

文章编号: 1007-2993(2009)06-0288-04

地库开挖对已建主楼影响的数值模拟

吴超 叶朝汉 樊向阳

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200438)

【摘要】 在基坑开挖过程中, 邻近重要建筑物的保护是一个重要的研究课题。对于含有地下车库和主楼的大面积基坑, 往往主楼的开挖和建造先于地下车库, 而地库往往紧挨着主楼, 这就必然出现地库开挖对已建或在建主楼的影响问题。本文结合实际工程, 采用有限元分析方法, 模拟地库开挖对已建主楼的影响情况。

【关键词】 基坑开挖; 建筑物; 主楼; 有限元分析

【中图分类号】 TU 433

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2009. 06. 005

Numerical Simulation of Pit Excavation on Constructed Main-Buildings

Wu Chao Ye Chaohan Fan Xiangyang

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200438, China)

【Abstract】 Protection of adjacent important buildings is an essential subject during pit excavation. As for a wide foundation pit with underground garage and main buildings, the excavation and construction of main buildings may precede underground garage. In general, the underground garage is often close to main buildings, which would lead to such serious problem inevitably, the excavation of underground garage has great influence on main buildings constructed or under-construction. Based on practical engineering, finite element method is utilized to simulate this problem.

【Key words】 pit excavation; buildings; main buildings; finite element analysis

0 引言

在城市高层建筑、地铁工程、市政工程建设中, 深基坑开挖一般都处于较复杂的周围环境中, 基坑开挖必然会对周围土体的应力场和位移场产生影响, 从而引起基坑周边地表及建筑沉降变形^[1-5], 若设计或施工处理不当, 会导致周边建筑物或地下管线等^[6-9]产生较大的变形而破坏, 造成严重的危害。

对目前含有主楼与地下车库的大面积基坑, 业主为了早早开盘, 往往首先开挖和建造主楼, 待主楼建至 1~2 层或封顶回填后, 再开始地下车库的开挖, 而地下车库一般紧贴着主楼或离其较近, 地库的开挖必然会对已建主楼产生较大的影响, 上海莲花路的倒楼事件, 恰恰是由于没注意此问题。因此, 准确预测地下车库开挖对已建主楼影响的问题, 越来越引起工程界的重视。

地下车库开挖对已建主楼的影响是目前基坑工程的重点和难点课题, 常规的计算方法难以考虑复杂的边界条件和诸多因素的影响, 而以有限元为代表的数值方法^[10]采用网格单元离散计算域, 可考虑复杂

的地质条件、施工过程等诸多因素, 十分适合于深基坑工程的计算分析。笔者拟采用弹塑性有限元法, 结合一实际工程, 分析预测基坑开挖对已建主楼的影响。

1 工程概况

1.1 工程简介

某工程位于上海市浦东新区, 拟建建筑物由 9 栋主楼及 1 层地下车库组成, 主楼为 18 层的高层建筑, 设 1 层地下室, 主楼与地库的基础型式均为桩筏基础。该工程±0.000 相当于绝对标高 4.70 m, 场地自然地面绝对标高按 3.900 m 考虑, 即相对标高 -0.800 m, 基坑开挖深度按边反梁垫层底考虑, 主楼开挖深度为 3.50 m, 地下车库开挖深度为 6.10 m。

1.2 工程地质条件

根据岩土工程勘察报告, 本场地浅部土层分布见表 1。

表 1 基坑围护设计参数一览表

层号	土层名称	重 度 /(kN·m ⁻³)	渗 透 系 数 /(cm·s ⁻¹)	c/kPa	φ/(°)
②	粉质粘土	18.9	3.0×10 ⁵	17.0	21.0
③	淤泥质粉质粘土	17.6	2.0×10 ⁶	10.0	19.5

续表

层号	土层名称	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
	粉质粘土				
④	灰色淤泥质粘土	16.7	5.5×10^{-7}	13.0	12.0
	质粘土				

本工程场地地质条件特点:

第①层杂填土,结构松散,含碎石、砖块等建筑和生活垃圾,在施工围护桩前应做好相应的清障工作。

第②层粉质粘土,土性物理力学性质指标较好,固结快剪峰值指标粘聚力 $c = 17 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$,渗透系数较小,对基坑的稳定性比较有利,在暗浜区域该层缺失。

第③层灰色淤泥质粉质粘土夹粘质粉土,状态流塑,,本工程基坑开挖面位于该层,对基坑的变形影响较大,同时渗透系数较大,应做好相应的降水、止水工作。

本工程场地内有暗浜分布,为了保证围护桩的成桩质量建议对暗浜采取换填或加固处理。

2 围护方案

主楼:主楼部分挖深 3.5 m,采用一级放坡开挖,放坡坡比为 1 : 1.5,止水帷幕采用 2 ϕ 700@1000 双轴水泥土搅拌桩,长度 8 m,设置于放坡坡顶。坡面上设置 60 厚 C20 混凝土护坡,内配 $\phi 6.5@300$ 双向钢筋。

地下车库:地库挖深 6.1 m,采用两级放坡,放坡坡比均为 1 : 1.5,第一级开挖深度 3.5 m,即挖至主楼坑底,第二级开挖深度 2.6 m,中间设置 3.0 m 宽平台;平台上设置轻型井点降水,场地内部止水帷幕采用 2 ϕ 700@1000 双头搅拌桩,长度 6 m,设置于平台上。坡面及平台上设置 60 厚 C20 混凝土护坡,内配 $\phi 6.5@300$ 双向钢筋。

基坑围护典型断面剖面图见图 1。

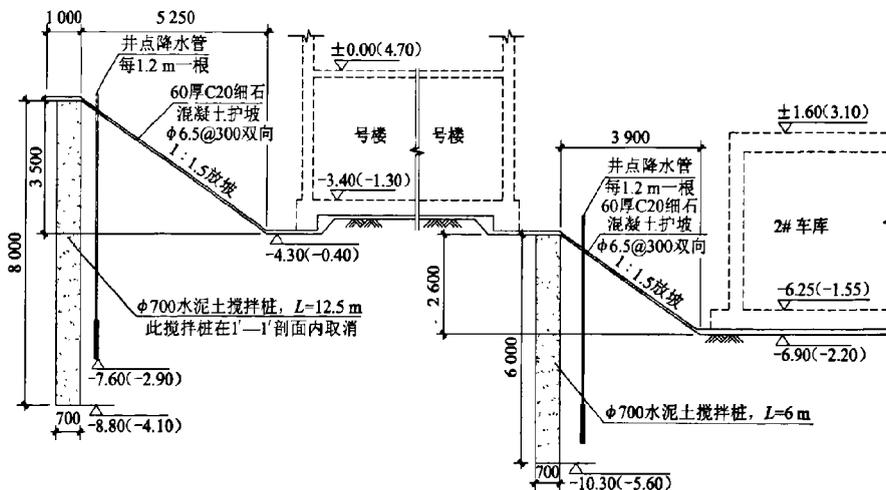


图1 典型断面剖面图

当时的设计工况为将主楼建至 1~2 层后开挖地库,但业主为了赶工期,待部分主楼结构封顶并回填土后才开始开挖地下车库,主楼距地库基坑边线最近距离仅约 7 m,此时地库的开挖必然会对已建主楼产生较大的影响,为了防止上海莲花路事故重演,本文对这一工况进行了模拟。

3 分析原理及方法

数值模拟采用弹塑性有限单元法来进行,有限元分析中弹塑性应力-应变关系可表述为,

$$\{\delta\sigma\} = [D_{ep}]\{\delta\epsilon\} \quad (1)$$

式中: $\{\delta\sigma\}$ 为应力增量; $[D_{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵; $\{\delta\epsilon\}$ 为应变增量。

当不考虑硬化规律采用弹性-理想塑性本构关

系时,根据屈服准则和流动规则可推得弹塑性矩阵的表达式:

$$D_{ep} = D - \frac{D \left\{ \frac{\partial g(\sigma)}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \right\}^T D}{\left\{ \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial g(\sigma)}{\partial \sigma} \right\}} \quad (2)$$

式中: D 为弹性刚度矩阵; $f(\sigma)$ 为屈服函数; $g(\sigma)$ 为塑性势函数。

Mohr-Coulomb 模型虽是在土力学中广泛应用的理想弹塑性模型,但其不能模拟土体随应力状态变化的性质,不能考虑土体加载卸载后刚度的变化,计算速度往往较快,相对只适用于问题的初步分析。本工程地库基坑边线离已建主楼较近,须采用一种高级的本构模型来对基坑开挖过程中土体的变形及

对周围环境的影响情况进行精确的模拟。因此,本工程采用 Hardening-Soil 模型模拟土的本构关系,该模型是一种改进了的模拟岩土行为的模型,相对于理想弹塑性模型(Mohr-Coulomb 模型),Hardening-Soil 模型采用三个不同的输入刚度可以将土体的刚度描述得更准确,即:三轴加载刚度 E_{50} 、三轴卸载刚度 E_{ur} 和固结仪加载刚度 E_{ocd} ,该模型比 Mohr-Coulomb 模型的优越之处不仅在于它使用了一条双曲应力-应变曲线,而非双线性曲线,还在于对应力水平依赖性的控制,也即所有的刚度随着压力的增加而增加,从而更符合实际情况。

Hardening-Soil 模型本质上是一个双曲线的应力应变关系,其屈服函数为:

$$f = \bar{f} - \gamma^p \tag{3}$$

式中: \bar{f} 是应力的函数,而 γ^p 是塑性应变的函数:

$$\bar{f} = \frac{1}{E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}}, \quad \gamma^p = -(2\epsilon_1^p - \epsilon_3^p) \approx -2\epsilon_1^p$$

式中: q 为三轴加载下的偏应力; q_a 为抗剪强度的渐进值; E_{50} 和 E_{ur} 分别为与围压相关的主加载模量和卸载再加载模量,它们由下面的方程给出:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m, \quad E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m$$

Hardening-Soil 模型的帽盖型屈服面定义为:

$$f^c = \frac{\bar{q}^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \tag{4}$$

式中: α 是一个与 K_{sc} 相关的辅助模型参数; $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$; p_p 为等向预固结应力。

由于围护桩与周边土体两种材料的刚度相差甚大,有限元分析中采用了接触面单元,考虑到计算中的收敛性,单元类型采用非线性弹簧单元,屈服准则采用线性库仑模型。在接触面的节点处设置切向和法向两根弹簧来模拟桩土间的接触特性,其切向和法向刚度分别为 K_s 和 K_n 。利用虚功原理,可以建立节点力和节点位移的关系表达式:

$$F = B^T D_c B \delta \tag{5}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$D_c = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: F 为节点力向量; δ 为节点位移向量; θ 为局部坐标轴与整体坐标轴的夹角。由于线弹性本构关系比较简单,在此不作赘述。

4 分析模型及工况

4.1 分析模型

基坑开挖本质上是三维问题。以往的平面和三

维分析结果比较表明:在反映围护结构的变形和坑内外土体的位移状况方面,两者的变形趋势及数值基本接近。这说明二维的假定可以满足工程计算的要求,且如果采用三维分析,计算模型模型复杂,计算量大。因此,综合考虑分析问题的合理性、计算速度和模型规模,采取二维有限元平面应变模型进行分析。

模型计算区域:竖向范围取 25 m,水平范围取 50 m。

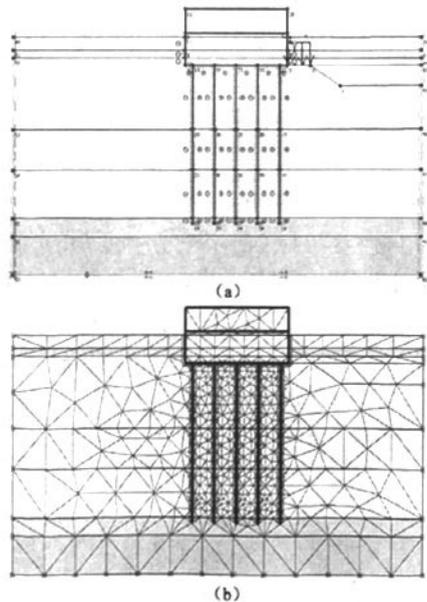
基坑围护分析过程中,针对不同分析对象采用不同的单元类型和本构关系,具体详见表 2,分析模型的底部采用全自由度约束,即水平、竖向往固定约束,侧面采用法向约束,允许竖向变形。坑边施工超载取为 20 kPa。

表 2 分析单元类型与本构模型表

对象	单元类型	节点数目	本构模型
土体	三角形	15	Hardening-Soil
工程桩	梁单元	3	线弹性
主楼结构	梁单元	3	线弹性
桩土接触面	接触面单元	15	库仑准则

结构参数:工程桩、主楼结构均为混凝土结构,混凝土的弹性模量取 30 000 MPa,泊松比 0.2,重度 25 kN/m³。

计算断面有限元计算模型及网格见图 2。



(a)有限元模型图 (b)有限元网格图

图 2 有限元模型及网格图

4.2 工况模拟

基坑在开挖之前场地存在初始应力场,故首先按土体自重应力场来模拟场地存在的初始应力场。在上述应力场基础上,初始化所有位移与应变为零,仅保存其变化的应力场作为基坑施工模拟的初始应力场。具体计算工况如下:

- 工况 1:生成初始地应力场;
- 工况 2:开挖浅层土,施加施工超载;
- 工况 3:开挖至坑底。

5 计算结果分析

在各施工工况中,当基坑开挖至坑底(工况 3)时,围护结构及周边的变形最大,因此主要对该工况进行分析。工况 3 时,基坑最大水平位移为 23.3 mm,出现在放坡坡顶面位置,水平位移云图见图 3。坑边地表最大竖向位移为 10.6 mm,出现在距坡顶 25 m 左右位置,坑底最大隆起量为 13.6 mm,出现在基坑开挖面中间,竖向位移云图见图 4。

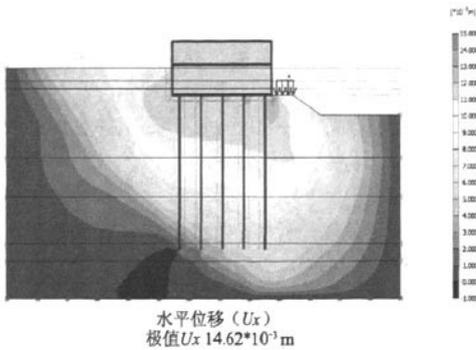


图 3 工况 3 时水平位移云图

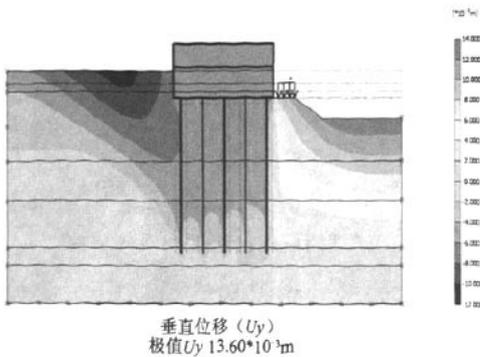


图 4 工况 3 时竖向位移云图

对已建主楼的影响分析:工况 2、工况 3 时主楼靠近坑边的工程桩的水平位移见图 5,由图 5 可知,两种工况下桩顶的水平位移最大,分别为 8.3 mm 和 11.9 mm;工况 2、工况 3 时主楼靠近坑边的工程桩的剪力见图 6,由图 6 可知,两种工况下桩的剪力分布

基本一致,最大剪力分别为 28.9 kN 和 32.1 kN,剪力在桩身中部出现零点,即此处弯矩最大。由计算的桩基水平位移和剪力可知,本工程基坑开挖对主楼结构的影响较小,不会对其工程桩产生严重的影响。

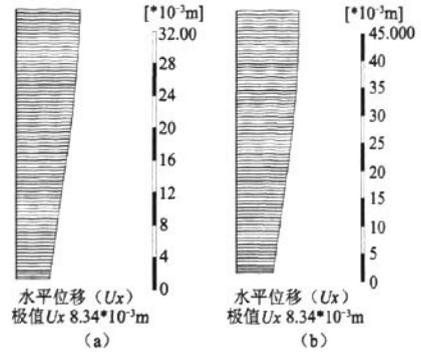


图 5 不同工况时工程桩水平位移

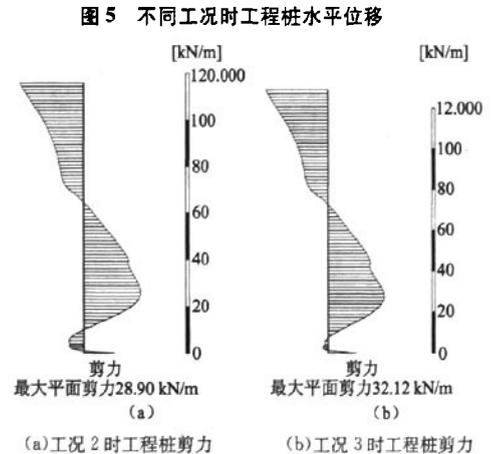


图 6 不同工况时工程桩剪力

6 结论

本文采用二维有限元技术,有效地分析了地库开挖对已建主楼的影响,得到了以下几点认识:

1) 准确预测地库开挖对已建主楼影响的问题,越来越引起工程界的重视;各种计算方法中,有限元方法采用网格单元模拟计算域,可考虑复杂的地质条件、施工过程等诸多因素,具有其他方法无法比拟的优势,可准确地预测基坑开挖引起的环境问题。

2) 有限元模型及土体本构模型的选取对计算结果至关重要,本工程采用高级岩土模型 Hardening-Soil 模型,该模型能够考虑加载与卸载的不同刚度,同时可考虑刚度随应力变化的情况,能够准确模拟地库开挖过程中土体的变形及对已建主楼的影响。

3) 对本工程,随着地库开挖深度的增大,主楼工程桩的水平位移和剪力均有所增大,但增大幅度不

4 结论

基于小波变换的奇异性指数计算简单、快捷,奇异性指数检出数据异常方便可靠。由奇异性检出结果识别多传感器监测系统的数据异常属性。剔除差错异常,保留真实异常,是安全监控建模的基础。基于小波变换的奇异性异常识别是一种新颖有效的方法。

参 考 文 献

- [1] 丛培江. 大坝监测数据异常值的概率识别法[J]. 水电能源科学, 2005, 23(4): 32-34.
- [2] Cetin A E, Ansari R. Signal recovery from wavelet transform maxima [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42(7): 1845-1848.
- [3] Daubechies I. Ten lecture on wavelets [M]. CBMS

NSF Series in Appl. Math. SIAM, Philadelphia, 1991.

- [4] Mallat S, Theory for multi-resolution signal decomposition; The wavelet representation [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [5] 何正友, 钱清泉. 基于小波变换的信号奇异性只是计算方法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(3): 12-15.
- [6] 陈志坚, 陈松, 董学武, 等. 岩土工程安全监测异常值属性的识别方法[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 40-44.
- [7] 李筱艳. 复杂条件下超大型群桩基础安全监控理论及其应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

收稿日期: 2009-08-06

(上接第 291 页)

大,即开挖浅层土时已经使工程桩产生了较大的水平位移和剪力,第二步的放坡开挖对主楼影响并不显著;因此在实际工程建设中,应尽量不要待主楼回填后再开挖地库,条件许可时应同时开挖。

4)计算结果表明本工程地下车库的开挖对主楼影响不大,但在实际施工时应加强主楼的沉降和变形观测,以免发生工程事故。

参 考 文 献

- [1] 袁海峰, 郑刚. 邻近建筑物受基坑开挖影响有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2006(3): 102-104.
- [2] 赵延林, 等. 深基坑开挖对周边地表沉降变形的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2009, 19(2): 97-100.
- [3] 陈果元, 唐小弟, 魏丽敏. 基坑开挖对相邻建筑物安全性影响分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(2): 136-139.
- [4] 张志勇. 分层开挖基坑影响建筑物沉降的数值模拟[J]. 山西建筑, 2009, 35(3): 127-128.

- [5] 王泓华, 贺炜. 深基坑开挖引起周边地表沉降的数值分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(12): 122-124.
- [6] 王磊, 贾敏才, 周健. 相邻深基坑开挖地下管线保护有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 170-175.
- [7] 海明雷, 孙玉永, 王炳龙. 深大基坑开挖对邻近地铁车站影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(1): 7-11.
- [8] 崔春义, 赵颖华, 等. 基坑开挖对邻近桩筏基础特性影响的数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(5): 65-69.
- [9] 杜金龙, 杨敏. 深基坑开挖对邻近埋管管线影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3015-3020.
- [10] 郭海燕, 李胜林, 张云. 深基坑开挖与支护的有限元模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 165-168.

收稿日期: 2009-09-08