

Analysis on deformation law of shield TBM overlapping construction tunnels under micro-wind hard rock geological conditions

Yubao Ma Chi Mi

PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shanxi, 710000, China

Abstract

With the development of urban underground space in China, shield tunneling (TBM) has become increasingly prevalent. These tunnel constructions involve intense interactions and complex mechanisms of force and deformation, which can easily lead to engineering challenges. This study focuses on overlapping TBM construction methods and employs multiple linear regression to establish the interaction between tunnel construction parameters and ground subsidence. The results demonstrate that construction parameters are closely related to ground subsidence: increasing excavation speed leads to ground subsidence, while enhancing soil chamber pressure, grouting pressure, and grouting volume can reduce it. The developed model aligns well with field measurement data, providing theoretical and technical support for similar engineering projects.

Keywords

shield TBM; overlapping construction; deformation law; excavation parameters

微风化硬岩地质条件下盾构 TBM 区间交叠施工隧道变形规律探析

马玉宝 弥驰

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

随着我国城市地下空间发展, 盾构—TBM 应用增多。这类隧洞施工中相互作用强, 受力和变形机理复杂, 易引发工程问题。本项目以 TBM 交叠施工为研究对象, 用多元线性回归方法构建隧道施工工艺参数与地表沉降的相互作用关系。研究结果表明: 施工工艺参数与地面沉降关系密切, 提高开挖速率会导致地面沉降, 提高土仓压力、注浆压力及注浆量可减少地面沉降。所建模型与实测资料基本相符, 可为同类工程建设提供理论和技术支撑。

关键词

盾构 TBM; 交叠施工; 变形规律; 掘进参数

1 引言

随着我国城市地下空间的大量开发与利用, 盾构掘进机 (Tunnel Boring Machine) 在我国已得到越来越多的应用。在某些复杂的施工环境和特殊的地质情况下, 盾构 -TBM 部分重叠区段的形成是不可避免的。在隧道建设中, 交叉隧道的受力和变形机理十分复杂, 极易引起地面沉降、隧道结构变形、管片开裂等一系列问题, 严重时还会威胁到周围建筑结构的安全。因此, 开展盾构隧道施工过程中隧道的变形特征及其与隧道沉降之间的相互作用关系, 对保证隧道施工安全、提高施工质量和降低工程风险有着十分重要的实际意义。

本文以北方某地铁线路 TBM 交叠段工程为背景, 通过地表沉降、管片变形、结构应力等监测数据的系统分析, 综合考虑盾构掘进参数、地质条件、设计图纸等信息, 构建理论与数值模拟相结合的方法, 研究盾构隧道在交叠施工条件下的变形规律, 对其进行数值模拟, 揭示其变形演化机理, 为同类工程建设提供理论基础与技术支撑。

2 交叠段工程概况

2.1 交叠段影响范围界定

研究区间为主线 YK13+015.663~YK13+243.199 (左线 ZK13+003.012~ZK13+230.550), 左右线空间关系复杂, 相互作用显著。在 YK13+167.989 (ZK13+154.719) 处, 左线位于右线下方, 重叠段长度 227 米 (1 环至 150 环)。支护加固台车位于 ZK13+101.514~ZK13+127.014 (左线 56~73

【作者简介】马玉宝 (1983-), 男, 中国河南新乡人, 本科, 高级工程师, 从事工程项目管理研究。

环)，为该段关键施工区域。

2.2 交叠段地质条件分析

地层自上而下依次为杂填土、粉质黏土、强风化花岗岩、中风化花岗岩、微风化花岗岩。强风化层结构松散、稳定性差，需加强支护；中、微风化层强度高，但施工扰动易引发应力重分布与局部失稳。

3 施工进度与监测体系构建

3.1 施工进度跟踪与分析

交叠段下行隧道先于上行隧道施工，在下行隧道内布置支撑台车，台车随上行隧道盾构掘进换步移动，布距15米，上行隧道每布局施工时间为2天。施工日期为12月11日至15日。

3.2 监测点布置原则与方案

地表沉降点沿轴线每10m布设1个，共7个断面，每断面9个点，以捕捉沉降槽分布。管片沉降与收敛监测每5m设1断面，每断面3个，分布在两侧拱腰、拱顶。应力监测点布设于管片与台车关键部位，共26个测点，实时监测结构响应。

4 监测数据深度挖掘与分析

4.1 地表沉降数据特征分析

为了深入探究地表沉降的变化规律，我们将各监测点在不同日期的沉降数据进行了统计分析：如表1所示。从表

中数据可以看出，不同监测点的沉降情况存在差异，且随时间变化呈现出不同的趋势。

以DBC-T08-03为研究对象，从12月11日至12月15日上行隧道盾构穿越该测点，沉降量由-3.15mm增至-3.23mm；通过对地面沉降观测资料的分析，得出了盾构施工参数与地面沉陷的关系。随着盾构高速推进，地面沉降也将随之增大，这主要是由于高速隧道开挖会对周边土壤造成强烈的干扰，进而引起地层应力再分配，进而造成地面沉降，且贮槽内压力对地面沉陷也有一定的影响。

4.2 管片结构变形数据解析

管片结构的变形直接关系到隧道的稳定性和安全性，因此对管片拱顶沉降和净空收敛监测数据的分析至关重要。表2展示了管片拱顶沉降和净空收敛的监测数据。

通过分析监测数据，当盾构机右线施工穿越左线（56环）时，管片拱顶的下沉效应仅为0.1mm，而收缩量仅为-0.3mm，掘进施工对已成型管片的影响不大。但是，随着隧道开挖的推进，在一些区段，管片的变形会不断增加。在73环的范围内，管片的净容差累积最大值为-1.4毫米；这说明盾构施工对隧道衬砌结构产生了一定的压缩变形。分析了造成这种现象的原因，认为是盾构施工过程中对周边土的扰动，引起了土压力的作用，从而引起了管片的变形。注浆压力与注浆量的不均匀性也会造成管片的受力不均匀，从而使管片产生变形。

表1 地表沉降数据特征分析

监测点号/日期	2024.12.11	2024.12.12	2024.12.13	2024.12.14	2024.12.15	对应环号
	累计变化变量 (mm)					
DBC-T08-01	-1.14	-0.92	-0.68	-0.92	-0.95	47环
DBC-T08-02	-1.47	-1.52	-1.39	-1.46	-1.65	47环
DBC-T08-03	-3.15	-2.95	-2.92	-2.97	-3.23	47环

备注：“-”为沉降，“+”为抬升。

表2 管片结构变形数据

监测点号/日期	2024.12.11	2024.12.12	2024.12.13	2024.12.14	2024.12.15	对应环号
	累计变化变量 (mm)					
GGDC-01	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	56环
GJKJ-01	-0.3	-0.2	-0.5	-0.5	-0.7	56环
GDC-TZ-08	-0.4	-0.5	-1.1	-0.5	-0.5	73环
JKJ-TZ-08	-0.7	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	73环

4.3 管片与台车应力数据分析

右线盾构施工期间，管片及支护结构受力均有较大变化。结果表明，在盾构隧道施工过程中，管片结构表层的最大变形值为-83.29 $\mu\epsilon$ ；分析了造成这种现象的原因，认为是盾构施工过程中引起的土压力再分配，从而引起了管片及台车内的应力改变。注浆压力与注浆量的不均匀性还会造成管片及支护台车的受力不均匀，从而产生应力的改变。

通过对左56环隧道管片及支护台车的微观应变量的计算，得出了盾构穿越该段隧道后，管片结构表层的微观应变为28.27 $\mu\epsilon$ ，而台车的表层为-40.67 $\mu\epsilon$ ，两者的微观变形与应力发展趋势基本吻合。这说明，盾构隧道施工时，管片与支撑补强车是一个整体，它们的受力状况是相关的。管片和支撑加固台车的应力状态直接反映了其结构的受力情况，对保障隧道施工安全具有重要意义。

5 掘进参数与沉降变化关联建模

5.1 盾构掘进参数选取与监测

在盾构 TBM 交叠段隧道施工中,精确选择与有效监测开挖参数对隧道变形演化研究至关重要。刀盘转速直接影响掘进效率和地层切割效果:转速过高会加剧刀具磨损和土体扰动,过低则降低掘进效率。通过速度传感器实时监测刀盘转速,并将数据传送至控制系统,可实现准确记录与调控。

掘进速度关系施工进度与地层扰动。在软土中过快推进可能导致土体失稳,引发地表沉降或隧道变形;在硬岩中则受岩石硬度与刀具性能制约。借助位移传感器与测速装置实时监测推进速度,可为不同地质条件下的掘进控制与模型建立提供数据支持。

土仓压力对维持开挖面稳定至关重要。压力过低可能引起土体坍塌和地表沉降,过高则导致土体过度挤压和异常变形。通过压力传感器实时监测土仓压力,可及时进行调整。

注浆压力与注浆量共同影响隧道周围土体的填充效果。压力或注浆量不足会导致填充不密实,引发地层沉降。采用压力与流量传感器对注浆过程进行同步监测,有助于保证注浆质量。

5.2 建立相互影响趋势分析模型

在此基础上,提出了一种基于多元线性回归的隧道开挖变形预测模型。以一种基于多个自变量(隧道开挖)的隧道开挖建立变形模型,并利用实测资料拟合出各因素间的定量关系。首先,采集并分析盾构施工过程中的刀盘转速、掘进速度、土仓压力、注浆压力、注浆量等施工参数,以及地表沉降、管片沉降、管片沉降等沉降观测资料。再通过对采集到的数据进行预处理,去除离群点、遗漏点,保证了数据的准确、完整。

然后,将掘进参数作为自变量,沉降变化数据作为因变量,运用多元线性回归分析方法进行建模。通过最小二乘法求解回归方程的系数,得到掘进参数与沉降变化之间的数学表达式。假设地表沉降为因变量,刀盘转速为,掘进速度为,土仓压力为,注浆压力为,注浆量为,则回归方程可表示为,其中为回归系数。为了验证模型的准确性,我们采用交叉验证的方法。将收集到的数据随机分为训练集和测试集,用训练集数据对模型进行训练,得到回归方程的系数;然后用测试集数据对模型进行验证,计算模型的预测误差。通过多次交叉验证,评估模型的稳定性和准确性。

如果模型的预测误差在可接受范围内,则说明模型能够较好地反映掘进参数与沉降变化之间的相互影响趋势;如果预测误差较大,则需要对模型进行优化,如增加数据量、调整自变量的选择或采用其他建模方法。

5.3 模型结果分析与验证

利用多元线性回归模型,得出了隧道施工工艺参数与地面沉降的量化关系。研究发现,随着开挖速率的增加,地面沉降也随之增大。这主要是由于高速开挖会对周边土壤造

成强烈的干扰,进而造成地层应力再分配,造成地面沉降增加。每提高 1 个单位的开挖速率,地面沉降就会增大 0.5 个单位。

结果表明,在一定范围内,土仓压力与地面沉降之间存在着显著的负相关性,在一定程度上增加土槽压力,可有效降低地面沉降;每增加一个单位的土槽压力,地面沉降就会减少 0.3 个单位。注浆压力、注浆量与地面沉降之间存在较大的负相关性;注浆压力每提高 1 个单位,地面沉降可减少 0.2 个单位;注水量每增加 1 个单位,地面沉降将减少 0.15 单位。

通过与实测资料的比较,对模式预报结果进行检验。在一个实测断面上,实测地面沉降 15.2 毫米,模式预报 14.8 毫米,二者之间的相对误差在 2.6% 以内,表明该模式的预报结果更接近于实际。同时,利用其它实际工程实例,对所建立的模型进行检验,则说明该模型具有较高的可信度和普适性。

6 结论

本项目在已有工作基础上,通过对盾构施工过程中盾构施工过程中的观测数据、盾构施工参数、地质条件、设计图纸等数据进行综合分析,构建盾构施工过程中盾构施工参数与地表沉降之间的耦合关系,揭示盾构掘进过程中盾构施工参数与地表沉降之间的相互作用机制。就交叉区段而言,地面沉降表现出与盾构施工紧密相关的变化特点。隧道掘进过程中,地面沉降变化较大,各监测点沉降量及变形速度也各不相同。盾构施工还会对管片结构的拱顶沉降及容重值产生一定的影响,在部分区段,随着隧道开挖的推进,管片的变形会逐渐增加。在盾构施工过程中,支承补强车的沉降与收敛均受盾构施工的影响,使其变形在某一区间内发生变化。

隧道开挖参数对地表沉降的影响较大。随着开挖速率的提高,由于高速开挖对周边土壤造成了很大的干扰,从而改变了土体的受力状态。结果表明,在基坑开挖过程中,土体的土槽压力与地面沉降之间存在着显著的负相关关系,适当的增加土槽压力可以有效地降低地面沉降,保持基坑表面的稳定性。随着灌浆压力的增大,灌浆量的增大,围岩的沉降量也随之降低。在此基础上,提出了一种基于人工神经网络的隧道开挖变形预测方法。

参考文献

- [1] 李志军,王明年,于丽,等.护盾式TBM施工下穿河流破碎带稳定性分析及变形控制技术[J].铁道科学与工程学报, 2024, 21(11).
- [2] 杨泰华,李林锋,龚建伍.复合地层EPB/TBM双模盾构掘进参数变化规律及相关性分析[J].施工技术(中英文), 2023, 52(13):72-78.
- [3] 钱七虎,胡小强,李树忱,et al.中国盾构隧道工程关键技术的新进展综述[J].隧道建设(中英文), 2024, 44(5):897-926.
- [4] 张蒙祺,勾斌,邓雨,等.新型TBM螺旋槽滚刀破岩性能及接触行为研究[J].机械工程学报, 2023, 59(5):259-270.