

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.007

多通道负压排水动力夯实技术试验

唐彤芝¹, 刘建², 刘培贵², 蔡新³, 张金良⁴, 孙苏才²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 2. 南通沿海开发集团有限公司, 江苏 南通 226006;
3. 河海大学发展规划处, 江苏 南京 210098; 4. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

摘要: 应用多通道组合低位负压动力夯实法对南通滨海园区通州湾科教城场地进行加固地基研究, 分析水位、表面沉降、土体深层水平位移、孔隙水压力、真空度的变化过程和特性, 对处理后地基土的物理性质、强度和承载力进行了检测和评价。结果表明, 持续降雨下场地内水位可快速降至3 m以下, 非密封条件下抽真空在7 m深度内形成负压, 强夯引起的超静孔压可在2~3 d内快速消散; 夯实以沉降压缩为主, 侧向位移小, 土体物理力学性质明显改善, 有效影响深度达到6.5 m, 地基承载力特征值达到80 kPa; 多通道负压排水动力夯实技术能够增强降排水和超静孔压连续快速消散能力, 对地下水丰富、降雨充沛区域的适应性强。

关键词: 多通道排水系统; 低位真空; 动力夯实; 孔压; 地基处理

中图分类号: TU122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)04-0324-08

Experimental study of new technology of multi-channel vacuum drainage dynamic compaction

TANG Tongzhi¹, LIU Jian², LIU Peigui², CAI Xin³, ZHANG Jinliang⁴, SUN Sucui²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Nantong Coastal Development Group Co., Ltd., Nantong 226006, China;
3. Department of Development Planning, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Nanjing R&D Tech Group Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: The multi-channel combined with low negative pressure dynamic compaction method was used to reinforce the ground in the Tongzhou Bay Science and Entrepreneurship Town in the coastal zone of Nantong. The change process and characteristics of ground water level, surface settlement, horizontal displacement of deep soil, pore water pressure, and vacuum degree were analyzed. The main physical properties, soil strength, and bearing capacity of the treated foundation were tested and evaluated. The results show that, the underground water level in the field can quickly drop to less than 3 m under the condition of continuous rainfall, a negative pressure condition was formed within a depth of 7 m using the vacuum method under the non-seal condition, and super static pore pressure caused by dynamic compaction can rapidly dissipate in 2 to 3 days. Influence of dynamic compaction was mainly based on settlement compression, the lateral displacement was small, and the physical and mechanical properties of soil were improved significantly, with the effective depth reaching 6.5 m and the characteristic value of bearing capacity of foundation reaching 80 kPa. The new technology can enhance the ability of water drainage and the rapid dissipation of super static pore pressure. It is worth popularizing and applying in areas of abundant groundwater and rainfall.

Key words: multi-channel drainage system; low vacuum; dynamic compaction; pore pressure; ground improvement

收稿日期: 2016-03-29

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401006)

作者简介: 唐彤芝(1974—), 男, 湖南东安人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事软弱土地基处理研究。E-mail: tztang@nhri.cn

江苏省南通滨海园区通州湾科教城场地地基主要由三角洲泥沙长期冲积、海边滩涂淤积和人工冲填、滨海相交错沉积而成,粉质黏土、淤泥质黏土、粉土、粉砂等相互夹杂,土质松散、塑性低、含水率高、强度低,孔隙比和压缩性大。以强夯为主辅以降水(管井、高真空井点、电渗等)、插设塑料排水板等措施是该区域工程建设时常采用的地基处理方法^[1-11],施工简便、造价低,其技术核心是降低水位,消散超静孔压。但滨海地区往往地下水位高,雨水充沛,导致施工经常停歇,拖延进度,而且地基土处于高含水率的饱和状态,受反复动力荷载作用导致结构扰动,颗粒之间的毛细孔遭到破坏,水分不易渗透和散发,出现“橡皮土”和“弹簧土”现象^[10],夯击能量被吸收浪费,导致夯实效果差,有效处理深度浅,影响地基处理效果和质量。

多通道组合低位负压排水动力夯实法^[12]是在传统方法的基础上进行创新和改进,采用降水+消压+动力夯实的加固机制和施工工艺,提出了多通道组合负压管网体系以增强持续降低水位和快速消散超静孔压的能力,从而保障和提高地基加固效果。本文介绍多通道负压排水动力夯实技术在南通滨海园区通州湾科教城试验场地的现场应用情况,对该技术的加固机制和效果进行研究。

1 试验区概况

1.1 地形地貌与水文气象

试验区位于南通滨海园区通州湾科教城 F 地块,面积约 8 000 m²,主要由三角洲泥沙长期冲积、海边滩涂淤积冲填而成。地貌形态较单一,地形较平坦。地下水属浅层孔隙潜水,主要补给来源为海水补给、大气降水、地表水和同一含水层的侧向补给,埋深较浅,一般在 0~1 m 左右。地处北亚热带湿润性气候区,季风影响明显,雨水充沛。

1.2 地基土分布与性质

勘察所揭露的 20.0 m 深度范围内的地层均属第四纪全新世冲海相交错沉积物,按其成因类型、土层结构及其性状特征,可划分为 6 个主要层次,见图 1。土体的主要物理力学性质指标见表 1。

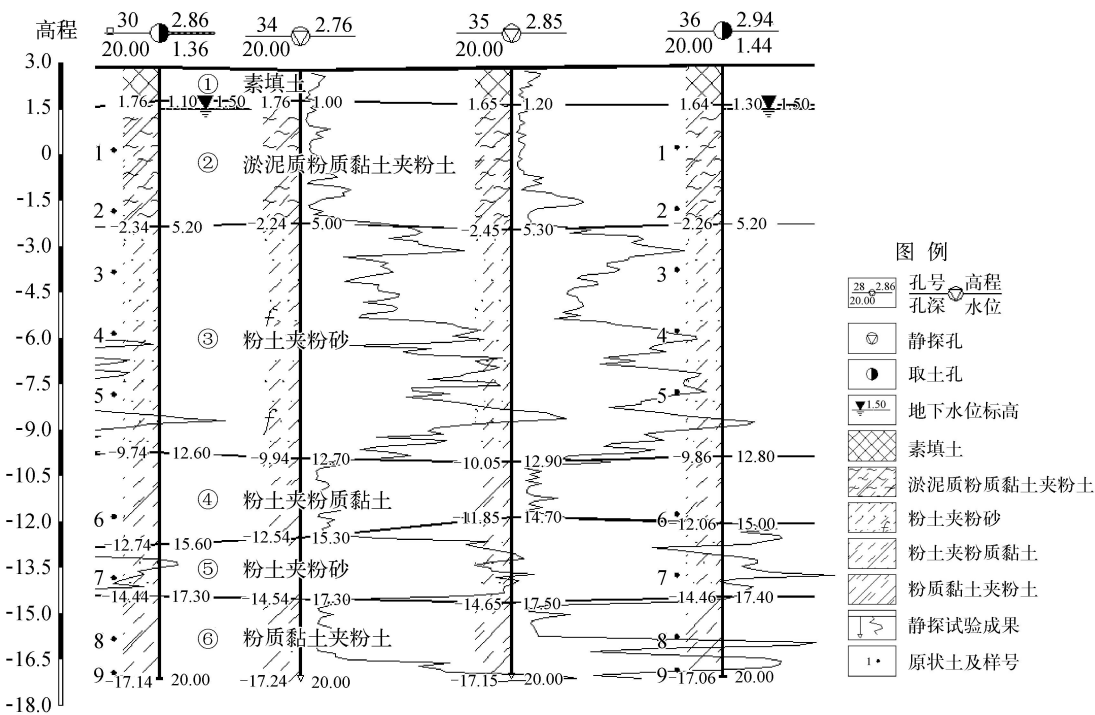


图 1 试验区地基土层勘探剖面(单位:m)

Fig. 1 Section of soil layers of ground foundation in test site(units:m)

表1 土体主要物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical indices of soils

土层 序号	土 层 名 称	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	快剪强度		承载力特征值 f_{ak}/kPa
						黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	
①	素填土							35
②	淤泥质粉质黏土夹粉土	36.1	1.78	0.54	3.85	7.4	8.2	55
③	粉土夹粉砂	30.5	1.84	0.20	10.06	4.9	25.3	150
④	粉土夹粉质黏土	32.2	1.83	0.35	6.03	7.2	18.0	100
⑤	粉土夹粉砂	30.8	1.84	0.18	10.48	4.3	25.6	140
⑥	粉质黏土夹粉土	33.0	1.81	0.37	5.50	10.6	16.6	80

土层① 素填土：灰~灰黄色,见植物根茎,厚度不均,结构松散。

土层② 淤泥质粉质黏土夹粉土：灰黄~灰色,含云母片和贝壳碎片;淤泥质粉质黏土：软~流塑,干强度、韧性中等;粉土：稍密,干强度、韧性低。层底标高-2.99~-1.68 m左右,层厚约3.5 m。比贯入阻力平均值 $P_s=0.6\sim1.4\text{ MPa}$ 。

土层③ 粉土夹粉砂：灰色,稍密,含云母片和贝壳碎片;粉土：摇振反应迅速,干强度、韧性低;粉砂：颗粒呈圆形、亚圆形,颗粒级配不良。层底标高-10.09~-7.79 m,层厚约7.0 m。 $P_s=4.1\sim6.8\text{ MPa}$ 。

土层④ 粉土夹粉质黏土：灰色,含云母碎片;粉土：稍密,饱和,摇振反应中等,干强度、韧性低;粉质黏土：软塑,干强度、韧性中等。层底标高-14.39~-11.85 m,层厚约3.0 m。 $P_s=1.1\sim2.2\text{ MPa}$ 。

土层⑤ 粉土夹粉砂：灰色,稍密~中密,含云母碎片;粉土：摇振反应迅速,干强度、韧性低;粉砂：颗粒呈圆形、亚圆形,颗粒级配不良。层底标高-16.35~-13.89 m,层厚约1.5 m。 $P_s=2.8\sim9.9\text{ MPa}$ 。

土层⑥ 粉质黏土夹粉土：灰色,含云母碎片;粉质黏土：软塑,干强度、韧性中等;粉土：稍密,干强度、韧性低。未钻穿,层厚大于3.1 m。 $P_s=1.2\sim5.4\text{ MPa}$ 。

2 加固方案设计与原理

2.1 加固目标与设计方案

采用多通道组合低位负压排水夯实新技术压实土体,提高地基承载力,主要处理场地①层素填土和②层淤泥质粉质黏土夹粉土,处理深度5 m左右,处理后地基表面承载力特征值不小于80 kPa。试验区平面布置见图2。

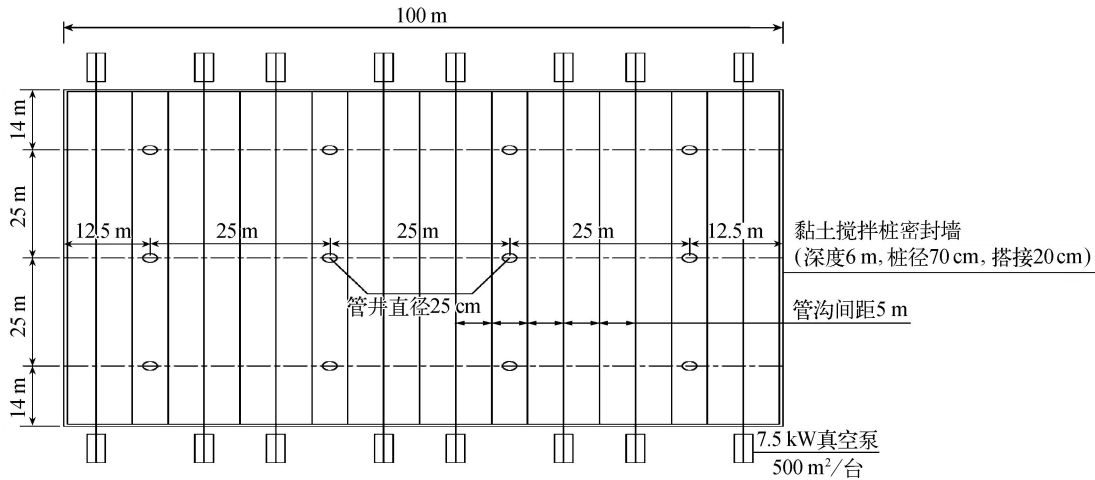


图2 设计方案平面布置

Fig.2 Plane layout of new technology scheme

多通道组合低位负压排水夯实技术的主要设计原理、工艺流程和施工参数如下：

a. 区域四周采用黏土与原地基土就地搅拌的方式构造一道具有一定密封性的密封墙,深度约6 m,一定

程度上阻隔场地外地下水渗流补给,保障降水深度,为低位负压的产生创造条件。

b. 在地基内构造由横向波纹管与竖向排水板相交织并外接真空射流泵、均匀布设的大口径管井共同组成、能制造低位负压的多通道组合三维立体式排水管网系统。竖向排水板采用 B 型板,按横向间距 5.0 m、单排纵向间距 1.2 m 打设,深度约为 5 m,以不打穿下卧粉砂层为宜。排水板打设完成后,沿横向靠近排水板铺设直径 40 mm 透水波纹管,出露的排水板与横向波纹管正交、缠绕、绑扎。用小型挖掘机开挖间距 5.0 m、深约 1.0 m、宽 0.5 m 的横向管沟,将绑扎在一起的横向波纹管和排水板一同埋于沟底并回填密实。管井采用直径 25 cm、下端 1~2 m 透水的波纹管,深度 6 m,间距 25 m,均匀布置,井底放置小型潜水泵。

c. 遵循“多遍低能、轻重结合”的原则,优化能耗布置,实现组合动力夯实:降水+消压+动力夯实+振动碾压。经试夯试验确定强夯施工参数为:2 遍点夯(夯击能分别为 1250 kN·m、1500 kN·m,每点 2~3 击),一遍满夯(夯击能 1000 kN·m,每点 1~2 击),夯点间距为 5.0 m,正方形布点。先进行管井降水,当水位降至 2~3 m 以下时,开启真空泵,进行第 1 遍点夯。第 1 遍点夯后,推平夯坑,持续进行管井降水,低位真空抽吸,待超静孔隙水压力基本消散时,进行第 2 遍点夯,夯点位于第 1 遍点夯中间。第 2 遍点夯后,推平夯坑。负压抽水至孔隙水压力基本消散时,则进入满夯阶段并回填管井。管井回填采取分层回填,逐级捣实,直至表层填实,构成竖向增强体。满夯夯印搭接 1/4。然后全场地采用 16 t 振动碾压 3~5 遍。

2.2 现场监测及效果检验方案

在试验场地内设置沉降、深层水平位移、水位、孔压、真空度等监测仪器,通过施工观测获取新机制作用下地基沉降变形、超静孔压增长与消散过程、水位变化等各项数据资料,归纳总结相关规律,深入研究和剖析多通道负压排水动力夯实技术的加固机理,开展钻孔取土试验、静力触探和静载荷试验,分析评价地基承载力变化和处理效果。

2.3 多通道负压排水动力夯实技术加固原理与优势分析

与常规的高真空井点降水、排水板联合强夯等相比^[13-18],从理论上而言,多通道负压排水动力夯实技术的加固原理和主要技术优势体现在以下几方面:

a. 对集排水体系进行优化组合和改进。(a)构建内置式多通道的集排水体系,改变以往井点管单一的渗流结构,增大集排水接触面积。(b)在场外管网端口安设射流真空泵,连续实施水气抽排,在地基加固深度范围内形成一定程度的真空负压,促使地基浅层和深层土体内部水气、土体自由水和超静孔隙水压力在自重和负压共同作用下加快汇集排出,起到了排水预压固结的效果。

b. 综合自重集排水、真空负压排水和动力夯实的技术优势,结合静力排水固结与动力夯实固结。排水管网事先埋设在地基内部,无需拔出,节省了大量的降水施工管材、人员和时间,保障施工全过程的连续性。新型低位负压降排水体系实现全过程、不间断地消散超静孔压,内部设置的竖向排水通道可将真空负压和夯击能传递到深层土体,兼备场地后续使用运行的集排水功能。通过优化调整管路布置和动力夯实方式,多通道负压排水动力夯实技术能同时满足对不同土质条件、浅层和深层加固效果的不同要求,适用范围广。

多通道负压排水动力夯实技术融合了自重自流、负压抽吸、动力挤压等多种排水联合机制,由以往地基加固时二维平面径向渗流发展成三维空间立体渗流,优化了渗流途径,缩短了渗流长度,增大了渗流的水力坡度,可以提高土体渗流排水固结的速度和效果。地基土自由水在自重和负压胁迫作用下可以迅速汇集到管路,通过端口排出。动力夯击产生的超静孔压通过立体空间管网体系可以迅速消散,有利于土体快速固结密实。实际应用时可以连续抽吸水气,缩短停工间歇期和工期,对雨期季节施工具有良好的适应性。

3 新机制作用下地基特性与效果研究

3.1 降(隔)水机制与效果

在场内外分别埋设了一根水位管,实时监控场地内外的地下水位变化情况,研究分析就地搅拌黏土密封墙措施的阻隔水以及多通道管网系统的快速降水机制和效果,见图 3。

试验区设置了 12 根均匀布设的直径 25 cm 的管井,与埋于地基内的水平、竖向排水体共同构成组合降水系统。现场试验在 6—8 月,正值夏季多雨季节,对降水速度和效果有较大的不利影响,也是对新技术工艺的适应性和有效性的最好检验。场地内水位可降至地面以下 3.0 m,以满足强夯加固需要。

受试验场地限制和成本考虑,黏土密封搅拌墙处理深度未截断渗透性较强的下卧土层③粉土夹粉砂层,

场地内外存在水体渗流补给的通道,降水开始后场地内外的水位一同下降,当排出与补给基本处于动态平衡时,场地外的水位埋深基本处于地面以下 1.5 m 左右的区间内,维持波动较小的稳定状态,基本不受场地内降水的影响,说明黏土墙起到了一定的阻隔水作用。停夯后开始下 1 遍夯击之前,场地内的水位上升也较快,说明场地外补水速度也很快。

3.2 低位负压与孔压快速消散机制与效果

选择由 2 排管沟围成的区域构成 1 个代表性观测单元,在其中一条管沟内的水平排水波纹管壁沿长度方向均匀绑扎 3 只真空度测头,在 1 根竖向排水板的不同深度位置(沟底以下 1 m、3 m、5 m)的板芯里设置真空度测头。在 2 排管沟之间的中心位置布设 1 组 4 只不同深度的孔压计(地面以下 1 m、3 m、5 m、7 m),单孔单只埋设。监测抽吸产生的真空度在水平和竖向深层的大小与传递状况以及实施动力夯击时地基内部孔隙水压力的增长变化和消散过程,见图 4 和图 5。

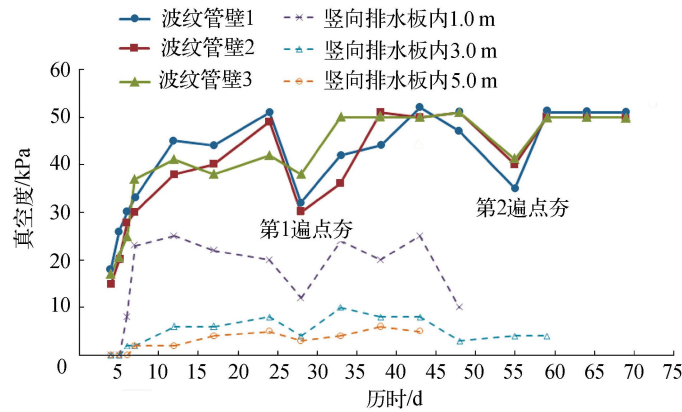


图 4 抽真空时管沟底水平波纹管壁和竖向排水板内真空度变化曲线
Fig. 4 Curves of vacuum degree in horizontal corrugated pipe and vertical drainage slab at bottom of tunnel using vacuum method

将水平波纹管与竖向排水板连接成“板-管一体化”,埋入地面一定深度的管沟底,施工不慎可能会造成水平波纹管路出现弯曲、被淤堵或压扁等不良状况。为分析此类不良状况对孔隙水压力消散的影响,选择另一条管沟,将同一根水平波纹管分段处置,分别模拟管路平面弯曲(人为弯曲布管)、管路淤堵(控制开孔率比正常少 50%)、管路扁瘪(人为压扁波纹管),在 3 段长度中间以下 3.0 m(相当于沟底以下约 2.0 m)地基内单孔单只埋设孔压计。实测孔压变化过程见图 6。

由图 4 可知,“宽横向间距管沟+窄纵向间距排水板”的疏密结合、埋置于地面以下、未密封的排水管道系统在抽真空后产生了低位负压,横向波纹管壁真空度基本维持在 50 kPa 左右,竖向排水体内不同深度也测得了真空度,说明负压通过竖向排水体传递到地基深部(约 6 m),产生了辐射作用,但由于自 6 m 深度以下就是渗透性强的③粉土夹粉砂层,真空压力会迅速消散。2 次点夯时,真空度受到冲击影响而有所降低,但夯击完成后,真空度恢复较快。

图 5 反映出抽吸过程中地基内不同深度的孔隙水压

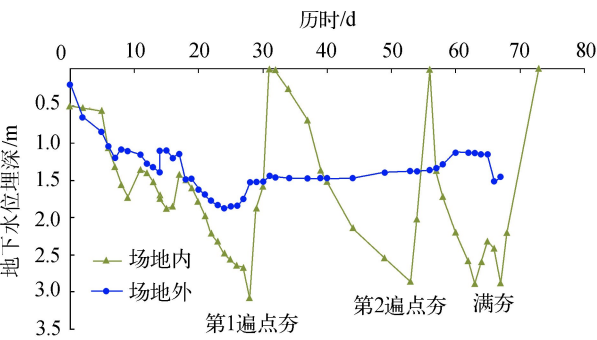


图 3 场地内外地下水位的埋深变化曲线
Fig. 3 Curves of buried depth of underground water levels inside and outside of test site

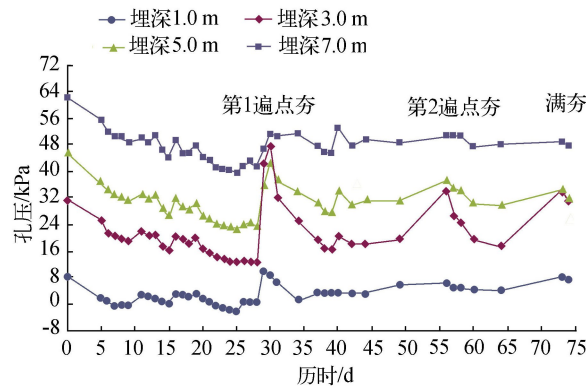


图 5 管沟间不同深度的孔隙水压力变化曲线
Fig. 5 Curves of pore water pressure at different depths of tunnel

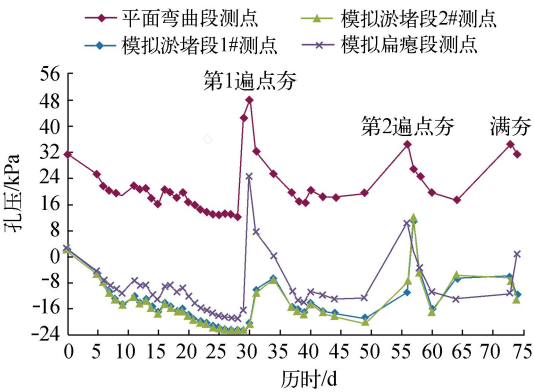


图 6 模拟波纹管路不良状况下埋深 3.0 m 的地基内孔隙水压力变化曲线
Fig. 6 Curves of pore water pressure in ground foundation at buried depth of 3.0 m under simulated adverse condition of corrugated pipe

力逐渐降低,超静孔压呈现负值,产生负压固结效果,其中埋深 3.0 m、5.0 m、7.0 m 的超静孔压达到-16 ~ -19 kPa,明显高于埋深 1.0 m 的测点(超静孔压约-6.5 kPa)。2 次点夯过程中,埋深 3.0 m、5.0 m 的孔压上升快,而埋深 1.0 m 的孔压上升量较小,分析其原因是管沟间埋深 1.0 m 的深度刚好与两侧开挖的管沟深度基本一致,真空压力消散快。埋深较浅的 1.0 m 和 3.0 m 处产生了正的超静孔压,埋深较大的 5.0 m、7.0 m 仍处于负的超静孔压状态。受夯击能和土体密实程度的影响,点夯产生的超静孔压绝对值随点夯遍数增加也逐渐减少。

图 6 表明模拟波纹管淤堵和压扁的测点在抽吸过程中孔压下降较大,基本全程处于负孔压状态,超静孔压绝对值要大于平面弯曲段测点。说明淤堵和压扁抑制了真空负压的平面传递,但有利于通过竖向排水体向地基深部传递。不良状况对强夯产生的超静孔压的消散并无大的影响。因此,管沟底铺设的水平波纹管可适当减少开孔率,在回填密实前沿管沟方向在波纹管上加铺一层长条形塑料密封膜(宽度约 20 cm,以盖住波纹管为宜),可增强地基深层的负压固结效果。

综上所述表明,维持低位负压的抽吸实现了全过程快速消散超静孔压,平均历时 2 ~ 3 d,缩短了点夯间隔时间,较好地解决了渗透性较低的淤泥质土层需要较长时间的停工间歇期来消散超静孔压的问题。低位负压的抽吸会对土体产生预压固结效果,在强夯夯击能作用的基础上,真空压力相当于在土体上增加了一个额外的附加应力,对土体有一定的附加加固作用。施工结束后,埋置地基内的排水通道仍可持续发挥消散孔压、固结土体的作用。

3.3 沉降与侧向水平位移

采取测量场地网格平均高程的方式监测地表累计沉降量,分别为第 1 遍点夯 169 mm、第 2 遍点夯 109 mm、满夯 86 mm,合计总沉降量为 364 mm。第 1 遍点夯时夯坑沉降量大,隆起量小;随着土体受到夯实、挤压,第 2 遍点夯和低能级的满夯产生的沉降量逐渐减少。

在试验区西侧密封墙外布置 1 根深度 8 m 的测斜管,通过观测测斜管的位移了解场地边界地基不同深度的土体在夯击过程中侧向水平位移累积量的变化(图 7),研究夯击作用对地基土体的侧向挤压效应和影响深度,评价夯击施工对周围环境的影响。

实施低位抽真空阶段,场地产生向内收缩、由上而下逐渐减少的水平位移,量值很小,实测最大水平位移量约为 10 mm,发生在地表面,3 m 以下测值基本为零。点夯开始后,强大的冲击能量迫使地基土体产生急剧向外的水平位移,但总体累计位移量不大,最大值约为 35 mm,发生在地表以下约 2 m 处,说明地基变形以竖向压实为主,黏土搅拌墙具有一定的隔震作用,可降低强夯施工对周围环境的影响。从侧向位移曲线来分析,深度 3 ~ 4 m 范围内的土体压实效果最明显,但影响深度达 6.5 m 左右,与竖向排水板插设深度基本一致,竖向排水体的打在深层土体中形成通道,负压抽吸使土体中的水气得以快速排出,夯击能量可以传递得更深、更远。

3.4 处理效果检测

3.4.1 土体主要物理力学性质

分别测试处理前后②层淤泥质粉质黏土夹粉土的主要物理力学性质,统计结果见表 2。

表 2 土体处理前与处理后主要物理力学性质指标对比
Table 2 Comparison of physical and mechanical indices of soils before and after treatment

时段	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
处理前	36.10	1.780	0.54	3.85	7.40	8.20
处理后	30.05	1.855	0.20	9.74	5.20	25.65

由表 2 可知,土体处理后软土的主要物理力学性质和强度指标改善明显。压缩性由高降为中,黏聚力降低了 29.73%,内摩擦角增加了 212.80%,说明强夯的巨大冲击能量对土体压实和颗粒重组有较大的影响。

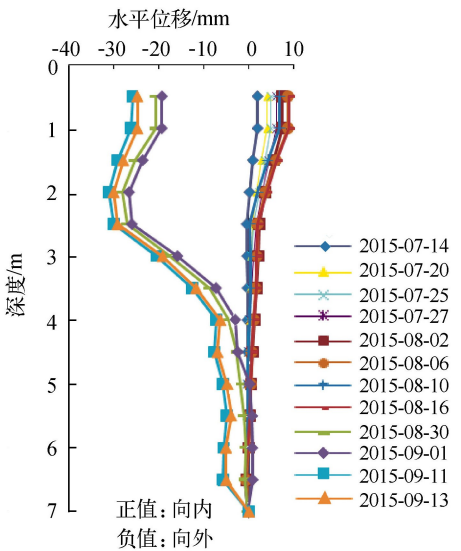


图 7 地基土体深层水平位移实测曲线
Fig. 7 Curves of horizontal displacement at different depths of foundation

另外,土体处理后,含水率、密度、压缩系数、压缩模量变化幅度分别为-16.76%、4.21%、-63.89%、152.95%。

3.4.2 地基承载力特征值

浅层平板载荷试验采用1410mm×1410mm 方形钢板,载荷板埋深于地面标高以下500mm 左右,板底铺设中砂找平层,依据JGJ79—2012《建筑地基处理技术规范》进行试验^[5]。

加压至160kPa 时,试板累计沉降28.05mm,能达到相对稳定标准未破坏,满足终止加载条件而终止加载。压力-沉降曲线平缓,未出现陡降段,地基承载力按相对变形值确定,所对应标记的压力为116kPa,再按地基承载力特征值不应大于最大加载压力的50%,即地基承载力特征值取80kPa,达到了处理目标。

3.4.3 静力触探试验

处理前后在试验区进行原位静力触探试验,结果见表3。可见②层淤泥质粉质黏土夹粉土的比贯入阻力平均值 P_s 增幅显著,其下卧的③层粉土夹粉砂也得到一定的提高,说明加固影响深度已经超过设计要求。

3.5 承载力时间效应

分别在试验区满夯后的第2天、第16天和第38天于同一测试位置进行静力触探,测得②层淤泥质粉质黏土夹粉土的 P_s 值分别为0.97MPa、1.28MPa 和1.30MPa。满夯后第16天的 P_s 值与第2天相比增长了0.31MPa,增幅约为32%,而第38天与第16天相比, P_s 值基本未变。可见对于淤泥质粉质黏土夹粉土层而言,夯后地基承载力的恢复、增长具有一定的时间效应,历时约半个月。该效应一方面与夯后土颗粒的再重组调整有关,另一方面与多通道立体排水管道系统持续发挥超静消散作用有关,土体继续固结,强度逐渐增长。

4 结 论

- a. 多通道负压排水动力夯实技术设置了内置式竖向排水体、水平排水管沟以及大直径管井构成多通道组合排水管网,实施抽真空和管井抽水,快速降低地下水位至3m 以上并持续稳定,强夯引起的超静孔压在2~3d 内迅速消散,地基内产生负的超静孔压,多通道负压排水动力夯实技术在快速降低水位、消散超静孔压的同时起到了一定程度的负压排水固结作用,增强了雨季施工的适应性。
- b. 抽真空时地基土体产生向内收缩位移,强夯施工时地基侧向向外位移,主要发生在深度4m 范围内,实测影响深度达6.5m 左右。累计最大水平位移在3cm 以内,累计夯沉量约为36cm。夯击使土体产生较大的竖向压缩变形,侧向位移较小。处理后土体直剪内摩擦角提高了212.80%,夯实效果显著,地基承载力特征值达到80kPa,满足设计要求。
- 受试验场地条件和时间的限制,本文研究具有较大的特定性,偏于定性化,在多通道负压排水动力夯实技术的计算理论和实用设计方法、深层更软弱厚淤泥质土层的处理等方面仍有待进一步加大研究和推广应用。

参考文献:

[1] 龚晓南.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[2] 娄炎.真空排水预压法加固软土技术[M].北京:人民交通出版社,2013.

[3] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[4] 徐至均,张亦农.强夯和强夯置换法[M].北京:机械工业出版社,2004.

[5] 中华人民共和国建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[6] MENARD L,BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Geotechnique,1975,25(1): 3-18.

[7] 叶为民,唐益群,杨林德,等.强夯法加固软黏土地基效果研究[J].岩土力学,1998,19(3): 7276-7284. (YE Weimin, TANG Yiqun, YANG Linde, et al. Research on effecton of improving soft clay with DCM[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(3): 7276-7284. (in Chinese))

[8] 郑颖人,陆新,李学志,等.强夯加固软黏土地基的理论与工艺研究[J].岩土工程学报,2000,22(1): 18-22. (ZHENG

表3 土体处理前后静力触探测试结果对比
Table 3 Comparison of results of soils before and after treatment from static cone penetration tests

土层 序号	土 层 名 称	P_s /MPa		P_s 增幅/ %
		处理前	处理后	
②	淤泥质粉质黏土夹粉土	0.32	1.30	306
③	粉土夹粉砂	1.72	2.21	28
④	粉土夹粉质黏土	5.30	5.80	9

- 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. (in Chinese))
- [9] 储旭,陈波,周建芑,等. 真空电渗降水及动力挤密脱水加固淤泥技术[J]. 水利水电科技进展,2008,28(5): 78-79. (CHU Xu, CHEN Bo, ZHOU Jianpeng, et al. A novel sediment technique integrating electro-osmotic drainage and vibro-densification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008,28(5): 78-79. (in Chinese))
- [10] 孙召花,高明军,刘志浩,等. 导电塑料排水板加固吹填土现场试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(3): 255-260(SUN Zhaohua,GAO Mingjun,LIU Zhihao,et al. Field test on consolidation of dredger fill using electric vertical drains[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015,43(3): 255-260. (in Chinese))
- [11] 范莹莹,朱洪涛,陈思周,等. 插板降水强夯置换法在处理砂混黏性土地基中的应用[J]. 港工技术,2016,53(1): 94-98. (FAN Yingying, ZHU Hongtao, CHEN Sizhou, et al. Application of precipitation dynamic consolidation replacement with plastic drainage plate in the treatment of sand mixed cohesive soil foundation [J]. Port Engineering Technology, 2016,53(1): 94-98. (in Chinese))
- [12] 唐彤芝,张金良,刘建,等. 低位负压立体多通道排水组合夯实装置: 中国,ZL201520773090.8[P]. 2015-09-30.
- [13] 闫续屏,安明. 高水位地基强夯机理及关键施工技术[J]. 施工技术,2015,44(1): 81-83. (YAN Xuping, AN Ming. Construction technology and dynamic compaction mechanism of high water level foundation[J]. Construction Technology, 2015, 44(1): 81-83. (in Chinese))
- [14] 郑晓,刘胜群,卓凡. 强夯法设计参数的确定与现场试验研究[J]. 江西理工大学学报,2007,28(6): 46-49. (ZHENG Xiao, LIU Shengqun, ZHUO Fan. Ascertainning the design parameters of intense densification and the study of scene experiment [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2007,28(6): 46-49. (in Chinese))
- [15] 朱允伟,韩选江,朱进军,等. 真空动力固结法处理新近吹填土地基的加固效果分析[J]. 工业建筑,2007,37(增刊1): 855-858. (ZHU Yunwei, HAN Xuanjiang, ZHU Jinjun, et al. Analysis of the treatment effect of recent dredger fill with vacuum dynamic consolidation[J]. Industrial Construction, 2007,37(Sup1): 855-858. (in Chinese))
- [16] 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): 376-380. (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. (in Chinese))
- [17] 周健,崔积弘,贾敏才,等. 吹填细砂软弱地基处理试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(4): 859-864. (ZHOU Jian, CUI Jihong, JIA Mincai, et al. In-situ test study on ground treatment of hydraulic fine soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 859-864. (in Chinese))
- [18] 彭中浩,陈永辉,陈庚,等. 真空降水联合强夯法加固粉土路基的研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2015, 32(2): 47-51. (PENG Zhonghao, CHEN Yonghui, CHEN Geng,et al. Experimental research on dynamic consolidation method combined with vacuum well point dewatering to reinforce silt subgrade[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2015,32(2): 47-51. (in Chinese))