

考虑施工影响的地下连续墙环向等效支撑刚度分析

翟之阳, 李薪丰, 聂东清

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 由于环拱效应能够充分发挥混凝土抗压强度高的特点, 圆形地下连续墙围护结构在超深竖井基坑中应用广泛。环向等效支撑刚度取值是圆形地下连续墙围护结构设计中的重要参数。由于地下连续墙在实际施工过程中采用折线拟合圆形, 且存在地表荷载分布不均匀或土层分布不均匀等情况, 这些因素会对环向等效支撑刚度产生影响。使用有限差分单元法建立计算模型, 分析了基坑实际形状、不均匀荷载分布对环向等效支撑刚度的影响。计算结果表明, 圆形地下连续墙的环向等效支撑刚度, 在折线长度为2 m时与圆形理论解基本一致, 当折线长度为3 m时, 需要根据竖井直径进行折减。同时, 不均匀荷载对环向等效支撑刚度造成的折减效果显著, 荷载分布不均匀程度越大, 竖井直径越大, 环向等效支撑刚度折减越大。

关键词: 竖井基坑; 地下连续墙; 环向等效支撑刚度; 折线拟合; 不均匀荷载

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0311-05

Analysis on Circumferential Equivalent Strut Stiffness of Diaphragm Wall Considering Construction Impact

ZHAI Zhiyang, LI Xinfeng, NIE Dongqing

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The enclosure structure of circular diaphragm wall is widely used in ultra-deep shaft foundation pit because of the ring arch effect able to fully play the characteristics of high compressive strength of concrete. The value of circumferential equivalent strut stiffness is a very important parameter in the design of circular diaphragm wall enclosure structure. In practice, because the diaphragm wall adopts the polyline to fit the circle, and the surface load distribution is uneven or the soil layer distribution is uneven, these factors will affect the circumferential equivalent strut stiffness. The finite difference element method is used to establish a calculation model to analyze the effect of the actual shape of foundation pit and the uneven load distribution on the circumferential equivalent strut stiffness. The results show that the circumferential equivalent strut stiffness of the circular diaphragm wall is basically consistent with the circular theoretical solution when the polyline length is 2 m. When the polyline length is 3 m, it is necessary to reduce the polyline according to the diameter of the shaft. At the same time, the non-uniform load has a significant effect of polyline reduction caused by the circumferential equivalent strut stiffness. The greater the non-uniform load distribution is and the larger the shaft diameter is, the greater the polyline reduction of the circumferential equivalent strut stiffness is.

Keywords: shaft foundation pit; diaphragm wall; circumferential equivalent strut stiffness; polyline fitting; non-uniform load

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 上海建工集团股份有限公司重点科研项目(22YJKF-190)

作者简介: 翟之阳(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政结构及基坑设计研究工作。

通信作者: 李薪丰(1993—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事深基坑设计工作。电子信箱: lixinfeng@smedi.com

0 引言

因为环拱效应的存在, 圆形地下连续墙围护整体性好, 以环向受压为主的受力特点, 可以很好发挥混凝土抗压强度高的特点, 相对其他地下连续墙形式, 可以减小地下连续墙壁厚和配筋, 降低工程投资, 越来越多的圆筒形支护结构应用于工程实践。尤其是对于大深度基坑, 如上海世博500 kV地下变

电站、上海苏州河段深层排水调蓄管道系统工程中苗圃调蓄竖井、东京新丰洲地下变电站等工程均采用了圆形地下连续墙作为围护结构^[1-4]。

很多学者对圆形支护的相关问题进行了研究,如杨骁等^[5]、周健等^[6]、金亚兵等^[7]基于不同理论和假定分别推导了圆形支护结构的变形解析解,内力和位移解,内支撑刚度计算式。王卫东等^[3]通过考虑圆形地下连续墙自身的环向刚度,对上海苏州河段深层排水调蓄管道系统工程中苗圃竖井基坑方案进行了优化,提出将多道环梁支撑加逆做的方案优化为5道环梁的方案。国外一些圆形竖井基坑工程甚至直接取消环梁支撑,完全依靠圆形地连墙自身环向刚度抵抗土压力作用,例如英国泰晤士河深隧 Abbey Mills 竖井基坑,直径 30 m,基坑开挖深度超过 70 m^[8]。

实际上,圆形基坑的形状受地下连续墙槽段划分的影响,基坑实际形状为多边形。同时,实际施工过程中,由于基坑周边的施工荷载、邻近构筑物荷载、土层分布不均匀等诸多状况的存在,使得圆形基坑环向荷载不均匀^[3]。目前基于理论推导的圆形基坑环向支撑刚度计算方法均不能考虑这些因素的影响,相关规范^[9]中一般通过对理论结果进行修正来考虑上述影响,但修正系数取值还缺乏相关研究。本文使用有限差分法软件建立环形支护支撑计算模型,分析了基坑实际形状以及不均匀荷载对环向等效支撑刚度的影响。根据分析结果,对圆形地连墙槽段划分方式,环向等效刚度取值提出了建议。

1 环形支撑刚度计算

对于环形支撑的刚度,可以采用理论公式计算,如下式:

$$K = \frac{Ed}{R^2} \quad (1)$$

式中: K 是单位宽度环形支撑刚度系数, MN/m^3 ; E 是环形支撑材料的弹性模量, kN/m^2 ; d 是环形支撑的有效厚度, m ; R 是环向支撑中心半径, m 。

本文使用有限差分单元法软件建立环形地下连续墙的计算模型,根据径向变形量计算环向等效支撑刚度。计算模型如图 1 所示。

计算模型中,混凝土强度等级为 C30,弹性模量为 30 GPa,地下连续墙厚度取 800 mm,直径 30 m。单位荷载 100 kN/m 围压下支撑径向变形为 0.94 mm,得到地下连续墙的环向等效支撑刚度为 106.4 MN/m^3 。根据理论公式计算得到的支撑刚度为 106.7 MN/m^3 ,

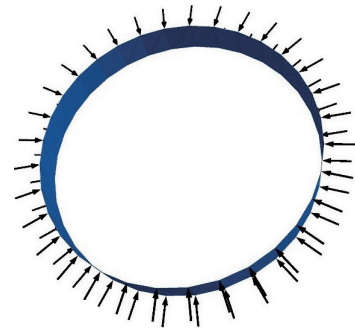


图1 基坑环形地下连续墙计算模型

理论计算结果与数值计算结果差距在 1% 以内。

2 基坑实际形状对环向等效支撑刚度的影响

由于在实际施工过程中,圆形地下连续墙平面实际为多边形,理论计算不能考虑该因素的影响。为此,本文在上述计算模型基础上,将圆环改为多边形,根据实际圆形基坑的地连墙布置方式,使实际基坑多边形外切于圆形基坑内边缘,计算其环向等效支撑刚度,分析研究基坑实际形状对环向等效支撑刚度的影响。实际工程中,地连墙槽段长度基本一致,因此多边形基坑按正多边形考虑。多边形边数及直径见表 1。例如,15 m 直径的正十边形地下连续墙计算模型如图 2 所示,此时正多边形边长为 4.87 m。

表 1 计算模型参数

计算参数	取值
多边形边数	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50
多边形内切圆直径/m	5, 7.5, 10, 15, 30

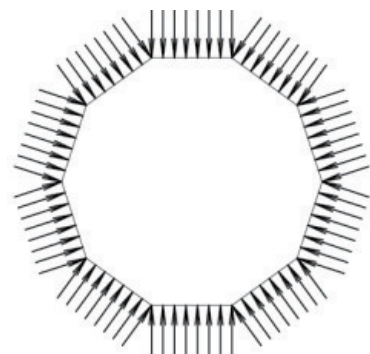


图2 正十边形地下连续墙计算模型

地下连续墙的环向等效支撑刚度随多边形边数的变化情况如图 3 所示。当地连墙基坑直径相同时,环向等效支撑刚度随着边数的增加而增加,当边数达到一定数值后趋于不变,多边形趋于圆形,同时刚度接近理想圆形支撑的刚度值。对于直径 5、7.5、

10、15、30 m的环形基坑在边数分别达到10、14、16、24、48时,环向等效支撑刚度即达到圆形支撑刚度值。此后,进一步增加边数对等效支撑刚度计算结果无影响。同时,边数的临界值随着基坑直径增加而增加,即基坑直径更大时,基坑边数需要分的更多才能得到更高环向等效刚度。

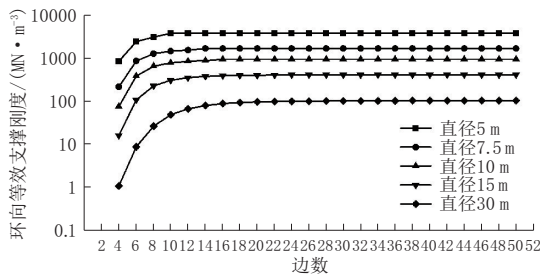


图3 边数不同情况下的环向等效支撑刚度值

对于直径5、7.5、10、15、30 m的环形地连墙基坑,当边长分别为1.62、1.71、1.99、1.97、1.97 m时,环向等效支撑刚度趋于理想圆形支撑刚度值。可以发现当基坑直径大于10 m,正多边形边长约2.0m左右时,地连墙环向等效支撑刚度能够达到极限值。对于直径5 m和7.5 m的环形基坑,可能由于直径较小且边数为整数的条件限制,边长无法凑到2.0 m左右。为验证猜想,进一步计算了直径4.83 m和直径7.46 m两组模型,此时,外切多边形分别为正8边形和正12边形时,边长均为2 m。地下连续墙的环向等效支撑刚度随多边形边数的变化情况如图4所示。可以发现边长2 m时,环向等效刚度达到理想圆形刚度值。可以认为边长2 m为多边形基坑的临界边长。

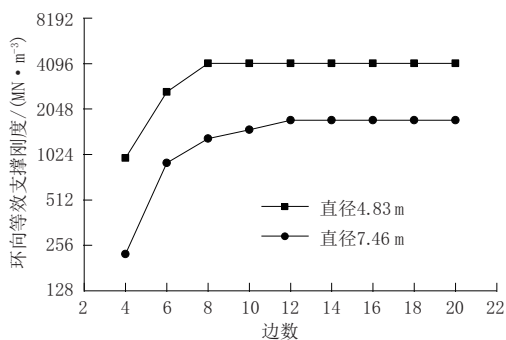


图4 边数不同情况下的环向等效支撑刚度值

地连墙一次开挖槽段宽度一般不小于2.8 m,如图3所示,当地连墙边长约为2.8 m时,直径5、7.5、10、15、30 m的环形基坑对应的多边形边数分别为6、8、10、16、32;此时对应的环向等效支撑刚度分别为2 451、1 294、795.9、398.9、104.9 MN/m³;相较于圆形基坑,刚度分别折减为理论刚度的63.8%、75.8%、82.9%、93.5%以及98.3%。可以看出,对于直径15 m以下的基坑,多边形边长对环向等效支撑刚度影响

显著,对直径15 m以上的基坑,环向等效支撑刚度对边长的变化不太敏感。因此,对于直径15 m以下的环形基坑,可以考虑通过槽段开挖时,进行更多搭接实现边长在2 m左右,减小基坑实际形状对环向等效支撑刚度的影响(见图5)。

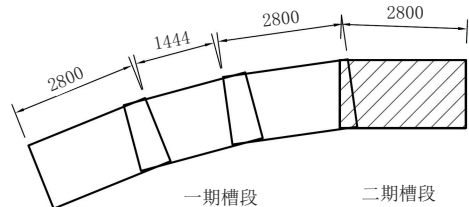


图5 上海苏州河深隧调蓄工程竖井基坑^[10](单位:mm)

3 不均匀荷载对环向等效支撑刚度的影响

由于在基坑实际施工过程中,土层分布不均匀,地面局部超载,邻近建筑或基坑不均匀开挖等诸多因素会造成基坑周边施工荷载不均匀。本文在第2部分分析的基础上,进一步研究不均匀荷载对地连墙环向等效支撑刚度的影响。不均匀荷载的施加方式参照《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》(CECS 137—2015)中圆形沉井井壁土压力分布模式,即假定最大和最小水平土压力强度作用在互成90°的两点处,如图6所示。

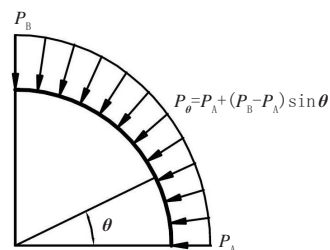


图6 井壁环向不均匀荷载施加示意图

计算模型中,其余参数不变,取正多边形边长为2 m,直径及不均匀荷载差值的取值范围见表2。例如,边长2 m直径7.46 m的正十二边形地下连续墙在不均匀荷载差值15%情况下的计算模型如图7所示。

表2 边长2 m计算模型参数

计算参数	取值范围
多边形内切圆直径 (多边形边数)	4.83 m(8边形), 7.46 m(12边形), 10.05 m(16边形), 15.19 m(24边形)
不均匀荷载差值 ^①	0, 5%, 10%, 15%

注:①不均匀荷载差值即环向90度范围最大与最小荷载的差值相对最小荷载的比例。

不均匀荷载下的地连墙环向等效支撑刚度值,根据最大荷载及其作用杆件的平均径向变形计算,环向等效支撑刚度随荷载不均匀程度的变化情况如

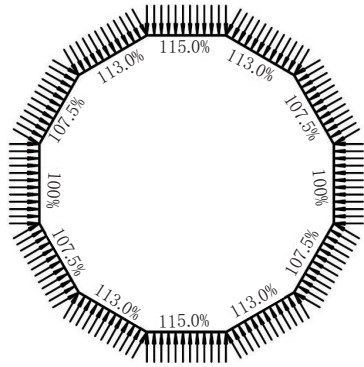


图7 不均匀荷载差值15%下的正十二边形地连墙计算模型

图8所示。可以看出,基坑直径不变,随不均匀荷载差值的增加,环向等效支撑刚度逐渐变小。大直径的圆形地连墙环向刚度随不均匀荷载差值变化的减小幅度更大。

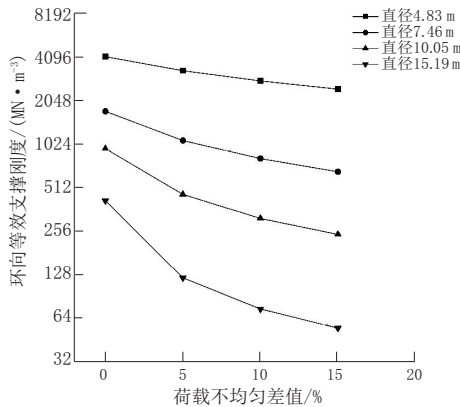


图8 不同不均匀荷载差值下的环向等效支撑刚度

为更好地研究不均匀荷载对环向等效支撑刚度造成的影响,对计算刚度结果做去量纲化处理,将计算刚度与均匀荷载下的理论环向支撑刚度之比定义为刚度比。考虑不均荷载差值时,不同直径圆形基坑的刚度比变化情况如图9所示。

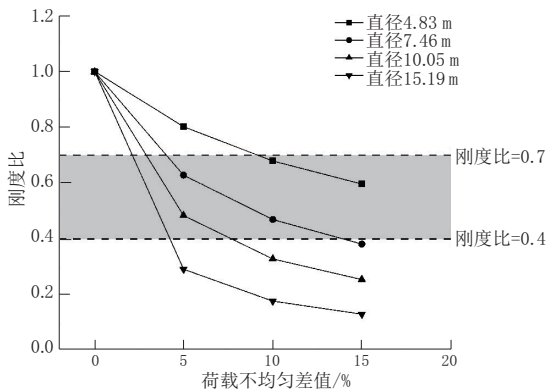


图9 不同不均匀荷载差值下的刚度比

从图9可以看出,不均匀荷载对环向等效支撑刚度造成的影响显著。以直径4.83 m的基坑为例,在不均匀荷载差值分别为5%、10%、15%时,环向等效支撑刚度分别减小了20%、32%、40%。荷载越不均

匀,等效支撑刚度值越小。

不均匀荷载差值相同,基坑直径越大刚度比越小。在实际工程中,大直径基坑可能产生环向不均匀荷载的可能性实际也更大。因此,应重视不均匀荷载对地连墙环向等效支撑刚度,尤其是大直径圆形地连墙基坑环形等效刚度产生的影响。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)(以下称“规范”)中通过引入修正系数 α 对理论刚度值进行修正的方法考虑不均匀荷载,基坑形状等影响因素,推荐修正系数的取值范围是0.4~0.7。当基坑半径较大,修正系数取小值。

如图9所示,将计算的刚度比与规范中的修正系数进行对比,发现对于直径小于10 m的基坑,按目前规范计算的刚度范围与本文计算结果比较接近。但对于直径大于10 m的基坑,刚度比要小于规范中的修正系数。因此,对于直径较大基坑,采用规范方法进行环形刚度取值可能偏大。

4 结语

本文使用有限差分单元法软件建立环形地下连续墙计算模型,分析了基坑实际形状、不均匀荷载对环向等效支撑刚度的影响。得到如下结论与建议。

(1)对于圆形地下连续墙基坑,多边形边长取2 m时,地下连续墙的环向等效支撑刚度达到极限值,进一步增加边数减小边长对刚度结果无影响。实际工程中可以按2 m边长控制地连墙槽段宽度。

(2)对相同圆形地下连续墙基坑,荷载不均匀程度越大,环向等效支撑刚度值越小。不均匀荷载程度相同,基坑直径越大,环向等效支撑刚度相对理论圆形支撑刚度的折减越大。目前规范采用环向刚度修正系数考虑不均匀荷载,基坑形状等因素影响。对于小直径基坑,规范取值较合理。但对于直径较大的基坑,可能会高估刚度值。

(3)本文仅讨论了不均匀荷载及基坑多边形形状特点的影响,实际施工中,地下连续墙垂直度,地下连续墙槽段之间的接头方式同样对环向等效支撑刚度有影响,还需要做进一步研究。

参考文献:

[1] 王卫东,朱伟林,陈峥,等.上海世博500 kV地下变电站超深基坑工程的设计,研究与实践[J].岩土工程学报,2008(增刊1):564-576.
 [2] 宋青君,王卫东.上海世博500 kV地下变电站圆形深基坑逆作法变形与受力特性实测分析[J].建筑结构学报,2010,31(5):181-187.

- [3] 王卫东,徐中华,宗露丹,等.软土地区56 m深圆形基坑的优化设计与实践[J].建筑结构,2022,52(10):1-10
- [4] Kumagai T, Ariizumi K, Kashiwagi A. Behaviour and analysis of a large-scale cylindrical earth retaining structure[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2008, 39(3):13-26.
- [5] 杨骁,任凯凯,盛棋楸.刚性环梁支撑圆形基坑支护结构变形解析解[J].力学季刊,2020,41(4):684-694.
- [6] 周健,罗筱波.圆形支护结构的拱效应等效支撑计算方法[J].岩土力学,2003,24(2):169-177.
- [7] 金亚兵,刘动.深基坑内支撑支点水平刚度系数的解析解计算方法研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1031-1039.
- [8] Schwamb T, Soga K. Numerical modelling of a deep circular excavation at Abbey Mills in London[J]. Géotechnique, 2015, 65(7):604-619.
- [9] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [10] 沈浩,邹丽敏,王碧波.超深圆形基坑地下连续墙成槽垂直度控制施工措施[J].中国给水排水,2020,36(6):83-87.

(上接第310页)

方案可行性的研究;(4)泥浆固化土水下施工流失率在20%左右,总体可控,今后施工中应尽量减少泵送次数,增大单次泵送量,以减少流失率。泥浆固化土技术在东海大桥试验工程的成功应用,再次证明该技术在海域桥梁桩基冲刷防护工程中具有良好的推广价值和市场前景。

参考文献:

- [1] 易仁彦,周瑞峰,黄茜.近15年国内桥梁坍塌事故的原因和风险分析[J].交通科技,2015(5):61-64.
- [2] 蒋焕章.公路水文勘测设计与水毁防治[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 何超.苏通大桥桥墩冲刷防护工程研究[J].现代交通技术,2020,17(3):46-49,59.
- [4] Ouyang HR, Dai GL, Gao LC, *et al.* Gong WM. Local scour characteristics of monopile foundation and scour protection of cement-improved soil in marine environment—Laboratory and site investigation[J]. Ocean Engineering, 2022(255):111443.
- [5] 徐定山,梁胜发,乐治齐.某外海工程超长直径钢管桩变形原因简析与加强方案研究[J].海洋工程,2012,30(2):136-142.
- [6] 李濡宇,毋晓妮,陈锦剑,等.冲刷防护作业中流态固化土对海洋桩基作用力的数值研究[J].上海交通大学学报,2023(12):1-23.
- [7] Li RY, Wu XN, Chen JJ, *et al.* CFD modeling of fluidized solidified slurry in pumping for scour repair around offshore pile foundation[J]. International Ocean and Polar Engineering Conference, 2023:1326-1332.