

灌区节水改造工程渠道防渗设计与水力要素计算

彭佳¹ 廖砚雯¹ 孙翔²

1. 湖北澜图工程设计有限公司, 湖北 武汉 448124

2. 湖北楚禹水务科技有限公司, 湖北 荆门 448000

[摘要]北方平原老旧土质灌溉渠道普遍存在渗流病害, 渠系输水利用率长期偏低, 难以适配现代农业规模化灌溉供水标准。基于区域水土治理需求, 本文以华北平原中小型农耕灌区为研究对象, 结合区域季节性冻融水土条件, 横向对比现浇混凝土, 复合土工膜, 三合土三类衬砌材料现场工程使用性能。依托现行水利国标查表参数, 结合曼宁谢才公式完成梯形渠道水力要素演算, 同时结合场地原生地形条件优化渠体断面构型。结合干支渠输水负荷差异选用分级防渗模式, 骨干干渠适配复合防渗结构, 田间支渠适配现浇混凝土衬砌结构。该改造方案可均衡渠内水流流速, 有效降低渠道冲刷淤积风险, 稳步阻断渠体渗流通道, 进一步提升渠系输水运行稳定性。

[关键词]平原灌区; 土质渠道; 分级防渗; 明渠水力计算; 节水改造

DOI: 10.64635/ja.2026.1388

中图分类号: S277.5

文献标识码: A

Channel Anti-Seepage Design and Hydraulic Element Calculation for Water-Saving Reconstruction Projects in Irrigation Districts

Peng Jia¹, Liao Yanwen¹, Sun Xiang²

1. Hubei Lantu Engineering Design Co., Ltd., Wuhan, Hubei 448124, China

2. Hubei Chuyu Water Technology Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract: Old earth irrigation channels in northern plain areas commonly suffer from seepage diseases, and the water conveyance efficiency of canal systems has remained relatively low for a long time, making it difficult to meet the water supply standards of modern large-scale agricultural irrigation. Based on the needs of regional soil and water governance, this paper takes small and medium-sized agricultural irrigation districts in the North China Plain as the research object. Combined with the regional seasonal freeze-thaw soil and water conditions, the on-site engineering performance of three lining materials, namely cast-in-place concrete, composite geomembrane, and lime-soil mixture, is horizontally compared. Based on tabulated parameters from current national water conservancy standards, the hydraulic elements of trapezoidal channels are calculated using the Manning-Chézy formula, while the channel section configuration is optimized in combination with the original terrain conditions of the site. According to the differences in water conveyance loads between main canals and branch canals, a graded anti-seepage mode is adopted. Composite anti-seepage structures are suitable for backbone main canals, while cast-in-place concrete lining structures are suitable for field branch canals. The proposed reconstruction scheme can balance flow velocity in the channel, effectively reduce the risks of channel scouring and sediment deposition, steadily block seepage paths in the channel body, and further improve the operational stability of canal water conveyance systems.

Keywords: plain irrigation district; earth channel; graded anti-seepage; open-channel hydraulic calculation; water-saving reconstruction

引言

华北平原存量农耕土质渠道建设年限普遍久远, 渠体大多修建于早期农田水利基建阶段, 受当时建设资金与施工标准限制, 建设初期仅满足基础过水输水功能, 并未配

套专项防渗防护及抗冻构造。区域冬春季节冻融交替作用显著, 土体反复胀缩会持续破坏渠基整体结构, 加之汛期浅层地下水水位波动幅度较大, 地下水长期浸润软化渠基土体, 叠加河道引水常年动水剪切冲刷的耦合作用, 渠基

土体裂隙逐步发育扩张,渠道输水渗漏损耗居高不下,这一现状不仅加剧区域农业水资源供需矛盾,同时增加灌区常态化引水运维成本。现阶段灌区现代化提质改造工作稳步推进,防渗衬砌已然成为渠道节水增效,延长渠体服役年限的核心工程手段。现阶段县域中小型灌区改造设计大多偏重防渗材料选型与现场施工工艺管控,较少兼顾衬砌改造后的水流工况校核,防渗面层糙率发生改变后会打破原有水流平衡,进而诱发渠坡局部冲刷,渠底泥沙淤积,水流紊动等次生病害。纵观现有行业研究,相关成果多单独开展材料防渗性能试验或是单项水力演算,研究内容关联性偏弱,结合区域冻融土质条件,联动开展防渗构造布设与水流运行规律的综合研究数量较少。基于上述区域工程现状与现有研究短板,本文结合片区水土工况,系统开展渠道病害成因研判,防渗方案优选,水力断面优化及工程效益分析,依托国标规范查表参数完成全套设计推演,进一步完善无现场实测数据条件下平原灌区渠道标准化改造设计流程,为同类田间渠系改造提供可行设计思路。

1 灌区渠系基础工况与设计参数核定

1.1 灌区渠道病害及渗漏成因

本次研究依托华北平原典型农耕灌区开展专项工况分析,该区域属于温带半湿润季风气候,年内降水时空分布极不均衡。其中汛期降水集中充沛,非汛期干旱少水,片区农业灌溉水源完全依托周边河道引水补给。区域渠系自上而下划分为干、支两级输水体系,两类渠道分工协同完成片区农田引水配水作业^[1]。现状渠道均采用农田工程通用性梯形素土断面,渠底坡度完全顺应场地原生自然地形顺势布设,以此最大限度减少早期土方开挖工程量。受区域气候季节性变化叠加影响,冬季低温环境下渠基土体存在周期性冻融胀缩,土体孔隙结构随之反复形变扩张。进入雨季汛期后浅层地下水位阶段性抬升,地下水向上浸润软化渠基土体,再叠加渠基原生粉质壤土孔隙率偏大,透水渗透能力较强的固有土质特点,多重水土气候因素共同作用,最终引发渠道常态化渗漏,边坡坍塌两类型病害。结合现场渠系踏勘研判结果来看,存量土渠边坡表层土体风化剥离,松散脱落现象较为明显。渠底受长期动水渗透作用发育贯通性渗水裂隙,渠坡转角,渠肩位置零散坍塌点位分布零散。从渗流路径机理层面划分,渠体渗漏主要分为三类形式,分别为渠底垂直下渗补给浅层地下水,边坡土体侧向渗流外排,渠道分期施工接缝集中渗流。由于原生素土渠无任何防渗衬砌防护面层,无法从结构层面阻断渠内渗流通道,渠道长年运行之下输水损耗居高不下,

片区水资源利用效率长期偏低。

1.2 设计依据与规范参数选取

为保障本次防渗构造及水力全套设计合规性与工程落地可行性,全文设计流程严格遵循《灌溉与排水工程设计标准》GB 50288-2018 行业强制规范相关要求。结合片区冬季冻融,雨季地下水抬升两类不利水土条件,划定渠道抗冻胀,抗渗流,抗水流冲刷三大核心控制指标。在此基础上界定渠内泥沙起动最小流速,衬砌材料极限抗冲流速双向管控区间,统一规范渠体安全超高,沿程允许水头损失等硬性设计限值。考虑到本次研究无现场取样,室内试验实测条件,本文全部土体,防渗主材物性参数取自规范附录工程查表标准值。为提升参数适配度,同时结合华北平原近五年已完工同类灌区改造工程经验对标修正,精准核定现浇混凝土,复合土工膜,三合土三类防渗主材渗透系数,压实密度,长期服役壁面糙率等核心参数。依托上述标准化规范参数开展后续防渗构造设计与水力推演工作,以此保证全文计算逻辑闭环合规,研究结论具备学术可信性。

2 渠道防渗方案比选与构造设计

2.1 防渗工艺对比及干支渠选型

综合考量区域年度冻融气候,田间狭小施工场地,县域财政工程造价预算,后期运维养护难度四大客观条件,梳理本次平原灌区防渗设计四项核心原则。防渗结构需要适配年度正负温差交替冻融环境,全方位阻断渠底,边坡,接缝多处渗流路径。面层需要耐受常年含泥沙水流常态冲刷,整体服役年限匹配灌区 15 年常规运维周期。施工工艺需要适配田间机械进场受限的作业场地。依托上述工程设计原则,横向对比三类主流田间土质渠道防渗工艺综合优劣^[2]。现浇混凝土衬砌结构整体成型性优良,渠壁成型后粗糙度较低,水体沿程通行阻力小,整体输水水力条件优异。但该材料导热性较强,低温温差作用下易产生贯通结构性裂缝,裂缝成型后防渗耐久性会大幅下降。复合土工膜本体隔水防渗性能突出,单位面积材料采购成本可控,柔性材质可适配土体微小形变。不足之处在于表层无硬质防护时,材料极易受水流漂杂物,田间碎石冲击撕裂破损。三合土防渗依托原状土体拌合改性,可就地取材降低外运成本,现场拌合施工简易且整体造价低廉。但人工拌合结构密实度可控性较差,长期动水浸泡之下结构孔隙逐步扩张,输水防渗效能衰减速度较快。结合干支渠输水量,水流剪切强度,运维等级差异化特征,因地制宜采用分级防渗设计思路。大流量主力输水干渠水流冲击力

强,运维等级高,选用土工膜搭配混凝土双层复合防护结构。中小流量田间配水支渠水流平稳,荷载较小,选用单层现浇混凝土衬砌,以此平衡防渗效果,施工难度与工程全周期经济性。

2.2 细部防渗构造设计及糙率取值

确定主体分层防渗结构后,为规避温差形变,地下水承压顶推,地表汇水入渗三类因素叠加引发的结构破损渗漏问题,配套精细化完善渠体全断面细部防渗构造。沿渠道纵向每 6m 分段设置伸缩缝,缝内嵌填聚乙烯止水密封填料,柔性消解混凝土温变收缩应力,进而规避面层开裂渗水问题。在渠坡坡脚全域布设级配砂石反滤层,分层疏导坡内承压地下水,均衡地下水压力,抵消土体向上顶推力,从源头规避防渗面层起鼓脱空开裂病害。渠肩两侧同步砌筑混凝土防渗压边护埂,拦截坡面降雨地表汇水,防止地表水沿渠顶缝隙渗入软化渠基土体,进一步杜绝渠肩次生渗漏问题。结合国标渠道糙率工程专用取值表,结合平原已完工同类灌区长期监测数据对标标定壁面糙率数值。其中原状素土渠糙率取值 0.027,现浇混凝土衬砌渠道取值 0.015,复合防渗衬砌渠道取值 0.012^[3]。将三类标准化糙率参数统一录入水力计算台账,界定水力演算基础边界条件,为下一节渠道水力推演工作提供精准参数支撑。

3 防渗渠道水力核算与方案优化

3.1 水力计算方法与校核准则

结合灌区春耕补水,汛期灌溉常态化输水规律可知,渠内水位季节性变幅较小,水体流动流态平稳无剧烈紊动,工况条件完全符合明渠恒定均匀流基本力学假定。基于该流态特征,选用适配梯形衬砌渠道的曼宁谢才耦合公式开展全域水力推演,该计算体系经过华北平原数十项灌区改造工程实践验证,计算精度能够满足中小型渠道工程设计要求^[4]。结合灌区设计灌溉规模核定基础设计流量,片区干渠设计流量取值 $2.1\text{m}^3/\text{s}$,支渠设计流量取值 $0.7\text{m}^3/\text{s}$,结合场地自然地形坡降核定渠底坡降取值 0.0018。本次水力核算围绕六大核心水力要素逐层递进计算,依次求解过水断面面积,断面湿周,水力半径,断面平均流速,沿程水头损失,单位渠长渗漏量。依托渠道衬砌糙率取值开展分步演算可知,原状土渠断面流速介于 $0.32\text{m/s}\sim 0.45\text{m/s}$,流速整体偏小极易淤积渠底泥沙。改造完成后复合衬砌渠道断面流速稳定控制在 $0.65\text{m/s}\sim 0.78\text{m/s}$,混凝土衬砌支渠流速稳定控制在 $0.52\text{m/s}\sim 0.60\text{m/s}$,流速区间均可满足渠道防冲防淤双重运行要求。针对渠体渗漏量采用分区精细化计算方式,分别核算面层

均匀渗流量以及接缝集中渗流量,叠加两类渗流数值后核算渠系综合水利用系数^[5]。与此同时结合农田输水渠道设计通则确立双向校核标准,一方面保证过水断面满足片区峰值灌溉流量,另一方面管控渠内流速区间,保障流速高于泥沙起动流速且低于衬砌材料极限抗冲流速,兼顾水力运行安全与土方改造成本。

3.2 基于演算结果的断面优化调整

依托前文全域水力要素演算实测数据,针对性补齐原生老旧渠道断面运行短板,提升渠体输水适配能力。本次断面优化全程依托水力计算结果微调尺寸,研究边界仅聚焦水流适配与防渗贴合作,不涉及后期工程效益研判相关内容,保证章节研究逻辑独立。原生梯形渠道全线边坡坡度统一,弯道水流受离心力作用扰动效应明显,渠道外侧流速超标易冲刷掏空坡脚衬砌结构。结合水力演算流速规律,放缓弯道外侧边坡系数至 1:1.75,以此均衡弯道全域水流速度,弱化离心紊动影响。结合非汛期小流量水力演算结果,小幅收窄支渠渠底宽度,减少无效过水断面,进一步降低输水水头损耗。本次优化全程依托原有渠体路基原位施工,无需大规模土方开挖改建,最终结合水力半径,水头损失,渗漏量三项核心管控要素,敲定定型渠道断面尺寸,各项水力参数均满足灌区设计标准,也可为第四章工程效益研判提供完整定型方案支撑。

4 工程改造效益综合分析

4.1 水资源节水效益分析

依托定型落地的干支渠分级防渗改造方案,结合华北区域同规模存量灌区改造验收监测数据,从区域水资源集约管控视角,系统量化项目长效节水价值。相较于孔隙透水能力较强的原生素土渠道,分层分级衬砌结构可完整封闭土体渗流界面,阻断边坡,渠底,施工接缝多处渗漏通道,从源头降低渠体输水无效损耗,稳步提升片区渠系水资源利用效率。从区域供水调度层面分析,渠系渗漏水量减少可直接降低河道引水取水总量,有效缓解片区农业灌溉高峰期供水调度压力,契合区域地下水压采,水资源节约管控相关政策要求。从水土生态长效层面分析,可控制削减渠体渗漏对浅层地下水的无序补给,规避局部地下水位过高引发的农田土壤次生盐碱化问题,平衡片区水土水文循环,整体节水效益兼具工程实用性与生态长效性^[6]。

4.2 运维及综合经济效益分析

从工程全生命周期投入产出视角,研判本次分级防渗方案综合经济效益。防渗硬质衬砌完工后渠壁平整度,整体性大幅提升,水流挟沙附着淤积,边坡土体滑移坍塌病

害发生率显著降低,有效缩减年度常态化渠系清淤,边坡修护,缺口修补运维工作量,长期运维资金人工投入可控。本次分级防渗因地制宜匹配干支渠差异化输水工况,不盲目全域采用高价复合防渗结构,施工工艺成熟通用,区域本地化砂石混凝土主材供应充足,外运成本低,整体改造工程造价可控,工程投入性价比远优于全域复合防渗方案。除此之外,渠道输水流速水量稳定性提升后,田间地块灌溉供水均匀度大幅提高,规避局部田地缺水积水问题,利于片区农作物稳产提质,同步兼顾工程运维效益与农业生产效益,适配县域中小型灌区普惠式改造落地需求。

5 结论

综合本次灌区渠道病害机理分析,防渗方案比选,水力要素演算及工程效益评价全流程研究工作,依托水利行业国标规范参数,梳理得出适配北方冻融平原灌区的渠道改造相关结论。结合干支渠输水负荷差异布设分级防渗方案,现场工程适用性更强,大流量输水干渠选用土工膜复合防渗结构,结构抗形变与隔水抗渗性能更优异,中小型田间配水支渠选用现浇混凝土衬砌,施工便捷且整体造价经济性更优。合规防渗衬砌能够优化渠壁水力边界条件,规整渠内整体水流流态,有效削减渠体渗流量,切实提升灌区渠系水资源利用效率。依托国标查表参数搭配经典水力计算公式,可高效完成中小型土质渠道无实测工况下的水力校核工作,适配中小型灌区简易化设计流程。与此同

时本次研究仍存在一定局限性,全文仅围绕常态恒定输水工况展开分析,渠道研究品类较为单一,后续可结合数值水力模拟手段,拓展多变水文工况及异形渠道相关研究,进一步完善北方平原灌区渠道防渗一体化设计体系。

【参考文献】

- [1]罗科峰.灌区节水改造中防渗渠道断面的优化设计探讨[J].湖南水利水电,2022(2):95-97.
- [2]姚治国.大中型灌区节水改造中防渗渠道断面优化设计[J].陕西水利,2020(4):75-76+79.
- [3]刘鸿涛,朱梦娜,赵新宇.寒区混凝土衬砌渠道糙率系数试验研究[J].节水灌溉,2025(7):45-52.
- [4]罗李强.阳西县陂底水库灌区续建配套与节水改造工程设计研究[J].陕西水利,2022(11):79-81+87.
- [5]刘国鹏.水利工程渠道防渗施工的关键技术探究[J].科技资讯,2023,21(22):133-136.
- [6]尚奇.灌区节水改造工程中渠道防渗关键技术分析[J].水上安全,2024(5):166-168.

作者简介:彭佳(1988.12—),女,汉族,籍贯:湖北荆门人、学历:大学、毕业院校:长江大学、所学专业:土木工程。廖砚雯(1989.03—),女,汉族,湖北荆门人、本科、湖北工业大学、工程管理。孙翔(1987.12—),男,汉族,湖北荆门人,本科,毕业于:长江大学,土木工程专业。