

# 钢筋混凝土曲形支撑体系 在地铁复杂深基坑围护结构设计中的应用

石建刚

(中铁第一勘察设计院集团有限公司城建院, 陕西 西安 710043)

**摘要:**受地面环境的影响,市区内明挖深基坑的平面布置形式逐渐向复杂多边形方向发展。由简单条形杆系内撑组成的传统围护结构在该类基坑中应用时,由于各种施工条件的限制,将难以付诸实际。从复杂深基坑平面布置形状特点、设计方案的可实施性、施工过程的安全性和施工组织的便捷性角度出发,提出了一种适合于该类复杂深基坑特点的曲梁式环撑围护结构体系,并依托实际工程背景,对该种围护结构体系的构成、支护方案特点、结构检算方法及具体设计参数等进行了详细阐述,最后通过现场监测结果对设计方案的可行性进行了验证。

**关键词:**地铁;深基坑;围护结构;曲梁支撑

**中图分类号:**TU921 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2018)02-0021-06

近些年来,城市轨道交通工程的大量兴建,产生了大量的深基坑工程。由于受到众多边界条件和控制因素的影响,现在地铁基坑的形式也大大超出了标准的模式,基坑的深度不断变深,从而基坑围护工程的风险也在不断增大。在一些轨道交通线路逐渐形成网络的城市,在后续地铁建设过程中会有更多体量庞大的换乘车站,换乘站因为线路平面交叉形成复杂的多边形深基坑,如何选择科学合理的支护方案,进行可靠的围护结构设计,保证围护结构在施工中的安全及邻近建筑物和地下管线的安全,成为众多从事基坑工程的技术人员所关心的问题。

基坑安全的问题涉及的方面很多。例如:工程地质、围护选型、嵌固深度、地下水位、降水方案、内支撑体系、冠梁围檩构造等多项参数的合理选择与确定<sup>[1]</sup>。而桩身水平位移,特别是桩顶水平位移反映基坑围护结构的变形情况,能直接反映围护结构变形特性,是围护结构安全状况的重要指标,过大的桩身位移往往是围护结构破坏的前兆,威胁着基坑的安全<sup>[2]</sup>。肖武权等对深基坑支护方案和所选支护类型细部结构的设计计算两个方面的优化进行了探讨<sup>[3]</sup>。王晓伟等提出了考虑深基坑坑角效应的支护结构变形计算方法,并通过工程实例验证了此计算方法及所得系数的合理性<sup>[4]</sup>。文献[5]~文献[8]从室内试验、现场监测和模拟计算方面对深基坑的变形和内力方面做了有效的研究。上述研究均是建立在常规矩形平面深基坑工程的基础上所取得的成果,但对于基坑平面不规则、空间效应明显的复杂深基坑,相关的研究成果未见详细报道。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

在建工程车站是西安市线网中第二轮建设的两线换乘站,位于既有道路与规划路十字路口的北侧,沿南北向敷设于道路下方。车站全长189.7 m,本期车站为地下三层岛式站台车站,标准段宽度23.7 m,远期线车站为地下二层岛式站台形式,本站土建工程预留节点换乘条件,换乘节点处基坑最大跨度约55 m(见图1)。



图1 车站总体布置

收稿日期:2018-03-02 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2018.02.05

作者简介:石建刚(1985—),男,工程师,主要从事地铁工程设计及理论研究工作。E-mail:404417629@qq.com

石建刚.钢筋混凝土曲形支撑体系在地铁复杂深基坑围护结构设计中的应用[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(2):21-26.

车站采用明挖顺做法施工,三层站主体基坑深度约为 24.8 m,围护结构形式采用直径 1 200 mm@1 500 mm 钻孔灌注桩(换乘节点二层基坑采用桩径 1 000 mm@1 400 mm)+内支撑。站位所在道路为双向 6 车道+2 非机动车道,现状道路总宽 40 m,规划道路宽 60 m。

## 1.2 工程地质及水文地质

### 1.2.1 工程地质

站位所在主要地貌单元为河流二级冲洪积阶地,拟建场地经人工改造后地势较平坦,地形略有起伏,地面高程介于 410.61~411.78 m,最大相对高差约 1.17 m。

工程场地在勘探深度 50.0 m 范围内的地层主要为第四系堆积物,即由全新统杂填土(Q4 ml)、素填土(Q4 ml)、冲积(Q4al)黄土状土、粉质黏土、粉细砂和中砂组成。地层物理力学参数见表 1。

表 1 各土层物理参数表

岩土 分层	岩土 名称	天然 密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然 含水量 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e$	渗透 系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	变形 模量 $E_d/MPa$	直剪快剪		直剪固快	
								黏聚力 $c/kPa$	内摩 擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 $c/kPa$	内摩 擦角 $\varphi/(\circ)$
1-1	杂填土	—	—	—	5	10	10	15.0	—	—	—
2-1	黄土状土	1.81	19.04	1.52	0.790	5	6	25	21.0	32	22.5
3-1	黄土	1.91	21.9	1.56	0.731	3	7	23	20.0	33	24.0
3-2	古土壤	1.96	21.7	1.62	0.669	0.5	9	26	19.0	34	24.5
3-3	粉质黏土	1.99	20.7	1.65	0.636	3	12	24	20.6	35	25.0
3-5	粉细砂	1.97	17.7	1.65	0.601	25	12	0	30.2	—	—
3-6-2	中砂	1.98	20.34	1.64	0.626	30	20	0	32.3	—	—
4-3	粉质黏土	2.01	22.3	1.64	0.645	3	13	27	22.0	36	26.0
4-6	中砂	2.03	17.7	1.70	0.571	30	22	0	35.0	—	—

### 1.2.2 水文地质

地下水埋深介于 14.7~15.6 m 之间,地下水高程介于 395.82~396.41 m 之间。地下水位具有由南向北缓慢降低的趋势。地下水主要赋存于砂类土及粉质黏土中,属孔隙性潜水。

地下水补给主要来自大气降水、绿化灌溉、侧向径流等,排泄方式主要为径流排泄、人工开采、潜水越流排泄等。地下水的径流方向与区域总体地形趋势一致,由南向北。

## 2 基坑特点及支护方案的比选

本站遇到线路平面交汇形成夹角问题、基坑深度高低错落问题、施工期大面积围挡造成的交通导改和管线迁移困难、且需考虑在建车站为远期车站预留合理的结构接口条件,避免接驳误差造成废弃等工程难题,故本站遇到的换乘站深基坑边界条件矛盾突出,需设计出一个科学合理的深基坑支护体系解决工程实际,同时给类似换乘车站深基坑设计提供一个解决思路和优化方案。

基坑内支撑体系,由于换乘节点处基坑呈现多边形,且长、短边均超过 40 m,如果采用常规的杆系内支撑,难以布置出每个临空边均形成支点的受力体系(如图 2 所示)。

为此,研究中拟定 2 个基坑支护设计方案:

方案一:换乘节点处地下二层、三层基坑不能同期施工,先开挖三层基坑、施工主体结构,再开挖外挂

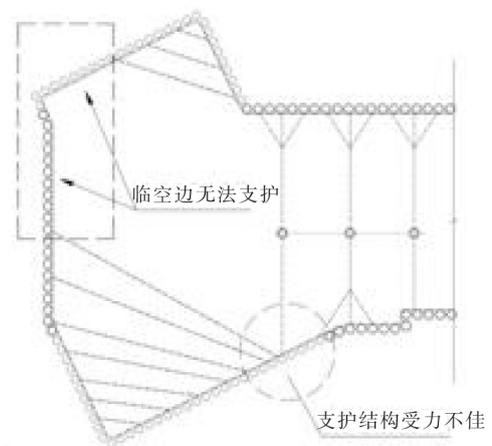


图 2 换乘节点处常规基坑围护布置示意图

的二层基坑、打开换乘节点处结构。采用常规平面计算模型(见图 3)。优点:支护结构受力简单、施工方便。缺点:工序转换多、开挖空间局促、工期延长、施工效率低。

方案二:换乘节点处地下二层、三层基坑同期施工;采用平面“半圆形”或“曲形”的钢筋混凝土支撑布置(以下简称“环撑”),利用“水平拱圈结构”解决深基坑支护的整体稳定性。采用三维整体计算模型(见图 4)。优点:施工效率高、有效利用空间、支护结构新颖、节省工期、节约造价。缺点:支护结构受力复杂、对施工工艺要求较高。

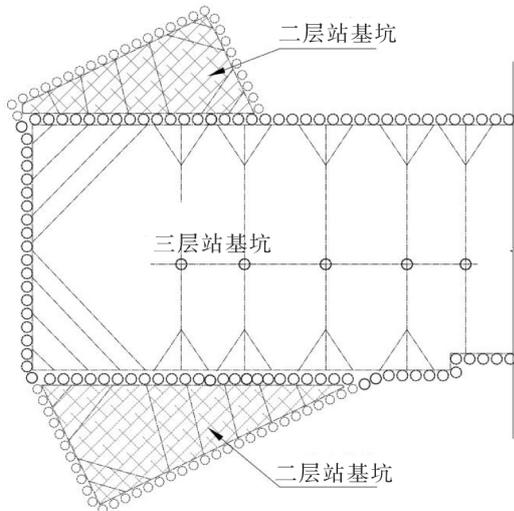


图 3 方案一基坑支护布置图

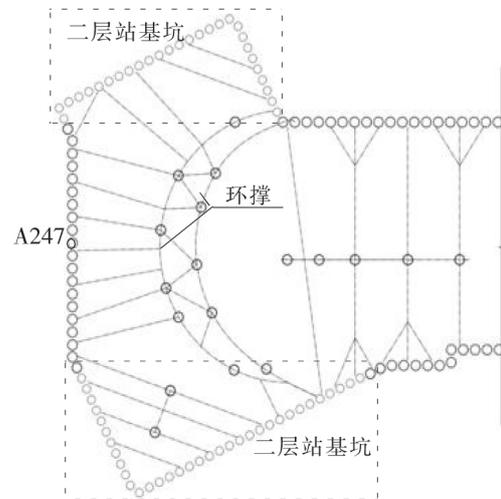


图 4 方案二基坑支护布置图

经过综合比选最终推荐方案二作为基坑设计方案。具体设计参数如下:

(1)三层站主体基坑深度约为 24.8 m,围护结构形式采用直径 1 200 mm@1 500 mm 钻孔灌注桩(换乘节点二层基坑采用桩径 1 000 mm@1 400 mm)+内支撑。针对本站重点的换乘节点处设置 4 道钢筋混凝土支撑,另外增加一道换撑,支撑竖向间距从上到下分别为:1.9 m、6.0 m、5.5 m、4.0 m 及换撑 2.0 m。

(2)实际支撑布置:两层基坑深度(17 m)设置三道砼支撑(截面尺寸分别为 1 200 mm×1 000 mm、1 600 mm×1 100 mm、1 600 mm×1 100 mm);第四道为混凝土支撑(截面尺寸为 1 600 mm×1 100 mm),位置在负二层底板标高以下,形成一道内基坑的冠梁+支撑体系;剩余约 8.0 m 的内基坑一次开挖至基底。

(3)在负三层底板浇筑完成后,继续浇筑一段结构侧墙再架设第五道换撑,待主体结构砼强度达标后拆除第四道支撑(该工况基坑由第三道环撑和第五道环撑受力),有效防止负三层侧墙(高约 7.5 m)产生较大悬臂状态导致围护结构水平变形过大。

(4)多边形基坑多处应力集中造成冠梁、围檩在角部内力徒增,需按照弯剪扭构件核算并增强其结构配筋,另外增加转角处板撑截面以提高整体刚度。

(5)本基坑设计创新点和难点在于形成了平面半圆形或环形的支撑形式(以下简称“环撑”),环撑再与杆系内支撑组合形成“放射状”的超静定结构,其空间效应明显、构件受力状态复杂,且环撑下方需设置中立柱(共 11 根直径 1 200 mm 钢筋混凝土桩)以减小跨度,形成平面环形支撑体系的类似桁架结构,提高基坑整体稳定性。支撑体系布置完成后施工吊装作业、出土空间仍然较大。

### 3 模拟计算分析

#### 3.1 计算工况及控制条件

研究中采用理正深基坑支护结构分析软件(FSPW7.0)作为分析软件,利用增量法原理模拟基坑施工全过程,计算内容包括抗滑、抗倾覆,并根据围护结构内力和变形情况检算设计参数。基坑保护等级和变形控制标准为一级,基坑最大水平位移不大于 0.1% $H$ ,且不大于 30 mm,地面最大沉降量不大于 0.1% $H$

( $H$  为基坑深度,单位:m)。

### 3.2 计算结果分析

根据计算结果,基坑变形及环撑内力最不利工况为基坑开挖至设计标高,最大变形发生在换乘节点端头基坑中部,最大水平变形值为 21.83 mm,小于 30 mm 及  $0.1\%H$  要求,如图 5 所示。基坑开挖至基底标高时,各层环撑内力计算结果汇总如表 2 所示,平面杆系支撑内力如表 3 所示,第三道环撑水平面各构件弯矩如图 6 所示。

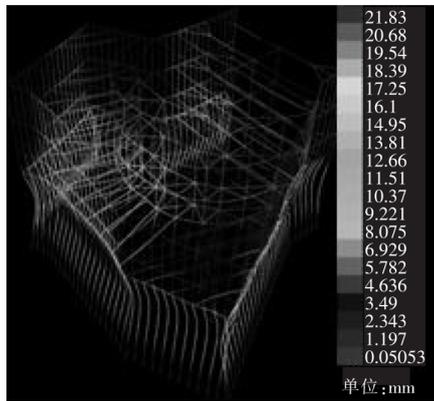


图 5 开挖至设计标高时基坑水平位移(单位:mm)

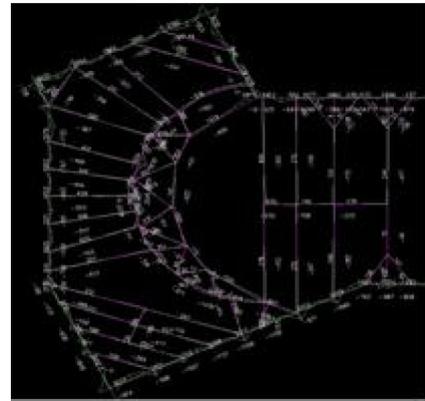


图 6 第三道内支撑平面各构件弯矩(单位:kN·m)

表 2 基坑开挖结束后各层环撑内力汇总

项目	最大水平弯矩/(kN·m)	最大竖向弯矩/(kN·m)	最大水平剪力/kN	最大轴力/kN
第一道环撑	1 092	1 085	948	3 272
第二道环撑	1 780	1 151	1 764	6 010
第三道环撑	2 882	1 766	3 505	9 329
第四道环撑	4 137	2 252	4 454	10 964

表 3 基坑开挖结束后各层平面内撑内力汇总

项目	最大弯矩/(kN·m)	最大剪力/kN	最大轴力/kN
第一道内支撑	512	149	1 950
第二道内支撑	577	170	3 960
第三道内支撑	714	185	6 452
第四道内支撑	1 003	215	8 853

围护桩内力最不利工况发生在拆除第四道支撑时,围护桩最大弯矩 3 609 kN·m,最大剪力 1 854 kN。分析三维模型计算结果,中立柱开挖至基底工况,共 11 根直径 1 200 mm 砼中立柱(兼做桩基础,基底以下桩长 18 m),取其中柱底部轴力最大值 2 473 kN。依据详勘报告按照摩擦端承桩计算立柱桩的承载力特征值  $2 526.45 \text{ kN} > 2 473 \text{ kN}$ ,满足规范要求。

### 3.3 围护体系各构件组成配筋设计

围护体系中,冠梁、围檩、围护桩、环撑、内撑以及中立柱等均可根据计算所得内力按常规压弯构件进行配筋设计,设计方法均为常规方法,此处不再累述。

## 4 现场监测及施工效果

为验证施工设计方案的可靠性,施工过程中开展了现场监控量测工作。工作内容包括:周边地表沉降、围护桩水平位移、环撑内力及中立柱的变形等监测项目。

#### 4.1 地表沉降及围护桩水平位移

施工过程中,地表最大沉降出现在开挖至基坑底部时,发生位置对应 247# 围护桩(具体位置见图 4)基坑的外侧地表。最大沉降值 13.56 mm,该测点地表沉降的时间历程曲线如图 7 所示。地表沉降监测数据满足相关要求。基坑周边建(构)筑物监测无异常,施工期间没有出现基坑预警情况。

施工期 247# 围护桩的桩身水平位移最大,最大值为 15.32 mm,出现在开挖至基坑底部时,位置发生在距桩顶面下 18.93 m(总桩长 34.35 m),该处桩身水平位移时间历程曲线如图 8 所示。基坑稳定性满足设计要求。

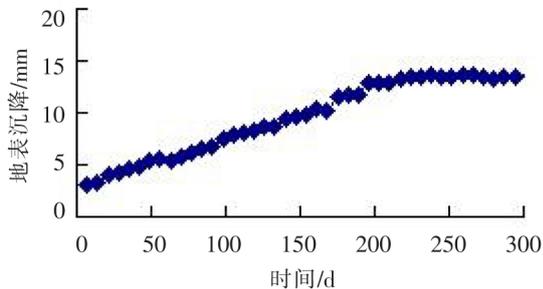


图 7 地表沉降时间历程曲线

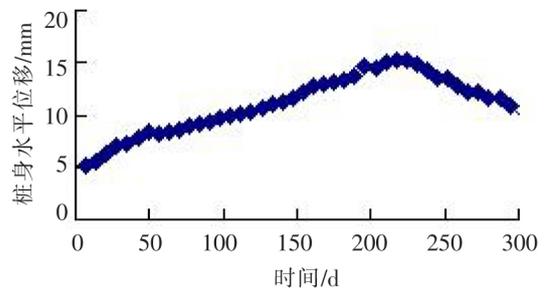


图 8 桩身水平位移时间历程曲线

#### 4.2 环撑内力

环撑内力采用混凝土表面应变计首先测出该处 4 个侧面混凝土的表面应力,再换算出该截面的轴力,通过轴力的结果反馈施工。文中仅选取最不利工况的第三道环撑整理监测数据,组合环撑共布设 6 个内力测点,如图 9 所示,每个测点的最大轴力监测结果如表 4 所示。监测结果均小于设计最大轴力 9 329 kN,结构配筋满足受力要求。

表 4 环撑最大轴力

测点编号	1	2	3	4	5	6
轴力/kN	8 267	8 413	8 236	8 186	8 407	7 955

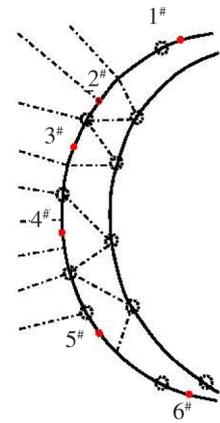


图 9 环撑内力测点布置示意

#### 4.3 中立柱变形

选取最不利的 8 号立柱(即环撑内力测点 3、4 之间的立柱,如图 9),其最大水平位移 20.85 mm,最大变位发生在靠近基底。针对立柱根部一个测点分析,基坑在未开挖前因浇筑混凝土构件时温度应力、施工误差等因素,立柱向基坑外侧发生较小变位;待基坑逐渐开挖过程立柱向基坑内侧位移,与环撑受力体系发挥作用的变形趋势基本一致(见图 10),但总体位移不大。

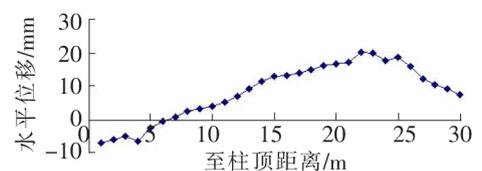


图 10 中立柱水平位移监测曲线

## 5 结论

(1)创新性提出了一种适用于不规则多边形深基坑的围护结构设计理念,并在实际工程得以应用,应用效果良好,达到了经济效益和技术效益的高度统一。

(2)采用专业深基坑支护结构分析软件对依托工程“曲形支撑体系”内力及变形进行了模拟分析,印证了所提方案的可行性,为工程设计实践提供了技术支持。

(3)对于类似基坑平面不规则、空间效应明显、斜撑布设角度大、支座处易滑移等难点的地铁深基坑,推荐采用环撑与杆系内支撑组合形成“放射状”的超静定结构,即利用环撑发挥“拱”受压承载能力优势解决多条临空边支护难题,为今后类似规模的深基坑支护设计方案提供了创新的思路和解决方法。

## 参 考 文 献

- [1]朱占国,赵文,李慎刚,等. 地铁深基坑支护结构计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(5):1109-1114.
- [2]任建喜,张引合,张馄. 西安地铁车站深基坑变形规律 FLAC 模拟研究[J]. 铁道工程学报,2011,28(3):90-93.
- [3]肖武权,冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学,2007,28(6):1201-1205.
- [4]王晓伟,童华炜. 考虑深基坑坑角效应的支护结构变形计算[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(3):479-484.
- [5]蓝日彦. 深基坑排桩支护土压力及变形的试验研究[D]. 南宁:广西大学,2002.
- [6]刘均红. 黄土地区地铁车站深基坑变形监测与分析[J]. 中国铁路,2009(8):68-71.
- [7]刘勇,冯志,黄国超. 北京地铁工程深基坑围护结构变形研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(2):329-335.
- [8]刘继国,曾亚武. FLAC 3D 在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 岩土力学,2006,27(3):505-508.

## Application of Reinforced Concrete Curved Beams Brace of Complex Supporting Structure in Design of Metro Deep Foundation Pit

Shi Jiangang

(Urban Architecture and Rail Transit Design Institute, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Because of the influence of the surrounding environment, the plane layout of urban deep foundation pit gradually evolves into a complex polygon. The traditional enclosure structure consists of a series of inner-support rods system. It is difficult to put it into practice limited by various ground conditions. Based on the complex deep foundation layout shape characteristics, design feasibility, construction safety, and construction convenience, this paper puts forward a kind of enclosure structure system with curved beams and supporting bars, which is suitable for the complex characteristics of the deep foundation pit. Taking practical engineering as the background, the enclosure structure system is described in detail, including the composition of the system, the characteristics of the support scheme, the method of structure checking and the specific design parameters, etc. Finally, the feasibility of the design scheme is verified by the field monitoring results.

**Key words:** metro; deep foundation pit; supporting structure; curved beams

(上接第 9 页)

bridge with flexible arches. The steel truss is cantilever assembled symmetrically using a 74 t erection crane from middle span to side span, and 40 t rotary crane is used to assemble the flexible arch, whose middle part is assembled at first, and side part is assembled afterwards. In this paper, a shell finite element model for the connecting part between steel chords and top bracing pieces is established base on ABAQUS when the crane walking through the arch, then the mechanical behaviors of the structures under two different sizes of backing plates are analyzed. The research results show that the stress state of the connecting parts is unfavorable and the overall deformations of the structure are larger when the top bracing limbs are loaded separately, which has detrimental effect on the construction safety. When the connecting parts are in good condition and structure deformations are relatively small, the structure satisfies the construction requirements.

**Key words:** Yin-xi railway; steel truss girder with flexible arch; 40 t erection crane; ABAQUS; finite element analysis