

某在建住宅楼倾倒的三维数值分析^{*}

尹 骥, 徐 枫

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200438)

摘 要: 本文采用岩土工程数值分析软件 zsoil pc v2009 对上海某大楼的倾倒进行了建模分析。模型中考虑了在建住宅楼一侧两次堆土以及另一侧的基坑开挖, 并采用 HSS 模型模拟土的应力应变强度特性。分析结果表明: (1) 建筑物以向基坑侧平移为主, 平移最大值达 12cm; (2) 桩基 (角桩) 的最大竖向力约为 1200kN, 最大弯矩约为 140kN·m; (3) 桩基弯矩的分布形式影响了桩基的破坏顺序; (4) 堆土引起的附加水平推力估算值约为 3000T。

关键词: HSS 模型; 三维有限元; 大楼倾倒; 堆土荷载; PHC 管桩承载力; 土结构相互作用

中图分类号: TU478 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-0836(2010)01-0208-05

3D Numerical Analysis of the Overturning of A Residence under Construction in Shanghai

YN Ji, XU Fen

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd. (SGDI), Shanghai 200092)

Abstract: The 3D geotechnical software zsoil pc v2009 is employed to analyze the overturning of a building in Shanghai. Twice surcharge, together with excavation opposite the building, is considered in the FEM model. The hardening soil model with small strain (HSS) is used to simulate the stress-strain-strength relationship of the soil. The results show: (1) the building moves towards the excavation, and the largest horizontal displacement reaches 12cm; (2) the largest axial force and moment of pile reaches 1200kN and 140kN·m respectively; (3) the distribution style of the moment affects the failure sequence of the pile; (4) the horizontal force caused by surcharge amounts to about 3000T.

Keywords: HSS model; 3D FEM; overturning of a building; surcharge load; bearing capacity of PHC pile; soil structure interaction

1 引言

2009 年 6 月 27 日 5 时许, 上海某商品房小区在建的 13 层住宅楼发生了整体倾倒事故, 如图 1 所示。该事故为典型的基础破坏: 上部结构在倒下后亦能保持良好的完整性, 建筑物所采用的 PHC 管桩呈不同形式的破坏。本文拟在收集资料的基础上, 基于三维有限元分析, 探究该建筑物倾倒的机理。

2 工程概况

2.1 结构概况



图 1 倾倒后的高层建筑

Fig 1 The building after overturning

^{*} 收稿日期: 2009-12-26 (修改稿)

作者简介: 尹 骥 (1980 -), 男, 工学博士, 主要从事岩土工程设计和科研工作。E-mail: geofem@126.com

倾倒建筑物为13层剪力墙结构体系,位于基地北侧,北临河道。基础采用PHC管桩+条形地基梁。工程桩总数为114根,桩型为PHC AB型高强预应力混凝土管桩,采用《先张法预应力混凝土管桩》上海图集。桩端持力层均为第7-1-2层粉砂层,单桩承载力设计值为1300kN。工程桩具体参数:桩长33m,管径400mm,壁厚80mm,混凝土强度等级为C80。

2.2 堆土与基坑概况

据了解,建筑物北侧堆土分两次完成。第一次堆土坡顶高度约3~4m左右,距离建筑物约20m,距离防汛墙约10m;第二次堆土坡顶高度约10m左右,一侧基本上紧挨着建筑物,另一侧与第一次堆土相接。

建筑物的南侧正在开挖地下车库基坑,基坑开挖深度从地表计算约为4.6m左右,围护边距离建筑物2~4m左右。基坑采用复合土钉支护形式,土钉长度约6~9m,均打入建筑物基础以下。堆土实况照片及堆土平面范围如图2所示。



图2 堆土实况照片

Fig 2 Photo of surcharge

2.3 工程地质条件

场地位于东海之滨、长江三角洲入海口东南前缘,地貌形态单一,属上海地区四大地貌单元中的滨海平原类型,地势较平坦。场地自地面以下60.3m深度范围内的土层按其成因可分为7层,约25.9~29.8m以上各土层均为第四系全新世(Q4)土层,约25.9m以下至60.3m均为上更新世(Q3)土层。典型静力触探p-s曲线如图3所示。

3 计算模型与参数

3.1 计算软件选用

本文数值分析采用Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne开发的真三维岩土工程有限元软件zsoil pc v2009。该软件在全世界范围内有1500多个用户,在设计、咨询、研究领域取得了

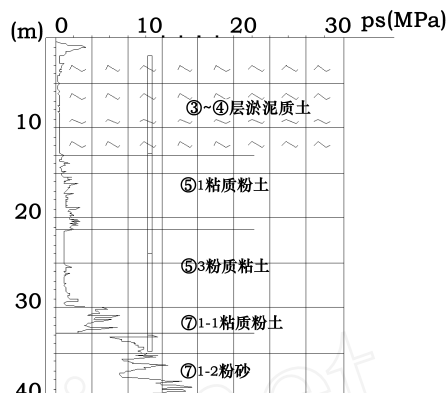


图3 典型钻孔p-s曲线

Fig 3 Typical boring p-s curve

巨大的成功,涵盖了现实世界中可能遇见的几乎所有岩土工程问题,提供了解决土力学和岩石力学、地下结构、基坑开挖、土结构相互作用、地下水和温度分析的统一方法。同时,该软件以Swiss Federal Institute的深厚理论基础为支撑,内置强大的岩土高级本构模型。特别地,本文中采用的HSS(Hardening Soil Model with small strain)模型系软件中内置。

3.2 土体的模拟

土体本构模型采用小应变硬化土(HSS)模型^[2-6]。该模型在Schanz(1998)和Schanz等(1999)在Vemmer(1978)的硬化土(HS)模型的基础上,考虑了土体小应变刚度的特性,加以改进而获得。HS模型由p-q平面内一个双曲线型的剪切屈服面以及一个椭圆型的盖帽屈服面组成。HS模型在模拟剪切方面可认为是弹塑性的Duncan-Chang模型,且其盖帽屈服面可模拟土体体积压缩方面的特性。HS模型在主应力空间的屈服面如图4所示。

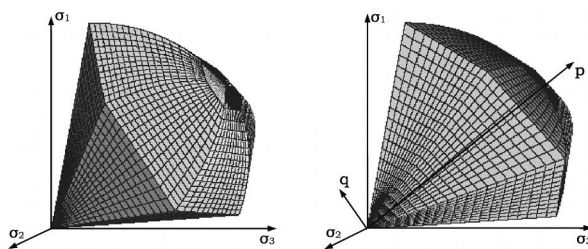


图4 HS模型的剪切屈服面和盖帽屈服面

Fig 4 Shear yield face and cap yield face by HS model

地层30m以上范围土层渗透系数均为 10^{-7} cm/s量级的淤泥质土和粘性土,加载过程中不能完成排水,可近似认为不排水。为与基坑快速开挖和快速堆载相匹配,分析时采用固结不排水(CU)

强度指标。

3.3 结构的模拟

基础采用梁式基础,高度较大,采用考虑剪切变形的 beam 单元模拟。建筑物结构外墙、剪力墙及楼板采 one layer shell 单元模拟。Beam 和 Shell 单元采用高级复合结构单元材料(层叠模型),即混凝土及钢筋均采用理想弹塑性材料模拟,指定材料的抗压强度、抗拉强度以及模量。采用该模型后可以考虑梁、板结构的弯矩-轴力耦合效应、塑性铰效应,且基础结构强度和刚度较为符合实际。条形承台与结构板的几何尺寸按照实际情况选用。

工程桩(PHC AB 400)采用 zsoil pc v2009 中内置的 pile 单元模拟。该单元由 beam 单元及桩侧接触、桩端接触整合而成,如图 5 所示。桩的截面几何形式以及钢棒的布置均按照管桩图集设置。桩侧接触面(剪切弹簧)的本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型;桩端接触面为理想弹塑性的法向弹簧,即可设定桩端承载力,当荷载超过桩端承载力时,桩端弹簧开始屈服。为与现行规范对桩侧摩阻力为定值的假定相符合,可设置桩侧接触面摩擦角为 0° ;内聚力设置为勘察报告上提供的桩侧摩擦强度,而桩端的承载力设置持力层的地基承载力即可。

工程桩与上部结构(条形基础)的连接方式为固接,即工程桩的剪力、轴力以及弯矩可传递给上部结构,反之亦然。

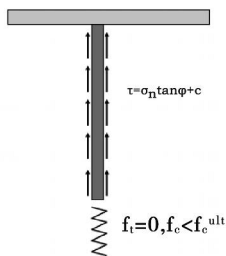


图 5 Pile 单元模型

Fig 5 Element model of a pile

3.4 计算模型及工况设置

计算范围为 $160\text{m} \times 96\text{m} \times 45\text{m}$,模型中包含 35919 个六面体实体单元,1618 个 beam 单元(包括桩单元),8839 个 shell 单元。模型的边界条件为:四周限制侧向位移,底部同时限制水平和竖向位移。数值分析模型如图 6 所示,结构模型如图 7 所示。

数值分析中采用的工况以实际工况为依据,并按照工况对模型造成的实际影响分类和简化,数值

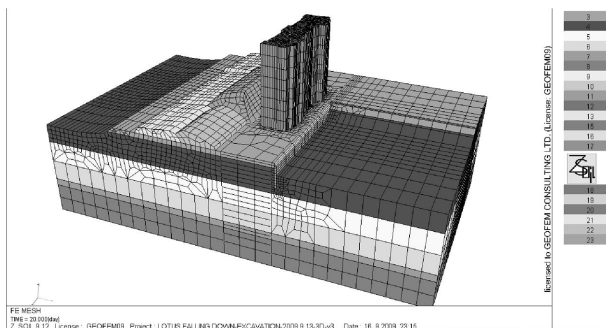


图 6 有限元模型

Fig 6 Finite element model

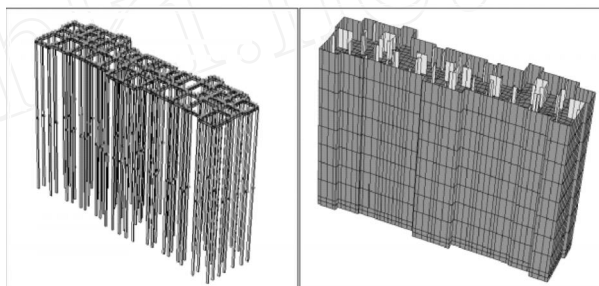


图 7 结构模型(左:桩和条形基础,右:外墙和剪力墙)

Fig 7 Structural model

模拟中所采用的计算工况如下:

- 工况 0:计算初始位移,并将位移清零;
- 工况 1:施工桩基础、条形基础、上部结构;
- 工况 2:分级加载,施加第一部分堆土;
- 工况 3:施工基坑支护,并开挖基坑;
- 工况 4:分级加载,施加第二部分堆土。

特别地,为模拟基坑开挖与堆土的同步进行,通过匹配被开挖土体的卸载函数与堆土的加载函数实现。

4 数值分析结

4.1 建筑物位移

第二次堆土完成后,建筑物的水平位移约为 12cm ,沉降值约为 20cm 。总体来说建筑物的位移以平移为主,由于地下车库基坑尚有 $1/4 \sim 1/3$ 左右未开挖,因此建筑物近开挖至坑底处(西南侧)位移较大,近未开挖处位移较小,差异值约为 6cm ,建筑物在地表平面内有“扭转”的趋势,如图 8 所示。

4.2 桩基的位移及受力

桩基变形后的形状如图 9 所示。在上部条形基础梁及剪力墙结构的约束作用下,桩顶随着上部结构的平移而平移。在桩长的下部 $2/3$ 桩长,桩体基本没有侧向移动。就桩基的位移的数值来看,上

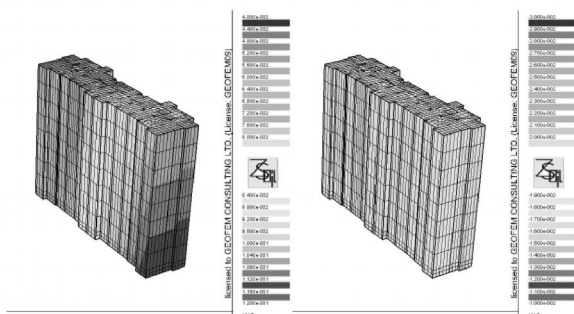


图 8 建筑物平移位移(左)和竖向沉降(右)

Fig 8 Horizontal displacement (L) and vertical settlement (R) of the building

部位移较大,最大值约为 11.5cm;沿着桩身侧向位移逐渐减小,在对应于第 1 层顶面,即软土、硬土交界面附近的位置,桩基的侧向位移已经衰减为 2cm 左右。可见下卧的好土层对桩基的中下部有较好的嵌固作用。

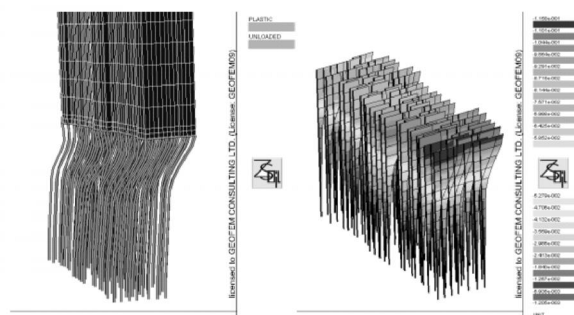


图 9 桩基变形后网格(左)和桩基侧向位移(右)

Fig 9 Network of pile foundation after deformation (L) and side displacement (R)

桩基的弯矩如图 10(左)所示,堆土侧最大弯矩约为 $131 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (中部),基坑侧最大弯矩约为 $140 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (西南角),基坑侧桩基的最大弯矩略大于堆土侧。在 1 层顶面,即软土、硬土交界面附近,堆土侧和基坑侧桩基均存在较大的弯矩。堆土侧桩基在 1 层顶面附近的弯矩与桩顶弯矩同方向;而基坑侧桩基在 1 层顶面附近的弯矩与桩顶弯矩反方向。

桩基轴力如图 10(右)所示,堆土侧对应最大桩顶弯矩的桩,其桩顶轴力为 960kN 左右;而基坑侧对应最大桩顶弯矩的桩,其桩顶轴力为 1200kN 左右。

桩基剪力如图 11 所示,堆土侧桩基最大剪力约为 177kN;基坑侧桩基最大剪力约为 162kN。桩基的最大剪力均发生在桩头锚入基础处,且堆土侧与基坑侧桩顶剪力方向相反。

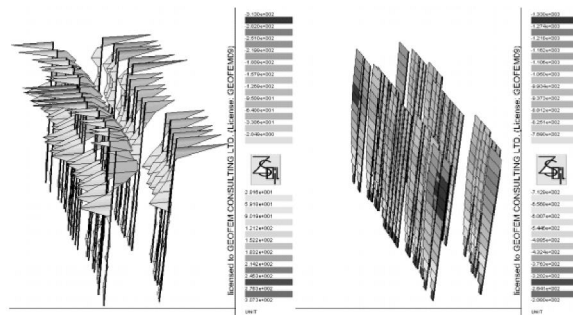


图 10 桩基弯矩(左)和桩基轴向力(右)

Fig 10 Moment (L) and axial force (R) of the pile foundation

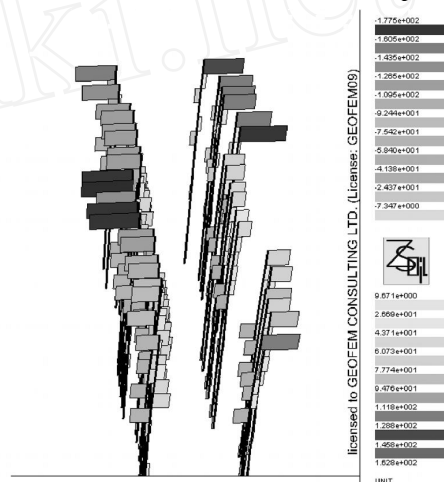


图 11 桩基剪力

Fig 11 Shear of the pile foundation

4.3 堆土产生的水平推力

堆土产生的附加水平推力,即堆土完成时刻的侧向土压力减去堆土前的原位土压力,最大值约为 90kPa,发生在地表以下 1~2m 范围内;而第 1 层顶面附近,侧向压力已经衰减为 30kPa 左右,如图 12 所示。如假定土压力自堆土底面以下 1m 至第 1 层顶面线性分布,则每沿米平均推力约为 $(90 \text{ kPa} + 30 \text{ kPa}) / 2 \times 11.0 \text{ m} = 660 \text{ kN/m}$ 。考虑建筑物纵向长度 45m 左右,则堆土产生的附加总推力约为 $660 \text{ kN/m} \times 45 \text{ m} = 29700 \text{ kN}$,约为 3000T。

4.4 桩基受力性状的探讨

由计算结果可得,堆土侧中部的桩基以及基坑侧西南处的角桩具有较大的内力组合。堆土侧弯矩较大桩基的内力组合为:轴力 960kN,弯矩 $131 \text{ kN} \cdot \text{m}$,剪力 165kN;基坑侧弯矩较大的角桩的内力组合约为:轴力 1200kN,弯矩 $140 \text{ kN} \cdot \text{m}$,剪力 118kN。根据《先张法预应力混凝土管桩》提供的不同轴力条件下的极限弯矩值,上述桩基均接近于压弯构建的承载能力极限状态。因此,较小的荷载增量即可能导致桩基破坏。

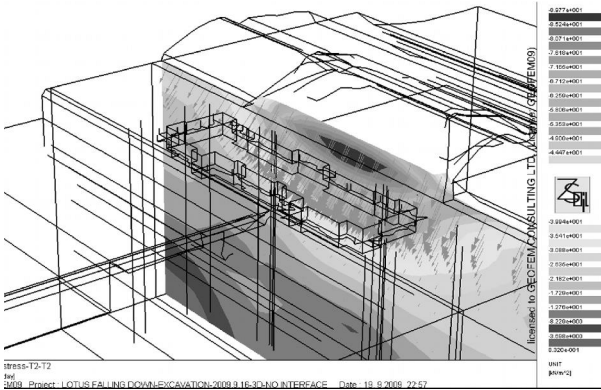


图 12 堆土产生的附加水平应力云图

Fig 12 Nephogram of additional horizontal stress by surcharge

图 13 为堆土侧中部的桩基以及基坑侧西南处的角桩的在堆载完毕时刻的弯矩分布图。现就 1 层顶面以上部分的弯矩分布来说,堆土侧的弯矩分布形式类似于两端固定,中建施加均布(梯形)荷载的梁的情况;基坑侧的弯矩分布,类似于两端固定的梁,其两约束之间产生相对平移的情况。虽然两者的弯矩最大值绝对值相差不多,但是弯矩的分布形式相差较大。因此,弯矩分布形式可能影响了桩基的破坏顺序。

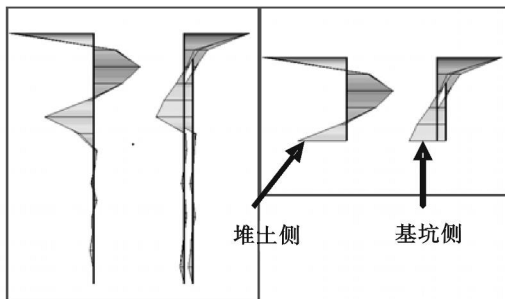


图 13 桩基受弯特性示意图

Fig 13 Sketch of bending of pile foundation

5 结论

本文对某在建住宅楼倾倒事故采用岩土工程

专用数值分析程序 zsoil pc v2009 建模分析,得出以下计算结果:

(1)建筑物在北面堆土、南面开挖基坑的不利工况下,建筑物以向基坑侧平动为主,平动最大位移达 12cm 左右;

(2)桩基顶部受上部结构的约束、下部受较好土层约束的条件下向基坑侧变形,最大变形量约为 11.5cm;

(3)基坑侧桩基(角桩)的最大竖向力约为 1200kN,最大弯矩约为 140kN·m;

(4)虽然堆土侧和基坑侧桩基的弯矩最大值相差不多,但是弯矩的分布形式可能影响了桩基的破坏顺序;

(5)堆土引起的附加水平推力估算值约为 3000T。

参考文献:

- [1] Zimmernann T, Truty A. Z - Soil PC 2009 manual [M]. ZACE service Ltd Lausanne, Switzerland, 2008.
- [2] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, chapter Formulation and verification of the Hardening - Soil Model [M]: 281 - 290. Balkema, Rotterdam, 1991.
- [3] Vermeer P A. A modified initial strain method for plasticity problems [A] // Proc 3th Int Conf Numer Meth Geomech [C]: 377 - 387. Balkema, Rotterdam, 1979.
- [4] Vermeer P A. Double Hardening Model for Sand [J]. Geotechnique, 1978, 28 (4): 413 - 433.
- [5] Vermeer P A. Formulation and analysis of sand deformation problems [D]. PhD thesis, Delft University of Science and Technology, 1980.
- [6] Benz, T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences PhD thesis, University of Stuttgart, 2006.

(上接第 200 页)

- [5] 奚江林,王海龙,张涛. 地铁应对恐怖袭击的安全设计及建筑措施探讨 [J]. 现代城市研究, 2005, (8): 8 - 13. (Xi Jianglin, Wang Hailong, Zhang Tao. On the Safety Design and Building Measures for Subway against Terrorist Attacks [J]. Urban Research, 2005, (8): 8 - 13. (in Chinese))
- [6] 张国伟. 爆炸作用原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (Zhang Guowei. Theory of explosion action [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2006. (in Chinese))

- [7] 国家安全生产监督管理局. 安全评价 [M]. 北京: 煤炭出版社, 2004. (State Administration of Work Safety. Safety Evaluation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004. (in Chinese))