

文章编号:1673-9469(2015)02-0060-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.015

水气分离集成井降水强夯法试验研究

刘伟¹,陈慧刚²,李平^{1,3},陆海⁴

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;2. 平湖市建筑工程管理处,浙江 平湖 314200;3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098;4. 江苏诚丰建设有限公司,江苏 江阴 214400)

摘要:为了克服降水强夯法处理深度小、降水时间长的缺陷,结合扬中灏港通用码头软土地基处理工程,改进了传统降水强夯工艺,采用水气分离集成井降水联合强夯法进行加固处理。通过在常规真空井点降水强夯和改进降水强夯两个试验区开展现场监测和检测试验,对加固效果进行了对比评价分析,研究表明:水气分离集成井降水强夯工艺降水深度可达地表以下5~6 m,夯后孔压消散时间约为1~2天;地基加固后总地表施工期最大沉降量为0.606 m,可有效减小工后沉降;与常规井点降水强夯法相比,改进法加固后土体强度和地基承载力均有较大提高,地基加固效果优势明显。

关键词:水气分离;降水强夯;软基加固;试验分析;扬中灏港

中图分类号:TU471.8

文献标识码:A

Experimental study of moisture separator integrated wells dewatering - dynamic compaction

LIU Wei¹, CHEN Hui-gang², LI Ping^{1,3}, LU Hai⁴

(1 School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;2 Pinghu City Construction Project Management Office, Zhejiang Pinghu 314200, China;3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;4 Jiangsu Cheng-feng Construction Co., Ltd, Jiangsu Jiangyin 214400, China.)

Abstract: In order to overcome its defects of insufficient depth and dewatering long time, combining the soft foundation treating engineering of Yangzhong Haogang all-purpose wharf, the traditional dewatering - dynamic compaction is improved, in which moisture separator integrated wells dewatering - dynamic compaction is used to consolidate the soft foundation. Field monitoring and testing are carried out in two experimental sites, respectively the conventional vacuum wells dewatering - dynamic compaction, and another treated with the improved dewatering - dynamic compaction. The results show that dewatering depth of the improved dewatering - dynamic compaction could reach 5 - 6m below the surface, and the dissipating time of the pore water pressure after tamping is 1 to 2 days; the maximum settlement of the surface during the construction after the foundation consolidation is 0.606 m, thus the post-construction settlement is effectively reduced; compared to the conventional vacuum wells dewatering - dynamic compaction, both the soil strength and bearing capacity of the foundation have substantially improved. Thus it can be seen, the effect of the foundation consolidation is notable.

Key words: moisture separator; dewatering - dynamic compaction; soft foundation; experimental analysis

降水强夯由于其工艺简单、造价低、施工速度快等特点已经成为我国软土地基处理的一种常用

方法。但是它也存在着不足,如井点降水深度较浅,从而会影响到强夯的加固效果;而管井降水强

收稿日期:2014-11-23

作者简介:刘伟(1991-),男,安徽合肥人,硕士,研究方向为地基处理。

夯法降水深度虽然较深,可是其耗时较长;再者针对于真空井点降水强夯法在水位下降的过程中,会有空气从水位之上的滤孔进入,使真空度下降,从而影响其降水效率。针对以上问题,国内外学者对降水强夯法进行了改进,周健^[1-3]较早的提出了低能量强夯与井点降水的结合,利用真空井点降水技术,提高了软粘土的固结速率,但是其降水深度又限制了强夯的作用,从而制约了其加固深度;刘嘉^[4]、徐敏生^[5]、林佑高^[6]对井点降水强夯法都进行了改进和应用,但是受限于传统井点降水深度的影响,仅适用于浅层基础的加固;刘宝臣^[7]、张群^[8]采用强夯法与管井降水的结合,利用管井降水技术加大了降水深度,有效的阻止了“橡皮土”现象,但是管井降水时间长限制了其在工程上的应用;兰韡^[9]、冯建斌^[10]分别采用超强真空井点降水和高真空井点降水使降水深度取得了不错的进步,可是随着空气的渗入,会影响其真空效果,对降水速度依旧没有很大的提升。在此基础上,本文开发了一种水气分离集成井降水与强夯相结合的工艺,结合扬中灈港通用码头软土地基处理工程,对试验区分别采用常规真空井点降水强夯工艺和水气分离集成井降水强夯工艺进行处理,通过对地基加固效果现场监测、检验的对比分析,从而为今后类似工程提供借鉴经验。

1 工程概况

试验场地位于江苏省扬中经济开发区三跃镇石城村。拟建码头上游距泰州大桥约 4.3 km,下游与镇江兴隆港码头相邻。试验区原为滩地、农田等,采用吹填砂填筑,其土层物理力学性质指标见表 1。

2 试验方案

试验区总面积约 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,分为水气分离集成管井降水强夯区(1号区,面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ m}^2$)和常规真空井点降水强夯区(2号区,面积约 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^2$)两个部分,设计夯击能为 $2\ 500 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。强夯要求击穿②粉质粘土层,使吹填土

层与粉细砂层贯通,达到加固目的。

2.1 真空井点降水强夯

常规真空井点降水强夯即运用真空井点降低地下水位,并联合强夯工艺对地基进行加固。在试验区布置网络为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的真空轻型井点进行降水。在水位下降至地表以下 3 m 时,拔除夯点间井点管,进行第一遍强夯,夯点间距为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,呈正方形布置,夯击能为 $2\ 500 \text{ kN} \cdot \text{m}$,每点 4~5 击。夯后推平,连接未拔井点管,继续进行降水。当孔压消散至 90% 以上时,进行第二遍强夯,夯点呈梅花形布置与第一遍相交叉,夯击能不变。第二遍夯后再次连接未拔井点管,继续进行降水,在孔压再次消散到 90% 以上时,进行满夯。满夯夯印搭接 1/4,夯击能为 $1\ 000 \text{ kN} \cdot \text{m}$,每点 2 击,夯后推平。

2.2 水气分离集成井降水强夯

水气分离集成井降水技术的关键设备如图 1 所示,设备管盖连接有排水管、抽真空吸气管和压力检测管,其中抽真空吸气接管直接连接真空泵,在真空泵作用下,集成井内部会形成负压,使周围土体中的水和气通过渗透孔进入管井,由管井内部连接抽水管的潜水泵将其排出,形成主动降水,从而达到降低水位的目的。检测管中安置真空表和水气分离平衡阀。该设备的优势所在是由真空泵直接连接管井,减少了真空度的损耗,由水气分离平衡阀控制管井内部的真空度也避免了能源的浪费。

改进降水强夯法的水气分离集成井布置设外围管井和内层管井,管井直径为 250 mm,管井入土深度为 10 m,内置 0.75 kW 潜水泵。外围管井井距 10 m,布置在需加固区域周边;内层管井设置在中部,井距 15 m,梅花形布置。

在设置管井过程中,充分考虑需加固区域地下水及土质分层条件,管井滤水器设置在渗透系数较小的②粉质粘土上。强夯方案与常规真空井点降水强夯区域相同,在进行最后一遍满夯时,需

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indicators of soil

土层及名称	层厚/m	含水率 $\omega/\%$	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2} /MPa	压缩模量 E_s/MPa	标贯击 数/击
①吹填土	2.30	37.7	1.84	1.032	0.481	4.300	2~3
②粉质粘土	3.64	33.8	1.82	1.090	0.552	3.843	2
③粉砂	5.98	25.8	1.95	0.692	0.144	12.902	9

用振捣器对管井回填土进行捣实,并要求在满夯时遇到管井点采取 1 000 kN·m 的夯击能,每点补打 5~6 击。

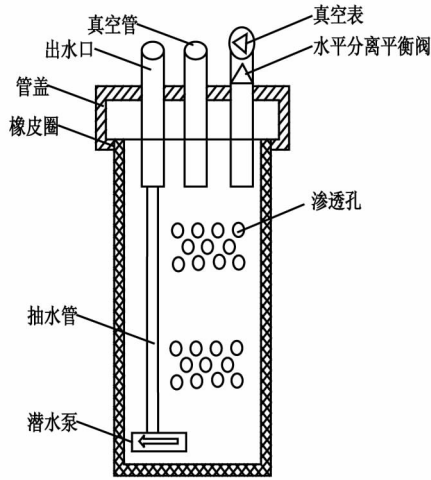


图1 水气分离集成井设备构造示意图

Fig.1 Moisture separator integrated wells device schematic

3 现场监测

3.1 监测方案项目

为比较两种处理方法的加固效果异同,在施工过程中预埋一定数量的监测仪器分析各加固区的表面沉降、孔隙水压力、地下水位等变化规律。每个实验区孔压计共埋设 3 组,采用 1 孔 1 计的方法埋设,布置沉降板 10 块,水位观测管 2 个。

3.2 监测结果分析

3.2.1 超孔隙水压力变化

图 2 和图 3 为试验区超孔隙水压力的变化曲线,可以看出在强夯期间超孔隙水压力上升明显,同时由两图的孔隙水压力消散、增长过程对比可以发现,采用水气分离集成井降水技术夯后超孔隙水压力的消散仅为 1~2 天,明显少于常规降水

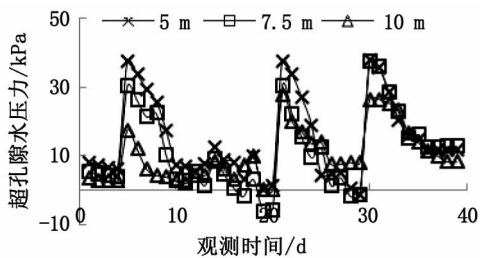


图2 超孔隙水压力随时间变化曲线(常规降水强夯)

Fig.2 Variation of excess pore water pressures with time (conventional dewatering-dynamic compaction)

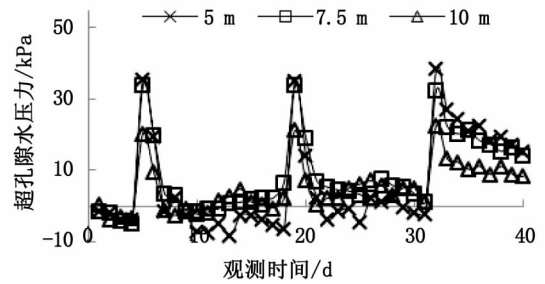


图3 超孔隙水压力随时间变化曲线(改进降水强夯)

Fig.3 Variation of excess pore water pressures with time (improved dewatering-dynamic compaction)

技术。从全程的加固效果比较,除强夯期间,改进降水强夯技术的超孔隙水压力一直处于较低水平,表面加固效果明显,孔隙水压力消散速度较快。由 10 m 处的超孔隙水压力比较可以看出,改进降水强夯技术的超孔隙水压力大部分处于负压状态,表明加固深度要比常规方法要深。

3.2.2 地下水位变化

图 4 为地下水位监测结果,其中水位点 1 位于常规降水强夯试验区,水位点 2 位于水气分离集成井降水强夯试验区。由现场实测结果可以看出,在降水初期两种工艺水位下降速度都较快,水位点 1 的水位整体稳定在地下深度 3 m 左右,而水位点 2 的水位稳定在 5~6 m 左右,最深达到了 6.012 m,这表明水气分离集成井降水深度要明显大于常规井点降水。在土体经受强夯加固后水位都有明显的上升,由对比可见在随后的二遍、三遍降水中,水气分离集成井降水工艺在 1~2 天就可以降到 5 m 以下,明显要快于常规井点降水。此外,地下水位变化曲线中还存在多处波动,这主要是由于在监测期间降水较为频繁和地处江边地下水位变化较大的原因。

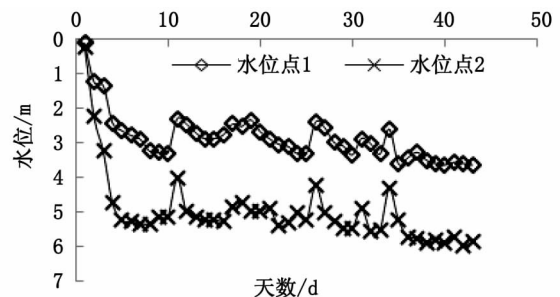


图4 地下水位降深随时间的变化规律

Fig.4 Variation of drawdown of groundwater lever with time

3.2.3 表面沉降变化

图 5 为表面沉降的监测结果,不难发现在两种工艺的加固作用下,降水期间沉降都较为稳定

但是速率缓慢,在强夯期间都会有大幅度的沉降。但是,水气分离集成井降水强夯工艺试验区的沉降深度明显大于常规井点降水强夯,水气分离集成井降水强夯的最大沉降量为0.606 m。

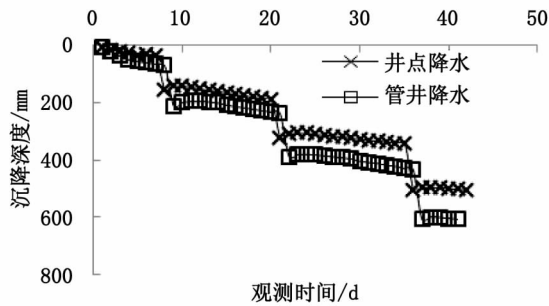


图5 表面平均沉降随时间的变化规律

Fig.5 Variation of average total settlements with time

4 现场检测

4.1 静力触探试验

表2为静力触探试验结果,可以看出经过常规降水强夯(J8和J12孔)加固后表层吹填土比贯入阻力提高明显,最小值为5.05 MPa,第二层粉质粘土层的比贯入阻力尚可,最小值为2.14 MPa。同时经过水气分离集成井降水强夯法(J9和J10孔)处理后表层吹填土比贯入阻力相对增大更多,最小值达到5.56 MPa,第二层粉质粘土层的比贯入阻力最小值也达到2.40 MPa。

表2 静力触探试验结果

Tab.2 The result of static penetration test

地质层次	常规降水强夯				改进降水强夯			
	J8孔		J12孔		J9孔		J10孔	
	层厚 /m	比贯入阻 力/MPa	层厚 /m	比贯入阻 力/MPa	层厚 /m	比贯入阻 力/MPa	层厚 /m	比贯入阻 力/MPa
①吹填土	3.00	5.52	3.00	5.05	3.00	6.13	2.80	5.56
②粉质粘土	2.50	2.14	3.50	2.49	2.80	2.40	3.70	2.75
③粉砂	4.50	4.65	4.65	4.29	4.20	5.38	3.50	5.16

表3 $N_{63.5}$ 标准贯入试验结果

Tab.3 The result of $N_{63.5}$ standard penetration test

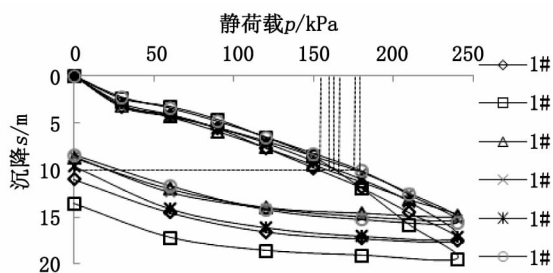
地质层次	常规降水强夯				改进降水强夯			
	JK7孔		JK18孔		JK5孔		JK6孔	
	层厚 /m	击数/击	层厚 /m	击数/击	层厚 /m	击数/击	层厚 /m	击数/击
①吹填土	3.10	12~18	3.50	13~20	3.10	12~19	3.20	13~18
②粉质粘土	2.50	7~11	3.10	6~10	2.40	8~10	2.30	9~12
③粉砂	4.90	14~18	4.00	14~22	5.00	15~18	5.00	15~23

4.2 标准贯入试验

各试验区测点的 $N_{63.5}$ 标准贯入试验结果见表3。分析可知,常规降水强夯法加固后表层吹填土标贯击数由原来的最低2~3击(详见表1)提高到最低12击,第二层粉质粘土层的标贯击数由原来的最低2击提高到最低6击。同时水气分离集成井强夯法加固后表层吹填土标贯击数同常规真空井点降水强夯,但第二层粉质粘土层的标贯击数则提高幅度较大,由原来的最低2击提高到了最低8击。相比较可见,改进的水气分离集成井降水强夯法地基强度提高幅度更大,加固效果较为明显。

4.3 平板静载荷试验

平板静荷载试验在每个试验区设置3个测点,其中1#、2#、3#点处于常规井点降水强夯加固区,4#、5#、6#点处于水气分离集成井降水强夯区。采用相对沉降法计算地基承载力特征值,即在 $p-s$ 曲线中取 $s/b=0.01$ 时所对应的荷载为地基承载力特征值,由图6可以看出,1#、2#、3#对应的地基承载力特征值分别为153、163和159 kPa,而4#、5#、6#对应的地基承载力特征值则分别为175、165和178 kPa。比较可见,水气分离集成井降水强夯试验区加固后地基承载力要明显的高于常规井点降水强夯试验区。

图6 $p-s$ 关系曲线Fig.6 Relation curve between p and s

5 结论

1) 通过对试验区地下水位的观测,与常规真空井点降水强夯工艺相比,水气分离集成井降水强夯法降水深度可达地表以下5~6m,突破了深层加固因降水深度限制的瓶颈,在夯击过程中使夯击能对土体的加固深度、效果明显提高。

2) 从表面沉降监测结果看,常规真空井点降水强夯工艺的加固效果虽然能达到设计所需的各项技术指标,但是工后沉降还是比水气分离集成井降水强夯工艺要大。

3) 与常规真空井点降水强夯工艺相比,采用水气分离集成井降水技术夯后孔隙水压力的消散仅为1~2天,时间明显少于前者,而且由于工艺简单、投入设备及人力较少,可以大大加快软弱地基加固处理速度。

4) 现场检测试验结果对比表明,采用水气分离集成井降水强夯工艺对软土地基进行加固,在加固深度、土体强度和地基承载力方面均有较大幅度的提升,其中第二层粉质粘土标贯击数由原来的最低2击提高到了最低8击,平板载荷试验

地基承载力特征值最小值达到165 kPa,地基加固效果明显。

参考文献:

- [1]周健,史旦达,贾敏才,等.低能量强夯法加固粉质黏土地基试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2359-2364.
- [2]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(Z1):198-200.
- [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.
- [4]刘嘉,罗彦,张功新,等.井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2222-2227.
- [5]徐敏生.低能量强夯结合轻型井点降水地基加固的试验研究[J].工程勘察,2010(Z1):472-476.
- [6]林佑高,林国强.井点降水联合低能量强夯法在某码头工程中的应用[J].中国港湾建设,2011,176(5):35-39.
- [7]刘宝臣,谢艳华,张炳晖,等.管井降水预压联合“轻夯多遍”软土地基处理试验[J].建筑结构,2011,41(1):118-121.
- [8]张群,吴名江,郑钰昊,等.管井降水动力联合预压固结法加固福安某厂软土地基的研究[J].路基工程,2012,162(3):14-16.
- [9]兰韡,张英英,沈驰.超强真空降水井研究与应用[J].工程勘察,2013(Z1):86-92.
- [10]冯建斌.采用“高真空降水加强夯”处理吹填砂地基[J].山西建筑,2014,40(3):81-82.

(责任编辑 王利君)

(上接第59页)

- [10]谭继文.宽级配砾质土在土石坝心墙防渗中的应用与研究[D].大连:大连理工大学,2001.
- [11]SL 237-1999,土工试验规程[S].
- [12]郭庆国.关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J].水利学报,1987(5):59-66.

- [13]张婉璐,谢军,徐锴,等.不同初始条件下高液限土的力学特性研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(4):8-11.

- [14]保华富,沈蓉,李仕胜,等.风化料掺砾作为高坝心墙防渗体的研究[J].云南水力发电,2007(4):27-32.

(责任编辑 王利君)