



码头施工过程中单桩稳定性计算

何冠中, 沙益春

(上海三航奔腾建设工程有限公司, 上海 200441)

摘要: 针对码头施工过程中可能遇到的单桩稳定性问题, 分析了处于单桩状态的弹性长桩和刚性桩的不同失稳机理并提出了不同地质条件下相应的单桩稳定计算方法和主要步骤, 同时还依据工程实例和模型试验数据给出了刚性桩的稳定安全系数建议值, 在码头桩基施工实践中对相关工程技术人员具有参考意义。

关键词: 码头; 施工过程; 单桩; 稳定性; 计算

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0168-05

Calculation of single pile's stability during wharf construction

HE Guan-zhong, SHA Yi-chun

(Shanghai Third Harbor Benteng Construction & Engineering Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: For the single pile's stability problems possibly encountered during wharf construction, this article analyses the difference of instability mechanism between elastic long-pile and rigid pile when they are in a state of single pile, presents respective stability calculation method and key steps of single pile at diverse geologic conditions, and provides the proposed value of stability safety factor for the rigid pile on the basis of project case and model test. The results may serve as reference for associated engineering technicians in the practice of wharf pile foundation construction.

Key words: wharf; construction process; single pile; stability; calculation

在地质条件比较复杂的高桩码头工程设计中, 往往由于某些区域覆盖层较薄、桩入土较浅而需采用嵌岩桩以满足承载力要求。那么, 桩基(或者钢套管)在嵌岩之前的单桩稳定性问题就是施工单位需要面对的课题。还有一种可能发生的情况就是: 对于一般的采用打桩船沉桩的打入桩施工过程中, 因某种特殊原因在基桩还未达到足够的入土深度时打桩船却必须暂时撤离, 单桩稳定问题也同样是施工单位需要快速反应的问题。

1 单桩稳定概述

根据JTJ 254—1998《港口工程桩基规范》^[1]第4.3.1条规定, 承受水平力或力矩作用的单桩根据

桩的入土深度 L_1 (m)和桩的相对刚度系数 T (m)之间的对比关系分为弹性长桩、中长桩和刚性桩。桩的相对刚度系数 T (m)由 m 法确定, m 为土的水平地基抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m^4)。当 $L_1 \geq 4T$ 时为弹性长桩; 当 $4T > L_1 \geq 2.5T$ 时为中长桩; 当 $L_1 < 2.5T$ 时为刚性桩。这3种状态单桩的失稳机理差别较大, 需分别说明。

为方便分析, 先研究刚性桩和弹性长桩的单桩稳定, 这两者性质完全不同。刚性桩由于桩、土的相对刚度较大, 桩下端得不到充分的嵌固且桩身的挠度可以忽略不计, 因此在水平力的作用下将产生全桩长的刚体转动(图1), 在转动中心上方的土层和转动中心到桩底之间的土层分别产生方向相反的水平抗力, 这两部分抗力形成抵

收稿日期: 2013-06-18

作者简介: 何冠中(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事港口工程设计和施工工作。

抗水平荷载的力矩。当土抗力形成的力矩不足以抵抗水平荷载产生的力矩时, 该桩、土体系就会被破坏。因而刚性桩的单桩失稳实质上就是土体的失稳。而弹性长桩由于桩结构相对土体较具柔性, 在水平力的作用下桩顶的水平位移是由桩本身的挠曲变形及土体的压缩变形产生, 且桩下段的水平土抗力可视为无限大, 亦即桩下段可视为嵌固于土中而不能转动(图2), 水平荷载由桩截面的抗矩和土抗力共同承担。当水平荷载逐渐增大直至桩身最大弯矩超过桩的抗弯能力时, 桩将被破坏, 这时桩破坏截面以上的土体由于不能承担全部水平荷载而随之破坏, 最终导致桩的倾覆。也就是说, 弹性长桩的单桩失稳首先表现为桩结构的破坏, 其次才是土体的失稳。中长桩的单桩稳定则是介于弹性长桩和刚性桩之间的过渡工况, 可以理解为桩身结构的破坏和土体的失稳接近同步发生。

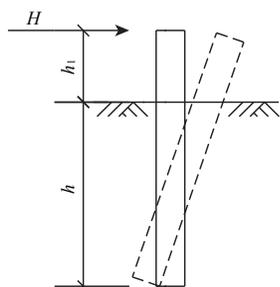


图1 刚性桩

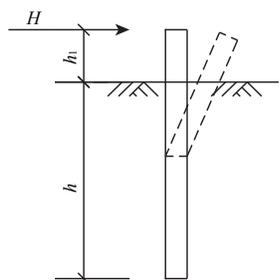


图2 弹性长桩

因此, 在施工过程中, 如果桩的入土深度满足了弹性长桩的条件, 在确保基桩本身有足够强度应对施工期的水流荷载和波浪荷载(对于斜桩还包括自重荷载)的前提下是不必担心单桩的稳定性的。而对于刚性桩则必须根据不同的情况计算其稳定性。至于处于弹性长桩和刚性桩之间的

中长桩, 建议将其假定为刚性桩进行计算, 这样假定是偏于安全的。

2 单桩稳定性的验算方法

2.1 弹性长桩单桩稳定性

对于弹性长桩, 根据前面对其失稳机理的分析, 其单桩稳定性验算方法比较简单, 一般可将基桩假定为承受水流荷载和波浪荷载(对于斜桩还包括自重荷载)作用的悬臂梁, 并且采用假想嵌固点法确定悬臂梁锚固端(也就是最大弯矩点)的位置(一般为泥面以下5~6倍桩径处), 然后求出最大弯矩值。只要桩身抗弯强度能够满足该最大弯矩要求, 就能确定该单桩状态的基桩是不会失稳的。

2.2 刚性桩单桩稳定性

布罗姆斯(Broms)提出采用极限地基反力法^[2-3]来验算刚性桩的单桩稳定性。极限地基反力法又称极限平衡法, 它适合短期荷载工况。布罗姆斯假定当水平荷载达到极限值时在桩的入土全长范围内地基均处于塑性屈服状态。以这个假定为前提, 同时考虑到黏性土和砂性土的工作状态有所不同, 布罗姆斯分别提出了黏性土和砂性土中刚性桩的计算方法。

2.2.1 黏性土地基

在均匀黏性土中具有自由桩头的刚性桩, 布罗姆斯假设可用简化的图式代表桩上土壤的反力(图3), 图中 B 为桩宽或直径, H_u 为水平向极限荷载, C_u 为不排水抗剪强度。在 $1.5B$ 深度以上, 零压力代表土壤收缩与桩离开的影响; 在 $1.5B$ 深度以下假定为塑性区域的地基反力分布, 其值为 $9C_uB$ 。

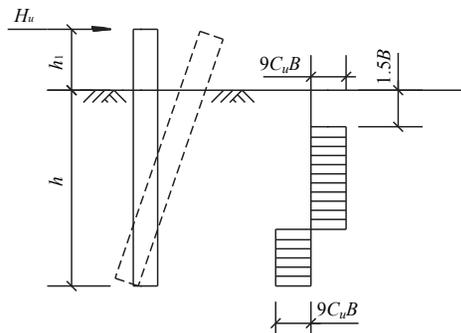


图3 黏性土中短桩的地基反力

根据力的平衡条件可得：

$$H_u = 9C_u B \left\{ \sqrt{4\left(\frac{h_1}{B}\right)^2 + 2\left(\frac{h}{B}\right)^2 + 4\left(\frac{h_1}{B}\right)\left(\frac{h}{B}\right)} + 6\left(\frac{h}{B}\right) + 4.5 - \left[2\left(\frac{h_1}{B}\right) + \left(\frac{h}{B}\right) + 1.5\right] \right\} \quad (1)$$

2.2.2 砂质地基

在极限水平力的作用下，桩头和桩尖将产生方向相反的位移（图4a），因此在转动中心以上和以下的土体将对桩产生方向相反的水平抗力（图4b），而转动中心考虑在桩尖附近。在很多实测数据的基础上，布罗姆斯确认在桩的全部入土长度范围内处于屈服状态的土体对桩产生的水平抗力相当于兰金被动土压力的3倍。因此，桩上单位土壤反力为：

$$P_z = 3BP_{oz}K_p \quad (2)$$

式中： B 是垂直于转动方向的桩宽； P_{oz} 是在深度 Z 处的有效上覆土压力；而 K_p 是兰金被动土压力系数：

$$K_p = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi) \quad (3)$$

式中： φ 为土体的内摩擦角。布罗姆斯还提出将桩尖的地基反力以一集中力 P 来代替（图4c）。根据对桩尖的力矩平衡条件即可得到极限水平荷载为：

$$H_u = 0.5Bh^3K_p\rho/(h_1 + h) \quad (4)$$

式中： ρ 为土体的密度。

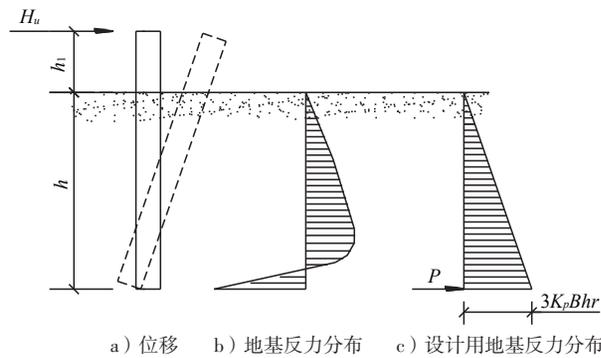


图4 砂质土中短桩的地基反力分布

3 单桩稳定计算主要步骤

3.1 弹性长桩

3.1.1 荷载计算

1) 水流荷载。

根据设计文件中的水流数据，按照“港口工程荷载规范”中的相关规定分别计算设计高水位和设计低水位时作用在单桩上的水流力对假想嵌

固点的弯矩值。

2) 波浪荷载。

根据设计文件中的波浪要素数据（波高控制在1 m左右），按照“海港水文规范”中的相关规定分别计算设计高水位和设计低水位时作用在单桩上的波浪力对假想嵌固点的弯矩值。

3) 自重（对斜桩）荷载。

根据桩的斜率分别计算设计高水位和设计低水位时桩身自重对假想嵌固点产生的弯矩值。

3.1.2 荷载组合

工况1：设计高水位时水流荷载、波浪荷载及自重荷载对假想嵌固点产生的弯矩值进行组合。

工况2：设计低水位时水流荷载、波浪荷载及自重荷载对假想嵌固点产生的弯矩值进行组合。

3.1.3 单桩稳定性验算

比较“工况1”和“工况2”的弯矩值，选两者中较大者验算桩的强度即可。

3.2 刚性桩的情况

3.2.1 荷载计算

1) 水流荷载。

根据设计文件中的水流数据，按照“港口工程荷载规范”中的相关规定分别计算设计高水位和设计低水位时作用在单桩上的水流力及该力对泥面的力臂。

2) 波浪荷载。

根据设计文件中的波浪要素数据（波高控制在1 m左右），按照“海港水文规范”中的相关规定分别计算设计高水位和设计低水位时作用在单桩上的波浪力及该力对泥面的力臂。

3) 自重（对斜桩）荷载。

根据桩的斜率分别计算设计高水位和设计低水位时桩身自重对泥面处桩身产生的弯矩值。

3.2.2 求总水平力及该力对泥面的力臂

1) 将相应水位时的水流荷载和波浪荷载相加得到总水平力 H 。

2) 将相应水位时的水流荷载、波浪荷载及自

重荷载对泥面处桩身产生的弯矩相加得到总弯矩。

3) 将相应水位时的总弯矩除以总水平力得到总水平力对泥面的力臂 h_1 。

3.2.3 单桩稳定性验算

针对不同的地质情况, 先按布罗姆斯 (Broms) 提出的计算公式式 ((1) 和式 (4)) 求出不同水位时相应的 H_u , 再按下式进行验算:

$$H_u/H \geq K \quad (5)$$

式中: K 为刚性桩单桩稳定性验算安全系数。

4 刚性桩单桩稳定性验算安全系数 K 的建议值

宝钢马迹山矿石中转港卸船码头部分区域基岩裸露海底, 最大水深超过30 m。设计方案为高桩梁板式结构, 采用2.8 m直径的嵌岩桩, 岩面以上桩长达40 m。施工必须先将直径2.8 m长40 m的钢套管立稳于海底 (稳桩), 然后才能进行后续的工序。经初步计算后拟采用的稳桩措施是: 先在海底抛填7 m厚粗砂, 再以0.5 m厚的碎石层覆盖以确保砂层不被水流冲刷, 由此形成7.5 m厚的人工覆盖层作为施工期的稳桩土层。为检验以7.5 m厚砂石层来稳定钢套管的可靠性, 河海大学对此进行了模型试验^[3]。

1) 原始数据。

水深33 m; 波高1.0 m, 波长30.0 m, 周期4.39 s; 最大垂线平均流速1.7 m/s。砂石层厚度及钢套管尺寸均与实际情况一致。

2) 荷载计算结果。

根据水流波浪资料计算出的单根钢套管上的总水平力为205.0 kN, 水平力对碎石层顶面的力臂为18.2 m。

3) 试验主要结果。

模型试验的几何比尺 $\lambda = 1:10$, 荷载比尺为 $\lambda^3 = 1:1\ 000$, 因此模型中每根钢套管上的总水平力应为205 N。

在施加水平荷载时, 可测得模型钢套管在碎石顶面处的转角 ϕ_0 , 并由此可求得原型钢套管顶的水平位移 (表1)。试验荷载和转角 ϕ_0 关系见图5。

表1 试验荷载、转角 ϕ_0 及安全系数 k

试验荷载/N	$\phi_0 / (10^{-4} \text{弧度})$	安全系数 k
107.5	1.53	9.29
155.5	2.10	6.42
204.0	3.60	4.89
302.0	6.17	3.31
400.0	9.17	2.50
501.0	10.97	1.99
601.0	13.93	1.66
697.5	18.10	1.43
799.0	26.40	1.25
898.0	36.83	1.11
998.5	42.37	1.00

注: 安全系数 k 等于极限试验荷载 (998.5 N) 除以各级试验荷载。

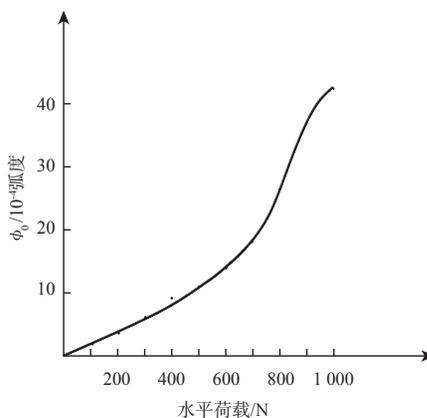


图5 水平荷载与转角关系曲线

从表1和图5可以看出:

1) 实际最大加载为998.5 N(极限水平荷载), 与钢套管上的总水平力205 N相比, 为4.87倍的关系, 这与按布罗姆斯的计算结果 (安全系数为 $k=4.93$) 基本相符。

2) 当水平荷载小于501 N时, ϕ_0 值与水平荷载基本上成线性关系, 说明此时土体处于弹性变形状态, 此时的安全系数为1.99; 当水平荷载大于501 N时, ϕ_0 值增长明显比水平荷载增长要快, 说明此时土体开始进入塑性直至屈服状态。

当安全系数大于2时, 桩土体系中的土体处于弹性变形状态。施工过程中, 以控制土体在弹性变形阶段工作作为稳桩所需最小入土深度的计算依据比较合理。为将受水平荷载作用的单桩的桩顶位移控制在较小的范围, 建议将刚性桩单桩稳

定性验算安全系数的 k 值取为3。

5 结语

1) 对于基桩穿越非单一土层的情况, 布罗姆斯 (Broms) 计算公式中土的不排水抗剪强度 C_u 和土体的内摩擦角 ϕ 取根据各土层的厚度按加权平均法计算得出的综合值。

2) 计算斜桩的自重荷载时, 桩的水面以上区段和水面以下区段分别取干密度和浮密度进行计算。

3) 计算设计低水位工况斜桩的自重荷载时要考虑桩内水位仍然处于设计高水位的情况, 此时桩内高出设计低水位的水体重力应作为桩自重的一部分参与荷载计算。

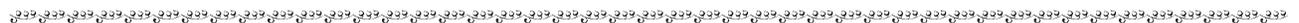
4) 对于波浪力与水流力夹角较大的情况, 在荷载组合时可按矢量合成来计算合力。

5) 对于水流较急的水域, 应适当考虑水流对桩周土体冲刷而导致泥面高程降低的不利影响。

参考文献:

- [1] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [2] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
- [3] 河海大学港口航道及海岸工程学院. 马迹山宝钢码头岩基上钢管桩套箱基础施工期稳定性研究[R]. 南京: 河海大学港口航道及海岸工程学院, 1997.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第154页)

4 结论

通过分析当前水运港口业务和组网的需求, 以 TD-SCDMA技术为基础, 针对港口行业的通信问题和需求提出了基于TD-SCDMA 的港口专网系统解决方案。方案可有效解决当前港口的通信问题, 提高港口的安全生产效率和高度的信息自动化, 同时也保证了无线专网系统的实时性和有效性。结果表明: TD无线专网解决方案具有极强的可行性, 能有效解决当前港口的通信问题, 并能更好地满足港口数字化业务建设的需求, 应对挑战。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 公路水路交通运输信息化“十二五”发展规划[R]. 北京: 交通运输部, 2012.
- [2] 李世鹤. TD-SCDMA第三代移动通信系统标准[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [3] William Stallings. 无线通信与网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 王易志. 内通集群调度系统的分析及应用[J]. 科技资讯, 2011(22): 211-212.
- [5] 韩有为. 连云港港务局通信专用网简介[J]. 水运工程, 1993(5): 19-19, 18.

(本文编辑 郭雪珍)