

DOI: 10.11779/CJGE2014S2023

# 双排混凝土灌注桩基坑支护的数值模拟分析

钱 明

(中国石油天然气华东勘察设计研究院岩土工程处, 山东 青岛 266071)

**摘 要:** 近年来, 随着计算机技术及岩土工程数值计算理论的发展, 数值模拟分析在岩土工程中的应用越来越多。该文结合青岛某深基坑实例, 利用岩土工程有限元软件 PLAXIS, 模拟双排桩基坑支护的全过程, 分析了水平位移的变化趋势, 并与实测数据进行了对比分析。同时对单排桩支护方案进行了比较分析, 证明了双排桩支护在限制水平位移的明显优势。由此认为数值模拟工作能对基坑支护方案比选工作和基坑稳定性分析提供有效的帮助。

**关键词:** 双排桩; 有限元; 水平位移; PLAXIS

**中图分类号:** TU475

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0136-04

**作者简介:** 钱 明(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事岩土工程及工程地质方面的技术工作。E-mail: qdqmianming@126.com。

## Numerical simulation of double-row bored concrete piles in foundation pits

QIAN Ming

(East China Investigation and Design Institute of CNPC, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In recent years, with the development of computer technology and numerical theory of geotechnical engineering, numerical simulation analysis is more and more applied in geotechnical engineering. Based on a deep foundation pit in Qingdao, the geotechnical finite element soft PLAXIS is used to simulate the whole process of double-row piles. The change trend of horizontal displacement is analyzed and compared with the measured data. At the same time the single-row pile supporting method is compared and analyzed, the double-row piles are proved to have obvious advantages in restricting the horizontal displacement. Therefore, the numerical simulation may provide effective help for selection of supporting methods and stability analysis of foundation pits.

**Key words:** double-row pile; finite element; horizontal displacement; PLAXIS

## 0 引 言

实际的基坑工程中, 在某些特殊条件下, 锚杆、土钉、支撑受到实际条件的限制而无法实施, 而采用单排悬臂桩又难以满足承载力、基坑变形要求等情况下, 双排桩是一种可供选择的基坑支护形式。本文运用岩土大型有限元软件 PLAXIS 对双排桩进行模拟分析, 同时对其设计计算结果及主要影响因素进行模拟分析, 包括排距、桩体刚度等因素, 来得到其合理的设计参数取值依据。

## 1 工程概况

### 1.1 地质情况

该工程位于青岛市燕儿岛路1号, 拟建地下2~4层, 地上3层, 设计基坑开挖深度11.2~15.7 m, 地下室深度11.2~15.7 m, 地下室周长约1250 m。基坑安全等级为一级。

场地第四系厚度约16~25 m, 第四系由全新统人工填土层、海相—海相沼泽化沉积层及洪冲积层构成。基岩为燕山晚期花岗岩, 基岩面较平缓, 总体上自北向南、自东向西缓倾。基坑支护参数见表1。

场地地下水稳定水位埋深约3~4 m, 地下水类型主要为第四系孔隙潜水, 主要含水层为填土和砂层, 主要接受大气降水补给, 与海水有一定的联系。地下水对混凝土结构具弱腐蚀性, 对钢筋混凝土结构中的钢筋在干湿条件下具强腐蚀, 对钢结构具中等腐蚀性。

### 1.2 基坑支护方案

基坑支护设计方案采用: 高压旋喷止水帷幕, 双排钻孔灌注桩结合一道扩大头锚杆进行支护。双排桩水平承载力大, 抗弯能力强, 克服了单排锚杆支护产

基金项目: 中国石油工程建设公司科学研究与技术开发项目 (CPECC2013KJ02)

收稿日期: 2014-07-28



表 1 基坑支护参数一览表  
Table1 Parameters of strut forms of excavation

编号	支护类型	支护设计参数
1	钻孔灌注桩	直径为 $\phi 1200$ mm, 桩间距 2000 mm, 桩身混凝土强度为 C25, 桩长 21.2 m, 桩顶标高为 0.65 m, 支护桩入梁 100 mm, 主筋入梁 300 mm
2	高压旋喷桩	直径为 $\phi 1200$ mm, 搭接 300 mm, 浆液压力>30 MPa, 入强风化基岩>0.5 m
3	盖梁	尺寸为 500 mm $\times$ 3800 mm, 混凝土 C25
4	放坡	1 : 0.2~1 : 0.15
5	预应力锚索	MG1 : 6 $\phi$ s15L=23 m@2.0 m, 自由段 13 m(局部 15 m), 锚固段 10 m, 扩大头长 5 m, 直径 $\phi 800$ , 设计抗拔力 $T=850$ kN; 倾角均为 25°

生的较大弯矩, 可有效的控制基坑变形, 保证基坑工程安全。计算中采用弹性抗力法。计算结果为前排桩最大位移为 25.1 mm, 最大弯矩为 1501.1 kN/m, 后排桩最大位移为 20.1 mm, 最大弯矩为 7421.1 kN/m。

2 有限元分析模型的建立与分析

PLAXIS 程序是一种岩土工程有限元软件。该程序界面友好, 建模简单, 自动进行网格剖分。PLAXIS 程序应用性非常强, 能够模拟复杂的工程地质条件, 尤其适合于变形和稳定分析,能够计算两类工程问题: 平面应变问题和轴对称问题。本文运用的 PLAXIS 版本为 PLAXIS 2D 2011。

2.1 本构模型的选择

模拟计算对桩和粗粒土采用莫尔-库仑模型。它能较好地描述土体的破坏行为, 因此适合稳定性问题的分析。莫尔-库仑模型描述了对岩土行为的一种“一阶”近似, 包括 5 个输入参数: 模量  $E$  和泊松比  $\nu$ , 内摩擦角  $\varphi$ , 黏聚力  $c$ , 剪胀角  $\psi$ 。由于基坑工程一般属于二维平面应变问题, 而排桩属于三维问题, 为了避免三维问题很大的计算工作量, 采用 PLAXIS 程序建立二维有限元模型进行分析, 将排桩按刚度等效的原则转化为平面问题。按下式计算板桩单元的等效刚度:

$$\left. \begin{aligned} EA_{eq} &= (E_{soil} + A_{soil} + E_{pile} + A_{pile}) / d, \\ EI_{eq} &= (E_{soil} + I_{soil} + E_{pile} + I_{pile}) / d。 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $d$  为桩间距, 将桩体等效为板桩单元, 结果可能使土层的水平位移比实际略小, 而桩体水平位移比实际略大。PLAXIS 板单元输入等效的刚度, 可以获得较为准确的内力。研究表明当桩间距小于 3 倍桩径时, 土体侧压力 90%以上由桩承担, 这样可将排桩等效为板桩单元, 作为机理研究, 完全可用于二维分析。计算参数见表 2。

2.2 几何模型的建立

项目选用平面应变模型, 为了获得较高的计算精度, 平面网格划分采用 15 节点三角形单元。考虑按基

坑中部选取计算断面。

表 2 支护桩、锚杆及注浆体模拟计算参数

Table 2 Simulation parameters of supporting piles, anchors and grouting

支护桩参数				锚杆力学参数		注浆体参数
轴向刚度 (/kN·m <sup>-1</sup> )	抗弯刚度 (/kN·m·m <sup>-2</sup> )	重度 (/kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比	轴向刚度/kN	间距/m	轴向刚度 (/kN·m <sup>-1</sup> )
1.7 $\times 10^7$	1.5 $\times 10^6$	8.3	0.15	2 $\times 10^5$	2.0	1 $\times 10^5$

在水平方向上, 模型的坑内部分自排桩延伸至基坑中心, 坑外部分自外排桩向外延伸 40 m (不少于 2 倍基坑开挖深度); 竖直方向按实际情况进行土层归并后设置土层; 模型的总尺寸 60 m $\times$ 35 m。排桩采用梁单元模拟, 锚杆采用点对点锚杆单元模拟拉杆, 土工格栅单元模拟注浆体(扩大头)。竖向边界约束水平位移, 下边界约束水平和垂直方向的位移。地下水位取 3 m。选用的几何模型见图 1。

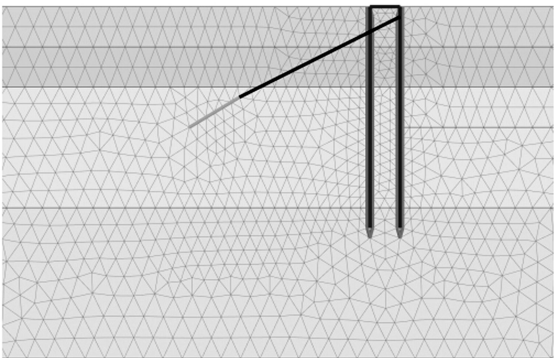


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

2.3 模型参数的选取

土的本构采用 PLAXIS MC 模型, 为了计算简便, 将物理力学性质相近的土层归并, 相关参数取加权平均值, 表 3 给出了有限元分析采用的土体参数值。模型土体计算参数可通过土工试验和原位测试结果获得。

表 3 剖面土层参数表

Table 3 Parameters of soil layers

土层岩性	层厚 /m	重度 (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)	压缩模量 /MPa	泊松比
素填土	4.1	18	0	15	8	0.30
中、细砂	7.0	19	0	27	10	0.28
粗砂—砾砂	12.0	20	0	35	11	0.26
强风化 花岗岩	—	23	0	45	45	0.23

针对基坑工程，基坑开挖属于卸载，其中弹性模量参数决定于土体回弹模量，取值一般由压缩模量或变形模量  $E_0$  换算得到，一般呈 3~5 倍压缩模量关系。本次模拟采用 4 倍关系。泊松比采用经验值，可参见《土工原理与计算》中所列值。剪胀角  $\psi$  可采用如下经验关系来估计：

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为内摩擦角，对于内摩擦角小于  $30^\circ$  的石英砂，剪胀角几乎为 0。

2.4 施工过程模拟

考虑到施工过程周期短，由此可假定开挖过程中固结几乎不起作用。基于该假设，同时考虑旋喷桩止水帷幕的作用，使用不排水分析模式，根据实际施工过程，施工模拟计算工序见表 4。

表 4 有限元分析模拟工序

Table 4 Simulation process of finite element analysis

计算工况步骤	工况
工况 1	模拟土体在自重应力下的应力场
工况 2	施工灌注桩
工况 3	第一次开挖
工况 4	施工锚杆
工况 5	开挖至设计深度
工况 6	再开挖至基底深度

3 计算结果分析

3.1 水平位移分析

计算分阶段进行，首先激活桩单元，然后第一步开挖至设计深度，施工锚杆，再分步开挖至基坑设计深度。计算最后工况的有限元网格及位移云图见图 2。

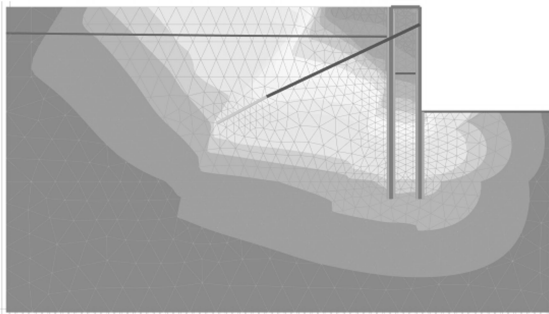


图 2 最后工况水平位移变形图

Fig. 2 Horizontal displacement deformation under final working conditions

数值模拟计算结果最大水平位移 3.23 cm，从位移云图上可看出最大水平位移出现在基坑边缘桩顶部位。图 3 为外排桩桩总体水平位移规律图，从图 3 中可以看出，桩单元自身变形很小，上部变形主要为水平，指向坑内，往下逐渐减小。

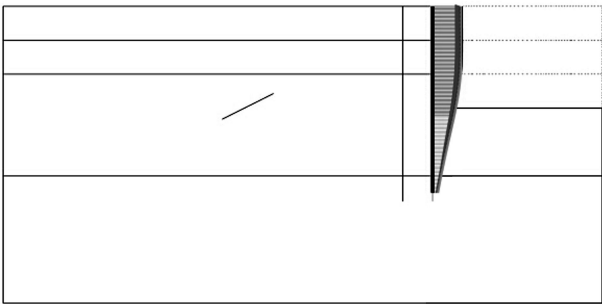


图 3 桩单元水平位移规律

Fig. 3 Horizontal displacement of pile element

图 4 对比了数值计算结果与监测数据。结合数值模拟，可以发现数值模型与实测结果所揭示的位移趋势基本一致。分析桩顶水平位移曲线可知，基坑开挖后 30 d 内累计位移不超过 10 mm，此时基坑已开挖至 6 m，充分体现了采用双排桩限制位移的优越性。锚杆施加预应力后，水平位移出现向基坑外侧的异常波动，从时间上来看两者具有明显相关性。随后，随基坑开挖深度的不断增加，桩顶水平位移呈匀速发展的趋势直至稳定。

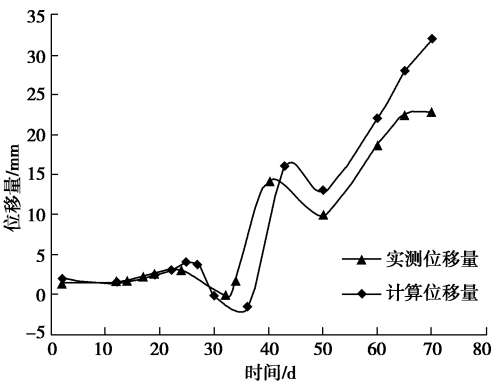


图 4 位移量-时间曲线

Fig. 4 Displacement- time curves

围护结构的变形主要集中在上部易变形的土层中，这与实测的趋势吻合，模拟计算位移值基本大于实测值及基坑设计软件公式计算值，这可能未考虑双排桩之间土体的加固情况有关，但影响不大。同时内排桩与外排桩的水平位移差异很小，说明双排桩形成刚架结构，刚度明显大于单排桩。

3.2 与单排桩的比较分析

由于双排桩的造价较高，同时对单排桩加锚杆方

案进行了模拟数值分析。在工况 6 模拟计算过程, 计算失败, 出现荷载进程失败问题, 此时水平位移量为 6.25 cm, 远大于设计预警值及规范要求, 说明单排桩加一层锚杆的方案水平位移较大, 不满足支护要求。从而说明双排桩在限制位移方面优势十分明显。

## 4 结 论

运用通用有限元软件对双排桩加一层锚杆基坑支护进行了数值模拟计算, 并对结果进行了分析, 可以得到以下 5 点结论。

(1) 基于 PLAXIS 软件对双排桩基坑支护的全过程进行数值模拟分析, 其结果与场地的实际监测位移规律基本符合, 证明该数值模型可对双排桩基坑支护方式效果进行有效模拟。

(2) 监测资料表明, 该工程基坑支护系统稳定、安全, 对周边环境影响小, 说明双排桩加一排锚杆的支护方式是安全可靠的。

(3) 通过分别采用双排桩和单排桩加锚杆的支护方案的模拟对比分析, 证明双排桩限制位移的优势非常明显, 对于基坑周边对位移要求较高地段可考虑采用双排桩支护方式, 但造价可能较高。

(4) 采用 PLAXIS 有限元进行数值模拟过程中, 土体模型的选择和参数的确定是十分重要的, 它直接关系到模拟分析的结果成功与否。由于土体本身本构关系的复杂性及岩土工程本身边界条件难以确定、土体本身的不均匀性等问题, 数值模拟要做到准确定量是相当困难的。

(5) 现在城市建设过程中, 基坑支护和周边建构物的相互影响及保护是岩土工程设计中的一大难题, 而通过有效的数值模拟工作能对方案比选工作和基坑稳定性分析提供较大帮助。

## 参考文献:

- [1] GB 50007—2011 建筑基坑支护设计规范[S]. 2011. (GB 50007 — 2011 Design specification on supporting of foundation pit[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] 北京金土木软件技术公司. PLAXIS 岩土工程软件使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (Beijing Civil King Software Technology Company. PLAXIS geotechnical engineering software user's guide[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 王殿斌, 吕三和. 青岛市深基坑工程实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (WANG Dian-bin, LÜ San-he. The practice of deep foundation pit engineering in Qingdao city[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [4] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2001. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [5] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Design, analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [6] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [7] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 174 - 178. (ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 174 - 178. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)