

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.071

多层桩锚支护深基坑开挖全过程数值模拟

王胜,李陆海,黄俊文

(珠海市规划设计研究院,广东 珠海 519000)

摘要:为更直观地得到桩锚支护基坑在开挖过程中的变形和受力特征,并反馈于实际设计与施工,以珠海市某桩锚支护深基坑工程为例,基于有限差分软件FLAC^{3D}建立精细化数值模型,计算分析各工况下基坑的变形和受力特性。分析结果表明:随着基坑开挖的进行,坑顶地表沉降量逐渐增大,最大地表沉降出现在距桩顶28m的位置;坑顶地表沉降增速慢,表明预应力锚索的加入对于限制基坑变形具有较好的效果;锚索所需提供的抗拔力随开挖而逐渐增大,且第一级锚索所需提供的抗拔力最大,其次是第三级锚索;使用所建数值模型分析该基坑开挖过程是合理的,计算结果可为实际施工和设计提供参考。

关键词:深基坑;桩锚支护;数值模拟

中图分类号:U473.2

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)07-0304-06

0 引言

桩锚支护以其工程适用性强、成本较低的优势,在城市中深基坑的应用中较为广泛^[1-2],但受现有设计理论缺陷或基坑复杂性难以评估等因素影响,基坑事故频发。因此,近年来利用数值模拟辅助深基坑支护设计逐渐广泛应用,在基坑开挖前对支护方案进行全过程数值模拟分析,可检验支护方案可靠性并进一步反馈设计,为安全施工提供有效保障。

刘继国等^[3-5]运用FLAC3D软件实际深基坑开挖与支护模拟,通过计算得出不同开挖阶段的地表沉降、基底隆起和墙后土体水平位移,为工程设计与施工提供参考。吴明亮^[6]利用ANSYS分析了基坑开挖过程中相邻框架结构、支护结构和地表土层的变形发展规律,考虑了上部结构距基坑的距离和支护形式的影响。周勇^[7]利用有限元软件ADINA对某采用桩锚支护形式的深基坑进行了数值模拟,分析得到了锚杆预应力和锚杆角度对支护结构位移的影响。郑志均等^[8]基于Plaxis对实际施工工况进行模拟,动态地分析了基坑开挖工程对地铁隧道变形的影响,结果与实测数据吻合度较好。郑刚^[9]基于Plaxis^{3D}中的HSS小应变模型,通过控制基坑围护结构的最大水平变形量,分析了4种典型的围护结构变形模式对抗外土体沉降、建筑物变形的影响。黄福杰等^[10]基于有限元软件对地铁基坑开挖对新建基坑开挖、

支护的力学响应特征进行了分析,计算结果为处于深厚淤泥区基坑开挖过程的安全性提供了进一步的保障。

现以珠海市某桩锚支护深基坑工程为例,基于有限差分数值软件FLAC^{3D}对基坑开挖进行全过程数值模拟。基于数值计算结果,得到了各工况下支护桩、预应力锚索及基坑的受力和变形规律。该计算结果可为实际施工和设计提供参考。

1 工程概况

珠海市某地下停车场深基坑工程位于珠海市香洲区九洲大道附近,基坑形状大致呈矩形,西侧及北侧均为市政道路,东侧及南侧为现状居民小区。为避免基坑开挖对既有构建筑物造成不利影响,无法采用大面积放坡开挖处理,拟采用的支护方案为预应力锚索+灌注桩的支护形式。典型支护横断面如图1所示。

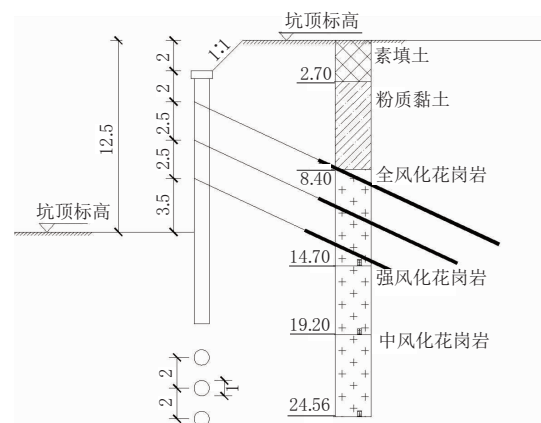


图1 基坑桩锚支护示意图

收稿日期:2022-09-18

作者简介:王胜(1998—),男,硕士,助理工程师,主要从事岩土工程设计和科研工作。

该段基坑开挖深度为 12.5 m,分为 4 层开挖,支护形式为预应力锚索 + 灌注桩支护。在 0~2 m 的深度采用放坡处理,预应力锚索打三层,竖向间距为 2.5 m,水平间距为 2 m。考虑周边的均布荷载,取荷载值为 20 kPa。

2 模型参数及模拟工况

2.1 模型基本参数取值

2.1.1 土体模型参数

土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,不考虑地下水及渗流对土体和桩体的影响。根据该项目岩土工程勘察报告提供的数据,不考虑抗拉强度的影响,剪胀角为 0,得到简化后的土层参数如表 1 所列。

表 1 土体参数表

土层	h/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	K/MPa	G/MPa	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
素填土	2.7	18.1	1.25	1.37	9.6	14
粉质黏土	5.7	18.9	5.67	3.4	31	15.5
全风化花岗岩	6.3	19.1	6	3.6	24	22.5
强风化岩	4.5	19.7	38.7	15.2	35	28
中风化岩	5.4	22.5	66.7	22.2	38	30

2.1.2 围护结构模型参数

对于围护结构的模拟,在 FLAC^{3D} 软件中可以采用衬砌单元或实体单元进行替代,上述两种方式计算结果并无太大差异^[11]。具体而言,采用等效刚度法,即按照抗弯刚度相等的原则,将等间距分布的灌注桩等效为一定厚度的地下连续墙,计算得到的等效地下连续墙 $h=0.67$ m,具体模型中围护结构的相关参数如表 2 所列。

表 2 围护结构实体单元计算参数表

厚度 /m	杨氏模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
0.67	10	0.20	2 500

2.2 基坑开挖工况选取

在对基坑进行开挖时,一般开挖一层土,随即进行预应力锚索的施工,因此根据实际工程的施工顺序,选取 4 种工况如表 3 所列。

3 数值模型建立

3.1 土体模型建立

依据圣维南原理,基坑开挖深度为 12.5 m,取模型总尺寸为 70 m(x) \times 30 m(y) \times 62.5 m(z)。假定模型的边界为位移边界,侧向约束使其不产生水平方

表 3 基坑开挖工况表

工况号	工况类型	深度	锚杆级数
1	开挖	4.5	
	支撑	4.0	锚杆 1
2	开挖	7.0	
	支撑	6.5	锚杆 2
3	开挖	9.5	
	支撑	9.0	锚杆 3
4	开挖	12.5	

向的位移,底面约束使其不产生竖向位移。

建立模型时,在桩身周围两侧对网格进行加密处理,建立模型如图 2 所示。建好的模型单元总数为 30 750,网格节点数为 35 096 个。土体的开挖过程用空模型 Null 来实现。开挖后的模型见图 3 所示。

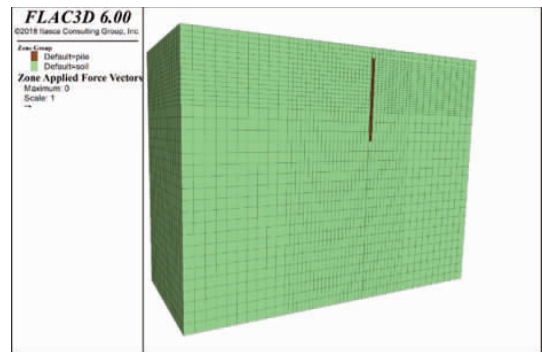


图 2 基坑模型网格划分示意图

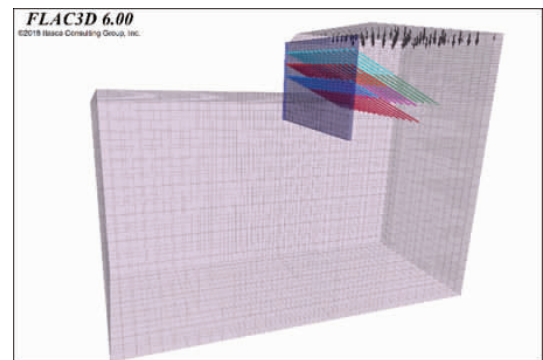


图 3 基坑开挖支护模型图

3.2 支护桩和预应力锚索的模拟

围护结构采用实体单元进行模拟,经前述等效刚度法确定灌注桩的等效宽度为 0.67 m,相关模型参数详见表 2 所列。为能更准确反映桩土二者之间的相互作用,在桩体与土体的接触部分使用接触面(interface)来考虑桩-土之间的相互作用,如图 4 所示。

对于预应力锚索则使用 cable 结构单元来进行模拟。设计相关参数如表 4 所列,模型中的锚索相关参数详见表 5 所列。

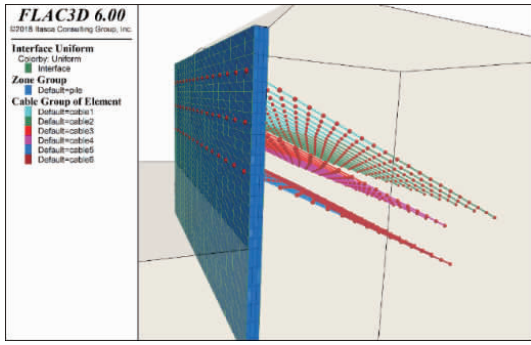


图4 桩锚支护模拟示意图

表4 预应力锚索设置参数表

序号	锚固体直径/mm	水平间距/m	竖向间距/m	预应力/kN	入射角/(°)	总长/m	锚固段长度/m
1	180	2	4	150	25	20.50	11.00
2	180	2	2.5	100	25	15.50	7.50
3	180	2	2.5	100	25	16.50	10.00

表5 锚索单元计算参数表

参数名	单位	参数值
锚索杨氏模量(emod)	GPa	20.0
剪切连接弹簧粘聚强度(gr_coh)	MPa	0.8
剪切连接弹簧摩擦角(gr_fric)	degree	27
锚索拉伸强度(ytens)	kN	510
注浆孔周长(gr_per)	m	0.565
剪切连接弹簧刚度(gr_k)	N/m	2.1 × 107

锚索与支护桩的锚固连接,通过删除锚索 cable 端头与 zone 之间的连接 link,然后在其间重新建立完全刚性的连接 link 来模拟锚索端头的托盘,然后在锚索的自由端施加预应力。

4 基坑开挖数值分析

4.1 水平位移分析

4.1.1 基坑水平位移

图5~图8为基坑开挖过程中不同工况下的基坑水平位移云图。

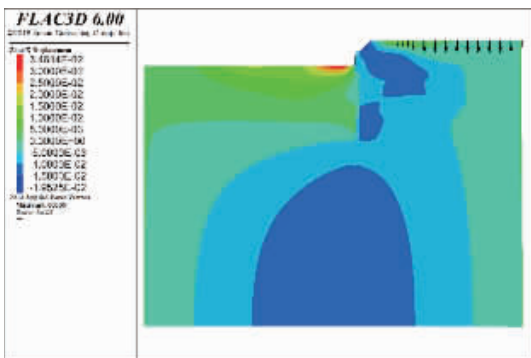


图5 工况一位移云图(Sx)

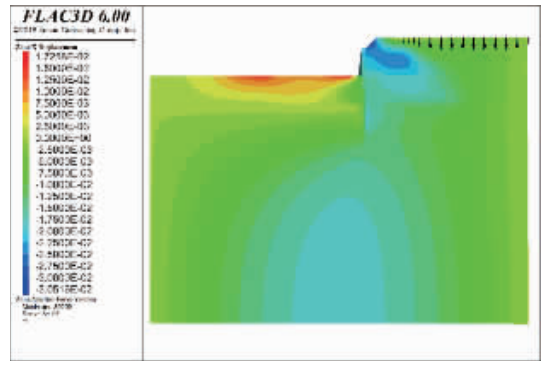


图6 工况二位移云图(Sx)

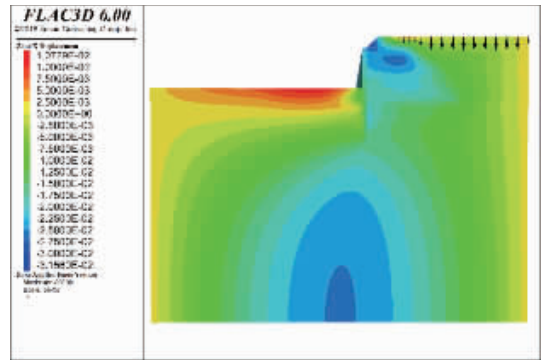


图7 工况三位移云图(Sx)

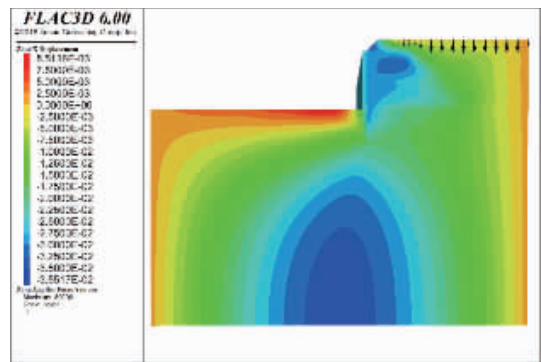


图8 工况四位移云图(Sx)

从以上各工况下水平位移图可以看到,随着开挖深度的增加,基坑底部的水平位移值逐渐减少,从工况一到工况四,坑底最大水平位移值分别为34.6 mm、17.3 mm、10.7 mm、8.5 mm(方向水平向右)。而坑底水平位移产生递减规律的原因在于桩墙后土体的水平位移逐级增大。基坑开挖深度的增加,使得周边土体的水平位移逐渐增大,影响范围也逐渐扩大到坑底土体,坑底产生的水平位移为正(向右),而坑外土体所发生的水平位移为负,从而减小了坑底原来的水平位移。

坑顶0~2 m的深度内采用放坡处理,坡面处所产生的水平位移最大,各个工况下的最大水平位移分别为19.5 mm、30.5 mm、31.6 mm和35.5 mm(方向水平向左)。

4.1.2 桩身水平位移

图 9~ 图 12 为四个工况下放大 50 倍的桩身水平位移云图。

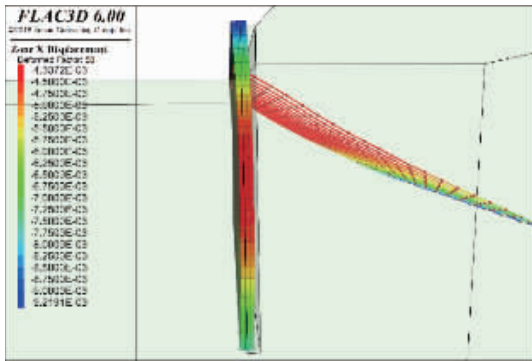


图 9 工况一桩身水平位移

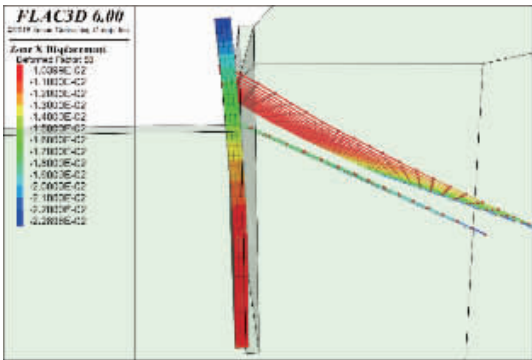


图 10 工况二桩身水平位移

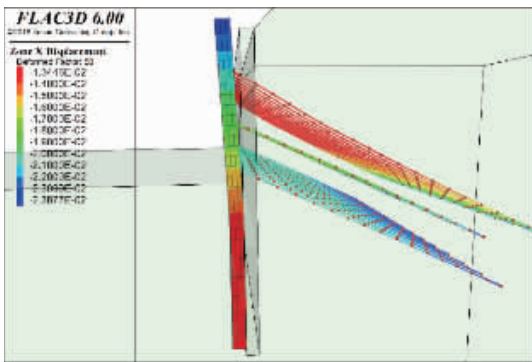


图 11 工况三桩身水平位移

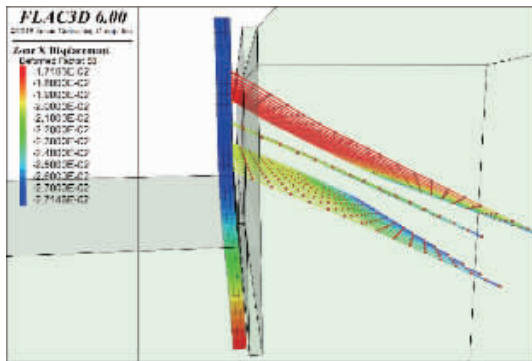


图 12 工况四桩身水平位移

可以看到随着开挖深度增加,桩身的水平位移逐渐变大,从工况一到工况四,桩身的最大水平位移值出现在桩顶处,大小分别为 9.2 mm、22.9 mm、23.9 mm

和 27.2 mm。

计算时在桩身等间距布置 9 个水平位移监测点,得到每一层开挖后桩身水平位移值的分布情况,进而绘制桩身水平位移曲线如图 13 所示。

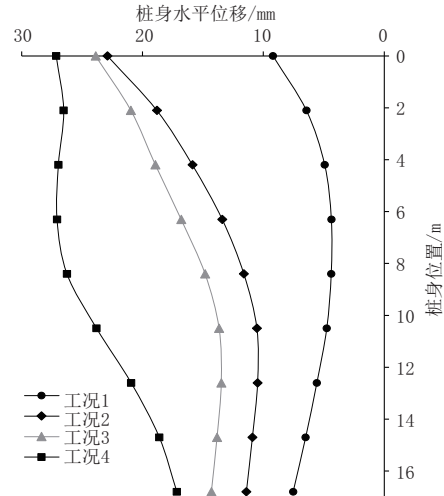


图 13 桩身水平位移曲线图

从图 13 来看,从工况一到工况三的桩身变形模式相同,桩身上部和下部水平位移较中部的大,且桩顶水平位移最大。原因在于前三种工况下,土体均是等厚度开挖(每层开挖 2.5 m),且开挖一层立即打预应力锚杆,在桩身中部打的预应力锚杆有较好的抵抗水平位移的效果,但是由工况三到工况四,开挖的深度为 3.3 m,且无新锚杆加入抵抗变形,因此导致工况四的桩身变化与前三种有差异。

4.2 基坑竖向位移分析

图 14~ 图 17 为基坑开挖过程中不同工况下的基坑竖向位移云图,可见基坑底部的隆起现象非常明显,而坑后的土体竖向位移主要发生在竖向堆载的区域。

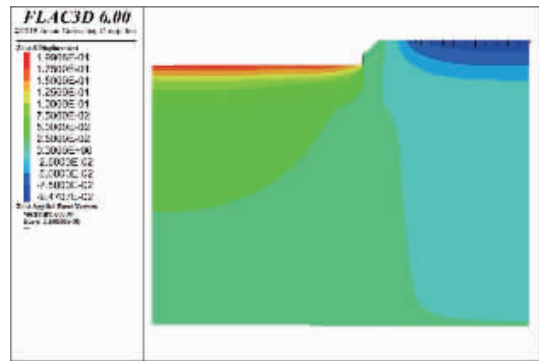


图 14 工况一竖向位移云图

分析模型求解结果可以发现,开挖第一层后(4.5 m)和开挖第二层后(7.0 m)的基坑隆起量接近,隆起值都在 200 mm 左右。当开挖至第三层(9.5 m)时,基坑的隆起减少为 153 mm 左右,开挖到底后

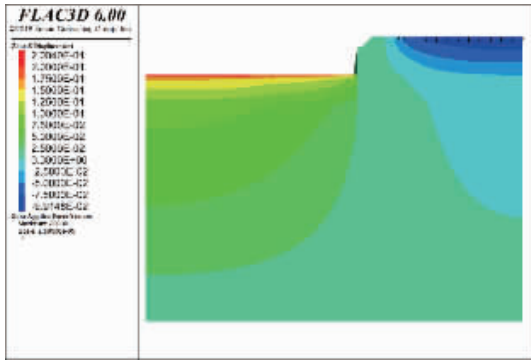


图 15 工况二竖向位移云图

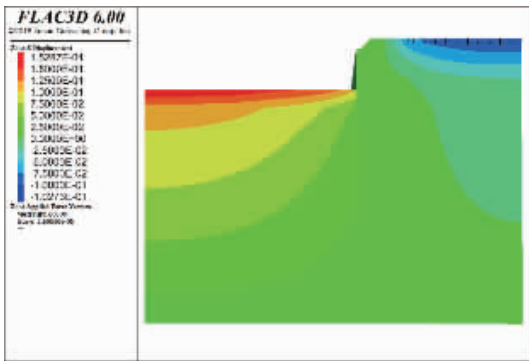


图 16 工况三竖向位移云图

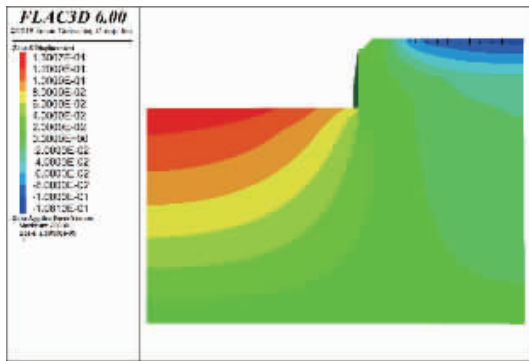


图 17 工况四竖向位移云图

(12.8 m), 基坑隆起进一步减少, 约为 130 mm。

坑顶地表沉降量随着开挖深度的增加, 沉降量逐渐增大, 但是沉降增量很小, 表明预应力锚索对于基坑变形具有较好的限制作用。根据坑顶地表竖向位移值绘制变化曲线如图 18 所示。地表开始发生沉降是在距坑边 2 m 的位置, 由于距离坑边 4 m 至 28 m 的范围设有 20 kPa 的均布荷载, 所以在这一范围内所产生的沉降最大, 工况一至工况四地表的沉降分别为 94.5 mm、98.9 mm、102.6 mm、107.9 mm。

4.3 预应力锚索受力分析

图 19 至图 22 为各工况下的锚索轴力云图。随着基坑开挖的进行, 由于坑外土体与锚索之间相对位移的增大, 锚索所需承受的荷载也逐渐增大, 从计算结果中也可反映出锚索轴力的这一变化规律。

从工况一到工况四, 锚索的最大轴力值逐级增

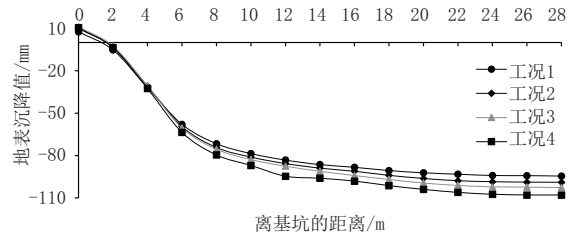


图 18 坑后地表沉降曲线图(单位:mm)

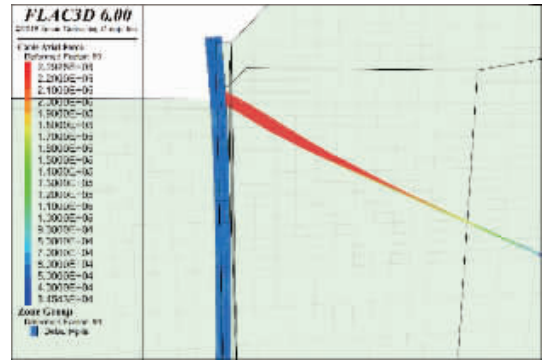


图 19 工况一锚索轴力云图

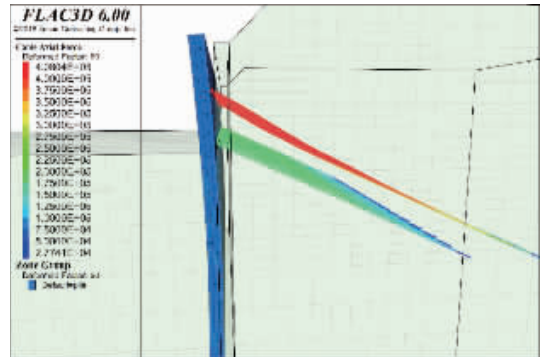


图 20 工况二锚索轴力云图

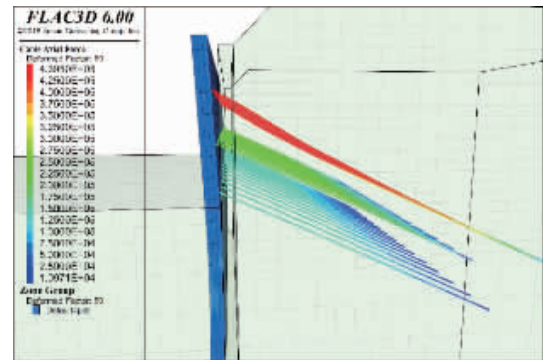


图 21 工况三锚索轴力云图

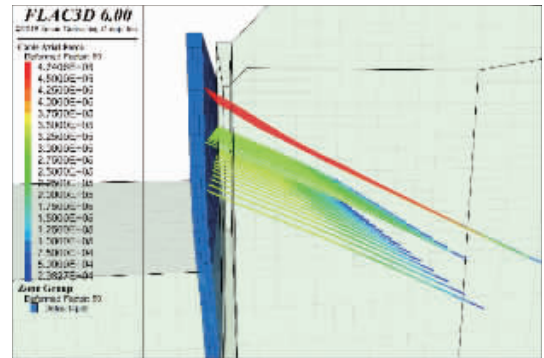


图 22 工况四锚索轴力云图

大,分别为 229.4 kN、406 kN、449.5 kN 和 474.1 kN,且锚索最大轴力位于锚索与桩墙的连接处,将第一道锚索的轴力沿锚索全长的分布按照 4 个工况绘制曲线,如图 23~25 所示。

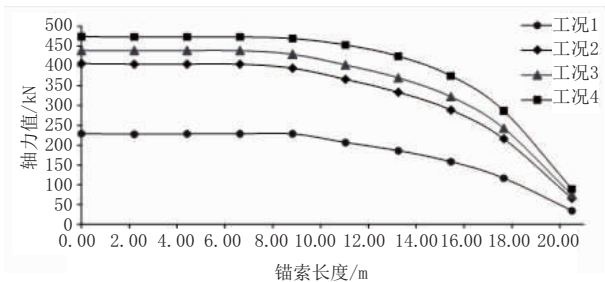


图 23 锚索 1 轴力分布曲线图 (单位: kN)

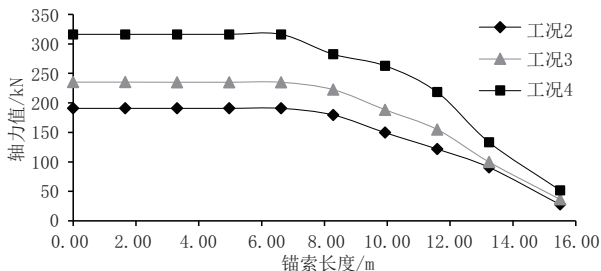


图 24 锚索 2 轴力分布曲线图 (单位: kN)

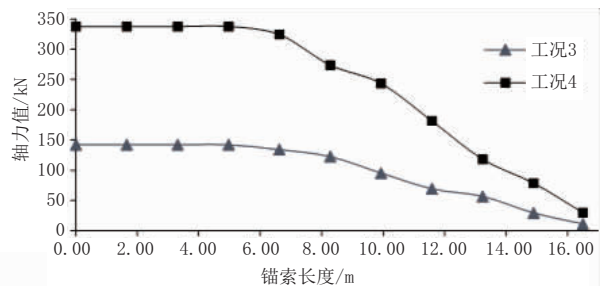


图 25 锚索 3 轴力分布曲线图 (单位: kN)

第 1 道锚索全长为 20.5 m,其中锚固长度为 11 m,自由段长度为 8.5 m,施加的预应力大小为 150 kN。

除锚索轴力逐级增大外,从图 23 中还可以看到锚索的轴力在各个工况下沿锚索长度的分布规律,在自由段,锚索轴力大,且轴力值曲线保持水平,即基本不发生变化,这是由于没有周围土体摩擦力来分担轴力的原因。而在锚固段,由于锚索周围存在注浆体和周围土体产生的摩阻力,因此锚固段锚索的轴力值沿着锚索长度逐渐减小。

锚索 2 和锚索 3 的轴力沿长度的分布曲线如图 24 和图 25 所示,可见其轴力变化规律同锚索 1 相同,自由端的轴力沿长度基本无变化,而在锚固段沿长度逐渐减小。对比 3 道锚索可以发现,第一层锚索

所承受的轴力值最大。

5 结语

以珠海市某桩锚支护深基坑工程为例,基于 FLAC^{3D} 对基坑开挖全过程进行了数值模拟分析,得到了开挖过程中基坑的变形及受力特性。经分析得到了一些结论:

(1)随着基坑开挖的进行,坑顶地表沉降量逐渐增大,最大地表沉降出现在距桩顶 28m 的位置。坑顶地表沉降增速慢,表明预应力锚索的加入对于限制基坑变形具有较好的效果。

(2)锚索所提供的抗拔力随着基坑开挖深度的增大逐渐增大,且第一级锚索所提供的抗拔力最大,其次是第三级锚索。

(3)随着基坑开挖,坑底水平位移值将逐渐减少。原因在于坑外土体向基坑内部的水平位移增大,从而减小了坑底因开挖卸载所引起向坑外的水平位移。

(4)本文模拟计算结果可为工程设计提供指导和参考。

参考文献:

- [1] 曹剑波.深基坑桩锚支护及工程应用研究[D].武汉:中国地质大学,2010.
- [2] 曾友谊.深基坑桩锚支护结构安全性研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [3] 刘继国,曾亚武.FLAC^{3D}在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J].岩土力学,2006,27(3):505-508.
- [4] 闫纲丽,王斌.基于 FLAC^{3D}的深基坑桩锚支护结构分析[J].华北水利水电学院学报,2012,33(3):82-85.
- [5] 王涛,余建民.基坑开挖对邻近既有下穿顶管隧道的变形影响分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):200-204.
- [6] 吴明亮.深基坑开挖对相邻浅基础框架结构的影响分析与研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [7] 周勇.基于开挖过程的深基坑桩锚支护结构位移的数值模拟分析,兰州理工大学学报,2018,44(5):132-136.
- [8] 郑志均,郑江敏.某基坑开挖对地铁隧道变形的影响分析[J].城市道桥与防洪,2019,11(11):185-188.
- [9] 郑刚,李志伟.不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J].岩土工程学报,2012,34(6):969-976.
- [10] 黄福杰,陈浩民,何则干.深厚淤泥区基坑开挖作用下临近地铁基坑的力学响应[J].城市道桥与防洪,2020,1(1):188-190.
- [11] 陈育民.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].第二版.北京:中国水利水电出版社,2013.