

水力吹填砂地基强夯处理试验研究

胡波, 汪稔, 胡明鉴, 王新志

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 以某海湾工程为例, 详细介绍了强夯加固吹填砂地基的试验方案, 分析了孔隙水压力增长和消散规律。通过各种原位测试和室内土工试验对强夯加固效果进行评价, 并得出地基的有效加固深度, 为类似工程的设计施工提供借鉴。

关键词: 强夯法; 水力吹填砂; 夯击能; 承载力; 原位测试

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental research on dynamic consolidation method of hydraulic filled sand

HU Bo, WANG Ren, HU Ming-jian, WANG Xin-zhi

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Taking a bay project for example, the experiment scheme of dynamic consolidation method on hydraulic filled sand is introduced in detail. The increasing and duration laws are analyzed. Before and after the experiment all kinds of in-situ tests and soil mechanics laboratory tests are carried out in order to make a conclusion of the efficiency of foundation improvement by dynamic consolidation method, and the effective depth of the improvement of foundation is calculated so as to provide an example for such engineering designs.

Key words: dynamic consolidation; hydraulic filled sand; tamping energy; bearing capacity; in-situ test

1 引言

强夯法又称动力固结法, 经过近 40 年的研究、改进和完善, 它已被广泛应用于建筑、交通、水利等各类工程中的地基处理。是地基加固方法中具有生命力的一种方法^[1]。在许多工程中都取得了良好的处理效果和经济效益。本文以某大型水力吹填造地工程为例, 在划分区块内进行强夯试验, 通过现场试验和监测, 确定最佳的施工控制, 取得了良好的地基加固效果, 通过强夯后的检测对处理效果进行了评价。

2 试验概况

2.1 工程概况^[2]

拟建场地处于某海湾海堤内, 区域内分布有大量鱼塘和虾池。地下水位埋深在 3.1 m 左右。据勘察资料分析: 场地内岩土层分布自上而下依次分别为吹填土、素填土、淤泥(混砂)、砂混淤泥、中粗砂、残积砂质黏性土等。表层吹填素填土层系由本

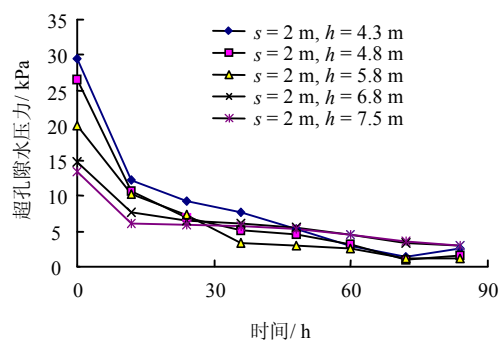
溪河的冲积物经搅吸吹填形成, 颗粒成分为砾, 呈松散~稍密状。厚度为 5.0~6.0 m, 是本次强夯的主要加固层。淤泥(混砂), 呈灰黑色, 饱和、流塑状, 主要由黏粒组成, 含中粗砂 10%~30%及少量有机质, 局部砂粒成份较高, 主要分布在塘埂处, 厚度 2 m 左右; 虾池中的次生淤泥层厚度为 0.5 m 左右, 与上覆吹填土相混。属高压缩性土, 强度低, 工程性能极差。中粗砂、残积砂质黏性土物理力学性能好, 强度高、压缩性低、工程性能好。

地基处理的设计要求: 有效加固深度不小于 6~8 m, 地基承载力达到 150 kPa。地基存在的主要问题有: 分层吹填砂由于机械碾压存在较大的不均匀性; 淤泥混砂层的强度不能满足设计要求。综合以上分析, 在场地内划分了强夯试验区, 通过试验来确定合理的施工控制并研究强夯加固效果。

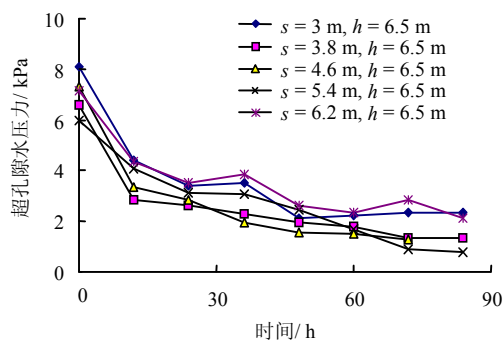
2.2 试夯参数

设计强夯施工工艺参数为: 夯锤重 15.2 t, 直径为 2.1 m, 锤高 0.9 m, 落高为 20 m; 采用 2 遍点夯、1 遍满夯的方式, 点夯能量控制在 3 000 kJ 左

供了水平通道。另外，比较 2 组孔隙水压力成果可以看出，由于离夯坑近，在此区域由强夯形成的裂隙增加了排水通道，第 1 组消散速度相对更快。综合以上分析可知，强夯遍与遍之间的间歇期不少于 3 d。



(a) 第 1 组孔隙水压力计



(b) 第 2 组孔隙水压力计

图 4 孔压水压力消散特征曲线

Fig.4 Feature curves pore water pressure duration

4 强夯效果检测

4.1 载荷试验

试验场地在强夯处理前后进行了 6 个点的静载试验，表层土在做静荷载试验时均被挖掉 0.2 m，试验结果整理如表 1。

表 1 强夯处理前后静载试验结果比较表

Table 1 Contrast between results of static tests before and after dynamic consolidation

试验	载荷板面积 / m ²	承载力特征值 / kPa	对应的沉降量 / cm	变形模量 / MPa
夯前	1	140	0.31	16.4
夯后	1	312	0.95	27.6

4.2 重型动力触探 ($N_{63.5}$) 试验

根据强夯处理前后动力触探的资料，得到试夯区强夯处理前后场地不同深度砂土的重型动力触探击数 $N_{63.5}$ 和密实度对比关系见表 2。

表 2 强夯处理前后动力触探结果比较

Table 2 Contrast between results of dynamic touch tests before and after dynamic consolidation

土层深度 / m	强夯前		强夯后		加固效果
	$N_{63.5}$ 平均值	密实状态	$N_{63.5}$ 平均值	密实状态	
0~0.5	5.6	松散	6.0	松散	差
0.5~2.0	6.0	稍密	15.1	中密	明显
2.0~4.0	5.4	稍密	23.0	密实	显著
4.0~6.0	4.8	松散	16.2	中密	明显
6.0~8.0	5.7	稍密	13.3	中密	明显
>8.0	15.4	中密	16.7	中密	不明显

从上述统计图表可以看出，试夯区吹填砂层在强夯前多处于稍密或松散状态，0~8 m 范围内动探击数均小于 6 击；强夯后表层的 0.5 m 范围内，由于强夯形成的面波作用，使该部分土体处于松散状态。对该层吹填料而言，加固效果不明显。0.5~2 m 重型动力触探击数 $N_{63.5}$ 平均值由 5.4 提升到 23，土体由稍密变成密实，加固效果显著；2.0~4.0 m $N_{63.5}$ 平均值由 4.8 提升到 16.2，加固明显。深度 ≥ 8.0 m 加固效果不明显。堤埂上由于动力触探深度只有 4 m，该范围内的试验结果与试验区相差不大。因此，3 000 kJ 级夯能对试验区内土体具有明显的加固效果，有效加固深度为 8.0 m。4 m 范围内的堤埂，强夯也具有明显的加固效果。

4.3 标准贯入试验

试验场地在强夯处理前后进行了 2 个孔的标准贯入试验，孔深均为 9.0 m，试验结果整理如图 3。

从图 5 可以看出，地基处理后约 1.5 m 处的强度最大，该处地基处理后标准贯入击数约为处理前的 4.57 倍，自 8.0 m 以下地基强度变化不明显，8.0 m 处地基处理后标准贯入击数为未处理时的 1.1 倍。

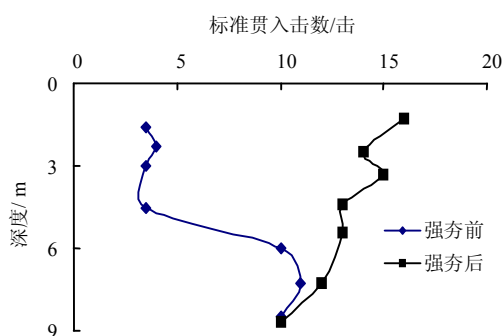


图 5 地基强夯处理前后标准贯入试验结果比较图

Fig.5 Contrast between results of standard penetration tests before and after dynamic consolidation

4.4 室内土工试验

强夯前后吹填砂下卧土层的物理力学性质指标(表 3)显示，在 8.0 m 深度以内，其含水率平均减

少 9.4%，干密度增大 5%，土体孔隙比减小 6.8%，压缩模量增加 14.8%。这说明 8.0 m 深度内的淤泥质黏土层的物理性质指标得到了明显改善，地基强度得到显著提高；而 8.0 m 以下，改善不明显，有些地方压缩模量和压缩系数反而恶化，可能是液化所致。

表 3 夯击前后地基土工性质指标

Table 3 Indexes of physico-mechanical properties of soils before and after tamping respectively

深度 / m	含水率 ω /%		干密度 ρ_d / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		孔隙比 e		压缩模量 E_s / MPa	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
4	44	36.8	1.25	1.34	1.136	0.996	2.76	3.01
5	36.4	33.4	1.33	1.35	1.009	0.994	3.23	3.76
6	31.2	27.8	1.42	1.47	0.833	0.815	3.33	4.01
7	53.4	52.3	1.05	1.13	1.542	1.368	1.87	2.76
8	59.3	58.7	1.01	1.07	1.632	1.497	2.84	2.94
8.5	67.4	67.2	1.05	1.05	1.532	1.538	1.86	1.82

4.5 强夯有效加固深度

结合分析孔隙水压力变化规律、动力触探和标准贯入的试验成果，以及夯击前后地基土性质指标，可知场地的有效加固深度在 7~8 m，满足设计要求。考虑地基土的性质、不同土层的厚度和埋藏顺序、地下水位等因素的影响，强夯有效影响深度 H 通常采用修正的 Menard 公式^[1]：

$$H = \alpha \sqrt{\frac{Mh}{10}} \quad (1)$$

式中： M 为夯锤重 (kN)； h 为夯锤落距 (m)； α 为修正系数。

将试验所得的最佳单击夯击能和强夯有效影响深度代入式 (1)，反算可求得修正系数 $\alpha = 0.46$ 。

5 结 论

(1) 强夯法处理表层厚度达到 5~6 m 的吹填砂可以取得很好的效果，其有效加固深度可以达到 7~8 m，有效加固深度修正系数宜取 0.46；

(2) 吹填砂层能够促进超孔隙水压力的消散，本工程中孔隙水压力能够在 24 h 内消散 60% 以上，72 h 内基本消散完毕；

(3) 强夯后效果检测表明，强夯后地基承载力可以达到 312 kPa，满足设计承载力要求。

参 考 文 献

- [1] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [2] 胡明鉴, 胡波. 环东海域综合整治建设工程洪塘片区 D 标段试夯区监测及检测试验报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [3] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 810—1 814.
- [4] 赵松年. 子波变换与子波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [5] 吴维青. 镍磷化学镀对 40 Cr 钢疲劳损伤行为的影响[J]. 机械强度, 2004, 26(3): 317—320.
- [6] 吴维青, 阮玉忠. 表面处理层疲劳损伤过程的数值跟踪研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(5): 59—62.
- [7] Dobson S, Noorim, Hou Z, et al. Modeling and random vibration analysis of SDOF system with asymmetric hysteresis[J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 1970, 32(4): 669—680.
- [8] 张敏霞. 循环荷载作用下水泥土的疲劳特性及其损伤行为研究[M]. 福州: 福州大学出版社, 2004.
- [9] 简文彬, 黄春香, 吴维青. 水泥土的疲劳试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 949—1 953.
- [10] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 581—1 585.

上接第 88 页

岩土工程[C]. 北京: 科学出版社, 2003. 1—35.