

文章编号: 1000-7598 (2010)增刊 2-0456-06

# 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟

刘 杰<sup>1</sup>, 姚海林<sup>1</sup>, 任建喜<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

**摘 要:** 以某城市大型地铁车站基坑为研究背景, 对基坑围护结构及其变形监测方案进行了设计, 并对基坑围护结构变形的现场监测数据进行了分析, 重点分析了基坑施工过程中围护结构的水平变形随基坑开挖深度和时间的变化规律。建立了弹塑性有限元模型, 并对地铁车站深基坑开挖进行施工仿真模拟计算, 将获得的围护结构变形结果与监测结果进行了对比分析, 再引用多种围护形式对基坑变形进行敏感性因素分析。结果表明: 钢支撑+围护桩的围护形式对基坑土体的侧向变形有较好的限制作用, 有限元数值计算结果与现场实测结果比较一致, 有限元计算的结果是可信的, 改变钢支撑的施作位置对限制基坑的侧向变形有重要作用。随着围护桩入土深度的增大, 土体向基坑内侧变形的趋势有所减缓。

**关 键 词:** 地铁车站; 基坑; 围护结构; 有限元; 现场监测

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

## Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit

LIU Jie<sup>1</sup>, YAO Hai-lin<sup>1</sup>, REN Jian-xi<sup>2</sup>

(1. State key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on some urban subway station foundation-pit project, retaining structure of the foundation pit and its deformation monitoring program are designed; in-situ monitoring data of the retaining structure deformation in the foundation pit are analyzed. The laws of the horizontal deformation of the retaining structure changing with the excavation depth and time are studied. Elastoplastic finite element model is built to do construction simulation calculation of the station foundation pit; FEM results and in-situ monitoring results of retaining structure deformation are compared; and sensitivity factors analyses of the foundation pit deformation are done with a variety of retaining structure form. The results showed that: the retaining form with steel support and supporting pile has good limit to the lateral deformation of the foundation pit soil. The results calculated by FEM are consistent with the in-situ monitor results; it is shown that the results of finite element analysis is credible; it plays an important role in limiting lateral deformation by change the position of steel support; with the increase of supporting pile insertion depth; the soil deformation trending to the foundation pit inside is slowed down somewhat.

**Key words:** subway station; foundation pit; retaining structure; finite elements; in-situ monitoring

### 1 引 言

地铁的建设将是我国 21 世纪城市地下空间开发的重点。我国除已开通北京、上海、天津、广州、深圳的地铁外, 正在兴建的有武汉、南京、西安等地铁, 此外国家已经批准和正在筹建地铁的城市有成都、杭州、青岛等 20 多座, 预计 21 世纪初至中叶将是我国大规模建设地铁的年代。而地铁的兴建, 产生了大量地铁车站基坑工程, 其规模和深度不断

加大, 而且一般是建在建筑较密集、人口较稠密的地区, 由于受到场地的局限性, 在基坑以外没有足够的空间进行放坡开挖, 基坑围护结构的设计与施工问题变得非常紧迫而突出, 这给当地的基坑工程建设带来了许多新的工程技术问题<sup>[1-4]</sup>。随着计算机技术的不断进步、基坑测试技术的不断提高, 各种新的设计理论和先进的测试技术不断地被应用于基坑工程中。计算机技术的迅猛发展为利用数值方法解决基坑开挖所产生的工程问题奠定了基础<sup>[5-8]</sup>。而

收稿日期: 2010-08-14

第一作者简介: 刘杰, 女, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事岩土数值解析方法及公路路基稳定性研究。E-mail: chouchou0205@sohu.com

基坑工程监测技术的进步，加速了基坑工程中信息化施工的进程，反过来又迅速提高了对基坑工程设计方法和理论的认识，基坑工程的设计原则正从强度破坏极限状态向着变形极限状态控制发展。因此，本文着眼于城市地铁车站基坑工程围护结构变形规律的研究，对基坑工程围护结构变形进行现场监测方案设计，采用有限元数值分析方法对城市地铁车站深基坑施工过程进行模拟研究，并针对不同的基坑围护形式下城市地铁车站深基坑的稳定性进行分析研究。

地质时代	层号	层底标高 / m	层底深度 / m	分层厚度 / m	柱状图 1:200	岩性
$Q_4^{ml}$	1 2	381.73	2.10	2.10		素填土; 黄褐色。土质不均, 以黏土为主
$Q_4^{pl}$	2 1 1	376.73	7.10	5.00		黄上状土; 褐黄~黄褐色。土质均匀, 具自重湿陷性和中等~强烈湿陷性。属高压缩性土。
$Q_4^{pl}$	2 1 2	371.73	12.10	5.00		黄上状土; 褐黄色。土质均匀, 具自重湿陷性和中等~强烈湿陷性。属中等压缩性土。
$Q_4^{al}$	2 2	370.03	13.80	1.70		粉质黏土; 黄褐色。土质均匀, 属中等压缩性土。
$Q_4^{al}$	2 3	369.73	14.10	0.30		黏土; 黄褐色。
$Q_4^{al}$	2 4	369.23	14.60	0.50		粉细砂; 褐黄~灰黄色。级配较差。
$Q_4^{al}$	2 5	361.98	21.85	7.25		中砂; 褐黄~灰黄色。
$Q_4^{al}$	2 6	359.83	24.00	2.15		粗砂; 褐黄~灰黄色。级配较差, 密实。
$Q_4^{al}$	2 7	358.23	25.60	1.60		砾砂; 褐黄~灰黄色。级配较差, 密实。
$Q_3^{al}$	3 4 2	349.23	34.60	6.10		粉质黏土; 黄褐色。土质均匀, 属中等压缩性土。
$Q_3^{al}$	3 7 2					中砾; 褐黄~灰黄色。级配较差, 密实。

图 1 地铁车站基坑场地典型钻孔柱状图  
Fig.1 Typical core drilling histogram of subway station foundation pit

## 2 工程概况及水文地质条件

### 2.1 工程概况

研究的地铁车站深基坑所在城市快速轨道交

通线沿该市南北向主客流走廊布设，线路全长为 32 km，共设 24 座车站。1 期工程正线全长为 26 km，全线共设 21 座车站。研究车站设 4 个进出口通道，车站两端均设新风井、排风井、活赛机械风道及风亭。基坑所在地的地面标高基本介于 383.56~383.87 m。场地地基土的组成见图 1。

### 2.2 水文地质条件

该地区测得地下水稳定水位埋深为 14.26~15.37 m，稳定地下水位标高为 368.48~369.61 m。拟建场地地下水主要赋存于冲、洪积砂层中，水量较大，潜水含水层底板约在 70~80 m。由于本区灌溉的频繁抽降，其地下水位较周围地段低，故也存在一定的侧向补给。本地设防水位为地面下 12.3 m。

## 3 车站基坑围护结构设计及监测方案

### 3.1 围护结构设计

研究的地铁车站深基坑长度为 225.7 m，基坑标准段宽度为 24.9 m，深为 14.7~15.6 m，节点部分深为 21.7 m。采用明挖顺作法施工，基坑主体围护结构采用  $\phi 1\ 000\ \text{mm}@1\ 500\ \text{mm}$  钻孔灌注桩+钢管内支撑，桩间土采用挂网喷射混凝土，桩顶设置钢筋混凝土冠梁，截面  $b \times h=1.0\ \text{m} \times 0.8\ \text{m}$  和  $1.2\ \text{m} \times 0.8\ \text{m}$ 。灌注桩及冠梁采用 C30 混凝土，中间挡土板采用 C25 混凝土。钢支撑采用内径  $\phi 600\ \text{mm}$  钢管，壁厚为 14 mm，钻孔灌注桩保护层为 70 mm。冠梁混凝土保护层为 50 mm，挡土板保护层为 25 mm。标准段基坑深度竖向设置两道支撑，水平间距为 4 m，局部区域水平间距为 3~5 m；围护桩在计算主体结构时作为永久结构进行计算。研究截面处基坑围护结构布置图见图 2。

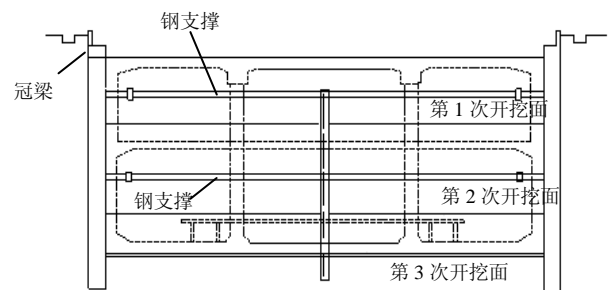


图 2 基坑围护结构布置图  
Fig.2 Layout of retaining structure of foundation pit

### 3.2 监测项目及方法

经过现场调查，重点研究的监测位置及车站基坑全貌见图 3，根据规范要求，主要的基坑监测项目及测点布置见表 1。

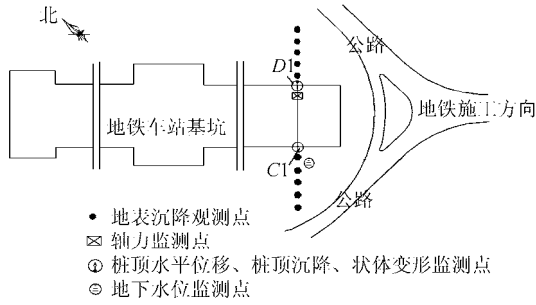


图3 重点研究的测点的位置及车站基坑周围环境布置图  
Fig.3 Locations of important measuring points and layout of the environment around the station foundation pit

### 3.3 监测结果分析

桩体水平位移是基坑监测的一个主要内容，是考察围护结构安全状况的重要指标。选取图3研究截面西侧测斜孔C1的监测数据进行分析（因东侧测斜孔D1在地表以下12m处堵塞，只能测到地表以下12m位置处）。监测点C1处桩体水平位移曲线见图4。基坑开挖的关键步骤见表2。在开挖初期，围护桩呈向坑内变形的“前倾型”曲线，桩顶水平位移最大。随着基坑的开挖和钢支撑的施作，围护桩变形曲线由“前倾型”逐渐向“弓形”变化，最大水平

表1 基坑监控项目及测点布置

Table 1 The layout of measuring points and monitoring project of foundation pit

序号	监测项目	位置或监测对象	监测精度	测点布置	仪器名称	监测频率	控制值	报警值
1	围护桩顶水平位移	钻孔桩上端部	1.0 mm	间距为10~15 m	经纬仪	基坑开挖0~5 m为1次/5 d, 5~10 m为1次/3 d, 10 m以下1次/2 d, 实际作业过程中根据桩体实际变形速率适当调整监测频率。	30 mm与0.1% <i>H</i> 取小值	24 mm
2	围护桩体变形	钻孔桩内	1.0 mm	孔间距为15~20 m, 测点距0.5 m	测斜管、测斜仪		30 mm与0.1% <i>H</i> 取小值	24 mm
3	围护桩体内力	钻孔桩内	≤1/100( <i>F<sub>s</sub></i> )	2点	钢筋应力计	开挖初期24 h监测, 开挖完毕后1次/1 d, 浇注完底板后3 d量测一次。		
4	支撑轴力	支撑端部或中部	≤1/100( <i>F<sub>s</sub></i> )	轴力较大处布置	轴力计或应变仪	开挖初期1次/(3 d), 挖至基底2~3次/d	设计轴力	控制值的80%
5	地下水位	基坑周边	1.0 mm	孔间距为15~20 m	水位管和水位计	1次/(2~4 d)		
6	地表沉降	基坑周围地面	1.0 mm	孔间距15~20 m	水准仪	1次/(3 d)	-20 mm	-16 mm

表2 关键施工阶段

Table 2 Key steps of construct process

时间/d	基坑施工阶段	时间/d	基坑施工阶段
1	基坑开挖	151	施作底板
75	施作第1道钢支撑	187	拆除第2道钢支撑
89	施作第2道钢支撑	228	拆除第1道钢支撑
136	基坑土方开挖完成		

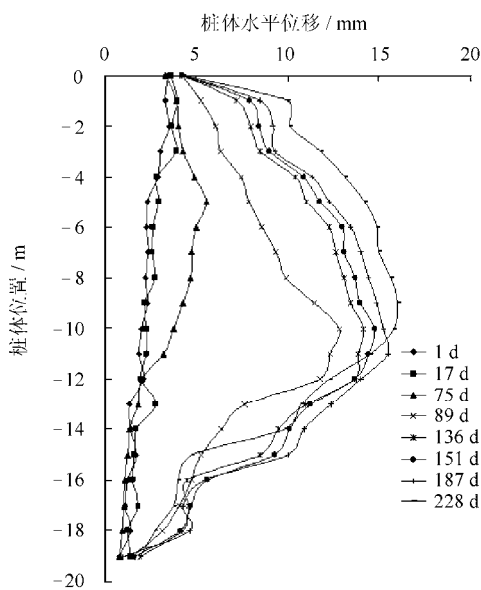


图4 关键施工阶段监测点C1处桩体水平位移曲线  
Fig.4 Horizontal displacement curves of monitor point C1 in key construction step

位移发生的部位随之下移。在施加第2层钢支撑后，桩体水平位移增加的速率有所减少，说明钢支撑可以在一定程度上限制桩体的水平变形。

## 4 有限元计算模拟及分析

### 4.1 数值计算模型

研究基坑标准段宽为24.9 m，深为15 m，围护桩长为19 m，第1道钢支撑距冠梁为3.5 m，第2道钢支撑距第1道钢支撑为6 m。基坑第1道钢支撑的设计轴力为1 980 kN，预加轴力为200 kN。第

2 道钢支撑的设计轴力为 1 500 kN, 预加轴力为 350 kN。采用有限元分析软件 ANSYS 建立有限元模型, 并进行分析, 有限元计算模型见图 5。

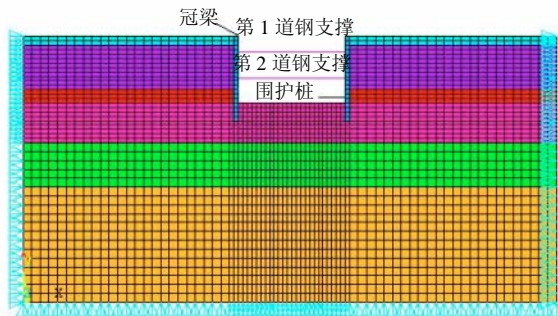


图 5 有限元计算模型  
Fig.5 FEM calculation model

### 4.2 计算参数选取

根据试验室获得的地铁车站深基坑周围土体的基本物理力学参数数据见表 3。围护桩采用 C30 混凝土, 根据经验将弹性模量  $E$  取为 25 GPa, 泊松比  $\nu$  取 0.20, 重度为 25 kN/m<sup>3</sup>。钢支撑采用线弹性杆单元模拟, 弹性模量  $E$  取 200 GPa, 泊松比  $\nu$  取 0.26。在基坑开挖前已经进行了基坑降水处理, 因此不考虑地下水对基坑围护结构变形的影响。

表 3 各层土物理力学参数  
Table 3 Physico-mechanical parameters of soils

土层	层厚 /m	重度 /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	弹性模量 /MPa	泊松比
素填土	1.8	19.80	14.50	19.50	10	0.28
黄土	10.0	19.80	23.00	16.75	25	0.32
粉质黏土	2.2	19.88	24.20	20.40	23	0.35
粗、中砂	11.0	20.03	0.00	34.00	30	0.30
粉质黏土	9.0	20.80	32.70	19.00	25	0.35
中砂	26.0	19.47	0.00	34.00	30	0.30

### 4.3 计算与监测结果对比

根据现场施工过程将基坑开挖的关键过程分为: ①初始地应力模拟; ②围护结构施工; ③基坑第 1 层土开挖; ④设置第 1 层钢支撑; ⑤第 2 层土开挖; ⑥设置第 2 层钢支撑; ⑦开挖至基底。计算结果与监测结果对比分析见图 6。

由计算结果可知, 在施作第 1 道钢支撑时, 桩顶位移偏向基坑内侧位移最大达到 2.03 mm, 随着桩体位置的下移, 桩体向坑内发展的趋势明显没有桩体上部的大。到桩底 19 m 位置处, 桩体向坑内水平位移为 0.82 mm。在刚施作第 2 道钢支撑时, 桩身水平位移不断增加, 最大位移出现在桩身 10 m 位置, 达 12.70 mm, 与监测值 12.83 mm 比较接近,

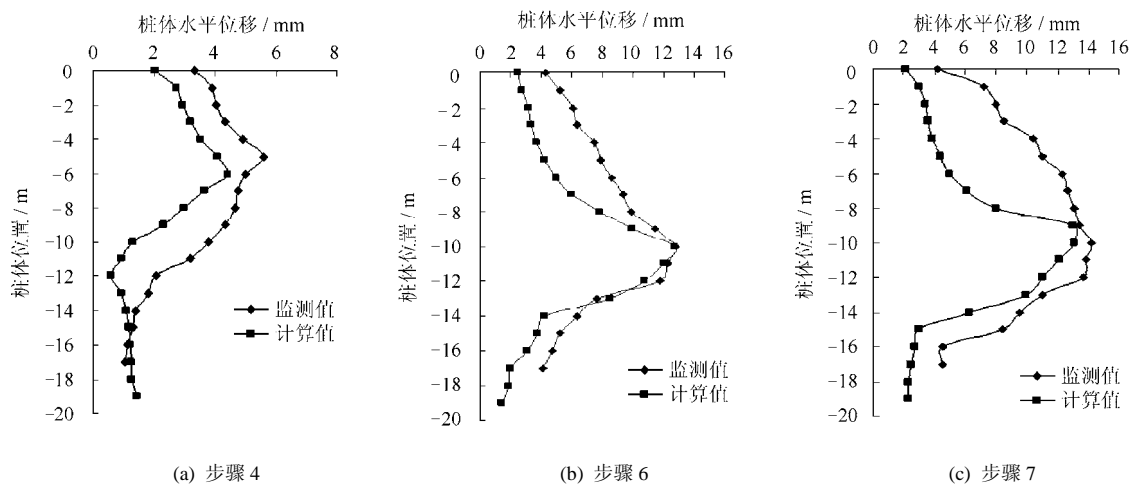


图 6 关键施工阶段围护桩水平位移监测与计算值对比曲线

Fig.6 Horizontal displacement contrast curves of monitoring and calculation values of retaining structure in key construction step

土方开挖到基底时, 桩顶位移计算值变化不大, 桩体向坑内位移在围护桩体 10 m 位置上最大, 达到 13.07 mm, 随着桩体位置的下移, 向坑内的水平变形趋势明显减缓。到桩底 19 m 位置处, 桩体向坑内水平位移为 2.28 mm。对比监测数据, 实际监测中桩体向坑内位移在围护桩体 10 m 位置上最大达到 14.17 mm, 到桩底 19 m 位置处, 桩体向坑内水

平位移达到 1.93 mm。

由于实际工程中基坑外地表受人为、车辆、施工机械、时空效应等的影响, 计算中无法考虑, 使监测和计算结果有一定的偏差。但监测结果和计算结果数值上变化趋势基本一致, 说明模型建立、参数选取以及计算方法是合理的, 计算结果能够明确地体现基坑变形的一般规律, 说明计算模型选取是

正确的。

#### 4.4 不同围护设计形式对基坑稳定性的影响

在基坑围护结构设计当中，不同的围护结构形式对基坑的稳定性影响也不同，它是由基坑的基本外在条件决定的，因此，有必要对不同的围护结构形式下的基坑进行变形的敏感性分析。

##### 4.4.1 钢支撑的位置对基坑围护结构变形的影响

分别设置5种工况：工况1为第1道钢支撑、第2道钢支撑同时向上调整2 m；工况2为第1道钢支撑不动，第2道钢支撑向上调整2 m；工况3为第1道钢支撑向上调整3 m，第2道钢支撑向下调整2 m；工况4为第1道钢支撑向上调整2 m，第2道钢支撑不动；工况5为第1道钢支撑、第2道钢支撑同时向上调整3 m。将这5种工况与设计工况进行对比，所得对比曲线见图7。

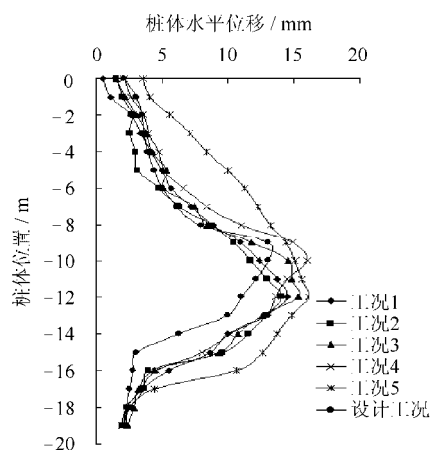


图7 钢支撑施作在不同位置时围护桩水平位移对比曲线  
Fig.7 Horizontal displacement contrast curves of retaining pile in different steel support locations

从对比曲线可以看出，同时提高两道钢支撑的位置，围护桩顶的水平变形有所减少，但围护结构的整体的水平变形加大，且最大位移发生的位置出现下移。而仅仅提高第2道钢支撑的位置，不改变第1道钢支撑的位置，与工况1的效果相差不大。提高第一道钢支撑2 m，不改变第2道钢支撑的位置，对围护桩体的水平位移影响较原设计而言有所加大。提高第1道钢支撑位置，而降低第2道钢支撑的高度，使得两道支撑之间的距离加大，钢支撑之间的土压力向坑内发展的趋势加大，同时提高1、2道钢支撑3 m时，由于基坑下部土体缺少支撑的作用，土体向坑内产生较大的侧向变形，基坑围护结构水平变形也有较显著的加大。

因此，从整体位移来看，设计工况下，对桩顶和桩身水平位移控制是合理的，进一步验证了设计

工况的合理性。

##### 4.4.2 围护桩入土深度对基坑围护结构变形的影响

为验证围护桩入土深度对基坑变形的影响，选择入土深度分别为2、6、8 m的情况下，对基坑的开挖进行数值模拟，并将结果与按照选取设计入土深度为4 m时的计算结果进行对比。所得基坑围护结构的水平变形见图8。

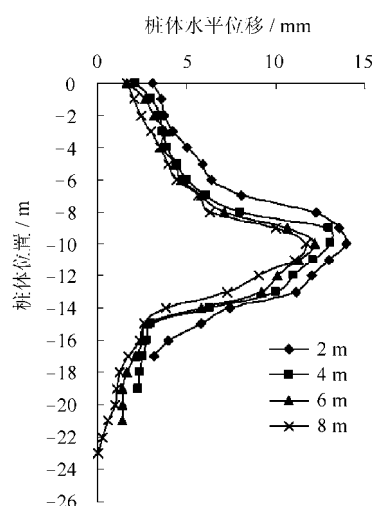


图8 围护桩入土深度不同时基坑围护桩水平位移对比曲线  
Fig.8 Horizontal displacement contrast curves of retaining pile in the condition of different depths of retaining pile in the ground

考虑了围护桩入土深度的不同，围护桩入土深度的改变对于基坑围护结构变形有一定的影响，不同入土深度情况下围护桩水平位移发展趋势基本一致，随着入土深度的增大，土体向基坑内侧发展的趋势有所减缓，但效果不明显，因此，在基坑的稳定性要求能够满足的情况下，需要确定一个合理的桩长，而单纯增加围护桩的入土深度减小变形是不经济的。

## 5 结论

(1) 通过对监测数据的分析可知，在基坑开挖过程中，围护桩体变形值小于设计值，说明基坑围护结构设计是安全合理的。

(2) 采用有限元数值分析方法对基坑开挖的施工过程进行了模拟研究，将计算结果与监测结果进行了对比，结果表明：围护桩变形及基坑周围地表变形的基本趋势大体一致。有限元计算模型和参数选取是合理的，可用于基坑工程的数值模拟分析。

(3) 初步研究了钢支撑施作位置的不同、围护桩入土深度的变化对基坑围护结构变形的影响，结果

表明: 改变钢支撑的施作位置对限制基坑的侧向变形有重要作用, 围护桩的入土深度对基坑围护结构的变形影响较明显, 需要确定一个合理的桩长, 但单纯增加围护桩的入土深度减小变形是不经济的。

(4) 为了提高模型精度, 考虑应力路径, 模型参数的取值还需要进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 赵锡宏, 等. 大型超基坑工程实践与理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 柳建国, 程良奎. 北京地区基坑支护技术的发展与工程实践[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1013—1017.  
LIU Jian-guo, CHENG Liang-kui. Pit support technology development and engineering practice in Beijing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 1013—1017.
- [3] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1885—1896.  
YANG Guang-hua. Practical calculation method of retaining structures for deep excavations and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1885—1896.
- [4] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122, (5): 337—345.
- [5] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818—823.  
GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 818—823.
- [6] POTTS D M, FOURITE A B. The behavior of a popped retaining wall, result of a numerical experiment[J]. **Geotechnique**, 1984, 34(3): 383—404.
- [7] BORJA R I. Analysis of incremental excavation based on critical state theory[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1990, 116(6): 964—985.
- [8] 谢秀栋, 刘国彬, 李志高, 等. 邻近运营地铁车站基坑开挖土层位移特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 742—744  
XIE Xiu-dong, LIU Guo-bin, LI Zhi-gao, et al. Analysis of soil layers displacement characteristics in foundation pit adjacent to subway station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(4): 742—744.
- [19] 康勇, 李晓红, 杨春和. 深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增刊 1): 3578—3583.  
KANG Yong, LI Xiao-hong, YANG Chun-he. Research on numerical tests on damage-failure mode of surrounding rock in deep-buried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2007, 26(Supp1): 3578—3583.
- [20] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报. 2009, 28(8): 1610—1619.  
ZHANG Guo-hua, CHEN Li-biao, XIA Xiang. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1610—1619.
- [21] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬. 偏压分岔隧道施工过程损伤破坏分析与优化研究[J]. 岩土力学. 2009, 30(6): 1705—1710.  
WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHENG Xue-fen. Damage analysis and optimum research on construction process for forked tunnel under bias pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2009, 30(6): 1705—1710.
- [22] ZHU W C, TANG C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2004, 37(1): 25—56.
- [23] TANG C A, LIU H, LEE PKK, TSUI Y, THAM LG. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression, part I: Effect of heterogeneity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 555—569.
- [24] ZHU W C, TANG C A, HUANG Z P, et al. A numerical study of the effect of loading conditions on the dynamic failure of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(1): 348—353.
- [25] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(2): 236—252.
- [26] 韩军, 张宏伟, 宋卫华, 等. 煤与瓦斯突出矿区地应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3852—3859.  
HAN Jun, ZHANG Hong-wei, SONG Wei-hua, et al. In-situ stress field of coal and gas outburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**. 2008, 27(Supp.2): 3852—3859.

### 上接第 441 页