

# 沿海淤泥土地基中 新型双排PC工法桩围堰的应用分析

仝妍妍<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>, 吴永军<sup>2</sup>, 周成洋<sup>3</sup>, 袁聪<sup>3</sup>, 沙亚伟<sup>2</sup>

(1. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800; 2. 江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225002;  
3. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223001)

**摘要:**新沂河海口枢纽北深泓闸下游围堰工程为所处河道地基含一定深度的淤泥土,为提高围堰工程效益,设计采用一种新型双排PC工法桩围堰结构形式,通过分析其结构优点,结合规范,对该围堰进行抗倾覆稳定性验算、抗水平滑移验算、抗隆起验算以及深层抗滑稳定验算,得出该围堰结构形式稳定安全的结论。对其施工方法和工艺进行优化,为沿海地区同类围堰工程推广提供价值性参考。

**关键词:**淤泥土地基; 围堰; PC工法桩; 施工方法

中图分类号:TV125 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2024)01-0019-0005

## Application analysis of the new type double row PC pile cofferdam in the coastal silty soil foundation

TONG Yanyan<sup>1</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, WU Yongjun<sup>2</sup>, ZHOU Chengyang<sup>3</sup>,  
YUAN Cong<sup>3</sup>, SHA Yawei<sup>2</sup>

(1. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China;  
2. Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225002, China;  
3. Huaishu New River Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

**Abstract:** The foundation of the river channel in this project contains a certain depth of silty soil. In order to improve the efficiency of the cofferdam project, a new type of double row PC pile cofferdam structure is designed. By analyzing its structural advantages and combining with standards, the cofferdam is subjected to stability checks for overturning, horizontal sliding, uplift, and deep-seated anti-slide stability. The conclusion is drawn that the cofferdam structure is stable and safe. The construction method and technology are optimized to provide a valuable reference for the promotion of similar cofferdam projects in coastal areas.

**Key words:** silty soil foundation; cofferdam; PC pile; construction methods

水利工程建设中,常需提前修建围堰工程,以便创造合适的工作环境<sup>[1-2]</sup>。围堰结构形式包括土围堰、锁扣管桩围堰、钢筋混凝土围堰和钢板桩围

堰等<sup>[3-4]</sup>,这些围堰结构形式有着各自的优缺点和适用环境。在沿海软土地区,钢板桩围堰因其具备强度高、施工速度快、止水性能好、易打入土层且能重

收稿日期: 2023-11-26

作者简介: 仝妍妍(1996—),女,本科,研究方向为水利工程建设与管理。E-mail: tongyy1996@163.com

复利用等优点,成为了一种常用围堰结构形式<sup>[5-6]</sup>。但是,沿海地区可能存在深厚淤泥土地基的施工环境,淤泥土层厚度有时达到10.0 m以上,采用双排钢板桩围堰时,钢板桩长度往往设计较大,造成工程造价高昂,且影响后期拆除。

PC工法组合钢管桩(简称PC工法桩)是从拉森钢板桩改进得到的一种新型板桩支护结构,由钢管桩和拉森钢板桩共同组成,通过钢管桩两侧焊接的锁口将钢管桩和拉森钢板桩有效连接起来,由此建立一道连续的刚性连续板桩,用于挡土和止水<sup>[7-9]</sup>。PC工法桩以钢管桩为主要受力桩,与传统板桩支护结构相比,其桩身刚度得到了提高,由此改进了拉森钢板桩刚度偏低和易变形的缺点。鉴于PC工法桩的工程应用优点,本文以北深泓闸加固改造工程下游围堰工程为依托,该围堰地处深厚淤泥质土地基,设计和发展了一种适合该深厚淤泥土地基的新型双排PC工法桩围堰支护结构,其安全和稳定性值得关注与分析。本文对该双排PC工法桩围堰设计样式、稳定性验算和施工方法等进行了研究和分析,有望为双排PC工法桩围

堰在类似淤泥土地基环境中的推广提供价值性参考。

## 1 工程概况与双排PC工法桩围堰设计

该工程处于新沂河出海口,位于江苏省连云港市灌云县燕尾港镇。工程场地土质及力学性质特征划分为7层,下游围堰大部位于①灰黄、灰色黏土、粉质黏土上,中部位于③层灰色淤泥质重黏土、黏土上,桩底位于⑤层灰色重砂壤土、粉砂土上。

北深泓闸下游施工截流措施为在距闸下游约200 m处打施工围堰。根据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252—2017),下游围堰为4级水工建筑物。经设计与施工人员研究,结合工程实际情况,对原设计方案进行改进,下游围堰拟采用双排PC工法桩围堰,其结构示意图可见于图1和图2所示。如图1所示,河底高程为-4.0 m,外河水位高程为3.0 m,双排PC工法桩间距为12.0 m,通过钢拉杆相连,基坑侧紧邻围堰位置设置一戽台,PC工法桩中的钢管桩纵向深度为27.0 m,钢板桩纵向深度为18.0 m,如图2所示。钢管直径为630 mm,壁厚为

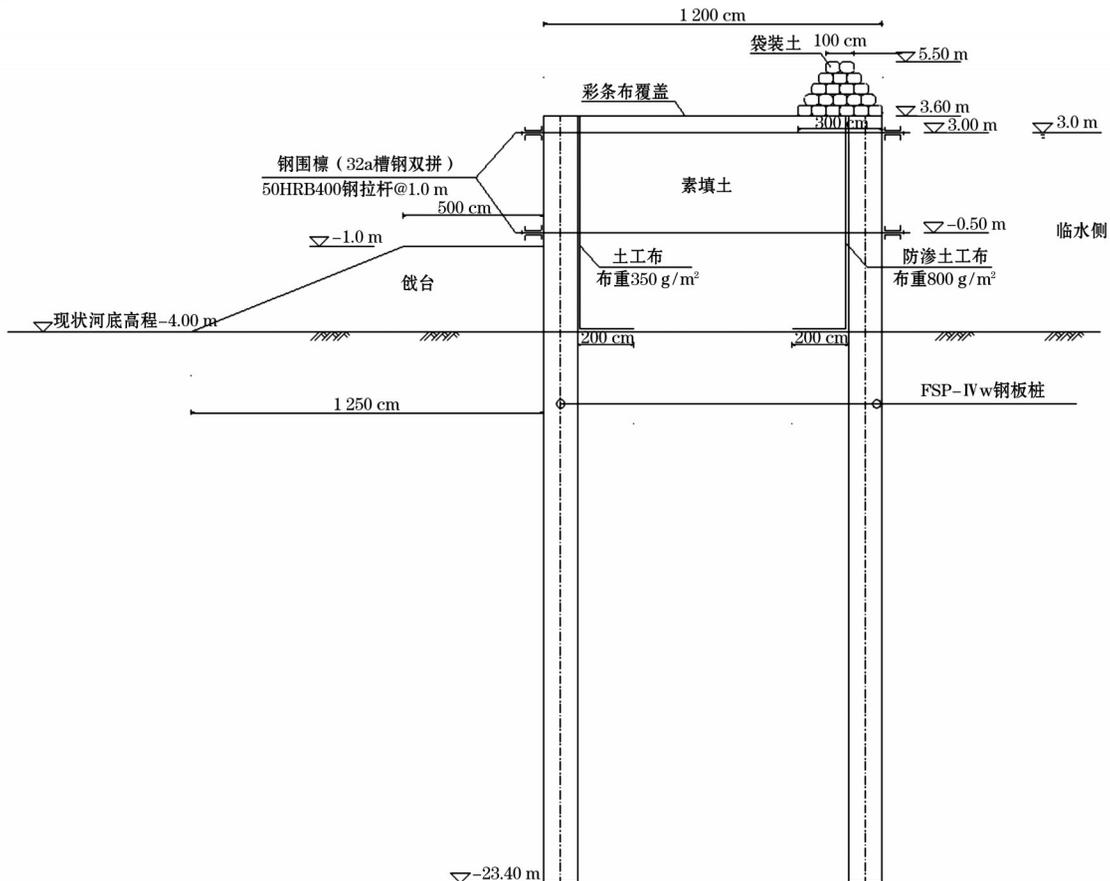


图1 双排PC工法桩结构立体示意

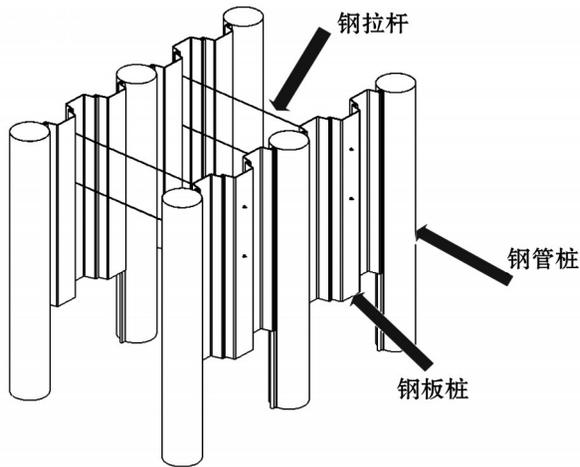


图2 双排PC工法桩结构立体示意

14 mm。2根钢管桩之间有3根钢板桩,相邻钢板桩通过锁扣条咬合固定,钢管桩与钢板桩通过侧扣条与锁扣条相互咬合固定,这样就可以形成一排PC工法桩。同样,两排PC工法桩之间添加素填土,且两排工法桩用钢拉杆相连接,钢拉杆为直径50 mm的HRB400。

## 2 双排PC工法桩围堰稳定性验算

该工程地基含有深厚淤泥质土,由于其结构形态与力学性能和双排钢板桩围堰相似,为确保围堰工程安全性,有必要参考《水利水电工程钢板桩围堰技术规范》,对双排PC工法桩围堰进行抗倾覆、抗水平滑移、抗隆起和深层抗滑稳定等验算。

### 2.1 抗倾覆稳定验算

双排PC工法桩板桩围堰的抗倾覆稳定性验算采用下式进行验算:

$$\frac{E_{pk}a_p + Ga_c}{E_{ak}a_a} \geq K_c \quad (1)$$

式中, $K_c$ 为抗倾覆稳定安全系数,安全等级为三级的围堰, $K_c$ 不应小于1.15; $E_{pk}$ 和 $E_{ak}$ 分别为基坑内外侧荷载的合力作用点至挡土构件底端的距离; $a_p$ 和 $a_a$ 分别为基坑内、外荷载的合力作用点至挡土构件底端的距离; $G$ 为钢板桩、桩间土的自重之和; $a_c$ 为钢板桩、桩间土的重心至前排桩边缘的水平距离。

取一段PC工法桩围堰为对象,结合各土层物理力学参数,按式(1)开展计算,该双排PC工法桩围堰抗倾覆稳定系数为1.61,满足规范安全要求。

### 2.2 抗水平滑移验算

围堰的抗水平滑移稳定性按下式计算:

$$K_c = \frac{f \sum G}{\sum E} \quad (2)$$

式中, $K_c$ 为围堰抗滑移稳定安全系数,其值不应小于1.2; $f$ 为挡土墙基底面与地基之间的摩擦系数,可由试验或根据类似地基的工程经验确定,本文取0.25; $\sum G$ 为作用在挡土墙上全部垂直于水平面的荷载; $\sum E$ 为作用在挡土墙上全部平行于基底面上的荷载。

经计算, $K_c$ 为4.10,满足规范安全要求。

### 2.3 抗隆起验算

双排PC工法桩围堰嵌固深度应满足坑底抗隆起稳定性要求,抗隆起稳定性可按下列公式验算:

$$\frac{\gamma_{m2}l_d N_q + cN_c}{\gamma_{m1}(h+l_d) + q} \geq K_{he} \quad (3)$$

$$N_q = \lg^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi} \quad (4)$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi \quad (5)$$

式中, $K_{he}$ 为抗隆起安全系数,对于该围堰, $K_{he}$ 不应小于1.4; $\gamma_{m1}$ 为围堰外桩底以上土的重度,对地下水以下的土取浮容重,对多层土取各层土按厚度加权的平均重度; $\gamma_{m2}$ 为围堰内桩底以上土的重度; $l_d$ 为基坑底面至钢板桩底面的土层厚度; $h$ 为基坑底面至钢板桩外侧河床的土层厚度; $q$ 为河床以上均布荷载; $N_q$ 和 $N_c$ 为承载力系数; $c$ 和 $\varphi$ 为挡土构件底面以下土的黏聚力和内摩擦角。

经计算,该围堰的抗隆起稳定性系数为2.27,满足规范安全要求。

### 2.4 深层抗滑稳定验算

为进行深层抗滑稳定验算,采用Autobank软件进行二维建模,通过建立围堰有限元模型,并导入地层地质及力学参数,进行渗流和边坡稳定计算。本文选用有效应力法进行稳定性验算,采用瑞典圆弧法进行计算。鉴于本文选用的PC工法桩有27 m长的钢管桩以及18 m的钢板桩两段,因此,将两段分别计算,计算结果如表1所示。图3和图4分别为双排PC工法桩围堰的钢管桩段和钢板桩段的圆弧滑动稳定计算结果,两种板桩长度的围堰断面安全系数分别为4.76和2.23,满足规范安全要求。

综合上述计算结果,该围堰的抗倾覆稳定性安全系数,抗水平滑移验算、抗隆起验算以及深层抗滑稳定计算均符合规范要求,围堰方案安全可靠。

## 3 双排PC工法桩围堰施工方法

### 3.1 施工工艺流程

双排PC工法桩联合支护围堰施工工艺流程如下:

表1 计算结果(不同板桩长度)

板桩长度/m	工况	有效应力/ 总应力	渗流	超孔压	降雨	解法	地震加速度	安全系数
27	施工期	有效应力法	外海侧水位 3.00	$u' = 0$	无降雨	瑞典法	0 g	4.76
18	施工期	有效应力法	外海侧水位 3.00	$u' = 0$	无降雨	瑞典法	0 g	2.23

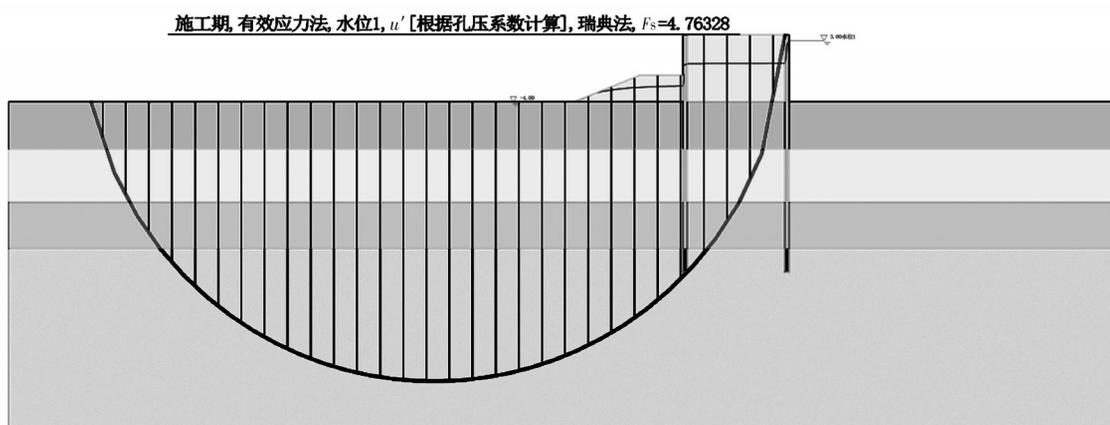


图3 钢管桩段圆弧滑动稳定计算结果(钢管桩长27 m)

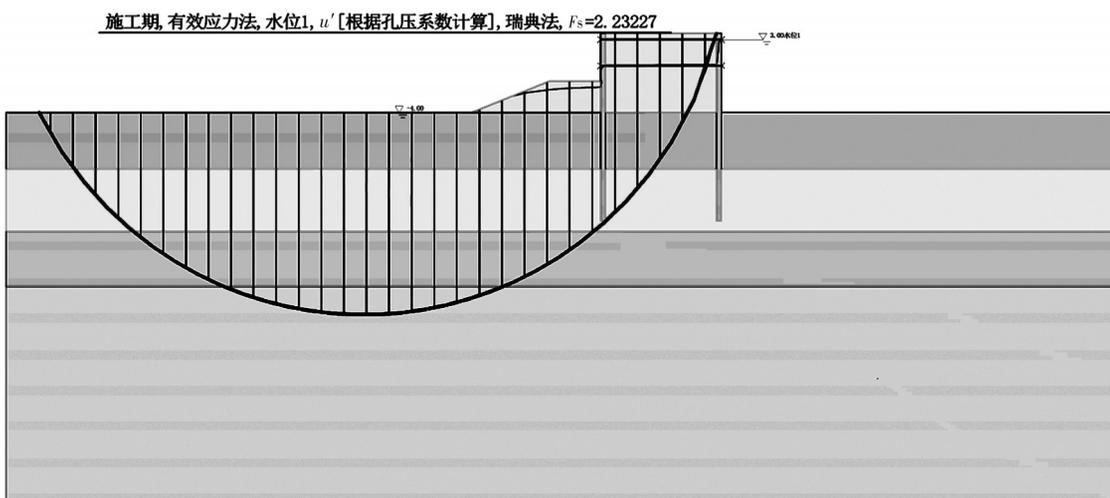


图4 钢板桩段圆弧滑动稳定计算图(钢管桩长18 m)

施工测量→滩地土围堰施工→滩地段钢板桩施工→深泓段PC板桩(PC法)施工(预留龙口)→围堰、拉杆安装→钢板桩内两侧回填土(预留龙口)→龙口填土合拢→龙口段插打钢板、安装围堰和拉杆→围堰后戗台施工、袋装土子堰施工→围堰验收→闸塘排水→围堰后戗修整。具体可分为下述过程。

### 3.2 施工准备

(1)选用施工噪声小、空气污染少的工程机械进场施工。围堰施工前,通过测量定位出围堰位

置,随后开展滩地围堰土方施工和水上PC板桩打桩施工。

(2)施工前期,于施工现场的明显位置竖立公示牌,标明工程施工现场存在的危险源与监控牌、可能造成环境影响的因素及各项安全要求等。

(3)施工用材料包括钢板桩、 $\Phi 630$ 钢管、拉杆、双拼槽钢围堰、土工布等均通过陆路运至施工现场。钢板桩采用SP-IV w拉森钢板桩,单根长18 m。 $\Phi 630 \times 14$  mm钢管长27 m,共需130根,共800 t。钢

围檩及拉杆125 t,防渗土工布2 500 m<sup>2</sup>,土方由业主指定区域就近取土。

(4)施工机械准备。及时组织调遣土方施工机械、打桩设备、抽排水设备、清淤设备和水上工作船等设备运至工地。施工机械的选择性能好、施工效能高和证照齐全的施工机械进场施工。

(5)测量放样。根据设计图纸及建设单位提供的坐标点建立施工控制点对围堰轴线进行放样定位。围堰放样结束报请监理工程师验收复核,符合要求后方可进入下道工序施工。

### 3.3 施工过程

(1)根据以往施工经验,采用两台套水上打桩设备组合,每天可以完成PC板桩施打40~60根,共计770根桩,30 d内完成钢板桩施工,计划从2022年10月1日开工,于2022年10月31日施工完成。

(2)打桩施工从两侧岸边向中间施打推进,每完成20 m左右钢板桩,立即进行拉杆和围堰檩的安装固定,再进行桩间土方回填压实至设计高程;一段完成后,重复上述工序,进行第二段的施工,以此循环重复,纸质全部完成。

(3)沉桩时要严格控制板桩的垂直度,以免桩位偏斜造成脱榫。沉桩的位置和垂直度由定位桩和经纬仪进行控制,沉桩标高通过水准仪控制。

(4)根据定位尺寸,沿钢板桩施打方向先打临时定位桩,每5 m布置导向桩一对,在导向桩上焊接槽钢导梁,用经纬仪校验合格后方可开始钢板桩施打。在钢板桩向前施打的同时,导向桩和导梁不断向前设置。

(5)施工过程中安排专人用垂球线分别观察桩的轴线和垂线方向的倾斜情况,若发生倾斜,则通知操作员及时调整振动锤进行纠偏。在施打过程中,安排质量监督员必须坚守岗位,随时观察桩的倾斜动态变化,保持桩的垂直度。

(6)双排钢板桩形成20 m左右,及时架设围檩,安装对拉杆,使双排桩形成整体,并进行桩间填土至设计标准。围檩分二道布置,在高程▽-0.5 m和▽3.0 m处设置两排拉杆,采用φ50@100钢拉杆,围檩采用[32a双拼槽钢。▽-0.5 m一道钢围檩,需要在最低潮位才能施工,因此必须24 h内赶潮施工。围檩拉锚时应注意围檩槽钢与钢板桩的连接,如果型钢安装后与钢板桩之间出现较大的间隙,为防止围堰变形,应将槽钢与钢板桩之间的间隙全部用槽钢焊接支撑连接,围堰的4个角更应加强。拉杆用螺栓固定在围檩槽钢上,为保证内外钢板桩对拉牢

固,防止螺帽滑牙,应采用双螺帽固定,螺帽与围檩之间用铁板并加橡皮垫实,防止拉杆处渗水。

### 3.4 围堰拆除

(1)水下工程通过验收后,向围堰内注水以保持围堰内外水位基本持平后拆除围堰。拆除前,编制方案报经监理审批后实施,先用挖机将围堰钢板桩拉杆以上部位的土方挖出,运至指定地点。

(2)围堰水下方拆除前先进行围堰钢板桩拔除。拔桩采用机械手作业,选用DZ90型振动锤,计划投入2台套水上拔桩设备。拔桩前先解除连接,拆除拉杆,直到围堰内锚杆全部拆除完,方可进行拔桩。拔桩施工采用机械手的夹具夹住钢板桩,启动振动锤,借助振动锤的不断震动,减少桩与土之间的摩擦力,将板桩从围堰内拔出,然后由吊车装车平板车转运出场。

(3)待钢板桩清除完毕后,采用2 m<sup>3</sup>抓斗式水下挖泥船清除河道所有泥土及杂物,恢复河道原貌。水下方作业期间必须经常探测河床底高程及河道的宽度,直到满足设计要求。水下方拆除完成后,对河道断面进行复测和验收,报建设单位和监理工程师共同参与验收。

## 4 结语

本文以北深泓闸加固改造工程下游围堰工程为例,该工程面临深厚淤泥质土地基的问题,原设计方案采用双排钢板桩围堰方案,钢板桩纵向深度达到27 m,存在侧向刚度偏低、工程造价较高等缺陷。为改善其结构刚度并缩减工程造价,本文发展了一种适用于深厚淤泥土地基的双排PC工法桩围堰,其中钢管桩保持纵向深度27 m,钢板桩纵向深度则为18 m。结合规范要求,对该双排PC工法桩围堰进行了抗倾覆稳定性验算、抗水平滑移验算、抗隆起验算以及深层抗滑稳定验算,稳定性均符合规范要求,围堰方案安全可靠。最后对该双排PC工法桩围堰的施工方法和过程进行了研究和分析。本文研究成果有望为双排PC工法桩围堰在类似淤泥土地基环境中的推广提供价值性参考。

### 参考文献:

- [1] WANG Q, LI C, MA Y, et al. Research on deformation characteristics and design optimization of super-large cofferdam enclosure structure [J]. Buildings, 2023, 13 (10):2429.

实施典范推广。针对影响水生植物群落时空反演变的驱动因子提高生态蓄水区的沉水植物存活率及覆盖率,结合徐圩湖项目经验,可参照以下思路进行:

(1)保证水源地湖区足够深的水位,尽量避免有过大波动,将耐寒性沉水植物苦草变更为狐尾藻,采用新型种植工艺,通过不断补种和养护,逐渐恢复生态蓄水区沉水植物覆盖率。

(2)通过适当地降低水位和提高透明度,保持合适的透深比,为徐圩湖的沉水植物萌发生长提供了良好环境,促进了沉水植物的逐步恢复。

(3)生态蓄水区需要做好防风浪措施,预防底泥搅动影响沉水植物正常生长,如采取设置防风林、护岸绿化、围隔等。

(4)为了消除食草性鱼类对沉水植物的牧食影响,需要进行渔业调查调控鱼类结构,设置围网阻隔引水过程中外来鱼类的带入,减少底层杂食性鱼类对底泥的扰动。

#### 参考文献:

- [1] 姓海涛,宋力,沈静,等.平原地区新开挖水库水质维持管理——以连云港市蔷薇湖水库为例[J].施工技术,2018,47(增刊1):1744-1746.
- [2] 潘荣生,宋力,刘婷,等.连云港市应急水源地工程(蔷薇湖水库)生态工程关键性技术设计与实践[J].江苏水利,2018(3):39-42.
- [3] 上海勘测设计研究院.徐圩新区应急备用水源工程(徐圩湖水库)初步设计报告[R].上海:上海勘测设计研究院,2016.
- [4] 国家环境保护总局科技标准司.地表水环境质量标准:GB3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 张晓姣,朱金格,刘鑫.浅水湖泊沉水植物调控技术研究进展[J].净水技术,2018,37(12):46-51.
- [6] 李威,胡淑芳,陈楠,等.不同密度铜锈环棱螺对沉水植物生长和水质的影响[J].水资源保护,2022,38(3):198-204.
- [7] 张松贺,王佳阳,牟小颖,等.不同水体沉水植物叶面微生物群落特征[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):66-74.
- [8] SAEED T, SUN G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands; Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112(24):429-448.
- [9] 刘永,郭怀成,周丰,等.湖泊水位变动对水生植被影响机理及调控方法[J].生态学报,2006,26(9):3117-3123.
- [10] YIN H B, YAN X W, CU XH. Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Water Research, 2017(115):329-338.
- [11] 翁松干,许静波,樊旭,等.大纵湖高等水生植物与生态环境调查研究[J].江苏水利,2017(12):11-16.
- [12] 卿杰,王超,左倬,等.大型表流人工湿地不同季节不同进水负荷下水质净化效果研究[J].环境工程,2015,33(1):190-193.
- [13] 张彩莹,杜瑞卿,王岩.季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(4):1706-1712.
- [2] JIANG Y, GUO F, WANG W, et al. Stability study of a double-row steel sheet pile cofferdam structure on soft ground[J]. Water, 2023, 15(14):2643.
- [3] 姜士竹,冯峰,谭秀志.板模围堰在水闸消能工程中的应用[J].江苏水利,2014(11):16-17.
- [4] 周成洋,袁聪,林立.钢板桩围堰技术在沿海淤泥质土中的应用[J].江苏水利,2022(3):19-23.
- [5] 袁淑霞,裴龙瑶,张宇鹏,等.非牛顿流体滩涂钢板桩围堰泄漏量分析[J].水利水电科技进展,2023,43(4):67-72.
- [6] 周清泉,李振羽,江义.基于变形控制的某双排钢板桩围堰结构设计优化[J].水电能源科学,2023,41(11):121-124.
- [7] 许海明,郭生根,卢纪璠,等.PC工法桩在基坑支护中的研究及应用[J].施工技术,2019,48(4):85-89.
- [8] 赵豫鄂,曹杰,彭韬宇,等.PC工法桩在水上深基坑工程中的应用[J].施工技术(中英文),2022,51(4):133-136.
- [9] 张云舒,盛天浩,陆春华,等.鄱阳湖某桥墩深基坑PC工法桩支护结构监测与优化设计[J].建筑技术,2023,54(11):1302-1307.

(上接第23页)