

一个采用单道环撑支护方案的深基坑工程案例

吴连祥, 周宏博, 贾 华

(启东市建筑设计院有限公司, 江苏 启东 226200)

摘要: 启东地区地表向下约 18 m 淤泥质粉质黏土层与粉土、粉砂层交互沉积, 再向下至 55 m 左右主要为淤泥质粉质黏土。在此地层条件下, 开挖 2 层地下室基坑, 通常采用排桩+两道内支撑的支护方案。由于支撑工作量大, 影响施工操作, 导致工期长、造价高, 因此需要优化与改进支护方案。本文结合基坑工程实例, 对比常规支护方案与环撑支护方案后, 考虑采用钻孔灌注桩+单道钢筋混凝土环撑的支护方案。实践结果表明, 该方案在满足基坑稳定性要求和变形控制要求的基础上, 既能提供开阔的施工空间, 显著改善地下工程的施工作业条件, 使挖土、运土及地下结构便捷施工, 又能大幅减少支撑结构的安装、拆除、土方开挖及主体结构施工的工期和支护造价。

关键词: 软土地区; 深基坑工程; 支护方案; 钻孔灌注桩; 单道钢筋混凝土环撑

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0174-07

A deep foundation excavation supported by a single-layer circular strut

WU Lian-xiang, ZHOU Hong-bo, JIA Hua

(Qidong Architectural Design Institute Co., Ltd., Qidong 226200, Jiangsu, China)

Abstract: About 18 m down from the surface of the area of Qidong is silty clay layer with silt and silt layers alternately deposited, and then down to about 55 m it is mainly silty clay. Under this stratum condition, a supporting scheme of row piles and two internal supports is usually adopted when excavating the foundation pit of the 2-storey basement. However, this scheme has a large supporting workload, which affects the construction operation, resulting in a long construction period and high cost. Therefore, it is necessary to optimize and improve the support scheme. In this paper, combined with the example of foundation pit engineering, the support scheme of bored piles and single reinforced concrete ring support is adopted after comparing the conventional support scheme and the ring support scheme. The practical results show that this scheme can meet the stability requirements and deformation control requirements of the foundation pit. At the same time, it can provide a wide construction space, significantly improve the construction conditions of underground engineering, and facilitate the construction of excavation, soil transportation and underground structures. It can also greatly reduce the construction period and support cost of the installation, removal, earthwork excavation and main structure construction of the supporting structure.

Key words: soft soil area; deep excavation; support scheme; bored pile; single reinforced concrete circular strut

0 引言

在桩撑支护结构中, 作用在竖向排桩上的水土侧压力通过水平向支撑来传递和平衡。如果把水平支撑设计成圆环结构, 水土侧压力通过竖向排桩传至围檩与边桁架腹杆, 再传至圆环内撑, 转换为轴向压力, 就能充分利用混凝土的抗压能力。

随着设计理论的发展及施工经验的积累, 大直径圆环内撑逐渐为工程人员/工程师所认可, 并越来

越多地运用于实际工程。陈雨蒙^[1]、李欣^[2]采用有限元法, 结合工程实例, 分析了环撑的变形及内力变化规律, 并与实测结果比对分析, 得出了一些有价值的结论; 蓝海江^[3]对三亚一个挖深 13.7 m 的基坑工程采用三道双圆环内撑支护, 取得了较好的效果; 程杰林等^[4]在武汉一个 4 层地下室基坑工程中采用多重大直径同心环撑支护方案, 技术与经济效益俱佳; 赵升峰等^[5]在江苏泰兴采用 HCMW 工法桩结合两道圆环内撑对一个 2 层地下室基坑工程成功实施

收稿日期: 2022-03-23

作者简介: 吴连祥(1960—), 男, 江苏东台人, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事建筑结构及岩土工程设计。E-mail: qdsjywx@126.com。

支护。这些研究与应用成果均表明:圆环内撑不仅适用于软土地基多种平面形式的基坑,特别是方形、多边形基坑;还适用于环境保护要求高、土方工期紧、施工场地小的基坑。圆环内撑具备如下优点:

(1) 受力性能合理。从根本上改变了常规支撑结构方式,圆环内撑受力以水平受压为主,能够充分发挥混凝土材料的受压特性,具有足够的刚度和变形小的特点,能够确保基础施工、周边环境安全。

(2) 土方挖运便捷。采用圆环内撑结构在基坑平面形成的无支撑面积达到70%左右,为挖运土的机械化施工提供了良好的多点作业条件,挖土速度可成倍提高,极大地缩短了深基坑的挖土工期,同时有利于基坑变形的有效控制。

(3) 经济效益显著。采用圆环内撑结构,与各类支撑结构相比,节省大量钢材和水泥,单位土方开挖费用有较大幅度的下降,施工费用节约可观,社会效益十分显著。

启东位于长江口北岸,属于长江三角洲软土区,地表向下18 m左右,层理构造呈“千层饼”状,为淤泥质粉质黏土与粉土、粉砂交互沉积土层;再往下至55 m左右,主要为淤泥质粉质黏土层^[6]。淤泥质粉质黏土具有含水量大、压缩性高、抗剪强度低等特性,基坑支护设计需要解决变形控制难、施工过程繁、工程造价高的难题。对于2层地下室基坑常规支护方案采用钻孔灌注桩+两道井格式水平支撑。这种方案能够有效控制变形,但是井格式支撑严重妨碍挖土、运土作业,施工不方便,且井格式支撑的钢筋混凝土工程量大,围护费用高,因此有必要探讨更加合理的新方案。基于圆环内撑的诸多优点,本文结合启东某2层地下室基坑工程,在分析该基坑特点的基础上,对常规支撑方案与环撑方案进行比较,最后选用钻孔灌注桩+单道环撑支护方案,达到了预期的效果,为软土地区类似深基坑支护工程的设计、施工提供参考。

1 工程概况

启东城投商务大楼由办公主楼(17层)、辅楼(11层)、报告厅及员工食堂(3层)、公共门厅(2层)组合而成,地下设扩大地下室(2层)。用地面积15 718 m²,总建筑面积68 792 m²(其中地上42 965 m²,地下25 827 m²)。除办公主楼为框架剪力墙结构外,其余建筑均为框架结构,桩筏基础。

1.1 基坑参数

基坑东西长125 m,南北宽110 m,形似正方

形,周长470 m,面积13 750 m²。场地整平后的绝对标高2.0 m,对应于相对标高-0.9 m。坑边承台底相对标高-11.6 m,挖土深度10.7 m,地下室基础板底相对标高-10.9 m,挖土深度10 m,坑中坑最大挖土深度12.3 m。

1.2 周边环境

项目位于启东市金沙江路北侧,民胜南路西侧。基础边线东侧距用地红线7.5 m,距在建的启东市公安大楼约50 m;北侧距用地红线5.3 m,距启东市公共卫生中心大楼37.3 m;西侧距用地红线5 m,距民胜路19.0 m,用地红线与民胜路之间有煤气管线与自来水管线通过;南侧距用地红线5 m,距金沙江路8.7 m,金沙江路南侧为吾悦广场住宅区。周边环境平面如图1所示。

单位: m

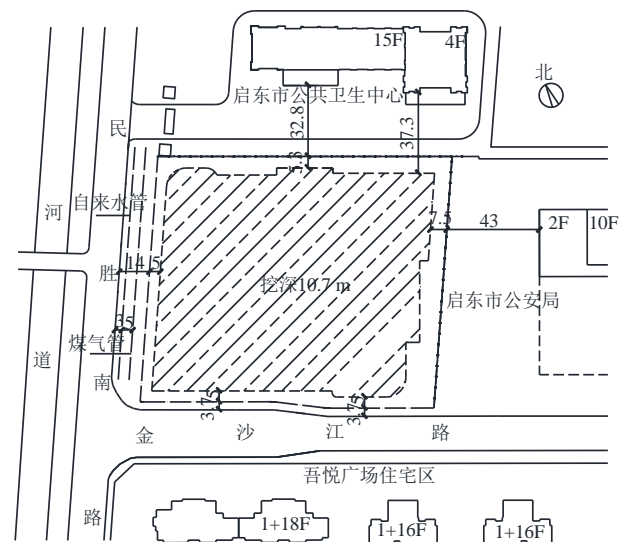


图1 基坑周边环境平面图

Fig. 1 Plan of the foundation excavations and its surroundings

1.3 地质条件

拟建场地地貌属长江新三角洲平原,勘探深度范围内土层分布依次为:

①素填土,层厚1.50~0.40 m; ②淤泥质粉质黏土,层厚2.60~0.80 m; ③粉土夹粉砂,层厚4.80~2.20 m; ④粉土夹淤泥质粉质黏土,层厚4.00~0.90 m; ⑤粉砂,层厚4.30~2.70 m; ⑥粉土,层厚2.80~1.30 m; ⑦粉砂,层厚5.30~3.10 m; ⑧淤泥质粉质黏土,层厚4.70~3.40 m,其下均为淤泥质粉质黏土,厚度近40 m。

场地地下水类型为孔隙潜水,主要赋存于第⑦层粉砂层及以上含水土层中,补给来源为大气降水及地表水,排泄方式主要为自然蒸发和侧向径流,水位在自然地面下1 m左右。基坑支护土层设计参数见表1(土层厚度取平均值)。

表1 基坑支护涉及土层计算选用指标

Table 1 Parameter of the soil layers involved in the founding excavation for numerical simulation

编号	土层名称	土层厚度/m	重度/(kN/m ³)	直剪固结快剪		渗透系数/(10 ⁻⁶ cm/s)	
				$\phi_c/(\circ)$	c/kPa	水平 k_h	垂直 k_v
②	淤泥质粉质黏土	1.5	17.5	3.9	13.6	6.89	2.39
③	粉土夹粉砂	3.5	18.2	17.8	7.8	765	412
④	粉土夹淤泥质粉质黏土	2.5	17.8	15.7	9.4	44.1	26.5
⑤	粉砂	3.5	18.5	27.2	2.9	4 610	3 620
⑥	粉土	2.0	18.1	15.9	7.4	655	341
⑦	粉砂	4.0	18.6	27.6	1.7	5 640	4 710
⑧	淤泥质粉质黏土	4.0	17.4	1.6	12.1	5.71	1.88

2 方案分析比较

本基坑工程特点分析:

(1) 挖土深、面积大。基坑周边土方挖深 10.7 m, 局部挖深达 12.3 m, 面积 13 800 m², 土方开挖量 15 万 m³, 属深大基坑工程。

(2) 场地小、空隙少。项目用地面积 15 718 m², 基坑面积就达 13 800 m², 地下室外墙与场地北、西、南面红线仅有 5 m 距离, 支护空间严格受限。

(3) 设施多、距离近。基坑周边有各种地下管线、道路、建筑物等需要保护, 特别是西侧的压力管线及北侧的建筑物对变形有较高的控制要求。

(4) 地基软、土性差。场地浅层土层构造主要呈“千层饼”状, 淤泥质粉质黏土与粉土、粉砂交互沉积, 土质较差, 地表向下 18~56 m, 均以淤泥质粉质黏土为主, 土质更差, 对深基坑的稳定不利。

基于以上特点, 支护方案通常采用钻孔灌注桩+两道钢筋混凝土井格式水平支撑, 但不尽合理。由于环撑具有受力性能合理、土方挖运便捷、经济效益显著等优点, 故考虑采用环撑来代替井格式水平支撑作用。现对以下 3 种方案进行比较。

方案 1: 钻孔灌注桩+两道钢筋混凝土井格式水平支撑, 平面布置示意图 2。

两道内支撑分别设在 1、2 层地下室楼板之下, 拆换撑工序为: 基础底板浇筑完成拆除第二道支撑, 负 2 层顶板施工完成拆除第一道支撑。该方案可靠、成熟、变形控制好, 但支撑工程量大, 造价高; 需要两次设撑、换撑、拆撑, 工期长; 挖土空间小, 施工不方便。

方案 2: 钻孔灌注桩+两道钢筋混凝土环撑方案, 平面布置如图 3 所示。

两道环撑竖向设置标高与方案 1 相同, 支撑形式为环形, 基坑中间无支撑网格。该方案的优势在

于大型挖土机械可直接进入坑内进行大规模土方挖运, 且材料吊运受限少, 便于地下室施工。然而, 坑外侧向水平推力通过围檩、边桁架和环梁转化为环梁的轴向压力, 支撑费用虽有所降低, 但仍然需要两次设撑、换撑、拆撑, 工期长。

方案 3: 钻孔灌注桩+单道钢筋混凝土环撑方案, 平面布置如图 4。

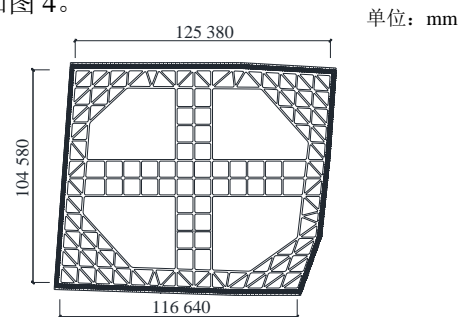


图2 两道井格式支撑布置平面图

Fig. 2 Layout plan of the double-layer cross-over strut

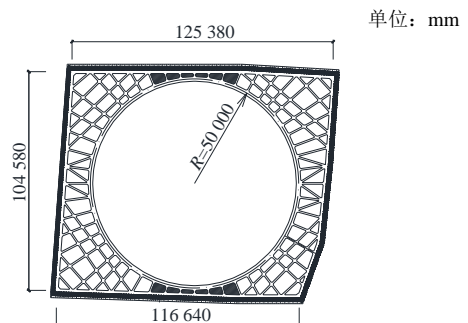


图3 两道环撑布置平面图

Fig. 3 Layout plan of double-layer circular strut

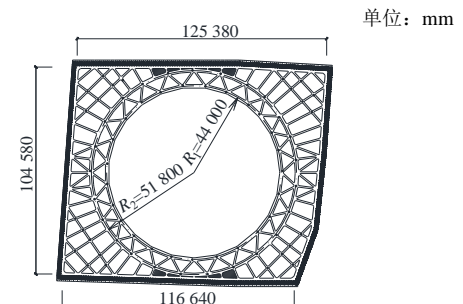


图4 单道环撑布置平面图

Fig. 4 Layout plan of the single-layer circular strut

支撑适当下移, 设置一道环撑, 排桩受力更为合理, 除具有方案 2 的优点外, 因少设一道支撑, 节省了支撑施工、养护、换撑、拆撑时间, 工期大大缩短, 工程造价更低。

对以上 3 种方案进行定量分析, 设定 3 种方案钻孔灌注桩参数相同, 桩径为 0.9 m, 间

距为 1.3 m, 土层计算指标选用表 1, 采用同济大学启明星基坑设计软件计算, 主要结果列于表 2。

比较表 2 计算结果可知: 方案 3 即单道环撑方案性价比最高。因此, 确定选用钻孔灌注桩+单道钢筋混凝土环撑支护方案。

表 2 3 种支护方案主要计算结果

Table 2 Main calculation results of the three support schemes

方案编号	支撑道序	支撑形状	支撑反力/(kN·m)	排桩最大弯矩/(kN·m)	排桩最大位移/mm	排桩主筋/mm ²	围檩断面 b×h/m	主撑断面 b×h/m	次撑断面 b×h/m	支撑最大位移/mm	支撑混凝土用量/m ³
方案 1	1	井格	221.5	-559.1~	15.7	6 753.4	0.7×1.2	0.7×0.7	0.65×0.65	24.1	3 356.91
	2		389.6	685.8			0.7×1.2	0.7×0.8	0.70×0.70		
方案 2	1	环形	221.5	-559.1~	15.7	6 753.4	0.7×1.3	0.7×2.2	0.65×0.65	30.1	3 058.71
	2		389.6	685.8			0.7×1.3	0.7×2.4	0.70×0.70		
方案 3	1	环形	376.8	-765.1~ 973.4	24.9	9 993.6	0.8×1.3	0.8×1.6	0.75×0.75	20.7	2 100.97

3 支护方案设计

3.1 排桩设计

钻孔灌注桩按排桩设计^[7], 内力与变形按平面弹性地基梁理论, 采用同济启明星 FQWS 软件计算, 桩径 900 mm, 间距 1 300 mm, 一般区域基本挖深 10 700 mm, 为满足基坑稳定性验算要求, 灌注桩有效桩长 29 700 mm, 嵌入坑底深度 19 000 mm, 主筋 22Φ25 (HRB400)。东侧南段为出土口, 荷载较大, 为此增加一排灌注桩, 直径 900 mm, 间距 3 000 mm, 共 15 根, 有效桩长 16 000 mm, 形成双排桩, 对出土口区段予以加强。灌注桩与地下室外墙间留 1 400 mm 作为地下室外墙防水施工空隙。距灌注桩外侧 100 mm, 套打 Φ850@600 三轴水泥土搅拌桩作止水帷幕, 方案典型剖面如图 5 所示。

3.2 环撑设计

环撑中心标高设在自然地面以下 3.2 m (相对标高-4.1 m) 处, 一方面可以发挥灌注桩的悬臂承载力, 另一方面可以减少灌注桩的最大弯矩。

基坑东西长 125 m, 南北宽 110 m, 近似正方形, 支撑形式采用圆环形。考虑到单环受力性能相对较差, 对不对称荷载极为敏感, 而坑外道路离基坑很近, 土方车辆运输荷载、土层差异及土方开挖

方式等因素极易造成土压力的不对称, 故采用双环斜腹杆支撑的布置形式^[8], 内环直径 88 m, 外环直径 103.6 m, 外环南、北侧分别与基坑围檩相切, 内外环之间及四周角部施以桁架式腹杆, 将内外圆形环梁与围檩及围护桩连接成整体, 圆形环梁下设立柱, 其内力与变形按平面弹性地基梁法^[9], 采用同济启明星 BSC 软件分析计算 (土层厚度取用图 5 值), 内环最大轴力标准值 13 698 kN, 最大水平位移 20.2 mm, 外环最大轴力标准值 12 122 kN, 最大水平位移 20.7 mm。

环撑除满足强度和稳定性要求外, 还考虑兼作施工便桥, 最终选定环撑断面尺寸 (b×h): 环梁 800 mm×1 800 mm, 腹杆 800 mm×800 mm, 围檩 800 mm×1 400 mm, 混凝土强度标号 C30。在沿圆形支撑周边南北两处与基坑相切的区域设钢筋混凝土加强板, 与支撑整体浇筑, 以限制环形支撑转动变形。

环撑立柱采用格构式钢柱, 截面尺寸 440 mm×440 mm, 四角为 L140×2 角钢, 四边用 420 mm×300 mm×10 mm 钢板, @700 mm 作缀板焊接, 下端插入立柱桩内, 作为水平支撑系统的竖向支承构件, 立柱桩采用钻孔灌注桩, 桩径 850 mm, 桩长 20 m, 格构柱插入钻孔灌注桩内 3 m, 立柱桩注意避开工程桩、地下室剪力墙和柱的位置, 共布

用 80 mm×40 mm 方木, 上下 3 道, 竖向背楞采用 2Φ48×3 mm 钢管, 水平间距 200~500 mm, 由计算确定, 上下两道 M14 高强螺栓对拉, 水平间距与竖向背楞相同, 底模直接利用 C20 素混凝土垫层找平。环梁、腹杆、围檩一次浇筑成型, 保证强度同步发展。

环撑的拆除在换撑强度达到 80%后方可进行, 拆撑时进行多点应力释放, 对称拆除, 以减小支护结构瞬间位移值。采用锯绳切割法, 先脱离围檩, 后分段切割, 先腹杆, 再环梁, 最后围檩。



图 7 基坑开挖施工实景

Fig. 7 Foundation pit excavation during construction

5 监测结果

在基坑施工过程中, 对支护体系及周边环境进行了实时监测^[9]。本工程共布置坑外深层土体水平位移监测点 8 个, 灌注桩压顶梁、围檩位移(水平、竖向共用)监测点 47 个, 其中灌注桩压顶梁 16 个, 围檩 31 个, 支撑轴力监测点 11 个, 立柱沉降监测点 8 个, 坑外地下水位监测点 16 个, 周边建筑物沉降监测点 17 个, 基坑周边道路沉降监测点 14 个, 以及周边管线监测点若干。监测点布置平面如图 8 所示。

监测结果如下:

(1) 深层土体水平位移: 基坑四周土体的最大侧向位移发生在坑底下 1.5~4 m 范围内, 沿支护桩长度呈“大肚形”。最大侧向位移值: 北侧 CX2 孔 36.31 mm, 东侧 CX3 孔 28.58 mm, 南侧 CX6 孔 34.23 mm, 西侧 CX8 孔 27.76 mm。侧向位移曲线如图 9 所示。

(2) 压顶梁、围檩位移: 灌注桩压顶梁、围檩的水平位移和竖向位移均较小, 大多数在 10 mm 以内。最大水平位移发生在北侧中间段, Z2 点向基坑内侧水平位移 28.8 mm, 最大竖向位移也发生在北侧中间段, Z2 点处沉降 24.12 mm。

(3) 支撑轴力: 实测值均大于计算值, 最大比值近两倍, 主要是混凝土的收缩、徐变造成了钢筋应力增大^[10]。实测内环最大轴力为 26 699 kN, 外环最大轴力为 22 356 kN。

(4) 立柱沉降: 立柱平均隆起 34.45 mm, 最大隆起量 42.27 mm, 支撑梁未发现明显裂缝。

(5) 其它监测: 基坑北侧附近的启东市公共卫生大楼由于是桩基础, 平均下沉 3.62 mm; 基坑西侧的民乐南路 7 个观测点平均沉降 8.69 mm; 南侧的金沙江路 7 个观测点平均下沉 10.68 mm; 所有管线监测点的沉降均未超过 10 mm。

监测结果证明: 该基坑工程的围护结构和支撑体系使用效果良好, 围护结构变形、坑外环境变形控制均在允许范围内, 基坑周边建筑、道路、管线使用正常。图 10 为基坑支护结构完成全貌。

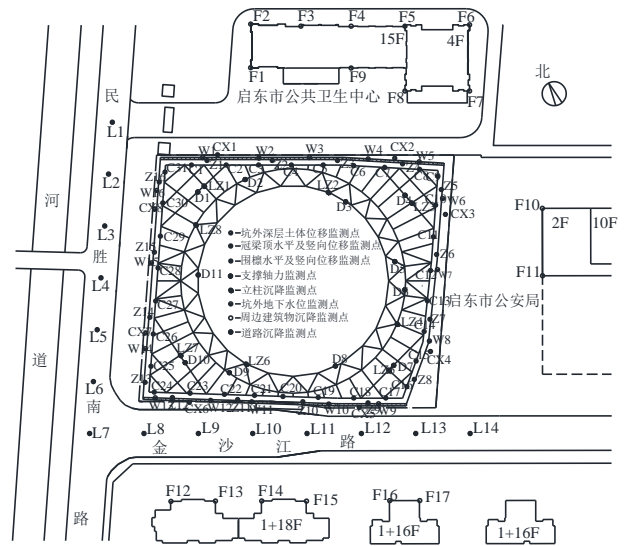


图 8 基坑监测点布置平面图

Fig. 8 Layout plan of foundation pit monitoring points

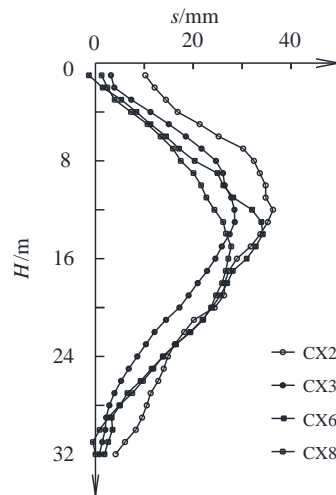


图 9 土体侧向位移曲线

Fig. 9 Typical lateral displacement profiles of the soil surround the excavation



图 10 基坑支护结构完成全貌

Fig. 10 Constructed bracing system of the excavation

6 结 论

(1) 本工程为软土地区 2 层地下室基坑工程, 采用钻孔灌注桩+单道钢筋混凝土环撑支护方案, 安全可行、施工方便、经济合理, 为软土深基坑支护工程的设计和施工提供了成功的经验。

(2) 双圆环内支撑结构体系结构新颖合理, 系统简洁, 受力明确, 充分利用环形结构受力特性, 充分发挥混凝土的抗压性能, 有较好的整体刚度和稳定性, 能较好地控制位移, 减小变形, 但对整圆性的控制是关键。

(3) 基坑支护工程的成功需要设计、施工、监测部门的密切配合, 监测工作很关键, 不仅可使基坑支护结构始终处于安全监控之下, 也可确保周边建筑物、管线、道路的变形在安全监控之中, 为信息化施工提供指导, 确保安全施工。

参考文献

- [1] 陈雨蒙. 大型基坑环梁支护体系有限元数值模拟分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
CHEN Yu-meng. The numerical simulation analysis of ring beam retaining system of large foundation pit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [2] 李欣. 软土地基中深基坑双环形桁架支撑体系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
LI Xin. Research on double ring truss support system for deep foundation in soft soil[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [3] 蓝海江. 双圆环内支撑在基坑支护设计中应用实例[J]. 广东土木建筑, 2013, 20(6): 28-30.
LAN Hai-jiang. Application case of double-ring bracing system in foundation pit[J]. Guangdong Civil Architecture, 2013, 20(6): 28-30.
- [4] 程杰林, 李玉忠, 刘秀珍, 等. 多重大直径同心环形支撑在超深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1): 122-126.
CHENG Jie-lin, LI Yu-zhong, LIU Xiu-zhen, et al. Application of many concentric ring supports with large diameter in super deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 122-126.
- [5] 赵升峰, 陈祉阳, 蔡云, 等. HCMW 工法结合圆环内支撑基坑支护设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(3): 120-124.
ZHAO Sheng-feng, CHEN Zhi-yang, CAI Yun, et al. Excavation support design of HCMW method combined with ring bracing[J]. Building Structure, 2019, 49(3): 120-124.
- [6] 邵锦周. 长江口北岸岩土工程实录[M]. 南京: 南京大学出版社, 2009: 29-42.
SHAO Jin-zhou. Geotechnical Engineering Record of the North Bank of the Yangtze River Estuary[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2009: 29-42.
- [7] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 432-438.
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. Second Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2009: 432-438.
- [8] 金永涛. 考虑不对称土压力对圆环支撑内力影响分析[J]. 淮阴工学院学报, 2012, 21: 65-68.
JIN Yong-tao. Analysis of the influence of asymmetric earth pressure on inner force of ring bracing[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2012, 21: 65-68.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Monitoring of Building Excavation Engineering: GB 50497—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [10] 吴连祥, 樊永平. 基坑监测中混凝土支撑轴力监测结果分析与判断[J]. 江苏建筑, 2015(2): 99-101.
WU Lian-xiang, FAN Yong-ping. Analysis and judgment of monitoring results on bracing axial force of concrete in monitoring of building foundation excavations[J]. Jiangsu Construction, 2015(2): 99-101.