

地铁盾构施工引起的地表沉降规律与预测模型优化

章昊

中国水利水电第七工程局成都水电建设工程有限公司 四川 成都 611130

摘要：本文探讨了地铁盾构施工引起的地表沉降规律及预测模型优化。概述了地铁盾构施工工艺，包括盾构机的工作原理和主要流程。详细介绍了地表沉降监测方法、数据收集与处理以及沉降规律的初步分析。深入分析了地铁盾构施工引起的地表沉降规律，包括横断面和纵断面沉降曲线的特征。最后，回顾了现有预测模型，选择了机器学习算法作为主要预测方法，并进行模型的初步构建与验证，为地铁盾构施工地表沉降的预测和控制提供理论支持和技术参考。

关键词：地铁盾构施工；地表沉降规律；预测模型优化

1 地铁盾构施工工艺概述

1.1 盾构机的工作原理

盾构机是一种专门用于地下隧道施工的大型机械设备，其工作原理基于盾构法施工技术。盾构机主要由盾构壳体、刀盘、推进系统、出土系统、拼装系统、导向系统、注浆系统和后配套系统等部分组成。在施工过程中，盾构机通过刀盘上的刀具对地层进行切削或破碎，同时利用推进系统的千斤顶产生推力，推动盾构壳体沿隧道设计轴线前进。出土系统负责将切削下来的土体或岩石碎块运出隧道，而拼装系统则负责在盾构机推进的同时，安装预制好的隧道衬砌管片，以形成隧道的永久支护结构。注浆系统用于在衬砌管片背后注浆，填充空隙并固结地层，增强隧道的稳定性。导向系统则确保盾构机在掘进过程中的方向控制，保证隧道的精确度。

1.2 盾构施工的主要流程

盾构施工的主要流程包括始发段施工、正常掘进段施工和到达段施工三个阶段。在始发段施工中，首先需要完成始发井的建设和盾构机的组装调试，然后利用始发基座和反力架等设备，将盾构机从始发井推入地层开始掘进。正常掘进段施工是盾构施工的主体部分，此阶段盾构机按照预定的隧道设计轴线，通过刀盘的旋转切削地层，同时利用推进系统产生的推力不断推进。在掘进过程中，需要实时监测盾构机的姿态和掘进参数，如推进速度、刀盘扭矩、泥水压力等，以确保施工的安全和质量。出土系统则不断将切削下来的土体或岩石碎块运出隧道，而拼装系统则同步安装隧道衬砌管片^[1]。当盾构机掘进至隧道设计终点附近时，进入到达段施工。此阶段需要完成盾构机的接收工作，包括将盾构机推入到达井、拆卸并转运盾构机以及处理隧道端部的收尾工作等。整个盾构施工过程需要高度的技术水平和精细的管

理，以确保施工的安全、质量和效率。

2 地铁盾构施工地表沉降监测与数据分析

2.1 监测方法

地铁盾构施工引起的地表沉降是施工过程中必须密切关注的重要指标之一，它直接关系到隧道的稳定性、周边建筑物的安全和施工的整体质量。为了准确、及时地获取地表沉降数据，需要采用科学、合理的监测方法，并配备先进的监测仪器。目前，地铁盾构施工地表沉降监测主要采用以下方法：水准测量法、GPS测量法、全站仪测量法以及倾斜仪测量法等。水准测量法是通过在地表设置沉降观测点，利用精密水准仪进行周期性的高程测量，以监测地表沉降的变化。GPS测量法则是利用全球定位系统技术，通过在地表设置GPS接收机，实时获取地表沉降点的三维坐标，进而计算沉降量。全站仪测量法是通过全站仪对地表沉降点进行角度和距离测量，再通过计算得到沉降量。而倾斜仪测量法则是通过在建筑物或土体内部安装倾斜仪，监测其倾斜角度的变化，从而间接反映地表沉降的情况。

2.2 监测数据收集与处理

在地铁盾构施工地表沉降监测过程中，收集到的监测数据需要经过一系列的处理和分析，才能得出沉降规律和趋势。监测数据的收集主要包括沉降观测点的初始高程测量和后续周期性高程测量。在每次测量结束后，需要对测量数据进行整理，包括检查测量数据的完整性、准确性和可靠性，剔除异常数据和错误数据，以保证后续分析的准确性。对于收集到的监测数据，需要进行如下处理：首先，对原始数据进行清洗和整理，剔除无效或异常数据；然后，将处理后的数据按照时间顺序进行排列，形成时间序列数据；接着，利用统计方法对数据进行描述性分析，包括计算沉降量的平均值、标准

差、最大值和最小值等统计指标，以了解沉降量的分布情况和变化趋势；最后，利用数学模型对数据进行拟合和预测，以揭示沉降规律和趋势^[2]。

2.3 沉降规律初步分析

一般来说，地表沉降主要受到盾构施工引起的地层扰动、土体固结、地下水位变化等多种因素的影响。在盾构掘进初期，由于盾构机的推进和刀盘的切削作用，会对地层产生较大的扰动，导致地表沉降速度较快。随着掘进深度的增加和土体的固结作用，地表沉降速度会逐渐减缓。地下水位的变化也会对地表沉降产生影响。当地下水位下降时，土体中的有效应力增加，会导致地表沉降加速；而当地下水位上升时，土体中的孔隙水压力增加，会减缓地表沉降速度。另外，地表沉降还与盾构施工参数、地质条件、地下管线布局等因素有关。例如，盾构机的推进速度、刀盘的扭矩、注浆压力等参数都会影响地表沉降的速度和范围。而地质条件的差异，如土壤的类型、密度、含水量和强度等，也会对地表沉降产生显著影响。在软土地区，由于土壤强度低、压缩性高，地表沉降往往更为显著。管线密集、材质脆弱或老化严重的区域，更容易受到地表沉降的影响，出现管线破损、漏水等问题。通过对监测数据的深入分析，可以进一步揭示地表沉降的空间分布特征和时间演化规律。在空间分布上，地表沉降通常呈现出以隧道轴线为中心、向两侧逐渐减小的趋势。在隧道上方，由于盾构掘进引起的地层扰动最为直接和显著，地表沉降量通常最大。

3 地铁盾构施工引起的地表沉降规律

3.1 横断面沉降曲线分析

在横断面沉降曲线的分析中，关注的是垂直于隧道轴线方向的地表沉降情况。横断面沉降曲线通常呈现出一种类似正态分布的形态，即隧道上方的沉降量最大，向两侧逐渐减小。盾构机掘进时，其前端的刀盘会对土体进行切割，导致开挖面的应力释放和土体变形。随着盾构机的推进，这种变形会逐渐向上传递至地表，形成沉降槽。在隧道中线上方，由于应力释放最为集中，地表沉降量通常达到最大。而沿着隧道轴线两侧，由于土体受到的扰动逐渐减弱，地表沉降量也随之减小。在实际工程中，横断面沉降曲线的形态还会受到多种因素的影响，如地质条件、盾构施工参数、注浆效果等^[3]。在软土地层中，由于土体强度低、压缩性大，地表沉降往往更为显著，沉降槽的宽度和深度也更大。而在硬土地层中，由于土体强度较高，地表沉降相对较小，沉降槽的形态也更为狭窄。盾构施工参数的调整也会对横断面沉

降曲线产生影响。例如，提高盾构机的推进速度可能会加剧地表的瞬时沉降，而优化注浆工艺则有助于减缓地表沉降速度并促进沉降稳定。

3.2 纵断面沉降曲线分析

纵断面沉降曲线关注的是沿着隧道轴线方向的地表沉降情况，在盾构掘进初期，由于开挖面的应力释放和土体变形，地表沉降速度较快，沉降量逐渐增加。随着盾构机的持续推进，地表沉降速度会逐渐减缓，沉降量增加的趋势也会趋于平稳。当盾构机掘进至隧道设计终点附近时，地表沉降速度会再次加快，直至盾构机完全穿越该区域并停止掘进。在纵断面沉降曲线中，还可以观察到一些特殊的沉降特征。例如，在盾构机刀盘刚刚切入土体时，由于土体受到的瞬时扰动较大，地表可能会出现一个小的沉降突跳。而在盾构机尾部脱离开挖面后，由于土体的固结作用，地表沉降速度会暂时减缓，形成所谓的“滞后沉降”。纵断面沉降曲线还会受到地下水位变化、地下管线布局等多种因素的影响。当地下水位上升时，土体中的有效应力减小，地表沉降速度会减缓；而当地下水位下降时，土体中的有效应力增加，地表沉降速度会加快。同时，地下管线的存在也会限制土体的变形空间，从而影响地表沉降的规律和范围。

3.3 沉降规律总结

综合以上分析，我们可以得出地铁盾构施工引起的地表沉降具有以下规律：第一，地表沉降在横断面上呈现出类似正态分布的形态，隧道上方的沉降量最大，向两侧逐渐减小。这种沉降形态受到地质条件、盾构施工参数和注浆效果等多种因素的影响。第二，在纵断面上，地表沉降速度随着盾构机的掘进先快后慢，逐渐趋于平稳。同时，还会出现一些特殊的沉降特征，如瞬时沉降突跳和滞后沉降等。这些特征反映了盾构施工对土体的扰动程度和土体的固结过程。第三，地表沉降还受到地下水位变化和地下管线布局等多种因素的共同影响。在实际工程中，需要综合考虑这些因素对地表沉降的影响程度，并采取相应的措施进行预防和治理。

4 地铁盾构施工地表沉降预测模型构建

4.1 现有预测模型回顾

在地铁盾构施工地表沉降预测领域，已存在多种预测模型，这些模型基于不同的理论和方法，试图准确预测施工引起的地表沉降。现有的主要预测模型包括经验公式法、数值模拟法、机器学习算法等。经验公式法通常基于大量的工程实践数据，通过统计分析得出地表沉降与盾构施工参数之间的关系，如Peck公式和O'Reilly-Newland公式。这些公式考虑了隧道尺寸、土体性质、施

工参数等多种因素，但往往依赖于特定的地质条件和施工环境，对于复杂地质条件或特殊施工情况的适用性有限。数值模拟法则通过建立数学模型，模拟盾构掘进过程中土体的应力应变状态，进而预测地表沉降。这种方法能够考虑多种因素的影响，包括土体非线性、多相介质耦合等，具有较高的理论精度。然而，数值模拟法的计算量大，需要高精度的地质勘察数据和复杂的建模过程，且结果易受参数设置和边界条件的影响^[4]。近年来，随着大数据和人工智能技术的发展，机器学习算法也被应用于地铁盾构施工地表沉降预测。

4.2 预测模型选择与设计

在构建地铁盾构施工地表沉降预测模型时，需要综合考虑模型的准确性、可行性、稳定性和适用性。基于对现有预测模型的回顾和分析，本文选择机器学习算法作为主要预测方法。机器学习算法能够处理非线性、非参数化问题，适用于复杂的地铁盾构施工地表沉降预测；机器学习算法具有强大的数据分析和模式识别能力，能够从大量的历史数据中提取有用的信息，提高预测的准确性；随着计算技术的发展，机器学习算法的计算效率和稳定性也在不断提高，使得其实用性得到增强。在算法选择上，考虑到支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、神经网络（NN）等算法在预测领域的广泛应用和良好性能，本文将对这些算法进行比较和评估，选择最适合地铁盾构施工地表沉降预测的算法。为了进一步提高预测的准确性和稳定性，将采用集成学习方法，将多个算法的结果进行组合和优化。在模型设计上，要充分考虑地质条件、施工参数、地下管线布局等多种因素的影响。将收集大量的工程实践数据，包括地质勘察报告、盾构施工记录、地表沉降监测数据等，作为模型训练和验证的基础。同时，将采用特征选择和特征工程方法，对原始数据进行预处理和变换，以提高模型的性能。

4.3 模型初步构建与验证

在完成预测模型的选择和设计后，需要进行模型的初步构建和验证，将收集到的历史数据划分为训练集和测试集，用于模型的训练和验证。训练集用于训练模型，使其能够学习到数据中的规律和特征；测试集则用于评估模型的性能，确保其在未知数据上的准确性和稳定性。在模型构建过程中，需要对算法进行参数调优，以提高模型的预测能力。可以采用交叉验证、网格搜索等方法，对算法的参数进行搜索和优化，找到最优的参数组合。采用特征选择和特征工程方法，对原始数据进行预处理和变换，以提高模型的性能和稳定性。完成模型构建后，在测试集上进行验证和评估。可以采用均方误差（MSE）、均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）等指标，对模型的预测结果进行量化评估。同时，可以通过可视化方法，如绘制预测结果与真实值的对比图，直观地展示模型的预测性能。

结束语

综上所述，地铁盾构施工引起的地表沉降是一个复杂而重要的问题。通过对地表沉降规律的深入分析和预测模型的优化构建，可以更好地理解沉降现象，预测沉降趋势，为工程实践提供科学依据。未来，随着技术的不断进步和数据的日益丰富，地铁盾构施工地表沉降预测模型将更加精准和高效，为城市地铁建设的安全和可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]周祖斌.对地铁盾构施工引起的地表沉降研究分析[J].装备维修技术,2020(02):94-95.
- [2]厉风,李宏.智慧渊.地铁车站深基坑施工中基底隆起规律及控制关键技术研究[J].现代交通技术, 2020, 17(6): 89-92.
- [3]冯慧君,俞然刚.双线隧道盾构掘进对地表沉降影响的数值分析[J].铁道工程学报, 2019, 36(3): 78-83.
- [4]李俊威.地铁盾构法施工中盾构机转接始发技术研讨[J].工程建设与设计,2019(15):208-209,212.