

富水砂层大直径长距离顶管施工技术研究

刘 祺¹, 王晓隆², 鹿 瑶¹, 常东辉¹

(1. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212000; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要: 富水砂层条件下大直径长距离顶管施工, 存在顶进摩阻大、姿态不易保持、地层沉降变形不易控制等问题。针对这三项难题, 进行顶管关键技术研究, 提出了注浆减摩、实时监测等多项技术相结合的方法; 并依托哈尔滨阿什河穿河段污水主干线工程, 采用 MIDAS GTS NX 有限元软件, 对顶管动态顶进施工过程进行了三维有限元数值模拟, 并对周边环境的影响进行评估。结果表明: 顶管施工过程中, 施工段最大水平位移量为 2.11 mm, 最大竖向位移量为 3.74 mm, 阿什河受 2 号~3 号顶管段施工引起的最大水平位移量达到 0.73 mm; 最大竖向沉降量达到 2.38 mm; 既有堤坝受 4 号~3 号顶管段施工引起的最大水平位移量为 0.67 mm, 最大竖向沉降量为 1.89 mm。

关键词: 富水砂层; 大直径; 长距离; 顶管施工; 数值模拟

中图分类号: TU922.05

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0225-06

Study on Construction Technology of Large-diameter Long-distance Pipe Jacking in Water-rich Sand Layer

LIU Qi¹, WANG Xiaolong², LU Yao¹, CHANG Donghui¹

(1. The Third Engineering Co., Ltd., the Second Aviation Bureau of China Communications, Zhenjiang 212000, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In the construction of large-diameter long-distance pipe jacking under the condition of water-rich sand layer, there are problems such as large jacking friction, attitude hard to maintain, and stratum settlement deformation not easy to control. Aiming at these three problems, the key technology of pipe jacking is studied, and the method of combining grouting friction reduction, real-time monitoring and other technologies is put forward. Based on the sewage trunk line project crossing the Ashi River in Harbin, the three-dimensional finite element numerical simulation is carried out for the dynamic jacking construction process of the pipe jacking by using MIDAS GTS NX finite element software, and the influence on the surrounding environment is evaluated. The results show that in the process of pipe jacking construction, the maximum horizontal displacement of the construction section is 2.11 mm, the maximum vertical displacement is 3.74 mm, and the maximum horizontal displacement of Ashi River caused by the construction of No. 2 ~ No. 3 pipe jacking section reaches 0.73 mm. The maximum vertical settlement reaches 2.38 mm. The maximum horizontal displacement of the existing dam caused by the construction of the No. 4 ~ No. 3 pipe jacking section is 0.67 mm, and the maximum vertical settlement is 1.89mm.

Keywords: water-rich sand layer; large diameter; long distance; pipe jacking construction; numerical simulation

0 引 言

近年来,随着城市化进程的不断加快,污水收集和处理、路面破损、排水系统不完善等问题日益凸出。大直径地下给排水系统的建设可为城市污水处理、自来水供水提供有效渠道。大直径长距离顶管

技术作为一种地下给排水建设的常用技术之一,其最显著优势在于使用无需开槽施工,具有开挖面稳定性好、管道受力变形小及施工简便可靠等优点^[1]。近年来得到了广泛应用。但是,富水砂层大直径长距离顶管施工技术仍存在众多问题。顶管在穿越湖泊和河流情况下,施工难度系数会增加,给施工带来多重严峻挑战,若不能妥善控制顶进时间、掘进参数和出土量^[2],容易导致掌子面失稳,从而对河底土体造成扰动,甚至会形成贯通的渗流通道^[3-5],造成涌水涌砂、路面坍塌事故^[6]。因此,如何确保大直径顶管施工过程中的安全稳定与快速施工成为行业内最

收稿日期: 2024-03-11

作者简介: 刘祺(1973—),男,学士,工程师,从事地下工程施工管理工作。

通信作者: 王晓隆(1989—),男,硕士,从事道路与桥梁方向研究工作。电子信箱: 718734823@qq.com

为关注的问题^[7-10]。

为此,基于顶管施工流程分析,提出注浆减摩、实时监测等多项技术相结合的顶管施工技术,以满足富水砂层地质、大直径长距离条件下的顶管施工要求。同时,依托哈尔滨阿什河穿河段污水主干线工程,建立顶管施工区间、顶管结构及其周边环境的有限元分析模型,对动态顶进过程进行数值模拟,研究顶管施工对周边环境沉降及其变形的影响,确保在富水砂层条件下大直径长距离顶管的安全、高效施工。

1 工程概况

1.1 工程布置

哈尔滨阿什河穿河段污水主干线工程顶管沿阿什河布置共4座,即1号井~4号井,井深约22.75~34.05 m。其中,2号与4号井为顶管始发井,1号及3号井为顶管接收井,井位布置平面见图1。

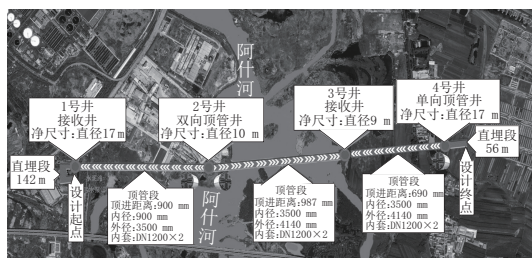


图1 顶管段平面示意图

2号井~1号井竖井顶管段全长900 m,2号井~3号井竖井顶管段全长987 m,4号井~3号井竖井顶管段全长690 m。顶管管节采用预制整环结构,设计有效长度2 500 mm,管节内径3 500 mm,外径4 140 mm,管节衬砌厚度320 mm。

1.2 工程地质条件

顶管段下穿阿什河,顶管轴线距离阿什河底最低处7 m,根据施工勘查报告,主要岩体类别为细砂、粗砂、黏土和深厚淤泥,为典型的富水砂层(见图2)。

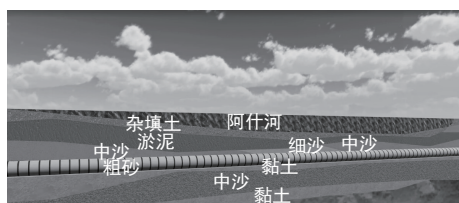


图2 顶管地层纵向分布图

1.3 工程施工难点

根据工程布置及工程地质条件分析可知,该项目顶管顶进区间内多为富水砂层,渗透性高、自稳性

差;管节直径大、衬砌厚度大,总施工长度长达2 577 m。顶管施工过程中易出现三类问题:(1)采用注浆顶管法顶进,管壁的摩擦阻力会随着顶进距离的增加而增加,从而影响顶进的效率;(2)顶管进出洞时,顶管长距离下的姿态不易保持,可能引发涌砂、流土等危险事故;(3)顶管顶进作用效应会对土层造成一定的扰动,引发周边土体变形。

因此,有效降低顶进阻力,保持顶管长距离的姿态一致,减少顶管施工对地表及周边环境的作用,是本工程的重难点。

2 施工技术及关键措施研究

2.1 施工流程

顶管施工工艺流程见图3。顶管施工时,需将止水装置安装在洞口处,待顶管机成功安装并调试完毕于工作井内后,解除封锁门,开始进行掘进作业,管节顶进,根据不同地质、覆土深度和地面沉降情况,控制顶进速度和出土量,调整注浆压力及注浆量,保持土压平衡,减少对土体扰动。施工过程中动态调整顶管机姿态,完成管节顶进后再进行下一管节吊装顶进,依次循环,直至所有管节吊装、顶进施工完成。施工时需安装中继间,共设置16套中继间,每个顶管首个中继间布置在机头后30 m位置,第二个中继间距离第一个中继间100 m,后续间距按照150 m进行布置,为了确保在富含水地层中的安全性,中继间使用了两个橡胶密封圈和两个可调节密封。顶管机进入隧道后,在穿越200、100、50 m的位置处,对地面进行控制网布设,同时在井下设置控制点,对顶管机的姿态进行全面测量复核,确保顶管机安全接收,顶管机进洞,最后进行顶后处理与现场清理。

2.2 关键施工技术

2.2.1 注浆减摩

选择优质的触变泥浆材料对于注浆至关重要,需针对膨润土进行取样测试,主要测试造浆率、失水量和动塑比。采用同步注浆为主、补浆为辅的方式进行压浆,结合机尾同步注浆、沿线壁后补浆和洞口注浆的方法来减少注浆时的摩擦阻力。在进行顶进的过程中应当实时检查各推进段的浆液形成情况。为防止外侧土体堵塞注浆孔而影响注浆效果,在注浆孔中设置单向阀。注浆时控制注浆压力与注浆速度,保证掘进与注浆同时结束。

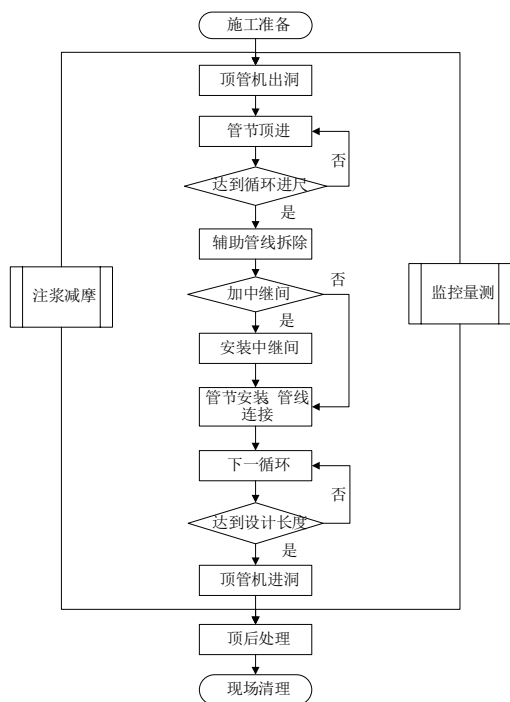


图3 顶管施工工艺流程图

2.2.2 顶管施工止水及防扭转技术

顶管机出洞时需进行止水装置安装,止水装置采用一道橡胶密封+两道盾尾刷密封,盾尾刷安装完成后对盾尾刷进行手涂油脂涂抹。

随后进行设备安装,涉及主顶系统、顶管机设备、止退、防扭转设置等多项安装。安装完毕后,进行设备调试,在顶管机两侧或后续管节两侧焊接三角反力架(见图4),在管节吊装孔的位置处插入圆钢装备,以防止顶管机及前几节管节受到主动土压力向后退。顶管机出洞后正常掘进时,要保证顶管机和部分管节通过连接螺杆装备组成整体,管道外水土压力传递至顶管机,掘进过程中及时对刀盘左右转进行切换,减少刀盘单向旋转时间,达到顶管机防扭转目的。

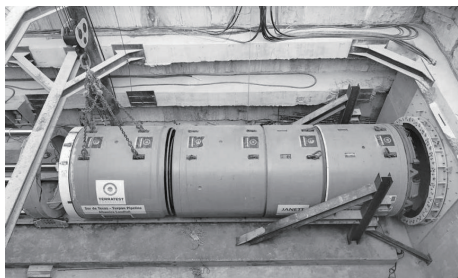


图4 三脚架防止退装置示意图

顶管机进洞后,洞圈和顶管机、管节间的空隙是泥水流失的主要通道。顶管机应该以最快速度切入洞口以免带来不良影响,顶管机进洞口立即通过洞口预留管道注入水泥水玻璃双液浆,填充洞口与管

节之间的间隙,避免渗漏水引起沉降过。针对渗漏水现象,洞口处井内侧采用钢封板+工字钢进行加固支撑,顶管端头的加固效果通过水平钻孔取芯确认端头加固及止水帷幕隔水效果,封门范围内布置5个水平探孔,钻孔深度为3~4 m,钻孔顺序由上向下,分布在洞门边缘位置,确认端头隔水效果。

2.2.3 顶管长距离姿态保持

采用实时监测手段对顶管机掘进姿态调整与纠偏。顶管施工前对地下土质分布情况进行充分了解,使顶力合力线与管道顶进轴线相重合;掘进过程中,采取措施减少刀盘扭矩,消除管道旋转的外力因素。在施工过程中需要测量顶管机的水平轴线、高程以及保持顶管机姿态,遵守严格的放样复核制度,发生偏差应及时纠正,保证顶管机姿态准确,成形管道轴线符合设计要求。顶管机掘进方向控制采用VMT自动导向系统进行顶管轴向量测工作(见图5),全站仪及后视棱镜里程由测距轮实时更新并且得到其坐标,激光实时测得机器方位角,通过TUNIS.MT导向软件计算得到机器姿态。进行始发出洞纠偏时,5~10 m的范围内,偏差容许值为:轴线偏移不超过50 mm,高程偏移不超过30 mm。若顶管机头的方向偏差超过10 mm,则需使用纠偏千斤顶进行校正,缓慢进行,使管节逐渐复位。

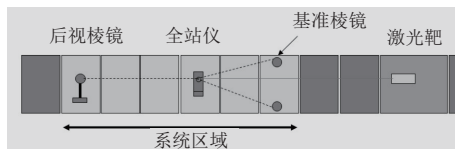


图5 VMT 自动导向系统工作示意图

2.2.4 顶管掘进参数动态调整

加强地面监测,利用监测数据进行反馈分析,以判断目前的施工状况是否科学合理。确保顶管机的土压力设置在主动土压力和被动土压力之间,并需要控制土压力的设定以及土仓内的土压力平衡状态。首先要控制开挖面的土压力与出土量,严格控制土仓内的压力值,保持稳定,将波动幅度控制在尽可能小的范围内,以确保开挖面的稳定。其次是要控制减摩泥浆的注浆压力和注浆量,顶管掘进过程中,在管道周围的环形空隙进行同步注浆和补浆,起到减摩和填补支撑的作用。第三是要控制顶管轴线的纠偏,确保顶管在顶进过程中的轴线定位走向与设计轴线尽可能一致,减少纠偏量,有效控制纠偏对周围土体的扰动。最后,在顶管顶进结束后,要及时进行泥浆置换,自远至近连续注浆,减少土体的固结

变形,进一步降低地面沉降和土体变形。

2.3 关键技术对比分析

在传统的减摩注浆中,通常会使用顶管机自动控制减摩系统,通过上位机和自动球阀控制,可以设定固定的注浆间隔时间和不同的注入模式,从而实现根据设置的参数自动注入变化的泥浆。而本次提出的注浆减摩方法采用了有机尾同步注浆、沿线壁后补浆、洞口注浆三种相结合的方式 进行注浆减摩,并实时对注浆、浆液等情况进行安全监测。

顶管机进出洞时,传统施工工艺是对进出洞口进行土体加固,忽略了顶管机进出洞时可能会发生渗水漏水、管节后退、刀盘扭转等安全事故。因此,对顶管机进出洞全过程进行了止退、防扭转及防渗漏水技术研究,增设了水平探孔及增添止水帷幕两道工序。

顶管长距离姿态不易保持,本次施工技术采用VMT自动导向系统进行顶管轴向量测工作,减少了施工周期,严格控制了纠偏误差;施工过程中对管道轴线进行实时监测,并利用千斤顶的方式进行了顶管纠偏。

顶管施工易引起地层沉降变形,传统施工工艺将注浆减摩与土压力控制相结合减少由于顶管施工引起的地层沉降变形,本次施工技术提出了顶管顶进结束后的技术措施,考虑了顶管施工全过程的地层沉降变形控制问题。

3 地层沉降变形数值模拟分析

3.1 有限元模型构建

3.1.1 基本假定

- 有限元模型遵循如下基本假定:
- (1)场地内的各个地层均质、各向同性,地层厚度取值按最不利情况进行考虑;
 - (2)初始应力场按照自重应力场进行计算,忽略构造应力场的影响;
 - (3)由于顶进施工速度快、施工期短,故分析过程中不考虑地下水水位变化;
 - (4)顶管顶进施工过程中不考虑土体的时间效应,只考虑顶进空间、距离的变化;
 - (5)由于顶管机头和衬砌刚度远大于土体刚度,故实际模拟过程中不建立实际的顶管机机具,而是以力、位移和边界条件等形式来模拟。

3.1.2 本构模型及材料参数

根据项目实际情况,选取顶管掘进过程中的主

要风险源作为分析工况,见表1。利用MIDAS GTS NX有限元软件建立的有限元网格模型见图6、图7。

表 1 计算模型信息表			
序号	名称	周边环境	空间关系
1	2号井~3号井顶管段	下穿阿什河	顶管轴线距离阿什河底最低处7 m
2	4号井~3号井顶管段	下穿堤坝	顶管轴线距堤坝顶约15 m

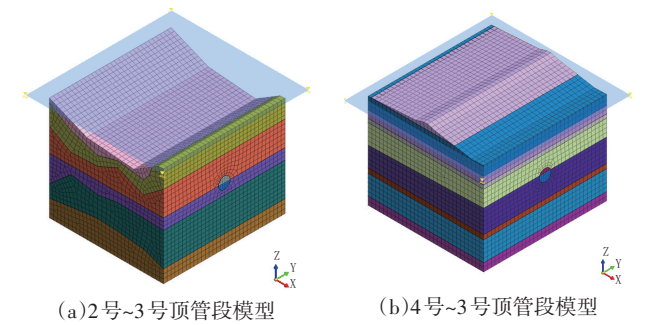


图6 有限元网格模型

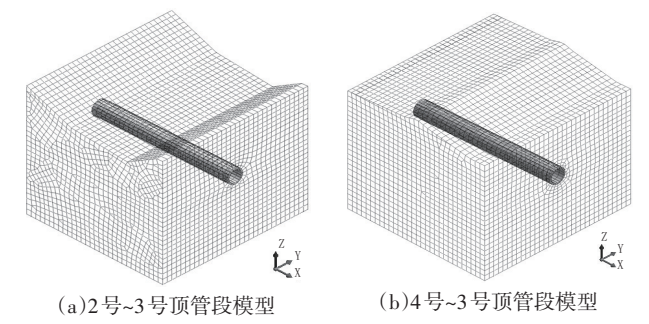


图7 顶进37.5 m时的顶管段模型

土体选择修正-摩尔库伦理想弹塑性本构模型。由于顶管管节刚度大,在顶进过程中不考虑其进入塑性状态,故采用线弹性本构模型。对应模型1、2的岩土体物理力学参数见表2、表3。

表 2 模型1(2号~3号顶管段)岩土体物理力学参数表				
编号	弹性模量/ MPa	容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
1杂填土	6	17.8	10	10
2-2淤泥	3.5	16.2	6.4	5.7
3-1细砂	13	19.2	2	25
5黏土	8.5	18.4	23.6	14.4
6中砂	15	19.2	0	31.7
6-1砾砂	20	19.3	0	31.5

模型中岩土体、堤坝、河道土均采用三维实体单元模拟,顶管管节采用二维板单元模拟。此外,顶管顶进施工过程中,由于顶管机和土体之间其刚度差异大,分析模型中通过添加界面单元来模拟结构与土体的相对滑移。为了更真实反映结构受力特征,二者间的接触面采用Goodman单元,接触面非线性

表 3 模型 2(4 号~3 号顶管段)岩土体物理力学参数表

编号	弹性模量/ MPa	容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1 杂填土	6	17.8	10	10
2 粉质黏土	7.5	18.2	13	17.2
3 中砂	13	19.2	0	31.1
3-3 淤泥质黏土	4.5	16.6	5.6	4.3
4 粗砂	18	19.4	0	31.3
6 中砂	15	19.2	0	31.7
7 黏土	8.5	18.4	23.3	16.4
7-1 中砂	20	19.2	0	32.3
8 全风化泥岩	30	19.2	30	35

行为用库伦摩擦模拟。

Goodman 单元参数输入的关键在于切向和法向模量的定义及界面非线性参数的输入,具体可采用软件内置的界面建模助手定义 R, t_v 值后进行自动换算。其计算关系式如下:

$$K_n = \frac{2(1 - \nu_i)RG_{soil}}{(1 - 2\nu_i)t_v} \tag{1}$$

$$K_t = \frac{RG_{soil}}{t_v} \tag{2}$$

式中: R 为界面强度折减因子,取为 0.7; t_v 为虚拟厚度系数,取为 0.1; G_{soil} 为土体剪切模量。

3.1.3 荷载

- (1)各个土层、顶管管节的重力;
- (2)顶管顶进力,按照节点集中力考虑;
- (3)土仓压力,按照圆形均布荷载考虑;
- (4)顶管机与周边土体的摩擦力,按照均布荷载施加在接触面上。

3.1.4 边界条件

边界条件的施加对象为岩土体。在模型四周施加法向位移约束,在底部施加三向位移约束,顶部为自由面不施加任何的约束。

3.1.5 工况设置

顶管实际施工中是个连续、动态顶进过程,MIDAS GTS NX 在施工阶段的分析采用了累加模型,即每个工况都会引入上一个工况的分析结果,并将本工况的分析结果累加到其中。顶管施工模拟工况见表 4(其中共有顶进工况 15 个,每次顶进 2.5 m,模拟顶进长度 37.5 m/15 环管片)。2 号~3 号段、4 号~3 号段顶管顶进 37.5 m 后的示意图见图 7。

3.2 结果分析

顶管顶进施工必然会引起周围土层应力重分布,会使土层产生位移。以模型坐标系为依据,水平

表 4 施工工况表

编号	工况名称	简述
1	初始应力场计算	本工况是工程分析的初始步,在整个分析模型中只考虑岩土体。岩土体的初始应力场按自重应力场考虑,不考虑构造应力场。
2	初始应力场平衡(位移清零)	初始应力场平衡,并将前述工况引起的变形场进行清零操作。
3	顶管顶进 S1	顶管开始进行第 1 次顶进,累计顶进长度为 2.5 m,施加相应的顶管管节。
4	顶管顶进 S2	顶管开始进行第 2 次顶进,累计顶进长度为 5.0 m,施加相应的顶管管节。
5	顶管顶进 S3	顶管开始进行第 3 次顶进,累计顶进长度为 7.5m,施加相应的顶管管节。
.....		
16	顶管顶进 S14	顶管开始进行第 29 次顶进,累计顶进长度为 35.0 m,施加相应的顶管管节。
17	顶管顶进 S15	顶管开始进行第 30 次顶进,累计顶进长度为 37.5 m,施加相应的顶管管节。顶管施工至接收井,亦即施工完成。

变形以整体坐标系的 Y 方向为主,竖向位移则体现在整体坐标系的 Z 方向上。由此,本节主要分析 2 号~3 号顶管段、4 号~3 号顶管段施工过程中的水平及竖向上由于开挖应力释放而产生的位移,以及对周边环境的变形影响。

3.2.1 模型 1 计算结果分析

由图 8(a)、图 8(b)可知,顶管施工引起的顶管结构水平位移位置随着开挖向前推移、延伸,2 号~3 号顶管段施工全过程中,最大水平位移量达到 2.00 mm;最大竖向沉降量达到 3.76 mm。

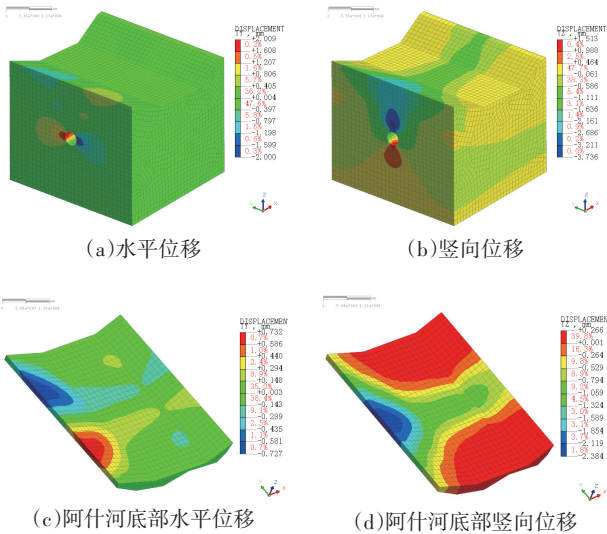


图 8 顶进 37.5m 后 2 号~3 号顶管段模型位移

由图 8(c)、图 8(d)及图 9 可知,当 2 号~3 号顶管段施工全过程中,阿什河河底土体(表层)最大水平

位移量达到0.67 mm;最大竖向沉降量达到2.46 mm。可见,2号~3号顶管施工过程引起的阿什河河底土体(表层)水平、竖向位移量较小。

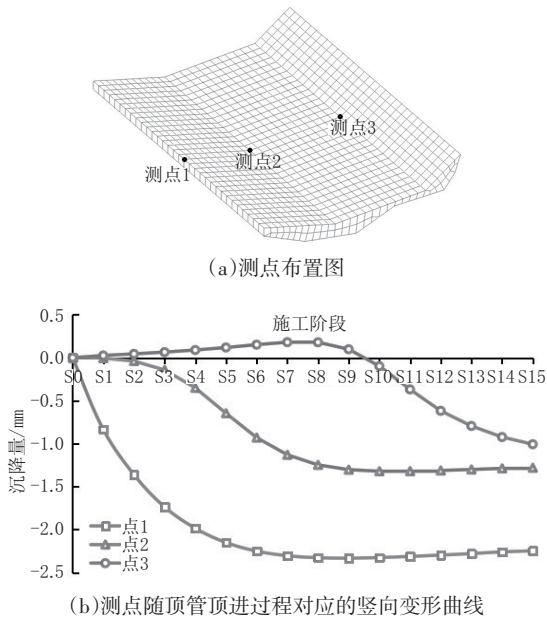


图9 顶进37.5m后2号~3号顶管段模型竖向变形曲线

3.2.2 模型2计算结果分析

由图10(a)、图10(b)可知,顶管施工引起的顶管结构水平位移位置随着开挖向前推移、延伸。4号~3号顶管段施工全过程中,最大水平位移量达到2.11 mm;最大竖向沉降量达到3.72 mm。由图10(c)、图10(d)及图11可知,既有堤坝的水平、竖向位移均随着顶管顶进施工不断变化,顶管施工过程中,引起的既有堤坝最大水平位移为0.67 mm,最大竖向沉降为1.93 mm。可见,4号~3号顶管施工过程引起的既有堤坝水平、竖向位移量较小。

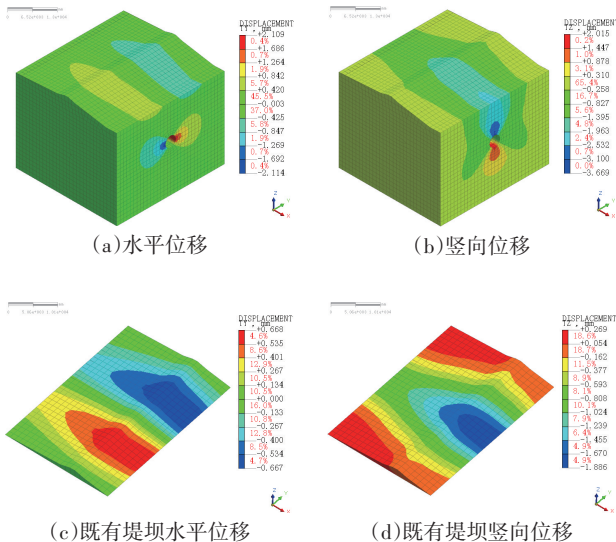
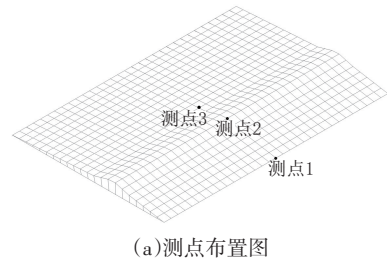


图10 顶进37.5m后4号~3号顶管段模型位移



(a)测点布置图

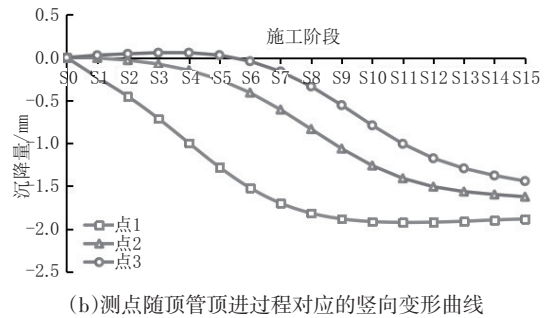


图11 顶进37.5m后4号~3号顶管段模型竖向变形曲线

4 结 语

(1)对比传统施工技术,本文针对注浆减摩问题,提出了调配最佳触变泥浆配比技术;针对顶管进出洞长距离姿态保持问题,提出了采用VMT自动导向系统等多项技术进行方向与轴线纠偏处理;针对顶进过程中出现的地层变形等问题,提出了土压力值控制、注浆减摩压力与注浆量控制、顶管顶后泥浆置换等地层沉降变形控制措施。有效规避了富水砂层条件下大直径长距离顶管施工中可能存在的问题。

(2)通过建立穿河与穿坝两个顶管顶进有限元计算模型分析,发现顶管施工过程中,顶管周边土体水平和土体竖向位移不断向前发展,顶管施工引起的最大水平位移量为2.11 mm,最大竖向位移量为3.74 mm。阿什河、既有堤坝均随着顶管施工而有一定的变形,最大水平位移量达到0.73 mm,最大竖向沉降量达到2.38 mm,均发生在穿河段,表明顶管顶进对周边环境的变形影响可控,拟定的施工方案、掘进参数基本合理。

参考文献:

- [1] 李洪运.城市复杂环境超大直径钢顶管施工技术[J].施工技术,2017,46(11):86-89,108.
- [2] 谢尚兵.富水砂层长距离大直径顶管减阻施工技术[J].工业技术创新,2016,3(5):969-972.
- [3] 戴志仁,任建,王俊,等.砂卵石地层矿山法隧道近距离穿越既有线关键技术研究[J].北京交通大学学报,2019,43(4):1-8.

(下转第235页)