

深厚软土地基综合处理技术试验研究

王德亮, 曹军波, 郭军, 陈军红, 王国辉

(河北建设勘察研究院有限公司, 河北石家庄 050227)

摘要:根据深厚软土地基的特性及地基处理要求,结合碎石垫层、轻型井点排水固结、强夯法、振冲碎石桩4种地基处理方法的综合处理技术优势,开展地基综合处理技术试验研究。对处理过程中地下水及孔隙水压力等指标进行了细致的监测,并对处理前后的地基承载力进行对比分析,结果表明,该综合地基处理方法可弥补单一地基处理方式的缺点,能够有效提高地基承载力。本文可为后续的同类地基处理工程施工提供借鉴。

关键词:深厚软土地基;碎石垫层;轻型井点排水固结;强夯法;振冲碎石桩;地基承载力;地基综合处理技术

中图分类号:TU472 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2021)11-0117-05

Experimental research on comprehensive treatment techniques for deep and thick soft ground

WANG Deliang, CAO Junbo, GUO Jun, CHEN Junhong, WANG Guohui

(Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050227, China)

Abstract: According to the characteristics of deep and thick soft soil ground and the requirements of ground treatment, combined with the comprehensive treatment technology advantages of the four foundation treatment methods of gravel cushion, light well point precipitation, dynamic compaction, and vibration-replacement stone column, experimental research on comprehensive foundation treatment technology was conducted. The treatment process index such as groundwater, pore water pressure were carefully monitored, and the foundation bearing capacity before and after treatment was compared and analyzed. The results show that the comprehensive ground treatment method can make up for the shortcomings of a single ground treatment method, and can effectively improve the bearing capacity of ground. The article can provide a reference for subsequent construction of similar ground treatment projects.

Key words: deep and thick soft soil ground; gravel cushion; light well point precipitation; dynamic compaction method; vibration-replacement stone column; ground bearing capacity; comprehensive ground treatment techniques

0 引言

沿海地区广泛分布着较厚的松散粉细砂、粉质粘土、淤泥质土、吹填土等软弱土层,这类土具有含水量大、压缩性高、强度低等特点,利用这些场地做建、构筑物的地基时一般均需进行软基处理^[1-2]。

振冲碎石桩作为一种常用的复合地基处理方式^[3-5],工程中应用十分广泛,能有效地消散地震等震动引起的超静孔隙水压力,减少砂土地基的液化现象^[6]。强夯法处理地基是20世纪60年代末由法

国工程师Menard^[7]首先提出。国内诸多专家、学者也对强夯工艺的作用机理进行了深入研究^[8-10]。当软弱土层的厚度不大,需要提高浅层地基的承载力时,碎石垫层可起到较好的效果,还可以起到减少基础沉降量、加速软弱土层排水固结的作用。轻型井点降水适用于地下水埋深 <6 m的粘土及粉土等土层,结合其他地基处理方式时,可提高地基土的排水固结速度^[11-12]。

深厚软土地区沉积地层的均一性较差,采用单

收稿日期:2021-02-18; 修回日期:2021-03-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.11.017

作者简介:王德亮,男,汉族,1983年生,高级工程师,硕士,主要从事岩土工程施工的技术管理工作,河北省石家庄市槐安路555号,wdrain@163.com。

引用格式:王德亮,曹军波,郭军,等.深厚软土地基综合处理技术试验研究[J].钻探工程,2021,48(11):117-121.

WANG Deliang, CAO Junbo, GUO Jun, et al. Experimental research on comprehensive treatment techniques for deep and thick soft ground[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11):117-121.

一地基处理方法的处理效果有时不理想。只有多种地基处理方法相结合^[13],才能针对性地解决多种工程问题,因此有必要对软基处理的新方法、新工艺不断地进行研究和摸索。

1 综合处理新技术加固机理

深厚软土地基综合处理新技术充分利用了碎石垫层、轻型井点排水固结、强夯动力固结、振冲碎石桩4种地基处理方法的技术优势,以振冲碎石桩为主体,考虑饱和软土的工程特性,将振冲置换、强夯动力固结、软土排水固结、垫层应力扩散这几种地基处理机理有机结合、综合应用,最终实现改善和提高土体力学物理性能,提高复合地基的承载力及压缩模量,改善地基抵抗变形的综合能力。

2 试验区概况

试验区面积为20 m×20 m,在振冲碎石桩加固范围内,地层主要以粉质粘土为主,粉质粘土多为软塑—可塑状态,上部地层为软塑状态,下部地层为可塑状态;地面以下5 m及15 m位置各有一层粉土,层厚均为1.5 m左右,粉土以中密为主,摇震反应迅速。

在试验桩区域,仅1层地下水,属潜水,主要受大气降水及潮汐的补给,蒸发为主要排泄途径,施工期间稳定地下水埋深1.5~2.5 m。

3 试验方案

采用振冲碎石桩、碎石垫层、轻型井点排水固结、强夯动力固结4种地基处理方法进行综合试验处理,要求处理后复合地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 220$ kPa,具体施工步骤如下:

振冲碎石桩施工→桩间真空井点排水系统的布设及降水→碎石铺设→低能量强夯及排水固结→施工区满夯→碎石垫层施工。

3.1 振冲碎石桩

振冲碎石桩桩径1.2 m,桩长25 m,正三角形布桩,桩间距1.8 m,桩顶标高-1.5 m,在试验区内共布置61根桩。采用含泥量 $\geq 5\%$ 的碎石,粒径为40~150 mm。选用BJV130E-426型振冲器进行施工。

3.2 轻型井点

成孔孔径 ≤ 150 mm,深度10 m。井点管采用

直径 ≤ 32 mm的PVC管,孔深9.8 m,底部设置2.5 m长的花管段。

井点管沿试验区四周布置一圈,形成封闭环,间距2 m。试验区内井点位于正三角形布置的碎石桩中心点土体内,间距采用1.8 m×3.1 m。内、外圈井点单独抽排水,外圈井点主要起到隔断外界水源向试验区内部进行补给的作用,内部井点进行试验区内部疏干降水。

真空抽水期间要求真空度 ≤ 0.08 MPa,且强夯主夯期间保持井点管运行正常。

3.3 碎石铺设

强夯之前及满夯之后均铺一层碎石垫层,采用级配碎石,有机质含量、含泥量 $\geq 5\%$,最大粒径 ≤ 30 mm,铺填厚度300 mm,采用压路机分2层压实,夯填度 ≥ 0.9 。

3.4 低能量强夯

(1)采用4遍点夯2遍满夯的工艺,第一、二遍强夯施工期间继续进行试验区碎石桩桩间土真空井点降水的施工方法。夯锤直径2.0~2.3 m,锤重10~15 t,接地压力25~40 kPa。

(2)第一遍夯击能1200 kN·m,第二遍夯击能1500 kN·m,夯点均布置在振冲碎石桩上,每点夯3击,间距7.2 m×3.1 m。

(3)第三遍、第四遍夯击能均为2000 kN·m,夯点布置在第一遍、第二遍夯点之间,每点夯3击,间距7.2 m×3.1 m。

(4)满夯夯击能1000 kN·m,每点夯击2击,锤印搭接不少于1/4。2遍满夯施工间隔3 d。满夯施工完毕后,间歇不少于14 d的恢复期。

图1为试验区平面布置示意图。

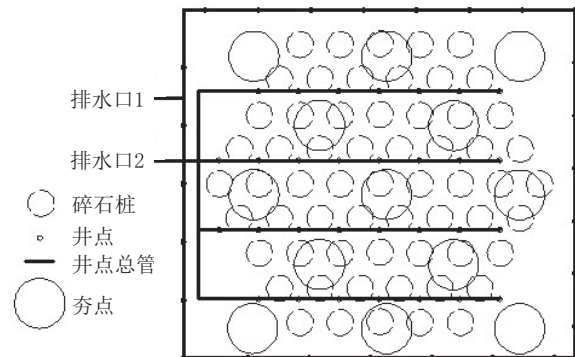


图1 试验区平面布置示意

Fig.1 Layout plan of the test area

4 试验过程监测与分析

试验区四周井点管内侧布置了5个水位观测点;在东北及西南侧各布置了一个孔隙水压力监测点。每组孔隙水压力计沿深度方向按照间距2 m埋设一支(即自碎石桩桩顶算起,每孔5支孔隙水压力计)。

4.1 降水系统出水量观测与分析

第一、二遍强夯时,降水机组2的井眼数均为30眼井。在强夯过程中,由于土中超孔隙水压力的显著增大,场地单位时间出水量明显上升;强夯结束后,土体中孔隙水压力迅速下降,单位出水量也呈现出指数下降的趋势。强夯动力荷载对于加速场地的排水具有显著的效果。

第二遍强夯时,强夯分前后2 d完成,出水量变化如图2所示。随着强夯点数和次数的增加,土体的孔隙水压力呈现阶梯跳跃式升高。土体中形成较多的裂隙排水通道,土体单位时间出水量增加。水排出后,孔隙水压力迅速下降,土体单位时间的出水量相应减小。

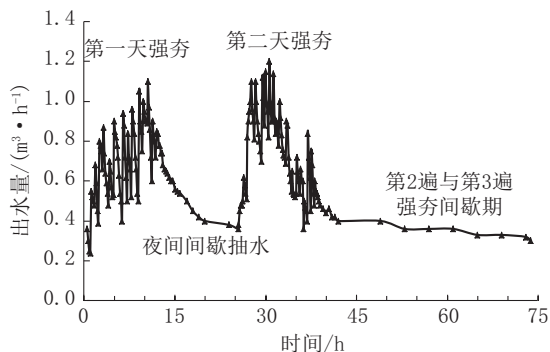


图2 第二遍强夯出水量变化曲线

Fig.2 Water yield change curve of the second round of dynamic compaction

第三遍强夯时,试验区内真空井点减少为16眼;再进行第四遍强夯时,土体排出的水量已经很小,继续加强夯基本没有太大效果,表明本次试验进行3遍强夯是合理的。

4.2 地下水位观测与分析

刚开始强夯时地下水位上升较明显,强夯结束后,在不断排水的情况下,地下水位逐渐降低。随着强夯次数的增加,地下水位变化越来越小。

强夯过程中,在夯击能作用下,孔隙水压力增大,自由水大量排出,引起地下水位升高。真空降水

系统的可靠运行和对补给水源的隔离措施,对试验区内的地下水位控制非常重要,将直接影响软土固结效果,施工时应当保证降水系统的可靠运行。

4.3 孔隙水压力的观测与分析

孔隙水压力随着地下水位上升或下降变化十分明显,即随着地下水位升高(降低)而增大(减小)。待孔隙水压力和地下水位稳定后进行下一遍强夯。

第一遍强夯开始时,孔隙水压力在2 m的位置呈现负值,说明此处井点降水对孔隙水压力影响较大,地下水位-3.91 m以下的孔隙水压力为正值。孔隙水压力最大增幅接近10 kPa,不同深度的孔隙水压力变化不同,10 m处增幅最小,说明强夯对地下水的有效影响深度在8 m之内。强夯后31 h,孔隙水压力消散了85%以上。

第二遍强夯孔隙水压力变化整体规律和第一遍强夯基本一致。

第三遍强夯采用的是较大的能量,强夯期间孔隙水压力最大增幅均低于6 kPa,且总体趋势较稳定,与前2次的强夯相比,第三遍强夯时孔压增幅较小,说明强夯的加速固结作用越来越小,经过前几遍的强夯处理后,土体被压密,土层含水量变小,强夯遍数再增加已无太大意义。

第四遍强夯的第一天,地下水位呈明显下降趋势,进行点夯时,孔隙水压力呈现较小波动趋势,但整体是在减小。第四遍强夯的第二天,强夯后地下水位有轻微上升,孔隙水压力有较小增长。

满夯过程中,孔隙水压力呈现先升高,之后慢慢消散的规律,各孔检测数据变化规律趋于一致。孔隙水压力的变化幅值和波动小于前2次点夯,和第三遍强夯的情况类似,说明经过地基处理后,土体被压密,含水量降低,进行满夯时已没有过多的水被排出。

4.4 夯沉量分析

经过地基综合处理后,试验区总夯沉量为368 mm。第一遍的夯沉量最大,第三遍虽然加大了夯击能,但夯沉量变化不大,这和孔隙水压力的分析结果较吻合,由此可见,对于本项目强夯遍数设置为3遍是适宜的。

5 加固效果评价

通过采用碎石桩桩身超重型动力触探、桩间土标准贯入试验、单桩复合和三桩复合载荷试验等检

测手段对复合地基进行了加固前和加固后的对比。

5.1 标准贯入试验评价

在强夯前后共进行了2组标准贯入试验,每组3个试验点,处理前后锤击数 N 的平均值对比如图3所示。0~5 m深度范围内土体锤击数较处理前均有所提高,此范围内锤击数平均增加了1~4击。说明经过多遍强夯及降水处理后,土体被挤密,承载力提高,形成了“硬壳层”,弥补了振冲碎石桩表层承载力相对偏小的缺点。6~10 m深度范围内土体锤击数 N 整体有所提高,说明本项目的地基综合处理方法对较深层土体也有一定的加固和挤密效果。

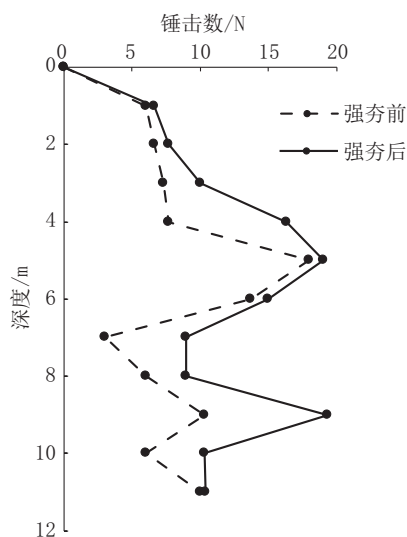


图3 处理前后标贯锤击数平均值对比

Fig.3 Comparison of the average SPT blow count before and after treatment

5.2 桩体动力触探评价

开展了一组(3根桩)的桩体动力触探试验,处理前后平均值对比如图4所示。0~5 m深度范围内桩体锤击数较处理前有所提高,锤击数增加了1~5击,说明在该段范围内的碎石桩桩体经强夯后被进一步挤密,上部桩体承载力提高了。

5.3 地基承载力评价

根据勘察报告显示,地基处理前原地基承载力为80 kPa;地基综合处理完毕后,分别进行了3个桩间土载荷试验,经检测,桩间土承载力为90.3 kPa;表明处理后的地基承载力提高了12.9%。

强夯处理之前进行了3个单桩复合地基静载试验,承载力为108 kPa。强夯处理完成后,进行了3

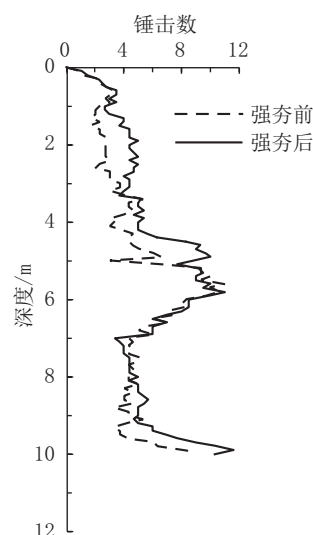


图4 处理前后动力触探平均值对比

Fig.4 Comparison of the average DPT blow count before and after treatment

个三桩复合地基载荷试验,三桩复合地基承载力为256.3 kPa,相比强夯处理前,复合地基承载力提高了137.3%。此外,桩间土及复合地基承载力均有不同程度的提高。

6 结语

(1)利用碎石垫层、轻型井点降水、强夯法、振冲碎石桩4种地基处理方法的综合技术优势,以振冲碎石桩为主体,考虑饱和和软土的工程特性,将振冲置换、强夯动力固结、软土排水固结、垫层应力扩散几种地基处理机理有机结合,扬长避短,可有效提高地基承载力。

(2)借助振冲碎石桩、碎石垫层的排水通道及井点降水的降排水作用,低能量强夯引起的超孔隙水压力得以快速消散;真空井点降水系统可以隔断外界补给水源并及时消散由强夯引起的超孔隙水压力,为提高强夯处理效果提供了重要保障。

(3)本项目采用深厚软土综合地基处理技术经济、合理,各分项技术施工工艺成熟,处理后地基承载力提高较大,可为后续类似的工程施工提供参考。

参考文献(References):

- [1] 编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- Writing Committee. Handbook of Foundation Treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.

- [2] 周德泉,王丽辉,赵明华.竖向增强体的组合形式及其复合地基研究动态[J].中外公路,2007,27(4):173-178.
ZHOU Dequan, WANG Lihui, ZHAO Minghua. The combined forms of vertical reinforcement and the research trends of its composite foundation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007,27(4):173-178.
- [3] 赵明,赵明华,陈昌富.确定碎石桩复合地基桩土应力比的一种新方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2002,29(2):112-116.
ZHAO Ming, ZHAO Minghua, CHEN Changfu. New pile-soil stress ratio calculation method in rushed stone pile composite foundation[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2002,29(2):112-116.
- [4] 牛国生.振冲碎石桩在水库坝基处理工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):75-80.
NIU Guosheng. Application of vibro-replacement stone column in the reservoir dam foundation treatment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(1):75-80.
- [5] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile supported earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002,128(1):44-53.
- [6] 孟宪中,张国堂,宋刚,等.弥补振冲碎石桩地基处理承载力不足的方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):79-85.
MENG Xianzhong, ZHANG Guotang, SONG Gang, et al. Method to improve the bearing capacity of vibro-replacement stone pile composite foundations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(11):79-85.
- [7] Menard L, Borioise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1975,25(1):3-18.
- [8] 郑颖人,陆新,李学志,等.强夯加固软黏土地基的理论工艺研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):18-22.
ZHENG Yingren, LU Xin, LI Xuezhi, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(1):18-22.
- [9] 韩文喜,张淦元,傅小敏,等.饱和土的强夯模拟试验[J].地质灾害与环境保护,1999,10(3):31-36.
HAN Wenxi, ZHANG Naoyuan, FU Xiaomin, et al. Modeling test of dynamic consolidation for saturated soil[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1999,10(3):31-36.
- [10] 白冰.强夯荷载作用瞬间饱和土层固结变形计算[J].岩土力学,2003,24(1):57-60,64.
BAI Bing. Calculation of consolidation deformation of saturated stratum under dynamic compaction loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(1):57-60,64.
- [11] 冯士广,纪燕祥,尹春播,等.一次性免堆载预压技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):72-77.
FENG Shiguang, JI Yanxiang, YIN Chunbo, et al. Application and research of the once-for-all surcharge-free preloading process[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):72-77.
- [12] 徐有娜,李建中.非饱和网纹红土比例加载特性研究[J].钻探工程,2021,48(2):117-124.
XU Youna, LI Jianzhong. Research on behavior of unsaturated reticulate red clay under proportional loading[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):117-124.
- [13] 王刚,赵建粮,王烁.PHC与CFG复合桩在郑州航空港区的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):59-63.
WANG Gang, ZHAO Jianliang, WANG Shuo. Application of PHC and CFG composite piles in the Zhengzhou Aviation Port area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):59-63.

(编辑 周红军)