

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.010

基于三维数值分析的土钉支护结构研究

钱玉林, 糜长林, 吕媛

(扬州大学岩土工程研究所, 江苏扬州 225127)

摘要:以某土钉支护形式的基坑工程为依托,结合土体和土钉的复合作用机理,建立土钉支护结构的三维数值模型。采用 Mohr-Coulomb 塑性模型,对基坑分步施工的过程进行了模拟分析,得出土钉拉力、坡顶水平位移和地面沉降的发展规律。研究表明:数值计算得到的基坑坡顶土体水平位移、竖向沉降的结果与现场监测数据基本吻合,整体三维模拟结果更接近实测值;土钉的拉力与长度、所处开挖面位置有相关性,拉力最大值随开挖深度的大小而发生变化。

关键词:土钉支护;数值模拟;水平位移;沉降;土钉拉力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0051-05

Soil Nailing Structure Analysis Based on the Three-dimensional Numerical Analysis

QIAN Yulin, MI Changlin, LV Yuan

(Geotechnical Engineering Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: Based on a soil nailing structure engineering, considering the composite mechanism of soil nail and soil, a three-dimensional numerical model of soil nailing structure was developed. Mohr-Coulomb model was adopted to analyze the process of foundation pit construction step by step, which revealed the law of soil nail force, development horizontal displacement and slope, ground subsidence. The results show that the data of horizontal displacement and vertical settlement of slope crest is close to the measured data, especially in whole three-dimensional results; tension and strength of soil nailing has correlation with excavation surface position, maximum tension changes with the depth of the excavation.

Keywords: soil nailing support; numerical simulation; horizontal displacement; subsidence; soil nail tension

土钉支护技术是基坑开挖的一种较新颖的支护形式,由于具有经济、工期快、安全可靠被广泛应用^[1]。现用的土钉支护结构的设计理论和稳定性评价方法有很多,肖专文、邓建刚^[2-5]等人提出了多种土钉支护优化设计方法。大多基于经验或极限平衡理论,把安全系数、滑裂面形式、土压力及土钉抗拔力进行简化和假设,能满足工程设计理论要求,但未考虑土钉支护结构体系内部的作用机制,不能准确得到土钉拉力沿基坑深度的分布规律,对其变形作用机理还缺乏深入、系统的研究^[6-7],不能正确分析土钉在基坑中受力的发展规律。

本文选取某土钉支护结构的基坑工程为研究对象,考虑土体和土钉的实际协同作用^[8-9],用

ABAQUS 软件的三维模型模拟其施工过程^[10-12],得到基坑放坡顶部土体的水平位移和沉降、土钉拉力分布等规律,土钉钻孔直径、水平和纵向间距等参数根据相关经验值和现场数据设计,主要研究长度的大小在支护作用中的影响。布置土钉支护后,研究土体的变形变化与破坏情况以及基坑整体对临近建筑物稳定的影响;对实际支护方案设计有着重要参考作用,将数值计算值与实测数据进行对比。

1 工程概况

扬州地区某基坑,四周均是城市道路,基坑开挖深度为 6.0 m,土钉墙进行加固,分四层开挖。由于现场水位较深而忽略地下水的因素。数值模型中定

义的土层主要有三层,土层相关物理力学参数见表 1,土钉力学特性参数^[13-14]见表 2。

表 1 土层物理力学参数

层号	土层名称	厚度 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	泊松比 μ	弹性模量 E /MPa
1	杂填土	3.60	17.40	16.4	9.8	0.30	5.43
2	粉质黏土	4.87	18.68	21.2	16.5	0.37	6.68
3	粉质黏土	6.10	18.95	23.0	21.0	0.40	8.32

表 2 土钉设计参数

土钉排号	泊松比 μ	弹性模量 E/GPa	竖向间距 /mm	水平间距 /mm	倾角 /($^\circ$)	超挖深度 /mm	钻孔直径 /mm	土钉长度 /m
1	0.2	36.1	1500	1500	15	500	120	13
2	0.2	36.1	1500	1500	15	500	120	11
3	0.2	36.1	1500	1500	15	500	120	10
4	0.2	36.1	1500	1500	15	500	120	7

2 土钉支护的数值分析

2.1 模型的建立

在已有的相关理论研究和工程实例基础上,模型尺寸的计算深度大约是实际开挖深度的 2 倍~4 倍,计算宽度是实际深度的 3 倍~4 倍^[15]。基坑实际开挖深度为 6.0 m,因此模型的计算长度取 36.8 m,基坑按 1:0.3 坡度放坡,共设四排土钉进行支护,倾角 15°,长度自上而下分别为 13.0 m、11.0 m、10.0 m、7.0 m。将基坑施工分为 4 步进行开挖,每步挖一层土;开挖结束后,边坡上进行土钉、混凝土面层的布置。距坡顶左侧 18.0 m 处边界线设为左边界,坡的水平投影长度为 1.8 m,右边界布置在距离坡底 17.0 m 处;模型计算高度设为 12.0 m。有限元模型计算尺寸如图 1 所示。

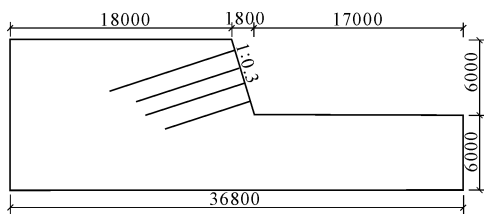


图 1 模型计算尺寸图(单位:mm)

本文重点考虑基坑边长中部开挖面的土钉位置,将该范围的土体作为研究对象。土钉墙体立面如图 2 所示。

基于土体弹塑性的特性,采用 Mohr - Coulomb 计算准则,该模型参数较为简单且符合实际工程的受力状态,在实际中应用最为广泛;土体、土钉均采用六面体八节点等参数作为计算单元。

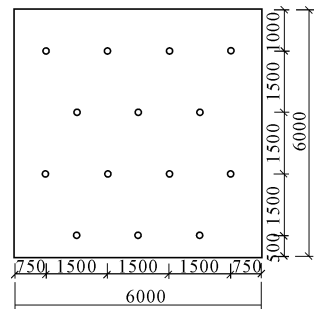


图 2 土钉墙体立面图(单位:mm)

由于受土钉较大的影响,土体与土钉接触面的力学性能与土体有所不同,引入界面单元概念单独考虑,单元厚度通常取经验值 $D/2$ (D 为土钉自身直径)。并考虑与土体之间的极限摩阻力。

当界面单元为弹性时,剪应力为

$$|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (1)$$

当界面单元为塑性时,剪应力为

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (2)$$

式中: σ_n 为接触面上正应力; τ 为接触面上剪应力; c_i 、 φ_i 界面单元的黏聚力和摩擦角。

边界条件:模型左右界面布置 X 向水平约束,前后面布置 Y 向约束,底部设定 Z 方向的竖直约束。如图 3 所示。

2.2 初始应力平衡

建立初始自重应力场模拟固结完成后的土体,输入关键词 * initial conditions, type = stress, geostatic 建立地应力平衡,作为整个模拟过程中土体的初始应力状态。在上述边界和荷载条件下,通过迭代平衡找到与其平衡的轴向应变等值线云图,从图 4

可看到初始应力平衡后的位移大小等值图。

图 4 中土体发生的位移数量级范围基本上在 $10^{-5} \text{ m} \sim 10^{-6} \text{ m}$,能很好的得到地应力平衡状态,与基坑开挖情况基本保持一致。

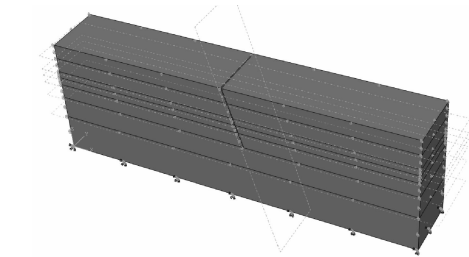


图 3 有限元计算模型

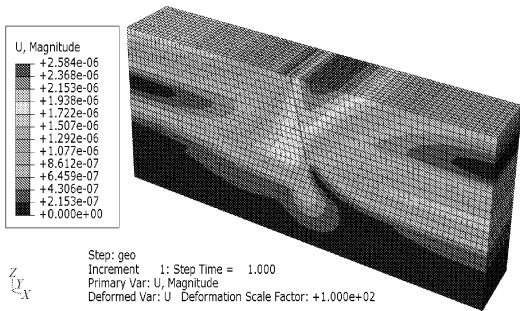


图 4 初始地应力平衡状态的土体

2.3 计算结果及分析

评价土钉支护体系稳定性的因素有很多,包括土钉最大承载力、轴力、安全系数、边坡土体位移等;其中影响较大的有坡顶土体水平位移、竖向沉降和土钉拉力。边坡顶部作为基坑支护中重要的变形监测部位,其土体的水平向位移和地面沉降大小是评价土钉支护结构是否有效保持基坑稳定性的重要依据;土钉拉力值的大小、不同的布置方式会影响最危险滑移面的位置,对工程经济性等方面也会产生重要影响。数值分析得出的结果如图 5~图 10 所示。

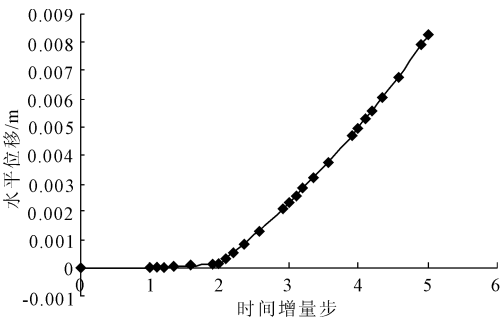


图 5 坡顶开挖过程中水平位移

图 5~图 7 描述了各开挖面、坡顶在施工过程中的水平位移,全部开挖后坡顶水平位移:

(1) 开挖面土体的水平位移沿着深度呈递减趋势。由于各步挖土深度相等,每一步开挖后的土体位移曲线趋势基本保持一致。随着土体逐渐外移和挖深,各层均质土体发生线性位移变化;坡顶发生明显较大的水平位移,最大水平位移达到 8.62 mm。根据现场监测可得,随着施工时间的发展,地表可能出现开裂导致最大水平位移位置出现一段内移。

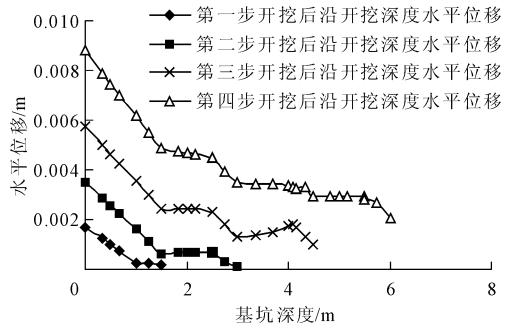


图 6 各步开挖面水平位移

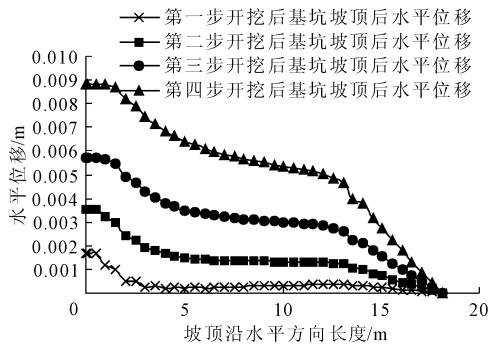


图 7 各步开挖后坡顶水平位移

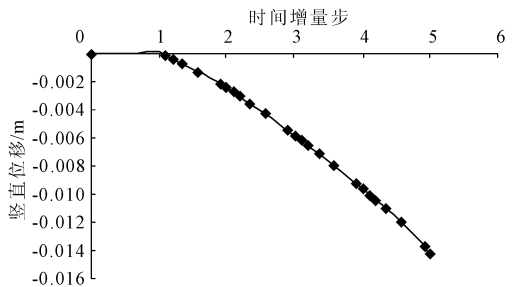


图 8 坡顶开挖过程中竖直位移

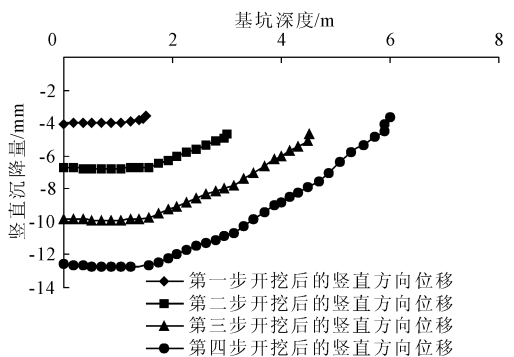


图 9 各步开挖面竖直位移

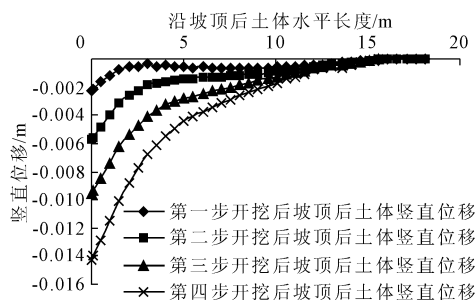


图 10 各步开挖后坡顶竖直位移

(2) 开挖面越深,坡顶水平位移值越大。远离坡边的土体位移很小,开挖面附近的土体位移值显著增大,在坡顶处达到最大值且比开挖面处大。

图 8~图 10 描述了各开挖面、坡顶在施工过程中的竖向位移,全部开挖后坡顶土体的沉降:

(1) 开挖破坏了原状土的密实和受力状态,土体发生扰动成为重塑土,形成二次应力场。受被动土压力影响,四周土体对开挖面产生挤压,作业面上的土体发生隆起现象。

(2) 基坑开挖导致土体卸载,发生较大沉降。当挖土达到一定深度后,坑边土体沉降量突然增大,最大沉降为 -13.13 mm 且位置逐渐远离基坑边界;在分布开挖过程中,坑边 15 m 处土体的沉降值基本为 0,与实测数据大体相似。

(3) 受开挖影响的土体沉降可以用曲线表示,各分布的曲线趋势基本一致。

基坑周围地层内布置监测点,用测斜仪等器材检测水平、竖向位移,用应变钢筋计对土钉拉力进行测试。由工程监测数据可知,坡顶实际水平向产生的最大位移为 10 mm,小于上述对应计算结果,产生 14.7% 偏差值;最大计算沉降值比实测数据大 11.2%。由于模型自身的局限性等原因,上述偏差在允许范围内,模拟的结果与文献[16]中所列举的经验值比较接近,认为该模型能较准确的反映工程实际施工情况。在评价支护结构变形、稳定性工作中,最大水平位移 U_H 与开挖深度 H 的比值 $(U_H/H)\%$ 是重要参数, $(U_H/H)\%$ 的正常范围在 1%~3%,土钉支护在非饱和土中的 $(U_H/H)\%$ 一般在 2% 以内;若 $(U_H/H)\%$ 大于 3%~4% 时,支护结构将失稳,起不到加固作用。本文数值计算 $(U_H/H)\%$ 结果为 1.43%,属于正常水平。

3 土钉拉力数据分析

在土钉墙支护变形体系中,土钉的长度、位置分布的不同显然是重要影响因素。土钉通常以上长下

短方式分布,本模型中从第一排以 13 m,11 m,10 m,7 m 依次布置。各排计算得到的土钉所受拉力各不同,见图 11~图 15。

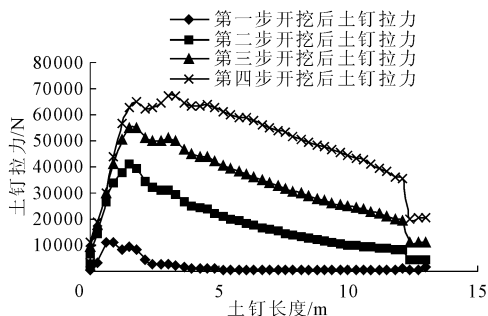


图 11 第一排土钉各步所受拉力

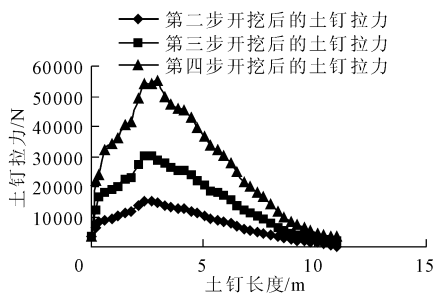


图 12 第二排土钉各步所受拉力

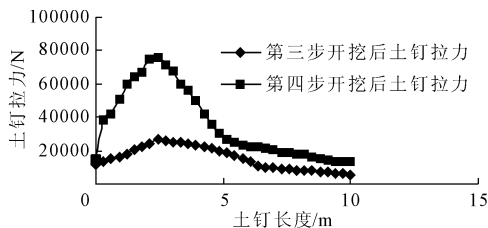


图 13 第三排土钉各步所受拉力

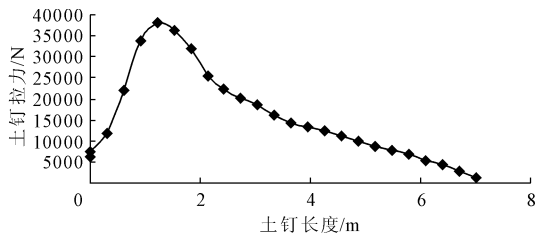


图 14 第四排土钉各步所受拉力

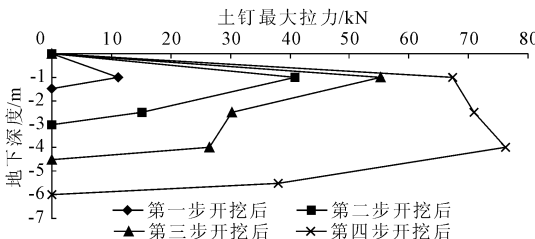


图 15 土钉最大拉力沿基坑深度分布图

由图 11~图 15 可以看出:

(1) 随着长度的增长,同排土钉所受的拉力发

展趋势基本一样,分布开始上升较快,在靠近接触面层的位置(约 3 m)时曲线开始发生较快下降,后期变慢并递减为 0;随着不断地挖深,土体卸载形成的土压力大幅度提升,土钉所受的拉力也不断增大。

(2) 土钉在底部或顶部不会出现最大拉力值,在边坡中下部位置所受的拉力较大;模拟结果得到土钉在第三排时拉力值最大,在第四排时拉力最小,与已有的相关结论一致。

(3) 在各开挖步过程中,上排土钉承受了比较大的荷载,自身拉力发生较大的增大。在基坑分步开挖过程中,土钉支护体系必须达到一定的承载能力时,才能进行下一步开挖施工,否则就可能发生边坡失稳等危险情况。

4 结 论

本文用 ABAQUS 有限元分析系统对基坑土钉支护结构进行变形与破坏的数值模拟分析,通过算例分析得出以下结论:

(1) 土钉拉力支护结构的位移分析结果与实测数据有一致的变化规律,基于三维非线性模拟结果与实测结果更为接近,可以应用在实际工程的预测分析。

(2) 随着土方开挖,坡顶土体水平位移和竖向沉降呈递减趋势;边坡顶部土体的最大水平位移、沉降应在实际工程中作为重要的变形监测点。

(3) 各层土体中,同排土钉拉力由靠近接触面层位置向两边递减,随开挖深度的增加而不断增大;在土钉支护设计中,有意识的在中间布置直径较大的钢筋,上下各排钢筋可以节约使用。

参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 肖专文,龚晓南,谭昌明.基坑土钉支护优化设计的遗传算法[J].土木工程学报,1999,32(3):73-80.
- [3] 邓建刚,傅旭东.土钉支护结构的优化设计[J].岩土力学,2003,24(S2):321-324.
- [4] 贺可强,阳吉宝,王胜利.遗传算法在土钉支护结构优化设计中的应用[J].岩土工程学报,2001,23(5):567-571.
- [5] 梧 松,吴玉山.土钉支护结构优化的改进遗传进化—复合形算法[J].岩土力学,2002,23(2):228-230.
- [6] 李喜明.土钉支护结构设计问题探讨[J].山西建筑,2011,37(11):74-75.
- [7] 刘容地,刘增荣.土钉支护结构的设计及应用[J].四川建材,2011,37(2):75-77.
- [8] 陈 岩.土钉墙支护技术在实际工程中的应用[J].中国煤炭地质,2010,22(Z1):56-59.
- [9] 揣东明,郭晓军.基坑土钉墙支护设计应用[J].山西建筑,2010,36(33):97-98.
- [10] 张明聚,宋二祥.土钉支护变形性能的有限元分析[J].土木工程学报,1999,32(6):59-63.
- [11] 陈进杰,贾金青,张明聚.土钉支护工作性能参数分析[J].岩土工程学报,2001,23(5):618-622.
- [12] 张 晗.土钉支护工作性能的三维数值分析[D].保定:河北农业大学,2006.
- [13] 谭正清,夏念恩.土钉墙支护技术在深基坑工程中的应用概论[J].河南建材,2011(4):10-11.
- [14] 刘喜旺.土钉墙支护技术机理及其优化设计[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2010,23(2):82-84.
- [15] 宋二祥,陈肇元.土钉支护及其有限元分析[J].工程勘察,1996(2):1-5.
- [16] 周海林.土钉墙支护技术在工程中的应用[D].北京:中国地质大学(北京),2009:6.