

西安沣河梁家滩段防洪提升与生态治理工程设计研究

马 昭¹, 潘小钰², 张 璐³, 相凤欣¹, 郭 强¹

(1. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 渭南高新区城市管理处, 陕西 渭南 714000; 3. 西安市水利规划勘测设计院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为提升西安沣河梁家滩段防洪能力并改善生态环境, 针对该段堤防建于20世纪60年代、防洪标准不足、结构老化及河床下切严重等问题, 开展了综合治理设计研究。基于区域相关规划, 通过河道演变与水面线分析, 提出了“防洪安全+生态景观”协同治理方案。设计采用坡式护岸与蜂巢格室护坡等生态技术, 堤顶宽8 m, 超高1.4 m, 防洪标准提升至100年一遇。结果表明, 工程实施后可有效增强区域防洪安全, 修复河道生态, 提升滨水空间品质, 实现综合效益, 并为类似城市河流治理提供借鉴。

关键词: 防洪能力; 生态环境; 河道演变; 水面线分析; 生态技术; 蜂巢格室护坡

中图分类号: TV87

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0271-05

Design and Study on Flood Control Enhancement and Ecological Governance Project in Liangjiatan Section of Fenghe River in Xi'an

MA Zhao¹, PAN Xiaoyu², ZHANG Lu³, XIANG Fengxin¹, GUO Qiang¹

(1. Xi'an Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China; 2. Weinan High-tech Zone Urban Management Office, Weinan 714000, China; 3. Xi'an Water Conservancy Planning Survey and Design Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To enhance the flood control capacity and improve the ecological environment of the Liangjiatan section of the Fenghe River in Xi'an, a comprehensive governance is designed and studied on the issues such as the existing levees constructed in the 1960s, insufficient flood control standards, structural aging and severe riverbed scouring. Based on relevant regional plans, a coordinated governance scheme integrating "Flood Control Safety + Ecological Landscape" is proposed through the analysis on river channel evolution and water surface profile. The ecological techniques such as slope revetment and honeycomb cell slope protection are adopted in the design. The top of the embankment is 8 m wide and 1.4 m high. The flood control standard has been upgraded to a once-in-100-year event. Results indicate that after the implementation of the project, it can effectively enhance the regional flood control safety, restore the ecological environment of the river course, improve the quality of the waterfront space, achieve the comprehensive benefits, and provide a reference for the governance of similar urban rivers.

Keywords: flood control capacity; ecological environment; river channel evolution; water surface profile analysis; ecological techniques; honeycomb cell slope protection

0 引 言

西安沣河梁家滩段作为城市重要生态廊道, 其防洪安全与生态功能协同提升需求迫切。该段原有堤防建于20世纪60年代, 存在防洪标准低、结构老化等问题, 难以满足当前区域发展需求^[1-2]。在国际研究领域, 河流治理正从单一工程防洪向综合治理转变, "基于自然的解决方案"(NbS)成为研究热点,

强调通过恢复河流自然形态来增强防洪韧性。国内研究方面, 治理理念逐步强调"人水和谐"与"流域系统治理", 相关学者在沣河治理中提出了"弹性应对洪水"等设计策略。然而, 当前研究仍存在以下不足: 防洪与生态景观在工程设计层面的深度融合不足; 对护坡材料的生态性能、耐久性与经济性缺乏系统权衡; 针对受采砂影响的砂床质河道, 其河床下切与淤积的动态响应机制研究尚不完善。当前研究热点主要集中于生态技术本土化、基于NbS的弹性设计等领域。

本文的创新性主要体现在: 通过将河道演变分

收稿日期: 2025-10-30

作者简介: 马昭(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水环境治理、市政及环保设计与研究工作。

析、水面线计算与生态护坡设计有机结合,提出"防洪安全+生态景观"协同治理方案;通过系统比选护坡材料,优选出适用于本地条件的蜂巢格室护坡结构;基于冲淤动态分析,精确确定堤防参数,并创新性采用水平砌护长度适应河床变形。设计研究技术路线见图1,本研究为类似城市河流治理提供了有益参考。

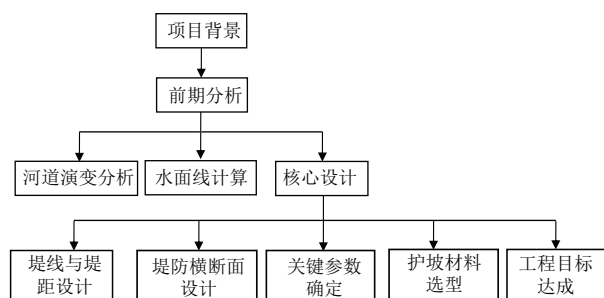


图1 设计研究技术路线图

1 工程防洪现状及存在问题

1.1 工程防洪现状

梁家滩运动公园三期防洪工程的范围:上起西户公路下游580 m,河道桩号0+580,下至运动公园三期北侧,河道桩号3+100治理段河道全长2.52 km,防洪工程范围及位置见图2。



图2 防洪工程范围及位置图

工程范围内堤防均为1963~1966年整修所建,工程具备抵御10~20年一遇洪水的能力。当时受各种条件限制,缺乏系统性的规划与综合治理,而是在原有旧堤基础上整修而成。现状河堤的断面尺寸不足,其顶宽为2~4 m,内、外边坡比约为1:1.5,由于1964年整修是沿原旧堤修建,大片农田在防洪堤内,导致堤防开口增多,由于沔河水流冲刷及大量采沙活动,引发纵横向切割现象严重,局部地区主河槽下

切3 m左右。加之,堤防整修至今,年久失修、堤身单薄,经过多年运作,老化严重,多处河段的堤防防洪功能已严重退化^[3]。

1.2 工程存在问题

根据沔河防洪现状,结合新形势下治水思路,工程范围内主要防洪问题表现为工程老化,防洪体系薄弱,整体防洪能力低。

(1)河道防洪标准偏低,工程老化,沔河堤防工程建设较早,大多修建于上世纪六、七十年代,防洪能力只有10~20年一遇,堤身单薄,平面弯曲较大,宽窄不一,堤防几十年来从未整修过,缺口过多,堤顶沉陷,高低不一,内外坡面损坏严重,险工段逐年增多。

(2)当前防洪体系存在明显短板。主要体现在上游山区缺乏具备调蓄功能的控制性水利枢纽,原河道有多处无堤段,洪水隐患较大。近年来上游段河道得到开发治理,但由于分段开发,目前并未形成完整体系。

(3)河床下切严重,造成堤基暴露,迎水面未砌护,受洪水冲刷局部垮塌严重,水毁险情时有发生,已基本丧失抗洪能力,危及堤防及跨河建筑物安全。

(4)现状堤顶道路不通,管理管护不便,不利于河道的管理和保护。

2 河道演变分析

2.1 河道横向变化分析

根据近年沔河航测地形图及现状实测地形图进行对比分析,工程段河道未发生大的横向摆动,主流基本稳定,尤其是上世纪70年代大规模挖沙后,主槽基本无变化。随着沔河两岸堤防工程的逐渐建成完善,河道主流走势已趋于稳定,过流断面形态规整,平面摆动很小,若不出现超标洪水,预估今后不会出现较大的平面摆动。

2.2 河道纵向变化分析

通过对1989年至2017年沔河河底高程进行对比分析,项目区段河道河底高程下降明显,河底下切深度约8 m左右,局部下切到10 m,之所以出现这种趋势,原因是随着西安城市建设的发展,采砂现象非常严重,河道内大量开采沙砾料,导致床面高程降低严重。近几年来,随着河道采砂的限制,已成拦河坝对河底高程的影响,河床下切趋势得到控制,河道淤积影响逐渐大于冲刷,下切的河床将逐渐恢复到早期的河床高程,纵向变化将趋于稳定,项目区所在的河段也最终将达到冲淤平衡状态^[4]。

3 水面线成果分析

从起点(西户路桥,0 m)到 550 m 处,河道的高程(无论是河底还是洪水位)呈现下降趋势,表明此段河道坡度较大,水流较快;550~1 400 m 处之间河底

有 2 次高程凸起;整个工程河段存在 3 个高程低点,高程最低点约 393 m,之后河道高程开始持续上升,直至终点(橡胶坝,3 500 m)。这表明河道在此处存在一个局部低点,之后坡度变缓甚至形成回水区,可能与橡胶坝的壅水作用有关。整体趋势见图 3。

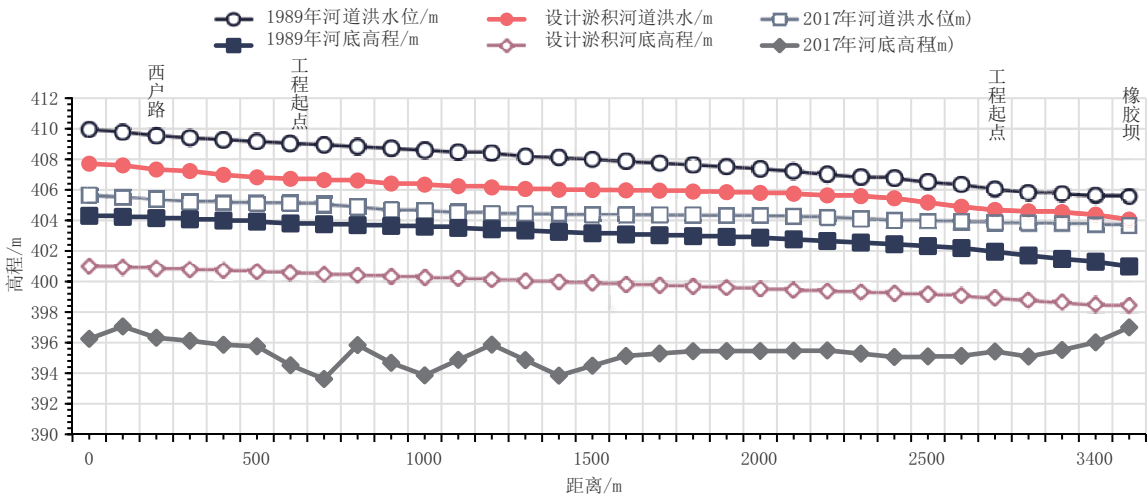


图3 沔河良家滩段 100 年一遇洪水水面线图

对比 1989 年河底高程和 2017 年河底高程,可以判断近 30 年来河床是抬升(淤积)还是下切(冲刷)。若 2017 年线高于 1989 年线,则表明河道存在淤积。

对比 1989 年洪水位和 2017 年洪水位。如果河床淤积,在相同流量(100 年一遇)下,洪水位会相应抬高,这意味着河道的行洪能力下降,防洪风险增加。与 1989 年相比,2017 年的河床因淤积等因素抬升了约 2~4 m。这表明河道淤积严重,会导致过水能力下降。

设计淤积河底高程和设计淤积河道洪水位代表了工程治理后的预期状态。通常,治理目标是通过清淤或疏浚,使河底高程降低(设计河底高程线应低于 2017 年河底高程线),从而在发生大洪水时,能容纳更多的水量,使设计洪水位低于 2017 年洪水位,以达到降低防洪风险的目的。

橡胶坝作为一种拦河建筑物,会雍高上游水位,这在图中被直观地表现出来。这是河道中一个关键的水力控制点。

综上所述,沔河良家滩段经历了显著的河道淤积(河床抬升),导致在遭遇特大洪水时,水位会比历史时期更高,防洪压力增大。图 3 中的工程设计(如设计淤积线)正是为了管理和应对这种自然变化,而橡胶坝等工程设施对局部水流有显著影响。该图是进行防洪规划、河道清淤和工程评估的重要科学依据。

4 堤防设计分析

4.1 堤线、堤距确定

本次堤线设计依据国家规范与上位规划(堤距 200~250 m),兼顾了该段河势条件与左岸梁家滩运动公园三期改造需求,最终确定堤线沿现状走向布设,保障最小堤距 200 m,并完成左岸 2.766 km 堤防的治理任务^[5-6]。

4.2 河堤横断面

4.2.1 堤防横断面型式

堤防断面设计基于防洪安全核心,综合考虑现状地形、滩地利用、生态亲水及区域协调发展等因素进行优化,力求与梁家滩区域发展相匹配,使本次设计范围内堤防工程融合防洪安全与生态景观,旨在构建人水和谐的生命共同体,满足新区环境的沔河生态治理要求^[7-8]。

考虑到河道左岸将建设城市运动公园,为更好地与其衔接,堤防设计以简单生态化为主。基于河床既有地形,遵循经济实用、就地取材的原则,进行综合规划设计,使砌护工程满足防洪安全与运维管理的需求,基于稳定与施工便利性原则,护岸设计为坡式,断面采用梯形^[9]。

4.2.2 堤顶宽度及堤顶路

堤顶宽度系综合堤防防渗结构、防洪抢险作业及运营管理需求而定。本设计依据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013),将 I 级堤防堤顶宽度确定

为8.0 m。在参照沣河既有堤防运行实践,并统筹两岸区域开发愿景的基础上,最终确定了堤顶断面的具体构成:包括5 m宽行车道,两侧各设0.3 m宽景观平石,并分别配置迎水侧1.0 m、背水侧1.4 m宽的绿化带。此外,为保障堤身稳定与管理需要,于背水坡坡脚外侧划定了50 m宽的护堤地^[9]。

4.2.3 堤顶高程

堤顶设计高程按《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)的规定,由设计洪水位加堤顶超高确定。其中,堤顶超高系指波浪爬高、风壅增高及安全加高三项分量之和,其具体数值依据规范所给定的公式进行计算^[5,10-11]。

$$Y=R+e+A \quad (1)$$

式中:Y为堤顶超高,m;R为设计波浪爬高,m;e为设计风壅增水高度,m;A为安全加高值,m。

平均波高与平均波周期采用莆田试验站公式进行计算^[5]。

$$\text{平均波高: } \frac{gh_m}{W^2} =$$

$$0.13tg\left[0.7\left(\frac{gH_m}{W^2}\right)^{0.7}\right]th\left\{\frac{0.0018\left(\frac{gD}{W^2}\right)^{0.45}}{0.13tg\left[0.7\left(\frac{gH_m}{W^2}\right)^{0.7}\right]}\right\} \quad (2)$$

$$\text{平均波周期: } T_m=4.438 h_m^{0.5}$$

式中: h_m 为平均波高,m; T_m 为平均波周期,s; W 为计算风速,m/s(取14.8×1.5倍); D 为风区长度,m; H_m 为水域平均水深,m; g 为重力加速度,m/s²(取9.81 m/s²); t 为风浪达到定常状态的风时,m。

$$\text{平均波长: } L_m=\frac{gT_m^2}{2\pi}th\left(\frac{2\pi H}{L_m}\right) \quad (3)$$

式中: L_m 为平均波长,m; H 为坝坡迎水面水深,m。

$$\text{波浪爬高: } R_m=\frac{K_\Delta K_w}{\sqrt{1+m^2}}\sqrt{h_m L_m} \quad (4)$$

式中: R_m 为平均波浪爬高,m,(不允许越浪的堤防累积频率为2%的爬高值 $R_{2\%}$); m 为坡度系数; K_Δ 为斜坡的糙率渗透性系数(取0.90); K_w 为经验系数。

$$\text{最大风雍水面高度: } e=\frac{kW^2 D}{2gH_m}\cos\beta \quad (5)$$

式中: e 为计算点处的风雍水面高度,m; D 为风区长度,m; K 为综合摩阻系数(取3.6×10⁻⁶); β 为计算风向与坝轴线的法线夹角,°。

堤顶超高值见表1。

经分析计算,本工程堤顶超高最终确定为1.40 m,堤顶设计高程执行不低于100年一遇洪水位加此超

表1 堤顶超高值计算结果

堤防级别	桩号	波浪爬高 R/m	风壅增高 e/m	安全加高值 A/m	计算超高 Y/m
I	0+900	0.343	0.000 9	1.0	1.344
	1+600	0.369	0.001 5	1.0	1.371
	2+400	0.337	0.001 5	1.0	1.339

高的标准。该取值的确定基于对各桩位波浪爬高、风壅增高及安全加高的系统计算。计算结果显示,理论超高值介于1.339~1.371 m之间。最终采用的1.40 m取值,是在满足规范要求与结构安全的基础上,适度考虑了安全冗余,并兼顾了与周边城市景观,特别是运动公园的协调融合。

在堤顶高程与运动公园场地设计的衔接处理上,遵循“就高原则”:当公园设计地形高程高于堤顶设计高程时,采用公园地形高程;当低于堤顶设计高程时,则采用堤顶高程。这一原则有效保障了防洪工程体系的结构安全性与完整性,同时确保了堤防与公园在竖向空间上的平顺过渡,实现了工程功能与景观环境的一体化设计。

4.2.4 堤防基础埋深

依据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013),堤防基础的埋置深度应基于河床的预期冲刷深度确定,以保证结构在运行期内的稳定与安全^[4-5,12]。顺坝及平顺护岸冲刷深度可按下式计算:

$$h_s = H_0 \left[\left(\frac{U_{cp}}{U_c} \right)^n - 1 \right] \quad (6)$$

$$U_{cp} = U \frac{2\eta}{1+\eta} \quad (7)$$

式中: h_s 为局部冲刷深度,m; H_0 为冲刷处的水深,m; U_{cp} 为近岸垂线平均流速,m/s; n 与堤防岸坡在平面上的形状有关,取 $n=1/4$; η 为水流流速不均匀系数,根据水流流向与岸坡交角 α 查表D.2.2采用; U_c 为泥沙起动流速,m/s,对于黏性与砂质河床可采用张瑞瑾公式(D.2.1-5)计算。

$$U_c = \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_{50} + 0.000\,000\,605 \frac{10 + H_0}{d_{50}^{0.72}}} \quad (8)$$

式中: d_{50} 为床沙的中值粒径,m; γ_s 、 γ 为泥沙与水的容重,kN/m³; g 为重力加速度,m/s²。

根据河道冲刷深度计算结果,见表2。本段护岸最大局部冲刷深度为2.60 m,为堤防基础埋深设计提供了关键依据。工程区位于已成橡胶坝上游的回水淤积区,尽管该区域水流减缓、泥沙易淤,但现状河底高程普遍低于橡胶坝底板高程(397.00 m),表明

仍存在一定冲刷风险,故未完全依赖淤积效应进行防护。

为此,设计中采取基础底高程与现状河底齐平并低于橡胶坝底板的策略,以增强结构安全冗余。

在抗冲方式上,创新采用“以水平砌护长度替代垂直抗冲深度”的适应性方案,通过延伸护岸在河床平面的覆盖范围,有效分散水流冲击力,适应河床动态演变。

表2 河道冲刷深度计算表

断面桩号	冲刷处的水深 H_0/m	行进流速 $U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	泥沙启动流速 $U_{cr}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	系数 $n(1/4)$	$(r_s-r)/r$	d_{50}/m	水流方向与岸坡夹角 α	平均流速 $U_{cp}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	水流流速不均匀系数 η	局部冲刷深度 h_s/m
0+600	10.98	1.59	0.89	0.25	0.98	0.000 032		1.59	1	1.71
1+200	8.81	2.31	0.82	0.25	0.98	0.000 032		2.31	1	2.60
1+800	9.08	1.22	0.83	0.25	0.98	0.000 032	$\leq 15^\circ$	1.22	1	0.92
2+200	8.88	1.61	0.82	0.25	0.98	0.000 032		1.61	1	1.62
2+600	8.88	2.30	0.82	0.25	0.98	0.000 032		2.3	1	2.60

注:备注:本次计算采用现状河道水位各参数进行计算。

4.2.5 护坡材料的比选

设计对蜂巢格室护坡和格宾石笼护坡进行比较,见表3。

表3 两种坡式护岸比较

名称	适用条件	优点	缺点	单位面积价格/(元·m ²)
蜂巢格室护坡	适用于各种水流条件	耐久性强,成本低、工期短、就地取材、施工便捷、生态效果好	河道流速不同蜂巢格室内填料不同	80 (15 cm厚)
格宾护垫	流速不宜过高	生态良好,抗冲性强,能够满足大多河道冲刷要求	石料短缺运距远造价高	170 (30 cm厚)

两种护坡形式均能满足抗冲要求,且施工便利,生态性良好。蜂巢格室护坡的单位面积造价相对格宾石笼较低,且为成品,内填原土,不存在石料短缺等问题^[13-15]。因此,本次设计推荐采用蜂巢格室护坡,蜂巢格室实景图图4。



图4 蜂巢格室实景图

迎水坡护坡采用蜂巢约束系统(其组成为PCA土工格室、连接键、锚杆、限位帽、集料)。

PCA土工格室规格为448 mm×520 mm×150 mm(长×宽×高),类型为B类。格室要求详见堤防标准横断面设计图。格室材料设计寿命50年。限位帽选用型号为SC14,材质为PCA。

锚杆采用专用锚杆,直径为14 mm,长800 mm,锚杆通过限位帽固定在巢室壁上。锚杆纵、横向间距均为2.24 m。

5 结 论

本研究围绕西安沣河梁家滩段防洪能力提升与生态环境改善目标,开展系统性工程设计研究,形成以下结论:

(1)针对现状堤防存在的防洪标准偏低、结构老化及河床下切严重等问题,提出“防洪安全+生态景观”协同治理理念。通过系统诊断与水力分析,确立关键设计参数;采用坡式护岸与蜂巢格室护坡等生态技术,设定堤顶宽8 m、超高1.4 m,成功将防洪标准提升至100年一遇,显著增强区域防洪韧性 with 生态功能。

(2)本研究的创新主要体现在三方面:一是集成河道演变分析与水面线计算,提出综合治理路径;二是通过护坡材料比选,优选适用于本地条件的蜂巢格室结构,实现抗冲、生态与经济的统一;三是引入水平砌护长度以应对河床动态变形,提升工程适应性与科学性。

(3)尽管在工程设计方面取得进展,研究仍存在若干局限,如护坡材料长期性能与生态效应的原位监测数据不足;河床冲淤模型对极端气候响应考虑不充分;工程与城市开发的协同机制亦有待深化。

(4)后续可重点开展护坡结构长期性能的原位监测与生态评估;构建水文—泥沙—生态动态耦合模型,提升治理方案的预测能力;探索基于自然解决方案(NbS)的弹性治理路径,推动城市河流治理向智慧化与可持续方向发展。

(下转第320页)