

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024204

侍恒,邓宇,曾贺,等.基于灌注桩施工方法的黄河下游花园口段堤岸加固方案研究[J].中国防汛抗旱,2025,35(6):94-98.SHI Heng,DENG Yu,ZENG He,et al.Research on the reinforcement scheme for the embankment of Huayankou Section in the lower reaches of the Yellow River based on the construction method of cast-in-place pile[J].China Flood & Drought Management,2025,35(6):94-98.(in Chinese)

基于灌注桩施工方法的黄河下游花园口段 堤岸加固方案研究

侍恒^{1,2} 邓宇^{1,2} 曾贺^{1,2} 张宝森^{1,2} 刘昌辉³

(1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院,郑州450003;2.水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心,郑州450003;
3.黄河勘测规划设计研究院有限公司,郑州450003)

摘要:针对黄河传统土石结构的护岸、护脚易受水流冲(淘)刷,进而发生根石走失、坦坡失稳等问题,通过对比多种堤岸刚性加固措施,综合考虑实用性、环保性等多种因素,选取黄河花园口险工92垛—127坝作为试点工程,采用钢筋混凝土钻孔灌注桩的方式加固现状堤防。基于多年平均流量(1 000 m³/s)、调水调沙期流量(5 000 m³/s),考虑抗冲刷性和倾覆稳定性设计了2套护根排桩构型,研究成果为促进黄河下游游荡性河道河势归顺,塑造适应多种流量的主槽提供了可行的堤防加固方案。

关键词:灌注桩;护根排桩构型;堤岸;加固;黄河

中图分类号:TV533

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2025)06-94-05

黄河洪水灾害严重,堤防工程是确保黄河防洪安全的重要防线^[1]。通过分析黄河堤防冲决破坏机理可知^[2],水流冲(淘)刷堤脚,造成大堤堤身破坏,进而形成决口险情。由于水沙关系不协调,黄河下游“横河”“斜河”现象频出^[3],黄河传统土石结构的护岸、护脚直接面临水流冲(淘)刷,易出现根石走失、坦坡失稳等问题。为提升堤防工程安全系数,解决中小洪水发生时对堤脚的冲(淘)刷问题,通过对比多种堤岸刚性加固措施,在确保减少阻断地下水交换的前提下,设计了一种堤防加固方法,选用钢筋混凝土钻孔灌注桩的方式,穿过已有抛石层进行施工,对现状堤防加固,研究成果可为确保黄河堤防安全提供技术支撑。

1 工程位置选取及加固方案设计

1.1 工程位置选取

堤防、险工是防洪工程体系中控导河势、稳定主流的

重要组成部分,对人民群众生命和财产安全起到重要的保护作用。黄河花园口险工是抵御黄河洪水、保障下游安全的重要屏障,对其河段右岸大堤起到直接防护作用,背河及下首主要为花园口镇、南月堤村及郑州城区、郑东新区,以及连霍高速等重要干道,区域经济发达、交通位置极为重要。此外,从黄河花园口险工到其下游东坝头工程河段是典型的淤积河段,具有河床持续抬高、二级悬河现象严重等特征,每年汛期都面临发生险情的风险,因此,对该河段工程险情进行加固非常必要。本文选取花园口险工92垛—127坝作为加固位置(图1),该段工程是目前河流顶冲较为严重的河段。

结合花园口段河势及现状防洪工程布置,该段试点工程起点为花园口险工92垛,终点为花园口险工127坝,长度2.625 km。工程总体沿现状险工外侧布置,排桩位置线距离堤防险工坝垛头部前沿约20 m。在两个坝垛之间的坝

收稿日期:2024-06-17

第一作者信息:侍恒,男,工程师,E-mail:819086226@qq.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3011403)。

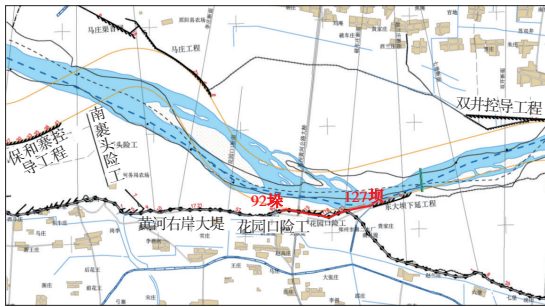


图1 黄河花园口段堤防加固试点工程位置示意图

档处,从工程线型整体平顺和走向美观考虑对排桩位置线进行外移平顺布置,花园口段护根排桩平面布置示意图见图2。



图2 黄河花园口段护根排桩平面布置示意图

1.2 堤岸刚性加固措施比选

堤防安全主要涉及堤身安全和堤脚安全。对于黄河堤防险工段,目前通过对堤坡进行防护,解决了大洪水对堤身的冲(淘)刷危险,但仍没有解决中小洪水对堤脚的冲(淘)刷问题。黄河郑州河段堤防险工均为历史抢险而成,其长度达到堤防长度的72%,由于多年抢险,堤防险工临河侧较大范围内均存在较厚抛石层。黄河郑州段堤防险工前均存在厚薄不均的块石层,分布并无规律,厚度一般在3~6 m。对于黄河砂质河床,大洪水时冲(淘)刷深度较大,现状堤防险工根石不稳,刚性加固方式的选择应既能满足对堤脚根石的有效加固,又能在现状地质情况下得以顺利实施。目前,河流堤防加固、抢险、河道整治中刚性加固技术主要有地下连续墙^[1]、沉井、钢桩及预制桩、钢筋混凝土灌注桩等几种。堤岸刚性加固措施比选见表1。

通过对各种刚性加固措施比选可知,地下连续墙可有效加固堤脚,但会阻断地下水影响当地生态环境,且穿过

表1 堤岸刚性加固措施比选

序号	刚性加固措施	优点	缺点
1	地下连续墙	整体性好,具有良好的抗渗能力,施工振动小、噪音低	存在废泥浆处理难,粉砂地层易引起槽壁坍塌等问题,需采取相关措施保证施工质量;遇到块石层施工难度加大;阻断地下水
2	沉井	具有较好的整体性,抗冲能力强	施工穿过抛石层,难以有效沉至设计深度
3	钢桩	在地层条件较好段施工简单	穿过抛石层施工难度大;暴露于空气中(特别是水位变动区)时,自身易腐蚀;含沙水流长期冲刷下,防腐层易受破坏,后期维护成本高
4	预制桩	施工速度快,成本低	施工受地层条件限制,打入深度有限
5	钻孔灌注桩	适应各种地层施工,可有效穿透厚块石层,抗腐蚀性较强,后期维护费用低	桩间透水,水流可致桩后附近部分土体受冲(淘)刷

厚抛石层施工困难;沉井、钢桩、预制桩也同样因厚抛石层的存在,施工受限。钻孔灌注桩施工既可以实现无临设工程^[5],有效加固现状堤防,不阻断地下水交换,减少对河流流态影响,又能穿过已有抛石层进行施工,形成一道排桩护根,防止根石走失,桩间间隙对桩后土体产生的冲(淘)刷可通过相关措施避免对堤防产生影响。经综合比选,采用钢筋混凝土钻孔灌注桩方法对黄河花园口堤防险工段进行加固。

1.3 加固位置和桩型选择

基于堤防刚性加固理念,本次排桩护根加固通过工程措施对现有险工护根加固,以解决堤防冲决问题,保证防洪安全。黄河传统土石结构的护岸、护脚,受水流冲(淘)刷时,易发生根石走失,坦坡失稳。将护根排桩布置距现状险工一

定距离的临河侧水中或滩地处,可有效避免根石走失的发生,并与桩后险工坝垛、堤防形成组合体,加强现有坝垛的稳定性,降低工程出险概率,防御洪水威胁。

根据黄河花园口险工护坡和根石的实际情况,综合考虑加固效果、技术可行性、经济合理等因素,排桩结构型式选择分离式护根单排桩加固方案^[6],桩体距堤防险工坡脚一定距离,采用钢筋混凝土透水排桩,桩径1.2~1.8 m,桩体净间距0.3~0.4 m。

1.4 灌注桩施工原理

钢管桩沉桩采用“旋转压入工法”,设备选用旋挖钻机,其具有成孔速度快,污染少,机动性强等特点。旋挖钻机可配合冲锤钻碎坚硬地层后进行挖孔作业。如果配合扩大头钻具,可在孔底进行扩孔作业。旋挖钻机采用多层伸

缩式钻杆,钻进辅助时间少,劳动强度低,不需要泥浆循环排渣,节约成本。

2 护根排桩结构设计

2.1 桩前冲刷深度计算

堤防加固采用的排桩护根加固型式,即钢筋混凝土护根排桩是现有堤防险工工程的组成部分。结合近年来黄河下游防洪工程和河道整治工程建设情况,按照实测流量资料,根据刚性加固原则,护根排桩冲(淘)刷计算工况采用如下:①大洪水期正常运用计算工况(流量22 000 m³/s)。护根排桩淹没运用,与堤防险工共同抵御设计洪水,工程自身稳定。②调水调沙期正常运用计算工况(流量5 000 m³/s)。分离式护根排桩淹没运用,工程自身稳定。③多年平均流量正常运用计算工况(流量1 000 m³/s)。分离式护根排桩桩顶不淹没,工程自身稳定。

根据黄河下游地质勘探结果,河床泥沙平均粒径为0.015~0.218 mm,中数粒径采用0.2 mm。根据花园口断面多年实测流量资料,在流量为1 000 m³/s时,靠河险工堤前平均流速为1.0~1.5 m/s,为安全起见,取1.5 m/s;在流量为5 000 m³/s时,平均流速为1.0~2.5 m/s,取2.5 m/s;在流量为22 000 m³/s时,平均流速为3.0~4.0 m/s,取4.0 m/s。由于黄河的河势复杂多变,主流会顶冲工程,冲(淘)刷计算应考虑水流流向的影响。根据《堤防工程设计规范》(GB 50206—2013),顺坝及平顺护岸冲(淘)刷深度公式计算可得设防流量22 000 m³/s、水流流速3.0~4.0 m/s时,计算总冲(淘)刷水深为18.10~20.79 m;流量5 000 m³/s、水流流速1.5~2.5 m/s时,计算总冲(淘)刷水深为12.05~14.48 m;流量1 000 m³/s、水流流速1.0~1.5 m/s时,计算总冲(淘)刷水深为9.32~10.96 m。综合考虑以上几种冲(淘)刷工况计算结果,参考黄河下游实际水中进占抢险水深数据,结合桩的实际运用工况,确定排桩在设防流量下设计最大冲(淘)刷深度取19.00 m。

2.2 设计水位和桩顶高程

郑州市黄河堤防设防流量为防御花园口22 000 m³/s的洪水标准。花园口段试点工程为沿堤防修建的钢筋混凝土护根排桩,属堤防的一部分,护根排桩和桩后堤防共同防御洪水。因此,设计水位采用堤防工程2020年水平年22 000 m³/s流量相应水位。

由于本次工程为试点工程,为积累经验,花园口险工北广场段(花园口险工116坝至122坝)桩顶高程分别选取正常运用计算工况1 000 m³/s流量和调水调沙期5 000 m³/s流量相应水位,以便后期观测不同桩体的运行情况。根据花园口段近3年水位流量观测资料,分别推算出花园口段试点工程桩顶高程,见表2。

表2 花园口险工段试点工程桩顶高程推算

位置	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	桩顶高程/m
花园口险工段	1 000	89.60~89.06
	5 000	91.20~90.66

2.3 桩体透水率

根据黄河水利科学研究院动床物理模型试验^[7],一般桩径为0.8~1.0 m,桩净间距为0.30~0.75 m,透水率为27%~43%。在相同入流角度条件下,透水率越大则坝后滩地过流水深及流速会相应增大^[8-9]。通过对透水桩坝型式的工程实际运行情况分析,考虑水流对桩后土体的冲(淘)刷情况,桩间距1.1 m、净间距0.30 m(透水率33%)的工程实际运行效果好于桩间距1.4 m、净间距0.4 m(透水率40%)的工程,能更好地保护桩后土体免受较大冲(淘)刷。

综合考虑相关研究成果、工程运行及工程施工等影响因素,桩的设计透水率确定在20%左右,例如采用桩径1.2 m和1.8 m,桩净间距分别为0.3 m和0.4 m的布设方式,透水率为18%~20%。

2.4 受力分析

排桩主要承受水平方向荷载,受力应重点分析水压力和土压力。排桩竖向主要承受自重,竖向稳定有保证。排桩水平向因遭受水压和土体推压有发生倾覆的可能,在进行排桩承受荷载计算时,取单桩为分析单元,单桩所承受的水平荷载主要有:静水压力、动水压力、主动土压力及被动土压力。

本次护根排桩采用透水排桩结构,水流可通过桩间空隙使桩前及其左右河床冲刷坑底以上范围内的河床部分土体被水流冲失,桩后河床冲刷坑底以上范围内的部分土体被绕过桩体的水流冲失,通过冲刷和绕流作用,使桩前后河床形成较小的高度差,本次设计考虑在桩前冲刷坑达到设计冲深时,桩后土体走失高度为3.0 m。桩前冲刷坑形成时,透水排桩在前后水压力和挡土压力作用下,主要是向前推倒,偏安全考虑,本次设计桩体受力不计行近流速

动水压力和前后水位差的影响。

2.5 灌注桩嵌固深度计算和桩长确定

本次护根排桩为悬臂式排桩,其冲刷坑底以下嵌固深度由抗倾覆稳定决定,悬臂式排桩支挡结构的嵌固深度应满足桩整体相对于桩底内侧O点的倾覆稳定性,通过倾覆稳定性求解桩嵌固深度。嵌固稳定性计算如图5所示。

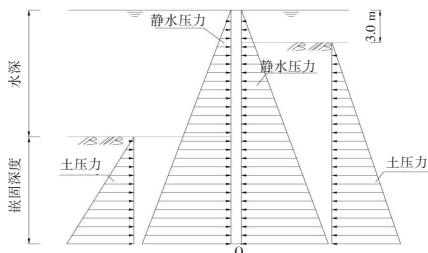


图5 悬臂式结构嵌固稳定计算示意图

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012),悬臂式支挡结构的嵌固深度应符合嵌固稳定性要求。对试点工程桩顶高程分别选取1 000 m³/s流量时相应水位和调水调沙期5 000 m³/s流量时相应水位两种工况条件,计算嵌

固深度。①1 000 m³/s流量水位运用工况条件下,桩前水深(桩顶以下)14.4 m,按挡土高度差11.4 m考虑计算,嵌固深度≥20.6 m,可满足嵌固稳定安全系数1.2的要求;②5 000 m³/s流量水位运用工况条件下,桩前水深16.0 m,按挡土高度差13.0 m考虑计算,嵌固深度≥24.0 m,可满足嵌固稳定安全系数1.2的要求。

小浪底水库运用以来,由于水库拦沙和调水调沙,黄河下游主槽发生了持续冲刷,同流量水位明显下降。参考《黄河下游引黄涵闸改建工程可行性研究报告》中对未来黄河下游极限冲刷状态下河道冲刷预测,未来花园口以上河段主槽仍将冲刷1.66 m,花园口—夹河滩河段主槽将冲刷1.48 m。考虑小浪底水库运用后河床下切的不利影响,安全起见按照最不利设计原则,本次设计预估冲刷为2.0 m,总桩长=嵌固深度+桩前水深(桩顶以下)+预估冲刷(2.0 m),计算结果见表3。根据嵌固深度计算结果可知,桩顶高程为1 000 m³/s流量水位和5 000 m³/s流量水位的排桩设计总桩长分别为37 m和42 m。

表3 嵌固深度计算结果统计表

设计工况	桩顶高程	桩顶以下桩前水深/m	挡土高度差/m	嵌固深度/m	计算桩长/m	计算总桩长/m
设防流量22 000 m ³ /s	1 000 m ³ /s流量相应高程	14.4	11.4	20.6	35	37
	5 000 m ³ /s流量相应高程	16.0	13.0	24.0	40	42

3 强度验算

3.1 结构内力计算

根据嵌固深度计算结果可知,方案1:桩顶平1 000 m³/s流量水位时,满足嵌固稳定安全系数要求的桩入土嵌固深度为20.6 m;方案2:桩顶平5 000 m³/s流量水位时,满足嵌固稳定安全系数要求的桩入土嵌固深度为24.0 m。依据《码头结构设计规范》4.2.20条承受水平荷载桩类型划分标准计算得到两种方案中入土嵌固深度均>4T=12.96 m(T为桩的相对刚度系数,m),属于弹性长桩,因此,本文中两种设计方案所采用的护根排桩均属于弹性长桩,根据《码头结构设计规范》4.2.21条相关内容护根排桩内力计算可采用弹性地基梁法(“m”法)进行计算。由于护根排桩前存在冲刷坑,按冲刷线以上和冲刷线以下两部分分别进行计算。在冲刷线以上结构部分按梁单元计算;冲刷线以下部分按弹性地基梁单元计算。计算两种情况控制荷载分别如下:方案1灌注桩直径D=1.2 m,桩间净距d=0.3 m,桩体计算控

制荷载成果为剪力 $Q_0=334.4$ kN、弯矩 $M_0=1 259.22$ kN·m。方案2灌注桩直径D=1.8 m,桩间净距d=0.4 m;桩体计算控制荷载成果为 $Q_0=632.15$ kN、 $M_0=2 739.32$ kN·m。

3.2 桩身结构强度验算

拟定桩身混凝土采用C35,钢筋HRB400,抗拉强度设计值 $f_y=360$ N/mm²,钢筋保护层厚度采用5 cm。根据内力计算结果,以及《基坑支护技术规程》和《混凝土结构设计规范》附录进行截面承载力计算,采用对称配筋方式计算,从计算结果(表4)可知,弯矩、剪力设计值满足结构内力要求。

表4 桩身配筋计算表

方案	M_0 /kN·m	Q_0 /kN	纵筋	箍筋
方案1	2774.6	493.5	28C28	φ8@250
方案2	6325.2	915.9	30C32	φ8@250

4 结论与建议

本文基于黄河下游堤防安全防护的实际需求,以黄河下游花园口段的花园口险工工程作为分析对象,提出了钢

钢筋混凝土钻孔灌注桩加固堤防险工的方法,结论如下。

(1)通过对不同刚性加固措施的比选分析,确定了钢筋混凝土钻孔灌注桩方法对黄河花园口堤防险工段进行加固,并提出了具体的加固位置及分离式护根单排桩的结构形式。

(2)以1 000 m³/s和5 000 m³/s两种不同流量工况作为计算分析条件,从抗冲刷性和倾覆稳定性两方面考虑,得出钢筋混凝土钻孔灌注桩的设计透水率约为20%,排桩嵌固深度分别为20.6 m和24.0 m,总桩长分别为37 m和42 m,灌注桩直径分别为1.2 m和1.8 m。

(3)研究成果将有助于提升黄河堤防工程防洪安全,进而促进黄河下游游荡性河道河势归顺,塑造适应多种流量的主槽,建议将该技术方法推广到堤坝决口封堵、植入式斜桩护岸、基础地基工程加固等方面进一步提升完善。

参考文献

[1] 徐路凯,张宝森,岳瑜素,等.黄河下游堤防工程标准化管理平台设计

与实现[J].中国防汛抗旱,2022,32(5):55-58.

[2] 张秀勇.黄河下游堤防破坏机理与安全评价方法的研究[D].南京:河海大学,2006.

[3] 胡一三,张红武,刘贵芝,等.黄河下游游荡性河段河道整治[M].郑州:黄河水利出版社,1998.

[4] 吴照海.建筑工程施工中的地下连续墙施工技术[J].低碳世界,2017(31):213-214.

[5] 张宝森,胡全义,李宇鹏,等.无临设工程施工的沉桩方法及工法设计[J].中国防汛抗旱,2024,34(3):81-84.

[6] 张宝森,王忠福,田治宗,等.黄河下游预应力管桩丁坝结构优化设计研究[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(5):96-99,129.

[7] 刘燕,江恩惠,曹永涛,等.透水桩坝对黄河下游河势控导效果[J].人民黄河,2011,33(6):11-12.

[8] 姚文艺,王普庆,常温花.护岸式透水桩坝缓流落淤效果及桩部冲刷过程[J].泥沙研究,2003(2):26-31.

[9] 栗铭阳,张宝森,方国华,等.基于MIKE21的河南省东安透水桩坝水流数值模拟[J].中国防汛抗旱,2022,32(10):67-72.

Research on the reinforcement scheme for the embankment of Huayuankou Section in the lower reaches of the Yellow River based on the construction method of cast-in-place pile

SHI Heng^{1,2}, DENG Yu^{1,2}, ZENG He^{1,2}, ZHANG Baosen^{1,2}, LIU Changhui³

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003;

2. Research Center on Levee Safety and Disease Prevention, MWR, Zhengzhou 450003;

3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003)

Abstract: In response to the problems of traditional soil and rock structures in the Yellow River, such as bank protection and foot protection, which are easily eroded by water flow, resulting in root stone loss and slope instability, various rigid reinforcement measures for embankments were compared. Taking into account practicality, environmental protection and other factors, the Huayuankou dangerous project from Dike 92 to Dam 127 on the Yellow River was selected as a pilot project, and reinforced concrete bored cast-in-place pile were used to reinforce the current embankment. Based on the average annual flow rate (1 000 m³/s) and the flow rate during the water and sediment adjustment period (5 000 m³/s), two sets of protective root row pile configurations were designed considering erosion resistance and overturning stability. The research results provide a feasible embankment reinforcement plan for promoting the normalization of the meandering river channel in the lower reaches of the Yellow River and shaping a main channel that adapts to various flow rates.

Keywords: cast-in-place pile; root protection pile configuration; embankment; reinforcement; the Yellow River 编辑 赵乐媛