

有限元数值分析在基坑围护设计中的应用

孙海忠

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 在基坑围护设计过程中, 经常会遇到一些很难用已有理论知识进行计算的工况, 而有限元数值分析正好弥补了这一空白, 并能较好地指导工程设计。基于这一点, 采用有限元方法对某基坑斜抛撑牛腿的承载能力进行数值分析, 提出了相应的处理措施, 并经工程实践证明该措施是安全合理的。

关键词: 基坑设计; 基坑开挖; 有限元分析

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0129-05

作者简介: 孙海忠(1979-), 男, 江苏高邮人, 博士, 主要从事基坑工程的设计及科研工作。E-mail: sunhaizhong22@163.com。

Application of finite element numerical analysis in excavation design

SUN Hai-zhong

(Shanghai Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200032, China)

Abstract: During the process of excavation design, many conditions cannot be solved through the existing theoretical knowledge. However, finite element numerical analysis may make up the gap, and it can accurately calculate and guide the engineering design. Based on this, the capacity of struts is computed by the finite element method, and appropriate measures are provided. The engineering case shows that those measures are safe and reasonable.

Key words: excavation design; pit excavation; finite element analysis

0 引言

基坑工程是一个古老而又有时代特点的岩土工程课题。随着我国城市化进程的加速推进, 城市空间的开发利用也越来越被重视, 人们对地下空间的开发和利用日益增多, 基坑工程不仅数量增多, 而且向着更大、更深的方向发展。

基坑工程的支撑体系分为水平支撑体系和竖向斜撑体系。目前对于水平支撑体系的计算比较成熟, 对于竖向斜撑体系特别是支撑端部牛腿与底板组合时的承载力计算比较复杂, 一般依据已经积累的工程经验进行设计。但是, 当遇到斜撑端部没有底板而是桩基承台及相关联系梁组合情况时, 斜撑往往支撑在桩基承台上, 此时支撑端部的变形受承台、桩及联系梁的相互作用影响, 而这三者之间存在耦合关系, 采用常规分析方法很难反映诸多因素的影响, 若支撑端部变形控制不当则易导致基坑工程险情或事故的发生。本文正是基于这点, 采用有限元方法对某基坑斜抛撑牛腿的承载能力进行分析计算, 提出相应的处理措施, 并经工程实践证明该措施是安全合理的。

1 工程概况

1.1 地质条件

根据岩土工程详细勘察报告, 该工程建筑场地属滨海平原地貌类型, 基坑开挖深度范围内的地基土主要由填土、粉质黏土、淤泥和黏性土组成。根据勘探成果分析, 与基坑工程有关的场地地层分布如表1所示。对本工程有影响的主要为浅部土层中的潜水, 本工程基坑围护设计时, 按地下水潜水位埋深0.5 m考虑。

1.2 支护方案

本基坑采用水泥土搅拌桩重力坝作为围护结构, 北侧深坑坑边搅拌桩内插H500×300×11×18@3000型钢, 并结合斜向抛撑(Φ609×16钢管)一起控制基坑位移, 斜抛撑总共布置11排, 其中5排端部支撑在先前浇筑好的桩基承台上, 如图1所示。表1中 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 m 、 R_{inter} 的取值是结合上海地区的大量工程实践经验并参考了《深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例》^[1]和《基坑工程手册(第

二版)》^[2]确定的。

表1 土层物理力学性质参数表

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

参数	水泥 土搅 拌墙	①填土	②粉 质黏 土	③淤泥 质粉质 黏土	⑤灰 色黏 土
层厚/m		1.44	1.9	9.5	6.2
$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19	18	19.1	17.8	17.1
c / kPa	20	10	32	14	14
$\varphi /(^{\circ})$	20	5	17	17.5	12.5
$\psi /(^{\circ})$	0	0	0	0	0
$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	42.1	15	12	10	12
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	21	7.5	6	5	6
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	170.5	75	50	60	50
m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
R_{inter}	0.7	0.65	0.65	0.65	0.65

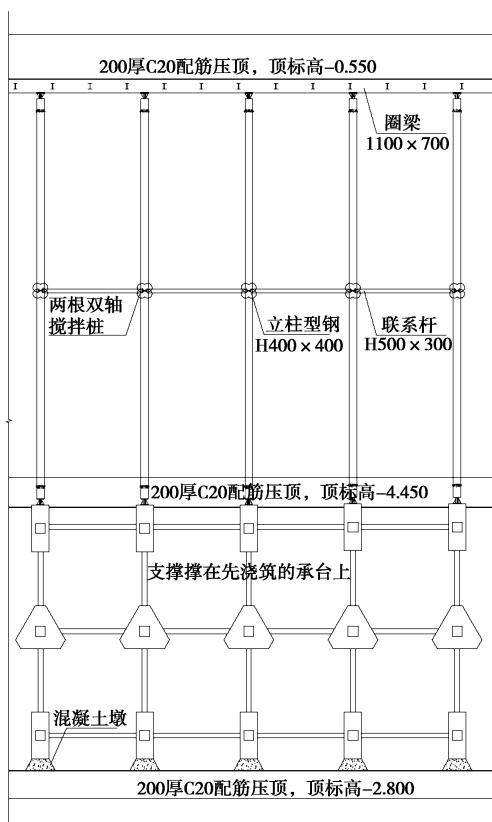


图1 支撑平面布置图

Fig. 1 Plan layout of support

2 有限元数值分析

2.1 土体模型

数值分析中的一个关键问题是采用合适的土体本构模型。虽然土的本构模型有很多种，但广泛应用于商业岩土软件的仍只有少数几种，如：线弹性模型、Duncan-Chang(DC)模型、Mohr-Coulomb(MC)模型、Drucker-Prager(DP)模型、修正剑桥(MCC)模型、Plaxis Hardening Soil(HS)模型等。线弹性模型（包括

DC 模型）由于对拉应力没有限制而无法较好地模拟主动土压力和被动土压力，一般不适合于基坑开挖的数值分析。弹-理想塑性的 MC 或 DP 模型不能区分卸荷和加荷，且其刚度不依赖于应力历史和应力路径，应用于基坑开挖数值分析时往往会得到不合理的很大的坑底回弹，虽然这两个模型在有些情况下能获得一定较满意的墙体变形结果，但难以同时给出合理的墙体后土体变形形态及变形影响范围。能考虑软黏土硬化特征、能区分加荷和卸荷的区别且其刚度依赖于应力历史和应力路径的硬化类弹塑性模型如 HS 模型和 MCC 模型，相对而言能给出较为合理的墙体变形及墙体后土体变形情况，适合于基坑开挖的数值分析。从上海地区多个工程的分析应用实例来看，HS 模型具有较好的适用性^[3]。

HS 模型本质上是一个双曲线的应力应变关系，其屈服函数为：

$$f = \bar{f} - \gamma^p , \quad (1)$$

式中， \bar{f} 是应力的函数，而 γ^p 是塑性应变的函数，且

$$\bar{f} = \frac{1}{E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{\text{ur}}} , \quad (2)$$

$$\gamma^p = -(2\varepsilon_i^p - \varepsilon_v^p) \approx -2\varepsilon_i^p , \quad (3)$$

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：

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m , \quad (4)$$

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m . \quad (5)$$

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：

$$[F] = [B]^T [D_c] [B] \{\delta\} , \quad (6)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} , \quad (7)$$

$$[D_c] = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} . \quad (8)$$

式中 $[F]$ 为节点力向量； $\{\delta\}$ 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。

2.2 分析对象

本基坑采用竖向斜撑体系，坑内存在两种挖深，

深坑挖深 5.7 m, 浅坑挖深 3.9 m, 由于深坑内局部深坑较多, 不便于浇筑斜抛撑牛腿, 斜抛撑只能支撑在浅坑处, 而浅坑底面不浇筑底板, 只有联系梁和桩基承台, 经过项目组成员多次集体讨论, 斜抛撑最好支撑在桩基承台上, 如图 1, 2 所示, 但随之带来的问题是: 桩基承台是否具有足够的承载力来抵抗斜抛撑的水平荷载, 这也是业主和结构设计单位所关注的。依据目前的理论水平, 很难计算出承台、桩及联系梁的协同作用, 也不太现实。应用数值模拟方法是较为可行的, 根据有限元计算结果, 结合实际工程经验来判断支撑水平荷载对桩基承台的影响程度, 以此作为基坑围护设计的依据。

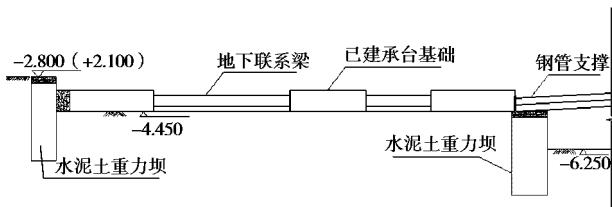


图 2 支撑布置剖面图

Fig. 2 Profile of support

2.3 有限元模型建立及网格划分

从图 1 可以看出, 该支撑平面布置可以看成一个平面问题来分析计算。模型计算宽度取 50 m, 计算深度取 50 m, 模型中混凝土承台采用 C30 砼, 具体物理参数取值为^[4]: $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$, $\nu = 0.2$, $E = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。桩基采用 PHC-AB600(110) 管桩, 根据国家建筑设计标准设计图集《预应力混凝土管桩》(10G409), 管桩材料是 C80 砼, 具体参数取值为^[5]: $E = 3.8 \times 10^4 \text{ MPa}$, $I = 0.00534 \text{ m}^4$, $A = 0.169 \text{ m}^2$, 管桩长 37 m, 伸入承台长度为 100 mm。水泥土重力坝物理参数取值^[3]: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $E = 300 \text{ MPa}$, $c = 25 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$ 。各土层物理参数取值见表 1。

由基坑剖面内力计算得到每延米支撑水平荷载为 132 kN/m, 而支撑间距为 8.4 m, 则每根支撑承受的水平荷载为 1108.8 kN, 承台高度 1.2 m, 所以作用在承台上的水平方向均布荷载为 924 kN/m。联系梁高度为 700 mm, 宽度 400 mm, 按平面应变问题考虑, 联系梁可以等效为高度 280 mm, 宽度 1000 mm 的板体。

根据此问题的特点, 对位移边界条件做了假设: 认为模型的左右边界水平方向位移为零, 垂直方向允许发生一定变形, 下边界任意方向的变形为零, 具体模型见图 3。模型采用 15 节点单元, 网格划分精度选择中等粗糙程度, 并对结构物与土体接触处及基坑底部附近的网格进行加密, 这样既能减少计算时间又能

得到较为理想的计算结果, 网格划分见图 4 所示。

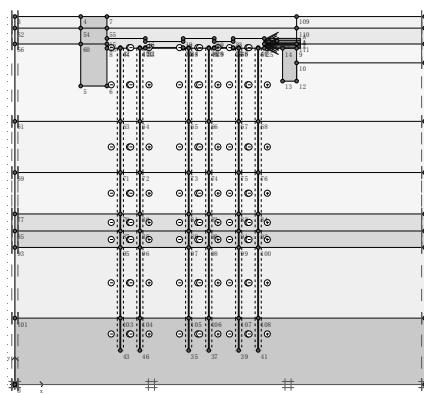


图 3 有限元模型

Fig. 3 Model of finite element

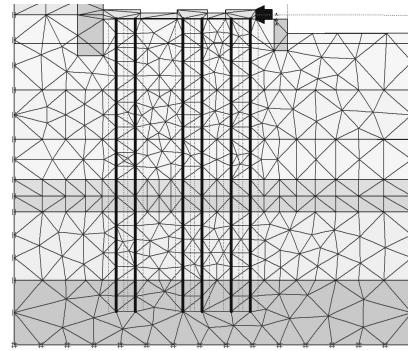


图 4 网格划分

Fig. 4 Finite element meshes

2.4 模拟结果分析

模拟过程见表 2 所示, 计算结果如图 5、图 6 所示, 靠近支撑处管桩的位移图见图 7 所示, 最大位移为 $10.66 \times 10^{-3} \text{ m}$, 满足设计要求。该管桩最大弯矩为 104.18 (kN·m) (如图 8 所示), 小于 PHC-AB600(110) 管桩的桩身受弯承载力设计值 281 (kN·m)。该管桩最大水平剪力为 324.1 kN, 大于桩身剪切承载力 305 kN^[5]。从图 9 可见, 管桩剪力最大值主要集中在管桩顶端 3.5 m 范围内。另外, 通过对比发现, 水泥土搅拌墙局部刺入破坏较严重, 如图 10 所示, 降低了基坑侧壁的安全稳定性。

表 2 模拟过程

Table 2 Steps of simulation

计算荷载步	工况
Step0	模拟土体在重作用下的应力场
Step1	打入 PHC 管桩
Step2	挖土至承台底面
Step3	施加水平荷载
Step4	开挖右侧深坑土体

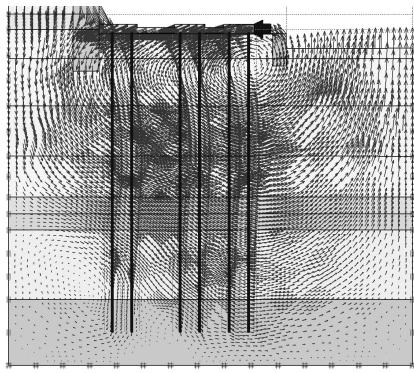


图 5 位移矢量图

Fig. 5 Displacement vector

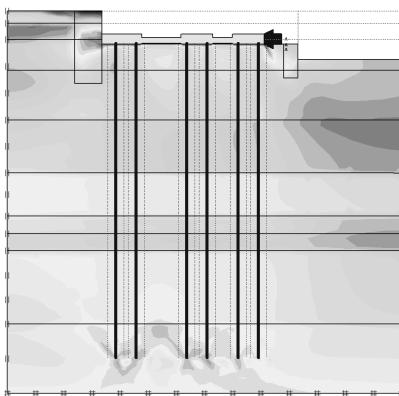


图 6 应力云图

Fig. 6 Stress cloud

2.5 设计措施

(1) 措施一

在钻孔灌注桩中填芯, 提高 PHC 管桩的抗剪承载力。根据管桩剪力图, 在管桩顶端 4 m 长度范围内进行填芯 C30 微膨胀混凝土, 如图 11 所示。管桩内填芯面积为 113354 mm^2 , C30 混凝土剪切模量可取其弹性模量的 40%^[4], 则管桩内混凝土提供的剪力 $R = 3 \times 10^4 \times 40\% \times 113354 \times 10^{-3} = 1360248 \text{ kN}$ 。对比管桩剪力图 9, 填芯后的管桩完全能满足水平抗剪切要求。

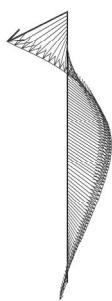
图 7 管桩位移图 ($D_{\max}=10.66 \times 10^{-3} \text{ m}$)

Fig. 7 Displacement of pipe pile

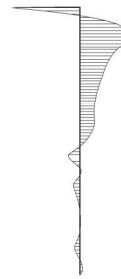
图 8 管桩弯矩图 ($M_{\max}=104.18 \text{ kN}\cdot\text{m}$)

Fig. 8 Moment of pipe pile

图 9 管桩剪力图 ($Q_{\max}=324.1 \text{ kN}$)

Fig. 9 Shear force of pipe pile

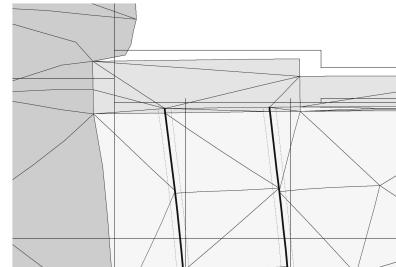


图 10 水泥土搅拌墙局部刺入破坏

Fig. 10 Destruction of cement wall

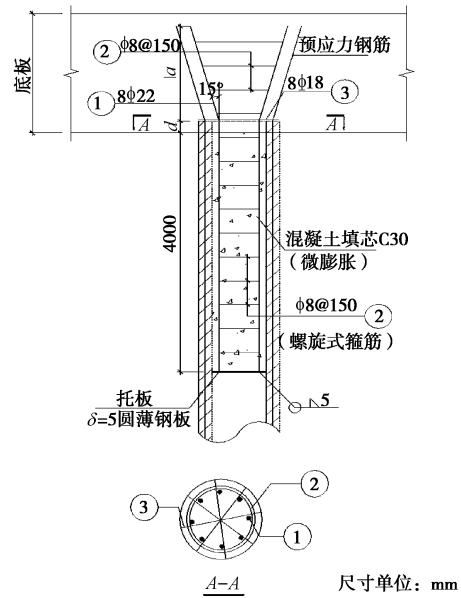


图 11 管桩填芯详图

Fig. 11 Filling of pile core

(2) 措施二

从图 10 可见, 水泥土搅拌墙局部刺入破坏严重, 为提高水泥土搅拌墙刚度, 在与承台相连接的重力坝区域插入 H500×300×11×18@450 的工字型钢, 长度为 8 m, 具体见图 12。

(3) 措施三

为进一步提高水泥土搅拌墙的自身稳定性, 在与承台相连接的重力坝区域加密搅拌桩格栅, 如图 13 所示。

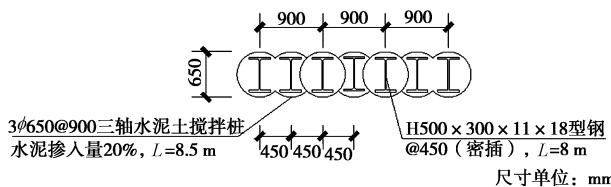


图 12 构造详图

Fig. 12 Detail of structure

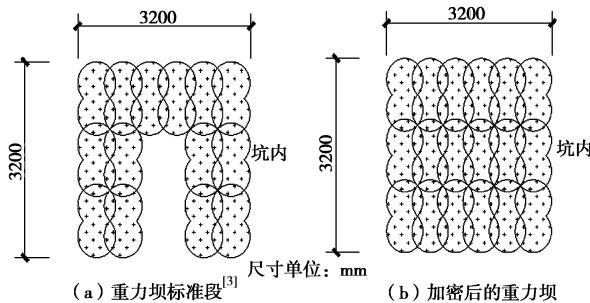


图 13 构造详图

Fig. 13 Detail of structure

3 结语

深基坑工程历来被认为是实践性很强和风险性很高的岩土工程问题, 在规避基坑风险方面, 围护设计环节尤为重要, 而在设计过程中, 经常会遇到一些很难用已有解析理论进行计算的工况, 而有限元数值分析正好弥补了这一空白, 并能较好地指导工程设计。本文正是基于这一点, 采用有限元方法对某基坑斜抛

撑牛腿的承载能力进行数值分析, 提出了相应的处理措施, 而该工程现场的监测结果证明这些措施是安全合理的。

参考文献:

- [1] 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: 161 - 260. (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: 161 - 260. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 1078 - 1103. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Deep excavations engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 1078 - 1103. (in Chinese))
- [3] 上海市城乡建设和交通委员会. DB/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市勘察设计行业协会, 2010. (DB/TJ08 — 61 — 2010 Shanghai Construction and Transportation Committee. Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai: Investigation and Design Institute, 2010. (in Chinese))
- [4] 中国建筑科学研究院. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010. (China Academy of Building Research. GB50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. 2010. (in Chinese))
- [5] 中国建筑标准设计研究院. 10G409 预应力混凝土管桩[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010. (China Institute of Building Standard Design and Research. 10G409 prestressed concrete piles[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, 2010. (in Chinese))

(本文责编 明经平)