

# 水下抛石基床振夯工艺主要影响因素探讨

曾昊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中交第四航务工程勘察设计院有限公司 广州 510230

**摘要:** 采用高频液压振动锤进行水下抛石基床夯实是一种新工法, 本文介绍振夯工艺及致密机理, 通过某采用振夯工艺工程实例, 对夯击时间、夯沉量、夯沉量与时间曲线关系进行研究, 并对振夯工艺主要影响因素进行探讨, 为振夯工艺质量控制提供参考。

**关键词:** 水下抛石基床; 振夯工艺; 影响参数;

## Discussion on the Main Influencing Factors of Vibratory Tamping Technology for Underwater Rockfill Foundation Beds

Hao Zeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CCCC FHDI Engineering Company, Ltd., Guangzhou 510230, China;

**Abstract:** The use of high-frequency hydraulic vibrating hammers to compact underwater rockfill foundation beds is a new construction method. This article introduces the vibratory compaction process and compaction mechanism. Through an example of a project using vibratory compaction technology, Study the impact time, compaction amount, and the relationship Between compaction amount with time curve, and discuss the main influencing factors of vibratory tamping process, and provide reference for the quality control of vibratory tamping process.

**Key words:** underwater rockfill foundation beds; vibratory compaction technology; Influencing Factors;

水下基床抛石中传统的重锤夯实存在效率较低、施工成本高等问题, 爆破夯实工艺则对周边环境影响较大。高频液压振动锤振夯工艺作为水下抛石基床夯实的一种新工艺, 具有效率较高, 施工成本较低, 施工噪声小, 对周边环境影响小等优点, 有较好推广应用价值。目前高频液压振动锤振夯工艺有一定的工程应用案例, 但施工过程中主要影响因素及质量控制指标尚无规范统一规定。本文对振夯工艺主要影响因素及质量控进行探讨。

### 1 振夯工艺及致密机理

振夯工艺采用高频液压振动锤对水下抛石基床进行夯实致密, 在高频液压振动锤共振梁下通过钢管或直接连接厚钢板, 共振梁和钢管受到振动锤顶部可变频振动器的驱动, 使得厚钢板在水下抛石基床表面以一定的频率和激振力做周期性振动, 使抛石颗粒产生相对错动, 从而实现抛石基床密实。

水下抛石基床在自重堆积下具有一定的孔隙比, 达到了抛石基床的初始平衡状态。抛石颗粒在受到高频液压振动锤产生的激振力作用下, 颗粒间产生相对错动、相互支撑位置发生变化, 打破了抛石基床的初始平衡状态。当颗粒较为松散时, 下方颗粒对上方颗粒没有明显的阻碍作用, 抛石基床的局部孔隙比开始急剧下降, 抛石颗粒在振动锤下方整体处于压缩状态, 抛石基床迅速密实。随着振动时间的增加, 孔

隙比变化率呈现出逐步衰减的趋势, 此过程中, 由于下方的颗粒先达到稳定状态, 对上方的颗粒存在一定的阻碍和缓冲作用, 相邻颗粒之间的作用越为紧密, 致使颗粒紧密堆积趋于缓慢, 孔隙比变化值变小, 最终趋于稳定<sup>[1]</sup>。

### 2 振夯工艺工程实例

#### 2.1 工程方案概况

国内某新建重力式沉箱结构码头为5万吨级多用途泊位。多用途泊位码头面高程4.5 m(理论最低潮面), 前沿设计泥面高程-14.4 m。码头基床厚度范围为1.0m~5.0m, 基槽地质为散体状强风化及中风化流纹岩; 采用高频液压振动锤振夯工艺对抛石基床进行夯实, 基床厚度在1.0m~3.0m之间的不分层一次夯实, 基床厚度在4.0~5.0m之间的基床分2层抛填2次夯实。

#### 2.2 高频液压振动锤参数

采用的高频液压振动锤主要性能参数如下:

- (1) 液压振动锤重量T: 4453kg;
- (2) 最大激振力F: 2300KN;
- (3) 偏心力矩M: 110kgm;
- (4) 最大振幅A: 24.7mm;
- (5) 振动频率H: 20Hz。
- (6) 夯实板重量T1: 5500kg

(7) 夯实板尺寸 (LxB) :4.0m × 2.5m

### 2.3 夯击能量计算

(1) 假设加夯实板后振动锤振幅为A1, 根据公式:  
 $A1 \times (T+T1) = M$ , 则:

$$A1 = M \times 1000 / (T+T1) = 11.05 \text{mm}$$

(2) 假设加夯实板后振动锤速度为V, 则:

$$V = A1 \times H / 1000 = 0.221 \text{m/s}$$

(3) 假设加夯实板后振动锤质量产生的动能为W质, 则

$$W质 = 1/2 (T+T1) / 1000 \times V \times V = 0.24 \text{kJ}$$

(4) 假设振动锤激振力产生的动能为W振, 则

$$W振 = F \times A1 \times 1000 = 25.42 \text{kJ}$$

(5) 假设振动锤振夯1次产生的总动能为W总, 则

$$W总 = W质 + W振 = 25.66 \text{kJ}$$

(6) 假设连续振动1s累计夯击能量W1s, 则

$$W1s = W总 \times H \div (LxB) = 51.32 \text{kJ/m}^2$$

### 2.4 典型施工

根据不同地质条件特征和基床厚度, 选取K0+003~K0+010、K0+256~K0+266及K0+284~K0+294共三段基床振夯典型施工, 基床及夯实尺寸参数见表1。振夯施工过程中记录了夯前标高、夯后标高、单点振夯时间、夯沉量及夯沉率等主要施工参数, 见表2。

表1 基床及夯实尺寸参数

| 夯实桩号            | 基床厚度 (m) | 夯实长度 (m) | 夯实宽度 (m) | 夯实面积 (m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|----------|----------|----------|------------------------|
| K0+003 ~ K0+010 | 1.5      | 7        | 17       | 119                    |
| K0+256 ~ K0+260 | 1.6      | 5        |          | 85                     |
| K0+262 ~ K0+266 | 2.8      | 5        |          | 85                     |
| K0+284 ~ K0+296 | 2.2      | 10       |          | 170                    |

表2 振夯典型施工主要参数

| 桩号        | K0+003 ~ K0+010 | 夯击时间(s)   | 60s     | 基槽地质  | 强风化流纹岩 |
|-----------|-----------------|-----------|---------|-------|--------|
| 夯前平均标高(m) | 夯后平均标高(m)       | 平均夯沉量(cm) | 基床厚度(m) | 夯沉率   |        |
| -16.53    | -16.78          | 25        | 1.5     | 16.4% |        |
| 桩号        | K0+256 ~ K0+260 | 夯击时间(s)   | 45s     | 基槽地质  | 中风化流纹岩 |
| 夯前平均标高(m) | 夯后平均标高(m)       | 平均夯沉量(cm) | 基床厚度(m) | 夯沉率   |        |
| -16.53    | -16.88          | 35        | 1.6     | 22%   |        |
| 桩号        | K0+262 ~ K0+266 | 夯击时间(s)   | 60s     | 基槽地质  | 中风化流纹岩 |
| 夯前平均标高(m) | 夯后平均标高(m)       | 平均夯沉量(cm) | 基床厚度(m) | 夯沉率   |        |
| -16.39    | -16.86          | 47        | 2.8     | 17%   |        |
| 桩号        | K0+284 ~ K0+296 | 夯击时间(s)   | 60s     | 基槽地质  | 中风化流纹岩 |
| 夯前平均标高(m) | 夯后平均标高(m)       | 平均夯沉量(cm) | 基床厚度(m) | 夯沉率   |        |
| -16.63    | -16.79          | 17        | 2.2     | 11%   |        |

### 2.5 夯沉施工过程

振夯施工过程中监测夯沉量情况, 根据典型的不同基槽地质条件和基床厚度, 绘制振夯夯沉量与时间曲线图, 曲线图为水下抛石基床振夯施工时间控制提供了参考依据。基槽地质为强风化流纹岩, 基床厚度2m的振夯夯沉量与时间曲线见图1, 基槽地质为强风化流纹岩, 基床厚度3m的振夯夯沉量与时间曲线见图2, 基槽地质为中风化流纹岩, 基床厚度2m的振夯夯沉量与时间曲线见图3, 基槽地质为中风化流纹岩, 基床厚度3m的振夯夯沉量与时间曲线见图4。

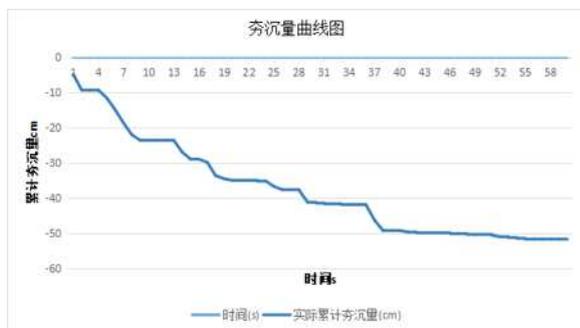


图1 夯沉量与时间曲线图 (一)

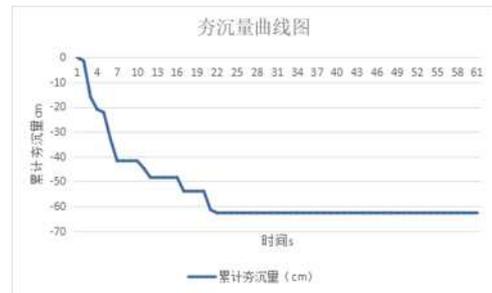


图2 夯沉量与时间曲线图 (二)

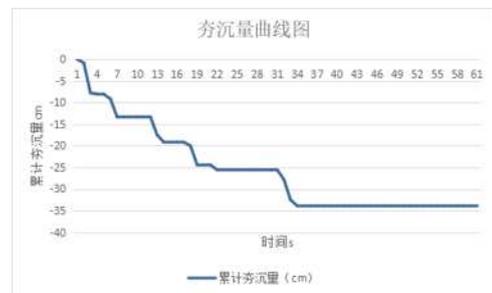


图3 夯沉量与时间曲线图 (三)

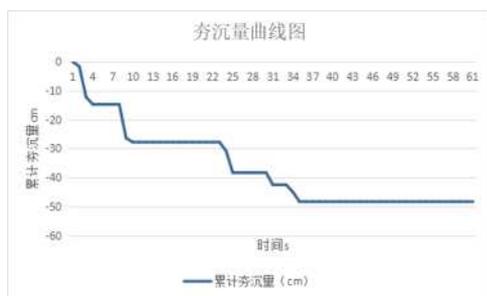


图4 夯沉量与时间曲线图 (四)

## 2.6 夯沉施工效果小结

根据图3~图6的振夯夯沉量与时间曲线图, 振夯时间25s~34s后, 夯沉量基本趋于稳定; 在基槽底地质情况相同, 基床厚度3m的夯沉量相对基床厚度2m大。根据表2的振夯典型施工主要参数, 抛石基床夯沉率范围为11%~22%, 平均值为15%; 达到《码头结构施工规范》(JTS215-2018)规定基床爆夯夯沉量控制在抛石层厚的10%~15%范围的上限<sup>[2]</sup>。

## 3 振夯工艺影响因素探讨

液压振动锤对抛石基床的振动密实效果, 主要影响因素包括: 振动锤的主要参数(激振力、振动频率、振幅), 振动时间, 抛石基床的粒径级配等, 主要影响因素探讨如下:

### (1) 激振力

基床抛石的块石呈颗粒结构, 压缩性低, 强度高, 力学性能稳定, 块石之间没有粘聚力。当外力大于块石间的摩擦力时, 可以使块石间产生相对移动, 此时振动锤的激振力如果大于块石间的摩擦力, 即可以使块石重新排列, 减小孔隙率, 实现密实效果。《码头结构施工规范》(JTS215-2018)规定重力锤夯底面静压强宜采用40~60KPa, 落距可取2.0~3.5m<sup>[2]</sup>。根据自由落体运动, 重力锤重4吨, 从高度4m落下, 重力锤从接触抛石基床到静止时间为0.2s~0.3s, 经计算, 冲击力约100KN·m<sup>-2</sup>~200KN·m<sup>-2</sup>。根据某一工程沉管隧道基础块石振沉夯实试验情况, 激振力达到150KN·m<sup>-2</sup>时即能达到重力锤的夯沉效果。

### (2) 振动频率

振动频率的选择原则是强迫振动的频率尽可能接近块石的自振频率, 与抛石体形成共振, 这样振动的衰减最小, 且使块石达到最大振幅, 这时的密实效果最好。

### (3) 振幅

振幅就是振动锤的振动幅度。振幅足够大时, 才能破坏块石间弱化摩擦力的作用, 使足够大的力能够传递到基床深处, 从而产生更好的密实效果。振幅过小会造成表层过早密实, 减小对深层块石的影响, 从而影响密实效果。振幅对密实效果的影响, 由于块石的种类、级配不同, 需要的振幅也不相同, 但业内普遍认为振幅不能小于3mm。

### (4) 振动时间

只有达到了一定的振动时间, 振动锤连续振动累积能量

才能抵消克服块石间的摩擦力, 使块石间产生相对移动产生的能量, 从而使抛石基床达到密实效果。根据《Geotechnical Engineering Circular No.1-DYNAMIC COMPACTION》, 下表用于初始估算强夯或轻型击实处理每立方米不同种类回填土所需要的能量<sup>[3]</sup>。

Table 3. Applied energy guidelines.<sup>[3]</sup>

| Type of Deposit  | Unit Applied Energy (kJ/m <sup>3</sup> ) | Percent Standard Proctor Energy |
|--|--|---------------------------------|
| Pervious coarse-grained soil - Zone 1 of Figure 5  | 200-250                                  | 33-41                           |
| Semipervious fine-grained soils - Zone 2 and clay fills above the water table - Zone 3 of Figure 5 | 250-350                                  | 41-60                           |
| Landfills  | 600-1100                                 | 100-180                         |

Note: Standard Proctor energy equals 600 kJ/m<sup>3</sup>.

根据上表分类, 抛石基床属于粗颗粒土一类, 振夯工艺类似轻型击实; 轻型击实使粗颗粒土密实所需要的能量为600KJ·m<sup>-3</sup>。上述2振夯工艺工程案例, 夯实抛石基床分层厚度为2~3m, 使每平方米抛石基床密实所需要的能量为1200~1800KJ。而振动锤连续振动1s累计夯击能为51.32kJ/m<sup>2</sup>, 振夯时间25s~30s, 累计夯击能为1350~1620KJ; 根据图3~图6夯沉量与时间曲线图表明, 夯沉量基本趋于稳定。由于抛石基床分层厚度达到密实所需能量是初始估算, 实施过程中振动时间需要根据典型施工夯沉量与时间关系曲线确定。

### (5) 抛石基床的粒径级配

抛石基床粒径级配良好, 振动过程中小粒径颗粒容易挤入大粒径颗粒间的空隙, 抛石颗粒之间咬合度高, 相互之间挤压紧密。反之则不利于挤密。

## 4 结论

(1) 振动锤激振力需要大于块石间的摩擦力, 激振力达到150KN·m<sup>-2</sup>能达到重力锤的夯沉效果。

(2) 振动锤振动时间根据抛石基床分层厚度达到密实所需能量进行初始估算, 达到一定时间累积能量才能满足。如抛石基床分层厚度一般为2~3m, 振夯时间不宜少于30s; 需结合典型施工夯沉量与时间关系曲线确定。

(3) 抛石基床良好的粒径级配有利于挤压紧密。

(4) 振夯工艺施工控制以振夯时间为主, 夯沉量为辅助指标, 夯沉量控制在抛石层厚的15%左右。

## 参考文献

- [1]何燕清,黎浩然,陈福全.水下抛石基床振动致密机制[J].南昌大学学报(工科版),2017.
- [2]中交第四航务工程局有限公司.码头结构施工规范:JTS215-2018[s].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [3]Lukas,R.G.GeotechnicalEngineeringCircularNo.1-DYNAMICCOMPACTION.Report,FHWA-SA-95-037,1995.

作者姓名: 曾昊, 1982年4月, 男, 汉, 重庆潼南, 大学本科, 工程师, 河海大学, 港口与航道工程。