



动力打桩能量转换率及选锤要素

陆 红¹, 洪 亮¹, 林 登², 张 剑², 杨震宇², 李海瑞²

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;
2. 浙江永安工程机械有限公司, 浙江 温州 325204)

摘要: 动力打桩的桩锤规格选择是桩基施工中重要及复杂的环节, 满足桩基设计的极限承载力为主要考虑因素。常用的选锤方法有公式计算法、经验综合分析法、波动方程法共 3 类, 可以选用桩锤的锤击能量及极限承载力。通过分析选锤要素引出了选锤最小能量值, 从传统的单一锤击能量扩展到了一个区间, 既简化了选锤方法, 又提高了沉桩效率。从锤击能效及效率角度分析了锤桩质量比不宜小于 1/4 的实质是锤击能量转换效率的大幅降低, 从理论上将动力打桩与静压沉桩有机联系起来。

关键词: 动力打桩; 能效; 转换率; 选锤; 阈值; 最大值

中图分类号: O 313.4; U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0179-04

Energy conversion rate of power piling and hammer selection elements

LU Hong¹, HONG Liang¹, LIN Deng², ZHANG Jian², YANG Zhenyu², LI Hairui²

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. Zhejiang Yongan Machinery Co., Ltd., Wenzhou 325204, China)

Abstract: The selection of pile hammer specifications for power piling is an important and complicated link in pile foundation construction, and the ultimate bearing capacity of pile foundation design is the main factor to be considered. The common methods for hammer selection include formula calculation, empirical comprehensive analysis, and the wave equation method, which can select the hammering energy and ultimate bearing capacity of pile hammers. The analysis of hammer selection elements can lead to the minimum energy value of hammer selection, which extends from the traditional single hammering energy to a range. This simplifies the method of hammer selection and improves the piling efficiency. From the perspective of hammering energy efficiency and efficiency, this paper analyzes the reason why the hammer-to-pile mass ratio should not be less than 1/4, namely that the hammering energy efficiency would be significantly reduced. In this way, power piling and static pressure piling are related in theory.

Keywords: power piling; efficiency; conversion rate; hammer selection; threshold; maximum value

动力打桩的桩锤规格推荐及选择, 一直是桩基施工中比较重要及复杂的一个环节。满足桩基设计的极限承载力要求为选锤主要考虑的因素, 并综合考虑桩的类型、形状、长度及质量, 沉桩位置的地质条件, 沉桩过程穿透的贯入击数较高的土层及持力层的岩土特性等。常用的选锤方法基本分 3 类: 应用动力打桩公式估算值选锤; 按

经验综合分析归纳总结出图表, 采用作图法选桩锤^[1]; 以沉桩时的应力状态为基础, 应用波动方程进行桩的可打性分析, 进而选锤。

1 选锤要素

1.1 能量级别

上述 3 种选锤方法, 基本是在 20 世纪 90 年

收稿日期: 2022-06-17

作者简介: 陆红 (1957—), 男, 教授级高工, 从事水运工程施工技术及船机设备技术管理。

代高效筒式柴油打桩锤广泛应用于工程领域时期逐步形成并完善的。选锤的过程，实际上就是确定沉桩过程中桩锤的锤击力能克服桩身侧摩阻及端阻的最大值，并获得一定贯入度需要的最小能量值，以及桩锤在锤击过程中可能产生的桩身应力不超过损坏桩身的临界值时的最大能量值。

1.2 锤芯质量与锤击应力关系

大量的工程实例证实，在满足冲击能量要求的前提下，当锤击能量为一定值时，打桩应力随锤质量的增加反而减小。因此，为降低打桩过程中桩身的应力，宜采用“重锤轻打”。即在锤击能量一定时，桩身的应力并不因锤质量的增加而加大，反而是下降。用重锤低落距打桩，无论在桩的贯入度性能方面还是在保持桩身完好性方面，均好于用轻锤高落距打桩。

1.3 柴油锤特性

以筒式柴油打桩锤为主选锤型时，由于柴油锤工作原理类似于一个内燃式单缸两冲程柴油机，其可持续循环工作的条件是沉桩锤击过程中桩身的阻力必须大于一个最小值。也就是说，如果选择的柴油锤质量太大，即使采用最小档位沉桩也难以满足锤芯最小回弹高度，就不能保证作为单缸柴油机活塞的锤芯有足够的反弹高度，即锤击贯入度太大无法维持可持续循环锤击的工作条件。这也是选用柴油锤时选锤上限的一个重要控制条件。

近年来，随着国内桩工机械制造水平的提高，打桩锤制造及配置大能量锤的成本越来越低，液压打桩锤也已广泛应用于工程建设桩基施工领域，为实现重锤轻打提供了有利条件。由于液压打桩锤的动力是依靠桩锤外部的动力柜提供，其可持续循环工作的条件与柴油打桩锤完全不同。某一规格的柴油锤一般仅有 4 个能量级别的挡位可调，而液压打桩锤的锤击行程（能量级别）可连续调整，因此从操作层面上讲，液压锤的广泛应用才使重锤轻打在工程应用中真正成为了可能。

2 锤击能效

2.1 动力打桩过程

动力打桩的过程就是利用桩锤的锤芯产生的冲击能量碰撞桩顶的过程。依靠外部动力设备提供或桩锤内部燃油爆炸做功产生的机械能，将锤芯提升到一定的高度，转化为势能存储于锤芯。然后在控制系统的作用下，锤芯快速或加速下落，将势能转化为动能，以最大末速度快速撞击桩顶，获得巨大的瞬时力，迫使桩身克服桩侧摩阻力、桩端阻力，压缩并冲剪桩端土层，将桩身沉到预定深度的持力层。

2.2 锤击能量转换率

在锤芯与桩顶的碰撞过程中，力的变化十分剧烈，并伴有强烈的声、光、热等机械能损失^[2]。将锤与桩作为一个体系^[3]，研究碰撞前与碰撞后的能量及动量变化^[4]，就可得出锤击能效的数值解。

桩锤的锤芯提升到预定的高度，将机械能转化为重力势能存储于锤芯：

$$E_g = mgH \quad (1)$$

式中： E_g 为重力势能； m 为锤芯质量； g 为重力加速度； H 为锤芯提升的高度。在控制系统的作用下，锤芯以近似自由落体的速度下降撞击桩顶，碰撞前锤芯的最大速度及动能为：

$$v_1 = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (3)$$

式中： v_1 为锤芯碰撞桩顶前的最大速度； E_d 为动能。锤芯与桩顶在碰撞时，由于有一部份机械能转化为热、光、声等其他形式的能量，能量有损耗。根据动量守恒定律，锤芯撞击桩顶前后的动量是相等的，即： $mv_1 = (m+M)v_2$ ，故

$$v_2 = \frac{m}{m+M}v_1 \quad (4)$$

又 $E_{dt} = \frac{1}{2}(m+M)v_2^2$ ，代入式(3)并化简得：

$$E_{dt} = \frac{1}{2}\left(\frac{m^2}{m+M}\right)v_1^2 \quad (5)$$

式中: v_2 为锤芯撞击桩顶后锤桩体系速度; M 为桩身的质量; E_{dt} 为锤桩体系获得的有效能量。则撞击前后的能量比值为:

$$\frac{E_{dt}}{E_d} = \frac{m}{m+M} \quad (6)$$

令: 桩身质量与锤芯质量的比值 $n=M/m$, 碰撞前后的能量转换率为 $\eta=E_{dt}/E_d$, 则碰撞后锤桩体系获得的有效能量及转换效率为:

$$\eta = \frac{1}{1+n} \quad (7)$$

式(7)就是打桩锤的锤芯锤击桩身后锤桩体系获得的有效能量转换率的理论计算公式。可以看出, 当锤芯质量等于桩身质量, 即 $n=1$ 时, 转换效率为 50%; 当锤芯质量为桩身质量的 $1/4$, 即 $n=4$ 时转换效率仅为 20%。这就是为什么在选锤时锤芯质量不应小于桩质量 $1/4$ 的原因。如锤芯质量为桩身质量的 4 倍时, 则效率高达 80%; 当锤芯质量远大于桩身质量, 即 $m \gg M$ 时, 锤击效率趋于 100%。静压桩机沉桩就属于锤芯质量远大于桩身质量、锤击行程趋于零的特殊工况。能量转换效率公式揭示了“重锤轻打”的内在机理。锤桩质量比能量转换效率曲线见图 1。

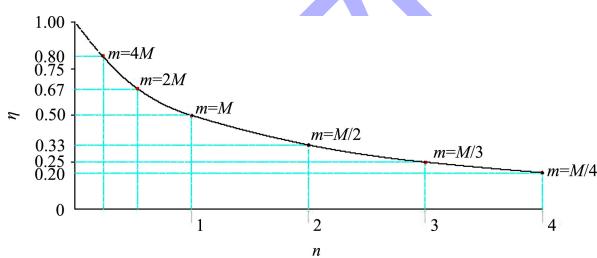


图 1 锤桩质量比能量转换效率曲线

3 选锤区间

3.1 最小锤击能量

从满足桩基极限承载力的要求分析, 所选桩锤的能量应大于克服沉桩过程最大阻力需要的最小能量, 也就是能量级别的下限, 所选桩锤的能量应大于在整个沉桩过程中可能出现的侧摩阻力+端阻力的最大值。选锤的问题实质上就是通过各种公式、图表、波动方程等, 估算出锤击沉桩过

程中桩身阻力的阈值, 所选桩锤的能量必须大于这个阈值才能确保桩身打设到设计高程, 并满足极限承载力的要求。

3.2 最大锤击能量

在相同的锤击能量下, 相较用轻锤高落距打桩, 用重锤低落距打桩在桩的贯入性能方面、保持桩顶完好方面均较好。重锤低落距打桩, 锤芯冲击桩顶时速度较小, 其锤击的有效能量较高, 因此打桩贯入性能好, 打桩时的锤击应力也随锤质量的增加反而减小, 特别是在施打混凝土桩时能有效保护桩顶完好。

3.2.1 柴油打桩锤

在选择筒式柴油锤打桩时, 可维持持续循环工作是依赖于锤击打桩过程中土层对桩身的阻力产生的反力, 如选锤质量过大、锤击贯入度过深, 锤芯的反弹高度将会不足, 无法维持柴油锤循环锤击的工作条件。所以在选用柴油锤时, 最大锤击能量不能超过控制值, 这是柴油锤选锤上限的一个重要约束条件。

3.2.2 液压打桩锤

由于液压打桩锤采用外部液压动力柜提供能源, 工作循环也是依靠电器系统控制进行, 理论上锤击能量可在零与标称能量之间连续可调, 为实现“重锤轻打”提供了便利的条件。上述锤击能量转换率曲线定量分析了锤桩质量比与锤击效率之间的关系, 是重锤轻打优势的内在机理。所以在选用液压锤时, 约束最大锤质量的条件已经不是桩锤的标称锤击能量了。液压打桩锤的上限可以取锤重力 \approx 桩基承载力, 此时的锤击行程趋于零, 这就是静压桩机的沉桩机理。因此, 约束液压锤选锤上限的条件已经转为桩机设备的起重能力及施工成本。

4 结语

1) 通过物理学的能量守恒及动量守恒定理, 推导出锤桩质量比与锤击能量转换效率之间的内

在联系,从理论上定量分析“重锤轻打”优势的本质就是锤击能量转换效率高低的问题。选锤的问题从传统的单一能量规格的确定扩展到一个选锤区间,简化了复杂的传统选锤方法。

2) 由于柴油锤维持其持续工作循环受限于地基反力,因此选锤时在满足所需最小能量的条件下,还受限于最大能量值。为了改善沉桩的贯入性能,选锤的上限可以按最小能量值,适当上调1、2档,以获得较好的锤击贯入性能。

3) 由于液压锤的锤击行程可调,因此选锤时在满足需要的最小能量条件下,桩锤重力上限可以小于或等于桩基的极限承载力。因此,在有条件的情况下宜选用较大规格的液压打桩锤。

4) 通过锤桩质量与锤击能量转换效率的分析,从机理上将动力打桩与静压沉桩联系起来,

实际上静压沉桩就是动力打桩中锤击行程趋于零的一个特例。从锤击效率曲线上可看出,静压桩机的能量转换效率最高,理论上可趋近于100%,沉桩时桩身应力也是最小的。

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程局有限公司. 港口工程施工手册. 下册 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015: 1078-1086.
- [2] 南京工学院等七所工科院校. 物理学. 上册 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1977.
- [3] 陆红, 王雪刚, 金文龙, 等. 碰撞力学原理在动力打桩过程分析中的应用 [J]. 中国港湾建设, 2019, 39(1): 11-14, 66.
- [4] 南京工学院, 西安交通大学. 理论力学(下册) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 113 页)

参考文献:

- [1] 黄志扬, 丁健, 刘红, 等. 南通港吕四港区进港航道试挖工程回淤监测研究 [J]. 水运工程, 2012(12): 218-224.
- [2] 魏日征. 杭州湾深水航道试挖回淤观测研究 [J]. 水运工程, 2002(10): 94-97, 110.
- [3] 孙平锋, 陈恩慈. 温州港大小门岛港区 30 万吨级航道试挖槽回淤分析 [J]. 水运工程, 2013(5): 100-105.

- [4] 李孟国, 麦苗, 李文丹, 等. 椒江口台州湾建港条件研究 [J]. 水道港口, 2015, 36(5): 369-377.
- [5] 杨辉, 谢钦春, 李伯根, 等. 港湾深槽骤淤的条件探讨 [J]. 海洋学报(中文版), 2005, 27(4): 95-101.
- [6] 黄世昌, 韩海骞, 赵鑫, 等. 浙东淤泥质潮流试挖槽台风骤淤观测分析 [J]. 泥沙研究, 2009(4): 25-30.

(本文编辑 王璁)

(上接第 156 页)

- [5] 李进, 金文良, 王强, 等. 复合地基条件下沉管隧道块石垫层振密试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2021, 41(1): 39-43.
- [6] 王芳, 梁邦炎, 尹春辉, 等. 抛石基床振动密实颗粒流数值模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(13): 175-179.
- [7] 何燕清, 黎浩然, 陈福全. 水下抛石基床高频振动致密

- 机制 [J]. 南昌大学学报(工科版), 2017, 39(04): 347-353, 379.
- [8] 李杨, 余成学, 焦小亮. 堆石料碾压试验的颗粒流模拟新方法 [J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3029-3038.
- [9] 王大群, 秦金桥. 基于颗粒流程序的土石混合料振动压实特性数值分析 [J]. 路基工程, 2020(5): 99-104.

(本文编辑 武亚庆)