

浅覆土粉细砂层污水微顶管施工技术研究

王镇筠 刘津铭 虞 阳

首都机场集团有限公司北京建设项目管理总指挥部, 北京 100621

[摘要]文中以首都机场某办公楼前污水管道大修工程为依托, 针对 D400mm 污水管道在埋深 5.97m~6.11m 浅覆土、粉细砂地层、下穿多条既有管线且穿越交通繁忙道路的复杂工况, 开展微顶管施工技术研究。工程采用数值模拟预分析、试验段参数优化、端头注浆加固、触变泥浆减阻、双道密封防漏、激光导向纠偏等综合技术措施, 有效解决了浅埋软土地层顶进易沉降、易涌砂、管线保护难度大等技术难题。施工全过程地表沉降控制在 10mm~18mm, 满足道路与管线安全运营要求, 实现了不断路、少扰动、高精度的非开挖施工目标。研究成果可为机场及城区类似浅覆土、管线密集、软土地层条件下的污水管道非开挖改造提供技术参考与实践依据。

[关键词]微顶管; 粉细砂层; 浅覆土施工; 沉降控制; 数值模拟; 管线保护

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19527

中图分类号: TU7

文献标识码: A

Research on Construction Technology of Micro Top Pipe for Sewage in Shallow Soil Fine Sand Layer

WANG Zhenyun, LIU Jinming, YU Yang

Beijing Construction Project Management Headquarters, Capital Airport Holdings Co., Ltd., Beijing, 100621, China

Abstract: Based on the major repair project of a sewage pipeline in front of an office building at the Capital Airport, this article conducts research on micro jacking construction technology for D400mm sewage pipelines in complex working conditions such as shallow soil cover, fine sand layers, multiple existing pipelines, and busy traffic roads buried at a depth of 5.97m to 6.11m. The project adopts comprehensive technical measures such as numerical simulation pre analysis, experimental section parameter optimization, end grouting reinforcement, thixotropic mud drag reduction, double channel sealing leakage prevention, laser guided correction, etc., effectively solving technical problems such as easy settlement and sand gushing in shallow buried soft soil layers, and difficult pipeline protection. The surface settlement during the entire construction process is controlled within 10mm~18mm, meeting the requirements for safe operation of roads and pipelines, and achieving the goal of non excavation construction with no interruption, minimal disturbance, and high precision. The research results can provide technical reference and practical basis for the non excavation renovation of sewage pipelines in airports and urban areas under similar shallow soil cover, dense pipelines, and soft soil conditions.

Keywords: micro top tube; fine sand layer; shallow soil covering construction; settlement control; numerical simulation; pipeline protection

1 绪论

随着我国城镇化水平持续提升, 城市地下管网建设进入存量更新与提质增效阶段。污水管网作为城市重要的基础设施, 其改造升级往往面临施工空间狭小、周边环境敏感、地下管线错综复杂、道路交通不允许中断等多重约束。传统明挖施工因占地大、工期长、对环境与交通干扰显著, 在城区核心区、交通干道、机场枢纽等特殊区域已难以适用。非开挖顶管技术凭借施工占地小、对地面交通与建构

筑物影响小、综合效益突出等优势, 已成为市政污水、雨水、给水、燃气等管线改造的主流技术。

在首都机场区域开展地下管线施工, 具有更高的安全标准与运营保障要求。首都机场作为重要国际航空枢纽, 地面交通组织、地下设施运行均实行严格管控。本工程位于首都机场 T3 东部、大型酒店南侧, 毗邻多个公共建筑, 污水管线穿越现状社会道路, 承担周边办公区域污水排放功能。由于现状管道老化破损, 需进行更换大修。受现场

条件限制,该段无法采用明挖施工,必须采用非开挖顶管工艺实施。

本工程顶管段存在多项技术难点:一是覆土深度仅 5.97m~6.11m,属于典型浅覆土顶管,地层自稳能力弱,极易发生地面沉降、冒浆、路面开裂等问题;二是顶管主要穿越 2 层粉细砂地层,该地层黏聚力低、渗透性强、流变性显著,顶进过程易出现涌砂、塌孔、轴线偏位等风险;三是顶管轴线垂直下穿雨水方沟、通信、给水、电力、热力、燃气等 11 条现状管线,与 2000mm×2000mm 雨水方沟结构底垂直净距仅 0.6m,管线密集且多为重要市政管线,保护要求极高;四是施工穿越现况二纬路,该道路为双向四车道、机非混行交通干道,早晚高峰车流量大,施工期间必须保证道路正常通行,地面沉降控制标准严格,不允许出现影响行车安全的变形。

为确保工程安全、优质、高效实施,本项目以“安全可控、沉降达标、管线无损、交通不断”为目标,采用微顶管施工工艺,建立“数值模拟指导-试验段验证-关键技术优化-全过程监测控制”的技术体系。通过对顶进系统、注浆系统、密封系统、导向纠偏系统及竖井支护体系的综合优化,形成适用于浅覆土粉细砂层、下穿密集管线与繁忙道路的微顶管成套施工技术。本文系统总结工程概况、重难点分析、关键施工工艺、数值模拟研究、监控量测及工程应用效果,为同类工程提供可复制、可推广的技术方案与实践经验。

2 工程概况

2.1 工程位置与建设内容

本工程为首都机场某办公楼前污水管道大修项目,位于首都机场 T3 南区,首都机场集团公司和酒店南侧,涉及穿越现况二纬路(三经路~四经路)段污水管线更换。该段污水管线承担周边办公区污水收集与排放功能,因原管道运行年限较长,出现破损、渗漏、沉降等问题,影响正常使用及周边地下设施安全,需重新敷设污水主管线。工程采用微顶管法施工,新建污水管道为Ⅲ级钢筋混凝土钢承口管,管径 D=400mm,内径 400mm,管壁厚度 60mm,单节管长度 2000mm,单节重量约 0.484t。管材满足《混凝土和钢筋混凝土排水管》GB/T 11836-2023 要求,混凝土强度等级 C50~C60,抗渗等级不低于 P8。管道内表面做 300μm 树脂玻璃鳞片防腐处理,提升管道在污水环境下的耐久性能。

顶管施工总长度 62m,分为两个施工段:第一段为 W2→W1,长度 6m,作为试验段,用于优化顶进参数、

注浆参数及纠偏策略;第二段为 W2→W3,长度 56m,为主穿路段,穿越粉细砂地层,并垂直下穿多条现状市政管线。顶管管顶埋深 5.97m~6.11m,覆土较浅,施工风险较集中。

2.2 工作竖井设计

本工程共设置 3 座工作竖井,包括 1 座顶管工作坑(W2)、2 座顶管接收坑(W1、W3)。竖井采用倒挂井壁逆作法施工,支护结构为钢筋格栅+喷射混凝土,整体安全性高、占地小、对周边环境影响小。

工作坑与接收坑设计参数如下:

(1) W2 顶管工作坑:净空尺寸 5m×4m,为顶进设备安装、操作、管节下放及出土提供作业空间。

(2) W1、W3 顶管接收坑:净空尺寸均为 3m×3m,用于顶管机头贯通、拆除及转场。

竖井支护结构设计:

(1) 墙体支护:采用 300mm 厚 C25 喷射混凝土,具备较高早期强度与整体性。

(2) 钢筋格栅:主筋采用 Φ22 钢筋,辅助筋采用 Φ14 钢筋,竖向间距 500mm,形成稳定骨架。

(3) 连接筋:采用 Φ22 钢筋,间距 1000mm,内外双侧布置,增强格栅整体性。

(4) 钢筋网片:内外侧均铺设 Φ6@150×150 钢筋网,提升喷射混凝土抗裂性能。

(5) 锁口圈梁:采用 C30 钢筋混凝土,截面尺寸 0.6m×0.4m,增强井口整体刚度,防止井口沉降与坍塌。

竖井防水与排水设计:

(1) 坑底及侧壁止水:采用地面垂直注浆加固,浆液为水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在 0.5MPa 以内,形成封闭止水帷幕,阻断地下水渗入。

(2) 马头门加固:洞口设置钢筋混凝土环梁,与格栅焊接牢固;洞周上下左右各 1.5m 范围、长度方向不小于 5m 范围进行注浆加固,提高进出洞土体稳定性。

(3) 疏干排水:每座竖井坑底设置疏干井,及时排除坑内渗漏水,保持干槽作业条件,防止基底软化、涌砂。

2.3 工程地质条件

根据勘察报告,场地地层自上而下分布如下:

(1) 层杂填土(Q4ml):杂色,松散至稍密,湿,主要成分为砖块、水泥块、卵石、灰渣及黏性土,全场分布,层顶埋深 0.00~2.50m,厚度 1.20~1.70m,土质不均,结构松散。

(2) 1 层细砂素填土(Q4ml):黄褐色,稍密,湿,

中等到高压缩性,以细砂为主,局部夹少量卵石与灰渣,全场分布,层顶埋深 1.20~1.50m,厚度 1.00~2.10m。

(3)层粉细砂(Q4al+pl):褐黄色、黄褐色,中密,中压缩性,砂质较纯净,主要成分为石英、长石,颗粒级配较好,全场连续分布,层顶埋深 3.30~4.20m,厚度 3.50~5.40m,为本工程顶管主要穿越地层。

(4)1层粉质黏土(Q4al+pl):灰色,可塑,中等到高压缩性,局部夹粉细砂薄层,层顶埋深 7.70~8.70m,厚度 1.60~4.00m。

(5)层细中砂(Q4al+pl):褐黄色,中密,中压缩性,砂质纯净,未穿透,揭露厚度 2.30~10.70m,工程性质良好。

场地土腐蚀性评价:根据试验结果,场区浅层土对混凝土结构、钢筋混凝土结构中的钢筋均具有微腐蚀性,在采取正常防腐措施条件下,可满足结构耐久性要求。场地地下水对施工影响主要为上层滞水与孔隙潜水,通过竖井疏干、洞口注浆止水可有效控制。

2.4 地下管线与施工环境

本工程顶管施工范围内地下管线密集,垂直下穿通信、雨水、给水、电力、热力、燃气等多条现状管线,各管线与拟建污水管道位置关系如下表所示。其中,顶管外顶与 2000mm×2000mm 雨水方沟结构底垂直净距仅 0.6m,安全距离小,保护难度大。

施工穿越现况二纬路,道路标准横断面为一幅路形式,由北向南依次为:6m 人行道、22m 车行道、6m 人行道,总宽度 34m,双向四车道,机非混行,交通流量大,尤其早晚高峰不具备断路施工条件。路面结构对沉降敏感,必须严格控制地表沉降,确保道路行车安全与设施完好。

2.5 主要技术指标

- (1)管道规格:III级钢筋混凝土钢承口管,D=400mm。
- (2)顶进长度:62m,分两段施工。
- (3)覆土深度:5.97m~6.11m。
- (4)穿越地层:以2层粉细砂为主。
- (5)地面沉降控制:≤20mm。
- (6)管道轴线偏差:≤±30mm。
- (7)管道高程偏差:≤±20mm。
- (8)接口形式:橡胶圈柔性接头,密封不渗漏。

3 工程重难点与技术对策

3.1 工程重点与难点分析

3.1.1 浅覆土超浅层顶进风险突出

本工程顶管覆土厚度 5.97m~6.11m,管径 400mm,

覆土厚度约为管径的 14.9~15.3 倍,虽绝对值较大,但属于道路下方超浅层非开挖施工,上部土体荷载小、卸荷拱效应弱,顶管施工引起的地层损失易直接传递至地表,造成地面沉降、开裂甚至冒浆。在车辆动荷载反复作用下,沉降风险进一步放大,是本工程的首要控制重点。

3.1.2 粉细砂地层稳定性差

顶管穿越主体为2层粉细砂,该地层黏聚力低、渗透性大、流变性强。顶进过程中,切削扰动易引发土体流动、涌砂、塌孔;进出洞阶段易出现洞口流失、周边土体塌陷;管周空隙若填充不及时,将快速引发地层沉降,直接威胁路面与管线安全。

3.1.3 现状管线密集且保护要求高

顶管垂直下穿雨水方沟、燃气、热力、电力、通信等 11 条现状管线,涉及多个产权单位,管线功能重要、安全等级高。雨水方沟为钢筋混凝土结构,净距最小,对沉降最敏感;燃气、热力管线存在泄漏风险;电力、通信管线关系机场运营安全,施工中不允许出现明显变形、破损及中断运行。

3.1.4 繁忙道路不断路施工组织难度大

施工期间二纬路必须保持正常通行,无法采取封闭、半封闭措施。施工场地狭小,设备布置、出土运输、材料吊装均受严格限制;同时,车辆动荷载持续作用,加剧地表沉降与土体扰动,对施工参数控制、工序组织、应急处置提出极高要求。

3.2 总体技术对策

针对上述重难点,本工程确立“预控为先、模拟指导、试验先行、精细施工、动态监测、快速响应”的总体技术路线:

(1)施工前采用 MIDAS-GTS 有限元软件建立三维数值模型,模拟顶进过程,分析沉降规律、注浆压力、顶进参数、行车荷载等对地表变形的影响,确定关键参数控制区间。

(2)设置 3m 试验段,通过现场实测与模拟结果对比,优化顶进速度、注浆压力、注浆量、纠偏频率等参数,形成标准化施工控制指标。

(3)采用端头超前注浆加固、触变泥浆同步注浆、管尾双道密封等技术,最大限度减小地层损失,抑制地表沉降。

(4)采用激光导向+电子纠偏系统,实现顶进姿态精准控制,遵循“勤测量、勤纠偏、小幅度、多频次”原则,避免大幅纠偏加剧土体扰动。

(5) 建立地表沉降、管线变形、竖井收敛三位一体监测体系,实行“累计变形+变形速率”双控管理,超预警值立即停工处置。

(6) 优化工序组织,采用连续作业方式,缩短土体暴露时间,降低扰动风险;配备应急物资与预案,确保突发情况快速处置。

3.3 主要创新点

3.3.1 微顶管先导向+螺旋出土一体化工艺

采用 $D=114\text{mm}$ 双臂中空钻杆作为先导管,配合激光经纬仪与光靶定向,实现高精度导向;先导孔贯通后,安装钢护管与螺旋刀盘,通过螺旋输送连续出土,出土效率高、对土体扰动小,特别适用于浅覆土粉细砂地层。

3.3.2 数值模拟与试验段联动控制技术

以数值模拟结果为理论依据,以试验段实测数据为校准依据,形成“计算-试验-优化-推广”闭环控制,使下穿道路段施工参数更贴合实际,沉降预测精度高、控制效果好。

3.3.3 浅覆土粉细砂层成套沉降控制体系

集成端头注浆加固、触变泥浆配比优化、定量控压注浆、均衡顶进、动态纠偏、管尾密封等技术,形成针对性强、协同作用的成套控沉技术,有效解决浅埋软土顶管沉降大、难控制的行业难题。

4 微顶管施工关键技术

4.1 总体施工工艺流程

微顶管施工按以下流程组织实施:

施工准备→现状管线探查与物探→工作竖井施工→洞口注浆加固→顶进设备安装调试→先导管导向顶进→先导管贯通接收坑→钢护管与螺旋刀盘安装→混凝土管节顶进→同步触变泥浆注浆→姿态监测与纠偏→顶管贯通→泥浆置换与封堵→设备拆除→竖井回填与路面恢复。

4.2 现状管线探查与保护

施工前采用人工探槽与地质雷达物探相结合的方式,对顶管轴线及影响范围内现状管线进行全面探查,精准确定管线类型、走向、埋深、材质、管径及结构形式。对雨水方沟、燃气、热力、电力等重点管线设置明显标识,并布设专用监测点,施工中全程监测,发现异常立即采取加固、调整参数等措施。

4.3 工作竖井施工技术

竖井采用倒挂井壁逆作法施工,自上而下逐段开挖、逐段支护:

(1) 测量放线:精准确定竖井中心与轮廓,确保洞

口位置与顶管轴线一致。

(2) 锁口圈梁施工:绑扎钢筋、支模浇筑 C30 混凝土,养护达到强度后进行土方开挖。

(3) 分层开挖与支护:每开挖 500mm ,安装一榀钢格栅,布设连接筋与钢筋网,喷射 C25 混凝土至设计厚度,循环作业直至设计深度。

(4) 井底施工:开挖至设计标高后,施工井底混凝土垫层与底板,设置疏干井,及时抽排地下水。

(5) 马头门施工:洞口位置加强格栅与环梁,洞周注浆加固完成后,方可破除洞口土体,进入顶进作业。

竖井施工严格控制开挖深度,严禁超挖;喷射混凝土保证密实、平整,无空鼓、脱落;钢格栅安装位置准确、连接牢固,确保竖井整体稳定与安全。

4.4 小导管超前注浆加固技术

顶管进出洞是施工高风险点,采用小导管超前注浆加固技术,提高洞口土体强度与稳定性,抑制沉降与涌砂。

(1) 小导管制作:采用 $\text{DN}32\times 2.75\text{mm}$ 焊接钢管,长度 2.0m ,前端加工成锥形,便于打入;距后端 $0.5\sim 1.0\text{m}$ 段管壁梅花形布设注浆孔,孔径 $6\sim 8\text{mm}$,间距 $100\sim 200\text{mm}$ 。

(2) 小导管布设:沿洞口轮廓环向布置,间距 0.25m ,外插角 $5^\circ\sim 10^\circ$,纵向相邻两排搭接长度不小于 1.0m 。

(3) 注浆材料:采用水泥-水玻璃双液浆,凝结时间可调,早期强度高,止水效果好。

(4) 注浆参数:注浆压力控制在 0.5MPa 以内,防止压力过大造成土体劈裂、地表冒浆及管线抬升;加固范围:环向洞口外侧 1.5m ,始发端加固长度 6m ,接收端加固长度 8m 。

(5) 注浆效果:通过注浆加固,粉细砂土体形成固结体,黏聚力与内摩擦角显著提高,自稳能力增强,有效防止进出洞涌砂、坍塌及大幅沉降。

4.5 微顶管先导向与顶进技术

4.5.1 先导向系统

在工作坑内布设激光经纬仪,发射激光束对准先导管钻头后部的光靶中心;操作室设置电子纠偏显示屏,实时显示钻头姿态、高程、轴线偏差,操作人员根据偏差及时调整顶进方向。导向系统精度高、响应快,可保证顶管按设计轴线与坡度推进。

4.5.2 先导管顶进

先导管采用 $D=114\text{mm}$ 双臂中空钻杆,单节长度 $1.0\sim 1.5\text{m}$,连接方便、刚度适宜。顶进时,利用千斤顶将先导

管向前顶进,钻头斜面在扭力作用下实现方向微调。每顶进一节,千斤顶回缩,连接下一节钻杆,继续顶进,直至先导管抵达接收坑,完成导向孔施工。

4.5.3 钢护管与螺旋出土施工

先导管贯通后,在工作坑安装钢护管与螺旋刀盘,螺旋刀盘与先导管后端刚性连接,通过扭力切削土体。切削下来的土体由螺旋输送机输送至工作坑内,再由吊装设备运出。每顶进 1.0~1.5m,接长一节钢护管与螺旋机构,连续作业,减少土体暴露与扰动。待钢护管贯通接收坑后,拆除刀盘,回抽先导管,为混凝土管顶进创造条件。

4.6 钢筋混凝土管顶进与姿态控制

4.6.1 管节安装与顶进

混凝土管节采用起重机吊装就位,放置在导轨上,调整高程、轴线符合要求后,与顶铁、千斤顶连接。顶进前检查接口橡胶圈完好、位置正确,确保密封性能。顶进时采用多台同规格千斤顶,保证顶力、行程、顶速同步,顶力合力线与管道中心线重合,防止偏载导致管节破损、轴线偏位。

4.6.2 姿态控制与纠偏

顶进过程中,每顶进一节管节,进行一次高程、轴线测量,记录偏差数据。遵循“勤测量、勤纠偏、小幅纠偏、逐步到位”的原则,当偏差较小时,利用斜面机头微调方向;偏差较大时,通过调整千斤顶顶力、分次小角度纠偏,严禁一次性大幅度纠偏,避免加剧土体扰动、增大沉降。

4.6.3 管节拉紧与密封

管节之间设置拉紧装置,使顶进中的管节紧密连接形成整体,防止接口错位、渗漏及轴线偏差。接口采用橡胶圈柔性密封,安装时保证橡胶圈均匀压缩、无翻转、无破损,满足抗渗要求。

4.7 触变泥浆减阻与沉降控制技术

触变泥浆注浆是控制地层损失、减小顶进阻力、抑制地表沉降的关键措施。

4.7.1 泥浆作用

(1) 填充管外壁与土体之间的环形空隙,减少地层损失,控制沉降。

(2) 在管外壁形成润滑泥浆套,大幅降低顶进阻力,减小顶力。

(3) 隔离地下水与土体,提高土体稳定性,防止涌砂、塌孔。

4.7.2 泥浆配比优化

针对粉细砂地层与浅覆土特点,优化膨润土、纯碱、

CMC 等材料配比,使泥浆具备良好的触变性、稳定性、封堵性与润滑性,在动荷载作用下不易析水、不易流失。

4.7.3 注浆工艺控制

(1) 同步注浆:顶进与注浆同步进行,随顶随注,及时填充空隙,避免土体塌落。

(2) 定量注浆:按理论空隙体积的 1.1~1.3 倍控制注入量,保证填充密实。

(3) 控压注浆:注浆压力控制在 0.1MPa 左右,约为上部覆土压力的 2 倍,压力过低填充不密实,易引发沉降;压力过高易击穿土层、造成地表冒浆与管线抬升。

(4) 补浆与置换:顶进完成后,及时进行补浆,保证空隙填充饱满;后期采用水泥砂浆进行泥浆置换,提高管周土体密实度。

4.8 管尾密封防漏技术

为防止粉细砂、地下水及触变泥浆从管尾涌入管内,在工具管管尾设置两道环形钢密封刷,密封刷之间填充专用密封油脂,形成可靠密封结构。该装置可有效阻挡土体与地下水进入管道,维持注浆压力,保证泥浆不泄漏,从而稳定控制地层沉降。

5 顶管施工数值模拟分析

5.1 数值模型建立

为准确预测顶管施工引起的地表沉降规律,指导施工参数优化,采用 MIDAS-GTS 有限元软件建立三维数值模型。

(1) 模型尺寸:长度 50m,宽度 5m,深度 8m,满足边界效应要求。

(2) 地层模拟:按实际地层分层建模,土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。

(3) 结构模拟:顶管管节采用线弹性模型;管周注浆层以等代层模拟,体现注浆加固与地层损失效应。

(4) 荷载模拟:施加地面车辆荷载,模拟实际交通工况。

5.2 模拟内容与结果分析

5.2.1 注浆压力对沉降的影响

模拟结果表明,注浆压力直接影响地表沉降。压力过低,空隙填充不密实,沉降显著增大;压力过高,易击穿土层,造成地表隆起与冒浆。本工程最优注浆压力约 0.5MPa,可使沉降控制在合理范围。

5.2.2 地表沉降分布规律

沿顶进方向,地表沉降随顶进距离增加而逐渐增大,最终趋于稳定;沿横向,沉降曲线呈正态分布,顶管轴线

正上方沉降最大,向两侧逐渐减小,土体扰动范围约 $\pm 3\text{m}$ 。

5.2.3 行车荷载的影响

对比有/无行车荷载工况,车辆动荷载对竖向沉降影响显著,无荷载工况地表最终沉降约 8mm ,有行车荷载工况沉降约 17mm ,与现场实测结果接近。

5.2.4 端头注浆加固效果

模拟显示,对进出洞区域实施注浆加固,可显著提高土体稳定性,有效抑制进出洞沉降,防止洞口坍塌。当加固范围为管外侧 2m 、始发端 3m 、接收端 3m 时,加固效果最优。

5.3 数值模拟与现场实测对比

现场监测结果显示,试验段地表累计沉降 $5\text{mm}\sim 10\text{mm}$,下穿道路段沉降 $10\text{mm}\sim 18\text{mm}$,均满足 $\leq 20\text{mm}$ 的控制标准。数值模拟结果与实测数据趋势一致、数值接近,证明模型可靠,可有效指导施工参数设计与风险控制。

6 监控量测与安全控制

6.1 监测项目布设

为实时掌握施工对地表、管线、竖井的影响,建立全方位监测体系:

(1) 地表沉降监测:沿顶管轴线布设监测断面,每 5m 布设一个测点,重点覆盖道路、管线位置。

(2) 现状管线监测:对雨水方沟、燃气、热力、电力、通信等重要管线布设专门测点,监测沉降与变形。

(3) 竖井监测:监测竖井收敛、井口沉降、井底隆起,确保竖井结构安全。

(4) 施工参数监测:实时监测顶力、顶进速度、注浆压力、注浆量、顶管姿态等。

6.2 控制标准与预警机制

采用“累计变形值+变形速率”双控指标:

(1) 预警值:累计沉降 $\geq 10\text{mm}$,或日沉降速率 $\geq 2\text{mm/d}$ 。

(2) 控制值:累计沉降 $\leq 20\text{mm}$ 。

当监测数据达到预警值时,立即停止顶进,分析原因,采取加强注浆、调整顶进参数、加固土体等措施;达到控制值时,启动应急预案,确保安全。

6.3 应急保障措施

(1) 建立应急组织体系,明确人员职责,配备注浆设备、封堵材料、支护器材等应急物资。

(2) 与管线产权单位建立联动机制,出现异常立即

通报,协同处置。

(3) 加强现场巡视,重点检查路面、井口、管线露头变化,发现裂缝、沉陷、渗漏等情况及时处理。

7 施工效果与工程验证

本工程微顶管施工严格按照优化后的技术方案实施,全过程安全平稳,各项指标均达到设计与规范要求:

(1) 沉降控制效果:全线地表沉降控制在 $10\text{mm}\sim 16\text{mm}$,远低于规范限值,路面无开裂、无沉陷,交通运行正常。

(2) 管线安全:下穿 11 条现状管线未发生任何变形、破损及运行中断,安全受控。

(3) 施工质量:管道轴线、高程、坡度、接口密封、防腐层均符合设计要求,验收合格。

(4) 工期与效益:试验段参数优化后,主路段快速推进,工期满足计划要求;采用非开挖施工,避免断路、拆迁,社会经济效益显著。

工程实践证明,本项目采用的微顶管成套技术,在浅覆土、粉细砂、管线密集、交通繁忙的机场区域具有良好适应性,安全可靠、可控性强、施工效率高,可有效解决同类工程技术难题。

8 结束语

本工程以首都机场某办公楼前污水管道大修项目为依托,针对浅覆土、粉细砂地层、下穿密集现状管线与繁忙交通干道的复杂工况,系统研究并应用了微顶管施工成套关键技术。通过数值模拟预控、试验段参数优化、端头注浆加固、触变泥浆减阻、精准导向纠偏、管尾密封防漏及全过程动态监测等综合措施,成功实现了不断路、少扰动、高精度、高安全的非开挖施工目标,为机场及城区核心区类似污水管网改造工程提供了成功案例与技术支持。

微顶管技术在本工程中的成功应用,充分体现了非开挖技术在城市地下管网更新中的优势。面对越来越严苛的环境安全、交通保障、管线保护要求,以微顶管为代表的精细化非开挖工艺将得到更广泛应用。未来可进一步开展设备小型化、智能化、自动化研究,结合数字化监测、信息化管控技术,持续提升顶管施工的精度、安全性与效率,为城市基础设施高质量发展提供更强有力的技术保障。

【参考文献】

- [1]马保松, D.Stein, 蒋国盛.顶管和微型隧道技术[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2]喻军, 龚晓南.考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值

分析[J].岩石力学与工程学报,2014(1):2605-2610.

[3]余芳.顶管施工引起地面沉降的分析研究[D].上海:上海交通大学,2009.

[4]王雪,王成虎,马孝春,等.国内外顶管施工技术的对比分析[J].施工技术,2017(2):6.

[5]翁晓博,张金海.顶管施工对地下原有管线的保护方法

[J].中国水运(下半月),2013(1):112-113.

[6]GB/T 11836-2023.凝土和钢筋混凝土排水管[S].北京:中国标准出版社,2023.

作者简介:王稹筠(1972.06—),女,北京人,就职于首都机场集团有限公司北京建设项目管理总指挥部,从事项目规划、项目工程管理、建设项目运营前期等工作。