

# 波浪桩在引黄济青沉沙池除险加固工程中的应用研究

齐树栋<sup>1</sup> 车健林<sup>2</sup>

1. 山东省调水工程运行维护中心博兴管理站 山东 滨州 256500

2. 潍坊鲁鸢水务有限公司 山东 潍坊 261000

**摘要:**波浪桩是一种新型的预应力混凝土构件,广泛应用于护岸护坡等水利工程,施工时无需做截流、围堰、降水开挖等临时工程。引黄济青沉沙池利用波浪桩进行修复加固,取得了显著效果,本文对波浪桩在该工程中的应用进行分析研究,可为类似水利工程的应用提供借鉴和参考。

**关键词:**波浪桩;沉沙池;除险加固;应用研究

## 引言

波浪桩在干湿环境均可施工,受气候影响较小,无需降水排水,大大缩短工期,特别适合水利护岸护坡,景观河道改造等项目,引黄济青沉沙池常年为胶东地区引水,在不停水的情况下利用波浪桩进行修复加固效果显著,在同类工程中值得推广。

### 1 沉沙池概况

#### 1.1 设计情况

引黄济青工程是山东省境内一项将黄河水引向青岛的跨流域、远距离的大型调水工程,利用博兴县打渔张引黄闸引水,设计自流沉沙与扬水沉沙相结合的运用方式<sup>[1]</sup>。渠首引水工程设计包括输沙渠和沉沙池两部分。其中输沙渠分为高、低沙渠,三堤两渠。在沉沙池使用初期利用低输沙渠,黄河水自流进入沉沙池,随着沉沙池不断淤高,自流引水能力逐步丧失,然后改用泵站扬水,通过泵站和高输沙渠把黄河水送于沉沙池。沉沙池采用条渠形沉沙池,设计总沉沙面积36km<sup>2</sup>,设9个条渠分期使用,每条自流沉沙1.5~2年,扬水沉沙2.5~3年,每个条渠可用4~5年,规划沉沙区可用40年。1989年引黄济青工程先启用2#条渠,第一期工程修建第二、第三两隔堤,长度分别为5930m与6530m,沉沙面积3.43km<sup>2</sup>。

#### 1.2 运行情况

由于各种原因渠首泵站未建,扬水沉沙功能不能实现,1992年底2#沉沙池已基本丧失自流沉沙能力,严重影响引水能力<sup>[2]</sup>。为保证工程的正常运行,采用了“以挖待沉方案”,即将沉沙池内的泥沙清出,腾出库容沉积泥沙。从1993年开始,通过采用内贴式和外排式清淤,至2019年底共清淤1141万m<sup>3</sup>,保证了引黄济青工程的正常运行。

### 2 沉沙池除险加固的必要性

#### 2.1 沉沙池隔堤的现状

2#沉沙池隔堤基本为砂壤土填筑,除2013年对沉沙池南围堤边坡进行防护外,其他边坡均未防护。沉沙池运行30多年一直未进行大修,特别是刘王桥以下段常年蓄水,由于雨淋、沉降和波浪淘蚀,大堤临水面坡度早已不满足1:3的要求,基本在1:1.3~1:2之间,局部边坡在1:1左右,出现塌陷架空现象,堤顶道路存在多处裂缝,其中横缝约50多处,多处纵向裂缝,严重影响大堤安全。

#### 2.2 隔堤安全评价

2018年引黄济青打渔张泵站开始建设,至2019年底泵站建成并已投入运行,沉沙池的运行由自流沉沙改为扬水沉沙,运行水位抬高,水深增加。为保证工程安全运行,2020年5月山东省调水工程运行维护中心委托山东省水利科学研究院对沉沙池刘王桥下游隔堤进行安全评价。山东省水利科学研究院依据《堤防隐患探测规定》(SL436-2008)、《水利水电工程物探规程》(SL/Z679-2015)及有关规范对隔堤进行安全复核,工作内容包括现场检测、综合物探、工程设计安全复核和综合安全评价。

##### 2.2.1 隔堤隐患检测

沉沙池刘王桥下游右侧隔堤长2.8km,左侧隔堤长2.2km,总长5.0km。每200m检测1个断面,共25个断面。主要通过仪器测量、表面观察等方式进行现场安全检测,发现有50多处横缝,多处纵向裂缝。

隔堤隐患检测采用探地雷达法,对重点区段采用超高密度电法详细检测。根据现场实际情况,雷达测线沿隔堤轴线连续布置,共10条测线;超高密度电法测线布置在险工段。通过探地雷达法和超高密度电法探测综合分析认为:

a.探地雷达图像显示在隔堤深度3~4.5m普遍存在雷达波反射异常,系隔堤水位区的反映,认为隔堤土料的透水性好。

b.超高密度电法显示在桩号12+110~12+120处,存在相对的高阻异常,结合现场踏勘分析是隔堤内部裂缝的反映。由横断面电阻率剖面分析认为隔堤土料透水性较好,水有外渗趋势。

### 2.2.2 隔堤稳定复核

#### a.渗流安全复核

根据勘测结果,隔堤防渗整体情况保持较好,正常运用工况断面渗流量正常,隔堤的等势线形态符合均质土堤等势线的分布规律。按照《堤防工程安全评价导则》(SL/Z679-2015)的相关规定,隔堤防渗透坡降等满足相关标准要求,但存在安全隐患,安全性属“B”级。

## 3 沉沙池除险加固研究

### 3.1 加固工程范围

根据工程勘查和安全隐患检测情况,需要对刘王桥以下至沉沙池出口段隔堤内坡进行加固防护,工程总长度5.0km。左岸桩号9+900~12+100,防护长度2.2km;右岸桩号9+900~12+892,防护长度2.8km。

### 3.2 地形、地质及水质情况

工程场区地貌属鲁西北堆积平原区黄河冲积平原亚区(I<sub>2</sub>),为黄河冲积形成。根据地质勘察报告,勘探深度范围内,地层由第四系土层组成。地层岩性主要为第四系松散堆积物,岩性主要为壤土、砂壤土等,总厚度约20.0m。根据水质分析报告,地下水矿化度为827.5~863.1mg/L,PH值7.9,总硬度为498.9~527.1mg/L,属弱碱性极硬淡水。依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)附录L,地下水对混凝土无腐蚀性,对钢筋混凝土中的钢筋具有弱腐蚀性。

### 3.3 除险加固工程研究

#### 3.3.1 沉沙池设计水位及运行水位

根据《山东省引黄济青工程渠首及沉沙池施工图设计说明书》(山东省水利勘测设计院,1987年3月)2#沉沙条渠设计流量41.0m<sup>3</sup>/s,扬水期运行水位12.0m。目前打渔张泵站工程已建成并投入运行,实现了扬水沉沙功能,因此最高运行水位为12.0m。

#### 3.3.2 沉沙池堤顶高程校核

堤顶高程按扬水沉沙水位加堤顶超高确定。

堤顶超高按《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)<sup>[5]</sup>的规定计算,公式为:  $y = R + e + A$

式中:  $y$ —堤顶超高, m;

$R$ —设计波浪爬高, m;

$e$ —设计风壅增水高度, m;

$A$ —安全加高, m

根据计算结果,堤顶超高为1.866m,围堤顶设计高

程值应为13.866m。现场测量现状隔堤顶高程在15.4~16.2之间,均大于设计值,满足规范要求。

#### 3.3.3 沉沙池隔堤加厚设计

由于隔堤临水面坡度基本在1:1.3~1:2之间,存在重大安全隐患,需要对隔堤进行加厚。结合原设计及当地料场情况,仍采用梯形断面均质土堤,迎水坡边坡采用1:3,背水坡仍维持现状。根据《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)规定填筑标准为压实度0.93。

#### 3.3.4 渗流稳定分析

根据地形和运行情况选择左岸断面12+001、11+400、右岸断面11+400、10+200四个代表断面,采用autobank7.0计算分析软件中的渗流分析计算模块对沉沙池堤防进行计算。

计算工况I:临水侧正常水位12.00m,背水侧水位为截渗水位6.00m。

计算工况II:临水侧正常水位12.00m骤降至1/3堤防处水位9.40m,背水侧水位为截渗水位6.00m。

经计算各计算断面堤后坡出逸比降均小于允许比降,满足规范要求。

#### 3.3.5 边坡抗滑稳定分析

根据堤防土料的种类、土料物理力学指标,采用毕肖普法计算。选择左岸断面12+001、11+400、右岸断面11+400、10+200四个代表断面,采用autobank7.0计算分析软件中的边坡稳定分析模块进行抗滑计算。

## 4 沉沙池加固后围堤迎水坡防护

### 4.1 防护顶高程

综合考虑沉沙池的运行条件,防护顶高程为扬水沉沙水位+0.5m超高,确定为12.5m。

### 4.2 防护形式的选定

沉沙池隔堤内坡按照设计坡比加固后,为了保护围堤不再遭受冲刷破坏,需要对迎水坡进行防护。根据工程经验和当地实际情况,初步选定现浇混凝土板护坡、预制混凝土连锁块护坡、悬臂式混凝土挡土墙防护、波浪桩防护、波浪桩与连锁块组合防护五种形式。

对以上五种防护形式进行比较,从施工条件来看,现浇混凝土板护坡、预制混凝土连锁块护坡、悬臂式混凝土挡土墙防护均需要干地施工;波浪桩防护、波浪桩与连锁块组合防护可以水下施工,对工程输水影响最小。沉沙池每年需要采用机械清淤,现浇混凝土板护坡、预制混凝土连锁块护坡在清淤时容易被破坏;悬臂式混凝土挡土墙、波浪桩防护、波浪桩与连锁块组合防护整体性强,清淤时不容易被破坏。从造价上比较,波浪桩与连锁块组合防护造价最低;现浇混凝土板护坡、

预制混凝土连锁块护坡造价基本相同；波浪桩防护造价较高；悬臂式混凝土挡土墙造价最高。

经综合分析比较，波浪桩与连锁块组合防护形式投资最低，且可在沉沙池低水位运行时完成波浪桩施工，不影响引水。因此，无论从经济合理角度，还是从易于施工和运行要求考虑，波浪桩与连锁块组合防护方案最优。

#### 4.3 波浪桩与连锁块组合防护设计

##### 4.3.1 波浪桩布置形式

常用的波浪桩布置形式两种，一是S型布置，二是M型布置。S型布置桩与桩之间咬合在一起，整体性好，抗倾能力强，但处理护岸长度较短；M型布置桩与桩之间不衔接，整体性不如S型布桩，但悬臂长度较小时可采用。根据沉沙池淤积现状，经计算波浪桩最大悬臂长度为2m，在保证安全的前提下，从经济性考虑采用M型布置。

##### 4.3.2 波浪桩防护设计

波浪桩为预制钢筋混凝土结构，由厂家预制生产，单根波浪桩为半圆形，型号为W-CP-400，桩径0.393m，桩长6.0m。为保证防护工程的整体性，波浪桩顶设置冠梁，冠梁为现浇钢筋混凝土结构。

##### 4.3.3 波浪桩稳定计算

计算依据按照《国家行业标准—建筑基坑支护技术规程JGJ120-2012》，采用同济启明星设计计算软件FRWS8.2。

##### a. 抗倾覆验算

桩长6.0m，嵌入深度4.0m时倾覆稳定安全系数 $K = 1.72 \geq 1.5$ ，满足《水工挡土墙设计规范》SL379-2017的要求。

##### b. 整体稳定验算

采用总应力法进行整体稳定验算。经计算抗滑稳定安全系数 $K = 1.99 \geq 1.35$ ，满足《水工挡土墙设计规范》SL379-2017的要求。

##### 4.3.4 混凝土连锁块设计

预制混凝土连锁块底高程10.50m，顶高程为12.50m。综合考虑预制混凝土连锁块的耐久性及施工经验，确定混凝土连锁块厚度120mm。坡面恢复后进行预制混凝土连锁块护坡，护坡结构自上而下为：C30（F150）混凝土连锁块+碎石垫层（2~30mm）100mm+土工布（300g/m<sup>2</sup>）。

## 5 工程安全检测

检测项目包括围堤堤身沉降和位移观测。在现状左围堤边坡失稳最严重的位置11+400、11+700、12+000布设3个沉降、位移观测断面，每个观测断面在堤防内堤肩、外堤肩、内坡、外坡共埋设4个标点。

沉沙池内坡按照设计坡比进行修复加固，背水坡维持现状。堤内坡和内堤肩沉降量随着坝体填筑不断增大，在坝体填筑至坝顶后沉降趋于稳定，堤外肩和外坡沉降量很小。工程完成后开始观测，截至2022年5月内坡最大沉降量为3.8cm，内堤肩最大沉降量1.9cm。断面位移观测基本没有变化。根据沉降观测资料分析，3个观测断面内坡最大累计沉降量为2.1~3.8cm，无不均匀沉降现象。

### 结语

2020年11月至2021年7月由山东省威海水利建设集团有限公司进行沉沙池围堤加固施工，在不影响送水的前提下，保质保量的完成了施工任务。通过一段时间的运行，证明波浪桩在引黄济青沉沙池除险加固工程中的应用是成功的，高水位运行时没有出现塌坡、波浪冲刷等问题，彻底杜绝了引黄济青沉沙池围堤运行的不安全因素。实践证明波浪桩干湿环境均可施工，受气候影响较小，无需降水排水，大大缩短工期，特别适合水利护岸护坡，景观河道改造等项目。波浪桩在干湿环境均可施工，受气候影响较小，无需降水排水，大大缩短工期，特别适合水利护岸护坡，景观河道改造等项目，引黄济青沉沙池常年为胶东地区引水，在不停水的情况下利用波浪桩进行修复加固效果显著，在同类工程中值得推广。

### 参考文献

- [1] 鲍芳, 侯燕钦, 王均乔. 引黄济青干渠改扩建及输水能力分析. 山东水利, 2017(05):34-35.
- [2] 水利部南水北调规划设计管理局、山东省胶东调水局. 引黄济青及其对我国跨流域调水的启示. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [3] 冯国栋、刘祖德、胡定. 土力学. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [4] 中华人民共和国水利部. 堤防工程安全评价导则 (SL/Z679-2015)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范 (GB50286-2013)