



# 打桩对码头岸坡稳定的不利影响和防治措施

袁和平<sup>1</sup>, 陶桂兰<sup>2</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 高桩码头的打桩施工常常对码头岸坡的稳定性造成极大的不利影响。研究了打桩施工产生的超孔隙水压力、打桩对土体的扰动、打桩振动以及打桩速度等因素对岸坡稳定的不利影响, 并总结了由打桩引起的码头岸坡滑移的防治措施。

**关键词:** 打桩; 超孔隙水压力; 土体扰动; 振动; 岸坡稳定

中图分类号: TU 475<sup>+.9</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0072-04

## Negative impact on stability of dock slope by driving pile and prevention measures for it

YUAN He-ping<sup>1</sup>, TAO Gui-lan<sup>2</sup>

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Since the pile driving of standing-pile wharf often exerts much negative impact on the stability of dock slope, this paper studies the negative impact on the slope stability exerted by the excess pore water pressure, disturbance of soil, vibration and pile driving velocity, and puts forward the prevention measures for sliding caused by pile driving.

**Key words:** pile driving; excess pore pressure; disturbance of soil, vibration; stability of slope

高桩码头的岸坡稳定性是其设计和建造中一个十分值得关注的问题, 施工阶段的岸坡稳定性尤其值得重视。在工程实践中发现, 受打桩施工产生的各种不利因素的影响, 常常使本来稳定的岸坡在施工时发生变形, 导致已打好的桩基发生横向偏位和断裂, 严重的使已完成施工的上部结构与岸坡一起发生整体失稳, 造成很大的经济损失。如上海张华浜码头, 打桩时岸坡发生严重的变形<sup>[1]</sup>; 安徽荻港由于在打桩前没有考虑打桩对岸坡稳定的影响, 造成了已打好的几百根桩随岸坡下滑<sup>[2]</sup>; 南京新生圩码头打桩时亦发生过一定程度的岸坡滑移, 由于及早采取了措施才未造成严重的后果<sup>[2]</sup>。

### 1 打桩施工对岸坡稳定影响的不利因素

#### 1.1 超孔隙水压力

打桩引起的超孔隙水压力是影响码头岸坡

稳定的主要因素之一。打桩作用使桩周土体被挤开, 桩对土的挤压作用导致桩周围土体的应力增加。当土受到外力作用时, 外力仍然由孔隙水和有效应力平衡, 这样一来就导致桩周土的孔隙水压力升高, 于是土中就产生了由外力作用产生的超孔隙水压力。

太沙基有效应力原理和莫尔-库仑破坏准则如下:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为剪破面上的法向总应力;  $u$  为剪破面上的孔隙水压力;  $\sigma'$  为剪破面上的法向有效应力;  $c'$ ,  $\varphi'$  为土的有效应力强度指标;  $\tau_f$  为土的抗剪强度。当孔隙水压力上升时, 有效应力就会降低, 因此打桩产生的超孔隙水压力影响范围内的土体抗剪强度也要降低, 土的抗剪强度的降低必然导

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 袁和平 (1980—), 男, 硕士, 注册土木工程师 (港航), 从事港口航道工程设计研究工作。

致土坡的抗滑力(力矩)减小, 岸坡的变形和滑动往往由于打桩而诱发(图1)。

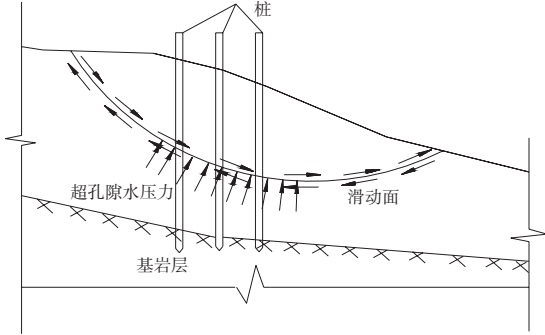


图1 超孔隙水压力对岸坡稳定影响

打桩后桩周土发生弹塑性屈服, 弹性区的超孔隙水压力较小, 可以忽略不计。塑性区的超孔隙水压力分布可以利用打桩后桩周土体的应力分布来研究, 由无限土体中的小孔扩张理论<sup>[3]</sup>可以确定打桩后桩周土塑性区任意一点3个方向的总应力增量:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_r = \left[ 2\ln\left(\frac{R}{\rho}\right) + 1 \right] c_u \\ \Delta\sigma_\theta = \left[ 2\ln\left(\frac{R}{\rho}\right) - 1 \right] c_u \\ \Delta\sigma_z = 2c_u \ln\left(\frac{R}{\rho}\right) \end{cases} \quad (3)$$

根据Henkel<sup>[4]</sup>公式, 在不排水条件下三向应力条件下孔隙水应力的表达式为:

$$\Delta u = \beta \Delta\sigma_{oct} + \alpha \Delta\tau_{oct} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_z} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta)^2 + (\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_\theta)^2 + (\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_z)^2} \quad (6)$$

式中:  $\Delta u$ 为孔隙水应力增量;  $\beta, \alpha$ 为空间应力条件下土的孔隙应力参数, 对于饱和土体 $\beta=1$ , 参数 $\alpha$ 与常用的轴对称三轴试验条件下测得的斯肯普顿孔隙应力系数 $A_f$ 之间的关系为:

$$\alpha = 0.707 (3A_f - 1) \quad (7)$$

打桩后桩周塑性区超孔隙水应力增量沿桩径方向的分布为:

$$\Delta u = \left[ 2\ln\left(\frac{R}{\rho}\right) + 1.73A_f - 0.58 \right] c_u \quad (8)$$

式中:  $R$ 为塑性区半径,  $R = r \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)c_u}}$ ;  $\rho$ 为计算点到桩中心的水平距离;  $c_u$ 为土的不排水强度;

$r$ 为桩的半径;  $E$ 为土的压缩模量;  $\mu$ 为土的泊松比。

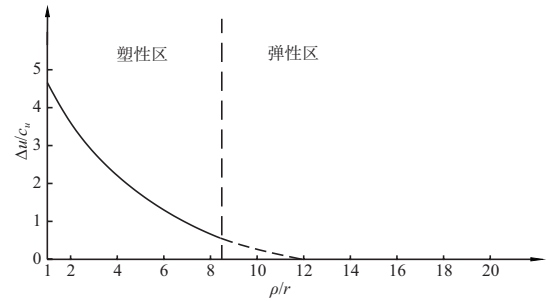


图2 超孔隙水压力增量沿径向的变化

塑性区超孔隙水压力沿径向与桩中心轴的距离增加成对数衰减, 单根桩引起的超孔隙水压力的有效分布范围大约8倍桩径。当在岸坡上连续打桩后, 超孔隙水压力的分布范围就会随打桩数量的增加而增加, 岸坡的稳定性就会随之而降低。

## 1.2 桩周土体扰动

桩周土体在打桩扰动作用下容易发生触变, 使岸坡土体强度降低。一方面, 土体被扰动, 使局部的片状土粒较平行地排列以及吸着水层中水分子的定向排列和阳离子的分布遭到破坏; 另一方面, 土的固体颗粒的特定排列和相互接触处由于孔隙水中析出的沉淀物引起的固结作用产生的附加强度由于打桩扰动被破坏。特别是在灵敏度较高的土中打桩时, 打桩扰动产生的不利作用尤为明显。

对于高灵敏黏土, 打桩扰动作用会使初始为固态的土体变成黏滞滑移状态, 这种状态的土强度非常低, 因此打桩时最容易发生土坡的变形和滑移。另外在高灵敏度的土中打桩时产生的超孔隙水压力也比在低灵敏度的土中打桩产生的超孔隙水压力要高很多, 如图3所示, 图中纵坐标为孔

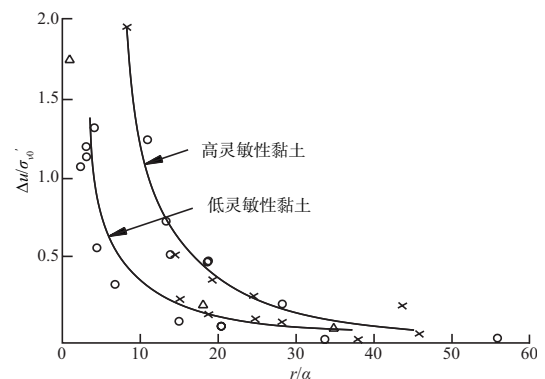


图3 不同灵敏度土中打桩超孔隙水压力变化<sup>[5]</sup>

隙水压力增量与土中初始应力的比值,横坐标为土塑性区半径与桩径的比值。

### 1.3 打桩振动

当桩在桩锤的撞击下贯入土中时,有相当部分的打桩能量会传递到土体中引起桩周一定范围内的土体发生振动,打桩产生的振动使振动影响范围内的土颗粒受到附加的惯性力,惯性力使岸坡土体的滑动力矩增大或者使抗滑力矩减小(图4)。对于沙性土,振动可使土发生液化而降低桩周土体的强度,因此码头施工时打桩振动对岸坡稳定影响也是十分明显的。

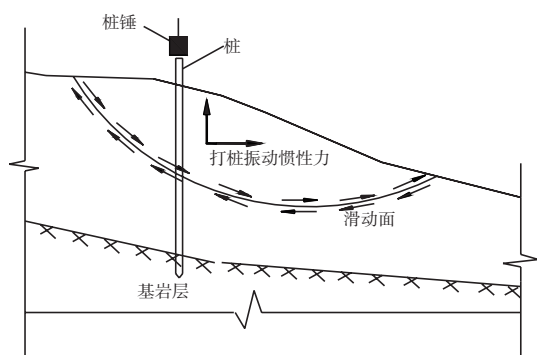


图4 打桩振动对岸坡稳定影响

在打桩过程中可以通过合理选择打桩机具来控制加速度的大小和传递范围,以降低打桩振动对岸坡稳定的不利影响。

### 1.4 打桩施工速度

打桩速度也是影响码头岸坡稳定的一个重要的因素,由于打桩结束后桩周土马上就要重新固结,超孔隙水压力就发生消散,如果打桩速度太快,已打桩基周围土体中的超孔隙水压力大面积升高且来不及消散,因此在岸坡同一断面上连续快速打桩是比较危险的,工程实践中也反映出当打桩速度过快时岸坡就发生变形甚至滑移。

## 2 打桩引起的滑坡的防治措施

### 2.1 打桩引起的滑坡的预防措施

#### 1) 岸坡地形地貌观测。

应结合建港地区的地形、地貌、地质状况,深入调查该地区的地层演变过程及边坡迁移情况,并结合临近已建工程岸坡的稳定状况对在建工程岸坡进行稳定性分析和评估。

#### 2) 岸坡地勘结果分析。

在设计阶段应充分了解该地区岸坡土的物理力学性质,大灵敏度、高含水率、高孔隙比的土由于打桩扰动作用容易发生触变,岸坡容易发生变形和失稳。

#### 3) 打桩前进行岸坡稳定性计算。

打桩前对岸坡进行圆弧滑动稳定计算,如果计算出的抗力分项系数小于或接近规范规定的最小值,就必须及早采取有效的防治措施。

#### 4) 岸坡稳定监测。

在可能出现滑移的岸坡上打桩,要随时监测桩基和岸坡的变形情况,尤其是已打桩的变形,它往往是岸坡变形和滑移的前兆,如在打桩时发现桩的横向变位过大甚至发生折断的现象,就必须立即停止打桩。

### 2.2 打桩引起的滑坡的治理措施

若计算出的码头岸坡稳定抗力分项系数过小或打桩时已经出现不稳定的迹象,可以采用下列措施防止岸坡变形和滑移的发生。

#### 1) 减缓坡度。

若施工时码头坡脚处天然水深大于码头的设计水深,可以在坡脚处抛填块石,这样既可以增加施工时期码头岸坡的稳定,也可以防止使用期码头岸坡在水流作用下发生冲刷和变形;或者在岸坡顶部进行阶梯状开挖削坡降低坡比、减小滑动体土重力和滑动力,增加岸坡的稳定性。

#### 2) 调整打桩顺序和速度。

通过调整打桩顺序可以避免短时间内在一处密集打桩,在保证方便打桩船进出的前提下采用间隔打桩,这样可以避免超孔隙水压力在岸坡的某一处集中,还能让打桩产生的超孔隙水压力有一定的时间得以消散。

#### 3) 打桩机具。

打桩振动测试中发现采用重锤轻打、低频锤击的方法可以有效地降低加速度的最大值,减小加速度的分布范围,对桩周土的扰动也较小,打桩时采用重锤轻打、低频锤击的方法可以在一定程度上降低打桩振动对岸坡稳定的影响。

#### 4) 改打桩为压桩。

有条件时可采用静压沉桩的方法,可以有效

降低沉桩对桩周土的扰动,减小超孔隙水压力的产生范围,土体中也不会产生振动惯性加速度。

#### 5) 其它方法。

打桩时低潮停打,高潮打,大潮汛不打,小潮汛打,水位骤降时应尽量避免打桩施工;还可以在打桩前对岸坡进行排水以减小土中的含水量。

### 3 工程实例分析与处理

某工程位于浙江沿海地区,在打桩施工过程中岸坡发生变形并导致个别已打好的桩基发生偏位。

对该工程岸坡进行地形地貌观测、地质勘察成果分析,工程地区的滨海为典型的河口冲积平原,土层主要是淤泥质粉质黏土和粉质黏土,这些土的特点是高含水率、大孔隙比、高灵敏度、高压缩性且强度低,由于上述地质条件,打桩施工对码头岸坡稳定的不利影响比较明显。

采用《港口工程地基规范》中的圆弧滑动条分法算得岸坡滑动稳定抗力分项系数 $\gamma_R=1.13$ ,打桩前岸坡稳定安全储备较小。当短时间内岸坡上打桩数量快速增加,打桩区域超孔隙水压力的分布面积急剧增加且来不及消散,灵敏性黏土在打桩扰动作用下发生触变,使岸坡土体强度进一步降低,岸坡变形和滑动导致桩基偏位。

此后采取了如下措施:1)打桩施工前对坡顶进行削坡,减小坡顶土重力,提高岸坡施工前的稳定性。2)调整打桩顺序,避免打桩船在同一区

域连续快速打桩,避免超孔隙水压力在同一区域大面积急剧增加,使超孔隙水压力有时间部分消散。3)打桩的时机尽量选择在高潮位和涨潮期,避免低潮和落潮时打桩。4)打桩时采用重锤轻打,低频锤击的方式施工,减小振动对岸坡稳定的影响。5)整个施工过程中对岸坡变形进行实时监测。

采取上述措施后有效避免了打桩施工对本工程岸坡稳定产生的不利影响,再未发生岸坡变形和桩基变位,防止了打桩时岸坡发生滑移带来的损失。

#### 参考文献:

- [1] 魏汝龙,张诚厚.提高码头岸坡稳定性的经验总结[G].第三届岩土工程论文集,1981:445-451.
- [2] 潘振社.高桩码头打桩稳定性验算的探讨[J].港工技术,1986(2):30-34.
- [3] Vesic A C. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal Soil Mechanics and Foundation Division: ASCE, 1972, 98(3): 265-290.
- [4] Henkel D J. The relationships between the strength, pore water pressure and volume change characteristics of saturated clays[J]. Geotechnique, 1959, 9(3): 119-132.
- [5] Poulos H G. Effect of pile driving on adjacent piles in clay[J]. Can Geotech J, 1994, 31: 856-867.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~

(上接第71页)

### 3 结语

本文所进行的重力式码头抗滑、抗倾稳定性对比验算,在案例结构类型、荷载作用方式及样本数量等方面覆盖的范围较广,代表性较好。虽然未包括作用短暂组合下的验算,有一定的局限性,但在作用持久组合下对比验算的结果所具有的趋向性是明显的。在引入综合分项系数 $\gamma_R$ 和调整结构调整系数 $\gamma_d$ 后,码头的抗滑、抗倾稳定性验算仍与JTS 167-2—2009基本一致,且总体上略

偏于安全。因此,按《码头结构设计规范》修编(征求意见稿修改稿)中,对重力式码头抗滑、抗倾稳定性验算表达式的修订是可靠的、可行的。

#### 参考文献:

- [1] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [2] GB 50158—2010 港口工程结构可靠性设计统一标准[S].

(本文编辑 郭雪珍)