

深基坑开挖对邻近盾构隧道变形影响及控制措施

范志杰

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.013

摘要: 随着城市地下空间开发的集约化发展,深基坑工程与既有盾构隧道的空间冲突日益突出。基坑开挖引起的土体卸荷效应会显著改变周边土体的应力场,导致邻近盾构隧道产生附加变形,严重威胁隧道结构安全与运营稳定。本文系统梳理了深基坑开挖对邻近盾构隧道变形的影响机理,分析了隧道上浮、水平位移及截面收敛等主要变形模式及其关键影响因素;在此基础上,综述了当前主流的变形预测与评估方法,包括理论解析法、数值模拟法和现场监测法;重点论述了分区开挖、伺服支撑、隔离桩、堆载反压及地基加固等变形控制措施的原理、适用条件与控制效果。研究表明,分区开挖可使隧道上浮变形减少 11% ~ 22%,伺服支撑可使围护结构位移减小率达 63% 以上,隔离桩能有效降低隧道水平位移达 60% 以上。本文旨在为类似工程的方案设计与施工控制提供系统性的理论参考与实践指导。

关键词: 深基坑; 盾构隧道; 变形机理; 变形控制; 分区开挖; 伺服支撑; 隔离桩

Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Deformation of Adjacent Shield Tunnels and Control Measures

Zhijie Fan

Abstract: With the intensive development of urban underground space exploitation, spatial conflicts between deep foundation pit projects and existing shield tunnels have become increasingly prominent. The soil unloading effect induced by foundation pit excavation significantly changes the stress field of surrounding soil, resulting in additional deformation of adjacent shield tunnels and seriously threatening the structural safety and operational stability of tunnels. This paper systematically sorts out the influence mechanism of deep foundation pit excavation on the deformation of adjacent shield tunnels, and analyzes major deformation modes including tunnel uplift, horizontal displacement and section convergence as well as their key influencing factors. On this basis, it reviews mainstream deformation prediction and evaluation methods, including theoretical analytical method, numerical simulation method and field monitoring method. It focuses on discussing the principles, applicable conditions and control effects of deformation control measures such as zoned excavation, servo bracing, isolation piles, surcharge counter-pressure and foundation reinforcement. The research shows that zoned excavation can reduce tunnel uplift deformation by 11%–22%, servo bracing can reduce the displacement of retaining structures by more than 63%, and isolation piles can effectively cut down the horizontal displacement of tunnels by over 60%. This paper aims to provide systematic theoretical reference and practical guidance for scheme design and construction control of similar projects.

Keywords: deep foundation pit; shield tunnel; deformation mechanism; deformation control; zoned excavation; servo bracing; isolation piles

前言

近年来,我国城市地下空间开发进入高速发展阶段,地铁隧道网络不断延伸,高层建筑地下室、地下综合管廊、地下商业设施等深大基坑工程日益增多。城市核心区域土地资源稀缺,新建基坑工程不可避免地邻近甚至上跨既有盾构隧道,形成复杂的空间交叉关系。基坑开挖过程中的土体卸荷效应会引发围岩应力重分布,使邻近盾构隧道产生附加应力和附加变形,可能导致管片开裂、接头渗漏水、椭圆度超限等病害,严重威胁隧道结构的安全运营。

一、深基坑开挖对邻近盾构隧道的变形机理

(一) 卸荷效应与应力重分布

深基坑开挖的本质是对原始地层的卸荷过程。开挖使

坑内土体被移除,原本由这些土体承担的竖向应力和水平应力被释放,导致坑底和坑壁附近土体的应力状态发生显著改变。这种卸荷效应沿基坑周边向远处传播,形成坑外主动区土体向坑内的变形移动趋势。

对于下卧盾构隧道而言,基坑开挖卸荷会在隧道位置产生向上的附加应力,使隧道承受原本由上部土体提供的压应力减小,隧道结构在自身重力和下部土体回弹的共同作用下产生竖向隆起变形。对于侧方隧道,基坑开挖引起的水平卸荷会导致隧道朝向基坑方向产生水平位移。基坑底部和基坑侧壁的卸荷效应共同作用,使隧道断面承受不均匀的附加荷载,导致截面收敛变形。

(二) 隧道变形的模式

根据隧道与基坑的相对位置关系,邻近盾构隧道的变形可归纳为以下三种主要模式:

1. 竖向变形(上浮/沉降)。对于下卧隧道,基坑开挖卸荷导致隧道以竖向上浮变形为主。研究表明,临近深基坑开挖扰动下,下卧双线盾构隧道结构附加应力以负弯矩为主,最大负弯矩位于基坑开挖中段下方。当隧道位于基坑侧方且埋深较浅时,距离坑壁较近处表现为沉降,而距离坑壁较远处表现为轻微隆起。

2. 水平位移。侧方隧道在基坑开挖卸荷作用下,会随坑外主动区土体一起产生向坑内的水平位移。研究表明,邻近区间隧道水平位移往往明显大于竖向位移,且水平变形增加速率高于隧道沉降速率。对于两侧不对称基坑开挖工况,隧道会出现偏向于大基坑方向的位移。

3. 截面收敛变形。基坑开挖引起的非均匀围压变化会导致盾构隧道管片环产生横向收敛或扩张变形。当隧道埋深较大时,隧道变形主要表现为竖向收敛。管片接头的转动刚度和剪切刚度对截面变形模式具有显著影响——接头剪切刚度越大,盾构隧道竖向位移与环间错台量越小。

(三) 变形的影响因素

深基坑开挖对邻近盾构隧道变形的影响程度受多种因素控制,主要包括:

1. 基坑几何参数。基坑开挖深度、面积及形状是影响隧道变形的重要因素。基坑开挖面积及深度越大、形状越不规则,隧道的隆起变形越大。基坑开挖宽度对下卧隧道变形亦有显著影响。

2. 隧道-基坑相对位置。隧道与基坑的水平间距、竖向间距以及隧道埋深是决定性因素。隧道最大变形与隧道-基坑间距可用指数函数高精度拟合。当支护桩底与隧道顶的竖向间距大于4 m或支护桩边缘与隧道边缘的水平间距大于4 m时,支护桩的踢脚位移和下穿隧道的隆起变形迅速增加。

3. 地质条件。软土地层由于强度低、压缩性高,基坑开挖引起的变形更为显著。软粘土层厚度越大,邻近隧道变形越明显。

4. 施工工艺。开挖方式(整体开挖与分区开挖)、支撑体系类型、降水方案等均对隧道变形有重要影响。

二、隧道变形预测与评估方法

(一) 理论解析法

理论解析法通过建立力学模型求解基坑开挖引起的隧道附加变形。目前常用的方法包括两阶段分析法和地基梁模型法。

两阶段分析方法首先计算基坑开挖卸荷在隧道位置产生的附加应力,然后基于地基梁理论建立隧道纵向变形平衡微分方程进行求解。有学者基于Mindlin解,考虑坑底残余应力及围护桩效应,推导了基坑开挖卸荷在隧道处附加应力的计算公式。在此基础上,部分研究进一步考虑了基坑开挖及降水的共同作用。

在地基梁模型方面,Kerr地基模型及Timoshenko梁理

论被广泛应用于隧道纵向变形分析。近年来,研究者开始关注盾构隧道接头刚度非线性影响,提出了考虑接头刚度非线性变化的理论预测模型。基于非连续地基梁模型的分析表明,接头转动刚度和剪切刚度、地基反力系数、基坑开挖深度以及隧道-基坑水平间距均是影响隧道变形的关键参数。

(二) 数值模拟法

数值模拟方法是目前应用最为广泛的隧道变形预测手段。常用的数值分析软件包括ABAQUS、MIDAS GTS NX、FLAC3D等。

在土体本构模型的选择上,小应变硬化本构模型(HS-small)能够较好地反映软土在微小应变条件下的非线性特性,被广泛应用于邻近隧道基坑开挖的数值模拟。三维数值模型可以全面考虑基坑开挖的空间效应、施工工序、支护结构与土体的相互作用。

数值模拟的准确性依赖于合理的模型建立、参数选取和工况模拟。研究表明,数值模拟与实际监测结果的误差可控制在7%左右。然而,三维数值分析建模复杂、计算量大,在一定程度上限制了其在实际工程中的快速应用。

(三) 现场监测法

现场监测是掌握隧道变形动态、验证理论分析和数值模拟结果最直接的手段。监测内容通常包括隧道道床沉降、水平位移、水平收敛以及管片接缝张开量等。

自动化监测技术的应用显著提高了监测的实时性和精度。三维激光扫描技术可实现隧道全线变形的高精度采集,监测精度可达毫米级。对于临近地铁隧道的深基坑工程,通常需要在基坑施工全过程中对隧道变形进行实时监测,并根据监测数据及时调整施工方案。

三、隧道变形控制措施

深基坑开挖对邻近盾构隧道变形的控制应从设计阶段和施工阶段两个层面综合施策,形成“主动控制与被动防护相结合”的系统性控制体系。

(一) 分区开挖控制

分区开挖是控制隧道变形的首要施工措施,其基本原理是利用基坑开挖过程中的时空效应,通过分块、分区分步开挖减小单次卸荷量,降低应力释放的速率和幅度。

研究表明,分区开挖能有效减少隧道结构上浮变形。以某既有双线盾构隧道区间上部深基坑开挖工程为例,基坑两侧向中部对称跳挖、顺次开挖、基坑中部向两侧对称开挖方案的上浮变形量相比整体开挖分别减少21.90%、19.04%和11.07%。对于侧方隧道,分区开挖同样具有显著的控制效果——采用分六区开挖可使隧道水平位移减小22.1%。

在实际工程中,应遵循“大基坑、小开挖”的分区分块开挖原则。合理设计开挖分区方案,采用跳挖等施工方式,可有效降低施工扰动。同时,合理安排两侧基坑的施工作业顺序能有效控制隧道的水平位移。

(二) 伺服支撑控制

伺服支撑技术是近年来发展起来的主动变形控制手段,

通过轴力自动补偿系统对支撑轴力进行实时调控，主动约束围护结构的变形。

钢支撑轴力伺服系统在邻近地铁隧道的深基坑中应用效果显著。杭州某地铁超深基坑的实测数据表明，伺服系统的应用可使开挖阶段基坑围护结构最终位移减小率达到 63%，并且在地下结构施工阶段可以起到顶回围护结构的作用。伺服支撑作用下，围护墙变形模式由常规的内凸形转变为 S 形。

伺服支撑的控制效果受支撑位置和层数的影响。伺服钢支撑设置位置越靠近隧道埋深处、设置层数越多，对隧道变形的控制效果越好。双层支撑伺服系统比单层系统的变形控制效果更优。然而，伺服支撑技术对距离基坑较近的隧道位移控制效果明显，但对远离基坑且埋深较浅的隧道位移控制效果有限。

在控制策略上，“双控法”（轴力控制值与位移变化量控制值相结合）被证明是有效的控制思路——轴力控制值的增加可使围护结构的最大水平位移量和地面沉降量明显减小。

（三）隔离桩控制

隔离桩是在基坑与既有隧道之间设置的一排或多排桩体，通过阻断或削弱基坑开挖引起的土体位移向隧道方向的传递路径，达到保护隧道的目的。

隔离桩的控制效果受多个设计参数影响。研究表明，设置隔离桩能够有效降低隧道水平位移。保护作用随隔离桩桩长的增加而逐渐增加，但桩长达到临界点后，隔离桩的“牵引作用”会使保护效果随桩长增加而减小。桩间距较小时保护效果较好；隔离桩设置靠近基坑一侧时保护效果明显优于设置在靠近隧道一侧。

在工程应用中，隔离桩可使桥墩最大累计竖向位移与桥桩最大水平位移分别减小 68.5% 和 60.7%。隔离桩对隧道环向弯矩的保护效果主要体现在对隧道靠近基坑一侧拱腰的控制上——隔离桩有效控制了隧道近坑侧的土体位移，从而减小了该侧的围土压力变化。埋入式隔离桩与常规隔离桩的隔离效果基本相同，且能有效降低隧道周围的土压力。

（四）堆载反压控制

堆载反压是在隧道上方或隧道内部施加额外的荷载，以抵消基坑开挖卸荷引起的隧道上浮变形。该方法主要适用于下卧盾构隧道的隆起控制。

在隧道内进行堆载反压是最直接有效的控制方式。研究表明，内堆载反压主要影响下卧隧道的上浮变形，对隧道内力影响很小。增加堆载区域长度和堆载量可有效提升上浮变形控制效果。基于数值优化分析，堆载长度建议为隧道下卧段长度的 80%，二级堆载量应大于 200 kN/m。

在堆载方式上，位于基坑范围内的隧道管片采用线性加载的方式可以较好地控制下卧隧道的上浮量。工程实践表明，采取隧道管片内堆载反压及管片纵向加固等综合措施后，管片最大上浮量可控制在 17.7 mm 以内，处于允许范围。

（五）地基加固与其他辅助措施

1. 坑内土体加固。在基坑底部进行水泥搅拌桩等加固处理，可以提高坑底土体的承载力，减少坑底隆起，从而控制下卧隧道的上浮变形。坑底加固厚度是影响控制效果的关键参数。

2. 围护结构优化。采用咬合桩加内支撑等刚度较大的围护结构形式，能够有效控制围护结构自身的变形，从而减小对周边环境的影响。

3. 降水控制。基坑降水会引起土体有效应力增加，导致土体固结沉降，可能加剧隧道的沉降变形。因此，在邻近盾构隧道的深基坑工程中，应严格控制降水引起的水位变化。多层止水帷幕系统可用于控制地下水水位变化对隧道周边土体的扰动。

4. 隧道结构加固。在隧道管片内部采用槽钢等型材将管片纵向连接，可加强管片连接的整体性和稳定性，起到抑制不均匀沉降的作用。下卧盾构隧道采用钢条加固后，隧道上浮量可减小约 8%。

（六）控制措施的综合应用与效果对比

上述控制措施各有其适用范围和技术特点，在实际工程中往往需要综合应用以达到最佳控制效果。表 1 汇总了各类控制措施的主要特点与适用条件。

表 1 深基坑邻近盾构隧道变形控制措施对比

控制措施	控制原理	适用场景	典型控制效果
分区开挖	利用时空效应减小单次卸荷量	各类基坑，尤其是大面积基坑	上浮变形减少 11% ~ 22%
伺服支撑	主动调控支撑轴力约束变形	邻近隧道的深大基坑	围护位移减小率达 63%
隔离桩	阻断土体位移传递路径	侧方隧道、坑隧距离较近	水平位移减小 60% 以上
堆载反压	抵消卸荷引起的隧道上浮	下卧隧道隆起控制	上浮量控制在 17.7 mm 以内
地基加固	提高坑底承载力减少回弹	软土地层、下卧隧道	与堆载等措施联合使用效果更优

综合应用时应注意措施之间的协调性。例如,分区开挖与伺服支撑可联合使用——分区开挖从源头上减小卸荷量,伺服支撑从约束上控制围护变形;隔离桩与坑内加固可协同作用——隔离桩阻断侧向土体位移,坑内加固控制坑底隆起;堆载反压与隧道结构加固可配合使用——堆载抵消上浮力,结构加固增强隧道自身刚度。

四、工程实例分析

(一) 杭州某软土深基坑工程

杭州某软土深基坑工程采用钢筋混凝土双围檩伺服支撑主动变形调控技术。数值模拟结果表明,采用伺服支撑技术且设置较大支撑力阈值的情况下,围护墙变形呈现S形,与常规内凸变形有明显区别。伺服支撑作用下,浅层旁侧隧道发生朝向坑外的水平位移,而较深位置的隧道则仍随墙体发生朝向坑内的水平位移。该研究表明,伺服支撑调控技术对距离基坑较近的隧道位移控制效果明显。

(二) 某既有双线盾构隧道上部基坑工程

同济大学工程风险研究团队以某既有双线盾构隧道区间上部深基坑开挖工程为案例,通过三维数值模型对比分析了四种典型开挖方案。研究揭示了临近深基坑开挖扰动下下卧双线盾构隧道结构附加应力以负弯矩为主的受力特征,以及竖向上浮变形为主的变形模式。基于此,提出了堆载长度建议为隧道下卧段长度的80%、二级堆载量大于200 kN/m的优化控制参数。

(三) 杭州某邻近地铁隧道深基坑工程

杭州某邻近地铁隧道的深基坑工程实践表明,充分利用开挖过程中的时空效应,采用“大基坑,小开挖”的分区块开挖原则及利用上覆基坑结构底板进行堆载反压,

是控制既有下卧隧道变形的有效技术手段。结合有限元数值模拟分析,全过程模拟实际施工工况,动态分析基坑近接施工过程中对下卧隧道的影响,验证了有限元分析的必要性以及计算模式的合理性。

结语:

深基坑开挖通过卸荷效应改变周边土体应力场,使邻近盾构隧道产生竖向变形、水平位移和截面收敛等模式,变形受基坑几何参数、相对位置、地质条件及施工工艺等多因素综合控制。预测方法主要有理论解析法、数值模拟法和现场监测法,三者各有优势、互为补充。当前主流控制措施中,分区开挖可使隧道上浮减少11%~22%,伺服支撑可使围护位移减小率达63%以上,隔离桩能降低隧道水平位移超60%,堆载反压可将上浮控制在20 mm以内。各类措施应结合具体条件综合选用。

参考文献:

- [1] 翟乐天. 基坑开挖对黄土地层中邻近既有盾构隧道影响研究 [D]. 西安理工大学, 2025.
- [2] 吴瑞. 超大基坑开挖对邻近既有地铁盾构隧道的影响与控制研究 [D]. 北京交通大学, 2024.
- [3] 韩天然. 盾构隧道结构空间多尺度变形信息智能感知与大变形控制 [D]. 东南大学, 2022.
- [4] 潘皇宋. 软土地区明挖隧道施工全过程对下卧地铁盾构隧道影响及变形控制研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [5] 刘骏超. 深基坑开挖对邻近地铁盾构隧道的影响分析及隧道影响区的划分 [D]. 南昌大学, 2021.

作者简介: 范志杰(2002年-)、男、汉族、湖南衡阳人、大专、初级工程师、研究方向为:地质工程。