

复合土钉支护的有限元分析

汪德信

(上海升固特种结构工程有限公司,上海 200092)

摘要:复合土钉支护在软土地区深基坑支护中已得到广泛应用,但其设计计算理论却远远不能满足目前工程应用的需要。借助非线性平面应变有限元模拟方法,对复合土钉支护结构在分步开挖、分步支护过程中的变形性能进行研究,并通过与工程实例对比验证这一方法的合理性。最后对复合土钉支护设计提出初步看法。

关键词:深基坑支护;复合土钉;软弱地层;有限元分析

中图分类号:TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)10-0050-03

Finite Element Analysis on Composite Soil-nailing/WANG De-xin (Shenggu Special Engineering Structure Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The composite soil-nailing has been wildly used in the soft soil zone, but its theory for design and calculation cannot satisfy the present project application. With the aid of the non-linear plane strain finite-element, the distortion performance of composite soil-nailing during the step-by-step excavation and supporting process was studied. Through the contrast testing with engineering examples, the rationality of this method was verified. The preliminary view to the composite soil-nailing design was proposed.

Key words: deep foundation pit support; composite soil-nailing; soft ground; finite-element analysis

0 引言

深基坑土钉支护具有施工便捷、造价低、无污染、振动小、不占或少占工程施工主导工期等特点,在深基坑支护中得到广泛应用^[1]。《基坑土钉支护技术规程》(CESS96:97)第1.0.3条规定,土钉支护适用于有一定胶结能力和密实程度的砂土、粉土和砾石土、素填土,坚硬或硬塑的粘性土,以及风化岩层等下列土体。不适合于软弱地层。

工程兵工程学院与同济大学等提出了结合止水帷幕的复合土钉支护概念^[2],张庆山、张荣^[3,4]等发展复合土钉支护即利用水泥土搅拌桩帷幕等超前支护措施解决土体的自立性、隔水性以及喷射面层与土体的粘结问题,利用水平向压密注浆及二次压力灌浆解决土体加固及土钉抗拔力问题,以相对较深的插入深度解决坑底的隆起、管涌和渗流等问题,形成防渗帷幕、超前支护及土钉等组成的复合型土钉支护(如图1所示)。

南京河西地区位于长江漫滩地带,上覆土层上部主要为沼泽相~漫滩相的饱和软粘性土,是典型的高含水量、高压缩性、高灵敏度的软土地基^[4]。目前,挖深<6.0m的浅基坑,常规的支持方案为重力式深搅桩墙,依靠支护结构自身重力、支护结构一

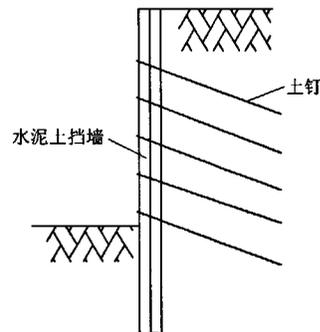


图1 复合土钉墙示意图

定的位移来维持极限平衡状态。这种支护方式造价较高、工期较长,同时位移不能得到有效控制,易造成周边道路开裂、建筑物沉降。采用复合型土钉支护能解决以上问题,现已完成多项工程,成功率较高,取得了一定的工程经验^[3,4],但对其变形规律及作用机理仍研究尚少。本文拟以工程实践为基础,借助有限元方法对其作分析,并拟通过将分析结果与工程实践作对比,得出一些对设计有用的结论。

1 复合土钉支护的有限元分析模型

1.1 基本假定

为了简化计算,根据复合土钉支护的实际情况,我们作如下假定:

收稿日期:2011-03-03; 修回日期:2011-05-19

作者简介:汪德信(1969-),男(汉族),安徽东至人,上海升固特种结构工程有限公司国家注册土木工程师,水文地质与工程地质专业,从事地基处理、基坑维护的设计与施工等工作,上海市赤峰路59弄4号503室,wdx888@online.sh.cn。

(1)除基坑坑角外,在矩形基坑长边跨中附近,同一水平面上土钉支护的变形问题是一个平面应变问题;

(2)土体为弹塑性体,支护结构均假设为弹性材料;

(3)土中的孔隙水压力保持不变。

1.2 土体单元及其材料性态模型

本文的计算采用土工有限元软件 PLAXIS 进行模拟。地层土体拟采用 6 - node 三角形等参元模拟。土的本构模型对计算结果有重大影响,要较好的模拟土体在工作状态下的变形,必须选择一个合适的本构模型。常用的非线性弹性模型 Duncan - Chang 模型能够反应模量与应力水平的关系,也能反应加载模量小于卸载模量的剪切硬化规律,但是它的缺点是不能反应土体在塑性阶段的变形特点。弹塑性模型 Mohr - Coulomb 模型能较好的描述土体在塑性破坏阶段的变形特性,缺点是变形模量是一个定值。因此,考虑采用 Duncan - Chang 模型来描述土体正常工作状态下的变形特性,而用 Mohr - Coulomb 模型来描述土体在破坏阶段的变形特性即采用屈服函数:

$$\left. \begin{aligned} f &= \bar{f} - \gamma^p \\ \bar{f} &= \frac{1}{E_{50}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: q ——偏差应力; q_a ——应变很大时偏差应力的极限值; γ^p ——塑性剪切应变; E_{50} ——对应于 50% 极限剪应力的割线模量; E_{ur} ——卸载模量。

E_{50} 、 E_{ur} 按下式计算:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{ccot\phi - \sigma_3'}{ccot\phi - p^{ref}} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{ccot\phi - \sigma_3'}{ccot\phi - p^{ref}} \right)^m \quad (3)$$

式中: E_{50}^{ref} ——在参考压力 p^{ref} 下的变形模量,一般取工程大气压 100 kPa; 一般有 $E_{ur}^{ref} = (2 \sim 4) E_{50}^{ref}$; m ——按土类别不同,一般在 0.5 ~ 1.0 之间取值。

塑性剪切应变 γ^p 是屈服函数中作为硬化参数,在给定剪胀角时,它和塑性体积应变符合如下关系: $\epsilon_v^p = \sin\Psi_m \cdot \gamma^p$ (其中 Ψ_m 是当前应力下的剪胀角,可据 Rowe 的剪胀理论由当前摩擦角、临界摩擦角及最大剪胀角 Ψ 确定)。

应用上述模型时要注意到:(1)模量和应力水平有关,地质勘察报告中一般给出变形模量对应于应力从 100 kPa 到 200 kPa 时的割线模量,不能直接

作为程序的输入值,而应考虑土层中的实际应力水平,参照式(2)进行修正,当土层厚度较大时,应人为地将其分为几层避免因应力水平差异引起的误差;(2)一般来说,卸载模量和加载模量之间的关系因土性而异,对于砂土卸载模量可取加载模量的 3 ~ 4 倍,对粘性土卸载模量可取加载模量的 1.5 ~ 2 倍^[5,6]。

1.3 支护结构单元与材料性态模型

支护结构包括土钉、面板和辅助结构(搅拌桩墙)。有限元分析中土钉按 3 - node 杆单元考虑,搅拌桩墙按梁单元计算,面板因仅起护面作用而忽略其影响。

1.4 支护形成过程的模拟

复合土钉支护的形成过程复杂,细节繁多,这里考虑的主要工作有:平整场地、设置搅拌桩、坑内降水、分层挖土、土钉注浆以及喷射混凝土面层等。分别对这些主要使用过程进行有限元模拟:第一步,选择土体天然自重应力场作为初始地应力场;第二步,激活桩单元,使其在随后的开挖中起作用;第三步,开挖第一层土到指定深度;第四步,安装第一排土钉,即激活第一排土钉单元,使其在下一步开挖中受力;然后重复进行第四步的工作,直至开挖、支护到预定的基坑底面标高。

2 实例分析

2.1 工程概况

玄武湖隧道工程东起新庄立交桥二期,穿越玄武湖、古城墙、中央路,西至模范马路芦席营路口。主要土层物理力学性质如表 1 所示。

表 1 主要土层物理力学性质

土层	厚度 /m	饱和重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c /kPa	ϕ /(°)	颜色	状态	饱和泊松比
素填土	1.0	18.1	10	15	褐黄		0.33
粉土夹粉砂	10.0	19.0	8.7	30.7	灰黄	稍密	饱和 0.33
粉细砂	12.0	19.1	9.4	30.6	灰	稍密	饱和 0.33

本工程的基坑支护为复合型土钉支护。施工时先沿基坑轮廓线设置双排水泥搅拌桩形成止水帷幕。开挖过程中共设置 9 排土钉,水平和垂直向间距均为 1.0 m, 1 ~ 7 排土钉长 18 m, 8、9 排土钉长 15 m。

2.2 模型确定

土钉孔径 110 mm, 倾角 15°。土钉按弹性考虑,且仅考虑其受拉。经计算取土钉抗拉刚度 $EA = 2.5$

$\times 10^5$ kN。土钉刚度为水泥浆体刚度与钢筋刚度之和,但前者考虑开裂乘以折减系数 0.8。水泥搅拌桩墙的厚度 1.20 m,坑底以下嵌固深度为 8 m,模量 $E = 500$ MPa。

2.3 现场测试概况^[7]

现场测试是在基坑最深处选取 3 个试验断面,在测试段布置 2 个测斜孔断面,每个断面设 3 个测斜孔。测斜孔孔深约为基坑深度的 1.5 倍,已经达到风化岩层,可以认为测斜管已经深入到变形影响范围深度下。

测试土钉布置如图 2 所示。测量导线从各测点引出,并沿着边坡坡面汇集到坡顶的集线箱内。在每根测试土钉 2.0、5.0、8.0、16.0 m 处布置应变式测力传感器,测试土钉拉力分布。土钉的中前部传感器布置得较密,后部布置得较疏,以便测得土钉拉力的最大值和土钉端部的受力情况,较真实地反映土钉拉力的实际分布。

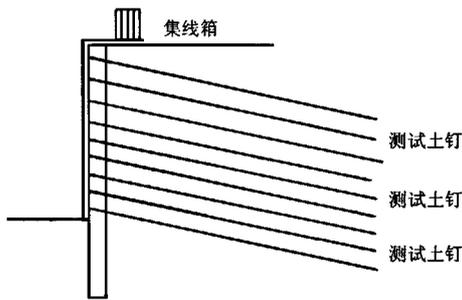


图2 基坑支护测试示意图

2.4 数值计算结果分析

应用有限元计算结果输出如下。

2.4.1 基坑的变形大小及特征

由图 3 可以看出,水泥石桩复合土钉支护体系受力变形特性表现为:开挖后桩顶位移较小,但随着深度的增加,深部土体有较明显的水平移动趋势,搅拌桩墙体向基坑内侧凸起,呈“凸肚状”。

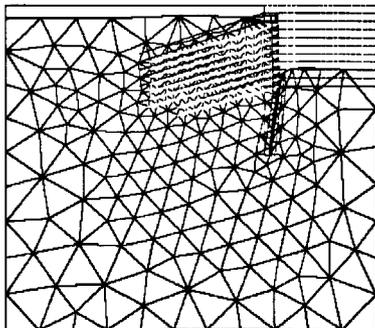


图3 有限元计算变形图

随着深度的继续增加而逐渐减小,开挖面以下

的土体也受到影响而发生位移。最大水平位移与基坑深度的比值约为 3‰。而地面的变形形态则为凹下,呈“槽状”,与施工现场观察到的变形形态基本一致。

2.4.2 土钉的轴力大小及分布特征

图 4~6 给出了 3 根测试土钉的拉力随挖深的分布和变化情况。由图中可以看出,土钉所受的拉力沿其整个长度呈“抛物线”型变化的。随着挖深的增加,土钉拉力呈不均匀增长状态。在上一层土钉设置好,进行下一层土的开挖时,土钉拉力有突增长。

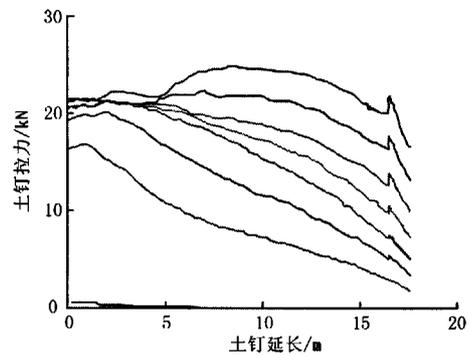


图4 第二排土钉拉力沿土钉延长分布

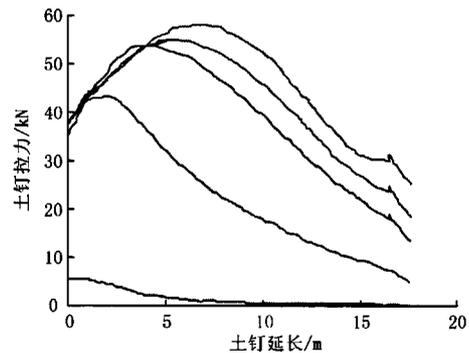


图5 第五排土钉拉力沿土钉延长分布

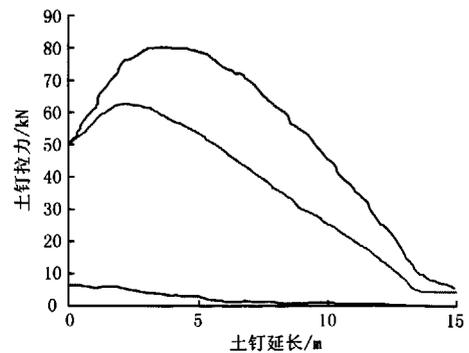


图6 第八排土钉拉力沿土钉延长分布

在施工时应注意,施作一排土钉后,停留一段时间,或使用早强剂,使注浆体达到一定强度并与周围
(下转第 59 页)

连续注浆效果更好,每注一根浆管时要先封堵另两根浆管管口以免窜出浆体,以实现高效率高质量注浆效果;群桩桩底即压浆在允许的情况下,应选择先外后内的帷幕注浆顺序施注,最好一次连续注浆完成,这样可在提高注浆效率的同时保证浆体向桩底竖向范围扩散延伸以取得更加理想的压浆效果,出现的情况是帷幕内后期桩底压浆压力会升高。

4.2 已成桩桩底后压浆

此工法在注浆管制作、制、压浆工序相关的关键技术措施与即压浆工法相同。特别提出的是:安装注浆管是单孔双管(含封孔管),在依序吊接下入孔内后,一定要以足量的中粗砂填充孔内使袖阀出浆口埋入砂粒中,以确保封堵浆体不致包裹压浆底管袖阀出浆口段,这样做可减少压浆前的开塞工序。如需压浆前开塞,可在封堵后20~30h进行。

注浆管植入钻孔的施工与注浆管(封堵管)的植入、封堵环状空间最好一次性完成,并及时开塞。群桩注浆最好采取帷幕注浆顺序一次性连续注完一个群桩体以实现高效优质压浆效果。

5 注浆工程效果

现场对个别压浆桩底岩土体进行了钻孔取样,可明显观察到桩底岩土体内存有网状水泥浆充填和团块状水泥结块,水泥浆向桩底延伸最大可达2.5m,群桩桩底岩土体水平向浆脉相互穿插为一体。

为了减少压浆桩与前期未压浆桩整体结构的沉

(上接第52页)

土体粘结牢固后,再进行下步开挖,这样不但使土钉的作用得以充分发挥,而且保证土钉支护边坡具有良好工作性能,并处于稳定状态。如果土钉设置后,还没有起作用,就进行下步开挖,是很危险的。

与实测资料对比,第二、五排土钉拉力大致与实测一致,但第五排土钉拉力计算结果偏大,与实测不符,有待进一步的分析。

3 结语

要用有限元进行数值分析,模型的选择、参数的选取是很重要的。基坑开挖是一个特殊的问题,它属于卸载问题,与建筑地基一类的加载问题有明显的区别,需引起注意。复合土钉支护的变形特点与常规土钉有很大的不同,这已经被工程实践所证明。

降差异,对压浆桩上部结构进行了加载预压,预压沉降量 $<2\text{ cm}$,而未注浆桩结构沉降量一般在 $3\sim7\text{ cm}$ 。

6 结语

钻孔桩桩底压浆对于提高桩体竖向承载力确有明显工程效果,特别是在松软桩底岩土体承载力较低且桩体较短、桩周摩阻承载力较小的情况下更具明显工程效果。要获得好的压浆工程效果,必须对压浆对应的土体特性和相对应的压浆工艺及参数进行现场多次试验,优选其最佳工艺及参数,不可套搬,要做到针对地层特性,灵活把握工艺实施过程,方能注入足量的水泥浆体,以实现加固桩底岩土体工程效果。

参考文献:

- [1] 陈飞,段新胜,方青春,等. 钻孔灌注桩桩侧桩端后压浆技术在武汉瑞通广场的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):29-31.
- [2] 王德武,张辉义. 杭州滨江区钻孔灌注桩桩端后压浆施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):54-56.
- [3] 李友东,杨生彬,邵卫信. 后压浆钻孔灌注桩施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):49-52.
- [4] 王桂,李维平. 钻孔灌注桩后压浆工艺参数控制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(4):23-25,28.
- [5] 吴礼生,徐洪红,王爱平. 钻孔灌注桩后压浆技术机理的新认识[J]. 探矿工程,2001,(5):4-6.

数值计算和现场实测均显示挡墙最大水平位移点在基坑中下部分,所以施工该部位土钉时,应特别注意。

参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] 李象范,徐水根. 复合土钉墙的研究[J]. 上海地质,1999,(3).
- [3] 张庆山. 软土基坑复合土钉支护的变形特性分析与数值模拟[D]. 浙江杭州:浙江工业大学,2009.
- [4] 张荣. 复合土钉支护技术在南京河西地区基坑中的应用[D]. 江苏南京:河海大学,2007.
- [5] 宋二祥,邱玥. 基坑复合土钉支护的有限元分析[J]. 岩土力学,2001,22(3).
- [6] 杨林德,李象范,钟正雄. 复合型土钉墙的非线性有限元分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(2).
- [7] 张凡,段建立,谭跃虎. 复合土钉支护工作性能的现场测试研究[J]. 建筑技术,2003,34(2).