

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.020

超长距离顶管管道上浮控制实施时机的研究

郑平¹, 崔旭辉², 卢海军²

(1. 武汉三镇实业控股股份有限公司, 湖北 武汉 430070; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 为解决超长距离顶管在软弱地层管道上浮控制实施时机的难题,以武汉汤逊湖污水处理厂尾水排江工程两段超长距离顶管施工为对象,利用工程实测分析的方法,对不同控制措施下的管道上浮速率进行研究。结果表明,管道上浮峰值超过220 mm,采取管内动态压载、管顶加固、管内注放泥、启用中继间等处置措施有效,但最高点上浮速率最小值仍有10 mm/d,对顶管正常施工影响较大。基于第一段管道上浮区域控制结果,提出了顶管机出洞后平直顶进100 m,然后下调顶进轴线呈偏移设计轴线-90 mm,当管道上浮峰值达到120 mm开始动态压载的控制实施时机。结合工程监测数据,对优化后的上浮速率进行分析,结果表明,最高点上浮速率由5 mm/d降低至0.8 mm/d,满足施工要求。

关键词: 超长距离; 顶管; 管道上浮控制; 实施时机

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0120-07

Research on the Implementation Timing of Pipe Floating Control for Ultra-long Distance Pipe Jacking

ZHENG Ping¹, CUI Xu-hui², LU Hai-jun²

(1. Wuhan Sanzhen Industry Holding Co. Ltd., Wuhan 430070, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Co. Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: To determine the control timing of pipe floating for ultra-long distance pipe jacking in soft stratum, the floating rates of pipes under different control measures were analyzed through on-site monitoring based on two ultra-long distance pipe jacking sections of tailwater drainage project in Wuhan Tangxun Lake sewage treatment plant. The results show that when the floating peak value of the pipes exceeded 220 mm, the disposal measures such as dynamic ballast inside the pipe, pipe crown reinforcement, slurry injection and release inside the pipe, and intermediate jacking stations activation were effective. However, the minimum floating rate at the highest point was still 10 mm/d, which had a significant impact on the pipe jacking construction. Based on the floating control effect of the first pipe jacking section, a control timing was proposed for the pipe jacking machine is to jack 100 m in a straight line after launching, then adjust the jacking axis is to offset the design axis by -90 mm, and start the dynamic ballast when the pipe floating peak value reaches 120 mm. The optimized floating rate was analyzed based on the monitoring data. The results show that the highest point floating rate decreased from 5 mm/d to 0.8 mm/d, meeting the construction requirements.

Key words: ultra-long distance; pipe jacking; pipeline floating control; implementation timing

目前顶管施工技术在国内给排水管道建设中应用广泛。随着施工需求增加,近几年不断向着直径大型化、顶进距离超长化发展。受顶管施工工艺影响,顶进力自尾部管道传递至顶管机,在淤泥、淤泥质粉质黏土等浅覆土软弱地层,靠近工作井的管道易出现上浮现象;顶进距离越长,总顶力越大,上浮现象越明显,造成管节密封失效,严重影响管道功能质量及施工安全。

关于顶管管道上浮研究主要集中在失稳机理、总体控制措施等方面,而对管道上浮控制的实施时机暂无相关研究。如魏纲等^[1]研究管道失稳的机理,并提出减小顶进力、减小管道偏斜、选用F型管接口、注浆加固改善土质等防止管道失稳的控制措施。李清华^[2]分析了海底管线上浮的主要原因,采取吹填覆土、地基加固、管内配重、调整顶管机掘进方向等控制措施。张立新^[3]认为长距离顶管管道局部隆起失稳的直接原因是顶推力过大,可采取启用中继间、注浆减摩、管内压载、管底开孔高压射流冲刷、管顶注浆等解决方案。成果^[4]就钢顶管中继间上浮后,采取增加覆土、压重、来回活动管道、管底开孔泄压等综合处置措施,并对配重取值进行计算。陈晓晨等^[5]结合工程实例对管道失稳展开分析,并研究了超长距离混凝土顶管在浅覆土状态发生竖向失稳的原因,介绍了采取增加管顶覆土厚度、对管道上方土体加固改良、调整注浆压力、控制顶力、管内配重、管节接口拉杆限位等措施及效果。吴艳辉^[6]针对顶管机偏离设计轴线,提出顶管机顶部注入辅助材料、管底取土和配重、液压油缸垫高调整油缸合力中心等控制措施。

以武汉汤逊湖污水处理厂尾水排江工程两段超长距离顶管施工为对象,研究了第一段管道上浮

峰值达到220 mm后采用的管内动态压载、管顶加固、管内注放泥、启用中继间等处置措施。结果表明,管道上浮后采取的处置措施有效,但措施越多,耗费的人力物力越大,对施工进度、隧道安全管控影响递增;需探究合适的上浮控制实施时机,明确控制的具体范围值,用简便的控制措施将管道上浮速率降到最低。基于第一段管道上浮区域的控制效果,提出了顶管机出洞后平直顶进100 m,然后下调顶进轴线呈偏移设计轴线-90 mm,当管道上浮峰值达到120 mm开始动态压载的控制具体范围值,为超长距离顶管在软弱地层管道上浮控制实施时机判别提供参考。

1 项目简介

1.1 工程概况

汤逊湖污水处理厂尾水排江工程施工线路主要分为陆地段和穿湖段,穿湖段线路总长约3.77 km,分为1#~2#、3#~2#、4#~3#竖井段,采用顶管法施工,顶管机掘进过程中均需下穿汤逊湖;其中3#~2#竖井顶管段隧道全长约1 556.79 m,平面线形为直线,竖直线形为0.22%上坡。4#~3#竖井顶管段隧道全长约1 492.65 m,平面线形为直线,竖直线形为1%上坡。管节预制整环结构,C50混凝土,管节外径4.8 m,壁厚0.4 m,长2.5 m,接头密封采用F型承插连接。

1.2 地质水文条件

3#~2#竖井顶管段,顶管机主要穿越淤泥质粉质黏土,黏土,中、强风化泥质粉砂岩层,具体如图1(a)所示。4#~3#竖井顶管段,顶管机主要穿越黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、砾卵石层,具体如图1(b)所示。

各岩土层主要参数见表1。

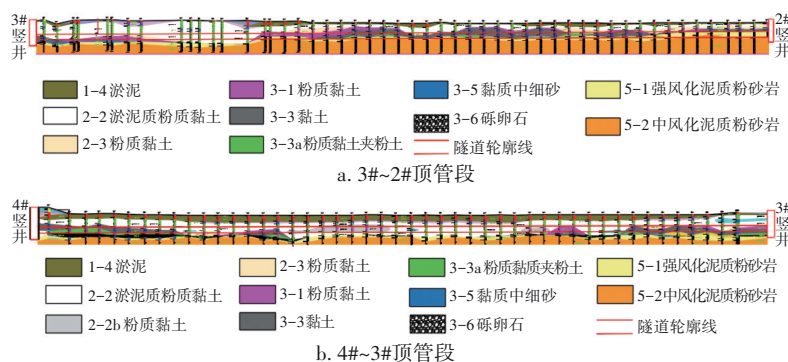


图1 地质断面图

Fig.1 Geological profile

表1 各岩土层主要参数建议值
Tab.1 Recommended values of main parameters of each rock and soil layer

地层类别	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力标准 值/ kPa	内摩擦角标 准值/ $(^\circ)$	压缩模量/ MPa	岩石饱和单轴抗压 强度标准值/ MPa	承载力基本 容许值/ kPa
2-2 淤泥质粉质黏土	17.8	10	5	3.2		60
2-2b 粉质黏土	19.5	23	12	6.0		130
2-3 粉质黏土	19.0	22	12	5.5		120
3-1 粉质黏土	19.1	26	13	7.5		180
3-3 黏土	19.5	40	15	13.0		350
3-3a 粉质黏土夹粉土	19.7	24	12	7.5		180
3-5 黏质中细砂	19.2	2	23			140
3-6 砾卵石	20.0	0	27			300
5-1 强风化泥质粉砂岩	20.5	48	17			450
5-2 中风化泥质粉砂岩	21.6	70	22		3.3	1 500

该工程所在地水文线位于地下 0.6~1.8 m, 孔隙承压水主要赋存于场地 3-5 黏质中细砂层、3-6 砾卵石层, 含水层厚度 0.3~4.8 m, 含水层渗透性随深度递增。

2 管道上浮参数分析

顶管机自 3#竖井出洞, 顶进至 437 m 时, 距离工作井 30 m 处逐渐呈上浮趋势至 120 m 处达到峰值

220 mm, 然后逐渐回落, 于 196 m 处恢复至设计轴线; 观察相邻 5 d 上浮区域相对设计轴线偏离变化, 上浮速率最大值为 35 mm/d。

3#~2#管道上浮区域轴线变化见图 2。由图 2 可以看出, 3#~2#管道上浮区域轴线整体呈持续偏移趋势, 若无控制措施, 上浮最高点折曲角增大, 甚至造成承口钢环变形, 使顶进难以继续。

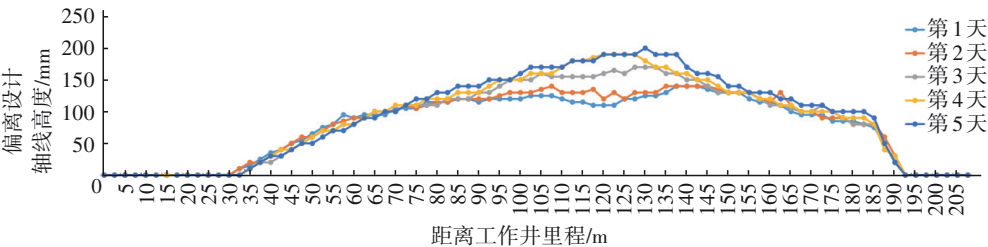


图2 3#~2#管道上浮区域轴线变化

Fig.2 Axis changes in the pipeline floating area of 3#~2#

① 地勘结果显示, 上浮区域管顶均为淤泥质粉质黏土层, 覆土厚度 7.5~9 m, 原地貌为散落鱼塘; 采用静力触探仪对上浮区域进行补勘, 揭露淤泥质粉质黏土状态局部为软流塑状, 与原地勘结果相符。

近工作井约 35 m 的未上浮区段原地貌为陆地, 穿越黏土层的厚度几乎达到管顶, 覆土厚度超过 9 m。

② 初步分析管道上浮原因主要是: 淤泥质粉质黏土层天然状态分布不均, 局部存在流塑状态土层, 施工扰动使粉质黏土发生触变, 混合减摩泥浆汇集于管底, 产生向上的浮力; 顶管机自 3#出洞后平直顶进约 30 m, 逐渐调整至设计轴线呈上坡顶进, 此时顶力的竖向分力作用于管顶土体。在浮

力、顶力的竖向分力共同作用下, 管顶软弱土体发生剪切破坏; 又因管顶覆土厚度有限, 该区域内的土体剪切破坏发生塑性变形后迅速扩展为上方土体的整体剪切破坏, 导致管顶土体丧失了对管道的约束, 逐渐偏离原轴线而上浮。

③ 从抵抗浮力、增强管顶土体抗剪强度、减小竖向分力等几个方面入手, 采用管内动态压载、管顶加固、管内注放泥、启用中继间等处置措施保持轴线稳定。

3 管道上浮处置措施及效果分析

管道上浮控制施工工艺流程如图 3 所示。

在实际施工中, 采取了管网动态压载、管顶加固、管内注放泥、启用中继间等措施, 基本达到预期的控制效果。

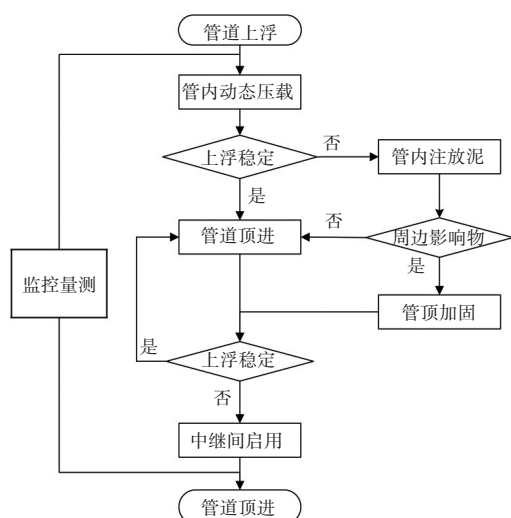


图3 管道上浮控制施工工艺流程

Fig.3 Flow chart of pipeline floating control construction process

3.1 管内动态压载

隧道内铺设轨道,平板车运输配重块至上浮区段进行压载,顶进过程中根据管底高程测量动态移动,使配重块稳定在管道上浮区域。

① 轨道、平板车加工:采用14#槽钢加工成 $0.8\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 轨道段,纵向槽钢内侧焊接圆钢,增大槽钢与圆形管道接触面积,轨道段隧道内纵向连接,接头处螺栓紧固;平板车同样选用14#槽钢加工为 $0.8\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 框架,底部前、中、后焊接3对 $\varnothing 12\text{ cm}$ 平面钢轮,对称布置。

② 压载:计算^[4]上浮峰值120 mm处竖向分力约3.4 t(34 kN),预制 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 混凝土块,单块质量约3.5 t,作为压载配重块,前后预留吊点,便于后期吊装与拖拉。50 t门式起重机用于现场垂直运输,井底管口搭设临时平台,吊放混凝土块至小车摆放平稳,四角焊接止挡防滑;压载区域选择上浮量超过120 mm管道,约85 m,利用1 t小型卷扬机纵向牵引,后期固定卷扬机至洞口,动态移动配重块稳定在上浮区域。为避免上浮区段超压,压载分为两阶段进行;第一阶段每管节压载1个配重块,每日监测管底高程变化,分析管节复位情况;实施后上浮速率无下降,立即进行第二阶段混凝土块顶部加砂袋,增加压载质量,以高度不影响顶管机导向测量为宜。实施后监测管底高程,上浮速率仍有15 mm/d,严重影响顶管正常施工,需进一步采取控制措施。

3.2 管顶加固

3#竖井至上浮最高点的原地貌为散落鱼塘,周边存在1处民房;为减小注放泥对周边环境的影响,对上浮峰值区域进行粉喷桩加固处理,见图4。

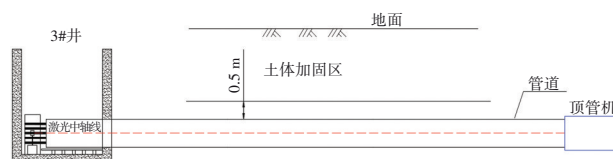


图4 管顶软弱土体加固

Fig.4 Reinforcement of soft soil at the top of the pipe

① 加固范围为管道中心两侧各4 m,纵向沿顶进轴线距工作井94~165.5 m,共71.5 m,深度至管顶以上0.5 m。

② 加固前对鱼塘段处理范围内抽排水并修筑桩机施工平台,采用42.5 MPa普通硅酸盐水泥,水泥掺量50 kg/m,桩径0.5 m,间距1 m,呈梅花形布置。

3.3 管内注放泥

① 上浮趋势形成后,立即预制注放泥管节;管节顶部 60° 范围对称预埋2个、底中心预埋1个内通径DN50孔;顶部2孔加单向阀,底部为通孔;预埋时应将两端的内螺外侧与钢筋骨架焊接固定,中间设置止水圈防止渗漏,见图5(a);进场后统一安装球阀。

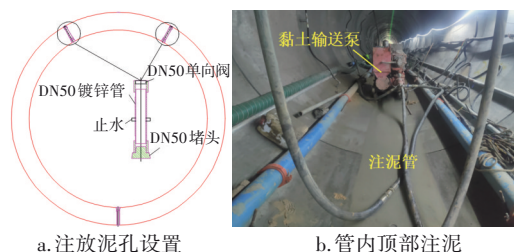


图5 顶部注泥底部放泥

Fig.5 Top slurry injection and bottom mud discharge

② 地面放置2台浓泥搅拌设备,配比采用黄泥:膨润土:高分子=1:0.025:0.000 5(体积比)混合搅拌,门机吊放下井,手推车水平运输;管内布置1台黏土输送泵,通过注放泥管节顶部预留孔注入浓泥,形成浓泥区,增大抗剪强度,见图5(b);注泥压力超过0.4 MPa时,辅助底部放泥,执行先注后放、不注不放,确保注入量和放泥量匹配;底部放泥孔四周应提前准备砂袋,避免球阀失效造成突涌。

③ 施工完成后注放泥孔注入水玻璃+水泥双液浆,孔内空隙部位填充环氧砂浆,拧紧堵头,防止后期渗漏。

④ 通过管顶注泥、管底放泥,上浮区域管道轴线有效回落30~40 mm,但上浮速率最小值仍有10 mm/d,需持续实施管内注放泥措施。

3.4 启用中继间

① 3#~2#、4#~3#顶管段各设置13道中继间,第1道中继间设置在顶管机后方20 m,第2道和第1道间距30 m;后续间隔80~130 m设置一道中继间。

每道中继间安装了25个液压油缸,每个油缸最大推力800 kN,有效行程500 mm,中继间最大推力20 000 kN。

② 3号中继间处于上浮段和顶管机中间位置(见图6),启用后克服迎面阻力与中继间前部管节的摩阻力;中继间顶进时上浮区段承受的中继间顶推反力由一部分中间管道摩阻力分散,竖向分力较小;工作井主顶顶力降低,上浮区段管道竖向分力减弱,以此控制管道上浮区段的上浮速率;同此原理类推启用其他中继间。

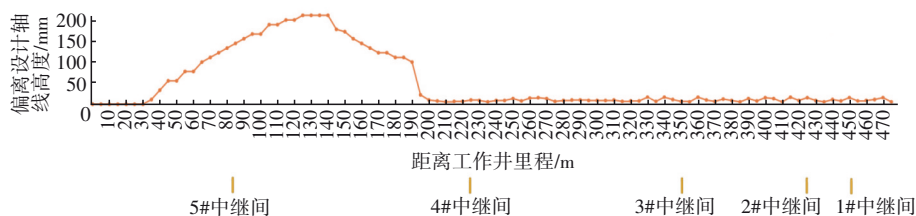


图6 中继间启用位置示意

Fig.6 Schematic diagram of the enabling position of the relay station

③ 启用中继间后,整体顶进速度下降,管壁摩阻力持续增大;管道顶部软弱土体加固完成,注放泥管节顶进至上浮最高点,以管内注放泥措施为主,中继间断断启用,可释放管间压力。

3.5 监控量测

① 测量人员2班/d,利用水准仪和标尺测出管底相对高程,与设计轴线对比,结合顶管机顶进的轴线偏差,得出管道轴线与设计轴线偏差。

② 监测管道上浮区域轴线偏差及复位情况,及时指导管内动态压载;若上浮峰值超过250 mm,则采用注放泥措施稳定轴线。

3.6 实施效果

① 3#~2#竖井顶管段,顶管机顶进至437 m时,管道出现上浮,峰值达到220 mm;随后采用管内动态压载、管顶加固、管内注放泥、启用中继间等处置措施保持轴线稳定。

② 顶部软弱土体加固后,持续对周边1处民房监测,房屋结构稳定无沉降;启用中继间顶进速度下降,管壁摩阻力持续增大,管道顶部软弱土体加固完成,注放泥管节顶进至上浮最高点,以管内注放泥措施为主,中继间断断启用,可释放管间压力。整个上浮处置过程中,最高点上浮速率最小值仍有10 mm/d,需持续采用顶部注泥、底部放泥措施控制管道轴线,直到顶管机进洞接收。

③ 顶管机进洞前50 m,加强管内注放泥措施,使管道上浮区域偏移设计轴线量符合要求。

④ 管道上浮后采取的处置措施有效,但措施越多,耗费的人力物力越大,对施工进度、隧道安全管控影响递增;需探究合适的上浮控制实施时机,明确控制的具体范围值,用简便的控制措施将管道上浮速率降到最低。

4 管道上浮控制时机预测与效果

《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246:2008)规定,管顶覆土层厚度在不稳定土层中、穿越江河水底时宜大于管道外径1.5倍,即7.2 m,本项目覆土厚度满足规范要求。鉴于管顶软弱土体易发生剪切破坏,设计时可优化管顶覆土厚度取值;当管顶覆土为软流塑状,其计算厚度宜折半,折算后的覆土层厚度满足规范要求。在软硬不均地层,工作井宜设计在硬土端,由硬土段往软土段顶进施工。

4#~3#竖井顶管段长距离穿湖施工,通过加固管顶土体增强抗剪强度的措施无法提前实施,且长距离加固费用过高,施工成本压力倍增;工作井及接收井已制作完成,不能大范围调整设计轴线,增加覆土厚度;综合考虑可通过控制微调顶进轴线、管内动态压载、管内注放泥等措施的实施时机,将管道上浮速率降到最低。

4.1 下调顶进轴线实施时机

4#~3#竖井顶管段隧道竖直线形为0.1%上坡,顶管机自4#竖井出洞,平直顶进100 m,此时偏移设计轴线约100 mm;下调顶进轴线呈偏移设计轴线-90 mm,增大调整管道上浮偏离设计轴线的范围;此阶段不宜下调顶进轴线过大,避免软弱土体中顶进顶管机磕头,造成管道轴线向下偏移超限。

4.2 管内动态压载实施时机

3#~2#顶管段上浮峰值达到220 mm,开始动态压载,上浮速率不满足正常施工要求;上浮区域管道的竖向分力与上浮峰值成正比,峰值越小进行动态压载更利于上浮控制,也不可压载过早,以避免管道局部向下失稳;综合考虑本段管内动态压载实施时机设定为管道上浮峰值达到120 mm,即偏移设计轴线+30 mm;过程中需加强监测,若出现过压应及时分散或移出配重块,避免管道向下失稳。

4.3 注放泥管节设置优化

根据上浮影响范围、速率及注放泥效率,注放泥管节隧道内与普通管节间隔10节安装,本体呈A、B型交叉布置,比例为1:4,顶管机后350 m及工

作井至上浮点起始段不设置。

本段注放泥孔管节采用A、B型预制;A型,管节顶部60°范围2个、底中心1个内通径DN50孔;B型,仅管节底中心预埋1个内通径DN50孔;顶部孔加单向阀,底部孔预留5 cm混凝土保护层,便于后期球阀安装和施工后封堵,出厂时统一拧紧堵头。

4.4 实施效果

① 顶管机顶进至585 m时,距离工作井330 m处上浮量达到120 mm,随即采用动态压载措施,压载区域选择上浮量超过100 mm管道,约135 m;此后最高点上浮速率由5 mm/d控制为0.8 mm/d。

② 上浮区域管顶均为淤泥质粉质黏土层,覆土厚度8~10 m,存在3~5 m湖底淤泥;距离工作井约150 m地勘资料揭示地层为黏土;对比分析,工作井前部地层稳定段更有利于管道上浮控制,综合考虑稳定段长度不宜小于100 m。

③ 顶管机距离接收井50 m,管道上浮区域轴线如图7所示。距离工作井208 m处逐渐呈上浮趋势至338 m达到峰值,偏移设计轴线+110 mm,然后逐渐回落,于490 m处恢复至顶进轴线。

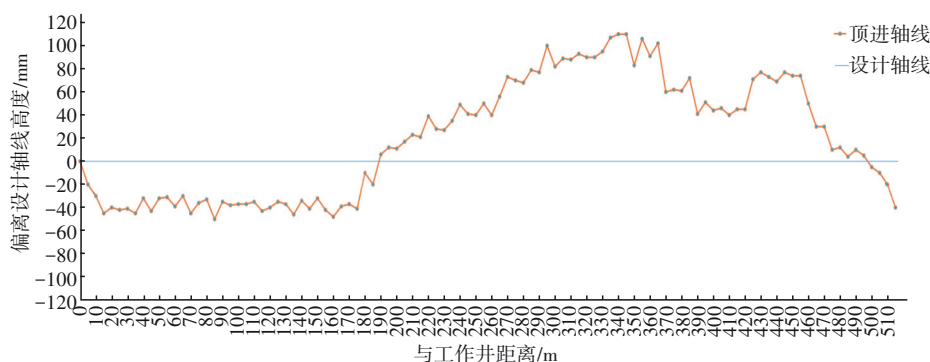


图7 4#~3#管道上浮区域轴线

Fig.7 Axis of pipeline floating area of 4#-3#

5 结论

依托汤逊湖污水处理厂尾水排江工程两段超长距离顶管,利用工程实测分析的方法,对不同控制措施下的管道上浮速率进行研究。提出了顶管机出洞后平直顶进100 m,然后下调顶进轴线呈偏移设计轴线-90 mm,当管道上浮峰值达到120 mm开始动态压载的上浮控制具体范围值。结合工程监测数据,最高点上浮速率由5 mm/d降至0.8 mm/d,满足施工要求,可为超长距离顶管在软弱地层管道上浮控制实施时机判别提供参考。

① 顶管机出洞后,根据纵坡大小,宜平直顶

进50~100 m,然后逐渐下调顶进轴线呈偏移设计轴线-90 mm,增大调整管道上浮偏离设计轴线的范围。

② 管道上浮峰值达到120 mm,开始在上浮量超过100 mm管道段实施动态压载,质量可根据上浮峰值点的竖向分力计算。

③ 注放泥管节隧道内与普通管节间隔10节安装,本体呈A、B型交叉布置,顶管机后350 m及工作井至上浮点起始段不设置。

④ 工作井前部存在地层稳定段,有利于管道上浮控制,超长距离顶管靠近工作井100 m浅覆土

软弱地层宜提前加固。

⑤ 设计时可优化管顶覆土厚度取值,当管顶覆土为软流塑状,其计算厚度宜折半,折算后的覆土层厚度满足规范要求;对于软硬不均地层,工作井宜设计在硬土端,顶进施工由硬土段往软土段进行。

⑥ 此研究为基于超长距离顶管纵坡为正值的管道上浮控制实施时机,纵坡为负值的还需进一步验证。

参考文献:

- [1] 魏纲,徐日庆,黄斌.长距离顶管管道的失稳分析[J].岩土力学与工程学报,2005,24(8):1427-1432.
WEI Gang, XU Riqing, HUANG Bin. Analysis of stability failure for pipeline during long distance pipe jacking [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1427-1432 (in Chinese).
- [2] 李清华.潮汐作用对厦门海底顶管抗浮稳定性的影响分析[J].中国市政工程,2016(2):103-105,122.
LI Qinghua. An influence analysis of tidal effects on the anti-floating stability of subsea pipe-jacking in Xiamen [J]. China Municipal Engineering, 2016(2): 103-105, 122 (in Chinese).
- [3] 张立新.长距离顶管管道局部隆起失稳防治措施[J].建筑科技,2019(2):24-25.
ZHANG Lixin. Partial uplifting instability prevention in

long distance pipe jacking construction [J]. Building Technology, 2019(2): 24-25 (in Chinese).

- [4] 成果.复杂环境下钢管顶管中继间上浮处理方案[J].给水排水,2019,45(11):116-118.
CHENG Guo. Floating treatment scheme for steel pipe-jacking relay room under complex environment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(11): 116-118 (in Chinese).
- [5] 陈晓晨,毛海明,黄金明.超大直径混凝土顶管在浅覆土软土层下的管道失稳分析[J].特种结构,2015,32(1):75-80.
CHEN Xiaochen, MAO Haiming, HUANG Jinming. Analysis of stability failure for large-diameter concrete pipe jacking with shallow cover and soft soil [J]. Special Structures, 2015, 32(1): 75-80 (in Chinese).
- [6] 吴艳辉.长距离顶管施工轴线控制与纠偏技术应用[J].江苏建筑,2020(4):75-76,107.
WU Yanhui. Application of long-distance pipe jacking construction axis control and correction technology [J]. Jiangsu Construction, 2020 (4): 75-76, 107 (in Chinese).

作者简介:郑平(1980-),男,湖北武汉人,学士,高级工程师,主要研究方向为污水、自来水管道路等设施建设施工管理。

E-mail:79876095@qq.com

收稿日期:2023-07-23

修回日期:2023-08-02

(编辑:衣春敏)

完善水利基础设施网络
增强水安全保障能力