

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.05.013

考虑土层分布影响的深基坑开挖数值模拟研究*

曾亚林

(湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要:为研究土层分布差异对深基坑开挖稳定性的影响,以某深基坑开挖工程为背景,采用 ABAQUS 有限元软件建立不同土层分布下基坑二维模型,对考虑桩土耦合效应的模型进行地应力平衡,分析不同土层分布下基坑桩身水平位移和基坑外地表沉降变化。结果表明,黏性土的分布可显著改变混凝土支护桩的变形特点,增大基坑外地表沉降,各工况下有黏性土分布模型的平均水平位移更大,且开挖完成后桩身出现多个水平位移极值点。

关键词:公路;深基坑;土层分布;桩身变形;地表沉降;黏性土

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)05-0050-04

随着地下空间资源的开发与利用,深基坑开挖工程面临的问题与挑战愈发复杂。与普通深度基坑不同,深基坑周围土体类型更丰富,土体性质、土层分布等对基坑开挖稳定性的影响更大。针对这一问题,张艳书等以某狭长基坑开挖工程为背景,采用 MIDAS 软件分析软土层厚度变化对基坑外地表沉降的影响,提出了软土层分布与地表沉降的数值关系;王卫东等根据 5 个典型基坑数值模型计算结果,确定了土体 HS-Small 模型参数取值方法,证明了典型 HS-Small 模型参数的普遍适用性;李镜培等对某软土基坑开挖过程中变形特性展开检测与动态响应追踪,得出软土基坑施工对周围土体具有明显深度效应;吴昌将等结合多个基坑监测数据,分析了浅层软土厚度与开挖面积对基坑内挡土墙变形特性的影响;黄敏等对土岩组合地区的基坑开挖过程进行有限元模拟,得到了基坑地表沉降模式与桩体水平位移的相互影响规律。上述研究从不同角度分析了土体性质对基坑开挖的影响,但对同一基坑开挖时土层分布差异带来的影响鲜有研究。该文以两方向剖面土层分布存在明显差异的深基坑开挖工程为背景,通过数值模拟分析土层分布差异对基坑开挖时桩体水平变形及地表沉降的影响,为存在地层差异的深基坑开挖施工提供借鉴。

1 工程概况

某深基坑位于环湖浅丘地带,为湖滨丘陵地形

地貌,地面标高为 36.18~36.76 m。基坑尺寸为 12.1 m×12.1 m,基坑总开挖面积约 175 m²。地面标高按 36.396 m 考虑,基底标高为 5.705 m,基坑开挖深度为 30.691 m。采用交合桩结合竖向 5 道内支撑的支护方案,其中第 1 道内支撑采用 C35 钢筋混凝土,第 2~5 道内支撑采用 $\phi 609 \times 16$ mm 钢管。基坑采用开挖→加撑→开挖的循环施工方法,开挖步骤和加撑步骤见图 1。

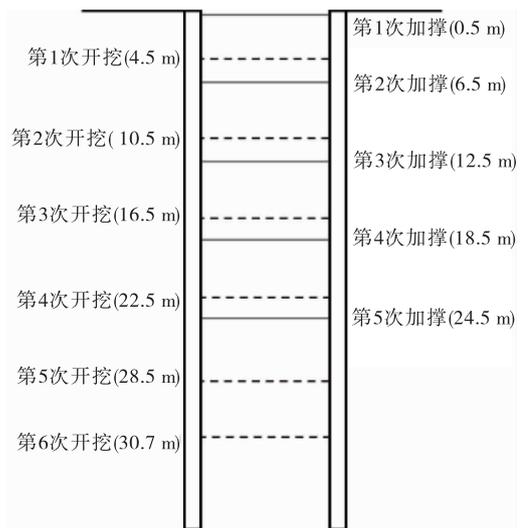


图 1 施工工况示意图

根据工程地质勘察报告,基坑共包含 5 种土层,分别为杂填土、黏性土、强风化板岩、中风化板岩和微风化板岩,其中东西剖面与南北剖面土层分布存

* 基金项目:湖南省交通科技项目(201704;201826)

在差异,东西剖面土层分别为杂填土、黏性土、强风化板岩、中风化板岩和微风化板岩,南北剖面土层分

别为杂填土、强风化板岩、中风化板岩和微风化板岩。各土层分布及物理性质见表1。

表1 各剖面土层分布及物理性质

土层	东西剖面/mm	南北剖面/mm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/kPa
杂填土	3 656	936	19.5	15	0.30	15.0	8.0
黏性土	2 600	—	18.5	23	0.35	18.3	21.2
强风化板岩	9 000	3 600	26.4	126	0.25	20.0	30.0
中风化板岩	4 600	19 300	26.5	210	0.25	45.0	200.0
微风化板岩	21 970	18 000	27.2	300	0.25	62.0	300.0

2 数值模拟

2.1 基本假定

采用 ABAQUS 进行深基坑开挖过程数值模拟。由于土体性质的复杂性,深基坑开挖数值计算无法实现对实际开挖过程的完全模拟,在保证模拟结果合理性的前提下,为提高数值计算的效率与精度,对数值模型作如下基本假设:

(1) 施工过程中地下水水位基本无变化,且施工中采取合理的排水措施,建立模型时不考虑地下水对开挖模型的影响。

(2) 不考虑基坑开挖作业的时间效应及开挖施工对土体物理力学指标的影响。

(3) 土体呈层状均匀分布,且为各向同性的理想弹塑性本构。

(4) 不考虑地下支护桩施工过程对土体的影响,认为支护桩与土层的耦合为模型初始条件,考虑桩土耦合效应进行地应力平衡分析。

2.2 模型建立

采用 ABAQUS 分别建立东西、南北剖面深基坑开挖二维平面模型,各土层厚度根据地质勘察报告按实际尺寸选取。为兼顾计算精度与速度,且保证模型迭代收敛,采用 CPE4 单元模拟土层及支护桩,采用 B21 单元模拟内支撑结构,对混凝土支护桩及桩身周边的土体进行适量网格加密。

混凝土支护桩密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 30 GPa ,泊松比为 0.2 。支撑钢管采用 Q345 钢,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa ,泊松比为 0.3 。各土层参数见表1。土体采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性本构,对全模型施加重力荷载作用。

混凝土支护桩与土体之间采用面对面有限滑移接触,以混凝土支护桩作为主控面、桩周土体作为从属面,切向罚函数取 0.5 ,法向定义为硬接触;支撑与

混凝土桩身采用节点耦合方式进行相互作用。模型两侧采用法向约束,底部采用切向和方向共同约束。ABAQUS 有限元模型见图2。

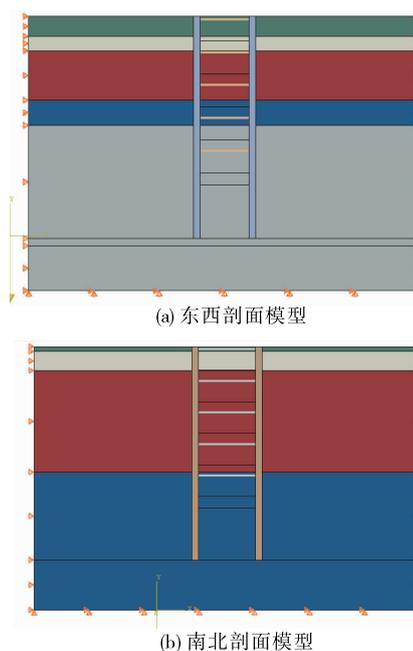


图2 深基坑有限元模型

基坑开挖过程采用 ABAQUS 生死单元功能 (Model change) 模拟,根据各工况实际开挖及加撑情况,激活或杀死对应单元和接触。分析步与对应施工工况见表2。

表2 模型分析步及对应施工工况

分析步	施工工况	分析步	施工工况
Initial	初始化	C3	第3次加撑
Geo	地应力平衡	W4	第4次开挖
W1	第1次开挖	C4	第4次加撑
C1	第1次加撑	W5	第5次开挖
W2	第2次开挖	C5	第5次加撑
C2	第2次加撑	W6	第6次开挖
W3	第3次开挖		

2.3 考虑桩土耦合的地应力平衡

考虑到桩土相互作用时极易发生迭代不收敛,且考虑土体的 Mohr-Coulomb 塑性本构后基本无法完成地应力平衡,采用 Python 语言调用 ABAQUS 进行地应力迭代计算。先将仅定义弹性本构的土体应力场作为初始预应力场施加在定义了 Mohr-Coulomb 弹塑性本构的模型上,反复进行迭代。考虑桩土耦合作用且同时定义 Mohr-Coulomb 塑性本构的模型地应力平衡土体位移见图 3。

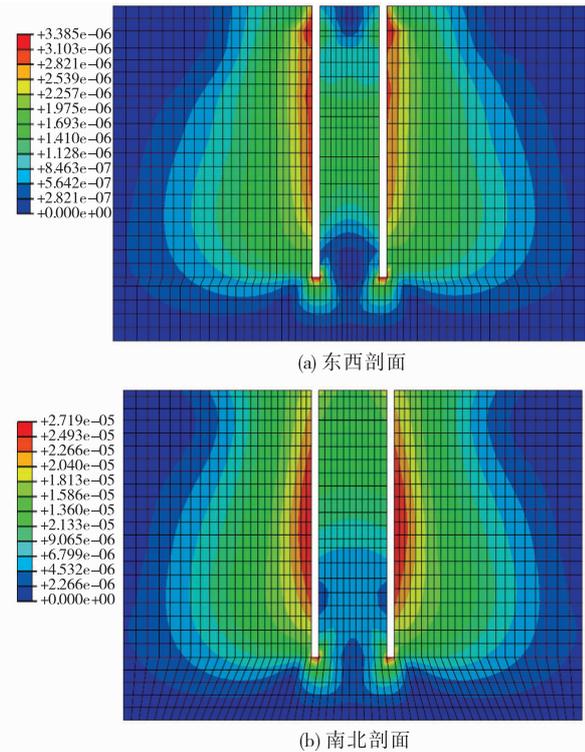


图 3 地应力平衡土层位移(单位:m)

由图 3 可知:采用循环迭代进行桩土耦合下地应力平衡后,东西剖面基坑模型的土体位移为 $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ m,南北剖面基坑模型的土体位移为 $2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ m。自重作用下基坑模型土体内部位移与实际土体十分吻合,可以地应力平衡结果作为基坑开挖的初始状态进行开挖模拟。

3 模拟结果对比分析

3.1 桩身位移

图 4 为不同开挖工况下东西剖面与南北剖面模型桩身位移,图 5 为各工况下东西剖面与南北剖面模型桩身位移峰值。

由图 4(a)可知:各工况下,有较深黏性土层分布的东西剖面模型桩身上部水平位移峰值较大,对

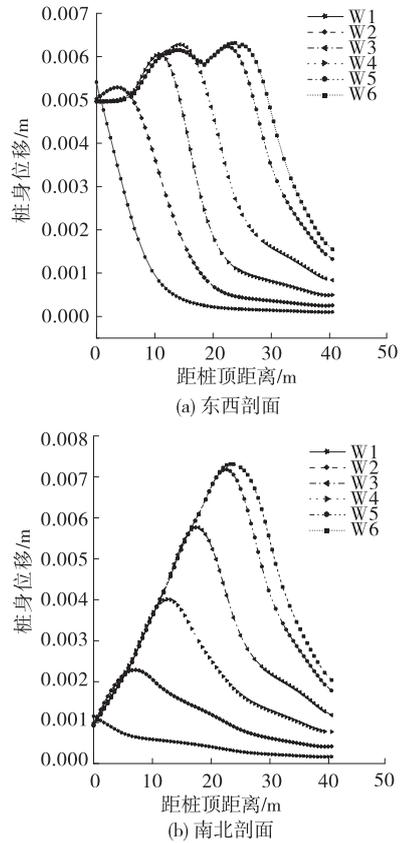


图 4 不同开挖工况下桩身水平位移

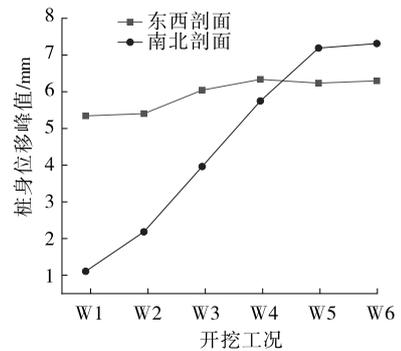


图 5 不同开挖工况下桩身水平位移峰值

比 W1 和 W2 工况,支撑布置在一定程度上限制了桩顶水平位移的进一步增大,但效果有限,开挖卸荷后桩顶水平无明显变化;在 W6 工况,第 6 次开挖卸荷后桩身出现 2 处位移极值,第 1 次位移极值出现在距桩顶 15 m 左右处,即东西剖面强风化板岩分布位置,上部黏性土层性质导致开挖过程中土体活动量增大,显著影响桩身位移。

由图 4(b)可知:无黏性土层分布的南北剖面模型桩身水平位移随着开挖和加撑的进行逐步增大,各工况下均只有一个明显的位移极值点,桩身上部位移明显小于有较深黏性土分布的东西剖面模型,

桩身上部有支撑位置和下部有土体位置的位移较小,各工况下位移峰值均出现在最后一道支撑与基底之间。

由图5可知:有较深黏性土层分布的东西剖面模型在各工况下的位移峰值相差较小,随着开挖的进行位移峰值无明显增大趋势,位移峰值极差仅为1.58 mm;无黏性土分布的南北剖面模型的位移峰值随着开挖的进行呈明显增大趋势,位移峰值极差为6.11 mm。可见,桩身位移峰值受土层分布影响显著。

3.2 地表沉降

图6为2个剖面模型的桩外土体沉降峰值。

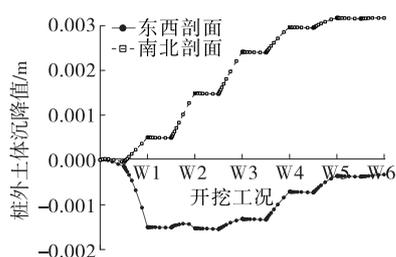


图6 桩外沉降峰值对比

由图6可知:有较深黏性土层分布的东西剖面模型在前期开挖中桩外土体沉降明显,随着各道支撑的布置,桩体变形被有效限制,基坑外土体沉降逐渐减小;无黏性土层分布的南北剖面模型的土体性质较稳定,开挖过程中沉降较小,且随着支撑的布置,基坑外土体出现一定隆起。

4 结论

(1) 考虑桩土耦合效应时可采取将重力场作为初始预应力场的循环迭代方式进行模型地应力平衡,解决考虑桩土耦合时地应力平衡计算不收敛的问题。

(2) 黏性土分布对基坑开挖稳定性有显著影响,基坑开挖过程中黏性土的土体活动明显,桩身上部变形比无黏性土分布模型大。

(3) 开挖过程中有黏性土分布模型基坑外土体的沉降更大,随着支撑的布置沉降逐渐减小。无黏性土分布模型的土体结构较稳定,随着支撑的布置基坑外土体出现一定隆起。

参考文献:

[1] 张艳书,薛栩超,庄海洋,等.软土层对地铁狭长深基坑地表沉降的影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,

- 14(6):1639-1651.
- [2] 王卫东,王浩然,徐中华.上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J].岩土力学,2013,34(6):1766-1774.
- [3] 李镜培,陈浩华,李林,等.软土基坑开挖深度与空间效应实测研究[J].中国公路学报,2018,31(2):208-217.
- [4] 吴昌将,孙召花,赖允瑾,等.软土地区地下连续墙深大基坑的变形性状研究[J].岩土力学,2018,39(增刊2):245-253.
- [5] 黄敏,刘小丽.土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1):571-575.
- [6] 陈昆,闫澍旺,孙立强,等.开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J].岩土力学,2016,37(4):1075-1082.
- [7] 徐凌,陈格际,刘帅.基于 FLAC^{3D} 的深基坑开挖与支护数值模拟应用[J].沈阳工业大学学报,2016,38(1):91-96.
- [8] 李大鹏,阎长虹,张帅.深基坑开挖对周围环境影响研究进展[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(8):659-668.
- [9] 郑杰明,谢玖琪,杨平,等.深基坑开挖支护结构水平变形对地表沉降影响的数值模拟[J].现代隧道技术,2013,50(2):102-108.
- [10] 周冠南.软弱地层深基坑开挖时空效应分析及控制[J].地下空间与工程学报,2014,10(增刊1):1653-1658.
- [11] 刘小丽,周贺,张占民.软土深基坑开挖地表沉降估算方法的分析[J].岩土力学,2011,32(增刊1):90-94.
- [12] 楼晓明,杨晶,李德宁,等.立柱桩在深基坑分步开挖过程中的上拔位移分析[J].岩土工程学报,2013,35(1):193-198.
- [13] 史豪杰,李富相,李志勇.公常路下穿改造工程深基坑开挖施工监测与稳定性分析[J].公路与汽运,2021(4):97-100+165.
- [14] 张文凯,杨志强,李波.不同开挖方式的深基坑数值模拟研究分析[J].包钢科技,2011,37(2):28-31.
- [15] 杨贵生,李雨润,李雨辰.超深基坑支护开挖对土体变形影响数值模拟研究[J].铁道工程学报,2008(6):32-35.
- [16] 孙海霞,张科,陈四利,等.考虑渗流影响的深基坑开挖三维弹塑性数值模拟[J].沈阳工业大学学报,2015,37(5):588-593.
- [17] 夏琴,石峰,张红彬,等.某明挖车站基坑开挖过程监测与数值模拟[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2019,36(4):388-395.