



克里比深水港工程钢管桩桩端结构选型

王 新, 邱青长, 尹培林

(中交四航工程研究院有限公司, 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 针对克里比深水港工程码头后方轨道梁部分钢管桩无法沉桩至设计桩端持力层, 承载力无法满足设计要求这一工程难题, 提出通过优化桩端结构来提高钢管桩在硬黏土层中的承载力。对 3 种桩端结构进行了现场试验, 并通过贯入度观测、打桩监控、高应变动力测试和静载试验等方法, 分析了开口、半闭口和闭口钢管桩在硬黏土层中的贯入度、桩身应力和极限承载力的变化情况。基于现场试验结果, 最终选定闭口桩端结构作为本项目的优化方案。

关键词: 克里比深水港; 钢管桩; 桩端结构; 承载力

中图分类号: TU 473.13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0178-05

Selection of pile tip of steel tubular pile in Kribi deep sea port engineering

WANG Xin, QIU Qing-chang, YIN Pei-lin

(CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation,
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Some steel tubular piles located at the rear crane rail of Kribi deep sea port can not be driven into the design bearing layer, and the ultimately bearing capacity of them can't meet the design requirements. So we propose a method of optimizing the pile tip, aiming to improve the ultimately bearing capacity of steel tubular pile driven in stiff clay layer. We also carry out a trial piling of three types of pile tip including open-end, semi-closed and closed on the sit and analyze the set, driving stress and bearing capacity according to the survey of set, driving monitoring, high strain dynamic test and the axial compression static test. Finally, the type of closed pile tip is recommended on the basis of the test results.

Keywords: Kribi deep sea port; steel tubular pile; pile tip; bearing capacity

克里比深水港项目位于非洲西海岸大西洋几内亚湾, 距离喀麦隆南部省克里比市约 30 km。该项目采用重力式沉箱结构, 泊位总长度 677.07 m, 共布置 3 条门机轨道, 其中前轨与中轨位于沉箱上, 后轨位于沉箱后方, 采用钢管桩基础。

钢管桩外径 800 mm, 壁厚 16 mm, 设计桩长 14.6~17.6 m。原设计采用开口桩端结构, 以中风化混合岩为持力层。试桩前的补充勘察结果显示后轨所在区域中风化岩埋深变化很大, 致使部分钢管桩以现有桩长仅能沉桩至硬黏土层。

桩端持力层的变化, 将会造成钢管桩承载力无法达到设计要求。解决这一施工难题最直接的方法就是接长钢管桩, 但目前喀麦隆地区还不具备钢管桩制作和焊接能力, 如果采用接桩方案, 钢管桩需在国内制作加工后再运至现场, 但往返海运时间将达数月之久, 会严重拖延工期、增加施工成本, 因此该方案不具备现场实施条件。

通过探明硬黏土层的分布范围, 分析其物理、力学特性并结合现场施工条件, 确定采用优化桩

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 王新 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事地基基础试验检测工作。

端结构的方法来提高钢管桩在硬黏土层中的承载力^[1-2]。先阐述了 3 种桩端结构的特点, 再对 3 种桩端结构钢管桩的沉桩情况进行了分析, 最后利用高应变动力测试和静载试验验证所选桩端结构的适用性。

1 地质条件

沉桩区域从上自下主要分布有填土层、细砂层、粉质黏土层、黏土层、硬黏土层、强风化混合岩和中风化混合岩层。图 1 给出了试桩位置的钻孔剖面, 并标明了各土层的分布位置、厚度和标准贯入试验击数。表 1 列出了主要土层的物理和力学参数值。

根据现有钢管桩桩长, 沉桩至设计高程时桩端将位于硬黏土层④₂中, 标贯和室内试验结果表明, 该土层平均标贯击数大于 80 击, 强度和变形参数均较高, 可作为桩端持力层。

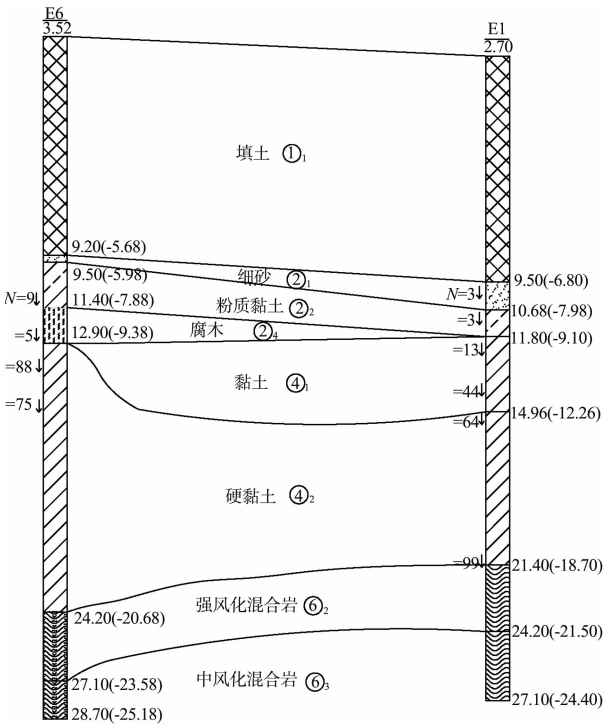


图 1 试桩位置地质剖面 (单位: m)

表 1 主要土层物理和力学参数

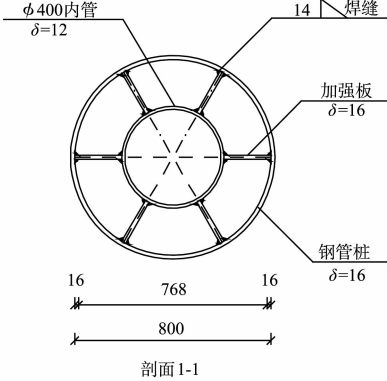
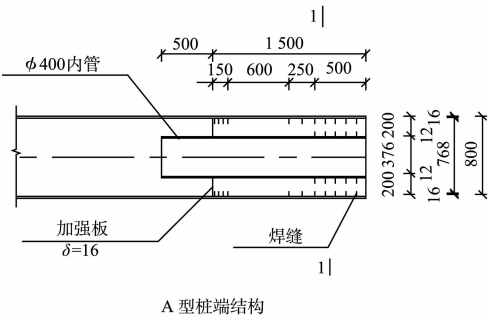
编号	土类	含水率 $\omega/\%$	比重 G_s	密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比 e	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性 指数 I_p	液限 指数 I_L	直剪试验 q		固结快剪 C_q		压缩模量 E_s/MPa
										粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
② ₁	细砂			1.90										
② ₂	粉质黏土	46.1	2.73	1.76	1.283	52.1	31.5	20.7	0.68	26.4	12.3			
④ ₁	黏土	24.3	2.73	1.92	0.762	43.1	26.1	17.0	0.09	57.1	22.2	43.4	23.5	17
④ ₂	硬黏土	20.1	2.73	1.92	0.709	40.4	24.8	15.7	0.05	59.4	24.5	47.5	24.7	25

2 桩端结构方案

原设计为开口桩端结构, 见图 2a), 端部设置 $\phi 400\text{ mm}$ 内管和 6 块 16 mm 厚的加强板。在此基础上提出了两种改进型的桩端结构, 见图 2b)、2c)。

B 型是在原开口桩端基础上用 20 mm 钢板封

堵 3 孔后所形成的半闭口结构, C 型为全闭口结构, 为提高其贯入能力, 在桩端设置了十字型桩靴, 同时为防止锤击沉桩引起端部结构破坏, 在桩端下部 4 m 范围内灌注了微膨胀性混凝土, 用以保护桩端结构^[3-4]。



a) A型结构(原设计方案)

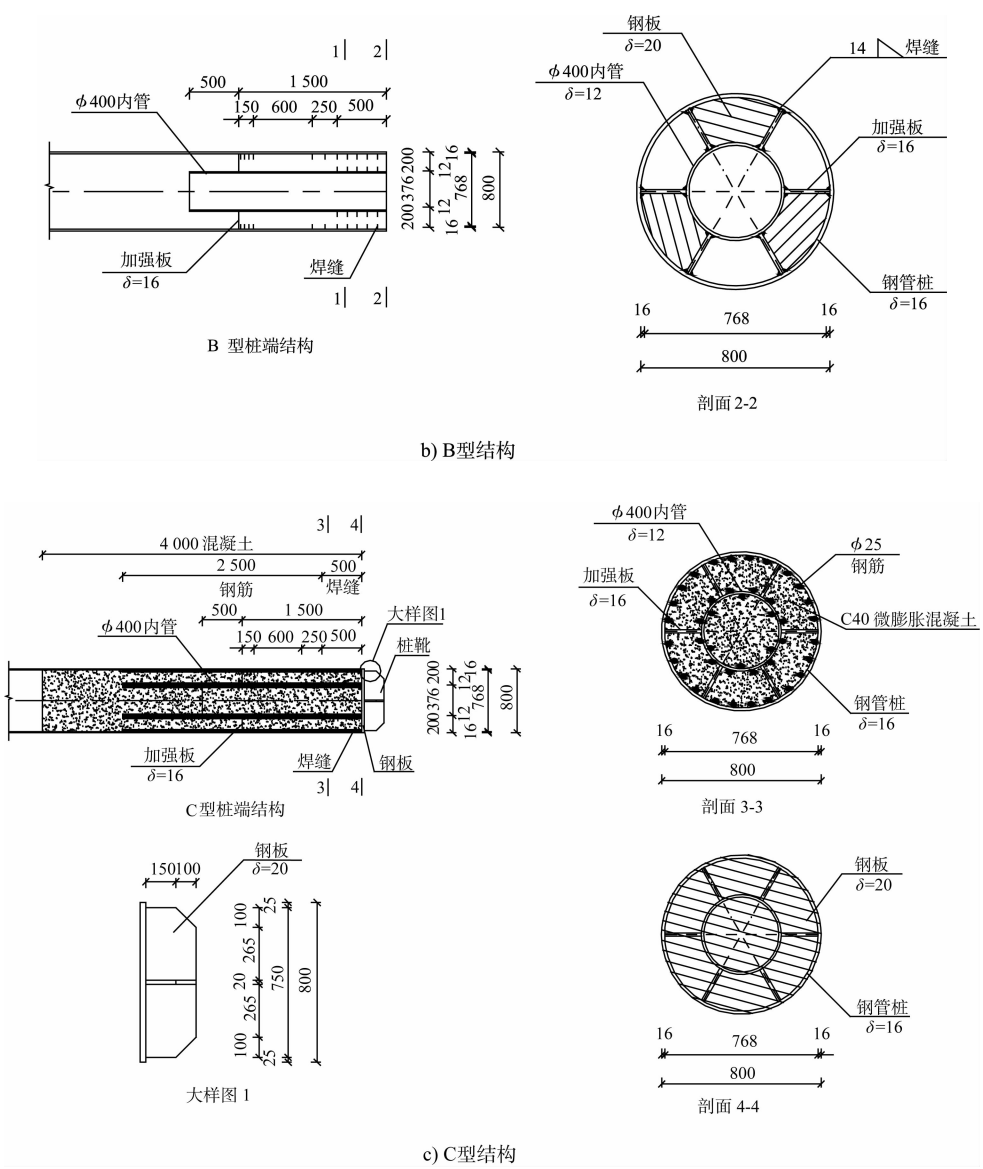


图 2 桩端结构形式 (单位: mm)

3 沉桩控制标准

对应上述 3 种桩端结构, 依次选择 SP101 (A 型)、SP102 (B 型) 和 SP107 (C 型) 共 3 根钢管桩进行沉桩试验, 对比分析 3 种桩端结构在硬黏土层中的适用性。试桩对应的桩端结构及试桩控制标准见表 2。

表 2 试桩控制标准				
桩顶 高程/m	桩底 高程/m	极限 承载力/kN	收锤标准/ (mm·b ⁻¹)	屈服 强度/MPa
1.60	-16.0	8 000	4	345

沉桩施工以贯入度控制为主, 并辅以高程控制。设计收锤标准为最后 3 阵 (10 击为 1 阵) 的平均贯入度不大于 4 mm/b, 同时要求单桩竖向抗压极限承载力不小于 8 000 kN。

为防止锤击作用引起桩身屈服破坏, 依据锤击沉桩相关规范要求, 桩身应力按式(1)控制^[5]:

$$\sigma_{ed} = \frac{\sigma_e}{\gamma_a} \tag{1}$$

式中: σ_{ed} 为桩身应力控制标准值 (MPa); σ_e 为屈服应力 (MPa); γ_a 为系数, 一般可取 1.25。由式(1)计算得试桩桩身应力控制值为 276 MPa。

4 沉桩施工与监测

4.1 沉桩施工

钢管桩施工采用液压振动锤和液压打桩锤组合方式进行。打桩前先将桩架调平、对中, 将钢管桩插入打桩架导向孔中, 利用桩架上的调向螺杆将桩身调直, 再用 ICE32B 型液压振动锤将钢管桩插入回填砂层中, 待桩身稳定后改用 CG240 型液压锤锤击沉桩。本项目采用的先振动插桩后锤击沉桩的方法有效控制了桩身施工的垂直度、提高了桩基施工质量。

4.2 试桩监测

为分析 3 种桩端结构的适用性, 沉桩过程中及施工完成后进行了一系列的监测和检测试验:

- 1) 贯入度观测。测试 3 根试桩在进入硬黏土层后的贯入度变化过程和停锤时的贯入度。
- 2) 打桩监控。分析 3 根试桩在沉桩过程中的最大桩身应力和桩端压应力。
- 3) 高应变动力测试。沉桩完成后间隔 14 d 进行高应变复打测试, 检测 3 根试桩的竖向抗压极限承载力。
- 4) 单桩竖向抗压静载试验。对选定桩端结构进行单桩竖向抗压静载试验, 验证所选结构的适用性。

5 试桩结果

5.1 贯入度变化过程

根据规范要求, 在锤击沉桩时记录桩身每贯入 25 cm 的锤击数 (贯入度)。为分析不同桩端结构钢管桩的贯入度变化情况, 图 3 给出了 3 根试桩在硬黏土层中的贯入度变化过程线。

图 3 显示, 随着桩端进入持力层深度的增加曲线呈阶梯状变化, 且超过某一深度时贯入度将会明显降低。SP101 和 SP102 钢管桩均能够顺利沉桩至设计高程, 两者停锤时的贯入度分别为 8、6 mm, 在同一深度 SP102 较 SP101 的贯入度有所减小, 但仍超控制标准。SP107 为全闭口桩端结构, 其贯

入度较 A 型和 B 型有明显减小, 沉桩至 -14.21 m 高程时平均贯入度已降至 2 mm, 此时该桩进入持力层的深度已超 2 m, 满足施工规范要求。

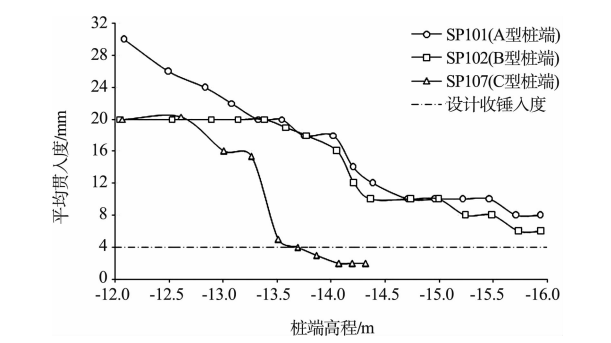


图 3 3 种桩端结构在硬黏土层中的贯入度变化过程线

从开口到闭口桩端结构, 钢管桩在硬黏土层中的贯入度依次减小, 沉桩阻力逐渐增加, 说明闭口桩端结构有利于提高桩端阻力, 且该结构形式能够满足规范对桩端进入持力层深度的要求。

5.2 打桩监控

主要目的是监测 3 根试桩在锤击作用下的桩身应力, 包括桩身最大压应力、最大拉应力和桩端压应力。监测结果见表 3。

桩号	应力/MPa		
	桩身最大压应力	桩身最大拉应力	桩端压应力
SP101	201.4	36.9	143.4
SP102	190.4	20.3	207.2
SP107	239.5	30.4	212.2

表 3 监测结果显示, 3 种桩端结构钢管桩的桩身和桩端应力均在控制范围内, 说明锤击不会引起桩身或桩端破坏。从开口, 半闭口到全闭口结构, 桩端压应力逐渐增大, A 型结构桩端压应力仅为 143.4 MPa, 封堵 3 孔后迅速增加至 207.2 MPa, 增加量明显, C 型桩端压应力为 212.2 MPa, 相比 B 型结构增加量较小, 表明在端部灌注混凝土能够有效保护闭口桩端结构。

5.3 高应变动力测试

对 3 根试桩进行了高应变复打测试, 并用

CAPWAP 曲线拟合法进行了分析^[6-8]，所得结果列于表 4。

表 4 高应变动测拟合结果

桩号	极限承载力/kN	侧摩阻力/kN	端阻力/kN	拟合桩顶沉降量/mm
SP101	6 406.2	2 366.4	4 039.8	25.4
SP102	7 357.2	2 387.9	4 969.3	30.6
SP107	8 035.2	2 773.4	5 261.8	32.0

表 4 列出了 3 种桩端结构钢管桩的极限承载力、桩侧摩阻力、端承力和拟合桩顶沉降量。从动测结果可以看出：3 根试桩的侧摩阻力基本相当，极限承载力的增加主要由桩端阻力提供。SP102 桩的极限承载力较 SP101 有明显提高，但仍低于设计值，而采用闭口桩端的 SP107 桩，其动测极限承载力能够满足设计要求。

5.4 单桩竖向抗压静载试验

为进一步检验闭口桩端结构钢管桩的承载力性能，对 SP107 钢管桩进行了竖向抗压静载试验。试验按照慢速维持荷载法进行，最大试验荷载为 8 000 kN，共分 10 级加载。对 SP107 钢管桩进行动静试验对比分析，结果见图 4。

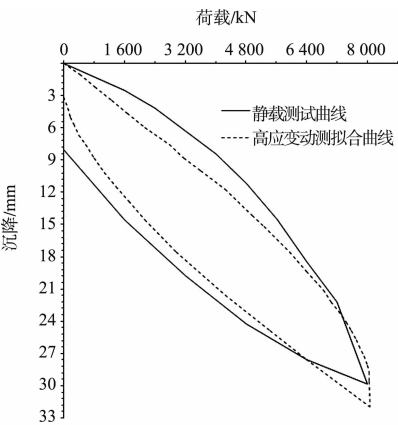


图 4 SP107 静载测试曲线与高应变动测拟合曲线

图 4 显示，两组荷载-沉降关系曲线的加载和卸载变化过程均基本一致，因静载试验未能测至钢管桩极限承载力，测试桩顶沉降量较拟合值小约 2 mm。静载试验证实了高应变动测结果的准确性，进一步确认了 SP107 钢管桩的竖向抗压承载力能够满足设计要求，验证了在硬黏土层分布较

厚区域采用闭口桩端结构提高单桩极限承载力的方法是可行性。基于上述分析可知，闭口桩端结构可作为本项目的优化方案，供后续钢管桩使用。

6 结论

针对海外项目遇到的实际问题，在既无法重新采购又不具备接桩条件的基础上提出了通过优化桩端结构形式来提高单桩极限承载力的方法，并进行了现场沉桩试验，得出以下结论：

- 1) 优化桩端结构能显著提高钢管桩承载力，半闭口和闭口钢管桩抗压极限承载力分别较原方案提高 14.8% 和 25.4%，在硬黏土层分布较厚区域，可选用闭口桩端结构来提高钢管桩的竖向抗压极限承载力。
- 2) 设计闭口钢管桩时，需配有桩端保护措施，避免因锤击作用造成桩端结构的破坏。
- 3) 采用高应变动测技术能够快速验证桩基优化方案的可行性，且测试结果与静载试验有很好的相关性，对后续采用闭口桩端结构的钢管桩可采用动测法检验其承载力是否满足设计要求。

参考文献：

[1] 曾锡庭. 提高大直径钢管桩承载力的几项措施[J]. 中国港湾建设, 1981(1): 8-15.

[2] 胡利文, 贾德庆, 傅洁馨, 等. 开口钢管桩承载力影响因素[J]. 水运工程, 2005(9): 17-22.

[3] 刘艳亭, 赵娟. 新型钢管桩桩尖在天津港高桩码头的应
用[J]. 港工技术, 2013(3): 20-22.

[4] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].

[5] Fascicule 62 title V, Foundations Calculations Rules for Civil Engineering[S]. France, 1993.

[6] 陈建容, 高飞. 现代桩基工程试验与检测[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.

[7] JTG 249—2001 港口工程桩基动力检测规程[S].

[8] Likins G E, Rausche F, Goble G G. High strain dynamic pile testing, equipment and practice[C] //Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles. St. Paul: CRC Press, 2000: 327-333.

(本文编辑 武亚庆)