

机械顶管穿越河流管涌事故处置措施

向 闯

(中交石油天然气管道工程有限公司)

摘 要：为解决机械顶管穿越河流、水库、沟渠等复杂地质条件时可能发生的管涌事故问题，采用案例分析的方法，研究了套管外壁与顶管机械成孔之间发生管涌事故的处理措施。通过系统分析工程实际案例，提出了一系列针对性的风险控制措施，包括施工前的详细地质勘察、施工过程中的实时监测以及应急预案的构建与实施。研究结果表明，风险控制措施能够有效降低管涌事故的发生概率，并在事故发生时迅速采取应对措施，减少损失。研究首次建立了涵盖“勘察-施工-应急”全周期的管涌防控技术体系，填补了复合地层顶管施工动态风险预警的理论空白，为类似工程提供了安全控制指标和模块化应急预案模板，经工程验证可提高综合工效。

关键词：机械顶管；穿越河流；河底渗水；注浆加固；克泥效

0 引言

机械顶管技术作为一种非开挖施工方法，近年来在地下管道穿越工程施工中得到了广泛应用，特别是在穿越河流、水库等复杂地质条件时，其优势尤为显著。然而，顶管施工在复杂水文地质条件下仍面临诸多挑战^[1]，如涌水、地层扰动、顶进阻力增大等问题，直接影响了施工的安全性和效率。现有研究主要集中在顶管机具的选型与改进、施工工艺优化以及风险控制措施等方面，如相关的顶管机具选型与改进的研究^[2]。现有研究多侧重于单一技术或局部问题的解决，缺乏对复杂水文地质条件下顶管施工系统性风险控制的研究，特别是在管涌事故的预防与处理方面，仍存在较大的研究空白。

本文提出一套从事事故预防到应急处理的系统性解决方案，包括土工布铺设、注浆堵漏、中继间增加等措施，显著提高了施工安全性效率，为机

械顶管穿越河流管涌事故处置提供了解决方案。

1 工程概况

1.1 项目概述

某工程采用 HRC2400 mm^[3]复合式岩石破碎顶管机进行泥水平衡顶管施工穿越黄水河，设计顶管穿越长度为 188 m，始发井及接收井采用钢筋混凝土沉井结构，沉井净宽为 12 m，净长为 15 m，井深为 21 m。始发井距河道 22 m，接收井距河道 71 m，水面宽度约 95 m，现场平面布置见图 1。在井内相距 5 m 平行顶进 2 根水泥套管，每根长 188 m，水泥套管采用钢筋混凝土管片^[3]，DN2400 mm，壁厚 230 mm，套管顶设计深度距河床底大于 5 m。设计顶进深度为套管顶距河床底大于 5 m。当顶进至约 47.5 m(已深入河流下方约 25.5 m)时，发生了严重的管涌事故。涌水导致工作井被淹，整套泥水平衡顶管设备淹没失效，造成重大直接经济损失。

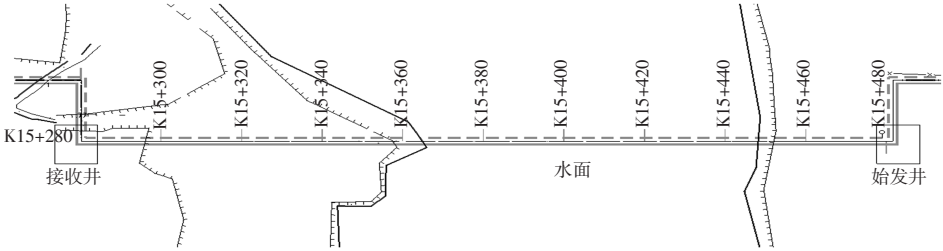


图 1 现场平面图

1.2 工程地质条件

勘察结果显示 25.0 m 深度内主要为人工填土、第四系全新统冲洪积层及上更新统坡洪积层。

地表为褐黄色松散—稍密素填土①层(含植物根、砖块碎石)。其下依次为褐黄色中密—密实粉土②层(含云母、氧化铁、局部钙质结核或粉砂)

及褐黄色中密黄土状粉土③层(含云母、氧化铁、白色菌丝、局部钙质结核或砾石)。底部为棕红色硬塑粉质黏土④层,土质不均,稍湿,局部夹粉土薄层;线路部分区段富含粒径 2~8 cm 碎石或钙质结核(含量 20%~40%),其它区段则富含粒径 2~6 cm 灰绿色团块(含量 20%~40%)。设计顶管管道底部位于河床以下 5 m,主要处于粉质黏土④层中。

2 顶管管壁水害机理研究

管涌事故是多种不利因素相互作用的结果。顶管穿越段存在不良地质条件,上覆原状土层仅厚 0.5 m,如此薄的原状土层难以形成有效的隔水屏障。下伏的素填土具有较高的渗透性,为地下水的流动提供了便利条件。在顶管施工过程中,不可避免会对周围土体产生扰动。施工扰动使得原本相对稳定的素填土结构遭到破坏,进而产生裂隙,使地下水的渗流更加顺畅。

河流水位与工作井底板之间形成的高达 13.3 m 的水头差,是导致管涌事故的另一个关键因素。巨大的水头差产生强大的渗透压力,在高水压的驱动下,河水通过被扰动的素填土裂隙,沿着套管外壁与土体间的环隙向下渗透,逐渐形成贯通的涌水通道。

当涌水通道形成后,通道内的高压水流直接作用于洞口前墙止水圈。止水圈作为防止涌水的最后一道防线,承受巨大的压力。瞬时高压水流冲破固定 10 mm 厚橡胶止水圈的钢压板体系,导致止水结构失效,进而河水涌入工作井,引发工作井内水位快速上涨,最终导致严重的管涌事故。管涌事故不仅造成了工作井被淹,整套泥水平衡顶管设备淹没失效,还对工程进度和周边环境造成了严重的影响,带来了巨大的经济损失和社会影响。

3 处理方案

3.1 处理方案原则

确定管涌事故的原因后,首先实施源头封堵,通过采用套管外注浆技术,通过注浆材料的填充和固化作用,封堵涌水通道,阻止河水继续涌入工作井。在注浆过程中,严格控制注浆材料的配合比和注浆压力,确保注浆效果。选用优质的水泥基注浆材料,根据地质情况和涌水压力,将注浆压力控制在合适的范围内,保证浆液能够充分填充涌水通道,形成有效的封堵层。

成功堵漏后立即排干沉井积水,选用符合设计要求的 10 mm 厚橡胶止水圈更换失效止水圈,严格按照安装工艺进行更换安装,确保止水圈与洞口前墙紧密贴合,固定止水圈的钢压板体系安装牢固,防止再次出现涌水现象。

由于注浆后顶进阻力明显增大,增设中继间提供辅助顶力,帮助克服增加的阻力,使顶管能够继续顺利顶进。在增设中继间时,对其位置和数量进行设计。根据顶进阻力的计算和现场实际情况,在合适的位置增设中继间,并合理分配各中继间的顶力,确保接力顶进时各节点顶力均衡协调。

同时,岸上在顶管两侧钻孔至套管中心标高,埋设注浆管,按规定配比注入克泥效配膨润土以填充套管外侧环隙,使浆液均匀填充套管外侧环隙。这种注浆填充能够进一步加固套管周围土体,提高其稳定性,减少涌水风险。在钻孔和注浆过程中,严格控制钻孔精度和注浆质量。采用先进的钻孔设备,确保钻孔位置准确,深度达到设计要求。

注浆完成后再次排干沉井积水并检修设备,确保设备能够正常运行。为防止顶进过程中套管周边再生空隙,持续实施跟管注浆。然而,持续跟管注浆导致顶进阻力持续上升,当主顶力不足时,依据现场情况额外增设中继间。在整个处理过程中,各措施紧密配合,按照控制涌水、修复设备和结构、保障顶进顺利进行的顺序实施,有效解决管涌事故带来的问题,为顶管施工的继续进行奠定基础。

3.2 顶管穿河防渗控险

3.2.1 河床复合土工膜隔水层及河岸注克泥效浆体施工

由于本工程顶管穿越河流,为防止河道内渗水及涌水现象发生,保障顶管顺利安全通过,采取了一系列针对性的措施:顶管线路河床复合土工膜隔水层施工和始发井河岸注克泥效浆体施工布置见图 2。

1) 在顶管线路河道内铺设土工膜。沿顶管轴线铺设宽度为 10 m,长度为 30 m 的土工膜。土工膜宽度和长度的设定基于对河流宽度、水流速度、地质条件以及顶管施工范围等多方面因素综合考虑。为了确保土工膜能够有效发挥隔水作用,先用直径 14 mm 的螺纹钢筋制作龙骨。龙骨沿土

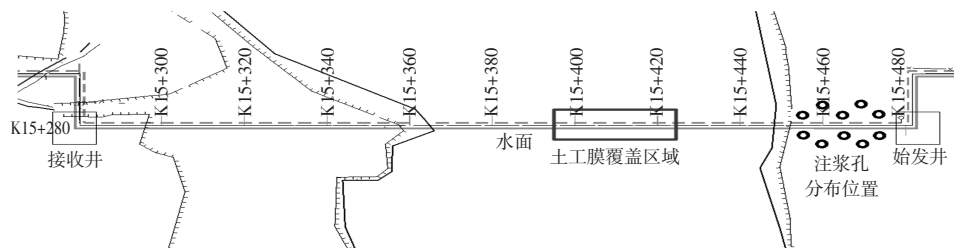


图2 注浆孔位置分布及土工膜覆盖区域

工膜一周安装,沿30 m长度方向每隔1 m间距设置1根龙骨。由于长度较长,采用分段制作安装的方式,以提高施工效率和质量。在制作龙骨时,严格控制钢筋的直径和间距,确保龙骨的强度和稳定性,能够有效支撑土工膜。

土工膜加装龙骨后,用吊车吊运至水面。沿土工膜整体放置袋装石子,放置高度为30 cm,以达到河床底部隔水效果。袋装石子的放置能够增加土工膜的重量,使其更好地贴合河床底部,防止河水从土工膜下方渗透。在放置袋装石子时注意分布均匀,避免出现局部堆积或缺,确保隔水效果的均匀性。

2) 在始发井河岸注克泥效浆体。克泥效浆体具有良好的填充和止水性能,能够进一步增强河岸的防渗能力。在注入克泥效浆体时,严格控制注浆的位置、压力和用量。根据设计要求,在特定的位置进行注浆,确保克泥效浆体能够有效填充河岸土体的空隙,形成一道有效的防渗屏障。

通过以上河床复合土工膜隔水层施工措施的实施,有效提高了河床的防渗能力,降低河道内渗水及涌水现象发生的可能性,为顶管施工的安全顺利进行提供了有力保障。

3.2.2 套管环隙同步注浆填充

为防止套管外壁孔隙内发生涌水,在始发井河岸每侧顶管处用螺旋钻机引10个DN40 mm孔,引至套管中间位置,引孔长度20 m,引孔完成后插入DN40 mm镀锌注浆管。注浆管插入完成后用注泥泵注入搅拌好的膨润土和克泥效(膨润土和克泥效比例为3:1),边顶进边注浆,每顶进4节套管,在10处注浆孔均注入一次拌制好的浆液,每个孔注至压力达到4 MPa为止。

3.2.3 中继间接力顶进系统增强

顶管注浆时掺入外加剂,可提高克泥效的黏度(膨润土:克泥效=3:1),由于边顶管边注克泥效,套管外壁阻力增大,顶至150 m时油顶顶力可达12 753 kN,根据油顶设置8个,每个1 962 kN,

最大能提供15 696 kN顶力,为了应对顶管阻力增大情况采取每道管道增加1组中继间以加大顶力措施,由原来每顶进一路管子2套中继间增加至3套中继间,以保障管道顶通。

3.2.4 顶进姿态动态控制与精度保障

严格控制顶进速度,提高管道纠偏效果。管道轴线偏移是造成管道失稳的重要原因之一,因此在施工中应把控制管道轴线偏移作为顶管技术的核心内容,尽量减少轴线偏差。同时,在管道轴线发生偏离时,认真执行管道纠偏的有关原则,及早纠偏。同时注意对顶管设备的检查,加强管道连接刚度。

3.2.5 加强机头偏转及纠正措施

出洞前机身导轨摩阻力不足抵抗刀盘转矩反力,导致顶管机反向偏转(刀盘顺时针转则机身逆时针偏,反之亦然)。顶进中,遇硬软不均土层形成偏差,频繁纠偏会加剧整条管道偏转。主要纠偏措施为利用主顶油缸调整姿态,控制机头刀盘旋转方向,在顶管机外壁焊接纠偏定位板。

4 顶管施工质量控制

为确保顶管施工的顺利进行并有效控制潜在风险,需从施工前的准备、施工过程的动态控制、施工后的验收以及应急与安全管理等多个环节实施系统化的质量管理。

4.1 施工准备

施工前准备是保障工程顺利推进的基础。

首先,对顶管机、注浆系统、中继间及主顶油缸等关键设备进行全面检查与调试,确保其运行状态与设计参数相符,以满足复杂地质条件下的施工需求。

其次,材料质量控制同样至关重要。所有进场的主要材料,包括混凝土管材、膨润土及克泥效等,均需依据设计要求对其性能和规格进行严格检验,并采取妥善的防潮、防污存储措施,防止材料性能劣化。

此外,地质风险的动态管控不可或缺。施工

前通过地质勘察报告深入分析地层结构、岩土性质及水文地质条件,识别潜在风险点。施工过程中结合实际地质情况,对结论分析进行动态更新与修正,为后续施工方案的优化提供科学依据。

4.2 动态质量控制

施工过程中的动态质量控制是确保工程精度的核心。

首先,对关键参数进行实时监测与调控。通过激光导向系统、沉降监测仪等先进技术,对顶管姿态(如轴线与高程)、顶进推力、注浆压力等核心参数全程连续监控,并依据监测数据及时调整施工参数,确保顶进精度始终处于可控范围。

其次,注浆工艺的优化与效果验证是保障管道稳定与止水效果的关键。严格执行膨润土与克泥效的既定配比(建议为3:1),并依据不同区段的地层特性,动态调整注浆压力与注浆量,确保浆液充分填充环隙。注浆完成后,进行压力测试,以评估注浆层的密实度与止水效果。

再次,顶进速度的科学控制对维持地层稳定至关重要。施工中需根据地层条件变化与设备运行状态,合理调整顶进速度,避免因速度过快导致地层扰动加剧,或因速度过慢造成顶进阻力异常增大。

同时,一旦监测到管道轴线发生偏移,必须立即启动纠偏程序。纠偏操作遵循“小幅度、高频次”的原则,避免一次性纠偏量过大引发管道失稳或接口损伤。在采用中继间施工时,对各中继间的顶力分配策略进行精心优化,确保接力顶进过程中各节点顶力均衡协调,防止因局部顶力超限导致设备损坏或管道结构变形。

4.3 系统性质量验收

顶管贯通后系统性质量验收是检验施工成果的重要环节。

首先,对管道接口进行严格的密封性检测,通常采用水压试验或气密性试验等方法,验证接口是否存在渗漏,确保其满足设计要求。

其次,对施工影响区域进行沉降监测。工程完工后,对顶管轴线沿线及邻近区域(如水库堤岸、邻近构筑物等)实施持续沉降监测,确认施工活动未对周边环境造成超出允许范围的不利影响。如果发现异常沉降,及时采取有效的补救措施。

此外,完整的技术资料归档是工程验收与后

期维护的重要依据。施工全过程中产生的所有关键数据,包括技术参数记录、监测数据、纠偏记录及材料检验报告等,均需详细、准确地记录,并进行系统整理与归档。

4.4 应急预案体系与风险分级管控

针对顶管穿越河流等复杂环境可能面临的突发涌水、关键设备故障、地层塌陷等重大风险,必须制定专项应急预案。预案内容应明确应急响应流程、具体处置措施、资源调配方案及各岗位人员职责。同时,需定期组织实战演练,确保所有施工人员熟练掌握应急操作技能,提升整体风险应对能力。

4.5 人员培训与安全管理

人员素质与安全意识是保障施工质量与安全的基础。施工前应对所有作业人员进行专项技术培训,确保其熟练掌握顶管施工工艺、设备操作流程及质量控制要点。同时,必须严格执行安全生产制度,按要求配备救生衣、安全帽、防护栏等必要的安全防护设施,并加强现场安全监督,切实保障施工人员的人身安全。

5 结语

本文以机械顶管穿越某河流工程为研究对象,针对施工过程中发生的管涌事故,系统分析了事故原因,并提出了一套综合性的处理方案。针对顶管施工中管涌事故的突发性和不可预见性,提出了从源头堵漏、套管外注浆、增加中继间等综合措施,有效解决了传统方法难以应对的复杂水文地质问题。创新性地采用了克泥效配膨润土注浆技术,并结合土工膜铺设和螺旋钻机引孔注浆,显著提高了堵漏效果和施工安全性。

当前处治方案主要侧重于事故后的快速响应,未来研究应探索将实时监测技术(如分布式光纤传感DTS/BOTDA、孔隙水压力传感、顶力/姿态监测)与涌水风险预警模型结合,实现对潜在涌水通道形成过程的早期识别和预警,推动顶管施工安全管理从“被动应对”向“主动预防”转变。

参考文献:

- [1] 丁天良.长输油气管道的河流穿越技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2014,34(3):81.
- [2] 王长明,方文献,杨国富,等.大口径钢筋混凝土管的泥水平衡顶管法施工技术[J].建筑技术开发,2022,49(16):67-68.
- [3] JC/T 2092—2023 顶管施工法用钢筒混凝土管[S].