

# 海外施工液压锤的选型与应用

张晓雨<sup>1</sup>, 李彬<sup>2</sup>, 张雨雷<sup>2</sup>

(1. 中国交通建设股份有限公司; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:** 当海外项目地质资料较少时, 更要科学合理地进行液压锤选型, 以便于海外项目规划。以巴布亚新几内亚莫尔兹比 Angabanga 桥项目为例, 利用标准贯入度  $N$  值与挤土效应系数关系计算桩基承载力, 并借助广泛应用的海利公式对液压锤选型进行基础研究。结果表明该液压锤选型方法合理, 工程应用情况良好, 有利于海外项目的降费增效。同时总结形成一套适用于打入式钢管桩锤击设备选型的方法, 可为类似海外工程提供借鉴。

**关键词:** 液压锤; 设备选型; 海利公式; 标准贯入度; 打入式钢管桩

国际工程普遍具有专业性强、计划性高的特点, 不同于国内项目人机料资源配置丰富, 选择性更为广泛。由于海外工程的特殊性导致了海外设备管理过程中增加了如机械运输、机械境外购买等环节, 充分利用既有设备材料, 科学编制施工技术看方案, 提前制定物资采购计划, 成为了当下关注的热点问题。

相较于传统的柴油锤, 液压锤由于有效能利用率高、打击力控制性能好、低碳环保的特点逐渐成为工程沉桩机械的首选, 国内对于液压锤的选型改造开展了研究, 陈机等<sup>[1]</sup>将 APE400型液压振动锤进行改造, 将 5 468 t 我国首创的大型 H 和 AZ 型组合钢板桩振沉至设计标高; 李胜等<sup>[2]</sup>通过优化钢管桩定位和钢护筒顶部结构施工方案等措施, 实现复杂地质条件下采用液压振动锤陆上打设大直径钢管桩; 余晓东<sup>[3]</sup>从岩石开挖、破碎及混凝土建筑物拆除的应用场景分析液压锤的选型、安装调试与使用, 为液压锤设备的管理提供了较为全面的认知; 李志辉<sup>[4]</sup>从能量转换率、低碳等方面对柴油锤和液压锤在跨海桥梁钻孔平台管桩施工的应用效果进行对比; 陈奋健<sup>[5]</sup>根据打桩记录、

高应变动力检测结果对风化岩地基下柴油锤和液压锤的使用效果进行分析; 林登等<sup>[6]</sup>依据动量守恒原理, 建立了各类锤型之间等效替换方法。以上虽然对于设备的选型有了一定的研究, 但是主要集中在为设备类型比选、设备使用管理的规范化, 对从桩基承载力的角度出发进行液压锤选择的研究较少, 更没有海外工程应用的研究。

本文在地质资料较少的情况下, 利用标准贯入度 SPT 结合中日的研究成果最终确定地基极限承载力, 同时借助海利公式对液压锤选型进行基础研究, 最后通过实际的验证表明该方法科学高效, 对液压锤的锤重、冲程选择具有指导意义, 对海外项目的顺利实施和效益提升意义重大, 可为提高海外施工液压锤设备管理水平提供借鉴。

## 1 工程概况

Angabanga 桥项目位于巴新首都莫尔兹比哈利塔诺高速公路沿线, 桥梁设计长度 160 m, 上部结构采用钢桁架+现浇桥面板式结构, 设计跨度为 27.5 m + 3 × 35 m + 27.5 m, 见图 1。桥梁承台下设埋置式钢管桩基础, 钢管桩设计直径 800 mm, 壁厚 9 mm, 桩间距 2.33 m, 最大设计桩长 44 m。

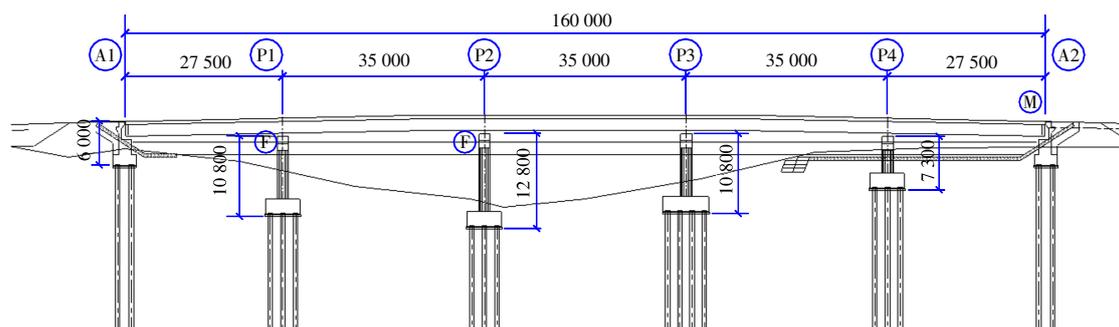


图 1 Angabanga 桥纵向断面结构示意图

结合工程设计文件及地勘资料,选择P4承台下钢管桩进行基础理论分析,结合中国《实用桩基工程手册》<sup>[7]</sup>及日本《道路桥示方书》<sup>[8]</sup>中有关标准贯入度 $N$ 值与土体系数关系,计算桩基侧摩阻力与端阻力,并应用海利公式反算动力打桩设备锤芯重量,进而为液压锤选型提供参考。

## 2 地质条件分析

### 2.1 地质条件概述

结合 Angabanga 桥项目地勘资料,对P4承台钻孔位置的各土层性质进行分析,各地质层表现形式主要为粉细砂、粉土、砂岩,土质分布较为均匀,各土层性质如表1所示。

表1 各地质层土体性质

桩深/m	土层性质	SPT中 $N$ 值
1~2	粉砂	6
3~5	粉土	8~11
7~13	砂质粉土	6~10
17~18	粉砂	8
18~39	粉土	16~23
42~43	砂岩(持力层)	>50

参照设计文件,P4承台下桩基设计长度为41.5 m,结合日本标准贯入度SPT中 $N$ 值分布,桩体进入持力层深度为2.145 m。

### 2.2 桩基阻力计算

根据《实用桩基工程手册》中开口钢管桩单桩竖向承载力计算方法中第二类,即管外侧阻力+端阻力,对桩基设计承载力进行核算。具体如下所示:

$$Q_u = \lambda_s U \sum q_{su} L_i + \lambda_p q_{pu} A_p$$

式中: $q_{su}$ 、 $q_{pu}$ 分别为桩周第 $i$ 层土极限侧阻和极限端阻; $L_i$ 为桩周第 $i$ 层土的厚度; $U$ 为钢管桩的厚度; $A_p$ 为桩端投影面积; $\lambda_s$ 为侧阻挤土效应系数,随桩径增大而减小,按照表2取值; $\lambda_p$ 为端阻挤土效应系数,随桩端进入持力层深度 $h_b$ 增加而增大,具体按照公式确定:

$$\text{当 } h_b/D < 5, \lambda_p = 0.16 \frac{h_b}{D} \lambda_s$$

$$\text{当 } h_b/D \geq 5, \lambda_p = 0.8 \lambda_s$$

表2 开口钢管桩桩侧挤土效应系数

$D/\text{mm}$	< 600	700	800	900
$\lambda_s$	1.0	0.93	0.87	0.82

参照规范要求,本工程为开口钢管桩,侧阻挤土效应系数取值为0.87;鉴于桩侧进入持力层厚度 $h_b = 2.145$  m,即 $h_b/D = 2.68$ ,则可推断桩端挤土效应系数为 $\lambda_p = 0.3732$ 。

结合《实用桩基工程手册》中有关粉砂持力层桩端阻力经验公式,选取极限桩端阻力值6 000 kPa;按照日本《道路桥示方书》标准贯入度 $N$ 值与土体极限侧摩阻力关系,即砂质土层: $q_{su} = N/5 \leq 98.07$  kPa(10 tf/m<sup>2</sup>),计算极限侧阻力。

综上所述,计算得出钢管桩极限侧阻力为336.5 kN,钢管桩极限端阻力为1 125.0 kN,确定该项目工程桩基为端承摩擦桩,极限承载力为1 461.5 kN。

## 3 海利公式应用

### 3.1 海利公式简介

动力打桩海利公式(Hiley Formula)应用较为普遍,条件允许情况下可免去桩基静载实验,有效降低项目实施成本,提高工程施工效率。参照英国土木工程师联合会发布的技术标准BS 8004:2015《Code of Practice for Foundations》<sup>[9]</sup>,利用海利公式计算桩基承载力可适用于砂土、砂砾、粉土等可渗透性地基或坚硬岩石基层,但严禁用于软弱黏土地基。可见,本工程地质条件满足海利公式应用标准。

海利公式应用机理来源于能量守恒原理和物体撞击理论,即桩锤锤击能量转换为桩基贯入土体有效功、桩周土体体系弹性变形能、桩身及锤垫变形能。公式表达如下:

$$R_u = \frac{Wh\eta g}{F \times (s + c/2)}$$

式中: $R_u$ 为桩基极限承载力,kN; $W$ 为锤芯重量,t; $F$ 为安全系数,参照规范一般取值为2~3; $g$ 为重力加速度,取10 N/kg; $h$ 为锤芯有效落距,mm,即有效系数 $K$ ×实际落距,有效系数 $K$ 取值0.9; $\eta$ 为锤击效率系数,代表撞击后的能量与冲压件的撞击能量之比。其中, $W > P_c$ 时,桩打入可穿透地面: $\eta = \frac{W + P_c^2}{W + P}$ ;  $W < P_c$ 时,桩打入可穿透地面: $\eta = \frac{W + P_c^2}{W + P} - \frac{W - P_c}{(W + P)^2}$ , $\eta$ 与 $e$ 和 $P/W$ 比值的关系见表3; $P$ 为桩身、锤架及桩垫合计重量,t; $e$ 为锤击恢复系数,取值参考表4; $s$ 为单次锤击贯入度,mm; $c$ 为桩身、土体及桩垫反弹模量,mm。

表3 锤击效率系数  $\eta$  取值参考表

$P/W$	$e = 0.50$	$e = 0.40$	$e = 0.32$	$e = 0.25$	$e = 0.00$
0.5	0.75	0.72	0.70	0.69	0.67
1.0	0.63	0.58	0.55	0.53	0.50
1.5	0.55	0.50	0.46	0.44	0.40
2.0	0.50	0.44	0.40	0.37	0.33
2.5	0.45	0.40	0.36	0.33	0.28
3.0	0.42	0.36	0.33	0.30	0.25
4.0	0.36	0.31	0.28	0.25	0.20
5.0	0.31	0.27	0.25	0.21	0.16
6.0	0.27	0.24	0.23	0.19	0.14

表4 锤击恢复系数取值参考

锤击种类	锤击条件	系数取值
双动锤打桩	无打入桩帽的钢桩	0.5
	无替打的钢筋混凝土桩	0.5
	桩顶有保护且用短导向架的钢筋混凝土桩	0.4
	有替打且保护的木桩	0.4
单作用落锤打桩	无替打的钢筋混凝土桩	0.4
	但在桩顶进行保护时, 钢桩或现浇钢管桩	0.32
	配有传动盖和短导向架, 用钢板覆盖, 带替打的钢筋混凝土桩	0.25
	还有保护, 导向架状况良好, 木桩状况良好	0.25
	还有保护, 导向架状况良好, 木桩状况不佳	0

$$c = C_c + C_p + C_q$$

式中:  $C_c$  为锤垫反弹量, mm, 取值参考表 5;  $C_p$  为钢管桩桩身反弹量, mm, 取值参考表 5;  $C_q$  为土体反弹量, mm, 取值参考表 5;  $A$  为钢管桩投影面积,  $\text{mm}^2$ ;  $a$  为钢管桩截面积,  $\text{mm}^2$ ; 如果采用组合的措施, 反弹压缩量应进行叠加。

表5 临时反弹压缩量 mm

反弹压缩形式	材料	较易打入条件	一般打入条件	较难打入	非常难打入
桩顶和锤垫反弹压缩量 $C_c$	木桩桩顶	1.3	2.5	3.8	5
	短导向的替打或者桩垫	1.3	2.5	3.8	5
	替打或桩垫以下 75 mm 包裹	1.8	3.8	5.6	7.6
	钢筋混凝土桩头上铺设 25 mm 的垫层	2.0	1.3	1.8	2.5
桩身反弹压缩量 $C_p$	木桩 ( $E = 10 \text{ kN/mm}^2$ )	0.33L	0.67L	1.0L	1.3L
	预制混凝土桩 ( $E = 14 \text{ kN/mm}^2$ )	0.25L	0.5L	0.75L	1.0L
	钢桩 ( $E = 205 \text{ kN/mm}^2$ )	0.25L	0.5L	0.75L	1.0L
土体反弹压缩量 $C_q$	桩周及桩底的土体	1.3	1.3~2.5	3.8~6.4	1.3~3.8

### 3.2 锤芯重量计算

鉴于打桩锤选型研究阶段已选定部分厂家提供锤型参数, 初步以永安机械公司提供的 YC-15 型单动式液压打桩锤为例, 核算锤芯重量是否满足工程设计标准。锤体各项参数如表 6 所示。

表6 预选液压打桩锤主要参数

主要参数	数值
锤芯最大行程/mm	1 500
锤芯最小行程/mm	200
锤芯部分重量/t	15
锤架及桩帽/垫重量/t	8
锤体尺寸(长 × 高 × 宽)/mm	9 090 × 1 370 × 1 160
最大冲击能量/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	225
冲击频率/(次 · $\text{min}^{-1}$ )	30 或 90

结合海利公式应用机理, 参照《Code of Practice for Foundations》理论研究及工程施工规范《Specification for Road and Bridge Works》, 分别对公式中各项系数进行查询或分析计算, 得出结果如表 7 所示。

表7 应用海利公式参数取值

主要参数	数值	备注
桩基极限阻力 $R_u/\text{kN}$	1 462	等于极限阻力
锤芯落距/mm	1 350	$K$ 取值为 0.9
桩基承载力安全系数 $F$	2.5	规范取值
锤击效率系数 $\eta$	0.63	规范取值
停锤贯入度 $s/\text{mm}$	15	规范: 最后 10 击平均值
锤垫反弹量 $C_c/\text{mm}$	0	规范: $R_u/A$ 值查表
桩身反弹量 $C_p/\text{mm}$	31.1	规范: $0.75L/1\ 000$
土体反弹量 $C_q/\text{mm}$	1.5	规范: $R_u/a$ 值查表

注: 土体反弹量  $C_q$  与  $R_u/A$  的比值呈线性关系, 两者关系式为  $C_q = 4 R_u / A + 0.7$ 。

经过综合分析计算得出, 锤击沉桩所需锤芯重量  $W$  为 13.7 t, 永安机械公司提供的 YC-15 型单动式液压打桩锤锤芯重量为 15 t, 满足工程实施标准。

## 4 液压振动锤安装使用注意事项

### 4.1 准备工作

液压振动锤安装前需要熟悉和准备相关的技术资料, 液压锤及管路的安装照图施工, 同时对于过滤装置必须重视, 如果液压锤使用频率较高, 必须加装液压锤管路的回油滤清器。安装时, 还需对液压锤上腔与蓄能器的氮气压力进行检查与调整。

调整液压锤管路上的安全阀设定压力值与系统匹配,开机后,对系统进行充分预热,使液压油温度达到 60℃左右,使用过工程及使用完成后,应依据使用和维修手册,结合设备厂商技术人员的建议和熟练操作员的经验制定液压锤的保养、维修计划。应结合海外国家实际情况制定维修保养配件的增补计划,对于易损构件,充分考虑工程量及物流运输状况,可以考虑提前采购或者当地提前寻找替代品,以免影响液压锤的正常作业。

#### 4.2 使用过程中注意事项

液压锤工作期间,操作人员应注意以下 3 点:

##### 1) 软管剧烈振动时应停止作业

当发现液压锤高压及低压软管振动过于剧烈应立即停止作业,同时检查软管接头处是否渗油、液压锤钢钎是否有余量,排除上述问题后,仍未解决应找技术人员进行更细致的维修检查。

##### 2) 应在例行的引擎转速下作业

液压锤进行沉桩作业时,引擎转速应符合规定的定值。超过作业需要的引擎转速并不会增加打击力,但会使油温升高而导致设备损坏。

##### 3) 严禁在水中或水下作业

严禁在水中或水下采用液压锤进行沉桩作业,否则活塞或类似部件可能会生锈而导致其永久性损坏。如需在水中或水下作业,应订购水下型液压锤。

#### 5 工程应用

由于项目初期设计未提供桩基设计承载力(桩基极限阻力),依据工程实施经验,原计划采用荷兰 S280 双动式液压打桩锤进行本工程桩基施工,锤芯重量 13.6 t,锤芯落距 1.2 m,但单套设备价格高达 1 800 万元人民币,实施成本较高,同时根据文中计算可知选用该锤具有一定的风险。

本次研究通过日本《道路桥示方书》中标准贯入度  $N$  值与土体参数关系,确定桩基设计承载力取值,并通过海利公式完成桩锤选型。所用永安机械公司的 YC-15 型单动式液压打桩锤价格仅为 150 万元人民币,且单动式设备具有操作简单、便于维修的特性,极大地节省了实施成本。

结合项目桩基实际施打情况,在 YC-15 型单动式液压打桩锤最大落距条件下,均成功将本工程桩基打设至设计标高,进而通过海利公式再反算桩基极限承载力,均达到设计标准值,满足了工程建设要求。通过本研究的应用,提前筹划物资采购,对海外项目液压锤选型产生极大助益。

#### 6 结语

本文对海外工程项目液压锤的选型与应用进行了研究通过海利公式从能量守恒的角度验证液压锤的贯入能力,并为锤重和冲程的匹配提供指导。总结出了一套适用于打入式钢管桩锤击设备选型的方法,可为类似工程液压锤选型提供了参考经验,具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈机,宋俊强,王文兴,等.曹妃甸煤码头起步工程钢板桩沉桩振动设备的选型与改造[J].中国港湾建设,2008,28(4):46-49.
- [2] 李胜,周维,徐立强.复杂地质条件下液压振动锤陆上打设大直径钢管桩[J].中国港湾建设,2015,35(9):54-57,66.
- [3] 余晓东.对液压锤的选型、安装调试与使用[J].四川水力发电,2016,35(5):39-42.
- [4] 李志辉.深水有覆盖层条件下打桩锤的选型与应用[J].铁道建筑技术,2019(9):98-101.
- [5] 陈奋健.柴油锤和液压锤在风化岩地基施打钢管桩的分析[J].中国港湾建设,2004,24(3):5-10.
- [6] 林登,陆红,张剑,等.液压打桩锤与柴油打桩锤互换比选及工程应用[J].建筑机械,2021(5):41-43,47.
- [7] 吴佩栋.实用桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [8] 日本道路协会.道路桥示方书·同解说[M].东京:丸善株式会社,2012.
- [9] BS 8004:2015, Code of Practice for Foundations[S].