

大直径泥水盾构始发关键技术

冯 帆 唐顺龙 姜才华 周煜航 邓 欢

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610213

摘 要：大直径泥水盾构始发是软土富水地层隧道施工的高危关键工序，相较于常规盾构，存在断面大、扰动范围广、施工容错率低等突出问题。本文依托大直径泥水盾构施工工况，系统分析始发施工机理与独有施工特性，梳理洞门渗漏、掌子面失稳、姿态偏移等典型风险及失效模式。针对性开展始发前期准备、端头破壁密封、掘进参数优化、地层沉降管控及风险应急技术研究，形成一套适配大直径盾构的始发核心控制工艺。研究成果可有效降低始发阶段地层扰动与安全隐患，为同类大断面隧道始发施工提供工程参考。

关键词：大直径泥水盾构；始发施工；地层扰动；参数优化；风险防控

引言

随着城市隧道、跨江通道工程建设规模不断扩大，大直径泥水盾构凭借优异的富水软土适应性，得到广泛应用。始发阶段作为盾构施工的起始核心环节，受浅埋覆土、地层软弱、断面尺寸大等因素影响，极易引发涌水涌砂、地表沉降、设备姿态失控等施工病害。目前常规盾构始发技术难以完全适配大直径盾构的受力与变形特征，施工管控针对性不足。为此，本文结合现场实际施工特点，开展大直径泥水盾构始发机理、风险隐患及核心控制技术研究，旨在优化施工工艺，提升始发作业安全性与稳定性。

1 大直径泥水盾构始发机理及特性分析

1.1 泥水盾构工作原理与始发作业流程

泥水盾构主要依托泥水压力平衡掌子面水土压力，通过泥水循环系统实现渣土排出与地层稳定，是软土、富水地层隧道施工的核心设备。其核心工作原理为通过泥水舱内稳压泥水贴合掌子面，形成致密泥膜，阻隔地层水土渗漏，同时刀盘切削土体与泥水混合，形成浆渣混合液，经管道输送至地面处理系统，完成渣土分离与泥水循环。盾构始发是隧道施工的首道关键工序，整体作业流程具备固定工序逻辑。施工前期完成设备组装、洞门密封安装与端头地层加固后，依次开展洞门破除、刀盘贴合掌子面、泥水系统调压、初始掘进作业，逐步完成盾体入土、管片拼装、尾部密封成型等工序，直至盾构完全进入地层，完成始发全过程施工。

1.2 大直径盾构始发区别于常规盾构的核心特性

相较于常规中小直径泥水盾构，大直径盾构始发施工差异显著。大直径盾构盾体自重、刀盘切削面积大

幅增加，始发阶段整体刚度更低、受力不均衡问题更突出，极易出现盾体倾斜、姿态偏移等问题。大断面掌子面水土压力分布不均匀，地层扰动范围更广、沉降影响半径更大，对泥水压力调控精度要求更高。大直径盾构洞门尺寸大，密封结构覆盖范围广，洞门间隙止水、防涌砂难度远高于常规盾构。设备荷载大、掘进扭矩高，始发阶段设备匹配性、施工协同性的控制难度也大幅提升，施工容错率更低^[1]。

2 大直径盾构始发典型风险与失效模式分析

大直径泥水盾构始发断面大、覆土浅、洞门暴露面积广，施工扰动敏感性强，相较于常规盾构存在更多典型隐患。结合软土富水地层始发工况，可将现场主要风险及对应的失效模式分为四类，具体如下：（1）洞门密封失效风险。大直径洞门环状间隙跨度大、分布不均，密封刷安装贴合难度高。在破壁及初始掘进阶段，受地层水土压力、盾体姿态偏移影响，密封结构易出现挤压变形、局部脱空等问题，最终引发洞门涌水、涌砂、漏浆等失效现象，直接破坏掌子面泥水稳压体系。（2）掌子面失稳失效风险。大断面掌子面应力分布离散性强，泥水压力调控容错率低。泥水参数匹配不当、压力波动过大时，会出现掌子面局部坍塌或土体挤出问题，造成地层亏土、地表沉降超标，是始发阶段最常见的结构性失效模式。（3）盾构姿态失控风险。大直径盾体自重荷载大、重心偏高，始发阶段仅部分盾体入土，受力极不均衡。掘进过程中易出现盾体上浮、倾斜、轴线偏移等问题，严重时会导致管片拼装错位、盾体卡壳，造成掘进施工中断。（4）地层扰动超限风险。大直径刀盘切削扰动范围广，端头加固区与原状地层交接处稳定性薄弱。掘进扰动易引发加固区开裂、土体松动，产生持续

性地层变形,诱发周边地表、构筑物沉降超限,引发施工安全隐患^[2]。

3 大直径泥水盾构始发前期准备

大直径泥水盾构始发施工复杂度高、前置条件严苛,完善的前期准备工作是规避始发故障、控制地层变形、保障施工连续的基础。前期核心准备工作主要分为场地与结构校核、设备系统调试、端头地层处理、监测布设四项核心内容。(1)始发井结构校核与场地布置。针对大直径盾构自重及掘进荷载大的特点,对始发井墙体、底板承载力及结构尺寸进行复核验算,排查结构受力薄弱区域。结合大件吊装、泥水循环、渣土转运需求规划场地布局,明确设备安放位置与施工通道,满足大盾构始发施工的空间与荷载要求。(2)整机设备与泥水系统调试。完成盾体、刀盘、管片拼装机等核心设备的现场组装,逐项检查机械连接、电气控制及液压系统工况。重点调试泥水循环管路、筛分设备与压力控制系统,校验设备运行稳定性与参数响应精度,消除设备装配缺陷。(3)端头地层加固与止水处理。根据现场地质条件,选用适配的加固工艺对始发端头土体进行加固处理,提升土体整体性与密实度。封堵地层孔隙,阻断地下水渗流通道,降低洞门破除及初始掘进阶段涌水、涌砂风险。(4)监测系统布设。沿隧道轴线、地表及周边建构筑物布置监测点位,安装沉降、位移监测设备,调试数据采集与传输系统,确保始发全过程可实时掌握地层与周边环境变形状态^[3]。

4 大直径泥水盾构始发核心控制关键技术

4.1 大直径泥水盾构端头密封与破壁始发技术

端头密封与洞门破壁是盾构始发的第一道关键工序,直接决定掌子面泥水系统稳定性,是杜绝涌水、涌砂、漏浆病害的核心工艺,适配大直径盾构大断面、大间隙的施工特点。大直径盾构洞门开挖跨度大,围护结构破除后土体临空面积显著增加,地层应力释放更为明显,若密封及破壁工艺控制不当,极易出现洞门渗漏、掌子面失稳等重大始发风险,因此必须采用精细化、分级化施工控制手段。(1)端头密封精细化安装控制。大直径盾构洞门环状间隙大、圆周间隙分布不均,采用双层钢丝刷密封结构为主、橡胶止水衬垫为辅的密封体系。施工中严格控制密封刷焊接与安装精度,保证密封刷整体贴合盾体外壁,杜绝局部脱空、翘边现象。针对洞门上下、左右间隙差值较大的区域,增设辅助密封填料,填补异形间隙,规避高压泥水穿透渗漏通道。同时严控密封结构防腐与加固处理,避免始发掘进摩擦、挤压造成密封结构破损失效。(2)分步分级洞门破除工

艺。摒弃一次性整体破除方式,采用人工配合机械分层破除洞门混凝土结构。先破除表层围护结构,逐层剥离钢筋与混凝土,实时观察端头土体稳定性,排查渗水、塌孔隐患。破除过程保留核心土体保护层,待盾构设备调试完成、泥水稳压系统就绪后,一次性破除剩余土体,最大程度缩短洞门裸漏时长,减少地层应力释放与水土渗漏风险。(3)破壁阶段泥水压力精准管控。洞门破除完成后,快速建立掌子面泥水平衡体系,根据覆土厚度、地层水土压力计算基准泥水压力值。破壁初期采用低压稳压模式,缓慢提升泥水压力,避免压力骤变扰动原状土体;盾体逐步入土过程中,动态微调泥水参数,保证掌子面泥膜完整、压力稳定,抵御地层水土压力,维持端头地层整体稳定性。

4.2 大直径泥水盾构初始掘进参数优化技术

初始掘进阶段盾构未完全入土,盾体受力不均、姿态敏感性强,掘进参数的合理匹配与动态优化,是控制掘进姿态、降低地层扰动的核心手段。结合大直径盾构刀盘切削面积大、扭矩荷载高的特点,针对性优化掘进控制参数。大直径盾构始发段普遍存在覆土浅、地层承载力弱、应力扰动敏感等特点,参数选取不能沿用常规小直径盾构施工经验,需根据实际地质及覆土条件动态精细化匹配,实现低扰动平稳始发。(1)泥水配比参数优化。根据始发段软土、富水地层特性,合理调配泥水比重与黏度。掘进初期适当提高泥水黏度,快速在掌子面形成致密均匀泥膜,封堵土体孔隙,减少泥水流失与土体渗透变形。根据掘进进度实时调整泥水比重,规避比重过大造成地层挤压隆起、比重过小导致掌子面失稳的问题,保证泥水稳压效果与渣土输送效率适配。(2)掘进力学参数协同控制。严格管控掘进推力、刀盘扭矩、推进速度三项核心参数的协同匹配。始发阶段降低推进速度,采用低速稳推模式,避免快速掘进造成的土体剧烈扰动;根据盾体受力状态动态调整掘进推力,杜绝推力过大导致盾体偏移、卡壳问题。实时监测刀盘扭矩变化,针对大断面切削阻力不均的特点,及时调整参数,防止扭矩突变引发设备故障与地层扰动。(3)盾构姿态精准纠偏控制。针对大直径盾体自重偏大、易上浮、易偏移的特点,建立实时姿态监测机制。初始掘进阶段严控轴线偏差值,出现微小偏移时及时微调油缸推力与掘进角度,采用小幅度、高频次纠偏方式,杜绝大幅度纠偏造成的盾体受力失衡、周边土体挤压破损问题,保障盾构沿设计轴线平稳入土掘进^[4]。

4.3 始发阶段地层变形与沉降控制技术

大直径盾构始发掘进断面大,地层扰动范围远大于

常规盾构,端头加固区与原状地层交接位置稳定性薄弱,极易出现沉降、隆起等变形问题,需通过注浆优化、实时监测、动态管控实现地层变形可控。始发阶段盾体尚未完全进入稳定地层,盾尾间隙暴露时间长,地层损失难以通过常规施工手段完全弥补,是地表沉降及周边构筑物变形的高发阶段,必须依托全过程动态控制技术实现变形可控、受控。(1)同步注浆参数动态优化。结合始发阶段盾体间隙、地层孔隙特征,优化同步注浆压力、注浆量、注浆速度。严格控制注浆压力,避免压力不足导致浆液填充不密实、压力过大引发地表隆起。根据掘进进度匀速注浆,保证浆液均匀填充盾体与土体之间的环形间隙,及时补偿地层损失,约束土体变形。针对大断面间隙空间大的特点,适当微调注浆量,杜绝空隙残留。(2)二次注浆补强管控。对同步注浆填充盲区、浆液固结收缩区域开展二次补浆施工,采用少量多次的注浆方式,封堵地层空隙,加固松散土体。重点针对洞门周边、隧道顶部等易沉降区域强化注浆补强,提升地层整体性,阻断后续地层持续变形通道。(3)全过程变形监测与预警。在隧道轴线地表、周边建构筑物、管线位置布设高密度监测点位,全程采集沉降、水平位移数据。实时对比监测数值与预警阈值,及时识别微小变形趋势。针对超限变形隐患,第一时间调整掘进参数与注浆方案,实现地层变形的动态管控,规避持续性沉降风险。

4.4 大直径泥水盾构始发风险防控与应急技术

大直径泥水盾构始发工序复杂、风险源集中,需依托精准风险辨识、常态化防控、专项应急处置体系,解决始发阶段涌水涌砂、姿态失控、设备故障等典型隐患。相较于常规盾构,大直径始发施工风险耦合性更强,单一参数波动或工序缺陷极易诱发连锁安全隐患,因此必须建立源头防控、动态监测、应急处置一体化的管控体系,保障始发施工全过程安全稳定。(1)重点风险源头防控。针对洞门涌水涌砂风险,始发前复核端头加固质量,检查密封结构完整性,杜绝间隙渗漏隐患;针对盾体姿态失控风险,严格管控掘进参数,保证盾体受力均衡;针对设备运行

风险,始发前完成整机、泥水系统、注浆系统全面调试,杜绝设备带病作业。全程落实工序旁站管控,及时排查隐性安全隐患。(2)动态风险辨识与分级管控。结合地质条件、施工进度、设备状态开展动态风险评估,对高风险点位实行重点管控、专人值守。针对复杂富水地层、浅埋断面等高危工况,升级管控标准,加密监测频次,提前做好工况适配调整,降低风险发生概率。(3)专项应急处置技术。针对始发典型病害制定标准化应急方案,出现洞门渗漏、涌砂时,立即暂停掘进,封堵渗漏通道,调整泥水压力稳压止水;出现盾体偏移、上浮时,即刻纠偏调参,平衡盾体受力;出现地表沉降超限时,快速实施补浆加固、地表回填处置,遏制风险扩大,保障始发作业整体安全可控^[5]。

结束语

本文通过对大直径泥水盾构始发全过程技术开展系统性分析,明确了大直径盾构区别于常规盾构的施工特性与扰动机理,总结了始发阶段主要风险失效形式。通过梳理端头密封破壁、掘进参数优化、地层变形控制及风险应急防控等核心技术,完善了大直径盾构始发施工管控体系。研究表明,精细化工序管控、参数动态匹配、全过程风险防控是保障大直径盾构平稳始发的关键。

参考文献

- [1] 李瑞光. 软弱富水地层大直径盾构始发关键技术研究[J]. 科技资讯, 2026, 24(5): 147-149.
- [2] 武景存. 狭窄竖井小直径泥水盾构分机分体始发技术研究[J]. 现代工程科技, 2026, 5(5): 29-32.
- [3] 闫铁. 超大直径盾构的中间井过站施工关键技术研究[J]. 科技视界, 2026, 16(8): 1-4.
- [4] 靳兆阳, 牛刚. 大直径泥水盾构突遇孤石群处理关键技术——以福州滨海快线地铁项目为例[J]. 科技和产业, 2025, 25(11): 47-53.
- [5] 陈林, 秦银平, 张文新, 等. 超大直径泥水盾构水中接收关键技术研究——以汕头海湾隧道为例[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(8): 130-136.