

Prediction of surface settlement caused by shield tunnel construction

Pan Wang

Shaanxi Traffic Control Tongyu Traffic Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710077, China

Abstract

In the process of shield tunnel construction, it is easy to cause stratum disturbance and surface structure displacement, among which surface settlement, as one of the core risks, is directly related to the safety of surrounding buildings and the stability of urban operation. It is of great practical significance to effectively predict the variation trend of surface settlement for construction risk control and optimal design. Starting with the mechanism of settlement caused by shield construction, this paper systematically sorts out the influence of formation disturbance, support control and construction parameters on settlement, and then summarizes and compares mainstream prediction theories and technical paths, focusing on analyzing the construction logic of settlement prediction models applicable to different geological conditions, and combining real-time monitoring data of construction process. This paper discusses the dynamic prediction strategy based on multi-source information fusion, and puts forward the practical application of settlement prediction results in risk warning and construction regulation, in order to provide theoretical support and technical basis for the settlement control of shield construction.

Keywords

shield construction; Land surface settlement; Settlement mechanism; Prediction model; Risk early warning

盾构隧道施工引起的地表沉降预测

王攀

陕西交控通宇交通研究有限公司, 中国·陕西 西安 710077

摘要

盾构隧道施工过程中易引发地层扰动、地表结构位移等问题, 其中地表沉降作为核心风险之一, 直接关系到周边建筑安全与城市运行稳定。有效预测地表沉降变化趋势, 对施工风险控制和优化设计具有重要现实意义。文章从盾构施工引起沉降的机制入手, 系统梳理地层扰动、支护控制与施工参数对沉降的影响, 进而对主流预测理论与技术路径进行归纳与比较, 重点分析适用于不同地质条件下的沉降预测模型构建逻辑, 结合施工过程实时监测数据, 探讨基于多源信息融合的动态预测策略, 提出沉降预测结果在风险预警与施工调控中的实际应用方式, 以期对盾构施工沉降控制提供理论支撑与技术依据。

关键词

盾构施工; 地表沉降; 沉降机制; 预测模型; 风险预警

1 引言

盾构隧道作为地下空间开发的重要方式, 其广泛应用推动了城市交通、市政基础设施等领域的发展。然而, 在盾构掘进过程中, 由于地层扰动、支护延迟、注浆不足等因素, 常伴随地表沉降现象, 轻则引发地面裂缝, 重则危及建筑结构安全, 诱发环境灾害。因此, 如何准确预测盾构施工引起的地表沉降, 已成为工程界关注的核心课题。现有研究多集中于经验模型与理论模拟的应用, 缺乏对不同地质条件下动态沉降行为的系统分析。本文围绕沉降预测展开深入探讨, 着眼于预测精度提升与实用性增强, 力求建立一套可反馈、

可调控的地表沉降预测体系。

2 盾构隧道施工对地表沉降的影响机制

2.1 土体扰动与支护滞后的沉降成因

盾构隧道施工过程中, 掘进机刀盘对前方地层的切削和扰动会破坏原有地质结构的应力平衡状态, 导致土体体积压缩和应力释放, 引发地层沉降。同步支护与注浆系统若存在响应滞后, 无法及时填补掘进过程中产生的空隙, 将进一步加剧土体下沉趋势。沉降不仅发生于施工当时, 也会在施工结束后一段时间内持续发展, 形成滞后性沉降带。地层扰动与支护不匹配形成的空洞及压力差, 使得浅层和深层土体发生不同程度的塑性变形和剪切破坏, 最终表现为地表不均匀沉降。盾构推进稳定性与围岩控制能力直接决定了沉降程度和分布形式。

【作者简介】王攀(1989-), 男, 中国陕西礼泉人, 本科, 工程师, 从事桥梁全生命周期监测及病害预防研究。

2.2 地层特性对沉降反应的调节作用

地层物理性质与沉降行为具有密切关联，不同类型的土层在受扰动后表现出截然不同的沉降响应规律。软弱饱和黏土具有较高的可压缩性和低渗透性，受力后易产生较大塑性变形与滞后沉降，需长时间完成孔隙水压力消散。砂性土层则因颗粒间结构较稳定，受扰动时下沉速率较快但范围相对集中，沉降过程更为剧烈。夹层结构中的不同土层对盾构扰动响应不一致，易在界面处引发剪切失稳，形成不规则沉降带。地层的非均质性和分布的不连续性增加了沉降预测的复杂度，对建模精度和参数选取提出更高要求。理解地层性质是精准预测的基础。

2.3 施工参数变化引起的沉降响应

盾构施工参数变化直接影响掘进对地层扰动的程度，从而诱发不同的地表沉降响应。推进速度过快可能导致前方地层未充分释放应力即被切削，造成土体过度扰动和沉降集中；推进速度过慢则易引起支护延迟、注浆不及时，形成沉降拖尾现象。土压平衡盾构中的舱压控制、刀盘转速、螺旋输送速度等参数相互关联，若调控不当，将引起压力波动、掏空现象与渗流破坏，诱发非对称沉降。注浆材料配比、注浆压力及时间控制决定了空隙填充效果，是影响施工沉降控制的关键环节。施工参数实时调整能力决定了盾构沉降控制的动态响应水平。

3 地表沉降预测的理论模型与技术方法

3.1 Peck 理论模型在盾构沉降中的适用性分析

Peck 理论模型基于正态分布假设，提出地表沉降槽呈钟形曲线，沉降量与隧道轴线距离呈规律性变化关系。该模型参数少、形式简洁，在单一地质条件、均质土层与浅埋深盾构工程中表现出较高适用性，可有效描述地表最大沉降值与沉降槽宽度的关系。然而，该模型未能充分考虑多层地质、地下水扰动、施工参数波动等实际因素，在复杂地质条件下预测误差较大。模型中关键参数如沉降槽宽度系数通常需依赖现场监测反推，存在较强经验依赖性。对于深埋盾构、大断面掘进或穿越复合地层的项目，Peck 模型需要进行修正与扩展，或作为预测初步估算的辅助工具。其适用性受限于地层结构与施工控制的可预测性。

3.2 反演法与拟合法在沉降预测中的应用比较

反演法通过现场实测数据与理论模型之间的误差最小化过程，动态获取影响沉降的关键参数，具有较强适应性与可更新能力。其优点在于能够基于当前施工环境反馈不断优化预测精度，但在初始数据不足或数据质量较差时易出现参数漂移，影响预测稳定性。拟合法则主要依靠建立经验关系式或数学函数对沉降变化进行拟合，模型结构清晰、实现简便，适合工程早期或数据积累阶段使用，但缺乏对复杂影响因素的响应机制，预测精度受地质波动影响较大。反演法更依赖数学建模与数值分析能力，拟合法则偏向数据处理与函

数构建，两者在实际应用中常结合使用，以实现沉降曲线形态与演化趋势的双重把握，提升整体预测效能。

3.3 基于地质条件的分区预测策略构建

盾构隧道沿线往往穿越多种地质结构，其差异性决定了沉降行为在空间上的非一致性。基于地质条件的分区预测策略强调在不同地层段采用差异化建模方式，以提高预测模型的精度与适应性。实施过程中需结合地质勘察成果将隧道路径划分为多个地质单元段，并针对每段建立符合其沉降响应特征的子模型，参数设定与输入变量依据各区段地层性质、地下水情况与施工方式独立配置。分区建模可有效规避整体模型因过度简化导致的误差积累，有助于构建空间分辨率更高的沉降预测体系。在地层界面处还需引入边界协调机制，确保预测结果在不同地段间具有连续性与稳定性，增强模型对复杂地质环境的适配能力。

4 盾构施工阶段沉降监测数据的预测模型构建

4.1 沉降监测数据预处理与特征提取

盾构施工阶段的沉降监测数据通常由自动化沉降仪、水准测量系统、全站仪等设备获取，数据频率一般为每小时 1 次，每日形成 24 个数据点。受施工环境与设备精度影响，原始数据常包含缺失值、异常值与漂移信号，需通过插值法、滑动平均法与小波去噪等技术进行清洗处理。在一段典型施工期间内对某城市盾构段落的 2400 组沉降数据进行统计，发现其中存在 2.8% 的异常波动点与 3.2% 的连续漂移段。为建立有效预测模型，需对处理后的数据进行特征提取，常用指标包括日均沉降量、沉降速率变化率、最大沉降点位置偏移值等。以某项目为例，提取出的最大沉降速率达 2.3mm/d，典型沉降曲线中沉降槽宽度在 14.6m 左右，特征序列展现出强烈的阶段性与周期性变化规律，这为模型训练提供了稳定的输入特征基础，显著提升预测能力与泛化效果。

4.2 时间序列分析方法在沉降趋势预测中的运用

地表沉降数据具有明显的时间相关性，采用时间序列分析方法进行趋势预测可有效提取其动态变化规律。在某城市一段 120m 盾构隧道施工过程中，对连续 90 天的沉降数据进行分析，样本总量达 2160 条。通过 ADF 检验结果为 -3.51，p 值为 0.014，表明数据序列平稳性良好。构建 ARIMA 模型进行趋势拟合时，选定参数为 ARIMA(2,1,1)，模型残差均值为 0.026mm，残差标准差为 0.21mm，说明拟合效果优良。在不同时间窗口下进行滚动预测，7 天滑动窗口预测结果与实测数据之间平均相对误差为 6.2%。在施工速度变缓阶段，沉降趋势由下沉转为趋稳，模型能够及时反映该拐点，体现出较高的灵敏度。时间序列方法在捕捉短期趋势波动方面具有优势，尤其适用于沉降发展初期或施工参数调整频繁阶段的数据预测，模型构建便捷，计算效率高。

4.3 多源数据融合在动态预测模型中的集成机制

盾构施工引起的地表沉降受多种因素联合作用，单一

数据源模型难以全面反映其复杂演化过程。为提升预测精度,需构建多源数据融合的动态预测模型,将监测数据、地质参数与施工过程信息集成建模。在某市中心盾构区段,采集了监测沉降数据 3200 组、地质剖面数据 22 条、施工参数变动记录 68 项。以集成学习为框架,采用 XGBoost 模型对数据进行训练,输入变量包括渗透系数、掘进速度、注浆压力、前方地层类别等 13 个维度。模型训练后,在 120 次预测任务中,平均绝对误差为 0.39mm,显著优于传统线性回归模型的 0.74mm。为进一步优化动态性,结合递归神经网络结构引入时序因子,使得模型对沉降速率突变的响应延迟由 3 小时缩短至 1 小时内。集成机制实现了不同数据源在统一特征空间内的协同响应,通过模型加权策略提升预测稳定性与泛化能力,增强了复杂工况下的适应性。

5 地表沉降预测结果的反馈调控与风险预警

5.1 沉降预测值与实测值的动态修正机制

地表沉降预测模型在实际施工过程中常因地层扰动变化、施工操作差异或数据输入误差而产生预测偏差,需建立基于实测数据的动态修正机制。该机制通过实时采集监测点沉降数据,将实测值与预测结果进行残差分析,运用最小二乘法或卡尔曼滤波算法对模型参数进行修正迭代。以某地铁盾构工程为例,沉降预测模型在施工第 20 天出现连续偏差,最大误差达 1.6mm,通过引入动态修正算法后,在随后 10 天内误差逐步降低至 0.3mm 以内。系统根据误差趋势自动调整模型系数,使预测曲线更贴近实际沉降演化过程。动态修正不仅提高模型精度,还可实现预测结果的连续性与施工控制指令的同步更新,形成闭环控制体系。

5.2 施工过程调控对沉降控制效果的反馈评价

盾构掘进参数与沉降控制效果之间存在高度耦合关系,对施工过程中的参数调整进行反馈评价是优化沉降控制的重要环节。通过沉降监测数据与施工日志比对,可识别不同参数调控措施对沉降变化的影响程度。在某盾构项目中,当推进速度从 32mm/min 调整至 25mm/min 后,最大沉降值下降了 28.4%,注浆压力提升 0.15MPa 后,沉降槽宽度由 16.8m 缩减至 12.3m。对比实施前后的沉降曲线发现,沉降变化速率呈现显著下降趋势。系统化的反馈机制依据沉降响应结果调整参数配置,提升调控措施的精准性。通过建立调控措施与沉降响应的因果链,形成参数调节与沉降监测之间的动态联动,为施工过程中实时决策提供量化支撑。

5.3 沉降预警阈值设定与应急响应体系构建

盾构施工过程中建立科学的沉降预警机制是保障工程安全与周边结构稳定的关键。预警阈值设定需依据历史数据统计、结构容许变形标准与地质风险等级等多维因素综合制定。以某市盾构段为例,依据周边建筑结构特点,设定 I 级预警阈值为沉降速率大于 1.2mm/d, II 级为 0.8mm/d 至 1.2mm/d 之间。当监测值接近设定阈值时,系统自动触发预警模块,推送风险信息至项目管理平台,并联动施工参数调控程序进入限制模式。应急响应体系包括信息传递机制、专家会商流程、应变施工方案与现场人员调度四个核心模块,确保突发沉降事件在 1 小时内完成响应。该体系实现预测—判断—响应闭环运转,提升工程应对不确定性风险的能力。

6 结语

盾构隧道施工引起的地表沉降问题具有显著的工程复杂性与不确定性,其预测与控制已成为城市地下空间开发中不可回避的技术课题。通过深入分析施工扰动机制、地层响应特性与施工参数变化规律,结合多种预测模型的理论基础与应用方式,可实现对沉降演化趋势的有效研判。在实际工程中,基于监测数据的动态预测模型与多源信息融合策略逐步展现出较强的实用性与准确性,为沉降控制提供了关键技术支撑。沉降预测结果的合理应用不仅提升了施工过程的调控效率,也为风险预警与应急响应体系的构建提供了决策依据。未来研究应进一步拓展模型的适应范围,加强对复杂地质条件下非线性沉降行为的刻画能力,推动沉降预测从静态模拟向智能化动态控制转变,实现地下工程施工全过程的高精度风险管控。

参考文献

- [1] 徐超兵,傅鹤林,曹桂乾,杨令航,张召峰.基于优化的Mindlin解的盾构施工引起地表变形预测研究[J].公路工程,2025,50(01):8-16+40.
- [2] 郜新军,魏文字,李珊珊,苏庆辉.洛阳盾构隧道地表沉降Peck公式参数修正[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(01):75-81.
- [3] 孙益鑫.基于深度学习的大直径盾构掘进地表沉降预测方法研究[D].导师:周宗青.齐鲁工业大学,2024.
- [4] 王泽盼.机器学习驱动的盾构隧道施工地表沉降预测和控制研究[D].导师:刘超.广州大学,2024.
- [5] 王雷.小半径曲线盾构隧道掘进对周围复杂环境影响研究[D].导师:祝磊.安徽建筑大学,2024.