

文章编号:1673-9469(2015)02-0047-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.012

真空降水联合强夯法加固粉土路基的研究

彭中浩^{1,2}, 陈永辉^{1,2}, 陈庚^{1,2}, 高世虎^{1,2}, 张婉璐^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:结合绍兴滨海新城新东线道路的软基处理工程,进行了真空井点降水联合强夯法的现场试验研究。试验过程中对每遍处理过程中的孔隙水压力、地下水位、施工沉降进行了实时监测和分析,并对加固后的路基进行静力触探检测和地基承载力检测。结果表明:真空井点降水联合强夯法可有效加固深厚饱和粉土路基,能加快孔隙水压力消散,缩短工期;并使加固后土体的Ps值和地基承载力显著提高,有效加固深度达8 m,处理效果显著。

关键词:真空井点降水联合强夯法;饱和粉土;现场试验;加固深度

中图分类号:TU471.8

文献标识码:A

Experimental research on dynamic consolidation method combined with vacuum well point dewatering to reinforce silt subgrade

PENG Zhong-hao^{1,2}, CHEN Yong-hui^{1,2}, CHEN Geng^{1,2}, GAO Shi-hu^{1,2}, ZHANG Wan-lu^{1,2}

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;)

Abstract: Combining with the new east coastal city of Shaoxing road soft ground treatment works, the in-situ experiment of dynamic consolidation method combined with vacuum well point dewatering is carried out. Construction settlement, underground water level and excess pore water pressure are measured and analyzed in the experiment, and conduct static cone penetration and bearing capacity are tested after reinforcement. The results showed: High Vacuum Densification method can effectively reinforce deep saturated silt subgrade, can accelerate the dissipation of pore water pressure, shorten the construction period; and significantly improve the value and bearing capacity of foundation soil reinforcement after the effective reinforcement depth of 8m, treatment effect to meet the design requirements, which has a certain reference value for similar reinforcement deep saturated silt roadbed coastal areas.

Key words: dynamic consolidation method combined with vacuum well point dewatering; saturated silt; in-situ test; reinforcement depth

目前,随着沿海地区经济往来的日益频繁,在沿海沿江地区兴建了大量的公路,这些公路的路基多处于软土地区^[1]。对于占地面积60%~80%的公路、道路,如何经济、快速、高效地处理软土路基将影响整个工程的造价、质量和进度^[2]。真空井点降水联合强夯法作为一种饱和软土地基的快速处理工法^[3],由于施工快速、造价低廉、节能环保、效果显著等优点得到了广泛的应用和发展^[4-5]。本文以绍兴滨海新城新东线公路软土路基工程为实例,结合真空井点降水联合强夯法,进行现场试验及加固效果研究。

保、效果显著等优点得到了广泛的应用和发展^[4-5]。本文以绍兴滨海新城新东线公路软土路基工程为实例,结合真空井点降水联合强夯法,进行现场试验及加固效果研究。

1 工程概况

本公路工程位于绍兴滨海新城,西起临江新城

收稿日期:2014-11-04

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(2014H01);江苏省高校研究生科技创新计划(2013B26714)

作者简介:彭中浩(1990-),男,江苏连云港人,硕士,从事软土地基处理研究工作。

表 1 土的物理力学指标

Tab. 1 The physical and mechanical properties of soil

序号	土层名称	含水率/%	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和度/%	孔隙比	塑性指数	压缩模量/MPa
1	粉土	26.3	1.93	93.8	0.772	9.1	12.6
2	粉砂	26.1	1.95	90.8	0.726	—	12.52
3	粉土	24.6	1.93	94	0.736	9.3	11.52
4	淤泥质粉质粘土	40.0	1.79	96.3	1.134	15.3	3.19

一号路,东至东区与余姚市交界处的规划疏港公路,此公路为双向八车道,路基处理宽度为 53.5 m。且要求处理后的地基表层承载力特征值达 140 kPa。

经现场勘查,此工程位于冲击平原,地势低平,多分布有鱼塘,场地浅层为厚层冲海积粉土层,局部夹粉砂,厚约 20.10 m,状态松散-中密,性质较差,可能发生液化;深部为厚层海积淤泥质粉质黏土、粉质黏土层,流塑-软塑状,厚约 6.6 m,压缩性高、性质差。物理力学指标如表 1。

2 试验方案

在进行大面积真空井点降水联合强夯法加固处理之前,为分析此方法的适用性以及为大面积加固提供设计依据,选取 50 m × 60 m 试验块进行现场试验。地基处理的土层主要为去除表层植被后的原状土层,要求处理后的地基承载力特征值满足 140 kPa。

真空井点降水联合强夯法,包括真空井点降水和强夯两部分^[6-7],两部分的试验参数选择如下:

(1)真空降水环节,间隔设置深管和浅管,深管长为 6 m,浅管长为 3 m,间排距为 3.5 m × 3.5 m。

(2)强夯击密工序采用 3 遍点夯和 1 次满夯。夯击能分别为:第 1 遍,1 500 kN · m,3 击;第 2 遍,1 800 kN · m,4 击;第 3 遍,2 200 kN · m,4 击;满夯,800 kN · m,2 击。

其中夯击能 $E = m \times g \times h$, m 为夯锤重, h 为夯锤提起高度。

点夯施工过程中,高真空强排水持续进行。一遍强夯完成后,待孔隙水压力消散 80% 以后进行下一遍强夯。第一、二遍点夯实行跳夯,两遍夯完后夯点间距 3.5 m × 3.5 m,第三遍点夯打在第一遍夯点上,对第一遍夯能进行加强,满夯搭接 1/4 锤直径。三遍点夯的夯点布置图如图 1 所示。

真空井点降水和强夯击密两工序穿插进行,并采用“先轻后重,逐级加能,少击多遍,逐层加

固”的夯击方式^[8]。具体流程为:第一遍降水—第一遍强夯—第二遍降水—第二遍强夯—第三遍降水—第三遍强夯—满夯。

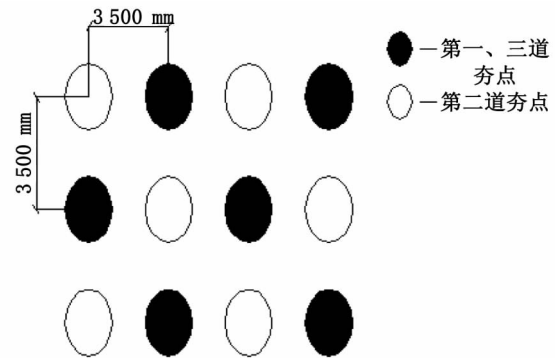


图 1 夯点布置图

Fig. 1 Layout of compaction point

3 试验监测分析

现场试验过程中监测分析的内容包括场地孔隙水压力变化、加固过程中水位变化以及每遍强夯后夯沉量。现场试验的监测点与原位试验点位平面布置如图 2 所示。

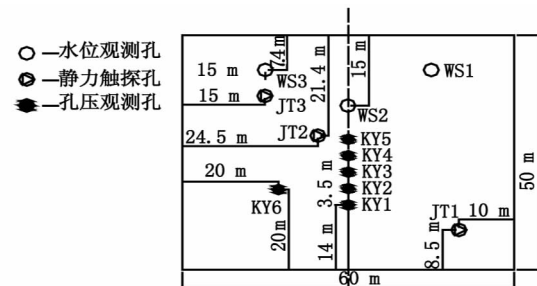


图 2 监测点与原位试验点位平面布置图

Fig. 2 Monitoring and in-situ test point

3.1 孔隙水压力分析

为观测土层在降水固结试验中孔隙水压力消散情况,在场地中线布置 5 个孔压观测孔(KY1 - KY5),埋深分别为 2、4、6、8、10 m。在距场地边线 20 m 处布置 1 个孔压观测孔 KY6,埋深 4 m。孔压从第一遍降水后,第二遍强夯前开始监测,历时 2 周。并在群夯之前进行单点点夯,分别距 KY6 为 0、2、4、6 m 处进行三次点夯,夯击能为 1 500

kN·m,研究距夯点不同径向距离超静孔隙水压力变化规律。

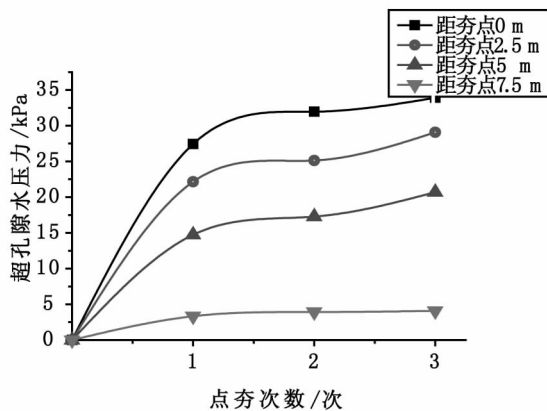


图3 距夯点不同距离处超静孔隙水变化曲线图

Fig.3 Changes in excess pore water at different distances curves

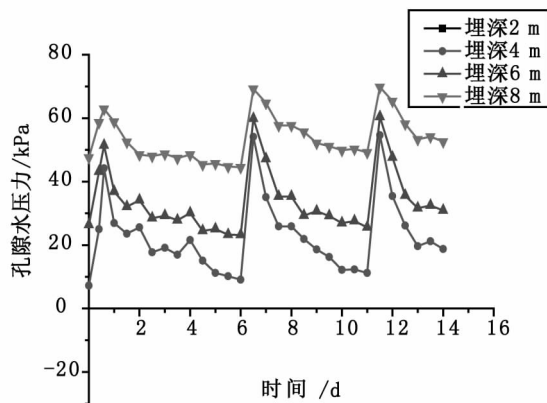


图4 施工过程中孔隙水压力变化规律

Fig.4 Variation of pore water pressure during construction

(1)图3 为在距 KY6 不同径向距离处进行点夯,超孔隙水压力的变化规律,其中超静孔隙水压力值是由夯击产生的孔隙水压力与静水压力的差值。由图可以看出,在距夯点不同距离处,埋深4 m 的超孔隙水压力值不同,随径向距离增大而减小,在距夯点7.5 m 时,超孔隙水压力值变化较小,可知点夯的径向有效影响范围可达7.5 m。

(2)图4 为真空降水联合强夯加固过程中,观测孔隙水压力的变化曲线。由此曲线可以看出,随着深度的增加,夯击后孔压变化减小,如图中埋深8 m 处的孔压在夯击时变化幅度明显减缓,说明夯击效果随着土层深度增加呈递减趋势。且由于粉土渗透性较好,每遍强夯后降水3~5 d,孔压消散达80%以上。如埋深4 m 处孔压第一次夯击后达44.6 kPa,最终消散为8.1 kPa,孔压消散约90%。且在降水到2 m 以下时,由于真空作用,埋

深2 m 的孔压将出现负值。

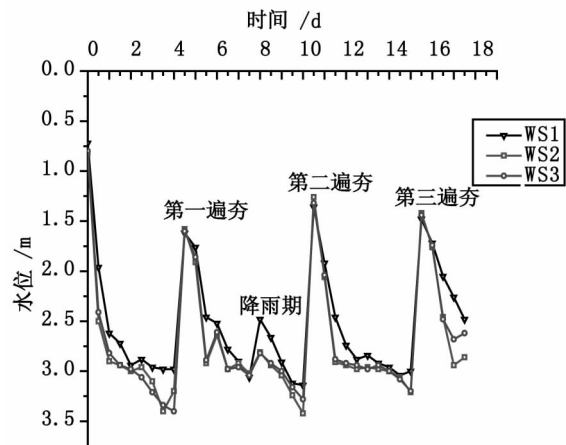


图5 地下水位降深变化规律

Fig.5 Variations of drawdown of groundwater

3.2 地下水位监测

图5 给出了自降水预压以来,包括前三次强夯阶段地下水位降深 s 随抽水时间 t 的变化规律。如图所示,在真空强降水作用下,地下水呈阶梯状直线下降,3 d 内平均降至地表下3.2 m。在各个阶段强夯期间,地下水会出现较明显的回升,夯击过程中水位回升峰值最大增量约为1.48 m。由于粉土渗透性较大,夯击引起升高的地下水位回落速度很快。夯击结束3~4 d 后地下水位几乎与施工前持平。图中曲线较大波动处是受强降雨天气的影响。

3.3 夯沉量监测

在每遍夯击结束后,推平场地,按10 m×10 m 网格对处理前和处理后的场地地面标高进行测量,对测量数据取均值,求出每遍高真空击密后的地表沉降值,结果详见表2。

表2 施工沉降监测表

Tab.2 Construction settlement monitoring table

主要工序	第一遍强夯击密	第二遍强夯击密	第三遍强夯击密	满夯
沉降/cm	30.1	21.4	11.2	5.8
合计/cm	68.5			

由表2 可以看出,经真空井点降水联合强夯击密后,试验区施工沉降可达68.5 m。夯沉量主要集中在第一遍和第二遍高真空击密,其中第一遍击密后地表沉降最大,占总沉降的44%,后面几遍夯沉量逐级减小。

4 加固效果分析

为现场检测地基加固效果,在试验区完工后

14 d 进行了静力触探试验和载荷板试验。

4.1 静力触探试验

在试验场区内布置 3 组静力触探试验,为便于各阶段加固前后对比分析,每个试验点处在加固前和每一遍强夯后均进行了单桥静力触探试验。选取其中一组 JT3 进行地基加固分析,得到第一遍击密、第二遍击密、满夯处理后 14 d 的 P_s 值对比曲线,曲线如图 6 所示。

由各阶段夯击后的静力触探 P_s 对比曲线可以得出以下规律:

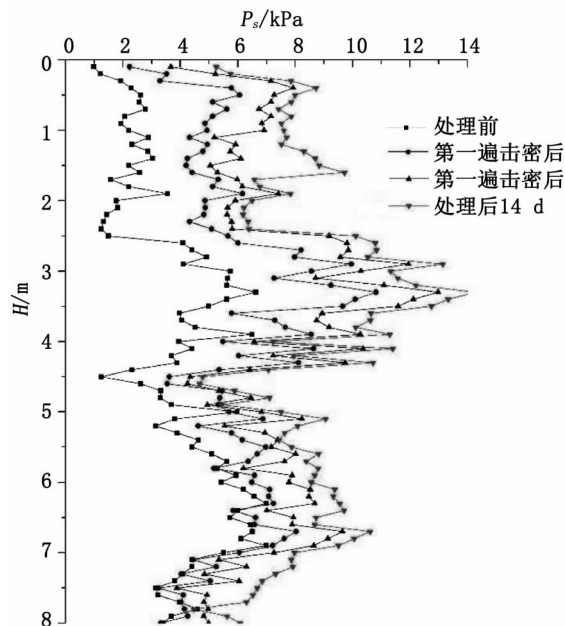


图6 典型 P_s - H 曲线

Fig. 6 Typical P_s - H curve

(1) 试验检测结果表明经过各阶段真空井点降水联合强夯击密处理后,试验区土层的 P_s 值都有大幅度的提高。第一遍强夯击密处理后的 P_s 值相较于未处理之前的 P_s 值提高幅度最大,尤其在 4 m 深度范围内提高了 2.1 ~ 3 倍,因此真空井点降水联合强夯击密可形成约 4 m 的较为良好的硬壳层。

(2) 6 m 深度范围内,每遍处理后土体强度都有比较明显的增长。第一遍强夯击密处理后,接下来每遍处理使得 P_s 值提高 1.2 ~ 1.5 倍,处理完后的 P_s 值是处理前的 3.8 倍。6 ~ 8 m 深度范围内,地基处理后的 P_s 值是地基处理前的 1.6 倍。说明此次真空井点降水联合强夯试验的有效加固深度可达 8 m。

强夯加固深度通常由修正的 Menard 公式计算:

$$H = \alpha \sqrt{Mh}$$

式中 H 为加固深度,单位:m; M 为夯锤重,单位:t; h 为夯锤提升高度,单位:m。

第一遍夯击能为 1 500 kN·m,由静力触探结果可看出,有效加固深度约 6.5 m,由上式计算修正系数 α 约取 0.531。第二、三遍夯击能分别为 1 800 kN·m 和 2 200 kN·m,相应的处理深度为 7 ~ 7.2 m 和 7.5 ~ 8 m,由修正的 Menard 公式计算所得修正系数 α 为 0.534 ~ 0.552。修正系数与土的含水率和地下水位有关,在当前水位降深和施工参数下,此土层强夯加固深度的 Menard 修正系数可取 0.53 ~ 0.55。

4.2 载荷板试验

为进一步检验加固后该路基的承载力情况,进行载荷板试验。试验采用面积为 1 m² 的正方形厚钢板,加荷最大值为 300 kPa,加载级差为 30 kPa,逐级等量加载,得到载荷板试验的 P - S 曲线如图 7 所示。根据平板载荷试验要点^[9-10],并结合检测结果 P - S 曲线图,加载至最大荷载 300 kPa,地基并未出现破坏,其承载力特征值不低于 150 kPa,满足设计要求。因此,粉土地基经真空井点降水联合强夯法处理后,可得到有效加固,形成硬壳层,并且有利于消除工后沉降和不均匀沉降。

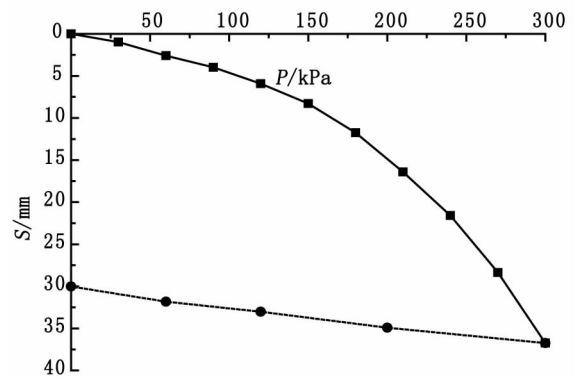


图7 载荷板试验曲线

Fig. 7 P - S curve of static load test

5 结论

1) 真空井点降水联合强夯法运用于深厚粉土公路软基加固处理后,地基承载力和静力触探等指标可以得到显著提高。

2) 真空井点降水联合强夯法运用“压差”主动排水,大大缩短了施工工期。由于在强夯击密施工过程中进行持续真空排水,既起到了降水预压

的作用,又加速了因夯击产生的超静孔隙水压力的消散使得每遍夯后约3~4 d孔压即消散80%以上,且水位降至3 m以下,达到进行下一遍强夯施工的标准,提高工作效率。

3)强夯击密间距和夯击能对加固效果有影响,随击密间距的增大,加固效果减小。在本文试验方案的1500 kN·m的夯击能下,点夯的有效径向影响范围可达7.5 m,在施工中宜采用小间距击密方案且夯点间距在7.5 m范围内为宜。

4)真空井点降水联合强夯法处理此深厚粉土路基的有效深度约8.0 m,绍兴滨海地区此类软土路基有效加固深度的Menard修正系数为0.53~0.55,有效加固深度和地基承载力均满足设计要求。此方法处理后的软基浅层可形成较良好的硬壳层,达到提高承载力效果。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 水伟厚, 詹金林, 周同行. 真空降水动力固结法在软土地区大型工业项目中的应用[C]//第十届土力学与岩土工程学术会议论文集. 重庆: 重庆大学出版社,

2007: 248-253.

- [3] 高有斌. 高真空击密法加固滨海饱和吹填土地基试验和理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [4] 徐士龙, 楼晓明, 刘敦敏. 高真空击密法加固堆场地地基的试验研究[C]//第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003(10): 736-739.
- [5] 周健, 姚浩, 贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1685-1688.
- [6] 滕圣康, 王金璟, 徐士龙, 等. 高真空击密法加固水力吹填粉煤灰地基的试验[J]. 水运工程, 2004(7): 9-12.
- [7] 周健, 曹宇, 贾敏才, 等. 强夯-降水联合加固饱和软黏土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 376-381.
- [8] 郑颖人, 陆新, 李学志. 强夯加固软黏土地基的理论研究与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18-22.
- [9] 李雪萍, 程祖峰, 李娟, 等. 浅层平板载荷试验确定承载力特征值浅析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 39-42.
- [10] GB 50007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].

(责任编辑 王利君)

(上接第46页)束,混凝土弹性压缩引起箱梁纵桥向位移大于先张拉腹板束后张拉顶板束。

2)由于两种张拉方式引起的预应力损失量差别不大,两种张拉方案均可行,可根据工期和现场条件进行选择。

3)先张拉顶板束后张拉腹板束,引起的预应力损失略小于先张拉腹板束再张拉顶板束。

参考文献:

- [1] JTJ 041-2000, 公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] COLE H A. Direct solution for elastic prestress loss in pre-tensioned concrete girders [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2000, 5(1): 27-30.
- [3] 石鲁宁, 闫维明, 何浩祥, 等. 考虑第一批预应力损失的

后张法箱梁张拉顺序优化[J]. 北京工业大学学报, 2014(2): 239-246.

- [4] 刘美兰. Midas Civil 在桥梁结构分析中的应用: 一[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [5] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [6] 朱建. 预应力张拉工艺对连续刚构桥应力及变形影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [7] 丁南宏, 钱永久, 林丽霞. 分批张拉预应力损失的空间简化计算方法[J]. 公路交通科技, 2006(6): 66-68.
- [8] BARR P J, KUKAY B M, HALLING M W. Comparison of prestress losses for a prestress concrete bridge made with high-performance concrete[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(5): 468-475.

(责任编辑 王利君)