

真空动力固结联合扩底旋喷桩在饱和软粘土地基加固中的应用研究

周 健 王冠英 贾敏才

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

【摘 要】 针对饱和软粘土的工程特性, 采用了真空动力固结联合扩底旋喷桩加固饱和软粘土地基。结合江苏某软粘土地基加固工程, 在探讨其加固机理的基础上, 通过对加固过程的方案设计及现场试验结果的分析 and 讨论, 表明该法能够充分发挥强夯、真空降水及旋喷注浆各自的技术优势。该法具有工期短、造价低、预沉降可控、加固效果好等优点。进一步拓宽了饱和软粘土地基的处理方法, 为我国沿海地区软粘土地基处理工程提供了新的途径。

【关键词】 饱和软粘土; 真空动力固结; 扩底旋喷桩; 硬壳层

【中图分类号】 TU472.36

DCM Combined With Vacuum Dewatering Treatment and Extended Bottom Rotary Jet Grouting Pile Applied to Reinforce the Saturated Soft Clay Foundation

Zhou Jian Wang Guanying Jia Mincai

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

【Abstract】 DCM (dynamic compaction method) combined with Vacuum dewatering treatment and extended bottom rotary jet grouting pile is adopted to reinforce saturated soft clay foundation. The reinforcement mechanism is discussed. Combining with a reinforcement project in Jiangsu province, the in-situ test results demonstrate that the method can fully exert the advantage of DCM, vacuum dewatering and rotary jet grouting pile. It shows that this method saves both time and money, and the pre-subside is controllable too. This method proposes a new way for the treatment of the saturated soft clay foundation in the coastal areas and improves in approaches to the treatment of saturated clay.

【Key Words】 saturated soft clay; DMC combined with Vacuum dewatering treatment; extended bottom rotary jet grouting pile; crust layer

0 引 言

在我国沿海地区广泛分布着性质极为软弱的淤泥质粘土和淤泥质粉质粘土, 它们大多为欠固结土-正常固结土, 土质疏松, 孔隙比大, 含水量高, 多数呈软塑状态, 承载力低。在上部荷载作用下, 沉降变形大, 不均匀沉降明显, 固结历时较长。在这样的天然地基上建造构筑物, 在强度和变形方面都无法满足工程建设的需要。

如何提高软粘土的强度、减小变形量、缩短变形持续的时间, 是岩土工程师迫切需要解决的问题之一。饱和软粘土加固处理的基本原理之一就是排水压密, 而软粘土另一个不利的工程性质——低透水性, 使得一切排水方法不能在短时间内奏效^[1-2]。

针对软粘土的特性, 采用真空动力固结联合扩底旋喷桩法加固软粘土地基取得了成功。该方法是将强夯技术、真空降水与旋喷注浆技术结合起来的一种复合式地基处理方法, 它能够充分发挥三者各自的技术优势, 并且具有工期短、造价低、预沉降可控、加固效果好等优点。本文结合江苏省某软粘土地基加固工程, 在探讨其加固机理的基础上, 分析了此复合地基处理方法在饱和软粘土地基中的适用性和有效性, 得出了一些有益的结论, 可为类似工程的设计和施工提供借鉴。

1 工程概况及场地工程地质条件

江苏某工业园区厂房冷轧车间堆载区工程位于饱和软粘土层上。堆载区长为 126 m, 宽 108 m, 地

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目

作者简介: 周 健, 1957 年生, 男, 浙江临海人, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基处理、土动力学和数值计算等方面的研究工作。E-mail: tjuzj@vip.163.com

面设计堆载为 8 t/m^2 。

场地工程地质条件较差,属长江下游平原地貌,其中浅层素填土和浜填土,呈松软和流塑状态,工程性质很差;而深部厚度较大的灰色淤泥质粘土呈

饱和和流塑状态,强度极低,压缩性很大,承载力仅为 $50 \sim 60 \text{ kPa}$ (见表1)。因此,为保证今后堆场的安全和正常运营,必须选择适当的地基加固措施对地基土体进行处理。

表1 场地土层物理力学特性指标

| 层号 | 土层名称 | 土层厚度/m | 渗透系数 $k/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 地基承载力 f_{ak}/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\circ)$ | 粘聚力 c/kPa |
|----|-----------|--------|---|--|------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| ② | 粉质粘土 | 0.98 | 1.21×10^{-7} | 18.3 | 70 | 13 | 18.3 |
| ③ | 灰色淤泥质粉质粘土 | 2.45 | 2.45×10^{-7} | 17.2 | 50 | 10 | 16.0 |
| ④ | 灰色淤泥质粘土 | 11.48 | 1.08×10^{-7} | 16.9 | 60 | 12 | 9.5 |

2 加固机理

真空动力固结联合扩底旋喷桩法是针对软粘土的工程特性,综合动力固结(强夯法)、排水固结和旋喷注浆三种方法而形成的一种复合软土地基处理技术。

目前在饱和软粘土强夯施工中多采用塑料排水板或袋装砂井方法来加速超孔隙水压力的消散,但这些方法均为被动排水,排水速度较慢,历时很长,而且很难有效解决地基的工后沉降问题,因此加固效果受到影响^[3]。而真空降水技术以一种主动排水方式取代了塑料排水板或袋装砂井这一被动排水方式,从而避免了强夯对排水体系的损坏,而且可以更有效地加速夯击引起的超静孔压的消散和软土的固结^[4-6]。并可直接在浅层地基中形成具有一定厚度、应力均匀、承载力高的“硬壳层”,此“硬壳层”的存在将有利于应力的扩散,减小地基的沉降。

而高压旋喷技术是利用钻机等设备,把安装在注浆管(单管)底部侧面的特殊喷嘴,置入土层预定深度后,用高压泥浆泵等高压发生装置,以 20 MPa 左右的压力,把浆液从喷嘴中喷射出去冲击破坏土体,同时借助注浆管的旋转和提升动力使浆液与从土体上崩落下来的土搅拌混合,经一定时间凝固,便在土中形成圆柱状的水泥土固结体,从而增加地基强度,提高地基承载力,达到减小沉降的目的。它不仅可以有针对性地解决软土高含水量、高压缩性、低强度的问题,更可以解决硬壳层下软基不易处理的难题,具有工艺简单、节省工期、节约造价等优点。

可以看出,三种方法的结合,不仅克服了传统强夯法不能有效处理饱和软粘土地基的缺点,又较堆(超)载预压排水固结法缩短了工期,且可以有效降

低浅层地基土体的含水量,改善其强度、压缩性等工程性质,对下卧层产生预压作用。而且在地基表层形成的“硬壳层”作用是双重的,一方面土体本身的压缩性减小,承载力增大,可作为复合地基的主要持力层及有利于应力的扩散;另一方面可以改善桩土之间的应力分担,协调桩-土间的共同作用,使旋喷桩与桩周土间的侧摩阻力提高,从而单桩承载力提高。最后,在真空动力固结后,采用扩底旋喷桩构成复合地基对场地的深层软弱土层进行加固。旋喷桩作为一种竖向加固体系,对于提高加固区的承载力、减小地基的沉降变形、增强地基和结构物整体稳定性有明显效果^[7]。

3 加固方案思路与设计

根据工程地质勘察资料,考虑堆场的特点,原天然地层无法满足其对地基变形及承载力的要求,必须进行地基处理。针对饱和软粘土的埋深及工程特点,加固方案的设计从以下三个方面考虑:

1) 真空降水设计

针对饱和软粘土层厚度大、渗透系数低、抽水困难,必须寻求合理有效的降水工艺才能有效地降排水。由于场地地下水位较高,为了提高夯击效果,首先利用轻型真空井点系统,进行浅层降水。降水范围为整个厂房的堆载区,降水深度根据场地标高以及土层渗透系数,选用埋深 4 m 和 6 m 的井点降水设备。强夯前进行第一遍真空降水,强夯结束推平场地后,立即插管抽水,以加速孔隙水的排出和超孔压的消散,迅速恢复软土结构和提高软土强度。并同步进行旋喷桩施工,以利于旋喷桩的加固效果。

2) 动力固结设计

加固方案的设计考虑到场地表层“硬壳层”的缺失,故强夯处理前整个场地进行回填(堆填厚度通常

大于 0.5 m)。然后根据软粘土层的埋深、厚度情况,进行不同夯击能、夯击间距的试夯施工,确定最佳夯击能量、夯击间距等工艺参数,并根据孔隙水压力消散情况确定每遍夯击间隔时间。

最后确定采用质量 12~15 t、直径 2.5 m 的夯锤对场地进行夯击。夯击能量 800~1 000 kN·m,每点 1~2 击。夯击施工范围为整个厂房的矩形堆载区。

3) 旋喷桩设计

用旋喷注浆(即旋喷桩)处理的地基,宜按复合地基设计^[8]。根据该场地土层物理状态、力学性质及有关规范,采用底部扩大的旋喷桩形式,以提高单桩承载力。高压旋喷桩复合地基承载力标准值按下式计算:

$$f_{sp,k} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{s,k} \quad (1)$$

式中: $f_{sp,k}$ ——复合地基承载力特征值, kPa;

m ——桩土面积置换率;

R_a ——单桩竖向承载力特征值, kN;

A_p ——桩的截面积, m^2 ;

$f_{s,k}$ ——桩间土处理后承载力特征值, kPa;

β ——桩间土承载力折减系数。

与常规方法不同的是,由于动力固结产生的“硬壳层”明显提高了桩间持力层的承载力。因此,采用本文的方法,优化了设计,降低了造价。

按照上述设计思想最终确定:旋喷桩桩距为 2.5 m,以第 ⑤₁ 层为持力层,正方形布桩,总桩量 1 396 根。

4 试验监测、检测结果分析

现场监测、检测是指导施工进度和保证工程质量的一个重要工作,也是验证加固效果和分析变形机理的重要手段。

4.1 孔隙水压力变化分析

地基土在夯击荷载作用下将引起孔隙水压力的迅速增加,孔隙水压力的增长和消散的变化规律,一定程度上反映了强夯地基加固的有效影响深度和加固效果的好坏,孔压的消散主要与孔隙水的顺利排出有关。因此,观测分析动力固结过程地基土中的孔隙水压力变化规律,对进一步了解加固机理和加固效果是十分必要的。实测典型超孔隙水压力变化情况见图 1、图 2,从图中可以看出整个过程中孔隙水压力变化有下面一些规律。

1) 夯击过程中超孔隙水压力瞬间增大:埋深 1.5 m 和 3 m 处的超孔隙水压力值上升较快,达到

10~20 kPa,强夯过后则逐渐下降;而 6 m 埋深处的超孔隙水压力值则基本没变化,说明强夯达到了对表层土体的加固目的。

2) 孔压消散和井点降水:埋设在软粘土中的孔压计一般在强夯 1~2 天后超孔隙水压力已消散 80%~95%。说明井点降水技术在超孔压的消散和孔隙水的排出过程中充分发挥了作用,避免了“橡皮土”的产生。

3) 强夯的水平影响范围:根据孔压的变化情况,能量在 800~1 000 kN·m,强夯的影响范围约为 4~6 m,因此本次强夯中,能量主要耗散在 6 m 范围的浅层土体。

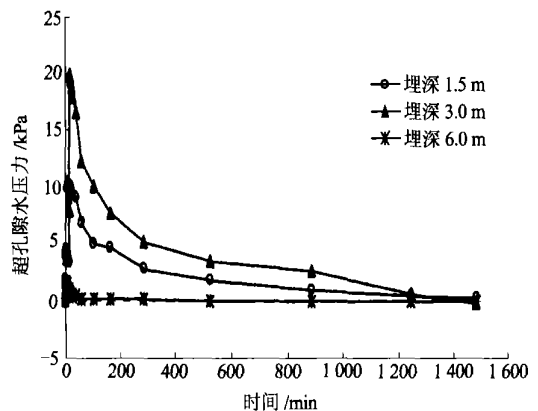


图 1 加固过程中超静孔隙水压力实测曲线

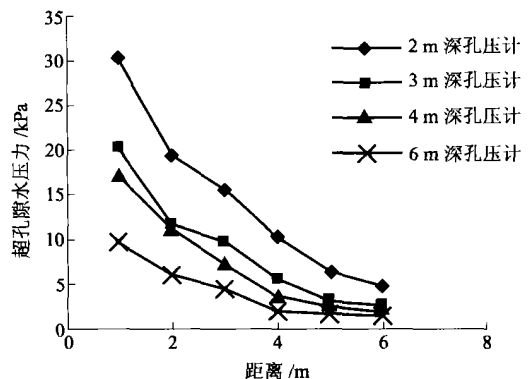


图 2 超孔隙水压力变化与距离的关系

4.2 加固效果测试

加固结束后采用静力触探试验来检测软粘土层的加固效果,辅以一定数量的单桩复合地基载荷试验及复合地基桩土应力比试验,对地基加固效果进行评价。

试验检测在旋喷桩施工结束后 28 天进行。现场静力触探和载荷板试验检测结果见图 3 和图 4,从图中可以看出,通过真空动力固结联合扩底旋喷

桩加固后,浅层土体地基承载力在处理有了较大幅度的提高。桩间土体性质的改善对复合地基承载力的影响是双重的,一方面土体本身的压缩性减小,承载力增大;另一方面使旋喷桩与桩周土间的侧摩阻力提高,从而单桩承载力提高。

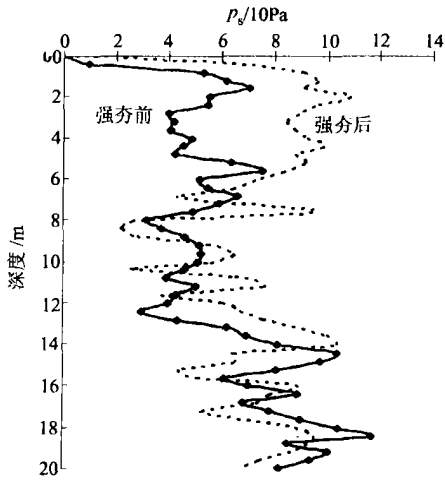


图3 真空动力固结加固前后静力触探比较图

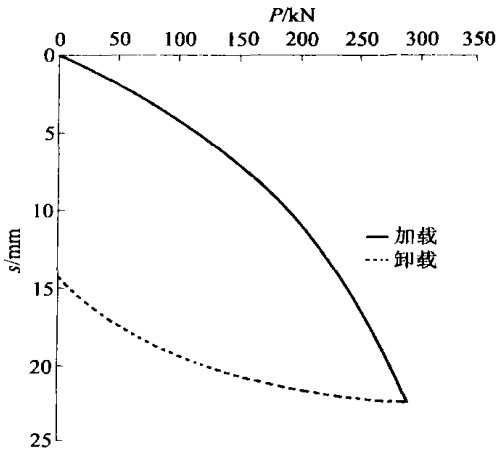
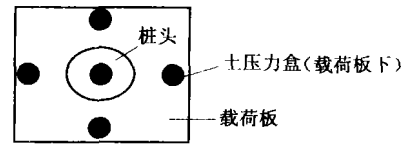


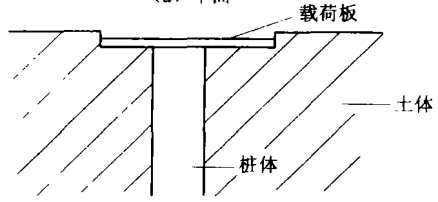
图4 加固后地基荷载板试验 P-s 曲线

4.3 桩土应力比研究

为了研究旋喷桩复合地基的桩土受力情况,检验复合地基加固效果,在荷载试验过程中,桩身及桩周土周围埋设了五个土压力盒(见图5),以分析桩土应力分担情况。由图6可以看出,随着荷载的增加,桩土应力比逐渐增加。当荷载达到最大值290 kN时,桩土应力比达到8~9左右,而在正常工作荷载80 kN时,桩土应力比为2~3。这说明在本工程中由强夯形成的“硬壳层”充分发挥了扩散和调整应力、协调桩土变形的作用。同时说明了这种联合加固技术能够充分发挥各自的优点,加固是有效的、成功的。



(a) 平面



(b) 剖面

图5 桩顶及桩间土压力计埋设图

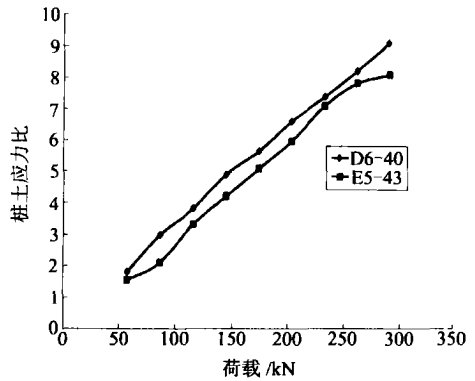


图6 桩土应力比随荷载变化图

5 结论

1) 针对饱和软粘土的特性,真空动力固结联合扩底旋喷桩法综合了真空降水法、强夯法及旋喷注浆法的各自优势,对提高软粘土的强度、降低压缩性、减少不均匀沉降等方面有着明显的效果,该法在满足地基设计要求的同时,具有工期短、造价低、预沉降可控、加固效果好等优点。

2) 在加固软土地基时采用井点降水可以主动快速消散由强夯和旋喷注浆引起的超静孔压和排出孔隙水,而且还可以有效地解决孔压消散和增加加固深度的矛盾,避免实际工程中常见的“橡皮土”的产生。

3) 针对沿海地区“硬壳层”常缺失的客观事实,通过强夯形成“硬壳层”。一方面使土体本身的压缩性减小、承载力增大,并可作为复合地基的主要持力层;另一方面,与旋喷桩相联合,不但优化了设计,而且可以共同发挥作用,有效地改善桩土之间的应力分担,协调桩-土间的共同作用,保证地基的稳定性和变形均匀性,使加固作用更加合理有效。

(下转第143页)

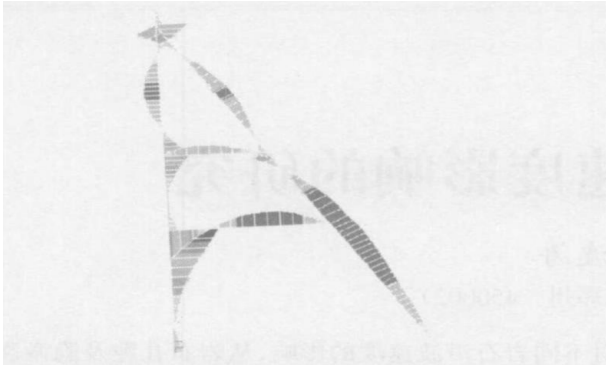


图3 优化完成后结构的弯矩图

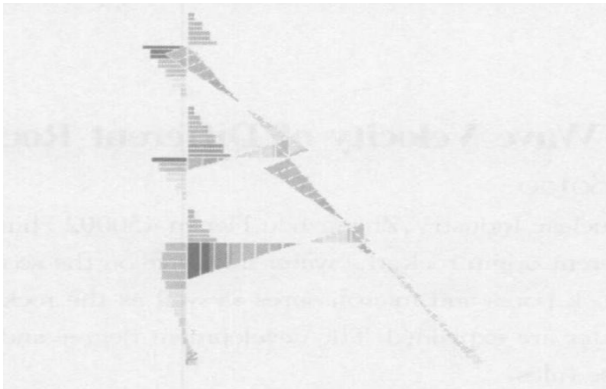


图4 优化完成后结构的剪力图

3 结 论

1) 通过对“人”字型抗滑桩的优化设计分析, 得到的各截面尺寸组合形式, 不仅使“人”字型结构的体积最小, 而且结构的的内力分布形式也较为理想, 充分发挥了混凝土的抗压强度, 达到了节约成本的目的。

经比较, “人”字型抗滑桩较其它形式桩在同等滑坡推力和相同地质条件下, 具有结构变形与侧壁应力小, 弯矩、剪力分布较合理等特点, 单桩可承受较大的滑坡推力。特别适合于地质条件较差以及土体腐蚀性较强不宜设置锚索桩, 且推力较大的滑坡。

2) 通过对 ANSYS 的二次开发, 利用 VB 编写的程序直接调用 ANSYS, 将 APDL 语言编写的命令流文件导入 ANSYS 中, 实现了针对不同的条件, 仅需修改程序菜单中的选项即可反复进行优化设计, 此外在建模时稍加修改, 采用 ANSYS 提供的单元“生死”功能, 即可应用于悬臂桩与锚索桩的设计中。从而极大地提高了优化设计分析速度, 减少了结构设计过程中不断重复设计所消耗的时间, 大大缩短新结构研究的时间, 为岩土工程中新型结构的研究与应用提供了一种切实有效的解决模式。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552-3558.
- [2] 蓝宗建, 梁书亭, 孟少平. 混凝土结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [3] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

收稿时期: 2006-04-11

(上接第 112 页)

参 考 文 献

- [1] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [2] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软粘土地基的理论研究与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 22(1): 18-22.
- [3] 纽建定, 吉战兵. 沿海低地工程强夯加固软土地基的机理[J]. 港工技术, 2002, 6(2): 42-44.
- [4] 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.

- [5] Merrifield C M, Davies M C R. A study of low-energy dynamic compaction: field trials and centrifuge modeling[J]. Geotechnique, 2000, 50(6): 675-681.
- [6] 肖勇. 低能量强夯法在港口工程软基加固中的应用[J]. 水运工程, 2004, 36(5): 35-40.
- [7] 丁二忠, 上官洁. 旋喷注浆技术及其在塘沽地区的应用[J]. 中国市政工程, 2001, 93(2): 40-42.
- [8] 段新胜, 顾湘. 桩基工程(第二版)[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1995.

收稿日期: 2006-03-13