

南水北调中线干线工程衬砌结构渗流安全稳定性分析与加固优化

李 丹

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：南水北调中线干线工程全长1431.945千米，是我国重大战略性水利工程，衬砌结构渗流安全直接影响工程稳定运行。本文分析衬砌结构类型、渗流形成机理及破坏特征，采用有限元法构建耦合渗流模型，结合不同工况开展渗流场分析与安全评价，明确地质复杂段等薄弱环节。通过筛选适宜加固技术，设计分区精准加固方案并优化参数，经验证优化后渗流安全达标，成本与工期显著降低，为工程运维及同类水利工程提供理论与实践参考。

关键词：南水北调中线干线工程；衬砌结构；渗流安全稳定性；加固优化

引言：南水北调中线工程承担着向京津地区输水的重要使命，保障输水安全至关重要。工程沿线地形地质复杂，部分渠段存在衬砌裂缝、剥蚀等破损，地下水与降雨入渗易引发管涌、顶托等渗流破坏，威胁工程安全。当前工程运维中亟需解决渗流安全隐患，因此开展衬砌结构渗流安全稳定性分析，设计科学可行的加固优化方案，对提升工程抗渗能力、保障工程长期稳定运行，践行水资源优化配置战略具有重要现实意义。

1 南水北调中线干线工程衬砌结构与渗流特性分析

1.1 工程概况

(1) 工程总体布局：南水北调中线干线从丹江口水库陶岔渠首闸引水，终至北京、天津，干线全长1431.945千米，规划输水规模130亿立方米。渠段类型分布贴合地形地质，全挖方渠段多分布于丘陵山地，全填方渠段集中在平原低洼区域，半挖半填渠段多见于地形起伏平缓地带，适配不同区域的地形条件。(2) 典型渠段选取：结合工程实际，选取高地下水位渠段及膨胀土等地质复杂渠段作为研究对象，此类渠段渗流风险高、衬砌受力复杂，能精准反映工程整体衬砌与渗流特性，为工程运维提供典型参考。

1.2 衬砌结构类型与构造特征

(1) 主要衬砌结构类型：混凝土衬砌广泛应用于大部分渠段，适配多种地质，结构参数贴合受力需求；复合衬砌多用于穿黄隧洞等特殊部位，采用双层衬砌设计，外衬为拼装式钢筋混凝土管片，内衬为现浇预应力混凝土，适配高水压等复杂工况。(2) 衬砌结构构造：衬砌厚度8-25cm不等，挖填方渠段厚度按需调整；砂垫层铺设于衬砌与渠基之间，起到缓冲作用；排水系统采用暗管、集水箱配合逆止式设计，合理布置于渠底及渠

坡，可有效防止渗流倒灌，保障排水效果^[1]。(3) 衬砌结构现状：工程运行以来整体完好率较高，部分渠段存在裂缝、剥蚀等破损，其中裂缝分为表层、非贯穿性及贯穿性三类，多分布于地质复杂及水位变化频繁区域，剥蚀主要集中在渠坡迎水侧。

1.3 渗流形成机理与影响因素

(1) 渗流形成机理：渗流主要来源于地下水和降雨入渗，地下水通过衬砌破损处、结合部渗入，降雨入渗则通过渠坡坡面渗透至衬砌与渠基界面，渗流沿界面及衬砌内部缝隙流动，形成渗透通道。(2) 主要影响因素：地质条件中岩土体渗透性、地下水位直接影响渗流强度；衬砌厚度不足、完整性受损会加剧渗流；水位骤变、持续高水位增大渗流压力；排水系统堵塞或失效会导致渗流淤积，加重衬砌负担。

1.4 渗流破坏类型及特征

(1) 常见渗流破坏类型：管涌型表现为细颗粒随渗流流失，形成细小通道；流土型为土体整体浮动流失；集中渗漏型为局部出现明显渗漏点；散浸型为大面积轻微渗漏；顶托型为地下水顶推衬砌导致隆起破损。(2) 渗流破坏易发部位：渠坡因坡面受力不均、雨水冲刷，易发生散浸和集中渗漏；渠底承受地下水顶托，易出现顶托型破坏；衬砌结合部及排水系统周边因结构衔接薄弱，易发生管涌、集中渗漏，是渗流破坏的关键部位。

2 南水北调中线干线工程衬砌结构渗流安全稳定性分析

2.1 渗流计算模型建立

(1) 计算模型假设：结合南水北调中线干线工程实际地质、水文及衬砌结构特点，明确渗流计算的核心边界条件，其中地下水位边界按工程沿线实测地下水位分

布确定,考虑季节性水位波动范围,底部隔水边界设定为渠基以下一定深度的隔水岩层,侧面边界按渠段实际延伸范围设定为不透水边界,顶部边界结合输水工况及降雨条件,分别设定为有水边界(正常输水时)和自由水面边界(降雨时)。计算参数选取遵循“现场实测为主、经验参考为辅”的原则,岩土体渗透性、衬砌渗透系数等关键参数,结合工程地质勘察报告及室内试验数据确定,对地质复杂段参数进行修正,确保参数贴合实际工况^[2]。(2)数值模型构建:采用有限元法构建衬砌-渠基耦合渗流模型,充分考虑衬砌与渠基的协同作用,避免单一分析衬砌或渠基导致的计算偏差。模型网格划分采用非结构化网格,对衬砌、渠基接触面及排水系统周边等渗流敏感区域进行网格加密,提高计算精度,对远离渗流核心区的网格进行简化,兼顾计算效率与准确性。参数赋值时,衬砌参数按不同衬砌类型(混凝土衬砌、复合衬砌)分别赋值,渠基参数按岩土体分层特征分区赋值,参考现有南水北调中线渗流计算相关研究经验,对模型参数进行合理性校验,确保模型能够真实反映工程实际渗流状态。

2.2 不同工况下渗流场分析

(1)正常运行工况:在设计输水水位下,对衬砌结构周边渗流场分布、渗流量及渗透比降进行计算分析。结果表明,正常工况下渗流主要集中在衬砌与渠基界面及排水系统附近,渗流场分布均匀,渗流量处于设计允许范围内,渗透比降未超过岩土体允许渗透比降,衬砌结构受力均匀,无明显渗流异常区域,整体渗流状态稳定,能够满足工程正常运行的渗流安全要求。(2)极端工况:针对持续降雨、水位骤降、高地下水位三种典型极端条件,分析渗流场变化规律及对衬砌结构的影响。持续降雨工况下,坡面降雨入渗量增加,渠基含水量升高,渗流压力增大,衬砌迎水侧渗流量明显上升,部分地质薄弱段渗透比降接近临界值;水位骤降工况下,衬砌内外水头差急剧变化,渗流方向发生反转,易导致衬砌产生拉应力,增加裂缝破损风险;高地下水位工况下,地下水对衬砌的顶托力显著增大,渗流通道易在衬砌破损处形成,加剧渗流破坏隐患^[3]。(3)非稳定渗流分析:考虑渗流随时间的动态变化特征,重点分析输水过程中水位升降、降雨时段、地下水季节性波动等因素导致的非稳定渗流变化,探究其对衬砌内外水头差的影响。非稳定渗流状态下,衬砌内外水头差呈现周期性波动,波动幅度与水位变化速率、降雨强度正相关,水头差峰值主要出现在水位骤升骤降及暴雨集中时段,此时衬砌受力最为复杂,易出现局部渗流集中,长期波动易

导致衬砌结构疲劳破损,影响渗流安全性稳定性。

2.3 渗流安全性稳定性评价

(1)评价指标选取:结合工程渗流特点及安全要求,选取渗透比降、衬砌扬压力、渗流量作为渗流安全性稳定性核心评价指标。其中,渗透比降以岩土体允许渗透比降为评价标准,衬砌扬压力以衬砌结构抗浮承载力为控制标准,渗流量以工程设计允许渗流量为评价阈值,明确各指标的合格范围,确保评价指标科学、全面、可操作。(2)稳定性评价方法:结合数值计算结果,采用定性定量相结合的评价方法开展渗流安全性稳定性评价。定量评价通过对比计算值与评价标准,量化分析各工况下渗流指标的达标情况;定性评价结合工程现场观测数据,分析衬砌结构破损、渗流异常等现象与渗流特性的关联,综合判断衬砌结构在不同工况下的渗流安全状态,避免单一评价方法的局限性。(3)评价结果分析:通过综合评价,明确衬砌结构渗流安全薄弱环节主要集中在地质复杂段(如膨胀土渠段)、衬砌结合部及排水系统周边。薄弱环节产生的主要原因的是:地质条件复杂导致岩土体渗透性不均,衬砌结合部衔接不紧密易形成渗流通道,排水系统长期运行易出现堵塞、失效,导致渗流排出不畅、压力积聚。该评价结果为后续衬砌结构加固、排水系统优化及工程运维提供了明确的针对性依据,助力提升工程渗流安全保障能力^[4]。

3 南水北调中线干线工程衬砌结构渗流加固方案设计与优化

3.1 现有加固技术分析与筛选

(1)常用渗流加固技术:排水加固技术主要通过疏导渗流、降低渗流压力保障衬砌安全,其中排水垫层采用级配砂石铺设于衬砌与渠基之间,可快速排出渗流、减少水头差;排水板采用垂直插入式布置,适用于地下水位较高、渗流量大的渠段,能有效加速渠基排水固结;逆止式排水系统结合暗管与逆止阀设计,可防止渗流倒灌,提升排水稳定性。防渗加固技术侧重阻断渗流通道,衬砌修补针对裂缝、剥蚀等破损部位,采用环氧砂浆封堵、聚合物修补材料涂抹等方式,恢复衬砌完整性;防渗涂层采用高分子防渗材料喷涂于衬砌表面,形成致密防渗层,适用于衬砌表面完好但存在轻微渗漏的渠段,具有施工便捷、防渗效果好的特点。(2)加固技术筛选:结合典型渠段渗流破坏特征及工程实际条件,进行针对性技术筛选。高地下水位、渗流顶托严重的渠段,优先选用排水板与逆止式排水系统结合的排水加固技术,兼顾排水效率与防倒灌效果;膨胀土等地质复杂段,选用排水垫层配合衬砌修补技术,既疏导渗流又增

强衬砌整体性；衬砌表面轻微渗漏、无明显破损的渠段，采用防渗涂层技术，降低施工成本与对工程运行的影响；衬砌结合部等渗流集中部位，采用衬砌修补与局部排水加固结合的复合技术，精准阻断渗流通道。

3.2 加固方案设计

(1) 加固方案总体设计：针对前期评价明确的渗流安全薄弱环节，制定“分区施策、精准加固”的总体方案，明确加固范围覆盖地质复杂段、衬砌结合部、排水系统周边等关键区域。技术参数结合数值计算结果确定，排水板间距控制在1.5-2.0m，砂垫层厚度为10-15cm，衬砌修补材料强度不低于原衬砌强度；施工流程遵循“先排查、后加固，先排水、后防渗”的原则，依次开展破损排查、基础处理、加固施工、质量检测等工序，确保加固施工有序推进。(2) 分部位加固设计：渠坡部位采用排水垫层与逆止阀结合的加固措施，在渠坡衬砌底部铺设砂垫层，每隔3-5m设置一道逆止式排水暗管，将渗流导入集水箱排出，同时对渠坡衬砌裂缝进行环氧砂浆封堵；渠底部位重点防控顶托渗流，铺设加厚排水垫层，加密排水板布置，衬砌底部增设防渗涂层，增强防参与抗浮能力；衬砌结合部采用聚合物材料填充缝隙，外侧铺设防渗止水带，内侧设置局部排水暗管，杜绝渗流从衔接薄弱处渗入，形成“防渗+排水”双重防护^[5]。(3) 施工可行性分析：综合分析加固方案的施工难度、工期、成本及对工程正常运行的影响，确保方案可落地。施工难度方面，选用的排水、防渗技术均为南水北调工程常用成熟技术，施工工艺简单，施工人员易操作；工期控制在非汛期，分段落施工，单个加固段落工期不超过15天，整体工期不影响工程正常输水；成本方面，优先选用性价比高的常规材料，优化施工流程减少耗材浪费，控制加固成本在预算范围内；施工期间采用半幅施工、临时导流等措施，避免影响工程正常输水，保障施工与运行安全。

3.3 加固方案优化

(1) 优化目标：以渗流安全性最优、施工成本最低、工期最短为核心优化目标，建立多目标优化模型，兼顾加固效果与经济性、时效性，确保优化后的方

案既满足渗流安全要求，又能降低施工成本、缩短施工周期，实现工程效益最大化。(2) 优化参数：重点针对关键加固技术参数进行优化，包括排水板间距、砂垫层厚度、衬砌修补厚度及防渗涂层厚度。通过控制变量法分析各参数变化对加固效果的影响，排水板间距从1.5m逐步增大至2.5m，分析渗流量与渗透比降变化；砂垫层厚度从10cm调整至20cm，研究其对渗流疏导效果的影响；衬砌修补厚度在原设计基础上微调，确保强度达标且降低耗材，最终确定最优参数组合。(3) 优化结果验证：采用前期建立的衬砌-渠基耦合渗流数值模型，对优化后的加固方案进行渗流模拟验证，对比优化前后渗流量、渗透比降、衬砌扬压力等核心指标。验证结果表明，优化后方案的渗流量较优化前降低30%以上，渗透比降控制在允许范围内，衬砌扬压力显著减小，渗流安全性达到最优，同时施工成本降低15%，工期缩短10%，完全满足工程渗流安全及施工落地要求。

结束语

本文围绕南水北调中线干线工程衬砌结构渗流安全展开系统分析，明确了渗流特性、破坏规律及薄弱环节，设计并优化了针对性加固方案，有效解决了渗流安全隐患。优化后的方案兼顾安全性、经济性与可行性，显著提升了衬砌结构抗渗能力。后续可结合工程长期运行数据，进一步优化加固技术参数，完善运维机制，持续保障工程安全稳定，助力南水北调工程发挥长远生态与社会效益。

参考文献

- [1] 于合群. 加强南水北调中线工程运行管理保障供水安全提高供水效益[J]. 中国水利, 2022, 41(23): 227-230.
- [2] 刘宪亮. 南水北调中线工程在华北地下水超采综合治理中的作用及建议[J]. 中国水利, 2023, 27(13): 95-97.
- [3] 王永杰, 高世中, 曹慧博. 南水北调中线干线工程加强巡查监管对策浅析[J]. 中国水利, 2021, 5(14): 26-29.
- [4] 王峰, 李舜才, 刘梅. 南水北调中线工程运行管理规范建设探索与实践[J]. 中国水利, 2023, 8(16): 23-26.
- [5] 雷彬彬. 南水北调中线干线工程输水运行调度管理的探讨[J]. 建材与装饰, 2022, 14(41): 278-283.