

# 某超高层建筑围护桩优化设计

杨春<sup>1</sup>, 宋珪<sup>1</sup>, 黄志强<sup>2</sup>

(1. 江西省地质工程(集团)公司, 江西南昌 330029; 2. 中国地质大学, 湖北武汉 430074)

**摘要:**结合苏州某超高层建筑围护结构设计的工程实例,对围护桩配筋进行优化,并对沿周边非均匀配筋和均匀配筋进行强度、刚度和经济比较,同时对围护桩不同长度下基坑受力变形特征进行了研究。结果表明:围护桩采用不均匀配筋及长短交错布置,在受力性能上变化不大,但是能够降低工程造价,缩短工期,获得最佳的经济效益和社会效益。

**关键词:**超高层建筑;围护桩;优化设计;配筋;桩长

**中图分类号:**TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)06-0036-04

**Optimization Design of Retaining Pile for a Super High-rise Building/YANG Chun<sup>1</sup>, SONG Gui<sup>1</sup>, HUANG Zhi-qiang<sup>2</sup>**  
(1. Jiangxi Geo-engineering (Group) Corporation, Nanchang Jiangxi 330029, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Combined with the engineering case of the retaining structure design of a super high-rise building in Suzhou, the reinforcement steel was optimized; comparison was made on the strength, stiffness and economic of surrounding non-uniform reinforcement and uniform reinforcement; and study was made on the stress deformation characteristics of foundation pit under the condition of retaining piles with different length. The results show that there is little change in mechanical behavior when non-uniform reinforcement steel and retaining pile with different length are adopted, but low project cost, short construction period and the best economic and social benefits can be achieved.

**Key words:** super high-rise building; retaining pile; optimization design; reinforcement steel; pile length

## 0 前言

对于超高层建筑,基础工程造价一般占土建工程总造价的25%~40%,施工工期约占总工期的1/3,同时,深基坑的施工也是一项风险极大的任务,因此,围护结构是否安全,关系到整个工程的进度。

目前在设计围护墙的问题上,苏州大部分采用比较保守的做法,采用3道支撑以上时,入土比仍然达到0.85以上。在止水帷幕上采取 $\varnothing 850$  mm的三轴水泥土搅拌桩,进入不透水层或微透水层。采用钻孔灌注桩作为围护的时候,基本上采用沿圆周均匀配筋,并且桩长一致,这固然对于施工是便利的,但钢筋与混凝土用量增加了,是不经济的做法。本文结合工程实例,从配筋和桩长两方面计算讨论了围护桩的优化设计,对今后类似的工程具有一定的指导意义。

## 1 工程概况

该工程位于苏州工业园区星桂路与星海路之间,苏惠路北侧、相门塘河道南侧。场地地形西北角较低,地面高程1.48~1.97 m;其余地形较为平坦,

地面高程1.97~2.84 m。场地地貌单元属长江三角洲冲积平原。四周道路路面高程4.00 m,相门塘堤面高程3.00 m。

通过勘察,自地表至40.0 m深度范围内所揭露的土层,由填土、粉性土和粉砂组成,具有成层分布的特点,各土层的物理力学参数如表1所示。基坑挖深范围内需要穿越透水性很大的粉土粉砂层(④层和⑤层),需考虑坑底下卧层即粉砂层的承压水问题。浅层(约5 m)土层强度高、透水性差。

表1 场地的物理力学参数

土层序号	土层名称	厚度/m	$c$ / kPa	$\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	水平基底系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	渗透系数 $K$ / ( $\times 10^{-6}$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
① <sub>2</sub>	素填土	0.5	12	10		18.5	20
④	粉质粘土	4.4	30	14	21	19.7	1.69
⑤	粉土	9.5	9.1	26.6	25	19.2	164
⑥	粉质粘土	8.5	12.7	16.5	16	19.2	8.64
⑧ <sub>1</sub>	粉质粘土	2.1	18.5	18.5	32	20.2	0.04
⑧ <sub>2</sub>	粉质粘土	11.2	18.1	26.7	24	19.5	4.39
⑨	粉砂	3.0	9	27	40	19.0	97

经过比较分析,基坑支护方式决定采用浅层放

收稿日期:2011-03-18; 修回日期:2011-04-19

作者简介:杨春(1966-),男(汉族),江西南昌人,江西省地质工程(集团)公司高级工程师,探矿工程专业,从事岩土工程施工工作,上海市徐汇区龙漕路1弄1号(200235),yangchun1966@sohu.com。

坡土钉墙、深层 2 道钢筋混凝土支撑,采取先浇底板后挖主楼深坑的做法。

### 2 围护桩的计算分析

#### 2.1 基坑整体滑移稳定性计算理论

按圆弧滑动假定计算基坑开挖阶段主要是第一道支撑安装后第二道支撑安装前地基的稳定性。对于多道支撑的基坑来说,一般总能得到满足。

#### 2.2 基坑坑底抗隆起稳定性计算理论

基坑抗隆起稳定性是基于太沙基(Terzaghi)公式<sup>[1]</sup>和普朗特等(Prandtl-Reissner)公式<sup>[2]</sup>。

假定开挖面以下的墙体能起到抵抗基地土体隆起的作用。即将墙地面作为基准面,采用太沙基和普朗特-瑞斯纳关于地基极限承载力公式。由此得到抗隆起安全系数  $K$ :

$$K = \frac{\gamma_2 DN_q + cN_c}{\gamma_1 (H + D) + q} \quad (1)$$

式中: $K$ ——抗隆起安全系数,根据基坑安全等级确定; $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ——墙背开挖面以上土的平均重度和墙前土的平均重度; $c$ ——墙背土的平均粘聚力; $D$ ——开挖面至墙底的距离; $H$ ——基坑开挖深度; $N_c$ 、 $N_q$ ——承载力系数; $q$ ——地面荷载。

对于太沙基公式:

$$N_q = \frac{1}{2} \left[ \frac{e^{3\pi/4 - \varphi/2}}{\cos(\pi/4 + \varphi/2)} \right]^2$$
$$N_c = (N_q - 1) / \tan\varphi$$

对于普朗特-瑞斯纳公式:

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$$

$$N_c = [e^{\pi \tan\varphi} \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) - 1] \text{ctg}\varphi$$

式中: $\varphi$ ——土的内摩擦角。

#### 2.3 墙体内力与变形计算的杆系有限元计算理论

围护墙施工阶段沿基坑周边取单位长度采用杆系有限元法计算。地层对墙体的作用采用等效弹簧进行模拟。围护墙划分为梁单元,支撑为仅承受轴力的杆单元,考虑各施工阶段施工参数变化、墙体位移的影响,满足强度及变形控制的安全稳定性要求。

围护结构开挖阶段计算时累加结构的前一施工步的位移值以及支撑的变形,按“先变形、后支撑”的原则进行结构分析,并计算主体结构回筑阶段(即换撑阶段)各工况的内力组合,最终的位移为各阶段之累计值。对于本工程计算假定如下:

- (1) 土压力计算理论采用朗金土压力理论, $c$ 、 $\varphi$ 值取固结快剪峰值,采用水土分算;
- (2) 地面超载取为  $20 \text{ kN/m}^2$ ;
- (3) 计算简图如图 1 所示。

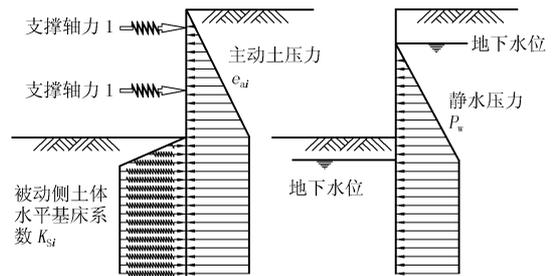


图 1 杆系有限元计算简图

计算结果如图 2 所示。

包络图(水土合算,矩形荷载)

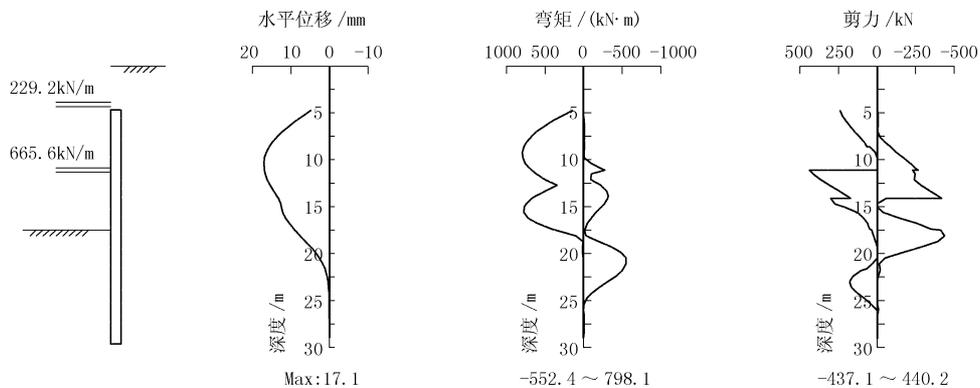


图 2 围护桩内力和变形计算结果

### 3 围护桩采取沿周长不均匀配筋的设计和施工

#### 3.1 圆形截面抗弯构件沿圆周不均匀配筋的计算公式

根据材料力学理论,抗弯构件拉压应力分布是与距离中和轴大小密切相关的,距离中和轴越远,拉应力和压应力越大<sup>[3]</sup>。因此将钢筋布置在距离中和轴较远处范围可以充分发挥其承载潜力。在中和

轴附近范围布置一定的构造钢筋即可。如图3。

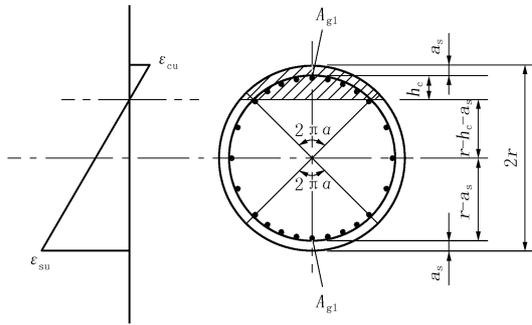


图3 构造钢筋的布置

本工程按拉压区钢筋局部均匀对称配置,即拉压区钢筋面积均为  $A_{g1}$ 。假定受拉区钢筋的受拉屈服与受压区边缘混凝土受压破坏同时发生,即受压区边缘混凝土达到其极限压应变 0.0033 时,受拉区边缘钢筋达到极限拉应变 0.01。假定围护桩直径为  $2r$ 。

根据材料力学平截面假定,求得受压区高度  $h$  为:

$$h/(2r-h) = \varepsilon_{cu}/\varepsilon_{su} \quad (2)$$

$$\text{又:} \quad h = h_c + a_s \quad (3)$$

冠形混凝土受压区的面积和形心位置为:

$$A_c = \pi\alpha r^2 - (1/2)r^2 \sin(2\pi\alpha) \quad (4)$$

$$y_c = (2/3) \cdot r^3 [\sin(\pi\alpha)]^3 / A_c \quad (5)$$

围护桩的极限承载力可求得:

$$M_u = A_{g1} f_k (r - a_s + y_c) \quad (6)$$

所以钢筋面积为:

$$A_g = 2M_u / [f_k (r - a_s + y_c)] \quad (7)$$

圆形截面抗弯构件沿周边局部均匀配筋的计算在国家规范《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120 - 99)附录 D 中已有专门计算公式。

### 3.2 均匀配筋与不均匀配筋的抗弯承载力比较

圆形抗弯构件采取周边均匀配筋和不均匀配筋在抵抗同样弯矩时钢筋用量是不一样的,后者较为节省<sup>[4]</sup>。针对本工程基坑围护桩,按周边均匀配筋和不均匀配筋情况,对其抗弯承载力进行了计算,计算结果如下。

已知混凝土强度为 C30 ( $f_c = 14.3 \text{ MPa}$ ),钢筋为二级 ( $f_k = 300 \text{ MPa}$ ),围护桩直径 900 mm,混凝土保护层厚度 50 mm。根据前面的计算知,弯矩为  $877.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$  ( $798.1 \text{ kN}\cdot\text{m} \times 1.1$ )。

按国家规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010 - 2002)“7.3.8”条规定,可算得按周边均匀配筋时围护桩的配筋为  $7275 \text{ mm}^2$ 。

按本节公式计算周边不均匀配筋时的钢筋,得到围护桩的配筋为  $4995 \text{ mm}^2$ 。比均匀配筋节省 31.3%。

### 3.3 围护桩采用沿周边不均匀配筋的施工措施

由于采用周边不均匀配筋,钢筋设置方向特别重要,需要在施工中加以注意。本工程的围护桩桩顶设在地面以下约 3 m,设置时更显困难,因为桩顶钢筋在施工时不露出地面。

为此需要在钢筋笼上设置定向钢筋。目前方便的做法是钢筋笼吊钩钢筋作为定向钢筋。为了便于钢筋笼放置时微调,吊钩钢筋比均匀配置的情况粗一些。对于该工程,采用直径 16 mm 钢筋。

具体放置时,由专业工程人员现场检查,钢筋笼进前大致调整到设计角度方位(设计的误差允许在  $\pm 5^\circ$ ),最终定位前小心旋转整体钢筋笼,适当微调,达到最终位置。

本工程由于设置逐桩旁站检查,钢筋笼方位合格率达到 99%。达到设计要求,从而实现确保质量,降低成本的目标。

## 4 围护桩采取长短桩交错布置的设计

大量的工程实践、理论研究及试验研究发现,排桩式抗滑桩桩后主动区的土体在桩发生变形时,产生不一致的变形,随着变形的发展,会形成土压力拱。墙桩前被动区的土体在桩的推动下也会形成反方向的土压力拱<sup>[5]</sup>。如图4所示。

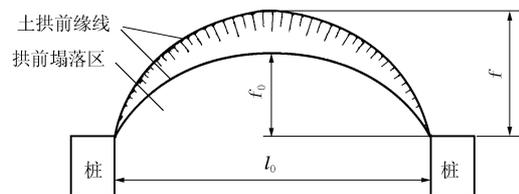


图4 土拱效应示意图

土压力拱的实质是:介质的不均匀变形产生的应力转移和应力重分布现象。土拱效应使得桩前或桩后土体形成土体的弧形压力拱圈,拱圈将岩土体施加的满布力变成作用到相邻的排桩的集中力。

在设计该工程时,利用坑底土体的压力拱原理,桩按长短桩交错布置,此方案充分考虑了坑底被动土在桩的推力下的成拱效应。

该工程围护桩长短桩桩长相差 1.5 m,在进行稳定性计算时可以采用长桩进行考虑,原因如下:(1)桩尖范围桩的内力本来就是最小的,按土拱效应,交错布置的桩在集中荷载下依然足以抵抗桩的

内力;(2)桩尖范围内土体基本未受基坑开挖的扰动,被动抗力较大,更容易形成压力拱;(3)桩尖范围的土体受到前后(主动和被动土压力)、上下(垂直自重压力)、左右(平衡的水土压力)等荷载,处于三向应力状态,强度高于普通土体。

针对基坑稳定性,采用启明星软件对主楼基坑围护桩按长桩、短桩、和介于二者的桩,进行了坑底稳定性安全计算,结果如表2所示。

表2 不同深度围护桩的基坑稳定性系数计算一览表

序号	开挖深度/m	入土深度/m	安全系数	备注
1	11.65	12	1.94	按长桩计算
2	11.65	10.5	1.82	按短桩计算
3	11.65	11.25	1.88	按介于二者之间长度计算

从表2可以看到,采用长短桩进行围护,其稳定性不会受很大影响,具有足够的安全性,但经济性却十分明显。

## 5 结论

(1)钻孔灌注桩做为围护桩在强度设计上可以

采用局部对称,而不必采用沿周长均匀配筋。根据本文的计算,按周边不均匀配筋时围护桩的配筋较传统的方法节省了31.3%的钢筋。

(2)对于围护桩采取长短交错布置,只要长度差适宜,可以保证基坑的坑底稳定性,经济效益也较为明显。

(3)对于围护桩的优化设计是多个方面的,由于条件的限制,本文仅从配筋和桩长两个方面进行了分析,如何全面地进行优化还需要更为深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 李明宇,郭院成,刘耀宗.深基坑隆起稳定性的模糊概率分析[J].河南科学,2009,(8).
- [2] 万云霞,王君,刘福臣.国内外基坑抗隆起验算方法对比分析[J].人民黄河,2010,(5).
- [3] 郑颖人,龚晓南.工程岩土塑性力学基础[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [4] 莫海鸿,周汉香,赖爱平.基坑支护桩结构优化设计[J].岩土工程学报,2001,(3):144-148.
- [5] 廖雄华,王蕾笑,张克绪,等.土体非线性弹性-塑性本构模型[J].岩土力学,2003,(1):41-46.

(上接第35页)

(9)凝固水泥及做耐压试验。凝固水泥72h后,下入 $\varnothing 295$ mm牙轮钻头扫除浮鞋及浮箍,进行耐压试验经检测达到了要求。试验完毕后,开始正常钻进,施工钻孔下段。由于准备充分,措施得当,此次下套管过程安全顺利,固井一次成功。

## 6 结语及建议

(1)在梧桐庄矿回灌孔中应用浮箍浮鞋,简化了下管、固井施工程序,提高了工作效率,既节约工期还节约成本。

(2)随着国民经济的持续快速发展,煤炭的需求将进一步增加,在保证煤矿开采量的提升和安全需要的前提下,大口径服务钻孔越来越多,如:排水孔、送料孔、瓦斯抽放孔、电缆孔、注浆孔等,这些都需要下入大直径厚壁钢管。通过本次采用该项技术在两个回灌孔下管及固井工程中的实际应用,未来浮箍浮鞋在煤矿大口径服务钻孔中的应用前景将十

分广阔。

(3)在具体施工过程中应注意前面提到的连接和一些具体细节管理,可以根据管材直径设计定做各种规格的浮箍浮鞋。总之,应在施工中及时总结经验,使该项技术在煤矿大口径服务孔中得到推广及应用。

## 参考文献:

- [1] 中国煤田地质总局.特种钻探工程(煤田钻探工程)[M].北京:煤炭工业出版社,1995.
- [2] 乌效鸣,等.钻井液与岩土工程浆液[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2002.
- [3] 彭桂湘,大口径工程井套管事故及预防技术措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(8):47-50.
- [4] 赵金洲,张桂林.钻井工程技术手册[M].北京:中国石化出版社,2004.
- [5] 杨宗仁,张新华,张西坤,煤矿瓦斯抽排井施工钻孔与巷道串通的治理及成井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(11):15-17.