

深基坑土钉支护的有限元分析*

薛新华, 张我华

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用考虑转动自由度的修正古德曼节理单元作为接触面单元, 将平面弯曲钢钉单元和考虑弹塑性的土体单元相互连接, 利用有限元方法对土钉支护的作用机理、变形及其受力进行分析, 并将其用于工程设计中。与实际监测结果的对比验证可知, 该模型是有效的和可行的, 研究结论对土钉支护的设计与施工具有较高的应用价值。

关键词: 土钉支护; 节理单元; 基坑; 变形分析

中图分类号: TU432 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2007)06-072-04

Finite Element Analysis of Nailing Support in Deep Foundation Pits

XUE Xin-hua, ZHANG Wo-hua

(Key Lab. of Soft Soils and Geoenvironmental Eng., Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The mechanism of action, deformation and stress state of soil nailing were analyzed using the finite element method. In the finite element model, the modified Goodman Jointed Element was adopted to simulate the interface between the steel nail bent in plane and the elastic-plastic deformed soil body. The model then was applied in an engineering design. Comparison with monitoring results and inspections in engineering practice shows that the soil nailing model is quite effective and feasible. The model may find wide application for design and construction in soil nailing engineering.

Keywords: soil-nail support; joint element; foundation ditch; deformation analysis

土钉支护是一种边坡原位土体加筋技术, 属于主动支护技术方法^[1]。目前, 土钉支护设计还没有一个统一的理论方法, 就目前的诸多方法而言, 大致分两类: 一类是极限平衡法, 该类方法以稳定性分析(内部稳定、外部稳定)来控制设计, 但它不能详细分析变形。另一类是有限元方法, 目前采用有限元方法分析土钉墙稳定性也很多, 但归纳起来, 主要有分离式和复合式两种模型^[2]。事实上, 土钉墙的变形是由土体和土钉共同承担的, 对于材料力学性质差异很大的钢筋和土体间的非线性, 应采用接触面单元来模拟。因此, 本文采用改进的接触面单元并结合极限平衡法对土钉支护进行设计, 取得了很好的效果。

二维平面应变问题; 2) 土钉处于弹性受力状态, 土体为弹塑性体, 土钉界面采用修正的 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。

当钉土之间的相对位移较小时, 界面处于弹性状态; 当钉土之间的相对位移较大时, 界面处于塑性状态。弹性状态与塑性状态转化阈值由库仑准则确定。当界面处于弹性状况时, 界面剪应力为:

$$|\tau_s| < \sigma_n \tan \varphi_j + c_j \quad (1)$$

当界面处于塑性状况时, 界面剪应力为

$$|\tau_s| = \sigma_n \tan \varphi_j + c_j \quad (2)$$

式中, φ_j 、 c_j 分别为界面的有效内摩擦角和有效凝聚力; 界面的有效强度参数(φ_j , c_j)由相应接触土体的强度折减得到:

$$c_j = \Omega_n c_{\text{soil}} \quad (3)$$

$$\tan \varphi_j = \Omega_c \tan \varphi_{\text{soil}} \leq \tan \varphi_{\text{soil}} \quad (4)$$

1 有限元理论分析

1.1 基本假定

为简化计算, 作如下假定: 1) 土钉墙的计算简化为

* 收稿日期: 2007-07-12

基金资助: 国家自然科学基金资助项目(50379046)。

作者简介: 薛新华(1977-), 男, 博士生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。

式中, Ω_n 为界面法向强度折减系数, Ω_r 为界面切向强度折减系数, 当钉土完全牢固粘结时, Ω_n, Ω_r 均取为 1; 当钉土界面完全松动、光滑滑动时, $\Omega_n = 0, \Omega_r < \frac{f_d}{\tan\varphi_{soil}}$, 其中, f_d 为钢钉在饱和土表面的滑动摩擦系数, 一般 Ω_n, Ω_r 的值在 (0, 1) 之间, 它们与钢钉表面的粗糙状态、土界面的颗粒大小、固结状态及钉土相对松动滑移状态有关。文献[3]建议: 对固结状态良好时 Ω_r 取为 1, 一般钢砂界面 Ω_n 取 2/3, 钢粘土界面 Ω_n 取 1/2。

1.2 修正的 Goodman 单元

土钉与土体的接触面具有特殊的性质, 它起因于混凝土和土的变形模量具有很大的差异。由于土钉支护一般采用压力灌浆, 水泥浆会不同程度地渗入土孔隙中, 这种有水泥浆的土便构成接触面的材料, 其性质与原先的土有很大的不同, 导致在两者的界面上常伴有较大的剪应力^[4]。在土钉支护结构中, 土钉的受力则几乎完全是这种剪力传递发挥作用。因此, 对这类结构物, 正确地分析接触面上的变形性能尤为重要。

Goodman 模型^[5]是一种应用较为广泛的接触面单元, 它的概念清晰, 能较好地模拟接触面的错动及张开, 从工程应用的角度看, 该作法方便易行, 其缺点是要求其法向刚度取值很大, 以防止过量嵌入, 这种人为设置的大法向刚度往往会使法向应力误差较大, 且沿

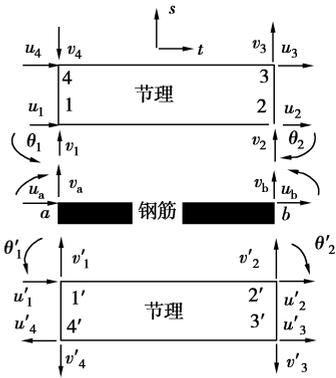


图 1 修正的 Goodman 单元

接触面方向还会出现波动^[6]。因此, 论文对此模型进行了修正, 对该 Goodman 单元增加两个转动自由度, 以协调土钉单元和土体单元间的变形。该修正模型最大的特点是引入了转动模量, 能够考虑接触面的滑动、拉裂等多种形式的组合破坏, 如图 1 所示。

在局部坐标系 $s-t$ 内, 该单元的应力-应变关系可写成:

$$\begin{Bmatrix} \tau_s \\ \sigma_n \\ M_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_n \\ \theta_{sn} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中, k_s, k_n, k_θ 分别为节理单元内一点的切向、法向及弯曲刚度(模量), $k_\theta = L^3 k_n / 4, s, n, \theta_{sn}$ 为单元两侧对应点的相对切向、法向位移(应变)及单位转角。

假定节理位移沿节理长度方向呈线性变化, 据虚功原理可以导出在局部坐标系 $s-t$ 中节理单元的刚

度矩阵为:

$$[K_j] = \frac{tL}{4} \begin{bmatrix} k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n \\ k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, t 为单元宽度, 对平面应变问题常取 $t=1$, 这是一个 8×8 阶的实对称矩阵。

上式为单元局部坐标系中的表达式, 将整体坐标系与单元局部坐标系间的坐标转换矩阵记为 $[T]$, 则整体坐标系中的单元刚度表达式为:

$$[K_j^*] = [T_\delta]^T [K_j] [T_\delta] \quad (7)$$

1.3 有限元程序的编制

按照前述理论, 采用 Visual Fortran 编写了基坑开挖与土钉支护的平面有限元分析程序, 本程序可以考虑多步开挖和多步支护, 并可以给出每一施工步骤的计算结果。该程序概括起来主要有以下几个特点:

1) 接触面单元采用修正的 Goodman 单元, 它能考虑接触面的滑动、拉裂等多种形式的组合破坏, 其中岩土体材料采用弹塑性模型。

2) 此程序为方便前处理工作预留了通用性的接口, 可以将其它软件前处理得到的数据方便地导入该程序的输入文件而用于计算分析。

3) 编制了相应的后处理程序, 用于输出该程序计算得到的大量数据, 并从中自动选择输出所需的单元信息, 方便数据处理。

4) 为方便程序设计, 本程序对输入数据特别是结点信息和单元信息规定了特定的格式, 因此在输入这些信息时务必严格按照规定的格式进行输入, 以免程序出错或得出完全错误的结果。

5) 程序采用变自由度的处理方法, 因此总刚度矩阵的维数随迭代过程不断变化。

程序框图如图 2 所示。

2 实例分析

2.1 工程概况

某基坑开挖深度 13 m, 地面均布荷载为 20 kPa, 地下水位为 6.0 m, 地质情况从上往下依次为:

第 1 层杂填土, 杂色, 以回填土为主, 含有大量建筑垃圾、树根、杂草等有机质。场区普遍分布, 平均厚度为 5.78 m。

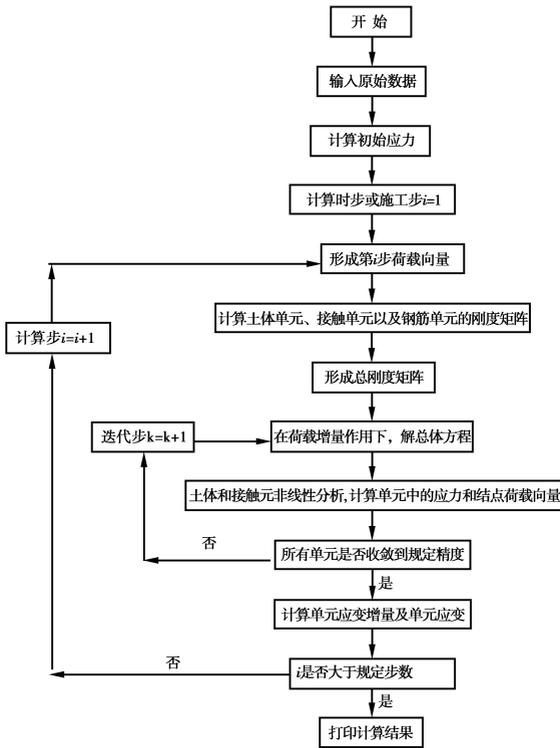


图 2 有限元程序框图

第 2 层粉质粘土, 黄褐色, 以粉质粘土为主, 含有少量的砂粒及有机质。场区普遍分布, 平均厚度为 5.28 m。

第 3 层为强风化花岗岩, 肉红色, 含有大量花岗岩碎石颗粒, 手捏可碎, 可见风化残积岩结构。各土层的物理力学性质指标见表 1。

表 1 岩土的物理力学性质指标

土名	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	E_0/MPa	c/kPa	$\Psi/^\circ$	μ
杂填土	20	8.16	35	12	0.3
粉质粘土	19	8.00	45	15	0.3
强风化花岗岩	21	1 500	35	40	0.15

2.2 有限元分析

首先采用极限平衡法对土钉支护进行初步设计, 如图 3 所示。该方法只能计算出土钉长度及其抗拔力, 但对土钉的变形却无法考虑, 而该基坑周边有交通要道, 对其坡顶位移要求较高, 基坑施工过程中要同时保证基坑本身和周边建筑物的安全与稳定^[7], 因此, 对土钉支护的变形分析显得尤为重要。

2.2.1 计算模型建立 为对开挖过程进行模拟, 首先应确定进行开挖的剖分区域及其离散化。考虑到场地的土层条件较好, 开挖影响范围较小, 因此将计算域向

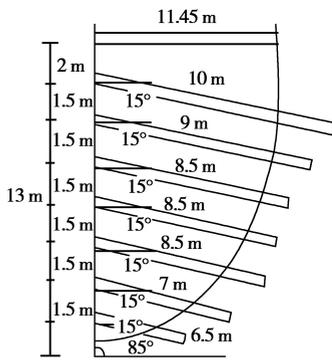


图 3 土钉支护结构剖面图

下延伸开挖深度的 1.5 倍, 向边坡外围同样延伸开挖深度的 1.5 倍。计算中采用四边形四节点等参元, 土钉简化为受轴力和弯矩共同作用的平面弹性杆单元, 并用修正的 Goodman 节理单元过渡接触面。地层开挖后出露的喷射混凝土面层和密排搅拌桩的组体简化为弹性梁。在其与土体的接触面上采用本文给出的修正 Goodman 单元, 用以模拟接触面, 有限元计算参数见表 2。

表 2 土钉支护有限元计算参数

土钉	面层	接触单元
钢筋直径 0.028 m	厚度 0.1 m	切向刚度 4 000 kN/m
弹性模量 20×107 kPa	抗拉强度 125×103 kPa	
屈服强度 31×104 kPa	弹性模量 22×106 kPa	
倾角 15°	泊松比 0.25	法向刚度 250 kN/m

根据计算区域内土体的物理力学性质, 将计算区域剖分成 1 160 个单元, 1 430 个节点, 其中 2 个三角形单元, 85 个钢钉单元, 320 个节理单元, 计算模型底边界采用垂直方向约束, 左右边界采用水平方向约束, 计算模型见图 4 所示。

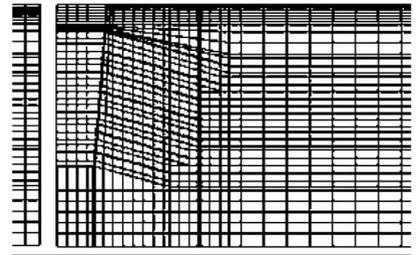


图 4 计算模型图

2.2.2 计算结果分析 有限元计算的破坏区分布见图 5。由图 5 可以看出, 当开挖到第 7 步时(开挖深度 13 m), 虽然地表出现了一定范围的拉应力区, 但深度较小, 基坑下部的塑性区很小, 并且坡脚处没有出现最大剪应力集中区, 表明边坡仍稳定。节点位移矢量图见图 6 所示。

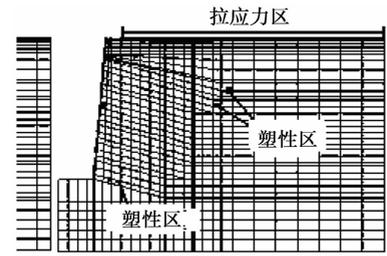


图 5 开挖后破坏区分布图

土钉不但减少了开挖面的水平位移和地表的沉降变形, 而且改变了开挖面处水平位移的形状。当基坑开挖后, 由于应力释放, 土体必然发生向开挖面方向的位移。当加入土钉后, 约束了土体的侧向变形, 侧向约束作用在钉土接触面处表现最为明显。图 7 和图 8 给

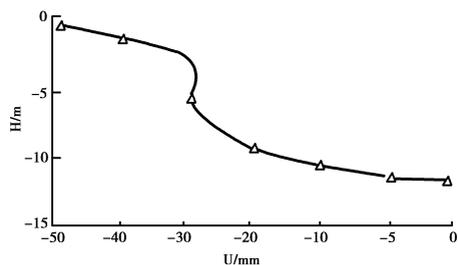


图6 节点位移矢量图

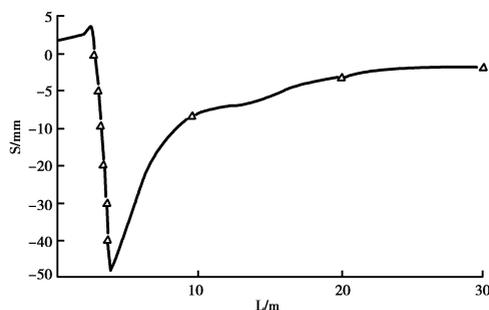


图7 坡面水平位移图

出了坡面水平位移和地表的沉降曲线图。由图7可以看出,发生最大水平位移的点位于坡顶上距离坡面0.5 m处,其最大水平位移量为48.12 mm。由图8可以看出,产生最大沉降量的点位于坡面上距离坡肩3.8 m处,其沉降量为48.65 mm。从上面的分析可知,由于土钉对土体的侧向约束作用,减小了基坑变形。工程基坑深度为13 m,属二级基坑,其最大变形量在允许范围 $0.0050H=65$ mm内^[8],满足设计要求。该工程实际开挖后的监测结果也证明了这一点,最大沉降为44.25 mm,最大水平位移为31.45 mm。

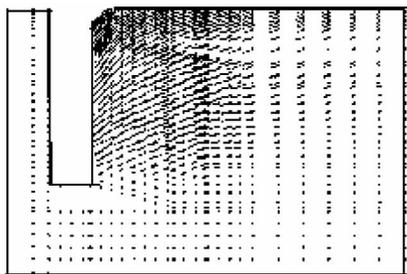


图8 地表沉降曲线图

3 结 语

1)采用弹塑性土体单元、平面弯曲钢钉单元和带转动自由度的修正 Goodman 节理单元模拟土体与土钉间的接触面特性,建立了非线性计算模型,并从钉土的耦合变形方面进一步对土钉墙的变形稳定进行了分析。监测结果表明,该工程中土钉支护效果非常理想,完全满足设计要求。

2)土钉支护是一种较好的基坑支护方法,为有效的使用这种方法,对其机理的了解是必不可少的。工程中常常需要用简便而有效的方法来分析支护体系的

稳定性和变形,本文采用的方法,希望能对类似的工程有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 连镇营,韩国城,吕凯歌. 土钉支护弹塑性数值分析及稳定性探讨[J]. 岩土力学,2002,23(1):85-89.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, LU Kai-ge. Elastoplastic Numerical Analysis and Stability Study of Soil-Nailed wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1):85-89.
- [2] 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.
CHEN Jin-jie, JIA Jin-qing, ZHANG Ming-ju. Parametric Studies on Behaviors of Soil Nailing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,23(5): 618-622.
- [3] Han J,Gabr M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced and Pile-supported Earth Platforms over Soft soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(1):44-53.
- [4] 程永锋,谢康和,曾国熙. 深基坑土钉支护的数值分析[C]//龚晓南,俞建霖,严平. 岩土力学与工程的理论与实践. 上海:上海交通大学出版社,1999:199-205.
CHENG Yong-feng, XIE Kang-he, CENG Guo-xi. Numerical analysis of soil nail support for deep Pfoundation pit [C]//GONG Xiao-nan, YU Jian-lin, YAN Ping. Theory and Practice of rock mechanics and engineering. Shang Hai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999:199-205.
- [5] Goodman R E, Taylor R L, Breke T L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock [J]. Soil Mech Found Div, ASCE, 1968, 94(SM3): 637-659.
- [6] 殷宗泽,朱泓,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报,1994,16(3):14-22.
YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical Simulation of the Deformation in the Interface Between Soil and Structural Material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Enigeering, 1994, 16(3):14-22.
- [7] 朱瑞钧,高谦,齐干. 深基坑支护桩周边建筑物沉降分析[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(2):52-55.
ZHU Rui-jun, GAO Qian, QI Gan. Settlement Analysis on Building Near Retaining Pile of deep Foundation pit[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006,28(2):52-55.
- [8] SJG05-96,深圳地区建筑深基坑支护技术规范[S]. 深圳:深圳市勘察测绘院,1996.
Technical Code for Retaining and Protection of Dee PBuilding Foundation Excavation in Shenzhen Region (SJG05 - 96) [S]. Shenzhen: Shenzhen Geotechnical Investigation & Surveying Institute,1996.