

基于数值模拟的深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响及控制措施研究

杨继位

天津市建筑设计研究院有限公司, 天津 300074

DOI:10.61369/ETQM.2025070030

摘要：随着城市建设加速，深基坑工程不断涌现，保障地铁安全运营尤为关键。深基坑开挖对邻近地铁隧道的变形影响显著，相关研究极具现实意义。数值模拟技术因能考量复杂地质与施工过程，在该领域广泛应用。研究通过数值模拟剖析基坑深度、支护结构、土体性质及开挖顺序等因素对隧道变形的作用，并针对性提出优化支护设计、调整开挖工艺、加强监测等控制措施，以降低变形影响，保障地铁安全。本研究为同类工程提供理论与实践指导，对城市地下空间开发及地铁保护意义重大。

关键词：深基坑开挖；地铁隧道；数值模拟；变形影响

Study on the Influence of Deep Excavation on the Deformation of Adjacent Subway Tunnels and Control Measures Based on Numerical Simulation

Yang Jiwei

Tianjin Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074

Abstract： With the acceleration of urban construction, deep foundation pit projects continue to emerge, and ensuring the safe operation of the subway is particularly critical. The excavation of deep foundation pits has a significant impact on the deformation of adjacent subway tunnels, and related research is of great practical significance. Numerical simulation technology is widely used in this field because it can consider complex geology and construction processes. This study uses numerical simulation to analyze the effects of factors such as foundation pit depth, supporting structure, soil properties, and excavation sequence on tunnel deformation. It proposes targeted control measures such as optimizing support design, adjusting excavation techniques, and strengthening monitoring to reduce deformation impact and ensure subway safety. This study provides theoretical and practical guidance for similar projects and is significant for urban underground space development and subway protection.

Keywords： deep foundation pit excavation; subway tunnel; numerical simulation; deformation effect

引言

随着城市化推进，地下空间开发加剧，深基坑工程数量激增。这类工程深度大、规模广且周边环境复杂，施工易影响周边土体与既有结构。与此同时，地铁作为城市交通骨干，以大运量、高效环保等优势，在城市客运体系中至关重要。但深基坑开挖引发的土体应力重分布，会威胁邻近地铁隧道稳定性，可能导致隧道变形、开裂，危及地铁运营安全。一旦隧道受损，将严重影响市民出行，造成重大社会与经济损失。因此，研究深基坑开挖对地铁隧道变形的影响及控制措施，对保障城市建设与市民安全意义重大。

一、相关概述

（一）深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究现状

深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究，经历了从理论探索到实证研究的发展历程。近年来，柯明中等^[1]以杭州地区某邻近地铁隧道的基坑工程为例，通过理论分析和有限元模拟，指出隧道会出现朝向基坑内侧的水平位移和向下的竖向位移。马江

锋^[2]针对南昌地区某地铁隧道附近的基坑工程，数值模拟了基坑整个开挖过程，提出了隧道变形是随着基坑开挖深度的增加而不断增加的，并提出了基坑应进行分块开挖的建议。刘波等^[3]通过综述最新研究成果认为基坑开挖引起临近既有隧道变形的影响主要与地质条件、基坑条件、隧道条件三方面有关。

（二）数值模拟技术在相关研究中的应用进展

数值模拟技术在深基坑开挖对地铁隧道变形影响的研究中占

据重要地位，其发展与计算机技术革新紧密相连。早期受计算机性能制约，数值模拟规模与精度有限；随着软硬件升级，该技术在该领域得以广泛应用。目前，Midas GTS NX和Plaxis等软件成为主流工具。Midas GTS NX擅长构建复杂几何模型，精准模拟基坑分步开挖、支护结构施作等施工过程，已在众多工程中成功应用，助力分析隧道变形。Plaxis则专注于土体变形与稳定性模拟，能够考虑土体复杂本构关系，适配深基坑及地铁隧道工程的复杂工况。数值模拟技术可通过计算机模拟各类复杂工程条件，提前预测地铁隧道变形，为工程设计与施工提供关键参考，在实际工程中展现出显著优势。

二、数值模拟技术原理及应用

（一）数值模拟技术原理

在深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的研究中，有限元法和边界元法是重要的数值模拟手段。有限元法将连续求解域离散为有限个通过节点相连的单元，模拟土体与结构相互作用时，先对其离散化并赋予单元物理属性，再建立单元刚度矩阵并组装成整体刚度矩阵，结合边界与荷载条件求解方程组，从而得出节点位移、应力等物理量，能精准模拟复杂受力下的变形及应力分布，适用于分析土体与支护结构受力。边界元法则利用格林公式将区域内微分方程转化为边界积分方程求解，在处理无限域或半无限域问题时，仅需离散边界，可降低计算量并模拟无限远处边界条件，适用于分析远离基坑土体对隧道变形的影响。

（二）常用数值模拟软件介绍

MIDAS GTS Nx和Plaxis是岩土工程数值模拟的核心软件，在深基坑与地铁隧道工程中不可或缺。MIDAS GTS Nx擅长构建复杂几何模型，可精准呈现不规则深基坑、地铁隧道及周边土体形态，同时能模拟基坑分步开挖、支撑体系施工等过程。在某临近地铁的深基坑项目中，该软件通过建立三维有限元模型，系统分析了混凝土支撑轴力、围护结构位移等变化规律，以及施工对地铁隧道的影响。Plaxis则专注于土体变形与稳定性分析，凭借丰富的土体本构模型，可准确模拟不同土体的受力变形特性。在杭州地铁1号线两侧深基坑项目中，运用Plaxis 2D和3D软件模拟基坑开挖，验证了围护方案符合地铁盾构隧道控制标准，为工程安全提供保障^[4]。

（三）数值模拟在深基坑开挖对地铁隧道变形分析中的应用案例

在高层住宅与天津深基坑工程中，数值模拟技术成为保障邻近地铁隧道安全的关键。某高层住宅项目临近地铁，场地填土厚（3.0m—8.0m）、局部粗骨料含量高（30%~60%），下层为粉质黏土，通过建立数值模型模拟基坑开挖，发现分区与未分区开挖卸载对隧道变形影响显著，且隧道最大位移随条坑开挖深度变化，模拟结果有效指导了施工方案优化^[5]。天津某深基坑工程地质复杂，运用三维有限元软件动态模拟施工全流程，获取基坑围护结构变形及地铁隧道位移数据，如地连墙最大水平位移、地表最大沉降等，基于模拟优化设计方案，在控制成本的同时确保隧

道变形可控，为工程决策提供有力支撑。

三、深基坑开挖引发地铁隧道变形的影响因素

（一）基坑深度的影响

基坑深度的变化对地铁隧道变形存在显著影响。随着基坑深度的增加，坑底土体的卸荷量增大，导致坑底土体回弹，同时坑周土体向坑内移动，这种土体的变形会带动邻近地铁隧道的变形。从影响机制来看，基坑开挖深度越大，土体应力重分布的范围和程度就越大，对隧道周围土体的扰动也越强烈，进而使隧道承受更大的附加应力，产生更明显的变形。

相关数值模拟结果表明，在一定范围内，地铁隧道的变形量与基坑深度近似呈线性增长关系。例如，以某邻近地铁隧道的深基坑开挖为对象的数值计算分析显示，当基坑深度较浅时，隧道变形较小；随着基坑深度逐渐增大，隧道拱顶竖向位移以及边墙水平位移均明显增加。在实际案例中，也有类似规律体现，如某些深基坑工程，随着开挖深度的推进，邻近地铁隧道的监测数据显示变形量逐步累积，且变形速率与基坑深度增加存在紧密联系。这都表明基坑深度是影响地铁隧道变形的重要因素之一^[6]。

（二）支护结构的影响

不同的支护结构类型对地铁隧道变形的控制作用存在差异。地下连续墙作为一种常见的支护结构，具有较高的整体性和刚度，能够有效限制基坑周围土体的变形，从而减少对邻近地铁隧道的影响。其通过将墙体嵌入到稳定的土层中，利用墙体的抗弯刚度和土体的侧向阻力来抵抗基坑开挖产生的侧向土压力，进而控制隧道的变形。钻孔灌注桩支护则是通过桩体的侧向刚度来承受土压力，其控制隧道变形的效果与桩的间距、直径以及桩身混凝土的强度等因素相关。

支护结构的参数，如厚度和刚度，对隧道变形影响显著。以地下连续墙为例，研究表明，随着地下连续墙厚度的增加，地铁隧道水平位移和竖向位移逐渐减小，且水平位移和竖向位移与地下连续墙厚度成高度的线性关系。增加支护结构的刚度，可以提高支护结构抵抗土压力的能力，减少支护结构的变形，进而降低对地铁隧道的影响^[7]。

（三）土体性质的影响

土体的物理力学性质对地铁隧道变形起着关键作用。弹性模量反映了土体抵抗变形的能力，弹性模量较大的土体，在基坑开挖过程中产生的变形相对较小，对地铁隧道的变形影响也较小；反之，弹性模量较小的软土，如淤泥、淤泥质黏土等，在基坑开挖卸荷后，易发生较大的变形，从而带动地铁隧道产生明显变形。

黏聚力和内摩擦角是土体抗剪强度的重要指标。黏聚力较大的土体，其颗粒间的粘结力较强，在基坑开挖时，土体抵抗剪切破坏的能力较强，有利于维持基坑周围土体的稳定性，减少地铁隧道的变形。内摩擦角较大的土体，其颗粒间的摩擦阻力较大，同样能提高土体的稳定性，降低隧道变形风险。例如，在某些地质条件较好的地区，土体黏聚力和内摩擦角较高，深基坑开挖对邻近地铁隧道的影响相对较小；而在软土地区，由于土体黏聚力和内摩擦角较低，地铁隧道在基坑开挖过程中更容易发生变形。

（四）开挖顺序的影响

不同的开挖顺序对地铁隧道变形影响明显。分段开挖可以将基坑开挖的影响范围局部化，减小一次性开挖对土体的扰动范围，从而降低对地铁隧道的影响。例如，将基坑分为多个小段依次开挖，每段开挖完成后及时施工支撑结构，能有效控制该段土体的变形，避免因大面积一次性开挖导致土体应力突然释放，引起地铁隧道产生较大变形^[8]。

分层开挖则是按照一定的厚度分层进行开挖，这种方法可以使土体应力逐步释放，减少每次开挖对土体的扰动程度。通过数值模拟展示，采用合理的分层开挖顺序，如先开挖远离隧道的一侧，再逐步向隧道方向开挖，可以有效控制地铁隧道的变形。与无序开挖相比，合理的分层开挖能显著降低隧道的变形量。因此，选择合适的开挖顺序对于控制地铁隧道变形至关重要，不合理的开挖顺序可能导致隧道变形超出允许范围，影响地铁的安全运营，而合理的开挖顺序则能在保证施工进度同时，有效保护邻近地铁隧道的安全。

四、深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的控制措施

（一）优化支护设计

优化支护设计是控制深基坑开挖引发邻近地铁隧道变形的关键手段之一。增加支护结构刚度可有效减小隧道变形，例如采用地下连续墙作为支护结构时，适当增大其厚度，能够提高墙体的抗弯刚度，从而增强对基坑侧壁土体的约束能力，减少土体向基坑内的位移，进而降低对地铁隧道的影响^[9]。在地质条件较差、基坑深度较大的场景中，这种措施尤为有效，可显著提升支护体系的整体稳定性。设置多道支撑也是优化支护设计的重要方式，通过在不同深度设置水平支撑，将基坑侧壁的土压力分散传递，避免应力集中，有效控制支护结构的变形。多道支撑适用于基坑开挖深度较大且对周边环境保护要求较高的情况，如在城市繁华区域邻近地铁隧道的深基坑工程中，多道支撑能够为地铁隧道提供更可靠的保护，确保隧道变形在安全可控范围内。

（二）调整开挖工艺

调整开挖工艺对于减少深基坑开挖引起的邻近地铁隧道变形具有重要意义。分段分层开挖是常用的开挖工艺调整方法，将基

坑划分为多个区域，按照一定的顺序逐段、逐层开挖。这种开挖方式可使土体应力逐步释放，避免一次性开挖导致土体应力突然变化，从而减少对地铁隧道的影响。例如在长条形基坑中，采用分段开挖，先开挖中间部分，再开挖两侧，可有效控制基坑变形向地铁隧道传递。预留土墩也是在开挖过程中保护地铁隧道的有效方法，在基坑开挖至一定深度时，在靠近地铁隧道一侧预留部分土体形成土墩，利用土墩的自重和对土体的支撑作用，减少基坑侧壁土体的位移，进而降低对隧道的变形影响。该方法在实际工程中应用效果良好，特别是在隧道与基坑距离较近的情况下，预留土墩能为隧道提供额外的保护屏障，显著减少隧道变形。

（三）加强监测

在深基坑开挖施工过程中，加强对地铁隧道变形的实时监测至关重要。实时监测能够及时掌握隧道变形的情况，为施工方案的调整提供关键依据，确保地铁隧道的安全运营^[10]。常用的监测技术包括水准测量、全站仪测量以及自动化监测系统等。水准测量可精确测量隧道沉降变形，通过在隧道内布设水准点，定期观测其高程变化，获取隧道竖向位移数据。全站仪测量则可用于监测隧道水平位移，利用其高精度测角、测距功能，确定隧道特征点的平面坐标变化。自动化监测系统能够实现24小时不间断监测，通过布设各类传感器，实时采集隧道变形数据，并上传至监控平台，方便管理人员随时查看和分析。当监测数据出现异常，如变形速率或累计变形量超过预警值时，应及时调整施工方案，如暂停开挖、加密支撑、采取土体加固措施等，以有效控制隧道变形，保障地铁的安全运营。

五、结束语

总之，深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响研究已取得丰富成果，从理论探索到实证分析，数值模拟技术贯穿其中，为揭示影响机制提供有力支撑。基坑深度、支护结构、土体性质及开挖顺序等因素，均显著影响隧道变形，而优化支护设计、调整开挖工艺、加强实时监测等控制措施，有效保障了地铁运营安全。未来，随着城市建设发展，需持续深化研究，创新技术手段，为深基坑工程与地铁保护协同发展提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 柯明中, 李玉明, 王坚, 等. 基于数值模拟的基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响规律分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 2837-2841. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1358.
- [2] 马江锋. 软土深基坑开挖全过程对邻近地铁盾构区间隧道影响风险分析及控制 [J]. 土工基础, 2022, 36(02): 145-148+167.
- [3] 刘波, 范雪辉, 王园园, 等. 基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响研究进展 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 253-258.
- [4] 陈俊变; 张益; 白尊铭; 张贵保; 路开诚. 某深基坑对临近城市轨道交通影响数值模拟分析 [J]. 广东建材, 2024, 40(2): 86-90.
- [5] 孟姗姗. 深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响研究 [J]. 中国新技术新产品, 2023, (2): 84-86.
- [6] 邹传仁; 付鹏; 项锦涛; 金爱国; 林王成. 深基坑开挖对邻近地铁车站的变形影响和隔离桩控制效果分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S01): 2809-2814.
- [7] 王涛. 基坑施工对地铁隧道影响的数值试验研究 [J]. 低温建筑技术, 2024, 46(3): 138-142.
- [8] 张鹏; 黄伟; 褚云鹏. 基坑开挖对紧邻地铁隧道的三维数值模拟分析 [J]. 江西交通科技, 2023, (3): 74-79.
- [9] 张琳. 深基坑开挖对邻近既有地铁区间隧道的影响分析 [J]. 福建建设科技, 2020, (6): 27-30.
- [10] 陈仁朋, 孟凡衍, 李忠超, 叶跃鸿, 胡琦. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 856-863.