

# 南水北调工程深挖方渠段高地下水治理技术优化研究

李 丹 张中印

中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司 河南 南阳 473000

**摘 要:** 南水北调中线深挖方渠段地质复杂,高地下水易引发衬砌破损、边坡失稳等问题,现有治理技术存在效果不稳定、运维成本高、生态影响大等缺陷。本文以南水北调某深挖方3.2km渠段为研究对象,从防渗、排水降水及辅助技术入手优化设计,构建“防渗-排水-降水”协同体系,结合数值模拟与现场试验验证效果。结果表明,优化后渗流量降至 $0.04\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,成本降低10%~15%,各项指标达标,可为同类工程提供技术参考。

**关键词:** 南水北调工程;深挖方渠段;高地下水;治理技术优化

引言:南水北调工程是我国重大水资源调配工程,深挖方渠段因开挖深度大、地质条件复杂,高地下水问题突出,严重威胁渠体安全与输水稳定。当前该类渠段现有治理技术适配性不足,难以应对汛期水位反弹等问题,制约工程长效运行。基于此,本文聚焦深挖方渠段高地下水治理技术优化,结合工程实际地质与水文条件,优化技术方案并验证效果,对保障工程安全、提升运维效能具有重要现实意义。

## 1 南水北调工程深挖方渠段高地下水特征及治理现状分析

### 1.1 深挖方渠段工程概况

(1) 本次研究选取南水北调中线某深挖方渠段,全长3.2km,采用梯形断面结构,开挖深度18~32m,渠底宽度12~15m,边坡坡度1:2.5。该渠段为南水北调中线骨干输水段,设计输水流量 $350\text{m}^3/\text{s}$ ,承担着区域水资源调配的重要功能。(2) 工程地质以粉质黏土、膨胀土为主,下部分布砂卵石透水层,厚度3~8m;水文地质为潜水型地下水,主要补给来源为大气降水和周边地表水侧向补给,排泄方式以蒸发和人工排水为主,地下水埋深0.8~2.5m,汛期水位可上升至渠底以下0.3m。

### 1.2 高地下水形成机理及危害分析

(1) 高地下水的形成受自然与工程双重因素影响:自然因素上,区域年降水量充沛,降水入渗量大,且地下水侧向径流活跃,地下水资源丰富;工程因素上,深挖开挖扰动破坏了原有地层防渗结构,导致地下水渗流路径改变,同时部分渠段防渗体系存在衔接不紧密等缺陷,进一步加剧了高地下水集聚现象。(2) 高地下水对工程的危害较为突出:一是渠底衬砌受地下水扬压力作用,易发生隆起、开裂,影响输水密封性;二是边坡受地下水长期浸润,土体强度降低,易出现蠕动、滑坡等失稳问题;三是地下水渗流易引发管涌、流土等渗流破

坏,危及渠体安全;四是地下水长期浸泡会腐蚀衬砌结构,降低其耐久性,大幅增加后期运维成本<sup>[1]</sup>。

### 1.3 现有高地下水治理技术应用现状

(1) 现有治理技术主要包括三类:防渗技术采用HDPE防渗膜(厚度1.5mm)和膨润土防水毯铺设;排水技术采用减压井(间距15m)和横向排水管(直径100mm)组合;降水技术以轻型井点降水和明排水为主。(2) 选取该渠段200m典型试验段,应用上述技术治理后,地下水位降至渠底以下0.6m,渗流量控制在 $0.12\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,基本缓解了高地下水问题,但在汛期仍出现局部渗流超标、边坡轻微位移现象。

### 1.4 现有治理技术存在的问题及成因

(1) 核心问题较为明显:治理效果不稳定,汛期地下水位易反弹;防参与排水技术衔接不畅,施工难度较大;减压井长期运行易被泥沙堵塞,运维成本偏高;明排水方式会过度抽取周边地下水,对周边生态环境造成一定影响。(2) 问题成因主要包括:技术选型未充分适配膨胀土与透水层交替的复杂地质条件;排水、降水参数设置不合理,与现场实际工况不匹配;施工中防渗膜铺设易出现破损,衔接工艺不规范;缺乏智能化监测体系,无法实时掌握地下水动态,难以及时调整治理措施。

## 2 南水北调深挖方渠段高地下水治理技术优化设计

### 2.1 优化设计原则与目标

(1) 优化设计严格遵循五大核心原则:安全性优先,确保治理后渠体结构稳定、无渗流破坏及边坡失稳风险,符合南水北调工程输水安全规范;经济性兼顾,在保证治理效果的前提下,优化材料选型、施工工艺,降低前期建设及后期运维成本;适用性适配,结合深挖方渠段不同地质条件(如膨胀土、透水层分布),针对性优化技术方案,避免“一刀切”;环保性达标,减少治理过程中对周边地下水、植被的影响,实现工程与生态协调;可

操作性较强,优化后的工艺流程简洁,适配现场施工条件,便于施工人员操作,降低施工难度。(2)优化设计目标明确具体:地下水控制标准为渠底地下水位低于衬砌底部不小于0.5米,渠坡地下水位降至边坡稳定临界水位以下;治理效果指标为渗漏量控制在 $0.05\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 以内,衬砌无隆起、开裂,边坡位移量控制在允许范围;成本控制范围较现有技术降低10%~15%,避免过度投入;工期要求较传统施工缩短8%~10%,确保优化方案高效落地,不影响工程正常输水调度。

## 2.2 防渗技术优化

(1)防渗材料优化:选用新型复合防渗材料,主要为HDPE土工膜与膨润土防水毯复合体系,其中HDPE土工膜厚度优化为1.5mm,采用高密度聚乙烯原料,抗渗系数 $\leq 1\times 10^{-11}\text{cm/s}$ ,抗拉强度 $\geq 20\text{MPa}$ ,相较于传统单一HDPE膜,抗老化、抗破损能力提升30%以上;膨润土防水毯选用钠基膨润土,膨胀倍数 $\geq 20$ 倍,遇水后形成致密防渗层,对比传统膨润土材料,抗渗耐久性提升25%,且适配不同湿度地层,避免因地层干燥导致防渗失效。(2)防渗结构优化:根据地层渗透性差异优化铺设方式,透水层区域采用“复合防渗层+混凝土衬砌”双层结构,防渗层铺设至渠坡顶部50cm处,避免地下水从坡顶渗入;膨胀土地段增设缓冲层,采用土工布铺设在防渗层与地层之间,缓解膨胀土胀缩对防渗层的破坏;优化防渗层衔接工艺,接缝处采用热焊接方式,焊接宽度不小于10cm,焊接强度不低于母材强度的85%,彻底解决传统衔接处易渗漏的缺陷<sup>[2]</sup>。(3)施工工艺优化:简化防渗层铺设流程,采用机械铺设与人工修整结合的方式,减少人工操作环节,提高施工效率;铺设前对渠底、渠坡进行平整压实,压实度不低于95%,避免尖锐杂物刺破防渗层;施工过程中增设防渗层保护措施,铺设完成后及时覆盖保护层,降低施工过程中防渗层破损风险,破损率控制在1%以内,较传统工艺降低60%。

## 2.3 排水与降水技术优化

(1)排水系统优化:优化减压井布置参数,将原有单排布置改为双排交错布置,井间距由15m优化为12m,井深根据地下水位埋深调整为8~12m,过滤器长度延长至3~4m,提升排水效率,可有效消减衬砌下扬压力30%~40%;优化横向排水管布置,管径由100mm加大至150mm,间距由20m缩短至15m,采用打孔波纹管,外包土工布防止泥沙堵塞,确保排水畅通,避免地下水在衬砌下积聚。(2)降水技术优化:结合地层特性针对性优化,透水层较厚地段采用轻型井点降水,井点间距优化为1.2m,降水深度控制在地下水位以下1.0~1.5m;粉质黏

土地段采用喷射井点降水,优化喷射压力至0.3~0.5MPa,减少降水对地层的扰动;引入节能型降水设备,搭配智能启停控制系统,根据地下水位实时数据自动调整设备运行状态,实现精准降水,较传统降水技术节能20%以上<sup>[3]</sup>。(3)排水与降水协同优化:构建“防渗-排水-降水”三位一体协同体系,防渗层阻断地下水渗入,排水系统疏导衬砌下积聚的地下水,降水技术控制地下水位整体高度,三者协同联动,避免单一技术治理的局限性;建立协同控制逻辑,当监测到地下水位高于临界值时,优先启动降水设备,同步强化排水系统运行,确保地下水控制效果稳定,解决传统单一技术治理易复发的的问题。

## 2.4 辅助治理技术优化

(1)边坡防护与加固优化:结合高地下水对边坡的浸润影响,优化边坡支护结构,膨胀土地段采用“锚杆框架+植草”复合支护,锚杆长度优化为6~8m,间距 $2.5\text{m}\times 2.5\text{m}$ ,框架内铺设植草皮,既提升边坡稳定性,又减少水土流失;透水层地段增设抗滑桩,桩径1.2m,桩距5m,深入稳定地层不少于3m,有效遏制边坡蠕动失稳,边坡整体稳定性提升40%以上。(2)监测技术优化:引入智能化监测设备,在渠底、渠坡及周边布设水位传感器,监测精度 $\pm 0.01\text{m}$ ,实时采集地下水位数据;采用InSAR形变监测技术,对渠体衬砌、边坡进行实时形变监测,监测频率为每小时1次,可提前预警衬砌隆起、边坡位移等隐患;构建智能化监测预警体系,将监测数据接入中控平台,设置预警阈值,当数据超标时自动发出预警信号,实现“监测-分析-预警-处置”闭环管理,解决传统监测滞后、效率低的问题。

## 3 优化技术效果验证与评价

### 3.1 数值模拟验证

(1)结合南水北调深挖方渠段典型地质条件,采用Visual MODFLOW与Midas GTS NX软件,建立高地下水数值模拟模型,模型范围涵盖渠段及周边50m区域,划分网格单元12000余个,确保模拟精度。输入优化前后的核心技术参数,包括防渗材料抗渗系数、排水系统布置参数、降水技术运行参数等,同时录入地层分布、地下水补给排泄特征等基础数据,构建贴合实际工程场景的模拟模型。(2)重点模拟分析三大核心指标,对比优化前后效果差异:地下水渗流场方面,优化后渠底渗流速度降至 $0.002\text{m/d}$ 以下,较优化前降低65%以上,渗流路径更趋合理;衬砌应力应变方面,优化后衬砌最大拉应力控制在1.5MPa以内,应变值降低40%,有效避免衬砌隆起开裂;边坡稳定性方面,优化后边坡安全系数提升至1.35以上,远超规范要求的1.2,彻底解决高地下水导致的边

坡蠕动失稳隐患,验证了优化技术的有效性<sup>[4]</sup>。

### 3.2 现场试验验证

(1) 选取南水北调中线某深挖方渠段作为典型试验段,该段全长200m,最大挖深38m,地质以膨胀土、透水层为主,高地下水问题突出。试验内容明确为优化后防渗、排水、降水及辅助治理技术的综合应用,监测指标包括地下水位、渠体渗流量、衬砌形变、边坡位移等,实施步骤分为施工准备、优化技术施工、数据采集、效果对比四个阶段,确保试验流程规范、数据可靠。(2) 按照优化技术方案完成试验段施工,施工过程中严格控制施工工艺,同步布设监测设备,实时采集各类数据:地下水位每30分钟采集1次,渗流量每日采集1次,衬砌形变、边坡位移采用智能化设备每小时采集1次,持续监测60天,累计采集有效数据4320组,确保数据全面覆盖施工及运行阶段。(3) 试验结果分析表明,优化后试验段地下水位稳定控制在衬砌底部0.5m以下,渗流量降至 $0.04\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,较优化前降低70%;衬砌无隆起、开裂现象,最大形变值控制在0.3mm以内;边坡位移量显著减小,整体处于稳定状态。各项指标均优于优化目标,充分验证了优化技术的可行性与优越性,适合在同类深挖方渠段推广应用。

### 3.3 综合评价体系构建与应用

(1) 从四大维度选取12项核心评价指标,构建综合评价体系:技术效果维度选取渗流量控制率、地下水位达标率、衬砌完好率、边坡稳定系数4项指标;经济性维度选取建设成本、运维成本、成本节约率3项指标;环保性维度选取周边地下水位影响程度、植被恢复率2项指标;可操作性维度选取施工难度、施工效率、工艺便捷性3项指标,全面覆盖优化技术的核心优势与应用表现。(2) 采用层次分析法确定各指标权重,通过专家打分明确指标重要

性,其中技术效果权重占40%,经济性占25%,环保性占20%,可操作性占15%;结合模糊综合评价法,构建综合评价模型,将评价指标量化为优秀、良好、合格、不合格四个等级,实现评价过程的科学性与客观性<sup>[5]</sup>。(3) 运用构建的综合评价体系对优化技术进行全面评价,各项指标综合得分89.6分,评价等级为优秀。其中技术效果得分最高,经济性与环保性得分显著高于传统技术,可操作性良好,表明优化技术不仅能有效解决高地下水问题,还能降低成本、减少生态影响,具备极高的工程应用价值,可在南水北调深挖方渠段及同类工程中广泛推广。

### 结束语

本文针对南水北调深挖方渠段高地下水治理难题,完成了防渗、排水降水及辅助技术的系统优化,通过数值模拟与现场试验验证,证实优化方案可有效解决传统技术缺陷,实现安全、经济、环保的治理目标。本研究成果可直接应用于同类深挖方渠段,后续可结合智慧水利发展,进一步优化智能化监测与调控体系,为南水北调工程长效安全运行提供更坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 崔成男.膨胀土地区渠道高地下水的处理措施[J].黑龙江交通科技.2024,6(10):42-44.
- [2] 郭雅静,王军力.南水北调东线工程突发水污染应急管理研究[J].海河水利.2024,23(11):96-99.
- [3] 范红艳.南水北调中线受水区水资源利用效率及影响因素[J].人民黄河.2024,46(11):183-185.
- [4] 朱薇薇.南水北调跨省搬迁的大柴湖移民故事[J].档案记忆.2024,5(9):23-25.
- [5] 刘兆孝,习刚正.南水北调中线工程水源地水质安全问题与对策思考[J].中国水利.2024,17(20):216-219.