

基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究

张军舰, 李 鹏, 殷坤宇, 罗玉磊, 郭 慢

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, LUO Yulei, and GUO Man

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江北机场高填方夯后碎块石土剪切力学性质研究

A study of the shear mechanical properties of high-filled gravel-block soil after dynamic compaction near the Jiangbei airport

马昊, 黄达, 肖衡林, 王俊杰, 马文浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 88-88

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107

基于数字图像处理的颗粒流厚度动态提取方法研究

A study of the dynamic extraction method for granular flow thickness based on digital image processing

吴越, 李坤, 程谦恭, 王玉峰, 龙艳梅, 姜润昱, 宋章, 刘毅 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 151-159

分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

张振, 陈勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 89-96

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104076

张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 117-125.

ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, *et al.* An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 117-125.

基于接力排水的强夯法在滨海回填区 地基处理中的试验研究

张军舰¹, 李鹏², 殷坤宇³, 罗玉磊⁴, 郭慢⁵

(1. 岩土科技股份有限公司, 浙江 杭州 311401; 2. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266032;
3. 青岛岩土基础工程公司, 山东 青岛 266032; 4. 中交一航局第二工程有限公司,
山东 青岛 266071; 5. 青岛滨海勘察测绘有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 本文对山东半岛海岸带滨海杂填土、饱和粉细砂、淤泥质土等特殊复杂地层地基处理方法进行了研究。以经济高效的强夯法为基础, 提出复杂地层整体排水概念, 设计了浅层、深层竖向排水和水平排水的接力排水系统, 并进行了现场试验研究。监测数据表明, 强夯荷载作用下, 接力排水系统整体协同排水, 可快速排出各个地层中地下水、消散超孔隙水压力。7h左右可基本消除强夯引起的地下水上升及孔隙水压力消散。持续降水, 地表沉降为上部土体厚度的0.7%~2.0%。强夯动力荷载作用下, 表层土体压缩为上部土体厚度的8.7%~10.9%。埋深3~7m土体沉降约为土体厚度的5%、3%, 埋深7~10m土体沉降为土体厚度的2%。检测数据表明, 在强夯有效影响深度内地基处理效果明显, 土体工程性状改善明显。表层承载力及变形模量满足设计要求, 4m以下淤泥承载力平均值略低于设计要求, 下部淤泥质土计算平均固结度为77%。夯后1个月监测数据表明, 地表沉降量在25mm以内, 已逐步趋于稳定, 分层沉降、孔隙水压力数值整体稳定略有下降。

关键词: 滨海回填区; 复杂地层; 接力排水; 强夯; 井点降水; 塑料排水板

中图分类号: TU472; TU42

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0117-09

An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area

ZHANG Junjian¹, LI Peng², YIN Kunyu³, LUO Yulei⁴, GUO Man⁵

(1. China Geotechnical Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311401, China; 2. Qingdao Surveying & Mapping Institute, Qingdao, Shandong 266032, China; 3. Qingdao Geotechnical Foundation Engineering Company, Qingdao, Shandong 266032, China; 4. No. 2 Engineering Co. Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China; 5. Qingdao Binhai Investigation and Surveying Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The studies of foundation treatment methods are carried out for the special and complex foundation in the fill, saturated silty fine sand and silt in the coastal backfill area of the coastal zone of the Shandong Peninsula. Based on the economical and efficient dynamic compaction method, the concept of integrated combined drainage

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-08-23

投稿网址: www.swdgcgz.com

第一作者: 张军舰(1979-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事深基坑工程、地基加固工程设计研究工作。E-mail: zhangjunjianhz@163.com

is put forward. The relay drainage system of the shallow and deep vertical drainage channels and their relay horizontal drainage channels are designed, and field tests are undertaken. The monitoring data show that under the dynamic compaction load, the relay drainage system can coordinate drainage as a whole, which can quickly discharge the groundwater to dissipate the excess pore water pressure. The rise of groundwater level and dissipation of pore water pressure caused by dynamic compaction can be basically eliminated in about 7 hours. With continuous precipitation, the surface settlement is 0.7% ~ 2.0% of the thickness of the upper soil mass. Under the dynamic load of dynamic compaction, the surface soil is compressed to 8.7% ~ 10.9% of the thickness of the upper soil. The soil settlement is about 5 ‰ and 3 ‰ of the soil thickness at the buried depth of 3 ~ 7 m, and 2 ‰ of the soil thickness is at the buried depth of 7 ~ 10 m. The test data show that in the effective depth of dynamic compaction, the effect of foundation treatment is obvious, the engineering properties and the degree of consolidation of foundation are improved. The surface bearing capacity and deformation modulus meet the design requirements, the average bearing capacity of silt below 4 m is slightly lower than the design requirements, and the average degree of consolidation of mucky soil is 77%. The monitoring data of one month after tamping shows that the surface subsidence is within 25 mm, which tends to be stable, the layered settlement and pore water pressure are stable and slightly decreased.

Keywords: coastal backfill area; complex foundation; relay drainage; dynamic compaction; well point precipitation; plastic drainage plate

随着山东省海洋经济的发展, 土木工程建设向山东海岸带快速推进。山东海岸带滨海回填区广泛分布杂填土、饱和粉细砂、淤泥质土等特殊土。各类土密实程度、承载力、变形特性、渗透性等物理力学参数、工程性状差异明显^[1], 常规、单一地基处理方法难以满足快速高效、安全经济、科学合理的建设需求, 研究经济、高效的地基处理方法是迫切需要解决的工程问题。

加载方式和排水方法是使复杂地层地基快速高效固结的关键。强夯是快速、经济的加载方法之一, 是加固地下水位以上粗颗粒土地基常用方法^[1-4]。杂填土在强夯荷载作用下可瞬时完成固结, 而饱和粉细砂、淤泥质土中超孔隙水压力无法及时消散, 粉细砂易液化, 淤泥质土易形成“橡皮土”。

淤泥质土地基常用真空预压或堆载预压地基处理方法^[1-2]。传统真空预压法往往是上部土体先在真空负压下压缩固结稳定, 然后其作为荷载与真空负压对中下部土体压缩固结的缓慢过程^[5], 真空负压分层分阶段作用于土体, 使其渗流路径宽且长, 后期常形成淤堵现象^[6]。堆载需要分步施加, 每步的堆载高度需根据地基稳定性计算确定^[1-2, 7], 土体长时间的缓慢渗流排水也会导致淤堵影响处理效果。由于真空预压、堆载预压的作用机理, 使得其工期长、造价高, 而结果是表层形成硬壳层、中下部处理效果往往较差。

强夯的加载方式则不同, 夯锤夯击土体时释放巨大能量, 使土体产生强烈振动, 其作用可瞬间从地表

传至深部土体^[4]。强夯加载方式克服了真空加载和分步堆载的分层固结、淤堵等缺点。若辅之以有效的排水方法, 则为加固淤泥质土更有效之方法。

近些年众多学者对我国不同海岸带地区地基强夯+排水组合处理方法进行了研究。叶永兴^[8]对浙江钱塘江右岸冲积软弱粉土地基的强夯+真空井点降水方法进行试验研究, 取得了粉土地基处理前后的物理力学参数、地基土的孔隙水压力变化特征等资料数据。王越虹^[9]对青岛高新技术产业开发区吹填土地基低能量强夯联合井点降水方法机理进行研究, 并结合现场监测数据分析建立数值模型验证该方法的可行性。陈晨^[10]通过室内试验、模型试验研究塑料排水板和强夯法的作用机理及相关计算方法。陈志勇^[11]针对安徽皖江城市带特殊地质条件的路基工程, 通过室内试验、现场监测、数值模拟研究了真空预压后的淤泥质土在强夯荷载下耦合的作用机理及加固效果。谢伟树^[12]针对福建闽江口北岸特殊地质条件的体育中心项目, 对低能强夯+塑料排水板联合地基处理方法加固机理进行理论分析, 并建立了孔隙水压力消散公式。

以上研究均是针对一类特殊土的强夯荷载下单一排水系统研究, 没有针对其组合复杂地层进行研究。多层状不同渗透性地层的综合排水问题目前鲜有研究。早在 1965 年, 谢松高^[13]对存在隔层的层状地层水面上升至地面情况下的水平排水问题进行了研究, 得到了隔层的深度、厚度、相对透水性等因素

对排水效果影响规律。其研究是基于电拟试验、排水沟进行的,但反映了复杂地层排水的普遍规律。在隔层深度、厚度、排水沟深度一定情况下,隔层相对透水性 k_1/k_2 (隔层渗透系数/排水层渗透系数)越大,整体排水效果越好。隔层相对透水性 k_1/k_2 对隔层以上土层排水量影响不大,对隔层及其以下土层排水量影响明显。

滨海回填区地层地基的排水固结过程可视为多层状不同渗透性地层的综合排水过程。强夯荷载下地下水位迅速上升,上部杂填土、粉细砂层为普通排水层,下部淤泥质粉质黏土为隔层。塑料排水板使得隔层的渗透系数 k_1 增大,强夯作用下在淤泥质土中瞬时产生微裂隙也使 k_1 增大。然而强夯作用下上部填土和粉细砂是逐渐趋于密实,其渗透系数 k_2 逐渐减少。整个强夯过程中使得 k_1/k_2 逐渐增大,整个复杂地层更趋于一种均质排水地层, $k_1/k_2=1$ 时就为同一种地层。强夯作用下复杂地层的排水过程是多层土渗透性逐渐同化为同一种土的过程,也是地基整体同步固结的过程。

在前人研究基础上,以青岛特殊钢铁项目用地为背景,针对山东半岛海岸带滨海回填区多种组合特殊地层,提出复杂地层整体排水概念,设计浅层、深层竖向排水和水平排水的接力排水系统,并通过现场试验对其进行研究,为山东海洋经济发展建设提供基础支撑。

1 工程概况

青岛特殊钢铁项目用地位于青岛市黄岛区泊里镇,横河入海口西侧,工程场区平面示意图见图 1。

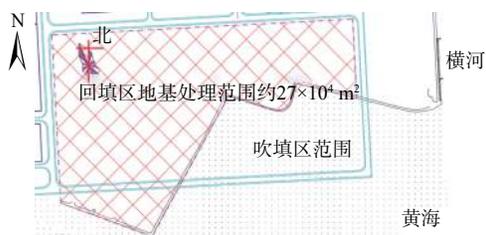


图 1 工程场区平面图

Fig. 1 Project site

场区地层自上而下为杂填土、粉细砂、淤泥质土、粉质黏土、中粗砂、全风化花岗岩,详见表 1。场区地下水埋深 1.0 m,主要以大气降水和场区南侧海水补给,地面蒸发为排泄方式,各层土间水力具有一定连通性。

地基处理要求如下:(1)处理深度约 13 m,至淤泥

表 1 场区地层概况

Table 1 Layers in the site

地层名称	平均厚度/m	性状简述
杂填土	2.0	湿—很湿,松散,风化砂、碎石,碎石粒径 80~160 mm
粉细砂	2.0	饱和,松散,颗粒级配较差
淤泥质土	8.5	黑灰色,有腥臭味,流塑—软塑
粉质黏土	1.6	黑灰色,软—可塑,含少量细砂
中粗砂	2.1	饱和,稍密—中密,颗粒级配差
全风化花岗岩	2.0	结构大部破坏,岩芯砂土状

层下 0.5 m。(2)交工面地基承载力特征值 150 kPa,交工面下 4 m 处地基承载力特征值 120 kPa。(3)压缩模量:交工面 12 MPa,交工面下 4 m 处 10 MPa。(4)固结度:交工面下 4 m 内 85%,交工面 4 m 以下 80%。

2 试验方案

2.1 排水系统

强夯荷载转换为土体内应力计算及土体固结排水理论十分复杂,目前对其作用机理仍在不断研究探索中。陈晨^[10]通过模型试验得出了冲击荷载下的孔隙水压力消散规律。吴航^[14]将 Biot 理论、Helmholtz 矢量分解和 Fourier-Hankel 积分变换相结合,求解了均质饱和土在强夯下的位移、孔压、应力解析解,为更好体现土体黏性,将标准线性固体模型引入解析解中。以上研究分别是基于室内模型试验和 Biot 理论,但 Biot 理论是基于土体线弹性、小变形、应力应变连续协调、土体骨架不可压缩、土体始终饱和、排水符合达西定律等诸多假定基础上的^[15],其计算结果与实际往往差别较大。

强夯及排水固结理论落后于实践,其设计方法是半理论半经验的,在理论上进行试验研究,通过试验数据分析和反馈,可对设计方案和理论研究具有重要指导推动作用。可人为改变土体的排水条件,结合各土层渗透性及强夯加载过程对土层影响等多种因素,设计复杂土层的综合排水系统。将轻型井点降水管作为粉细砂层中浅层竖向增强排水通道,塑料排水板作为淤泥质土中深层竖向增强排水通道,用填土、饱和粉细砂层作为轻型井点管、塑料排水板接力水平排水通道。使地层渗透性差异大、不同类型增强排水通道连通起来,形成一个接力排水系统。在强夯荷载下,复杂地层可整体排水完成固结,详见图 2。

井点管可拔除重复使用,塑料排水板材料应用广泛价格低廉,水平排水层利用原土就地取材。该排水系统具有施工高效便捷、造价低廉、绿色低碳环保等优点。

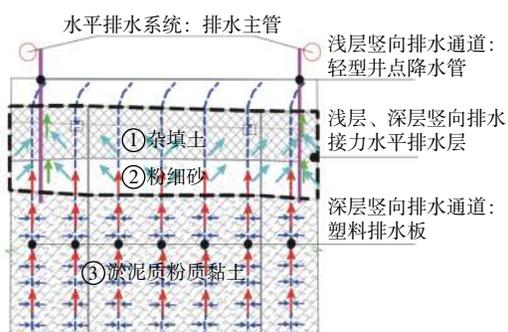


图 2 排水系统设计图
Fig. 2 Drainage system

2.2 试验参数

选取 2 个面积为 15 m×60 m 试验区, 区域 A 没有进行排水板施工, 区域 B 进行全工艺施工。埋设孔隙水压力计、水位观测管、分层沉降仪进行实时监测, 同时对地表沉降进行监测。试验平面图见图 3。

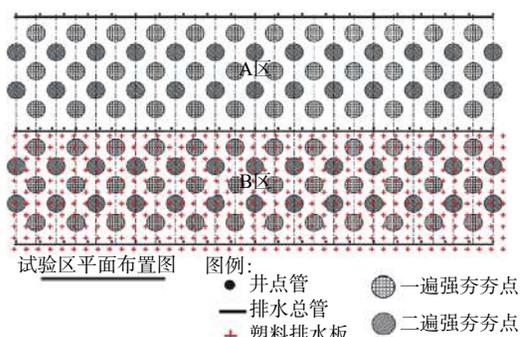


图 3 试验平面布置图
Fig. 3 Map of the test area

强夯试验参数: 点夯 2 遍, 点夯夯击能 2 500 kN·m, 夯点间距 5 m, 梅花形布置。满夯 1 遍, 夯击能 1 000 kN·m。

竖向排水系统参数: 浅层排水通道采用轻型井点降水。深层排水通道采用塑料排水板。井点降水管为镀锌钢管, 直径 36 mm, 单根长度 6 m, 井管水平间距 3 m。塑料排水板为 B 型, 水平间距 1.5 m, 单根长度入淤泥质土底。

水平排水系统参数: 浅层与深层竖向排水系统水平接力排水层采用杂填土和饱和粉细砂层, 厚度约 2 m。总体水平排水总管为直径 65 mm 镀锌钢管, 水平间距 15 m。

3 监测数据分析

3.1 地下水位监测

试验 B 区布置 4 组地下水位监测孔, 监测地下水位变化, 地下水位历时典型变化曲线见图 4。

从图 4(a)中可以看出, 降水持续 5 d 后地下水位

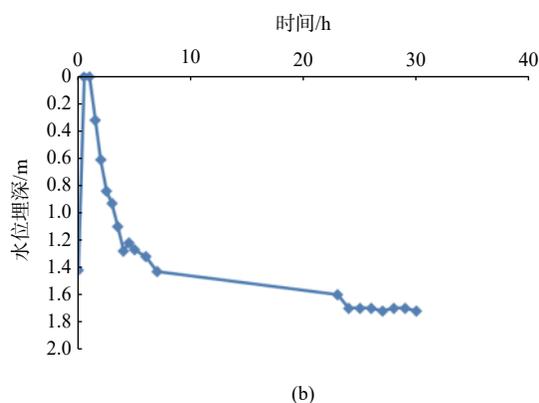
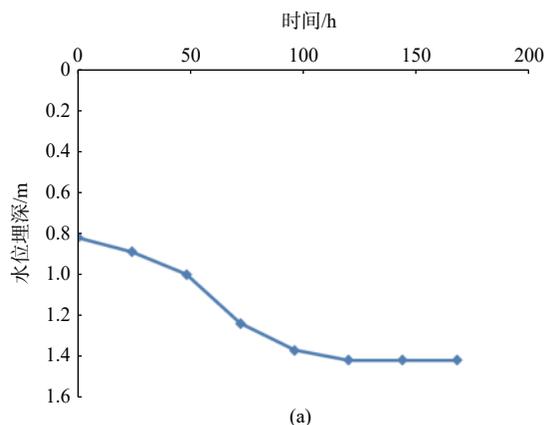


图 4 夯前 (a) 和夯后 (b) 降水时间变化曲线
Fig. 4 Duration curve of groundwater level depth before (a) and after (b) ramming

降低 0.6 ~ 0.7 m, 之后水位降深不变, 降水量不变。若进一步降低地下水位, 应加密井点降水管。从图 4 (b)可以看出, 强夯后地下水位迅速上升, 水位升至地面, 上升幅值约 1 m。持续降水 7 ~ 10 h, 上升的地下水降至夯前持续降水 5 d 后水位。由于其他原因 10 ~ 20 h 内未测地下水水位, 后继续降水 18 h, 地下水水位再降低 0.3 m。这可能是夯后土体密实度增加, 轻型井点真空度增加, 增加了地下水水位下降幅值。

3.2 孔隙水压力监测

在试验 A 区、B 区分别设置 1 组孔隙水压力监测点, 埋深分别为 4, 6, 8, 10, 12, 14 m, 监测数据见图 5、图 6。试验 B 区布置 6 组孔隙水压力监测点, 每组埋深分别为 4, 6, 8, 10, 12, 14 m, 对孔隙水压力监测, 典型监测数据详见图 7。

从图 5 可以看出, 排水板施工后, 4 ~ 10 m 深处的孔隙水压力均有减小, 减少幅度为 8% ~ 20%。埋深 12 m 以上孔隙水压力略有变化。施打塑料排水板后, 土体内形成竖向排水通道, 在上部回填土及自重作用下出现孔隙水压力消散现象。同时也证明了普通堆载或

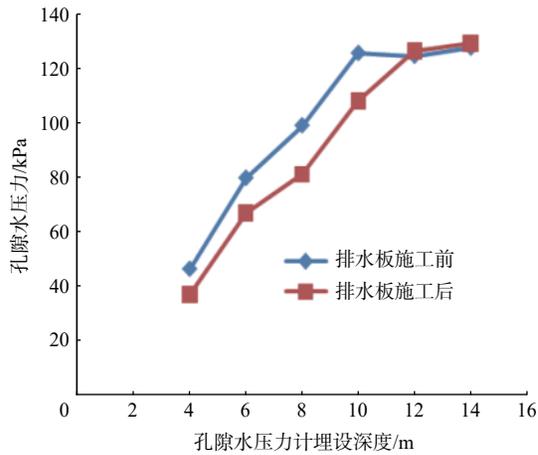


图 5 排水板施工前后孔隙水压力变化曲线

Fig. 5 Change of pore water pressure before and after plastic drainage plate embedded

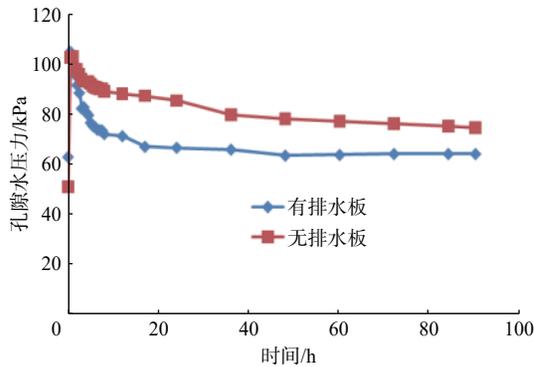


图 6 夯后有、无排水板孔隙水压力变化曲线 (6 m 处)

Fig. 6 Effect of plastic drainage plate to pore water pressure vanishing after ramming (6 m deep)

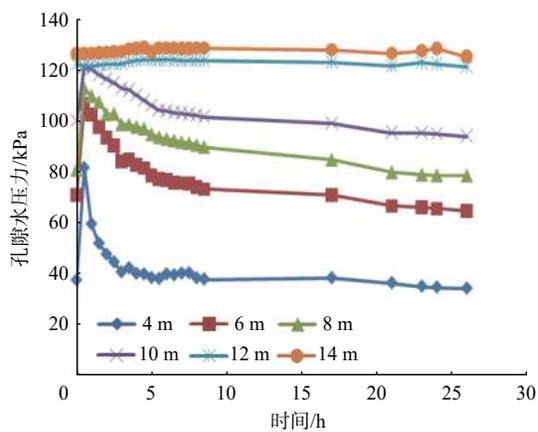


图 7 夯后孔隙水压力历时变化曲线

Fig. 7 Duration curve of pore water pressure after ramming

真空加载等静荷载对深部淤泥质土固结具有明显的分层缺陷,这也是普通真空预压或堆载预压表层效果好、中下部效果差的原因。

从图 6 可以看出,施加塑料排水板区域夯后,超孔

隙水压力在 7~10 h 后基本全部消散。未施加塑料排水板区域夯后超孔隙水压力消散缓慢,夯后 3 d 仍有约 50% 未消散。说明排水板可有效加速超孔隙水压力消散,大大缩减动力固结法点夯间歇时间,缩减整个施工工期。

从图 7 中可以看出,强夯后 4~10 m 深处孔隙水压力迅速升高,夯击能转换为超孔隙水压力,其值为夯前的 2.68~1.28 倍,12~14 m 深处孔隙水压力变化不明显,说明该夯击能的有效影响深度约为 10 m。夯后超孔隙水压力开始消散,埋深越浅消散幅度越大,强夯 7 h 后超孔压基本全部消散,埋深越浅消散速度越快,最终孔压稳定在强夯前的 80% 左右。说明在强夯动力有效影响范围内,使淤泥质土体产生微裂隙,加快土体排水速度和孔隙水压力消散速度。

在强夯荷载作用下,井点降水管、塑料排水板及粉细砂层形成竖向排水、水平向排水的接力排水系统,可整体快速排出地下水,使地基土整体排水固结。

3.3 分层沉降监测

试验 B 区设 6 组分层沉降监测点,初始值与第一遍点夯前测量间隔 7 d,第一遍点夯与第二遍点夯间隔 24 h。监测数据平均值见表 2。

表 2 分层沉降监测值

初始埋深 值/m	Table 2 Monitoring data of layered settlement			
	第一遍夯前沉 降值/mm/占土 层厚度比值/%	第一遍夯后沉 降值/mm/占土 层厚度比值/%	第二遍夯前沉 降值/mm/占土 层厚度比值/%	第二遍夯后沉 降值/mm/占土 层厚度比值/%
3.3	1.0/0.3	19.0/5.8	0.0/0.0	9.0/2.7
5.5	1.0/0.5	11.0/5.0	2.0/0.9	7.0/3.2
7.0	1.0/0.7	6.0/4.0	0.0/0.0	5.0/3.3
9.0	5.0/0.25	3.0/1.5	1.0/0.5	5.0/2.5
10.9	0.0/0.0	4.0/2.1	4.0/2.1	8.0/4.2
12.9	0.0/0.0	4.0/2.0	0.0/0.0	2.0/1.0
14.9	2.0/0.1	0.0/0.0	0.0/0.0	1.0/0.5

从表 2 可以看出,除第二遍夯后埋深 10.9 m 测点破坏导致数据异常外,埋深 3~10 m 范围土体在强夯作用下有一定沉降,埋深 11~15 m 范围土体在强夯荷载作用下沉降不明显,说明该夯击能影响深度为 10 m。2 遍点夯后埋深 3~7 m 土体沉降量分别约为土体厚度的 5%、3%,埋深 7~10 m 土体沉降量均为土体厚度的 2% 左右。

3.4 地表沉降监测

夯前持续降水期间对地表沉降量进行了监测,同时对夯前、夯后地表沉降进行了监测,试验 B 区共布设 5 个监测点,监测数据见表 3。

表 3 持续降水地表沉降、平均夯沉量监测数据

Table 3 Surface settlement by pumping and ramming settlement

点号	初始高程 /m	持续抽水沉降量 /mm	强夯后沉降量 /mm	总沉降量 /mm
1	4.260 22	10.99	437.3	448.29
2	3.865 69	17.01	401.3	418.31
3	4.234 62	6.24	426.5	432.74
4	4.074 14	7.25	376.2	383.45
5	4.468 02	8.96	349.7	358.66
平均值		10.09	398.2	408.29

从表 3 可以看出,持续降水 7 d,地表沉降量 6.2~17.0 mm,占上部土体厚度的 0.7%~2.0%,表明持续降水可使土体固结沉降。强夯动力荷载作用下,

表层土体压缩量 349~437 mm,占上部土体厚度的 8.7%~10.9%,使土体得到压密固结。

4 效果检测

4.1 夯前夯后土体参数对比

对夯前、夯后土体进行取样,按照土工试验方法标准^[16]要求进行测定,对其物理参数进行对比,试验数据见表 4。从表 4 可以看出,除个别试样数据异常外,强夯前、后土体孔隙比、含水率、湿密度、黏聚力、内摩擦角均有所改善,取样深度 5~10 m 改善幅度明显,表明处理效果明显。深度 10 m 以下土体参数略有改善,但不明显。

表 4 夯前、夯后土体物理参数对比

Table 4 Difference in soil parameters before and after ramming

取样深度/m	孔隙比 e		湿密度 $\rho_w/(g \cdot cm^{-3})$		含水率 $W/\%$		压缩模量 E_{s1-2}/MPa		黏聚力 c/kPa (剪切试验)		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ (剪切试验)	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
5.3~5.5	2.123	1.369	1.48	1.70	68.1	45.9	2.33	3.01	2.0	4.6	1.6	2.6
6.5~6.7	2.403	1.264	1.48	1.78	71.8	34.1	2.38	2.93	3.2	5.1	2.2	2.5
7.5~7.7	1.418	0.938	1.67	1.81	48.3	34.2	3.58	3.76	3.8	8.2	2.2	3.7
9.0~9.2	1.432	1.185	1.67	1.79	49.0	42.2	3.70	3.71	4.2	7.4	3.2	4.2
10.0~10.2	1.389	1.186	1.67	1.78	45.5	42.0	3.13	3.35	5.3	6.4	4.2	4.3
11.0~11.2	1.039	0.953	1.82	1.81	37.7	33.8	3.96	3.52	4.7	7.5	2.5	4.7
12.0~12.3	1.058	1.095	1.79	1.90	32.4	33.4	3.99	3.90	6.2	5.9	3.6	3.8
平均值	1.552	1.141	1.65	1.80	50.4	37.9	3.29	3.45	4.2	6.4	2.8	3.7
5~10m平均值	1.753	1.188	1.59	1.77	56.5	39.7	3.02	3.35	3.7	6.3	2.7	3.5

4.2 固结度计算

固结度分上部填土、粉细砂层与下部淤泥质土层两部分。上部 4 m 内填土、粉细砂其固结变形在强夯+降水完成后基本完成,其固结度可认为达到 100%。

采用土体孔隙比的变化来计算 4 m 埋深下土体固结度。夯前、夯后取土深度范围内土样平均孔隙比分别为 $e_0=1.552$ 和 $e_1=1.141$ (表 4)。淤泥质软土在上部土层荷载作用下固结,上部土层荷载约为 70 kPa。强夯后取土样进行固结试验,其数据见表 5。对应荷载 70 kPa,取土深度范围内土样平均孔隙比 $e=1.017$ 。

根据地基处理规范^[2],场区内淤泥质软土在附加荷载作用下最终固结完成的固结沉降量 S_f 为:

$$S_f = \varepsilon \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \quad (1)$$

式中: e_0 ——场区内淤泥质土上部未被施加附加荷载之前的土样孔隙比;

e ——场区内淤泥质软土在附加荷载作用下固结完成的孔隙比,根据土样室内固结试验取得;

H ——场区内淤泥质软土层的厚度;

ε ——经验系数。

场区内淤泥质软土在附加荷载作用下,施工排水板并强夯处理后固结完成的固结沉降量为 S :

$$S = \varepsilon \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H \quad (2)$$

式中: e_1 ——场区淤泥质软土在附加荷载作用下,施工排水板并强夯处理后土体孔隙比。

表 5 固结试验数据

Table 5 Data of the consolidation test

取样 深度/m	先期固 结压力 P_c/kPa	各级压力下固结稳定后的孔隙比 e					上部荷载 70 kPa
		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa		
5.5~5.7	36.0	1.31	1.253	1.13	0.926	1.199	
6.8~7.0	36.0	1.26	1.185	1.08	0.919	1.138	
7.5~7.7	58.6		0.834	0.793	0.741	0.816	
9.1~9.3	54.4		0.929	0.865	0.790	0.901	
10.0~10.2	54.0		1.069	1.002	0.905	1.039	
11.3~11.5	57.9		1.060	0.992	0.902	1.031	
12.0~12.2	65.2		1.133	0.834	0.782	1.001	

淤泥质软土在附加荷载作用下, 施工排水板并强夯处理后达到的固结度为 U :

$$U = \frac{S}{S_f} = \frac{e_0 - e_1}{e_0 - e} \quad (3)$$

进场取土时, 场区内已完成土体附加荷载施加及排水板施工, 强夯处理后达到的固结度计算中以 e'_0 代替 e_0 , 计算得:

$$U = \frac{S}{S_f} = \frac{e'_0 - e_1}{e'_0 - e} = \frac{1.552 - 1.141}{1.552 - 1.017} = 77\%$$

计算得出的固结度 77% 略低于要求的固结度 (80%)。

4.3 承载力检测

浅层载荷板试验点 3 个, 深度 0.5 m, 深层螺旋载荷板试验点 3 个, 深度 4.5 m, 按照相关规范^[17-18] 要求进行处理后地基承载力检测, 试验数据汇总见表 6。

表 6 载荷试验数据结果

Table 6 Results of the loading tests

试验点编号	试验深度 /m	承载力特征值 f_{ak}/kPa	f_{ak} 对应沉降量 s/mm	变形模量 E_0/MPa
1	0.5	155	4.51	12.5
2	0.5	160	4.01	14.6
3	0.5	150	4.33	12.8
4	4.5	119	0.93	10.3
5	4.5	116	0.98	9.6
6	4.5	120	0.91	10.7

从表 6 中可以看出, 表层承载力及变形模量完全满足设计要求。4 m 以下土体承载力平均值为 118.3 kPa, 略低于设计 120 kPa 要求, 变形模量平均值 10.3 MPa, 满足设计 10 MPa 要求。

5 夯后持续监测

5.1 地表沉降监测

强夯施工完成持续降水 20 ~ 40 d 后, 停止降水对地表沉降进行监测。由于其他原因, 监测时间仅有 1 个月, 数据见表 7。

表 7 夯后地表沉降数据

Table 7 Surface subsidence data

点号	停止降水时地面高程/m	0 ~ 10 d 沉降量/mm	10 ~ 20 d 沉降量/mm	20 ~ 30 d 沉降量/mm	累计 30 d 沉降量/mm
1	4.005 22	12.07	5.32	2.80	20.19
2	4.016 62	12.96	8.08	3.30	24.34
3	3.880 59	13.14	5.12	2.45	20.71
4	4.029 69	7.76	4.05	1.62	13.43
5	3.942 67	8.93	3.13	2.38	14.44
6	4.004 57	5.40	2.95	1.35	9.70

从表 7 可以看出, 强夯完成 20 d 区域的 1 ~ 3 点沉降在 25 mm 以内, 40 d 区域的 4 ~ 6 点沉降在 15 mm 以内, 总体沉降量不大。最后一次监测时, 单日平均沉降为 0.13 ~ 0.33 mm, 虽达不到 0.02 mm/d 的稳定要求^[19], 沉降量逐渐减少, 已基本趋于稳定。

5.2 分层沉降监测

强夯施工完成持续降水 20 ~ 40 d 后, 停止降水并继续对分层沉降进行监测, 部分监测点损坏, 仅列出完好点数据, 监测结果见表 8。从表 8 中可以看出, 分层沉降数值整体平稳, 略有增加, 下部土体增加幅度略大。

表 8 夯后分层沉降监测值

Table 8 Monitoring data of layered settlement

初始埋深 值/m	停止降水时 沉降量/mm	0 ~ 10 d 沉降 量/mm	10 ~ 20 d 沉降 量/mm	20 ~ 30 d 沉降 量/mm
3.3	30.0	30.0	29.9	/
5.5	21.1	22.0	/	22.0
12.9	8.3	10.0	10.0	13.2

5.3 孔隙水监测

强夯施工完成持续降水 20 ~ 40 d 后, 停止降水并继续对孔隙水压力进行监测, 监测结果见图 8。从图 8 中可以看出, 孔隙水压力整体平稳, 略有下降, 基本降至原孔隙水压力或略低, 没有残余应力累积, 这与文献 [20][21] 研究结果一致。10 m 处和 12 m 处孔隙水压力下降幅度稍大, 这与土体内设有排水板排水通道有关。

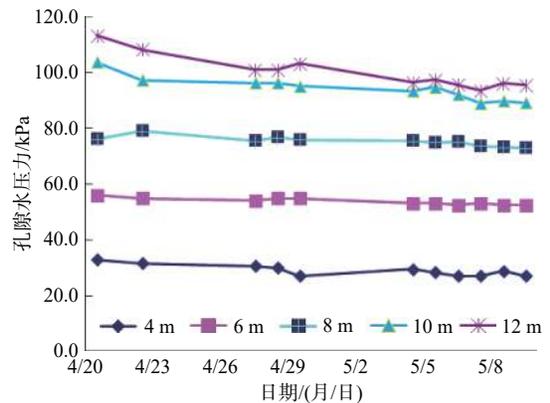


图 8 夯后持续监测孔隙水压力历时变化曲线

Fig. 8 Duration curve of pore water pressure after ramming

6 结论与建议

(1) 在强夯荷载作用下, 井点降水管、塑料排水板及粉细砂、填土形成的竖向、水平向接力排水系统工作高效, 可使填土、粉细砂、淤泥质土复杂地层整体快速排水、固结。在强夯有效影响深度范围内, 淤泥

质土的孔隙比、含水率、黏聚力、内摩擦角等参数得到改善。

(2)通过持续降水,地表沉降量 6.2~17.0 mm,占上部土体厚度的 0.7%~2.0%。强夯动力荷载作用下,表层土体压缩 349~437 mm,占上部土体厚度的 8.7%~10.9%。2 遍点夯后埋深 3~7 m 土体沉降量约为土体厚度的 5‰、3‰,埋深 7~10 m 土体沉降量约为土体厚度的 2‰。

(3)夯后 1 个月监测表明,地表累计沉降 15~25 mm,沉降逐渐趋于稳定。孔隙水压力、分层沉降亦趋稳定,无残余应力累积。

(4)处理后地基表层承载力及变形模量满足设计要求。4 m 以下淤泥承载力平均值略低于设计要求,下部淤泥质土计算平均固结度为 77%,略低于 80% 的要求。

(5)后续应加大夯击能以增大影响深度,加密排水板设置以达到更佳的排水效果和地基处理效果。上层填土、粉细砂层及下层淤泥质土的综合渗透系数变化关系、排水量关系,以及将粉细砂层中竖向排水板在粉细砂层内水平布设的接力排水系统等有待于进一步研究。

参考文献 (References) :

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [GONG Xiaonan. Foundation Treatment Manual [M]. 3ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79—2012. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [3] 中国工程建设标准化协会. 强夯地基处理技术规程: CECS 279—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010. [China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification of dynamic consolidation to ground treatment: CECS 279—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)]
- [4] 左名麒. 震动波与强夯法机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(3): 55—62. [ZUO Mingqi. Vibration wave and dynamic compaction mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(3): 55—62. (in

Chinese)]

- [5] 雷鸣, 王星华, 唐依民. 基于孔压实测资料的真空预压机理及沉降计算探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 81—85. [LEI Ming, WANG Xinghua, TANG Yimin. Discussion of the mechanism of vacuum preloading and settlement calculation based on measured values of pore water pressure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 81—85. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘景锦, 雷华阳, 卢海滨, 等. 真空预压法淤堵泥层形成机理及预测模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 61—71. [LIU Jingjin, LEI Huayang, LU Haibin, et al. A study of siltation mud formation mechanism and prediction model of vacuum preloading method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 61—71. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 董超强. 塑料排水板堆载预压法处理超软土地基固结沉降与稳定性控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. [DONG Chaoqiang. Study on consolidation settlement and stability controlling of super-soft foundation treated by the method of prefabricated vertical drains with preloading[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 叶兴永. 强夯法处理软弱粉土地基试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. [YE Xingyong. The test and study of dynamic consolidation applied in soft silt foundation treatment. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王越虹. 低能量强夯联合井点降水处理沿海软质地基的应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011. [WANG Yuehong. Application research of coastal soft foundation by low-energy dynamic and dewatering consolidation[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈晨. 塑料排水板—强夯法在吹填土地基加固中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. [CHEN Chen. The application of plastic-board drain and dynamic consolidation method for filled foundation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 韩治勇. 高真空排水+强夯动静耦合软基加固机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. [HAN Zhiyong. Study on the mechanism of high vacuum drainage combined with dynamic compaction for soft foundation consolidation[D]. Hefei: Hefei University of Technology,

2016. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 谢伟树. 低能强夯真空排水法孔压消散及沉降计算研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [XIE Weishu. Study on pore pressure dissipation and settlement calculation under low-energy dynamic vacuum compaction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 谢松高, 陈锦旺. 地面积水情况下层状土壤的水平排水[J]. 水利学报, 1965(5): 1 - 9. [XIE Songgao, CHEN Jinwang. Horizontal ditch drainage for layered soil with surface ponded water percolated[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1965(5): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴航. 强夯作用下土体动力响应的特性与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016. [WU Hang. Study on dynamic response of soil under dynamic compaction[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. [LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for composite foundation: GB/T 50783—2012. [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)]
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for deformation measurement of building and structure: JGJ 8—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)]
- [20] 倪静, 朱颖, 陈有亮, 等. 循环荷载作用下竖向排水板加固软黏土的孔隙水压力累积特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 383 - 389. [NI Jing, ZHU Ying, CHEN Youliang, et al. Cumulative pore water pressure behaviour of soft clays installed with prefabricated vertical drains under cyclic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 383 - 389. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 林敏晖. 静动力排水固结法夯击间隔期间软土固结机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017. [LIN Minhui. Consolidation mechanism between tamping on soft soil Static-dynamic drainage consolidation treatment [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞