

深基坑开挖和降水对地面沉降的影响研究

于向吉 闫烨琛

天津市地质工程勘测设计院有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i1.2117

[摘要] 本文系统研究了深基坑开挖与降水对地面沉降的影响机制、关键因素及控制措施。通过分析土体应力变化、地下水渗流等物理过程,结合地质条件、工程设计与施工参数及周边环境因素,揭示地面沉降的发生规律。阐述了传统与现代监测技术的原理及应用,并提出优化设计、施工控制和地基加固等措施。研究成果为深基坑工程地面沉降防控提供理论依据与技术支持,对保障城市建设安全具有重要意义。

[关键词] 深基坑开挖; 降水; 地面沉降; 影响机制; 控制措施

中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A

Study on the influence of deep foundation pit excavation and dewatering on land subsidence

Xiangji Yu Yechen Yan

Tianjin Geological Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] This paper systematically examines the mechanisms, key factors, and control measures of ground settlement caused by deep foundation pit excavation and dewatering. By analyzing physical processes such as soil stress changes and groundwater seepage, and considering geological conditions, engineering design and construction parameters, and surrounding environmental factors, the paper elucidates the patterns of ground settlement. It also explains the principles and applications of traditional and modern monitoring technologies, and proposes measures for optimized design, construction control, and foundation reinforcement. The research findings provide a theoretical basis and technical support for the prevention and control of ground settlement in deep foundation pit projects, which is crucial for ensuring urban construction safety.

[Key words] deep foundation pit excavation; dewatering; ground settlement; influence mechanism; control measures

引言

随着城市化进程的加速,城市建设不断向地下空间拓展,深基坑工程数量与日俱增。深基坑开挖和降水作为深基坑工程的关键环节,虽为地下工程施工创造了条件,但不可避免地改变了土体原有的应力状态和地下水环境,进而引发地面沉降问题。地面沉降不仅会对基坑周边的建筑物、地下管线等基础设施造成不同程度的损害,威胁人民生命财产安全,还可能影响城市的可持续发展。因此,深入研究深基坑开挖和降水对地面沉降的影响,探寻有效的控制措施,对保障城市建设的安全与稳定具有重要的现实意义。

1 深基坑开挖和降水对地面沉降的影响机制

1.1 深基坑开挖与支护结构变形引起地面沉降的机制

1.1.1 土体应力释放与变形原理

深基坑开挖过程打破了土体原有的应力平衡状态。根据弹

性力学理论,土体在开挖卸荷后,水平应力 σ_h 和竖向应力 σ_v 减小,产生应力释放。以二维平面应变问题为例,开挖引起的土体水平位移 u 和竖向位移 w 可通过下式估算:

$$\begin{cases} u = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \Delta\sigma_h x \\ w = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \Delta\sigma_v y \end{cases}$$

其中, ν 为土的泊松比, E 为土的弹性模量, $\Delta\sigma_h$ 和 $\Delta\sigma_v$ 分别为水平和竖向应力变化量, x 和 y 为计算点到开挖边界的距离。应力释放导致土体发生弹性变形和塑性变形,进而引起地面沉降。随着开挖深度增加,应力释放范围和程度扩大,地面沉降量也随之增大^[1]。不同类型的土体在应力释放后的变形特性差异显著。粉质黏土具有一定的黏聚力和可塑性,在应力释放时,其变形过程相对较为缓慢,且会呈现出一定的蠕变特性,即随着

时间推移变形会持续发展。砂土的颗粒较大,透水性强,应力释放后,砂土的颗粒会迅速调整位置,产生明显的瞬时沉降,不过其沉降稳定速度相对较快,只要后续没有持续的应力变化,沉降发展通常能较快停止。

1.1.2 基坑支护结构变形对地面沉降的影响

基坑支护结构在土体压力作用下会发生变形,其变形模式主要包括墙体水平位移、支撑轴力变化等。以桩-撑支护结构为例,墙体水平位移会带动周边土体产生位移,通过土-结构相互作用,将变形传递到地面,引发地面沉降。支撑轴力的变化会影响支护结构的整体稳定性,若支撑轴力不足,支护结构可能发生过大变形,导致地面沉降加剧。研究表明,支护结构的刚度EI(E为材料弹性模量,I为截面惯性矩)对控制地面沉降起着关键作用,刚度越大,支护结构变形越小,地面沉降量也相应减小^[2]。

1.2 深基坑降水引起地面沉降的机制

1.2.1 地下水水位下降与土体固结原理

深基坑降水使地下水水位下降,根据太沙基有效应力原理,土体中的有效应力 σ' 会增加,其关系可表示为:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

其中, σ 为总应力, u 为孔隙水压力。随着降水的进行,孔隙水压力降低,有效应力增大,土体颗粒间的作用力发生变化,导致土体产生固结沉降。在饱和软土地层中,这种固结沉降尤为明显,且沉降过程具有时间效应,通常遵循一维固结理论,其沉降量 S 随时间 t 的变化可通过下式计算:

$$S(t) = S_{\infty} \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{4} T_v} \right) \quad (2)$$

其中, S_{∞} 为最终沉降量, T_v 为时间因数^[3]。

1.2.2 渗透力与土体稳定性的关系

降水过程中,地下水的渗流产生渗透力 j ,其计算公式为:

$$j = \gamma_w i \quad (3)$$

其中, γ_w 为水的重度, i 为水力梯度。渗透力作用于土体颗粒,当渗透力超过土体的抗剪强度时,土体颗粒会发生移动,导致土体结构破坏,引发地面沉降。在砂性土地层中,渗透力容易引起流砂、管涌等现象,严重威胁基坑和周边环境的安全,加剧地面沉降^[4]。

2 深基坑开挖和降水对地面沉降的影响因素分析

2.1 地质条件因素

2.1.1 土层性质的影响

不同土层的物理力学性质对地面沉降影响显著。软土层具有高压缩性、低渗透性和低抗剪强度的特点,在深基坑开挖和降水作用下,容易产生较大的压缩变形和沉降。例如,淤泥质软土的压缩模量 E_s 通常小于3MPa,在应力变化时会发生明显的压缩沉降^[5]。粉质黏土在深基坑开挖和降水影响下,在降水初期,粉质黏土的沉降量可能不明显,但随着时间推移,孔隙水逐渐排出,土体有效应力不断增加,沉降会持续发展,且由于其结构性较强,

扰动后强度降低,可能导致更大的沉降。砂土的渗透性强,在降水过程中水位下降快,孔隙水压力迅速消散,有效应力增加,易引发土体的瞬时沉降。但砂土的颗粒骨架相对稳定,只要不发生流砂、管涌等破坏现象,沉降稳定也相对较快。而黏土层的渗透性低,其沉降具有明显的时间滞后性,在降水初期沉降量较小,但随着时间推移,沉降会逐渐发展。

2.1.2 地下水分布的影响

地下水的水位、水量和含水层分布直接影响深基坑降水的效果和地面沉降程度。潜水含水层水位较高时,降水引起的水位下降幅度大,有效应力增量也大,从而导致较大的地面沉降。承压含水层的存在会增加降水难度,若处理不当,可能引发突涌等事故,同时也会对地面沉降产生影响。此外,含水层的厚度、透水性和补给条件等因素,决定了降水的速率和持续时间,进而影响地面沉降的发展过程。

2.2 基坑工程设计与施工因素

2.2.1 基坑支护设计参数的影响

基坑支护结构的类型、尺寸和刚度等设计参数对地面沉降控制至关重要。例如,地下连续墙的厚度、配筋率和入土深度会影响其抵抗土体变形的能力,合理增加墙厚和入土深度可有效减小墙体水平位移,从而降低地面沉降。支撑体系的布置和间距也会影响支护结构的受力状态,合理的支撑间距能使支护结构受力均匀,减少变形传递到地面的沉降量。

2.2.2 开挖与降水方案的影响

开挖顺序和速度会改变土体应力释放的过程。分层分段开挖可使土体应力逐步释放,减少土体变形的突变,相比一次性开挖,能有效降低地面沉降。降水方式和降水量的选择也会影响地面沉降。管井降水适用于降水深度较大、涌水量较大的情况,但可能导致较大范围的水位下降,引起地面沉降;真空井点降水适用于浅层降水,对周边环境的影响相对较小。控制降水量和降水速率,避免过度降水,是减少地面沉降的关键措施。

2.3 周边环境因素

2.3.1 邻近建筑物和构筑物的影响

邻近建筑物和构筑物的基础形式、结构类型和荷载大小决定了其对地面沉降的敏感性。浅基础建筑物对地面沉降更为敏感,当地面发生沉降时,容易产生不均匀沉降,导致建筑物倾斜、开裂。高层建筑的荷载较大,会增加地基土的附加应力,在地面沉降作用下,其基础沉降量也会相应增大,且不均匀沉降的危害更为严重。

2.3.2 地下管线和基础设施的影响

地下管线的材质、管径和埋深影响其对地面沉降的耐受性。刚性管线(如混凝土管)在地面沉降作用下容易产生裂缝、断裂;柔性管线(如塑料管)虽有一定的变形适应能力,但过大的沉降也会导致管线接头处渗漏。城市地下交通等基础设施对地面沉降的要求更为严格,地面沉降可能影响地铁轨道的平顺性,威胁行车安全。

3 深基坑开挖和降水引起地面沉降的控制措施

3.1 优化基坑工程设计

3.1.1 合理选择支护结构和参数

根据地质条件、周边环境和工程要求,综合考虑支护结构的安全性和经济性。对于软土地层,可采用刚度较大的地下连续墙结合内支撑支护体系;对于砂性土地层,可选用钻孔灌注桩支护。在进行支护结构设计时,运用先进的数值模拟软件,如PLAXIS、FLAC等,对不同的支护结构方案进行模拟分析。通过模拟,可以详细了解在不同工况下支护结构的受力、变形情况以及周边土体的位移变化,从而优化支护结构的尺寸、刚度和入土深度等参数。

3.1.2 优化开挖与降水方案

采用分层分段开挖方法,每层开挖深度控制在2-3m,每段开挖长度不超过20m,使土体应力逐步释放。在实际施工中,根据地质条件和现场情况,可进一步细化分层分段方案。例如,在土层较软的区域,适当减小每层开挖深度和每段开挖长度,以更好地控制土体变形。同时,优化降水方案,采用按需降水原则,根据基坑开挖进度和水位监测情况,合理控制降水深度和速率,避免过度降水。建立精确的水位监测系统,实时掌握地下水位变化情况,当水位下降接近预警值时,及时调整降水设备的运行参数。还可采用回灌技术,在基坑周边设置回灌井,保持地下水位的相对稳定,减少地面沉降。

3.2 加强施工过程控制

3.2.1 严格施工工艺和质量控制

在基坑支护施工过程中,严格控制成桩(墙)质量,确保支护结构的强度和完整性。对于灌注桩,要严格控制泥浆的性能指标、钢筋笼的制作和下放质量以及混凝土的浇筑质量;对于地下连续墙,要保证槽壁的垂直度和稳定性,以及墙体接头的质量。土方开挖应遵循“对称、均衡、分层、分段”原则,严禁超挖和有序开挖。在开挖过程中,配备专业的测量人员,实时监测开挖深度和范围,确保按照设计要求进行施工。降水施工要保证降水设备的正常运行,定期检查降水效果,及时调整降水参数。建立完善的降水设备维护管理制度,定期对降水设备进行检查、保养和维修,确保设备的可靠性。

3.2.2 实时监测与预警

建立地面沉降实时监测和预警系统,设定沉降预警阈值。采用高精度的监测仪器,如电子水准仪、全站仪等,对基坑周边地面沉降进行实时监测。同时,结合信息化技术,将监测数据实时传输到监控中心,实现数据的自动采集、分析和处理。当监测数据达到预警值时,及时调整施工方案,采取加强支护、减缓开挖速度或停止降水等应急措施,防止地面沉降过大对周边环境造成严重危害。制定详细的应急预案,明确在不同预警级别下应采取的具体措施和责任分工,确保在紧急情况下能够迅速、有效地

进行应对。

3.3 采用地基处理和土体加固技术

3.3.1 地基处理方法

注浆加固是常用的地基处理方法之一,通过向土体中注入水泥浆、化学浆液等,提高土体的强度和稳定性,减少地面沉降。根据不同的地质条件和工程要求,选择合适的注浆材料和注浆工艺。对于砂性土地层,可采用渗透注浆,使浆液在土体孔隙中渗透扩散,填充孔隙,提高土体的密实度;对于黏性土地层,可采用劈裂注浆,通过高压使浆液在土体中劈裂形成脉状结石体,增强土体的强度。强夯法适用于处理砂土、粉土和碎石土等土层,通过强大的夯击力,使土体密实,提高地基承载力。

3.3.2 土体加固技术

深层搅拌桩通过水泥浆与土体搅拌混合,形成具有一定强度的桩体,提高土体的抗剪强度和整体性。根据工程需要,可采用单轴、双轴或三轴深层搅拌桩,合理设计桩径、桩长和桩间距。高压旋喷桩利用高压喷射流切割土体并与水泥浆液混合,形成柱状加固体,可有效控制基坑变形和地面沉降。在施工过程中,要严格控制喷射压力、喷射流量和提升速度等参数,确保加固体的质量。此外,还可结合使用土钉墙、预应力锚索等土体加固技术,根据不同的地质条件和工程需求,合理选择地基处理和土体加固技术的组合,能显著提高地基的稳定性,减少地面沉降。

4 结束语

深基坑开挖和降水引起的地面沉降是一个复杂的工程问题,涉及土体力学、地下水动力学等多学科知识。本文通过对其影响机制、影响因素和控制措施的研究,揭示了地面沉降的发生发展规律,提出了有效的防控策略,有利于保障城市建设的安全与可持续发展。

[参考文献]

- [1]黄茂松,李进军,王卫东.深基坑开挖对邻近地铁隧道影响的数值模拟[J].岩土工程学报,2021,43(10):1805-1814.
- [2]王卫东,徐中华,傅德明.深基坑工程技术的发展与展望[J].建筑施工,2021,43(08):1457-1461.
- [3]刘松玉,童立元,杜延军.软土地基沉降计算理论与方法研究进展[J].土木工程学报,2022,55(03):112-123.
- [4]赵明华,邹新军,陈昌富.渗透力作用下砂土边坡稳定性分析[J].岩土力学,2021,42(06):1667-1676.
- [5]龚晓南,俞建霖,潘建峰.软土工程特性及地基处理技术[J].工程地质学报,2020,28(03):545-556.

作者简介:

于向吉(1981--),男,汉族,天津人,天津市地质工程勘测设计院有限公司,硕士研究生,高级工程师,工程地质与水文地质。