

· 地基与基础 ·



超长PHC管桩嵌固深度研究

鲁子爱, 任云

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京210098)

摘要: 高桩码头结构计算时可以把基桩在某深度处固定进行上部结构计算, 再把计算的桩顶内力作为荷载施加到桩上进行桩-土相互作用分析。理论上讲, 以简化前后的桩顶水平位移相等为条件确定嵌固点位置最为合理, 但实际中难以实现。结合现场试桩资料, 深入分析了超长桩在水平荷载作用下的嵌固特性, 提出了嵌固深度随荷载变化的经验计算公式, 实例计算结果表明效果良好。

关键词: 横向承载桩; 桩土相对刚度; 土体弹塑性; 嵌固深度

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0163-05

Research on embedded depth of super-long PHC pipe pile

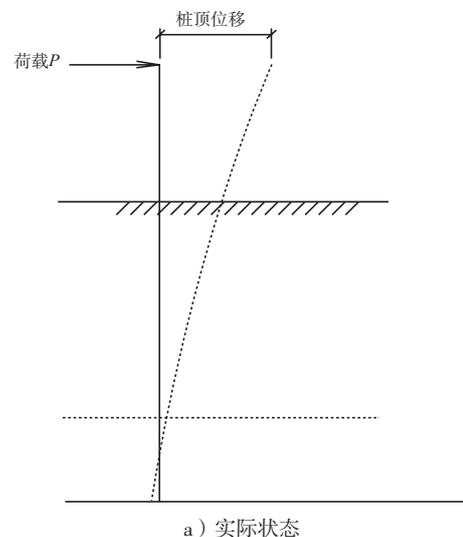
LU Zi-ai, REN Yun

(College of Harbour Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The structural calculation of high pile wharf could start with the upper structure calculation by fixing the pile at a certain depth, and is followed by the analysis of pile-soil interaction by applying the calculation of internal force as a load to the pile. In theory, the most reasonable location for the embedded point can be identified under the condition that the horizontal displacement of pile top equals before and after simplification, but in practice it is difficult to achieve. Combining with the data of the field loading test, this paper conducts an extended analysis of the embedding characteristics of the super-long piles under the horizontal load and puts forward the experience formula of the embedded depth which changes with load. Calculation results show that the effect is satisfactory.

Key words: lateral loaded pile; pile-soil relative stiffness; soil elastic-plastic; embedded depth

PHC管桩是一种采用先张法预应力工艺、离心成型并通过常压及高压蒸养方法制成的一种空心圆柱型钢筋混凝土预制桩^[1], 以其强度高、性能良好等优势在码头工程中应用数量急剧增多。根据现行规范对高桩码头结构计算的有关规定, 不论是按平面分析还是按空间分析, 都可以先把基桩在某深度处固定进行上部结构计算^[2], 再把计算的桩顶内力作为荷载施加到桩上进行桩-土相互作用分析, 显然该简化计算方法的关键是合理地确定固定点(一般称为桩的受弯嵌固点)的位置(图1), 因此研究超长PHC管桩的嵌固深度具有重要的实际意义。



收稿日期: 2013-04-26

作者简介: 鲁子爱(1955—), 男, 博士, 教授, 研究方向为港口、海岸工程结构和水运工程规划。

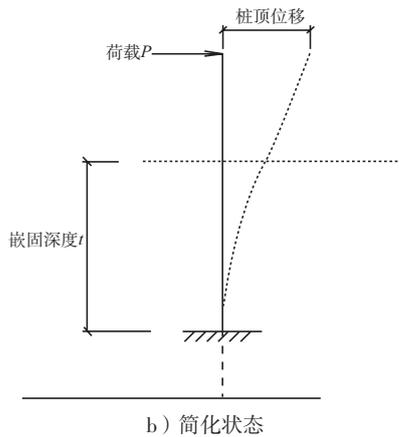


图1 受弯嵌固点示意图

1 现有算法分析

《港口工程桩基规范》^[3]规定，弹性长桩受弯嵌固点的深度可采用 m 法按下式确定：

$$t = \eta T \quad (1)$$

式中： η 为系数，取1.8~2.2，桩顶铰接或桩的自

由长度较大时取较小值，桩顶嵌固或桩的自由长度较小时取较大值； T 为桩的相对刚度系数(m)，按下式计算

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{mb_0}} \quad (2)$$

式中： EI 为基桩的横向抗弯刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)； m 为桩侧地基土的水平抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m^4)； b_0 为桩的换算宽度(m)，取 $2d$ ， d 为桩受力面宽度或桩径。

本次现场水平力试验采用外径1 000 mm，内径760 mm的PHC管桩，根据试桩条件，取 $m=2\,400\text{ kN}/\text{m}^4$ ， $b_0=2.0\text{ m}$ ， $\eta=1.8$ ， $E_s=1\,660\text{ kPa}$ ，得桩的相对刚度系数 $T=3.084\,6\text{ m}$ ，嵌固点深度 $t=5.55\text{ m}$ ，将此处作为桩底端并加以固定，对试桩各级荷载作用下的桩顶位移和转角进行计算^[4]，并与实测值进行了比较(表1)。

表1 按规范受弯嵌固点计算结果与实测值比较

桩顶荷载/kN	桩顶位移/mm	桩顶转角/(10^{-3} rad)	实测值		误差/%	
			桩顶位移/mm	桩顶转角/(10^{-3} rad)	桩顶位移	桩顶转角
12	34.220	2.276	24.03	1.67	42.407	36.305
18	51.330	3.414	44.71	2.99	14.808	14.195
24	68.441	4.553	65.44	4.29	4.585	6.121
30	85.551	5.691	86.4	5.59	-0.983	1.802
36	102.661	6.829	110.15	6.99	-6.799	-2.305
42	119.771	7.967	132.93	8.35	-9.899	-4.586
48	136.881	9.105	158.04	9.82	-13.388	-7.279
54	153.991	10.243	187.75	11.62	-17.981	-11.848
60	171.101	11.381	222.07	13.68	-22.952	-16.802
66	188.212	12.520	256.57	15.69	-26.643	-20.206

从表1可见，按规范计算的结果与实测值相差很大，且显示出较强的规律性：在小荷载情况下大于实测值，荷载越小差别越大，最大误差42.4%；在大荷载情况下小于实测值，荷载越大差别越大，最大误差-26.6%。其主要原因是：前述弹性长桩受弯嵌固点深度计算方法是以 m 法为基础确定的，而 m 法把桩周土视为弹性体，未考虑土体弹塑性的影响，本次试验最大荷载时泥面位移达到33 mm，土体已进入弹塑性甚至塑性阶段，不适合采用 m 法计算。

2 超长桩嵌固特性

横向承载超长桩靠桩周土体提供的土抗力和对桩的嵌固抵抗外荷载^[5]，在水平荷载作用下，桩周表层土首先受到挤压而产生土抗力，随着荷载的增大逐步向深层发展，当荷载达到一定量值时表层土开始屈服，荷载继续增大时塑性区不断向深层拓展。对长桩而言桩周土体可提供足够抗力使桩下部弹性嵌固于地基中，系统破坏一般取决于桩身强度。

确定弹性长桩受弯嵌固点位置的合理条件

是按嵌固点法计算得到的桩顶位移与实际情况一致, 因此影响嵌固点深度 t 的因素很多, 诸如桩身材料特性、桩截面形状和尺寸、桩周土体的力学性能、水平荷载的大小和性质等都是重要因素。

桩身横向抗弯刚度 EI 是反映桩身变形特性的基本物理量, 可以用于描述桩身材料特性及截面形状和尺寸等对嵌固特性的影响。描述土体性质的参数众多, 对于横向承载桩而言, 桩-土相互作用主要体现在桩身位移对土体的挤压, 所以描述土体压缩变形特性的压缩模量 E_s 能够反映土体性质对嵌固特性的影响。土体受到桩身挤压后产生土抗力阻止桩身位移, 桩-土相互作用范围直接影响土抗力的大小, 桩土相互作用有效宽度(换算宽度) b_0 也是影响嵌固特性的重要参数。

众所周知, 土体是比较典型的弹塑性体^[6], 进入弹塑性阶段后强度衰减明显, 并且弹性范围较小, 因此桩身位移也是影响嵌固深度的重要因素。桩顶荷载直接影响桩身位移, 荷载越大位移越大, 荷载重复次数越多位移也越大。

就单个影响因素而言, 水平承载桩的受弯嵌固点深度与桩身抗弯刚度、桩身位移成正比, 与土体强度(抗压刚度)成反比, 桩的实际嵌固深度是各种因素共同作用的结果, 不能从某个因素

进行片面分析。很明显刚度比较大的桩在岩石中的嵌固深度是比较小的, 而刚度比较小的桩在淤泥中的嵌固深度将会比较大。实际上就桩、土性质的影响而言, 它们的刚度比是描述桩的嵌固特性的重要参数。

本文研究超长PHC管桩在水平静载作用下的承载特性, 不考虑荷载性质的影响, 只考虑荷载大小和桩、土性质的影响, 在现行规范计算方法的基础上, 以桩、土相对刚度系数为主要研究参数, 在如何考虑土体的弹塑性特性方面进行分析, 取得了比较满意的研究成果。

3 桩土相对刚度系数

前面已述, 目前弹性长桩受弯嵌固点深度计算方法是以前述 m 法为基础确定的, 而 m 法把桩周土视为弹性体, 未考虑土体弹塑性的影响。本文结合现场水平静载试验, 深入分析桩土相对刚度系数的变化规律。

水平力静载荷试验采用顶推法加荷, 反力由试桩相邻的一平台提供。反力装置及加荷系统的主要设备有: 一根反力梁、一只水平推力专用千斤顶、一个千斤顶导向架、一只压力传感器、一台油泵及相应油路系统。见图2。

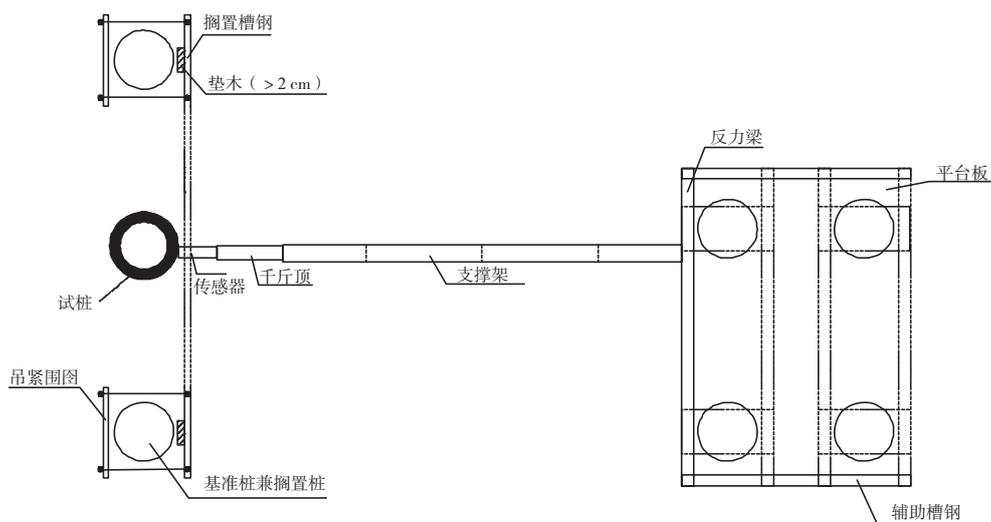


图2 试验装置平面示意图

试验量测了在各级荷载作用下桩在荷载施加处的水平位移(称为桩顶位移)和转角, 主要试验结果见表2。

3.1 相对刚度系数表达式

顾名思义, 桩的相对刚度系数是反映桩身抗弯性能和土体抗压性能的一个参数, 式(1)中的 m

表2 实测桩顶水平位移和转角

水平荷载/kN	桩顶位移/mm	转角/(10 ⁻³ rad)
12	24.03	1.67
18	44.71	2.99
24	65.44	4.29
30	86.40	5.59
36	110.15	6.99
42	132.93	8.35
48	158.04	9.82
54	187.75	11.62
60	222.07	13.68
66	256.57	15.69

值范围比较大，在实际中较难确定，也不便于考虑土的弹塑性特性。根据 m 值的物理意义，在深度 x 处发生位移 y 时作用在桩身上的土抗力

$$p=Bmxy \tag{3}$$

在考虑 m 值随土体弹塑性变化而变化的情况下， Bmx 即为发生位移 y 时土体在深度 x 处的实际压缩模量，与横向承载桩 p - y 曲线^[7]的割线模量相当，不妨称为土的相当模量，以 E_t 表示，则

$$E_t=Bmx \tag{4}$$

参考桩身计算宽度 b_0 与实际宽度 B 的关系，式

(2)可改写为

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{\alpha E_t/x}} \tag{5}$$

式中： α 是综合系数，包括 b_0 与 B 的比例系数等，可取 $\alpha=2.5 \sim 3.0$ 。

3.2 相当模量与位移的关系

根据现场试桩资料分析，试桩 p - y 曲线的割线模量随桩身位移 y 的变化关系具有很强的规律性，基本呈双曲线形式衰减（图3），利用最佳逼近法^[8]按下式进行曲线拟合：

$$E_t = \frac{A_1}{y^{A_2}} \tag{6}$$

拟合结果发现，系数 A_1 ， A_2 基本与深度 x 无关，而 E_t 可表示为

$$E_t = \frac{2.5}{y^{1.25}} \tag{7}$$

式（7）反映了 p - y 曲线割线模量与位移的关系，即土体压缩模量随位移增大而降低的规律性。

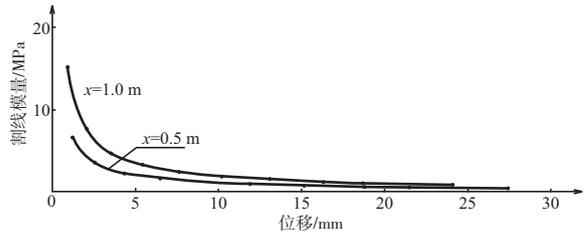


图3 试桩 p - y 曲线割线模量与位移的关系

3.3 位移与荷载的关系

桩身位移是未知量，利用式(7)反映土体压缩模量的弹塑性变化，进而确定桩的嵌固点深度仍需要叠代求解，给使用上带来不便。影响桩身位移的因素众多，但对实际工程而言，基桩和土体特性都是确定的，桩身位移就只是荷载的函数。根据本次现场静载荷试桩资料，深入分析了桩身水平位移与水平荷载的关系，其中泥面附近位移随荷载的变化情况见图4。

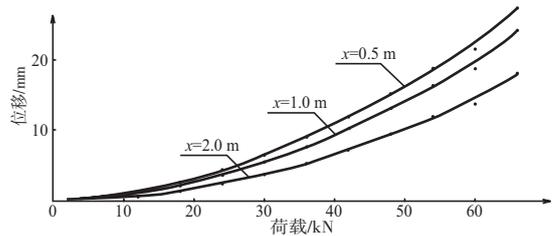


图4 试桩在泥面附近位移与荷载的关系

从图4可见桩身水平位移 y 与水平荷载 P 之间亦具有很强的规律性，本次试验成果显示呈指数变化，同样利用最佳逼近法进行曲线拟合

$$y=A_1 P^{A_2} \tag{8}$$

拟合发现，和 p - y 曲线割线模量与位移的关系类似，系数 A_1 ， A_2 基本与深度 x 无关，可表示为

$$y=5.51 \times 10^{-6} P^2 \tag{9}$$

代入式（7）得

$$E_t = \frac{5.640E_s}{P^{2.5}} \tag{10}$$

式中： E_s 是土体的压缩模量。用此式描述土体压缩模量的弹塑性变化就比较方便。

3.4 经验公式

上述分析显示相当模量的变化基本与深度 x 无关，不妨取 $x=1$ m，将式（10）代入式（5）有

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{5640\alpha E_s} \cdot P^{2.5}} \quad (11)$$

取 $\alpha=2.66$ 得水平承载桩相对刚度系数 T 的经验计算公式如下

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{15000E_s} \cdot P^{2.5}} \quad (12)$$

式中: T 为水平承载桩相对刚度系数(m); E 为桩身材料弹性模量(kPa); I 为桩身截面惯性矩(m^4); E_s 为桩周土体压缩模量(kPa); P 为桩受到的水平力(kN)。

水平承载长桩的相对刚度系数确定后, 其受弯嵌固点深度 t 仍可按规范方法计算:

$$t = \eta T \quad (13)$$

式中: 系数 $\eta=1.8 \sim 2.2$, 桩顶铰接或桩的自由长度较大时取较小值, 桩顶嵌固或桩的自由长度较小时取较大值。

4 实例应用

利用建立的经验公式(12)计算现场试桩在各级荷载时的受弯嵌固点深度, 进而按嵌固点法计算桩顶位移和转角, 结果见表3, 从表中可见计算的桩顶位移和桩顶转角与实测值吻合较好。

表3 按嵌固深度经验公式计算结果

桩顶荷载/ kN	嵌固深度/ m	桩顶位移/ mm	桩顶转角/ (10^{-3} rad)	误差/%	
				桩顶位移	桩顶转角
12	3.48	25.653	1.878	6.68	12.43
18	4.26	43.016	3.035	-3.79	1.50
24	4.92	62.863	4.302	-3.94	0.27
30	5.50	84.983	5.666	-1.64	1.35
36	6.02	109.215	7.117	-0.85	1.81
42	6.50	135.555	8.652	1.97	3.62
48	6.95	163.991	10.271	3.77	4.59
54	7.37	194.367	11.964	3.52	2.96
60	7.77	226.773	13.733	2.12	0.39
66	8.15	261.108	15.573	1.77	-0.75

5 结论

目前横向承载桩受弯嵌固深度的研究成果不多, 我国港口工程桩基规范推荐的计算方法未考虑土体塑性的影响, 认为桩的受弯嵌固深度仅与基桩特性和地基土特性有关, 与桩身位移无关, 这对土体处于弹性变形阶段的桩-土系统是合适的, 不适用于土体处于弹塑性和塑性变形阶段的桩-土系统。本文结合现场试桩资料, 分析了超长桩在水平荷载作用下的嵌固特性, 考虑土体弹塑性影响提出了嵌固深度随荷载变化的经验计算公式。实例计算结果表明: 桩顶位移和桩顶转角的计算值与实测值吻合较好, 误差基本在5%以内, 证明该经验公式可以为超长PHC管桩码头结构计算提供参考依据。

参考文献:

- [1] 华南理工大学, 浙江大学, 湖南大学. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [3] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [4] 张学言. 确定弹性桩嵌固点深度的方法[J]. 水运工程, 1980(10): 17-21.
- [5] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [7] 周礼军. 浅覆盖层中水平荷载桩 P - Y 曲线研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [8] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(本文编辑 武亚庆)