

双线盾构隧道下穿排水箱涵地面沉降分析

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: 以金洲大道站至雷锋西站区间盾构隧道穿越排水箱涵工况为例, 运用 FLAC3D 有限元软件构建了双线盾构隧道下穿排水箱涵的三维有限元计算模型。通过数值分析, 深入探讨了土体注浆加固措施在减少地面沉降和控制沉降变形方面的有效性, 揭示了盾构隧道下穿排水箱涵对地面沉降演化规律的复杂影响, 并通过数值分析验证了盾构隧道上方土体经过注浆加固后能显著减缓盾构隧道掘进时引起的排水箱涵及地面沉降沉降, 从而有效保护地下排水箱涵以及地面结构的安全与稳定。

关键词: 盾构隧道; 排水箱涵; 土体加固; 地面沉降; 数值分析

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)14-0192-07

随着城市城市化进程的加快, 越来越多的城市开始建设地铁和城市轨道交通系统以缓解地面交通拥堵^[1]。双线盾构隧道因其施工速度快、对地面建筑影响小、适应性强等优点, 成为城市轨道交通建设中的首选技术之一。盾构隧道施工虽然在很大程度上减少对地面建筑物和设施的影响, 但地面沉降问题依然是一个不可忽视的风险^[2]。

近些年来盾构隧道施工引起的地面沉降问题逐渐成为城市地下工程领域的一个重要研究课题, 已吸引了国内外众多学者的关注。这些研究旨在深入理解地面沉降的成因、评估其对城市安全的潜在风险, 并探索有效的预测、监测和控制方法。尹泉等^[3]提出了一种结合卷积神经网络、双向长短期记忆与自注意力机制的深度学习模型用于预测盾构隧道施工引发的地表最大沉降。以湖南万家丽路电力盾构隧道工程为例, 建立地表沉降数据集, 并与其他模型进行对比分析, 该模型在地表沉降预测性能上优于传统模型, 证明了深度学习在盾构隧道施工地表沉降预测中的有效性和优越性。加瑞等^[4]通过数值模拟研究了盾构隧道管片接缝漏水造成的地表沉降及管片受力的影响, 主要分析了渗漏时间、程度、位置和面积对地表沉降的影响, 发现隧道渗漏导致孔压降低, 土体竖向有效应力增加, 进而会引起地表沉降。韩伟和唐钱龙^[5]依据地层变形机理, 结合地下水渗流理论, 推导了隧道开挖扰动和地下渗流作用下的地表沉降理论

解, 并通过理论值与数值模拟结果的对比, 以及与工程案例的比较, 验证了所提方法的可靠性和正确性。潘秋景等^[6]提出一种新的地表沉降预测方法, 融合了机器学习技术, 以提高预测的准确性和效率。该研究通过引入机器学习方法来克服这些限制, 并在盾构隧道施工地表沉降预测中展现出优越性。谢雄耀等^[7]提出了基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术 (PS-InSAR) 的预测方法。通过在上海杨高中路电力隧道工程的应用验证, 该技术能够获取高精度的地面沉降数据, 预测的隧道沉降速率曲线与实测曲线趋势一致, 准确地反映了隧道施工引起的地表沉降情况, 为隧道工程施工安全提供了重要的监测手段。Krishna 和 Lokhande^[8]研究了城市区域内不同形状隧道 (圆形和半圆形) 在各种荷载条件和不同岩石层中引起的地表位移情况, 通过使用有限元法进行位移计算, 分析了不同岩土类型、荷载条件、隧道深度等因素对地表位移和周围应力的影响, 得到了圆形隧道在大多数情况下引起的地表位移较小, 且周围应力较低, 在设计时是更优选的结论。Wang 和 Yang^[9]以石家庄地铁某段为例, 建立数值模型分析隧道掘进机 (tunnel boring machine, TBM) 开挖过程中引起的地表沉降, 发现隧道开挖的纵向地表沉降影响大于横向, 随着隧道埋深的增加, 纵向沉降逐渐减小, 而沉降随着隧道开挖过程逐渐增加。Lee 等^[10]通过实时监测数据, 对 TBM 盾构机在混合地面条件下操作期间

收稿日期: 2024-04-07

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 (1993—), 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。

的沉降进行了预测,研究团队开发了一种模型,以预测在不同地质条件下的盾构隧道施工过程中可能发生的地面沉降。通过将预测模型与实际监测数据相结合,能够更准确地预测地面沉降,从而为施工过程中的风险管理提供支持。Yan 等^[11]探讨了长跨度隧道在施工过程中地表沉降的规律和影响因素,发现了隧道的跨度、施工方法以及周围地质条件等因素对地表沉降有显著影响,通过合理的施工技术和监测方法可以有效控制地表沉降,保证施工安全。

综上所述,虽然众多国内外专家学者已经就地铁隧道开挖导致的地面沉降问题进行了广泛的研究,但对于双线盾构隧道下穿排水箱涵引起的地面沉降变形问题方面的研究仍然较为缺乏。因此,本文以金洲大道站至雷锋西站区间的盾构隧道穿越部分排水箱涵部分作为研究背景,利用 FLAC3D 软件进行三维数值模拟分析,重点关注了双线盾构隧道下穿排水箱涵时的地表沉降变形范围,以及在实施土体加固措施后,地表沉降变形的演化规律,为此类工程的设计与施工提供了重要的参考依据。

1 工程概况

本文研究区间为长沙市金洲大道站至雷锋西站区间,区间隧道出金洲大道站后,沿汇智路向南前行,下穿雷锋河后,在长川路与汇智路交叉路口进入雷锋西站。区间隧道主要穿越地层为强风化板岩、中风化板岩中,基岩上方主要覆盖土为素填土、压实填土、粉质黏土,部分区段基岩上覆土有圆砾、卵石,覆土厚度为 10.5~15.7 m。盾构隧道设计为双线单孔隧道,采用圆形预制钢筋混凝土管片衬砌。隧道内径为 5 400 mm,外径为 6 000 mm,设计采用通用环管片,厚 300 mm。主要的研究对象区间隧道于左 DIIIK7+270.000、右 DIIIK7+289.000 附近处下穿望雷大道排水箱涵,下穿处区间埋深约 13.1 m,区间隧道与排水箱涵底竖向最小净距约 7.8 m。区间下穿望雷大道排水箱涵,位于盾构始发段,下穿段为矩形钢筋混凝土排水箱涵,箱涵断面为 5.5 m×2.0 m,埋深约 3 m,路面雨水通过雨水口进入箱涵,然后排入雷锋河。隧道位于强风化板岩中,隧道外轮廓距排水箱涵底 7.8 m,隧顶埋深 13.9 m。对下穿望雷大道排水箱涵区段采用地面斜向袖阀管注浆加固,在隧道上方采用一排 $\phi 108$ mm 长管棚隔离保护措施,加固范围为车站端头往大里程方向 65 m,隧道外轮廓左右各 1 m,拱顶 0.8 m。

针对隧道下穿排水箱涵这一特殊工况,需要对隧道上方进行加固土体的相关措施,以减小掘进过程中

对地层地表及排水箱涵的影响。本文对双线盾构隧道下穿排水箱涵隧道掘进过程中产生的地表变形移动规律进行模拟分析,然后对比土体加固对地表沉降变化的影响,最后得出对工程的控制措施建议。

2 模拟计算

2.1 基本假定

为确保分析结果贴合工程建设的实际,本文设定了以下假设:①假设地表和各土层沿隧道线的微小起伏被忽略,简化为均匀水平的层状分布;②岩体视为理想弹塑性材料,达到强度屈服点后,其强度和体积在塑性流动中保持不变,忽略应变硬化的影响;③忽略地质体及其与地层界面处的应力集中现象;④将岩体假设为各向同性的均质材料,并且塑性流动不会影响其各向同性特性;⑤适当调整扰动区域的弹性模量来模拟掘进来研究对岩体的扰动效应。

2.2 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。数值模拟模型及各部分对应关系如图 1 所

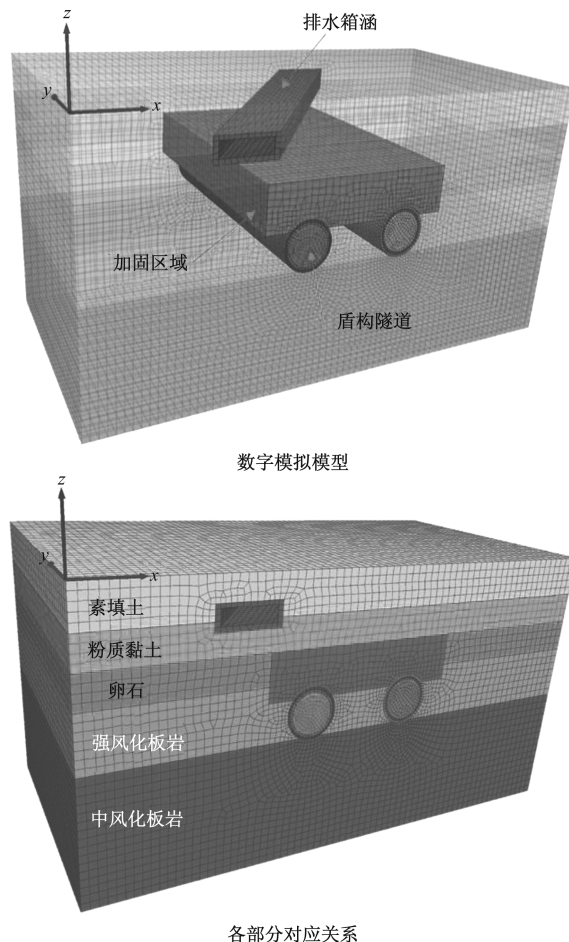


图 1 数值模拟模型及各部分对应关系

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 $70\text{ m}\times 36\text{ m}\times 36\text{ m}$,三维计算模型共划分 18.28 万个网格。

2.3 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查资料和室内直剪试验。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。

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,得到地表沉降数值模拟规律。

3 结果分析

3.1 地面沉降模拟结果

盾构隧道施工过程中,监测与控制地表沉降至关重要。图 2 为左线隧道掘进地表最大沉降值等值线图。图 3 为右线隧道掘进地表最大沉降值等值线图。

图 2(a)~图 2(d)显示的是左线掘进 9、18、27、36 m 的四个阶段,观察这些图示可以了解地表沉降的发展趋势。在左线隧道掘进 9 m 的初期,地表沉降尚不明显,最大沉降值为 3.09 mm,此时盾构机的切削作用和土体移动对地表的影响较为有限。然而随着掘进的进行,沉降逐渐显现,特别是当掘进达到 18 m 时,地表沉降明显增加,最大沉降值为 3.95 mm,表明土体扰动在持续增强。此时,沉降槽呈现典型的 Peck 曲线“V”形形态,最大沉降区域集中在隧道轴线附近。排水箱涵的刚性结构对周围土体产生了显著扰动,导致其上方和两侧的土体沉降更为明显。盾构隧道掘进至 27 m

表 1 数值计算参数

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	0.30	10	10
强风化板岩	7	2 000	100	0.20	15	30
中风化板岩	16	2 100	200	0.30	40	35
加固土体	6	2 400	200	0.30	100	35
管片衬砌及排水箱涵	—	2 500	35 000	—	—	—

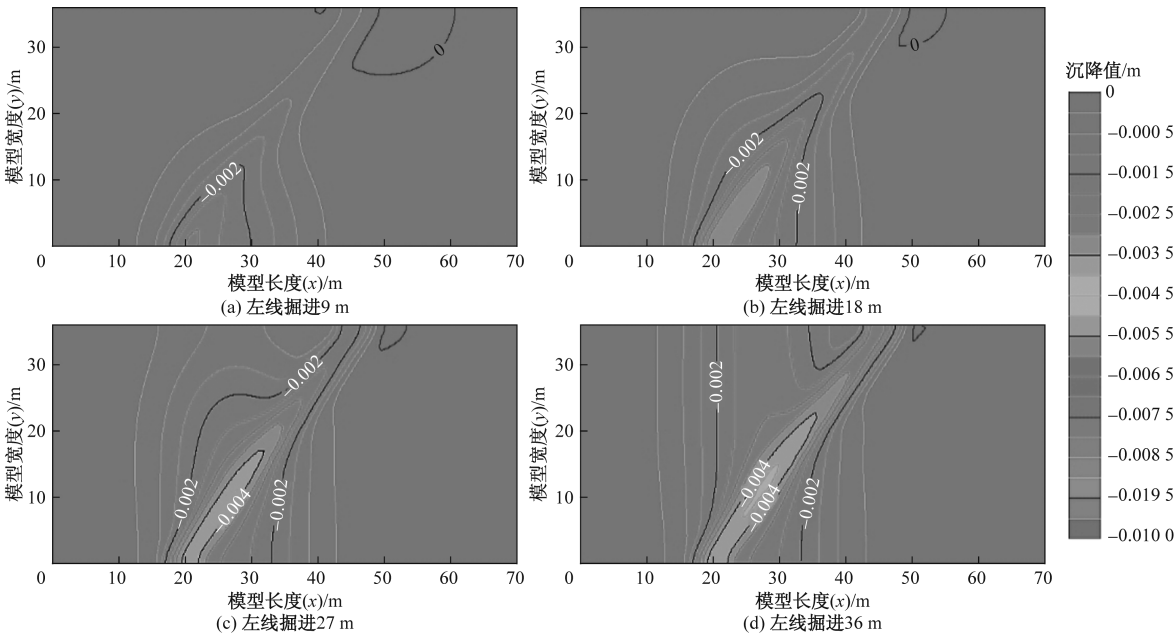


图 2 左线隧道掘进地表最大沉降值等值线

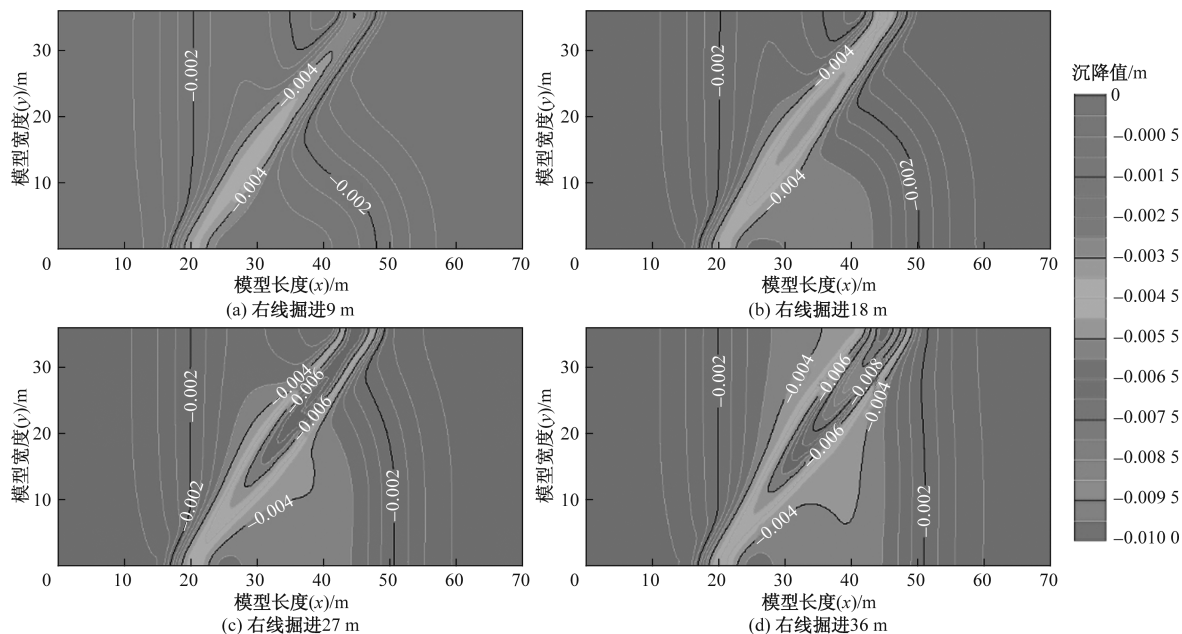


图3 右线隧道掘进地表最大沉降值等值线

时,沉降槽的“V”形更为加深,最大沉降值为4.35 mm,此阶段排水箱涵愈发显著,最大沉降区域由直上方向两侧扩展,形成了一个较宽的沉降区,穿越排水箱涵上方的整个空间都受到了影响,这主要是由于排水箱涵的刚性导致周围土体发生额外压缩和沉降。至36 m的掘进阶段,沉降趋势逐渐稳定,最大沉降值达到4.6 mm,Peck曲线的“V”形特征更为明显,最大沉降依然集中于隧道轴线和排水箱涵上方,显示排水箱涵的刚性对沉降模式有着不可忽视的影响,但整体地表沉降仍遵循Peck曲线的基本规律。

图3(a)~图3(d)展示右线掘进9 m、18 m、27 m、36 m的4个阶段,在右线隧道的掘进过程中,同样观察到地表最大沉降的持续发展。右线隧道掘进至9 m时,由于左线隧道掘进的完成,后续沉降在原有基础上继续发展,随着右线的进一步掘进,左线附近土体的沉降进一步发生,尤其是在两隧道轴线之间的区域,最大沉降值为4.89 mm。此外,排水箱涵上方及两侧土体的沉降趋势持续发生。隧道掘进至18 m和27 m时,地表沉降呈现“W”形沉降槽如图4所示,地表最大沉降值分别是5.79 mm和7.64 mm。隧道开挖引发的土体扰动和重新分布,进一步加剧了沉降现象,排水箱涵的存在使得隧道轴线上方出现了较大的沉降不均匀区域。两隧道之间的土体因两侧施工活动和排水箱涵周围土体的相互作用,产生了累积的沉降效应,导致这一区域的沉降相对较大。当右线隧道掘进



图4 隧道掘进剖面数值沉降(土体加固)

完成时,右侧轴线上的沉降超过了左侧,最大沉降区域位于排水箱涵出水口附近,最大沉降值为10.8 mm,隧道轴线方向的不均匀沉降进一步加剧。这一系列的观察表明,双隧道施工显著扰动了土体,尤其是排水箱涵的存在,使得中间土体受到的影响更为集中,形成了较大的沉降区。

排水箱涵作为一种刚性结构,在其周围土体中引入了非均匀的应力分布。正常情况下,土体的应力状态是由其自重以及上方结构负荷共同决定的,遵循一定的垂直和水平应力比。然而,当在这种应力场中引入刚性结构时,如排水箱涵,其不会像周围的土体那样发生形变,导致应力路径发生改变。更具体地说,刚性结构阻碍了土体的自然垂直和水平位移,造成了应力集中现象,尤其是在结构的底部和两侧。这种应力重分布导致周围土体承受不均匀的压缩,进而影响土体的沉降行为。盾构掘进对土体位移模式的改变主要体现在隧道周围土

体的扰动和重新分布上。盾构隧道掘进时,盾构机的切削面会对面前的土体产生扰动,导致土体的位移和变形。在理想情况下,盾构掘进引起的土体变形应当是均匀且对称的,以保持隧道周围土体的稳定性。但在实际情况中,由于地质条件的复杂性以及排水箱涵等刚性结构的存在,土体的位移模式会发生较大的改变。特别是在排水箱涵附近,盾构掘进引起的土体位移受到刚性结构的影响,使得土体沉降呈现出不均匀的分布。

3.2 土体加固前后沉降变化对比

土体加固前后左右线隧道掘进地表最大沉降值等值线图如图5所示。

图5(a)和图5(b)展示的是实施土体加固措施后,左线和右线隧道掘进完成后的地表最大沉降值的等值线图,而图5(c)和图5(d)则展示了在未进行土体加固情况下,同一施工阶段的地表最大沉降值等值线图。通过比较图5(a)与图5(b)以及图5(c)与图5(d)的等值线,可以看到,土体加固显著地限制了较大沉降范围的扩散,并显著降低了不均匀沉降的潜在风险。尤其值得注意的是,当左线隧道掘进完成后,加固后的土体展现了较强的抗变形能力,有效地减少了地表最大沉降范围。此外,随着右线隧道的完成,加固措施在整体上显著降低了地表的总体沉降量。这一变化强调了通过土体加固技术显著提升了土体的承载能力,使隧道上方的土层更加稳固,能够有效地抵抗因掘进引起的土体位移及其引发的应力变化。这一系列措施大大降低

了地表沉降及其不均匀分布的风险,保障了隧道排水箱涵及周边地区的稳定与安全。

图6和图7分别表示在双线隧道掘进过程中是否进行土体加固地表最大沉降值的动态变化。

由图6和图7中的结果可知,左线掘进时,由于掘进初期地表沉降较为敏感,初始掘进段最大沉降值变化明显,表明初期掘进对地表稳定性的影响较为突出。但随着左线掘进不断推进,最大沉降值的增加速度开始放缓,土体对掘进引起的扰动逐渐适应,沉降速率稳定下来。当左线掘进完成,右线掘进启动时,最大沉降值的增加速度明显加快,这是因为左线掘进已造成的沉降累积效应,以及排水箱涵出口位置正处于右线掘进路径上方,增加了地表沉降的复杂性和敏感性。

在整个掘进过程中,土体加固措施发挥了至关重要的作用,有效控制了各个掘进阶段的沉降发展,并显著减缓了沉降速率的变化。这些措施通过增强土体的承载能力和改善应力分布,显著提高了土体的抗变形能力。因此,在隧道掘进过程中,上方的土层能够更有效地承受由于土体移动而产生的应力变化,从而在很大程度上减少了地表沉降。加固土体后,隧道上方和排水箱涵下方的土体中的应力分布变得更加均匀,有效减少了由于应力集中而导致的局部过度沉降,这有助于避免因不均匀沉降而引起的建筑物损伤或结构裂缝。此外,加固土体还能有效地减缓沉降速率,尤其是在掘进初期,当地表沉降最为敏感的时候。通过提前处理土体,

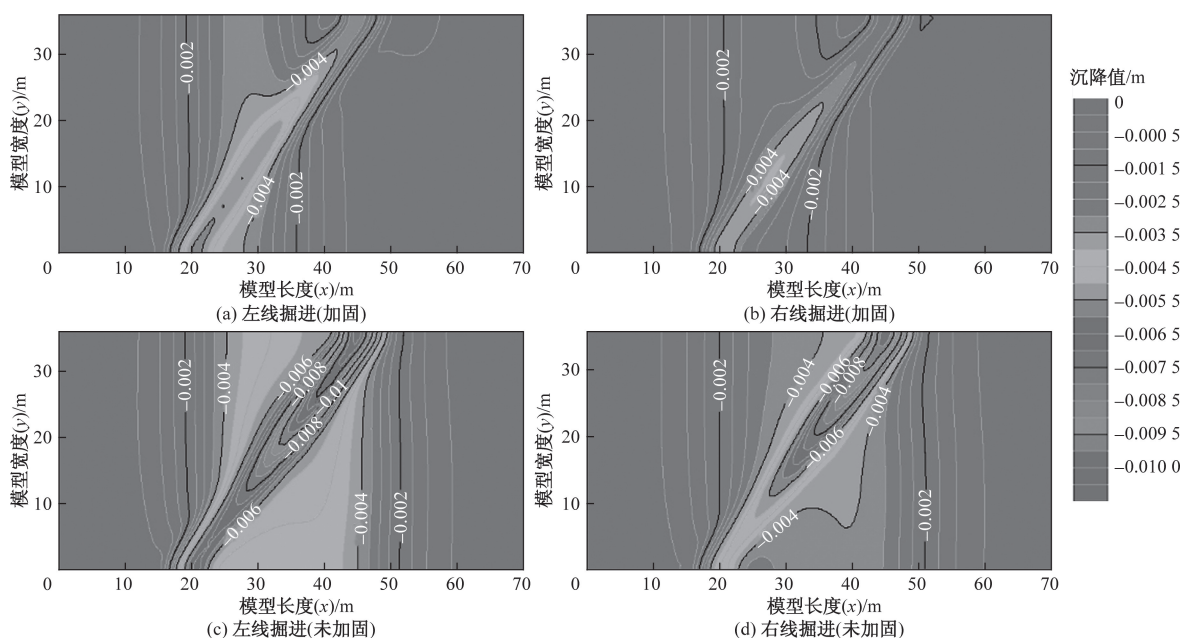


图5 左右线隧道掘进地表最大沉降值等值线



图6 隧道掘进剖面数值沉降(未土体加固)

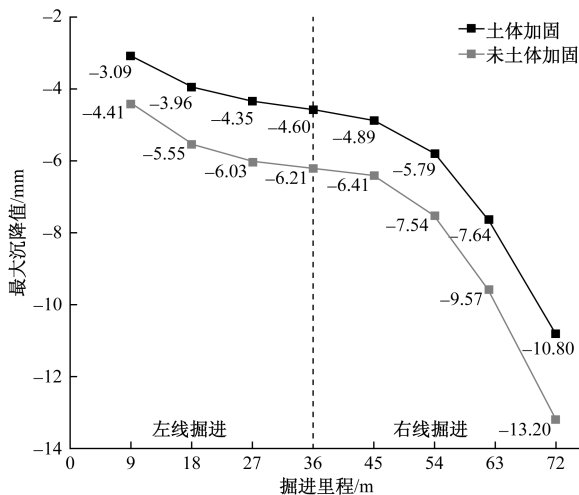


图7 双线盾构隧道掘进过程中最大沉降值变化

不仅减缓了沉降速率,而且在整个施工期间减少了总沉降量,有利于进一步控制工程风险。这一策略不仅保证了施工安全,减少了对周围环境和基础设施的潜在影响,同时也提高了工程项目的整体稳定性和可靠性。通过预先加固土体,可以在掘进前期就有效地抵抗和控制由于地下施工活动引起的不利地表变化,确保了施工过程中地表沉降的管理更为可预测和可控。

4 结论

本文以金洲大道站至雷锋西站区间的盾构隧道穿越排水箱涵部分为背景,采用FLAC3D有限元软件建立了双线盾构隧道下穿排水箱涵的三维有限元计算模型。通过数值分析,本文深入探讨了土体加固措施在减少地表沉降和控制沉降变形方面的有效性,揭示了盾构隧道下穿排水箱涵对地表沉降演化规律的复杂影响。这一分析为相似工程条件下的有效施工及保护策略的实施提供了重要的指导和参考,并得到了以下结论。

(1)盾构隧道下穿排水箱涵时的地表移动规律主要表现为随着隧道掘进,地表沉降量先增加后趋

于稳定,形成一个以隧道轴线为中心的明显沉降槽。这一规律说明了随着隧道穿越过程的进行,土体逐渐适应新的应力状态,导致沉降速率减缓直至稳定。

(2)排水箱涵的刚性结构对沉降分布的影响表现为沉降量在其上方和两侧因应力集中而变得更加显著。这种刚性结构导致的应力重分布,形成了一个较宽的沉降台区域,增加了沉降管理的复杂性。

(3)土体加固通过增强土体的承载能力和改善应力分布对地表移动规律产生显著影响,有效地减缓了沉降速率并降低了总沉降量。这一策略强化了土体结构,使其更能承受隧道掘进过程中引起的应力变化。

(4)加固措施提高了隧道上方和排水箱涵下方土体的稳定性,有效控制了不均匀沉降,减少了地面结构因不均匀沉降而可能遭受的损害。这保障了地面结构的安全性和稳定性,为盾构隧道下穿排水箱涵的施工提供了重要的地质安全保障。

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] 赵辰洋, 罗毛毛, 邱静怡. 盾构隧道施工引起地层变形预测方法综述[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(3): 31-46.
- [3] 尹泉, 周怡, 饶军应. 基于深度学习的盾构隧道施工地表沉降预测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 607-617.
- [4] 加瑞, 李青苗, 杨岗. 盾构隧道渗漏对地表沉降和管片受力影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1): 423-435.
- [5] 韩伟, 唐钱龙. 富水饱和区盾构隧道施工地表沉降计算方法[J]. 力学与实践, 2023, 45(5): 1057-1066.
- [6] 潘秋景, 吴洪涛, 张子龙, 等. 基于多域物理信息神经网络的复合地层隧道掘进地表沉降预测[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 539-551.
- [7] 谢雄耀, 柴隆, 李攀, 等. 基于PS-InSAR超载下隧道纵向沉降预测方法[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1656-1664.
- [8] KRISHNA S S, LOKHANDE R D. Study on the effect of surface subsidence due to tunneling under various loading conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(2): 923-943.
- [9] WANG T, YANG J. Numerical simulation study of the surface subsidence caused by TBM tunnel excavation[J]. International Journal of Geological Resources and Geological Engineering, 2023, 1(1): 1-8.
- [10] LEE H K, SONG M K, LEE S S. Prediction of subsidence

during TBM operation in mixed-face ground conditions from real-time monitoring data[J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 12130.

[11] YAN J, LIU X, BAI X. Research on surface subsidence of long-span underground tunnel[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 21(14): 1-13.

Analysis of Ground Settlement for Double-lines Shield Tunnel Passing beneath a Drainage Culvert

WANG Shuan, LI Donglei, LI Cong, ZHENG Xiaofei

(CCCC First Highway Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Focusing on the segment of shield tunneling from Jinzhou Avenue Station to Leifeng West Station, specifically where it crosses underneath a drainage culvert, FLAC3D finite element software was used to develop a 3D finite element model for a double-lines shield tunnel intersecting a drainage culvert. Through detailed numerical analysis, the efficacy of soil stabilization techniques in mitigating surface subsidence and managing deformation patterns was thoroughly investigated. It unveils the intricate effects that tunneling beneath drainage culverts has on the development of ground subsidence. Furthermore, the analysis confirms that soil stabilization efforts can significantly reduce both the rate and unevenness of subsidence triggered by such tunneling activities, thus effectively safeguarding the integrity and stability of surface structures.

Keywords: shield tunnel; drainage culvert; soil reinforcement; ground subsidence; numerical analysis