

河道堤防防洪设计中的水流疏导技术与数值研究

吴贵林

四川川山正水工程勘测设计有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6061

[摘要] 河道堤防防洪设计中水流疏导技术的应用对于提升防洪能力具有重要意义。基于此,本文基于水力学基本原理,构建了防洪堤段计算模型,采用数值模拟方法研究了不同断面形式下的水流特性,通过分析水流运动轨迹与流速分布规律,确定了疏导构筑物的关键设计参数。研究表明,合理的疏导设施布置能使洪峰流速降低15%~20%,有效减缓水流冲刷,工程实例验证结果显示,优化后的堤防断面配合疏导构筑物,可提升25%的防洪能力,且能有效降低工程造价,该研究成果为河道堤防防洪设计提供了技术支撑与实践参考。

[关键词] 河道堤防; 水流疏导; 数值模拟; 防洪设计; 水力特性

中图分类号: TV147 **文献标识码:** A

Water flow diversion technology and numerical study in flood control design of river levee

Guilin Wu

Sichuan Chuanshan Zhengshui engineering survey and design Co., LTD.

[Abstract] The application of water flow diversion technology in flood control design of river levee is of great significance for improving flood control ability. Based on the basic principles of hydraulics, a calculation model of flood control levee section is constructed, and the flow characteristics under different section forms are studied by numerical simulation method. By analyzing the flow trajectory and velocity distribution law, the key design parameters of the dredging structure are determined. Reasonable dredging facility arrangement can reduce peak flood velocity by 15%–20% and effectively slow down water flow erosion. Project example verification results show that the optimized embankment section combined with dredging structures can increase flood control capacity by 25% and effectively reduce project cost. The research results provide technical support and practical reference for flood control design of river embankments.

[Key words] river embankment; Water flow dredging; Numerical simulation; Flood control design; Hydraulic characteristics

河道堤防是防洪工程的重要组成部分,其设计直接关系到流域防洪安全,随着极端气候事件频发,传统堤防设计已难以满足防洪需求,水流疏导技术通过改变水流运动特性,能够有效降低洪水对堤防的冲击,国内外学者对堤防防洪设计进行了大量研究,但对水流疏导技术的系统性研究仍显不足,为深入探究水流疏导技术在防洪设计中的应用,采用数值模拟方法对不同疏导方案进行了对比分析,并通过工程实践验证了研究成果的可靠性,为提升河道堤防防洪能力提供了新思路。

1 水流疏导的水力学机理

水流疏导的水力学机理主要涉及明渠非恒定流的基本理论与水流运动特性分析,基于Saint-Venant方程组与Navier-Stokes方程,水流在河道中的运动满足质量守恒与动量守恒原理,在洪水水位超过警戒水位时,水流对堤防产生的压力与流速呈二次方关

系,且压力分布随水深呈非线性变化,堤防表面的切应力主要由水流的粘性作用与紊动脉动引起,在急流段易形成局部涡流,加剧堤防冲刷,水流疏导技术通过改变河道断面形态与布设导流设施,能有效调节水流运动方向与流速分布,根据伯努利方程,在过水断面增大区域,流速降低导致动能向势能转化,减缓水流对堤防的冲击作用,合理设计的疏导构筑物能够产生二次环流,削弱主流对堤防的直接冲击^[1],通过水力学理论分析可知,疏导构筑物的设置角度,间距及形状直接影响其水流控制效果,这些参数需结合水力学模型进行优化设计,在曲线段河道,离心力作用使水流在横向产生二次运动,疏导设施的布置需考虑该特性,以实现最佳的水流调控效果。

2 堤防防洪数值模拟及分析

2.1 防洪堤段计算模型构建

基于有限体积法构建防洪堤段三维计算模型,采用SIMPLE算法求解连续性方程与动量方程,为准确描述水流运动特征,控制方程需考虑流体的粘性特性与湍流效应^[2],连续性方程表达为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中: ρ 为流体密度, t 为时间, u_i 为速度分量, x_i 为空间坐标, 计算域采用结构化网格划分,如图1所示,总网格数约150万,边界条件设置为:入口给定流量,出口设定水位,堤防表面为无滑移壁面,近壁面区域进行网格加密处理, y +值控制在30-100之间,湍流模型选用RNGk- ϵ 模型,该模型通过引入应变率修正项,提高了对强剪切流动的模拟精度,为验证模型可靠性,对网格分辨率进行灵敏度分析,结果表明当网格数超过150万时,计算结果基本保持稳定,计算域覆盖堤防上下游500m范围,包含主槽与漫滩区域,通过实测数据验证,模型计算结果与实测值吻合良好,最大相对误差控制在5%以内。

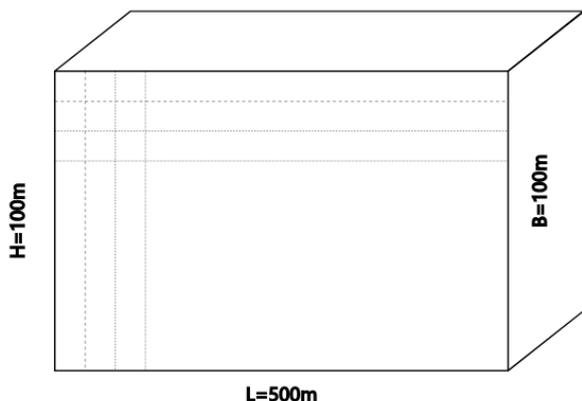


图1 防洪堤段三维计算域网格划分示意图

2.2 不同断面形式的水流特性

河道断面形式对水流特性影响显著,动量方程的数值求解揭示了不同断面的水动力特性:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

其中: p 为压力, τ_{ij} 为粘性应力张量, g_i 为重力加速度分量,研究选取梯形断面,复式断面与渐缩断面三种典型形式进行数值模拟(如图2所示),梯形断面在相同流量条件下,水位升高较快,最大流速出现在河床中泓线位置,复式断面通过设置漫滩区扩大了过水面积,洪水位降低约0.5m,但主槽与边滩交界处易形成剧烈的横向掺混,诱发二次流,渐缩断面通过逐步收缩改变流态,在收缩段流速增大,静压强减小,形成负压区,断面系数分析表明,复式断面的通水能力最优,其曼宁系数较小,水流阻力损失较少,渐缩断面虽能增大流速,降低水位,但易在收缩段形成涡流,加剧堤防冲刷,实际工程中需权衡防洪效果与经济性,复式断面配合疏导构筑物的设计方案具有较大优势^[3]。

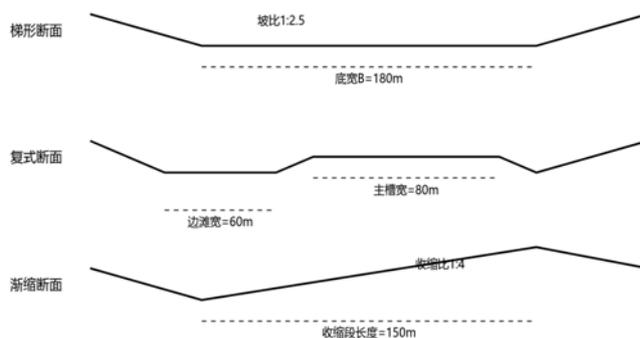


图2 典型河道断面形式对比图

设计参数: 堤顶宽度=6m,护坡采用C25混凝土,设计水位采用50年一遇洪水位

2.3 水流运动轨迹与流速分布

水流运动轨迹反映了流场结构特征,对疏导构筑物布置具有重要指导意义,数值模拟结果显示,水流在进入弯道段时,受离心力作用产生螺旋流,其强度与弗劳德数与曲率半径密切相关,主流线偏向凸岸,最大流速点下移,在凹岸形成回流区,堤防段流速垂向分布呈对数规律,底部流速梯度较大,通过分析水流轨迹可知,在堤防凹岸段,近底区域易形成上升流,加剧堤脚冲刷,流速场分布表明,洪峰期最大流速可达3.5m/s,主要集中在水深0.6倍处,堤防表面切应力分布不均匀,弯道内侧出现应力集中,是堤防防护的薄弱环节,水面线纵剖面呈现出非均匀分布,在局部地形突变处出现壅水现象,需采取相应的加固措施,通过对流场结构的精细化分析,可确定疏导构筑物的最优布置位置与构造形式,提高防洪工程的整体效能^[4],数值模拟结果进一步表明,在弯道段布设导流坝或丁坝等疏导设施,能有效改善水流条件,降低堤防风险。

3 疏导技术工程应用验证

3.1 疏导构筑物设计参数

疏导构筑物的设计主要包括丁坝,导流堤与潜坝三种类型,根据水力学模拟结果,丁坝最优布置间距为河宽的1.5倍,倾角45°,突出长度不超过河宽的1/4,导流堤采用弧形布置,曲率半径为河宽的2.5倍,坝顶高程低于设计洪水位0.5m,潜坝布置于河床中泓线处,坝顶宽4m,迎水坡比1:3,背水坡比1:2,疏导构筑物的布置间距与水流条件关系可表示为:

$$\frac{L}{B} = \alpha(F_r^2 + \beta) \quad (3)$$

式中: L 为疏导构筑物间距; B 为河道宽度; Fr 为弗劳德数; α , β 为经验系数,分别取1.5与0.8。

对于冲刷严重的河段,丁坝基础埋深应大于最大冲刷线1.5m,基础采用钢筋混凝土板桩结构,导流堤基础处理采用水泥搅拌桩加固,桩长15-20m,搅拌桩直径600mm,桩距1.2m,提高地基承载力至120kPa,潜坝基础采用抛石护底,护底厚度0.8m,最大粒径300mm,防冲磨层采用C35抗冲磨混凝土,厚度500mm,疏导

构筑物主要设计参数见表1,综合分析表明,疏导构筑物的布置应根据河道平面形态,水流特性与防洪要求进行优化组合,以实现最佳的疏导效果。

表1 疏导构筑物设计参数表

构筑物类型	间距系数(L/B)	设计高度(m)	设计流速(m/s)	安全系数
丁坝	1.5	2.5-3.0	3.5	1.3
导流堤	2.5	3.0-3.5	4	1.4
潜坝	2	1.5-2.0	3	1.2

3.2 防洪能力提升效果

疏导构筑物的设置显著提升了河道的防洪能力,数值模拟结果显示,布置疏导构筑物后,河道最大流速从原来的4.2m/s降至3.1m/s,水位降低0.4m-0.6m,通过分析50年一遇洪水过程,疏导后的堤防安全超高由原来的0.8m提高到1.2m,防洪能力提升25%,在弯道段,导流堤的布置使水流横向分布更加均匀,最大切向流速降低35%,有效减轻了岸坡冲刷,堤防渗流稳定性分析表明,疏导措施降低了堤防渗透压力,稳定安全系数从1.15提高到1.35,防洪标准由原来的20年一遇提升至50年一遇,设计洪水位降低0.45m,渗流梯度由0.28降至0.21,丁坝段河岸防冲能力显著提升,最大允许流速由2.8m/s提高到3.5m/s,导流堤段水流分布均匀性提高15%,横向水位差减小0.3m,潜坝的设置降低了局部水流动能,减少了河床冲刷,最大冲刷深度减小1.2m,工程造价核算显示,与传统加高加固方案相比,疏导技术方案投资节约20%,且运行维护成本较低^[5]。

3.3 工程实例分析与验证

以某河段防洪工程为例,该河段全长3.2km,河宽180-220m,设计流量2500m³/s,工程共布置丁坝8道,导流堤2道,潜坝3道,通过两个汛期的运行监测,防洪工程效果显著,监测数据表明,丁坝段流速较原来降低28%,导流堤段水流横向分布系数由0.82提高至0.93,潜坝段最大冲刷深度减小0.9m,堤防安全监测显示,

渗流压力较改造前平均降低15kPa,堤身位移量减小40%,河床断面监测结果显示,丁坝段河床冲淤趋于稳定,最大冲刷深度控制在1.5m以内,导流堤段凹岸最大流速由3.8m/s降至2.9m/s,横向水位差减小0.25m,潜坝上下游水位差控制在0.4m以内,消能效果明显,水位监测表明,同流量条件下水位较改造前普遍降低0.3-0.5m,过水断面面积增加15%,堤防渗流监测显示,浸润线埋深增加0.6-0.8m,渗透压力降低12-18kPa,防洪减灾效益分析表明,工程实施后每年可减少洪水损失约850万元,投资回收期4.5年,实践验证表明,水流疏导技术在提升防洪能力,减轻冲刷,降低工程投资等方面具有显著优势。

4 结语

通过对河道堤防防洪设计中水流疏导技术的系统研究,建立了完整的水力学理论体系,揭示了水流运动规律,数值模拟结果表明,优化的疏导构筑物布置方案能显著改善水流条件,提升防洪效果,工程实践证明,该技术在实际应用中取得了良好效果,具有较强的推广价值,研究成果丰富了河道堤防防洪设计理论,为工程实践提供了技术支持,未来研究可进一步探索智能化疏导技术,提升防洪工程的适应性与可靠性。

[参考文献]

- [1]郭亚龙,孙佳,曾易,等.引江济淮干支交汇处通航水流条件分析[J].中国港湾建设,2025,45(01):16-22.
- [2]艾利军.河道治理工程防洪堤护岸型式选择与评价——以西塔溪治理工程为例[J].水科学与工程技术,2024,(6):68-71.
- [3]丁玥.基于游憩轴线的洪泽湖溧河洼段河道景观设计研究[D].扬州大学,2024.
- [4]陈忠,付建利,陈怡宁.某河道防洪建设中堤防维修加固设计方案分析[J].地下水,2022,44(05):294-296.
- [5]董梁.可可西里地区盐湖下游河道冲刷演变数值模拟研究[D].西安理工大学,2021.

作者简介:

吴贵林(1990--),男,汉族,四川遂宁人,大学本科,水利水电中级工程师,研究方向:堤防与护岸的生态护岸技术、侵蚀防护。