

Analysis of deformation control technology for large diameter shield tunneling under operating metro tunnel

Ling Qin

China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Under the context of intensive urban underground space development, large-diameter shield tunneling beneath existing operational metro lines has become an unavoidable engineering practice. The construction-induced disturbances exhibit three key characteristics: extensive impact range, pronounced stress redistribution, and highly coupled structural responses. This study systematically analyzes the intrinsic evolution path of additional deformation in existing metro tunnels under large-diameter shield tunneling conditions, based on theoretical foundations including stratum stress redistribution, soil volume loss transfer, and dynamic coupling mechanisms between shield and metro structures. Building upon this analysis, a multidimensional collaborative control system is constructed to provide a systematic technical approach for controllable and predictable deformation management of existing metro tunnels under complex tunneling scenarios.

Keywords

large-diameter shield; subway tunnel; construction deformation; control technology

大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术分析

秦岭

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 610213

摘要

在城市地下空间高强度开发背景下，大直径盾构下穿既有运营地铁已成为不可回避的工程形态，其施工扰动具有作用范围广、应力重分布强和结构响应高度耦合等典型特征。本文以地层应力再分布、土体体积损失传递及盾构—地铁结构动力耦合机理为理论基础，系统解析了大直径盾构下穿条件下既有地铁隧道产生附加变形的内在演化路径，并在此基础上构建了多维协同控制体系，旨在为复杂下穿工况下既有地铁隧道变形的可控化与可预期化提供系统性技术路径。

关键词

大直径盾构；地铁隧道；施工变形；控制技术

1 引言

随着城市地下轨道交通网络的不断完善，大直径盾构隧道已逐渐成为主要的施工方法，此类新建的大口径盾构隧道近距离穿越既有地铁隧道的案例越来越多。大直径盾构穿越施工过程中如果对地层变形控制不当，极易影响既有运营地铁隧道的安全，为此必须深入探讨大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术。

2 大直径盾构下穿运营地铁的变形作用机理

2.1 地层应力再分布机理

在大直径盾构掘进过程中，刀盘切削与舱内土体卸载使原有土体三向应力状态被破坏，围岩由原始自重应力场转变为以盾构开挖轮廓为核心的再分布应力场。下穿运营地铁

时，盾构前方及周边土体产生明显的径向松弛区，拱顶及侧壁处主应力方向发生旋转，使地铁隧道所处土层承受的附加应力沿纵向与横向叠加变化。当应力集中区向既有隧道扩展时，其衬砌内力由原有稳定状态转变为受拉受剪复合状态，从而诱发结构微变形与刚度重新分配。

2.2 土体体积损失传递路径

盾构推进中不可避免存在超挖、刀盘扰动和同步注浆停滞，这些因素导致开挖断面周围形成体积损失区。该体积损失沿土层孔隙与结构面向上传递，在下穿条件下呈现“倒漏斗”式扩散形态，逐步影响到上覆的地铁隧道基础土。当地铁隧道处于该传递路径内时，其底部土体的有效应力降低，产生不均匀沉降，使隧道衬砌在纵向上出现差异化变形^[1]。

2.3 盾构扰动对地铁结构的耦合影响

大直径盾构的开挖面宽度远大于常规地铁隧道，其扰动范围覆盖地铁结构全断面。盾构通过时产生的振动、土体剪切重排及泥水压力波动，会在地铁衬砌周围形成动态应力

【作者简介】秦岭（1989-），男，中国四川成都人，本科，工程师，从事城市轨道交通施工及管理研究。

场。该应力场与地铁隧道原有的静力荷载共同作用，使衬砌环在短时间内经历反复受力调整，局部接缝处易出现微张开或闭合变化，进一步改变整体受力路径。

2.4 地层分层特性引起的差异变形

下穿区由不同土层所构成，各层的压缩性、透水性和强度指标差别较大；盾构掘进产生的应力释放后，在不同的土层中的释放速度以及衰减程度是不同的，所以会造成地铁隧道底部和两侧的土体产生变形速率存在较大差异；如果软弱夹层处在地铁隧道结构和盾构之间，则极易造成变形集中带，可能引起地铁隧道产生局部下沉或者横向偏移。

3 大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术

3.1 开挖面压力与推进参数协同控制

在大直径盾构下穿既有运营地铁隧道时，开挖面压力与推进参数的协同控制需要围绕地层应力重分布及隧道—土体耦合响应开展精细调控，主要是通过建立盾构土仓压力、刀盘扭矩、推进速度及地层变形等参数间的映射关系来保证掘进过程一直处于“低扰动—可平衡”运行区间。因此，不能仅仅根据覆土厚度或静止土压力确定开挖面压力值，而是应综合考虑地铁隧道衬砌埋深、围岩类别以及结构刚度等因素，针对原有地层应力场采用修正反演方法确定隧道—土体接触面的压力大小，并且保证其略大于隧道拱顶处的等效竖向应力，以此来平衡盾构掘进时带来的卸荷效应，防止地铁隧道上方土体沉降梯度扩大。在匹配推进参数时，可根据当前单缸推力和总推力增长斜率变化情况，使单缸推力峰值分配及总推力增长斜率变化与单管前进速度及土仓压力涨落变化情况相匹配，避免盾构机超速推进造成前方掌子面不稳定或者推进速度过慢形成土体回弹区现象^[2]。此外，根据地铁隧道平面位置进行布控，利用穿越地铁隧道工况下地层的刀盘扭矩变化率和土仓含砂量等参数，修正推进速率与土仓补压量之间的比例系数，使盾构在穿越区地层强度及土体固结程度发生变化时保持总体平衡，使盾构穿越地铁隧道的全过程控制在一个相对平稳的轨道上运行。与此同时，开挖面压力调节应与推进节奏形成闭环关系，当监测到地铁隧道拱顶竖向位移或周边土体孔隙水压力出现非线性变化时，优先通过微调土仓压力梯度进行补偿，而非单纯依靠降低推进速度，以避免形成长时间低速掘进导致的土体应力松弛区扩展。

3.2 同步注浆与二次补浆精细调节

在大直径盾构下穿运营地铁隧道过程中，同步注浆与二次补浆的精细调节构成围岩—衬砌—注浆体协同受力体系稳定性的关键控制环节，同步注浆需依据盾尾间隙的动态变化与地层变形响应进行参数匹配，通过对盾构姿态、推进速度与盾尾刷磨耗状态的实时计算，确定浆液充填量与注入压力的耦合关系，使浆液在盾尾脱空区内形成连续致密的支

撑带以抑制土体回弹与松弛扩散，在软弱可压缩地层条件下需提高初凝强度并降低离析风险，通过调整水胶比与外加剂比例使浆体在短时间内获得足够早期承载能力，从而在盾构掘进扰动释放前锁定围岩结构，同时注浆压力应沿盾尾环向分区控制以避免偏压导致地铁隧道受力不均引起的附加位移，结合盾构后方地层应力重分布特征建立压力—位移反馈模型，使同步注浆由固定设定转化为随变形调节的闭环控制过程；二次补浆则针对同步注浆后形成的微孔隙与局部脱空进行补偿加固，通过对监测到的地铁隧道沉降曲线与周围地层体变形梯度进行反演分析，精准锁定需补强的空间位置与注浆量级，补浆工艺应优先采用低黏度可渗透浆液以实现对既有浆体裂隙与土体毛细孔隙的充分填充，并通过分段、分序注入方式控制扩散半径，避免因过量注入诱发地层隆起或隧道抬升偏移，在时间控制上需结合盾构通过后的应力调整阶段进行分期补浆，使补浆体在地层逐步稳定过程中持续发挥承载补偿作用，进一步削减盾构扰动残余变形对既有地铁结构的传递效应，通过同步注浆与二次补浆在空间与时间维度上的协同调控，使围岩松驰区、注浆固结区与衬砌受力区形成连续过渡，从而将施工诱发的附加位移限制在可控范围内^[3]。

3.3 地铁隧道周边地层加固处理

在大直径盾构下穿运营地铁隧道的施工条件下，隧道周边地层加固处理需要围绕“刚度重构与渗流调控协同”的技术逻辑展开，其核心在于通过人为调节土体结构状态与孔隙水运移路径，削弱盾构扰动在既有隧道范围内的空间传递效应。针对软弱可塑层及松散填土层，应优先采用低压分区注浆与微扰动渗透加固组合方式，通过控制浆液扩散半径与固结速率，使地层由原有的压缩主导型变形模式转化为剪切约束型响应状态，从而提高地铁隧道周边土体在盾构扰动下的变形阻尼能力；在砂层或高渗透系数地层中，应通过硅酸盐类或微细水泥浆进行网状渗透加固，构建连续性较强的固结体，以降低开挖诱发的渗流重分布对衬砌结构产生的附加位移。对于盾构穿越区上覆与侧向影响范围内的土体，应依据隧道轴线与既有地铁结构的空间关系实施分层加固布置，在靠近地铁隧道拱顶及拱腰区域布设高模量注浆体以提高局部地层抗剪刚度，在远离既有结构一侧设置柔性加固带以缓释应力集中，避免刚度突变引发二次扰动。加固参数的确定需基于地层压缩模量、孔隙比及地下水条件进行反演计算，通过试验段实测注浆压力与注入量对地表及隧道变形响应的反馈关系，对加固区的等效弹性模量进行动态校正，从而使加固体与原状土体形成连续过渡区。在施工实施过程中，应同步布置隧道收敛、轨道几何及地层地压监测点，依据监测数据对注浆节奏和范围进行实时调整，当出现孔压异常回升或位移速率增大的趋势时，及时启动补强注浆以修复因盾构推进产生的微裂隙通道。通过上述加固路径，使盾构施工引起的应力释放与地层重排被限制在可控空间内，既有

地铁隧道周边土体保持相对稳定的力学状态，从而形成对盾构扰动的有效屏蔽。

3.4 盾构姿态与掘进轨迹控制

在大直径盾构下穿既有运营地铁隧道过程中，盾构姿态与掘进轨迹的稳定性直接关联到上覆隧道的附加变形响应，因此需将姿态控制从传统的“几何对中”转向“变形约束导向”的精细调控模式。在施工实施阶段，首先应基于下穿区段既有地铁结构轴线、埋深及轨道限界条件建立三维坐标基准体系，通过盾构导向系统将设计轴线、实时掘进轴线与地铁隧道空间位置进行同步映射，使盾构机姿态偏差能够以对既有结构影响敏感方向为权重进行分解，从而避免仅以平面或竖向偏移作为修正依据而引发的空间误判。在具体掘进控制中，应将盾构俯仰角、滚转角及偏航角与推进油缸分区推力实行联动约束。当盾构进入下穿影响区时，优先抑制可能引起地铁隧道拱顶附加沉降的俯仰角变化，通过降低上部油缸推力增幅、提高下部油缸推力稳定性来维持刀盘姿态的平缓演进。同时，在平面方向上对偏航角的调整应采用小幅、多次的渐进式修正方式，避免因一次性纠偏导致开挖轮廓与原状地层产生剪切扰动。掘进轨迹的控制不宜单纯依赖导向系统的几何偏差报警，而应结合既有地铁隧道监测到的沉降、水平位移及收敛数据建立反馈修正机制。当上覆结构出现非对称变形趋势时，应对盾构掘进方向进行反向微调，使掘进轨迹在空间上对地层应力重分布产生补偿效应，从而削弱变形集中区的持续发展。在盾构通过下穿核心区段时，还需将姿态控制与同步注浆参数联动。当盾构因纠偏产生局部超挖或欠挖时，通过调整对应方位注浆量与浆液流变特性，使盾尾间隙的填充效率与盾构姿态变化保持同步，防止因轨迹修正引发地层失稳。此外，应通过连续里程段的姿态变化率控制盾构运动的平顺性，对俯仰和偏航的变化幅度设定梯度阈值，使盾构轨迹在空间上呈现连续曲线而非折线形态，从而降低地层结构的反复剪切与松弛对既有地铁隧道变形的叠加效应。

3.5 施工过程监测与参数反馈调控

基于此，大直径盾构下穿运营地铁隧道高风险工况下需要实现全方位贯通式“感知—判读—调参—验证”的闭环监测与参数反馈调节体系。

在空间布局中，以既有隧道拱顶、拱腰以及轨道板为现场监测的核心敏感区，根据盾构机掘进方向，在既有隧道顶部等处布设足够数量的测点，形成高位覆盖的密集化监测带，将沉降、收敛、倾斜及振动等与盾构姿态、刀盘扭矩、土压及注浆量等相关指标按照不同时间戳有序采集，借助相同的数据接口，在同一时空坐标系下进行跨源数据的自动对齐，消除分散式测量可能存在的信息缺失与错位问题。在数据处理中，使用滑动窗口法和趋势外推算法把短时扰动和长期变形区分开来，并基于实测数据，实时拟合出当前既有隧道结构与盾构施工参数之间的相关性。监测值不仅要用来辨别是否越限，更重要的是能够具体判断某个参数应该往哪一项方向进行调整。例如：当盾构拱顶下沉速率突然加快并伴随土压波动变大时，要调整盾构推进速率与开挖面压力之间的比例关系，而不是简单地将某个参数值径直调整。在现场调控机制方面，将监测系统与盾构控制台之间进行硬连接，一旦发生超阈值变形，即可触发参数联动。在监测前，为了保证同步注浆浆量、注浆压力、推进推力同步受控，可以通过监测系统联动控制台进行两者的调整。在验证环节，通过对调参前后的既有隧道变形速率及盾构工况曲线的对比分析，实时修正监测阈值与反馈灵敏度。

4 结语

大直径盾构下穿运营地铁隧道本质上是一种多场耦合、多尺度传递的地下结构相互作用过程，其变形控制不再是单一参数优化问题，而是涉及地层力学重构、盾构运行状态调节与既有结构响应反馈的系统工程。本文所构建的技术框架以地层—结构—施工参数的协同演化为主线，将开挖面稳定、注浆支撑、地层刚度重构、盾构轨迹约束及实时监测反馈纳入统一控制逻辑之中，使盾构施工由传统经验型控制转向数据驱动与机理约束并行的精细化控制模式。

参考文献

- [1] 金典琦,李德行,黎莉,等.超大直径盾构隧道正交下穿对既有地铁隧道影响分析[J].建筑结构,2023,53(S01):2952-2959.
- [2] 周群,邵华,李家平.超大直径盾构下穿施工引起既有地铁隧道变形分析及控制要点[J].城市轨道交通研究,2024,27(S01):79-83.
- [3] 周群,邵华,李家平.超大直径盾构下穿施工引起既有地铁隧道变形分析及控制要点[J].城市轨道交通研究,2024,27(S01):79-83.