

# 超深基坑开挖支护及其对临近桥墩的影响数值模拟研究

李雨润<sup>1</sup>, 杨贵生<sup>2</sup>, 梁 艳<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401; 2. 铁道部第三勘察设计院, 桥梁与隧道研究所, 天津 300142; 3. 天怡建筑设计有限公司, 天津 300051)

**摘要:** 结合上海市宜山路端井深基坑围护开挖的具体实践, 利用理论分析、数值模拟等手段, 以土与支护结构相互作用稳定性为研究核心, 对深基坑开挖过程中引起的土层位移、地表沉降的分布规律以及深基坑开挖过程对临近的明珠一号桥墩的影响进行了全面深入的研究取得了一些有创见性的成果。

**关键词:** 基坑; 支护结构; 数值模拟; 有限元软件 FLAC-3D

**作者简介:** 李雨润 (1978—), 男, 河北唐山人, 博士, 讲师, 从事土动力学与岩土工程领域相关研究。Email: iemlyr7888@163.com。

## 0 引言

随着城市建设的发展, 愈益要求开发三维城市空间, 由此产生了大量的基坑工程, 并且开挖深度逐渐增大, 陆续出现开挖深度大于 30 m 的超深基坑工程。由于基坑工程工期长、造价高、难度大, 如何合理地对待基坑支护结构体系进行设计、分析和验算, 已成为土木工程界所关注的热点课题。此外, 由于基坑开挖深度增长和工期的加长, 基坑开挖过程中对周围建筑的影响必须加以考虑, 因此, 本文通过建立有限元分析模型, 对超深基坑开挖过程对邻近桥墩的影响作了分析。

本文利用大型有限元软件 FLAC-3D, 对上海市宜山路站 9 号线一期工程基坑开挖过程, 建立了基坑工程开挖、支护模拟的有限元模型, 模拟分析了该工程开挖、支护全过程及在此过程对邻近明珠一号桥墩的影响进行了详细地分析研究。本文采用 Null 单元模拟挖掉土体, 通过时间步来定义基坑工程开挖、支护过程, 从而可以计算分析每一工况下基坑支护结构的内力、变形和地表沉降。

## 1 显式有限差分软件 FLAC-3D

### 1.1 简介

FLAC(Fast Lagrange Analysis of Continua) 由美国 Itasca 公司开发的。目前, FLAC 有二维和三维计算程序两个版本, 二维计算程序 V3.0 以前的为 DOS 版本, V2.5 版本仅仅能够使用计算机的基本内存(64 K), 所以, 程序求解的最大结点数仅限于 2 000 个以内。目前, FLAC-2D 已升级为 V5.0 的版本, 其程序能够使用扩展内存。因此, 大大发展了计算规模。FLAC-3D 是一个三维有限差分程序, 目前已发展到 V3.0 版本。

FLAC-3D 采用 ANSI C++ 语言编写的。FLAC-3D 有以下几个优点:

(1) 对模拟塑性破坏和塑性流动采用的是“混合离散法”。这种方法比有限元法中通常采用的“离散集成法”更为准确、合理。

(2) 即使模拟的系统是静态的, 仍采用了动态运动方程, 这使得 FLAC-3D 在模拟物理上的不稳定过程不存在数值上的障碍。

(3) 采用了一个“显式解”方案。因此, 显式解方案对非线性的应力-应变关系的求解所花费的时间, 几乎与线性本构关系相同, 而隐式求解方案

将会花费较长的时间求解非线性问题。因此它没有必要存储刚度矩阵,这就意味着采用中等容量的内存可以求解多单元结构;模拟大变形问题并不比小变形问题消耗更多的计算时间,因为没有任何刚度矩阵要被修改。

## 1.2 基坑开挖模拟的方法

在城市地区进行深基坑工程开挖,初始应力场为重力场。当用有限元法进行模拟基坑开挖时,一般采用反转应力释放法和空单元法,但使用有限差分法进行模拟时,一般使用空单元法。空单元法的开挖效果是通过被挖掉单元的“空单元化”,即将要挖掉单元的刚度矩阵乘以一个很小的比例因子,使其刚度贡献变得很小,可忽略不计,同时使其质量、荷载等效果的值也设为零来实现,故称为空单元法。在重力作用下,运用空单元法模拟开挖过程时,所求的应力场为该步开挖后的土体实际应力场,所求的位移场须减去初始应力场才为该步开挖后的土体实际位移场。

在FLAC-3D中,开挖是通过Null单元实现的。Null单元是用力模拟从模型中挖去的那部分单元。Null单元中的应力自动设为零。Null单元也可以用于模拟材料性质的改变,因此可以用Null单元来模拟回填。

## 1.3 围护墙体的模拟

在FLAC-3D中,围护墙体有两种模拟方式。第一种方法用实体单元来模拟墙体,用实体单元来模拟墙体可以准确地模拟土体与墙体之间相互作用,计算结果较为准确。第二种方法通过结构单元Liner单元来模拟墙体。Liner单元是FLAC-3D中6种结构单元之一。Liner单元是3节点有限单元体。Liner单元不但具有壳单元的性质而且还可以传递墙体和土体由于摩擦而产生的剪应力。在法向,Liner单元同样可以传递拉力和压力,还可以从对应的实体单元面上脱离。Liner单元通常用于模拟结构与岩土体之间的接触面,如隧道的衬砌和挡土墙。

## 1.4 预轴力的施加

对于有内支撑的基坑开挖,在支撑安装时一般要用千斤顶给支撑施加大小为其设计荷载70%~80%的预轴力。这是由于支撑除了要承受围护墙体对它的作用之外,还必须承受由于自重而产生的应力和弯矩。

在FLAC-3D中可以通过命令 Apply x-force

在支撑的两个节点处施加一对大小相等方向相反的力来模拟预轴力。

## 2 工程介绍

宜山路站为9号线一期工程终点站及站前折返站。宜山路站位于徐汇区宜山路上,北起中山西路,南至凯旋路;车站呈南北走向,为地下四层岛式站台。主体结构外包尺寸为297.40 m长,21.2 m宽,站台宽10 m。

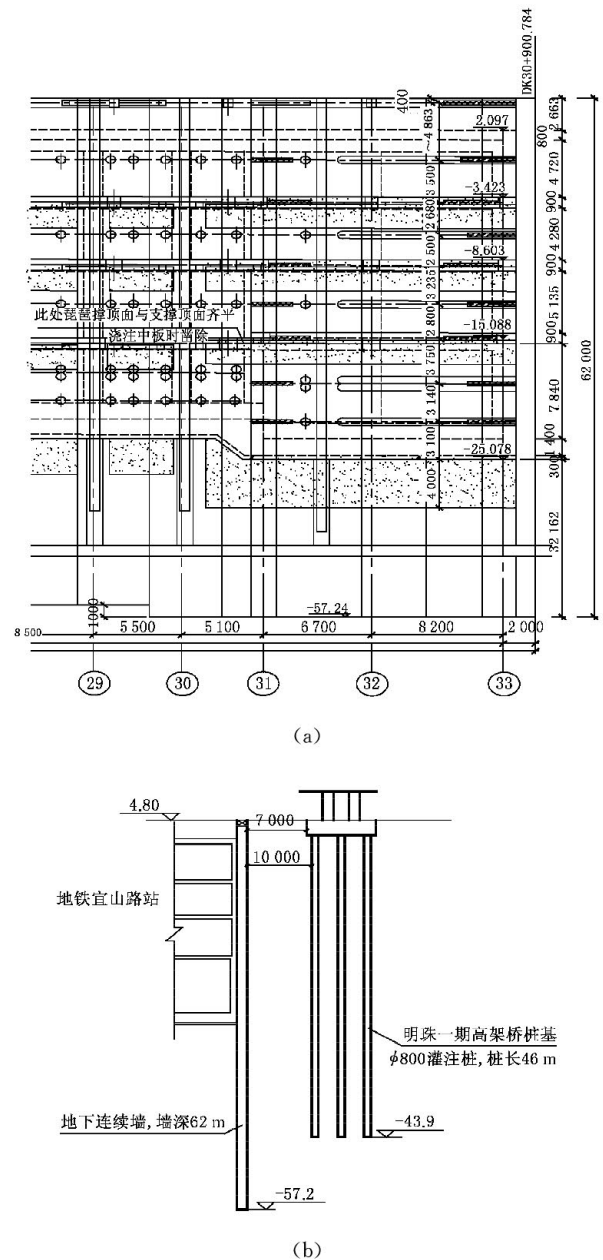


图1 宜山路站9号线一期端头井支撑及其与明珠桥墩位置关系

车站标准段:围护结构采用 1.2 m 厚、48 m 深地下墙,开挖深度为 27.875 m,入土深度 20.125 m,基坑宽度约 18.8 m,入土深度比  $\lambda = 0.722$ 。地下连续墙墙趾位于⑦1 粉质黏土层。

端头井:围护结构采用 1.2 m 厚、62 m 深地下墙,开挖深度为 29.718 m,入土深度 21.282 m,基坑宽度约 29.4 m,入土深度比  $\lambda = 0.716$ 。地下连续墙墙趾位于⑦2 层。沿基坑深度方向设置 9 道支撑。第 1、3、5、7 道为钢筋混凝土支撑,第 2、4、6、8、9 道为  $\phi 609$  单拼或双拼钢管支撑。钢筋混凝土支撑的设计考虑内部结构板与混凝土支撑的结合,支撑布置如图 1(a)所示。

### 3 数值模拟研究

#### 3.1 计算网格

几何模型长 80 m,宽 40 m,高 70 m。模型有限差分网格如图 2 所示。明珠桥墩与基坑位置关系如图 1(b)所示。

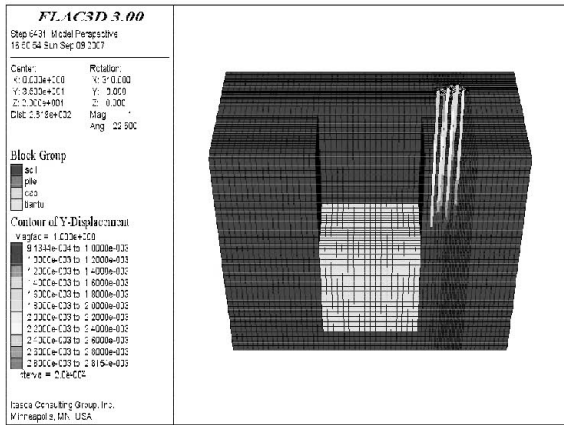


图 2 深基坑开挖端头井有限差分网格模型

#### 3.2 拟开挖步骤

为了真实的模拟开挖过程,采用 FLAC 软件中的 Null 单元及空单元来模拟开挖。在 FLAC 中用 Null 来代表从模型中挖去的那部分材料,空单元中的应力被自动设置为零。模拟开挖过程计算共分 11 步,具体实现步骤如下:

第 1 步:将模型全部赋为弹性材料,加上均匀的地应力场,形成初始地应力场。将模型全部赋为弹性是为了防止在形成初始应力场时,产生塑性变形。

第 2 步:消除与初始地应力场相对应的位移场。在 FLAC 中用命令 Initial 可以将位移变

为零。

第 3~11 步,分别模拟开挖至每道钢支撑底面以下 0.5 m 时安装该道钢支撑;开挖到每道混凝土支撑底面高程时施工制作该道混凝土支撑,并在每道支撑安装完毕开挖到下一道支撑设计高程时计算使之达到平衡。

#### 3.3 计算参数

表 1 土层及桥墩计算参数表

土层序号	体积模量 (MPa)	剪切模量 (MPa)	密度 (g/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 (°)	内聚力 (kPa)
1	105×10 <sup>6</sup>	36×10 <sup>6</sup>	1900	26	11.3×10 <sup>3</sup>
2	52.5×10 <sup>6</sup>	17.25×10 <sup>6</sup>	1817	9.4	14.4×10 <sup>3</sup>
3	72×10 <sup>6</sup>	24×10 <sup>6</sup>	1900	28.4	12.9×10 <sup>3</sup>
4	36×10 <sup>6</sup>	13.5×10 <sup>6</sup>	1779	11.5	16×10 <sup>3</sup>
5	61.5×10 <sup>6</sup>	27.57×10 <sup>6</sup>	1953	29.6	12.3×10 <sup>3</sup>
6	34.5×10 <sup>6</sup>	12.75×10 <sup>6</sup>	1880	11.5	26.5×10 <sup>3</sup>
7	82.5×10 <sup>6</sup>	27×10 <sup>6</sup>	1936	17	30.9×10 <sup>3</sup>
8	75×10 <sup>6</sup>	34.5×10 <sup>6</sup>	1911	17.8	35.1×10 <sup>3</sup>
9	210×10 <sup>6</sup>	96×10 <sup>6</sup>	1900	35	0
桥墩	1.49×10 <sup>10</sup>	1.02×10 <sup>10</sup>			

#### 3.4 地表沉降以及测点变形结果

通过计算不同开挖步骤对地表各测点沉降位的影响可以看出,最大地表下沉发生在开挖第 9 步的时候,沉降量为 28.7 mm,地表沉降曲线见图 3~图 6,从第 5~9 步随着开挖的进行,沉降增长的趋势变得不太显著。从图 4 中还可以看出,随着基坑开挖步数的增加,地表位移的沉降量也再逐步增大,距离基坑较远处发生的地表沉降值较基坑附近地表沉降值要大。

基坑开挖过程是基坑开挖面上卸荷的过程,由于卸荷而引起坑底土体产生以向上为主的位移,同时也引起围护墙体在两侧压力差的作用下而产生的墙外侧位移。通过对以上计算结果分析可以得出基坑开挖过程土体移动机理。由于基坑开挖垂直卸荷作用改变坑底土体原始应力状态,基坑底部土体在卸荷后产生垂直弹性隆起。基坑周围土体向下移动,以补充由于基底隆起而损失的土体。通过以上的计算可以得出结论,如果使用 62 m 的地下连续墙体和 5 层钢管支撑加 4 层钢筋混凝土梁的支撑体系,基坑在开挖过程中和开挖结束后,都还处于十分稳定的状态,基坑的周围土体的地表最大沉降量小于开挖深度的 0.1%,围护墙体最大水平位移为 41.2 mm,同样满足小于开挖深度的 0.14%。

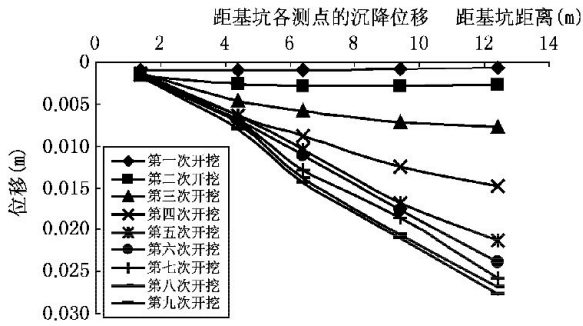


图3 基坑右侧各测点随开挖次数的沉降

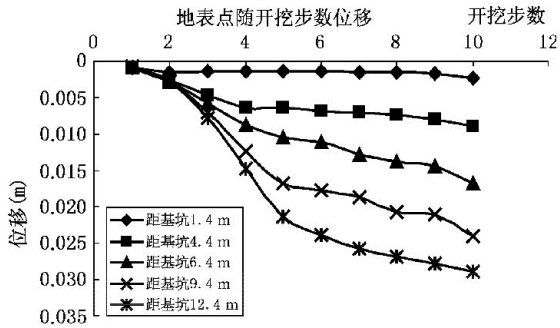


图4 随着开挖次数基坑右侧地表点的沉降值

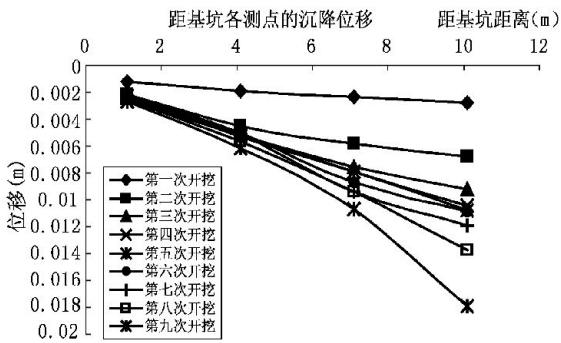


图5 基坑中部后面各测点随开挖次数的沉降值

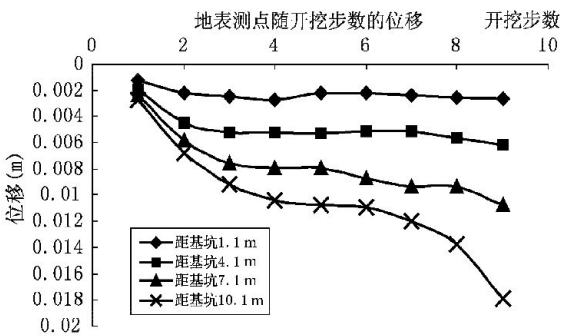


图6 随着开挖次数基坑中部地表点的沉降值

### 3.5 基坑开挖对邻近桥墩的影响分析

图7给出了明珠一期桥墩距基坑最远桩、最近桩及桩承台沉降随基坑开挖步数的变化曲线，

从图中可以看出，桩基和承台沉降值随着基坑开挖深度的增加而增大，距离基坑较近端桩与承台的沉降值比较接近，其量值大小分别为 2.759 mm 和 2.955 mm，距离基坑较远端桩基沉降量相对较小，其量值为 1.565 mm，均满足桥墩沉降设计要求。

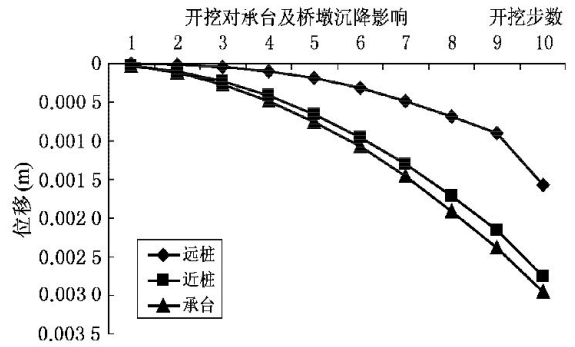


图7 桥墩桩基及承台沉降与开挖步数关系

图8给出了桥墩桩基沉降位移云图结果，从图中可以看出桥墩下面6根桩基沉降量是不同的，距离基坑附近的桩沉降量比较大，远处桩的沉降量相对较小。图9给出了桥墩承台竖直方向的

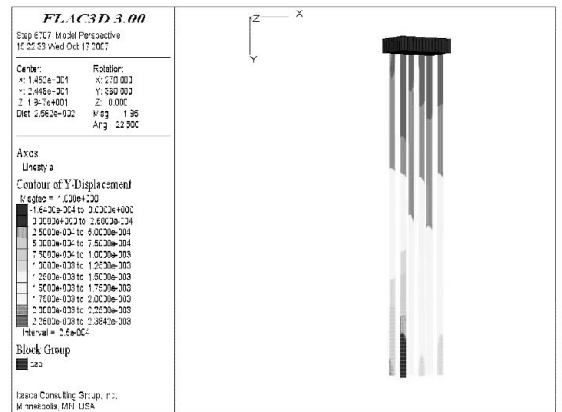


图8 桥墩桩基 Y 方向位移云图

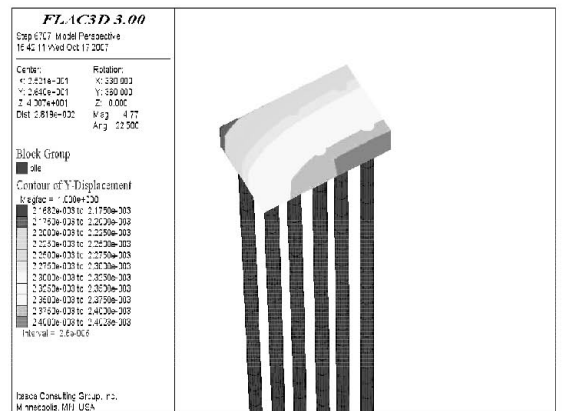


图9 桥墩承台 Y 方向位移云图

沉降分布图,从图中可以看出,距离基坑最近处承台的竖向沉降与远端相比较较大。

## 4 结 论

本文结合上海市宜山路实际基坑工程,利用大型有限元分析软件 FLAC-3D 对基坑开挖过程土体的变形影响进行的数值模拟研究。分析研究结果表明:

(1) 利用大型有限差分数值模拟软件进行超深基坑开挖的数值模拟研究是切实可行的,模拟分析得到的数值结果满足工程以及理论上的基本要求,与实际工程测量结果大致吻合。

(2) 基于数值模拟结果,随着开挖步数的增加,基坑支护外侧土体的位移量逐渐增加,最大沉降量发生在第 9 步,沉降值大小为 28.7 mm,满足工程需要。此外,随着基坑开挖步数的增加,地表位移的沉降量也在逐步增大,距离基坑较远处发生的地表沉降值较基坑附近地表沉降值要大。

(3) 基于数值模拟结果,基坑开挖过程是基坑开挖面上卸荷的过程,由于卸荷而引起坑底土体产生以向上为主的位移,同时也引起围护墙体在两侧压力差的作用下而产生的墙外侧位移。基坑在开挖过程中和开挖结束后,都还处于十分稳定

的状态,基坑的周围土体的地表最大沉降量小于开挖深度的 0.1%,围护墙体最大水平位移为 41.2 mm,同样满足小于开挖深度的 0.14% 要求。

(4) 基于数值模拟结果,桩基和承台沉降值随着基坑开挖深度的增加而增大,距离基坑较近端桩与承台的沉降值比较接近。桥墩下面 6 根桩基沉降量是不同的,距离基坑附近的桩沉降量比较大,远处桩的沉降量相对较小。

## 参 考 文 献

- [1] 王素霞. 基坑开挖对临近建筑物影响的数值分析研究[D]. 南京:南京工业大学,2006.
- [2] 应捷. 考虑土-结构相互作用的深基坑弹性地基有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
- [3] 彭戡. 紧邻地铁与高架的深大基坑工程支撑、降水和开挖施工技术[J]. 建筑施工,2006,28(10): 804~806.
- [4] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,1994.
- [5] 龚晓南. 土的塑性力学[M]. 2版. 杭州:浙江大学出版社,1999.
- [6] Tai D, Small J C. Analysis of pile raft systems in layered soils[J]. Int Jnl Num Anal Mechs In Geomechs, 1996, 20.