

斜坡地基深水基础封底结构抗浮安全分析

叶适斌

(中铁二十四局集团浙江工程有限公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 钢管桩围堰法是深水基础施工工法的一种, 由于其经济高效的特点, 近年来在我国高铁桥梁基础施工中应用广泛。浙江建德市新建新安江特大桥深水基础采用钢管桩围堰施工, 以基础封底结构为研究对象, 考虑了堆积河床斜坡地基对围堰封底结构的影响与施工过程的应力累积效应, 采用MIDAS Civil有限元软件建立了钢管桩围堰-非等厚封底结构整体模型, 分析了斜坡地基深水基础封底结构的受力变形与抗浮安全稳定性, 对封底混凝土厚度进行优化设计并提出了增强钢管桩围堰封底结构抗浮稳定性的施工措施。数值结果表明: 非等厚封底混凝土的最大拉应力与变形均出现在封底结构较薄处, 施工过程中需加强监测; 封底结构厚度减小1 m后混凝土最大拉应力与最大变形分别增大42.3%与56.1%, 均满足要求, 但封底结构抗浮稳定性不满足要求, 建议采用抗浮锚杆等措施增加封底结构稳定性, 为类似工程封底结构的设计与施工提供了理论指导。

关键词: 钢管桩围堰; 深水基础; 封底结构; 斜坡地基; 抗浮稳定性

中图分类号: TU753

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0190-06

Analysis on Anti-flotation Safety of Deep-water Foundation Bottom Sealing Structure in Sloping Subgrade

YE Shibin

(Zhejiang Engineering Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group, Hangzhou 310009, China)

Abstract: The steel pipe pile cofferdam method is one of the deep water foundation construction methods, which has been widely used in the foundation construction of high-speed railway bridges in China in recent years due to its economic and efficient characteristics. The deep water foundation of Xin'an River Bridge newly built in Jiande City of Zhejiang Province is constructed by steel pipe pile cofferdam. Taking the foundation bottom sealing structure as the research object, the influence of the slope foundation of the slope riverbed on the cofferdam bottom sealing structure and the stress accumulation effect in the construction process are considered. The overall model of steel pipe pile cofferdam - unequal thickness bottom sealing structure is established by MIDAS Civil finite element software. The stress deformation and anti-floating safety and stability of the bottom sealing structure of the deep water foundation in the slope foundation are analyzed. The thickness of the bottom sealing concrete is optimized and the construction measures to enhance the anti-floating stability of the bottom sealing structure of the steel pipe pile cofferdam are proposed. The numerical results show that the maximum tensile stress and deformation of the non-equal thickness bottom sealing concrete appear at the thinner part of the bottom sealing structure, and the monitoring should be strengthened during the construction process. After the thickness of the bottom sealing structure is reduced by 1 m, the maximum tensile stress and the maximum deformation of the concrete increase by 42.3 % and 56.1 % respectively, which all meet the requirements. However, the anti-floating stability of the bottom sealing structure does not meet the requirements. It is recommended to use the anti-floating anchors and other measures to increase the stability of the bottom sealing structure, which provides theoretical guidance for the design and construction of the bottom sealing structure of similar projects.

Keywords: steel pipe pile cofferdam; deep-water foundation; bottom sealing structure; slope foundation; anti-floating stability

0 引言

锁扣钢管桩围堰作为深水环境下一种理想的隔水挡土措施被广泛应用于深水基础施工中^[1-3]。已有较多专家学者对钢管桩围堰结构安全特性进行相

收稿日期: 2024-05-06

作者简介: 叶适斌(1987—), 男, 学士, 高级工程师, 从事铁路桥梁工程研究工作。

关研究,闫古龙^[4]研究了在厚砂层地质条件下钢管桩插打工艺,有效解决了厚砂层中钢管桩插打困难的问题。高小明等^[5-6]介绍了浅层覆盖粉砂质泥岩地质条件下深水基础钢管桩围堰的施工关键技术。钱骥^[7-8]分析了钢管桩及内支撑的受力安全与稳定性,并提出采用水下施工内支撑的加固方案。随着钢围堰在深水地区的应用,封底结构的强度验算与抗浮稳定性也逐渐引起人们的重视。熊辉^[9-10]对钢管桩围堰的设计计算方法以及施工工艺等方面进行了详细的介绍,并采用 MIDAS Civil 软件对钢管桩围堰各构件和封底混凝土的强度进行验算。刘奇^[11]采用 Abaqus 软件建立钢管桩围堰封底有限元模型并分析封底混凝土的受力变形规律,研究表明桩基对封底的受力和变形约束作用非常明显。刘宇^[12]研究了坡积层河床深水承台钢围堰施工技术 with 止水工艺,但未涉及坡积河床地基中封底结构安全分析。上述研究大多针对钢管桩的结构稳定性进行研究,而对有关封底结构受力变形与抗浮稳定性鲜有报道,且仅将封底结构单独进行计算,未考虑封底结构在施工过程中应力累积现象对研究结果的影响。此外,大多研究均是封底混凝土简化为等厚模型,并未考虑斜坡地基中非等厚混凝土的抗浮稳定性。

因此,本文综合考虑坡积河床斜坡地基对围堰封底结构的影响与施工过程的应力累积效应,采用 MIDAS Civil 有限元软件建立了钢管桩围堰-非等厚封底结构整体模型,对坡积河床斜坡地基中深水基础封底结构受力变形与抗浮稳定性进行研究,并对钢管桩围堰封底结构进行了设计优化,可为类似工程封底结构的设计与施工提供理论指导。

1 研究背景

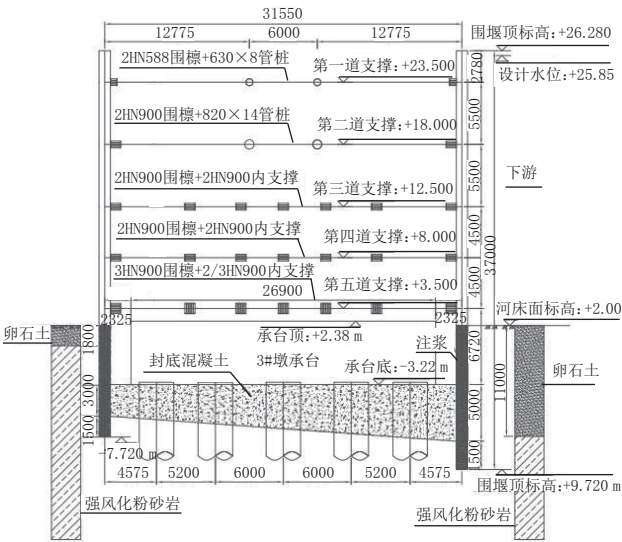
1.1 工程概况

新安江特大桥是金建铁路的关键控制工程之一,为金华至建德的重要铁路干线,跨越新安江。新安江为钱塘江支流,流域面积 11 674 km²,干流长度 359.0 km。金建铁路新安江特大桥见图 1,设计采用 112 m+216 m+112 m 矮塔斜拉桥,全梁长 441.6 m。新建金建铁路新安江特大桥 3#墩采用 13 根大直径钻孔桩基础,承台采用八边形承台,承台顶高程 +2.38 m,底高程 -3.22 m,见图 2。

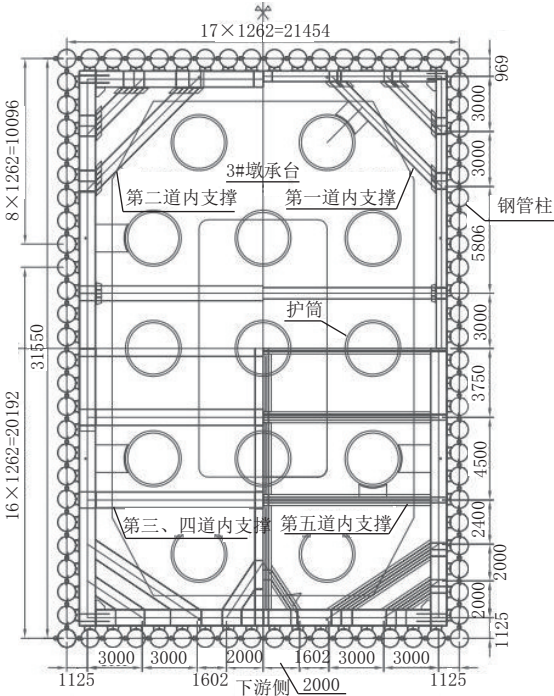
3#墩钢管桩围堰采用直径 1 000 mm×14 mm 钢管桩、直径 219 mm×10 mm 与工 28b 构成的 CT 扣组成,材质 Q235B。围堰平面尺寸长 32.55 m,宽 22.454 m,



图 1 金建铁路新安江特大桥效果图



(a)围堰总体布置图



(b)围堰平面布置图

图 2 金建铁路新安江特大桥围堰布置图(单位:mm)

其中上游侧钢管桩长度为 34.0 m,底高程 -7.72 m,顶高程 +26.28 m,下游侧钢管桩钢板桩长度为 36.0 m,底高程 -9.72 m,顶高程 +26.28 m。根据桥墩所在河

床为坡积层的特点,采用非等厚封底结构进行封底抗浮设计,封底结构采用C30混凝土浇筑,封底混凝土顶部标高为-3.22 m,上游封底混凝土底部标高为-6.22 m,下游封底混凝土底部标高为-8.22 m。

1.2 工程地质条件

桥墩所在河床为坡积层,上、下游两侧河床地层分界线高差较大,土壤类型主要为卵石土与强风化粉砂岩。河床土层的物理力学性质参数见表1,上覆层为卵石土,卵石土较松散,排水性能良好,但是强度较低,易于发生沉降和变形。下层土为强风化粉砂岩,压缩性低,承载力较高。

表1 河床土层物理力学性质参数表

岩土名称	上游/下游层厚 h/m	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c / kPa
卵石土	1.8/11.0	21	25	20
强风化粉砂岩	13.2	21	30	25

2 封底结构受力变形规律

2.1 有限元模型建立

为了分析封底结构受力变形特性,考虑整体围堰结构在水下开挖、封底混凝土浇筑及抽水等施工过程对封底结构的应力累积效应,采用MIDAS Civil软件建立钢管桩围堰与封底结构整体模型,模型见图3,钢管桩、围檩、内支撑用梁单元模拟,封底混凝土用实体单元模拟。

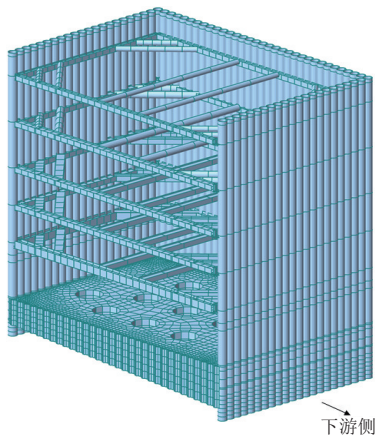


图3 钢管桩围堰MIDAS有限元分析模型剖面图

模型所考虑的荷载主要包括:结构自重、静水压力、土压力、水压力。新安江特大桥水流速为1.86 m/s,根据《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010),故水流对钢管桩顶部的水压力为5.01 kPa,围堰外围土压力基于朗肯土压力的基本原理进行计算,钢管桩围堰的计算荷载见表2。

2.2 非等厚封底结构受力变形分析

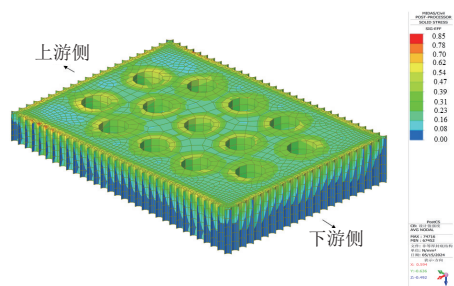
当在钢管桩围堰内抽水到封底混凝土顶部时封

表2 钢管桩围堰的计算荷载表

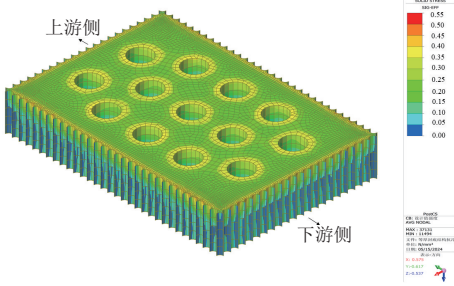
荷载类型	上游作用点 标高 h/m	上游作用点荷 载集度 q/kPa	下游作用点 标高 h/m	下游作用点荷 载集度 q/kPa
水压力	+25.85~+2	5.01~0	0	0
土压力	-5.88~-7.72	0~6.75	-5.88~-9.72	0~14.08
水压力	+25.85~-7.72	0~320.7	+25.85~-9.72	0~340.7

底结构所受浮力最大,此工况下封底结构受力最不利,通过计算得到钢管桩围堰抽水后封底混凝土的强度和刚度,非等厚封底混凝土的应力云图与整体变形云图见图4(a)、图5(a)。为了对比将封底结构模型简化为等厚封底模型所造成的误差,本节采用5 m等厚的封底混凝土计算封底结构受力变形特征,其他边界条件、荷载等与非等厚封底结构模型相同,等厚封底混凝土的应力云图与整体变形云图见图4(b)、图5(b)。从图4(a)与图4(b)中可以看出,不平衡土压力、水压力、浮力作用下非等厚封底混凝土最大拉应力为0.85 MPa,《混凝土结构设计规范 GB 50010—2002》规定C30混凝土的强度设计值为1.43 MPa,混凝土强度符合要求。而等厚封底混凝土最大拉应力为0.55 MPa,混凝土强度同样符合要求。相比非等厚封底结构模型的最大拉应力,简化后的等厚封底结构最大拉应力减小约35.3%。从图5(a)与图5(b)中可以看出,两个不同厚度模型的在浮力作用下发生隆起变形,非等厚封底混凝土的最大变形为0.041 mm,等厚封底混凝土的最大变形为0.024 mm,相比非等厚封底结构模型的最大变形,简化后的等厚封底结构最大变形减小约41.5%。且两个不同厚度模型的最大变形出现在钢管桩围堰四个角与桩基之间,因此,施工过程中需加强该位置的变形监测。综上所述,非等厚封底结构模型计算的应力、变形更大,实际工程中若不考虑实际斜坡地基对封底结构厚度的影响,将封底结构简化为等厚模型将过小估计结构的受力变形特性,造成结构验算偏危险。

非等厚封底混凝土底面的应力云图见图6(a),为分析封底结构在顺桥向(x轴方向)与横桥向(y轴方向)的应力变化规律,图6(a)中封底混凝土底面红色实线与黑色短划线所在区域应力随坐标变化规律见图6(b)和图6(c),从图6(b)和图6(c)中可以看出,封底混凝土底面的拉应力沿坐标方向呈现山峰状起伏变化,且拉应力峰值出现在桩基中间,最大拉应力出现在封底混凝土与钢管桩交界面处,在x轴方向与y轴方向的最大拉应力分别为0.7 MPa与0.55 MPa,小

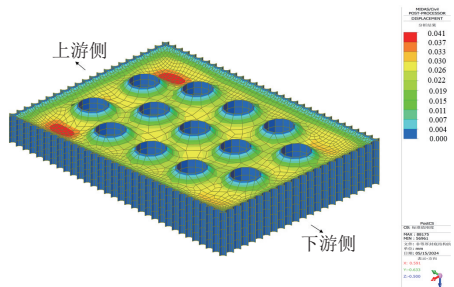


(a)非等厚封底混凝土的应力云图

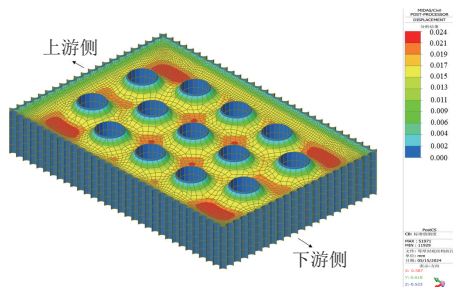


(b)等厚封底混凝土的应力云图

图4 封底混凝土的应力云图(单位:MPa)



(a)非等厚封底混凝土的变形云图



(b)等厚封底混凝土的变形云图

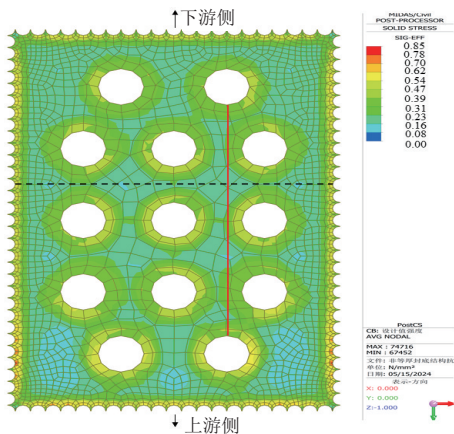
图5 封底混凝土的变形云图(单位:mm)

于C30混凝土的强度设计值1.43 MPa,均满足设计要求。

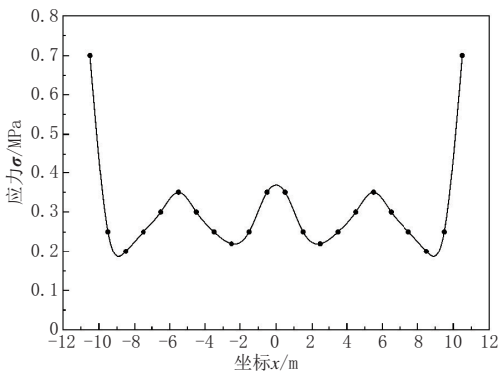
2.3 非等厚封底混凝土抗浮稳定性计算

当在钢管桩围堰内抽水到封底混凝土顶部时封底结构所受浮力最大,此工况下封底结构受力最不利,通过计算得到钢管桩围堰抽水后封底混凝土的强度和刚度,非等厚封底混凝土的应力云图与整体变形云图见图4(a)、图5(a)。

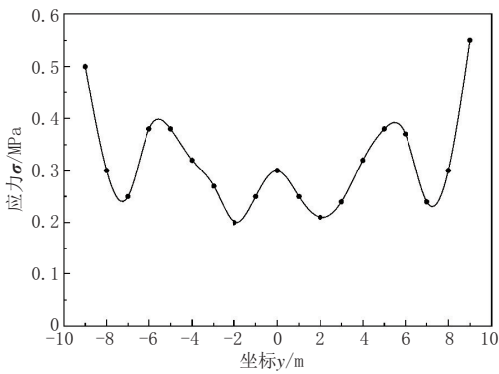
设计水位下抽水工况,封底混凝土主要承受自



(a)非等厚封底混凝土底面的应力云图



(b)封底混凝土底面x轴方向拉应力变化图



(c)封底混凝土底面y轴方向拉应力变化图

图6 封底混凝土底面拉应力变化图(单位:MPa)

重、内外水头差产生的浮托力及钢护筒提供的握裹力作用,封底混凝土标号为C30,重度为24 kN/m³,封底混凝土上游与下游厚度分别采用3.0、5.0 m,围堰平面尺寸长32.55 m,宽22.45 m,钢护筒直径为3.05 m,则封底混凝土平面面积为32.55×22.45-13×π×3.05²/4=635.77 m²,护筒与封底混凝土之间的黏结力可取150 kPa^[13],非等厚封底混凝土受力如下:

封底混凝土自重:

$$G=24\times(3+5)/2\times635.77=61\,033.7\text{ kN} \quad (1)$$

混凝土与护筒间的握裹力:

$$T_1=13\times150\times\pi\times3.05\times(3+5)/2=74\,738.5\text{ kN} \quad (2)$$

水的浮力:

$$F_0 = 10 \times [25.85 + (6.22 + 8.22) / 2] \times 635.77 \\ = 210\,248.3 \text{ kN} \quad (3)$$

混凝土与钢管桩的握裹力:

$$T_2 = \pi \times 1.0 \times (3 + 5) / 2 \times 55 \times 150 = 103\,672.6 \text{ kN} \quad (4)$$

抗浮稳定系数:

$$K = \frac{G + T_1 + T_2}{F_0} = \frac{61\,033.7 + 74\,738.5 + 103\,672.6}{210\,248.3} \\ = 1.14 \quad (5)$$

非等厚封底结构抗浮稳定系数为: $K=1.14 > 1.05$, 封底厚度满足抗浮要求。显然, 等厚封底结构的封底厚度也一定满足抗浮要求。

3 封底混凝土优化设计

3.1 封底混凝土厚度优化设计与强度计算

在确保基坑施工安全的前提下, 可通过减小封底混凝土厚度来解决开挖困难问题, 并能够节约大量施工成本与减少工期。本文将封底混凝土厚度减小 1 m 作为优化设计工况分析, 即封底混凝土上游与下游厚度分别采用 2.0、4.0 m。通过计算得到优化后封底混凝土的应力云图见图 7(a), 封底混凝土最大拉应力为 1.21 MPa, 小于 C30 混凝土的强度设计值 1.43 MPa, 混凝土强度符合要求。优化后封底混凝土的变形云图见图 7(b), 非等厚封底混凝土的最大变形为 0.064 mm。通过对比厚度优化前后两种工况的混凝土强度与刚度可以发现, 混凝土最大拉应力与最大变形分别增大 42.3% 与 56.1%, 但均满足要求。

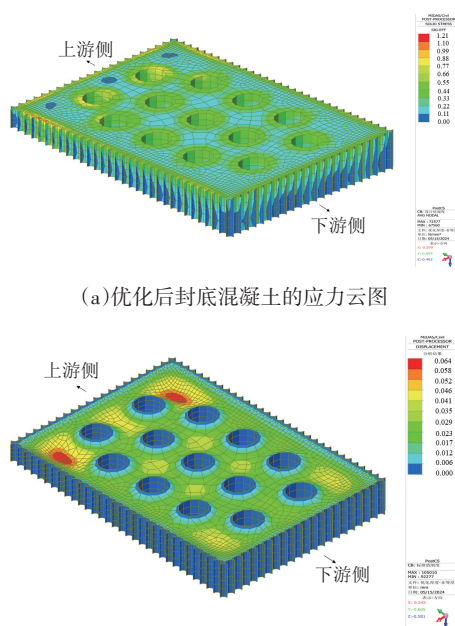
3.2 非等厚封底混凝土抗浮稳定性计算

将封底混凝土进行优化设计后, 按照式(1)~式(5)方法计算所得抗浮稳定系数为:

$$K=0.88 \quad (6)$$

抗浮稳定系数 $K=0.88 < 1.05$, 封底厚度不满足抗浮要求。若需满足抗浮要求, 可采用相应措施将抗浮力增加 34 502.27 kN 即可。

综上所述可知, 封底混凝土通过减小厚度进行优化设计时, 其强度与变形均满足设计要求, 但该工况下封底结构抗浮稳定性验算不满足要求, 因此, 在实际工程中, 针对坡积河床等斜坡地基的封底结构设计时, 封底混凝土的抗浮稳定性对整个围堰结构具有重要影响, 不容忽视。此外, 在解决封底混凝土厚度较小而产生的抗浮问题, 建议采用抗浮锚杆等措施增加封底结构抗浮稳定性。



(a)优化后封底混凝土的应力云图

(b)优化后封底混凝土的变形云图

图7 优化后封底混凝土的应力与变形云图

4 结 语

本文考虑了坡积河床斜坡地基对钢管桩围堰施工桥梁基础封底结构的影响与施工过程的应力累积效应, 采用 MIDAS Civil 有限元软件建立钢管桩围堰-非等厚封底混凝土整体模型, 分析了斜坡地基深水基础封底结构的受力变形与抗浮安全性, 得到以下结论。

(1)非等厚封底混凝土在不平衡压力作用下最大拉应力与最大变形分别为 0.85 MPa 与 0.041 mm, 等厚封底混凝土最大拉应力与最大变形分别为 0.55 MPa 与 0.024 mm, 均符合强度设计与抗浮稳定性要求。非等厚与等厚封底混凝土模型的最大变形均出现在钢管桩围堰四个角与桩基之间, 因此, 施工过程中需加强该位置的变形监测。

(2)将封底结构模型简化为等厚封底模型进行计算所造成的误差较大, 相比非等厚封底结构模型的最大拉应力, 简化后的等厚封底结构最大拉应力与最大变形减小约 35.3% 与 41.5%。实际工程中若不考虑实际斜坡地基对封底结构厚度的影响, 将封底结构简化为等厚模型将过小估计结构的受力变形特性, 造成结构验算偏危险。因此, 封底结构抗浮设计必须考虑实际封底厚度的影响。

(3)封底结构优化设计后混凝土最大拉应力与最大变形分别增大 42.3% 与 56.1%, 均满足强度与刚度要求, 但封底结构抗浮稳定性验算不满足要求。

在斜坡地基深水基础封底结构施工过程中,可适当减小封底混凝土厚度并采用抗浮锚杆等措施增强较薄侧封底混凝土的抗浮稳定性,抗浮锚杆的应用为其它类似围堰封底结构施工提供经验。

参考文献:

[1] 姜贺,牛伟锋,韩胜利,等. 济阳黄河公铁两用特大桥施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2024, 52(1): 45-50.

[2] 郭斌强,党涛,王超,等. 富水砂卵石层超长钢管桩围堰施工技术[J]. 建筑施工, 2023, 45(5): 966-969.

[3] 邸迎涛,贾宁. 复杂地质条件下锁扣钢管桩围堰施工技术控制[J]. 城市道桥与防洪, 2024(3): 185-203.

[4] 闫古龙. 厚砂层水中承台锁扣钢管桩围堰施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2022(3): 108-147.

[5] 高小明,熊红平,邱衍坚,等. 洪州大桥主墩承台围堰施工关键技术研究[J]. 市政技术, 2023, 41(12): 40-44.

[6] 陈艳平. 风化岩地质条件下带锁扣钢管桩施工工艺[J]. 城市道桥与防洪, 2018(7): 214-216.

[7] 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.

[8] 梁荣柱,韦实,王新新,等. 内支撑式和悬臂式锁扣钢管桩基坑围护结构变形对比试验分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 172-182.

[9] 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, 4(20): 140-142.

[10] 王泽升. 深水基础岩层地质锁扣钢管桩围堰施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2019(11): 75-78.

[11] 刘奇,雷胜友,杨忠领,等. 黄黄铁路巴河特大桥钢管桩围堰封底设计优化[J]. 科技和产业, 2023, 23(13): 245-249.

[12] 刘宇. 坡积层河床深水承台锁扣钢管桩围堰施工技术[J]. 价值工程, 2018, 37(29): 180-183.

[13] 付宗运. 汉江水域特大型桥梁双壁钢围堰施工结构安全设计[J]. 施工技术, 2019, 48(1): 1145-1149.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

