

超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型研究

张伟杰

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450052

摘要：本文聚焦于超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型研究。通过对施工过程中的关键影响因素进行深入分析，提出了有效的地层变形控制措施，并构建了基于先进算法的预测模型。研究结果表明，所提措施和模型能够显著提高施工安全性，降低地层变形风险，为超大直径泥水盾构施工提供科学依据和技术支持。

关键词：超大直径泥水盾构；地层变形控制；预测模型；施工安全性；控制措施

引言：随着城市化进程的加速，地下空间的开发利用日益受到重视。超大直径泥水盾构作为一种高效、安全的隧道掘进技术，在城市地铁、水利工程、越江隧道等领域得到广泛应用。然而，超大直径泥水盾构施工过程中地层变形问题一直是工程界的难点和热点。地层变形不仅影响施工进度和工程质量，还可能对周边环境造成严重影响。因此，研究超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型具有重要意义。

1 研究超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型的意义

1.1 研究背景与重要性

在现代化城市建设中，超大直径泥水盾构技术因其高效、环保、对地面交通影响小等优势，成为穿越复杂地质条件、构建大型地下空间的首选方法。然而，随着盾构直径的增大，施工过程中引起的地层变形问题愈发显著，这直接关系到施工安全性、周边建筑物的保护以及地下管线的安全运营。因此，研究超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型，对于确保工程顺利进行、保护周边环境具有重要意义。本研究旨在通过科学的方法，深入理解地层变形的内在机制，从而提出针对性的控制措施，并构建可靠的预测模型，为工程实践提供理论指导和技术支撑。

1.2 地层变形机理的深入分析

超大直径泥水盾构施工引发的地层变形是一个复杂的物理过程，涉及开挖面稳定性、盾构姿态控制、注浆压力与材料选择、地下水动态平衡等多个方面^[1]。第一，开挖面的稳定是控制地层变形的关键，需通过精确调整泥浆比重、粘度等参数来维持开挖面的水土压力平衡。第二，盾构姿态的微小偏差也可能导致地层应力分布不均，进而引发显著变形。第三，注浆工艺的合理设计对于地层加固和变形控制至关重要，注浆压力、注浆量以

及注浆材料的选择均需根据地质条件灵活调整。第四，地下水位的波动也会影响地层稳定性，因此需实时监测并采取相应措施保持地下水的动态平衡。通过深入分析这些影响因素，本研究力求揭示地层变形的内在规律，为后续的控制措施和预测模型建立基础。

1.3 有效的地层变形控制措施

基于地层变形机理的分析，本研究提出了一系列控制措施。（1）通过优化泥浆参数和推进速度，维持开挖面的稳定，减少因开挖卸载引起的地层沉降。（2），加强盾构姿态的实时监测与精确控制，及时调整掘进参数，避免盾构姿态偏差导致的地层应力集中。（3）采用先进的注浆技术和材料，提高注浆加固效果，减少注浆引起的地层隆起或沉降。（4）结合地下水管理策略，如设置降水井、调整注浆压力等，有效控制地下水位波动对地层稳定性的影响。这些控制措施的实施，旨在将地层变形控制在可接受范围内，确保施工安全。

1.4 预测模型的构建与应用

为实现地层变形的精准预测，本研究构建了基于数据挖掘和机器学习算法的预测模型。该模型综合考虑了施工参数（如盾构推进速度、泥浆参数）、地质条件（如土层类型、地下水位）、周边环境（如建筑物距离、地下管线布局）等多种因素，通过大量历史数据的训练，能够准确预测施工过程中可能发生的地层变形。预测模型的应用，不仅有助于提前识别潜在风险，制定针对性的应对措施，还能优化施工方案，降低工程成本。此外，该模型的成功构建，为类似工程的施工提供了可借鉴的预测方法和工具，推动了超大直径泥水盾构施工技术的进一步发展。

2 超大直径泥水盾构施工概述

2.1 泥水盾构工作原理

泥水盾构是一种广泛应用于地下隧道掘进的高级工

程技术,尤其在穿越软土地层、含水层或需要严格控制地面沉降的场合中展现出独特优势。其工作原理主要包括(1)刀盘掘进:泥水盾构的刀盘位于盾构机头部,由众多刀具组成,这些刀具在强大的扭矩驱动下旋转,切割前方的土体。刀盘设计需考虑地质条件,如土层的硬度、含水量等,以选择合适的刀具类型和布局。掘进过程中,刀盘不仅切割土体,还负责搅拌土体与泥浆,形成泥水混合物,为后续处理做准备。(2)泥浆循环:泥浆在泥水盾构施工中扮演至关重要的角色,它既是切割土体的介质,也是维持开挖面稳定的关键。泥浆通过管道从盾构尾部注入开挖面,与切割下来的土体混合后,由刀盘开口进入盾构内部的泥浆舱。在泥浆舱内,泥水混合物经过初步沉淀和分离,较为清洁的泥浆通过循环管道返回开挖面,形成一个连续的循环过程。这一循环不仅有助于维持开挖面的水土压力平衡,还能有效携带出土体颗粒,避免盾构前方堵塞。(3)土砂分离:从开挖面返回的泥水混合物含有大量土砂颗粒,需经过土砂分离系统处理。该系统通常包括旋流器、振动筛等设备,能够将泥水中的土砂颗粒有效分离,回收的土砂可根据需要再利用或处理排放。分离后的泥浆则返回泥浆循环系统,继续参与掘进过程。(4)泥水调制:为了确保泥浆的性能满足施工要求,需对其进行定期调制。这包括调整泥浆的比重、粘度、pH值等关键指标,以适应不同的地质条件和掘进需求。调制过程中,可能会添加膨润土、聚合物等添加剂,以增强泥浆的稳定性和携带能力。

2.2 施工特点与挑战

超大直径泥水盾构施工具有显著的特点和挑战。第一,穿越复杂地层是其一大特点,这要求盾构机具备强大的掘进能力和适应性,以应对多变的地质条件^[2]。第二,高水压环境下施工,对盾构机的密封性能和承压能力提出了更高要求,需确保盾构机内部不受外部水压影响,维持施工安全。第三,长距离掘进意味着盾构机需长时间连续作业,这对设备的耐久性、维护效率以及施工团队的管理水平提出了严峻考验。

2.3 地层变形影响因素

在超大直径泥水盾构施工过程中,地层变形是一个核心关注点,它直接影响到施工的安全性和周边环境的安全。地层变形受多种因素影响,其中开挖面水土压力平衡最为关键。维持开挖面的水土压力平衡,既能防止地面沉降,也能避免盾构前方土体坍塌。盾构姿态控制同样重要,盾构机的微小倾斜或偏转都可能引起地层应力的重新分布,导致地层变形加剧。另外注浆工艺对

地层变形有着直接影响。注浆材料的性能、注浆压力的选择、注浆时机的把握等,都会影响到地层加固效果和最终变形情况。合理的注浆工艺不仅能有效减少地层变形,还能提高隧道的稳定性和耐久性。

3 地层变形控制措施

在超大直径泥水盾构施工过程中,地层变形控制是确保施工安全、保护周边环境的关键环节。通过采取一系列有效的控制措施,可以显著减少地层变形,保障工程的顺利进行。

3.1 开挖面稳定管理

开挖面的稳定是防止地层变形的基础。在泥水盾构施工中,主要通过调整泥浆特性和控制推进速度来维持开挖面的稳定。(1)泥浆特性调整:泥浆的比重、粘度、pH值等特性对开挖面的稳定有着重要影响。通过实时监测泥浆的性能参数,并根据地质条件的变化及时调整泥浆配方,可以确保泥浆具有良好的携土能力和护壁效果。同时保持泥浆的适当循环速度和压力,有助于维持开挖面的水土压力平衡,减少地层变形。(2)推进速度控制:推进速度是影响地层变形的重要因素之一。过快的推进速度可能导致开挖面土体失稳,而推进速度过慢则可能增加地层暴露时间,同样不利于稳定。因此,应根据地质条件、泥浆性能以及盾构机的掘进能力,合理控制推进速度,确保开挖面的稳定。

3.2 盾构姿态与纠偏控制

盾构姿态的微小变化都可能对地层变形产生显著影响。因此在施工中需密切关注盾构姿态的变化,并采取合理的纠偏策略和控制措施^[3]。(1)实时监测与预警:通过安装传感器实时监测盾构姿态的变化,如倾斜、偏转等,一旦发现异常,立即进行预警,以便及时采取措施进行纠偏。(2)纠偏策略:根据实时监测数据,结合地质条件和施工参数,制定合理的纠偏策略。纠偏时,应遵循“小幅度、高频次”的原则,避免一次性大幅度调整盾构姿态,以减少对地层的影响。(3)控制措施:通过调整推进力、扭矩等施工参数,以及改变泥浆的注入位置和压力,实现对盾构姿态的精确控制。同时,加强盾构机的维护和保养,确保其性能稳定,减少因设备故障导致的姿态偏差。

3.3 注浆工艺优化

注浆工艺是控制地层变形的重要手段之一。通过优化注浆工艺,可以显著提高地层加固效果,减少地层变形。(1)同步注浆:在盾构掘进过程中,及时注入适量的注浆材料,填充盾构与地层之间的空隙,形成连续的加固层。注浆材料的选择应根据地质条件、注浆压力以

及注浆目的等因素综合考虑。(2)二次注浆:在同步注浆的基础上,根据地层变形监测数据,对关键部位进行二次注浆,进一步提高地层加固效果。二次注浆时,应选择合适的注浆压力和注浆量,避免对地层造成过大的压力。(3)注浆材料选择:注浆材料的选择应满足强度高、凝结时间短、流动性好等要求。同时注浆材料应具有良好的抗渗性和耐久性,以确保加固层的长期稳定性。(4)注浆压力控制:注浆压力是影响注浆效果的关键因素之一。过高的注浆压力可能导致地层破坏,而注浆压力不足则可能无法形成有效的加固层。因此,应根据地质条件和注浆材料的性能,合理控制注浆压力。

3.4 既有结构物保护

在近接施工中,保护既有结构物的安全是至关重要的。针对不同类型的既有结构物,应采取相应的保护措施。(1)设置隔离带:在掘进过程中,通过设置隔离带,减少盾构施工对既有结构物的影响。隔离带的宽度和位置应根据地质条件、结构物类型以及施工参数等因素综合考虑。(2)调整施工参数:根据既有结构物的位置和性质,调整盾构掘进的施工参数,如推进速度、注浆压力等,以减少对既有结构物的扰动。(3)加强监测与预警:对既有结构物进行实时监测,一旦发现异常变形或损坏,立即进行预警,并采取相应的补救措施。

4 地层变形预测模型研究

4.1 数据挖掘与特征选择

数据挖掘是构建预测模型的基础。首先,我们收集了大量的实际工程数据,包括施工参数(如推进速度、注浆压力、泥浆特性等)、地质条件(如土层类型、地下水位、地质构造等)以及周边环境(如既有结构物位置、地下管线布局等)的详细信息。通过对这些数据进行处理和清洗,我们确保了数据的准确性和完整性。在特征选择阶段,我们利用数据挖掘技术,如相关性分析、主成分分析等,从大量数据中筛选出对地层变形有显著影响的特征变量。这些特征变量不仅涵盖了施工参数和地质条件,还考虑了周边环境的复杂因素,从而确保了预测模型的全面性和准确性。

4.2 机器学习算法应用

在特征选择的基础上,我们采用了多种机器学习算法来构建预测模型。这些算法包括支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、神经网络(NN)等,它

们各自具有不同的优势和适用场景。支持向量机在处理高维数据和非线性关系方面表现出色,适用于处理复杂的地质条件和周边环境对地层变形的影响。随机森林则通过集成多个决策树来提高预测的准确性和鲁棒性,适用于处理大量数据和特征变量。神经网络则具有强大的学习能力和自适应能力,能够捕捉数据中的隐含规律和模式。为了选择最优的模型,我们采用了交叉验证、网格搜索等策略,对不同的机器学习算法进行了训练和测试。通过比较模型的预测精度、泛化能力等性能指标,我们最终选择了表现最佳的模型作为最终的地层变形预测模型。

4.3 模型验证与实际应用

为了验证模型的可靠性和有效性,我们将预测结果与实际工程数据进行了对比。通过对比分析,我们发现模型的预测结果与实际变形情况高度一致,预测精度达到了预期的目标。这不仅证明了模型的准确性和可靠性,还为我们后续的施工决策提供了有力的支持。在实际应用中,我们利用该预测模型对多个工程案例进行了地层变形预测。通过预测结果,我们能够提前识别出潜在的地层变形风险,并采取相应的预防和控制措施。这不仅有效减少了施工过程中的地层变形,还保护了周边环境的安全和稳定。

结语

综上所述,本文深入研究了超大直径泥水盾构施工过程中的地层变形控制与预测模型。通过提出有效的控制措施和构建预测模型,为施工过程中的地层变形精准预测和有效控制提供了科学依据和技术支持。未来,随着施工技术的不断进步和算法的不断优化,地层变形控制与预测模型将更加精准、高效,为城市地下空间的开发利用提供更加有力的保障。

参考文献

- [1]欧兵. 软弱地层浅覆土盾构始发与掘进关键技术[J]. 工程机械与维修, 2021(4): 210-211.
- [2]王均山, 衣凡, 连文博, 等. 软土地区地铁盾构隧道引发地表沉陷实例研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2871-2877.
- [3]赵旭伟. 软土地层盾构下穿铁路枢纽沉降规律及施工控制[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(2): 59-65.