

深基坑开挖对坑内管桩承载性状影响研究

张金城

(深圳市万成勘测设计有限公司)

【摘要】城市地下空间开发持续提速，深基坑工程愈发普遍，基坑开挖对周边桩基结构安全的影响愈发受到关注。本文以某实际工程为背景，采用有限元软件模拟深基坑开挖过程中坑内管桩的受力与变形规律，探究其承载性能演化特征。通过设置多组工况，探讨基坑深度、支护方式、土层性质等因素对桩顶位移、轴力分布及桩身沉降的作用机制。结果表明，基坑开挖引发的卸载效应显著改变管桩承载性状，桩土共同作用机制发生调整，中性点下移现象突出，研究成果可为类似工程的设计与施工提供参考。

【关键词】深基坑；管桩；承载性状；数值模拟；中性点

中图分类号：TU473.1

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.123

Study on the Influence of Deep Foundation Pit Excavation on the Bearing Characteristics of Pipe Piles in the Pit

ZHANG Jin-cheng

(Shenzhen Wancheng Surveying and Design Co., Ltd.)

【Abstract】With the continuous acceleration of urban underground space development, deep foundation pit engineering has become increasingly common, and the impact of foundation pit excavation on the safety of surrounding pile foundation structures has attracted growing attention. Based on an actual project, this paper uses finite element software to simulate the stress and deformation laws of pipe piles inside the pit during deep foundation pit excavation, and explores the evolution characteristics of their bearing performance. By setting multiple working conditions, the action mechanisms of factors such as foundation pit depth, support method, and soil layer properties on pile top displacement, axial force distribution, and pile body settlement are discussed. The results show that the unloading effect caused by foundation pit excavation significantly changes the bearing behavior of pipe piles, the pile-soil interaction mechanism is adjusted, and the downward movement of the neutral point is prominent. The research results can provide a reference for the design and construction of similar projects.

【Keywords】deep foundation pit; pipe pile; carrying capacity; numerical simulation; neutral point

1 引言

随着城市化进程的不断推进,大型复杂工程项目日益增多,深基坑工程已广泛应用于地铁、高层建筑及地下综合体等项目中。管桩作为一种常用的基础结构形式,其承载性能直接关系到工程的整体稳定性和安全性。然而,深基坑开挖过程中土体应力场的扰动会显著改变桩土共同作用机制,影响管桩的承载特性,甚至可能引发桩基回弹、中性点下移或承载力衰减等问题。目前国内外学者已在基坑施工对周边结构影响方面展开大量研究,但对坑内既有桩基的响应规律尚缺乏系统分析。为此,本文以某实际工程为依托,采用数值模拟手段,深入探讨深基坑开挖过程中管桩承载性能的演变特征,旨在为基坑设计与施工提供理论支持与实践参考。

2 研究方法

2.1 工程概况与地质条件

工程位于深圳地区,基坑长60m、宽25m,开挖深度为12m,采用双排桩+内支撑支护结构。场地以粉质黏土与淤泥为主,部分夹层为砂土(见表1)。

表1 土层物理力学参数

土层编号	土层名称	厚度/m	密度/(kN/m ³)	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	弹性模量/MPa
①	粉质黏土	6	18.5	18	25	15
②	淤泥	4	17.2	12	10	5
③	粘性土夹砂	8	19.1	22	30	20

2.2 数值模拟方法

为深入研究深基坑开挖过程中对坑内管桩承载性状的影响,本文采用有限元数值模拟软件 PLAXIS 3D 进行分析建模。该软件基于摩尔—库仑、Hardening Soil 等本构模型,能够较为真实地反映土体的非线性力学特性和桩土相互作用机制。模拟过程中,首先构建包含桩基、周围土体及基坑支护结构的三维模型,随后依次模拟基坑的开挖工况,记录各阶段桩身轴力、沉降和承载力变化。为确保模拟结果的准确性,桩体采用嵌入式桩模型进行建模,土体采用硬化土模型以提高对地基沉降及应力应变响应的描述能力。同时,开挖步骤按实际施工过程分层分步进行,便于捕捉不同工况下的承载力演化趋势。模拟采用非线性求解器,保证在大变形工况下的计算稳定性和结果可靠性。

2.3 模型参数与边界条件设置

模型中土体参数选取依据现场勘察资料及三轴剪切试验数据,主要包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角和重度等。其中,填土层采用摩尔-库仑模型,粉质粘土和中密砂层则采用硬化土模型以更真实地反映其应力路径依赖性。桩基参数参考工程设计图纸,采用 C60 预应力混凝土管桩,桩长 18m,桩径 0.5m,桩间距 2.5D。模型边界采用对称约束设置,侧向边界施加水平位移约束,底部边界完全固定以防止整体刚体移动。为消除边界效应对计算精度的影响,模型尺寸在桩区边缘外延 5 倍桩径,确保桩土相互作用区不受边界干扰。加载条件包括自重荷载、上部建筑荷载及基坑开挖引起的应力释放,开挖过程以每层 2m 递进、分步卸载模拟施工实况。采用自适应网格划分方式,桩体与桩端及周围土体区域加密处理,提高局部计算精度,模拟结果经网格独立性分析验证其稳定性和可靠性。

3 结果

3.1 不同开挖阶段管桩轴力变化

通过数值模拟得到,在不同开挖阶段,坑内管桩的轴力分布出现明显变化。随着基坑逐层开挖,管桩承受的竖向荷载逐渐减小,特别是在开挖至桩顶标高以上时,轴力下降幅度明显。这表明基坑开挖过程中土体卸载效应对桩体受力有直接影响。下表展示了三种典型开挖阶段(未开挖、开挖至基坑中

部、开挖完成)下桩身不同深度位置的轴力变化情况。

表2 不同开挖阶段桩身轴力分布 kN

桩深/m	未开挖	中部开挖	开挖完成
2	158.3	125.6	92.4
6	204.7	168.9	132.7
10	245.5	201.2	156.4
14	279.1	224.5	175.3
18	291.3	236.8	182.9

由表2可见,桩身轴力自上而下逐渐增大,开挖过程中整体轴力水平随深度递减,显示出明显的应力重分布特征。

3.2 管桩水平位移变化规律

基坑开挖引起土体水平位移变化,导致管桩水平受力状态也随之改变。模拟结果显示,随着基坑开挖深度增加,桩身中上部出现明显水平位移,最大水平位移出现在基坑开挖面附近,约为 5.6mm,属于结构允许范围内,但提示了桩顶位移控制的重要性。下表列出了典型桩位在开挖全过程中不同深度的水平位移情况。

表3 桩身不同深度水平位移值 mm

桩深/m	开挖前	开挖中	开挖完成
2	0.1	2.6	4.9
6	0.0	1.9	3.7
10	0.0	1.1	2.3
14	0.0	0.6	1.1
18	0.0	0.3	0.5

表3中数据说明桩顶位移最大,桩底位移最小,位移分布呈弯曲变形特征,说明基坑开挖对管桩水平稳定性具有不容忽视的影响。

3.3 桩端沉降响应特征

管桩端部的沉降量是评价桩承载性能的重要指标。模拟结果显示,在基坑开挖前后,桩端沉降整体呈增长趋势,但增长幅度有限,最大沉降值出现在开挖完成阶段,约为 3.2mm。该数值说明开挖引起的基础整体沉降有限,未对管桩极限承载力构成实质影响。表4汇总了不同桩位桩端沉降的变化情况。

表4 不同桩位桩端沉降量比较 mm

桩号	开挖前	开挖中	开挖完成
A1	1.1	2.3	3.2
A2	1.0	2.1	3.0
A3	1.3	2.4	3.1
A4	1.2	2.2	3.0

从表4可以看出,不同桩位的沉降趋势基本一致,表明沉降受开挖影响具有统一性,且整体控制良好,满足设计沉降标准。

4 结果分析

4.1 桩顶沉降规律分析

通过对比不同开挖阶段的桩顶沉降数据可见,随着基坑开挖深度的增加,桩顶沉降值显著增大,尤其在支护结构失稳临界前夕沉降速率加快。分析表明,开挖引起的土体卸载效应使得桩周围土体支承能力下降,从而导致桩体沉降加剧。此外,靠近基坑边缘区域的桩沉降值普遍大于远离边坡的桩,显示出空间分布差异。这种差异主要受侧向土体位移影响,且与土层刚度、地下水位变化密切相关。该现象提示设计阶段需充分考虑开挖引起的变形传递路径及桩基在不同部位的沉降不均问题,以保障桩基的整体稳定性与均匀性。

4.2 桩身轴力变化规律

在不同开挖深度下,桩身轴力沿深度方向均呈现非线性分布。随着开挖工况推进,桩身中上部轴力明显降低,部分桩甚至出现负摩阻力现象,即桩身上部受拉、下部受压。这一现象说明地基土对桩体的正向支撑能力逐渐减弱,甚至在局部转化为对桩的下拉作用。尤其是在开挖至地下水位以下时,孔隙水压力的骤降使得桩周土体有效应力剧增,从而放大负摩阻效应。图示结果也揭示,临近基坑侧墙的桩受影响最为显著,其轴力峰值迁移至桩身中下部,进一步加剧了桩基的不均匀受力,应在施工前通过布桩优化及支护调整减轻该类影响。

4.3 桩侧摩阻力变化规律

数值结果表明,基坑开挖过程显著改变了桩周侧摩阻力的分布特性。在未开挖状态下,桩侧摩阻力随深度逐步增加,表现出较好的承载性能;而在深基坑开挖过程中,尤其是当开挖深度超过桩身1/3长

度时,上部土体的卸载效应引起摩阻力剧烈减弱甚至转为负值。表格数据显示,最大负摩阻出现在桩身1/4~1/3深度区域,随着开挖进程向下传递,桩底摩阻力略有提升但不足以抵消上部削弱带来的整体承载力下降。因此,在设计及施工中应高度关注开挖深度控制及桩基周边支护有效性,防止负摩阻累积效应对结构安全造成隐患。

4.4 桩端阻力变化规律

研究表明,深基坑开挖对桩端阻力的影响具有一定的复杂性。随着基坑深度的逐步增大,桩端阻力呈现出先上升后趋于平稳的变化趋势。这是由于开挖引起上部土体应力释放,使得桩端承担的荷载比例增加,从而提高桩端阻力。然而,若支护体系不能有效控制坑底 heave(隆起)变形,可能导致桩端土体扰动,从而降低桩端承载力。分析表明,合理控制基坑底部稳定性、避免底部土体上拱,是确保桩端阻力正常发挥的关键。此外,对于以桩端承载为主的刚性桩型,施工中应特别重视视底部加固与排水降压措施,以确保桩基承载性能稳定可靠。

5 结语

本研究基于深基坑开挖条件下的数值模拟与实测数据分析,系统揭示了开挖过程对坑内预应力管桩承载性能的影响规律。结果表明:随着开挖深度增加,桩顶沉降显著加大,桩身轴力分布发生偏移,易出现负摩阻力;桩侧摩阻力在上部土层衰减严重,桩端阻力则在一定程度上增强以弥补整体承载力损失。桩基受力呈现空间分布差异,临近基坑边缘的桩影响更为显著。研究强调,设计与施工中应加强支护结构优化、桩位布置及坑底稳定性控制,以确保深基坑工程中桩基的安全与服务性能。

参考文献

- [1] 郑六益. 基于现场监测信息的黑港区间隧道动态支护参数研究[D]. 重庆市: 重庆交通大学, 2018.