分析

无论是虹吸排水还是堆载预压排水, 均能使土体中的部分地下水排出地表。如图 2 所示, 单纯虹吸、单纯堆载预压和虹吸联合堆载预压总是在虹吸启动和加载初期排水流量较大, 然后快速下降。

对比单纯虹吸、单纯堆载预压和虹吸联合堆载预压试验的流量监测结果可以看出, 虹吸联合堆载预压作用下的土体排水流量最大, 其次是传统的堆载预压固结排水流量, 仅采用虹吸排水进行软土处

理测试得到的排水流量最小。虹吸联合堆载预压固结方法的排水流量是单纯虹吸排水流量的 5 倍, 是无虹吸堆载预压固结方法流量的 3 倍。由此可见, 虹吸排水联合堆载预压作用可以有效加快软土的排水固结效果。这里需要说明: 虹吸排水孔只有一个, 而堆载是作用在整个模型的表面, 两者不具有直接对比的条件。

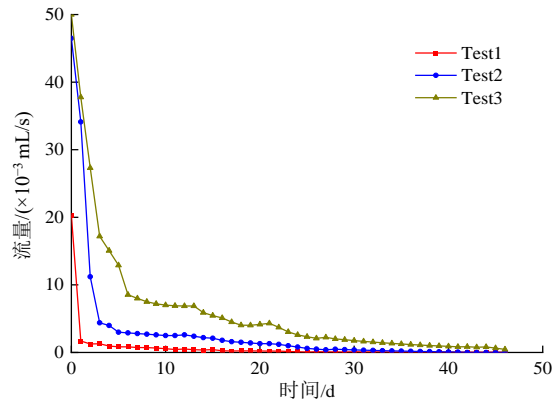


图 2 排水流量随时间变化

Fig. 2 Drainage flow changes over time

### 3.2 孔隙水压力变化

测压管监测的水头高度反映测点土体的孔隙水压力。虹吸排水促使土体孔隙水压力下降, 如图 3 所示为不同位置测点处的孔隙水压力随时间变化曲线, 可以看出, 距离虹吸管越近, 孔压下降越快, 但最终趋于稳定的时间大致相同。由于虹吸管出水口高度放置于距离模型底部 20 cm 处, 各测点的最终水位均下降到距模型底部接近 20 cm 的高度, 表明虹吸作用对于降低软土体内的地下水的效果是显著的。

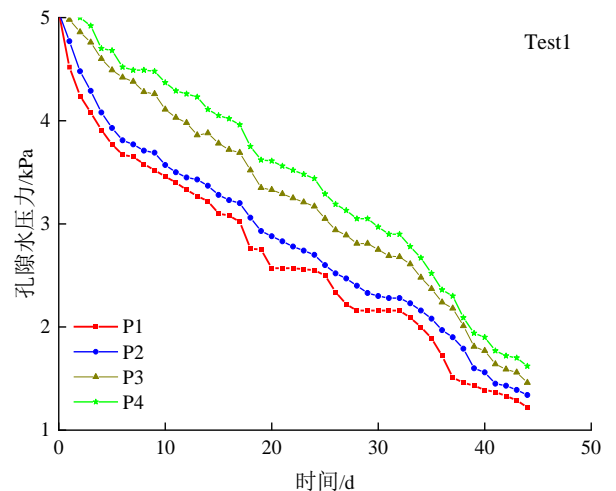


图 3 虹吸排水法孔隙水压力随时间变化图

Fig. 3 Pore water pressure changes over time in siphon drainage

堆载首先在土体中产生超孔隙水压力，其排水过程是超孔隙水压力消散的过程。如图4所示，堆载后各测点的孔隙水压力均上升，经历约20d后，堆载引起的超孔隙水压力基本消散，基本恢复到地下水自重的压力水平。

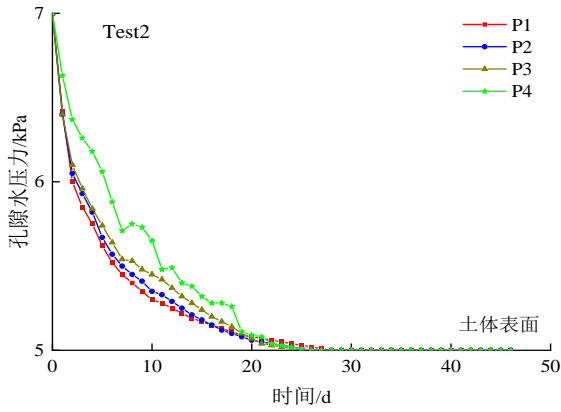


图4 堆载预压法孔隙水压力随时间变化图

Fig. 4 Pore water pressure changes over time in preloading

虹吸联合堆载预压的试验模型，虹吸管出水口高度放置于距离模型箱底部25cm处。如图5所示，采用虹吸联合堆载预压方法进行软土处理时，土体内部的水位高度可以下降到距离模型箱底部接近25cm处。与单纯虹吸排水不同的是，模型试验的初期，土体中的孔隙水压力由虹吸排水的降低作用和堆载引起的超孔隙水压力上升作用共同组成，初始阶段的孔隙水压力高度超过土体表面。

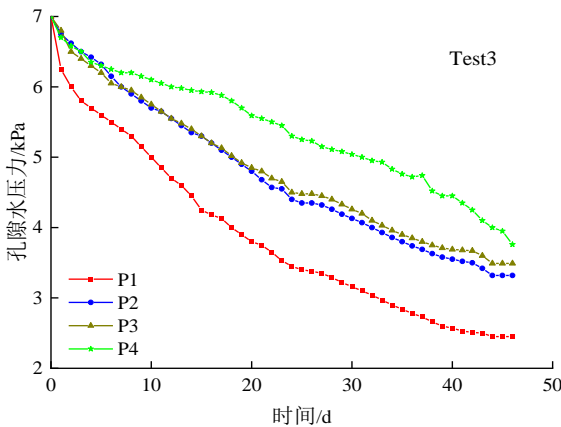


图5 虹吸联合堆载预压法孔隙水压力随时间变化图

Fig. 5 Pore water pressure changes over time in siphon drainage combined with preloading

无论是单纯虹吸排水还是虹吸联合堆载预压试验结果均表明，距离排水板越近，孔压下降越快，但最终趋于稳定的时间大致相同。虽然因试验工况及试验出水口高度设置的不同，具体监测到的土体

内的水位数据不同，但不同测点处的孔压监测值的整体变化趋势大体一致，虹吸作用对于降低软土体内的地下水具有显著的效果。

### 3.3 模型表面沉降变形

表面沉降变形是体现软土地基处理效果的直接指标，它反映了软土地基的压缩变形程度。如图6所示为单纯虹吸排水引起的模型表面沉降变形情况。虽然各测点的沉降值变化有所不同，但变化趋势相同，距离排水板越远，最终稳定的沉降值越小。经历60d左右的虹吸排水过程，模型土体的压缩变形基本处于稳定，此时虹吸排水的流量已近似为0，最后达到的沉降稳定值约为8mm，这也是单纯虹吸所能实现的软土固结最终效果。

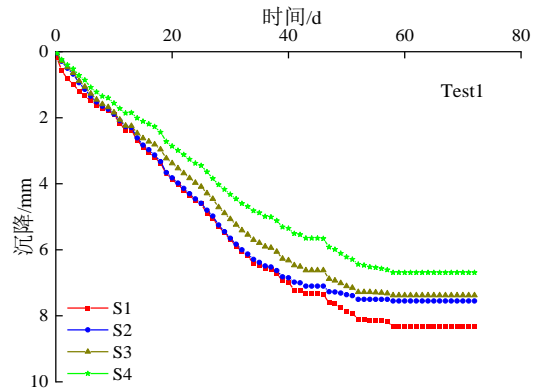


图6 虹吸排水法表面沉降随时间变化图

Fig. 6 Surface settlement changes over time in siphon drainage

图7为单纯堆载预压试验引起的表面沉降变形情况。各测点的沉降变化趋势相同，距离塑料排水板（虹吸孔位置）越远，沉降值越小。在经历80d的试验过程后，达到的沉降约为12mm，堆载引起的地表沉降变形还未达到稳定。此时的排水流量已近似为0，说明压缩变形的过程缓慢。

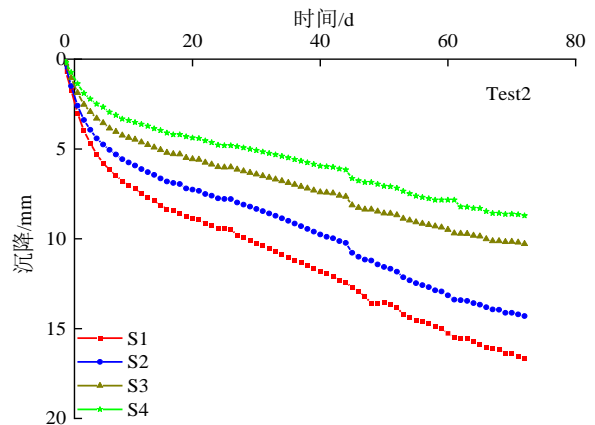


图7 堆载预压法表面沉降随时间变化图

Fig. 7 Surface settlement changes over time in preloading

如图8所示为虹吸联合堆载预压引起的模型表面沉降变形情况。与单纯虹吸或单纯堆载预压引起的土体表面沉降变形相似,各测点的沉降值变化也具有相同的变化趋势,也表现为距离排水板越远的沉降值越小。经历80d的试验过程后,虹吸联合堆载预压试验模型的压缩变形基本处于稳定,最终达到的沉降量约为16mm。可见虹吸联合堆载预压不仅可以提高土体的压缩固结效果,还有助于加快软土的固结速度。

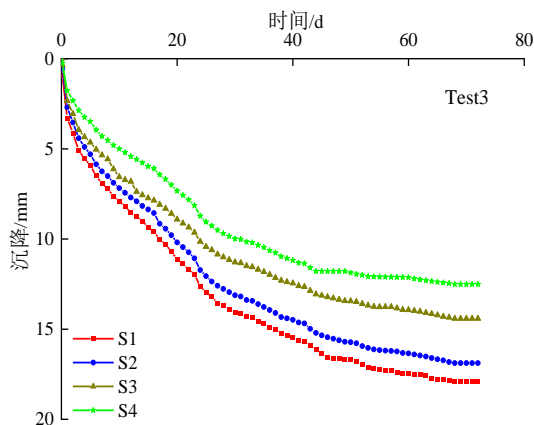


图8 虹吸联合堆载预压法表面沉降随时间变化图

Fig. 8 Surface settlement changes over time in siphon drainage combined with preloading

单纯虹吸排水进行软土地基排水固结处置时,软土的压缩变形是依靠地下水位的下降形成非饱和区而增大有效应力,沉降依靠土体自重压缩,因此达到的最终沉降量较小,处理后的土体不够密实,通常无法满足工程建设的需要。单纯的堆载预压方法在荷载作用下形成超孔隙水压力挤出地下水,排水固结的速度缓慢。采用虹吸排水联合堆载预压方法,既具有虹吸排水将软土地基中的地下水位降低的优势,也具有通过堆载快速压缩地基土的优势,可以实现很好的排水固结效果。

## 4 结 论

通过分析虹吸联合堆载预压方法的加固机理,针对单纯使用虹吸排水、单纯堆载预压以及虹吸排水联合堆载预压3种情况进行室内模型试验研究,分析了虹吸排水联合堆载预压方法的可行性和有效性,得到以下基本认识:

(1) 通过单纯虹吸排水、单纯堆载预压以及虹吸排水联合堆载预压3种工况模型试验的排水流量监测,结果表明,虹吸排水联合堆载预压方法下的

土体排水流量最大,说明虹吸排水联合堆载预压更有利于快速排出软土地基中的地下水,实现更高效的排水固结效果。

(2) 采用虹吸排水方法和虹吸联合堆载预压方法进行软土处理时,土体内部的水位高度可以下降到模型箱的底部,单纯堆载预压方法仅能将软土内部的水位高度下降到土体表面。虹吸作用对于降低软土体内的地下水具有显著的效果。无论是单纯虹吸排水还是虹吸联合堆载预压,距离排水板越近,孔隙水压力下降越快,但最终趋于稳定的时间大致相同。

(3) 单纯虹吸排水作用引起的表面沉降在60d内基本达到稳定,而堆载预压引起沉降在80d内还未达到稳定状态,虹吸联合堆载预压80d内也基本达到稳定,说明有虹吸排水可加快土体的固结速率。通过80d排水固结,仅虹吸排水引起的沉降值约为8mm,仅堆载预压引起的沉降约为12mm,虹吸联合堆载预压引起沉降约为16mm,表明虹吸联合堆载预压具有叠加效应。

## 参考文献

- [1] 刘松玉,周建,章定文,等.地基处理技术进展[J].土木工程学报,2020,53(4):93-110.  
LIU Song-yu, ZHOU Jian, ZHANG Ding-wen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.
- [2] 何忠意,郑伟文,朱佩宁,等.某近海软土地基真空联合堆载预压法工程实例分析[J].工程勘察,2019,47(2):1-8,78.  
HE Zhong-yi, ZHENG Wei-wen, ZHU Pei-ning, et al. Analysis on vacuum combined surcharge preloading method in offshore soft foundation treatment engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(2): 1-8, 78.
- [3] CHU J, BO M W, CHANG M F, et al. Consolidation and permeability properties of Singapore marine clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 128(9): 724-732.
- [4] 穆永亮,沈云如,姜建伟.某机场跑道真空联合堆载预压法地基处理试验研究[J].地基处理,2021,3(5):382-387.

- MU Yong-liang, SHEN Yun-ru, JIANG Jian-wei. Experiment study on foundation treatment by vacuum and surcharge preloading method for runway of an airport[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(5): 382-387.
- [5] 王春明. 组合排水板在软土地基处理中的应用[J]. *港工技术*, 2015, 52(2): 81-83.
- WANG Chun-ming. Application of combined drain boards in soft soil base improvement[J]. *Port Engineering Technology*, 2015, 52(2): 81-83.
- [6] YAN S W, CHU J. Soil improvement for a storage yard using the combined vacuum and fill preloading method[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(4): 1094-1104.
- [7] 祝关翔, 余清涛. 水载预压在软土路基处理中的应用浅析[J]. *地基处理*, 2020, 2(4): 357-360.
- ZHU Guan-xiang, YU Qing-tao. Application of water preloading in soft soil subgrade treatment[J]. *Chinese Journal of Ground Improvement*, 2020, 2(4): 357-360.
- [8] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 1-18.
- YANG Guang-hua. Innovation and development of modern theories for foundation design[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 1-18.
- [9] 曾华健, 李军, 梅军, 等. 真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J]. *地基处理*, 2021, 3(1): 64-70.
- ZENG Hua-jian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment storage[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(1): 64-70.
- [10] 徐宏, 邓学均, 齐永正, 等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(2): 285-290.
- XU Hong, DENG Xue-jun, QI Yong-zheng, et al. Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(2): 285-290.
- [11] 曾玲玲, 曾俊, 陈福全, 等. 天然沉积结构性黏土的不排水强度性状[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(6): 1072-1078.
- ZENG Ling-ling, ZENG Jun, CHEN Fu-quan, et al. Undrained shear strength behaviour of natural sedimentary structural clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1072-1078.