

· 地基与基础 ·



# 深层真空振击法吹填软土现场试验研究\*

武亚军, 王加台

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 结合实际工程进行深层真空振击法加固吹填软土的现场试验, 主要对土体的  $P_s$  值、含水率、压实度、塑性指数、颗粒级配和地基承载力等物理力学指标进行测试。通过对加固前后这些数据的对比分析研究地基土的强度增长特性。经过处理, 吹填土的地基承载力及压实度达到了设计要求。证明该方法的可行性与实用性, 说明该方法在吹填软土地基处理方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 吹填软土; 深层真空; 动力固结; 水平排水

中图分类号: TU 472.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0152-07

## Field experimental study on reclaimed soft soil by deep vacuum oscillation method

WU Ya-jun, WANG Jia-tai

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** This paper makes a field trial of deep vacuum rapping reinforcing of the dredger fill, mainly on the physical and mechanical characteristics such as value  $P_s$  of soil, moisture content, degree of compaction, plasticity index, the particle size distribution and bearing capacity, etc. The foundation's bearing capacity and the degree of compaction of dredger fill meet the design requirements after treatment, which demonstrates the feasibility and practicality of this method and proves that this method will have broad application prospects in reclamation soft processing.

**Keywords:** dredger fill; deep vacuum; dynamic consolidation; horizontal drainage

### 1 深层真空振击法

目前, 沿海吹填造陆软土地基常用的处理方法有堆载预压法、真空预压法和降水强夯法等。堆载预压法处理效果好, 但是具有地基处理周期长、需要大量堆载料、不利于环保、吹填软土无法直接施工等缺点<sup>[1]</sup>; 真空预压法可用于工程性质较差的淤泥、淤泥质土和黏土地基等, 但处理工期长、地基承载力不高<sup>[2]</sup>, 并需要铺设大面积密封膜, 表层刚度和强度低。强夯法由来已久,

主要适用于低含水率、低地下水位的粗粒土地基<sup>[3]</sup>, 但工后沉降较大, 且如果遇到含水率较高的粉土和粉质黏土等地基时, 常需要结合降水措施, 即降水强夯法, 一般降水强夯法是采用垂直插入到地层中的钢管或 PVC 管作为井点来排水, 点间距一般不小于 3 m, 否则造价成倍增加失去实用性, 但是对于黏粒含量稍高的软土处理效果并不明显<sup>[4]</sup>。

深层真空振击法<sup>[5]</sup>采用专用设备把波纹管

收稿日期: 2014-05-07

\*基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (D. 10-0118-13-001); 上海高校中青年教师国外访学进修基金 (B. 60-A118-12-001)

作者简介: 武亚军 (1973—), 男, 博士, 副教授, 从事岩土工程中软地基处理、基坑边坡支护、地下建筑结构工程等方面的教学与科研工作。

(滤水管) 一端按一定间距水平埋设到地层的设计深度, 另一端接出地面并通过管道与抽真空设备相连接, 在此过程中同时采用多遍强夯使土体逐步密实。对于波纹管, 先在表面钻取一定间隔的小孔, 然后用土工布将波纹管包装好, 防止抽水时土颗粒进入波纹管内。施工工艺为: 采用开沟机(或挖机) 开挖到设计处理深度(一般 3 m), 将处理包好的 20 m 长波纹管水平放置沟中, 一端封闭处理, 一端与竖向 PVC 管道相连, 然后回填沟渠, 竖向 PVC 管道与地面抽水泵相连, 将真空负压传递给水平管道, 土中水被吸入水平管道, 水平管道埋置设计处理深度, 水向下被吸入管道, 排水路径与重力方向一致。维持抽真空 5 d 左右, 测试土体含水率和地下水位, 含水率降低 5% ~ 10% 或地下水位降低 2.5 ~ 3.0 m 以下时进行第一遍强夯, 夯后仍维持抽水, 使土体强夯产生的超孔隙水压力快速消散, 达到预定水位或含水率后, 进行第二遍强夯, 由于不需对土体进行封闭处理, 施工工艺简单, 与真空击密法相比, 主要区别是水平 20 m 长管道排水面积大于井点排水面积, 更容易排水, 固结速度更快。该方法对于含水率高、渗透性差、强度低的软土有较好的处理效果, 且工后沉降小、工期短、造价低。

## 2 工程概况

项目位于江苏省启东市寅阳镇东侧, 长江入海口北岸, 地基为海底吹填粉砂质淤泥土, 处理总面积约 53 万  $\text{m}^2$ , 现场吹砂排水通道存水面积 17 万  $\text{m}^2$ , 明水平平均水深 20 ~ 30 cm, 最深处达 40 ~ 50 cm, 地基处理 B 区面积约为 24.47 万  $\text{m}^2$ , 其中岛区面积约 19.47 万  $\text{m}^2$ , 水系面积约 5 万  $\text{m}^2$ , 施工条件较复杂。

工程地质条件: ①<sub>1-1</sub> 淤泥质粉质黏土, 厚度约 0.3 m; ①<sub>1-2</sub> 砂质粉土, 厚度约 0.8 m; ①<sub>1-3</sub> 淤泥质粉质黏土, 厚度约 1 m; ②<sub>3</sub> 砂质粉土, 厚度约 1 m。再下面为以前原状粉质黏土, 土质比较好。从地层情况及处理要求分析, 本次软地基的

处理对象就是表面 3.0 m 左右的吹填土, 以达到地基承载力和沉降方面的要求。

地基处理要求: 处理深度为 3 m (局部暗沟 8 m), 处理后的吹填土标贯击数  $N$  不小于 12 击, 地基承载力不低于 120 kPa, 处理深度范围内土的压实系数达到 84% 以上。

为了达到地基处理设计要求, 在现场 B 区选取了一典型试验区进行了深层真空振击法试验。通过试验过程中对场地地下水位、含水率、承载力和压实度等指标进行实时测量和分析, 结果证明这种新型强夯联合降水法是可行的, 在吹填软土地基处理中具有一定的优势, 值得在类似工程中进一步推广。

## 3 试验方案

施工计划工期为 4 个月, 工期较紧, 对于所选典型试验 B 区, 先制定好试验步骤, 再详细了解各种施工参数。试验步骤如下:

1) 按照水平间距 5 m 布置长度为 20 m 的深层排水管, 排水管理深分别为 1.5 m 和 3 m, 两种深度相间 5 m 布置, 并连接深层水平管、地表水平管及真空泵, 进行真空排水;

2) 降水约 7 d, 当地下水位达到 2.5 m 后进行第 1 遍点夯, 点夯参数: 强夯分为两遍点夯和一遍满夯, 第 1 遍点夯采用 5 m × 5 m 方格网布置夯点, 第 2 遍点夯在网格中心插点。两边点夯点的总体布局呈梅花形, 每点夯击数为 5 击。满夯采用搭接夯, 间距为 1.8 m, 每点夯击数为 1 击。点夯夯点平面布置见图 1。

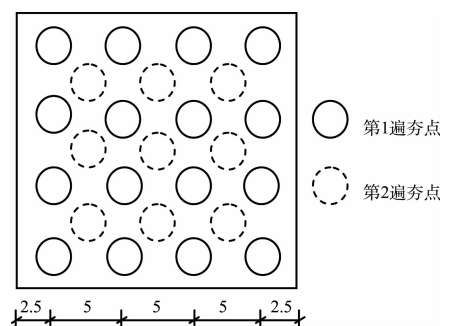


图 1 夯点平面布置 (单位: m)

3) 每道工序后推平夯坑后继续降水, 加快超孔隙水压力的消散, 当地下水位达到 2.5 m 后进行下一遍强夯。

降水前、后及每遍强夯之后, 在试验区内按 0.1、0.8、1.5 m 不同深度取土样进行击实试验, 绘制曲线得出最优含水率和最大干密度, 同时在临近点位进行单桥静探试验获得土体的比贯入阻力, 并测量地下静水位及不同深度土体的含水率。施工完后进行浅层平板载荷试验检验地基承载力。施工参数见表 1。

表 1 施工参数

| 施工工序 | 工序时间/d | 夯锤质量/t | 夯锤高度/m | 单击夯能/(kN·m <sup>-1</sup> ) | 夯锤直径/m | 夯击数    | 夯锤间距/m |
|------|--------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|--------|
| 降水前  |        |        |        |                            |        |        |        |
| 降水后  | 7.0    |        |        |                            |        |        |        |
| 1遍夯  | 3.5    | 13.2   | 11.5   | 1 500                      | 2.3    | 5(3+2) | 5.0    |
| 2遍夯  | 2.5    | 13.2   | 9.1    | 1 200                      | 2.3    | 5(3+2) | 5.0    |
| 满夯   | 3.0    | 13.2   | 8.1    | 1 000                      | 2.3    | 1      | 1.8    |

由于夯锤夯坑深度太大, 连续夯击次数太多时提升夯锤困难, 所以第 1 遍夯击时, 采用夯 3 击后对场地简单整平, 然后再加夯 2 击, 之后再整平, 等待场地水消散后再进行下 1 遍夯击。第 2 遍夯击亦如此, 采用先夯 3 击, 进行推平后再加夯 2 击。

### 4 试验成果分析

#### 4.1 静力触探试验

单桥静力触探试验是根据测得的探头比贯入阻力  $P_s$  值的大小与分布来判定土的物理力学性质的一种原位试验。与传统的钻探方法相比, 可连续获得地层的强度和其他方面的信息, 不受取样扰动等人为因素的影响。

在每道施工工序结束之后均进行了单桥静力触探试验(图 2)。从图 2 可以看出, 降水后比降水前土体强度有一定提高, 第 1 次夯击后承载力有显著的提高, 后 2 次夯击对土体承载强度提高趋相对近于平稳。图中降水后深度 0.7 m 和第 2 遍夯后深度 0.8 m 处强度较低可能是所选的试验点处有薄层淤泥质土夹层所致。

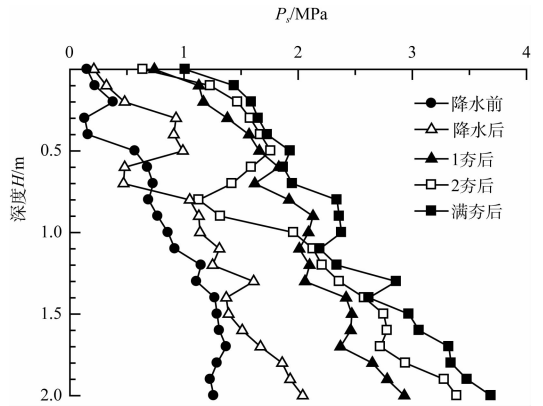


图 2 每道工序后探头阻力

为了研究单点夯的影响范围, 对单点夯不同水平距离进行单桥静力触探试验, 图 3 为第 1 遍夯时取一个单独夯点水平和竖向土体  $P_s$  值对比, 周围没有相邻夯点的影响。其中图 3 中阻力读数较低处为土体中局部小区域含有淤质泥土所致。从图 3 可以看出夯点水平向 2.4 m 处还有显著的影响, 但是到距锤心 3.6 m 处时提高幅度不大, 可以看出夯击水平影响距离在 2.4 ~ 3.6 m 之间。同时距表面 2.9 m 时探头读数还有较大变化, 但是到 3.6 m 深度时读数大致相同, 变化很小, 可以看出单独夯锤的竖向影响深度为 3.4 m 左右。

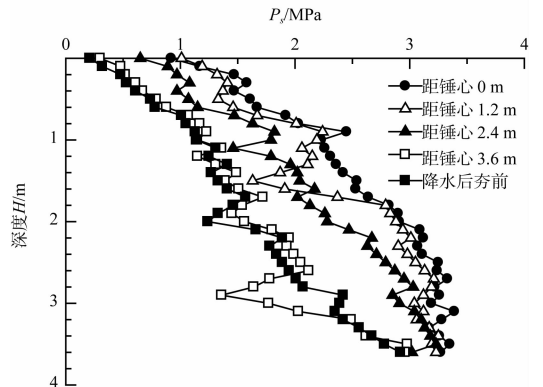


图 3 单点夯距锤心不同距离处土体探头阻力曲线

另外, 取单点夯与边缘夯点和中间夯点进行对比, 单夯点是周围没有其他点夯影响的取点; 边缘夯点为试验区域边上取点, 只有一边有其他点夯影响, 另外一边没有其他点夯的影响; 中间夯点为试验区域内部的点夯, 两边都有其他点夯的影响。图 4 中压强读数骤降点为小区域内的淤质泥土所导致读数下降。从图 4 可以看出对于夯

锤正中心来说, 相邻之间点的夯击对于其旁边点夯的中心土体的压实没有影响。从图 5 可以看出对于在夯锤的水平 2.5 m 半径范围之内, 土体的压实还是有一定的影响, 中间夯点受到影响最大, 边缘夯点受到影响小一些。分析其原因, 在锤半径范围内土体主要受竖向压力, 而周围土体却主要是受到夯锤冲击波的挤压和振动压力影响, 对于边缘夯点, 土体横向所受一边的挤压力和振动压力, 相比中间夯点两边都有挤压和振动力小, 而单点夯只受到一个夯锤的影响, 所以中间夯点压实效果最好, 承载力高些<sup>[6-10]</sup>。

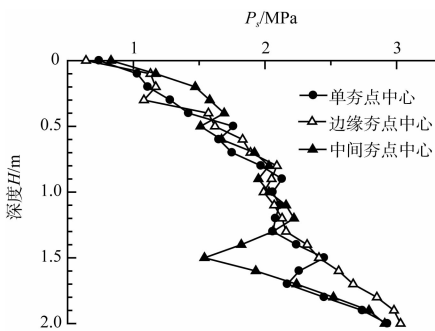


图 4 相邻夯点之间锤心的影响

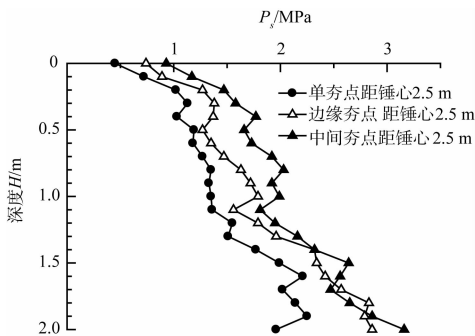


图 5 相邻夯点之间距锤心 2.5 m 的影响

### 4.2 颗粒级配试验

颗粒分析就是测定土中各种粒组所占该土总质量的百分数的试验, 土的颗粒组成在一定程度上反映了土的某些性质, 根据颗粒组成还可以概略地判断土的工程性质。

从图 6 和图 7 可以看出, 夯前夯后土体颗粒级配变化不大, 总体上土颗粒粒径在 0.05 ~ 0.1 mm 之间百分比含量高, 土质为粉质砂土为主。对于此种土质, 采用强夯进行地基处理有一定的效果<sup>[11]</sup>。

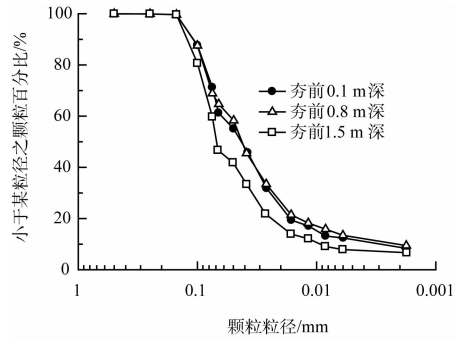


图 6 夯前各层土的颗分试验

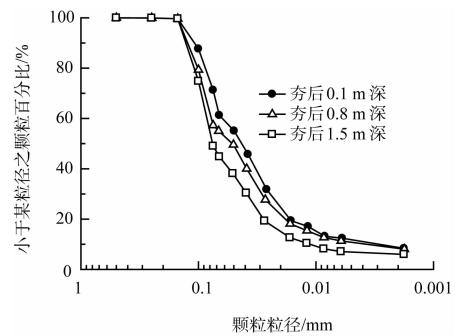


图 7 夯后各层土的颗分试验

### 4.3 击实试验

击实试验能反映出土体在压实功能和压实方法不变时, 土体干密度和含水率之间的关系, 通过这种关系可以得出土达到最大干密度时所对应的最优含水率, 从而为施工控制填土密度提供设计依据。施工前取不同深度土体进行室内轻型击实试验, 绘制出关系曲线, 求出最大干密度和最优含水率并分析实验结果。

由图 8 可以看出, B 区场地土最优含水率为 14.5% ~ 15.02%, 最大干密度为 1.79 ~ 1.81 g/cm<sup>3</sup>。结合颗分试验可以看出土质沿深度变化不大。

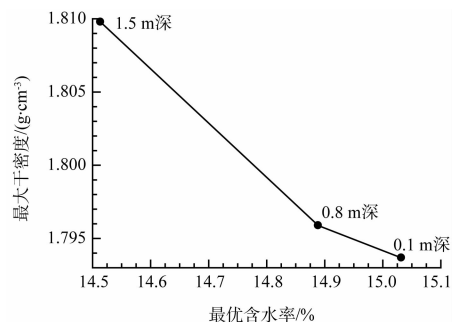


图 8 不同深度最大压实度和最优含水率

### 4.4 含水率

图9为0.1、0.8、1.5 m深度处降水前后和每遍夯后土体含水率的变化情况。从中可以看出，在降水前后土体含水率有很大的变化，第1遍夯后土体含水率变化也较大，说明埋管真空抽水加强夯能够有效地降低土体含水率，但是后2遍夯后含水率变化不大，可能与本工程现场施工工序间隔时间太短，土体强夯后孔隙水未完全消散有关。

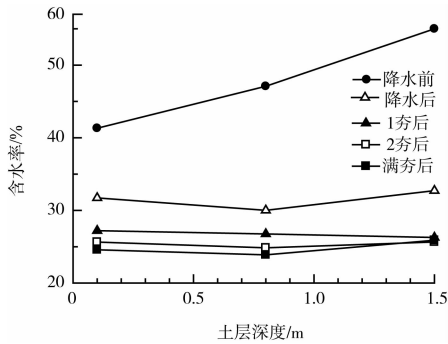


图9 不同深度含水率

### 4.5 压实度试验

由图10看出，在夯前土体压实度平均为73%左右，1遍强夯后土体压实度显著增加，后面2遍强夯对土体增加幅度减小，夯后压实度在81%~88%，结合图13可看出排水强夯能有效快速加固软土地基，在含水率较高时，强夯的效果不是很明显。说明排水对真空振击施工法有非常大的影响。

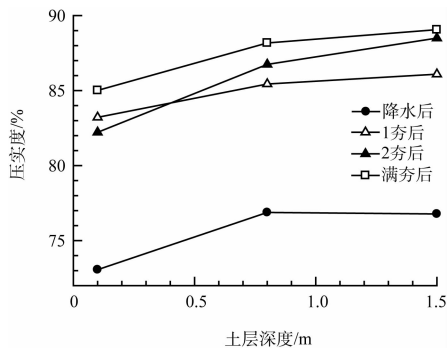


图10 不同深度的土体压实度

### 4.6 塑性指数

塑性指数在一定程度上综合反映了土体细颗粒含量：塑性指数越大土的颗粒越细，细颗粒含

量也越多。图11给出了处理前后不同深度处土体的塑性指数，从中可以看出强夯前后塑性指数基本在12.5~16之间，土体为粉质黏土，由于地基处理过程中不会造成土颗粒的流失，故处理前后土体的塑性指数变化不大，从其他数据结果来看，深层真空振击法对于这种的土质也是有效果的<sup>[12]</sup>。

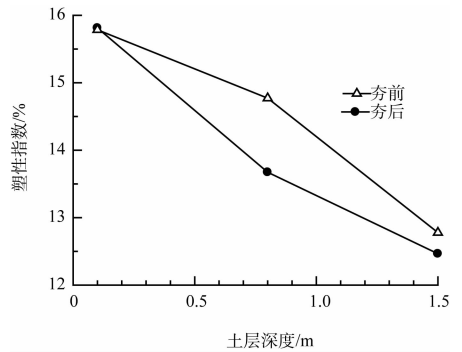


图11 不同深度土的塑性指数

### 4.7 地面沉降量

表2给出了每道工序后地下水位、夯坑深度、场地沉降量和夯坑周围土体隆起量，由表可以看出在降水后地下水位下降明显，强夯时地下水位下降量小，夯击时夯坑深度较大，场地沉降和隆起明显，说明采用深层水平真空抽水方法能有效快速地降低土层水位，减少土体含水率，抽水同时加上夯锤振动能够加速土体固结，场地高程下降明显。但是结合含水率试验看出土体含水率还是较高，不利于土体的固结，主要原因是每遍夯后等待时间太短，水中的超孔隙水压力还没有充分消散，导致土体夯击时变形太大，应该适当增加每道工序间隔时间<sup>[13]</sup>。

表2 场地施工测量数据

| 施工工序 | 地下水位/m |      | 夯坑深度/cm | 沉降量/cm | 隆起量/cm |
|------|--------|------|---------|--------|--------|
|      | 消散前    | 消散后  |         |        |        |
| 降水前  | -1.3   |      |         |        |        |
| 降水后  | -2.5   |      |         | 4      |        |
| 1遍夯  | -2.3   | -2.5 | 180     | 29     | 18     |
| 2遍夯  | -2.3   | -2.4 | 150     | 17     | 10     |
| 满夯   | -2.2   | -2.6 | 30      | 5      | 2      |

注：其中沉降量和隆起量是每遍强夯前3击结束后的数据。

### 4.8 平板载荷试验

试验结束后进行了平板载荷试验，压板尺寸

为 1.0 m × 1.0 m, 加载采用慢速维持法, 每级加载后, 按间隔时间 10、10、10、15、15 min, 以后为每隔 0.5 h 测读一次沉降量, 当在连续 2 h 内, 每小时的沉降量小于 0.1 mm 时, 则认为已趋稳定, 可加下一级荷载。由图 12 和图 13 看出加载至 240 kPa 时, 所绘  $p-s$  曲线未出现明显陡降,  $s-lgt$  曲线尾部亦无明显向下弯曲, 相对变形值  $s/b = 0.01$  (承载板宽度  $b = 1\ 000$  mm) 所对应的荷载值为 206 kPa, 其值大于最大加载值的一半 120 kPa, 故取 120 kPa 作为该试验点地基承载力特征值, 地基处理效果满足设计要求。

### 5 试验结果与理论对比

有效加固深度一般是指不完全满足工程要求的地基经过加固后达到设计要求的深度, 具体的控制指标及其临界值应结合工程要求和土质条件。强夯法虽然在实践中被证实是一种好的地基处理方法, 然而到目前为止现场检验有效加固深度的方法和标准还不一致, 还没有一套成熟完善的理论和设计计算方法。目前有效加固深度的确定有 2 个方面: 一是原位测试中地基土工程性能有明显改变的深度, 二是现场测量中地基土竖向变形应变比较明显的深度。但是采用哪种指标会因工程地质条件的不同、施工工艺等诸多因素综合作用而会有一定差异。

基于工程实践结果的经验公式一般选取与强夯机具密切相关的锤重、落距、锤底直径、单位面积夯击能等作变量, 将土性的影响概括的用修正系数来代替, 形式简洁便于计算。由于土体不做封闭处理, 不存在真空预压力, 排水时, 对土体所产生的负压力很小, 可忽略, 主要是通过强夯加固土体, 所以计算时仅考虑强夯能量的影响因素。常用的公式有修正梅纳公式和 BILLAM 公式<sup>[14]</sup>。

修正的梅纳公式:

$$Z = \alpha \sqrt{MH} \quad (1)$$

式中:  $Z$  为强夯有效加固深度 (m);  $M$  为夯锤的质量 (t);  $H$  为落距 (m),  $\alpha$  为与土类有关的修正系数, 碎石土和砂土  $\alpha = 0.6 \sim 0.39$ , 粉土黏性土湿陷性黄土  $\alpha = 0.5 \sim 0.35$ 。这里取  $\alpha = 0.42$ 、 $M = 13.2$ 、 $H = 9.1$ , 根据公式计算得  $Z = 4.6$ 。

BILLAM 公式:

$$Z = MHk/D^2 \quad (2)$$

式中:  $k$  为折减系数, 与土的种类和初始密度有关, 一般取 0.10 ~ 0.16。  $D$  为夯锤底面直径 (m)。这里取  $k = 0.15$ 、 $M = 13.2$ 、 $H = 9.1$ 、 $D = 2.3$ , 根据公式计算得  $Z = 3.4$ 。

两种经验公式的计算值与工程实测值  $Z = 3.3$  m 相比, BILLAM 法更加接近, 修正的梅纳公式偏大。

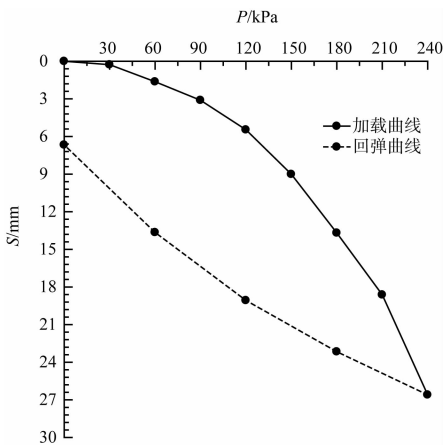


图 12 P-S 曲线

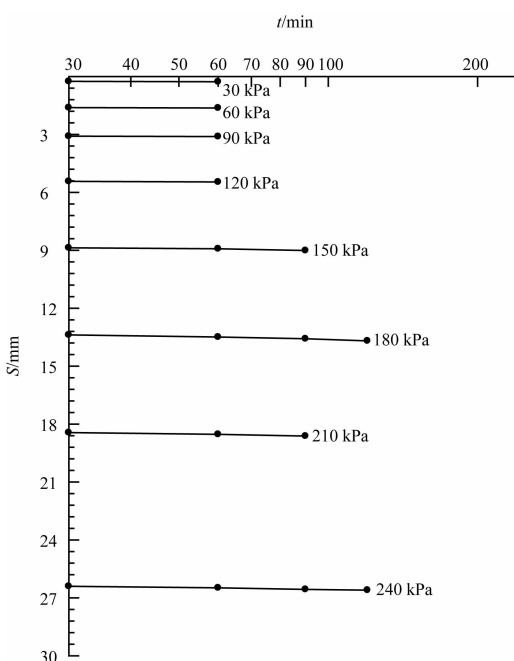


图 13 S-lgt 曲线

有效影响深度不仅与锤重、落距有关,还与其他强夯参数、土层厚度、地层分布及土性有关,随着这些因素的变化,有效影响深度也会不同,如土体含水率的差异,往往使土性相差很大,一般在塑限附近压实效果最好。本工程中地下水位在2.5 m左右,在水位以上含水率为25%左右,但是在水位以下含水率达到40%以上,主要是因为强夯完后间隔时间太短,超孔隙水压力未消散完,加之地下水的影响,导致实际影响深度偏小。

## 6 结论

1) 深层真空振击法采用竖向与横向相结合的排水体系,有助于加快超静孔隙水的消散速度,但是从后2遍夯击时含水率和最优含水率对比可看出,含水率还是偏高,主要因为工序间隔时间太短,超孔隙水压力尚未消散完全,对土体固结不利。建议在施工中遇到这种含水率较高、渗透性差、不易固结的软土,每遍夯击完后增加间隔时间,让土体中的超孔隙水压力充分消散后再进行强夯。

2) 由于吹填软土含水率大、渗透系数低,不易采用大能量强夯,本工程中采用1 200 kN·m夯击能是比较合适的,如果出现夯坑过深引起起锤困难,可以先夯3击,之后对场地简单整平后再补夯2击,这样锤下土体加固程度好,侧向挤出小,夯坑周围土体隆起小,固结排水畅通,避免夯坑过大,夯锤拔起难度大等施工问题,同时也提高了夯能利用率,即采用“先轻后重、逐级加能、少击多遍、逐层加固”的强夯施工工艺,能保证处理效果。

3) 由单点夯可以看出,这种含水率较高、渗透性较差、不易固结的软土,竖向有效加固深度约为3.5 m,水平向影响半径约为3 m,夯击时可以适当增加夯锤间距。

4) 相邻夯点之间存在相互影响,中间土体受两边挤压,加固效果较好,夯区边缘加固效果较差,因此对于地基处理场地边缘,应该在夯完之

后进行补夯,也可在布置夯点的时候,向外扩出一排夯点,以免边缘地区地基承载力不够。

## 参考文献:

- [1] 牟春梅,刘宝臣,李佰锋.真空预压与堆载预压加固软土的微观效果评价[J].工程勘察,2009,37(5):1-5.
- [2] 张延军,张延诘.国内真空预压法加固软土地基的现状与趋势[J].世界地质,2000,19(4):375-378.
- [3] Miller G F, Pusey H. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1955, 233(1192): 55-69.
- [4] 钱家欢,钱学德,赵维炳,等.动力固结的理论与实践[J].岩土工程学报,1986,8(6):1-17.
- [5] 武亚军.软土地基的深层真空振击处理工法:中国,ZL200710044237. X. [P]. 2010-12-08.
- [6] Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, Ameratunga J, et al. Performance and prediction of vacuum combined surcharge consolidation at port of Brisbane [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(11): 1 009-1 018.
- [7] 刘汉龙,高有斌,曹建建,等.强夯作用下接触应力与土体竖向位移计算[J].岩土工程学报,2009,31(10): 1 493-1 497.
- [8] 曹亚林,何广纳,林皋.土中振动孔隙水压力生长程度的能量分析法[J].大连理工大学学报,1987,26(3): 83-89.
- [9] Leonard G A. Dynamic compaction of granular soil [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE, 1980, 106(1): 135-144.
- [10] Minaev O P. Prospects of using dynamic compaction when placing ash materials and preparing bases for ash dumps [J]. Journal of Geomechanics Abstracts, 1997 (1): 22.
- [11] 颜永国.真空荷载下不同颗粒级配软土[J].水运工程,2010(10):109-112.
- [12] 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(S1): 198-200.
- [13] 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.
- [14] 叶观宝,陈望春,徐超.强夯法地基处理有效加固深度的分析研究[J].上海地质,2003,3(89):22-25.