

# 复杂地质条件下矩形顶管下穿管线影响分析

姜乃仁, 黄煜森

(中交一航局第三工程有限公司)

**摘要:**为解决复杂地质条件下矩形顶管下穿管线可能带来的管线下沉变形破坏、地表沉陷严重等现象,采用加密地质勘测、探地雷达的方法探明下穿区域地层及管线,并运用数值模拟的方法对顶进全过程地表沉降、地下管线变形情况进行分析,并根据建模分析结果,严格控制施工过程,及时采取多项措施,顺利实现贯通。通过理论与实践得出,管线在设计时应充分考虑后期施工的影响,选取合适的管线材质和尺寸,提高管线的抗压承载能力,同时工程实施前应充分考虑顶进施工过程、地质条件对矩形顶管下穿管线的影响,采取相应的支护和加固措施,确保矩形顶管施工的安全性、稳定性。

**关键词:**复杂地质条件;矩形顶管;下穿管线;地表沉陷;数值模拟

## 0 引言

随着城市化进程的加快,现有的地下管线将不能满足使用,亟需敷设各项功能的新管线。在既有复杂的地下管线网络下新建管线并不容易,地下矩形顶管作为一种重要的构筑物,被广泛应用于各类地下工程中,尤其是在城市地下空间受限的情况。然而,复杂的地质条件给矩形顶管下穿管线带来了挑战和风险,如地质构造异常、地下水位变化等因素会增加工程施工难度和安全风险。因此,有必要对复杂地质条件下矩形顶管下穿管线施工工艺进行深入研究,为相关工程提供一定的参考建议。

## 1 工程概况

高新二路综合管廊工程位于武汉市区中心繁华地段,三标段综合管廊需下穿城市主干道,横断面尺寸为  $7.7\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ,埋深  $4.9\text{ m}$ 。施工区域下方  $30\text{ m}$  处存在一条已运行的盾构通道,上跨燃气管,下穿 DN1200 给水管等多条管线,且地质条件较复杂,安全管控、技术难度很大。

## 2 施工工艺对比

### 2.1 明挖工艺

明挖法施工具有施工工艺简单、快捷、经济、安全等优点,通道的路线随机变化性大,较为适用于复杂路线的通道施工,但在城市各种通(隧)道建设过程中,往往受到管线迁移、交通疏导、环境保护和文明施工要求的制约,明挖法施工也受到越来越多的限制。

### 2.2 暗挖工艺

暗挖法施工对地面建筑、道路和地下管线影响小,施工占地少,扰民、城市环境污染危害小,但暗挖法施工难度大,工期较长,机械化程度不高,造价较高,而且防水效果不好。盾构法作为大截面的通道建设常用的施工方法,其施工技术先进、施工距离长、对周边环境的影响较小,适用于长距离的地下通道的建造,但盾构法施工使用设备多,始发及前期施工占用场地大,不适用于短距离的通道。

### 2.3 顶管工艺

相较于传统的明挖法和暗挖法,顶管法施工效率高、空间利用率高、施工安全风险较低,对周边环境的影响较小,适用于一次性顶进长度不大的通道施工,可采用大直径圆形顶管或大断面矩形顶管,但圆形顶管的断面利用率远不如矩形顶管,因此矩形顶管在城市通道建设中越来越受欢迎。

## 3 顶管施工工艺选择

由于顶管工艺的安全性、先进性及质量优越性,在城市通道施工中发挥越来越重要的作用。顶管可以是圆形断面或矩形断面。矩形顶管是从圆形顶管的基础上发展起来的,它们之间有许多相同点,包括平衡的方式、千斤顶顶进、方向控制的方法等,但矩形顶管有更高的断面利用率,而且可以做得更大。圆形顶管与矩形顶管对比如表 1 所示。

表 1 圆形顶管与矩形顶管对比分析表

项目	断面面积	地面沉降	扭转	中继接力	可顶进长度	地质适应性	占地面积
圆形顶管	目前最大的直径为 4 m	断面小, 超挖的空隙面积自然小, 上部土沉降量也小, 沉降影响小	允许	较容易实现	由于使用中继接力, 长度可达 1 000 m	岩土层均可顶进	一般较小, 但用于大断面时需要较大断面
矩形顶管	断面宽度超过 6 m, 达到 10 m	断面大, 超挖的空隙面积大, 上部土体沉降影响就大一些	不允许	难于实现	长度一般在 100~200 m	一般用于土层顶进, 采取措施也可用于岩层	一般

结合项目实际情况, 对矩形顶管和圆形顶管进行实质性分析后更倾向于采用矩形顶管, 分析内容如下:

矩形顶管的优点包括: 1) 断面与明挖段保持一致, 方便管线入廊敷设; 2) 施工顶进仅需一次施工, 施工周期短。武汉市内已成功实施多处矩形断面管廊顶管, 具有较好的工程基础。缺点主要为造价偏贵。

圆形顶管的优点包括: 1) 造价较低, 价格较透明; 2) 圆形断面施工案例较为丰富。缺点包括: 1) 断面尺寸大, 需采用 3 个圆形断面方可满足本项目入廊断面的需求; 2) 3 个圆形断面难以与明挖双舱管廊直接连通, 需增加舱室转换井, 增加后期管线敷设难度。

为保障施工区域上方的主干道正常通行, 同时还要按期完成建设任务, 多次开展工法研究并邀请专家论证, 经过明挖、暗挖、圆形顶管、矩形顶管等多种施工方案比选, 综合考虑了技术经济、安全环保、工期要求、业主入廊需求等因素, 最终决定采用矩形顶管工法进行施工。

4 矩形顶管下穿管线的影响

4.1 土体扰动分析

土体扰动是指在通道开挖施工过程中, 各种因素的影响而导致地层发生变化。在掘进机前方, 土体被刀盘顶推或切削产生位移, 会发生地层损失, 进而导致土体的沉降或隆起<sup>[1]</sup>。施工过程中, 顶管的姿态调整和管周间隙、管节侧摩阻力的影响也会对地层造成损失, 特别是在管尾处, 如果间隙较大, 不利于减阻泥浆封堵, 容易导致较大的地层损失。在通道开挖过程中, 顶管的姿态调整纠偏, 通常是为了确保顶管的准确施工和排水顺利, 但这种调整也会对地层造成一定的扰动。同时, 管周间隙和管节侧摩阻力的影响也不可忽视, 可能会增加地层的变化和损失。隆起区地层变形主要是由注浆压力和施加在土体上的顶推力引起的。在安装管节时, 施加在土体上的顶推力会加剧地层的变化, 导致地面出现隆起现象, 而管节与土体间的摩擦力也是造成地层沉降的主要

原因之一, 因为摩擦力会使土体受到较大的压力, 进而发生沉降现象。

4.2 地下管线变形分析

地下管线在顶管开挖前通常处于动静平衡状态, 上方的土体对管线施加一个向下的压力, 这种压力与管线下方土体的承载力相等。然而, 当顶管施工开始时, 下方的土体将会逐渐被挖掘出来, 这就导致了下部土体的减少, 并且这部分土体不再对管线施加支撑的力量, 而上方的土体所产生的压力却依然存在, 原本稳定的状态被破坏。而且, 因为上方的土体持续对管线施加向下的压力, 而下方的土体卸载变少了, 管线就会受到上方向下的挤压力, 这种挤压力会导致管线发生变形, 从而出现弯曲、收缩等。

5 数值仿真模型

本工程实施前采用加密地质勘测、探地雷达的方法探明下穿区域地层及管线的具体情况, 了解到下方盾构通道位置深度为 30 m, 施工总长度 120 m, 且上跨油管燃气管, 下穿 DN1200 给水管等多条管线; 掘进过程中遇到的胶结砾岩石平均厚度大于 2.2 m, 整体表现为连续性强、密度高、强度高、硬度大。

考虑盾构施工引起的边界效应, 数据模型构建的水平方向尺寸取盾构隧道位置深度的 3~5 倍, 取 100 m; 竖向取 1~2 倍, 一般为 30~60 m, 三维有限元模型如图 1 所示, 假设模型尺寸为 100 m×50 m×30 m<sup>[2]</sup>。

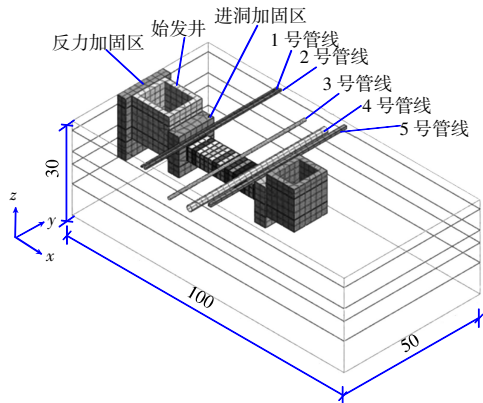


图 1 三维有限元模型图(m)

在顶管施工的模拟中,可以设置顶管底部固定在地基上,模拟地基的支撑作用。此外,还应将模型划分为网格,以便进行有限元分析,确保网格密度足够细致,能够准确反映结构的变形和应力情况,并根据实际情况施加荷载,模拟顶管下穿、盾构施工等过程中的外部加载情况,考虑模型的稳定性和安全性。

## 6 数值模拟结果分析

### 6.1 地表沉降分析

地表位移通常会受到施工过程、方法和支护结构的影响,而分析通道沿纵轴方向不同位置的地表沉降情况,可以了解地表位移的分布规律,根据实际情况绘制顶进地表沉降图如图 2 所示。

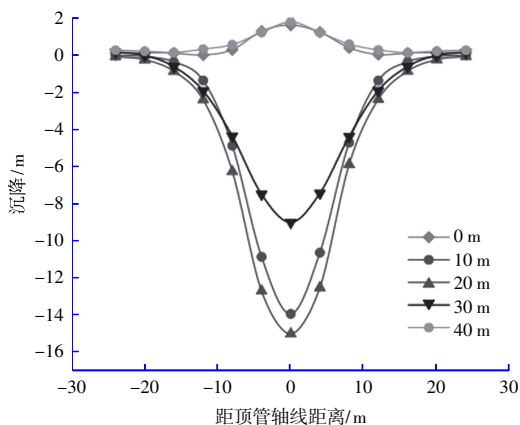


图 2 通道施作完成后各断面地表沉降图

如图 2 所示,以距离始发井 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m 处断面通道为例,在通道中部以地表沉降为主,呈现出明显的“V”字形分布,表明通道中轴线正上方的地表沉降最为显著,而向两侧逐渐减小,说明了通道施工对地下土层的扰动效应,明显影响到地表的沉降情况。地表沉降呈现出“V”字形分布的特点,主要是由通道施工过程中的开挖、支护和回填等工序决定的,在通道开挖的过程中,地下土层受到破坏和改变,使得地表附近的土层产生应力分布的变化,从而引起地表沉降。同时,通道的支护结构和施工方法也会对接地表沉降产生影响,合理的支护设计和施工方法可以减小地表沉降的幅度,保证周围建筑物和地下管线的安全。

### 6.2 地下管线变形分析

地下管线的变形一般发生在开凿穿墙洞口连续墙检验止水桩的止水效果、顶管顶进的线路上。通常情况下,在地表沉降分析后,地下管线的变

形容易被忽视,而地下管线变形产生的危害往往会造成不可逆的结果,因此在验证沉降满足设计及规范要求后,继续对管线的变形进行分析。如图 3、图 4 所示,在考虑土体沉降变形对管线影响时,需注意不同管线间的距离、受力状态以及地下结构的复杂性。在此工程中,3 号管线与顶管垂直距离仅有 1 m,影响最大,沉降量达 0.54 mm。水平方向上,通道中部土体沉降造成两侧土体受力状态改变,呈向中间移动趋势,导致管线水平位移,其中 1 号管线中间部位水平位移最大,达 0.70 mm。

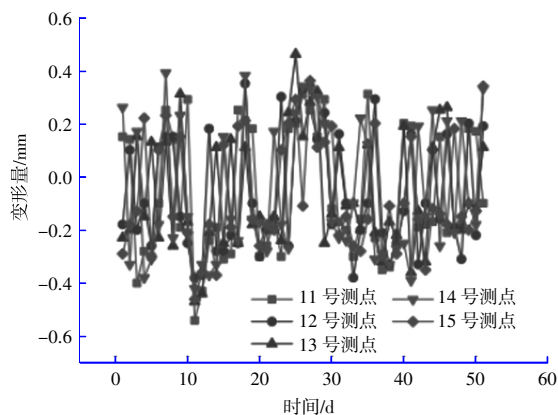


图 3 3号管线沉降变形监测数据图

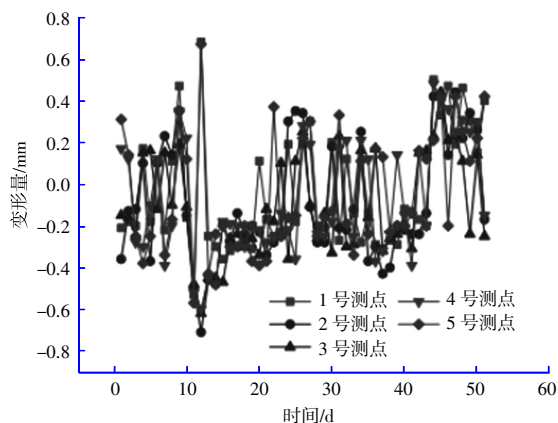


图 4 1号管线水平变形监测数据图

以上数据表明,该工程中地下管线受土体变形影响显著,地下管线受到的水平和垂直变形会引起管线内部应力变化,进而可能导致管线破裂或漏水。通道下穿完成后,管线整体水平位移呈现以下趋势:轴线左侧管线向右移动,右侧管线向左移动,在通道轴线区域,管线发生挤压变形,导致管线水平位移现象明显。接收井的临空开挖面和施加在始发井的顶推力对地表造成显著影响,

导致地表产生隆起现象, 这一过程进一步加剧了1号管线和3号管线的水平位移, 引起管线变形的加剧。

7 现场监测数据分析

矩形顶管施工过程中, 经过一段时间的数据监测后可知, 1号管线和3号管线的变形规律非常相近, 尤其在前10 d内变形波动范围较小, 大部分在-0.4~0.2 mm之间; 然而, 第11 d左右的变形出现了较大的波动, 此时实测数据显示, 1号管线分布在顶管轴线上方的沉降达到3.9 mm, 距离顶管轴线10 m范围内的沉降达到3.1 mm; 3号管线分布在顶管轴线上方的沉降达到3 mm, 距离顶管轴线10 m范围内的沉降达到2.5 mm, 如图5、图6所示。

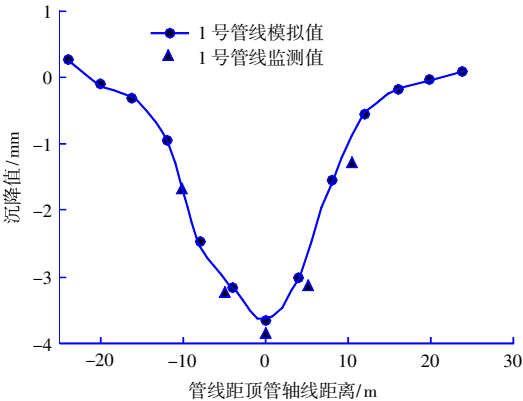


图5 1号管线监测数据、模拟数据对比

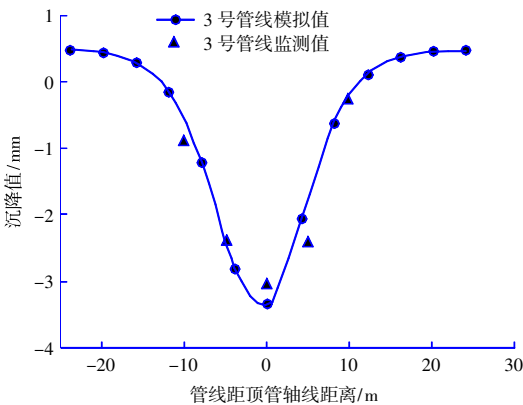


图6 3号管线监测数据、模拟数据对比

当既有管线位于顶管轴线中部区域时受到的变形影响最为显著, 从而产生较大的路表沉降。因此, 在工程设计和施工中应充分考虑土体沉降对地下管线的影响, 并采取相应措施保障管线的安全运行<sup>[3]</sup>。通过对比检测断面监测数据和数值模

拟数据, 可以验证数值模拟的准确性和可靠性; 通过比较模拟数据与实际监测数据之间的差异, 评估数值模拟的精度, 并对其进行修正, 以更好地模拟管线变形的规律和趋势, 为管线的结构设计和维护提供重要参考。

8 关键技术及控制措施

8.1 地表沉降风险控制措施

为了有效控制地表沉降风险, 首先需要对地质条件进行全面的分析和评估, 通过地质勘察报告、加密钻探等手段获取相关数据, 以评估地表沉降的潜在风险。然后根据具体的地质条件和地下管线情况, 设计出合理的施工方案, 再选择合适的掘进机械和工艺, 确定合理的施工参数, 确保施工过程中对地下管线和地层造成的影响最小。在洞门及顶进时, 选择合适的加固方式, 比如在软弱地层采用加固措施, 避免顶管发生变形或坍塌。常见的加固方法包括注浆灌浆、锚杆加固、钢筋混凝土加固等, 在复杂地质条件下, 可能需要结合多种加固方法, 以确保顶管的稳定性和整体强度。在施工过程中建立完善的监测系统, 对地表沉降实时监测, 采用自动测量设备, 对地表沉降持续监测, 并及时记录数据并分析, 为后续的施工提供数据支持。此外, 在施工过程中根据地下管线和地质条件合理控制施工速度, 避免过快推进导致地表沉降加剧, 根据监测数据及时调整施工速度, 如发现地表沉降超过预警值, 立即停止施工并采取应急措施。

8.2 地下管线变形控制措施

在复杂地质条件下, 矩形顶管下穿管线可能会产生多种影响, 包括但不限于地层沉降、管线损坏、地表沉降等。因此, 在设计阶段要充分评估地质条件, 确保了解地层情况, 包括土层性质、地下水情况等, 以便采取相应措施, 并采用加固地基、填充加固等措施减少地层沉降对管线的影响。在施工过程中密切监测地下水位变化、地层变形等, 及时调整施工方案, 确保安全穿越地下管线。同时, 选取合适的管线材质和尺寸, 提高管线的抗压承载能力, 并设置管线保护层, 减少外部作用对管线的影响, 对管线进行密集监测, 及时发现异常并采取措施修复或加固。此外, 还应做好现场勘测工作, 评估地表情况, 确保管线穿越位置的地表稳定, 采取加固地表、设置支撑措施等方法, 减少地表沉降或破裂的风险, 并对



周边建筑物和设施实时监测,确保管线和地质环境的安全稳定。同时探明地下管线的使用情况,发现损坏及时修复,待修复完成后方可实施。

## 9 应用效果

本工程面临地表用地紧张、地下管线复杂、地下结构复杂、工期紧张、管线入廊需求量大等多重不利因素,在设计阶段甄别各工艺优缺点后选择矩形顶管施工工艺。工程策划阶段,通过加密探测地勘点位,探明地下土层及管线分布,并着重强调数值模拟的意义,在施工前判别出管线沉降、支护结构、主顶推力、顶进施工速度、纠偏速率等关键影响因素;施工过程中分别采取了管线预注浆加固、洞门土体加固,严格控制顶推力、施工速度、纠偏角度等措施保证了管线变形值、地表沉降值均在规范的允许值内,成功实现了矩形顶管的顺利贯通。

## 10 结语

矩形顶管下穿管线施工通常用于复杂地质条件,如软土、岩石或高地下水位的情况,为避免破坏地面交通和地下管线,需要在施工前进行工程效果分析,以确保施工的顺利进行和管线的安

全通畅。采用数值模拟的方法预先进行矩形顶管对土体、管线及二者叠合的施工工况模拟,判别出施工存在的风险,在实施过程中,对顶管的下沉情况、管线的受力情况等实时监测和控制,及时发现问题并采取有效解决措施,以确保施工效果和顶进过程中管线的安全。

此外,在数值模拟阶段,接收井和始发井地表出现与掘进过程中地表沉降表征不同的隆起现象,这一现象表明了顶管施工过程中顶推力的作用机制和地下土体的响应机制,在施加的顶推力作用下,土体不仅在顶管所在位置发生了变形,同时在接收井和始发井位置也发生了隆起变形,其中的机制仍需深入分析以完善矩形顶管下穿管线的影响,从而对国内矩形顶管的设计、安全实施提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 南钰.黏性土地层矩形顶管施工对上覆既有道路及管线影响分析[D].合肥:安徽建筑大学,2023.
- [2] 郑知斌,李名淦,闫朝涛,等.北京首条矩形顶管风险防控设计与沉降分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1281-1290.
- [3] 胡文.软土地区大断面矩形顶管浅覆土下穿高速变形控制分析研究[J].城市道桥与防洪,2021(4):108-114,17.