

基坑环形内支撑平面几何构型与变形特征研究^{*}

王怡, 普运伟

(昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 近年来环形内支撑支护结构越来越受到岩土设计人员的青睐, 相对于其他支护型式, 环形内撑有着受力均匀、变形合理、能提供大面积施工面、易拆除等优点。现今对环形内支撑的研究主要为支撑结构的安全性, 分析其在基坑开挖过程中受力与变形规律, 而对环撑平面几何构型研究相对较少。传统设计人员对于既定的支护类型, 往往依靠经验性, 在保证安全性与美观性的同时, 缺乏对于其几何构型优化考虑, 导致造价成本浪费。因此本文主要针对环梁内支撑平面几何构型与变形特征进行研究, 依托于实际项目采用MIDAS软件进行数值模拟计算分析, 采用3种典型布置方案, 分析环撑受力变形特征, 得到环撑平面几何构型对基坑变形影响规律, 研究结果可为类似工程设计提供经验参考。

关键词: 基坑工程; 环形内支撑; 布置; 数值模拟

中图分类号: TU753 **文献标识码:** A

STUDY ON GEOMETRIC CONFIGURATION AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF CIRCULAR INNER SUPPORT PLANE IN FOUNDATION PIT

WANG Yi, PU Yun-wei

(Kunming University of Science and Technology, Institute of Land and Resources Engineering, Kunming 650093, China)

Abstract: In recent years, the ring-shaped internal bracing structure is more and more favored by geotechnical designers, compared with other types of bracing, the annular bracing has the advantages of uniform force, reasonable deformation, large construction area, easy removal and so on. At present, the research of the annular bracing is mainly about the safety of the bracing structure, analyzing the law of the force and deformation during the excavation of the foundation pit, but the research on the plane geometry configuration of the annular bracing is relatively less. The traditional designers often rely on experience for the given support type, while ensuring the safety and aesthetics, lack of consideration for its geometry configuration optimization, resulting in cost waste. Therefore, this paper mainly studies the geometric configuration and deformation characteristics of the inner support plane of the ring beam. Based on the actual project, Midas software is used to carry out numerical simulation and analysis, and three typical layout schemes are adopted, based on the analysis of the deformation characteristics of the ring bracing, the influence of the plane geometry of the ring bracing on the deformation of the foundation pit is obtained.

Key words: foundation pit engineering; annular support; layout; numerical simulation

1 引言

随着城市化的进展,城市发展越发重视地下空间的利用。因此近年来大面积的深基坑工程越来越多,如何达到安全性又兼具经济性,这对于岩土工程从业人员是一项重要的研究课题。基坑支护方法日新月异,技术手段也是层见叠出,基坑环形内支撑由于其受力较为合理、提供较大施工作业面、经济效益佳等优势,逐渐广泛应用于国内众多基坑项目中。天津国际大厦工程于 1988 年便已应用了环形内支撑支护方法,随后 2016 年高银 117 大厦完成当时世界最大 188 m 直径环形内支撑。国内外学者更是对环形支撑形式进行了大量相关研究。Clough 等^[1]早已证明除围护结构刚度外,支撑构件的位置、间距、刚度等因素均对支护结构刚度有影响。曾律弦等^[2]借助典型空间模型分析了在不同环梁刚度、支撑位置等影响对环梁支护结构的内力与变形的影响规律,研究结果得到较好的验证。陈雨蒙^[3]采用经典力学计算理论与传统计算方法对环形内支撑进行了系统分析,进一步细化了环撑支护适用条件。王建中^[4]等对基坑环形支撑体系进行细致分析,研究结果表明支撑体系平面布置的合理性在基坑设计中是最重要的一环。龚昕^[5]等针对双圆环形内支撑,论述了其布置原则并比较数值模拟手段位移与内力计算结果与实际监测值,分析了双圆环形支撑受力的合理性。苗笛^[6]、陈昆等^[7]和付一平等^[8]都基于实际工程项目借助有限元计算方法真实模拟开挖全过程并对环形支护体系进行受力与变形分析,实现良好的工程应用。

环形内支撑种类繁多,结构复杂。当前众多学者对环形支撑体系的研究取得丰硕的研究成果,其中主要为基坑开挖过程对支撑体系受力分析,但对内支撑平面几何构型对支撑结构变形与受力影响规律研究较少。因此本文选用昆明地区某典型基坑工程项目为背景,比较环形内支撑不同平面几何构型对支撑结构内力与变形情况,总结影响规律与变形特征,以期今后类似工程提供经验指导。

2 工程概况

2.1 工程简介

建设工程项目位于昆明市盘龙区某交叉路口,拟建 1 栋超高层、2 栋高层办公楼、1 栋裙房商业及配套组成一座新型商业中心,下设两层整体地下室。基坑开挖面积约为 15 898.05m²,基坑周长 511.69 m。基坑开挖范围内实际开挖深度介于 9.31~10.00 m。南侧、东侧与西侧皆为城市主要交通干线,并埋设有燃气管、污水管、通讯光缆及电力等管线。北侧与昆明某居民楼接壤,因此需严格控制基坑开挖过程中的变形,避免对周边环境产生破坏(图 1)。

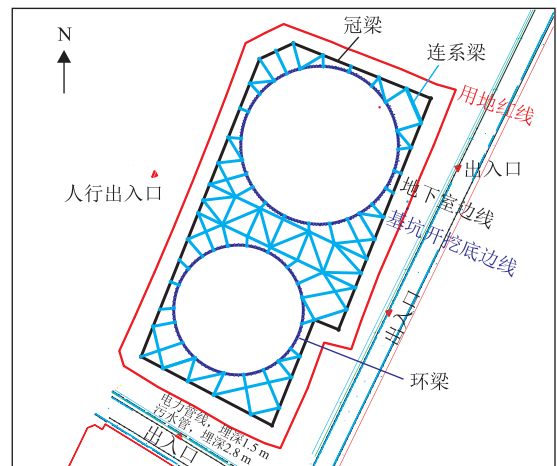


图 1 基坑平面布置图

2.2 工程地质条件

根据钻探揭露深度范围内的地层结构及成因类型表明,场地地层结构属多层型,地表为人类近期活动形成的地层(Q^{ml}、Q^{pd}),其下为第四系冲洪积相(Q^{al+pl}),以圆砾、黏性土、砂土为主,基坑土层参数如表 1 所示。

开挖范围内分布有一定厚度的人工填土和赋存地下水的粉砂层,自稳能力差。因此必须布设可靠的支护结构对基坑侧壁进行支挡,进而保证基坑整体稳定和控制侧壁变形。

表 1 土层物理力学参数表

土层	天然重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	压缩模量 E_s/MPa	天然孔隙比 e	弹性模量 E/MPa	含水率	土层厚度 /m
①人工填土	17.7	18.0	6.0	3.79	/	11.37	/	1
②黏土	18.3	16.4	5.5	3.68	1.001	11.04	37.0	3
③黏土	18.4	29.7	10.0	5.35	0.976	16.05	30.9	1
④圆砾	20.5	0	25.0	/	/	/	/	2
⑤黏土	19.0	41.0	11.7	8.97	0.869	26.91	44.1	2
⑥粉砂	19.4	11.0	18.0	7.54	/	22.62	/	1
⑦黏土	18.9	51.3	11.6	9.86	0.864	29.58	26.4	20

2.3 支护结构选型

基坑支护结构中支挡式应用范围最广,并且对于侧壁的控制能力佳、场地适应能力强。内支撑主要承受压力、剪力与弯矩等,其中环形支撑体系受力均匀能有效发挥拱效应,且易于混凝土现浇,并具有良好的整体性,布置方法多样,能有效发挥混凝土抗压性能。本基坑工程开挖面大、并且为不规则多边形,同时对周边环境控制要求高,因此综合考虑后需采用环形内支撑支护体系。

3 环形内撑平面几何布置

钢筋混凝土支撑可根据实际开挖面浇筑成任意

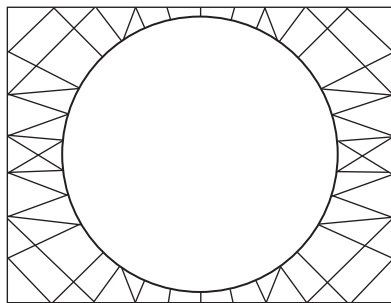


图2 单环桁架式支撑

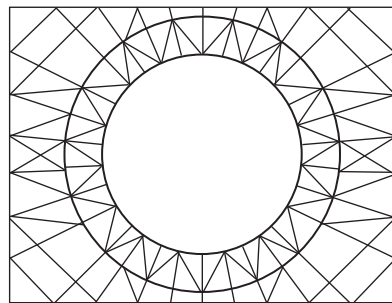


图3 同心双环桁架式支撑

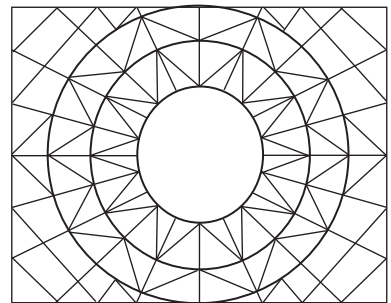


图4 同心三环桁架式支撑

3.2 含多个环形构件支撑

在同一个平面支撑体系中环形支撑构件的数量也可以多个,如图5所示。当基坑开挖面不规整、不规则,开挖边线不平行、不对称的情况下,采用仅含单个环形构件的支撑体系不再合理,就会出现双环形、三环形或多个环形组成的支撑体系(图6)。其中又能细分为多环同心布置、多环非同心布置等多种形式。

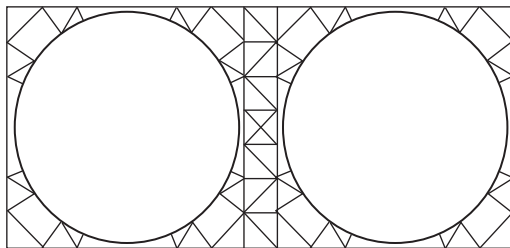


图5 双环非同心桁架式支撑

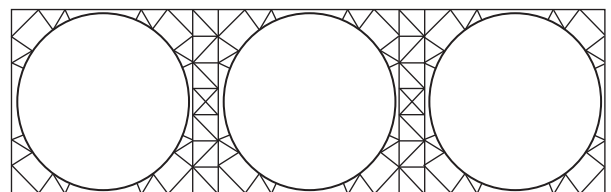


图6 三环非同心桁架式支撑

用于不规则多边形开挖面。

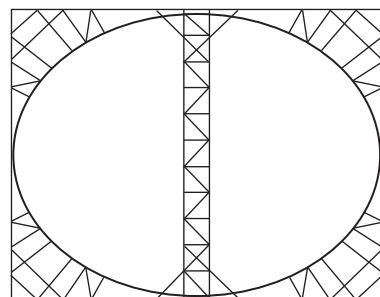


图7 双半圆桁架式支撑

3.3 非规则环形构件支撑

在实际项目中现场实际开挖面形状各异,在没有理想的规则形状下,便需要设计人员对方案进行环形组合,如图7所示的双半圆与桁架式支撑,其组合形式更加多样,适应能力强。该方案往往应用于深、大、复杂型基坑,其形状复杂,施工难度较大,适

形状,在实际应用中存在众多组合方案。常见的环形水平支撑布置依据环数、圈数、支撑布设位置等等组成各异的布置方案。

3.1 含单个环形构件支撑

基坑支护内支撑平面布置主要以正圆形、椭圆形等为主,通常结合上其他杆件,组成完整的环形支撑。其中最为常见的便为单个环形支撑,其施工较为便捷、规模较小、形状简单,其中环形支撑不直接承受均布荷载,多为承担支撑体系中连接杆件传递来得集中力,环形支撑内力、变形结果相对均匀(图2)。现今单个环形支撑应用最为广泛,为应对更为复杂的工程情况下,又出现同心双环桁架式支撑、同心三环桁架式支撑等(图3、图4)。

4 不同几何构型数值分析

本文旨在讨论在不同内支撑布置方案下,对基坑项目受力与变形的影响规律与特征。所以依托于

昆明某实际工程项目,仅改变不同水平内支撑方案,保持其他条件不变的情况下开展研究分析^[9]。土层参数信息见表1,杆件单元相关参数如表2所示。整体模型采用MIDAS/GTS软件建立,土体本构采用修正摩尔库伦模型,因其考虑土体加荷和卸荷模量的差异性,并且模型参数相对易取,更适合用于基坑开挖工程的应用。

表2 构件参数详情表

对象	截面高/直径 H/m	截面宽/直径 B/m	弹性模量 E/GPa
支撑构件-冠梁	1.0	1.4	31.5
支撑构件-环梁	0.8	1.2	31.5
支撑构件-连系梁	0.8	1.2	31.5
支撑构件-立柱	0.8	0.8	21.5
围护构件-排桩	1.2	1.2	31.5

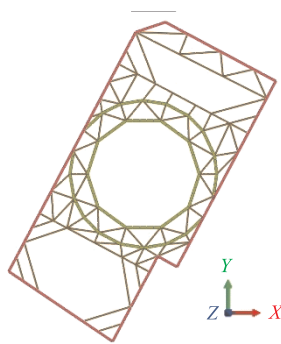


图8 同心双圆环桁架式支撑方案

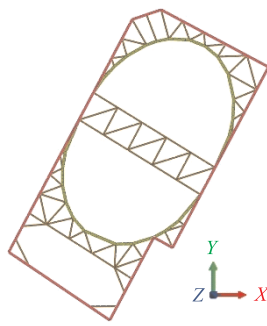


图9 双半圆桁架式支撑方案

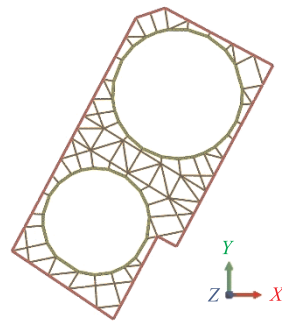
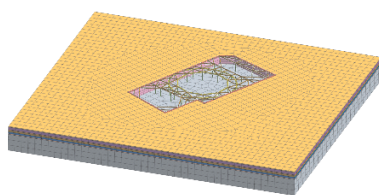
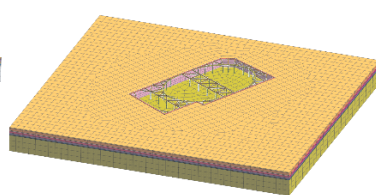


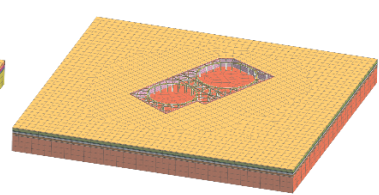
图10 非同心双环形桁架式支撑方案



(a)



(b)



(c)

图11 基坑开挖三维数值模拟

表3 各方案出土面积与材料消耗表

方案	出土面积/m ²	冠梁/m	环梁/m	支撑梁/m	立柱/m
方案一	5 805	491.69	420	1 041	480
方案二	6 672.5	491.69	277	932	432
方案三	7 742	491.69	405	1 221	648

根据表3数据可看出,依托于同一个基坑开挖面,但采用不同的水平布置方案其消耗的材料量与最终的出土面积各不相同,其中方案三的出土面积最大,便于后期施工工作的开展,但其缺点也明显,其造价成本最高,杆件施工周期长;方案二在3种方案中材料用量最少,出土面积适中,经济效益最高。根据表3也反映出,选择合理有效的结构形式、布置

4.1 方案设计

为使得不同的平面布置方案对比更具有可行性,方案设计尽可能保证不同平面布置情况下材料损耗上相近,目的是在追求同等“经济性”的前提下,比较各方案的受力与变形特征。依托于上文所述的实际项目,根据实际开挖面性状、周边环境与工程地质水文地质条件等布设水平支撑方案,如章节3所述,常见水平布设方案众多。由于本文篇幅有限,便针对现今应用率较高、代表性较好的3种方案。分别为:方案一:同心双圆环桁架式支撑;方案二:双半圆桁架式支撑;方案三:非同心双环形桁架式支撑(图8、图9、图10)。图11为依据设计方案所创建的MIDAS有限元数值模型。

方案直接决定着工程的经济性。

4.2 计算结果对比分析

对各方案进行数值分析计算,输出水平支撑构件位移变形结果,位移结果云图如图12所示:

由图12所示,其中图12(a)为同心双圆环桁架式支撑方案,其位移最大为8.367 cm;图12(b)为双半圆桁架式支撑方案,其位移最大为7.894 cm;图12(c)为非同心双环形桁架式支撑,其位移最大为2.006 2 cm。3种方案计算位移变形都在规范范围允许之内,并且位移值都较小,说明环撑对于基坑整体位移变形效果较好。由以上数据及云图可知,基坑位移变形最大处为基坑南侧冠梁,有明显的出现

向坑内挤压趋势,在施工时应重点留意。同时也从3组方案的计算结果可知,其中非同心双环形控制变形效果最佳。其中方案二与方案三在基坑中部布置对撑,相对于方案一的环形支撑存在明显的变形,

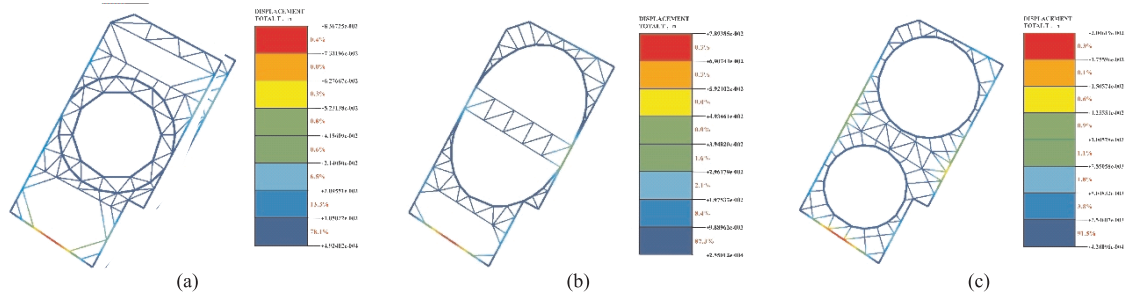


图12 水平支撑构件位移变形

输出对各方案结构内力及变形计算结果,结果如表4所示:

表4 各方案内力计算结果

方案	最大轴力/kN	最大剪力/kN	最大弯矩/kN×m
方案一	440.857	973.580	1369.56
方案二	560.352	1148.900	1176.10
方案三	418.940	479.859	901.87

根据计算出的内力云图中(图12)反映,构件内力变化是非连续的,其在构件交点处会出现内力突变,该点与位移变形特征一致。同时也从应力变形中反映出圆环支撑,轴力由外向内逐渐增大,而剪力及弯矩规律相反,即内圈上主要分布轴力,外圈上承受剪力和弯矩。由表4可知,其中方案三较其他两种方案其内力最小,对比方案一说明在多圆环撑较单圆环层效果更好;对比方案二说明环形半径越小变形控制效果越佳。方案一与方案二数据对比反映出,双圈较于单圈整体刚度与完整性更好,环梁直径的增加也能使得圆拱效应较弱,在侧向荷载的作用下,支撑抵抗能力更弱。

5 结论

环梁支撑体系经过多年的发展与应用,在基坑支护工程中都展示了其明显的优越性。前人针对环形支撑体系对于基坑开挖过程中的变形及对周边的影响做了众多研究分析,而本文针对环形支撑体系多样的水平布置方法进行研究,为保证分析对比更具有说服力,本文单一变量为支撑的平面几何布置,其余工程条件保持不变。采用有限元计算针对不同的环梁内支撑体系进行计算分析,所得结论如下:

(1) 本文将3种环形支撑体系应用于同一个实际基坑项目,得到的受力与变形结果都较好,证明环

形支撑在控制基坑变形有其明显的优越性。

(2) 数值计算变形结果表明环形内撑体系能充分利用拱效应,轴力分布由外向内逐渐增大。而剪力及弯矩规律则相反,呈现出内圈上主要分布轴力,外圈上承受剪力和弯矩。

(3) 通过数值计算结果表明:多圆环撑效果优于单圆环撑;环梁直径越大其圆拱效应越弱,支撑能力便越差;支撑体系中对撑与冠梁交接处存在应力集中,而环形支撑不直接承受荷载,其特有的拱效应使整体支撑体系更加稳定,对于基坑侧壁的变形控制效果更为出色。

(4) 选择合理有效的结构形式、布置方案直接决定着工程安全性与经济性。

(5) 由3种方案的比对结果表明方案三:非同心双环形桁架式支撑效果最佳,但其缺点也相对较明显,其结构与形状更为复杂,消耗施工材料多、施工周期长、经济性较差。该布设方案建议应用于项目等级高、规模大、开挖深的基坑工程项目。

(6) 环形支撑中钢筋混凝土支撑可根据实际开挖面可浇筑成任意形状。在实际应用中,个体工程情况差异巨大,周边环境、开挖面形状等更不可能完全一致。所以本文仅依托实际项目采取典型方案进行研究分析,无法做到面面俱到,研究结果为今后类似工程的设计和施工提供经验指导。

参考文献

- [1] Clough G W, O'Rourke T D. Construction induced movements of insitu walls: proceedings of the ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, New York[C]. Geotechnical Special Publication, 1990: 439-470.
- [2] 曾伟弦, 潘泓, 肖四喜. 深基坑环梁支护结构的性状分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 115-118.
- [3] 陈雨蒙. 大型基坑环梁支护体系有限元数值模拟分析[D]. 西

- 南交通大学,2011.
- [4] 王建中,周光熙.对基坑环形支撑系统的几点探讨[J].岩土工程界,2008,(9):37-40.
- [5] 龚昕,丁文其,赖允瑾,等.双圆环形支撑体系在基坑工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):179-183.
- [6] 苗笛.大直径环梁支护下深基坑开挖的数值分析[J].港工技术,2015,52(1):75-79.
- [7] 陈昆,闫澍旺,张智,等.不同内支撑支护体系对深基坑开挖变形的影响分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(S1):1-6.
- [8] 付一平,尹俊.超大型环梁支护体系数值模拟分析[J].施工技术,2017,46(13):77-80+131.
- [9] 曾营,徐世光,殷诗茜,等.基于 ABAQUS 研究持力层厚度对浅地基承载力的影响[J].地质灾害与环境保护,2021,32(2):55-61.

作者简介: 王怡(1998—),女,汉族,昆明理工大学国土资源工程学院研究生,主要研究方向为地理信息数据处理等。

E-mail:529035242@qq.com

通讯作者: 普运伟(1972—),男,汉族,昆明理工大学教授,博士,主要研究方向为模式识别、智能信号处理等。

E-mail:puyun wei@126.com