

复合地层条件下盾构隧道掘进参数优化研究

徐浩然

广东华隧建设集团股份有限公司 广东广州 510000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16463

[摘要] 本文着重探讨在复合地层状况下盾构隧道掘进参数的优化难题。借助理论层面的剖析、数值模拟手段以及实际工程案例的研究，梳理出复合地层特性是怎样对盾构掘进参数产生影响的规律。以深圳地铁五号线、广州地铁 7 号线等真实工程项目为依托，给出了依据地层分类来动态调整掘进参数的策略，同时证实了该优化方法在提升施工效率、把控地表沉降状况方面具有切实成效。研究最终显示，利用实时监测技术以及智能算法开展优化工作，能够让掘进参数和地层条件实现精准适配，为处于复杂地质条件下的盾构施工提供理论依据和技术指引。

[关键词] 复合地层；盾构隧道；掘进参数优化；数值模拟；动态控制

一、引言

当下，城市化进程不断加快，城市交通基础设施建设规模持续拓展，地铁、地下综合管廊等隧道工程越来越多。盾构法因具备高效、安全、环保等显著优点，在城市隧道建设中成为主流施工方法。但城市地质条件复杂，复合地层在隧道施工中很常见，占比超六成。它常呈现上软下硬、土岩交错等情况，给盾构施工带来刀盘偏磨、卡机、地表沉降超限等诸多难题，影响施工安全与效率。像深圳地铁 5 号线部分区间，未及时依地层变化调整参数，盾构机穿越时刀盘扭矩骤增，引发地表沉降超标。故本文以复合地层盾构施工为对象，综合多种方法构建优化模型，提供技术支撑。

二、复合地层特性与掘进参数关联机制

2.1 复合地层分类与力学特性

复合地层一般由多种性质不同的地层组合而成，常见的有软土（像粉质黏土、淤泥质土这类）、硬岩（比如中风化砂岩、花岗岩）以及过渡层。这些地层的力学参数差异明显，对盾构施工有着不同的作用。就拿深圳地铁 5 号线来说，隧道穿过的地层，上面覆盖着 10 米厚的粉质黏土，它的单轴抗压强度在 1 – 3MPa；下面则是 5 米厚的中风化泥质粉砂岩，单轴抗压强度能达到 5 – 20MPa，上下层强度比达到 1: 10。这么大的强度差距，让盾构掘进时刀盘受力很不均匀。在软土层里，刀盘容易黏附堵塞，影响掘进效率；在硬岩层中，刀具磨损会加快，增加施工成本和设备维护的难度。

2.2 掘进参数作用机理

盾构掘进参数构成一个复杂体系，主要有推进速度、刀盘转速、总推力、土仓压力、注浆压力等。这些参数相互关联、彼此影响，和地层条件有着紧密的耦合联系。推进速度对施工效率和地层扰动影响很大。在软土层，推进速度太快会造成超挖，引发地表沉降；在硬岩层，推进速度太慢会使刀盘与岩石摩擦时间变长，刀盘温度升高，加速刀具磨损。刀盘转速和地层硬度呈反向关系。在软土层，刀盘转速太快会加重黏附问题，降低掘进效率；在硬岩层，刀盘转速太慢会降低破岩效率，增加施工难度。总推力要依据地层强度动态调整。在上软下硬地层，总推力既要能克服下部硬岩的抗剪强度，又要防止对上部软土过度压实，避免地表隆起或沉降。注浆压力对管片背后空隙填充效果很关键。在复合地层中，注浆压力要平衡软土层的流变性和硬岩层的渗透性。注浆压力太小，浆液无法充分填充空隙，会导致地表沉降；注浆压力太大，浆液可能流失或损坏管片。

三、掘进参数优化方法

3.1 基于数值模拟的参数敏感性剖析

为了弄清楚各个掘进参数对地表沉降产生的影响，我们借助 FLAC3D 软件搭建了一个三维数值模型，模拟深圳地铁 5 号线盾构机穿越上软下硬地层的状况。模型的长、宽、高分别设定为 60m、30m 和 20m，地层参数按照实际地质情况来设置。其中，粉质黏土厚度为 10m，弹性模量是 8.5MPa，黏聚力为 22kPa，内摩擦角是 18°；强风化泥质粉砂岩厚度 3m，弹性模量 50MPa，黏聚力 120kPa，内摩擦角 32°；中风化泥

质粉砂岩厚度 5m, 弹性模量 200MPa, 黏聚力 300kPa, 内摩擦角 45°。我们采用单因素分析法, 对各个掘进参数进行独立变化分析, 以此确定它们对地表沉降的影响权重。结果显示, 注浆压力对地表沉降的影响权重最大, 为 0.32; 其次是土仓压力, 权重为 0.28; 刀盘扭矩、盾构推力、推进速度和同步注浆量的影响权重分别为 0.15、0.12、0.08 和 0.05。这一结果为后续的参数优化提供了关键依据, 明确了施工过程中需要重点留意和精准控制的参数。

3.2 基于机器学习的地层分类与参数预估

在实际工程里, 地质勘察数据和实际地层状况常常存在一定偏差, 这给准确设置掘进参数带来了难题。为解决这一问题, 我们提出了基于支持向量机 (SVM) 的地层分类办法。该方法把推进速度、刀盘扭矩、总推力等掘进参数当作输入特征, 通过网格搜索算法对模型参数进行优化, 从而实现对复合地层类别的准确识别, 准确率能达到 92%。接着, 我们进一步构建支持向量回归 (SVR) 模型, 用于预估被动控制参数, 像挤压压力、刀盘扭矩等。为提高模型的预测精度, 我们引入灰狼算法 (GWO) 对 SVR 模型进行优化。经过优化后的模型, 预测误差能控制在±8%以内, 能为施工人员提供比较准确的参数预估值, 指导他们合理设置掘进参数。

3.3 动态优化决策模型

为达成掘进参数的动态优化, 我们以掘进工期最短作为目标函数, 综合考虑地层参数、设备性能、安全阈值等因素作为约束条件, 构建了一个多目标优化模型。具体模型为: 以最小化总工期为目标, 约束条件包括总推力不能超过设备极限、土仓压力要在安全范围之内、注浆压力要满足填充要求、推进速度要处于合理区间。通过双重约束计算, 并结合不同地层的力学特性, 我们得出了各地层段的最优推进速度: 粉质黏土层推荐速度为 30~50mm/min, 强风化岩层推荐速度为 15~25mm/min, 中风化岩层推荐速度为 8~12mm/min。该动态优化决策模型能够依据实时地层信息, 自动调整掘进参数, 实现掘进过程的智能化管控。

四、工程应用与验证

4.1 深圳地铁 5 号线案例

4.1.1 施工背景与问题呈现

深圳地铁 5 号线民治站到五河站这一区间, 地质状况极

为复杂, 有着典型的上软下硬地层特征。原施工方案在制定时, 虽参考了过往的常规经验以及部分地质勘察得出的数据, 但并未充分考量该区间地层特性所具有的独特之处, 以及各个掘进参数之间错综复杂的耦合关系。在实际施工进程中, 盾构机在上软下硬地层段作业时, 依照原方案设定的推进速度是 10mm/min, 刀盘扭矩达到了 4500kN·m。在这样的参数组合下, 地表沉降问题极为突出, 沉降量高达 28mm, 远远超出了安全控制标准。过大的地表沉降, 不仅对周边建筑物的基础稳定性构成了严重威胁, 还极有可能影响地下管线的正常使用, 给整个工程的安全性以及周边环境都带来了严重的隐患。

4.1.2 动态优化决策模型的应用过程

针对上述出现的问题, 引入前文提及的动态优化决策模型来对掘进参数进行调整。首先, 对施工区间的地层特性展开详细分析。通过在现场取样, 并在室内进行试验等方式, 精确获取粉质黏土、强风化泥质粉砂岩以及中风化泥质粉砂岩的物理力学参数, 像弹性模量、黏聚力、内摩擦角等, 为模型提供精准的地层数据支撑。接着, 把实时监测得到的掘进参数, 涵盖推进速度、刀盘扭矩、总推力、土仓压力、注浆压力等, 输入到动态优化决策模型当中。模型依据地层参数、设备性能、安全阈值等约束条件, 以掘进工期最短作为目标函数, 进行多目标的优化计算。经过模型的计算与分析, 结合不同地层的力学特性, 得出在该上软下硬地层段的最优掘进参数。依据模型推荐, 将推进速度提升至 18mm/min, 刀盘扭矩降至 3200kN·m。同时, 对其他相关参数也进行了相应调整, 例如土仓压力根据地层压力的变化进行动态平衡, 注浆压力根据管片背后空隙的填充情况进行优化等。

4.1.3 应用效果评估

经过对参数进行调整之后, 施工效果得到了显著的改善。从地表沉降控制方面来看, 地表沉降量成功控制在 15mm 以内, 完全满足了安全要求。这不仅切实有效地保护了周边建筑物和地下管线的安全, 减少了因地表沉降引发的纠纷以及损失, 也为工程的顺利推进提供了有力保障。在施工效率方面, 提升效果更为显著。推进速度的提高使得盾构机在单位时间内掘进的距离增加, 施工效率提高了 40%。工期的缩短直接降低了施工成本, 包括人工成本、设备租赁成本、管理

成本等。同时,由于施工效率的提高,也减少了因长时间施工对周边环境和居民生活造成的影响,提升了工程的社会效益。此外,参数优化之后盾构机的运行状态更加稳定。刀盘扭矩的降低减少了刀具的磨损,延长了刀具的使用寿命,降低了设备维护成本以及更换刀具的频率。土仓压力和注浆压力的合理调整,保证了掘进过程中地层的稳定以及管片背后空隙的有效填充,提高了工程质量。

4.2 广州地铁 7 号线案例

4.2.1 施工背景与问题剖析

广州地铁 7 号线某区间在施工的时候,同样面临着复杂的地质条件。该区间地层存在软硬不均的情况,部分区域上层是软弱的淤泥质土,下层则是硬度较高的砂岩。原施工方案在设定掘进参数时,没有充分考虑这种软硬不均地层对掘进过程产生的影响。在盾构机掘进过程中,由于上层软土的承载能力较低,下层硬岩的阻力较大,导致盾构机受力不平衡。原方案中推进速度为 $12\text{mm}/\text{min}$, 刀盘扭矩为 $4000\text{kN}\cdot\text{m}$, 在这种参数组合下,盾构机在软硬交接处出现了明显的偏移现象,同时地表沉降也比较大,达到了 25mm ,对周边环境造成了不利影响。此外,盾构机的频繁偏移增加了施工的难度和安全风险,也影响了施工进度和工程质量。

4.2.2 动态优化决策模型的应用流程

为了解决上述问题,在该区间施工中运用动态优化决策模型对掘进参数进行优化。首先,对施工区间的地层进行详细的勘察和分析。通过地质雷达、钻孔取样等方法,准确掌握地层的分布情况、软硬程度以及各层之间的界面特征。同时,对地层的物理力学参数进行室内试验和现场测试,为模型提供可靠的数据基础。然后,将实时监测得到的掘进参数和地层信息输入到动态优化决策模型当中。模型根据地层特性和设备性能,以掘进安全和效率为目标,综合考虑各种约束条件,比如总推力不能超过设备极限、土仓压力要保证地层稳定、注浆压力要满足填充要求等,进行多目标的优化计算。经过模型的计算和分析,得出在该软硬不均地层段的最优掘进参数。根据模型推荐,将推进速度调整为 $16\text{mm}/\text{min}$, 刀盘扭矩降至 $3500\text{kN}\cdot\text{m}$ 。同时,根据地层软硬变化情况,实时调整土仓压力和注浆压力。在软土层中,适当降低土仓压力,减少对地层的扰动;在硬岩层中,适当提高土仓压力,

保证掘进的稳定性。注浆压力根据管片背后空隙的大小和地层渗透性进行调整,确保浆液能够充分填充空隙,防止地表沉降。

4.2.3 应用效果分析

参数优化之后,施工效果得到了明显的改善。在盾构机姿态控制方面,盾构机在软硬交接处的偏移现象得到了有效控制,掘进方向更加准确,提高了施工的安全性和可靠性。这不仅减少了因盾构机偏移引发的安全事故风险,也降低了后续纠偏的工作量和成本。从地表沉降控制来看,地表沉降量降低至 12mm 以内,满足了安全控制标准。这切实有效地保护了周边建筑物和地下管线的安全,减少了施工对周边环境的影响,提升了工程的社会形象。在施工效率方面,推进速度的提高使得施工进度加快,工期缩短。同时,由于盾构机运行状态的稳定,减少了设备故障和停机时间,进一步提高了施工效率。此外,参数优化之后刀具的磨损减少,降低了设备维护成本以及更换刀具的费用,提高了工程的经济效益。

五、总结

在复合地层开展盾构掘进作业时,由于地层性质存在差异,掘进参数不能一成不变,需依据地层的非均质性灵活、动态地调整。其中,注浆压力与土仓压力尤为关键,它们是控制地表沉降的核心要素,直接关乎施工安全以及周边环境的稳定,一旦把控不好,可能引发严重后果。将数值模拟和机器学习两种方法结合运用,能精准预测掘进参数。在此基础上构建的动态优化模型,可大幅提升施工效率与安全性,为复杂地质下的盾构施工提供了可靠且科学的技术支撑。工程实践显示,优化后的掘进参数成效显著,地表沉降可降低 $40\%-60\%$, 刀具磨损率下降 30% , 工期缩短 $15\%-25\%$, 兼具可观的经济与社会效益。

[参考文献]

- [1] 王恒. 上软下硬复合地层盾构施工掘进参数研究. 安徽建筑大学, 2012.
- [2] 孙毅. 土岩复合地层大直径盾构掘进地质研判与参数优化方法及应用. 山东大学, 2025.
- [3] 徐超. 成都地区复合地层盾构上跨既有隧道的掘进参数优化研究. 西安科技大学, 2024.