

# 深基坑开挖过程及空间效应影响的数值模拟

商卫东<sup>1</sup>, 聂庆科<sup>1</sup>, 白冰<sup>2</sup>, 吴刚<sup>2</sup>

(1. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北石家庄 050031; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:**结合工程实例,利用 FLAC<sup>3D</sup>有限差分法分析软件对某双排桩深基坑的开挖和支护过程进行模拟,分析了开挖过程中土体位移场的变化规律。研究表明,支护结构和土体的空间受力性状、土与支护结构之间的相互作用以及施工开挖过程等均会对支护结构的受力状态和变形特性产生显著影响。此外,还讨论了双排桩之间土体刚度的变化对位移和沉降的影响,表明适当地增加两排桩之间土体的刚度能有效地减小基坑外侧土体的位移。

**关键词:**深基坑开挖;支护结构;双排桩;空间效应;数值模拟

**中图分类号:**TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)01-0034-04

**Numerical Simulation on Space Effect for a Deep Foundation Pit Excavation/SHANG Wei-dong<sup>1</sup>, NIE Qing-ke<sup>1</sup>, BAI Bing<sup>2</sup>, WU Gang<sup>2</sup>** (1. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Using the finite difference procedure FLAC<sup>3D</sup> to simulate the excavation process of a deep foundation pit by a double-row piles retaining structure, the paper analyzed the change of soil displacement fields in the excavation process. The studies showed that the space mechanics character of retaining structure and soils, the interaction between soil and retaining structure and the excavation procedure obviously affect the displacement and settlement of the retaining structure. The paper also discussed influence of stiffness change of soil between double-row piles on displacement and settlement, the displacement and settlement of lateral soil of foundation pit could be decreased by properly increasing the stiffness change of soil between double-row piles.

**Key words:** deep foundation pit excavation; retaining structure; double-row piles; space effect; numerical simulation

## 0 引言

深基坑支护工程是一个涉及到土力学、水力学等诸多方面的一个古老而又具有时代特点的岩土工程课题,是一项综合性很强的系统工程。它是为了保证基坑开挖过程的顺利进行及基坑周边环境的安全,对基坑侧壁采取的一种支挡、加固和保护措施。基坑工程支护研究的主要内容包括<sup>[1,2]</sup>:基坑支护体系的强度和变形控制、基坑坑底和挡土墙后土体的变形控制、周围建筑物的安全和变形控制以及相关地面地下管线的安全和变形控制等。随着大量高层、超高层建筑以及地下工程的不断涌现,对基坑工程的研究也得到越来越多的重视。

目前,理论分析仍然是分析基坑开挖和支护的一个重要途径<sup>[3,4]</sup>,而在分析时一般需要首先得到作用在结构物上的土压力及结构的简化模型。例如,在进行双排桩支护结构的分析时,要先确定土压力在前、后排桩上的分布情况以及桩顶端的联结和底端的嵌固状态等,然后再分析桩间土对前、后排桩的作用效应以及土体滑裂面对土压力分布状况的影响。必要时,还要考虑联系梁的空间协调作用、桩-

土之间的相互作用等因素。利用这一思路已经得到大致三类理论计算模型<sup>[5,6]</sup>:基于经典土压力理论确定的计算模型;基于 winkle 假定的计算模型;基于土拱理论建立的计算模型。

近年来,数值分析已成为基坑开挖和支护结构研究的一个重要手段。利用数值计算可以很好地分析基坑的受力和变形性状,从而揭示支护结构以及周围土体的力学和变形机理,因而得到人们的重视<sup>[7]</sup>。本文结合工程实例,利用 FLAC<sup>3D</sup>有限差分法分析软件,通过建立考虑空间效应的三维数值模型,来模拟某双排桩深基坑的开挖和支护过程,进而分析开挖过程中土体位移场的变化规律。

## 1 工程概况和土性参数

某高层住宅楼地基为第四系冲(洪)积地层,场地地下水共分3层,其中第I层为第四系潜水,有稳定水位,水位埋深2.5m,第II、III层为弱承压水。地下水对混凝土具弱结晶类侵蚀。

场地的基本工程地质和水文地质状况如下:

①杂填土,主要由建筑垃圾及炉渣等组成,层厚

收稿日期:2008-09-30

作者简介:商卫东(1969-),男(汉族),河北定州人,河北建设勘察研究院有限公司高级工程师,建筑工程专业,从事岩土工程设计和施工,河北省石家庄市建华南大街58号。

0.7 ~ 1.1 m;

②粉质粘土,黄褐色,可塑~软塑状态,局部流塑,结构性差,振动有水析出,层厚 2.3 ~ 5.2 m;

③粉土,黄褐色~灰色,湿~很湿,中密状态,有蜗牛残骸及粉质粘土夹层,层厚 2.2 ~ 4.0 m;

④粘土,可塑~软塑状态,土质均匀,层厚 3.5 ~ 4.8 m;

⑤粘土,灰色~灰黄色,可塑~硬塑状态,团粒结构,有大孔,土质均匀,层厚 1.8 ~ 2.2 m;

⑥细砂,灰褐色,湿~很湿,中密状态,具水平层理,主要成分为石英、长石,粘粒含量较高,内含贝壳残骸,层厚 1.2 ~ 1.4 m,  $f_k = 175$  kPa;

⑦粉质粘土,灰褐色~黄褐色,可塑~硬塑状态,夹灰色条带,层厚 1.1 ~ 2.7 m,  $f_k = 215$  kPa;

⑧粉质粘土,黄褐色~棕黄色,可塑~软塑状态,含少量的小姜石,层厚 0.9 ~ 1.4 m,  $f_k = 180$  kPa;

⑨粘土,黄褐色,可塑~硬塑状态,含姜石 1% ~ 2%, 粒径 1 ~ 2 cm, 有粉质粘土夹层,结构性较好,层厚 2.9 ~ 5.7 m,  $f_k = 300$  kPa。

### 2 基坑围护结构设计

该基坑开挖深度为 8.3 m, 电梯井处局部深度为 10.2 m。基坑围护结构采用双排钻孔灌注桩并在桩顶设置冠梁的支护结构形式, 以充分利用其占地空间小及三维空间结构刚度大的优势。前排桩和后排桩间距 1.2 m, 呈梅花形布置。在两排桩的桩顶设置冠梁, 梁高 0.6 m, 梁宽 2 m。冠梁与支护桩为刚性连接。这样, 支护结构就形成了刚度很大的三维空间结构。支护结构外侧设置深层搅拌桩作为隔水帷幕。

基坑围护结构的主要设计参数:

(1) 支护桩: 桩径 0.6 m, 桩长 16.65 m, 混凝土强度等级为 C25, 支护桩钢筋笼主筋为 12 $\phi$ 25, 布置支护桩 146 根;

(2) 深层搅拌桩: 双轴深层搅拌桩总共布置 580 根, 桩长 12.0 ~ 12.2 m (受自然地面标高的影响而有一定变化), 单轴直径 0.7 m, 帷幕宽度 1.2 m;

(3) 冠梁: 宽 2.0 m, 高 0.6 m, 混凝土强度等级 C30。

采用坑内管井降水法降低地下水位, 从而使得基坑开挖过程中不受地下水的干扰, 又避免了大面积降水对周围建筑的影响。

支护结构几何尺寸和材料计算参数如下: 双排

桩的直径为 0.6 m, 桩长为 16.65 m, 泊松比为 0.3, 弹性模量为  $2.8 \times 10^3$  MPa; 冠梁的梁高为 0.6 m, 梁宽为 2 m, 泊松比为 0.35, 弹性模量为  $3 \times 10^3$  MPa。将实际场地地质资料概化后, 各土层的土性计算参数见表 1。

表 1 土性参数表

层号	土层性质	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c / \text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$	$E / \text{MPa}$	$\mu$	土层厚度/m
①	杂填土	17.2	10.0	10.0	4.31	0.28	0.8
②	粉质粘土	19.6	20.5	23.4	6.11	0.25	4.6
③	砂质粉土	19.3	17.1	29.6	6.49	0.33	3.6
④	粉质粘土	18.2	20.3	8.6	5.43	0.26	4.2
⑤	粘土	19.2	55	14.6	6.45	0.18	2.1
⑥	细砂	18.9	2	34	6.66	0.34	1.5
⑦	粉质粘土	19.5	20.2	22.2	6.45	0.28	1.0
⑧	粉质粘土	19.4	20.5	23.4	6.12	0.22	2.2
⑨	粘土	19.2	65	14.4	6.44	0.16	2.0

### 3 计算模型和计算过程

该基坑呈不规则形状, 南北距离约为 28.0 m, 东西最大距离为 32.8 m, 最小距离为 22.2 m, 坑深 8.3 m。考虑到计算模型的边界效应, 取长 92.8 m, 宽 76.8 m, 高 18.6 m 的三维空间进行分析 (见图 1), 共划分 27816 个网格, 30020 个节点, 基坑坑底采用固定约束。为节省计算工作量, 双排桩周围网格较密, 远处渐疏。基坑外侧设置有深层搅拌桩, 阻隔了地下水渗流的存在, 故可假定基坑外侧土体无渗流力作用。土体本构模型采用莫尔-库仑弹塑性模型。用 FLAC<sup>3D</sup> 中的桩单元来模拟双排桩, 用壳单元来模拟冠梁 (见图 2)。

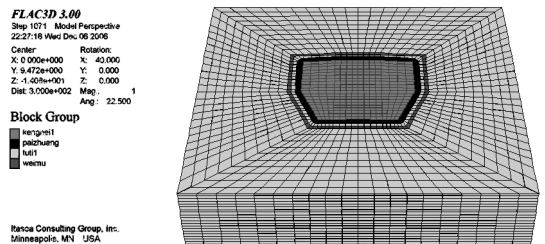


图 1 计算模型

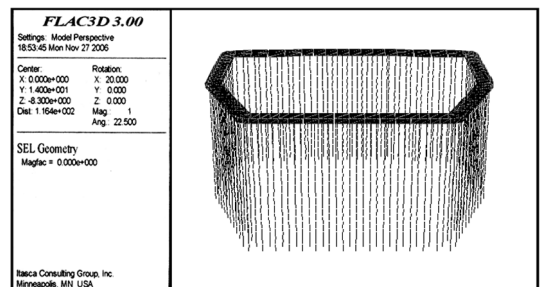


图 2 双排桩支护结构的空分分布

用 FLAC<sup>3D</sup> 进行分析时,基坑开挖模拟的具体过程如下<sup>[8]</sup>:

- (1) 建立支护结构和整个土体的计算模型;
- (2) 模拟土体在自重应力作用下的沉积固结过程,进行初始地应力平衡;
- (3) 在给定的边界条件和初始条件作用下,通过对最大不平衡力、节点速度或位移的监控,判断模型是否达到平衡状态,即判断最大不平衡力的值是否降到一定范围内;
- (4) 激活支护结构单元,赋予结构单元计算参数;
- (5) 自重位移归零,利用 model null 命令逐层挖空坑内的土体。

### 4 计算结果与分析

#### 4.1 开挖过程及空间效应

对于所分析的基坑,北侧坑壁长度最大,坑壁中部和坑壁两个角点处可能会由于空间效应而引起较大的受力和变形差异,所以重点分析北侧坑壁的位移和沉降变化规律。图 3 分别给出不同开挖步骤下(分 4 步进行,前 3 步各 2 m,第 4 步 2.3 m),与北侧坑壁垂直方向(即 y 方向)的位移色谱图。

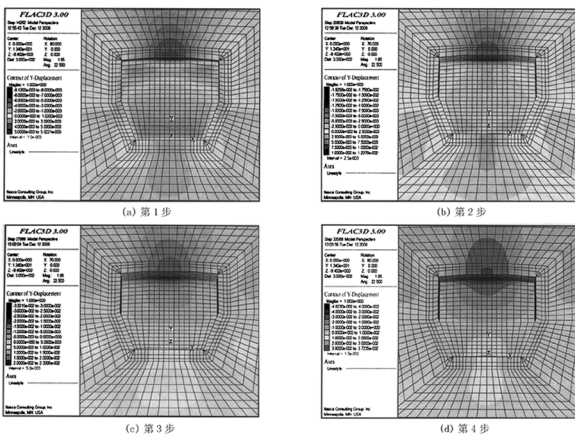


图 3 垂直于基坑侧壁方向(y 方向)的位移色谱图

由图 3 可以看出,随着开挖过程的进行,位移逐步增大。计算过程中也可得到对应于图 3 的四个步骤的沉降(即 z 轴方向)色谱图。为简化,图 4 只给出第 4 步的沉降(即 z 轴方向)色谱图。

计算结果表明,第 1 步、第 2 步、第 3 步和第 4 步开挖完成后,基坑北侧的最大位移分别为 9.12、19.3、33.2 和 48.2 mm。现场监测资料也表明,在开挖完成后垂直坑壁方向(即基坑北侧中部)的位移最大,其值为 37.4 mm。可见,数值计算与实测结果吻合较好,表明数值模拟过程是比较合理的。

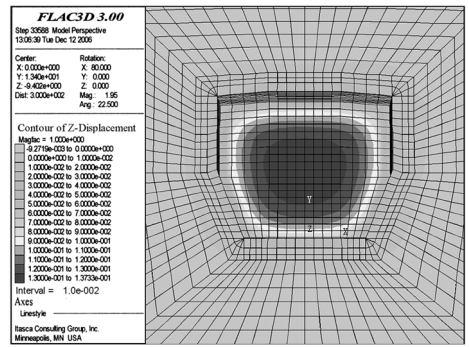


图 4 第 4 步开挖完成后 z 方向的位移色谱图

图 5 给出了开挖过程中,围护结构顶端(北侧)垂直于坑壁方向的位移变化规律。可见,随着基坑开挖过程的进行,北侧坑壁支护结构顶端的水平位移不断增大。而且,在坑壁的不同部位,位移增加的速率也不相同。在支护结构的两个角点处,由于受另一侧支护结构的约束作用,位移量很小,而在基坑中部区域,支护结构两端的约束作用已很小,所以位移量要大得多。而且,随着开挖深度的增加,这种空间效应也愈加明显。

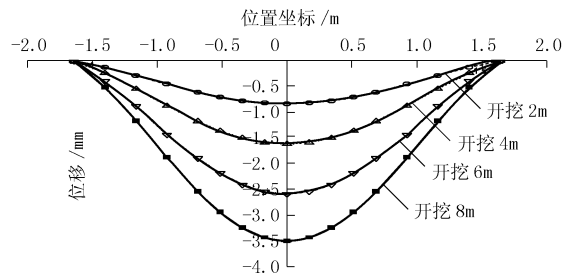


图 5 坑壁顶面水平位移变化曲线

图 6 给出了北侧坑壁的沉降(即 z 方向)变化规律。由图 6 可以看出,随着开挖深度的增加,沉降值也在不断增大,而且基坑中部区域沉降量要远大于基坑边角处的沉降量。

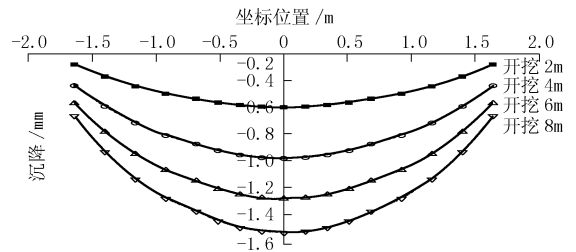


图 6 开挖过程中坑壁顶面沉降变化

由以上分析可知:基坑支护结构的位移和沉降量的分布均呈现明显的空间效应,基坑边角处的水平位移和沉降量均较小,而在基坑中部则有最大值。所以,在对双排桩支护结构进行设计时,应该根据空

间位置的不同来确定双排桩支护结构的设计参数。例如,在坑壁中部应适当增加支护结构的刚度和入土深度,以控制中部位置较大的结构变形,而在基坑边角处,桩体的刚度和入土深度可以适当地减小,从而达到优化基坑支护结构设计参数的目的。

#### 4.2 双排桩之间土体加固效应的影响

在基坑支护工程中,由于止水的需要,经常需要对排间土采用诸如搅拌桩、旋喷桩或注浆等方法进行加固。为研究排间土体加固效应的影响,分别取不同的土体模量进行了比较计算(假定土体加固前的模量为  $E$ )。表 2 和图 7 给出不同排间土体刚度下,坑外土体的最大位移。

表 2 不同桩间土体刚度条件下土体的最大位移值

刚度	位移/mm	刚度	位移/mm
0.25E	191.5	1.5E	31.9
0.5E	95.8	1.75E	27.5
0.75E	64.5	2E	23.9
1E	47.6	2.25E	21.3
1.25E	38.1	2.5E	19

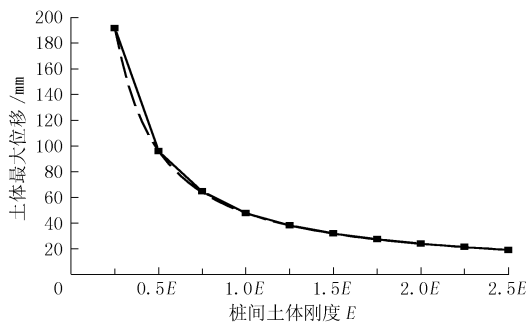


图 7 土体最大位移值随桩间土体刚度变化关系

由图 7 可以看出,当对双排桩之间的土体进行加固时,能有效减小坑外土体的位移,特别是当双排桩之间的土体刚度较小时,加固效果非常明显。但是当桩间土体的刚度达到一定值后,其对位移的减小程度就不明显了。可用双曲线关系来拟合最大位移与桩间土体刚度之间的关系,即:

$$y = 47.62/x \quad (1)$$

式中: $y$ ——支护结构的最大位移量; $x$ ——间土体的模量,方差  $R^2 = 0.99$ 。

#### 5 结论

(1) 基坑开挖过程数值模拟表明,随着基坑开挖深度的增加,空间效应越来越明显。因此,在对双排桩支护结构进行设计时,应适当地增加坑壁中部处支护结构的刚度和入土深度,以控制中部位置较大的结构变形,从而可达到优化基坑支护结构设计参数的目的。

(2) 当双排桩之间的土体刚度比较小时,对土体进行加固能明显地减小坑外土体的位移(特别是最大位移)。而当桩间土体的刚度达到一定值后,桩间土体刚度的增大对位移的减小程度就不明显了。可用双曲线关系来拟合最大位移和桩间土体刚度之间的关系。

(3) 由于支护结构和土体的空间受力性状、土与结构之间的相互作用和基坑的施工过程等都对基坑支护结构的受力状态产生显著的影响。因此,建立三维数值模型模拟施工开挖过程,并对关键设计参数进行研究是十分有价值的。

#### 参考文献:

- [1] 王军,王磊,肖昭然. 双排桩支护排距的有限元分析与研究[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(7):1096-1099.
- [2] 白冰,肖宏彬. 岩土工程若干理论与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [3] 熊巨华. 一类双排桩支护结构的简化计算方法[J]. 勘察科学技术,1999,(2):32-34.
- [4] 曾定帮,彭文祥. 双排桩与止水帷幕复合支护在基坑工程中的应用[J]. 岩土工程界,2005,8(6):47-48.
- [5] 俞建霖. 基坑性状的三维数值分析研究[J]. 建筑结构学报,2002,23(4):65-70.
- [6] 赵成刚,白冰,王运霞. 土力学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 孙凯,许振刚,刘庭金,等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):293-298.
- [8] 尹清锋,白冰. FLAC<sup>3D</sup>及其在地下空间开挖分析中的一些问题[J]. 西部探矿程,2005,17(11):1-3.

### 张涿高速公路开工

新华网河北频道消息 2008 年 12 月 26 日,备受张家口、涿州两市人民关注的张(家口)涿(州)高速公路在涞水县九龙镇举行奠基仪式,标志着该项目正式全线开工。计划建设工期为 3 年。

张涿高速公路起于张家口涿鹿县城东北单家堡,与京化高速相接,在张家口市境内经涿鹿县城东、栾庄、黑山寺、卧佛寺、孔涧、谢家堡,在岔河村东进入保定市,然后经九龙镇、

紫石口、三坡、都衙、娄村、西水北,在涿州榆林村北接张石高速公路密涿支线。路线全长 155.944 km,总投资 154.604 亿元,其中张家口段 83.566 km,保定市境内 72.378 km。全线按全封闭双向四车道高速公路标准建设,行车时速根据不同地形条件分别采用 100 km 和 80 km 设计。

张涿高速公路建成后,将开辟一条京张对接的新通道。