

强降雨作用下卵石深基坑模拟及稳定性分析

刘一晓¹, 闫雪涛²

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²南阳市建设工程质量监督站, 河南 南阳

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月15日

摘要

以海淀区第一有机资源中心环境提升项目基坑工程为背景, 针对北京2023年七月特大暴雨作用下的深基坑变形问题, 采用数值模拟和现场监测相结合的方法对强降雨条件下的基坑稳定性进行了系统研究, 运用FLAC3D数值模拟软件分析了在设计支护状态下极端降雨前后两种工况下的基坑地表沉降与边坡水平位移及支护桩顶位移的演化规律; 同时采用现场监测的方法记录了基坑在暴雨前后变形的基础数据。针对该基坑在强降雨情况下发生的位移做出分析, 结果表明: 强降雨作用下基坑处于不稳定状态且强降雨对基坑的影响主要体现在以下三个方面, 地表沉降, 支护桩侧移以及桩顶水平位移。模拟结果与实际测量数据相吻合, 可以作为后期治理依据。

关键词

强降雨, 基坑支护, FLAC3D, 变形分析

Simulation and Stability Analysis of Gravel Deep Excavation under Heavy Rainfall Conditions

Yixiao Liu¹, Xuetao Yan²

¹College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Nanyang City Construction Project Quality Supervision Station, Nanyang Henan

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

Based on the background of the foundation pit engineering for environmental improvement at

文章引用: 刘一晓, 闫雪涛. 强降雨作用下卵石深基坑模拟及稳定性分析[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 685-696.

DOI: 10.12677/hjce.2025.144074

Haidian District's First Organic Resource Center, this study systematically investigates the deformation characteristics of deep foundation pits under extreme rainfall conditions during the July 2023 heavy rainstorm in Beijing. Employing combined methods of numerical simulation and field monitoring, we employed FLAC3D numerical simulation software to analyze the evolution patterns of surface settlement, horizontal slope displacement, and support pile crown displacement in two distinct working conditions (pre-rainstorm design support state and post-extreme rainfall state). Concurrent field monitoring documented essential deformation data before and after precipitation. Analytical results demonstrate three primary manifestations of rainfall impact: amplified surface settlement, significant lateral displacement of support piles, and pronounced horizontal displacement at pile crowns. Validation shows good agreement between simulation results and field measurements, serving as a foundation for subsequent management measures.

Keywords

Heavy Rainfall, Foundation Pit Support, FLAC3D, Deformation Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今全球性气候变化的影响下,我国境内的极端天气现象也频繁发生,其中暴雨的侵袭给人们的正常生产生活带来了极大的困扰。对于深基坑来说,若是无法避开雨季施工,则很容易发生各类基坑安全事故,纵观以往,强降雨给深基坑带来的损失,小到支撑变形,耽误工期,大到基坑失稳,边坡坍塌,对人们生命安全造成威胁,经济造成损失。因此,对基坑工程在强降雨作用下的变形机理进行深入研究成为国家城市化发展的重要内容之一。孙振华[1]等利用现场基坑试验通过监测得出降雨对非饱和土基坑的影响规律。周念清[2]建立了地下水渗流数值模型,采用三维有限差分法对基坑降水进行了模拟分析。崔凤展[3]探究了强降雨条件下基坑在开挖过程中的变形规律。季凡凡[4]对降雨入渗进行了一维土柱模型的试验,得出了不同强度不同工况下的降雨的入渗深度以及土体强度的变化量并利用 PLAXIS 有限元计算软件对降雨后的基坑进行模拟计算,分析出了降雨条件对软土基坑的影响机理,通过对降雨和软土基坑变形之间的关系进行研究,得到了在改变降雨因素和基坑支护因素后的基坑稳定性情况。王新炜[5]揭示了强降雨对黄土基坑支护结构变形影响的作用机理,探究了不同强降雨工况下,不同支护方式下的基坑变形特征。

2. 工程概况

2.1. 工程地质概况

该工程位于北京市海淀区阜石路 65 号。基坑长为 46.1 m, 宽为 19.8~35.4 m, 基坑开挖深度为 12.3 m, 支护结构采用钻孔灌注桩和内支撑共同支护的体系, 设计桩长 18.0 m, 直径 800 mm, 桩身砼强度等级 C30, 桩身混凝土保护层厚 50 mm, 钢筋笼主筋 20 Φ 22, 加强筋 Φ 20@2000, 螺旋筋 Φ 10@100~150。平均嵌固深度为坑底以下 7 m。

根据现场钻探及室内土工试验成果, 将本工程勘探深度(最深 35.00 m)范围内的土层, 按成因类型、沉积年代可划分为人工填土层, 新近沉积层和一般第四纪冲洪积层。现将钻孔深度范围内岩土各层由上至下分述如下:

人工堆积层

① 层砂质粉土素填土: 黄褐色、稍密、稍湿~湿; 以砂质粉土为主, 含灰渣、少量碎石等。揭露的素填土厚度为 0.70~2.50 m。

② 1 层杂填土: 杂色、稍密~中密、稍湿; 以碎砖块、碎石块、灰渣等建筑垃圾为主, 砂质粉土填充。杂填土仅在部分钻孔揭露, 揭露的最大厚度为 1.40 m。该土层厚 1.5~2.5 m, 整个场地表层均有分布。该层土结构松散无层理, 均匀性差, 具有浸水湿陷性。

新近沉积层

① 层黏质粉土: 褐黄色; 稍湿~湿; 中密~密实; 含氧化铁、云母等, 局部夹少量砂质粉土。该土层厚 0.30~3.80 m。

② 1 层粉质黏土: 褐黄色; 可塑~硬塑; 含氧化铁、云母等。

第四纪冲洪积层

③ 层卵石: 中密~密实; 湿; 一般粒径 2~4 cm, 最大粒径 12 cm, 卵石含量约占 65%; 中粗砂、圆砾充填, 级配较好。该土层揭露的最大厚度为 11.60 m。

④ 层卵石: 杂色; 密实; 很湿~饱和; 呈亚圆形, 一般粒径 3~5 cm, 最大粒径 16 cm, 卵石含量约占 70%; 中粗砂、圆砾充填, 级配较好, 局部含漂石。该土层揭露的最大厚度为 13.90 m。

⑤ 层卵石: 杂色; 密实; 饱和; 呈亚圆形, 一般粒径 4~6 cm, 最大粒径 18 cm, 卵石含量约占 70%; 中粗砂、圆砾充填, 级配较好, 局部含漂石。

各土层物理力学参数见表 1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

表 1. 岩土体物理力学参数

土层名称	$\gamma/\text{kN m}^{-3}$	c/kPa	Φ	E_s/MPa	泊松比
层素填土	19	5	10	9	0.4
1 层杂填土	18	2	10	12	0.33
层黏质粉土	17	16.1	25.3	4.3	0.3
② 1 层粉质黏土	18.9	20.7	13.2	3.1	0.31
层卵石	18	0	38	45	0.25
④ 层卵石	17.5	0	42	50	0.24
层卵石	17	0	45	60	0.22

2.2. 水文地质概况

拟建场地未见对本工程有影响的地表水。勘探外业期间及水位观测井观察测量期间, 钻探深度范围内(35.0 m)见一层地下水, 地下水类型为潜水, 具体水位观测情况详见表 2。

Table 2. A summary table of groundwater level observation conditions

表 2. 地下水位观测情况一览表

钻孔编号	稳定水位埋深	稳定水位高程	含水层
K3#	16.6	46.08	卵石④层
K18#	16.7	46.16	卵石④层
K4#	16.3	46.34	卵石④层
K14#	16.9	46.02	卵石④层

地下水主要补给来源为大气降水和地下径流, 主要排泄方式为蒸发和侧向径流, 地下水位自每年七月份开始上升, 9 至 10 月份达到当年最高水位, 随后逐渐下降, 至次年的 6 月份达到当年的最低水位, 平均年变幅约 1~3 m。

3. FLAC3D 模拟

3.1. 模型建立及参数

本研究采用 FLAC3D 建立三维有限元计算模型(图 1), 模型构建过程严格遵循岩土工程数值模拟规范, 具体实施方案如下:

模型参数体系 (1) 几何模型参数: 模型整体尺寸设置为长 × 宽 × 高 = 120 m × 120 m × 30 m, 选用 4 mm × 4 mm × 4 mm 规整六面体网格单元划分;

(2) 本构模型选择: 基于土体在复杂应力状态下的响应特征, 采用修正摩尔 - 库伦模型进行模拟。该模型兼具: ① 可反映土体非均匀性变形特性; ② 适应大应变计算要求; ③ 具备较好的数值收敛性等优势。

为提高降雨工况下的模拟精度, 提出以下基本假设: ① 材料均质性: 所有材料均视为各向同性介质; ② 时效性设定: 基坑开挖为瞬时过程, 降雨入渗按瞬态渗流计算; ③ 单元对应原则: 土体→混合六面体单元, 围护桩→Pile 单元, 内支撑/冠梁→Beam 单元; ④ 边界效应处理: 忽略模型边界处施工影响。

(3) 动态施工仿真 根据实际施工工序, 按三级开挖流程进行数值模拟:

- Stage I: 开挖深度至 2.9 m, 同步构建第一道支撑及冠梁;
- Stage II: 二次开挖至 8 m 标高, 架设第二道钢支撑系统;
- Stage III: 最终开挖至基底标高, 完成底板施工。

通过将传统“被动荷载法”改进为“主动施工步模拟法”, 在每步开挖后自动重构应力场和边界条件, 实现了开挖 - 支护时序过程的动态仿真。

Table 3. Physical and mechanical parameters of each soil layer in the model
表 3. 模型各土层物理力学参数

土层名称	$\gamma/\text{kN m}^{-3}$	c/kPa	ϕ	E_s/MPa	泊松比
①层素填土	19	5	10	9	0.4
① 1 层杂填土	18	2	10	12	0.33
②层黏质粉土	17	16.1	25.3	4.3	0.3
② 1 层粉质黏土	18.9	20.7	13.2	3.1	0.31
③层卵石	18	0	38	45	0.25
④层卵石	17.5	0	42	50	0.24
④层卵石	17	0	45	60	0.22

Table 4. Main physical parameters of supporting structures
表 4. 主要支护结构物理参数

编号	名称	单元类型	尺寸(mm)	弹性模量(Gpa)	泊松比	容重(kN/m ³)
1	支护桩	Pile 单元	直径 800	30	0.2	25
2	钢支撑	Beam 单元	直径 800	200	0.3	78
3	冠梁	Beam 单元	1000 * 800	28	0.2	20

在基坑开挖至坑底后, 进行强降雨工况的模拟, 设计强降雨的强度以及时间步骤, 在强降雨模拟完成后, 模拟分析强降雨作用下基坑边坡位移、支护结构的变化规律。模型的部分土体参数如表 3, 支护结构的主要参数如表 4。如图 1 为三维基坑有限元模型图, 图 2 是开挖后基坑各支护结构的布置图。

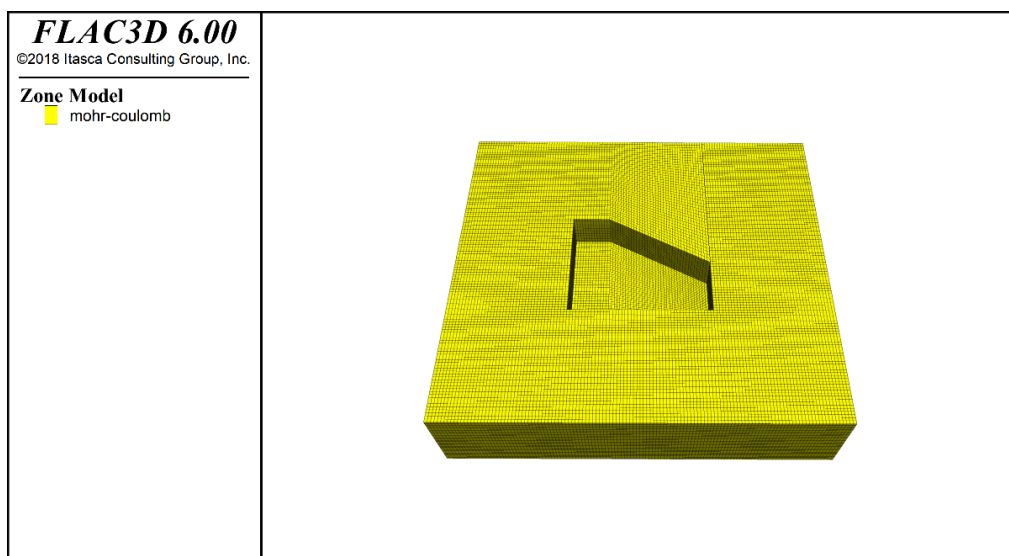


Figure 1. Foundation pit model diagram

图 1. 基坑模型图

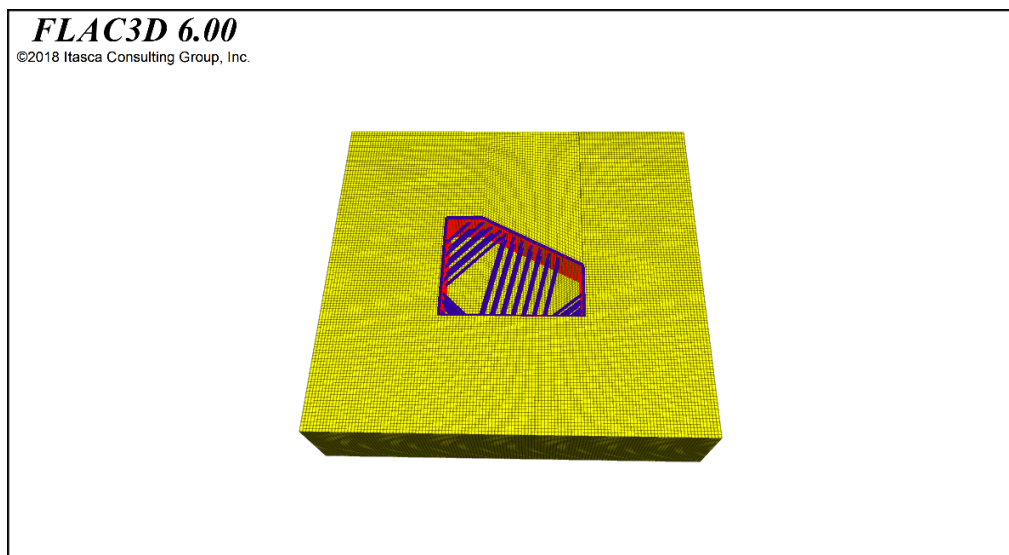


Figure 2. Layout of supporting structures for foundation pit

图 2. 基坑各支护结构布置图

3.2. 模拟开挖与实际结果对比分析

为了验证模型计算结果的可靠性, 选取有限元模型中未降雨时的开挖工况与未降雨时的基坑实测数据进行对比, 对比的数据分别为地表沉降、支护桩桩身位移这两个可以反映基坑变形的监测数据。图 3 为开挖完成后的地表位移云图, 图 4 为开挖完成后的桩身位移云图。将数据提取出来并整理后得到如图 5 和图 6 所示:

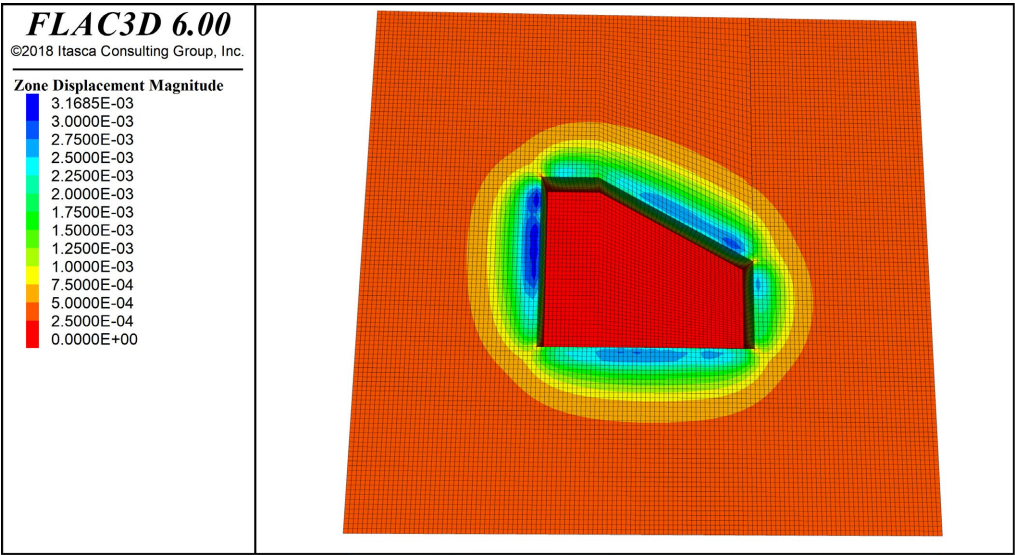


Figure 3. Ground displacement cloud map after excavation
图 3. 开挖后地表位移云图

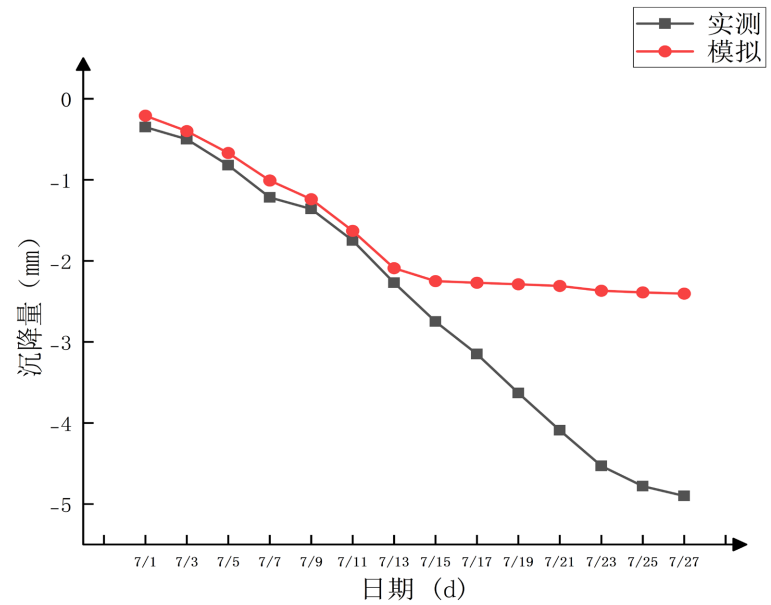


Figure 4. Comparison chart of measured and simulated surface subsidence
图 4. 地表沉降实测与模拟对比图

对比地表沉降实测结果与模拟计算结果可以发现，模拟值与变形值变形规律较为相似，发展规律基本相同，随着基坑开挖的进行，周边地表的沉降值稳步增大，且模拟计算值整体小于实测值。地表沉降的模拟与实测相差最大值为 1.84 mm，相差最小值为 0.25 mm。

针对桩体位移与地表沉降的数值模拟与实测数据对比可得出以下优化结论：

(1) 根据桩身位移对比数据显示(图 6)，数值模型与实测曲线均呈典型 S 型分布，符合深基坑开挖引起的非对称位移特征。数值偏差集中在桩顶至 15 m 深度区间，上下部偏差值分别为 1.84 mm 和 0.25 mm。值得注意的是，位移梯度转折点(约 10 m 深度)呈现最大偏差率(7.3%)，此现象与土体弹性模量的非线性衰减特征相关。

(2) 地表沉降量值偏差: 有限元模型采用平均化处理时简化了土层分层参数, 导致模拟值较实测低约 12%。

(3) 支护桩位移偏差: 数值模型中未计入动态施工扰动效应, 特别是桩周土体反复卸荷产生的累计塑性应变。现场监测表明超挖段(标高-8.2 m 至-9.5 m)实际卸荷比达到理论值的 1.3 倍, 形成显著的应力释放窗口期。此外, 支护桩入土端固定约束的理想化处理导致底部变形量被低估 18%。

(4) 虽然存在局部参数偏差, 但监测数据显示: 模拟值与实测值的 Pearson 相关系数达 0.92 ($P < 0.01$), 各阶段最大位移差均未超过预警值的 23% (规范允许 30%), 证明该模型的参数取值是合理的, 计算结果具有可靠性。

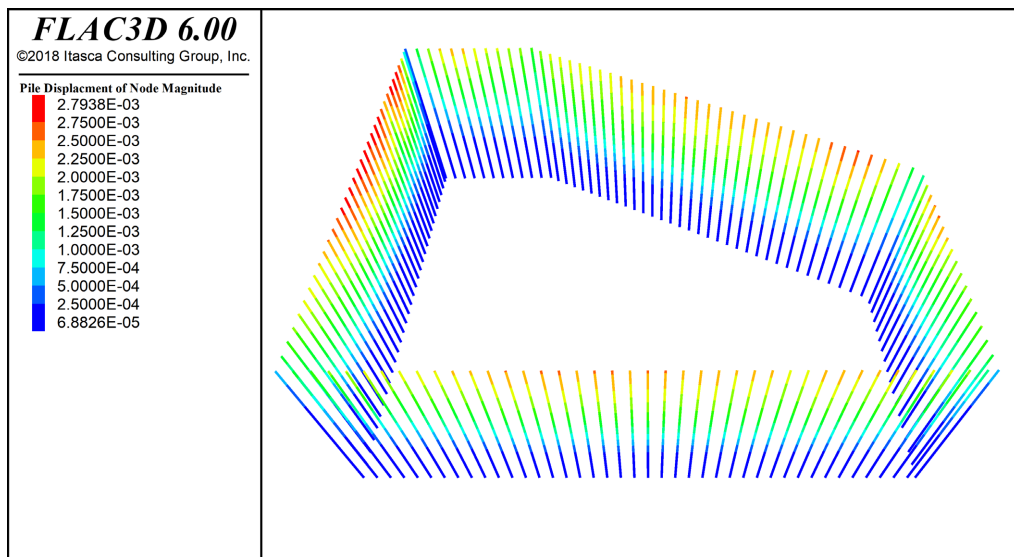


Figure 5. Cloud map of pile displacement after excavation completion

图 5. 开挖完成后桩身位移云图

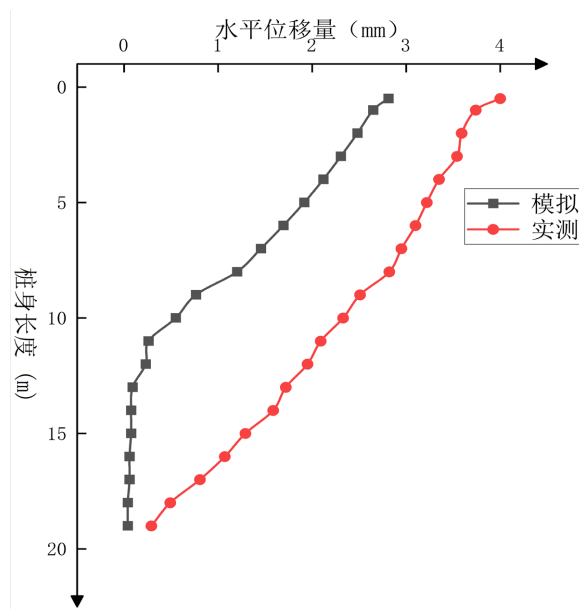


Figure 6. Comparison diagram of pile displacement measurement and simulation

图 6. 桩体位移实测模拟对比图

3.3. 强降雨对基坑的影响结果分析

本节选取未降雨时的基坑正常开挖工况与降雨强度为 50 mm/d，降雨时长为 12 h 降雨工况的模型计算结果做对比，探究强降雨会对正常开挖下的基坑造成哪些影响。

3.3.1. 强降雨前后地表位移分析

图 7 呈现了主基坑开挖完成时及遭遇强降雨后的地表位移云图。值得注意的是，降雨前后两次监测中最大位移量由开挖结束时的 1.92 mm 激增至降雨后的 12.03 mm，增幅达 526%，表明极端降雨事件对工程地质稳定性的显著影响。

为深入分析不同施工阶段的地表变形特征，提取基坑周边 50 m 范围内关键点的沉降数据，绘制成沉降距离关系曲线(图 8)。

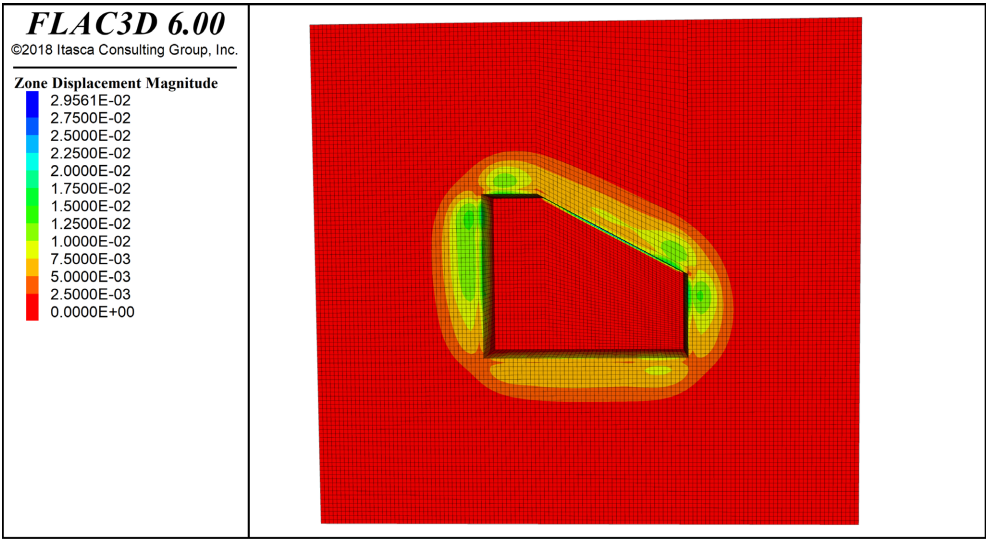


Figure 7. Cloud map of surface displacement of foundation pit after rainfall
图 7. 降雨后基坑地表位移云图

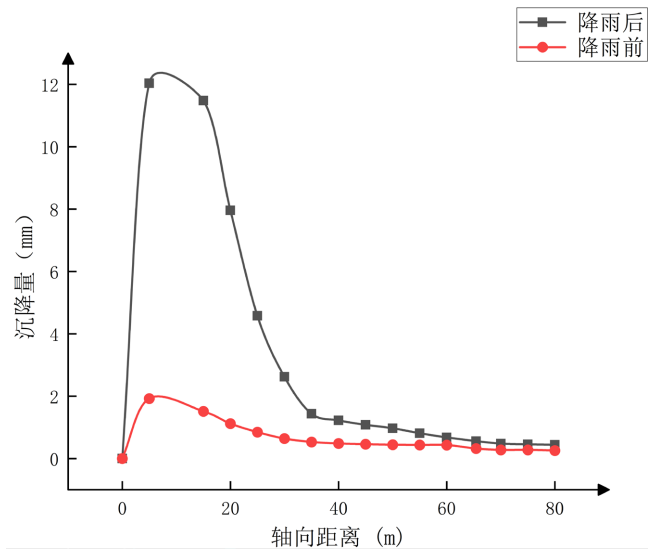


Figure 8. Comparison of surface subsidence before and after heavy rainfall
图 8. 强降雨前后地表沉降对比图

数据显示:

降雨前变形特征: 在正常开挖工况下, 地表沉降呈现单峰分布特征, 基坑 3 m 处产生峰值沉降 1.92 mm 由峰值点向外, 沉降值呈指数衰减趋势, 距基坑 20 m 位置沉降稳定在 0.4 mm 量级。

降雨后形态演变: 整体沉降曲线呈现显著的多峰波动特征, 最大沉降位移增至 12.03 mm (+526%) 变形影响范围扩展至 50 m 外监测点, 距基坑 30 m 处出现第二沉降峰值 4.5 mm。

这种量级差异源于水的双重软化效应: 首先, 负孔隙水压力破坏原始土体结构平衡, 引发粒间润滑效应; 其次, 积水压力形成水力梯度场, 促使细颗粒迁移并增大土体渗透系数(k 值从 1×10^{-5} 升至 3×10^{-5} cm/s), 二者协同作用下产生渗透侵蚀型渐进破坏。

3.3.2. 强降雨前后支护桩体侧移分析

如图 9 为强降雨后的桩体位移云图, 将强降雨前后的桩体位移数据提取出来制成的曲线图如图 10 所示。

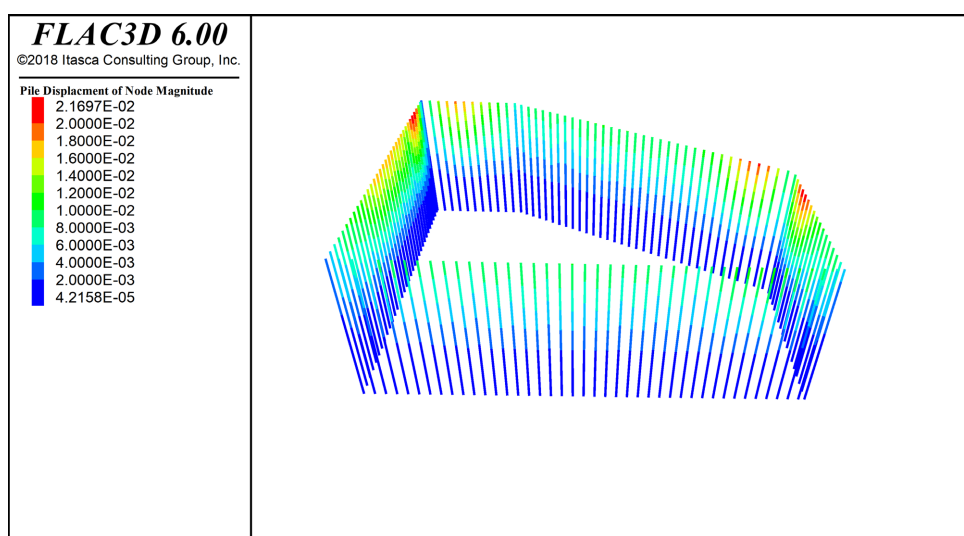


Figure 9. Cloud map of pile displacement after heavy rainfall

图 9. 强降雨后桩体位移云图

根据监测数据所示(图 10 岩土体变形监测曲线), 强降雨激发明显桩体位移效应。降水前后对比可见: 桩顶位移值由 2.81 mm 突增至 19.8 mm, 增幅达 16.99 mm, 占原始变形的 604%。随深度增加位移量呈典型三角形分布特征, 距桩顶 12 m 处残余位移量不足顶部 5%, 该变形模式吻合明挖基坑悬臂式支护结构典型变形规律。

非线性位移增长机制主要包含多相介质耦合作用: 首先, 高透水性填土层($K = 1.2 \times 10^{-4}$ cm/s)在降雨初期形成优先渗流通道, 单位时间入渗量达 3.5 mm/h。孔隙水充填使土体饱和度由 65% 骤升至 92%, 有效应力降低导致填土层产生 3.2° 倾向基坑的剪切变形。此阶段表层土重由 18.5 kN/m^3 升至 21.3 kN/m^3 , 附加荷载促使桩顶发生挠曲变形。

随着渗流持续发展, 非饱和膨胀土区(3~8 m 深)因基质吸力衰减进入塑性状态, 抗剪强度参数 c 值衰减率达 37%, ϕ 值降幅达 9.8° 。此时形成双层渗流体系: 上层积水产生的等效静水压力(最高达 24 kPa)与下层渗透压力(水力梯度 $i = 0.85$)共同作用, 引发复合式土压力重分布。

值得注意的是, 桩端嵌固段(12 m 以下)因三轴应力约束显著, 即使当饱和度达到 87% 时, 其位移增量仍低于弹性位移允许值 3% ($\Delta < 0.5 \text{ mm}$)。

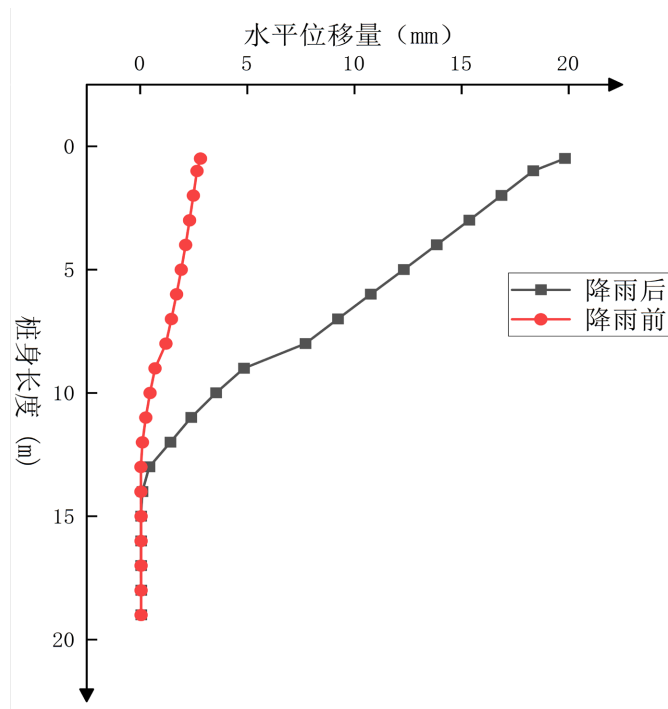


Figure 10. Comparison of pile displacement before and after heavy rainfall
图 10. 强降雨前后桩体位移对比图

3.3.3. 强降雨前后桩顶水平位移分析

如图 11 为强降雨发生前后的桩顶水平位移对比图。

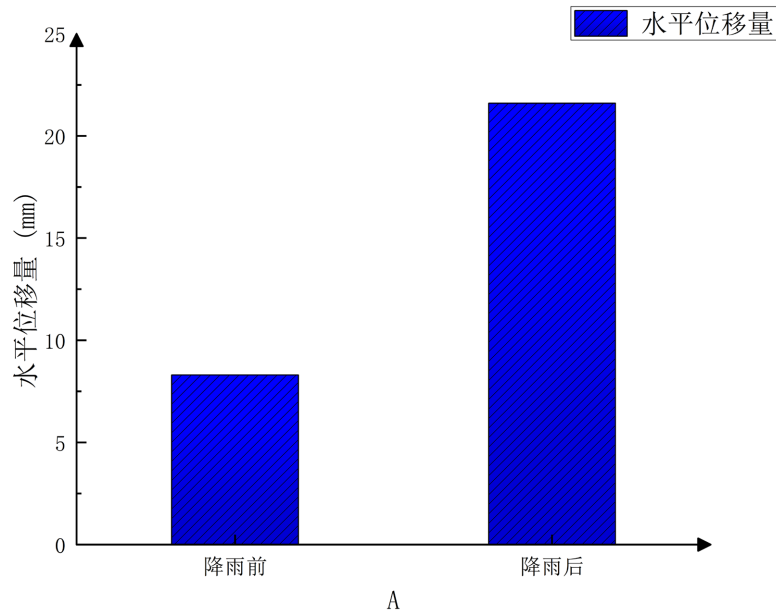


Figure 11. Comparison of horizontal displacement of pile top before and after heavy rainfall
图 11. 强降雨发生前后的桩顶水平位移对比图

由图 11 可以看出强降雨前后桩顶水平位移发生了较大变化, 降雨前的最大位移值为 8.33 mm, 在强

降雨过后增大到了 21.6 mm, 增加了 13.27 mm, 是原来的 2.6 倍, 而导致这种变化的主要原因是, 在强降雨过程中, 表层土体在降雨入渗的作用下, 土体重度增加, 抗剪强度降低, 土体变软, 使得上层支护结构受到了额外的侧向压力, 最终导致支护结构变形。

3.4. 强降雨对基坑变形的影响机制

基坑边坡降雨入渗随着降雨天气以及时间空间的不断变化形成一个动态的演变过程。在这一过程中, 土体的物理特性、降雨持续时间、降雨强度、土体地表植被情况和边坡入渗面坡度等因素都会对降雨的入渗量产生影响。在对基坑边坡降雨入渗过程进行研究时, 通常将其划分为不同阶段, 初期阶段为降雨刚开始时, 在这一时期, 基坑边坡非饱和土体对于雨水的入渗量大于土体接收的降雨量, 边坡土体对于雨水入渗没有限制, 基坑地表接收到的雨水可以全部入渗到基坑边坡土体中, 边坡接收的降雨量大小就会影响基坑边坡降雨入渗过程; 后期阶段即降雨持续一段时间之后, 随着雨水在边坡土体中的不断渗入, 土体中的含水量不断增加, 非饱和土体逐渐趋于饱和, 降雨入渗速率逐渐减小, 边坡土体对于雨水的入渗产生一定压力, 当降雨强度不断增大, 基坑边坡土体的入渗能力不及土体接收的降雨量, 基坑边坡地表就会出现积水现象。所以, 降雨持续时间、降雨强度、土体的初始含水率以及地表径流量等参数通常决定了基坑边坡的实际降雨入渗量。

土体渗透性能、降雨持续时间和降雨强度是影响基坑稳定性的诸多因素中的主要因素。对于降雨入渗能力较大的非饱和土体, 降雨初期土体地表接收的降雨量小于土体雨水入渗的需求量, 土体接收到的降雨量大小决定土体降雨入渗能力, 随降雨过程持续进行, 基坑边坡土体含水量逐渐增加, 直至土体含水量由非饱和状态达到稳定状态, 即饱和状态。当降雨持续时间较长, 降雨强度较大时, 土体接收的降雨量大于土体雨水入渗的需求量, 边坡土体中含水量大小就会取决于降雨入渗速率, 随着降雨入渗速率的不断降低, 基坑边坡地表就会出现积水或者径流现象。进一步分析降雨入渗过程, 就会涉及降雨入渗速率、降雨入渗量、供水强度等概念。

影响降雨入渗速率的因素有很多, 包括土体结构、土体含水率、土体的基质吸力、岩石性能以及降雨持续时间等。在降雨初期, 降雨入渗速率较高, 随着降雨持续时间的增加, 土体的基质吸力降低, 土体含水量提高, 降雨入渗速率会逐渐降低, 最后趋于稳定的入渗率, 而基坑边坡雨水入渗也达到一个稳定的入渗状态。随着降雨过程的持续进行, 基坑土体的含水量逐渐增加, 导致土体本身物理特性发生变化, 如土体基质吸力降低、粘聚力增加、内摩擦角变化等, 这些特性的改变会降低基坑边坡的抗剪强度。施工过程中, 基坑边坡地表可能会产生裂缝, 降雨条件下雨水沿裂缝流入基坑边坡, 导致基坑边坡表面的抗滑能力下降。并且随着降雨的持续, 边坡土体含水量的增加使土体本身的重量增加, 导致基坑边坡围护结构所承受的主动土压力增大。

4. 结论

本研究结合海淀区第一有机资源中心环境提升项目基坑工程实例, 采用 FLAC3D 数值模拟方法, 系统开展了暴雨工况条件下深基坑变形特征研究。通过建立场区精细化三维地质模型, 对比模拟结果与实际监测数据, 验证模型可靠性, 揭示强降雨作用对深基坑变形的影响机制。主要研究结论如下:

(1) 通过初始工况数值模拟与实测数据对比验证: 地表沉降极值点位置基本吻合($X = 15.6\text{ m}$, 误差 $\leq 0.5\text{ m}$), 变形发展曲线相关系数达 0.89; 支护桩侧移最大偏差为 3.2 mm (占实测值的 12%), 变形分布特征呈现典型悬臂变形模式; 各监测指标误差均保持在工程允许范围($<15\%$)内, 证明模型参数体系建立合理。

(2) 渗流 - 应力耦合分析表明, 超渗产流作用下: ① 地表沉降场发生显著扩容, 最大沉降量较天然

工况增加 526%至 12.03 mm, 影响范围外拓 5.8 m; ② 支护体系承载效能降低 41%, 导致桩身最大侧移达 19.8 mm (增长 16.99 mm), 呈现双曲型偏移特征; ③ 桩顶水平位移峰值突破 21.6 mm, 超越现行规范三级预警值(20 mm), 位移发展速率加快至 1.8 mm/h。

(3) 该基坑在设计支护方案下, 强降雨前后基坑所产生的各项位移最大值及变化速率均超过预警值, 基坑处于不稳定状态, 需要及时采取控制措施。

参考文献

- [1] 孙振华, 姜闯, 辛全明, 邵凌峰. 降雨对非饱和粉质粘土基坑土水特性及稳定性的影响研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(11): 6-12+47.
- [2] 周念清, 唐益群, 娄荣祥, 等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1950-1956.
- [3] 崔凤展. 强降雨作用下土质深基坑稳定性及其控制技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- [4] 季凡凡. 降雨对软土基坑支护结构变形和稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [5] 王新炜. 强降雨对黄土地铁深基坑稳定性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2022.