

基于有限差分法对基坑环境影响的应用浅析

袁小刚

湖北建艺岩土工程勘察设计有限公司, 湖北 荆州 434000

[摘要]深基坑开挖对周边环境的影响成为岩土工程领域的重要分析课题。文中依托荆州市某实际工程项目, 基于有限差分法建立三维数值模型, 通过对支护结构位移、地表沉降和建筑物变形的模拟与现场监测数据对比, 分析了基坑开挖对周边环境的影响。结果表明, 开挖到底桩顶水平位移最大 31.16mm, 计算与实测桩身水平位移较为吻合; 地表沉降曲线呈现典型的凹形, 在此文荷载条件下, 距基坑 2 倍开挖深度 (H) 处达到最大沉降值 16.41mm, 在距离超过 5H 后, 沉降影响逐渐减小至接近于零。研究成果为深基坑开挖对周边环境的影响及类似工程的设计与施工优化提供了参考。

[关键词] 基坑工程; 周边环境; 有限差分法

DOI: 10.33142/sca.v7i11.14180

中图分类号: TU463

文献标识码: A

Application Analysis of Finite Difference Method on the Impact of Foundation Pit Environment

YUAN Xiaogang

Hubei Jianyi Geotechnical Engineering Survey and Design Co., Ltd., Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract: The impact of deep excavation on the surrounding environment has become an important analytical topic in the field of geotechnical engineering. Based on an actual engineering project in Jingzhou City, a three-dimensional numerical model was established using the finite difference method. By comparing the simulation of displacement of support structures, surface settlement, and building deformation with on-site monitoring data, the impact of excavation on the surrounding environment was analyzed. The results show that the maximum horizontal displacement at the top of the excavated pile is 31.16mm, which is consistent with the calculated and measured horizontal displacement of the pile body; The surface settlement curve presents a typical concave shape. Under this load condition, the maximum settlement value of 16.41mm is reached at twice the excavation depth (H) from the foundation pit. After a distance of more than 5H, the settlement effect gradually decreases to near zero. The research results provide reference for the impact of deep excavation on the surrounding environment and the design and construction optimization of similar projects.

Keywords: foundation pit engineering; surrounding environment; finite difference method

引言

基坑开挖对周边环境的影响是一个重要的研究课题。基坑开挖会影响周边地层应力场, 导致周边地层发生位移, 从而对周边环境产生不利影响。为此, 众多学者展开了大量研究。刘彦玲^[1]、黄伟超^[2]通过基坑监测结果分析了支护结构的变形及周边沉降。结果表明, 随着基坑开挖深度的增加及距基坑距离的增大, 地表沉降呈现先增后减的趋势, 水平位移由基坑边缘至基坑中心逐渐增大。在空间维度上, 不同监测点的沉降曲线表现出多样化的趋势, 并显现叠加效应。宋卓华^[3]、陈林^[4]、张肖峰等^[5]将有限元与工程实例相结合研究了基坑开挖对周边环境的影响。结果表明, 随着开挖深度的增加, 分区开挖与非分区开挖的地连墙水平位移均呈现增大趋势, 并在深度方向呈现“上大下小”的高斯曲线, 周边建筑沉降呈现非线性增加。邻近基坑的开挖主要影响隧道的竖向位移, 最大竖向位移发生在基坑中部。

本文以荆州市某基坑工程为例, 采用有限差分法建立三维数值模型, 并结合基坑监测结果研究基坑开挖对周边环境的影响。

2 工程概况

工程建设场地位于长江一级阶地地貌单元, 场地地势整体较平坦。基坑四周环境条件为: 基坑北侧、西侧、南侧上开口线距离红线约 2.3m~6.4m, 红线外为空地, 环境条件较为开阔; 东侧距红线最近处约 2.60m, 红线外 3.40m 处为现状多层建筑 (5 至 7 层, 采用天然地基浅基础, 基础埋深约 1.50m)。

场地地层自上而下分别为: ①杂填土, 干至稍湿, 松散; ②粉质黏土, 稍湿, 可塑; ③粉质黏土, 稍湿, 软塑; ④细砂, 饱和, 稍密。基坑开挖深度为 4.70m, 地下水对本基坑无影响, 考虑到基坑东侧已有建筑在 2 倍坑深范围内, 基坑东侧长度约 114m, 环境条件较为复杂, 为避免基坑施工对抗外建筑造成不利影响, 该侧采用钻孔灌注桩支护, 桩径 0.8m, 桩距 1.1m, 桩长 12m。

3 有限差分数值模型

3.1 数值模型建立

本文采用 FLAC3D 软件进行模拟, 软件使用拉格朗日连续介质法进行有限差分计算, 用于解决偏微分方程的一种数值方法, 每一点的微分都被有限差分近似值所取代,

将计算偏微分方程问题转变为计算代数方程问题。以基坑东侧为对象建立数值模型，数值模型尺寸为 60m×60m×30m（长×宽×高），采用实体单元，模型共 128588 个节点，120780 个单元。如图 1 所示。模型底部设为固定边界，四周边界约束法向位移。数值模型中设置多种外部荷载，在距离基坑上开口线 1.5m 处施加了分布宽度为 3.9m、大小为 20kPa 的施工荷载，模拟施工过程中设备及材料堆载对地面的附加应力。在距离基坑上开口线 6.0m 处施加作用深度为 1.5m、分布宽度为 15m 的先期荷载，荷载大小为 105kPa，以此模拟建筑物自重及基础对地基的作用。Φ800mm@1100mm 钻孔灌注桩采用等效抗弯刚度法计算等效为地下连续墙，可得以下公式：

$$\frac{E\pi d^4}{64} = \frac{Ebh^3}{12} \quad (1)$$

式中：d 为钻孔灌注桩桩径，b 为单位长度计算长度取桩间距，h 为墙厚，E 为钻孔灌注桩与地下连续墙的弹性模量；按以上公式计算得出墙厚 h 为 0.603m。地下连续墙的墙顶位于地面以下 1.0m，墙顶以上设置 150mm 厚的钢筋混凝土挡墙与地下连续墙连接，以加强上部结构的稳定性。

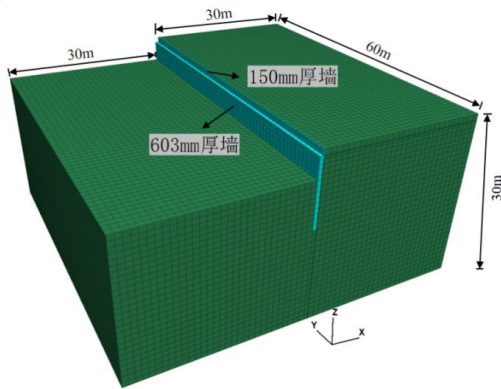


图 1 三维有限差分模型

3.2 计算参数

土体采用摩尔库伦本构模型，地下连续墙采用线弹性模型，材料物理力学参数见表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

编号	名称	层厚 /m	重度 (kN/m³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角/°	弹性模量/MPa	泊松比
①	杂填土	1.10	18.0	5.0	20.0	12.0	0.35
②	粉质黏土	1.90	18.7	19.0	11.0	13.5	0.32
③	粉质黏土	5.40	18.3	16.0	8.0	10.8	0.34
④	细砂	/	19.0	0	30.0	45.0	0.30
	地连墙	/	25.0	/	/	30000	0.20

3.3 计算方法

第一步进行初始地应力平衡计算，确保模型内部的应力分布符合原始地层的应力状态；第二步初始模型收敛性通过判断最大不平衡力，若最大不平衡力接近于零，说明

模型各网格节点上的力是平衡的，处于收敛状态，计算最大不平衡力为 1e-5N；第三步清除初始地应力平衡阶段可能产生的微小位移，以免影响模拟结果，后施工支护结构，并施加荷载；第四步清除由于施工支护结构阶段产生的位移，随后进行第一步开挖，开挖深度为 2m；第五步开挖至基底 4.7m。这种分步开挖方式能更真实地模拟基坑开挖过程中的应力变化与土体响应，提供更为可靠的沉降和位移数据。

4 结果分析

4.1 支护结构位移分析

图 2 (a) 为不同开挖深度下桩身水平位移计算值与实测值对比曲线。由图可知，计算与实测值较为吻合，这验证了本有限差分模型的合理性。当开挖深度为 2.0m 时，模拟值曲线斜率较大，支护结构整体水平位移变化趋势不大，顶部位移最大，模拟值为 9.84mm；底部位移最小，值为 3.29mm；深度 0~9.0m 的区域曲线斜率小于深度 9.0~12m 的区域，也就是说在桩身下半部分位移变化不大。当开挖至 4.7m 时，模拟值斜率较小；支护结构位移随深度增加逐渐减小，最大位移出现在桩顶，模拟值为 31.16mm；至支护结构底部的位移最小，模拟值为 5.16mm。从土层分布来看，基底处于第三层粉质黏土层，基底以下约 3.70m 为第四层细砂层，桩身有 3.60m 嵌入细砂层中。在深度 7.00m 以上区域，实际监测的水平位移小于有限差分模拟结果，并在该深度处发生了转变。造成这一差异的原因可能在于数值模拟过程中对地层和桩的简化处理，与实际地层条件存在一定差异。

图 2 (b) 为基坑开挖过程中桩顶位移随计算步变化曲线。由图可知，计算经历了两个阶段，第一个阶段为开挖 2.0m，约 16000 步时，此时桩顶位移为 9mm 左右，随后至 18000 步趋于平缓；第二阶段为开挖 4.7m，约 24000 步时，此时桩顶位移为 31mm 左右，之后开始趋于平缓。桩顶位移在计算初期变化较小，说明开挖深度较小支护结构足以抵抗这部分土压力。随着基坑开挖深度增加，曲线斜率较大。这表明随着土体被逐步开挖，土压力的释放导致支护桩顶的位移快速增大。达到 24000 步时，位移增长速度逐渐减缓，曲线趋于平缓，最后趋于 31.16mm。

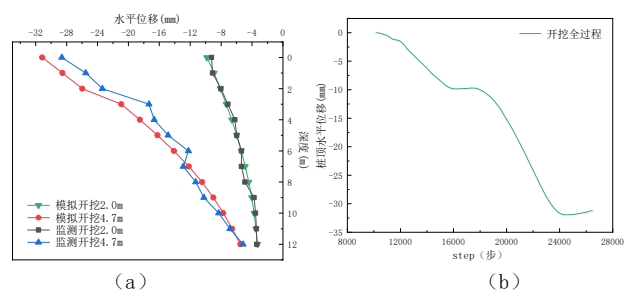


图 2 水平位移变化曲线

图 3 (a) 为基坑开挖 2.0m 时水平位移云图。由图可

知, 基坑开挖对坑外土层的影响范围约为 18m (约为 4H, H 为开挖深度), 基坑边缘处最大, 沿坑外方向逐渐减小, 最大值为 9.84mm。在垂直方向的影响范围约 22m。

图 3 (b) 为基坑开挖到底 (4.7m) 时水平位移云图, 由图可知, 水平位移云图呈现出上下大中间小的形状。基坑开挖在水平方向的影响范围约为距基坑上开口线 25m (约 5H), 呈现从基坑边缘最大值 31.2mm 至 25m 处值为 2.5mm 逐渐减小的趋势, 说明 25m 之后的区域不在开挖深度影响范围之内, 进入相对稳定区域。在垂直方向的影响范围约为 27m, 呈现从桩顶最大值 31.2mm 至深度 27m 处值为 2.5mm 逐渐减小的趋势, 说明 27m 之后的区域不在开挖深度影响范围之内。在基坑开挖过程中, 随着土体的应力释放, 坑外的土压力逐渐超过了坑内的土压力, 从而导致桩身向坑内产生水平位移。这表明基坑开挖不仅对支护结构产生显著影响, 也对其周边一定范围内的地层造成了扰动。

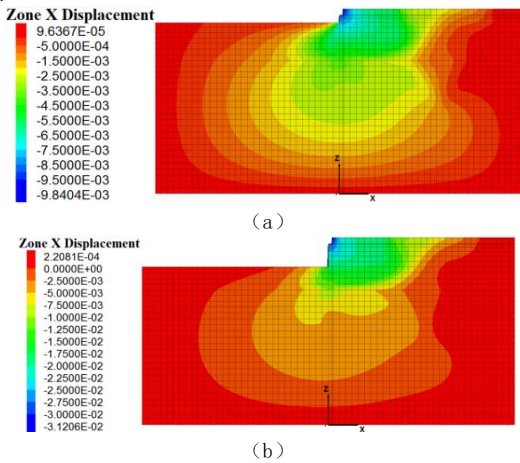


图 3 水平位移云图

4.2 周边沉降分析

图 4 为不同开挖深度下坑外地表沉降计算值与实测值对比曲线。由图可知, 数值模拟结果与实际监测结果较为吻合。总体上, 坑外地表沉降随着开挖深度的增加而增大。开挖 2.0m 时, 地表沉降曲线呈现出凹形, 距基坑上开口线 9m 范围内, 地表沉降较小, 趋于平缓; 距基坑上开口线 9~11m 范围内, 沉降量增大, 曲线呈现出斜率大, 在 11m 处达到最大沉降量 4.58mm; 之后沉降量缓慢减小, 至 25m 处趋于 0。开挖至基底 (4.7m) 时, 地表沉降曲线呈现 ‘V’ 字形, 在距基坑上开口线 2m 范围内, 曲线斜率较大; 在距基坑上开口线 2~8m (约 2H) 范围内, 沉降量变化较小, 曲线斜率小; 在距基坑上开口线 8~11m 范围内, 沉降量急速增大, 达到了最大沉降量 16.41mm, 曲线斜率大, 近似于 90°; 在距基坑上开口线 11~15m (约 3H) 范围内, 沉降量缓慢减小; 在距基坑上开口线 15~21m 范围内, 曲线斜率增大, 沉降量快速减小; 在距基坑上开口线 21~24m (约 4H) 范围内, 沉降量缓慢增加, 增

加了 0.32mm; 在距基坑上开口线 24~26m 范围内 (超过 5H), 沉降量快速减小, 曲线斜率增大; 之后缓慢趋于 0。由此可知, 可能会导致建筑地基出现不均匀沉降。

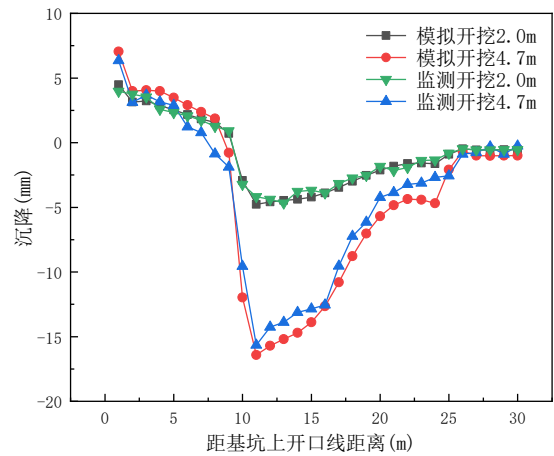


图 4 沉降变化曲线

图 5 (a) 为基坑开挖 2.0m 时沉降云图, 由图可知, 坑边沉降较小, 基坑开挖水平方向影响范围为距基坑上开口线约 10~19m (约 2~4H) 范围内, 地表出现了一定程度的沉降, 最大沉降量约为 4.86mm; 基坑开挖垂直方向影响范围为距基坑上开口线 13m 地面以下约 5m (约 1H) 范围内。

图 5 (b) 为基坑开挖到底 (4.7m) 时沉降云图, 由图可知, 沉降主要集中在距离基坑上开口线约 10~20m (约 2~4H) 的区域, 沉降量为 16.61mm; 在垂直方向上的影响深度约为 7m (约 1.5H)。由于基坑开挖过程中土体应力的重分布, 靠近基坑的建筑物出现了不均匀沉降, 可能对建筑物的整体稳定性产生影响, 甚至引发建筑物的倾斜或局部开裂等结构性损伤。

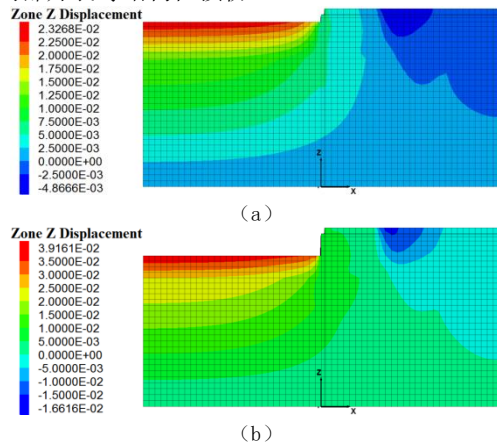


图 5 沉降云图

5 结论

(1) 桩身水平位移随深度增加逐渐减小, 最大位移出现在桩顶。数值模拟结果显示, 基坑开挖过程中桩身上半段水平位移较大; 开挖第一阶段 (开挖 2.0m) 时, 位

移变化较小,开挖第二阶段时,桩顶位移变化速率增加,反映出挖土卸荷对支护结构的影响逐渐加大,开挖至基底时,桩顶位移迅速增大,达到31.16mm。

(2) 基坑开挖改变了周围土体的应力状态,导致坑外土体沉降,并且该沉降表现为不均匀性,这可能导致建筑物出现不均匀沉降,严重时可引起建筑物倾斜或墙体局部开裂,从而形成安全隐患。监测和计算结果表明,地表沉降范围主要集中在基坑外2~4H(10~20m)之间,最大沉降量达到16.41mm。

(3) 若基坑周边环境条件较为复杂,基坑工程设计时需严格控制支护结构变形,从而减小对周边环境的影响。本案例中,考虑到基坑上开口线距已有建筑较近,采用了刚度较大的灌注桩作为支护结构,在施工过程中,该侧周边荷载严格按照设计要求执行。虽然地表最大沉降达16.41mm,但未达到基坑监测报警值,也未对建筑造成明显不利影响。

[参考文献]

- [1] 刘彦玲. 复杂环境深大基坑施工对周边环境影响研究[J]. 价值工程, 2024, 43(26): 109-111.
 - [2] 黄伟超. 相邻多基坑开挖对周边环境的沉降影响研究[J]. 江西建材, 2024, 12(1): 95-97.
 - [3] 宋卓华, 任宝双, 郁志伟, 等. 软土深基坑分区开挖对周边环境影响研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(12): 2488-2493.
 - [4] 陈林. 复杂条件下深基坑施工变形控制与周边环境监测研究[J]. 砖瓦, 2024, 12(6): 140-142.
 - [5] 张肖峰, 许饶, 辛侨. 广东地区地下变电站深基坑工程对周边环境数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(11): 22-27.
- 作者简介: 袁小刚(1987.6—), 毕业院校: 中国地质大学(武汉), 所学专业: 工程管理, 当前工作单位: 湖北建艺岩土工程勘察设计有限公司, 职务: 岩土技术部经理, 职称级别: 中级工程师。