

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230117

基于变形控制的某双排钢板桩围堰结构设计优化

周清泉¹, 李振羽², 江 义¹

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 中交第二航务工程局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为保证双排钢板桩围堰的结构安全并控制其用水面积, 采用单因素敏感性分析方法研究了多项设计参数对围堰变形的影响, 并通过 PLAXIS 软件进行二维、三维有限元模型计算。结果表明, 拉杆标高、拉杆张紧力、钢板桩抗弯刚度对围堰入土段变形的影响较小; 与堰体自身宽度相比, 围堰变形受到内侧压脚宽度的影响更大, 应尽量增加内侧压脚宽度; 外侧板桩入土深度对围堰变形无明显影响, 可适当减小外侧板桩入土深度、增加内侧板桩入土深度; 横隔结构对控制堰体变形的效果不明显, 可采取其他措施以加强内外板桩连接。研究思路和计算结果可为类似工程钢围堰结构设计优化提供参考。

关键词: 双排钢板桩围堰; 板桩入土深度; 堰体宽度; 内侧压脚宽度; 横隔结构

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0121-04

1 引言

钢围堰以其经济性高、占用面积小等优点在水电站、船坞、取排水等工程中应用广泛^[1-3]。双排钢板桩围堰属于常用的钢围堰结构形式, 它一般用于无法设置拉锚的场地中, 通过拉杆将双排板桩连接, 并在板桩墙之间进行填土, 从而形成重力式挡水体系, 为围堰内侧工程创造干地施工条件。目前, 针对双排钢板桩围堰的受力、变形特性方面的研究已较多, 如袁聪聪^[4]通过二维建模, 分析了钢管桩桩距、围堰宽高比等因素对围堰变形的影响; 武坤鹏等^[5]对位于软土区基坑工程的双排钢板桩支护进行了变形特性分析, 并给出结构加固措施建议; 司鹏飞等^[6]研究了堰体宽高比、钢板桩入土深度、拉杆布置高度等因素对围堰变形的影响; XUE R 等^[7]通过三维有限模型计算, 分析了采用混凝土框架连接的双排板桩结构的变形特性, 并提出了简化设计方法; SHEN Y 等^[8]通过物模试验研究了双排抗滑桩体系的内力分布, 并提出不同桩距下的最佳桩长。上述研究大多将钢板桩桩顶变形作为主要考察指标之一, 但钢围堰位于泥面以上的悬臂端变形可通过改变拉杆张紧力进行调控, 其对内侧干地施工的影响相对较小, 而板桩入土段的变形将直接影响内侧明挖基

坑等工程的安全, 更应受到关注。另外, 针对围堰横隔结构设置对其变形控制的影响, 缺乏充分的模型试验研究成果。为此, 本文依托某电厂排水口工程, 通过有限元计算分析了双排钢板桩围堰各项设计参数对板桩变形的影响, 并作出结构设计优化建议, 设计思路可为类似工程提供参考。

2 工程概况和设计条件

某电厂排水口工程采用明挖法施工, 围堰采用双排钢板桩结构。该工程围堰需承受波浪和较大的内外水头差作用, 因此其安全性要求高于常规钢围堰; 另外, 出于水生态保护的考虑, 应尽量缩减围堰的用水面积。堰体填料和典型钻孔信息见表 1。

表 1 堰体填料和地质钻孔信息

Tab. 1 Parameters of filling material and borehole

土层名称	层底标高/m	直剪抗剪指标		弹性模量/MPa	泊松比	
		天然重度	粘聚力/kPa			摩擦角/(°)
堰体回填中粗砂	-8.13	19.0	0	30	33	0.25
(原泥面标高)						
2-1 淤泥层(开挖换填砂)	-11.83	19.0	0	30	30	0.25
2-3 砂混淤泥	-15.23	18.8	5	20	15	0.30
4-1 砂质粘性土	-20.63	18.9	22	22.2	15	0.30
5-1 全风化花岗岩	-27.13	20.5	28	25	25	0.15
6-1 砂砾状强风化花岗岩	-36.33	21.5	30	28	45	0.15
8-1 中风化花岗岩	-50.00	25.0	100	40	80	0.15

注: 天然重度单位为 kN/m^3 。

收稿日期: 2023-01-01, 修回日期: 2023-02-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600700)

作者简介: 周清泉(1992-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水工结构, E-mail: zhouqq@theidi.com

本工程设计高水位 3.35 m, 25 年一遇高水位为 4.51 m, 设计波要素见表 2。

表 2 设计波要素

Tab. 2 Design parameters of wave

25 年一遇高水位+25 年一遇波浪				25 年一遇高水位+50 年一遇波浪							
$H_{1\%}$	$H_{5\%}$	$H_{13\%}$	H	T/s	L	$H_{1\%}$	$H_{5\%}$	$H_{13\%}$	H	T/s	L
/m	/m	/m	/m	T/s	/m	/m	/m	/m	/m	T/s	/m
2.67	2.20	1.86	1.19	4.9	35.6	2.99	2.48	2.10	1.35	5.2	39.4

注: $H_{1\%}$ 、 $H_{5\%}$ 、 $H_{13\%}$ 分别为累积频率为 1%、5%、13% 的波高; H 为波高; T 为波浪周期; L 为波长。

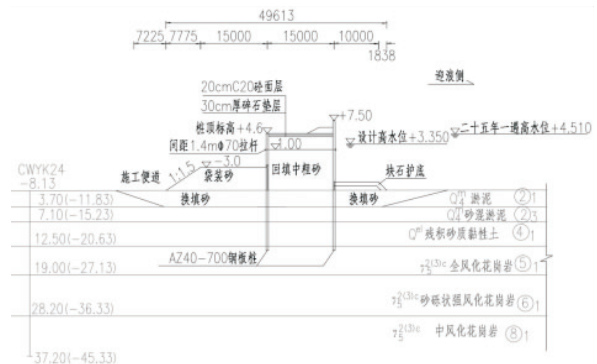


图 1 钢围堰标准断面图(单位:mm)

Fig. 1 Standard section of steel cofferdam

3 规范公式及土弹簧法有限元模型设计成果

经多规范对比,确定围堰的设计标准为:按照“25 年一遇高水位+25 年一遇波浪”设计围堰迎浪侧顶高程(按堰顶基本不越浪控制);按照“25 年一遇高水位+50 年一遇波浪”校核结构安全。并根据水文和波浪条件,确定围堰迎浪侧(外侧)的桩顶标高 7.5 m,背浪侧(内侧)的板桩顶标高 4.6 m。经波浪物理模型试验验证,该高程满足堰顶不越浪的控制标准。

依据《码头结构设计规范》^[9]和《钢围堰工程技术标准》^[10],分别计算围堰的内部剪切稳定性、整体抗倾稳定、内侧板桩的踢脚稳定、整体抗滑稳定性、抗隆起稳定和抗渗稳定,其中波浪作用力依据《港口与航道水文规范》^[11]进行计算。通过计算,确定围堰外侧、内侧桩底标高临界值分别为-16、-21 m,围堰宽度临界值 15 m。

结合围堰稳定性计算结果,围堰的标准断面设计见图 1,堰体宽度取 15 m,堰体内回填中粗砂。堰体内外侧均采用 AZ40-700 型钢板桩,且桩底标高均为-21 m,在标高 1.0 m 处设置一道 $\phi 70$ 钢拉杆,拉杆间距 1.4 m,拉杆张紧力 200 kN。围堰内侧袋装砂压脚平台顶标高-3 m,压脚平台宽 15 m。打桩前对表层淤泥土进行开挖

表 3 钢围堰结构设计参数优化

Tab. 3 Parameters to be optimized for structural design of steel cofferdam

优化项目	模型 1(标准模型)	模型 2	模型 3
拉杆标高	拉杆标高 1.0 m	拉杆标高 2.0 m	拉杆标高 2.5 m
拉杆张紧力	拉杆张紧力 200 kN	拉杆张紧力 100 kN	拉杆张紧力 50 kN
钢板桩规格	AZ40 钢板桩(内外侧)	AZ36 钢板桩(内外侧)	AZ20 钢板桩(内外侧)
堰体宽度(内侧压脚宽度不变)	堰体宽 15 m	堰体宽 13 m	堰体宽 11 m
堰体和内侧压脚宽度分配	堰体宽 15 m, 内侧压脚顶宽 15 m	堰体宽 17 m, 内侧压脚顶宽 13 m	堰体宽 19 m, 内侧压脚顶宽 11 m
板桩入土深度	内、外侧桩底标高均为-21 m	外侧桩底标高-16 m, 内侧桩底标高-21 m	外侧桩底标高-21 m, 内侧桩底标高-26 m
横隔结构设置	无横隔结构	在内外侧板桩之间设置 AZ20 钢板桩横隔墙,横隔墙间距 21 m,横隔墙深度-5.4 m	在内外侧板桩之间设置 AZ20 钢板桩横隔墙,横隔墙间距 21 m,横隔墙深度-10.4 m

换填砂处理。

通过土弹簧法计算模型对标准断面的内力和变形进行复核,利用 Robot 有限元软件建立钢围堰模型,采用梁单元模拟钢板桩及拉杆,采用 m 法土弹簧模拟桩土相互作用。计算工况包括围堰内外水头差产生的静水压力、堰体内剩余水头产生的静水压力、波浪力、土压力等荷载的组合,得出钢板桩最大应力 209 MPa,拉杆最大应力 243 MPa,钢板桩最大位移 15.3 cm。

4 钢围堰结构设计参数优化

针对围堰变形控制这一指标,为更准确地分析钢围堰的变形特性,拟通过 PLAXIS 有限元计算对表 3 中的待优化项目分别进行单因素敏感性分析。每个计算模型除了所研究的单变量外,其他信息均与模型 1(标准模型)相同。

5 PLAXIS 有限元模型计算结果

5.1 有限元模型信息

对于表 3 中的各优化项目,除横隔结构计算分析采用三维模型外,其他的因素分析均采用二维模型计算。计算模型见图 2。

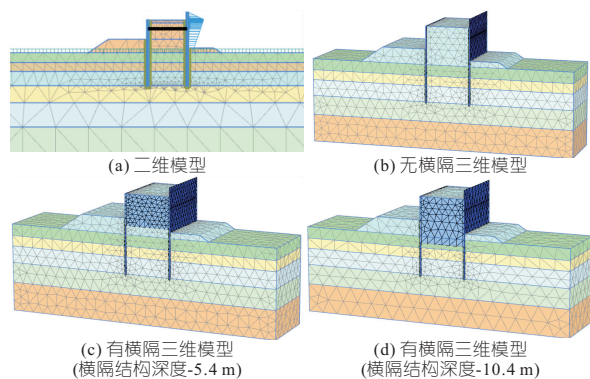


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

围堰内侧的基坑开挖应在围堰结构施工完成且堰体内侧水位降至开挖面以下后进行。建模分析时,认为在保证基坑支护刚度足够的条件下,基坑自身的支护、降水、开挖工序对钢围堰的受力、变形影响较小,因此未模拟基坑支护结构及基坑开挖相关工序,仅重点关注围堰自身在水头差及波浪力作用下的受力、变形。

采用板单元模拟内外侧钢板桩和横隔结构,采用点对点锚杆单元模拟拉杆,锚杆设置为不承受压力。拉杆、钢板桩等构件的截面刚度参数(截面积、惯性矩等)依据相关产品手册确定。土体采用摩尔库伦本构模型,具体参数见表 1。有限元分析的施工阶段主要包括:①表层淤泥清淤换填砂;②施工钢板桩;③钢围堰内侧压脚、外侧护底及部分堰体回填;④施工拉杆并预紧;⑤钢围堰堰体继续回填至拉杆位置;⑥拉杆最终张紧;⑦堰体继续回填至设计标高;⑧围堰内侧降水至泥面以下;⑨施加波浪荷载。

5.2 拉杆标高的影响

图 3 为板桩水平变形与拉杆标高的关系。由图 3 可知,在相同拉杆张紧力下,随着拉杆标高的抬升,拉杆对内外侧板桩的收紧作用增强,具体表现为外侧板桩朝内侧的位移、内侧板桩朝外侧的位移均相应增加。但拉杆标高仅对泥面以上部分的板桩变形有明显影响,内外侧板桩在泥面

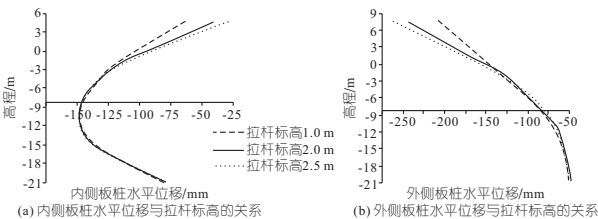


图 3 板桩水平变形与拉杆标高的关系

(负值表示朝向背浪侧,下同)

Fig. 3 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and elevation of tie rod (negative value indicates the lee-side direction, the same below)

以下部分的变形区别很小。

5.3 拉杆张紧力的影响

图 4 为板桩水平变形与拉杆张紧力的关系。由图 4 可知,拉杆标高相同时,随着拉杆张紧力的增加,内外侧板桩相向的变形量增加,内侧板桩自标高-3 m(内侧压脚顶标高处)往下的变形近乎相同,外侧板桩自泥面以下的变形近乎相同。

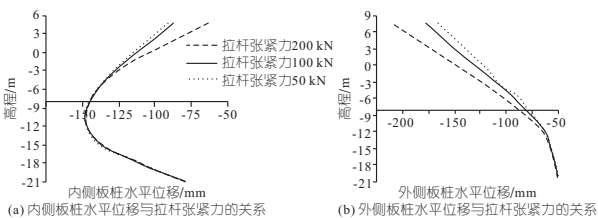


图 4 板桩水平变形与拉杆张紧力的关系

Fig. 4 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and tensile force of tie rod

5.4 钢板桩规格的影响

图 5 为板桩水平变形与钢板桩规格的关系。由图 5 可知,在其他因素相同的情况下,钢板桩抗弯刚度仅对自桩顶至-3 m 标高范围内的板桩变形影响较大。因此,提高钢板桩抗弯刚度对控制围堰入土段变形的作用较小,板桩的规格满足其自身强度要求即可。

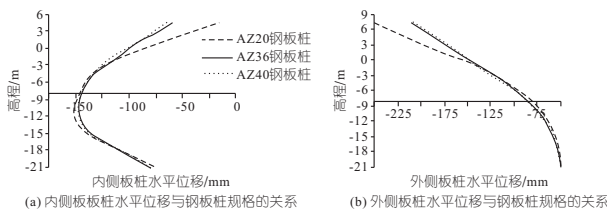


图 5 板桩水平变形与钢板桩规格的关系

Fig. 5 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and sheet pile specification

5.5 堰体及内侧压脚宽度的影响

图 6 为板桩水平变形与堰体宽度的关系。由图 6 可知,在内侧压脚尺寸相同的情况下,随着堰体的宽度增加,外侧板桩变形整体减小,内侧板桩自桩顶至标高-12 m 处的变形相应减小,内侧板桩自标高-12 m 处至桩底的变形趋于相同。

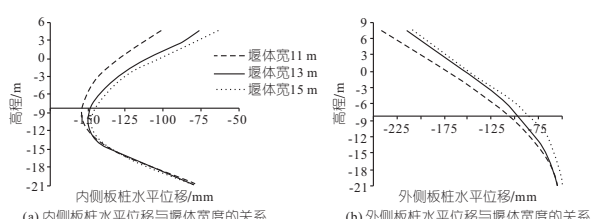


图 6 板桩水平变形与堰体宽度的关系

Fig. 6 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and cofferdam width

图 7 为板桩水平变形与堰体及内侧压脚宽度分配的关系。由图 7 可知,在堰体宽度与内侧压

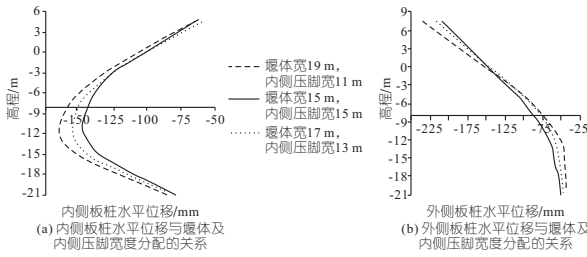


图7 板桩水平变形与堰体及内侧压脚宽度分配的关系
Fig. 7 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and width distribution

脚宽度之和不变的情况下,内、外侧板桩变形随着堰体宽度增加的变化规律有所不同。随着堰体宽度增加,内侧压脚平台的宽度随之减少,外侧板桩自拉杆位置处向下的整体位移相应减小,内侧板桩自拉杆位置处向下的整体变形相应变大,且不同模型的内侧板桩在约-12 m标高处的位移区别最大。

5.6 板桩入土深度的影响

图8为板桩水平变形与板桩入土深度的关系。由图8可知,外侧板桩入土深度的变化对内、外侧板桩变形的影响很小。随着内侧板桩入土深度的增加,外侧板桩整体变形变化较小,而内侧板桩泥面以上部分的变形无明显变化,其入土部分的变形有一定减小。因此,为控制围堰的变形,可适当增加内侧板桩的入土深度。而外侧板桩入土深度对围堰的变形影响不大,可在整体稳定性满足要求的前提下适当减小。

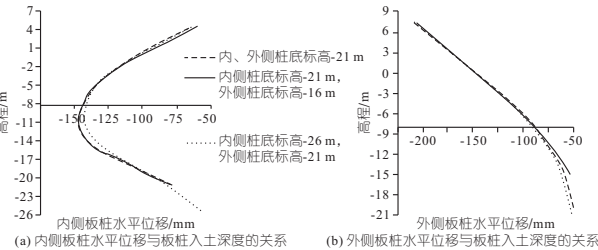


图8 板桩水平变形与板桩入土深度的关系

Fig. 8 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and its depth in soil

5.7 横隔结构设置的影响

图9为板桩水平变形与横隔结构的关系。由图9可知,关于外侧板桩的整体变形,横隔较深结构>横隔较浅结构>无横隔结构,这主要是由于横隔结构限制了堰体填料对外侧板桩的被动土压力的发挥,导致板桩变形增加。关于内侧板桩在泥面以上部分的变形,横隔较深结构>横隔较浅结构>无横隔结构,这主要是由于横隔结构的存在限制了拉杆对内侧板桩的收紧作用。关于内侧板桩入土部分的变形,无横隔结构>横隔较深结构≈横隔较浅结构,这主要是由于横隔结构增强

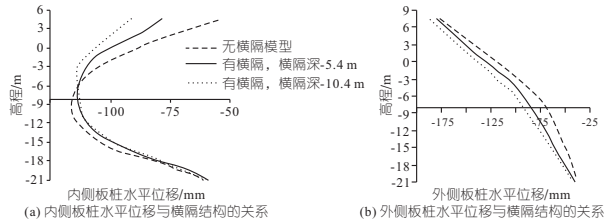


图9 板桩水平变形与横隔结构的关系

Fig. 9 Relationship between horizontal deformation of sheet pile and transverse structure

了围堰内外板桩的相互约束和变形协调,因此有横隔结构的内侧板桩在泥面以下部分的变形小于无横隔结构,但横隔结构的深浅对内侧板桩泥面以下部分的变形影响不明显。

6 结论

a. 拉杆标高、拉杆张紧力、钢板桩规格对双排钢板桩围堰入土部分的变形影响较小,而围堰在泥面以上的悬臂端的变形可通过调整拉杆张紧力进行控制。

b. 与堰体自身宽度相比,增加内侧压脚宽度对控制内侧板桩入土段变形的作用更加明显。考虑到应减小围堰内侧板桩入土段变形对内基坑的影响,在堰体和内侧压脚宽度总和不变的情况下,应尽量增加内侧压脚宽度。

c. 围堰外侧板桩入土深度对围堰变形无明显影响,可适当减小外侧板桩的入土深度、增加内侧板桩入土深度以减小板桩变形。

d. 在内、外侧板桩间设置横隔结构可减少内侧板桩入土部分的变形,但会增加外侧板桩的整体变形,且增加横隔结构埋深对减少内侧板桩变形作用并不明显。为加强围堰内外侧板桩的连接,避免出现板桩施工错位、拉杆弯剪破坏等情况,可考虑在内外侧板桩间浇筑混凝土连梁或在拉杆上增设反支撑等替代措施。

参考文献:

[1] 杨子,刘全,孔令富,等.塔贝拉水电站四期扩建围堰格体填砂工艺优化[J].水电能源科学,2016,34(8):124-126.
 [2] 朱艳,石振明,卢耀如,等.海岸带特殊地质条件下双排钢板桩适用性案例分析[J].工程地质学报,2021,29(6):1849-1861.
 [3] 熊菲.淤泥质海域取排水隧道相关特殊工艺研究[D].上海:上海交通大学,2016.
 [4] 袁聪聪.湖中基坑开挖期间双排钢管桩围堰受力变形特性研究[D].南昌:华东交通大学,2022.
 [5] 武坤鹏,罗俊兴,梁小丛,等.临水软土基坑双排钢板桩支护结构变形分析[J].水运工程,2023(1):157-163.

整数规划模型精确寻优有明显减小,能够为实际分析工作中高频次迭代计算提供技术支撑。

参考文献:

[1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):1-9.

[2] 刘德旭,刘艳,潘永旗,等. 基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1):64-71.

[3] 曾雪婷,刘天琪,李茜,等. 高水电比重系统电力电量平衡混合整数二次规划模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4):1114-1125.

[4] 杨修宇,穆钢,柴国峰,等. 考虑灵活性供需平衡的

源—储—网一体化规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9):3238-3246.

[5] 邵成成,冯陈佳,王雅楠,等. 含大规模清洁能源电力系统的多时间尺度生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19):6103-6113.

[6] 李湃,方保民,祁太元,等. 基于源—荷匹配的区域电网风/光/储容量配比优化方法[J]. 中国电力, 2022, 55(1):46-54.

[7] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7):2474-2483.

[8] 徐询,谢丽蓉,叶林,等. 基于非参数核密度估计的风电场有功功率双层优化模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2):43-55.

Supply and Demand Balance Method of Hydro-thermal-wind-solar-storage System Based on Heuristic Unit Commitment Algorithm

LU Run-zhao¹, CHEN Dian¹, HE Hai-lei¹, ZHANG Song-tao¹, ZHANG Jian¹, ZHANG Yan-tao¹, MA Li-ya², WANG Heng²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

Abstract: Under the background of building a new-type power systems, the hydro-thermal-wind-solar-storage system with a high proportion of new energy has become the main research object of power system planning. It is necessary to perform high-frequency iterative calculations on the long-term supply-demand balance of the hydro-thermal-wind-solar-storage system to achieve quantitative analysis of sensitive boundaries, which puts forward higher requirements for the calculation efficiency of the analysis method. Considering the working characteristics of various power sources and the output probability characteristics of new energy sources, this paper proposed a heuristic unit commitment algorithm based on operating rules, which realizes the daily determination of the unit start-up mode throughout the year, and further constructed a supply-demand balance model. Finally, a case study based on a regional power grid example proved that the proposed model and method were feasible and effective, which provides reference for analyzing long-term supply-demand balance of the hydro-thermal-wind-solar-storage system.

Key words: unit commitment; supply-demand balance; probability characteristics; hydro-thermal-wind-solar-storage system

(上接第 124 页)

[6] 司鹏飞,田利勇,张雨剑,等. 双排钢板桩围堰变形特性研究[J]. 水运工程, 2020(6):172-176, 187.

[7] XUE R, BIE S, GUO L, et al. Stability analysis for cofferdams of pile wall frame structures [J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(9):1-12.

[8] SHEN Y, WU Z, XIANG Z, et al. Physical test study on double-row long-short composite anti-sliding piles[J]. Geomechanics and engineering, 2017,

13(4):621-640.

[9] 中华人民共和国交通运输部. 码头结构设计规范: JTS167-2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2018.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢围堰工程技术标准:GB/T51295-2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范:JTS145-2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.

Structural Design Optimization of Double Row Steel Sheet Pile Cofferdam Based on Deformation Control

ZHOU Qing-quan¹, LI Zhen-yu², JIANG Yi¹

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;
2. The Third Engineering Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212000, China)

Abstract: To ensure the structural safety of the double row steel sheet pile cofferdam and control its water use area, the single-factor sensitivity analysis method was carried out to study the impact of various items on the deformation of cofferdam, and the PLAXIS software was used to implement the 2D and 3D finite element calculation. The results show that the elevation and tension of tie rod, and the specification of steel sheet pile have little impact on the deformation of cofferdam in soil; Compared with the width of the cofferdam itself, the deformation of cofferdam is more affected by the width of inner foot, so the width of the inner foot should be increased as much as possible; The depth of the outer sheet pile has no obvious impact on the deformation of the cofferdam, so that it can be reduced appropriately, and the depth of the inner sheet pile can be increased; The effect of the transverse structure on controlling the deformation of the cofferdam is not obvious, and other measures can be taken to strengthen the connection between the inner and outer sheet pile. The research ideas and calculation results can provide reference for structural design optimization of steel cofferdam in similar projects.

Key words: double-row steel sheet pile cofferdam; depth of sheet pile; width of cofferdam; width of inner foot; transverse structure