

黄河干流堤防加固关键技术与施工方法研究

马红旭, 陈思豫

(济南黄河河务局长清黄河河务局, 山东 济南 250300)

摘 要 黄河干流堤防需承担起防御高水位长期浸泡和强河势摆动的双重压力, 因此堤防加固的系统研究具有重大的现实意义。本文围绕渗控、安全稳定、河势适应三个主要要求, 建立防渗屏障、堤身固结、坡脚支挡、水沙调控等关键技术体系, 提出与之相适应的联动防渗、分层压实、阶式支护、水沙管控施工方法。通过技术链和施工链的协同组织, 可以明显提高堤防抗渗能力、整体强度以及复杂河势条件下适应性, 以期为黄河干流堤防的长效稳定运行提供技术参考。

关键词 黄河干流; 堤防加固; 防渗技术; 堤身结构; 水沙调控

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.018

0 引言

黄河干流堤防在高含沙水流、大流量调度、复杂河势的共同作用下, 长期处于渗流发育、堤身强度不足、岸坡失稳等风险之中, 加固任务具有连续性、复杂性。为了形成结构稳固、功能完备、运行安全的堤防工程体系, 就要从风险控制、结构提高、河道适应三个方面来综合研究关键技术与施工方法^[1]。以本研究的逻辑框架为依据, 提出成体系的技术构建与实施路径, 为黄河防洪工程的高质量提升提供依据。

1 黄河干流堤防加固要点

1.1 控制渗流通道风险

黄河干流水沙含量高、堤基多呈粉质黏土与砂层夹杂结构, 渗流通道形成具有隐蔽性和突发性, 在高水位持续顶托的情况下更易产生管涌、流砂等险情。因此堤防加固要将识别和控制渗透路径作为基本要点, 掌握堤基层间的差异和透水性的变化规律, 明确潜在渗透压力集中区和薄弱带的分布特征^[2]。只有整体认识渗透机制以及黄河独特的水沙动力背景, 才能保证堤防在长时间高水位作用下保持稳定。

1.2 提升堤身整体强度

黄河干流堤身大多为历史年代填筑, 成分差别较大, 结构缺陷和局部松散普遍存在, 高流量调度时承载需求大幅提高。堤身整体强度的提高是堤防安全的关键, 应考虑土体天然抗剪能力、密实度以及层间结合情况等内在力学性质。多年水流冲刷、干湿循环影响下堤身强度衰减具有累积性, 加强对材料均质性、

结构完整性认识, 是保证堤体抵御洪水压力的基础。

1.3 完善险段稳定构造

黄河干流河势变化无常, 局部岸坡容易受到冲刷、淘刷、浸润线抬升的影响, 造成堤脚区稳定性降低, 险段分布具有集中性、持续性。加固要点就是掌握堤坡力学平衡关系和失稳模式特征, 主要是滑移面发展趋向、坡脚应力分布以及洪水期地下水位变化带来的潜在影响。准确找出影响稳定性的主要结构因素, 堤防在复杂的水动力条件下就不会出现整体形态被破坏的情况^[3]。

1.4 强化河势演变适应

黄河有“水沙共律”的特点, 河槽摆动频繁, 滩区形态变化大, 堤防要具备适应河势演变的能力。加固要点是注意主槽摆动趋势、过流分配变化、床面冲淤调整对堤线安全空间的影响。河势转折、过水断面变化、高含沙洪水过程都会造成局部冲刷集中或者滩地抬升, 给堤防安全造成长期压力。加强堤防同河道演变关系的系统认识, 是保证加固工程具有前瞻性、长期稳定性的基础。

2 黄河干流堤防加固关键技术

2.1 深层防渗屏障构建

深层防渗屏障技术针对黄河干流堤基渗透性大、层间结构差异大的实际情况, 其关键之处在于创建一条贯穿渗流通道、具备足够延性和整体性的截水体系^[4]。黄河堤基常由粉土、粉砂和细砂等颗粒级配差别很大的组合构成, 垂向和水平方向渗透系数相差可

作者简介: 马红旭 (1996-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 黄河防汛、水利工程建设与运行管理。

达 1 到 3 个数量级, 使洪水期渗流线在堤基内部容易发生偏折和集中。防渗屏障的形成要依照“非均质渗流场”的特性, 以地下连续墙、塑性混凝土墙或者深层搅拌墙作为主要结构, 经由连续成槽或者原位搅拌来形成完整的隔断体。

技术要点: 包括屏障厚度、深度、贯通性要与渗流主通道位置相匹配, 使屏障延伸到相对低渗透层; 屏障材料的渗透系数一般控制在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s 之间, 满足高水头条件下的安全要求; 材料的变形模量不能过大, 以适应黄河河床沉降和堤基湿陷后的变形。施工上成槽质量连续性、垂直度和接头密实性决定屏障能否形成封闭结构。在监测上, 布设渗压监测点、分析洪水期渗透压力变化可以判断是否形成有效的水力阻隔面。深层防渗屏障技术的本质就是改变堤基水力梯度分布, 使渗流通道被迫延长、压降重新分配, 从而降低管涌和渗透破坏发生的可能性, 给堤防提供长期、稳定的渗控基础。

2.2 堤身结构固结增强

堤身结构固结增强技术的提出, 是考虑到黄河干流堤身材料复杂、密实度不同、长期受干湿循环影响导致强度衰减的特点。堤身提升的关键技术逻辑就是改善颗粒接触状态、加大有效应力、提高抗剪强度, 使堤体整体形成均质、连续、抗变形能力强的结构体系^[5]。黄河堤身常有粉质黏土和砂性土的不均质填筑层, 其天然抗剪强度小于水位长期上涨后的要求, 所以固结技术要包含力学性能恢复、结构性强化和压实度控制这三个方面。

固结增强体系一般以土体改良和结构重构为依托。水泥土固化、堤身补强填料、分层压实等常用方法的技术机理都是提高土体颗粒间的胶结度, 使抗压强度呈稳定增长。典型的固化体系无侧限抗压强度一般在 0.8 MPa 到 1.5 MPa 之间, 这是工程规范里常用参考值。同时, 堤身加固要达到压实系数要求, 使填土层之间没有结构性弱带; 控制含水率使固结后的土体在洪水浸泡期不发生软化, 是固结技术成败的关键条件之一。

从堤体工作机理上来说, 固结增强技术可以使浸润线抬升之后堤体有效应力下降幅度被抑制, 滑动面形成的可能性大大降低; 同时由于堤身内部结构均匀化, 侧向变形和沉降趋于一致, 有利于保持堤防整体线形的稳定。该技术重视材料力学性质、压实工艺、结构连续性的统筹, 使堤身在高水位、强河势的条件下保持稳定的承载能力。

2.3 坡脚稳定支挡体系

坡脚稳定支挡体系源于黄河干流岸坡受淘刷、渗流逸出和浸润线波动三者共同作用, 使坡脚区域最容

易形成剪切弱面和位移集中区, 因此堤防稳定的关键在于建立可以阻止滑动、分散侧向力并保持渗流平衡的支挡结构体系。支挡体系的设计逻辑要兼顾抗滑、抗冲、渗控这三个功能, 使堤坡在洪水的长期作用下保持整体稳定。

支挡体系一般包括反滤层、防冲构造和支挡结构三类。反滤层依靠合理的骨料级配, 使渗透梯度在坡脚处平缓过渡, 防止细颗粒被渗流带走, 这是黄河堤防最基本的渗控条件。防冲构造可以采用护砌、块体或者连续性材料, 其作用是抵御高含沙水流局部集中冲刷, 保持坡脚原有地形不被削弱; 冲刷深度的预测可以用水力学模型进行分析, 使防护范围覆盖最大潜在冲刷线以下一定深度。支挡结构如抗滑构造、支护墙或者加固体, 其力学作用是提供附加抗滑力, 使潜在滑面的安全系数满足设计要求。

2.4 河道水沙协同调控

河道水沙协同调控技术是黄河干流堤防加固体系当中具有河道整体性意义的重要技术之一。黄河有“水沙共律”特征, 水沙组合关系决定过水断面形态, 断面变化直接决定堤线安全空间和堤身受力条件。堤防的安全不单依靠堤体结构本身, 也依赖河槽形态是否能保持相对稳定。因此, 水沙协同调控的技术重点就是协调来水过程、来沙过程和河床冲淤反应, 使河道形态保持在可控范围内。

水沙协同调控的技术机制为调节水量、含沙量的组合来影响主槽流速、紊动特性, 控制河段内水力条件, 使冲刷能力不出现局部异常集中, 根据河床演变规律分析冲淤趋势对堤线安全的影响。河床冲刷深度分析、水流挟沙力计算、过水断面调整规律等可以通过水力模拟和物理模型试验来获得, 可以用来判断堤防所面临的风险。

3 黄河干流堤防加固施工方法

3.1 多工法联动防渗施工

多工法联动防渗施工是在一个防渗目标下综合使用成槽、搅拌、灌注等工法, 使地下防渗体系形成完整、连续、适应性强的结构。施工组织一般按照堤基地层结构的不同来设置工法分区, 使深层连续墙、旋喷桩墙或者固化搅拌墙根据水力条件和土体类别合理组合。在粉土和粉砂层混杂段, 成槽机先形成主槽体, 再采用渗透系数一般达到 10^{-7} cm/s 级别的低渗透材料均匀浇筑, 保证截水墙连续; 局部透水性较强的细砂段, 用高压旋喷形成三重管搅拌体, 水泥浆液在孔隙中均匀扩散并与土体充分混合, 弥补槽段接缝处可能出现的薄弱带。

施工期间联动控制为关键。不同的设备要保持施工节奏一致,使截水体在空间上没有断点、无缝隙;槽段闭合时,接头位置用专用止浆结构保证密实。完工后,用超声检测或者取芯试验来检验墙体的均质性;渗压监测点用来分析成墙前后水力梯度的变化,检验施工质量。多工法联动的本质就是适应复杂堤基结构,利用工法互补来提高整体防渗能力,在水位较高的情况下保持截水体系结构的完整性。

3.2 分层填筑压实成型法

分层填筑压实成型法适合堤身结构加固期,核心施工逻辑就是通过严格控制材料含水率、分层厚度和压实能量,使堤身形成均质化结构。施工开始阶段先对堤身填料进行筛分、含水率检测,使材料性能符合压实要求。填筑厚度一般控制在20~30 cm,推土平整后进入压实阶段。压实设备根据堤身材料选择,黏性土一般采用羊脚碾,砂性土一般采用振动碾,使压实能量充分作用于土体内部。

压实过程中要实时检测压实系数,使其达到工程规范要求的取值范围(0.93~0.95区间为常见指标范围),并用环刀试样或者轻便触探进行密实度复核。层间结合是保证整体性的重要环节,施工中要避免形成光滑层或隔离层,因此必须控制含水率使其接近最佳含水率附近,使压实后的土体抗剪能力不致减弱。

成型后的堤身要进行形态复核,即堤顶标高、坡比、横断面线形等是否符合设计要求。分层填筑压实成型法施工效果体现在堤身强度提高、变形协调性增强、浸润线抬升时稳定性改善,是堤身固结增强技术的直接落地方式。

3.3 阶式排力支护施工法

阶式排力支护施工法主要用来改善堤坡受力结构,提高堤坡的稳定性。施工方法的核心就是将堤坡分为若干阶梯形台阶,用支护结构把堤坡的侧向推力逐级传递和分散,减小潜在滑动面的剪应力集中。施工布置一般包括台阶开挖、反滤层铺设、支护体施工、坡面整形四个过程。

台阶宽度和高度根据堤坡坡比、土体强度、稳定计算结果确定,使开挖后的坡体有足够的的安全系数。在台阶底部铺设反滤层,来控制由于坡脚渗流逸出而造成的颗粒流失风险。支护结构可以采用浆砌体、混凝土构造或者加筋土结构,施工时需要保证界面粘结牢固,不能产生结构性弱面。

排力过程的实现依靠阶式结构的逐级分担作用,各个台阶的支护体凭借自身的刚度来抵抗坡体的水平应力,从而使得潜在的滑移面应力重新分布。施工中

需要用测斜仪和表面位移监测手段跟踪边坡变形,来判断支护效果。阶式排力支护施工法的意义在于用几何分割和结构支撑共同作用,使堤坡在高水位、快速退水、渗流耦合作用下仍然保持足够的稳定。

3.4 联动调度水沙管控法

联动调度水沙管控法属于堤防加固后河道协同施工方法,其实质就是对水量、水位、含沙量、流速等参数进行综合调度,使堤防所处河段的冲淤平衡保持在可控区间。施工组织要按照水动力模拟结果来调节调度策略,使得不同来水来沙组合情况下流场结构稳定,不会出现局部强冲刷作用集中到堤脚区域的情况。

调度方法一般包含三类联动作业:控制水量变化梯度防止水位快速上升造成渗流压力突然增大;调节含沙量结构改变输移沉积模式,使主槽不发生异常摆动;结合河道断面特征通过调控流量分配保持过水断面稳定。施工期和运行期要通过断面测深、流速剖面测量、含沙量取样等方式不断监测河槽状态。

水沙管控施工的关键是使河道动力过程和堤防结构相匹配,使堤线附近的水力条件稳定、冲刷深度没有大的变化。联动调度水沙管控法不是依靠单一的调度措施,而是依靠水位、水沙、断面控制三者联动,使堤防加固工程具有长期适应河势变化的外部条件。

4 结束语

黄河干流堤防加固要同时考虑渗流控制、结构加固、险段稳定、河势适应四项主要要求,采用深层防渗、堤身固结、坡脚支护、水沙调控等技术进行系统组合来达到工程功能整体提高的目的。相关施工方法的精细化组织使关键技术得以稳定落地,形成风险识别、结构构建、运行调控的闭合体系。研究成果为后续堤防加固方案优化、建设实施、长期运行管理提供可持续的技术支持。同时,通过持续监测与动态评估,可进一步验证技术体系在不同水文情势下的适应能力,为未来黄河防洪安全的长期保障奠定更加坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 薛泽雨.黄河干流上游径流特性及成因识别分析[J].水利水电快报,2025,46(07):17-23.
- [2] 黄敏昊.西江干流堤防护岸加固防渗技术应用[J].河南水利与南水北调,2024,53(02):34-36.
- [3] 马慧英.黄河内蒙古段堤防工程建设成效分析[J].内蒙古水利,2023(04):46-47.
- [4] 詹发竹.淮河干流一般堤防加固工程质量监督工作的思考[J].河南水利与南水北调,2023,52(01):81-82.
- [5] 刘玉瑞.黄河干流刘-盐段综合治理工程设计方案比选[J].陕西水利,2020(12):59-61.