

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.06.012

【工程应用】

泉州市某仓储中心地基强夯处理与承载力检测

张兴华, 刘清泉

(福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350108)

摘要:以泉州市某仓储中心地基强夯处理项目为例, 建筑物主要持力层为淤泥和粉质黏土, 设计要求地基承载力 150 kPa, 揭露持力层承载力为 40~60 kPa, 不满足设计要求, 需要进行地基处理。根据地基地层特性, 选择强夯加固对地基进行处理, 地基处理后形成 5~6 m 厚硬壳层且地基承载力 ≥ 150 kPa, 可满足设计要求。通过分析比较 Menard 计算公式与 Billam 方法, Menard 计算公式只考虑锤重与落距, Billam 算法包含了锤重、落距、锤底面直径和折减系数多个因素, 适用性较好, 且计算精度相对高。选择 Billam 方法确定采用 2 000 kN·m 夯击能, 强夯采用布点为 5.0 m×5.0 m, 推测其加固影响深度约为 5~6 m。并采用静载荷试验对施工质量进行了检测, 试验总沉降较小, 确定该工程参与统计的地基承载力特征值为 150 kPa, 地基承载力特征值满足设计要求, 表明地基处理方案可行有效。

关键词:地基; 强夯; 处理深度; 载荷试验; 承载力

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)06-0527-05

Dynamic compaction treatment and bearing capacity test of a warehouse foundation in Quanzhou

ZHANG Xing-hua, LIU Qing-quan

(Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: An example of foundation treatment of a warehouse foundation in Quanzhou is reported. The main bearing layers of the warehouse are mud and silt clay. The design requires a foundation bearing capacity of 150 kPa, while the bearing capacity of the soil is 40-60 kPa, which does not meet the design requirement. So the foundation treatment is required. According to the characteristics of ground condition, dynamic compaction method is selected to improve the ground. A 5-6 m-thick stiff layer was formed after compaction and the bearing capacity was found to be greater than 150 kPa, which can meet the design requirements. Two methods, namely, Menard formula and Billam's method, are used to evaluate the improvement effect. The Menard's formula only considers hammer's weight and hammer's height, but the Billam's method's can consider hammer's weight, hammer's height, hammer's diameter and reduced coefficient. It is found that the Billam's method's works well and has high calculation accuracy. The billam method is selected to determine the compaction energy of 2 000 kN·m. The distribution point of dynamic compaction is 5.0 m×5.0 m, and the reinforcement influence depth is about 5-6 m. Test results show the total settlement is small, and the characteristic value of bearing capacity is 150 kPa. So the characteristic value of the foundation bearing capacity meets the requirements, and the ground improvement technique is effective.

Key words: foundation; dynamic compaction; treatment thickness; loading test; bearing capacity

0 引言

强夯法是由法国工程师 Menard 于 60 年代提出的一种地基加固方法, 它通过重锤以一定的落距, 对地基土施加一个较大动应力, 可降低土压缩性、

提高地基土强度、改善砂土的抗液能力及消除湿陷性黄土的湿陷性等。经过数年的发展和工程应用, 强夯法已适用于多种地基土的加固处理。强夯法加固地基具有效果明显、经济易行、设备简单等优点, 因而得到了广泛应用。以某仓储中心地基强夯处理

收稿日期: 2021-09-10

作者简介: 张兴华(1983—), 男, 福建三明人, 本科, 工程师, 主要从事岩土工程和工程检测、监测方面的工作与研究。Email: 67885192@qq.com。

为例,对地基处理结果进行检测,探讨强夯加固的有效性。

1 工程概况

仓储中心项目位于泉州市惠安县,建筑占地面积约 31 227.55 m²,拟建 1 幢 1F 配送仓库、1 幢 1F 卫生间和 1 幢地上成品消防水池。配送仓库采用门式刚架结构,结构基本柱网均为 23 m×14 m,柱下最大轴力设计值约 900 kN;局部带夹层处柱下最大

轴力设计值约 2 000 kN;卫生间及地上成品消防水池,采用框架结构,结构基本柱网为 8.4 m×8.0 m,柱下最大轴力设计值约 1 000 kN。场地地层岩性均匀,根据勘察孔揭露的地质资料可知,距地表深 36.50 m 之上的地层除表层①素填土、①₋₁填石外,主要由②粉质黏土、③淤泥、④粉质黏土、⑤碎石、⑥粉质黏土、⑦碎石、⑧碎块状强风化花岗岩,地层从上而下逐渐增强。地质剖面如图 1。设计要求地基承载力 150 kPa,揭露持力层承载力为 40~60 kPa,不满足设计要求,需要进行地基处理。

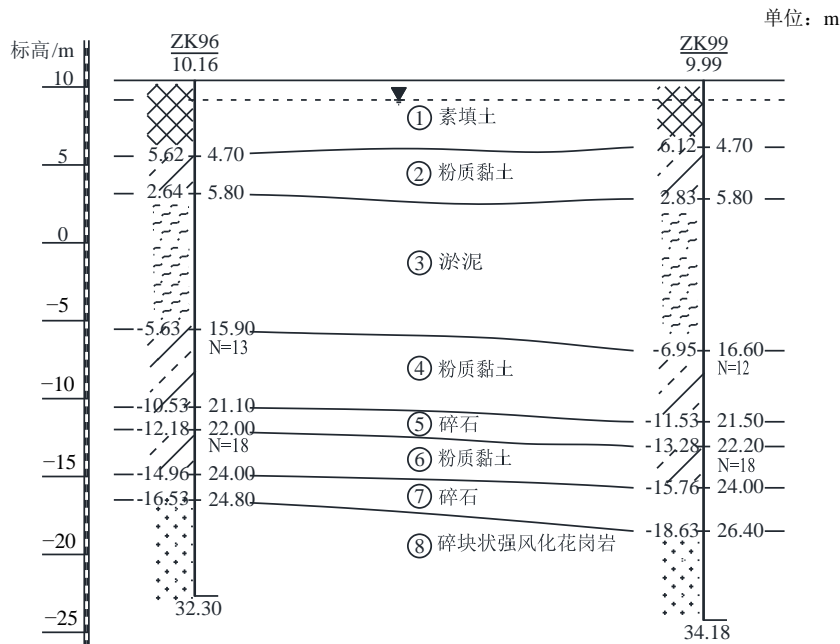


图 1 地质剖面图

Fig. 1 Geologic sections

2 强夯设计

2.1 设计要求

根据工程特性要求,经强夯加固处理后的地基应达到以下标准:①形成的硬壳层深度达到 5~6 m;②地基承载力 ≥ 150 kPa。

2.2 设计依据

根据设计要求及勘察报告揭示的主要工程地质问题,现场主要解决表层 3.7~6.7 m 范围内回填碎石土孔隙率大、工后沉降不均的问题。为确保施工质量,在满足地基加固处理技术指标的条件下,根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)^[1],对该层回填土采取强夯方法进行压密夯实,为防止夯后产生“弹簧土”现象,造成土体结构性破坏,因此强夯采用“先轻后重,少击多遍、逐级加能”^[2-4]的方法施工,采用多轮强夯法对土体夯密,

特别是对碎石土集中区域增加夯击遍数,以保证夯后场地满足设计所需的压实度及后期沉降指标。

2.3 设计方案

(1) 锤重和落距

土层加固深度 H (m),按经验公式^[5]:

$$H \cong k\sqrt{Mh} \quad (1)$$

式中: M 为锤重,t; H 为落距,m; k 为经验系数,一般取 0.4~0.7。

假定选取夯锤重 $M=10$ t,加固深度 $H=6$ m, $k=0.5$,则根据公式可以计算出落距 $h=14.4$ m。

(2) 夯击终止条件

a) 最后两击的平均夯沉量 ≤ 50 mm,当单击夯击能量较大时 ≤ 100 mm。

b) 夯坑周围地面不应发生较大的隆起。

c) 不因夯坑过深而引起起锤困难。

(3) 加固影响深度确定

a) 根据 1972 年 Menard 提出的计算公式, 计算强夯有效加固深度^[6-7]:

$$H \approx \sqrt{Mh/10} \quad (2)$$

b) 大多数学者通过大量的实践研究发现, 强夯实际加固的有效深度应是 Menard 公式计算深度乘上一个不大于 1 的折减系数, 即:

$$H = k\sqrt{Mh/10} \quad (3)$$

式中: k 为影响深度折减系数, 一般随土中黏性含量的增大或含水量的增大而减小。Menard 公式是经验性公式, 量纲存在问题。

c) 在实际施工过程中, 一般采用 Billam 算法计算强夯加固深度进行计算^[8]:

$$H = k \frac{Mh}{D^2} \quad (4)$$

$$k = \frac{g}{q} \quad (5)$$

式中: H 为强夯加固深度, m; M 为夯锤重量, t; h 为夯锤落距, m; k 为折减系数, 与土的种类和初始密度有关, 一般取 0.1~0.16 (g 为重力加速度 m/s^2 , q 为土骨架的动阻力 kN/m^2); D 为夯锤底面直径, m。

对比以上计算公式与方法, Billam 算法包含了锤重、落距、锤底面直径和折减系数多个因素, 可较真实反映强夯过程的各种因素。Billam 算法主要适用于粉土、砂土、黄土和黏性土等, 且计算精度相对高^[9-10]。在此用 Billam 算法计算该工程有效加固深度, 取 $k=0.15$ 。

采用 $MH=1\ 500\ kN \cdot m$ 夯击能、 $D=2.22\ m$, 其加固深度为:

$$H = \frac{0.15 \times 150}{2.22^2} = 4.5\ m \quad (6)$$

采用 $MH=2\ 000\ kN \cdot m$ 夯击能、 $D=2.22\ m$, 其加固深度为:

$$H = \frac{0.15 \times 200}{2.22^2} = 6.0\ m \quad (7)$$

根据以上计算, 结合该工程软土地基的特点, 采用 $2\ 000\ kN \cdot m$ 夯击能, 根据设计计算推测其加固影响深度约为 5~6 m, 可满足工程要求。强夯采用布点为 $5.0\ m \times 5.0\ m$, 夯点布置如图 2, 强夯通常采用两遍点夯, 再加一遍满夯。采用较大的夯点间距可防止夯击能产生的土体挤压效应对地基土产生破坏作用, 同时可在土体内形成一定深度的膨胀桩状, 能完成要求的加固深度范围, 同时前一遍加固

深度与后一遍加固深度挤密成硬壳层^[10], 以达到压实的目的。

两遍点夯完成后, 进行场地平整, 检测标高, 如因夯沉量过大, 则补充土方回填至起夯面, 满夯一遍, 满夯能量为 $1\ 500\ kN \cdot m$, 每点夯击 1~2 击, 满夯采用一般平底锤, 要求搭接 1/3 锤径, 满夯主要夯击表层松散土, 如图 3。

单位: m

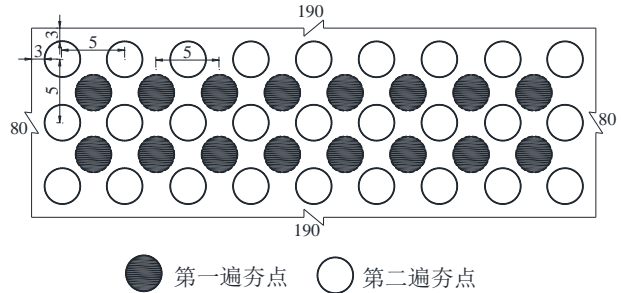


图 2 夯点布置示意图
Fig. 2 Schematic of the compacting spots

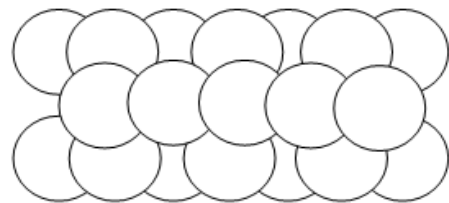


图 3 满夯示意图
Fig. 3 Schematic of the full ramming

3 地基承载力检测

强夯施工完成, 对施工质量进行工程检测。静载荷试验按《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[11]的有关规定进行, 试验由安装在载荷板上的油压千斤顶进行逐级加荷, 反力由混凝土预制块堆重平台承担, 载荷板沉降由对称方向安装的位移传感器测读。

试验加荷方式为慢速维持荷载法。按设计要求, 试验土层为粉质黏土层, 采用圆形承压板, 面积为 $2.0\ m^2$, 直径 $d=1.60\ m$, 圆形承压板, 取 $b=d$ ^[8], $0.01b=16.0\ mm$ 。

1 号、2 号、3 号、4 号、5 号、6 号及 7 号试验点的每级荷载增量均为 $75\ kN$, 承压板对地基土作用的压应力为 $37.5\ kPa$, 最大试验荷载均加至 $600\ kN$, 承压板对地基土作用的压应力为 $300\ kPa$, 以上 7 个试验点的试验进展均顺利, 未出现异常现象, 在最大荷载作用下, 试验均未达到规范终止加载条件^[11]。 $p-s$ 曲线如图 4 所示。

依据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[11],各试验点载荷试验结果如表1所示,7个试验点的总沉降较小。按相对变形值确定地基承载力特征值时,取 $s/b=0.01$ 所对应的荷载,但其值不应大于最大加载量的一半。同一土层参加统计的试验点不应少于3点,各试验实测值的极差不得超过其平均值的30%,取此平均值作为该土层的地基承载力特征值。

从表2看出,取 $s/b=0.01$ 所对应的荷载大于最大加载量的一半,即极限荷载的一半,选取极限荷载的一半作为该土层的地基承载力特征值,确定该工程参与统计的地基承载力特征值为150 kPa。

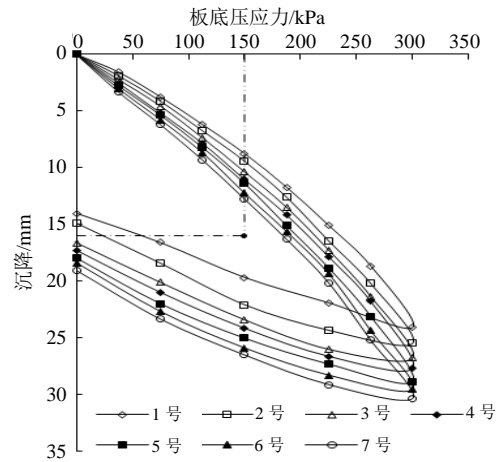
图4 $p-s$ 曲线结果Fig. 4 $p-s$ curve

表1 试验结果
Table 1 Results of loading tests

荷载/kPa	沉降/mm						
	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号
0	0	0	0	0	0	0	0
37.5	1.55	1.88	2.21	2.52	2.76	3.02	3.32
75.0	3.74	4.13	4.56	5.16	5.36	5.76	6.20
113.0	6.18	6.74	7.36	7.86	8.22	8.68	9.32
150.0	8.74	9.43	10.36	11.04	11.38	12.24	12.76
187.5	11.72	12.60	13.50	14.18	15.12	15.64	16.32
225.0	15.08	16.46	17.26	17.86	18.84	19.36	20.16
262.5	18.66	20.22	21.36	21.80	23.12	24.38	25.22
300.0	24.09	25.50	26.80	27.70	28.89	29.56	30.36
225.0	21.92	24.34	26.02	26.64	27.33	28.30	29.14
150.0	19.68	22.09	23.42	24.16	25.04	25.90	26.52
75.0	16.60	18.42	20.12	21.00	22.00	22.68	23.36
0.0	14.01	14.89	16.62	17.28	17.96	18.38	19.06

表2 承载力确定表
Table 2 Determine the bearing capacity

试验点编号	最大板顶沉降/mm	$s/b=0.01$ 对应荷载/kPa	极限荷载值一半/kPa	确定承载力/kPa
1号	24.09	> 150	150	150
2号	25.50	> 150	150	150
3号	26.80	> 150	150	150
4号	27.70	> 150	150	150
5号	28.89	> 150	150	150
6号	29.56	> 150	150	150
7号	30.36	> 150	150	150

4 结 论

因地基承载力不满足设计要求,需要进行地基处理。根据拟建场地的地层特性,选择强夯加固对

地基进行处理,通过 Billam 方法确定夯击能、夯点距离等。采用“先轻后重,少击多遍、逐级加能”的方法完成施工,并采用静载荷试验对施工质量进行检测。检测结果表明试验点总沉降较小,地基承

承载力特征值满足要求, 地基处理方案可行有效。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of housing and urban-rural construction of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 曾华健, 李军, 梅军, 等. 真空降水联合不同强夯工艺在仓储软土地基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 64–70.
ZENG Hua-jian, LI Jun, MEI Jun, et al. Application of vacuum dewatering combined with different dynamic compaction process in soft soil foundation treatment storage[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 64–70.
- [3] 姚宝宽, 刘聪, 李全军, 等. 真空井点降水、挤密砂桩联合浅层强夯在软基处理中的应用[J]. 地基处理, 2021, 3(2): 118–125.
YAO Bao-kuan, LIU Cong, LI Quan-jun, et al. Application of vacuum well point dewatering and sand compaction pile combined with dynamic compaction method in soft foundation treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(2): 118–125.
- [4] 张利军, 郭见扬. 江山机械厂新区强夯地基载荷试验分析[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 49–54.
ZHANG Li-jun, GUO Jian-yang. The analysis of bearing test on the dynamic compaction foundation in the new district of Jiangshan mechanical factory[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 49–54.
- [5] 曾庆军, 李茂英, 李大勇. 强夯置换深度的估算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 608–611.
ZENG Qing-jun, LI Mao-ying, LI Da-yong. Estimation of the displacement depth in dynamic replacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 608–611.
- [6] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3–18.
- [7] 孔学位, 陆新, 郑颖人. 强夯有效加固深度的模糊预估[J]. 岩土力学, 2002, 23(16): 807–809.
KONG Xue-wei, LU Xin, ZHENG Ying-ren. Fuzzy predetermination of effective reinforcement depth of dynamic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(16): 807–809.
- [8] 姜启田, 韩金田. 强夯的有效加固深度及计算[J]. 广东土木与建筑, 2007(12): 22–24.
JIANG Qi-tian, HAN Jin-tian. Effective reinforcement depth and calculation of dynamic compaction[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2007(12): 22–24.
- [9] LYSMER J, WAAS G. Shear waves in plane infinite structures[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1972, 98(1): 85–105.
- [10] 姚仰平, 张北战. 基于体应变的强夯加固范围研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2663–2671.
YAO Yang-ping, ZHANG Bei-zhan. Reinforcement range of dynamic compaction based on volumetric strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2663–2671.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of housing and urban-rural construction of the People's Republic of China. Technical Code for Inspection of Building Foundation: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.