

大直径双线盾构隧道施工期地表沉降监测分析

吴浩 马召 曹钰奇

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22237

[摘要] 大直径双线盾构施工所引起的地表沉降,在时空分布上表现出十分明显的规律性。纵向沉降沿隧道轴线呈渐变式发展,横向沉降槽则呈现出非对称的凹槽形态。实际上,双线叠加效应受到施工顺序和地层条件的共同影响,而沉降幅度则取决于地层参数、施工参数以及结构参数的协同作用。通过将数值模拟结果与现场监测数据进行对比验证,可以看出合理建模能够较好地预测沉降的发展趋势,同时偏差分析也为模型的进一步优化指明了具体方向。

[关键词] 大直径双线盾构; 地表沉降; 纵向沉降规律; 横向沉降槽; 数值模拟

中图分类号: U455.43 **文献标识码:** A

Monitoring and Analysis of Ground Surface Settlement During the Construction of Large-Diameter Double-Line Shield Tunnels

Hao Wu Zhao Ma Yuqi Cao

Northwest Engineering Corporation Limited of PowerChina

[Abstract] Ground surface settlement induced by the construction of large-diameter double-line shield tunnels exhibits distinct regularities in both spatial and temporal distributions. Longitudinal settlement develops gradually along the tunnel axis, while the transverse settlement trough presents an asymmetric concave profile. In practice, the superposition effect of the two lines is jointly influenced by the construction sequence and geological conditions, whereas the magnitude of settlement depends on the synergistic effects of geological, construction, and structural parameters. By comparing and validating numerical simulation results against field monitoring data, it is found that appropriate modeling can effectively predict the development trend of settlement. Meanwhile, deviation analysis provides specific directions for further model optimization.

[Key words] large-diameter double-line shield tunnel; ground surface settlement; longitudinal settlement characteristics; transverse settlement trough; numerical simulation

引言

随着城市地下空间开发不断推进,大直径双线盾构隧道工程越来越常见,其施工引起的地表沉降怎么控制,已经成了设计与施工中绕不开的一个关键难题。双线盾构先后穿过同一断面时,地层扰动的叠加效应会使沉降响应变得更加复杂,相关规律目前仍有待系统梳理。本文拟从沉降分布特征、主控因素及数值模拟验证三个方面展开分析,希望能为同类工程的沉降预测与施工调控提供一定参考。

1 大直径双线盾构施工地表沉降分布规律

1.1 隧道纵向地表沉降的时空演变规律

隧道纵向地表沉降随掌子面推进,表现出明显的时空演变特征。开挖初期沉降量不算大,影响范围主要局限在掌子面前方一小块区域内;随着掘进距离不断增大,沉降影响逐步向隧道后方延伸,累积效应越来越明显。从时间上看,沉降速率在掌子面

通过监测断面后会快速冲到峰值,之后逐渐降下来并趋于平稳,这个时间效应在整个过程中相当突出。不同监测断面测出来的数据表明,纵向沉降的影响范围和掘进速度、地层条件都有不小的关系。纵向沉降曲线沿隧道轴线呈渐变形态发展,整个过程把时空耦合的复杂特性体现得很充分。前期开挖段对整体沉降演变控制作用很明显,可以说后续沉降怎么发展,很大程度上取决于前期掘进区段的表现。

1.2 隧道横向地表沉降的分布特征

横向地表沉降在垂直隧道轴线的方向上,不均匀分布的特征很明显。从隧道中心线往两边走,沉降量逐渐变小,影响宽度受覆土厚度和地层性质制约,最大沉降一般出现在隧道正上方,越往外越收窄。沉降槽宽度和沉降深度之间有一定关系,沉降大的时候影响范围往往偏窄,反过来沉降小的时候影响范围相对宽一些。地层损失率是控制横向沉降形态的核心要素,不同施工

阶段引起的地层扰动程度不一样, 横向曲线的具体走势也会跟着变。双线隧道条件下, 横向沉降形态还会受线间距和相对位置影响, 不过沉降槽整体上还是能保持连续平滑的分布趋势, 跟典型沉降剖面的基本特征对得上。

1.3 双线盾构先后施工下地表沉降的叠加规律

双线盾构施工中, 后行隧道掘进会对先行隧道已经形成的沉降场产生二次扰动, 最后测出来的沉降量通常比单线工况下的实测值要高。不过这种叠加效应不是简单的代数相加, 实际效果跟两条隧道的相对位置、施工间隔时间、地层应力历史等因素都有关系, 是这些条件一块儿起作用的结果。施工间隔比较短的时候, 先行隧道周围的地层还没固结好, 后行隧道带来的附加沉降会更明显; 间隔时间拉长了, 地层强度慢慢恢复一些, 叠加效应也就相应减弱了。实测结果显示, 叠加之后的横向沉降曲线往往会朝后行隧道那一侧偏, 呈现出明显的非对称形态, 沉降峰值的位置也会跟着挪。沉降叠加规律反映的是多次施工扰动下地层响应的累积特征, 施工时序这块儿把控好了, 对调控叠加效应非常关键。

2 地表沉降主要影响因素分析

2.1 地层土体参数对地表沉降的影响

地层土体参数对地表沉降幅度具有基础性控制作用, 不同土质条件下的沉降响应差异显著。盾构掘进穿越粉质黏土时地表沉降最为突出, 穿越泥质粉砂岩时沉降量相对最小, 这一规律已被多项实测数据所印证。造成上述差异的原因在于不同土体在物理力学性质上的区别, 内摩擦角、内聚力、压缩模量及含水率等指标均存在明显不同。土体参数变化既影响沉降量值, 也决定沉降槽的形态特征。不同土层条件下地表沉降曲线形状总体一致, 均表现出凹槽型分布, 但凹槽的深度与宽度随土层性质改变而相应变化^[1]。地层损失引起的沉降明显大于固结引起的沉降, 而固结过程会在已有损失沉降的基础上进一步增加总沉降量。复合地层条件下, 土体参数竖向非均匀分布使沉降发展更为复杂, 上软下硬地层中软土部分的压缩变形与硬层部分的相对稳定共同决定了最终的沉降形态。土体饱和度对施工荷载引起的地层变形同样具有明显制约, 饱和度降低时荷载导致的变形幅值最大可减小约三成五。

2.2 盾构施工参数对地表沉降的影响

盾构施工参数属于施工过程中可直接调控的核心因素, 对地表沉降具有显著且即时的控制作用。特征重要性分析表明, 土仓压力、同步注浆量和出土方量是影响沉降的关键参数。土仓压力在掘进中通常维持在隧道埋深处侧向静止土压力的0.9至1.1倍之间, 盾构推力则波动于土仓压力在开挖面作用力的1.8至2.4倍范围内。土仓压力与注浆压力增大时, 上部地层和既有结构的变形能够得到有效控制; 压力不足时变形则会显著增大^[2]。高土压掘进模式下, 配合合理的同步注浆及二次注浆措施, 可有效抑制地表沉降的发展。地表沉降随掘进过程可划分为若干阶段, 盾构通过阶段通常是沉降量最大、变化最为剧烈的时期。出土方量直接反映开挖面的超挖程度和地层损失规模, 其控

制精度对沉降槽的最终形态具有决定性影响。

2.3 隧道结构参数对地表沉降的影响

隧道结构参数包括埋深、直径、断面形状及开挖面积等, 这些参数在设计阶段即已确定, 对地表沉降的分布特征起到框架性的约束作用。埋深是影响沉降槽宽度与幅度的关键参数, 随着埋深比增大, 地表沉降幅值整体呈递减趋势。浅埋条件下上覆土层约束较弱, 施工扰动更易传递至地表, 沉降槽宽度偏窄而峰值较高; 深埋条件下应力传递路径较长, 沉降分布相对平缓。隧道直径直接决定开挖面规模与地层损失的空间范围^[3], 小直径盾构掘进引发的地表沉降槽参数明显小于大直径隧道。双线隧道条件下, 轴线间距对横向沉降形态具有决定性影响, 现场监测表明净距小于直径的2.5倍时, 沉降槽由双峰形态转变为单峰形态。开挖断面形状与面积决定了地层扰动范围与程度, 非圆形断面可能引发更为复杂的沉降模式。隧道结构参数的合理选取需要在工程可行性、结构安全与沉降控制之间寻求平衡, 其影响具有长期性和全局性特征。

2.4 双线施工交叉扰动对沉降的叠加影响

双线盾构施工中, 两条隧道掘进所产生的应力释放与地层扰动在空间和时间上相互叠加, 形成了比单线工况更为复杂的沉降响应模式。双线平行隧道同向推进时, 盾构间的相互作用使地表沉降叠加效应显著, 沉降幅度较单线工况明显增大。后行隧道掘进会对先行隧道周围已部分恢复的地层产生二次扰动, 这种交叉扰动的影响程度与两条隧道的相对位置、施工间隔时间及地层性质密切相关。富水细颗粒地层中二次扰动效应尤为突出, 后行隧道土体损失率可达先行隧道的1.45倍, 沉降槽宽度系数约为先行隧道的1.13倍。当地表监测断面先后经历双线盾构通过后, 最大沉降位置会向双线隧道中心轴线方向发生偏移。横向沉降槽在双线扰动下往往呈现非对称分布特征, 沉降峰值的位置取决于两条隧道的先后顺序与相对位置^[4]。交叉扰动的影响范围主要由轴线间距和掌子面前后距离共同决定。

3 地表沉降数值模拟与监测数据对比分析

3.1 数值计算模型构建与参数赋值

数值计算模型的构建需以工程地质勘察资料为基础, 合理确定几何尺寸与边界条件。模型水平范围通常取隧道直径的数倍, 竖向延伸至基岩层或足够深度的不动层, 以消除边界效应对计算结果产生的影响。有研究采用MIDAS/GTS NX软件对双线盾构施工过程进行精细建模, 系统分析了先后掘进条件下地表沉降的响应特征。地层本构模型的选取直接影响计算精度, 常用模型包括莫尔-库仑模型、小应变硬化土模型等, 不同模型适用于不同类型土体力学行为的描述。有研究引入衬砌与土体刚性连接的Tie约束模型来模拟实际盾构工况, 计算分步开挖下地表横向截面的沉降结果^[5]。参数赋值阶段需依据室内土工试验和原位测试结果确定各土层的物理力学指标, 包括密度、弹性模量、泊松比、黏聚力及内摩擦角等, 说到底, 就是要确保模型参数能够真实反映地层的力学响应特性, 不能靠主观经验随意定数。

3.2 盾构施工过程数值模拟实现

盾构施工过程的数值模拟,需要在模型中再现掘进、管片拼装及壁后注浆等主要工序的力学效应。掘进模拟通过逐环激活或钝化相应单元来实现,每一分析步对应一环掘进长度。管片衬砌采用壳单元或实体单元模拟,注浆层则通过设置等效均布压力或采用流固耦合方法加以表征。有研究采用三维有限差分软件建立盾构下穿数值模型,系统分析了施工过程对上部地层的沉降影响规律。双线盾构模拟中,需分别设置两条隧道的掘进顺序与时间间隔,以体现先后施工对地层的不同扰动程度。施工荷载施加包括掌子面支护压力、盾壳摩擦力及注浆压力等。有研究指出,土舱压力宜维持在隧道埋深处静止土压力的1.1倍至1.3倍范围内,同步注浆压力控制在0.35至0.4兆帕之间。通过合理的施工步序与荷载施加方式,数值模型能够较为真实地再现盾构掘进中地层的应力重分布与变形发展全过程^[6]。

3.3 模拟沉降结果与实测沉降数据对比校验

模拟沉降结果与现场监测数据的对比校验,是评估数值模型可靠性的关键环节。对比分析通常选取地表沉降横向分布曲线、纵向沉降历时曲线及特征点位的沉降时程曲线作为主要校验对象。双线盾构先后通过监测断面后,地表最大沉降值分别为2.66毫米和5.22毫米,沉降槽均呈V形分布。右线开挖完成后,最大沉降位置向双线隧道中心轴线方向发生偏移。双线下穿引起的地层最大沉降位于两隧道中间位置,计算结果与实测值吻合较好,整体误差控制在10%以内。有研究采用ABAQUS软件建立三维数值模型,模拟结果经与现场监测数据对比后,验证了模型具有良好的准确性。

3.4 沉降偏差成因与模型优化分析

模拟结果与实测数据之间的偏差来源具有多元性,系统分析偏差成因是优化数值模型的重要途径。偏差主要可归结为三个方面:一是地层参数取值的代表性不足,二是本构模型对土体复杂力学行为的描述存在简化,三是施工模拟中对推进速度、停机时间、注浆时效等因素的处理较为粗略。针对上述偏差,模型优化可从参数反演和模拟方法改进两个方向展开。有研究提出将HSS本构模型与智能优化算法相结合的参数反演方法,通过敏感性分析筛选出对地表沉降影响最大的模型参数进行优化^[7]。有

研究采用登山队优化算法进行地层参数的无损反演,以数值模拟计算结果与实际监测数据的对比误差构建目标函数。

4 结束语

大直径双线盾构施工地表沉降受多重因素协同控制,纵向呈渐变延伸、横向呈非对称凹槽分布,双线叠加效应与施工时序密切相关。数值模拟可较好地再现沉降发展过程,但模型精度依赖参数取值与施工细节刻画。研究表明,合理调控施工参数并优化时序安排,是控制地表沉降的有效途径,对类似工程具有一定参考价值。

【参考文献】

- [1] 骆展鹏, 石超, 熊春林, 等. 双线平行盾构隧道同向推进地表沉降及控制措施研究[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(7): 18-21+75.
- [2] 王子君. 富水细颗粒地层双线盾构地表变形分析及预测[J]. 工程勘察, 2025, 53(11): 18-25.
- [3] 赫明胜. 大直径泥水盾构地表沉降Tie约束模型数值模拟研究[J]. 建筑机械化, 2025, 46(4): 132-136.
- [4] 王鹏飞, 邹利, 乙珂豪, 等. 考虑双线掘进和建筑结构耦合作用时地铁盾构下穿建筑物施工的地面沉降规律[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4): 145-150.
- [5] 陈鹤瑛. 新建盾构隧道双线下穿对既有管道及地表沉降的影响研究[D]. 华东交通大学, 2025.
- [6] 赫明胜. 大直径泥水盾构地表沉降Tie约束模型数值模拟研究[J]. 建筑机械化, 2025, 46(4): 132-136.
- [7] 黄戡, 傅铁军, 王科伟, 等. 盾构隧道施工对上覆平行管线的影 响分析[J]. 公路与汽运, 2025, 41(2): 118-123.

作者简介:

吴浩(1994—),男,山西长治人,本科,中级工程师,城市轨道交通 安全监测方向。

马召(2000—),男,陕西汉中 人,本科,助理工程师,城市轨道交通 安全监测方向。

曹钰奇(1995—),女,河南郑州人,本科,城市轨道交通 安全监测方向。