

引水工程穿越河道堤防顶管技术探析

杨杰¹ 陈闯¹ 张良² 袁鹏¹

1 宿迁市水务勘测设计研究有限公司, 江苏省宿迁市, 223800;

2 宿迁市水利局, 江苏省宿迁市, 223800;

摘要: 随着城市供水工程规模不断扩大, 引水管线穿越河道与堤防成为常见而又高度敏感的施工场景。为最大限度降低对堤体结构与行洪能力的影响, 顶管技术因扰动小、施工隐蔽性强而成为主要施工方式。本文以某引水工程穿越两河三堤的顶管施工为例, 对穿堤顶管的关键技术要点、地质适应性、结构布置、设计计算与施工控制策略进行了系统分析。研究显示, 穿堤顶管的核心风险在于地层稳定性与堤防沉降控制, 需要在施工前开展详勘并对土体结构、水文条件及堤防状况进行综合判别。在施工过程中, 通过泥水平衡支护、同步注浆、导向纠偏、中继间布设及顶力分段控制等技术措施, 可有效降低顶进阻力与堤体变形。工程实例表明, 科学配置设备参数并实施全过程监测, 可确保顶管姿态稳定并实现堤防安全可控。本研究为类似引水工程的穿堤施工提供了系统的技术思路。

关键词: 引水工程; 顶管施工; 河道堤防; 沉降控制

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.053

引言

随着区域供水体系规模的快速扩大, 跨河道与跨堤防输水线路的建设需求显著增加。然而河道堤防作为重要的防洪安全屏障, 其结构特性决定了施工活动必须在严格受控的条件下进行。在此类敏感区域施工不仅关乎管线建设本身, 更直接影响堤防安全与行洪能力。传统明挖方式易破坏堤防结构, 施工风险高, 而顶管技术因其隐蔽性强、扰动小等特点已成为跨堤防施工的重要手段。顶管工程在不同地层条件下的稳定性、顶力控制、沉降影响与施工组织方案均需经过严谨论证, 以确保在保证防洪安全的前提下实现高质量建设^[1]。

1 引水工程穿越河道堤防顶管技术要点

引水工程在穿越河道堤防时通常采用顶管施工方式, 顶管施工的核心目标是确保堤防安全稳定与顶进过程顺利可控, 因此在施工之前必须开展系统性的工程分析。首先需要详细调查地质条件, 包括土层结构、力学性质、地下水埋深与渗透系数等, 以便判断土体对掘进面稳定性的影响。若遇到软弱夹层、饱和砂层或强透水带, 必须制定相应的加固与防渗措施, 否则可能导致塌方或突涌等安全问题。其次, 堤体结构材料与加固历史需在技术方案中重点考虑, 特别是老旧堤防或存在病害的区域, 更应通过地质雷达或钻探进一步核实结构稳定性, 以避免在薄弱段顶进造成整体滑移或局部损伤。为确保顶管姿态与坡度控制准确, 需要采用高精度测量系统及导向纠偏技术, 通过实时比对设计路径与实际路径调整顶进方向, 防止偏移引起的顶力集中或管节受损。在顶进过程中, 土体应力平衡是控制风险的关键。施工

需采取分区开挖方式, 并结合泥水平衡或气压支护技术稳定开挖面, 同时根据土层渗透特性实施同步注浆。顶管设备的参数配置必须与地层条件相匹配。对于高含水率或松散土层, 应选择具备强支护能力的泥水平衡顶管机, 以确保开挖面稳定。对于覆盖层较厚或地层较硬的段落, 则需配置高扭矩、高推力的设备以满足掘进需求。施工过程中应依托监测系统实时掌握顶力变化、管节姿态、堤防沉降及周边渗压等关键指标^[2]。

2 引水工程穿越河道堤防顶管技术应用

2.1 工程概况

本工程输水线路全长 278.30km, 其中穿越河道段共计 49 处。本段需以顶管方式依次穿越两河三堤, 总顶进长度为 300.00m, 顶进管道选用钢筋混凝土管, 强度等级为 C50, 管道内径为 2200mm, 壁厚为 220mm。在顶管完成后, 于管道内部铺设输水管, 采用混凝土套管内置钢管结构, 钢管直径 1600mm, 壁厚 12mm, 设计压力 1.20MPa, 顶部与套管空间采用水泥砂浆回填, 以增强结构整体性和抗浮稳定性^[3]。

2.2 地质条件

顶管段地层构造由上至下主要包括人工填土、低液限黏土、级配不良砂及全风化泥岩。人工填土厚度约 3.00~6.00m, 以黏土为主, 主要分布于堤防部位。其下为黄褐色及灰色低液限黏土层, 两层黏土厚度约 0.80~5.90m, 可塑性较强, 并局部夹含中粗砂。底部为级配不良砂, 其矿物组成以石英和长石为主, 下伏层为全风化泥岩, 呈层状构造, 埋深约 7.60~9.20m。地下水位

较高,局部土层渗透性强,对顶管开挖吸力稳定、顶进阻力及防渗体系提出更高要求。由于该区段地层软硬交替且覆盖层厚度变化明显,顶管宜采用泥水平衡顶管机以适应可塑性黏土与风化泥岩间强度差异,施工需结合实时地基变形监测,控制掘进速率和注浆量,以保证开挖面稳定、减小沉降并维持堤防结构安全。

2.3 工程布置

根据河道管理范围与堤防安全要求,本工程顶管工作井与接收井均设置于堤防背水面外 20.00m 处,顶管总长度为 300.00m。顶埋深需满足抗浮、抗冲刷、覆土厚度及冻深要求,施工期管道顶部覆土厚度确定为 1.50m,检修阶段按管内无水计算,新凯河冲刷深度为 2.54m,中央排水沟为 1.23m,管道自重能满足抗浮稳定性要求。在运行期同时考虑最大冲刷深度与冻深需求,两区域覆土分别达到 4.34m 与 3.03m。穿越水底部位覆盖层厚度不小于外径 1.5 倍且不小于 2.50m,最终确定管顶高程为 162.49m,中心高程为 161.17m。

2.4 工作井与接收井

工作井与接收井采用沉井式结构,工作井高度 14.30m,接收井高度 13.60m,井型均为圆形混凝土结构,以满足较大的埋深与施工空间需求。工作井需满足单节顶管长度要求,其内净长不小于 8.60m,同时考虑前止水墙及后背墙附加厚度,设计内径为 9.50m;接收井需兼顾顶管机吊出等作业功能,设计内径为 6.00m。沉井施工采用排水下沉方式,小型机械逐层开挖土体,并通过卷扬或起重设备将渣土提升至地面堆置。井壁结构需满足承载顶力、维持坑壁稳定并抵御地下水压力的要求。在施工期需严格监测井壁变形、沉降及渗水情况,确保工作井支护体系可靠。

2.5 顶管设计计算

顶管设计计算的核心在于准确评估后背土体承载力、混凝土管道的允许顶力、顶进所需总顶力以及施工引起的堤防沉降量。计算过程需结合《给水排水工程顶管技术规程》与工程地层条件综合展开,以确保顶管推进过程中结构受力合理、堤防稳定可靠。本工程顶进段覆盖层厚度大、地层包含低液限黏土与全风化泥岩,摩阻力及迎面阻力均较高,因此顶力校核与沉降控制是本段设计的关键。

2.5.1 后背土体最大抗力计算

工作井后背土体在顶进过程中需承担顶力反作用,因此必须验证其极限承载力能够满足顶管推进要求。本工程依据规程选用的计算方法,将顶力的作用位置视为位于管外径三分之一处,通过土体强度、井壁结构与地层条件对后背土体进行稳定分析。文件中通过规范公式

计算得到后背土体的最大抗力为 13 650 kN 该数值是顶力校核的重要基础,若总顶力超过该承载值,则后背结构可能发生滑移或失稳,从而威胁工作井安全。由于本工程顶进距离长且需穿越两河三堤,顶力增长明显,因此后背承载力校核不仅验证结构安全,也直接决定后续是否需要布置中继间以及中继间间距配置,从而在整体设计中具有重要指导作用。

2.5.2 顶管允许最大顶力计算

钢筋混凝土顶管的允许顶力是判断管节是否具备足够抗压能力的关键指标。文件采用规范公式:

$$F_{dc} = 0.5 \times \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \frac{Y_{Qd}}{\varphi_5} f_c A_p$$

式中涉及材料折减系数、偏心受压提高系数、脆性系数、混凝土设计强度及有效传力面积等因素。本工程管道采用 C50 强度等级,计算得到允许顶力为 12 480 kN。该数值明显小于顶管推进所需总顶力,因此如果直接以单段方式顶进将导致混凝土管道承压不足,可能产生环向裂缝或局部压碎。由此可知,设置中继间分段顶进不仅必要且必须严格控制阶段性顶力,以使各段顶力均控制在管道可承受范围之内,从而保证结构整体安全性。

2.5.3 总顶力计算

顶进总顶力由摩阻力与迎面阻力组成,文件采用如下公式:

$$F_0 = D_1 L f_k + N_F$$

$$N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 \gamma_s H_s$$

其中 D_1 为管道外径, L 为顶进长度, f_k 为单位摩阻力, N_F 为迎面阻力, H_s 为覆盖层厚度。本工程顶管总长 300 m, 计算得到总顶力为 28 400 kN, 远大于管道允许顶力和后背土体抗力。因此必须通过设置中继间降低单次顶进顶力,文件据此布设了三个中继间,分别位于 45 m、120 m、195 m 处,使每段顶进顶力控制在 10 000 kN。这一计算结果显示顶力分析是决定施工组织方式的核心环节,对于长距离、多堤防穿越顶管尤为关键。

2.5.4 堤防沉降计算

为评估顶管施工可能引起的堤防沉降风险,文件采用 Peck 沉降槽理论。最大沉降量与沉降曲线由以下公式确定:

$$S(x) = S_{\max} \exp \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right)$$

$$S_{\max} \approx \frac{V_s}{2.5i}$$

$$i = \frac{H}{2\pi \tan(45^\circ - \varphi/2)}$$

式中 x 为横向距离, i 为沉降槽宽度系数, V_s 为超挖量。本工程通过严格控制土体损失率不大于 4%, 计算得堤顶最大沉降量为 13.72 mm, 小于规范允许的

20 mm,说明施工影响可控。由于堤防为防洪关键设施,沉降分析在本工程中具有重要安全意义,其结果为确认顶管方案可行提供了可靠依据。

2.6 顶管施工

2.6.1 注浆要求

顶管施工过程中必须同步进行注浆,以维持开挖面压力稳定并确保管道与土体之间形成可靠支撑层。文件指出主注浆孔应与顶进过程保持一致,做到先注浆后推进,中继间注浆需与中继装置启动同步开展,运行中保持连续注浆,以降低摩阻与控制地表沉降。对于覆盖层较薄的流塑性黏性土,注浆量应严格控制,避免地表隆起或管节上浮。根据不同土层渗透特性,减阻浆液亦需分类选择,在黏性土与粉质土中宜采用触变泥浆,在渗透性较高砂层中应加入化学稳定剂,而在粗砂或砂砾层中则需选用高分子化学泥浆以保证流变性能和稳定性。合理的注浆制度不仅决定顶进阻力大小,也直接影响堤防的沉降控制效果,是长距离穿越河道堤防时必须严格管理的核心工序。

2.6.2 顶进导轨布置及要求

顶进导轨是确保管节沿设计轴线推进的重要控制基准,其布设精度直接关系到顶管姿态与后续管线安装质量。文件要求导轨支架采用稳定性良好的钢结构构件,牢固固定于工作井底板,使顶进时导轨不发生位移。导轨与管道的支撑角应保持为六十度,高程与坡度需与设计轴线保持一致。安装偏差需控制在严格范围内,包括轴线位置偏差不得超过三毫米,顶面高程允许零至正三毫米,两轨净距偏差控制在正负二毫米范围内。导轨稳定性对于穿越堤防工况尤为关键,因为堤体覆盖层厚度大且地层差异显著,任何微小偏移均可能引起管节姿态失稳或纠偏难度增加,从而加大施工风险。因此导轨施工需要分阶段校核和复测,以确保顶进设备在长距离推进中始终保持正确方向。

2.6.3 主顶装置的性能和安装布置要求

主顶装置是顶管推进的动力核心,其性能配置需满足长距离、大顶力条件下的稳定输出。规范指出千斤顶行程应不小于一千毫米,单个千斤顶的额定顶力不小于一千千牛,并需成对布置在管节两侧,使作用力相对对称,以避免产生偏心力矩。千斤顶的合力中心需略低于管道中心,以利传力路径稳定。为满足长距离顶进的同步性要求,所有千斤顶需保持一致动作,并配合导向系统进行实时校正。在布置方式上,必须确保装置与管道轴线平行,传力面平整,并设置可靠的后背结构承担顶力反作用。对穿越堤防的工程而言,主顶装置的可靠性直接影响推进安全性,一旦顶力输出不均或不同步,将可能引发管节受力异常、土体扰动增大甚至堤防局部沉

降等风险。

2.6.4 主站油泵安装要求

主站油泵是主顶装置的动力来源,其性能必须与千斤顶的顶力需求与顶进速度匹配。文件要求油泵数量需满足顶进速度达到每分钟一百毫米的施工需求,油泵应安装在靠近千斤顶的位置,使油管路径尽量顺直、转折少,从而减少能量损失与压力波动。施工中油泵由顶管机主控系统统一调节,以实现顶力输出的稳定性与响应速度。由于穿越河道堤防地层多变且顶力需求波动较大,油泵系统必须保持良好运行状态,确保流量与压力稳定,否则将导致千斤顶动作不同步或顶进压力异常。合理的油泵布置不仅关乎施工效率,也影响顶力控制精度,是保证顶管姿态稳定与减少土体扰动的重要技术环节。

2.6.5 顶铁安装要求

顶铁承担顶力传递职责,其结构与安装质量直接关系到管节受力安全。文件建议采用 U 形或弧形刚性顶铁,以增强受力面稳定性,确保其能均匀将千斤顶的推力传递至管节。顶铁两受压面需保持平整、相互平行,并在与混凝土管之间增设木垫圈,以缓冲局部应力集中并保护管节端面。顶铁结构还需兼顾出渣与人员通行空间,避免对顶进节奏造成影响。由于本工程顶进总长度大且需布设多个中继间,顶铁在不同施工阶段可能承受略有差异的负荷,因此需要进行定期检查与校正,确保结构稳定性。在穿越堤防等重要部位时,顶铁的受力可靠性尤为关键,因为受力失衡可能导致管节端面损伤,进而引发整体轴线偏移或顶进阻力异常。

3 结语

通过对引水工程穿越河道堤防顶管施工全过程的分析可以看出,顶管技术在跨堤防施工中的优势明显,但其实施效果高度依赖地质勘察质量、工程布置合理性以及施工期的动态控制。计算结果表明管道抗浮能力、顶力分级配置和堤防沉降均处于可控范围,施工过程中的注浆、导向纠偏及设备匹配进一步确保了工程结构安全与堤体稳定性。工程实践证明,顶管技术能够在不破坏堤防主体结构的前提下完成长距离穿越,满足防洪、安全与运行需求。

参考文献

- [1] 温苑. 水利工程下穿高速全断面破岩顶管施工技术[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(12): 63-64.
- [2] 王美凤, 渠元闯, 沈振锁, 等. DN3000 钢管顶管用于引水工程检修应急通道[J]. 中国给水排水, 2023, 39(04): 108-111.
- [3] 罗维高, 林惠庭, 章志, 等. 大直径超长距离钢顶管施工技术应用分析[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(08): 71-75.