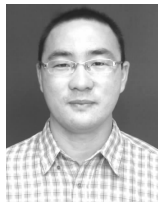


· 地基与基础 ·



# 软土地基上钢管桩围堰的基础理论研究\*

彭常青, 贺金仁, 林日练

(浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

**摘要:** 软土地基上的钢管桩围堰较传统土石围堰具有断面小、挡水水头高等优点, 但由于长期以来缺乏系统的计算理论, 仅凭经验或半经验设计和施工, 安全保证率低, 限制了其在工程上的运用。结合工程实例, 提出了影响钢管桩围堰稳定的主要指标及计算方法, 可供类似工程参考。

**关键词:** 软土地基; 钢管桩围堰; 基础理论

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0152-04

## Basic theory of steel pile cofferdam on soft clay foundation

PENG Chang-qing, HE Jin-ren, LIN Ri-lian

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** Comparing with the traditional earth rock cofferdam, the steel pile cofferdam has advantages of small cross-section and higher retaining water head when it is used on the soft clay foundation. But due to the lack of systemic theoretical calculation, the empirical or semi-empirical design and construction is low in safety assurance rate, therefore its application in engineering is limited. Combining with an engineering example, we present the main indicators and calculation methods which may affect the stability of the steel-pile cofferdam, and the result may serve as reference for the design and construction of similar projects.

**Keywords:** soft clay foundation; steel pile cofferdam; basic theory

软土具有强度低、承载力小、压缩性大、透水性差等特点。在软土地基上筑堤, 由于地基承载力不足, 经常会出现地面隆起、堤身倒塌的现象。为满足堤身整体稳定, 防止地基土剪切破坏, 通常需在堤脚设多级镇压平台反压, 因此在软土地基上建设的堤坝其断面往往较大。然而对于在有行洪、航运等要求, 不允许一次性断流的河道上修筑围堰而言, 如采用常规土石围堰会占用河道行洪面积、影响通航; 此外对某些地基土强度极低、挡水水头较高的围堰工程, 采用常规土石围堰往往不够经济。管桩围堰由于其断面较小、施工简单快捷、钢管还能重复利用等优点, 在软土地基上施工场地狭窄、挡水水头较高的水利工

程围堰设计上有广泛的应用。但由于长期以来缺乏系统的计算理论, 仅凭经验或半经验设计和施工, 安全保证率低, 限制了其在工程上的运用, 因此很有必要对钢管桩围堰的基础理论进行研究。

### 1 钢管桩围堰的稳定分析

钢管桩围堰的受力机理与基坑工程上的排桩支护基本类似, 根据规范<sup>[1]</sup>其稳定分析主要包括抗倾、抗滑、钢管及拉杆的强度验算等。

#### 1.1 围堰抗倾稳定计算

抗倾稳定计算的目的是确定钢管桩的嵌固深度, 其计算简图见图1, 计算公式如下:

$$\frac{E_{pk} a_{p1} + GB/2}{E_{ak} a_{a1}} \geq K_e \quad (1)$$

收稿日期: 2014-10-14

\*基金项目: 浙江省水利厅科技项目 (RB1106)

作者简介: 彭常青 (1985—), 男, 工程师, 主要从事水工设计。

式中:  $K_e$  为围堰抗倾稳定安全系数, 一级基坑取 1.25, 二级基坑取 1.20, 三级基坑取 1.15;  $E_{ak}$ 、 $E_{pk}$  为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力标准值 (kN);  $a_{a1}$ 、 $a_{p1}$  为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力合力作用点至挡土构建底端的距离 (m);  $B$ 、 $h$ 、 $l_d$  分别为围堰宽度、基坑深度、钢管桩入土深度 (m);  $G$  为堰顶至钢管桩底部之间土体自重及堰顶超载之和 (kN)。

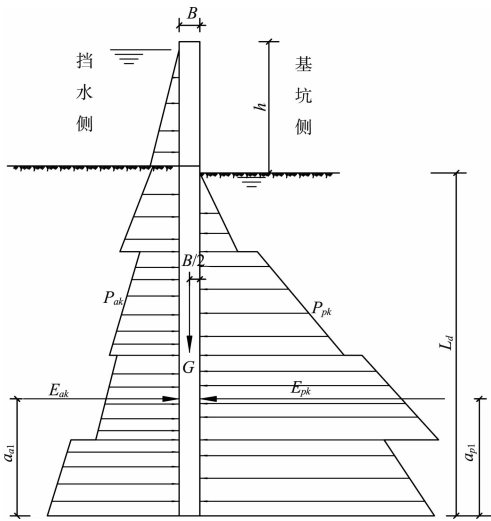


图 1 围堰抗倾稳定计算示意图

### 1.2 围堰整体稳定计算

根据规范, 围堰整体稳定一般采用瑞典条分法计算, 其计算公式为:

$$K = \frac{\sum (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

式中:  $K$  为整体抗滑稳定安全系数, 一级基坑取 1.35, 二级基坑取 1.30, 三级基坑取 1.25;  $W_i$  为第  $i$  滑动土条的重力 (kN);  $\alpha_i$  为第  $i$  滑动土条底滑面的倾角 ( $^\circ$ );  $l_i$  为第  $i$  滑动土条滑弧长度 (m);  $c_i$  为第  $i$  滑动土条底面的粘聚力 (kPa);  $\varphi_i$  为第  $i$  滑动土条底面的内摩擦角 ( $^\circ$ )。

钢管桩围堰由于有内、外侧钢管与钢管间横向拉杆和围堰的作用, 因此只要钢管、横向拉杆、围堰等材料不出现破坏, 则钢管桩围堰可视为一刚性体, 其合理的滑动面是以围堰中心线与原地面的交线为圆心、以圆心至钢管桩底部为半径的圆弧 (图 2)。

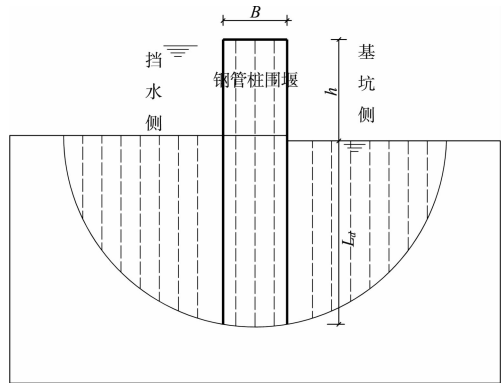


图 2 围堰整体稳定计算示意图

### 1.3 钢管桩及拉杆的强度验算<sup>[2]</sup>

#### 1.3.1 钢管桩的极限弯矩计算

钢管桩所能承受的极限弯矩按材料力学方法计算, 对于圆形薄壁钢管其容许弯矩按下式计算:

$$[\sigma] \geq \frac{M}{W_z} \quad (3)$$

$$W_z = 0.785 4D^2 t \quad (4)$$

式中:  $M$  为钢管桩容许最大弯矩 (kN·m);  $[\sigma]$  为材料的容许抗弯应力 (kPa), Q235 钢的容许抗弯应力取 215 kPa;  $W_z$  为弯曲截面系数 ( $m^3$ );  $D$  为钢管外径 (m);  $t$  为钢管壁厚 (m)。

#### 1.3.2 拉杆的极限拉力计算

钢管桩围堰在填土压力的作用下, 有向两侧挤开的趋势, 为确保钢管桩围堰的整体性和抵抗来自钢管内侧的土压力, 往往需要设置若干道连接前、后排钢管的横向拉杆, 其容许拉力按下式计算:

$$[\sigma] \geq \frac{F_N}{A} \quad (5)$$

式中:  $F_N$  为拉杆容许最大轴力 (kN);  $[\sigma]$  为钢材的容许抗拉应力 (kPa); Q235 钢的容许抗拉应力取 215 kPa;  $A$  为拉杆的截面面积 ( $m^2$ )。

#### 1.3.3 钢管桩的内力计算

钢管桩围堰的内力计算可简化成平面刚架模型进行, 其前、后桩间土对桩侧的压力可按式计算:

$$p_c = (2\alpha - \alpha^2) p_{ak} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{s_y - d}{h \tan(45^\circ - \varphi_m / 2)} \quad (7)$$

式中:  $p_c$  为前、后排桩间土对桩侧的压力 (kPa);  $s_y$  为双排桩的排距 (m);  $d$  为桩的直径 (m);

$p_{ak}$ 为支护结构外侧第*i*层土中计算点的主动土压力强度标准值(kPa);  $h$ 为基坑深度(m);  $\varphi_m$ 为基坑底面以上各土层按厚度加权的等效内摩擦角平均值(°);  $\alpha$ 为计算系数,当 $\alpha > 1$ 时,取 $\alpha = 1$ 。

如图3所示,假定钢管沿深度方向的变形为线性变化,则在材料弹性变形范围内,各层拉杆的轴力符合胡克定律,即:

$$\frac{F_{N1}}{x_1} = \frac{F_{N2}}{x_2} = \dots = \frac{F_{Nn}}{x_n} \quad (8)$$

通过求解力的平衡方程,即可得出拉杆的内力。

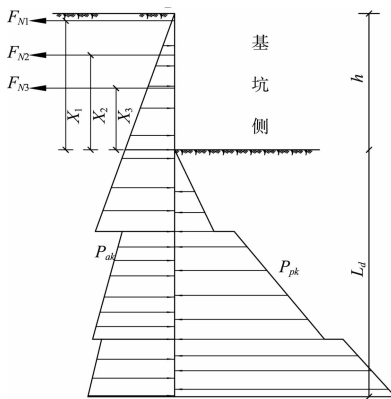


图3 钢管的受力分析

## 2 工程实例<sup>[3]</sup>

某新建闸站工程位于杭嘉湖东部平原一兼有行洪排涝和航运要求的狭窄河道上,闸站施工期间河道现有的各项功能均不能废除。经研究河道拟分二期截流,一期在右侧河道上修筑纵向围堰和上、下游横向围堰,先施工水闸,期间利用束窄后的左侧河道导流和通航;二期利用已建纵向围堰以及在左侧河道上修筑的上、下游横向围堰施工泵站,期间利用新建水闸导流和通航。

该围堰为4级建筑物,防洪标准为20 a一遇,围堰顶高程6.70 m,20 a一遇设计挡水位6.11 m,河道常水位1.30 m,河底高程-2.30 m,基坑侧最低开挖高程-2.80 m,基坑深度为9.50 m,为一级基坑。

根据地质勘探,围堰基础范围内土层从上至下依次为:Ⅲ<sub>1</sub>层淤泥质黏土、Ⅳ<sub>2</sub>层粉质黏土、Ⅴ<sub>1</sub>层黏土夹砂、Ⅵ<sub>1</sub>层黏土等组成,其主要物理力学指标见表1。

表1 地基土物理力学性参数

土层名称	层底高程/m	湿密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	饱和密度 $\rho_{sat}/(t \cdot m^{-3})$	粘聚力 $c/kPa$	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	主动土压力 系数 $K_{a,i}$	被动土压力 系数 $K_{p,i}$
Ⅲ <sub>1</sub> 淤泥质黏土	-8.50	1.680	1.730	5.00	3.10	0.897	1.114
Ⅳ <sub>2</sub> 粉质黏土	-16.00	1.910	1.990	31.00	14.80	0.593	1.686
Ⅴ <sub>1</sub> 黏土夹砂	-22.10	1.860	1.920	15.00	18.00	0.528	1.894
Ⅵ <sub>1</sub> 黏土	-27.60	1.780	1.820	14.40	10.80	0.684	1.461

围堰设计采用双排钢管桩,围堰顶宽7.0 m,桩底高程为-20.0 m;钢管采用Q235钢,水平间距0.6 m,直径273 mm,壁厚为12 mm;拉杆也采用Q235钢,直径40 mm,水平间距为1.2 m,分别布置在高程1.5、3.8、6.2 m处,围堰典型断面见图4。

堰顶超载按10 kPa考虑,主动土压力、被动土压力按水土合算法计算,钢管的许用弯矩取钢管允许最大弯矩的80%,经计算可得围堰的抗倾稳定安全系数为1.27 > 1.25,抗滑稳定安全系数为4.44 > 1.35,拉杆的最大拉力145.4 kN < 270 kN,钢管桩围堰的各项稳定指标均满足规范要求。

## 3 设计需注意的几个问题

### 3.1 围堰宽度的确定

钢管桩围堰较常规土石围堰的优越之处就在于其断面较小,因此合理确定围堰的宽度是钢板桩围堰设计的首要问题。围堰宽度的确定需综合考虑围堰的挡水水头、钢管的可能入土深度(地质条件)、施工场地空间和交通等。一般而言软土地基上围堰的防渗问题不是主要控制因素,对于采用黏性土填筑的围堰,其宽度达到挡水水头的1/3 ~ 1/2即可以满足渗透稳定的要求。而围堰的宽度对抗倾稳定和钢管的入土深度非常敏感,图5列出了在不同的围堰宽度下,围堰抗倾稳定安全

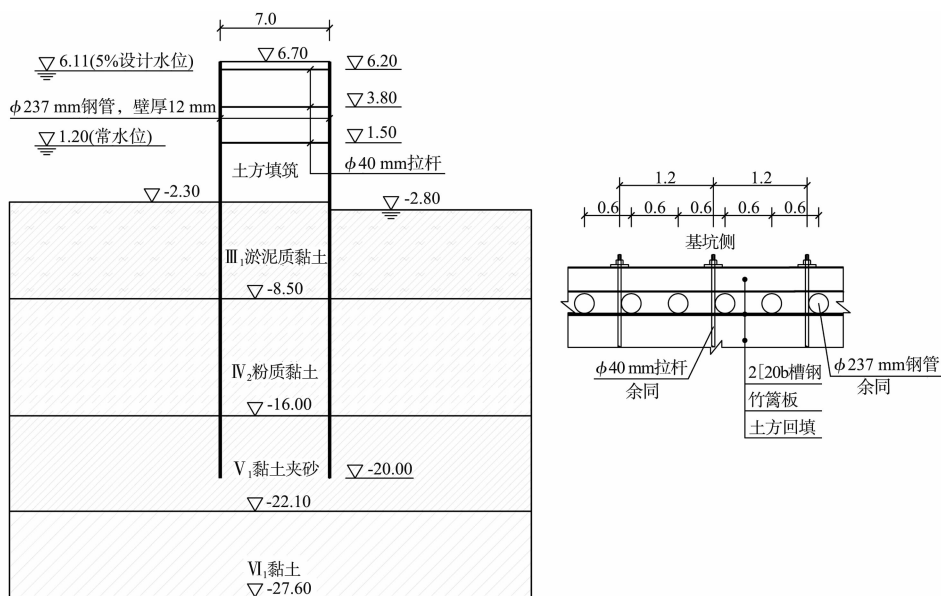


图 4 钢管桩围堰典型断面 (单位: m)

系数与钢管桩底高程的关系。由图 5 可知, 在相同的人土深度下, 围堰宽度越大, 安全系数越大, 且桩基入土深度越浅, 围堰宽度对抗倾稳定安全系数的影响越明显, 但也存在极值, 当围堰宽度增大至一定程度时, 安全系数不再增加; 以达到相同的安全系数为目标, 通过增加围堰的宽度往往比增加钢管桩入土深度更容易达到, 因此若场地空间容许或钢管入土深度受到限制, 则可尽量增加围堰的宽度, 若场地较狭窄, 则需考虑增加钢管的入土深度。

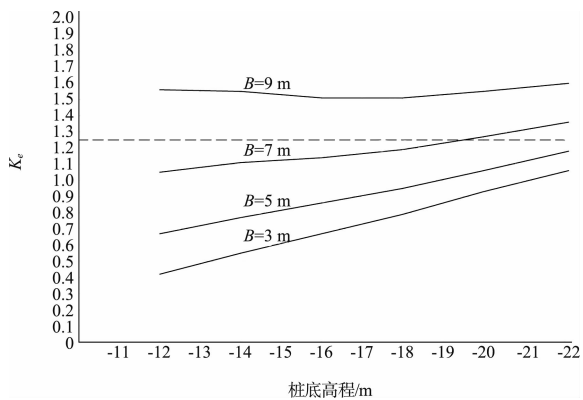


图 5 围堰抗倾稳定与钢管入土深度关系

### 3.2 拉杆的布置

由于圆形钢管桩较异形钢板桩抗弯截面模量要小得多, 因此钢管桩自身所能承受的弯矩较土压力作用在基坑底的弯矩小得多, 本例中钢管桩的极限

抗弯弯矩仅为土压力在基坑底面作用弯矩的 7.2%, 剩余绝大部分需要靠横向拉杆的拉力矩来承担。因此在钢管桩围堰设计过程中, 务必重视拉杆的作用, 避免拉杆设置过少导致支护钢管屈服。

### 4 结论

- 1) 钢管桩围堰的受力机理与双排桩基本类似, 运用基坑支护的理论进行钢管桩围堰的设计是可行的。
- 2) 钢管桩围堰设计过程中, 围堰的顶宽和钢管桩的入土深度之间存在反向相关关系, 以围堰抗倾稳定安全系数为目标函数, 围堰越宽, 钢管长度越短, 反之亦然。
- 3) 通过本文的分析可知, 钢管桩围堰的拉杆承担了 92.8% 的土压力弯矩, 而钢管仅承担了 7.2% 的土压力弯矩, 因此钢管桩围堰的设计过程中合理布置拉杆比仅增大钢管尺寸更为有效和经济。

### 参考文献:

[1] JGJ 120—2012 建筑基坑工程设计规范 [S].  
 [2] 刘志明, 王德信, 汪德耀. 水工设计手册. 第一卷 基础理论[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.  
 [3] 彭常青. 湘溪圩区整治工程初步设计报告(报批稿) [R]. 杭州: 浙江省水利水电勘测设计院, 2012.

(本文编辑 武亚庆)