不同地下水位条件下基坑开挖对周围环境影响 的数值模拟分析

朱海涛,查陈诚,尹迎超

上海理工大学环境与建筑学院,上海

收稿日期: 2025年6月24日; 录用日期: 2025年7月17日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

为研究地下水位不同时,基坑开挖对地表周围环境的影响,本文通过数值模拟的方式,将实际工程中分层土体开挖不同类型的基坑时对周围环境的影响作为研究对象,建立了复杂工况下基坑开挖过程的数值分析模型。对比不同水位条件下,两种不同基坑开挖过程中地表沉降和应力分析。结果表明地下水位不同时,对基坑开挖的施工影响较大,不同类型基坑开挖也对施工时对周围环境有较大影响。本文研究成果可为地铁车站基坑开挖施工方法选择、施工风险评估及优化设计提供重要参考依据。

关键词

数值模拟,基坑开挖,地下水位,地表沉降

Numerical Simulation Analysis of the Impact of Excavation on the Surrounding Environment under Different Groundwater Level Conditions

Haitao Zhu, Chencheng Zha, Yingchao Yin

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 24th, 2025; accepted: Jul. 17th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

To investigate the impact of excavation on the surrounding surface environment under different groundwater levels, this study employs numerical simulation to analyze the effects of excavating

different types of pits in layered soil conditions in actual engineering projects. A numerical analysis model for the excavation process under complex conditions has been established. The study compares the surface settlement and stress analysis of two different types of excavation processes under varying groundwater levels. The results indicate that different groundwater levels significantly impact excavation construction, and different types of excavation also have a substantial effect on the surrounding environment during construction. The findings of this study provide important reference criteria for selecting excavation construction methods, assessing construction risks, and optimizing designs for subway station excavation projects.

Keywords

Numerical Simulation, Excavation of Foundation Pits, Groundwater Level, Ground Surface Subsidence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> CC Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加快和地下空间开发的日益增多,基坑工程在城市建设中扮演着至关重要的角色。 然而,基坑开挖不可避免地会扰动周围土体,改变原有应力场和地下水流场,进而对邻近建筑物、地下 管线及周边环境产生不利影响。特别是在地下水位较高的地区,基坑开挖过程中的降水与支护措施可能 进一步加剧土体变形,甚至引发地面沉降、基坑失稳或周边结构损坏等工程问题。因此,研究不同水位 条件下基坑开挖对周围环境的影响,对于确保工程安全、优化设计方案及降低环境风险具有重要意义。

当前,针对复杂工况下基坑开挖引起的地表沉降与结构响应问题,国内学者开展了多角度研究。武 玉山等[1]通过以佛山地铁4号线绿岛湖北站深基坑为工程背景,采用数值模拟与现场实测相结合的方法 分析基坑开挖施工过程中支护结构与周边环境的变形规律及影响因素。黎红平等[2]与许成杰等[3]利用数 值模拟与现场监测分析了砂土与黏土条件下的基坑开挖时地表沉降特征。此外,杨笑男[4]从具体的工程 实例入手,以深基坑开挖的前、中、后不同阶段的全过程管理与监测数据为依托,采取多专业(勘察、设 计、监测)联合方式,采用不同数值分析方法对影响结果进行分析比较,进而反演推算合适参数及计算模 型,通过不断以实际情况进行验证。金修伟等[5]以绍兴市地铁1号线城市广场站项目为研究背景,基于 现场监测数据,对地连墙水平位移、地表沉降、建筑物沉降等因素进行探讨和分析,使用有限元分析软 件建立相应的数值模型,探讨和分析不同工况下地连墙水平位移、地表沉降和建筑物沉降随基坑开挖进 行的变形规律。段其广[6]选取济南黄河隧道盾构工作井基坑工程作为研究对象,开展粉质黏土地层条件 下基坑变形实测数据与数值模拟结果对比分析,系统分析粉质黏土地质条件下深基坑开挖过程中的变形 特性。陈云娟等[7]文章基于济南市开源路综合管廊工程,构建数值计算模型,考虑桩嵌固深度、钢支撑 数量、支护桩类型等因素,研究不同工况对管廊基坑开挖变形的影响。杨士杰等[8]以青岛地铁5号线澳 柯玛桥站为研究对象,通过有限元软件建立三维模型,分析基坑开挖以及对车站既有段和邻近桥桩的变 形影响。叶征远[9]通过有限元软件分析不同偏压条件下,基坑开挖过程中支护排桩的变形规律,查明了 偏压作用在基坑开挖过程中,对支护排桩变形程度的影响。侯书学[10]依托合肥市新桥机场 S1 号线国际 小镇站深基坑工程,通过对现场监测数据进行分析,归纳出基坑开挖的变形规律;再运用数值模拟方式, 建立基坑三维模型,将运算结果与现场监测数据对比分析验证基坑考虑降水模型建立的合理性;后分别

讨论固有因素、设计因素和施工因素等相关参数对基坑开挖变形的影响规律。

目前,国内外学者针对基坑开挖的环境效应已开展了大量研究,主要集中在土体变形机理、支护结构受力特性及降水引起的沉降预测等方面。然而,地下水位的变化对基坑开挖响应的影响机制尚未得到充分探讨。不同水位条件不仅会改变土体的力学性质,还可能影响基坑降水方案的可行性与效率,进而对周围环境的扰动程度产生显著差异。此外,现有研究多集中于单一水位工况,缺乏对不同水位条件下基坑开挖与环境响应的系统性对比分析。基于此,本研究拟通过数值模拟、理论分析及现场监测相结合的方法,探讨不同地下水位下基坑开挖对周围土体变形、邻近建筑物及地下管线的影响规律。研究旨在揭示水位变化与基坑环境效应之间的内在联系,为复杂水文地质条件下的基坑设计与施工提供科学依据,最终实现工程安全与环境保护的协同优化。

2. 工程背景和数值模拟模型建立

2.1. 工程概况和土体参数

依据工程地质调绘及地质钻探,第一层,杂填土,层厚2.5m,以碎石、砖块等建筑垃圾为主,夹粘 性土,局部夹少量生活垃圾等,普遍分布,局部较厚。第二层,素填土,层厚0.9m,夹植物根茎,及少 量贝壳碎屑,以粘性土为主,欠固结土。第三层,淤泥质粉质粘土,层厚1.3m,饱和,流塑,高等压缩 性;含云母、有机质,土质不均,夹粉性土,稍有光泽,无摇振反应,干强度中等压缩性;主要由长石、 石英、云母等矿物组成,土质尚均,普遍分布。第四层,粉质粘土,层厚1.3m,属中等压缩性,软塑。 含云母、有机质,土质不均,夹薄层粉土,稍有光泽,无摇震反应,干强度中等,韧性中等。第五层,淤 泥质粉质粘土,4.05m,饱和,流塑,高等压缩性;含云母、有机质,土质不均,夹粉性土,稍有光泽, 无摇振反应,干强度中等压缩性;主要由长石、石英、云母等矿物组成,土质尚均,普遍分布。第六层, 土为淤泥质粘土,层厚9.15m,饱和,流塑,高等压缩性;含云母、有机质,土质较均匀,有光泽,无 摇振反应,干强度高,韧性高,普遍分布。第七层,黏土,层厚4.5m,很湿~饱和,软塑~流塑,高等压 缩性;土质均匀,含云母、有机质,夹泥钙质结核、半腐芦苇根茎,有光泽,无摇振反应,干强度高等, 韧性高等,普遍分布。第八层,粉质黏土,层厚2.1m,属中等压缩性,软塑。土质均匀,含云母、有机 质,夹薄层粉土,稍有光泽,无摇震反应,干强度中等,韧性中等,普遍分布。

第九层,粉质粘土,层厚 3.65 m,属中等压缩性,软塑。土质不均,含云母、有机质,夹薄层粉土, 稍有光泽,无摇震反应,干强度中等,韧性中等。开挖土体的相关参数以及基坑开挖周围环境如下表1所 示。

土体	层厚(m)	容重(KN/m ³)	压缩模量(MPa)	泊松比	内摩擦角(°)
①杂填土	1.28	18	3	0.15	10
②粉质粘土	1.8	18.6	8.4	0.19	14.5
③淤泥质粉质粘土	7.32	17.3	6	0.28	13
④淤泥质粘土	7.8	16.6	4	0.32	9.5
⑤粘土	4.28	17	7.5	0.31	15
⑥粉质粘土	2.12	17.8	8.4	0.30	14
⑦粉质粘土	3.2	19.3	8.4	0.35	42
⑧砂质粉土夹粉砂	12.2	18.9	8	0.33	23.5

Table 1. Physical and mechanical parameters of the model 表 1. 模型物理力学参数

2.2. 施工工况模拟方案

根据上述给定的土体参数和隧道周围环境,模拟开挖两种不同类型基坑。根据地层剖面图建立 PLAXIS2D 二维有限元数值模型,模型一主要分为土层、钻孔桩、支撑和底板结构四部分。土体底部长 70 m,两侧侧边高均为 40 m,呈矩形分布。基坑开挖分三步进行,其中第一层开挖深度为 3.4 m,第二层 开挖深度为 3.5 m,第三层开挖深度为 3.5 m。隧道模型的建模过程如下图 1 所示。模型二主要分为土层、 钻孔桩、支撑和底板结构四部分。土体底部长 170 m,两侧侧边高均为 40 m,呈矩形分布。基坑开挖分 四步进行,其中第一层开挖深度为 3.2 m,第二层开挖深度为 2.7m,第三层开挖深度为 3 m,第四层开挖 3 m。隧道模型的建模过程如下图 2 所示。

在数值模拟过程中,各土层本构关系采用土体硬化小应变模型(HSS)进行模拟,定义边界条件为弹性, 材料属性设置为各项同性,并设置成 2D 平面应变单元。钻孔桩、支撑和底板的材料性质设置为弹性,定 义为各项同性材料,属性为 2D 平面应变单元。进行网格划分时,设置中等密度的网格,并对开挖部分土 体进行网格加密处理。网格划分完成后,模型一共生成 9238 个网格,8924 个节点,模型二共生成 12524 个网格,12163 个节点。模型中涉及的物理参数见表 1。



Figure 1. Model 1 图 1. 模型一



开挖前

Figure 2. Model 2 图 2. 模型二

基坑开挖的模拟首先是将钻孔桩激活;第二步进行第一层土体开挖,即停用第一层土体,激活第一 道支撑,并抽干开挖第一层土时地下水位以下的水;第三步进行第二层土体开挖,即停用第二层土体, 激活第二道支撑,并抽干开挖第二层土时地下水位以下的水;第四步进行第三层土体开挖,即停用第三 层土体,激活第三道支撑,并抽干开挖第三层土时地下水位以下的水;第五步进行第四层土体开挖,即 停用第四层土体,激活第四道支撑,并抽干开挖第四层土时地下水位以下的水;最后进行底板施工。在 数值模拟分析中,共设置0m、-2m地下水位,并设置四个开挖阶段,同时在同一水位条件下,设置三 种不同刚度的地连墙,总共设置19种工况,以探究不同工况对基坑开挖的影响。

3. 数值模拟结果分析

3.1. 水位0m, 开挖后模拟结果

3.1.1. 水位 0 m, 模型一开挖后模拟结果

由图 3 可知,开挖第三层土地下水位为 0 m 时,基坑两侧顶部岩体发生沉降,其中最大沉降量为 16.52 mm,最小沉降量为 0.4701 mm。基坑两侧结构向基坑方向发生水平位移,左侧结构位移最大值为 20.18 mm,右侧结构位移最大值为 22.27 mm。



(b) 两侧水平位移图

Figure 3. Water level 0 m, displacement diagram after excavation of Model 1 图 3. 水位 0 m, 模型一开挖后位移图

3.1.2. 水位 0 m, 模型二开挖后模拟结果

由图 4 可知,开挖第四层土地下水位为 0 m 时,基坑两侧顶部岩体发生沉降,其中最大沉降量为 6.972 mm,最小沉降量为 0.3694 mm。基坑两侧岩体向基坑方向发生水平位移,左侧结构位移最大值为 3.724 mm,右侧结构位移最大值为 10.14 mm。





(b) 两侧水平位移图

Figure 4. Water level 0 m, displacement diagram after excavation of Model 2 图 4. 水位 0 m, 模型二开挖后位移图

3.2. 水位-2m, 开挖后模拟结果

3.2.1. 水位-2 m, 模型一开挖后模拟结果

由图 5 可知,开挖第四层土地下水位为-2 m 时,基坑两侧顶部岩体发生沉降,其中最大沉降量为 13.08 mm,最小沉降量为 0.7985 mm。基坑两侧结构向基坑方向发生水平位移,左侧结构位移最大值为 16.4 mm,右侧结构位移最大值为 17.86 mm。



(b) 两侧水平位移图

Figure 5. Water level -2 m, displacement diagram after excavation of Model 1 图 5. 水位-2 m, 模型一开挖后位移图

3.2.2. 水位-2m, 模型二开挖后模拟结果

由图 6 可知,开挖第四层土地下水位为-2 m 时,基坑两侧顶部岩体发生沉降,其中最大沉降量为 8.405 mm,最小沉降量为 0.4088 mm。基坑两侧岩体向基坑方向发生水平位移,左侧结构位移最大值为 4.196 mm,右侧结构位移最大值为 12.01 mm。



(b) 两侧水平位移图

Figure 6. Water level -2 m, displacement diagram after excavation of Model 2 图 6. 水位-2 m, 模型二开挖后位移图

4. 地表沉降以及两侧水平位移分析

4.1. 同一水位,不同开挖过程地表沉降分析

4.1.1. 模型一地表沉降分析

同一水位,不同开挖阶段地表沉降图见图7、图8。







Figure 8. Water level -2 m, comparison of ground surface settlement at different excavation stages 图 8. 水位-2 m, 不同开挖阶段地表沉降对比图

从图 7、图 8 中可以看出,基坑开挖后基坑两侧的土体沉降呈现凹槽形,从图中可以看到,基坑两侧 土体沉降量随距离基坑的水平长度而改变,呈现出先增大后减小的趋势。

当地下水位一定时,基坑两侧的沉降量如图所示。当地下水位为0m时,开挖第一阶段两侧土体最 大沉降量为2.2mm,开挖第二阶段两侧土体的最大沉降量为8.0mm,开挖第三阶段两侧土体的最大沉降 量为26.7mm,第三阶段开挖比第一阶段开挖最大沉降量增加了24.5mm,增长幅度为1114%;当地下水 位为-2m时,开挖第一阶段两侧土体最大沉降量为1.6mm,开挖第二阶段两侧土体的最大沉降量为5.9 mm,开挖第三阶段两侧土体的最大沉降量为21.2mm,第三阶段开挖比第一阶段开挖最大沉降量增加了 19.6mm,增长幅度为1225%。可以看出,水位一定时,基坑两侧沉降量随着开挖阶段的进行而增加;当 地下水位发生变化时,相同开挖阶段随着地下水位下降地表沉降逐渐减小,同时,随着地下水位的下降, 不同开挖阶段之间的相互影响越大。

4.1.2. 模型二地表沉降分析

同一水位,不同开挖阶段地表沉降图见图 9、10。







Figure 10. Water level -2 m, comparison of ground surface settlement at different excavation stages 图 10. 水位-2 m, 不同开挖阶段地表沉降对比图

从图 9、图 10 可以看出,基坑开挖后基坑两侧的土体沉降呈现凹槽形,从图中可以看到,基坑两侧 土体沉降量随距离基坑的水平长度而改变,呈现出先增大后减小的趋势。

当地下水位一定时,基坑两侧的沉降量如图所示。当地下水位为0m时,开挖第一阶段两侧土体最 大沉降量为0.7mm,开挖第二阶段两侧土体的最大沉降量为1.6mm,开挖第三阶段两侧土体的最大沉降 量为3.0mm,开挖第四阶段两侧土体最大沉降量为6.9m,第四阶段开挖比第一阶段开挖最大沉降量增 加了6.2mm;当地下水位为-2m时,开挖第一阶段两侧土体最大沉降量为0.9mm,开挖第二阶段两侧 土体的最大沉降量为2.0mm,开挖第三阶段两侧土体的最大沉降量为3.7mm,开挖第四阶段两侧土体最 大沉降量为8.5m,第四阶段开挖比第一阶段开挖最大沉降量增加了7.6mm。可以看出,水位一定时,基 坑两侧沉降量随着开挖阶段的进行而增加;当地下水位发生变化时,相同开挖阶段随着地下水位下降地 表沉降逐渐减小,同时,随着地下水位的下降,不同开挖阶段之间的相互影响越大。

根据上述对比结果可知,基坑开挖过程中,地下水位的变化会显著影响地表沉降和基坑两侧水平位 移的分布特征。当地下水位较高时,土体有效应力降低,孔隙水压力增大,导致土体抗剪强度减弱,进 而引发更显著的地表沉降和基坑侧向位移;因此,在基坑工程中,需结合水文地质条件和土体力学特性, 采取针对性措施以控制水位变化对基坑稳定性的不利影响。

4.2. 同一水位,两侧水平位移分析

4.2.1. 模型一两侧水平位移分析

同一水位,不同开挖阶段两侧水平位移见图 11、图 12。

如图 11、图 12 所示,基坑开挖左右侧结构的水平位移在水位相同时不同开挖阶段的对比,可得到以 下结论:地下水位一定时,结构两侧的水平位移随着开挖阶段的进行而增加;同时,当地下水位下降时, 相同开挖阶段两侧结构水平位移随着地下水位的下降而减小。

当地下水位一定时,三个开挖阶段开挖时两侧结构水平位移都呈现随深度的增大先变大后变小的趋势。当开挖阶段一定时,随着地下水位的降低,两侧结构的水平位移值减少。左右侧结构的水平位移在 相同的地下水位和相同开挖阶段情况下也不完全相同,基本呈现右侧结构水平位移大于左侧结构水平位移。

同时根据左右侧结构的水平位移差距,由于右侧的结构水平位移更大,所以更加关注右侧结构是否 满足基坑开挖要求,要及时监测不同开挖阶段结构的位移变化,保证基坑开挖的正常进行。



Figure 11. Water level 0 m, comparison of horizontal displacement of structures on both sides at different excavation stages 图 11. 水位 0 m, 不同开挖阶段两侧结构水平位移对比图



Figure 12. Water level -2 m, comparison of horizontal displacement of structures on both sides at different excavation stages 图 12. 水位-2 m, 不同开挖阶段两侧结构水平位移对比图

4.2.2. 模型二两侧水平位移分析

同一水位,不同开挖阶段两侧水平位移见图 13、图 14。







Figure 14. Water level -2 m, comparison of horizontal displacement of structures on both sides at different excavation stages 图 14. 水位-2 m, 不同开挖阶段两侧结构水平位移对比图

如图 13、图 14 所示,基坑开挖左右侧结构的水平位移在水位相同时不同开挖阶段的对比,可得到以 下结论:地下水位一定时,结构两侧的水平位移随着开挖阶段的进行而增加;同时,当地下水位下降时, 相同开挖阶段两侧结构水平位移随着地下水位的下降而减小。

当地下水位逐渐下降时,除了地下水位为-4m时,第三阶段开挖时基坑两侧结构的水平位移随着深度增加而增大,当水位为-4m时,在达到一定深度时,水平位移呈现出减小的趋势;当地下水位一定时,第一阶段开挖和第二阶段开挖时两侧结构水平位移都呈现随深度的增大先变大后变小的趋势。随着地下水位的增大,两侧结构的水平位移的变化量随着深度的增加也增大,尤其是水位为-6m时,随着深度的增大,水平位移变化量很大。左右侧结构的水平位移在相同的地下水位和相同开挖阶段情况下也不完全相同,基本呈现右侧结构水平位移大于左侧结构水平位移。

根据上述结果可知,基坑开挖过程中,地下水位变化会显著影响基坑侧壁水平位移的分布特征和变 形规律。当水位较高时,一方面土体有效应力降低导致抗剪强度减弱,使侧壁更易发生较大变形;另一 方面渗流作用会产生附加水压力,推动土体向坑内移动,尤其在渗透性较强的砂土层中更为明显。若不 同类型基坑两侧水位存在差异,水力梯度的不对称性将导致两侧土体受力不均,表现为一侧位移明显大 于另一侧。此外,水位变动会改变土体的流变特性,在软黏土层中可能引发时间效应明显的蠕变变形。 因此,在设计和施工中需充分考虑地下水位变化对侧向位移的影响,采取降水控制或加固措施确保基坑 稳定性。

4. 结论

本文基于三维数值模拟方法,在复杂工程背景下,两种不同类型基坑开挖地表沉降和基坑两侧水平 位移分析。主要结论如下:

(1)不同地下水位条件下,两种不同类型基坑开挖对基坑周围地表沉降影响都较大,地下水位升高时,地表沉降相应增大;当水位一定时,随着开挖阶段的进行,两侧支撑的内力逐渐增大。说明地下水位较高时,土体有效应力降低,孔隙水压力增大,导致土体抗剪强度减弱,进而引发更显著的地表沉降。因此,在基坑工程中,需结合水文地质条件和土体力学特性,采取针对性措施以控制水位变化对基坑稳定性的不利影响。

(2) 在地下水位变化时,两种不同类型基坑开挖对基坑两侧土体水平位移影响都较大;在相同地下水 位时,两种不同类型基坑开挖时左右两侧土体水平位移呈现不对称现象。说明当基坑类型存在差异时, 水力梯度的不对称性将导致两侧土体受力不均,表现为一侧位移明显大于另一侧。此外,水位变动会改 变土体的流变特性,在软黏土层中可能引发时间效应明显的蠕变变形。因此,在设计和施工中需充分考 虑地下水位变化对侧向位移的影响,采取降水控制或加固措施确保基坑稳定性。

(3)不同地下水位时,两种不同基坑开挖时对周围环境有较大的影响,因此在复杂工况施工中,要及时监测地下水位变化,并对土体进行适当的加固。本文结论可以为不同地质背景下、水位变化时基坑开挖施工方法选择、结构加固设计以及安全风险评估提供依据。

参考文献

- [1] 武玉山, 畅建伟, 马玉龙, 等. 佛山软土地区深基坑开挖变形特性研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(11): 53-57.
- [2] 黎红平, 过锦, 俞建霖. 砂土地基基坑分坑施工对邻近地铁隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2025, 7(3): 284-292.
- [3] 许成杰,许鲁豫,史日磊.老黏性土基坑开挖对管线的影响[J].四川建材,2025,51(5):114-115, 131.
- [4] 杨笑男. 深大基坑开挖对紧邻地铁线路影响分析[C]//中国建筑业协会深基础与地下空间工程分会,中国工程机 械学会桩工机械分会,中国地基基础技术创新知识产权联盟,建筑安全与环境国家重点实验室. 深基础工程技 术创新实践(2024-2025). 天津:天津市勘察设计院集团有限公司, 2025: 33-38.
- [5] 金修伟, 胡碧辉, 刘达. 地铁深基坑开挖对邻近建筑物影响的实测与数值模拟分析[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(12): 124-130.
- [6] 段其广. 粉质黏土深基坑开挖变形特征研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(10): 168-171, 218.
- [7] 陈云娟, 刘梦悦, 尹福强, 等. 富水地层管廊基坑开挖变形及损伤演化分析[J]. 山东建筑大学学报, 2024, 39(4): 8-15.
- [8] 杨士杰, 张鑫, 郭春来, 等. 明暗挖结合地铁车站基坑开挖数值模拟研究[J]. 建筑施工, 2024, 46(7): 1022-1025.
- [9] 叶征远. 不同偏压条件下基坑开挖对支护排桩变形特性的影响研究[J]. 东北水利水电, 2024, 42(7): 43-46, 62, 72
- [10] 侯书学. 基于渗流应力耦合作用下基坑开挖的变形规律研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.