doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201901014

深基坑桩锚支护位移及内力数值模拟分析

徐孟龙

(河南理工大学土木学院,河南焦作 454000)

摘要:利用 FLAC3D 数值模拟软件,按照实际施工工序模拟基坑开挖支护全过程,得到了桩锚支 护结构以及基坑外土体沉降和基坑侧壁水平位移随基坑开挖的变形规律:随基坑开挖深度的增 加,基坑外土体沉降逐渐增大,变化曲线呈"勺状"分布;基坑顶和基坑侧壁水平位移随开挖深 度增加均逐渐增大且都在开挖至基坑底时位移最大;桩身弯矩最大值处基本出现在基坑开挖深 度1.5 m 以上的位置,最大负弯矩值为76.7;锚索轴力最大位置出现在锚索的端头处,且从端 头位置向端尾位置逐渐减小,而第1排至第3排锚索最大值逐渐增大,说明支护结构中第2、3 排锚索起主要作用,验证了深基坑桩锚支护的可行性。

关键词:深基坑;桩锚支护;数值模拟;变形规律

中图分类号:TU47 文献标识码:A 文章编号:1671-5322(2019)01-0072-07

自 20 世纪 80 年代以来,桩锚支护体系在我 国深基坑工程中得到广泛应用。城市进程的快速 发展、基坑深度的增加,以及周边环境的复杂性对 基坑变形的控制要求愈发严格等都对基坑工程的 安全性提出了挑战。钟潜智^[1]对 FLAC3D 模拟、 理正计算和实测结果作对比分析,发现理正计算 值偏大、实测值次之、模拟值最小,这与多数研究 者得出的结论一致;李浩^[2]利用现场试验研究了 冠梁土压力与内力变化规律以及锚索轴力和桩侧 向位移分布特征,丰富了桩土作用的理论研究;夏 晋华^[3]利用有限元软件模拟了郑州某基坑,得出 基坑外地表沉降呈抛物线形状且最大值出现在距 离支护结构 1.5 倍的开挖深度的结论;于丹^[4]通 过 FLAC3D 模拟发现桩锚支护比桩锚土钉墙联合 支护效果更好,验证了桩锚支护的优越性;吴才 德^[5]认为在压顶梁上设置土锚杆,可有效控制支 护结构变形;王一鸣^[6]分析了在考虑基坑外附加 荷载作用的情况下,桩锚支护结构锚索布置的最 佳分布形式和最合适位置,为类似工程提供了参 考依据。岩土工程界数值模拟软件比较多, FLAC3D 数值模拟软件是应用最为广泛的软件之 一^[7],可以模拟基坑实际开挖和支护的全过程,

获得土体位移场和应力场^[8-9]。本文运用 FLAC3D数值模拟计算软件对温县某深基坑工程 的开挖支护进行了全真模拟分析,分析了支护结 构和基坑的变形规律,并与实测值对比验证了该 模拟的正确性。

1 工程概况

该深基坑工程位于温县古温大街与黄河路交 叉口东北角,呈近似矩形,东西向长约105 m,南 北向宽约60 m,开挖深度约11.4 m。基坑东侧为 待接续地下室,南侧自北向南为人行道和黄河路 主干道,西侧自东向西有人行道、绿化带和古温大 街主干道,基坑北侧有3栋建筑,自西向东分别为 5F砖混、3F砖混和1F+3F混砖3栋建筑,距离 基坑边缘分别为5.0 m、5.0 m和8.8 m。

1.1 场地工程地质条件

拟建工程场地无发震断裂分布。场地覆盖层 厚度大于 50 m,属稳定场地。

1.1.1 地形地貌

场地所处地貌类型为黄河冲积平原,场区地 形平坦开阔。地面标高最大值107.79 m,最小值 107.16 m,地表相对高差0.63 m。

作者简介:徐孟龙(1992一),男,河南鹿邑人,硕士生,主要研究方向为岩土工程。

1.1.2 地层

本场地勘察深度范围内除填土外,地基土为

第4系全新统冲积层。各土层的工程地质特征如 表1所示。

		表 1	土层岩土物理力	学参数				
Table 1 Soil layer physical and mechanical parameters								
土层名称	层厚/m	重度 γ⁄	弹性模量 E/	粘聚力 c/	内摩擦角 φ /	対ない		
		$(kN \cdot m^{-3})$	MPa	kPa	(°)	们招口		
杂填土	1	18.0	14	24.48	31.62	0.25		
粉土	5.25	18.0	6	30.00	27.00	0.25		
粉质粘土	9.05	19.1	38	45.60	16.28	0.3		
粉土	20.00	19.6	19	30.00	27.00	0.25		
粉砂	未穿透	20.0	140	24.48	31.62	0.2		

1.2 场区水文地质条件

地下水属冲积层潜水。地下水依大气降水及 地下径流补给,依地下径流及蒸发排泄。经勘察, 场地初见水位与稳定水位基本一致。地下水稳定 水位埋深16.58~17.21 m。地下水水位季节性 变化幅度约2.0 m 左右。勘察期间为枯水期,历 史最高地下水水位埋深为14.58 m(标高:92.58 m)。 含水层主要以湿的粉质粘土、粉土、粉砂为主,粉 质粘土和粉土属弱透水层,粉砂属强透水层,故场 地的环境类型属 II 类。地下水对混凝土结构有微 腐蚀性;干湿交替时对钢筋混凝土结构中的钢筋 有微腐蚀性。根据《建筑地基基础工程质量验收 规范》^[10]第7.1.7条,判断该基坑属于一级基坑。

1.3 基坑支护设计

基坑北侧5层砖混结构住宅楼处支护设计图如图1所示,采用桩锚联合支护形式,钻孔灌注桩桩顶为宽1.0m、高0.6m的C25钢筋混凝土冠梁。钻孔灌注桩桩径0.8m、桩间距1.4m,桩身采用C25混凝土,桩长17.4m。设置3排宽0.3m、高0.5m的C25钢筋混凝土腰梁,设置3道锚索,锚索竖向间距第1排为3.5m,第2排和第3排为2.5m,水平间距1.4m,锚索成孔口径150mm。第1排锚索长20.5m,锚固段长13.5m,锁定预应力200kN;第3排锚索长19.5m,锚固段长14m,锁定预应力200kN;第3排锚索长17m,锚固段长12m,锁定预应力200kN;第3排锚索长17m,锚







2 FLAC3D 数值模拟

2.1 建立模型

基坑北侧西部为1栋5F砖混结构住宅楼,距 离基坑边缘为5.0m,此段为本基坑的最不利荷 载部分,本文也只研究此段的基坑支护。该支护 方案采用机械成孔混凝土灌注排桩+预应力锚索 支护。由于该基坑开挖面积较大,本次模拟选用 基坑北侧5层砖混结构所在位置剖面进行计算, 但为了消除边界条件对模拟结果的影响,模型在 水平方向上取约3倍开挖深度,在竖直方向上取 2倍开挖深度^[11-12]。模型的尺寸为长×宽×高= 35m×3m×23m,共有19320个实体单元,23359 个网格节点,如图 2 所示。基坑开挖深度为 11.5 m,在水平方向 x = 0 m 及 x = 35 m 约束 x 轴方向 位移,在 y = 0 m 及 y = 3 m 约束 y 轴方向位移,z轴方向只约束底面 z = -23 m 处的位移,基坑顶 面自由。该计算模型采用实体单元和结构单元结 合建模,土体采用实体单元本构模型——摩尔 – 库伦(Mohr-Coulomb)模型^[13],开挖土体用空单元 (Null)模型模拟,钻孔灌注桩采用 pile 结构单元 来模拟,预应力锚索采用 cable 结构单元来模拟, 冠梁及腰梁采用 beam 结构单元来模拟^[14],距基 坑边缘 5 m 的 5 层砖混建筑物,按照每层取值 20 kPa,基坑外无外加荷载计算时取 20 kPa,确定 该模型基坑顶荷载取值为 120 kPa。



Fig. 2 Calculation model diagram

2.2 参数选取

2.2.1 土体剪切模量和体积模量计算

土体的剪切模量 *G* 和体积模量 *K* 可用下述 式(1)和式(2)计算。

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \tag{1}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2v)} \tag{2}$$

其中:E为弹性模量,v为泊松比。

2.2.2 锚索参数选取

本段支护中锚索共3排,具体布置及参数如 表2所示。

1	表 2	锚	素参数表	
Table 2	Anc	hor	parameter	table

支锚道号	类型	水平间距/m	竖向间距/m	总长/m	锚固段/m	预加力/kN
1	锚索	4.5	3.5	20.5	13.5	200
2	锚索	4.5	2.5	19.5	14	200
3	锚索	4.5	2.5	17	12	200

2.2.3 冠梁及腰梁参数选取

本次支护中冠梁和腰梁均采用混凝土材料, 冠梁宽1m、高0.6m,腰梁宽0.3m、高0.5m。 2.2.4 桩参数选取及计算

数值模拟中需要用到支护桩剪切耦合弹簧刚

度 k_s 和法向耦合弹簧刚度 k_n ,可按式(3)计算。

$$k_s = k_n = 10 \max\left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G\right)}{\triangle z_{\min}}\right]$$
 (3)

•	75	•
•	75	•

	Table 3	表 3 冠架か Crown beam and	文腰梁奓 致 表 waist beam param	eter table	
名称	混凝土等级	截面高度/m	截面宽度/m	弹性模量/GPa	泊松比
冠梁	C25	0.6	1.0	28	0.2
腰梁	C25	0.5	0.3	28	0.2

表 4 支护桩参数表 Table 4 Supporting pile parameters table

名称	混凝土等级	桩径/m	周长/m	横截面积/m ²	弹性模量/GPa	泊松比
支护桩	C25	0.8	2.512	0.5024	28	0.2

其中 K 为桩身接触土体体积模量, G 为桩身接触土体剪切模量, Δz_{min} 为接触面法向方向连接 区域上的最小尺寸, 由划分的网格决定^[13]。

2.3 基坑开挖模拟计算

模拟过程最大程度地还原基坑实际开挖支护 过程,具体模拟计算过程如下:

(1)先建立理想模型,选用本构模型为各层 土体赋参数,如体积模量、剪切模量、密度、粘聚力 和内摩擦角,然后进行初始应力平衡,得到平衡 状态。

(2)将初始位移、速度清零,打入 beam 和 pile 结构单元,pile 单元长度为1.8 m,间距1.5 m,直径 0.8 m,桩长 18 m,beam 结构单元长度为1.5 m, 混凝土灌注桩和混凝土冠梁的混凝土强度等级为 C25,然后对 beam 和 pile 单元进行赋参,设置监测点等。

(3) 工况 1:基坑开挖至 -4 m, 为施作锚索超 挖 0.5 m。工况 2:在 -3.5m 施作第 1 排锚索然 后施作 100 mm 厚混凝土面层, 进行平衡计算。 工况 3:开挖至 -6.5 m 后, 在 -6.0 m 高度及时 施作第 2 排锚索, 然后施作 100 mm 厚混凝土面 层, 进行平衡计算。工况 4:基坑开挖至 -11.5 m 后, 在 -8.5 m 高度施作第 3 排锚索和 100 mm 厚 混凝土面层, 然后进行平衡计算。

3 计算结果分析

3.1 基坑外地表沉降分析

基坑外地表沉降云图及曲线如图 3 所示,由 图 3a~c可知,随着基坑土方的开挖,基坑隆起也 不断增大,但基坑底部隆起总量较小,隆起曲线平 缓,分析其原因可能是基坑开挖卸荷导致土体应 力发生改变引起基坑底部土体向上反弹;由图 3d 可知,随着基坑开挖深度的增大,沉降值逐渐增 加,开挖至基坑底部时,沉降值明显增大,最大沉 降值为10.13 mm;3次开挖支护平衡之后的沉降 曲线均成"勺状"分布,在勺把的位置3者的沉降 值差异较小且距离基坑边缘都为20 m,说明此次 基坑开挖对距离基坑20 m以外的建筑影响不大; 基坑外土体的最大沉降值明显小于规范要求值, 且最大沉降位置并不是距离基坑越近沉降越大, 可能是由于排桩、冠梁和锚索共同作用,增大了桩 后土体与桩和冠梁之间摩擦力的缘故。

3.2 基坑水平位移分析

基坑水平位移云图及曲线如图 4a~e 所示, 由图 4a、b 和 d 可知,前两次开挖基坑侧壁水平位 移量很小,不足2 mm 且在基坑顶附近出现轻微 的土体隆起现象,说明第1排、第2排锚索和支护 桩联合作用效果较好;由于第3次开挖至-11.5m, 开挖深度较大,对土体扰动作用以及土对支护结 构的压力增大,因此第3次开挖后基坑侧壁的水 平位移明显较大;由图 4b、c 和 d 可知,基坑侧壁 最大位移出现的位置,约为基坑开挖深度的0.6 ~0.75倍,最大位移约为11.94 mm,因此在该深 度位置应做重点支护和重点监测;由图 4e 可知, 随着基坑开挖深度的增大,基坑顶部水平位移逐 渐增大,第3次开挖引起的位移明显较大,说明基 坑水平位移主要受基坑开挖深度的影响,但最终 平衡值为8.6 mm,小于25 mm 的规范要求值,说 明该支护结构可以保证该基坑工程的安全稳定。

3.3 支护桩弯矩和锚索轴力分析

支护桩弯矩沿桩长的曲线分布如图 5 所示, 开挖至 -4 m 时最大弯矩出现在桩长 -4 m 的位 置且为正弯矩,最大值为9.3 kN · m,开挖至 -6.5 m 时最大弯矩出现在桩长 -6 m 的位置且为负弯 矩,最大值为 -16.04 kN · m,开挖至基坑底部时 最大弯矩出现在桩长 -10 m 的位置且为负弯矩, 最大值为-76.7 kN·m;第3次开挖与前两次开 挖相比,桩身弯矩明显增大,最大弯矩处基本跟随 基坑当前开挖深度位置,出现在该位置与预应力

锚索的作用有关。工况4平衡后的锚索轴力如图 6所示。由图6可知,第2排和第3排的锚索轴 力明显大于第1排锚索轴力,第1排锚索轴力约



图 3 基坑外地表沉降云图及曲线图







为140 kN,第2、3 排分别为160 kN 和173.7 kN, 说明该支护结构中第2、3 排锚索起主要作用;锚 索轴力最大位置出现在锚索的端头处,且从端头 位置向端尾位置逐渐减小。



图 5 支护桩弯矩分布曲线

Fig. 5 Moment distribution curve of retaining piles





3.4 模拟值与实测值对比分析

基坑侧壁水平位移模拟值与实测值曲线如图 7 所示,由图 7 可知基坑侧壁水平位移的模拟值 与实测值的变形规律基本一致,说明该模拟与实



Fig. 7 Horizontal displacement simulation and measured curve of foundation pit sidewall

际工况有很好的一致性,但实测值整体比模拟值 偏大,分析原因可能是模拟计算时仅考虑了主要 因素而实际施工过程中的可变因素较多,如天气 的变化以及道路行车的偶然荷载,都会影响基坑 的变形;实测值的最大值为14.2 mm,比模拟值大 2.3 mm,但均出现在基坑深 - 7 m 的位置,实测值 虽然较模拟值偏大,但仅是规范要求值的56.8%, 仍然满足规范要求。

4 结论

(1)随基坑开挖,基坑底部隆起逐渐增大但 隆起总量较小,基坑外土体沉降曲线分布呈"勺 状","勺底"为最大沉降值且最大值出现在距基 坑约8m的位置;3次开挖平衡后,沉降值均在距 基坑边缘20m的位置达到稳定,说明本次基坑开 挖对20m以外的建筑基本没有影响。

(2)无论是基坑侧壁水平位移还是基坑顶水 平位移,在前两次基坑开挖过程中变形值均较小, 都在第3次开挖时明显增大,最大位移出现在0.6 ~0.75 倍的基坑开挖深度的位置,说明基坑开挖 深度对基坑水平位移的影响最大。

(3)桩身弯矩最大值出现在当前基坑开挖深 度附近,且开挖至-11.5 m时桩身负弯矩最大, 在桩长约10 m的位置;第3排锚索轴力最大,第 2排次之,第1排最小,且各排锚索最大轴力的位 置均出现在锚索端部,然后向端尾处逐渐减小。

(4)本次模拟中,该基坑的水平位移值、基坑 外土体沉降值均在规范要求的安全值以内,且实 际监测位移值只达到规范要求变形值的56.8%, 说明该桩锚支护结构可以保证该基坑工程的安全 与稳定性要求。

参考文献:

- [1] 钟潜智,蒋忠新,李建新,等. 桩锚支护黄土深基坑开挖稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(增刊1): 364-379.
- [2] 李浩,宋园园,周军,等. 深基坑桩锚支护结构受力与变形特性现场试验[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(1):264-269.
- [3] 夏晋华,岳鹏威. 深基坑桩锚支护体系位移数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(4):848-853.
- [4] 于丹,郭举兴,庄岩,等. 某停车场深基坑支护方式的 FLAC3D 模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报,2015,31(1):38-44.
- [5] 吴才德,龚迪快,王洁栋. 门架加锚杆符合结构在超大基坑中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(S):85-89.
- [6] 王一鸣. 深基坑多支点桩锚支护结构优化设计[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.
- [7] Gaith M. Analytical and experimental natural frequencies of transverse vibration of sandwich beams interconnected by Winkler elastic foundation [J]. American Society of Mechanical Engineers, 2006, 5(10): 399-406.
- [8] 彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 徐凌,陈格际,刘帅. 基于 FLAC3D 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.
- [10] 上海市基础工程公司. 建筑地基基础工程质量验收规范:GB50202—2002[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- [11] 王明龙,王景梅. 深基坑桩锚支护中桩内力变化规律数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(3):576-584.
- [12] 赵文华,张彬,张海荣,等. 交通载荷作用下桩侧土对桩的横向影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014,33(1):71-75.
- [13] 吴志超,景超. 深基坑支护方案设计与数值模拟分析[J]. 应用力学学报,2016,33(3):509-515.
- [14] 徐凌,陈格际,刘帅.FLAC3D 的深基坑支护方式的模拟对比分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015, 35(11):1279-1283.

Numerical Simulation Analysis of Displacement and Internal Force of Pile Anchor Support in Deep Foundation Pit

XU Menglong

(School of civil engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: By using FLAC3D numerical simulation software, the whole process of foundation pit excavation and support is simulated according to the actual construction procedure. The deformation law of pile – anchor supporting structure, the soil outside the foundation pit and the side wall of the foundation pit with the excavation is obtained. With the increase of excavation depth, the settlement of soil outside the foundation pit increases gradually, and the variation curve is "spoon-shaped". The horizontal displacement of the top and side wall of the foundation pit increases gradually with the excavation and reaches the maximum when they are all excavated to the bottom of the foundation pit. Maximum value of the bending moment of the pile basically appears at a position 1.5 m above the current excavation depth of the foundation pit, and the maximum negative bending moment is 76.7. The maximum position of the anchor cable axial force appears at the end of the anchor cable, and gradually decreases from the end position to the end tail position, and the maximum value of the first row to the third row anchor cable gradually increases. It shows that the second and third rows of anchor cables play a major role in the supporting structure, which verifies the feasibility of deep foundation pit anchor support.

Keywords: Deep foundation pit; Pile anchor support; Numerical simulation; deformation law