

# 土钉支护结构有限元法变形与破坏数值模拟分析

秦四清<sup>1</sup>, 陈辉<sup>2</sup>, 张明中<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029 ; 2. 北京建材地质工程公司 北京 100102)

**摘要** :用 SnEpFem 土钉墙有限元数值分析系统,对土钉支护结构进行变形与破坏的数值模拟分析,对土钉支护结构的可靠性进行合理评价。此系统可对坡面水平位移、坡顶沉降及沉降范围、坑底隆起、张拉区和塑性区的作用机制进行全面分析,也可模拟施工中每一步开挖过程并给出坡体的变形与破坏情况。通过对某基坑土钉支护结构的工程实例数值模拟分析,计算得到的坡面最大变形与实际监测的变形数据相比较,二者相差很小,充分证明了 SnEpFem 土钉墙有限元分析系统的可靠性。

**关键词** :土钉支护;有限元;数值模拟;水平位移;沉降;张拉区与塑性区;隆起

**中图分类号** :TU473.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1672-7428(2005)S1-0102-04

**Deformation and Destruction Value Analogy Analyses for Soil Nail Support by Finite Element Method**/QIN Siqing<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, ZHANG Ming-zhong<sup>2</sup>(1. Institute of Geology and Geophysics of CAS, Beijing 100029, China; 2. Beijing Building Material Geotechnical Engineering Co., Beijing 100102, China)

**Abstract** :The deformation and destruction of soil nail support structure were analyzed with value analogy, and the reliability of soil nail support structure was evaluated, by SnEpFem Soil Nail Wall Finite Element Value Analysis System. The system can completely analyze horizontal displacement of slope surface, subsidence of slope top and subsidence range dimension, pit bottom hooving-up, and reaction mechanisms of tension area and plasticity area. The system also can simulate the deformation and destruction of slope body which occurred in each step during construction. The comparison of deformation data between calculation and actually monitoring shown that the difference is small. That proved the reliability of SnEpFem Soil Nail Wall Finite Element Value Analysis System.

**Key words** :soil nail support; finite element; value analogy; horizontal displacement; subsidence; tension and plasticity area; hoove-up

土钉支护技术与传统的支护形式(如桩锚、地连墙等)相比较,具有工期短、造价低、施工简便、应用广泛等优点。但是,现用的土钉支护结构的设计理论和稳定性评价方法都存在许多缺陷,对其作用机制研究较少,缺乏对其工作机制的深入认识<sup>[1,2]</sup>。设计方法多基于经验或极限平衡理论,不能考虑土钉的变形与破坏,也无法客观评价土钉墙变形所引起临近建筑物的沉降情况以及土钉加固后土体的破坏情况,所设计的方案或偏于保守造成不必要的浪费,或偏于危险造成基坑失稳。每年因土钉设计方案不合理引起的基坑塌方事故达数百起,造成的经济损失达数亿元。

由于深基坑常临近建筑物及地下设施开挖,对变形的要求很严格。目前,一些学者主要用极限平衡方法研究设计参数对支护体系稳定性的影响,对

其作用机制不能作出深入分析。针对土钉支护结构稳定性分析的缺陷,我们研发了 SnEpFem 土钉有限元分析系统,本文用此系统对某工程实例土钉支护结构的工作机制进行数值模拟,分析土钉支护结构的坡面水平位移、坡顶沉降、坑底隆起、张拉区和塑性区范围的变化情况,评价土钉墙支护土体的变形与破坏情况以及是否对临近构筑物的稳定性产生威胁,并将计算的最大变形值与实测值相对比,分析土钉支护结构的工作机制并对被支护边坡的稳定性给予合理的评价。

## 1 SnEpFem 土钉有限元分析系统<sup>[1]</sup>

由于土钉支护作用机理的复杂性和多变性,利用有限元法对土钉支护结构的工作机制进行分析应用的很少,其中关键问题在于支护系统模型的选择

收稿日期 2005-06-30

**作者简介** :秦四清(1964-)男(汉族),河北行唐人,中国科学院地质与地球物理研究所工程地质与应用地球物理研究室副主任、研究员、博士生导师,工程地质专业,博士后,从事教学与科研工作,北京市朝阳区德外祁家豁子北土城西路19号(010)62008343;陈辉(1968-)男(汉族),安徽太湖人,北京建材地质工程公司项目经理、高级工程师,探矿工程专业,中国地质科学院地质力学所在读博士研究生,从事岩土工程施工与管理工作;张明中(1958-)男(汉族),江西宜春人,北京建材地质工程公司总工程师、高级工程师,探矿工程专业,从事岩土工程施工与技术管理工作,北京市东直门外南湖渠(010)84913867, zhangmz@263.net.

以及参数的确定上难度很大。国内外很多学者所做的土钉有限元分析程序,大多基于岩体变形的结构关系和计算原理,不能适应于土体的变形与破坏特点,有些程序没有考虑面层这一重要受力构件的作用,有的程序不能考虑水的作用等等,都不能很好解决面层与土体接触面模型、土钉与土体接触单元形式选择、土体追踪破坏模式等问题,分析结果与实际情况有较大差距。针对这些问题,我们经过长期研究,解决了评价土钉墙稳定性方面的一些难题,开发了一套行之有效的数值模拟分析系统——SnEpFem 土钉墙有限元分析系统。该系统具有如下特点:

(1) 钉土接触单元采用了比 Goodman 单元更为合理的 Desai 单元。

(2) 面层单元采用了弹性地基梁模型。

(3) 对土体单元考虑了追踪破坏情况。还综合考虑了土体单元、土钉单元、面层单元、接触单元以及基础单元等多种单元形式;也考虑了自重、静水压力、地面超载、预应力等各种外力作用;对土体单元采用 Drucker - Prager 和 Mohr - Coulomb 不同屈服准则的弹塑性模型;对深基坑的开挖采用了追踪计算方法,以模拟真实的施工过程,深入、清晰地揭示了土钉支护结构的工作机制。

### 1.1 土体单元破坏模式

本有限元系统中采用两种弹塑性材料模型——Drucker - Prager 材料模型和莫尔 - 库伦材料模型。

(1) 平面应变问题中的弹性矩阵为:

$$[D] = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\mu)/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $E$  ——弹性模量;  $\mu$  ——泊松比。

土体受力后在未屈服之前仍然处于弹性状态,满足胡克定律。

(2) 土体采用的 Drucker - Prager 弹塑性材料模型为:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (2)$$

式中  $I_1$  ——应力张量的第一不变量;  $J_2$  ——应力偏量张量的第二不变量。

(3) 土体采用的 Mohr - Coulomb 材料模型。土体在未破坏之前是各向同性材料,这时屈服条件是:

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - \cos \varphi c = 0 \quad (3)$$

若上式被满足,土体就要屈服,产生滑移。以主应力  $\sigma_1, \sigma_3$  为坐标时,滑移角  $\theta = 45^\circ \varphi/2$ , 土体一

旦产生滑移,则材料的强度不再是各向同性,沿  $\theta$  角方向就是土体滑移的软弱方向,这时不能再采用 (3) 式作为屈服条件,而应采用下式:

$$f(\sigma_\theta, \tau_\theta) = \tau_{x'y'} + \sigma_{y'} \tan \varphi' + c' \quad (4)$$

式中  $x', y'$  ——局部坐标系的坐标;  $\varphi'$  ——土体沿  $\theta$  角方向的内摩擦角;  $c'$  ——土体沿  $\theta$  角方向的粘聚力。

利用 (4) 式,可以解决在开挖条件下,土体单元的追踪破坏模式。即如果某次开挖,某单元产生了屈服滑移,下一步开挖时,能保存上一步开挖产生屈服滑移的软弱面方向,土体单元滑移仍按上次开挖产生的滑移方向运动。

### 1.2 面层单元

面层单元是为描述面层支护而设置的,采用四节点单元,在形式上与土体单元没有区别,它是随着逐步开挖而出现的。由于面层中有钢筋网,强度比较高,计算时只是对强度进行校核,即可以满足强度需要。面层与土体接触面的力学模型难以建立,我们根据弹性地基梁的原理,把面层视为弹性梁,根据在接触面处梁的变形与土体变形相等的原理,确定出面层的反力,通过计算与对比分析,这样比较符合实际情况。

### 1.3 接触单元

土体中打入土钉之后,土钉和土体之间很窄的部分称为接触层(如图 1 所示),接触层位于土钉体和土体之间。接触层单元受土钉的影响非常大,力学作用与土体不一样,需要单独考虑。

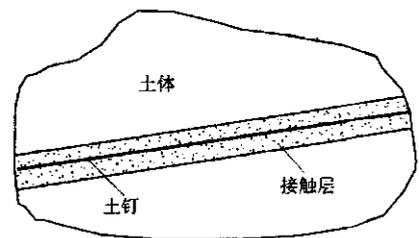


图 1 土钉、接触层示意图

由于土体与土钉的变形模量相差很大,因此在两者的界面上常伴随有较大的剪应力。剪应力的发挥程度直接影响着土钉的轴向拉力及支护结构的内部稳定性,因此研究接触面的性能显得极为重要。接触面单元经常采用两种材料模型:层状材料单元(薄单元)和接触摩擦型单元(无厚度单元)。其中 Goodman 单元<sup>[3]</sup>是一种应用较为广泛的无厚度接触摩擦型单元,该单元能模拟接触面的滑动和张裂,但其存在着接触面刚度参数不易确定和不适宜于土体

等问题。薄层单元是由 Desai 等提出的,该接触面单元的一个最大特点是在弹性范围内引入了独立的剪切模量,可以考虑滑动破坏和拉裂破坏。Desai 单元<sup>[4]</sup>厚度的选取对于计算结果影响较大,单元厚度太大会从物理上带来误差,厚度太小又会从数学上带来误差,如何较为合理地确定单元厚度,使得两方面的误差均不大,成为该方法的关键。我们根据计算研究和室内模型试验结果对比,确定出单元厚度取  $D/2$  ( $D$  为土钉体直径)较为合适。

#### 1.4 土钉单元

土钉单元是为研究土钉的力学作用而设置的,采用二节点弹性杆单元。

#### 1.5 基础、钢桩单元

基础、钢桩单元视为弹性体,不考虑破坏,在离散化时采用了四节点等参实体单元形式。

用 SnEpFem 土钉有限元分析系统对 50 多个有实测变形数据的基坑进行数值模拟分析,计算得出的变形情况与实测结果相差很小,证实了该系统分析的合理性、可靠性。

## 2 工程实例

### 2.1 工程地质情况

该工程位于北京西三环花园立交桥附近。根据工程地质勘察报告,在揭露深度 30.0 m 范围内,表层为人工填土层,其下为一般第四系冲洪积土层。按照《岩土工程勘察报告》提供的典型剖面分层,根据土层的物理力学性质,与支护有关的土体的厚度及物理力学参数见表 1。

表 1 各土层厚度及主要物理力学性能参数表

编号	土层类型	厚度 /m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	粘聚力 $c$ /kPa	变形模量 /MPa	泊松比
1	杂填土	1.0	18	10	10	20	0.30
2	素填土	1.0	18	15	10	25	0.28
3	粘质粉土	1.0	18	20	10	35	0.25
4	细砂	4.0	20	21.3	15	80	0.20
5	卵石	1.0	20	32	0	120	0.20
6	粉质粘土	4.0	20	22	20	40	0.26
7	粘质粉土	0.5	20	16	10	35	0.25
8	卵石	10.0	20	42	0	120	0.20

### 2.2 水文地质情况

根据工程地质勘察报告,在勘察的深度 30 m 范围内无地下水。在进行此基坑支护方案设计时,可以不考虑地下水的影响。

### 2.3 基坑支护深度及荷载情况

设计计算时按基坑深度为 14.6 m 考虑,即开挖

到第 8 号卵石层 2.1 m 处,放坡角为  $84^\circ$ 。地面附加荷载为 10 kPa。

### 2.4 土钉墙设计参数

基坑各个方向的土钉墙设计参数见表 2。

表 2 基坑设计的土钉墙参数表

位置	土钉层号	开挖深度 /m	层高 /m	孔间距 /m	孔深 /m	孔径 /mm	拉杆 /mm	倾角 /( $^\circ$ )
东侧和南侧	1	1.9	1.4	1.5	8.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	2	3.3	1.4	1.5	8.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	3	4.7	1.4	1.5	13.0	130	1束 7 $\varnothing$ 5	10
	4	6.1	1.4	1.5	9.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	5	7.5	1.4	1.5	9.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	6	8.9	1.4	1.5	10.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	7	10.3	1.4	1.5	10.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	8	11.7	1.4	1.5	8.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	9	13.1	1.4	1.5	6.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	10	槽底	1.4	1.5	4.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
西侧	1	1.5	1.0	1.5	9.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	2	2.7	1.2	1.5	5.0	110	1 $\varnothing$ 22	10
	3	4.0	1.3	1.5	15.0	130	1束 7 $\varnothing$ 5	10
	4	5.5	1.5	1.5	10.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	5	7.0	1.5	1.5	13.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	6	8.5	1.5	1.5	18.0	130	2束 7 $\varnothing$ 5	10
	7	10.0	1.5	1.5	15.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	8	11.5	1.5	1.5	13.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	9	13.0	1.5	1.5	5.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
	10	槽底	1.5	1.5	4.0	110	1 $\varnothing$ 25	10
北侧	1	1.9	1.4	1.5	7.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	2	3.3	1.4	1.5	7.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	3	4.7	1.4	1.5	6.5	110	1 $\varnothing$ 20	10
	4	6.1	1.4	1.5	7.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	5	7.5	1.4	1.5	7.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	6	8.9	1.4	1.5	7.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	7	10.3	1.4	1.5	9.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	8	11.7	1.4	1.5	8.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	9	13.1	1.4	1.5	4.0	110	1 $\varnothing$ 20	10
	10	槽底	1.4	1.5	3.0	110	1 $\varnothing$ 20	10

## 3 数值模拟计算模型

根据以上土层参数和基坑东侧、南侧、西侧及北侧分别设计的土钉参数划分有限元网格,如图 2 所示,开挖到底后边坡变形形状如图 3 所示,开挖到底时,边坡张拉区和塑性区如图 4 所示。

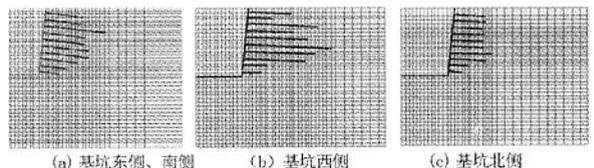


图 2 基坑各侧有限元网格划分图(宽度 40 m,高度 30 m)

从图 5 可见,基坑各侧面水平位移最大值均出现在坡顶位置。东侧、南侧和西侧的最大位移约为

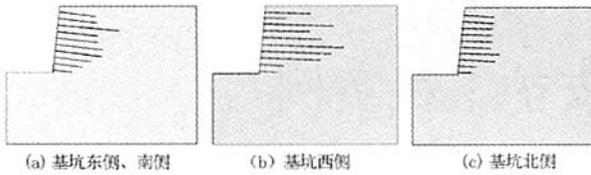


图3 开挖到底后 基坑各侧边坡变形形状图 (虚线表示边坡开挖前的形状)

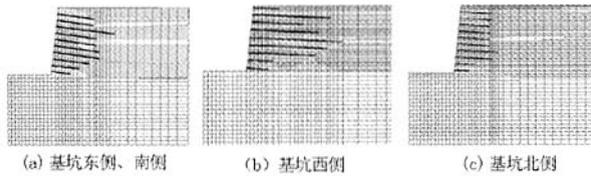


图4 开挖到底时 边坡张拉区和塑性区图

基坑坡面水平位移如图5所示。

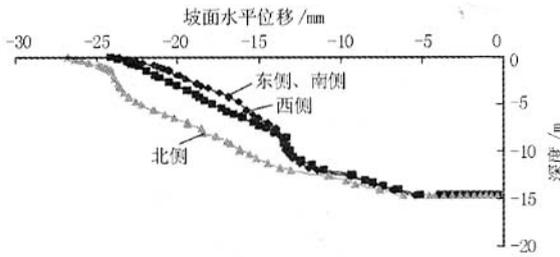


图5 基坑各侧面坡面水平位移随深度变化图

24 mm, 北侧稍大, 约为 29 mm。东侧、南侧和西侧均施加了预应力, 在施加位置坡面水平位移显著减小, 其整个坡面水平位移比北侧不加预应力的要小, 因此, 对土钉支护结构施加预应力可以有效减小坡面最大变形, 增加其稳定性。

另外, 用此系统还可以给出每一步开挖坡顶沉降和坑底隆起值, 从计算结构来看, 基坑各侧面的坡顶沉降最大值约为 23 mm, 坑底隆起值很小, 约为 3 mm。监测结果如图6所示。

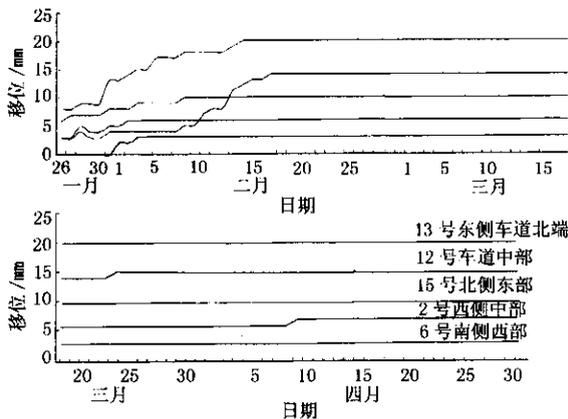


图6 监测结果示意图

经过近5个月的观测, 该基坑坡面最大变形为20mm左右, 并且变化不大。用此数值分析系统进行计算基坑各侧面最大变形为: 东侧、南侧和西侧为24 mm, 北侧为28 mm, 与实际监测的结果差别很小, 而且计算值比实测值稍大, 符合实际工程需要, 有利地证明了用有限元法进行数值分析的可靠性。

### 4 结语

本文用 SnEpFem 土钉墙有限元数值分析系统对深基坑土钉支护结构进行变形与破坏的数值模拟分析, 显示了用有限元法进行基坑支护变形分析的合理性。

(1) SnEpFem 土钉墙有限元数值分析系统可以进行深基坑土钉支护结构的变形分析。

(2) 此系统可以模拟基坑每一步开挖过程, 同时给出每一步开挖基坑的变形状态。开挖到底时, 可以给出变形图, 包括坡面水平位移、坡顶沉降、坑底隆起, 位移矢量图, 边坡张拉区和塑性区图。设计者可以直观看出基坑支护后的变形状态, 分析其对周围建筑物等的影响。

(3) 除了定量的变形图, 还给出每一步开挖的最大水平位移、坡顶沉降和坑底隆起数值表, 可准确看出每一步开挖基坑的变形情况, 随时调整支护结构参数, 满足工程要求的最大变形。

(4) 不仅可以分析单纯土钉支护结构的变形, 也可以模拟施加预应力的复合土钉支护结构。

(5) 用此数值模拟系统分析计算的基坑变形数值与实测值相差很小, 而且数值分析计算的结果偏大。此工程实例有利地证明了用 SnEpFem 土钉墙有限元数值分析系统进行深基坑土钉支护结构变形与破坏的数值分析是合理可靠的。

### 参考文献:

[1] 秦四清, 王建党, 王清, 等. 土钉支护机理与优化设计[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[2] 秦四清, 万林海, 贾金禄, 等. 深基坑工程优化设计[M]. 北京: 地震出版社, 1998.

[3] Goodman, R. E., Taylor R/L/, Brekke, T. L. A model for the mechani of jointed rock[J]. Journal of soil mechani and foundation division, ASCE, 1968, 94: 1121 - 1129.

[4] Desai, C. S., Zaman, M. M. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. International Journal of numerical and analytical methods in Geomechani, 1984, 8: 1101 - 1110.