

施工与监理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.021

# 美兰机场排水工程的多孔小间距顶管施工关键技术

贾凯, 武永新, 徐振博

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 以海口市美兰机场二期扩建场外排水工程为例,介绍了多孔小间距顶管施工技术。施工前期,采用数值模拟手段对多孔顶管施工顺序进行了优化分析,得出三孔和四孔顶管分别采用1-3-2和1-3-2-4的施工顺序时,可有效减少施工对地面的影响。同时总结了顶管施工的中继环布设、减阻泥浆注浆工艺等施工要点。针对顶管施工过程中遇到的顶管出洞发生渗水、管内渗漏及顶管遇巨大孤石等问题,给出了工程所采取的处理方法。通过采用上述关键施工技术,该工程取得了良好的施工效果。

**关键词:** 顶管施工; 多孔顶管; 触变泥浆

**中图分类号:** TU94 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0113-05

## Key Technology of Multi-hole and Small-spacing Pipe Jacking Construction in Meilan Airport Drainage Project

JIA Kai, WU Yong-xin, XU Zhen-bo

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Taking the phase II expansion off-site drainage project in Haikou Meilan Airport as an example, the construction technology of multi-hole and small-spacing pipe jacking is introduced. In the early stage, the construction sequence was optimized by numerical simulation, and it is concluded that the impact of construction on ground can be effectively reduced when the sequence for three-hole and four-hole pipe jacking is 1-3-2 and 1-3-2-4 respectively. At the same time, the key points of construction, such as the layout of intermediate jacking station and thixotropic slurry grouting of drag reduction are described. In view of the problems such as water seepage and leakage in pipe jacking hole and huge boulder during pipe jacking construction, the handling methods adopted in the project are provided. By adopting the above key construction techniques, the project has achieved good results.

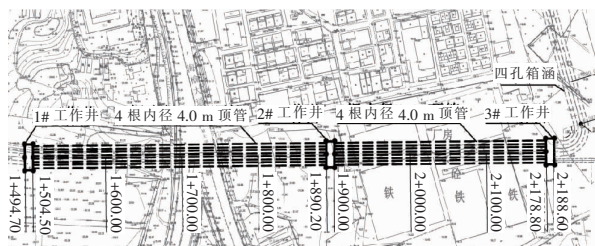
**Key words:** pipe jacking construction; multi-hole pipe jacking; thixotropic slurry

### 1 工程背景

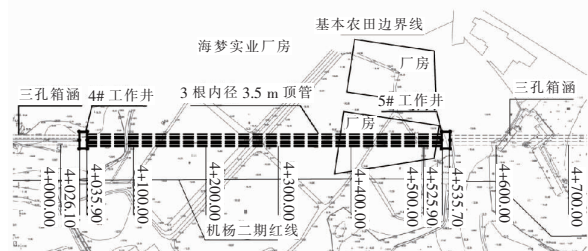
海口市美兰机场二期扩建场外排水工程总投资为10.15亿元,主要任务是解决机场周围涝水无法

排放问题。该工程包含了明渠、箱涵及顶管等内容,其中顶管段总长1795m(不含井),平面布置见图1。1#~3#井段为四孔直径4.0m顶管,顶管横向间

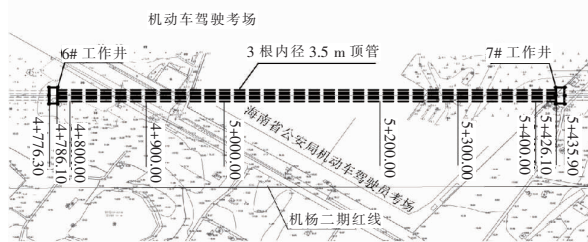
距3.1 m,平均覆土厚度11.19 m,顶距665 m;4#~5#井段和6#~7#井段为三孔直径3.5 m顶管,顶管横向间距3.18 m,平均覆土厚度分别为4.92、8.64 m,顶距分别为490、640 m。采用泥水平衡顶管法施工,管片选择专用钢筋混凝土管,每管节长2.5 m。



a. 1#~3#井段顶管布置



b. 4#~5#井段顶管布置



c. 6#~7#井段顶管布置

图1 顶管工程平面布置

Fig. 1 Plane layout of pipe jacking project

根据地质勘察资料,1#~3#井顶管段地基土主要为⑧层粗砂、⑨层粉质黏土和⑩层生物碎屑砂;4#~5#井地基土主要为⑧层粗砂和⑩层生物碎屑砂;

6#~7#井地基土主要为④层粉质黏土、⑦层粉质黏土和⑧层粗砂。该工程的难点是地质情况复杂、地面沉降控制难、顶距长。由于该工程下穿交通要道及地面厂房建筑物,且采用多孔小间距顶管施工,顶管间的相互影响增大了地面沉降控制难度;管线施工区域多位于中粗砂层,地下水压大,施工时易产生管涌、流砂等现象;顶距最长达640 m,顶力后期控制更难,需安装中继环协同施工。

## 2 顶管机顶力估算及中继环位置布设

在长距离顶管段加设中继环,减少主顶千斤顶的顶推力,可有效克服长距离施工时阻力过大问题。

依据《给水排水工程顶管工程技术规程》(CECS 246:2008),顶管理论顶力大于管片允许顶力80%时,需要安装中继环。当总顶力超过中继环容许顶力70%时,首个中继环应该布设使用。顶管顶力依据下式进行估算:

$$F_0 = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (1)$$

式中: $F_0$ 为总顶力标准值,kN; $D_1$ 为管道外径,m; $L$ 为管道设计顶进长度,m; $N_F$ 为顶管机迎面阻力,kN; $f_k$ 为管道外壁与土平均摩阻力,kN/m<sup>2</sup>。

该工程不同区段的顶力估算及中继环位置布设过程见表1。6#~7#井段由于顶距较长,管片强度不足以承受理论顶推力,需要布设两个中继环。首个中继环的位置距离顶管机头相对较近,目的是为了适应顶管机在不同地质条件下的顶力变化。中继环运行时,先开启最前端中继环,后面中继环和主顶油缸不动;待顶进后,启动第二个中继环,同时前面中继环收回伸缩杆,完成第二段顶进,最后启动主顶油缸,从而达到长距离顶进。施工完毕后,采用人工方式拆除中继环内千斤顶,钢壳留在管内做防腐处理后,再在中继环位置浇筑一节管片。

表1 顶力估算及中继环布设

Tab. 1 Estimation of jacking force and layout of intermediate jacking station

区段	顶距/m	管片允许顶力/kN	管片允许顶力80%/kN	理论顶力/kN	首个中继环与机头距离/m	第2个中继环与机头距离/m
1#~2#井	386	40 435.5	32 348.4	32 557.12	135	
2#~3#井	279	40 435.5	32 348.4	23 689.57		
4#~5#井	490	32 254.9	25 803.9	33 073.66	155	
6#~7#井	640	32 254.9	25 803.9	43 749.30	140	312.5

为保证顶管顺利顶进,此次选用的中继环最大行程为30 cm,Ø4.0 m顶管中继环内部配置40个50 t千斤顶,总推力20 000 kN;Ø3.5 m顶管中继环内部配置32个50 t千斤顶,总推力16 000 kN。

## 3 施工方法的确定

### 3.1 多孔顶管施工方法选择

多孔小间距顶管比单孔顶管施工复杂,顶管间相互影响,导致新建顶管对已建顶管产生应力变形,

引起地面不均匀沉降。目前有学者对多孔重叠隧道施工顺序进行了优化研究,廖少明等<sup>[1]</sup>得出重叠隧道采用“先下后上”的施工方法,可减小隧道间的相互影响;吕奇峰等<sup>[2]</sup>通过对三孔重叠隧洞的研究,也得出了“先下后上”的施工顺序最优。针对本工程四孔和三孔并行顶管施工,通过分析研究,确定最优施工顺序,保证顶管安全高效施工,降低地面沉降变形,减少顶管间相互影响。

为确定最优顶管施工顺序,施工前期依据工程地质条件进行了有限元模拟分析。土体本构模型为莫尔-库仑剪切破坏模型,基本假定:①土体为均质土体;②减阻泥浆为一等厚层;③顶管与周围土体的摩擦阻力均匀分布于管道外侧。

每个管片的顶进过程采用 ABAQUS 中“生死单元法”模拟,模拟步骤:首先对土体模型进行地应力平衡,保证地面沉降已经完成;将开挖土体折减 40%,模拟土体应力释放过程;随后“杀死”开挖土体,并在掌子面施加顶推力;激活管片材料,并在管片四周添加 3 kPa 的剪切力;最后添加减阻泥浆层。其余管片的顶进采用 \* Elcopy 命令进行循环模拟。每孔顶管模拟顶进 20 个管片。模拟两组工况,工况 1 的顶进顺序为 1-3-2,工况 2 的顶进顺序为 1-2-3。图 2 为  $\varnothing 3.5$  m 顶管按 1-3-2 顺序顶进后的地表沉降云图(放大 50 倍),沉降槽整体呈凹槽状,沉降最大值发生在三孔顶管中心轴处。

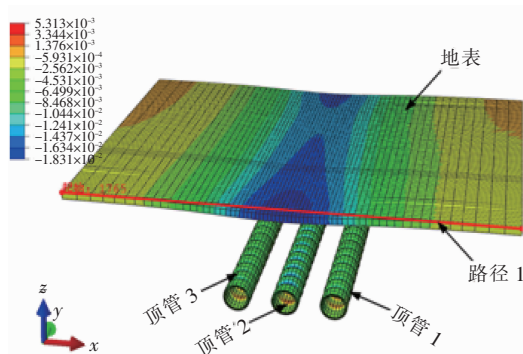


图2 顶进顺序为 1-3-2 时地面沉降云图(放大 50 倍)

Fig. 2 Cloud chart of ground subsidence at jacking sequence of 1-3-2 (magnify 50 times)

图 3 为路径一在不同工况下的沉降演变曲线,当第一根顶管贯通时,最大沉降值为 6.89 mm。当顶进第二根顶管时,顶进顺序不同,产生的沉降相差甚大:当顶进顺序为 1-3 时,产生沉降最大值为 8.64 mm,且沉降槽沿 3 孔顶管中轴线对称分布;而

顶进顺序为 1-2 时,产生沉降最大值达到 13.15 mm,远大于工况 1,且沉降槽偏向于顶管 1 方向。当三根顶管全部贯通时,工况 1、2 所产生的沉降最大值基本相当,分别为 17.56、16.93 mm。

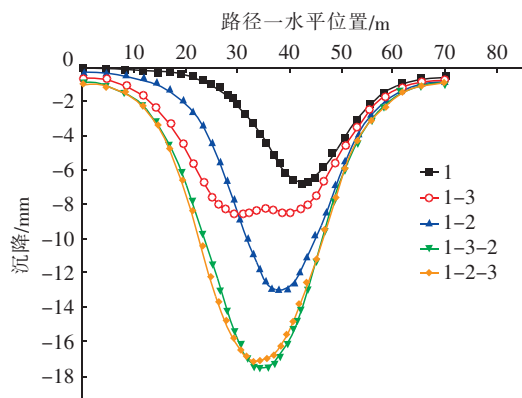


图3 地表沉降演变曲线

Fig. 3 Surface subsidence evolution curve

综合分析,由于本工程三根顶管下穿厂房,施工时特别注重厂房的倾斜值和沉降差变化。顶进第二根顶管时,工况 1 产生的沉降槽沿厂房中轴线对称分布,使其整体倾斜值明显小于工况 2,故施工顺序选择 1-3-2 为最优。同理,四孔顶管经模拟得出最优施工顺序为 1-3-2-4。工程施工共投入 3 台顶管机,其中 2 台 DN3 500 泥水平衡顶管机,1 台 DN4 000 泥水平衡顶管机。分 4 个施工段施工, DN4 000 顶管机施工 1#~2#井, 2#~3#井,施工顺序为 1-3-2-4; 1 台 DN3 500 顶管机施工 6#~7#井,施工顺序为 1-3-2; 1 台 DN3 500 顶管机施工 4#~5#井,施工顺序为 1-3-2。

### 3.2 出土方案设计

开挖后土体经排泥管排出,排出泥水中含砂、黏土、砾石等各种粒径土颗粒,其中黏土可用于配制平衡开挖面土压力的泥浆,因此需对排出的泥水进行处理,一部分循环再利用,另一部分运出场外。

施工现场设有 U 型砖砌泥浆池,泥浆池总容量为 1 050 m<sup>3</sup>。首先将排出泥水中颗粒大的砾石、粗砂分离出来,作为渣土运出;剩下含有黏土成分的部分泥水,经处理达到要求后,用作平衡土压的泥浆回收至开挖面;多余泥水在泥浆池中经自然沉淀,用渣土车外运处置;沉淀出水达标排放。经计算,以日顶进 10 m 工作量计,顶管理论出土量达 227 m<sup>3</sup>/d,泥浆外运间隔天数为 5 d,故每 5 天进行一次泥浆外运。由于顶进距离长,随着顶进距离增加,在 4#~



5#井(顶距490 m)间增设1台增压泵,6#~7#井(顶距640 m)间增设2台增压泵,以提高排泥效率。

### 3.3 泥浆减阻

#### ① 注浆方法

减阻泥浆技术的使用可有效缓解长距离顶进时阻力过大问题。为确保减阻效果,顶进前在管片外壁涂抹3遍改性石蜡;顶进时同步注浆且必须随顶随注,由于前段管道外侧摩擦阻力较大,在工具管尾部环向设置3个压浆孔,以便及时补充减阻泥浆。同时,对于距离工具管较近的三节管片,每节都布设压浆孔,距离较远的管片,每两节管片布设一节带有压浆孔的管片。在中继环处也布设压浆孔。压浆总管选择 $\varnothing 50$  mm镀锌钢管,在远离工具管的管段,应每隔6 m设置一个三通管,用于连接总管和压浆软管,实现注浆。由于6#~7#井顶距长达640 m,注浆距离远,无法一次性到达,在管内安设了两座压浆接力站,距离6#井分别为300、600 m。压浆泵选用脉动小的螺杆泵,可有效保证浆液从土体孔隙中挤进,形成良好的泥浆套。注浆压力控制在0.2~0.3 MPa,由于穿越中粗砂层区,注浆实际用量可达理论用量的4~8倍,因此注浆压力和注浆量需依据现场顶进的土质情况进行调控。

#### ② 泥浆置换

顶管施工完毕后,为减少外界动荷载和后期固结对上方土体的沉降影响,要及时将管壁外侧的减阻泥浆进行置换。采用水:水泥:粉煤灰配比为5:1:3的粉煤灰浆进行置换处理,通过原来的压浆孔进行注浆,重复注浆3次以上,相邻注浆时间间隔应小于1 d。泥浆置换时,以相邻两混凝土管片为一组,分别作为注浆孔和排浆孔管片,首先开启吸浆泵对第一组注浆孔进行注浆,当排浆孔排出泥浆后,停止注浆,即完成第一组管片的置换。同样的工法进行其余各组的置换,直至完成全部置换。最后关闭所有阀门,保持注浆压力1 MPa、持续30 min。

### 3.4 顶管始发出洞控制技术

顶管机从始发井顶入土体的这一过程称之为出洞,顶管出洞时经常会发生始发管节后退、顶管机磕头、洞口产生水土流失坍塌等问题。该工程管道穿越中粗砂地层,土质较差,为保证顶管顺利出洞,主要采取了3种技术措施。

#### 3.4.1 始发管节防止后退措施

该工程1#~3#井段四孔顶管平均覆土厚度达

11.19 m,且穿越粗砂层,顶管顶推面上的主动土压力大于管壁周围的摩擦力,当更换管节时,管片会发生后退问题。为防止该问题发生,施工时对钢筋混凝土管采用手拉葫芦防止管节后退,同时手拉葫芦还可以保证顶管的顶进方向不受刀盘旋转的影响。

#### 3.4.2 顶管机防磕头措施

为了抑制顶管机头出洞时产生下沉,施工中将机头及其后面三节混凝土管片连在一起。具体施工方法:预制混凝土管片时,在管片内埋设钢埋件,安装时将管片内的钢埋件和机头进行焊接,利用后续管节配重,增加稳定性。初始顶进时利用主顶油缸下面2~4个主千斤顶顶进,可产生明显的向上推力,修正顶管机向下的趋势。在洞口延长导轨,保证顶管机在洞内依然有导轨支托。出洞前,做好测量放样及复核工作,保证顶进方向准确。

#### 3.4.3 导轨控制

导轨采用45 kg/m的重型钢轨制作, DN4 000导轨基座采用型钢加工而成。

为确保整个导轨系统在使用过程中不发生位移,将钢横梁置于工作井底板上,并与底板上的预埋件焊接。导轨下部的方形钢管采用Q235型钢,在每个油缸处设置2个卡箍固定油缸,并设置25#槽钢支撑底部油缸,防止产生移动。施工时两导轨应与管道设计坡度(0.04%)保持一致。

### 4 施工中遇到的问题及解决措施

#### 4.1 顶管出洞发生渗漏

在6#~7#井顶管段,地下水埋深为1.90~4.10 m,水位较高且周围地质条件差,多为粗砂层地基土。为保证顶管顺利出洞,施工前在顶管出洞侧的钢筋混凝土防渗墙后又打入两排高压旋喷桩,形成连续的地下防渗墙。顶管顶进过程中,由于钢筋混凝土强度较大,顶管机无法穿透,只能采用人工破洞方式进行施工。6#工作井在破洞过程中,出现地下水外渗现象,渗水中带有砂,为防止渗水将砂层掏空导致地面沉降,在全部开洞之前采取相应处理措施。

发生渗水后,首先紧急对工作井内的渗水进行抽排,然后采用沙袋对人工开凿的洞口进行封堵,基本控制了地下渗水后,在顶管出洞区域以顶管轴线为中心,在半径2 m范围内进行灌浆处理,与地下防渗墙共同形成相对封闭的止水区域。通过该方法既解决了地下水渗漏问题,又解决了混凝土强度大顶管无法穿透问题。采取上述措施后,6#~7#井段顶

管出洞问题顺利解决。

## 4.2 管内渗水

在施工过程中,1#~2#井段已顶进管道的部分区域内部发生了渗漏现象。通过目测法计取管内渗水量,漏水平均1 min滴落6~8滴,根据实际经验判断24 h渗水量为2 L左右,达到了《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)规定的允许渗水量 $[Q=2\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]$ 。管内渗水一方面可能会导致周围地基下沉,增加后续顶管施工难度;另一方面,会导致施工后顶管运行存在安全隐患。对管内渗水原因进行调查,分析如下:①顶管吊装安放时,导致管片吊装孔产生了微小裂缝,在地下高水位地段可能产生渗漏;②顶管顶进时管道轴线产生小偏差,导致管节之间的止水装置密封不严。综合分析后,对后续管节采取以下措施进行处理:首先将吊装孔周围清理平整,在横纵方向分层涂抹水泥基防水涂料,保证吊装孔周围缝隙密实,并在后续管节吊装孔周围增加了加强筋;对于管与管之间的接缝,在木垫圈外部增加了一套密封橡胶装置,并在外侧涂抹水泥基防水材料,保证止水效果。对已经渗水区域,当顶管顶通后及时用粉煤灰浆置换触变泥浆,在泥浆置换过程中渗水问题可得到解决,同时对管道内侧渗水区域再用防水聚合物进行处理。采取上述措施后,管节渗漏问题得到了有效控制。

## 4.3 顶进时遇到障碍的处理措施

施工遇到障碍物时,会使刀盘电流和刀盘转矩发生大的变化,严重时会导致顶管机无法启动。

当顶管遇到巨大孤石时,可以采用人工进入破除、引入静力膨胀爆破、液压分离岩石以及水钻法等施工方式<sup>[3]</sup>,但本工程顶管直径达4 m,且顶管横向间距小,若采用以上破除方法,可能会对周围管线土层产生较大扰动,经分析采用了新建接收井挖除孤石方式。首先通过测量,确定孤石位置;依据测量结果和顶管直径大小,新建接收井。采用边开挖边支护的施工方式,开挖至孤石底部。若孤石直径小于接收井内径(8.2 m),可采用地面吊车将孤石吊出;若孤石直径大于接收井内径(8.2 m),则采用人工配合风镐方式破碎大块孤石,再采用吊车吊出较大孤石,剩余的碎小石块利用料斗吊出。孤石清理完毕后,对接收井进行回填,回填料选择含水率适当的黏土,并在回填料中掺入水泥、石灰等材料,改善回

填料的压实性能,每回填一层,采用人工夯压实,确保每层回填土的压实系数不小于设计值(0.9),保证顶管机通过时达到正常的土仓压力,从而减少施工中产生的地面沉降。此项施工完毕后,按照正常施工方式继续进行顶管顶进。

## 5 结论

海口美兰机场二期扩建场外排水工程采用了多孔小间距顶管施工法,单次顶进距离长,工程地质条件差,施工难度大。通过对下穿建筑物的三孔和四孔小间距顶管模拟分析,得出当顶进顺序分别采用1-3-2和1-3-2-4时,可以有效避免施工过程中建筑物的倾斜变化;对遇到的顶管出洞发生渗水、管内渗漏及顶管遇巨大孤石等问题,采取了有效的处理措施。截至目前,1#~2#井段已顺利顶通两根 $\varnothing 4.0\text{ m}$ 顶管,6#~7#井段 $\varnothing 3.5\text{ m}$ 顶管即将全线贯通,整体施工效果良好。

## 参考文献:

- [1] 廖少明,杨俊龙,奚程磊,等. 盾构近距离穿越施工的工作面土压力研究[J]. 岩土力学,2005,26(11): 1727-1730.  
LIAO Shaoming, YANG Junlong, XI Chenglei, et al. Approach to earth balance pressure of shield tunneling across ultra-near metro tunnel in operation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1727-1730 (in Chinese).
- [2] 吕奇峰,黄明利,韩雪峰. 重叠隧道施工顺序研究[J]. 铁道标准设计,2010(10):102-105.  
LÜ Qifeng, HUANG Mingli, HAN Xuefeng. Discussion on construction order of overlapping tunnels[J]. Railway Standard Design, 2010(10):102-105 (in Chinese).
- [3] 孟宪翠,庞德刚,杨敏,等. 复杂地质条件下污水管道顶管施工技术的选择与应用[J]. 中国给水排水, 2016,32(8):134-138.  
MENG Xianhui, PANG Degang, YANG Min, et al. Selection and application of sewer pipe jacking technology under complicated geological conditions[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(8):134-138 (in Chinese).

作者简介:贾凯(1994-),男,宁夏固原人,硕士,工程师,主要从事市政给排水设计与研究工作。

E-mail:kaijia@tju.edu.cn

收稿日期:2020-04-15

修回日期:2020-05-14

(编辑:衣春敏)