

城市地铁深基坑开挖引起地层变形特征及预测研究

葛稳强

(江苏省环境地质调查大队, 江苏 南京 210012)

摘 要 城市地铁深基坑施工会不可避免地扰动周围地层, 进而导致位移、沉降以及附加应力重新分布, 这就会对邻近结构及市政设施安全构成威胁。本文以深基坑工程的典型工况为基础, 总结开挖过程所引起的地层变形规律以及影响因素, 分析不同阶段的位移发展特征, 并且结合数值模拟与经验公式来讨论变形预测方法的适用性, 旨在为类似工程提供参考。研究结果显示, 地层变形具备明显的阶段性、累积性以及空间分布特征, 预测模型的选取需要充分考虑地质条件与支护体系特征。

关键词 深基坑; 地铁工程; 地层变形; 经验曲线; 数值模拟

中图分类号: U231.3; TU745.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.020

0 引言

随着城市化进程持续加快、地铁建设规模不断扩大, 深基坑工程数量也随之迅速增长。深基坑是地下空间开发当中的关键环节, 其施工过程常常会伴随较强的地层扰动情况, 若控制不当就容易引发过量沉降, 还可能造成围护结构位移以及邻近建(构)筑物损伤等问题。所以, 准确识别深基坑开挖引起的地层变形特征, 并且对其进行有效预测成为确保施工安全和城市运营稳定的重要技术问题。近些年, 国内外学者围绕深基坑变形机理、监测技术及预测模型开展大量研究, 已经形成了相对比较成熟的理论体系。不过因为城市地铁工程经常处于复杂地质环境当中, 而且基坑形态、支护体系与开挖顺序差异相当显著, 变形机制依然存在一定不确定性^[1]。本文在总结典型工程实践的基础之上, 系统分析城市地铁深基坑地层变形的基本规律及其影响因素, 并且探讨预测方法在工程当中的适用性与局限性, 以期能为实际设计与施工提供理论参考。

1 城市地铁深基坑开挖引起的地层变形特征

1.1 地层变形的总体发展规律

在深基坑进行开挖的过程当中, 地层变形一般会表现出明显的阶段性、空间集中性以及累积性特征, 随着支护结构施工、分层开挖以及降水等关键工况不断推进, 地层变形速率于不同阶段会有显著的变化情

况。开挖初期变形相对较小, 随着开挖深度不断增加以及支护体系作用逐步发挥, 位移和沉降会逐渐累积并且在底部开挖完成之后趋于稳定。在空间分布方面, 最大水平位移大多出现在坑深的0.3~0.6 H_e 处位置, 而最大地表沉降通常位于坑边外某一距离的地方, 并且会随着距离增加向远处进行扩散。变形还具备滞后性的特点, 支护结构变形往往在开挖结束之后仍会缓慢地发展, 这是土体固结、水位变化以及应力重新分布所引起的。

1.2 围护结构侧向位移特征

在深基坑开挖的过程当中, 围护结构如地下连续墙、桩—锚支护桩这类的侧向位移属于最直观且最关键的变形指标, 伴随开挖深度不断加深以及土体卸载逐步推进, 侧向位移会逐渐呈现增大的趋势^[2]。实践监测结果显示, 如地下连续墙, 其最大侧移一般为开挖深度 H 的大约0.05%~0.25%, 平均大概是0.12% H , 位移沿着墙高呈现出“鱼腹形”分布态势, 即顶端与底部的位移比较小而中部位移最大, 中部或者靠近开挖面的高度之处属于最大变形区域。如果基坑处于砂土或者松散填土层, 桩—锚支护结构在降水或者锚索预应力的作用之下, 也有可能产生比较大的水平位移, 其时空分布能够反映出土体与支护结构耦合受力的状态。围护结构侧向位移具备明显的随深度或开挖程度递增、沿高程“中段最大”和地层或支护体系密切相关的典型特征。

作者简介: 葛稳强(1983-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程、环境地质调查等。

1.3 地表沉降与深层土体变形特征

城市地铁深基坑开挖时地表沉降和深层土体变形呈现较稳定的空间分布规律,监测与数值模拟结果显示基坑外地表沉降沿距离基坑边缘方向先增加后减少,沉降曲线大多呈现“凹槽型”,且最大沉降通常出现在离墙体一定距离处,即基坑边缘外 5~15 米范围,之后向远处沉降值逐渐减小并趋于稳定。深层土体在软土区域开挖和土体卸荷常常会引起土层固结沉降、孔隙水压变化,以及侧向位移进而导致深层土体上下层发生变形。此外,在超深基坑中,由于卸荷回弹与应力重分布作用土体可能出现浅层回弹、深层压缩或隆起,甚至在某些地层条件下出现地连墙后“土体上浮”现象。

1.4 基坑底部隆起与隆起影响范围

当深基坑开挖到最后底部时,特别是在软土或者高地下水区域,土体垂直应力会急剧释放,底部土层有可能产生向上的“隆起”(heave)。这种隆起源自超载土体被挖除掉之后,原有的承压情况消失不见,使得土体“回弹”或者因为孔隙水压变化而产生上浮现象。隆起量会随着开挖深度以及土层塑性、压缩历史而不断增加,塑性黏土或者过固结黏土对此尤为敏感。在影响范围方面,如果土层比较软且基坑比较深,底部隆起及其影响区域可能会延伸到基坑边线以外数倍的坑深,规范建议监测范围至少要覆盖边线外 3 倍的基坑深度,而在滨海软土等极端条件之下,其影响范围甚至能够达到 6~8 倍的基坑深度。所以,工程设计与监测必须充分考虑底部隆起与其空间扩展情况,以此来防止基坑底部失稳或者邻近结构受到损害。

2 城市地铁深基坑变形的影响因素分析

2.1 地质与水文条件

在城市地铁深基坑工程中,地质与水文条件是决定地层变形形式和幅度的基础性因素。首先,软土、淤泥质土以及高压缩性黏性土层,由于含水量高、孔隙比大、渗透系数低且抗剪强度弱,在经过开挖卸荷和降水扰动之后容易产生明显沉降、固结与侧向变形,若再施加降水或者进行孔隙水压释放,沉降和变形情况将会进一步加剧。其次,地下水位高、含水层承压或者存在承压水的地层,在降水或者抽水过程当中会引起孔隙水压骤然减小,使得有效应力迅速增加,从而导致土体出现固结沉降或者不均匀变形。此外,若地质条件比较复杂,比如土层非均质、夹砂层、软硬层交错、含砂层与黏层叠置,土体响应就会更为复杂,变形分布可能不均匀且局部变形较为突出。因此,在

地铁深基坑设计和施工的时候,必须通过详尽的地质勘察与水文监测,准确判断地层结构、水文条件以及含水状态,以此制定合理的支护与降水方案,从源头对变形风险进行控制。

2.2 支护体系与结构刚度

在深基坑工程中所选支护体系及其结构刚度是控制地层变形的关键所在。刚度较大的支护结构(如厚壁地下连续墙密排桩或桩—锚桩复合支护)能显著降低开挖过程中围护墙侧向位移与地层沉降。研究显示,随着支护系统抗弯/抗剪刚度提高,最大水平位移与基坑深度之比可从 0.4%~1.5% 降到 0.1%~0.3% 以内^[3]。此外,支护桩嵌固深度桩间距墙体厚度与材料弹性模量等参数对刚度有着重要影响,当嵌固深度足够且桩距合理时,侧向变形和基坑底部隆起风险均能大幅降低,所以在不同地质和水文条件下应针对性选择,并设计支护体系以保证整体刚度满足基坑稳定与变形控制要求。

2.3 开挖方式与施工顺序

在城市地铁深基坑施工中,开挖方式和施工顺序对地层应力释放以及变形过程有着重要影响。常见的开挖方式包含分层开挖(layered excavation)和分层一段开挖(layered-section)这两种。研究结果显示,当基坑比较浅的时候,这两种开挖方式对变形的影响差异不是很大,但随着开挖深度不断增加,分层一段开挖在控制围护结构侧向位移以及地表沉降方面会更加有利^[4]。分层一段开挖借助分块卸荷以及对称或者交替顺序施工的办法,能够减缓土体应力重分布,有利于稳定支护结构并且减少整体变形。相反,要是采用大跨度、快速全面开挖或者不合理的开挖顺序如单侧连续开挖,就会造成不均匀卸荷,使土体产生较大的侧向位移和沉降,甚至还会引发流砂、局部塌陷等风险。所以,针对城市地铁深基坑常见的深度以及复杂地层条件,应该优先采用分层一段、步移/块状开挖并且结合合理施工顺序,以此来减少基坑及周边结构的变形风险。

2.4 市政环境及邻近结构荷载

城市深基坑施工时周边市政环境和邻近结构荷载对地层变形影响较大。若基坑周围有密集管线、道路、既有建筑基础或地下隧道,这些结构会改变原有土体应力状态,当基坑开挖与降水使土体应力重分布,荷载传递和结构—土体耦合会引发不均匀沉降、附加侧向位移或裂缝。若邻近建筑基础或地下结构基础浅且荷载重,其基础荷载叠加在软土或可压缩土层,会降低土体承载力并增强变形敏感性,易放大开挖导致的

土体扰动。市政管线、道路交通（含重载车辆）等动荷载，会通过周期性振动或静载叠加引起土体再扰动或加速变形，在降水或土体松弛期间更为显著。所以，地铁深基坑设计与施工要全面考虑市政环境和邻近结构的荷载/基础条件，合理布置支护体系、监测范围和加固方案，降低开挖引起的变形及结构损伤风险。

3 深基坑地层变形预测方法研究

3.1 基于经验曲线的预测方法

在深基坑或者隧道施工中，基于经验曲线的预测方法主要是来源于 Peck（1969年）等早期统计出来的大量工程实测资料，其经验公式是通过拟合地表沉降和距离基坑，或隧道中心线的关系曲线（通常呈现高斯分布）来估算的。沉降槽形、最大沉降值以及影响范围，采用经验曲线进行预测时，只需要输入基坑或隧道深度、土层类型、开挖断面尺寸等基本参数，便能够快速得出地表沉降的大致分布与幅度，比较适合初期设计或者快速评估阶段。经验方法计算起来较为简便、不需要复杂模型，也不需要大量计算资源，所以在工程实践当中被广泛采用。不过其局限性也比较明显，因为依赖统计数据，其适用性会受限于与原始案例地质条件、支护方式和施工工艺是否相似，当地层复杂、支护体系特殊、施工条件多变时，经验预测往往会偏保守或者发生较大误差。所以，经验曲线方法适用于设计前期的初步估算，而不是最终施工控制，对于复杂或者深基坑工程，应该结合数值模拟或者监测数据做进一步分析。

3.2 基于数值模拟的预测方法

在城市地铁深基坑工程中，基于数值模拟的方法（如有限元法 FEM 或者有限差分法等），能够对地层、支护体系和地下水三者的耦合效应做综合分析，进而对沉降、围护结构位移以及深层土体应力变化等进行精细预测。首先，通过建立能反映实际地质、水文、支护形式以及施工阶段的三维模型，数值模拟可量化分析复杂地质条件下的土-结构相互作用，尤其对地层异质、分层交错以及地下水变化剧烈等情况有良好适用性。其次，模拟结果涵盖土体位移、墙体变形、孔隙水压和应力分布等多个量，能在施工前对不同方案如支护结构、开挖顺序、降水方案等进行比选，为方案优化提供依据。然而此类方法对土体力学参数、边界条件、模型网格划分以及支护结构细节较为敏感，如果参数选取或者模型简化不当，预测误差可能会比较大，所以数值模拟方法虽强大，但应结合实测监测数据进行模型校正，以此提高预测精度与可靠性。

3.3 基于机器学习的预测方法

在深基坑和地铁基坑相关工程中，机器学习方法越来越多地被用于地层变形以及支护结构变形的预测工作。通过收集历史工程监测数据（涵盖支护结构侧移、地表沉降、施工参数、地质-水文条件、施工阶段信息等内容）作为训练样本，常用模型包含人工神经网络、支持向量机、深度学习模型、集成学习等。这些模型的优势主要在于能够处理多个复杂变量之间的非线性耦合关系，适合复杂地质、水文、支护体系与施工过程混合影响下的变形预测，和传统经验或数值模拟相比，其预测速度更快、计算资源要求更低、便于实时或近实时应用。近年来也有研究尝试将物理约束+数据驱动结合起来，将土-结构力学规律嵌入 ML 框架以提升预测精度与稳定性^[5]。然而其局限也比较明显，ML 模型高度依赖历史监测数据的质量与数量，在小样本、异构数据或地质/施工条件差异大时，模型泛化能力会下降，容易产生较大误差。所以，机器学习方法适合在施工监测/设计阶段和数值模拟、经验方法结合使用，既发挥其快速预测和实时预警优势，也通过物理约束与监测校正增强可靠性。

4 结束语

在城市地铁深基坑开挖过程当中引起的地层变形具有阶段性特点，空间分布规律明显，影响因素复杂，不同地质条件、支护体系以及施工工序都会对变形产生重要的影响，通过结合经验方法、数值模拟以及智能预测能够显著提升变形控制的效果。未来研究需要强化多源监测数据融合、智能预测模型的工程化应用以及复杂环境下变形机理的探索，以进一步提高深基坑工程的安全性与可控性。

参考文献：

- [1] 李淑,张亚芬,王笑然,等.北京地铁车站深基坑任意位置变形预测研究[J].建筑科学,2024,40(05):47-55,88.
- [2] 魏飞翼.换乘地铁车站深基坑变形特性及地表沉降预测研究[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [3] 陈建刚.超深基坑开挖对临近地铁与地层的影响分析[J].建筑机械,2024(10):212-215,223.
- [4] 孙斌,刘恒,刘婷婷.超深基坑开挖对临近地铁与地层的影响及控制措施[J].石材,2025(07):56-58.
- [5] 曾凌云.基于时空效应下深基坑开挖对临近地铁隧道的影响分析[D].南昌:南昌工程学院,2023.