



软土地基大直径超长钢管桩试验研究

张华章¹, 冯光华², 石 龙³, 韩林洪³

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 中交第四航务工程局第一工程有限公司, 广东 广州 510310)

摘要: 通过对海南洋浦港软土地基中桩长 74 m、桩径 1.5 m 的大直径超长钢管桩的高应变全程动测、压桩试验、拔桩试验和桩身轴力测试, 探讨深厚入土地基层中大直径超长钢管桩工程性状和压桩及拔桩土侧阻力的分布规律, 得出如下结论: 1) 同一土层侧阻力随着入土深度的增加而递增, 一定深度后, 其增幅减缓, 趋向稳定; 2) 深厚软土地基中, 大直径超长钢管桩拔桩和压桩侧阻力的比值为 56.9% ~ 75.0%; 3) 只有桩端位移达到 1.1% ~ 1.3% 桩径时候, 软土地基大直径超长钢管桩能充分发挥桩端土阻力, 此时端阻力值约为承载力的 19%。这对软土地基中的超长大直径超长钢管桩的理论研究和工程应用具有指导作用。

关键词: 大直径超长钢管桩; 侧阻力; 软土地基; 承载力特性

中图分类号: U 655.54⁺4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0159-06

Experimental research on large-diameter and super-long steel tube piles in deep soft soil foundation

ZHANG Hua-zhang¹, FENG Guang-hua², SHI Long³, HAN Lin-hong³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

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

3. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

Abstract: The 74 m-long and 1.5 m-diameter steel tube piles are driven into Yangpu harbor of Hainan province. According to the whole-process PDA test, pile pressing test, pile pulling test and axial force test, we discuss the distributing law of shaft friction on compressive and tensile load of large diameter and super-long steel tube piles in deep clay area and draw the conclusions as follows. Firstly, along with the increase of penetration, the shaft friction of the same soil increase, but after reaching certain depth of the penetration, its amplification reduces and becomes steady. Secondly, the shaft friction of large diameter and super-long steel tube piles under compressive load is 56.9% ~ 75.0% of its under tensile load. Thirdly, only when the displacement of pile top reaches 1.1% ~ 1.3% of its diameter, tip resistance of large diameter and super-long steel tube piles can be fully functional, and it is about 19% of carrying capacity. Furthermore, the distributing law of shaft friction on compressive and tensile load in deep clay area is discussed can give instruction to the bearing capacity of large diameter and super-long steel tube piles for theoretical research and engineering practice.

Keywords: large-diameter and super-long steel tube piles; shaft friction; soft soil foundation; capacity characteristics

钢管桩具有耐打、承载力高、桩长调节方便及穿透能力强的特点, 在码头工程中的应用越来越广泛。针对钢管桩承载力特性, 国内外进行了大量研究^[1-4], 而对于软土地基的超长大直径钢管

桩的承载力特性的研究, 目前鲜有报道。现有规范^[5-6]只是推荐了混凝土预制桩、泥浆护壁(冲)孔桩、干作业钻孔桩的侧阻力标准值, 而没有推荐钢管桩的侧阻力值。同时, 对于钢管桩压桩和

收稿日期: 2014-06-03

作者简介: 张华章(1980—), 男, 工程师, 从事港工设计及管理工作。

拔桩状态下侧阻力的差异性，也无相应的规范可用。

1 工程概况

工程位于海南经济开发区神头港区，建有 1 个

30 万吨级油品装卸泊位和 1 个 5 万吨级油品装卸泊位。码头吞吐量为 2 160 万 t/a，其中原油 2 000 万 t/a，成品油 160 万 t/a。试桩区域自上而下主要有淤泥混砂、松散粗砂、硬塑黏土等。各土层的平均厚度、物理指标及设计参数见表 1。

表 1 地基土物理力学性质指标

| 地层 | 土层名称 | 本层厚度/m | 层顶高程/m | 标贯击数 | 凝聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 重力密度 $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 空隙比 e | 含水率/% |
|----|---------|--------|--------|------|--------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------|-------|
| ① | 淤泥混砂层 | 2.8 | -23.70 | 2.0 | 10.2 | 7 | 19.0 | 1.529 | 65.1 |
| ② | 松散粗砂层 | 0.7 | -26.50 | 25.8 | | 25 | 21.8 | 0.765 | 25.4 |
| ③ | 硬塑黏土层 | 8.5 | -27.20 | 13.8 | 33.0 | 17 | 19.7 | 0.963 | 30.2 |
| ④ | 硬塑黏土混砂层 | 7.1 | -35.70 | 15.2 | 42.0 | 22 | 20.1 | 0.933 | 29.5 |
| ⑤ | 硬塑黏土层 | 26.0 | -42.80 | 22.6 | 45.0 | 23 | 19.9 | 0.959 | 31.4 |

2 试验概况

2.1 试验方法

试验采用钢管桩桩径为 1 500 mm，壁厚 28 mm，2 根试验桩、6 根锚桩和 3 根基准桩桩长均为 74 m，桩身材质为 Q345B 低合金高强度钢材。平面布置见图 1。S₁和 S₂为试验桩，对试验桩进行高应变全程动测，同时对锚桩进行高应变承载力检测，14 d 后试验桩和锚桩复打高应变承载力检测。

为了分析试验桩抗压和抗拔状态下桩身轴力和土阻力分布情况，对 2 根试验桩内壁埋设应变计，共设 15 个内力测点断面，在不同性质的土层界面处设为测点断面，当同一土层厚度较大时，适当增加测点断面数量，同时，桩端附近适当加密测点断面。同一断面对称布置 2 个钢筋计。

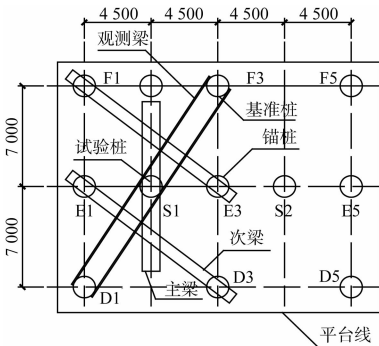
钢筋计沿轴线方向焊接在试验桩管内两侧，做好防水处理。钢筋计定点焊接后，导线全部捆扎后用螺栓固定，外面用 12 号槽钢包着作保护，底部用钢板拼接一个过渡坡面，以防止打桩过程中槽钢被挤出。在距桩顶以下 2 m 处，用钢筋焊接一个十字支撑，用于固定钢筋计的导线。

2.2 试验桩沉桩和试验

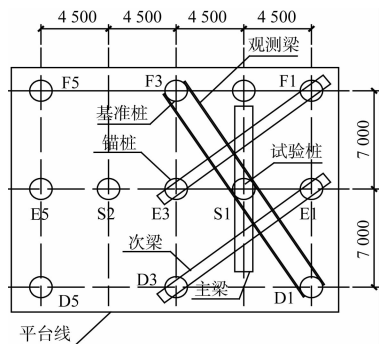
基桩采用 D160 柴油锤打桩船进行施工，沉桩资料参数见表 2。

表 2 基桩桩施工参数

| 桩号 | 桩长/m | 规格/mm | 入土深度/m | 总锤击数 | 动测贯入度/ (mm·击 ⁻¹) |
|----------------|------|-----------|--------|-------|---------------------------------|
| D ₁ | 74 | φ1 500×28 | 39.6 | 1 406 | 8.0 |
| D ₃ | 74 | φ1 500×28 | 39.6 | 1 318 | 10.0 |
| D ₅ | 74 | φ1 500×28 | 40.2 | 1 395 | 7.0 |
| S ₁ | 74 | φ1 500×28 | 39.7 | 1 286 | 10.0 |
| S ₂ | 74 | φ1 500×28 | 39.5 | 1 154 | 10.0 |
| F ₁ | 74 | φ1 500×28 | 39.7 | 1 576 | 9.0 |
| F ₃ | 74 | φ1 500×28 | 39.7 | 1 427 | 9.0 |
| F ₅ | 74 | φ1 500×28 | 39.5 | 1 465 | 10.0 |



a) S₁桩



b) S₂桩

图 1 试桩平面布置 (单位: mm)

基准桩、锚桩、试验桩均进行高应变承载力检测，试验桩进行沉桩过程高应变全程监控，确

定沉桩过程桩身最大应力、桩身完整性和锤击有效能量的变化。静载试验在沉桩施工 5 个月后进行。采用锚桩法、快速维持荷载加载的方法。

高应变动测和沉桩过程施工监控采用 PAX 型打桩分析仪, 冲击设备为施工现场的 D160 柴油打桩锤, 用经纬仪测量贯入度的变化。

3 试验结果及分析

3.1 试验桩的高应变测试结果

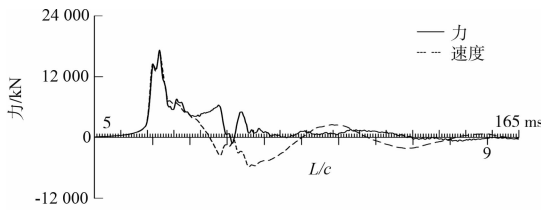
试验桩的高应变动测的主要参数见表 3, 实

测力曲线和速度曲线见图 2、3 (图中 L 为桩长, c 为波速)。

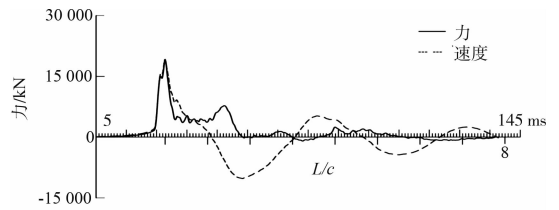
试验桩高应变测试参数见表 3。由表 3 可知, 最大锤击能量较大, 均超过 200 kJ, 最大动位移均超过 30 mm, 和静载的最大桩顶沉降差不多, 能充分发挥桩侧阻力和桩端阻力。图 2、3 中 2 根试验桩的初、复打曲线显示, 入土深度范围内桩身上部桩身侧阻力较小, 而试验桩复打速度曲线异向反射明显, 可知桩端土恢复较好, 承载力较高, 试验桩的承载力恢复系数均超过 1.3。

表 3 试验桩高应变测试参数

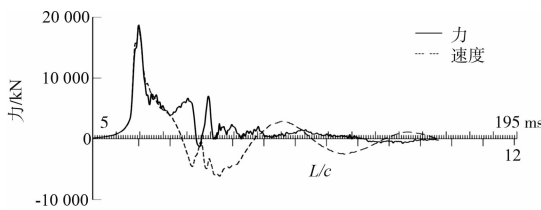
| 桩号 | 实测参数 | | | | 贯入度/ (mm·击 ⁻¹) | 动测极限 承载力/kN | 端阻力/ kN | 侧阻力/ kN | 承载力 恢复系数 | 极限承载力对应 桩顶沉降量/mm |
|----------|---------------|---------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------|------------|------------|-------------|---------------------|
| | 最大锤击 能量/kJ | 最大加 速度 g | 最大桩顶 速度/(m·s ⁻¹) | 最大动 位移/mm | | | | | | |
| S_1 初打 | 234.2 | 187 | 2.64 | 40 | 10.0 | 13 301.3 | 2 790.6 | 10 510.7 | 1.32 | 44.9 |
| S_1 复打 | 217.4 | 269 | 2.80 | 32 | 2.0 | 17 560.5 | 3 196.0 | 14 364.5 | | 41.0 |
| S_2 初打 | 270.7 | 137 | 2.97 | 39 | 10.0 | 13 398.4 | 2 714.5 | 10 683.9 | 1.33 | 52.2 |
| S_2 复打 | 220.9 | 225 | 3.64 | 33 | 2.0 | 17 852.4 | 3 277.8 | 14 574.6 | | 44.1 |



a) S_1 桩

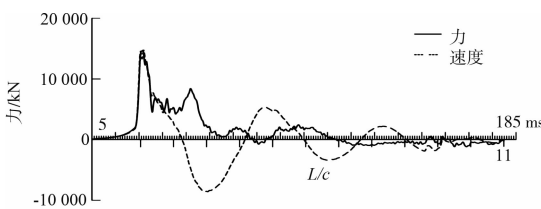


b) S_2 桩



b) S_2 桩

图 2 高应变初打实测曲线



a) S_1 桩

图 3 高应变复打实测曲线

3.2 试验桩静载桩顶沉降曲线

试验桩的压桩 $Q-S$ 曲线如图 4 所示, 拔桩 $Q-S$ 曲线如图 5 所示。

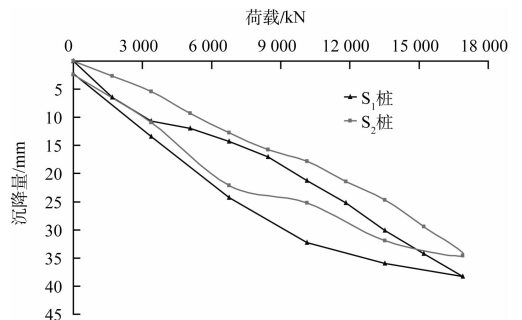


图 4 试验桩压桩 $Q-S$ 曲线

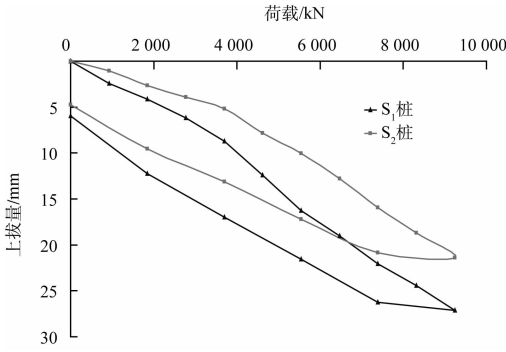


图5 试验桩拔桩 Q-S 曲线

其沉降量和上拔量统计见表4。试验桩压桩最大荷载均为16 900 kN，拔桩最大荷载为9 240 kN，试验桩压桩最大沉降量分别为38.27 mm和34.58 mm，均不超过40 mm，拔桩最大上拔量为27.11 mm和21.41 mm，压桩卸载为零后残余压缩量分别为2.28 mm和2.37 mm，拔桩卸载为零后残余上拔量分别为5.96 mm和4.72 mm。试验桩竖向抗压极限承载力不小于16 900 kN，竖向抗拔极限承载力不小于9 240 kN。其Q-S曲线呈现缓变型特性。

表4 试验桩桩顶位移统计值

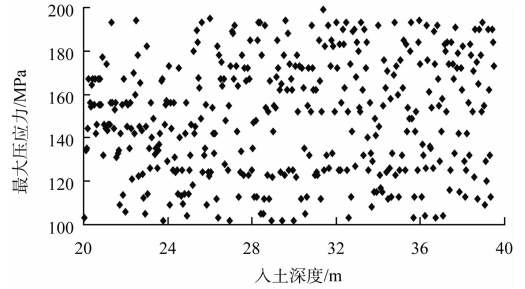
| 桩号 | 桩顶沉降/ 上拔量/mm | 卸载后的残余沉 降量 /上拔量/mm | 残余沉降/上拔量占最大 沉降/上拔量的比例/% |
|-------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| S ₁ 压桩 | 38.27 | 2.28 | 6.0 |
| S ₁ 拔桩 | 27.11 | 5.96 | 22.0 |
| S ₂ 压桩 | 34.58 | 2.37 | 6.9 |
| S ₂ 拔桩 | 21.41 | 4.72 | 22.0 |

3.3 试验桩沉桩过程高应变全程动测结果

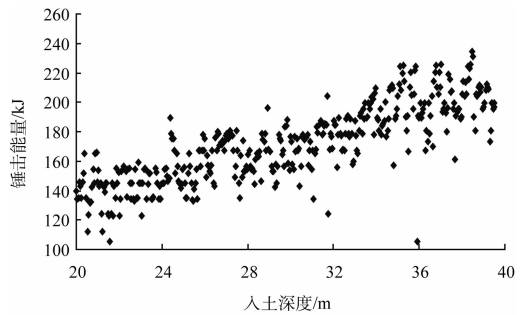
为了测试不同档位沉桩的情况，S₁试验桩采用Ⅱ档施打，S₂试验桩采用Ⅲ档施打沉桩。试验桩吊桩后，为防止溜桩，锤击数阵，穿过软层后，在桩顶附近安装传感器，测试沉桩过程的各个参数随着入深度土的变化，为设计对于工程桩的沉桩设计提供直接参考，同时确保各参数在合理的范围内，保证钢管桩沉桩质量。

由图6和图7可知，试验桩沉桩过程能量较大，且随着入土深度增加，土层较硬，能量呈现递增规律。S₁最大锤击效率为43.9%，沉桩过程最大压应力为223 MPa，S₂桩最大锤击效率为

50.7%，沉桩过程最大压应力为194 MPa 应力值和能量具有一定的离散性，是每一锤的落锤细微偏差导致传递到桩身的能量差异，每一锤对应的桩底土层状况也不尽一致，因此桩身的最大压应力值也有一定的差异。

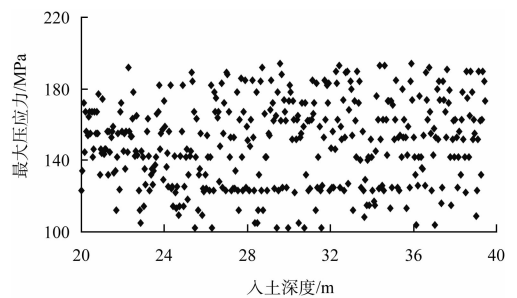


a) 入土深度-最大压应力

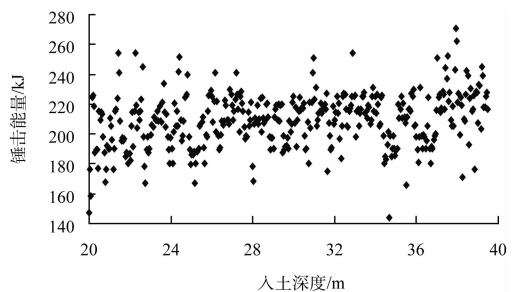


b) 入土深度-锤击能量

图6 S₁ 桩沉桩过程参数的变化



a) 入土深度-最大压应力



b) 入土深度-锤击能量

图7 S₂ 桩沉桩过程参数的变化

3.4 超长钢管桩的承载力特性

竖向荷载下桩身侧阻力测试试验和静载试验同时进行, 所得到的压桩轴力分布图如图 8 所示。桩身上部 0~3 m 范围内桩身轴力递减较慢, 原因是上部淤泥混砂层侧阻力较小。超长桩存在有效桩长问题^[7-8], 对于 2 根试验桩, 在桩顶荷载达到 10 140 kN 前, 桩底轴力均接近 0, 桩端土阻力发挥滞后。桩顶荷载为 10 140 kN 时, 对应的桩顶沉降为 21.23 mm 和 17.79 mm, 考虑减去理论计算的桩身最大弹性压缩量 2.12 mm, 对应的桩底位移为 19.11 mm 和 15.67 mm, 占桩径比例为 1.3% 和 1.1%。此时桩端土阻力逐渐发挥。

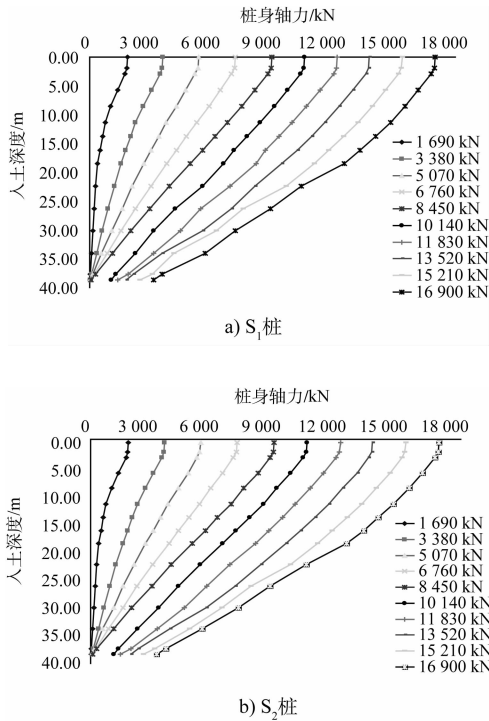


图 8 压桩轴力分布

只有当荷载足够大时, 端阻力才能发挥, 上部荷载较小时, 端阻力比例在 5% 以下, 甚至只有 1%, 达到最大荷载 16 900 kN 时, 端阻力占 19% 左右的比例。其对应的桩顶沉降均超过 30 mm。桩端阻力的发挥具有明显的滞后性^[9]

图 9 给出最大荷载作用下大直径超长钢管桩在深厚软土地基的侧阻力分布。由于最大荷载 16 900 kN 作用下, 2 根试验桩对应的桩顶沉降为别为 38.27 mm 和 34.58 mm, 理论计算的最大荷载时桩身弹性压缩量 3.54 mm, 减去压缩量理论值桩底沉降量超过 30 mm, 能充分发挥底部土层的侧阻力。由图 9 可知, 对于同一土层, 随着入土侧阻力随着入土深度的增加而递增, 而单一土层厚度较大时, 到一定深度, 其侧阻力的增加侧较为缓慢, 趋向稳定。表 5 给出了最大试验荷载作用下 2 根试验桩的侧阻力数值。由表可知, 在最大荷载作用下, 拔桩侧阻力和压桩侧阻力的比值约为 56.9%~75.0%, 其中淤泥混砂层拔桩侧阻力和压桩侧阻力的比值约为 56.9%~58.6%, 松散粗砂层比值为 65.7%~68.0%。硬塑黏土层比值为 61.8%~75.0%。硬塑黏土层的拔力状态侧阻力折减值相对小, 而淤泥混砂层则拔力折减比较大。

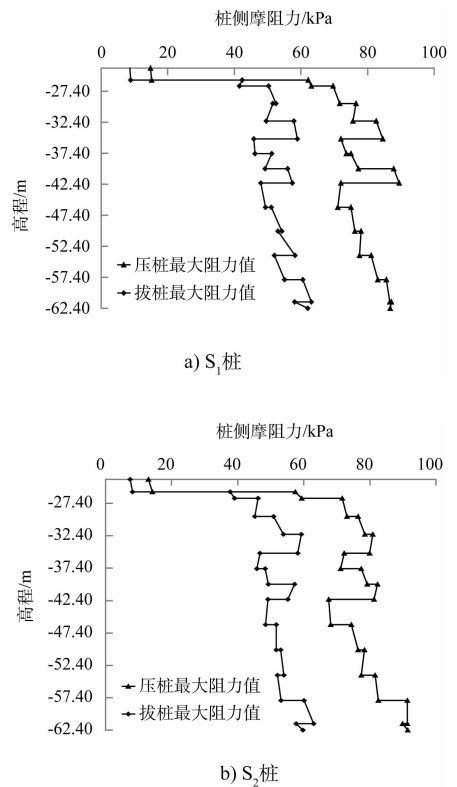


图 9 最大桩侧阻力值

表5 各土层中试验桩最大侧阻力值

| 土层 | S ₁ 桩 | | | S ₂ 桩 | | |
|--------|------------------|-------------|---------------------------------|------------------|-------------|---------------------------------|
| | 最大抗压侧阻力/kPa | 最大抗拉侧阻力/kPa | 1 [#] 桩拔桩侧阻力和压桩侧阻力比值/% | 最大抗压侧阻力/kPa | 最大抗拉侧阻力/kPa | 2 [#] 桩拔桩侧阻力和压桩侧阻力比值/% |
| 淤泥混砂 | 14.8~15.3 | 8.6~8.9 | 58.1~58.6 | 13.0~14.2 | 7.4~8.2 | 56.9~57.7 |
| 松散粗砂 | 62.2~63.1 | 41.5~42.3 | 65.8~68.0 | 57.4~59.4 | 37.7~39.1 | 65.7~65.8 |
| 硬塑黏土 | 69.7~84.6 | 50.3~58.9 | 65.6~73.2 | 71.6~80.9 | 45.2~59.2 | 61.8~73.2 |
| 硬塑黏土混砂 | 72.0~89.5 | 45.9~57.4 | 62.8~68.3 | 71.2~82.3 | 45.8~57.2 | 62.2~69.5 |
| 硬塑黏土 | 71.1~86.8 | 47.9~63.1 | 64.2~75.0 | 67.5~91.5 | 48.4~63.0 | 63.8~72.7 |

4 结论

1) 桩顶荷载较小时, 超长钢管桩端阻力在5%以下, 甚至只有1%; 当荷载和桩底沉降足够大时, 其端阻力才能充分发挥, 在深厚软土地基中端阻力比例可以达到19%左右, 属于典型摩擦桩。

2) 侧阻力随着入土深度的增加而递增, 到一定深度后, 其增加的幅度减缓, 趋向稳定。

3) 在深厚软土地基中, 大直径超长钢管桩拔桩和压桩侧阻力的比值为56.9%~75.0%, 其中淤泥混砂层拔桩侧阻力和压桩侧阻力的比值为56.9%~58.6%, 松散粗砂层比值为65.7%~68.0%。硬塑黏土层比值为61.8%~75.0%。设计应考虑超长钢管桩抗拔状态下的侧阻力折减。

参考文献:

- [1] 贾德庆, 陈锋, 吕黄. 大直径开口钢管桩承载力特性的分析[J]. 水运工程, 2004(10): 22-31.
- [2] 汪宏, 李志明, 王林, 等. 大直径钢管桩承载力的非线性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 213-217.
- [3] 徐向阳, 吕黄, 姚三. 深厚沉积层大直径钢管桩承载力特性试验研究[J]. 水运工程, 2012(6): 179-182.
- [4] 周伟, 吕剑, 周维. 大直径钢管桩在复杂地质条件下施工的探讨[J]. 水运工程, 2010(8): 147-152.
- [5] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [6] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S].
- [7] 俞炯奇. 非挤土长桩性状数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [8] 蒋建平, 高广运, 汪明武. 大直径超长桩有效桩长的数值模拟[J]. 建筑科学, 19(3): 27-29.
- [9] 周代表. 软土地基超长桩工程性状分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 745-749.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

中交建集团公司3个项目获2014—2015年度中国建设工程鲁班奖

日前, 中国建筑业协会发布了《关于公布2014—2015年度中国建设工程鲁班奖(国家优质工程)第一批入选工程名单的通知》。公司参建的3个项目榜上有名, 分别为: 一公局承建、一公局三公司参建的郑州黄河公铁两用桥(QL-1标); 中国交建、一航局、一航局五公司承建, 一航局一公司、一航局安装公司参建的唐山港曹妃甸港区煤炭码头工程; 三航局承建的苏州港太仓港区三期码头工程。

中国建设工程鲁班奖是中国建筑行业工程质量的最高荣誉, 受到社会的广泛关注和认可, 是公认的质量品牌的标志和企业信誉的象征。此次获奖进一步提升了公司的品牌价值, 对于调动各单位创建精品工程的积极性, 促进中国交建工程质量水平的整体提高, 将起到积极推动作用。

(摘编自《中国交通建设网》)