

盾构隧道施工对排水箱涵结构稳定性相互作用影响

——以雷锋西站到金洲大道站区间隧道为例

王 栓, 李东磊, 李 聪, 郑晓飞

(中交一公局集团有限公司, 北京 100020)

摘要: 随着城市基础设施的快速发展, 盾构法作为现代轨道交通重要的施工方式, 不可避免会对周边建构筑物产生相应的影响。以 flac3d 数值模拟技术为工具, 模拟盾构隧道在下穿排水箱涵时的完整施工过程, 重点分析了盾构施工中隧道形变的发展规律, 探讨了隧道施工过程对排水箱涵结构变形产生的具体影响。结果显示, 在盾构施工过程中排水箱涵结构变形稳定性控制在安全范围内, 为今后类似工程提供了理论依据和参考数据。

关键词: 盾构隧道; 数值模拟; 排水箱涵稳定性

中图分类号: U449.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)08-0051-09

在快速的城市化进程中, 地下空间的综合运用愈发成为城市发展中重要的部分。伴随着复杂地质条件和紧凑的城市布局, 盾构隧道施工已经成为现代轨道交通建设的首选方式^[1]。然而, 伴随着城市复杂的空间布局, 盾构施工过程中不可避免的会对周边地下工程结构产生影响。因此, 需要分析盾构隧道施工过程中对周围环境的影响。

近年来盾构隧道施工与周边地下工程的交叠影响已经成为一个重要的研究方向, 吸引许多学者的关注。刘勇等^[2]探讨盾构施工下穿既有隧道对结构和地层变形的影响规律, 通过模拟试验发现随着既有隧道底部地层距盾构隧道拱顶距离的增大, 地层沉降减小, 并且盾尾脱出阶段发生的地层沉降占比大于 80%, 表明注浆控制对减小地层扰动具有重要影响。刘维正等^[3]通过数值模拟研究长沙地铁 6 号线盾构下穿京广铁路客货运框架桥的影响, 分析不同注浆压力、土仓压力及地层加固情况下框架桥和轨道的变形受力特性。李明睿等^[4]研究盾构隧道施工近距离下穿桩基时对桩基位移的影响, 通过数值模拟探讨开挖速度、土仓压力、注浆压力等施工参数对桩基位移的影响。李京承和余航飞^[5]使用 ABAQUS 研究盾构隧道下穿既有隧道施工对结构和地表的影响, 得到合理的支护力和注浆压力对减

少地表沉降和保护既有线路至关重要的结论。郭文华等^[6]使用正交试验来优化大直径盾构下穿高铁桥梁的加固措施, 通过现场实测数据与数值计算结果对比, 提供合理土层加固设计的参考, 确保高铁列车正常运营时的桥墩变形控制要求。邱明明等^[7]讨论城市轨道交通工程中盾构法施工对周围土体产生移动与变形的问题, 特别是双线平行隧道盾构施工的相互扰动作用, 通过数值模拟和现场实测相结合的方法, 研究双线平行隧道盾构施工引起的地层变形演变规律, 并提出预测模型。施成华等^[8]利用随机场理论和蒙特卡罗模拟策略, 提出一种隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法, 研究地层刚度变异系数和水平波动距离对既有盾构隧道纵向变形的影响规律。苏永华和李明^[9]讨论考虑界面脱空和土体屈服的情况下盾构下穿管线响应计算问题, 提出一种基于无拉力 Winkler 地基和管线地基承载力理论的计算方法, 对预测盾构隧道开挖过程中管线的变形和安全性具有重要意义。冯国辉等^[10]提出一种用于预测盾构下穿施工引起的既有隧道变形响应的解析方法, 考虑既有隧道的轴向内力对变形计算的影响, 研究发现既有隧道的位移和内力随着地层损失率的增大而线性增大, 表明地层损失率是既有隧道

收稿日期: 2024-08-06

作者简介: 王栓(1984—), 男, 河北保定人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地铁及铁路建设施工; 李东磊(1991—), 男, 山东潍坊人, 工程师, 研究方向为城市地下空间工程施工; 李聪(1996—), 男, 陕西渭南人, 工程师, 研究方向为土木工程; 郑晓飞(1987—), 男, 河北邢台人, 高级工程师, 研究方向为地铁及铁路建设施工。

受力变形的敏感参数。曹洋等^[11]讨论滨海软土地层中浅埋盾构施工对地层稳定性的影响,基于有限差分平台建立了精细化数值模型。通过模拟盾构动态开挖过程,分析刀盘摩擦力、开挖面支护力、盾尾注浆压力和盾壳摩擦力等施工因素对地层扰动的影响,并结合现场监测数据总结各施工因素在扰动变形中的作用效果。Lei等^[12]研究多线盾构隧道短距离穿越现有桥梁桩基的控制技术,建立理论计算方法,通过引入额外地面损失比率来预测多线隧道邻近施工时桩基的变形。Zhou等^[13]提出一种考虑浆液固结和盾构隧道下穿及垂直平行开挖时对现有隧道变形的计算方法,使用等效层方法简化复合地层,分析不同因素引起的变形,并引入浆液固结方程进行修正,建立有限元模型分析现有隧道的变形。

地下工程结构中对于承载重要排水功能的箱涵结构,对施工过程中的稳定性分析同样值得深入研究。本文通过数值模拟手段,探究盾构施工过程中箱涵结构反映的变形稳定性变化,关注排水箱涵关键位置的变形规律,揭示盾构施工与周围土体及箱涵结构的相互作用机制,从而保障地下施工安全性,降低工程风险,为未来更加复杂的地下工程提供理论指导。

1 工程概述

研究范围涵盖从雷锋西站到金洲大道站之间的区间隧道,该隧道从金洲大道站出发,顺着汇智路往南延伸,在穿越雷锋河下方之后,最终接入位于长川路与汇智路交会处的雷锋西站。盾构隧道设计为双线单孔结构,使用圆形预制钢筋混凝土管片作为衬砌材料。区间总平面如图 1 所示。隧道的内径为 5 400 mm,外径则是 6 000 mm,并且采用了标准的通用环管片,其厚度为 300 mm。区间隧道在左 DⅢK7+270.000 和右 DⅢK7+289.000 附近下穿了望雷大道的排水箱涵。在下穿过程中,区间隧道的埋深大约为 13.1 m,而与排水箱涵底部的最小垂直净距为 7.8 m,排水箱涵主要为矩形钢筋混凝土结构,其断面尺寸为 5.5 m×2.0 m,埋深约为 3 m,路面雨水通过雨水口流入箱涵,最终汇入雷锋河。

为了确保隧道的安全,在下穿望雷大道排水箱涵的区段,采取地面斜向袖阀管注浆加固措施,并在隧道上方设置一排直径为 108 mm 的长管棚进行隔离保护,加固措施的范围从车站端头向大里程方向延伸 65 m,隧道外轮廓两侧各 1 m,拱顶 0.8 m。

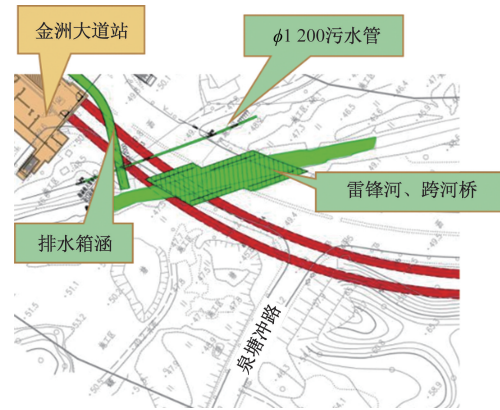


图 1 区间总平面

2 模拟计算

2.1 基本假定

为了使分析结果更贴合实际工程建设情况,基于以下假设进行了设定:假设隧道沿线、地表及各土层的微小起伏忽略不计,简化为均匀的水平层状分布,保持地质条件的一致性;岩体被视作理想的弹塑性材料,在其达到强度屈服点后,假设其强度和体积在塑性流动过程中保持不变,忽略应变硬化的影响,即材料在塑性变形过程中强度不会随着应变的增加而增加;假设在地质体及其与地层界面处不会产生应力集中现象,避免因局部应力集中而导致的不稳定性分析,使得研究更加关注整体的地质稳定性和隧道的安全性;岩体假设为各向同性的均质材料,并且塑性流动不会影响岩体的各向同性;为了研究掘进对岩体的扰动效应,适当调整了扰动区域的弹性模量,使得分析结果更接近实际工程情况。

2.2 参数设定

数值模拟计算中相关结构的具体几何参数为实际的设计值,地层物理力学参数参考地质勘察资料和室内直剪试验^[14]。计算中岩土地层采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,管片衬砌结构与排水箱涵采用线弹性本构模型,具体计算参数如表 1 所示。

表 1 数值计算参数选取

材料	层高/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/ MPa	泊松比	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)
素填土	5	1 800	30	0.35	10	14
粉质黏土	4	1 800	50	0.35	10	20
卵石层	4	2 200	70	0.3	10	10
强风化板岩	7	2 000	100	0.2	15	30
中风化板岩	16	2 100	200	0.3	40	35
加固土体	6	2 400	200	0.3	100	35
管片衬砌	—	2 500	35 000	—	—	—
排水箱涵	—	2 500	35 000	—	—	—

2.3 模型构建

使用有限元差分数值分析软件 FLAC3D 建立双线盾构隧道下穿排水箱涵的数值仿真模拟,建立的数值模拟模型包括排水箱涵和相对应的隧道开挖区间。双线盾构隧道下穿排水箱涵计算模型如图 2 所示。其中 y 轴方向为盾构隧道的掘进方向, x 轴为垂直盾构隧道掘进方向, z 轴正向为竖直向上,模型尺寸为 $70\text{ m}\times 36\text{ m}\times 36\text{ m}$ 。

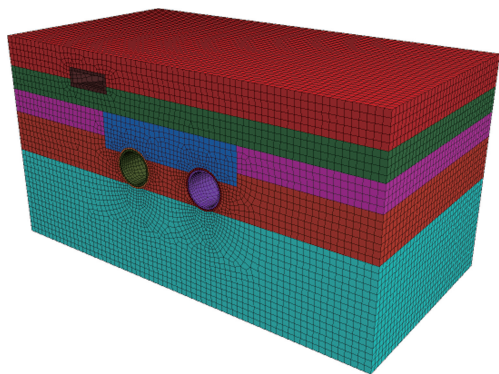


图 2 双线盾构隧道下穿排水箱涵计算模型

2.4 数值模拟过程

按照实际工况和计算参数在犀牛软件中建立网格模型,将其导入 FLAC3D 数值计算软件。将模型的四周和底部的边界条件设置为法向约束,地表为自由边界条件,并在自重的条件下求解至平衡。按照施工方案,首先开挖左线隧道,随后开挖右线隧道至贯通,移除相应时步需开挖的单元,从而生成新的开挖面支撑应力和管片单元。在计算过程中启动动力学计算通过迭代计算达到平衡,重复这些步骤直至隧道贯通。

2.5 监测点设置

为研究盾构隧道施工对周边排水箱涵结构稳定性相互作用影响,根据现场的实际施工情况,分别在排水箱涵四周及隧道拱顶拱底进行监测点布置^[15]。模型监测点布置示意如图 3 所示。每间隔 9 m 设置一个监测截面,共设置 5 个截面,各截面排水箱涵监测点与双线隧道位置关系如图 4 所示。排水箱涵每个截面布置 8 个监测点,左右线隧道每个截面在拱顶和拱底设置监测点,监测点记录在隧道开挖过程中的变形情况。

3 结果分析

3.1 隧道拱顶沉降与拱底隆起分析

盾构隧道在施工过程中,拱顶沉降与拱底隆起的监测对于评估工程安全性、稳定性及对周边环境的潜在影响有着很重要的作用。它们不仅反映了

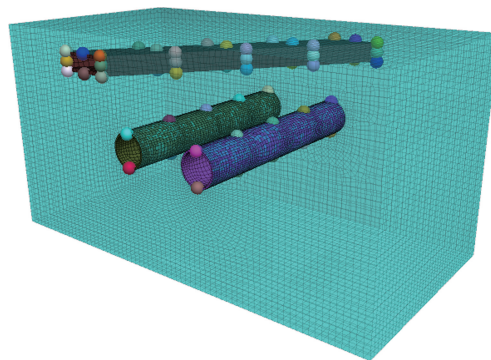


图 3 模型监测点布置示意图

土体稳定性的动态变化,并且揭示土体对施工活动响应的敏感性。在盾构隧道掘进阶段,由于刀盘对土体的切削作用、安装管片的荷载施加,对周围土体产生剧烈的扰动作用,进而导致拱顶区域的沉降和拱底区域的隆起,这种土体的被动响应揭示出其承载能力随盾构施工的变化过程。

随着盾构机的持续推进,局部地应力路径的改变导致拱底土体变形,反映应力重分布的现象。连续施工过程中,土体的扰动与应力的再平衡共同作用,使得拱顶沉降与拱底隆起现象愈加显著,先前挖掘的区域内土体的应力状态会逐步稳定,而盾构机的继续推进则会在前方产生新的应力变化和土体移动。这些周期性的工作步骤和土体应力变化造就监测数据中拱顶沉降的阶梯式变化。隧道拱顶沉降与拱底隆起变化如图 5 所示。

在右线隧道施工过程中,同样遵循左线的演变规律,具有相似的沉降和隆起动态变化趋势。但是右线隧道在掘进中受到左线隧道先前开挖的复杂影响,具体表现为右线拱顶沉降数值较左线有所增加。

3.2 排水箱涵变形分析

排水箱涵 1 号、3 号、5 号、7 号监测点位于排水箱涵的角点位置。因为对于矩形结构而言,角点是应力集中的关键区域。通过对排水箱涵角点的监测为及时捕捉到结构潜在异常提供了可能,对早期结构风险的预警具有重要意义。

对于排水箱涵各监测截面,角点监测数据显示,1 号与 3 号监测点的竖向变形趋势呈现出一致性,而 5 号与 7 号监测点亦然。具体来看,截面 1 处在左线隧道左上方,其自左线盾构隧道掘进完成后,1-1 与 1-3 监测点的累计垂直变形值约为 1 mm ;与此同时,1-5 与 1-7 监测点的累计变形值约为 3 mm 。值得指出的是,在右线隧道掘进期间,1-1

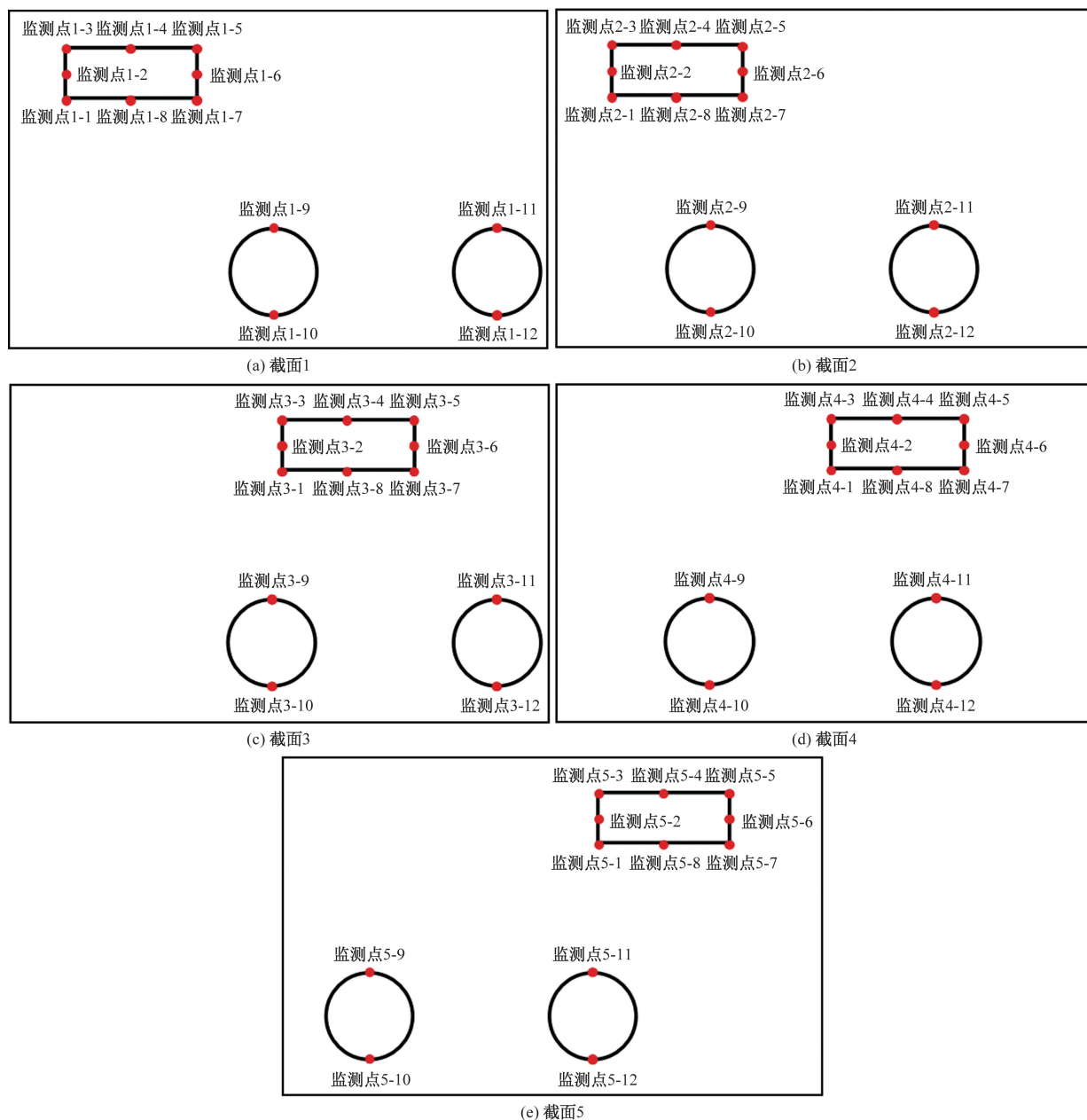


图 4 各截面排水箱涵监测点与双线隧道位置关系

与 1-3 监测点的变形有所恢复,而 1-5 与 1-7 监测点则维持在较为稳定的状态。

截面 2 位于左线隧道正上方,在左线盾构掘进期间,2-1 与 2-3 监测点呈现 2.5 mm 的最大变形值;而随后,在右线隧道掘进期间,这些监测点保持相对平稳。2-5 与 2-7 监测点则在左线盾构阶段的累积变形量达到 3 mm,并在右线掘进完成后呈现最终的 5 mm 累积变形量。

截面 3 与截面 4 的排水箱涵均受盾构隧道掘进的交替影响。在这两个截面中,3-1 与 3-3 监测点在左线掘进期间累积到 2.5 mm 和 2.7 mm 的

变形量。右线隧道盾构过后,累积变形值分别增至 4.5 mm 和 4.6 mm。4 号截面相应监测点的数值也显示出类似的变形过程:最终累积变形量达到 5 mm。

截面 5 处于排水箱涵出口,并紧邻右线隧道右上方,因而主要受其影响。在左线隧道盾构阶段,5-1 与 5-3 监测点的变形较小,累积变形均约为 1 mm。然而,值得关注的是,在右线隧道盾构完成后,这两监测点的变形值上升至 5 mm,突显方位对变形影响的重要性。同样,5-5 与 5-7 监测点遵循相似的变形趋势,并记录了 3 mm 的最终累积变形值。

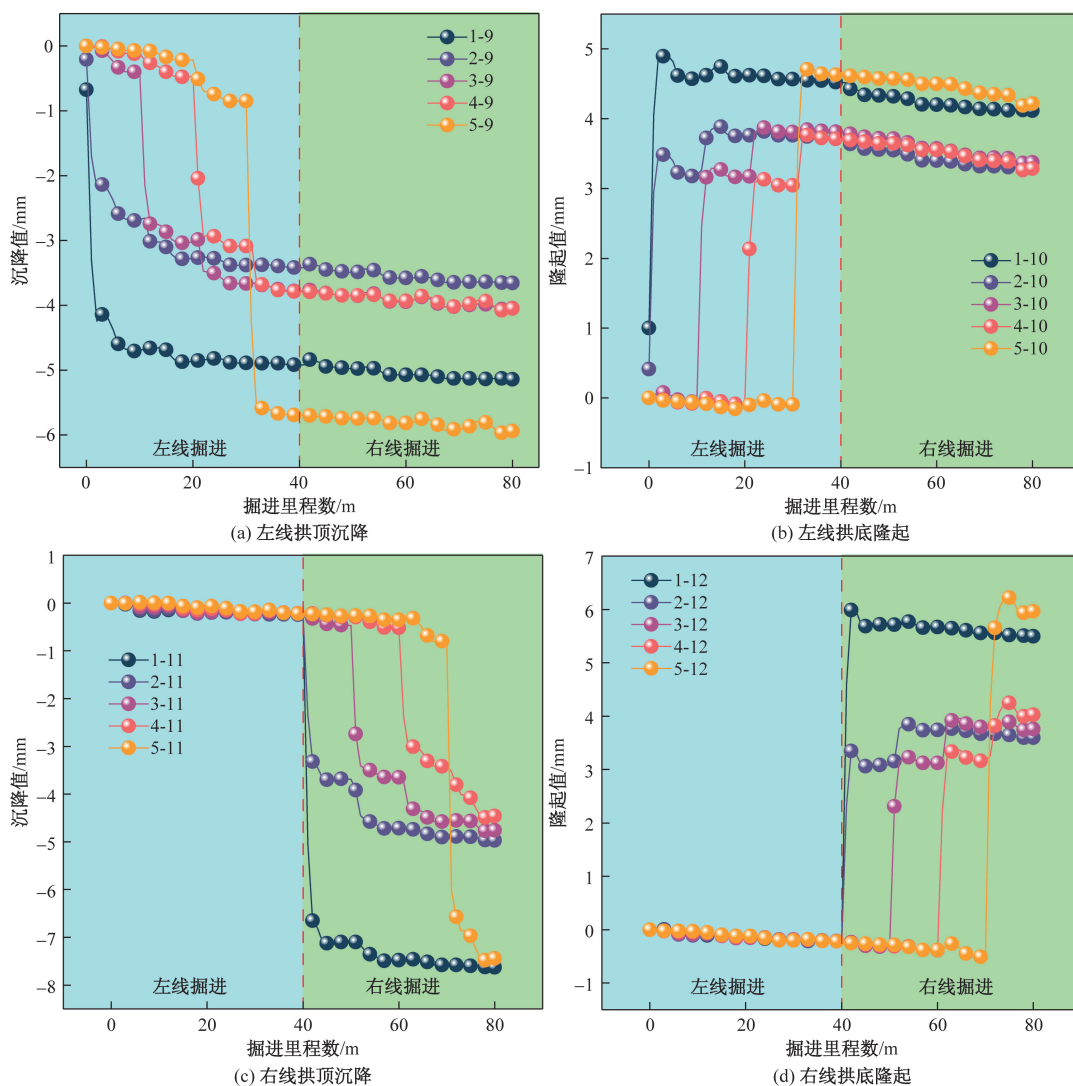


图5 隧道拱顶沉降与拱底隆起变化

如图6所示模拟监测数据,在盾构施工过程中,隧道上方不同位置的排水箱涵发生不同程度的竖向变形。这种不均匀变形可能会导致结构开裂或其他损伤,严重时甚至会导致局部结构失效。在右线隧道掘进后,监测点变形值增大,说明在该施工阶段结构风险增高,需要在施工环节中进行重点关注。

排水箱涵角点水平变形如图7所示,角点处水平变形值总体上来说变化不大,变形值均在1 mm以内。值得注意的是,尽管各监测点的变形幅度较小,但监测数据依然提供了盾构机掘进方向对土体变形趋势。左线掘进时各角点监测点的水平变形向左侧倾斜,而右线掘进时则表现为向右侧倾斜的趋势,这种规律性的变化揭示了隧道施工过程中,土体受力分布的非对称性。右线盾构的掘进对排水箱涵整体的水平变形趋势产生了较大的影响,造

成从左至右的水平形变转变。最终排水箱涵结构随着盾构隧道施工呈现出先向左再向右倾斜的复合移动模式,并在工程结束时整体结构相对于初始位置出现了向右的倾斜。

排水箱涵2号、4号、6号、8号监测点布置于排水箱涵的四个边中点位置,它们可以更准确地反映箱涵整体的平均变化情况和整体结构的变形趋势。排水箱涵边中点变形如图8所示。中点位置对预期发生的土体整体响应更为敏感,进而有利于监测排水箱涵是否存在整体性的弯曲或扭曲现象,这对评估箱涵整体结构的稳定性具有重要价值。

2号和6号监测点分别位于排水箱涵两侧,在盾构隧道掘进过程中呈现统一的变化模式。在左线盾构施工阶段,这些监测点在竖直方向上呈现下沉的趋势,当右线盾构启动后,监测点的变形方向

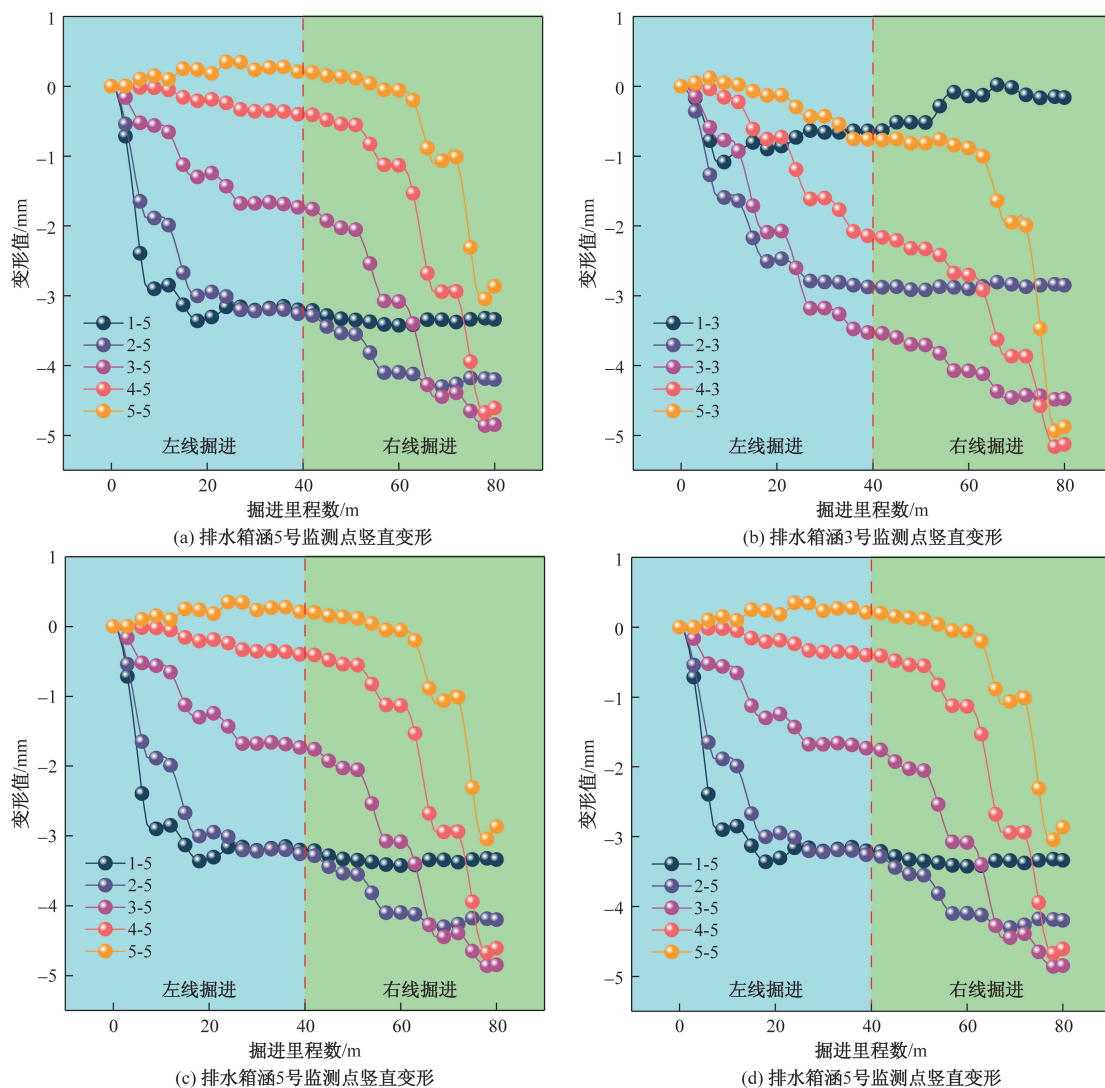


图 6 排水箱涵角点竖直变形

发生改变,转而向上移动并持续发展。在监测过程中,各截面 2 号监测点最大下沉值约为 0.5 mm,而最大上升值约为 3.6 mm,6 号点的最大下沉值略低,为 0.2 mm,最大上升值则为 5.6 mm。这种规律性的变形响应揭示盾构施工对周围土体影响的复杂性。

在 4 号监测点的监测数据中,这些位于排水箱涵上方的监测点在所有截面上均显示向下的变形趋势,特别是在靠近箱涵出口的区域,由于盾构施工引起的震动和土体失稳作用更加显著,此处的变形更为严重。由于排水箱涵自身的结构特点,箱涵上方土体在出口区域承受了较为集中的应力,从而导致更加显著的下沉现象,最大下沉值达到 11.5 mm。

对于位于箱涵底部的 8 号监测点而言,随着盾

构施工的有序进行,监测点出现沉降变化,且这些变化受到左右线盾构施工的交替影响十分显著,最大的下沉值为 4 mm。综合监测数据表明,施工对排水箱涵的影响具有不可忽视的空间异质性和工序间的动态变化性。

通过详尽的数据分析和对土体力学性质的综合考量,本文揭示盾构隧道下穿排水箱涵施工对箱涵结构稳定性的影响规律,为类似工程提供宝贵的参考依据。

4 结论

本文以金洲大道站至雷锋西站区间盾构隧道穿越排水箱涵为实例,运用 FLAC3D 有限元软件构建精细的双线盾构隧道三维模型,有效模拟施工过程中及其对周边环境的影响,对城市轨道交通建设和地下空间利用中的结构稳定性问题具有重要的实

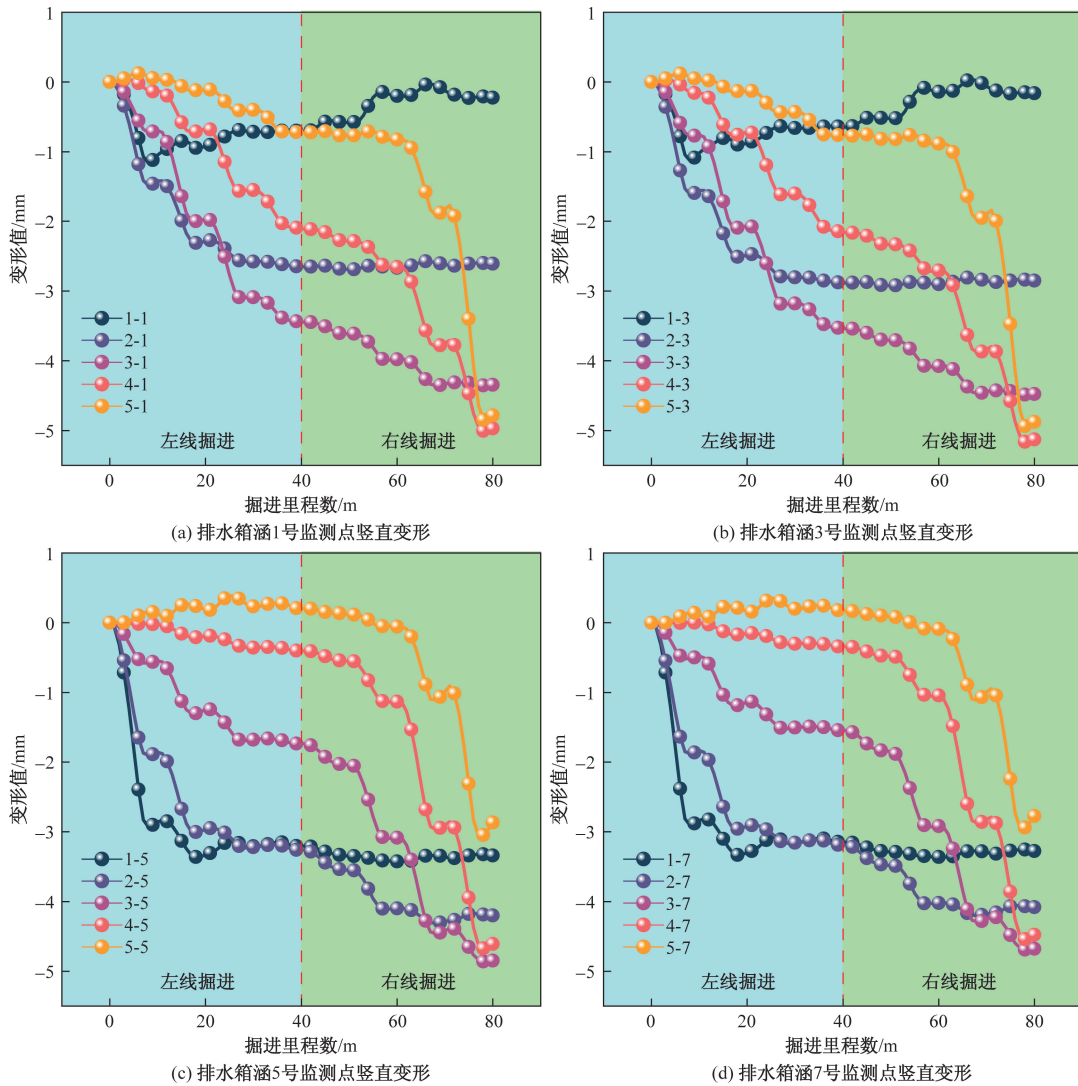


图7 排水箱涵角点水平变形

际指导意义。为了更好地监测施工对排水箱涵结构的影响,提出针对排水箱涵结构稳定性的监测点布置方案,在隧道拱顶、拱底及排水箱涵四周设置监测点。这种监测方法能够更全面地捕捉施工过程中的结构变化,为后续的数据分析提供有力支持。数值分析结果分析模拟盾构施工中各监测点的规律变化,尤其是对排水结构变形的具体影响,对于类似工程的安全评估与风险管理提供重要参考,并得到以下结论。

(1)通过分析隧道拱顶拱底处的监测数据可得,在盾构施工期间,这些关键部位的变形量相对较小,监测到的变形均在预设的安全范围内,排水箱涵结构不会对盾构施工产生较大影响。

(2)排水箱涵角点作为结构受力的敏感区域,通过对其监测发现,角点水平变形量维持在安全限

值内,竖直方向上在不同的盾构施工阶段会产生不均匀形变,受到右线掘进施工的影响大于左线,需要在施工环节中加强监测。

(3)排水箱涵边中点位置的监测数据显示,越接近排水箱涵出口位置,盾构施工对排水箱涵的扰动作用越大,尤其是排水箱涵上方区域,出现较大的沉降,但总体上箱涵结构在盾构施工过程中保持了相应的稳定性。

综上所述,盾构施工对排水箱涵的稳定性影响是可控的,通过对关键监测点的数据分析得出,在适当的预防措施和监测下,施工并不会对排水箱涵的稳定性造成不利影响。然而,需要注意的是,具体影响程度可能随土壤条件、施工参数和现场条件的不同而有所区别。对此,建议在施工前后对排水箱涵进行全面的监测以确保其安全。

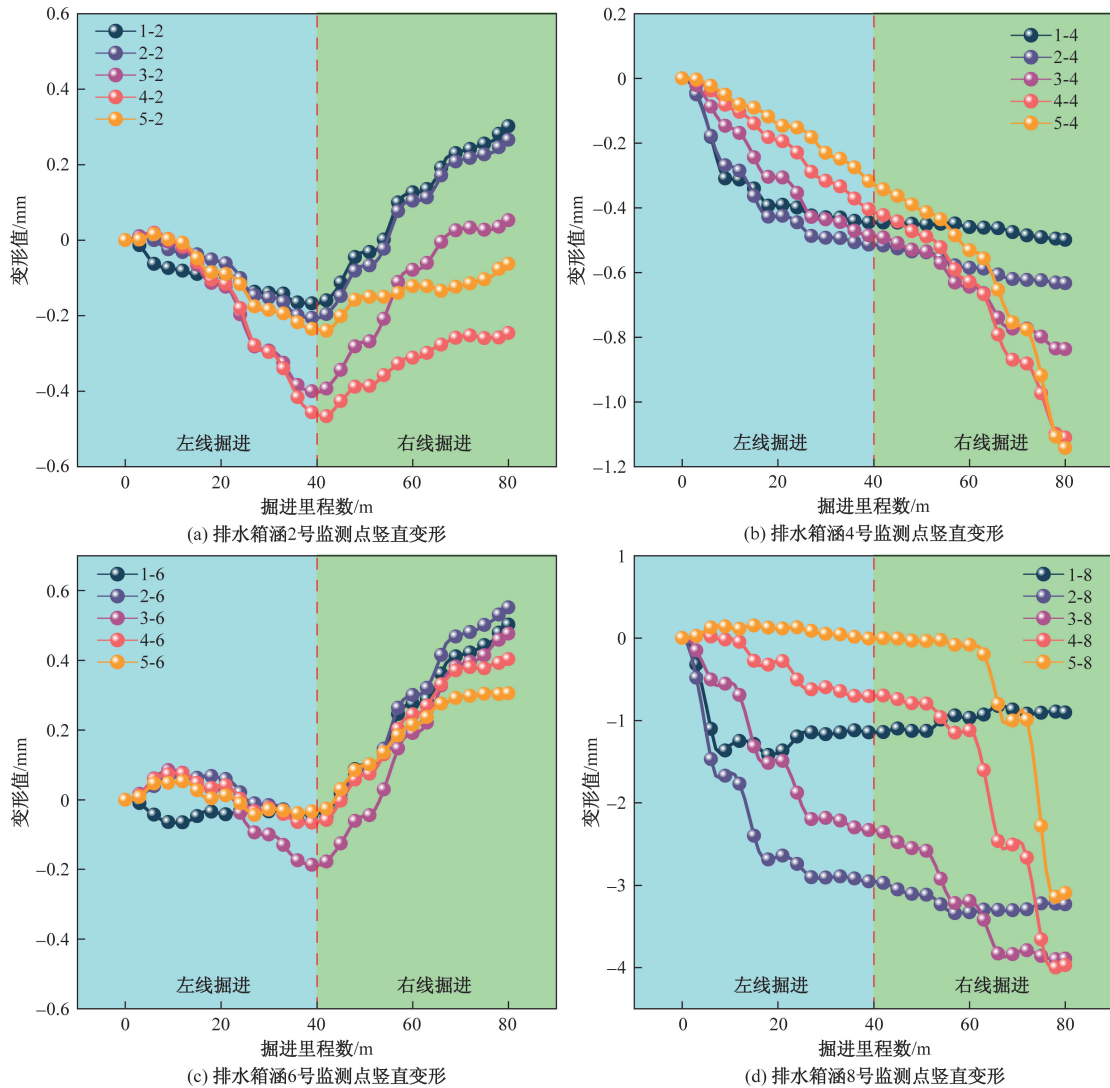


图8 排水箱涵边中点变形

参考文献

- [1] 韩宝明, 习喆, 孙亚洁. 2022年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 1-8.
- [2] 刘勇, 曹毅泽, 吴薪柳, 等. 地铁盾构施工下穿既有明挖隧道模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(1): 110-121.
- [3] 刘维正, 孙康, 戴晓亚, 等. 地铁盾构长距离下穿对既有铁路框架桥影响的数值与实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 208-218.
- [4] 李明睿, 陈国平, 范秀江, 等. 盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(1): 45-52.
- [5] 李京承, 余航飞. 盾构隧道下穿既有隧道施工影响的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2020(5): 109-114.
- [6] 郭文华, 丁宇航, 赵大亮, 等. 基于正交试验的大直径盾构下穿高铁桥梁的加固措施优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(11): 4481-4492.
- [7] 邱明明, 杨果林, 段君义, 等. 近距双线盾构隧道开挖诱发地层变形演变规律及数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 60-69.
- [8] 施成华, 郑晓悦, 王祖贤, 等. 考虑地层变异性的新建隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 500-512.
- [9] 苏永华, 李明. 黄土盾构下穿不同地下非连续管线的模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 59-68.
- [10] 冯国辉, 徐长节, 郑茗旺, 等. 考虑轴向内力时盾构下穿引起的既有隧道变形响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 523-529.
- [11] 曹洋, 林向荣, 李子路. 软土地层浅埋盾构施工的精细化数值模拟[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 149-158.
- [12] LEI M F, SHI Y B, TANG Q L, et al. Construction control technology of a four-hole shield tunnel passing through pile foundations of an existing bridge: a case study[J]. Journal of Central South University, 2023, 30

- (7): 2360-2373.
- [13] ZHOU Z, ZHENG Y D, HU J F, et al. Deformation analysis of shield undercrossing and vertical paralleling excavation with existing tunnel in composite stratum[J]. Journal of Central South University, 2023, 30 (9): 3127-3144.
- [14] 陈阳, 刘文, 刘文黎, 等. 盾构法隧道开挖面稳定性下的多目标优化研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (18): 7882-7888.
- [15] 张成, 宋棋龙, 彭元栋, 等. 软土浅埋超大直径盾构始发端头加固范围研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (6): 2579-2586.

Impact of Shield Tunneling Construction on the Stability of Drainage Box Culverts: A Case Study of the Interval Tunnel from Leifeng West Station to Jinzhou Avenue Station

WANG Shuan, LI Donglei, LI Cong, ZHENG Xiaofei
(CCCC First Highway Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: With the rapid development of urban infrastructure, shield tunneling has emerged as a key method in modern rail transit construction, inevitably affecting adjacent buildings and structures. Employing FLAC3D numerical simulation method, the entire construction process of shield tunnels passing beneath drainage culverts were simulated. The main focus of this study lied in analyzing the deformation pattern changes at monitoring points during the shield construction and investigating the specific impact of tunnel construction on drainage culvert structures. The findings reveal that the deformation stability of drainage culvert structures remains within a safe range during shield construction, thus providing theoretical support and reference data for similar projects in the future.

Keywords: shield tunneling; numerical simulation; culvert stability