

某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的 三维有限元分析

3-Dimensional FEA for the interaction between supporting structure of excavation and soil in a very deep pit

陆新征¹, 宋二祥¹, 吉 林², 睦 峰²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 润扬长江大桥指挥部, 江苏 镇江 212002)

摘 要: 某特深基坑设计尺寸达到 $69\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$, 且施工场地地质条件较差, 基坑变形控制严格, 用普通近似方法分析和设计有较大的难度。为了准确了解基坑支护结构的内力和变形情况, 确保工程安全, 本文对该基坑进行了施工全过程的三维有限元弹性分析和模拟, 并详细说明了其具体实现方法。有限元分析中分别考虑了支护结构和土体之间的相互作用问题, 以及各种开挖方案、降水方案对基坑变形的影响, 并对各种关键参数进行了参数敏感性分析和讨论。对比各种分析结果, 考虑共同作用和不考虑共同作用基坑变形相差达到 10 倍, 支护结构内力相差达到 1.5 倍。同时, 不同开挖方案及降水方案对变形和内力也有着重要影响, 各方案之间最终差别甚至可以达到 1 倍以上。分析结果说明, 对于这类复杂工程, 进行考虑结构与土体共同作用的施工全过程三维有限元分析和模拟是完全必要的。

关键词: 共同作用; 基坑工程; 三维有限元分析

中图分类号: TU 94

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0488-04

作者简介: 陆新征(1978-), 男, 安徽芜湖人, 清华大学土木工程系博士研究生。

LU Xin-zheng¹, SONG Er-xiang¹, JI Lin², SUI Feng²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Headquarters of the Runyang Yangtze Road Bridge, Zhenjiang 212002, China)

Abstract: The size of a very deep pit is about $69\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$ and it is difficult to be analyzed with traditional approximate method. In order to reveal the deformation and internal force of its support structure, spatial non-linear finite element analysis is carried out in which the excavation process is considered. The interaction between the excavation support and the soil, the difference between various excavation scheme, the influence of groundwater lowering and sensitive analysis of critical parameters are discussed in detail. The numerical results show that the deformation of the continuous concrete wall with interaction effect will be 10 times of that without interaction effect, while the difference of supporting forces between the two cases will be 1.5 times. At the same time, the excavation scheme and ground water lowering are also important for the deformation and internal force of the support. The analysis results show that investigation of the interaction between soil and structure and simulation of excavation process are necessary in such complex problems.

Key words: interaction; deep pit; spatial finite element analysis

0 引 言*

传统基坑工程中, 在设计基坑支护结构和考虑基坑安全程度的时候, 多采用等代梁法、 m 法^[1,2] 等近似方法。近年来, 考虑支护结构和土体共同作用的二维有限元分析^[3] 也被广泛采用。但是, 对于大型结构, 由于其所在场地和结构本身的空间作用显著, 二维有限元分析有着很大的局限。同时, 由于基坑工程中开挖和支护结构的施工都是随着工程进行而逐步进行的, 基坑和围护结构是一个随时间而不断变化的时变系统。考虑施工过程对工程影响也是完全必要的。本文结合某特深基坑工程说明该方法的具体实现步骤及其必要性。

1 工程简介和计算模型

1.1 工程概况

某特深基坑位于长江岸边, 设计尺寸为 $69\text{ m} \times 50$

$\text{m} \times 50\text{ m}$ 。基坑所在场地地表以下 16 m 为淤泥质土, 地表以下 16~48 m 为砂土, 48 m 以下为基岩, 各层土体的基本力学参数参见表 1。该基坑距离最近的长江大堤仅 70 余 m, 为了保证工程本身及长江大堤的安全, 对基坑的变形控制提出了严格要求。同时由于该基坑所在场地地质条件差, 地下水位高, 最后决定采用旋喷桩帷幕止水, 钢筋混凝土地下连续墙加内支撑的基坑支护体系。地下连续墙进入基岩深度平均约为 3 m。从地表以下 2 m 开始, 每隔 4 m 设置一道内支撑, 支撑结构平面布置参见图 1。在基坑开挖前先完成地下连续墙的施工, 内支撑随挖随撑, 层间间隔周期约为 10~15 d。在地下连续墙外 23 m, 设置一道旋喷桩止水帷幕, 用来降低作用在地连墙上的地下水压力。由于该基坑工程尺寸大, 支护结构空间作用明显, 施工周

* 收稿日期: 2002-09-05

期长, 环境复杂, 为了确保工程安全, 我们对该基坑进行了考虑结构与土体共同作用的施工全过程三维弹塑性有限元分析。

表 1 土的力学参数

Table 1 Parameters of the soil						
土层 编号	土体密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 /kPa	泊松比	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	深度 /m
1	1810	3000	0.35	13	5	+ 2~ - 12
2	1790	8000	0.30	10	9	- 12~ - 16
3	1900	15000	0.30	5	27	- 16~ - 35
4	1900	30000	0.25	2	30	- 35~ - 48
5	2200	2×10^6	0.25			

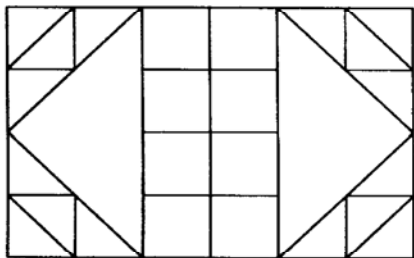


图 1 支撑结构平面布置

Fig. 1 Arrangement of internal supports

1.2 计算模型

计算软件采用美国 ANSYS 公司开发的 ANSYS^[4,5] 三维大型有限元计算软件。土体采用 20 节点三维实体单元, 本构模型选用 Drucker-Prager 理想弹塑性模型。钢筋混凝土连墙采用 8 节点板单元, 钢筋混凝土内支撑为空间梁单元, 都假设为线弹性材料。基坑开挖完成后的三维网格参见图 2。为了真实地模拟支撑结构和土体之间的共同作用及不同施工方案对支护结构的影响, 我们使用了 ANSYS 的单元“生死”功能来模拟土体开挖和支护施工。所谓“杀死”单元, 就是将该单元的刚度和质量都乘以一个很小的数, 相当于该单元不再能发挥作用。而“激活”单元, 就是让已经“杀死”的单元恢复到它原先的刚度和质量, 这时候的单元既没有初始应变, 也没有初始应力。例如, 本模型中, 地连墙的板单元是附着在土体单元上的, 在土体自重沉降过程中, 地连墙被“杀死”, 对土体自重沉降完全没有影响。而在沉降计算完成后, 则“激活”地连墙单元, 开始发挥作用。这时候它虽然已经有了变形, 但是程序假设其内力为零, 这与工程中的实际情况是相符的。

具体实现步骤是: ①建立整个场地土体及支护结构模型; ②“杀死”所有支护结构单元, 并施加重力荷载, 模拟土体在自重作用下自由沉降; ③“激活”地连墙单元, 并在地连墙两侧施加水压力, 模拟地连墙施工完成后的情况; ④逐层“杀死”各层的土体单元并“激活”相应的内支撑单元, 模拟开挖和支撑施工, 调整地连墙

两侧的水压力, 模拟降水过程。同时, 通过调整“杀死”土体单元和“激活”支撑单元的顺序来模拟不同开挖和支撑方案的影响; ⑤重复步骤 ④直至开挖至坑底。

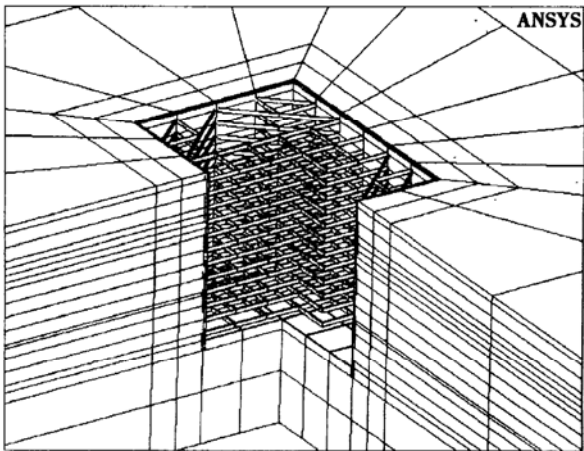


图 2 单元网格及支撑

Fig. 2 Mesh and supports

为了对比各种不同开挖方法的影响, 我们分别考虑了以下三种开挖方案: ①完全开挖掉本层土后再施工支撑, 基坑外围不降水(简称先挖后撑); ②先成槽, 施工支撑, 再开挖土体, 基坑外围不降水(简称先撑后挖); ③先挖去中间土体, 施工中间支撑, 再开挖两侧土体, 施工两侧支撑, 在施工两侧支撑的同时开挖下一层的中间土体, 基坑外围不降水(简称边挖边撑)。

为了考虑降水的影响, 分别计算了降水的边挖边撑方案(简称降水)和不降水的边挖边撑方案。

此外, 作为参照, 又计算了没有考虑施工过程(简称无过程)的算例来对比。

2 计算结果和参数讨论

以边挖边撑工况为例, 计算得到地下连续墙变形随开挖进程发展曲线如图 3 所示。可见在整个开挖过程中, 地连墙的变形和受力经历了一个复杂的变化过程。

不同开挖方案下基坑短边中点和长边中点的变形如图 4(a), (b) 所示。不同开挖方案、降水方案以及不模拟施工过程的计算结果对比见表 2。可以看出, 不同开挖方案对基坑变形及内力影响很大, 支撑越强, 地连墙变形越小, 地连墙的弯矩也相应较小, 而地连墙受到的土体侧压力却越接近静止土压力, 支撑受到的压力也就越大。一般说来, 设计人员和施工人员可以在这些方法中比较, 以选择合适的土体暴露时间和支撑施工时机, 在不影响结构安全性的前提下, 尽量方便施工。而对于本工程, 由于受到施工设备的限制, 地连墙的厚度和抗弯承载力的提高是有限度的, 而支撑结构

的设计自由度则相对较大。所以,在本工程施工过程中,尽量加快内支撑结构的施工速度,提高内支撑结构在整个侧压力作用下所分担的比重,进而减轻地连墙的内力,是十分重要的。从以上分析可以看出,在地下结构中,土体既是介质,又是主要荷载。对于复杂地

下结构问题,忽略施工过程和土体对结构的贡献而得到的计算结果可能和实际情况有较大差距。

表 2 不同施工方案对比

工况	先挖后撑	先撑后挖	边挖边撑	降水	无过程
地连墙最大位移/cm	16.1	6.87	9.71	4.71	0.72
支撑最大轴力/kN	18572	21686	15962	13303	30596
地连墙最大弯矩/(kN·m)	13742	6300	9204	4152	882

这里我们需要注意到,由于本基坑的长、宽和高都比较接近,加上短边支撑采用的是两对斜撑,使得整个基坑的空间作用表现得非常明显。突出表现在:当采用边撑边挖方案时,由于短边支撑时间比先撑后挖要晚,使得短边的位移明显大于先撑后挖方案。同时,由于短边位移的增大,给了长边一个较强的约束,使得边撑边挖方案的长边位移在开挖面位于-20 m 以上时要小于先撑后挖方案。同时,边撑边挖方案斜撑对长边位移的约束,也分担了一些中间对撑的荷载,使得支撑的最大轴力小于先挖后撑的最大轴力。这些重要结论都体现出三维有限元分析的重要性。

计算得到土体在开挖过程中的塑性应变分布如图 5 所示,由图中可以看出,土体的塑性应变基本都集中在开挖面附近,主要是因为土体开挖卸载后土体回弹及隆起而造成的。土的塑性参数对基坑变形的影响也主要集中在开挖面附近区域。因此,在进行非线性有限元分析时,适当放松迭代收敛标准,对本问题的最终结果影响不大。

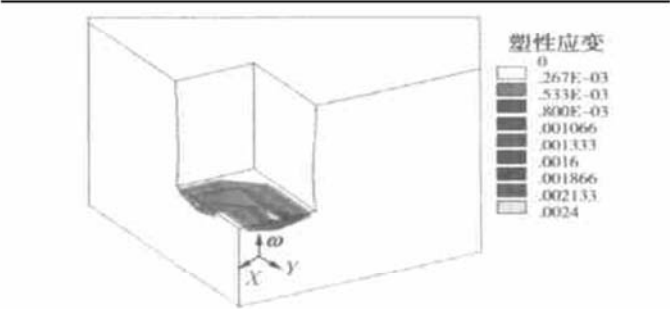


图 5 土体塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic strain

另外,考虑到该基坑结构复杂,施工周期长,部分结构参数可能测量不够准确或者在施工过程中发生了变化,因此,我们又对一些关键参数进行了敏感性分析,以先挖后撑为例,参数影响比较结果参见表 3。

根据表 3,如果仅从模量上考虑,混凝土、第一层土和第二层土的影响都很小,在基坑开挖过程中也不是反分析研究的关键因素。而第三、四层土的模量影响显著,尤其是第四层土体,由于基坑的最大变形位置

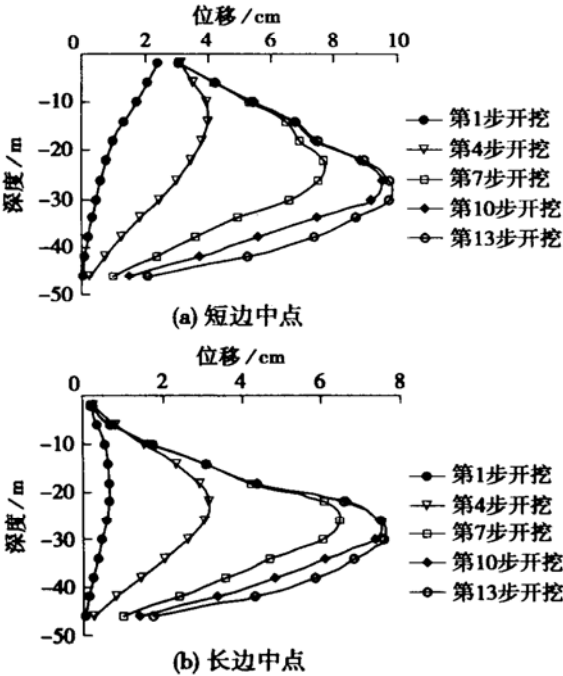


图 3 基坑开挖中地下连续墙的水平变形(边挖边撑)
Fig. 3 Development of deformation of continuous wall during excavation

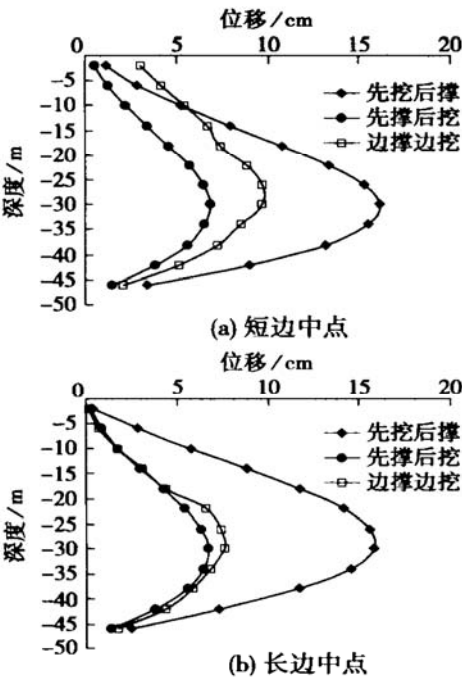


图 4 不同施工方案地下连续墙长短边中点的最大位移
Fig. 4 Maximum displacement on midpoints of long and short edge of wall for different construction schemes

基本在该层土内, 所以基坑最大变形受该层土体模量影响十分显著。因此, 在基坑施工过程中, 对该层土的情况, 尤其是该层土的回弹模量到底应该是多少, 应该给予密切关注。另外, 还需要注意到, 如果减小侧压力系数, 降低土体侧压力, 则最大变形减小的幅度比侧压力降低得还要快。这是因为在基坑开挖过程中, 由于土体的不断开挖, 支撑的不断起作用, 使得整个基坑施工过程是一个边界非线性问题。而且由于基坑变形发展是一个不断叠加积累的过程, 因此, 基坑最大变形对侧压力比较敏感。采取适当的坑外降水, 对变形的控制将是非常有利的, 而且降水越早, 变形减小得也越多。

表 3 参数变化影响
Table 3 Influence of variation of parameter

变化参数	最大变形相对变化量/%
混凝土弹性模量增大 20%	- 1.2
所有土层变形模量减小 50%	52.3
第一层土变形模量减小 50%	1.2
第二层土变形模量减小 50%	0.0
第三层土变形模量减小 50%	26.62
第四层土变形模量减小 50%	102.2
所有土层侧压系数减小 45%	- 70.4

3 结 论

从本文的分析结果我们可以看出, 对于复杂地下结构, 土与结构共同作用、施工过程影响、结构及土体的空间受力特性和土体的非线性行为等都对结构的变形和受力有着显著的影响。而部分结构参数的不确定, 使得结构最终变形和受力情况都变得更加复杂。因此, 进行模拟施工过程的土与结构共同作用的非线性空间有限元分析, 并对关键参数及其敏感性加以讨论和分析, 是十分必要的。

参考文献:

[1] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

[2] 周景星, 王洪瑾, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

[3] 孙 钧, 汪炳监. 地下结构有限元法分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.

[4] ANSYS 公司. ANSYS 分析指南[R]. 北京: ANSYS 公司北京办事处, 1999.

[5] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.

B. B. Broms 教授新著《地基基础工程学》问世

最近, 国际著名土力学家、原国际土力学及基础工程学会会长 Bengt B. Broms 教授在网上发表了一部著作, 其书名为《Foundation Engineering》, 中文可译作《地基基础工程学》。

该书共分 14 章, 章名如下: 1. 地基基础工程的各类问题; 2. 土力学; 3. 岩土工程现场勘察; 4. 地基承载力; 5. 地基基础沉降; 6. 地基基础设计中应考虑的因素; 7. 扩展基脚设计; 8. 弹性地基上的特殊基脚和梁; 9. 筏形基础; 10. 侧向土压力; 11. 挡土结构物; 12. 桩基础——单桩; 13. 单桩——动力分析; 14. 桩基础——桩群。

该书的最大特色是全书内容均用图表示, 而且只用图表示, 基本不用文字; 每一章各分若干节, 每一节各用一幅图。每一幅图下各有若干个关键词。全书 14 章共有 401 节, 亦即全书

内容就是 401 幅图。每一幅图下的关键词反映各节主要内容并可供读者在网上点击查找所需要的内容之用。

由此可见, 这是一部具有全新风格的著作, 这 14 章 401 幅图, 浓缩了土力学的主要内涵及其精华。这样的内容和这么一种新的表达形式, 实非一般人所能构想。笔者曾与 B. B. Broms 长期保持切磋往来, 多次看到过 Broms 在课堂上或报告会上边讲边绘图的情景, 上述 401 幅图皆出自 Broms 亲笔绘制。

B. B. Broms, 瑞典人, 曾任瑞典皇家理工学院院长、新加坡南洋理工大学教授、原国际土力学及基础工程学会会长, 曾多次来华访问讲学, 并于 1989 年 3 月应《岩土工程师》杂志聘请担任名誉主编。

(史佩栋 供稿)