

双排钢桩围堰稳定性计算分析

马 可

中亿丰建设集团股份有限公司，江苏 苏州 215131

[摘要] 临水钢围堰的稳定性是基坑安全施工的关键因素，其构件的过大变形将导致钢围堰失稳，给工程带来巨大损失。此文就苏州地区常用的一种填土钢围堰的设计，对其整体稳定性、抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性等进行计算，确保围堰设计、施工的安全。

[关键词] 钢围堰；稳定性分析；强度验算

DOI: 10.33142/ect.v2i1.10672 中图分类号: TU443 文献标识码: A

Stability Calculation and Analysis of a Common Steel Cofferdam

MA Ke

ZYF Construction Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215133, China

Abstract: The stability of the steel cofferdam near the water is the key factor for the safe construction of the foundation pit. The excessive deformation of its components will lead to the instability of the steel cofferdam, which will bring huge losses to the project. This paper calculates the overall stability, anti overturning stability and anti sliding stability of a commonly used fill steel cofferdam in Suzhou to ensure the safety of cofferdam design and construction.

Keywords: steel cofferdam; stability analysis; strength; calculation

引言

在岸边及水面区域施工支护工程，相对于其他的支护形式，钢（管）板桩承载能力、抗弯能力及施工便利性、场地适应性均较好。填土钢围堰利用在双排钢管桩之间填实黏性土，一方面隔断了外界的水力联系，一方面增大了围堰断面的刚度，加强了围堰抵抗变形的能力，是苏州地区常用的一种办法。

1 工程概况

拟建场地位于苏州市某景区内，为修葺湖边驳岸，需在拟建场地设置围堰并抽干场内湖水，以便施工作业。水面标高为 1.40m，水深在 2.00~3.00m 左右，淤泥厚约 0.35~0.50m。场区地貌属于长江三角洲冲积平原，地貌类型单一，湖底各土层信息与物理力学指标如表 1 所示。

表 1 土层物理力学指标

土层名称	重度	固结快剪		渗透系数 (cm/s)
	γ_0 (kN/m ³)	C_k (kPa)	ϕ_k (°)	
②淤泥质粉质黏土	17.3	8.5	6	2.0E-06
③粉质黏土	19.3	36.7	13.2	1.0E-06
④粉土夹粉砂	19.1	7.7	30.5	7.0E-04

2 钢围堰型式

围堰断面如图 1 所示，钢管桩采用外径为 273mm 的无缝钢管桩，钢管桩插入围堰硬土层的深度不应小于 3.0m。钢管桩间填筑黏土，施工时应每填 1~2m 高黏土后，在钢管桩外侧抛填袋装黏土。施工时先清除围堰部位浮淤并打

钢管桩，可采用平行作业法：已打好钢管桩的部位，先挂好竹帘片和土工布，再进行填土作业，宜考虑从两端开始，突击使坝身露出水面，后逐步延伸直至合拢。围堰必须填筑到设计标高后方可抽水。围堰填筑须采用黏土，回填土分层压实，禁止采用淤泥填筑。因围堰为水中倒土，预计围堰沉降量较大，因此施工时须预留沉降量。在整个工程施工期内应成立围堰护堤组巡查观测围堰沉降、变形、进行堤身维护。当堤身高程低于设计值 10cm 时，须进行培土加高，使其保持设计标高，保证围堰安全。

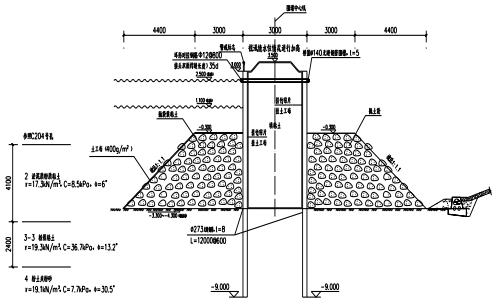


图 1 围堰剖面图

3 钢围堰计算

针对国内类似围堰工程安全性、稳定性方面，徐汉平等^[1]对钢板桩围堰的稳定性与承载力展开了分析，计算出相应工况下抗倾覆稳定性、抗滑移稳定性等稳定性安全系数，板桩承载力计算是基于土力学经典模型进行求解。

若在围堰刚度及承载力符合计算要求的前提下，钢围堰可以用重力式挡墙、双排桩的模式来模拟，其稳定性、

抗倾覆等计算参照《建筑基坑支护技术规程》的要求，临水侧可将水简化成一层黏聚力与内摩擦角均为零的土层，再采用启明星或理正软件计算^[2]。

在计算土压力时，采用经典土压力理论分析，这里以朗肯土压力为计算模型，其假定为：（1）刚性墙身，无墙体变形；（2）墙后填土延伸到无限远处，填土表面水平；（3）墙背直立、平滑^[6]。其实围堰并不满足基本假定，但相关文献均按照朗肯土压力的主、被动土压力理论进行计算；

整体稳定性通常采用条分法，条分法是将滑动土体按竖直方向划分成各个土条，将图2中的无限小弧长假设为有限弧长。每个土条代表一个刚体，土条宽度按1m取，依次求出作用于土条上的力对圆心的滑动力矩和抗滑力矩，然后求出对应的土坡稳定安全系数^[5]。

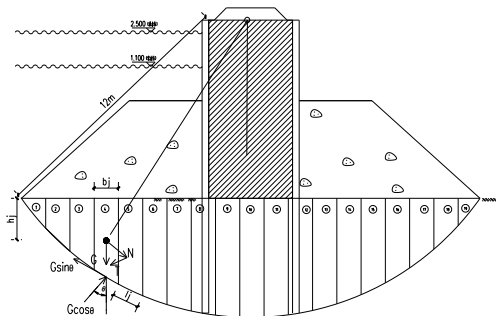


图2 围堰整体稳定性计算简图

（1）圆弧滑动条分法整体稳定性验算：

$$K_{si} = \frac{\sum \{c_j l_j + (q_j b_j + \Delta G) \cos \theta_j \tan \varphi_j\}}{\sum (q_j b_j + \Delta G) \sin \theta_j} \quad (1)$$

K_{si} —圆弧滑动稳定安全系数；

φ_j —土条滑弧面处的内摩擦角，(°)；

b_j —土条的宽度，m；

θ_j —土条滑弧面中心点处的法线与垂直面的夹角，(°)；

h_j —土条滑弧面中心点与地面（坑底平面）的距离；

l_j —土条滑弧长度，m，取 $l_j = b_j / \cos \theta_j$ ；

q_j —土条上的附加分布荷载标准值，kPa；

ΔG —土条的自重，kN，按天然重度计算。

将围堰假定成基坑的形式，以支撑结构顶部内侧 O 点为圆心，将 O 点与桩底连线作为滑动圆弧的半径。具体参数与计算见表2、表3。

表2 土层条分参数表

条	θ_j	h_j	l_j	γ	c_j	φ_j	q_j	θ_j
1	50.9	1.12	1.58	19.2	36.7	13.2	68	50.9
2	44	2.08	1.39	19.2	36.7	13.2	68	44
3	37.2	2.85	1.26	19.2	36.7	13.2	68	37.2
4	31.2	3.46	1.17	19.2	36.7	13.2	68	31.2
5	25.2	3.95	1.11	19.2	7.7	30.5	68	25.2
6	20.2	4.32	1.06	19.2	7.7	30.5	68	20.2

7	14.9	4.59	1.03	19.2	7.7	30.5	68	14.9
8	9.8	4.77	1.01	19.2	7.7	30.5	68	9.8
9	4.8	4.81	1	19.2	7.7	30.5	68	4.8
10	0.2	4.87	1	19.2	7.7	30.5	68	0.2
11	5.2	4.79	1	19.2	7.7	30.5	68	5.2
12	10.5	4.62	1.01	19.2	7.7	30.5	68	10.5
13	15.4	4.35	1.04	19.2	7.7	30.5	0	15.4
14	20.6	3.99	1.07	19.2	7.7	30.5	0	20.6
15	26.4	3.52	1.12	19.2	7.7	30.5	0	26.4
16	31.7	2.92	1.18	19.2	36.7	13.2	0	31.7
17	37.8	2.17	1.27	19.2	36.7	13.2	0	37.8
18	44.4	1.22	1.40	19.2	36.7	13.2	0	44.4
19	51.2	0.58	1.60	19.2	36.7	13.2	0	51.2

表3 基坑土条抗滑力与滑动力计算

条	$c_j l_j$	$q_j b_j$	ΔG_j	抗滑力		滑动力
				$(q_j b_j + \Delta G) \cos \theta_j$ $\tan \varphi_j + c_j l_j$	$\Delta G \sin \theta_j$	$(q_j b_j + \Delta G) \sin \theta_j$
1	57.99	68	21.50	71.26	0	69.46
2	51.01	68	39.94	69.25	0	75.02
3	46.24	68	54.72	69.23	0	74.25
4	42.94	68	66.43	69.95	0	69.64
5	8.55	68	75.84	85.22	0	61.28
6	8.16	68	82.94	91.56	0	52.08
7	7.93	68	88.13	96.76	0	40.12
8	7.78	68	91.58	100.36	0	27.13
9	7.70	68	92.35	101.77	0	13.47
10	7.70	68	93.50	102.83	0	0.48
11	7.70	68	91.97	101.54	0	14.56
12	7.78	68	88.70	98.51	0	28.52
13	8.01	0	83.52	55.43	22.13	0
14	8.24	0	76.61	50.47	26.97	0
15	8.62	0	67.58	44.29	30.01	0
16	43.31	0	56.06	54.52	29.43	0
17	46.61	0	41.66	54.34	25.54	0
18	51.38	0	23.42	55.31	16.40	0
19	58.72	0	11.14	60.36	8.69	0

$$K_{si} = \frac{\sum \{c_j l_j + (q_j b_j + \Delta G) \cos \theta_j \tan \varphi_j\}}{\sum (q_j b_j + \Delta G) \sin \theta_j} = 3.02 > 1.30 \quad (2)$$

因此，对于指定圆心 O 的滑弧，其整体稳定性验算满足规范要求。该滑弧并不一定是最危险滑动面，应进行多次试算，找到最危险滑动面，也就找到最小安全系数的滑动面^[7]。

对围堰采用挡土墙类型为双排桩计算模型；模型参数桩长：12m；钢管桩间距：0.6m；桩钢材牌号：Q235；桩

径: 0.273m; 壁厚: 8mm; 后排桩长: 12m; 后排桩间距: 0.6m; 前后排钢管桩间距: 3m。对围堰后填土采用盆式开挖模型进行计算具体信息详见表 4。

表 4 工况信息表

类型	深度 (m)	盆式开挖		
		台高 (m)	台宽 (m)	坡宽 (m)
开挖	3.3	4	3	4

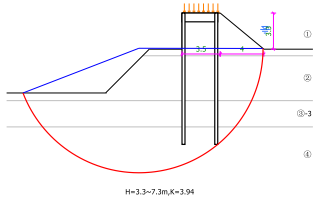


图 3 圆弧滑动法电算计算简图

圆心(-3.95, 3.22), 半径 11.37m, 滑动力 499.3kN/m, 抗滑力 968.9kN/m, 假定圆弧滑动法计算圆心与计算模型的计算圆心并不是同一点, 计算模型经过多次试算与假定圆心安全系数有一定的不同。

(2) 围堰抗倾覆稳定性计算。对于填土钢管桩围堰, 可按悬臂式支挡结构来计算, 抗倾覆力矩考虑水压力: 围堰最不利工况是河水水位达到最高洪水位, 坑内抽排水完成对此状态的围堰进行抗倾覆稳定性验算, 参照《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120-2012 4.2.1 条^[5]:

$$K \leq \frac{E_{pk} a_{p1}}{E_{ak} a_{a1} + E_{wk} a_{aw}} \quad (3)$$

已知 $\varphi_1=6^\circ$ $\varphi_2=13.2^\circ$ $\varphi_3=30.5^\circ$ 主动土压力系数:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (4)$$

$$K_{a1}=0.81, K_{a2}=0.63, K_{a3}=0.33 \quad (5)$$

临界深度:

$$Z_0 = \frac{1}{\gamma_1} (\frac{2c_1}{\sqrt{K_{a1}}} - q) = 1.1m \quad (6)$$

第一层土的主动土压力强度:

$$P_{1上} = qK_{a1} - 2c_1\sqrt{K_{a1}} = -15.3kPa \quad (7)$$

$$P_{1下} = (\gamma_1 h_1 + q) K_{a1} - 2c_1\sqrt{K_{a1}} = 42.15kPa \quad (8)$$

第二层土的主动土压力强度:

$$P_{2上} = (\gamma_1 h_1 + q) K_{a2} - 2c_2\sqrt{K_{a2}} = -13.57kPa \quad (9)$$

$$P_{2下} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q) K_{a2} - 2c_2\sqrt{K_{a2}} = 15.61kPa \quad (10)$$

第三层土的主动土压力强度:

$$P_{3上} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q) K_{a3} - 2c_3\sqrt{K_{a3}} = 29.98kPa \quad (11)$$

$$P_{3下} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 + q) K_{a3} - 2c_3\sqrt{K_{a3}} = 40.10kPa \quad (12)$$

主动土压力合力值:

$$E_a = \frac{1}{2} \times 42.15 \times 4 + \frac{1}{2} \times 15.61 \times 1.1 + \frac{1}{2} \times (29.98 + 40.1) \times 1.6 = 148.95kN/m \quad (13)$$

Ea 距墙角的高度:

$$x_a = \left[\frac{29.98 \times 0.8 + 10.1 \times \frac{1}{3} \times 1.6 + 15.6 \times (\frac{1}{3} \times 1.3 + 1.6) + 42.15 \times 5}{148.95} \right] / E_a = 1.83m \quad (14)$$

水压力按最不利考虑:

$$\mu_a = 10 \times 6.8 = 68kPa \quad (15)$$

$$E_{\mu a} = \frac{1}{3} \times 6.8 \times 68 = 154.13kN/m \quad (16)$$

被动土压力系数:

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \quad (17)$$

$$K_{p1}=1.23, K_{p2}=1.59, K_{p3}=3.06 \quad (18)$$

第一层土的被动土压力强度:

$$P_{1上} = qK_{p1} + 2c_1\sqrt{K_{p1}} = 18.85kPa \quad (19)$$

$$P_{1下} = (\gamma_1 h_1 + q) K_{p1} + 2c_1\sqrt{K_{p1}} = 33.75kPa \quad (20)$$

第二层土的被动土压力强度:

$$P_{2上} = (\gamma_1 h_1 + q) K_{p2} + 2c_2\sqrt{K_{p2}} = 111.80kPa \quad (21)$$

$$P_{2下} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q) K_{p2} + 2c_2\sqrt{K_{p2}} = 185.45kPa \quad (22)$$

第三层土的被动土压力强度:

$$P_{3上} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q) K_{p3} - 2c_3\sqrt{K_{p3}} = 205.74kPa \quad (23)$$

$$P_{3下} = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 + q) K_{p3} + 2c_3\sqrt{K_{p3}} = 299.25kPa \quad (24)$$

主动土压力合力值:

$$E_p = \frac{1}{2} \times (18.85 + 33.75) \times 0.7 + \frac{1}{2} \times (185.45 + 111.8) \times 2.4 + \frac{1}{2} \times (205.74 + 299.25) \times 1.6 = 779.11kN/m \quad (25)$$

Ep 距墙角的高度: $x_p = 1.8m$

$$K = \frac{E_{pk} a_{p1}}{E_{ak} a_{a1} + E_{wk} a_{aw}} = \frac{1402.38}{796.63} = 1.76 > 1.20 \quad (26)$$

钢管桩围堰最不利工况河水水位达到最高洪水位, 坑内抽排水完成对此状态的围堰进行抗倾覆稳定性验算满足规范要求。

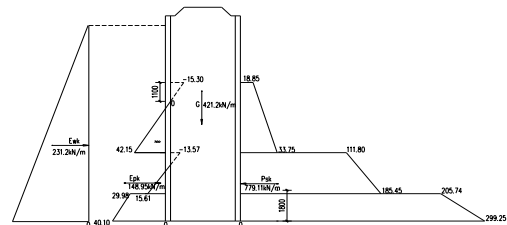


图 4 土压力计算简图

(3) 抗滑移稳定性验算

$$K_{s1} = \frac{E_{pk} + (G - \mu_m B) \tan \varphi + cB}{E_{ak}} = 3.26 > 1.20 \quad (27)$$

K_{s1} —抗滑移安全系数;

G —堰芯填土的自重 (kN/m);

μ_m —围堰底面上的水压力 (kPa);

c 、 φ —围堰底面下土层的粘聚力、内摩擦角;

钢管桩围堰最不利工况下满足抗滑移稳定性要求,围堰若采用重力式挡墙的计算模型时,墙的嵌固深度和墙的宽度是两个主要的设计参数,有关资料的分析研究结果表明,一般情况下,当墙的嵌固深度符合整体稳定性时,抗隆起稳定性会自然满足。整体稳定性决定嵌固深度下限,采用按整体稳定性确定的嵌固条件,再按墙的抗倾覆稳定性计算墙宽,挡墙宽一般自然能够同时满足抗滑移条件^[6]。

(4) 墙底隆起验算

当挡土构件底面以下有软弱下卧层时,坑底隆起稳定性的验算部位尚应包括软弱下卧层^[6]。

$\phi = 30.5^\circ$, $c = 7.7 kPa$ 。

$$K = \frac{\sigma_p \cdot N_q + c \cdot N_c}{\sigma_a} = \frac{89 \cdot 19.48 + 7.7 \cdot 31.37}{204.6} = 9.65 > 1.60 \quad (28)$$

安全系数大于 1.6, 满足规范要求。

(5) 钢材强度验算

根据《建筑基坑支护技术规程》3.1.6 条规定, 支护结构构件按承载能力极限状态设计时, 作用基本组合分项系数不应小于 1.25, 对于安全等级为一、二、三级, 结构重要性系数不应小于 1.1、1.0、0.9^[6]。

① 排桩钢管桩钢材强度验算:

$$\sigma = \frac{1.25 \gamma_0 |N|}{A} + \frac{1.25 \gamma_0 |M|}{W} = 67.7 MPa \leq f = 215 MPa \quad (29)$$

② 后排桩钢管桩钢材强度验算:

$$\sigma = \frac{1.25 \gamma_0 |N|}{A} + \frac{1.25 \gamma_0 |M|}{W} = 67.5 MPa \leq f = 215 MPa \quad (30)$$

对于前排桩钢管桩最大应力约为 70Mpa, 钢管桩强度利用率约 32.5%。

4 监测内容

围堰监测应包括: 围护桩顶沉降及水平位移, 土体深层水平位移、坑外水位、堰顶沉降及拉杆内力等监测。应建立观测制度, 及时反馈情况, 平时做到常维护, 减轻围堰负担, 注意围堰保护。围堰主体由黏性土填土组成, 使用过程中堰体沉降量较大, 应预先备足土源、机械设备, 遇有紧急情况及时投入到加固施工中。

5 结论及建议

本文对苏州地区常用钢围堰设计型式进行阐述, 结合本工程的工程地质条件, 对围堰支护结构的变形和受力进行分析, 采用手算及 FRWS9.0 计算软件, 通过对围堰整体稳定性、抗滑移、抗倾覆及钢管强度验算, 说明了该型式满足工程规范对安全稳定性的要求, 从计算理论上验证了钢围堰施工的可行性、安全性, 并分析得出以下结论和建议:

(1) 本文系统地阐述了围堰的稳定性及承载力的计算方法, 对围堰内土压力的计算方法进行讨论, 在计算一般较小围堰时可采用主被动土压力。(2) 围堰顶一般不作为材料堆载场地或施工便道使用, 围堰进行堰心填土作业时加强巡视作业, 避免拉杆出现断裂引起围堰的局部破坏, 加强对钢构件的保护。(3) 围堰墙背堆土或抛石利于结构的受力情况。背土侧堆土或抛石能够等同于缩短钢管的悬臂长度, 会显著增加围堰的安全性, 从而减少构件内力, 针对长、大围堰, 尤其在水深很深情况下, 也不失为一种既安全又经济的做法。(4) 因围堰为水中倒土, 预计围堰沉降量较大, 因此施工时须预留沉降量。在整个工程施工期内应成立围堰护堤组巡查观测围堰沉降、变形、进行堤身维护。当堤身高程低于设计值 10cm 时, 须进行培土加高, 使其保持设计标高, 保证围堰安全。

[参考文献]

- [1] 徐汉平, 黄雪阳. 沉管隧道双排钢板桩围堰支护计算探讨[J]. 广东土木与建筑, 2019(2): 51-53.
 - [2] 余雯. 龙湖隧道工程双排桩钢板桩围堰结构研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(5): 213-215.
 - [3] 赵振平. 京杭运河围堰施工受力分析[J]. 公路, 2014(3): 115-117.
 - [4] 宋尚. 某大型湖底明挖隧道钢围堰设计要点[J]. 城市道桥与防洪, 2021(7): 10.
 - [5] 李广信. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
 - [6] 《建筑基坑支护技术规程》编委会. 建筑基坑支护技术规程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
 - [7] 蔡新. 混凝土面板堆石坝结构分析与优化设计研究[D]. 江苏: 河海大学, 2005.
 - [8] 原华等. 公路、铁路与房建行业钢结构设计规范比较研究[J]. 高等建筑教育, 2014(4): 10.
- 作者简介: 马可 (1985.4—), 男, 毕业于南京大学地质工程专业, 研究生学历, 现就职于中亿丰建设集团股份有限公司, 任职勘察院技术负责人, 任职年限 8 年, 高级工程师。