

大跨度连续刚构桥桥墩基础钢管桩 围堰施工技术研究^{*}

张正南

(贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要:深水河床地质条件下桥墩基础施工给围堰施工带来了新的挑战。文中结合贵州某特大桥梁桥墩基础施工特点及地质条件,采用钢管桩围堰施工技术,通过围堰最不利工况受力分析,设计制作钢管桩围堰结构;采用 MIDAS/Civil 软件对围堰结构进行验算,结果表明,该钢管桩围堰结构强度、封底混凝土抗浮力和强度、围堰整体稳定性均满足实际施工需要。

关键词:桥梁;桥墩;钢管桩围堰;深水基础;施工技术

中图分类号:U445.55

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)02-0101-04

桥梁建设中,合理选择围堰结构是保证施工安全和质量的重要前提^[1]。围堰类型主要有木围堰、混凝土围堰、钢围堰、钢管桩围堰等。木围堰是将木桩打入河床而成,由于木质抗腐蚀性较差,木围堰受河床高度和水流速度的影响较大;混凝土围堰具有良好的抗水能力,适用于深水施工,但施工完成后不能回收利用,经济性欠缺;钢围堰可重复利用,适用于水流较大及深度较深的地区,对施工组织和条件设备有较高的要求;钢管桩围堰由单根钢管插打而成,具有强度和刚度大、施工较灵活、制作简易等优点,在不考虑大基底大规模挖掘的情况下对既有桥梁的影响较小,适用于桥梁水域深度较大的情况,其结构组成清晰,尺寸较小,符合当前桥梁工程项目的建设要求^[2-4]。本文结合贵州某特大桥桥墩基础施工,研究钢管桩围堰施工技术。

1 工程概况

贵州某特大桥全长 1 066.41 m,主跨为 120 m、220 m 不等跨连续刚构桥,属于深水、高墩、大跨度桥梁。桥位处水位变化大,流速大。承台埋深位于河床面以下 5 m,河床为裸露基岩。桩基地质为弱风化~未风化花岗岩,坚硬,完整。根据地质情况,采用锁口钢管桩围堰进行防护。

流量设计值 $Q_{1\%}=9\ 270\ \text{m}^3/\text{s}$,设计水位 $H_{1\%}=5.37\ \text{m}$,流速 $v_{1\%}=2.45\ \text{m/s}$,施工水位为 4.48 m,流向为自右向左。

桥址处土层从上至下分别为人工填土、软塑黏土、流塑淤泥、细砂、粉砂。其中:粉砂呈褐灰色,饱和,稍密,局部夹薄层淤泥质土,层厚 3.2~29.5 m;淤泥呈深灰色,流塑,饱和,由黏粒组成,黏性强,味臭,局部夹薄层粉砂,层厚 1.7~7.1 m;粉土呈灰绿色,潮湿,密实,层厚 1.5~6.9 m。

2 围堰设计

锁口钢管桩施工工序通常为不排水的基底清理、水下混凝土浇筑、抽水安装内部支撑结构^[5]。结合该工程情况,对施工工序进行优化和改进:钢管桩施工前,先安装第一层内支撑(兼插打钢管桩导向框),然后插打钢管桩,钢管桩合龙后进行水下混凝土封底(工况 1);水下封底后,抽水至第二层内支撑标高处,焊接第二层内支撑(工况 2);第二层内支撑焊接完成后,抽水至第三层内支撑标高处,焊接第三层内支撑(工况 3);第三层内支撑焊接完成后,抽水至第四层内支撑标高处,焊接第四层内支撑(工况 4);第四层内支撑焊接完成后,抽水至封底混凝土顶面,施工承台(工况 5)。

围堰采用 $\phi 630\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 钢管,锁口材料采用 $\phi 152\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 焊管及 I20a 工字钢,分别与螺旋焊管焊接。钢管桩顶标高为 4.48 m,桩底标高分别为 -13.52 m、-13.52 m、-16.52 m、-16.52 m,钢管桩入土深度分别为 7.12 m、5.12 m、7.22 m、6.42 m。20# 墩钢管桩围堰设置 3 层内支撑^[6],第

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278139)

一层采用双 I32a 工字钢(兼插打钢管桩导向框),其余采用双 I45a 工字钢;21#~23# 墩钢管桩围堰设置 4 层内支撑,第一层采用双 I32a 工字钢(兼插打钢管桩导向框),其余采用双 I45a 工字钢。21# 墩围堰设置 23+23+24+24=94 根钢管桩(见图 1),23# 墩围堰设置 32+32+34+34=132 根钢管桩。

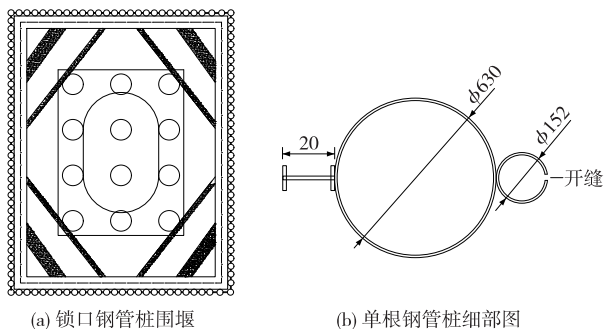


图 1 21# 墩锁口钢管桩围堰结构图(单位:mm)

锁扣钢管桩的堵漏是围堰成败的关键。施工前对钢管桩及锁扣进行检查,主要检查有无杂物、锁扣的变形程度等,如果发现锁扣变形严重,应对锁扣进行校正后再使用。此外,对钢管桩进行锁扣渗漏试验,并检查其松紧程度^[7]。

锁扣钢管桩围堰的设计原则:各构件应力小于容许值,临时结构容许应力可提高 20%,则 Q235 钢材容许弯曲应力为 170 MPa、容许剪切应力为 102 MPa、轴向容许应力为 170 MPa;结构具有足够的耐疲劳性能,构件之间的连接不允许出现破坏。

3 围堰结构验算

3.1 验算内容

(1) 锁口钢管桩围堰验算。对围堰各施工工况下锁口钢管桩进行整体结构、构件受力和强度分析及不同墩位支撑位置稳定性验算。

(2) 封底混凝土验算。对围堰各施工工况下封底混凝土进行抗浮力及强度验算。由于封底混凝土区域无钢护筒,封底混凝土与桩基直接接触,不验算封底混凝土的握裹力^[8]。

(3) 围堰整体稳定性验算。对围堰各施工工况下的整体稳定性进行验算^[9]。

3.2 20# 墩和 21# 墩围堰的验算

20# 墩、21# 墩的锁口钢管桩长度、钢围堰尺寸、桩顶标高及封底混凝土厚度都相同。21# 墩处水较深,动水压力较大(见图 2),围堰受力最不利,故仅对该墩进行验算。

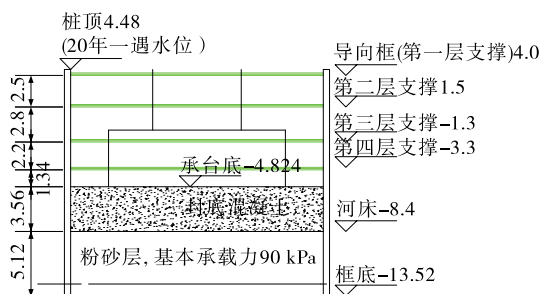


图 2 21# 墩围堰示意图(单位:m)

3.2.1 围堰结构构件验算

利用 MIDAS/Civil 软件建立 21# 墩围堰结构模型(见图 3)对结构受力进行计算分析^[10]。模型中锁口钢管桩、围图、内支撑采用梁单元模拟,锁口钢管桩之间无连接,下部嵌岩之后按铰接考虑^[11]。模型的边界条件:支护桩底部约束竖向位移;被动土压力采用只受压土弹簧模拟;围图与钢管桩之间采用只受压弹簧模拟;内支撑与围图间共节点;在牛腿处约束竖向位移模拟其对围图的支撑作用^[12]。

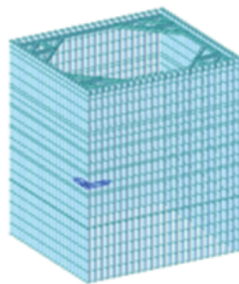


图 3 围堰结构有限元模型

经计算分析,上述 5 种围堰施工工况下,围堰外部受力均为 12.88 m 静水压力、2.45 m/s 流速下产生的动水压力;围堰内部受力分别为 9.78 m 静水压力和 3.1 m 新浇混凝土侧压力、6.8 m 静水压力、4 m 静水压力、2 m 静水压力、0 m 静水压力。各工况下 21# 墩围堰的最不利受力见表 1。

表 1 21# 墩围堰结构构件验算结果

工况 编号	位移/ mm	钢管桩 剪应力/ MPa	钢管桩 弯曲应 力/MPa	围图剪 应力/ MPa	围图弯 曲应力/ MPa	内支撑 轴向应 力/MPa
工况 1	22.2	4.0	8.2	8.0	14.7	4.7
工况 2	20.3	31.2	95.6	29.2	53.7	19.5
工况 3	20.1	31.2	96.7	40.6	74.4	31.8
工况 4	20.1	31.2	110.3	41.9	76.9	33.0
工况 5	20.1	31.7	113.1	42.0	77.1	33.1

由表 1 可知:工况 1 下围堰结构构件发生最大位移,工况 5 下围堰结构构件受力最不利,但均小于规范容许值,构件不会发生破坏,满足各项性能要求。

3.2.2 封底混凝土验算

(1) 封底混凝土抗浮力验算。封底混凝土按 C20、厚度 h 为 3.1 m 进行验算。该项目最不利施工水位为 +4.48 m,水头差为 12.98 m,取桩基与封底混凝土的摩阻力为 120 kPa,基底净面积为 383.86 m²。水的浮力 $P=49\,441.17$ kN,封底混凝土自质量 $G=2\,855\,918$ kg(28 559.18 kN),桩基与封底混凝土的摩阻力 $F_1=33\,640.70$ kN,钢管桩与封底混凝土的摩阻力 $F_2=15\,761.50$ kN,按式(1)计算抗浮系数 k ,得 $k=1.58>1.0$,封底混凝土的抗浮力满足规范要求。

$$k = \frac{G+F}{P} = \frac{28\,559.18+33\,640.70+15\,761.50}{49\,441.17} = 1.58 \geq 1.0 \quad (1)$$

(2) 封底混凝土强度验算。考虑地质及实际施工条件等,取 C20 水下混凝土的容许拉弯应力 $[\sigma]=500$ kPa,封底混凝土按均布荷载下四边固结双向简支板计算。根据规范,简支板 x 方向的长度 $L_x=4.8$ m, y 方向的长度 $L_y=4.2$ m, $L_x/L_y=1.14$ 时,弯矩 $M_x=M_y=0.036\,8 \times 128.8 \times 4.8 \times 23.04 = 524.19$ kN·m。封底混凝土双向简支板的截面模量 $W=bh^2/6=4.8 \times 3.1^2/6=7.69$ m³,按式(2)计算封底混凝土的拉弯应力 σ ,得 $\sigma=68.17$ kPa<500 kPa,封底混凝土的强度满足规范要求。

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{524.19}{7.69} = 68.17 \text{ kPa} < [\sigma] = 500 \text{ kPa} \quad (2)$$

3.2.3 围堰整体稳定性验算

围堰若只受静水压力,对称受力并不会使其发生倾斜。但在流水压力作用下,围堰可能发生整体倾覆,此时,倾覆力矩由流水压力 F 产生,稳定力矩由桩基与封底混凝土的摩阻力 G_1 、混凝土自质量 G_2 、钢管桩抗拔力 G_3 的合力与水的浮力 P 的差值组成,稳定力矩 M_0 见式(3),倾覆力矩 M_r 见式(4)。按式(5)计算围堰的稳定系数 K_a ,得 $K_a=97.1>1.5$,围堰的整体稳定性满足规范要求,且具有较高的安全储备。

$$M_0 = (G_1 + G_2 + G_3 - P)L = (28\,559.18 + 33\,640.7 + 30\,351.7 - 49\,441.17) \times$$

$$22.95 = 9.89 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

式中: L 为围堰重心位置到转动抽的距离。

$$M_r = FD = 22 \times 53.9 \times 12.88 \times 2 \div 3 = 10\,182.07 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

式中: D 为流水压力作用点到转动抽的距离。

$$K_a = \frac{M_0}{M_r} = 97.1 > 1.5 \quad (5)$$

3.3 22# 墩和 23# 墩围堰验算^[13]

除水的深度和封底混凝土厚度外,23# 墩围堰的其他参数与 22# 墩相同。23# 墩处的水较深,动水压力较大,故对 23# 墩围堰进行结构构件验算。由于 22# 墩处围堰内部封底混凝土的厚度较小,可能对封底混凝土的抗浮力、强度及围堰整体抗倾覆能力产生一定影响,须对 22# 墩围堰封底混凝土进行验算。

3.3.1 围堰结构构件验算

23# 墩有限元模型及受力情况与 21# 墩类似,不再赘述。5 种工况下,围堰外部受力均为 14.48 m 静水压力和 45 m/s 流速下产生的动水压力;围堰内部受力分别为 11.28 m 静水压力和 3.2 m 新浇混凝土侧压力、7.9 m 静水压力、4.7 m 静水压力、2.2 m 静水压力、0 m 静水压力。各构件受力验算结果见表 2。

表 2 23# 墩围堰结构构件验算结果

工况 编号	位移/ mm	钢管桩 剪应力/ MPa	钢管桩 弯曲应 力/MPa	围圈剪 应力/ MPa	围圈弯 曲应力/ MPa	内支撑 应力/ MPa
工况 1	34.7	7.3	14.3	10.2	21.9	5.9
工况 2	30.1	40.6	119.1	37.3	64.6	22.4
工况 3	29.7	40.6	119.4	49.7	87.3	41.7
工况 4	29.7	40.8	138.9	50.8	91.2	43.5
工况 5	29.7	41.2	146.4	50.9	93.7	43.7

由表 2 可知:工况 1 下围堰构件发生最大位移,工况 5 下围堰构件受力最不利,但均小于规范容许值,构件不会发生破坏。

3.3.2 封底混凝土和围堰整体稳定性验算

22# 墩、23# 墩围堰内部封底混凝土和围堰安全性验算结果见表 3。由表 3 可知:22# 墩、23# 墩钢管桩围堰内部封底混凝土的抗浮力和强度、围堰的整体稳定性均满足规范要求,结构不会发生破坏。

表 3 22# 墩、23# 墩安全性能验算结果

桥墩 编号	抗浮力验算		稳定性验算		强度验算	
	安全 系数	稳定性 系数	安全 系数	稳定性 系数	理论应 力/kPa	极限应 力/kPa
22#	1.14	1.0	84	1.5	172.26	500
23#	1.37	1.0	108	1.5	105.70	500

4 结语

锁扣钢管桩围堰具有结构安全、施工快速、材料可回收等特点,与其他类型围堰相比更经济,适用于深水基础施工。有限元计算结果表明,深水高墩基础施工中,在最不利工况下,锁扣钢管桩围堰具有良好的安全性、稳定性。

参考文献:

- [1] 刘自明.桥梁深水基础[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 李惠民.近海浅水桥梁基础钢管桩围堰施工技术[J].国防交通工程与技术,2019,17(3):77-80.
- [3] 肖正恩,朱江川,王寿武.粉质软土粘土条件下深水超长钢板桩围堰施工技术研究[J].中国水运,2022(7):125-127.

- [4] 赵建钢,高辉,施骏.水下深基础锁扣钢管桩围堰的设计及施工关键技术[J].建筑施工,2021,43(1):127-129.
- [5] 李山线.公路桥梁主墩围堰施工技术分析[J].运输经理世界,2023(36):95-97.
- [6] 常星.大跨混凝土箱拱拱座围堰施工技术研究[J].中外公路,2020,40(4):158-161.
- [7] 律建华.锁扣钢管桩围堰施工关键技术[J].科技创新,2023(11):139-142.
- [8] 熊辉,黄健伟.锁扣钢管桩围堰设计与施工[J].交通科技与管理,2023(20):140-142.
- [9] 彭亮英,李友明,朱强洪.深水漂卵石地层桥梁承台锁扣钢管桩围堰设计与施工研究[J].路基工程,2019(6):170-174.
- [10] 朵君泰.深水裸岩地区低桩承台锁扣钢管桩围堰设计[J].国防交通工程与技术,2020,18(2):17-21+68.
- [11] 钱骥,茆瑞馨,宋世杰,等.重庆官栈河大桥主桥主墩基础锁扣钢管桩围堰加固[J].桥梁建设,2024,54(1):148-154.
- [12] 钟正强,毛润华,黄春亮,等.锁扣钢管桩围堰在城南大桥深水基坑的应用[J].公路与汽运,2018(5):121-123+142.
- [13] 罗青松.连续刚构大桥主墩钢围堰施工技术研究[J].城市道桥与防洪,2020(10):118-121+18.

收稿日期:2023-10-27

(上接第 80 页)

- [6] 李维树,丁秀丽,邹爱清,等.蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J].岩土力学,2007,28(7):1338-1342.
- [7] 罗亚琼,张超,马婷婷.基于大型直剪试验的土石混合体剪切强度特性及剪切变形模拟方法研究[J].中外公路,2020,40(5):295-301.
- [8] 宋杨,王诚杰,孙文君,等.超大粒径块石在土石混填路基中稳定性数值模拟研究[J].中外公路,2018,38(5):18-22.
- [9] 朱桃丽.路基土石混合料的累积塑性应变预估模型研究[J].中外公路,2018,38(2):286-290.
- [10] 廖秋林,李晓,郝钊,等.土石混合体的研究现状及研究展望[J].工程地质学报,2006,14(6):800-807.
- [11] YIN P B, SHEN F Q, YANG Z H (Joey), et al. Dynamic characteristics of polyurethane-bonded rubber particle-sand mixture subject to freeze-thaw cycling[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2023,37(3):04023014-1-04023014-16.
- [12] Yin P, Wang K, Chen L, et al. Horizontal bearing capacity and reliability of piles in coastal soft soil con-

sidering the time-varying characteristics[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(2):247.

- [13] 尹平保,杨铠波,赵明华,等.考虑斜坡效应的地基水平抗力比例系数确定方法[J].中国公路学报,2022,35(11):12-20.
- [14] 杨忠平,李进,刘浩宇,等.土石混合体-基岩界面剪切力学特性块石尺寸效应[J].岩土力学,2023,44(4):965-974.
- [15] 胡世兴,靳晓光,孙国栋,等.土石混合体材料大型三轴试验及 PFC-FLAC 耦合仿真研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊):3344-3356.
- [16] 王书勤,尹平保,贺炜,等.镍铁渣-黏土改性土承载特性试验研究[J].公路与汽运,2022(4):63-67.
- [17] 丁继承.含水率和应力比对路基红砂土回弹模量及累积塑性应变的影响研究[J].公路与汽运,2021(6):74-79+87.
- [18] 徐文杰,胡瑞林.土石混合体概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56+70.
- [19] 李元明.软土地基上分阶段填筑路堤的稳定性评价[D].南京:东南大学 2004.

收稿日期:2023-06-05