



自平衡法和高应变检测在码头灌注桩中的应用

张丽珍, 王东静

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 海南某高桩码头工程地质条件特殊, 表面覆盖硬岩层, 下部为黏土层, 码头基础采用灌注桩结构, 以硬黏土层为持力层。施工后分别采用自平衡法静载试验和高应变法检测桩基承载力, 将检测结果与规范理论计算结果进行比较。结果表明, 通过自平衡检测的荷载-位移关系曲线判断, 桩端依旧处于弹性阶段, 并根据在加载过程中桩身轴力沿桩身轴向的分布情况, 可分别判断各桩侧摩阻力、端承载力的发挥值, 从而判断桩阻力并没有全部发挥, 桩基的实际极限承载力大于试验值。高应变检测法检测桩侧摩阻力结果大于理论计算结果, 桩端承载力小于理论计算结果, 总桩基承载力二者比较接近, 因此可以作为静载试桩的辅助验证。在港口码头工程中采用自平衡静载测试法, 并用高应变检测法进行验证, 可以解决水域条件下大质量桩基承载力的检测问题。

关键词: 自平衡法静载试验; 高应变检测; 桩基承载力; 码头灌注桩

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0134-05

Application of self-balanced method and high strain detection of cast-in-place pile in wharf

ZHANG Lizhen, WANG Dongjing

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The geological conditions of a high pile wharf project in Hainan are special, with hard rock layers covering the surface and clay layers below. The wharf foundation is adopt cast-in-place piles, with the hard clay layer as the bearing layer. After the construction of the project, static loading tests using self-balanced method and high strain method are carried out to detect the bearing capacity of the pile foundation, and the detection results are compared with the theoretical calculation results by the code. The results show that by using the load-displacement relationship curve of self-balanced test, it can be determined that the pile end is still in the elastic stage. Based on the distribution of the pile axial force along axial direction during the loading process, the values of the lateral friction resistance and end bearing capacity of each pile can be determined separately, and the pile resistance is not fully exerted and the actual ultimate bearing capacity of the pile foundation should be greater than the test value. According to the results of the high strain detection method, lateral friction are greater than the theoretical calculation results, and the pile end bearing capacity is smaller, while the total pile foundation bearing capacity is relatively close to the two, so it can be used as an auxiliary verification for static load pile testing. The use of self-balanced static loading test in port and wharf engineering, using high strain testing method for verification, can solve the problem of detecting the bearing capacity of high-mass pile foundations underwater conditions.

Keywords: self-balanced static loading test; high strain detection; pile foundation bearing capacity; cast-in-place pile in wharf

高桩结构是码头工程常用的结构形式之一, 而桩基承载力的验算是高桩结构设计的重要内容。

竖向桩基承载力的检测方法主要有静荷载试验法、高应变法和自平衡法。其中静荷载试验法通过在

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 张丽珍 (1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口海岸工程设计及管理。

桩顶部逐级施加荷载, 观测桩身应变、桩顶沉降和位移, 确定单桩承载力的试验方法, 是检测承载力最直观、最可靠的方法。但传统静载法的适用范围会受加载范围、场地条件的限制, 而码头工程一般位于海上, 更增加了传统的静载试验方法的操作难度, 导致检测费用高、检测时间长。而高应变检测法和自平衡法装置简单、检测费用较低, 在水上试桩等场地受限的地方更有显著的优越性。

自平衡静载试验已在铁路^[1]、桥梁^[2]、建筑^[3]等领域有广泛应用, 在码头工程也有较多的应用实例。沙特国王港^[4]桩基工程采用灌注桩基础, 共进行了 40 次自平衡静载试验; 陆志扬等^[5]采用自平衡法检测某煤炭码头的钢管桩及预应力高强混凝土管桩(PHC)-钢管桩的桩基承载力; 闵冬平等^[6]在广东国华惠州大亚湾热电工程码头采用自平衡试桩法对直径 1 200 mm 预应力混凝土大直径管桩进行静载试验; 王磊等^[7]在某长江内河码头工程中, 对钢管桩和 PHC 管桩通过自平衡法

静载试验进行桩基础承载力测试; 郑哲希^[8]采用自平衡法进行后注浆灌注桩轴向抗压承载力检测。

本文依托某海港码头工程灌注桩基础, 采用自平衡静载试验、高应变检测试验, 获得桩基的承载力数据, 并与理论计算结果进行对比, 可为类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 平面布置

海南某海港码头工程拟建重件、件杂货泊位, 采用透空式高桩结构, 桩基采用灌注桩。码头共有 4 个功能分区, 桩径根据不同功能区的结构宽度、荷载大小选取, 其中掉头平台区、变电所平台区的桩基直径为 1 300 mm, 件杂货码头区桩基直径为 1 400 mm, 重件码头区桩基直径为 1 500 mm。码头平面布置见图 1。对其中的 3 根灌注桩进行自平衡法静载试验, 每种直径各选 1 根, 分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 , 并对 2 根直径 1 300 mm 灌注桩进行高应变检测, 分别为 P_4 、 P_5 。



图 1 码头平面布置

1.2 工程地质

根据勘察报告, 本工程地质条件较为特殊, 表面覆盖硬岩层, 下部为黏土层。码头区域的地层分布主要为: 表层为中风化、强风化凝灰岩, 且存在凝灰岩夹层, 该层主要成分为火山灰, 岩

石强度低, 遇水易软化; 中间为强风化、中风化玄武岩, 强度较高; 下部广泛分布粉质黏土层。由于岩层分布范围、厚度不均匀, 以粉质黏土层作为桩基持力层。桩基为摩擦桩, 满足自平衡法的适用条件。地质剖面以及各个试验桩对应位置见图 2。

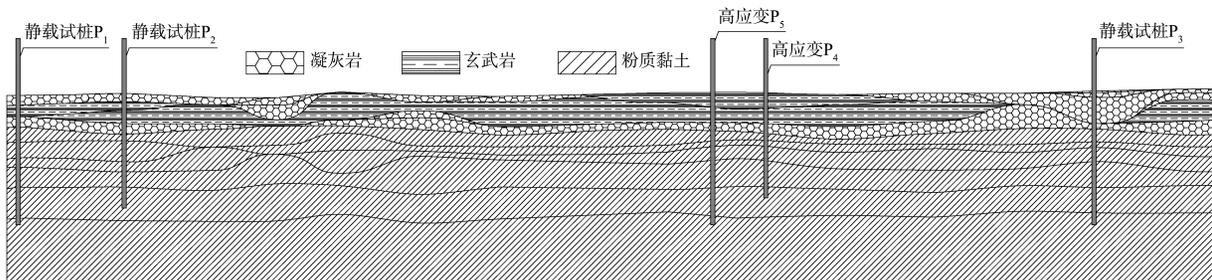


图 2 工程地质剖面

勘察报告提供的各层土(岩)桩基参数建议值见表1。

拟检测桩基的基本参数以及根据勘察报告提供参数计算的桩基承载力结果见表2。单桩轴向承载力 Q_d 计算公式取自JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[9]，为：

$$Q_d = Q_s + Q_R = U \sum \psi_s q_r l + \psi_p q_R A \quad (1)$$

式中： Q_s 、 Q_R 分别为桩侧摩阻力、桩端承载力，kN； U 为桩身截面周长，m； l 为桩身穿过土层的长度，m； ψ_s 、 ψ_p 分别为桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数； A 为桩端截面积， m^2 。

表1 勘察报告提供的各层土(岩)灌注桩基参数建议值

| 地层编号 | 地层类型 | 桩侧单位面积摩阻力 q_r /kPa | 桩端单位面积承载力 q_R /kPa |
|----------------|--------|----------------------|----------------------|
| ④ ₁ | 强风化凝灰岩 | 110 | - |
| ④ ₂ | 中风化凝灰岩 | 130 | - |
| ④ _夹 | 残积黏性土 | 45 | - |
| ⑤ ₁ | 强风化玄武岩 | 140 | - |
| ⑤ ₂ | 中风化玄武岩 | 150 | - |
| ⑤ _夹 | 残积黏性土 | 45 | - |
| ⑦ ₁ | 粉质黏土 | 55 | - |
| ⑧ | 粉质黏土 | 60 | - |
| ⑨ | 粉质黏土 | 70 | 1 200 |
| ⑨ _夹 | 粉砂 | 80 | 1 000 |
| ⑩ | 粉质黏土 | 75 | 1 700 |

表2 桩基检测基本参数

| 灌注桩位置 | 桩编号 | 桩底高程/m | 桩径/mm | 桩侧摩阻力 Q_s /MN | 桩端承载力 Q_R /MN | 合计承载力 Q_d /MN | 试验类型 |
|--------|----------------|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|
| 掉头平台区 | P ₁ | -50 | 1 300 | 9.472 | 1.998 | 11.470 | 自平衡静载试验 |
| 件杂货码头区 | P ₂ | -45 | 1 400 | 10.938 | 1.606 | 12.544 | 自平衡静载试验 |
| 重件码头区 | P ₃ | -50 | 1 500 | 11.234 | 3.004 | 14.238 | 自平衡静载试验 |
| 变电所平台区 | P ₄ | -42 | 1 300 | 8.504 | 1.411 | 9.915 | 高应变检测 |
| 变电所平台区 | P ₅ | -50 | 1 300 | 9.837 | 1.998 | 11.835 | 高应变检测 |

2 自平衡静载试验

2.1 自平衡法测试

自平衡法首先在桩自身平衡点处的安装荷载箱，通过预埋在桩身内的压力管传递试验压力，使荷载箱顶板和底板向上、向下移动，从而调动桩周土的摩阻力与端阻力，直至破坏。平衡点上段桩身重力与桩侧抗拔极限摩阻力之和与下段桩侧抗压极限摩阻力与极限桩端阻力之和基本相等。因此自平衡法是由桩体本身提供反力，而不借助外力的一种静荷载试桩方法，通过测试上、下段桩的承载力得到整根桩的承载力，其原理明确、装置和操作简单、场地适用性很强。

自平衡法测试过程按照JT/T 738—2009《基桩静载试验 自平衡法》^[10]进行。由于码头结构中部的桩基无拔桩力、弯矩较小，每种桩型各选1根，因此选择P₁、P₂、P₃作为试验桩。根据理论计算桩基承载力结果确定P₁、P₂、P₃的最大双向加载值，分别取11.2、12.0、12.5 MN，分9级加载。当加载至第9级荷载时，上、下段桩的总位移量都小于40 mm，位移达到相对稳定标准。

根据自平衡试验结果，计算得到荷载箱上段桩的极限摩阻力、荷载箱下段桩的极限承载力以

及基桩的单桩竖向抗压总承载力，见表3。

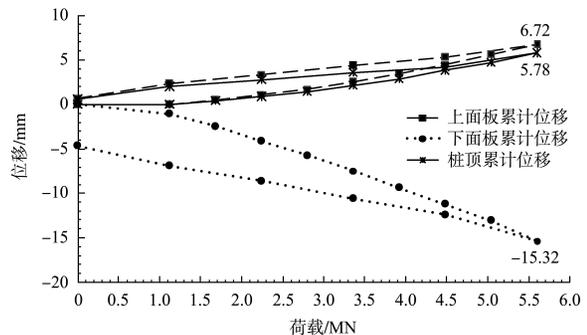
表3 自平衡法试验单桩极限承载力结果

| 桩编号 | 上段桩的极限承载力/MN | 下段桩的极限承载力/MN | 桩总承载力 q_R /MN |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|
| P ₁ | 5.60 | 5.60 | 11.2 |
| P ₂ | 5.65 | 6.35 | 12.0 |
| P ₃ | 6.25 | 6.25 | 12.5 |

2.2 测试结果分析

2.2.1 位移和桩阻力发挥分析

根据试验结果绘制荷载箱荷载-累计荷载箱上面板位移(Q_n-s_s)、荷载箱荷载-累计荷载箱下面板位移(Q_n-s_x)、荷载箱荷载-累计桩顶位移(Q_n-s_t)曲线。3根桩的 $Q-s$ 曲线见图3。



a) P₁桩

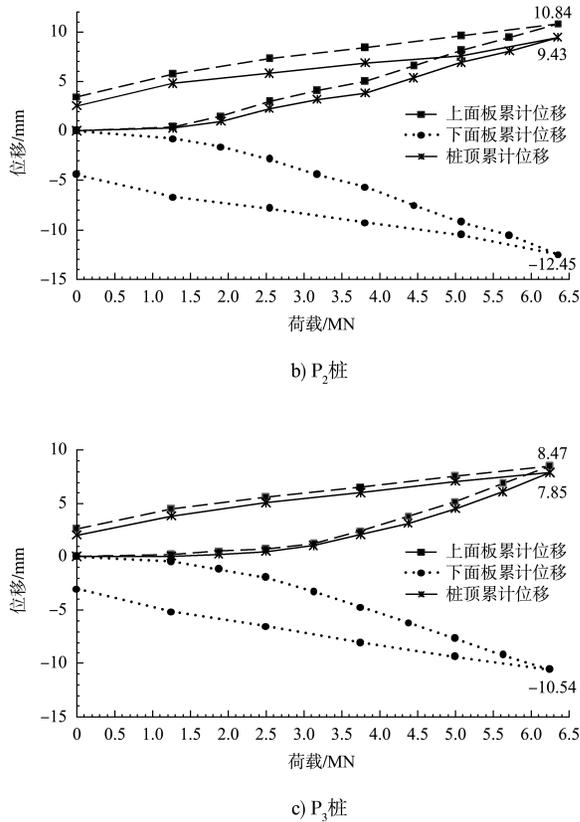


图 3 3 根桩的 $Q-s$ 曲线

由图 3 可看出, 各桩的 $Q-s$ 曲线均未出现明显的转折点, 为缓变型; 荷载箱加载至设计要求的极限加载值后, 桩端依旧处于弹性阶段, 桩阻力并没有全部发挥, 说明桩基的实际极限承载力大于试验值。

2.2.2 桩侧承载力分析

根据自平衡法试桩在加载过程中桩身轴力沿桩身轴向的分布情况, 计算各土层桩侧单位面积承载力发挥值, 并与勘察报告给出的桩侧单位面积摩阻力 q_f 推荐值比较, 结果见表 4。

由表 4 可看出, 通过比较各土层桩侧单位面积摩阻力, 试桩⑦、⑧黏土层的承载力与勘察报告提供桩侧摩阻力比较接近; ⑨黏土层的承载力略小于勘察报告提供结果; P_1 、 P_2 桩的④、⑤岩层桩侧承载力远小于勘察报告提供结果, 而 P_3 桩的④、⑤岩层桩侧承载力与勘察报告的结果差异较小。而总的桩侧摩阻力, P_1 、 P_2 桩的自平衡检测结果大于计算结果, P_3 桩的自平衡检测结果小于计算结果。

表 4 各土层桩侧单位面积承载力发挥值

| 地层编号 | 地层类型 | 桩侧单位面积摩阻力 q_f /kPa | 桩侧单位面积承载力/kPa | | |
|-----------------|--------|----------------------|---------------|---------|---------|
| | | | P_1 桩 | P_2 桩 | P_3 桩 |
| ④ ₁ | 强风化凝灰岩 | 110 | 未包含该地层 | 未包含该地层 | 66.8 |
| ④ ₂ | 中风化凝灰岩 | 130 | 90.78 | 133.4 | 70.3 |
| ⑤ ₁ | 强风化玄武岩 | 140 | 79.57 | 122.2 | 未包含该地层 |
| ⑤ ₂ | 中风化玄武岩 | 150 | 未包含该地层 | 122.2 | 未包含该地层 |
| ⑦ ₁ | 粉质黏土 | 55 | 62.12 | 71.1 | 52.7 |
| ⑧ | 粉质黏土 | 60 | 64.16 | 54.3 | 56.1 |
| ⑧ ₊ | 粉质黏土 | 60 | 65.11 | 58.7 | 未包含该地层 |
| ⑨ | 粉质黏土 | 70 | 64.63 | 60.2 | 44.5 |
| ⑨ _夹 | 粉砂 | 80 | 69.90 | 69.1 | 64.5 |
| ⑨ _{夹+} | 粉砂 | 80 | 未包含该地层 | 未包含该地层 | 72.4 |
| ⑩ | 粉质黏土 | 75 | 72.4 | 73.7 | 73.8 |

注: P_1 、 P_2 、 P_3 桩计算桩侧摩阻力分别为 9.472、10.983、11.234 MN, P_1 、 P_2 、 P_3 桩自平衡检测桩侧摩阻力分别为 9.817、11.097、10.550 MN。

因此, 初步估计, P_1 、 P_2 桩的桩侧承载力发挥度较小, P_3 桩的桩侧承载力发挥度更大。

2.2.3 桩端承载力分析

将各桩自平衡法静载试验的总承载力扣除桩侧

摩阻力检测值, 得到桩端承载力发挥值, 与勘察报告提供参数的桩端极限承载力计算结果进行对比, 见表 5。对比结果表明, 平衡法桩端承载力发挥值均明显小于极限承载力, 桩端阻力并没有全部发挥。

表5 桩端承载力对比

| 桩编号 | 计算桩端极限承载力/kN | 自平衡检测桩端承载力发挥值/kN |
|----------------|--------------|------------------|
| P ₁ | 1 998 | 1 382 |
| P ₂ | 1 906 | 902 |
| P ₃ | 3 004 | 1 950 |

3 高应变检测法

3.1 高应变检测

高应变检测是一种检测桩基的桩身完整性和单桩竖向承载力的方法，该方法采用重锤以自由落体击向桩顶，使桩-土产生足够的相对位移，以充分激发桩周承载力和桩端支撑力，通过安装在桩顶以下桩身两侧的力和加速度传感器接收桩的

应力波信号，应用应力波理论分析处理力和速度时程曲线，从而得到桩身完整性参数和单桩竖向承载力。高应变方案检测费用较低，但检测准确度略差。

高应变分析方法采用实测曲线拟合法，采用桩-土力学模型，选择实测力或速度或上行波作为边界条件进行拟合，拟合完成时计算曲线与实测曲线、桩侧土摩阻力与地质资料、贯入度的计算值与实测值都应基本吻合，从而获得桩的竖向抗压承载力和桩身完整性结果。

本工程高应变检测试验锤质量为16 t，落锤高度设置为0.8 m。检测数据见表6。

表6 高应变承载力检测结果

| 桩编号 | 动测贯入度/(mm·锤 ⁻¹) | 侧摩阻力/MN | 端承载力/kN | 拟合分析桩顶最大位移/mm | 总承载力/MN |
|----------------|-----------------------------|----------|---------|---------------|----------|
| P ₄ | 2 | 9.742 5 | 494.5 | 9.7 | 10.237 0 |
| P ₅ | 2 | 10.392 0 | 495.1 | 10.8 | 10.887 1 |

3.2 测试结果分析

将表2的勘察报告理论计算结果与表6的高

应变检测结果进行对比，见表7。

表7 高应变桩基承载力结果对比

| 桩编号 | 桩侧摩阻力/kN | | 桩端承载力/kN | | 总桩基承载力/kN | |
|----------------|----------|----------|----------|--------|-----------|----------|
| | 计算值 | 高应变检测值 | 计算值 | 高应变检测值 | 计算值 | 高应变检测值 |
| P ₄ | 8 504 | 9 742.5 | 1 411 | 494.5 | 9 915 | 10 237.0 |
| P ₅ | 9 837 | 10 392.0 | 1 998 | 495.1 | 11 835 | 10 887.1 |

根据以上对比可知，对于桩侧摩阻力，高应变检测结果均大于理论计算结果；而对于桩端承载力，高应变检测结果均小于理论计算结果；总桩基承载力二者比较接近。

极限承载力，桩端阻力并没有全部发挥。

4 结论

1) 本工程灌注桩为摩擦桩，满足自平衡法静载试桩的适用条件，实际应用效果良好，与理论计算结果比较接近，对设计进行了验证。

4) 本工程高应变检测结果中，桩侧摩阻力结果大于理论计算结果；桩端承载力小于理论计算结果，总桩基承载力二者比较接近。因此，高应变检测方法可以作为静载试桩的辅助验证。

2) 根据自平衡法各桩的荷载-位移曲线分析，未出现明显的转折点，为缓变型。说明荷载箱加载至设计要求的极限加载值后，桩端依旧处于弹性阶段，桩阻力并没有全部发挥，桩基的实际极限承载力大于自平衡法静载试验值。

5) 在港口码头工程中采用自平衡静载测试法，并用高应变检测法进行验证，可以解决水域条件下大质量桩基承载力的检测问题，在类似工程中可推广应用。

3) 自平衡法静载试验桩端承载力发挥值小于

参考文献:

[1] 聂细锋, 黄树强, 龚亚军, 等. 基于自平衡法试桩试验的铁路桥梁桩基设计[J]. 铁道建筑技术, 2023(12): 109-111, 185.
 [2] 金凯凯. 静载荷试验与高应变法、自平衡法对比研究[J]. 价值工程, 2023, 42(29): 100-102.