

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0005-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.002

邯郸深基坑支护体系的优化设计分析

杨士萱, 王天龙, 史三元, 王晓磊
(河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 通过理正软件根据实际基坑情况对最优方案进行分析, 研究该方案下的水平位移的影响。通过改变桩径, 分析并计算得出了在规范要求以及安全可靠的前提下, 能够更加经济的细部参数方案。然后对提出的最优方案进行有限元模拟, 得出位移分析以及沉降分析, 对其进行合理化的验证。结论: 随着开挖深度的增加, 桩体的沉降呈现出先增大后减少的变化趋势, 而土体的沉降量表现为逐渐减少。桩体和土体的水平位移从顶部往下均匀分布, 并依次减少, 最大水平位移均发生在桩顶。

关键词: 深基坑工程; 桩锚支护; 基坑优化; 有限元模拟

中图法分类号: TU47

文献标识码: A

Optimization design of supporting system of deep foundation pit in Handan

YANG Shixuan, WANG Tianlong, SHI Sanyuan, WANG Xiaolei
(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, P.R.China)

Abstract: According to the analysis method by Lizheng software and actual pit control variables to analyze and calculate the optimal solution, the results of horizontal displacement of the scheme are obtained. By changing the diameter of the pile, we can analyze and calculate the detailed parameter scheme that can be more economical under the premise of safety requirements and specifications. Then, the optimal scheme is simulated by finite element method, and the displacement analysis and settlement analysis are carried out to verify the rationalization. Conclusion: with the increase of excavation depth, the settlement of pile increases at first and then decreases, while the settlement of soil decreases gradually. The horizontal displacement of the pile and soil is uniformly distributed from top to bottom, and then the maximum horizontal displacement occurs at the top of the pile.

Key words: deep foundation pit engineering; pile anchor support; pile anchor support; finite element simulation

随着世界人口的增多, 只有不断加大对基坑支护的要求, 才能实现更安全, 更有益于环境的目标。选择最好的支护方案的同时, 又能保证安全和经济, 变得格外重要。国外的相关研究起步较早, Ashour^[1]等通过有限元模拟对桩土之间的相互作用进行了详细分析, Cording^[2]通过有限元模拟对基坑开挖导致的周边建筑物的变形以及损坏进行分析。Johnson K^[3]通过有限元模拟对基坑支护结构在不同荷载作用

下的土层变化进行分析研究。我国对基坑支护也有相关研究^[4-7]。龚晓南^[8]探究了基坑围护设计中土压力, 分析了现在基坑工程规范设计中计算机软件的使用。申永江^[9]等提出双排长短组合抗滑桩的支护形式, 以解决前后排桩受力不均匀问题。目前对于邯郸基坑支护的桩径影响的稳定性分析还不多。本文利用 ABQUES 有限元软件, 对优化方案进行数值模拟, 为邯郸市今后的基坑工程优化提供了基础。

收稿日期: 2017-10-02

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51174124); 河北省研究生创新资助项目 (171290080015); 河北省教育厅青年基金资助项目 (QN2014070)

作者简介: 杨士萱 (1993-), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事钢结构、岩土工程、地下空间工程方面的研究。

1 工程概况

拟建工程位于邯郸市，其概况见表 1。

在基坑工程设计原则以及多目标模糊理论的基础上，利用定性目标的统计量化方法、层次分析法以及综合模糊评判值对根据该工程所在地的地质情况、工程的概况等，专家对桩锚支护、地下连续墙、复合土钉墙三种支护方式进行评判打分。运用 MATLAB 软件计算并得出桩锚支护为最终的设计方案。

2 细部参数

根据基坑安全等级为 1 级，基坑深度为 11.5 m 等概况，初定方案为桩长 18 m，桩径 1 m，桩间距 1.2 m，桩身材料为 C25 混凝土，桩顶标高为 2 m，嵌固端长 8.5 m。在桩锚支护结构中，桩径一直是影响整个结构安全以及经济性的重要指标和优化因素。

由于原初步方案桩径 1 m，为研究桩径对基坑支护的稳定性影响，在其他条件不变的基础上，取 4 个不同长度 0.6、0.8、1、1.2 m 进行计算，得出表 2。

从表 2 可看出，四种不同的桩径均满足规范《建筑桩基技术规范》^[10] 的要求，由理正计算出的桩径为 1.2、1、0.8、0.6 m 的水平位移对比图（图 1）。

由图 1 可看出，随着开挖深度的增加，最大水平位移先增大再减少再增大。减少的原因是中间有锚索拉力的缘故导致位移降低。但是随着深度的增加，位移还是会逐渐增大。同样桩径越大，所对应的最大水平位移就越小。比较发现桩径 0.6 m 的位

移相比其他的桩径变化幅度更大。在安全稳定方面，0.6 m 桩径对比于其他桩径是不稳定的，所以 0.6 m 桩径不合理，与此同时，其他三种桩径的变化幅度比较紧凑，所以较为合理。其次考虑经济性原因，最终选择 0.8 m 的桩径较为合理。

通过理正软件计算可知，最终的优化方案定为桩长 18 m，桩径 1 m，桩间距 1.2 m，锚索位置为第一道锚索距离地面 3.5 m，第二道距离第一道锚索距离 3 m，第三道锚索距离第二道锚索 3 m，由理正深基坑软件计算得出该方案的最大水平位移为 14.14 mm，最大沉降量为 16 mm。

3 有限元模拟

3.1 模型的建立与选择

根据最终优选方案参数，对基坑进行建模分析。在进行基坑工程的数值模拟中，模型选取的范围取决于实际基坑的几何形状和实际的开挖深度以及土层的性质。一般情况模型竖向取值范围是实际基坑开挖深度的 2 ~ 4 倍，水平方向的取值为实际开挖宽度的 1 ~ 3 倍，本文对该基坑的 1-1 截面进行分析研究，实际方案的开挖深度为 11.5 m，嵌固深度为 8.5 m，桩间距为 1.2 m，所以模型深度取 28.5 m，水平方向取 42 m。由于考虑到结构的对称性，运用对称建模，宽度取相邻两根桩的桩中心建模，即宽度选桩间距 1.2 m。最终的模型尺寸为 1.2 m × 28.5 m × 42 m，桩体上部有 2m 的放坡，坡度系数为 0.2(图 2)。

表 1 拟建建筑物一览表
Tab.1 List of proposed buildings

名称	地上层数	地下层数	结构形式	基础形式	基底埋深 /m	基底压力 (标准组合)/kPa	地基基础 设计等级
商业办公楼	28	2	框架剪力墙	筏板	12.00	500	乙级
地下车库		2	框架	筏板	12.00	100	丙级

表 2 不同桩径对应安全系数
Tab.2 Safety factor of different length of pile

系数	桩径 /m			
	0.6	0.8	1	1.2
整体稳定安全系数	2.231	2.217	2.210	2.210
抗倾覆稳定安全系数	2.693	2.588	2.542	2.539
坑底抗隆起稳定安全系数	2.224	2.221	2.219	2.218
抗承压水（突涌）稳定安全系数	1.315	1.315	1.315	1.315

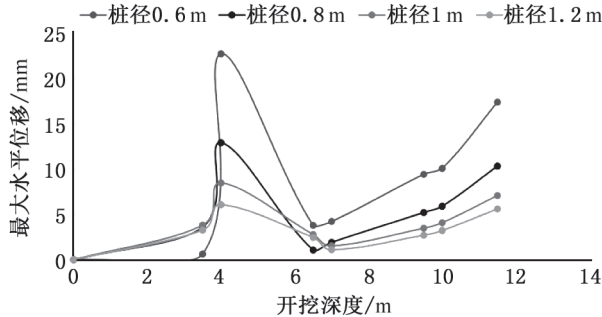


图 1 不同桩径的位移对比图

Fig.1 Displacement contrast diagram of different pile diameters

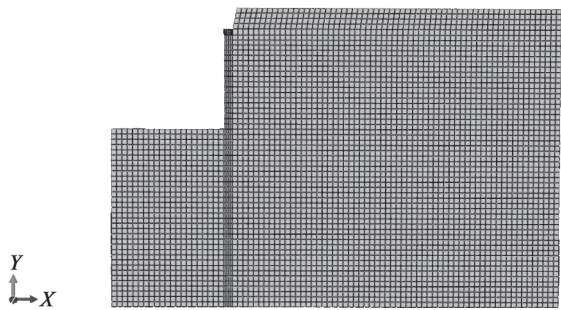


图 2 模型网格划分示意图
Fig.2 Sketch map of mesh generation

3.2 材料属性的选取

假定土体为理想弹塑性体，采用 M-C 屈服准则来确定各土层参数，锚索参数如表 3 和表 4。

3.3 模型荷载、边界条件以及接触条件

本工程的桩体外 15 m 范围内有 20 kPa 均布荷载，将土层压力设成土体的自重应力，初始应力场作为自重应力场。模型的底部边界条件为固定铰支座，侧边的边界条件为限制 X 方向没有位移即为 $U1=0$ ，Z 方向同样没有位移即为 $U3=0$ 。接触条件包含两个方面，分别为切向接触与法向接触，桩侧和土体是采用表面接触，法向采用硬接触，切向采用摩擦型接触，令 $\mu=0.36$ 。桩体底部是采用与土体固结的方式，使用的接触方式为 Tie，锚索锚固段嵌固到土体当中，使用的是 Embedded 的方式来进行，锚索与桩体之间是采用 Tie 的方式进行接触，由于锚索有预应力的添加，所以采取了等效降温法来进行添加预应力，通过改变各向的温度应变系数，得到所需的应变，达到一种预应力的效果。

4 模拟结果分析

4.1 水平位移分析

由 ABAQUS 软件建模分析后可得出基坑水平位移云图如图 3，基坑水平位移曲线图如图 4，桩体位移云图 5，桩体水平位移曲线图 6。

从图 3 基坑水平位移云图可以得出随着深度的增加整个土体位移走势为从土体顶部往下均匀分布，且为依次递减。从图 4 中得出水平位移的数值分为 19.2、11.7、9.9、8.3、6.1、3.21、2.42、1.93、1.31、0.54 mm 十个等级，水平位移最大发生在土体上部，最小在土体最下部，最大的区域的水平位移

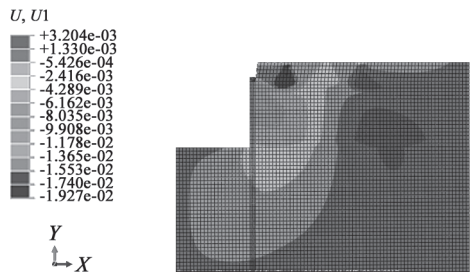


图 3 基坑水平位移云图
Fig.3 Horizontal displacement nephogram of foundation pit

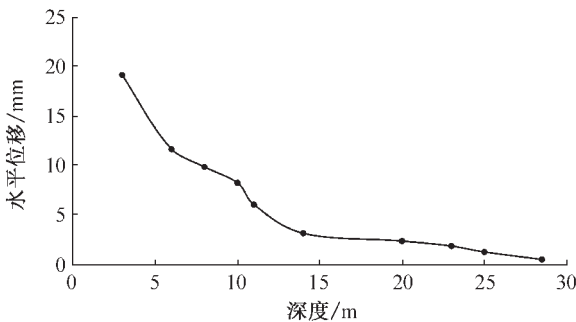


图 4 桩体水平位移云图
Fig.4 Horizontal displacement nephogram of pile

表 3 土层材料参数
Tab.3 material parameters of soil layer

层号	土类名称	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(kg·m ⁻³)	摩擦角 /°	膨胀角 /°	屈服应力 kPa
1	杂填土	6	0.4	1 800	10.178	0.1	0.873
2	粗砂	22 000	0.3	2 100	50.19	0.1	12.319
3	粘性土	16	0.35	2 020	43.26	0.1	12.319

表 4 预应力下锚索材料参数
Tab.4 Material parameters of prestressed anchor cable

支锚道号	支锚类型	水平间距 /m	竖向间距 /m	入射角 /°	总长 /m	锚固长度 /m	弹性模量 /GPa	预应力 kN	泊松比
1	锚索	1.2	3.5	15	20	12	190	250	0.3
2	锚索	2.4	3	15	20	14	190	250	0.3
3	锚索	2.4	3	15	20	15	190	250	0.3

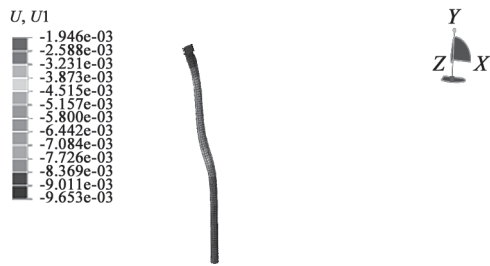


图5 桩体水平位移云图

Fig.5 Horizontal displacement nephogram of pile

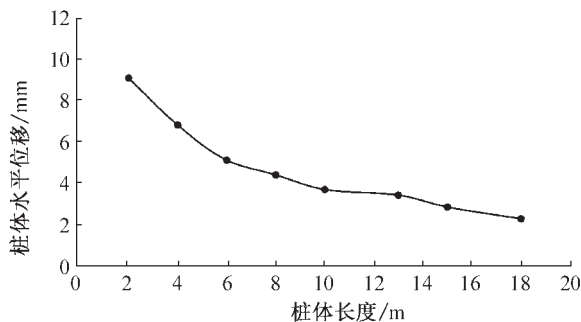


图6 桩体水平位移曲线图

Fig.6 Horizontal displacement curve of pile body

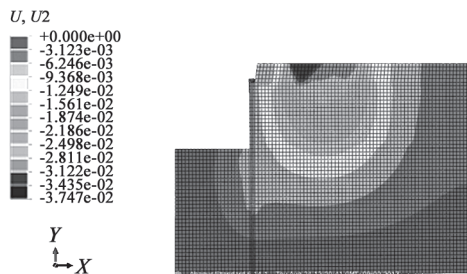


图7 基坑沉降云图

Fig.7 Settlement nephogram of foundation pit

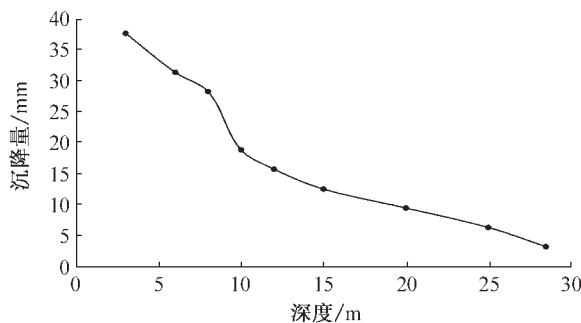


图8 基坑沉降量曲线图

Fig.8 Settlement curve of foundation pit

为 19.2 mm, 最小区域的位移为 0.54 mm。表明整个土体的水平位移数值分布随着深度的增加而减少。

从图 5 桩体水平位移云图中得出整个桩体向基坑外部倾斜, 在距离基坑顶部 3.5、6.5、9.5 m 处有向基坑内部倾斜的现象。这是由于添加锚索的缘故, 锚索对桩体有拉力的作用, 导致桩发生向内倾

斜。桩体本身的水平位移从顶部往下均匀分布, 且依次减少。从图 6 桩体水平位移曲线图得出水平位移的数值可以分为 9.90、7.08、5.15、4.34、3.54、3.23、2.58、1.94 mm 八个等级, 水平位移最大发生在桩顶, 数值为 9.65 mm, 最小发生在桩底, 数值为 1.94 mm。从基坑顶部到距离基坑顶部 9.5 m 处的水平位移曲线较陡, 距离基坑顶部 9.5 m 以下曲线较为平缓, 整个曲线呈现逐渐减少的趋势。

4.2 竖向沉降分析

由 ABAQUS 软件模拟可得基坑沉降云图 7, 基坑沉降曲线图 8, 桩体沉降云图 9, 桩体沉降曲线图 10。

从图 7 基坑沉降云图可以得出随着深度的增加, 整个土体沉降走势为从土体顶端向下均匀分布, 并且为依次递减少的现象。从图 8 中得出沉降量的数值可以大概分为 3.1、6.2、9.3、12.4、15.6、18.7、28.1、31.2、37.4 mm, 沉降量最大的区域为 3 m 处, 整个沉降量的数值分布呈现出随着深度的增加而递减。顶部由于有超载的原因导致沉降量最大。

从图 9 桩体沉降云图得出, 随着深度的增加, 桩体上部沉降分布呈均匀增加, 下部呈现出均匀递减的现象。从图 10 桩体沉降量曲线看出, 桩顶到距离桩顶 8 m 处的沉降量逐渐增加, 8 m 至桩底逐渐减少。最大沉降量发生在距离桩顶部 8 m 处, 最小沉降量发生在桩底。

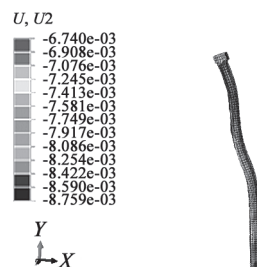


图9 桩体沉降云图

Fig. 9 Settlement nephogram of pile body

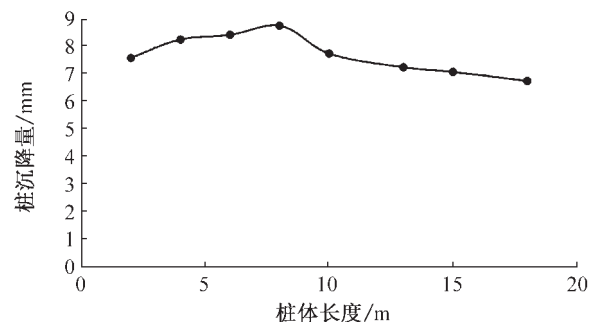


图10 桩体沉降量曲线

Fig.10 Settlement curve of pile body (下转第 13 页)

高, 加载后期, 孔隙个数随压力增长无明显变化。

3) 在固结压力的作用下, 孔隙的形状逐渐圆滑, 空间排列越加紧密。加载初期 0~200 kPa 下, 平均形状系数显著增加; 压力大于 400 kPa 后, 平均形状系数上升逐渐缓慢; 压力到达 1 600 kPa 后, 其平均形状系数逐渐趋于定值。

4) 固结压力对土体的排列特征影响明显。随着固结压力增大, 概率熵逐渐减小, 孔隙的定向性增强, 孔隙的排列更加有序。当固结压力达到 1 600 kPa 后, 概率熵逐渐平缓, 表明土样孔隙位置的排列及分布已相对稳定。

参考文献:

- [1] 周翠英, 牟春梅. 珠江三角洲软土分布及其结构类型划分 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 3(6): 81-84.
- [2] 谢晓华, 周永章, 张澄博, 等. 珠三角饱和软土固结过程中微观孔隙结构的演化规律 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 368-373.
- [3] 薛茹, 胡瑞林, 毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 87-91.

- [4] 梁仕华, 齐添, 谢康和, 等. 超固结土的一维固结理论及其试验研究 [J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 268-273.
- [5] HICHER P Y, WAHYUDI H, TESSIER D. Microstuctural analysis of inherent and induced anisotropy in clay[J]. Mechanics of Cohesive Frictional Materials, 2000(5): 341-371.
- [6] 张先伟, 杨爱武, 孔令伟, 等. 天津滨海吹填泥浆的自重沉降固结特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 769-776.
- [7] ZHANG Jiru, TAO Gaoliang. A New Model for Soil Consolidation Based on Microstructure[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(1): 78-82.
- [8] 孔令荣, 黄宏伟, HICHER P Y, 等. 上海淤泥质黏土微结构特性及固结过程中的结构变化研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3287-3292.
- [9] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412.
- [10] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价 [J]. 岩石工程学报, 1996, 18(4): 57-62.

(责任编辑 王利君)

(上接第8页)

5 结论

1) 通过改变桩径尺寸, 得到桩径越大, 桩的水平位移就越小, 安全性也随之变高。但在工程实际中, 还要考虑到安全性和经济性等因素, 选择 0.8 m 桩径的方案最为合适。

2) 随着开挖深度的增加, 桩体本身的水平位移最大发生在桩顶, 最小发生在桩底, 整个曲线呈现先陡后缓且逐渐减少的趋势。

3) 基坑土体随着深度的增加, 整个土体水平位移走势为从土体顶部往下均匀分布, 并依次递减, 最大水平位移出现在顶部; 整个土体沉降走势为从土体顶端向下均匀分布, 并且依次递减。

参考文献:

- [1] MONHAMED Ashour, NORRIS G. Modelling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 126: 420-428.
- [2] CORDING EJ, LONG J L, SON M, et al. Assessment

of excavation-induced building damage[C]//Earth Retention Conference 3(ER2010): 101-120.

- [3] JOHNSON K, LEMCKE P, KARUNASENA W, et al. Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(9): 1375-1380.
- [4] 张洪, 易发成. 基坑支护形式及支护技术发展分析与研究 [J]. 山西建筑, 2010, 36(31): 75-76.
- [5] 杨丰年. 长春某基坑支护方案优化研究 [D]. 吉林: 吉林建筑大学, 2015.
- [6] 李幼辉. 软土深基坑桩锚支护设计与数值模拟分析 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- [7] 孙龙才. 桩—锚支护结构在成都某深基坑支护工程中的应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [8] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考 [J]. 土木工程学报, 2005(9): 99-102.
- [9] 申永江, 杨明, 项正良, 等. 双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(Z2): 96-100.
- [10] JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范 [S].

(责任编辑 王利君)