

# 浅谈不对称圆形内衬支撑基坑设计

李 眇, 顾开云, 林 靖

(中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

**摘要:** 由于基坑形状往往取决于建筑周边环境条件及使用要求,许多基坑必须采用不对称的圆形围护结构。不对称的圆形围护结构是否还能有效地发挥圆形围护结构的三维拱效应,是否仍然可以采用常规的平剖面规范设计方法仍有待研究。结合直径 50 m 外接方形的基坑案例,对不对称圆环内衬支撑基坑的设计思路及分析方法进行了综合的阐述。通过二维杆件分析,得到在均匀围压作用下,不对称圆环支撑的刚度在不同区域差异非常大,仅采用圆环刚度来等效支撑刚度对围护结构分析来说是不安全的。引入考虑圆环不对称性的支撑刚度折减系数  $k$ ,能较为真实地反应支撑的有效刚度,且得到较为合理的围护桩内力。

**关键词:** 不对称圆形内衬基坑; 设计方法; 刚度折减系数; 有限元分析

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0888-04

**作者简介:** 李 眇(1981- ),女,湖南湘潭人,博士,高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的设计与科研工作。E-mail: yun.li1981@gmail.com。

## Design method for bracing of asymmetric cylindrical foundation pits

LI Yun, GU Kai-yun, LIN Jing

(China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** Because of the limited conditions of the surrounding environments and the operating requirements, most of the foundation pits are asymmetric cylindrical shape. The design and analysis methods are proposed based on an asymmetric cylindrical foundation pit, which is 25 m in depth and 50 m in diameter and constructed by using asymmetric cylindrical bracing as a horizontal support. 2D and 3D methods are studied. The results indicate that a stiffness-reduced coefficient  $k$  for the 2D method for beams on elastic foundation should be considered to get reasonable results.

**Key words:** asymmetric cylindrical foundation pit; design method; stiffness-reduced coefficient; FEM

## 0 引言

大型圆形地下结构方案综合考虑了地下结构的受力和结构性能,是一种非常合理的地下结构形式,在工艺和建筑允许的前提下这种方案必将占有较大的结构受力和经济方面的优势。近年,采用大型圆形地下结构方案的工程不断出现,表 1 列出了国内外最为典型的几个圆形围护结构的地下工程案例<sup>[1]</sup>。

由于基坑形状往往取决于建筑周边环境条件及使用要求,许多基坑并不能采用完整的圆形围护结构。不对称的圆形围护结构是否还能有效地发挥圆形围护结构的三维拱效应,是否仍然可以采用常规的平剖面规范设计方法需经过一定的分析研究。

本文将结合某不对称圆形基坑围护结构的设计思路,针对不对称圆形基坑围护结构设计时需要考虑的问题进行具体分析,以期得到较为合理的设计思路以及分析方法。

表 1 大直径深基坑工程实例表

Table 1 Project cases of deep cylindrical foundation pits

工程名称	直径 /m	墙厚 /m	挖深 /m	墙深 /m
宝钢热轧铁皮坑	27.5	1.2	31.63	49.9
上海世博地下变电站	134	1.2	34	58
彭越浦泵站	60	0.8	26.45	37.5
阳逻长江大桥南锚墩	70	1.5	45	60
香港环球金融中心基坑	76	1.5	28	75
东京袖开浦 LPG 地下贮罐	64	0.8	21	33.7
东京 50 万伏地下变电所	144	2.4	29.2	70
上海环球金融中心基坑	100	1	18.4	31.6

## 1 工程概述

项目位于福建省某厂房区域内。围护结构平面为一个圆形基坑(直径 50 m),西侧外接一个小方形基

坑的平面布置形式, 挖深约为 25 m。具体围护平面布置及典型剖面见图 1, 2 所示。项目围护结构采用双排灌注桩的竖向围护体系, 内圈采用  $\Phi 1200@2000$  灌注桩, 外圈  $\Phi 1000@2000$  灌注桩, 内外圈灌注桩交错布置。外排有效桩长约为 63 m, 以进入强风化岩 2 m 控制, 内排有效桩长 50 m。

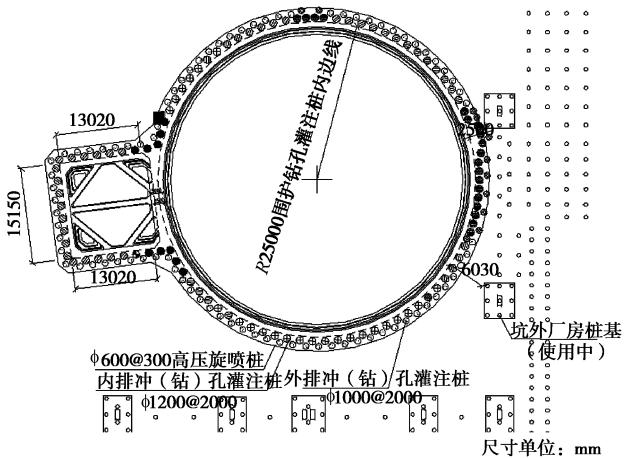


图 1 围护结构的平剖面示意图

Fig. 1 Sketch of plane and cross-section of retaining structure

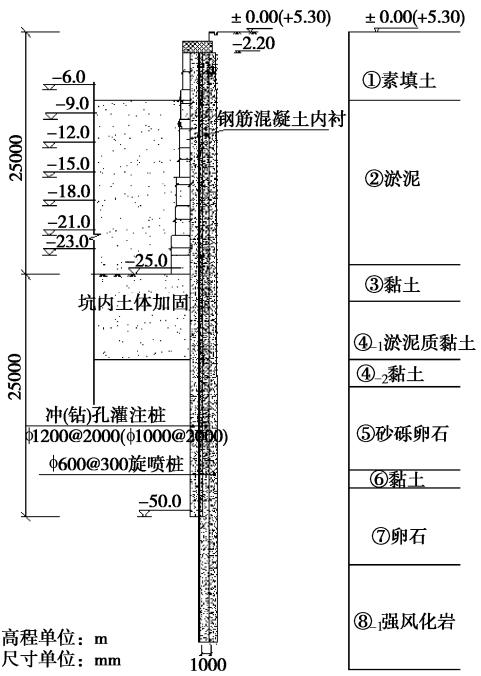


图 2 基坑围护剖面示意图

Fig. 2 Cross-section of retaining structure of excavation

平面支撑采用内衬的形式, 充分发挥圆拱效应。随着基坑开挖深度加大, 不断加厚内衬。在 21 m 以上内衬按照 3 m 一段, 21 m 以下内衬改为 2 m 一段。

拟建场区岩土主要物理力学参数如表 2 所示。

本工程采用离散的灌注桩作为竖向围护体, 则空间的圆拱效应完全由圆形内衬墙提供, 因此不对称的圆形内衬墙的受力分析显得格外重要。

表 2 土层主要物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层 名称	重度 $\gamma_0$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	直剪固快		渗透系数	
		$c_q$ (kPa)	$\varphi_q$ (°)	$k_v$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$k_h$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
①填土	18.5	—	—	$5.0\times 10^{-4}$	$5.0\times 10^{-4}$
②淤泥	15.2	9	5.8	$5.0\times 10^{-7}$	$5.0\times 10^{-7}$
③黏土	17.5	32	15.0	$1.0\times 10^{-7}$	$2.5\times 10^{-7}$
④.1 淤泥质黏土	16.7	11	7.0	$3.0\times 10^{-7}$	$4.0\times 10^{-7}$
④.2 黏土	17.4	25	11.6	$1.0\times 10^{-7}$	$2.0\times 10^{-7}$
⑤砂砾卵石	19.5	—	—	$5.0\times 10^{-4}$	$5.0\times 10^{-4}$
⑥黏土	17.6	39	16.0	$5.0\times 10^{-7}$	$5.0\times 10^{-7}$
⑦卵石	20.5	—	—	$1.0\times 10^{-7}$	$2.5\times 10^{-7}$

## 2 结构计算的分析和研究

### 2.1 不对称圆形内衬墙等效弹簧刚度法的刚度选取分析

平面竖向弹性地基梁法中环梁和墙体的等效弹性支撑系数的计算方法可以在一般的平面竖向弹性地基梁的方法上综合考虑环梁或者圆形墙体的三维效应, 将环梁或者圆形墙体以等效支撑弹簧来替代<sup>[2]</sup>。单位宽度环梁的等效分布弹性支撑系数可按下式计算(计算结果见表 3):

$$K_h = \frac{E_h A_h}{R_{h0}^2}, \quad (1)$$

式中,  $K_h$  为环梁的等效分布弹性支撑系数 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ),  $E_h$  为环梁材料的弹性模量 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ),  $A_h$  为环梁截面面积 ( $\text{m}^2$ ),  $R_{h0}$  为环梁中心线初始半径 (m)。

通过计算可以得到, 圆形环梁的等效分布弹性支撑系数  $K_h=37.3\sim 88.8$  ( $\text{MN}/\text{m}^3$ )。根据该方法可以得到围护结构的位移以及弯矩分布情况如图 4(a) 所示。

表 3 二维等效弹性支撑系数的计算结果

Fig. 3 Calculated results by 2D method

支撑	厚度 $H$ /m	高度 $B$ /m	半径 $R_{h0}$ /m	等效分布支撑刚度 $K_h$ /( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
第一道	0.8	1	25.4	37.3
第二道	1.0	1	25.5	46.2
第三道	1.1	1	25.6	50.6
第四道	1.2	1	25.6	55.0
第五道	1.5	1	25.8	67.9
第六道	1.6	1	25.8	72.2
第七道	2.0	1	26.0	88.8

建立不对称圆环支撑的平面杆件模型, 并在平面不对称圆环支撑外围施加均匀的外力, 进行二维不对称圆环杆件模型分析。通过二维杆件分析, 得到在均匀围压作用下, 不对称圆环支撑的变形, 通过计算得到不均匀圆环支撑的刚度分布情况。图 3 为 800 mm 厚的圆环支撑在 500 kN 的外侧围压作用下的位移以及相应刚度计算结果。每点的刚度为该位置的围压与位移的比值。

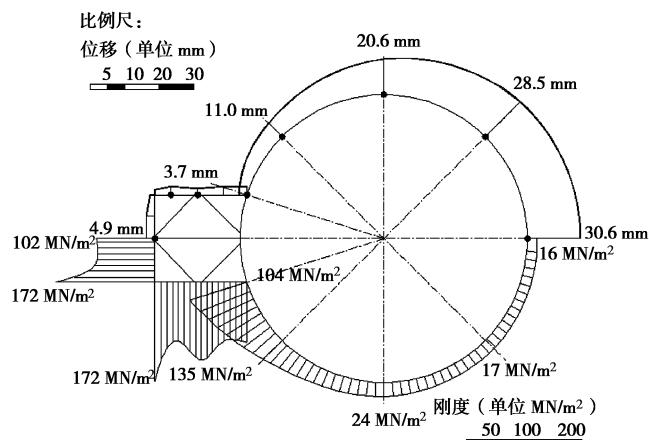


图 3 二维杆件计算的位移及刚度计算结果

Fig. 3 Calculated results by 2D method (Horizontal)

通过上面的分析可以得到, 不对称圆环支撑的刚度在不同的区域相差非常大, 刚度变化可以相差 10 倍左右。总体说来, 由于不对称的影响, 大范围内的支撑刚度都比完整的圆环支撑刚度弱 50%。

通过启明星进行剖面计算, 可以得到围护桩的位移及内力分布图, 如图 4 所示。可以看到, 虽然二维杆件计算不对称圆环得到的平面支撑刚度较圆环的等效分布刚度小 50%, 但对剖面计算的结果影响并不是非常显著, 围护结构的弯矩值增加 10%, 位移值也相应增加了 20%。

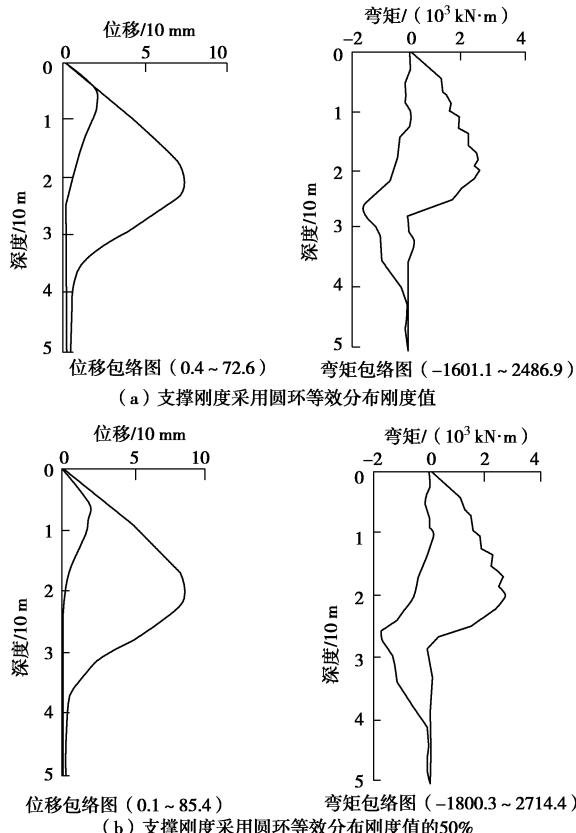


图 4 二维竖向围护结构计算结果

Fig. 4 Calculated results by 2D method (Vertical)

由于支撑刚度减小, 支撑所受到的反力也相应减小。表 4 为两种支撑刚度计算所得到的支撑反力对比。

以上分析说明, 对于不对称圆环, 如果仍采用圆环的等效刚度进行二维分析计算, 可能造成部分区域围护桩的结构设计偏危险, 围护桩位移估计偏小, 而支撑结构构件设计偏保守。

表 4 二维竖向围护结构计算的支撑反力结果

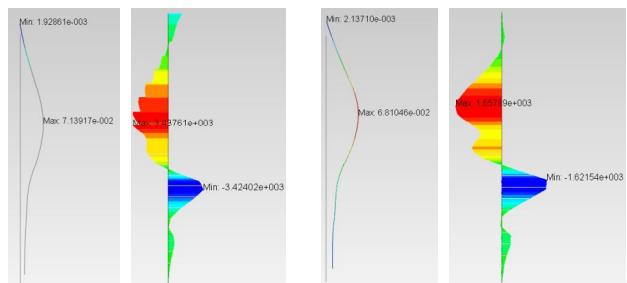
Fig. 4 Calculated results of reactions retaining structure by 2D method

支撑	厚度 $H$ /m	等效分布支撑刚度 $K_h$ 计算所得支撑反力/(kN·m <sup>-1</sup> )	等效分布支撑刚度 $K_h$ 的 50% 计算所得支撑反力/(kN·m <sup>-1</sup> )
第一道	0.8	253.1	215.8
第二道	1.0	331.3	278.8
第三道	1.1	410.7	348.5
第四道	1.2	445.6	381.7
第五道	1.5	497.4	415.8
第六道	1.6	441.8	366.7
第七道	2.0	352.3	275.5

## 2.2 三维连续介质有限元法

根据本工程的情况, 采用 MIDASGTS 软件进行三维连续介质分析。采用四边形单元划分网格。整个模型的平面尺寸考虑大于 3 倍开挖深度以消除边界效应, 深度取至第⑦层卵石层, 以保证底部的边界效应足够小。

土体采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。莫尔库仑模型应用于基坑开挖和隧道开挖等地下工程的初步分析时具有较好的结果和适用性。计算中不同分层土体的重度、黏聚力、摩擦角等参数由勘查报告提供, 土体模量值按照大量类似工程的经验取为压缩模量  $E_s$  的 8 倍<sup>[3]</sup>。图 5 是围护桩在开挖到坑底时的典型桩体计算结果。



(a) 典型内排桩位移和弯矩

(b) 典型外排桩位移和弯矩

图 5 三维连续介质法桩体计算结果

Fig. 5 Calculated results of piles by 3D FEM method

三维连续介质有限元分析结果显示, 在基坑开挖至 25 m 深度时, 围护结构的最大水平位移约为 76 mm, 深度为坑底附近。内排围护桩的最大弯矩约为 3604 kN·m, 外排围护桩的最大弯矩约为 1751 kN·m。

三维连续介质有限元分析结果显示(见图 6), 内衬墙的最大内力出现在第五道内衬墙处, 轴力最大值为 6205 kN/m, 弯矩最大值为 772 kN·m/m。

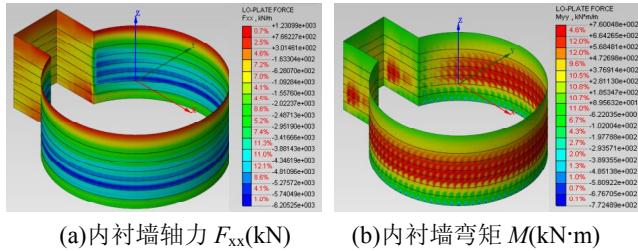


图 6 三维连续介质法内衬墙计算结果

Fig. 6 Calculated results of inner retaining wall by 3D FEM method

### 2.3 二维与三维计算结果对比分析

通过二维和三维两种计算方法对比分析, 围护结构在一次性开挖至 25 m 深度时候的位移以及受力情况如表 5 所示。

表 5 两种计算结果汇总

Table 5 Calculated results by three different methods

计算方法	桩体内力计算结果			
	水平位移 /mm	等效弯矩 /(kN·m·m <sup>-1</sup> )	内排桩弯矩 /(kN·m·m <sup>-1</sup> )	外排桩弯矩 /(kN·m·m <sup>-1</sup> )
2D 等效弹性支撑法	73	2487	3316	1658
2D 刚度折减的等效弹性支撑法	85	2714	3619	1809
3D 有限元法	76	—	3604	1751
内衬结构内力计算结果				
计算方法	最大轴力 N/(kN·m <sup>-1</sup> )	最大弯矩 M/(kN·m·m <sup>-1</sup> )		
2D 等效弹性支撑法	12435	—		
2D 刚度折减的等效弹性支撑法	10395	—		
3D 有限元法	6205	772		

从以上的对比分析可以看出, 考虑刚度折减系数  $k=0.5$  的等效弹性支撑法得到的桩体弯矩值较等效圆环的弹性支撑法弯矩值更大, 且更加接近三维连续介质有限元法。如果不考虑刚度折减, 仅按照一般的对撑圆环考虑支撑刚度, 则围护桩体的桩身内力计算结果偏不安全。因此, 在不对称性较为明显的圆环支撑二维计算中, 准确地计算圆环支撑的刚度分布情况,

选取较为合理的刚度折减系数是非常有必要的。

## 3 结 论

结合直径 50 m 外接方形的基坑案例, 对不对称圆环内衬支撑基坑的设计思路及分析方法进行了综合地阐述。

(1) 通过二维杆件分析, 得到在均匀围压作用下, 不对称圆环支撑的刚度在不同区域差异非常大。准确地计算圆环支撑的刚度分布情况, 选取较为合理的刚度折减系数是非常有必要的。

(2) 三维计算得到的内衬轴力明显小于二维计算结果。三维计算中, 不对称圆环内衬的刚度情况可以比较真实地得到反映, 并且不对称圆环在不均匀的外力作用下, 刚度折减情况可能小于二维计算所得到的折减系数  $k$ , 造成三维计算得到的内衬轴力明显减小, 并且出现圆环内衬中存在弯矩的情况。

(3) 对于不对称圆环在不均匀外力作用下的刚度折减问题较为复杂, 有待进一步的分析和研究。

## 参考文献:

- [1] 李 昽, 李华梅, 吴 昊, 等. 大型圆形深基坑设计分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 938 - 944. (LI Yun, LI Hua-mei, WU Hao, et al. Study on design method of great cylindrical foundation pits[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 938 - 944. (in Chinese))
- [2] JTG 303—2003 港口工程地下连续墙结构设计与施工规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (JTG 303—2003 Design and construction technical code for diaphragm wall structure of port engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 贾 堤, 石 峰, 郑 刚, 等. 深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J]. 岩土岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 155 - 158. (JIA Di, SHI Feng, ZHENG Gang, et al. Elastic modulus of soil used in numerical simulation of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S0): 155 - 158. (in Chinese))

(本文责编 明经平)