

高真空击密法加固青岛地区软土地基试验研究

杨登峰,于广明,赵鹏,李杏

(青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033)

摘要:结合青岛高新技术产业开发区的软基加固处理实践,对高真空击密法加固饱和软土地基在本地区的加固效果进行了研究。通过对加固处理过程中土体的超静孔隙水压力变化,变形、承载能力变化等进行监测,并对大面积施工过程中各参数包括强夯的夯击能、有效加固深度、夯击间隔时间、夯击次数和遍数、真空降水的时间等进行优化分析,试验结果表明高真空击密法能充分发挥强夯和真空降水的优点,有效加固了土体。

关键词:软基处理;高真空击密法;施工参数

中图分类号:TU477

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0047-05

High Vacuum Densification Method for Soft Foundation Improvement in Qingdao Region

YANG Dengfeng, YU Guangming, ZHAO Peng, LI Xing

(College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: The experimental study has been conducted to verify the effectiveness of reinforcing the saturated soft foundation by high vacuum densification method based on the soft foundation consolidation and treatment practices of Qingdao high-tech industrial development zone. The changes of excess pore water pressure and soil deformation, ground bearing capacity have been monitored, analyzed and discussed in the soil strengthening process to optimize the parameters for construction in large area, including the tamping energy in dynamic compaction, the effective reinforcement depth, the times of tamping and the intervals, the time of vacuum drainage. The test results showed that the high vacuum densification method could give full play to the advantages of dynamic compaction and vacuum drainage.

Key words: soft foundation; high vacuum densification method; construction parameters

高真空击密法主要针对饱和软粘土地基的处理,其理论核心是多遍的低能量强夯与真空降水交替进行。低能量的强夯(dynamic compaction, DC)使土层产生压缩并形成裂隙,以便于激起土体的超静孔隙水压力的消散,不会导致“橡皮土”的产生^[1-3]。强夯过程中的真空降水,使土体中的孔隙水及时排出,在加固土体范围内形成真空负压,加速土体的固结,有效地解决了土中地下水的排出和超孔隙水压力消散的问题^[4-5]。徐士龙等^[6]、吴价城等^[6]先后结合实际工程,对高真空击密法加固处理饱和软粘土地基提出工艺上的一些建议和改进,使其逐渐得到推广应用。

对于达不到要求的软土地基,需对其进行加固处理。软土地基处理的方法很多,有直接采用桩基、挤密碎石桩、深层搅拌桩、粉喷桩及真空预压、堆载预压等方法,但一般地基加固方案由于工期长、费用高等无法达到预期目的。与上述处理方法相比,高真空击密法具有造价低、工期短、质量可控、施工环保且适应新近沉积层及人工冲淤等优点,因而在青岛高新技术产业开发区大面积软基加固工程中进行实践。

收稿日期:2011-07-12

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(Z2007F10);青岛市科技局计划项目(07-2-3-16-jch).

作者简介:杨登峰(1983—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事工程力学方面的研究。E-mail:kdydf@126.com.

于广明(1963—),男,黑龙江青冈人,教授,博士生导师,主要从事工程力学、防灾减灾工程、工程测量方面的研究。

E-mail:yugm@qtech.edu.cn.

本研究结合青岛高新技术产业开发区的软基加固工程,通过设置试验场区并结合室内试验与原位测试方法,对高真空击密法加固前后土体的物理和力学性能的变化进行监测、检验,评价高真空击密法对于该水文地质条件下软基的加固效果,并对各施工参数进行了优化分析,为青岛高新技术产业开发区大面积软质地基处理的设计和施工提供科学依据。

1 试验区工程地质条件

本次勘察采用钻探、取土试验等手段对试验区进行综合评价。获得了各土层的物理、力学性质指标,试验区土层条件自上而下大致为:①表层土为新近回填土,杂色,干到稍湿,呈硬塑状态,具高压缩性,厚度为2.5~3.8 m,较大颗粒石块及混凝土废料;②淤泥质土层、粉质粘土层及强风化岩层,为较软弱地层,稍湿,呈流塑状态,具中压缩性,厚度为1.5~4.4 m;③粉质粘土层一般为褐黄到黄色,较湿,呈可塑到硬塑状态,具中到低压缩性,厚度为0.6~3.0 m;④底层为强风化岩,银灰色,饱和状态,呈软塑到可塑状态,具低压缩性。

2 现场试验设计

试验现场分A、B两个试验区,采用不同的夯击能量进行加固效果对比。本次试验夯击参数的选取遵循“少击多遍,从上至下,逐步增大加固深度与范围”的原则,两区的平面尺寸和具体施工参数见表1。

表1 各试验小区夯击施工参数汇总表

Tab.1 Summary of parameters of tamping construction in different test areas

夯区编号	夯区面积/m ²	夯击次数			单击夯能/(kN·m)		
		第1遍	第2遍	第3遍	第1遍	第2遍	第3遍
A	26×40	2	2	1	1 000	1 000	800
B	26×40	2	2	1	1 400	1 400	1 200

强夯机械选用50 t履带式吊车,夯锤为圆柱形,锤底直径1.2 m,重10 t,落距设为8.0~14.0 m,采用自动脱钩装置。采用3遍强夯加固土体,相邻两遍夯击之间的时间间隔初定为7 d,具体间隔时间根据试验过程中超静孔隙水压力的消散时间进行调整,要求必须待超静孔隙水压力消散85%以上方可进行下一遍夯击^[4]。如第1击时就出现明显隆起,则要适当降低夯击能,相邻夯坑内的隆起量应≤5 cm;第2击夯沉量应小于第1击夯沉量,两击夯沉量应≤50 cm^[7]。

试验开始之前进行井点降水以提高夯击效果,降水深度设为3.0 m,井点间距设为1 m,排距设为3.0 m。当地下水位降至3.0 m以下时,开始进行第1遍夯击。

3 试验结果分析

3.1 平均夯坑沉降及地面沉降分析

饱和软土地基的工后沉降是地基土处理的一个重要指标。高真空击密法利用快速动力排水固结形成的低含水量、高密实度硬壳层,克服了工后沉降的技术难题。为确定不同强夯施工工艺时的地面沉降以便控制将来大面积施工时的设计标高,在各个小区布置了6 m×6 m的方格网状地面沉降测点测量强夯前和每遍强夯后的地面沉降情况,强夯过程中选取一定数量的夯点进行夯坑夯沉量测量。每遍夯击后,夯坑内的隆起量、平均夯坑沉降及平均地面沉降数据如表2所示。

分析表2中数据可以看出,前两遍夯击过程中试验区夯坑内的隆起量都在4 cm以下,达到了地基加固标准的要求,两试验区的平均夯坑沉降和平均地面沉降具有相似的变化规律,随夯击遍数的增加夯击引起的平均夯坑沉降和平均地面沉降逐渐减小,两实验区平均地面沉降均不大于30 cm,达到了施工设计的要求。从平均地面沉降来看,第1遍夯击引起的地面平均夯沉量要明显大于第2遍。说明随着夯击遍数的增加,土

体逐渐被压实。

表 2 试验区平均夯坑沉降与平均地面沉降汇总表

Tab.2 Summary of average settlement of tamping pits and average ground settlement in different test areas

试验区	夯击遍数	夯点个数	隆起量/mm	平均夯沉/mm	平均地面沉降/mm
A	第 1 遍	300	32	326.9	86.5
	第 2 遍	300	26	157.8	12.8
	第 3 遍	360	14	35.9	10.9
	总计			520.6	110.2
B	第 1 遍	300	38	365.2	110.9
	第 2 遍	300	30	163.2	53.5
	第 3 遍	360	19	43.9	49.1
	总计			572.3	213.5

3.2 孔隙水压力变化分析

孔隙水压力监测是确定高真空击密法施工参数的重要依据。夯击能作用将引起孔隙水压力的迅速增长,孔隙水压力增长的幅度和消散速度在一定程度上反映了地基加固效果的好坏和强夯的影响范围。本次试验中观测到的超静孔隙水压力随时间、深度的变化曲线如图 1、图 2 所示。

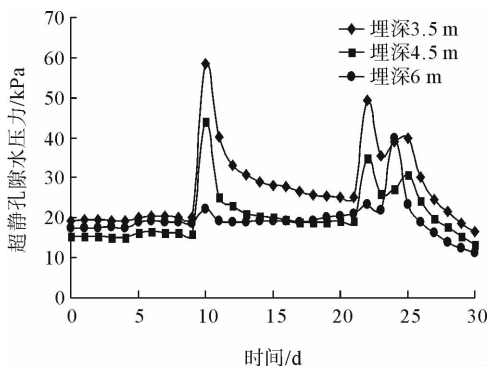


图 1 A 试验区降水过程中超静孔压变化曲线图
Fig.1 The curves of excess pore water pressure in the process of dewatering in A test area

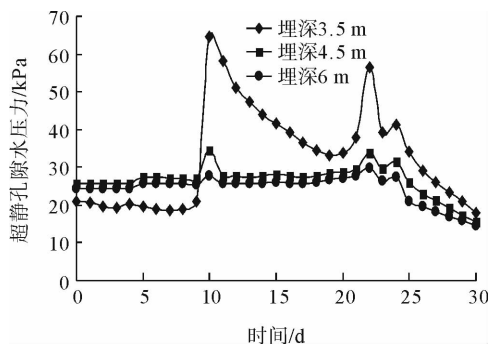


图 2 B 试验区降水过程中超静孔压变化曲线图
Fig.2 The curves of excess pore water pressure in the process of dewatering in B test area

分析图 1、图 2 曲线变化情况看出,在夯击过程中 A、B 实验区曲线表现出了相同的变化规律,每遍夯击完成后,不同埋深处的超静孔隙水压力均迅速增大达到峰值,随着夯击遍数的增加,超静孔隙水压力增幅逐渐变小。第 1 遍夯击超静孔隙水压力最大,A 试验区峰值达到 58.57 kPa,B 试验区峰值达到 64.75 kPa;第 3 遍的满夯能量最小,产生的超静孔隙水压力也最小,A 试验区峰值为 39.88 kPa,B 试验区峰值为 41.28 kPa。同一孔位处理埋深 3.5 m 的超静孔隙水压力远大于埋深 6 m 处的超静孔隙水压力。

第 1 遍强夯完成后在井点降水的作用下超静孔隙水压力开始迅速消散,夯后 8 d 即可消散 85% 以上。井点降水装置撤离后进行满夯,超静孔隙水压力消散速度比前两遍夯击后的慢,说明井点降水作用加速了孔隙水压力的消散和孔隙水的排出。根据超静孔隙水压力消散情况分析可知,强夯的能量主要耗散在地下 6 m 以内的土体中。

3.3 加固效果分析

为了评价高真空击密法加固软土地基的效果和优化施工参数,在软基处理前后分别对两试验区土体进行了原位测试(包括静力触探试验和标准贯入试验)和室内试验,并对场地处理前后的测试及实验结果进行

分析。静力触探试验(cone penetration test,CPT)结果如图3—图6所示。

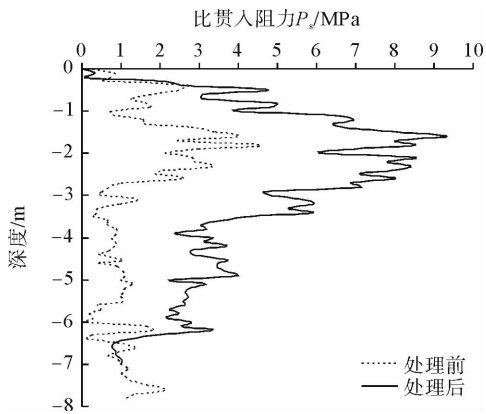


图3 A试验区处理前后静力触探曲线图(1#)

Fig. 3 CPT curves before and after DC of A test area (1#)

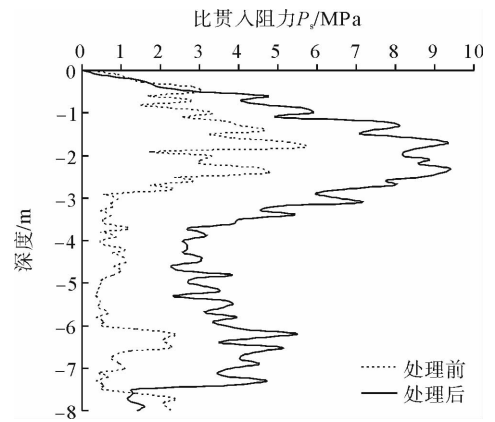


图4 A试验区处理前后静力触探曲线图(2#)

Fig. 4 CPT curves before and after DC of B test area (2#)

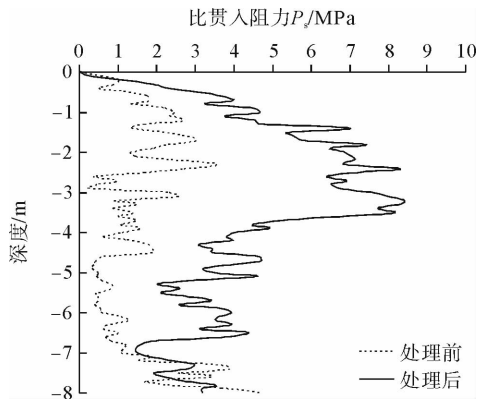


图5 B试验区处理前后静力触探曲线图(1#)

Fig. 5 CPT curves before and after DC of B test area (1#)

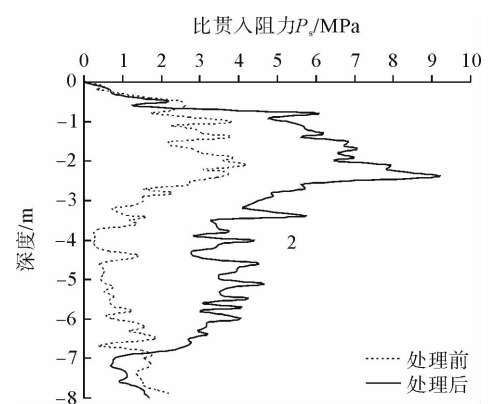


图6 B试验区强夯前后静力触探曲线图(2#)

Fig. 6 CPT curves before and after DC of B test area (2#)

由试验区地基处理前后静力触探试验结果可以看出,两试验区加固后土体在1~6 m深度之间的比贯入主力 P_s 值和加固前相比均有大幅度的提高,A试验区的比贯入主力 P_s 值达到了9.71 MPa,B试验区的比贯入主力 P_s 值达到了9.32 MPa,在2~3 m和4~6 m深度处比贯入主力 P_s 值增幅较大,说明加固后的土体性质有了明显的改善,达到了施工设计的要求。地面以下1 m范围内的回填土层加固效果不很显著,强夯完成后应适当进行压实处理。

为分析土层的加固效果,分别在两试验区进行了标准贯入试验,试验结果如表3所示。

表3 试验区加固前后标贯试验结果对比表

Tab. 3 Comparison of SPT results before and after reinforcement in different test areas

试验区	土层	夯前击数	夯后击数	标贯击数增加百分比/%
A	淤泥质土层	4.5	6.1	35.6
	粘土层	7.9	14.3	81.0
B	淤泥质土层	4.3	5.8	34.9
	粘土层	8.2	14.8	80.5

由标准贯入实验结果可以看出,两试验区土体加固后淤泥质土层和粘土层的标贯击数均有提高,A试验区的标贯击数增幅较大,淤泥质土层达到35.6%,粘土层达到81.0%,土体加固效果显著。

试验区地基处理完毕后,在每个试验区选取3点取样进行室内试验,测量土体主要物理力学性质指标。比较实验数据可以看出,强夯加固前后试验区土体的含水率、密度、孔隙比、压缩模量和内摩擦角均有明显的变化。地基处理完成后试验区土体的含水率和孔隙比有了明显的降低,淤泥质土层的含水率降低了42%,孔隙比降低了12.2%;粘土层含水率降低了0.3%,压缩系数降低了39.3%。表明加固后的软土地基物理性质有了很大改善,尤其是淤泥质土层改善较显著。

4 结论

由高真空击密法加固软土地基的现场监测和室内试验分析,可得出以下结论:

1)本次加固试验将强夯动力固结法和真空强排水技术结合起来,采用高真空降水来加速夯后超静孔隙水压力的消散和孔隙水的排出,有效加固了地下0~6 m范围内的土体,对淤泥质土层加固效果显著,达到设计要求。

2)高真空击密法在青岛高新技术开发区还是首次使用,施工参数的选择不能简单地依据传统控制标准,应根据本地实际情况并结合试验监测来确定,以避免大面积施工中“橡皮土”的产生,保证加固效果。

3)高真空击密法加固软土地基,能够充分发挥强夯和真空降水的优点,缩短了工期,为工程节约了资金,具有良好的推广应用价值。

参考文献:

- [1]丘建金,张旷成.动力排水固结法在软基加固工程中的应用[J].工程勘察,1995(6):7-10.
QIU Jianjin,ZHANG Kuangcheng. Application of dynamic consolidation method in the enforcing of soft soil project[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,1995(6):7-10.
- [2]雷学文,白世伟,孟庆山,等.动力排水固结法加固饱和软粘土地基试验研究[J].施工技术,2004,33(1):50-52.
LEI Xuewen,BAI Shiwei,MENG Qingshan,et al. In-situ test study on soft clay improvement by the dynamic consolidation combined with drainage[J]. Construction Technology,2004,33(1):50-52.
- [3]周健,曹宇,贾敏才,等.强夯-降水联合加固饱和软粘土地基试验研究[J].岩土力学,2003,24(3):376-380.
ZHOU Jian,CAO Yu,JIA Mincai,et al. In-situ test study on soft soils improvement by the DCM combined with dewatering [J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(3):376-380.
- [4]周健,张健,姚浩.真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J].岩土力学,2005,26(增):198-200.
ZHOU Jian,ZHANG Jian,YAO Hao. Study on technique of low-energy dynamic consolidation method combined with dewatering used to treat soft roadbed[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(s):376-380.
- [5]徐士龙,楼晓明.高真空击密法加固堆场地基的试验研究[C]//第9届土力学与岩土工程学术会议论文集.北京:清华大学出版社,2004:736-739.
- [6]吴价城,武亚军,吴名江.高真空击密法:一种软土地基处理新工艺[J].地球与环境,2005,33(增):496-501.
WU Jiacheng,WU Yajun,Wu Mingjiang. A high vacuum soil compact method:A new technology for soft soil improvement [J]. Earth and Environment,2005,33(s):496-501.
- [7]中华人民共和国行业标准编写组.JGJ 79-2002 建筑地基处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.