



# 海利动力打桩公式参数取值试验研究

张 伟<sup>1</sup>, 刘梅梅<sup>2</sup>

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 以深圳港盐田港区西作业区集装箱码头为依托, 采用动测试验方法, 研究了土体恢复系数 ( $K$  值) 及海利公式中锤击能量的有效传递系数 ( $n$  值) 和桩土体系总的弹性变形 ( $C$  值) 的取值, 得到求解  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  和  $\phi 1\ 000\ \text{mm}$  桩基极限承载力的更便捷、准确的计算方法, 并利用海利公式确定终锤贯入度  $e$  值, 为打桩停锤提供控制标准。

**关键词:** 海利公式; 锤击能量有效转化系数; 锤击数; 终锤贯入度; 极限承载力

中图分类号: TU 473.1<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0137-05

## Parameter value of Heily formula for dynamic pile driving

ZHANG Wei<sup>1</sup>, LIU Mei-mei<sup>2</sup>

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** This paper studies the value of the recovery coefficient of soil ( $K$ ), the effective transfer coefficient of hammer energy ( $n$ ) and the total elastic deformation of the pile-soil system ( $C$ ) using dynamic measurement method based on the third phase container terminal of Yantian port. A method is obtained to calculate the ultimate bearing capacity of pile with  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  and  $\phi 1\ 000\ \text{mm}$  more conveniently and accurately and to determine the penetration ( $e$ ) of the final hammer.

**Keywords:** Heily formula; effective transfer coefficient of hammer energy; hammer number; penetration of the final hammer; ultimate bearing capacity

动力打桩公式中的海利 (Heily) 公式在西方国家被广泛应用, 但海利公式中有关参数的取值是一个复杂而又困难的问题。近年来, 由于 PDA 动力检测技术在锤击沉桩时的广泛应用, 利用 PDA 动测成果中的有关实测数据, 可以计算得到海利公式的有关参数。在盐田西作业区码头工程中, 共用柴油锤施打钢管桩 1 830 根。在锤击沉桩时对所有的基桩 100% 进行了 PDA 初打动测。并有约 25% 的基桩进行了复打 PDA 动测。根据动测得到的数据, 计算出海利公式中的参数  $n$  值 (锤击能量有效传递系数) 和  $C$  值 (桩土体系总的弹性变形), 以及由初、复打动测得到的极限承载力

求得土体恢复系数  $K$  值<sup>[1]</sup>。这样, 今后在类似地质条件下 (风化岩地基) 用柴油锤施打钢管桩时, 根据实测得到的终锤贯入度  $e$  值<sup>[2]</sup> 和每分钟的锤击数  $N$  值, 即可快捷方便地判断桩的极限承载力是否满足设计要求。也可以用  $n$  值、 $C$  值、 $K$  值利用海利公式确定满足设计承载力要求时的终锤贯入度  $e$  值, 为打桩提供控制标准。

### 1 工程概况

深圳港盐田港区西作业区集装箱码头位于深圳市盐田区大鹏湾, 码头属顺岸式, 高桩梁板式结构, 桩基由直径  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  或  $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 、厚

收稿日期: 2015-06-05

作者简介: 张伟 (1983—), 男, 硕士, 从事港口工程施工技术管理工作。

度  $\delta = 18 \text{ mm}$  的钢管桩构成, 共计 618 根。桩基纵向 5 列, 间距 7.5 m, 前后轨道梁下桩直径  $\phi 1100 \text{ mm}$ , 直桩和 6:1 的斜桩等间隔布置, 中间 3 列桩直径  $\phi 1000 \text{ mm}$ , 全部直桩。桩基横向排架间距 6.4 m, 一个标准段长 60.8 m。

根据施工阶段地质勘测报告, 本区域主要的岩土地质分布基本上可分为上、中、下 3 大层: 1) 上层为海相沉积层的淤泥和淤泥质黏土, 其中淤泥层分布较广而稳定, 深灰-灰色, 流塑-软塑状, 平均厚度约 5 m, 含水量  $> 60\%$ , 土质极软,  $[R] = 60 \text{ kPa}$ ; 淤泥质黏土层主要分布在淤泥层下, 厚度不足 2 m,  $N < 1$  击,  $[R] = 80 \text{ kPa}$ 。2) 中层为陆相冲积层的黏土、亚黏土和粗砾砂, 该层分布广且均匀成层性较好, 平均厚度约 7.4 m, 黏土层、灰黄色、可塑状, 厚度变化不大,  $N = 7$  击,  $[R] = 180 \text{ kPa}$ 。亚黏土层, 呈黄-黄褐色, 灰白色, 硬塑状, 中塑性, 底部为风化残积土,  $N = 11$  击,  $[R] = 220 \text{ kPa}$ 。3) 下层为基岩。岩土风化带描述如下: 强风化岩层分布广、厚度变化大,  $N = 50 \sim 100$  击, 底部  $N > 100$  击,  $[R] \geq 500 \sim 1000 \text{ kPa}$ ; 中等风化岩层裂隙发育, 厚度较薄; 微风化岩层, 矿物质基本未风化, 在不同深度普遍夹有破碎带。

## 2 沉桩施工情况

### 2.1 锤击沉桩

本工程先后采用 D100-13 锤和 D125-3 锤两种型号的柴油锤进行沉桩作业。沉桩时, 选用 50 mm 厚的钢板作为垫层, 并在垫层钢板与替打之间加垫钢丝绳, 用以传递锤击能量; 在岸边, 选一通视良好的地段架设一台水准仪, 对桩的自沉、压锤、施打进行全程监控; 记录沉桩时间、锤击数、桩尖深度、泥面和桩顶高程, 并测定每阵锤击平均贯入度和终锤高程。根据桩基不同的设计承载力, 中间排桩, 停锤贯入度控制在 3~5 mm, 前、后排桩打入强风化岩后, 停锤贯入度控制在 2~3 mm 的范围。当贯入度满足停锤要求时, 采用打桩分析仪 (简称 PDA) 进行动力检测, 以校核桩的承载力是否到达设计标准, 否则, 继续锤击至单桩的

承载力达标。

### 2.2 桩基高应变动力检测

高应变动力检测试桩已在工程沉桩中广泛应用, 取得了良好的效果, 也得到了工程界的普遍认同<sup>[3]</sup>。在本工程中, 当沉桩锤击贯入度达到预设值时, 在距桩顶 1.5 m 处, 对称安装两只传感器对基桩进行初打动力检测; 通过传感器得出桩在冲击作用下的力和加速度, 用 PDA 对相关的数据进行分析, 并应用 CASE 法和 CAPWAP 法得出打桩应力、锤击能量、初打土阻力、桩身完整性系数、打桩极限承载力、桩侧阻力、桩端阻力等要素。有了这些要素, 就可以确定基桩的承载力是否达到设计标准。

## 3 土体恢复系数 K 值

在沉桩时, 桩身在锤击震动作用下产生一种克服来自土体侧向压力的反作用力, 这种作用力破坏了桩身周围土体的稳固平衡, 迫使桩身周围的土体松散并背向桩身移动, 在桩身周围形成一定的空隙, 便于桩身下沉; 当锤击结束后, 在海水压力、波浪振动、淤泥回积等诸多因素的共同作用下, 土体本身和桩土体系间的空隙会不断地密实, 土体本身也得以重新稳固, 从而使桩的极限承载力得以增加。桩的极限承载力在土体重新稳固时的大小与沉桩结束时的大小的比值即是土体恢复系数 K 值; 那么, 通过同一根桩上高应变初打和复打测试资料的对比, 就可以得出相应的地质条件下单桩极限承载力的土体恢复系数。

盐田港区西作业区集装箱码头工程中, 共有 377 根基桩在初打动力检测结束后, 进行复打动力检测; 根据技术条件书的要求, 初、复打动力检测的时间间隔不得少于 24 h, 以保证桩土体系有一定的时间回复稳定。在实际施测中, 初打与复打的时间间隔最少为 1 d, 最长达 109 d。因此, 可以根据初复打时间间隔天数, 对复打、初打得到的单桩极限承载力的比值 K (即土体恢复系数) 进行列表统计, 结果见表 1。

表1 土体恢复系数(K值)统计结果

初复打间隔 时间/d	测试 桩数/根	恢复系数 K值范围	恢复系数 K的平均值	均方差
1	163	1.014 0 ~ 1.185 3	1.08	0.036
2	34	1.002 0 ~ 1.183 8	1.08	0.050
3	26	1.033 6 ~ 1.244 4	1.09	0.045
4	24	1.027 5 ~ 1.219 5	1.10	0.045
5	18	1.022 7 ~ 1.172 8	1.09	0.042
6~7	17	1.020 1 ~ 1.198 8	1.09	0.048
8~13	23	1.032 0 ~ 1.171 6	1.09	0.033
16~41	43	1.020 8 ~ 1.180 7	1.09	0.040
54~109	13	1.119 8 ~ 1.023 3	1.09	0.026

从表1可以看出,打桩过后土体恢复很快,仅3d的时间土体已基本恢复,说明上覆土层不深且以风化岩为持力层时,锤击沉桩对土体扰动较小。土体恢复系数K值较小,不论时间间隔长短,K值最大平均值为1.10,大部分情况下K取1.09较为合理。

#### 4 海利公式参数取值分析

动力打桩公式之一的海利公式是海利(Hiley, A) 1930年根据能量守恒原理和撞击定理提出的<sup>[4]</sup>。其推导过程根据锤芯在沉桩锤击过程为自由落锤这一特性,将锤击过程分为撞击前阶段、撞击后阶段、弹性恢复阶段、回弹阶段共4个阶段。对每个阶段的能量守恒、动量传递的过程加以分析得出的打桩公式。其基本表达式如下:

$$P_u = \xi W_r H \eta / (e + C/2) \quad (1)$$

式中:  $P_u$  为桩的极限承载力;  $W_r$  为锤的重力;  $H$  为锤击跳高,即锤的落距;  $\xi$  为锤击下落时的能量折减系数;  $\eta$  为锤击效率;  $e$  为终锤时贯入度;  $C$  为锤击时桩土体系总的弹性变形。

这一公式在国内外得到了广泛的应用。专家们结合工程实例,进行了不少有益的尝试,积累了丰富的经验。近年来,人们将海利公式与现代测试技术相结合,直接测得桩顶承受的锤击能量  $E_{\max}$ ,省去了原打桩公式中难以确定的参数(如锤击效率折减系数,桩帽、桩垫和锤垫的弹性变形值和撞击时的恢复系数等),得到了较简化的打桩公式:

$$P_u = E_{\max} / (e + C/2) \quad (2)$$

式中:  $E_{\max}$  为实测得到传递到桩身的能量;  $e$  为终锤时贯入度;  $C$  为桩土体系总的弹性变形。

此公式大大降低了人为确定参数带来的误差,提高了海利公式的可靠性,通过水准仪器实测得出的基桩每阵锤击下沉量和每阵锤击数,算出该阵的平均贯入度  $e$ ,则桩土体系总的弹性变形量  $C$  可以通过下式求出:

$$C = 2(E_{\max} / P_u - e) \quad (3)$$

#### 4.1 桩土体系总的弹性变形量C值的统计分析

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (4)$$

式中:  $C_1$  为桩身弹性变形,与桩的材料、桩径、桩长有关,本工程钢管桩的材料为BS-4360-50B,相当于国标Q345,壁厚为18mm,桩径有 $\phi 1200$ mm和 $\phi 1000$ mm两种,桩长差别不大,桩顶高程为3.0m,桩尖高程为-35.0m左右;  $C_2$  为锤垫和桩帽的弹性变形,本工程用同一个钢桩帽,锤垫为厚钢板下的钢丝绳垫;  $C_3$  为土体的弹性变形,本工程处于风化岩地基,桩尖均在强风化层内终孔。

因此分 $\phi 1200$ mm钢管桩(前、后排)和 $\phi 1000$ mm钢管桩(中间排)两种情况,根据PDA动测资料,计算C值,并进行统计分析。

1)  $\phi 1200$ mm钢管桩,统计样本540根,C值的变化范围为13.8~38.7mm分布见表2。

表2  $\phi 1200$ mm钢管桩C值分布

C值变化范围/mm	根数	占比例/%
$C \leq 20.0$	47	8.70
$20.0 < C \leq 30.0$	411	76.12
$30.0 < C$	82	15.18

$\phi 1200$ mm钢管桩C值平均值为25.53mm,且大部分分布在20~30mm。

2)  $\phi 1000$ mm钢管桩,统计样本127根,C值的变化范围为22.2~47.4mm,分布见表3。

表3  $\phi 1000$ mm钢管桩C值分布

C值变化范围/mm	根数	占比/%
$C \leq 30.0$	37	29.13
$30.0 < C \leq 40.0$	71	55.91
$40.0 < C$	19	14.96

φ1 000 mm 钢管桩 C 值平均值为 33.77 mm，一半以上分布在 30 ~ 40 mm。

由以上统计结果可知：1) 由于影响 C 值的因素很多，C 值的离散性较大；根据初打动测数据计算得到的 C 值，在锤垫相同、桩端终锤土层、桩长接近的情况下，桩径越小弹性变形量 C 越大。2) 对于 φ1 200 mm 的钢管桩，当沉桩条件为覆盖层不厚、桩尖在风化岩内终孔、单桩极限承载力在 10 000 ~ 12 000 kN 时，C 值可取 25 mm。3) 对于 φ1 000 mm 的钢管桩，当沉桩条件为覆盖层不厚、桩尖在风化岩内终孔、单桩极限承载力在 7 000 kN 时，C 值可取 35 mm。

#### 4.2 锤击能量有效传递系数 n 值的统计分析

JTJ 279—2001 《港口工程动力检测规程》第 3.5.10.2 规定<sup>[5]</sup> 桩锤效率应为桩锤传递给桩的能量与桩锤额定能量的比值。可表达为：

$$n = \frac{E_{\max}}{W_i H_{\max}} \quad (5)$$

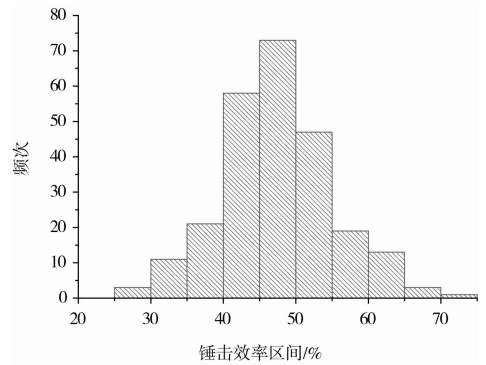
式中：n 为锤击能量的有效传递系数； $W_i H_{\max}$  为桩锤额定能量。

某一种型号的柴油锤，当油门在某一档位时，其额定能量是已知的（表 4）。

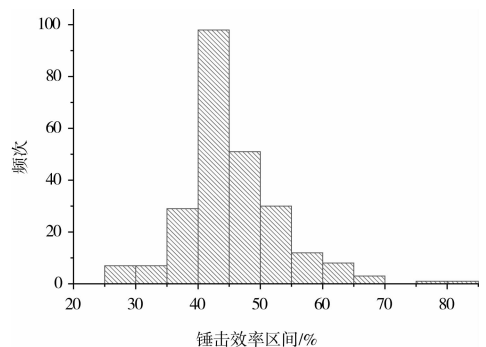
表 4 柴油锤额定能量

档位	能量/(kN·m)	
	D100-13	D125-3
1	213.86	250.20
2	257.65	304.41
3	299.20	371.13
4	333.54	417.00

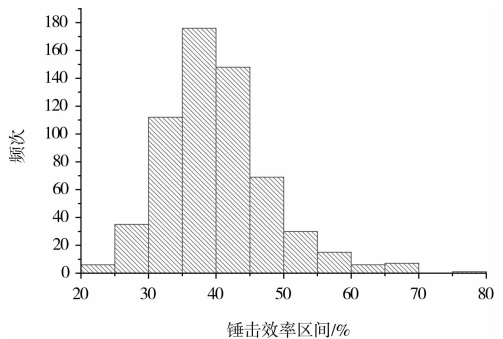
因此，根据 PDA 动测得到的  $E_{\max}$ ，即可求得不同型号的柴油锤施打不同直径的钢管桩时的 n 值。分别统计了 D100-13 锤施打 φ1 000 mm 钢管桩 249 次、D100-13 锤施打 φ1 200 mm 钢管桩 247 次、D125-3 锤施打 φ1 000 mm 钢管桩 605 次、D125-3 锤施打 φ1 200 mm 钢管桩 849 次的实测数据，计算 n 值。各种锤型施打的锤效率见图 1。从图中可以看出，锤效率分布有一定离散性，对于 D100-13 锤，锤效率 n 主要在 40% ~ 50%，而 D125-3 的锤效率 n 主要在 30% ~ 45%。



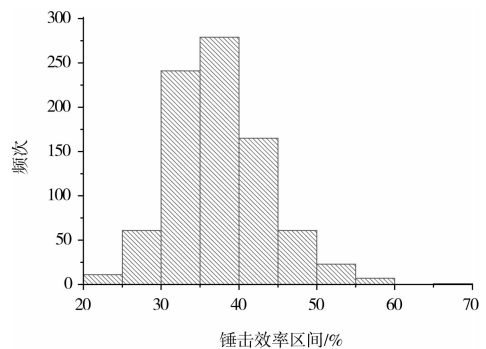
a) D100 锤 φ1 000 mm 桩



b) D100 锤 φ1 200 mm 桩



c) D120 锤 φ1 000 mm 桩



d) D120 锤 φ1 200 mm 桩

图 1 各种锤型施打锤效率

利用海利公式和有关参数可以在施工现场快捷地判断基桩承载力是否满足设计要求，方法如下：

- 1) 由测量人员报出每阵锤击时的平均贯入度  $e$ ;
- 2) 由柴油锤的资料得知各档位的额定能量  $W_i H_{\max}$ ;
- 3) 由  $E_{\max} = nW_i H_{\max}$  求得传递到桩身的能量;
- 4) 由  $P_u = E_{\max} / (e + C/2)$  求得初打时的承载力  $P_u$ ;
- 5) 由  $KP_u$  求得桩的极限承载力。由此方法在不进行动载测试时判断基桩的极限承载力是否符合要求比单纯用贯入度来控制停锤更可靠些。

## 5 结论

1) 提出了利用海利公式和有关参数方法现场判断基桩承载力的计算方法, 此方法更准确、方便地判断基桩承载力是否达标, 从而控制停锤。

2) 通过对 377 根桩进行初打、复打动测得到土体恢复系数取值, 统计分析  $K$  值取 1.09 更合适, 同时表明, 土体恢复很快, 锤击对土体扰动很小。

3) 分别对 540 根  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  和 127 根  $\phi 1\ 000\ \text{mm}$  的钢管桩进行  $C$  值统计分析, 得到  $C$  值变化范围,

为这两种直径桩的承载力计算提供了理论依据。

4) 海利公式中, 将锤击下降时的能量折减系数和锤击效率的乘积用锤击能量有效传递系数  $n$  表示, 通过对现有两种常用柴油锤打桩测试结果统计分析, 得到  $n$  值得取值范围, 并具有实际的参考意义。

## 参考文献:

- [1] 孟庆云. 打桩动力公式的探讨[J]. 铁道标准设计通讯, 1985(9): 13-23.
- [2] 王炳煌. 打桩公式和贯入度[J]. 水运工程, 1989(4): 1-8.
- [3] 肖花. 海洋桩基平台打桩动力分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.
- [4] Triantafyllidis T. 打长桩用的海利公式[J]. 龚丹丹, 译. 港工技术与工程, 2010(6): 38-43.
- [5] JTJ 279—2001 港口工程动力检测规程[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 130 页)

## 4 结语

1) 通航枢纽位于弯曲河段时, 受弯道水流和引航道建筑物的影响, 引航道口门区既受到弯道水流的制约, 又受到河床变宽产生的弯曲水流的影响, 特别是枢纽泄水闸开闸泄洪时, 引航道口门区的水流条件会变得复杂多变, 通航条件更加恶劣, 船舶无法安全过闸。

2) 依据河势走向和水流运动规律, 通过在引航道外侧的口门区附近设置挑流墩和采用实体与透空导航墙相结合的工程措施, 能够较好地调整水流流向、构建缓流水域, 极大地削弱弯曲河道中船闸下引航道口门区的斜向流和回流, 改善通航水流条件, 确保船舶安全过闸。

3) 本文提出的优化弯曲河道下引航道口门区通航水流条件的方法, 为山区河流在弯道上修建通航建筑物下引航道的通航水流条件难于满足要

求的问题提供了解决办法, 可为类似工程设计提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 重庆交通大学. 潇湘枢纽船闸改建工程整体水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [2] 唐仁杰, 胡旭跃, 戴玉婷. 弯曲河道水流的研究现状[J]. 水道港口, 2009, 30(2): 108-112.
- [3] 谭先泽, 郝岭, 吴文凤. 山区河流船闸引航道布置型式[J]. 水运工程, 2006(4): 69-72.
- [4] 彭伟. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件及改善措施研究[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2010.
- [5] 胡旭跃, 李彪, 徐立君. 水利枢纽通航水流条件研究综述[J]. 水运工程, 2005(11): 59-64.
- [6] 于广年. 改善周口船闸通航水流条件研究[J]. 中国水运: 下半月, 2012, 12(1): 156-158.

(本文编辑 郭雪珍)