

# 土钉支护工作性能参数分析

## Parametric studies on behaviors of soil nailing

陈进杰<sup>1</sup>, 贾金青<sup>2</sup>, 张明聚<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道学院 校办产业处, 河北 石家庄 050043; 2. 清华大学, 北京 100084)

**摘要:** 采用三维分离式有限元模型, 考虑土钉的加固作用及土钉与土体的相互作用, 模拟土钉支护施工过程。选择能够反映开挖特点的土的本构关系, 从而建立有限元分析方法, 并通过编程计算研究土钉支护的工作机理、变形和受力性能, 分析支护参数的影响。通过对一个大型足尺模型试验实例的分析计算, 与实测结果和现有有限元分析结果进行比较分析, 说明对二维有限元分析结果的改进。研究结论对土钉支护的设计和施工具有较高的应用价值。

**关键词:** 土钉支护; 三维分离式有限元模型; 参数分析; 基坑

**中图分类号:** TU 432      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2001)05-0618-05

**作者简介:** 陈进杰, 男, 1963 年生, 硕士, 副教授, 主要从事岩土工程科学技术研究、教学及工程实践。

CHEN Jin-jie<sup>1</sup>, JIA Jin-qing<sup>2</sup>, ZHANG Ming-ju<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A discrete three-dimensional (3-D) finite element model (FEM) has been developed for the analysis of soil-nailed structures. The soil constitutive law is chosen to analogize the behaviors of soil during excavation. The tensions of nails and their adhere-slip behaviors are simulated by bar elements and two-node double spring elements, respectively. The staged excavation and retaining can also be simulated in this model. The working principle and strain stress performances of soil nailing are researched. Parametric studies are applied to examine the effects of several factors on the deformation. An engineering case is, as an example, analyzed and the predicted soil deflections are compared with those measured in situ and computed by the existing 2-D FEM. The 3-D FEM obtains better results than the 2-D FEM. Conclusions may be of very high practical value in design and construction of soil nailing.

**Key words:** soil nailing; discrete three-dimensional finite element model; parametric study; foundation pit

## 1 土钉支护的有限元模拟<sup>y</sup>

### 1.1 三维模型

土钉支护通过土钉与土体的粘结作用使土钉与被支护的土体形成有机的整体。在建立土钉支护有限元分析模型时, 应该把土钉与土体作为一个相互作用的体系进行分析, 土钉与土体之间的界面单元应能恰当地模拟土钉与土体之间的实际接触情况。

一些学者按照这种模式对土钉支护进行了有限元分析<sup>[1~5]</sup>, 归纳起来有两种模型, 即复合式模型和分离式模型。在复合式模型中, 把土钉加固区作为土钉与土体共同作用的复合材料单元进行分析。在分离式模型中, 把土体、土钉和混凝土面层离散为不同的单元, 并考虑单元间的相互作用。分离式模型概念明确, 可分析得到各个组成部分的受力情况, 应用较为广泛。

本文采用三维分离式模型<sup>[6,7]</sup>, 既计入土钉的加固作用又简便易行。该模型主要考虑具有有限尺寸的土钉对半无限土层的三维作用, 而不是考虑基坑的深度和平面形状对基坑稳定性和变形影响的空间效应。模型沿基坑平面延长方向任取一段分析, 采用三维有限元格式, 与平面应变有限元有着本质区别。

### 1.2 计算边界与边界条件

三维模型的宽度为土钉水平间距的一半, 其他两个方向的尺寸根据地质条件和基坑开挖深度, 经试算确定。试算表明: 当基坑开挖宽度取大于等于基坑开挖深度  $H$ , 开挖面后的边界取在  $(2\sim 3)H$  处, 下边界在开挖底面以下  $0.5H$  时, 再扩大计算范围对水平位移和土钉拉力的计算结果没有很显著的影响, 计算结果是确定的。

在有限元网格的边界上, 应施加简单明确的边界条件。底面边界认为是静止不动的, 采用固定铰支, 两个侧面都为边坡的对称面, 没有剪切应力, 采用滚动支座, 竖直方向没有约束, 可自由滑动, 产生竖向位移。

### 1.3 模拟土体、面层、土钉及其界面的单元

模拟土体和面层的单元采用 20 结点空间等参单元, 土钉采用 3 结点杆单元, 界面采用 2 结点弹簧单元。由于面层和土钉单元的尺寸较小, 在面层和土钉加固区附近网格划分较密, 较远处划分较疏, 初步试算时网格划分较疏, 实际计算时网格划分较密。

<sup>y</sup> 基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8992009); 铁道部铁路科研基金资助项目(J2000Z156)

收稿日期: 2001-04-07

## 1.4 开挖与支护施工的模拟

每步土钉支护施工的模拟过程为开挖一定深度的一层土体, 设置一排土钉, 构筑喷混凝土面层。当挖去一层土体后, 计算被挖去的土体单元的等效结点力, 并反向施加于开挖面上, 使开挖面成为零应力面。

土钉支护施工把拟开挖的土体分为若干层。当挖去第一层土的单元时, 计算被挖去的土单元的等效结点力, 用与这些结点力大小相等、方向相反的力作为结点荷载, 作一次非线性分析。随着开挖的加深, 土体单元数目逐次减少, 土钉单元和面层单元逐次增加。有限元网格每次均相应于开挖一层以后的几何形状和支护状态, 每级荷载计算均需重新形成体系的总体刚度矩阵和总体荷载列阵。

在初始有限元网格生成中, 各个组成部分的单元信息都已经建立, 只是设置了状态开关, 根据开挖和支护的步骤确定开关是开启或关闭。某层土体被挖去, 在计算中就是把被挖去的土体所对应的单元关闭, 即不再把它的单元刚度矩阵装入总体刚度矩阵。土钉安装就相当于把土钉单元开启, 将其单元刚度矩阵装入总体刚度矩阵中。面层单元在构筑面层以前按土体对待, 构筑面层以后将原来的土体参数换为面层的材料参数。

## 2 土钉的有限元模拟

### 2.1 土钉拉力作用的有限元模型

土钉是土钉支护中的主要受力部件, 它同时受到拉力、弯矩和剪力的联合作用, 但土钉的受拉作用是最主要的。

注浆土钉是由中心的钢筋和外裹的水泥(砂)浆组成, 土体变形使得土钉受力是一个较为复杂的过程。根据试验结果<sup>[8]</sup>, 在塑性破坏以前, 虽然土钉注浆体已经产生裂缝, 但土钉拉力与相对位移的关系仍可近似地视为线弹性。土钉的等效模量可分别通过钢筋和注浆体的试验确定, 也可直接用钢筋和注浆体的组合体进行试验确定。为考虑注浆体开裂的影响, 应对计算得到的等效模量进行适当折减。

### 2.2 土钉界面的有限元模型

土钉与土体的粘结是土钉能够发挥加固作用的基础, 它不但与设置土钉的施工方法有关, 还与土类有关, 相互作用是十分复杂的。从简化角度分析, 土钉与土体间存在着很强的粘结作用, 在其轴向能承受很大的拉拔力。本文采用双弹簧联结单元模拟土钉与土体的粘结滑移性能<sup>[8]</sup>, 当界面的剪切应力小于极限剪应力时认为土钉与土体处于粘结状态, 当界面的剪切应力达到极限剪应力时将产生滑移。

## 3 基坑开挖中土的本构模型

基坑开挖使边坡附近的土体受到扰动, 处于连续的卸载-再加载状态, 需要选择一种模型来模拟基坑开挖过程中土的非线性。

目前土钉支护有限元分析中采用的本构模型主要有三种<sup>[1-5]</sup>: 非线性  $E-\nu$  模型、Mohr-Coulomb 弹性-完全塑性模型和渐进单屈服面模型(hierarchical single surface)。虽然采用这些模型应用于土钉支护分析都得到了一些有价值的结果, 但也存在一些问题。

在非线性  $E-\nu$  模型中, 计算泊松比  $\nu$  的值有一些经验公式, 但很不可靠, 计算值常偏大。采用 Mohr-Coulomb 弹性-完全塑性模型, 一方面在临近破坏时计算过程可能不稳定, 另一方面在弹性范围内加载与卸载采用相同模量, 不能反映基坑开挖过程中土体处于的连续卸载-再加载状态。虽然渐进单屈服面模型(hierarchical single surface)在理论上较为先进, 但计算得到的变形与实测结果有较大差别。

Duncan 等人提出并改进后的非线性  $E-B$  模型是较为简单实用的模型之一。该模型能反映岩土材料的非线性弹性, 当考虑卸载时, 还反映了岩土材料的非弹性变形性质。因此, 本文采用这种非线性  $E-B$  模型, 并针对基坑开挖的受力特点合理选择切线弹性模量  $E_t$ , 着重考虑下列两个问题的处理。

(1) 计算中要给出一个在什么情况下使用  $E_{ur}$  的标准。试验中  $\sigma_3$  不变, 若  $\sigma_1-\sigma_3$  降低就为卸载, 但实际问题中  $\sigma_3$  是变化的, 若  $\sigma_3$  和  $\sigma_1-\sigma_3$  同时降低, 仍有可能使应力水平增加, 产生塑性变形。Duncan 等人一开始选用的加卸荷函数  $f_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$ , 采用这个函数, 取用  $E_{ur}$  的单元太多。后来, Duncan 等人经过长期研究和应用, 对加荷函数进行了改进, 判断标准改为  $f_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \sqrt[4]{\sigma_3}$ , 计算结果较为合理。本文在分析中采用经改进后的加荷条件和处理方法。

(2) 基坑开挖后, 开挖面以下的土体受到的竖向压力减小, 围压也相应降低。按照上述方法确定的模量就较低, 实际上这些土体曾受到过较高应力的作用, 有较高的承载能力, 模量比计算值高, 但是, 模型没有给出这种情况下弹性模量的确定方法。考虑到基坑开挖是连续的卸载过程, 开挖面以下的土体由于竖向压力的减小而引起围压的减小, 相当于固结压力降低的情况, 其弹性模量与开挖以前的围压有关, 计算中当  $\sigma_3$  降低时用历史上曾经达到的最大固结应力  $\sigma_{3max}$  代替  $\sigma_3$  计算初始弹性模量  $E_i$ 、体积模量  $B_i$  和卸荷弹性模量  $E_{ur}$ 。

### 4 模型验证及参数分析

#### 4.1 与实测值的比较

该工程是 C. K. Shen 等人专门为研究基坑开挖土钉支护的工作性能所进行的现场足尺模型试验<sup>[9]</sup>, 测试数据与施工开挖步骤有较为明确的对应关系, 试验结果也比较全面。

该工程场区地层主要为砂质粉土和粉粘土, 基坑垂直挖深 9.2 m, 分 5 步开挖, 每步挖深 1.8 m。土钉为钻孔注浆钉, 直径 10 cm, 沿深度设置 5 排, 设计长度 6.1 m, 倾角为 20°, 水平间距和竖向间距均为 1.8 m。在基坑开挖过程中, 地层内的水平位移用测斜仪量测, 土钉拉力用应变钢筋计测试, 测试给出每步开挖后水平位移的分布曲线和土钉拉力沿深度的分布曲线。

土体、土钉和面层的计算参数根据试验场区岩土条件和试验资料, 文献[1]作有限元分析时采用的参数选取, 分析中采用的参数见表 1、表 2。

表 1 土、土钉及面层力学特性参数

Table 1 Mechanical properties of the nail and facing

土层		土钉				土层	
$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$K_0$	$f_y$ /MPa	$E_{eq}$ /GPa	$\tau_{ult}$ /kPa	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E_{eq}$ /GPa	$\nu$
20	0.64	340	48	60	26	22	0.3

表 2 非线性 E-B 模型参数

Table 2 Parameters of the nonlinear E-B model

$c$ /kPa	$\varphi_1$ (°)	$\Delta\varphi$ (°)	$R_f$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$K_b$	$m$
5	36	3	0.79	548	1370	0.5	360	0.3

有限元计算得到的水平位移分布如图 1, 2 所示。每步开挖后, 计算得到的水平位移与实测结果有大致相同的变化趋势, 数值大小基本吻合。

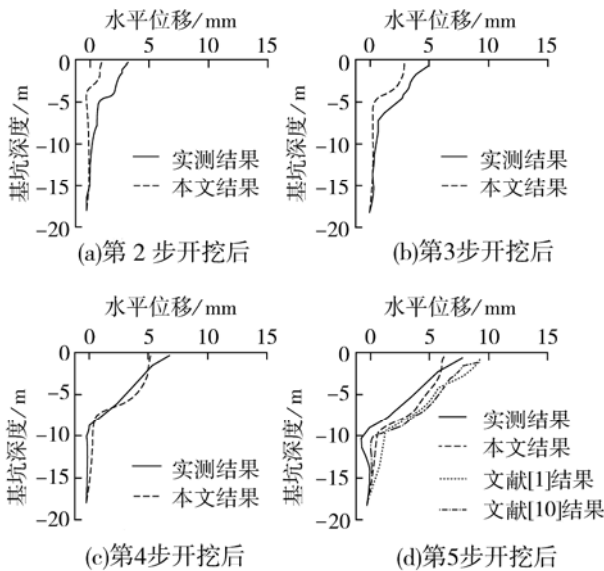


图 1 边坡内水平位移的分布(坡面后 1.5 m)

Fig. 1 Distribution of ground movements in slope(1.5 m behind)

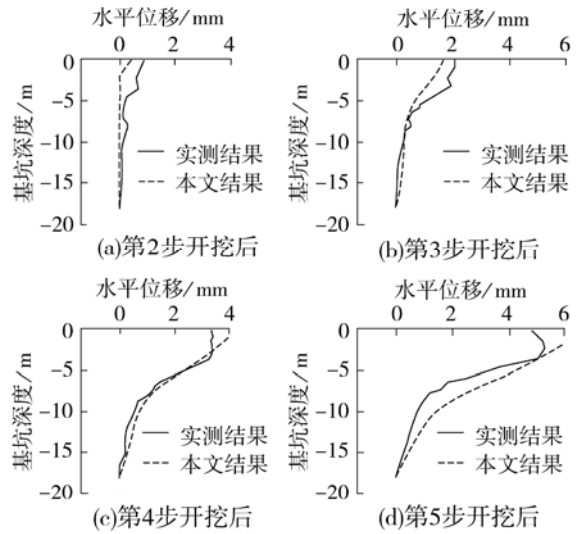


图 2 边坡内水平位移的分布(坡面后 4.5 m)

Fig. 2 Distribution of ground movements in slope(4.5 m behind)

分析得到的土钉最大拉力沿深度的分布情况如图 3 所示。土钉最大拉力与实测结果有一致的变化规律, 即基坑中部的土钉受力较大, 上下部的土钉受力较小, 与实测结果较为接近。

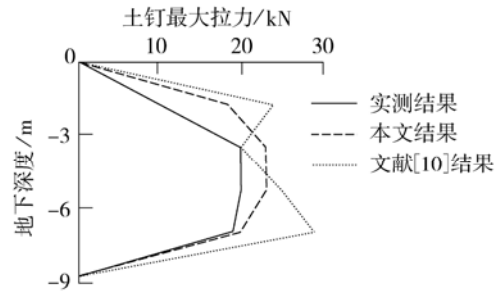


图 3 土钉最大拉力分布的比较

Fig. 3 Comparison of maximum nail tensions

#### 4.2 与二维有限元分析结果的比较

文献[9, 10]采用平面假定的二维有限元进行分析, 给出最后一步开挖的水平位移(见图 1), 文献[9]还给出土钉最大拉力沿深度的分布情况(见图 3)。

由图 1, 3 可知: 本文分析结果与实测值的一致性比二维有限元分析结果要好, 且与实测值更接近; 分析得到的土钉最大拉力沿深度的分布有较好的变化规律, 即基坑中部的土钉受力较大, 上下部的土钉受力较小, 比二维有限元分析结果更合理。

#### 4.3 参数分析

为进行支护参数分析, 另假定一开挖与支护的计算模型, 基本情况如下。

a) 基坑最终开挖深度为 9 m, 坡面竖直, 土钉水平设置, 长度为 6 m, 水平间距和竖向间距均为 1.8 m, 面层为钢筋网喷混凝土, 土钉与面层的连接牢固。

b) 基坑开挖和支护分 5 步进行, 每步开挖深度为 1.8 m, 取分层开挖区宽度 9 m, 距开挖面 18 m 远和最

终开挖底面以下 9 m 深处为有限元分析计算边界。

c) 土的非线性  $E-B$  模型参数和力学参数分别为  $c = 3 \text{ kPa}$ ,  $\varphi_1 = 28^\circ$ ,  $\Delta\varphi = 5^\circ$ ,  $R_f = 0.8$ ,  $K = 800$ ,  $K_{ur} = 1600$ ,  $n = 0.6$ ,  $K_b = 500$ ,  $m = 0.5$ ,  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ ,  $K_0 = 0.67$ ,  $\tau_{ult} = 80 \text{ kPa}$ ; 土钉的等效模量  $E_{eq} = 20 \text{ GPa}$ , 屈服强度  $f_y = 310 \text{ MPa}$ ; 面层  $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$ , 等效弹性模量  $E_{eq} = 15 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ 。

以上述数据为基准, 改变其中某个参数, 考察其对支护体系内力与变形的影响。

(1) 土钉长度的影响

对不同土钉长度(3~ 15 m)的设计方案进行计算, 最大水平位移和土钉最大拉力随土钉长度的变化关系如图 4 所示。

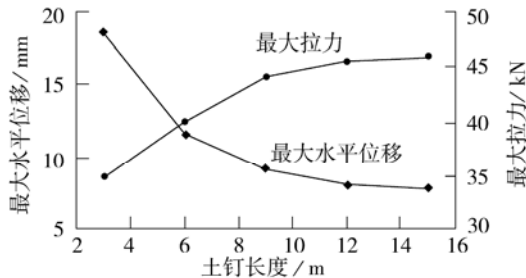


图 4 土钉长度变化的影响

Fig. 4 Influences of nail length

由图 4 可知: 基坑最大水平位移随土钉长度的增加而减小, 土钉较短时减小得较快, 土钉较长时减小得较慢, 土钉再增长时趋于稳定; 最大拉力随长度的增加而增加, 土钉较短时增加得较快, 土钉较长时增加幅度变缓, 土钉再增长时趋于常值

由此可知, 为控制基坑变形, 应适当增加土钉长度, 但基坑的变形与土钉长度并不是线性关系, 土钉长度过长, 控制变形的效果不明显, 而且土钉拉力增加不多, 强度得不到发挥, 造成浪费。

(2) 土钉密度的影响

在分析中, 土钉水平间距变化时, 改变有限元网格的划分比较容易, 因此通过改变土钉水平间距来反映土钉密度变化的影响。取不同水平间距(0.6~ 3.0 m)进行计算, 最大水平位移和土钉最大拉力随水平间距的变化关系如图 5 所示。

由图 5 可知: 基坑最大水平位移随水平间距的增加而增加, 水平间距较小时增加得较快, 水平间距较大时增加较缓慢。当土钉水平间距取值适中时, 最大拉力随水平间距增大而增大; 而当水平间距过大时, 最大拉力随水平间距的变化很缓慢, 并趋于稳定。

从土钉与土体的共同作用分析, 土钉设置得较密时, 开挖荷载由众多的土钉共同承担, 这种群体作用可有效地约束土体的变形。

(3) 土钉倾角的影响

假设不同土钉倾角( $0^\circ \sim 30^\circ$ )的设计方案进行计算, 最大水平位移和最大拉力随土钉倾角的变化关系如图 6 所示。

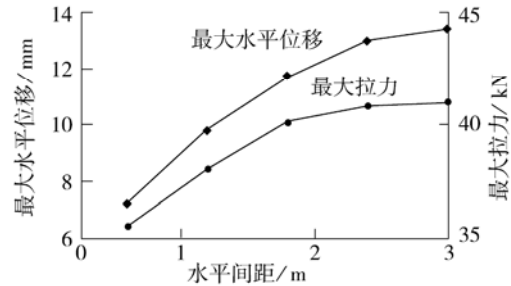


图 5 土钉密度变化的影响

Fig. 5 Influences of nail spacing

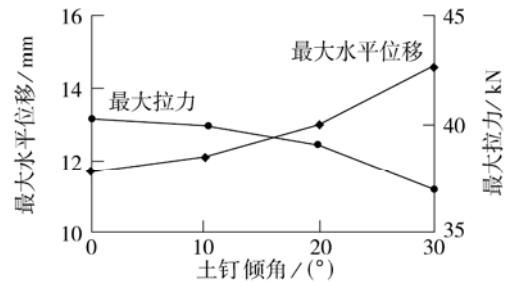


图 6 土钉倾角变化的影响

Fig. 6 Influences of nail inclination

由图 6 可知, 基坑最大水平位移随土钉倾角的增加而增加, 土钉倾角较小时增加得缓慢, 较大时增加得较快。土钉最大拉力随土钉倾角的增加而减小, 土钉倾角较小时减小得较为缓慢, 较大时减小得较快。

基坑开挖后边坡主要在侧向受到开挖荷载的作用, 主拉应变方向与水平方向接近, 因此产生的水平位移较大。土钉的倾角增大, 使得土钉偏离了土钉的主拉应变方向, 受到弯曲作用, 而土钉的弯曲刚度较小, 所以对横向变形的约束作用减弱。因此, 从控制基坑水平变形考虑, 土钉宜水平或接近水平设置。

(4) 土钉长度布置方式的影响

现设 4 种不同土钉长度的设计方案, 各排土钉的长度见表 3, 每种方案土钉的长度总和是相同的。对上述不同方案进行计算, 得到开挖完成后水平位移沿深度的分布如图 7 所示。

由图 7 可知: 土钉的布置方案对基坑变形有较大影响, 基坑中部土钉长的设计方案和基坑上部土钉长的设计方案对控制基坑上部水平位移较为有利, 是较好的设计方案。

为进一步研究有限元计算结果与极限平衡分析结果的差别, 在相同计算条件下对不同设计方案采用文献[11]方法进行了稳定性分析。得到上述 4 种方案的稳定安全系数依次为 1.52、1.57、1.46 和 1.63。

表3 不同设计方案的土钉长度布置方式

Table 3 Arrangement of nails in different design projects

土钉 所在排	土钉长度/m			
	方案1 (等长)	方案2 (中部长)	方案3 (上长下短)	方案4 (上短下长)
第1排	6.0	4.0	8.0	4.0
第2排	6.0	6.5	7.0	5.0
第3排	6.0	9.0	6.0	6.0
第4排	6.0	6.5	5.0	7.0
第5排	6.0	4.0	4.0	8.0

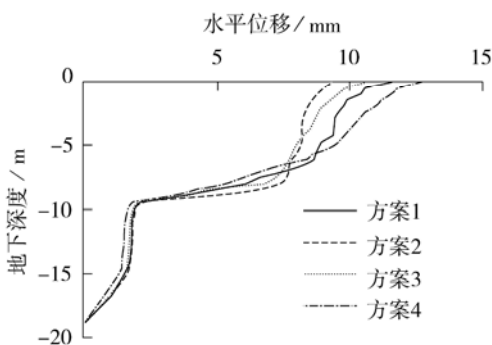


图7 不同设计方案的比较

Fig. 7 Comparisons among the different design projects

基坑上部土钉长、下部土钉短的方案的安全度最低, 基坑上部土钉短、下部土钉长的方案的安全度最高。如果以稳定计算结果为依据, 基坑上部土钉短、下部土钉长的方案是最好的设计方案, 与有限元分析得到的结论是不相同的。

这两种分析方法得到不同结论的原因主要在于极限平衡分析方法中存在的问题。首先, 极限平衡分析方法中的安全系数是对滑动圆弧圆心的抗滑力矩与滑动力矩之比, 土钉愈靠下力臂愈长, 产生的滑动力矩愈大, 故算得的安全系数愈大。其次, 在极限状态下, 基坑上部的土钉主要是受拉破坏, 下部土钉的抗力可能由弯剪和挤压强度控制, 而在现有的稳定分析中没有考虑后两种破坏形式。因此, 用现有的极限平衡分析方法是不能进行优化设计的, 只能对土钉布置较为合理的方案给出一个安全性评价。相比之下, 有限元分析就能给出较为合理的优化设计。

## 5 结 论

(1) 分析结果与实测结果有一致的变化规律, 与实测结果较为接近, 比二维有限元分析结果更合理。

(2) 为控制基坑变形, 应适当增加土钉长度, 但土

钉长度过长, 控制变形的效果并不明显, 而且土钉拉力增加不多, 强度得不到发挥, 造成浪费。

(3) 土钉设置较密时, 开挖荷载由众多的土钉共同承担, 这种群体作用可有效地约束土体的变形。

(4) 基坑开挖后边坡主要在侧向受到开挖荷载的作用。从控制基坑水平变形考虑, 土钉宜水平或接近水平设置。

(5) 土钉长度的布置方式对基坑变形有较大影响, 基坑中部土钉长的设计方案和基坑上部土钉长的设计方案较好。

本文工作得到陈肇元院士和宋二祥教授的指导, 在此表示深切感谢!

## 参考文献:

- [1] Shen C K, Bang S, Herrman L R. Ground movement analysis of earth support system[J]. J Geotech Eng Division, ASCE, 1981, 107(12): 1609~1623.
- [2] Simth I M. Three-dimensional analysis of reinforced and nailed soil[A]. Pande Pietruszczak. Numerical Models in Geomechanics [C]. Rotterdam: Balkema, 1992. 829~838.
- [3] Ho D K H, Simth I M. Modelling of soil nailing construction by 3-dimensional finite element analysis[A]. Proc Conf on Retaining Structures[C]. Cambridge: U K, 1992. 515~528.
- [4] Smith I M, Su N. Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan[J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 1997, 21: 583~597.
- [5] Tabrizi S K. 3-D finite element modelling of soil-nailed walls [D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 1996.
- [6] Zhang Mingju, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan. Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional(3-D) finite element modeling(FEM) [J]. Computers and Geotechnics, 1999(25): 191~204.
- [7] 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.
- [8] 江见鲸. 钢筋混凝土非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993.
- [9] Shen C K, Bang S, Romstad K M, et al. Field measurements of an earth support system[J]. J Geotech Eng Division, ASCE, 1981, 107(12): 1625~1642.
- [10] 宋二祥, 陈肇元. 土钉支护及其有限元分析[J]. 工程勘察, 1996, 139(2): 1~5.
- [11] 张明聚, 宋二祥, 陈肇元. 基坑土钉支护稳定分析方法及其应用[J]. 工程力学, 1998, 15(3): 36~43.