

# 超大型复杂地下综合体工程结构设计研究

周 兵

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,430063,武汉//高级工程师)

**摘 要** 武汉市光谷广场综合体为超大型复杂地下综合体,包含3条地铁线的车站和区间、2条市政隧道以及地下空间开发。研究了超大型复杂地下综合体工程的结构设计。介绍了光谷广场综合体的总体设计方案、基坑工程实施方案和主体工程结构布置。通过主体结构荷载模拟计算,验证了光谷广场综合体设计的合理性和结构的安全性。

**关键词** 地铁;超大型地下综合体;结构设计

**中图分类号** TU921

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.05.009

## Research on Design of Ultra-large Underground Complex Structures

ZHOU Bing

**Abstract** The Wuhan Optics Valley Plaza Complex is an ultra-large underground complex. The project includes 3 subway stations and sections, 2 municipal tunnels, and underground space development. The structural design of ultra-large underground complex was studied. The overall design scheme, foundation pit implementation scheme and main structure layout of the project were introduced. Through the simulated calculation of the main structure loads, the rationality of the design and the structural safety were verified.

**Key words** metro; ultra-large underground complex; structure design

**Author's address** China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

城市轨道交通多线换乘车站一般设置于城市中心区,区域交通拥挤且土地资源稀缺。因此,结合多线地铁换乘车站、市政工程、地下空间于一体的超大型地下综合体,作为一种高效集约的新型解决方案,将更多地应用于工程实践。

目前,国内外对于超大型复杂地下综合体的研究较少,工程设计、实施经验还存在许多不足,需进行深入研究。本文结合武汉市光谷广场综合体工程的总体方案、结构设计及建设实施全过程,从基坑工程、结构体系及计算分析3个关键方面,总结超

大型复杂地下综合体工程结构设计经验和要点,为后续同类工程提供参考。

## 1 总体设计方案

武汉市光谷广场综合体位于中国光谷的核心位置——光谷广场,工程总建筑面积约16万 $\text{m}^2$ ,包含3条地铁线的车站和区间、2条市政隧道以及地下空间开发。其中:地铁2号线南延线呈东西走向敷设于虎泉街-珞喻东路道路下方,地铁9号线呈南北走向敷设于鲁磨路-民族大道道路下方,地铁11号线呈西北至东南方向敷设于珞喻路-光谷街道路下方;珞喻路市政隧道沿东西方向从地下穿越,鲁磨路市政隧道沿南北方向从地下穿越。在有限的空间内解决5条线交汇的空间布局,同时保证其最优功能,是该项目首先遇到的挑战。

在总体设计阶段,通过对集中与分散站位、集中与分散站厅以及各条线路的空间组合进行研究分析,将地铁9号线、11号线站台集中布置在光谷广场中心地下,相比于分散站台,更有利于乘客换乘;贯通的地下一层作为地铁换乘大厅,连通3条地铁线的4座车站,同时实现与周边各地块的衔接。鲁磨路市政隧道与地铁9号线方向一致,同层归并于地下一层夹层,形成一种独特的地下大厅高架站台的空间布局;珞喻路市政隧道与地铁2号线南延线区间方向接近,同层归并于地下二层;地铁11号线站台布置于地下三层。光谷广场综合体空间布局图如图1所示。

该总体设计方案,地铁换乘便捷高效:基于地下一层的贯通大厅,乘坐地铁9号线的乘客直接上夹层;乘坐地铁11号线的乘客直接下负三层;乘坐地铁2号线的乘客既可从大厅向西进光谷广场站,也可向东进珞雄路站,过街则直接环通。该总体设计方案实现了交通功能的最优化,同时在三层半空间内解决了5条线交汇的空间布局问题,有效地节约了工程规模和投资。

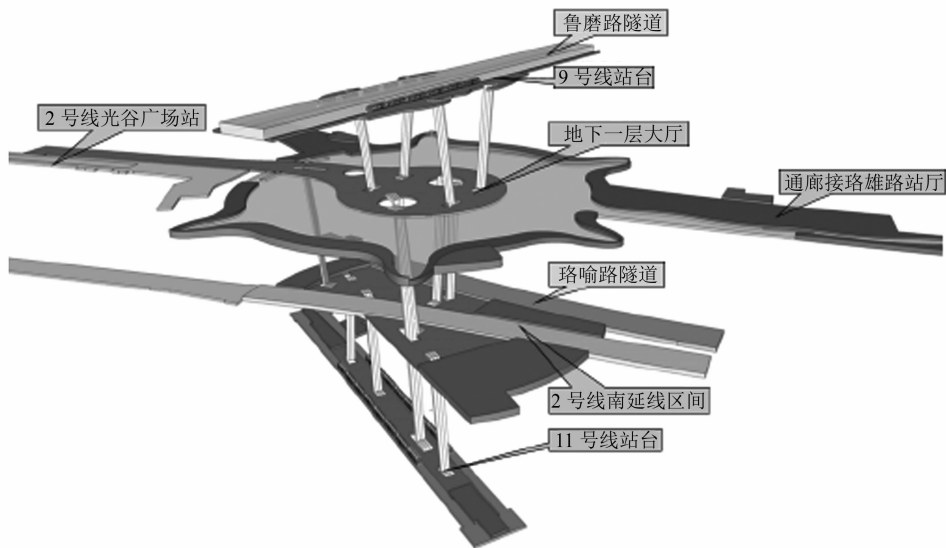


图1 光谷广场综合体空间布局图

## 2 基坑工程实施方案

### 2.1 场地地质概况

光谷广场综合体工程场地地貌单元为剥蚀堆积垄岗区(长江三级阶地),地形总体较为平坦。场区覆盖层主要为填土层( $Q^m$ )、第四系全新统洪积层( $Q_4^{al}$ )粉质黏土、第四系上更新统冲洪积层( $Q^{al+pl}$ )黏土等,厚度及性能变化较大;下伏基岩复杂,岩性多变,主要为志留系(S)泥岩。

工程场址的地下水主要为上层滞水和基岩裂隙水,上层滞水主要赋存于(1)层人工填土层中,静止水位在地面下0.3~3.0 m之间;碎屑岩裂隙水主要赋存于泥盆系、志留系的石英砂岩、砂质泥岩等的构造裂隙及风化裂隙之中,在基坑开挖过程中需做好隔渗及排水措施。

光谷广场综合体工程结构顶板覆土1~3 m,底板主要位于强风化砂质泥岩层(20a-1),该层岩体破碎,为极软岩,岩体基本质量等级为V级。

### 2.2 基坑实施方案

光谷广场综合体工程规模巨大,空间关系极为复杂:周边高楼林立,地面交通拥堵,人车混行严重,地下管线密集交错。该超大复杂项目的工程筹划、交通疏解、管线改迁及其对周边环境影响是所面临的巨大挑战。

设计时首先将工程规模最优化。光谷广场道路红线是以光谷广场中心点为圆心的直径为300 m的圆,规划阶段的光谷广场综合体车站主体轮廓的

直径为280 m,该轮廓线距周边地块红线仅10 m,难以满足施工期间地面交通、管线改迁、施工场地等的空间需求。设计时,在满足交通功能的前提下,根据6节A型车编组列车对地铁车站的最小长度要求,将该工程规模优化到直径为200 m圆形范围内,综合体与周边地块红线距离增加到50 m,这给地面交通、管线迁改和工程施工留出了充足的空间,给工程顺利、快速实施创造了前提。

该工程的基坑总平面面积近10万 $m^2$ ,平面不规则、竖向错层多,如此复杂的超大规模基坑工程国内尚无先例;该工程各组成单项的工期要求、各区段的工程条件也均不一致,在整体统筹协调工程实施方案的同时,必须分区分块、分期施工。

光谷广场综合体主体基坑范围如图2所示。光谷广场中区、西区、东区,以及地铁线路明挖区间、珞雄路地铁站5个区域均处于地下二层到三层,基坑平均深度21 m;广场中区内部地铁11号线负三层站台区域的基坑最深,深度为32 m;光谷广场北区、南区均处于地下一层,基坑深度为14 m。东西向的地铁2号线南延线需在4年内完工并开通运营,这一工期为关键工期。为确保地铁2号线南延线按期贯通,对光谷广场综合体主体基坑按整体实施和分期实施两种方案进行对比分析。整体实施方案考虑将综合体主体基坑工程全部同期同步实施,经工筹排布,总工期为50个月,工期不能满足地铁2号线南延线开通工期要求。分期实施方案考虑将地铁2号线南延线区间所在的光谷广场中区、西

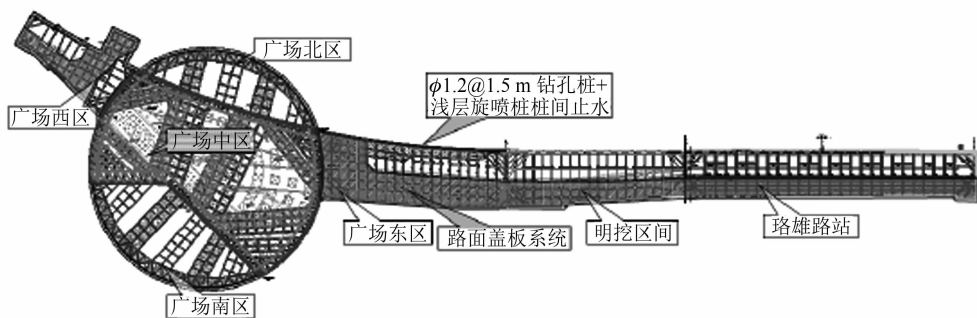


图 2 光谷广场综合体主体基坑分区图

区、东区,以及地铁线路明挖区间、珞雄路地铁站 5 个区域的综合体基坑工程作为一期工程同期先行实施,光谷广场北区、南区的综合体基坑工程作为二期工程,一期工程封顶后实施二期工程。经工筹排布,分期实施方案的总工期为 54 个月,但地铁 2 号线南延线可在 46 个月内提前贯通,工期满足地铁 2 号线南延线的开通工期要求。实际上,因场地条件局促,整体实施方案在施工组织上将面临很大困难;如果采用分期施工方案,综合体基坑工程的二期工程可与一期工程互为施工场地,能够有效解决场地问题。经对比分析,最终选择的方案为分期实施方案。

基坑一期工程中的 5 个区域虽总体同期实施,但受现场条件限制难以完全同步。从图 2 可见,由于这 5 个区域的基坑平面异形、竖向错台,如作为一个大基坑设计实施,其支撑体系布置和整体受力变形都将难以解决。因此,设计时,在各区域之间设置基坑分隔桩,各区域基坑分隔桩两侧支撑的平面布置及竖向标高相互对应,以保持基坑分隔桩两侧受力平衡。该设计方案将一个复杂的超大基坑划分为 5 个相对独立的基坑,既解决了基坑受力变形问题,也为各区域的工程实施条件保留了余地。

### 2.3 基坑工程设计

光谷广场综合体各区域基坑体型的平面和竖向均较为复杂,尤其是光谷广场中区,其轮廓呈蝴蝶结形状且存在坑中坑,具有较强的空间受力变形特征。该区域开挖到负三层底时,基坑体系将处于受力和变形控制工况,基坑自身以及紧临基坑边的环岛道路、市政管线均为重大风险区域。

根据综合体基坑情况和光谷广场的地质情况,综合体基坑主要采用  $\Phi 1.2@1.5$  m 钻孔桩进行支护,浅部填土层采用 7 m 深  $\Phi 800$  mm 双重管旋喷桩桩间止水,基坑采用钢筋混凝土水平桁架体系进

行支撑,大基坑竖向设置 3 道混凝土支撑。综合体广场范围基坑支撑布置如图 3 所示。

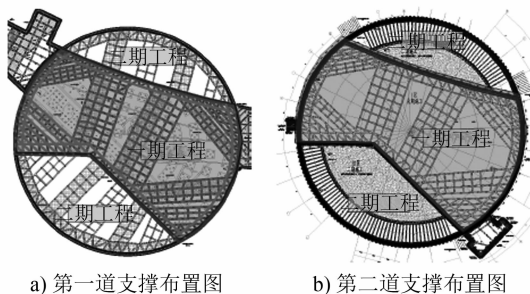


图 3 综合体广场范围基坑支撑布置图

通过对基坑进行三维整体计算分析,根据整体变形情况对支撑体系布置进行调整和优化。光谷广场中区基坑最大计算变形为 21 mm,围护结构受力、变形均满足一级基坑控制要求,基坑整体变形均衡,基坑设计合理。整体变形云图如图 4 所示。

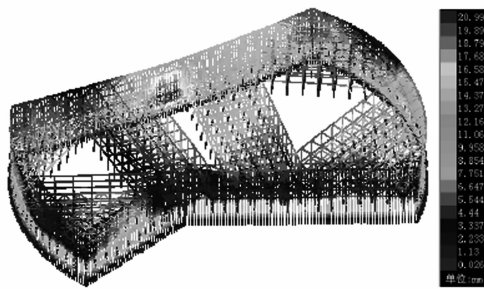


图 4 光谷广场综合体基坑整体变形云图

综合体基坑二期工程的北区、南区基坑竖向需设置 2 道支撑,由于存在基坑分隔桩,如果二期工程的基坑支撑直接支顶在分隔桩上,在回筑阶段分隔桩将难以拆除。设计时,将首道支撑支顶于一期工程顶板上方的牛腿上,随后盆式开挖基坑至基底并浇筑中部底板;将第二道钢支撑采用斜抛撑型式支顶于先浇底板后,开挖基坑周边土方并回筑。实践证明,该方案为施工提供了很大便利,同时解决了

回筑阶段分隔桩破除问题。

综合体基坑工程支撑体系复杂,传统的风镐拆除支撑方式难以满足工期要求。工程又处于光谷商业中心,因此减小拆除支撑对周边环境的影响是个重大难题。在工程实践中探索应用毫秒微差爆破拆除法逐层分区拆除支撑,在结构回筑阶段,采用该方法方便快捷地实现了支撑拆除。该方法与常规人工风镐拆除方案相比,一期工程的主题基坑工期节约了近 3 个月,支撑拆除费用节省了 47%。

### 3 主体工程结构布置方案

#### 3.1 工程结构体系

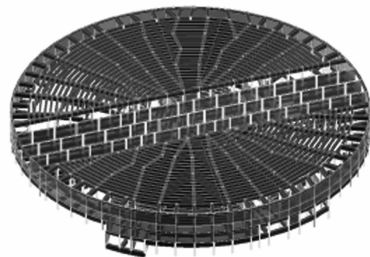
光谷广场综合体工程基于五线交汇,结构型式独特复杂,同时采用大净空、大跨度结合地下中庭、下沉广场等多种特殊结构形式来提升综合体的功能和环境,因此在确保综合体功能的同时保证其安全性和经济性成为结构设计的一大挑战。

综合体地铁车站主体区域为直径 200 m 圆形,主要客流为环向过街和径向进出站客流,因此结构体系布置应首先考虑建筑使用功能。根据建筑总体布置,地铁车站主体工程采用钢筋混凝土箱形框架结构,将柱网沿环向、径向布置,以有效避免对主要客流行进方向的阻挡;地下一层设备用房均位于转盘周边,主要设备管线为径向布置,结构对应采用径向主梁+环向次梁的受力体系,将主要设备管道布置于主梁之间,可有效节约空间,提升净高。

综合体地铁车站主体区域工程规模较大,远期全日客流量将近 40 万人次,站厅的空间效果和舒适度十分重要。如采用常规地铁车站 9 m 柱距方案,整个站厅成为“柱林”,功能较差且空间压抑。通过分析,地下一层柱网采用大跨度结构形式,非付费区为 45 m 宽圆环,直接采用 3 跨 15 m 大跨度结构;中央付费区人流密集,从付费区边线至站台边缘直接采用 1 个 26 m 超大跨。该方案使整个站厅结构体系简洁明了,站厅空间开阔。光谷广场综合体梁柱布置图如图 5 所示。

#### 3.2 基础设计

地勘报告抗浮水位取地面标高,经抗浮计算,结构自重不能满足使用阶段的抗浮要求,需布置抗拔桩参与使用阶段抗浮。同时,由于本工程采用大跨度结构,框架柱轴力巨大,而基底强风化志留系(S)泥岩节理裂隙极发育,岩体极破碎,竣工阶段基底承载力不足。综合考虑使用阶段和竣工阶段受



a) 梁柱布置三维模型



b) 梁柱布置现场效果

图 5 光谷广场综合体梁柱布置图

力条件,在框架柱柱下结合抗拔桩设置承台,使用阶段的抗拔桩在竣工阶段作为承压桩;承台在解决底板冲切问题的同时,也有效减小了底梁端部内力。

#### 3.3 温度应力解决方案<sup>[8]</sup>

光谷广场综合体地铁车站主体为圆形且线路交错,整个广场范围无法设置伸缩缝,但本工程体量庞大,必须采取有效措施来减小混凝土收缩应力对结构的影响,减少裂缝产生,因此解决该超大体量异形复杂地下结构伸缩缝设置问题是一大难题。

设计中,首先结合建筑布置和功能要求,将区间隧道伸缩缝尽可能地靠近光谷广场设置,尽量减小无伸缩缝的结构长度。在结构计算中以伸缩缝作为整体模型边界。计算考虑温度作用,根据《建筑结构荷载规范》,综合考虑武汉市年平均最高气温、最低气温及地下工程室内恒温等,在地下室顶板处施加 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度作用,离地表面深度 10 m 以下按《建筑结构荷载规范》不考虑温度作用。计入温度变化作用后进行结构计算并相应进行结构配筋,结构受力均可满足要求(见后文)。光谷广场综合体整体结构计算模型如图 6 所示。

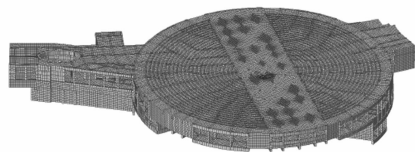


图 6 光谷广场综合体整体结构计算模型

综合体整体结构规模较大,在施工中分为中

区、北区、南区、西区、东区5个区域先后实施。结合分区围护桩设置结构后浇带,在二期工程分区后浇带封闭时一期工程土建已完工近一年,收缩已基本完成,相当于将结构收缩尺度由200 m减小至100 m,其效应相应减小。同时,在各分区内部每间隔30~60 m(分纵向和横向)设置间歇式膨胀加强带,采用C40微膨胀混凝土低温入模浇筑,封闭时间滞后45 d以上,使先浇筑的混凝土收缩大部分完成,然后再浇筑膨胀加强带,有效地释放混凝土的收缩应力。

综合体主体结构均采用补偿收缩混凝土,间隔跳段施工,补偿收缩混凝土(掺膨胀剂)水中养护14 d的限制膨胀率分别为:底板及顶板为0.015%,侧墙为0.020%,膨胀加强带为0.035%;混凝土初凝后,底板采用麻布覆盖,蓄水养护,侧墙采用喷淋养护;承台按照《大体积混凝土施工规范》要求施工,并在内部预埋冷却水管及测温计,通过冷水内部循环降低水化热,经施工现场测量,承台内部温度从初始的50℃峰值降低到了24.5℃,有效降低了水化热。工程主体结构完工一年来,未发现大范围的收缩裂缝,验证了工程措施的有效性。

## 4 主体结构荷载模拟计算

### 4.1 计算方法

光谷广场综合体主体结构十分复杂,需对其受力进行真实模拟。采用MIDAS/Gen软件进行三维有限元整体计算,对主体结构按竣工、使用阶段的实际工况进行分析。计算采用结构-荷载模式,按荷载最不利组合进行结构的抗弯、抗剪、抗压、抗扭强度和裂缝宽度验算,结构与周边土体相互作用采用弹性地基模拟。正常使用阶段水、土压力按静止土压力计算,水土分算考虑。

### 4.2 荷载及荷载组合

除永久荷载(结构自重、土压力、水压力、楼面建筑、设备质量等)、可变荷载(楼面人群荷载、列车荷载、地面汽车荷载、施工荷载等)、偶然荷载(6度地震作用,不考虑人防荷载)外,其余荷载及分项系数的取值按《建筑结构荷载规范》和地铁车站的使用要求确定。荷载组合按基本组合、准永久组合和偶然组合进行计算。

### 4.3 计算模型及边界条件

计算模型以各区域变形缝作为模型边界,采用梁单元模拟梁、柱、桩,板单元模拟楼板和承

台。梁、板单元的截面特性及材料按结构实际取值。

土体对底板作用采用只受压弹簧模拟,弹簧刚度 $E_1$ 根据地勘报告给出的垂直基床系数 $k_v$ 计算,即:

$$E_1 = k_v A_1 \quad (1)$$

式中:

$A_1$ ——底板与土体接触面的单位面积。

土体对抗拔桩水平方向作用采用拉压弹簧模拟,其弹簧刚度 $E_2$ 为:

$$E_2 = k_h A_2 \quad (2)$$

式中:

$k_h$ ——土体水平基床系数。

$A_2$ ——抗拔桩与土体接触面的单位面积。

土体对抗拔桩竖直方向作用采用拉压弹簧模拟,弹簧刚度 $E_3$ 为:

$$E_3 = Q_{sk} / \delta \quad (3)$$

式中:

$Q_{sk}$ ——桩基竖向极限侧阻力标准值。根据地质报告给出的各层土的极限侧阻力标准值,按《建筑桩基技术规范》的相关规定计算。

$\delta$ ——抗拔桩在极限承载力标准值作用下的竖向变形,通过模型试算确定为15 mm。

土体对抗拔桩端竖直方向作用采用只压弹簧模拟,弹簧刚度 $E_4$ 为:

$$E_4 = Q_{pk} / \delta \quad (4)$$

式中:

$Q_{pk}$ ——桩基竖向极限端阻力标准值。根据地质报告给出的桩端土的极限端阻力标准值,按《建筑桩基技术规范》的相关规定计算。

### 4.4 结构变形分析

光谷广场综合体结构层数、楼面荷载分布不均,根据楼板差异变形情况,对桩基承台、构件布置进行优化调整,以减小差异变形,使结构整体变形协调、合理。根据计算分析,各层结构变形较大的部位主要发生在大跨度梁、板的跨中或结构错层、模型边界处,对于这些部位采用调整构件布置、设置加腋、加强配筋等措施进行优化。以广场区域顶板为例,经优化调整,顶板使用工况下准永久组合位移结果如图7所示。

主体结构中受弯构件及悬臂构件的挠度限值按 $L_0/400$ ( $L_0$ 为构件的计算跨度)控制,计算得到各层板挠度值均满足规范要求,见表1。

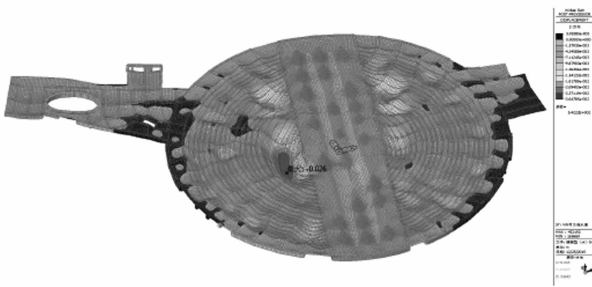


图 7 光谷广场综合体顶板使用工况准永久组合位移图

表 1 光谷广场综合体各层板挠度计算值及验算结果表

计算部位	挠度计算值	规范限值	验算结论
顶板	$L_0/839$	$L_0/400$	满足要求
地下一层底板	$L_0/1\ 014$	$L_0/400$	满足要求
地下二层中板	$L_0/1\ 014$	$L_0/400$	满足要求
地下二层底板	$L_0/2\ 385$	$L_0/400$	满足要求
地下三层中板	$L_0/2\ 385$	$L_0/400$	满足要求
地下三层底板	$L_0/1\ 856$	$L_0/400$	满足要求

4.5 结构内力分析

按荷载效应基本组合进行强度计算,按荷载效应准永久组合进行裂缝及挠度验算。以光谷广场区域顶板梁为例,基本组合及准永久组合情况下的梁弯矩如图 8 所示。

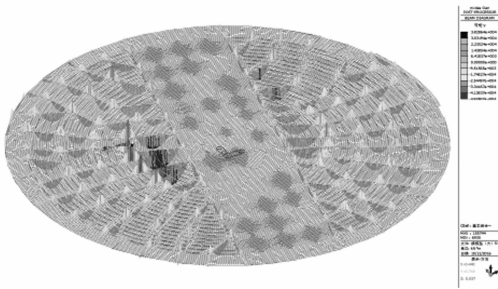


图 8 光谷广场综合体地下一层顶板梁弯矩基本组合包络值

构件按强度进行截面配筋计算,同时按最大裂缝控制值的要求进行裂缝验算。计算结果表明,地下工程结构构件配筋除个别构件截面和配筋由强度控制外,其余均由裂缝宽度控制。构件的配筋率控制在经济配筋率范围内,保证构件尺寸合理经济。

另外,经计算分析,地震力在工程大部分构件和位置为非控制性因素,仅需按抗震要求采取构造措施。但在结构边界接口框架处的梁柱及结构

大开孔中庭内的中柱水平方向内力值较大,在这些特殊部位需对截面、配筋及构造措施进行加强。

5 结 论

1) 超大型复杂地下综合体基坑工程应结合关键工期,综合考虑工程情况、地质条件、周边环境、施工场地、交通疏解、管线迁改,整体统筹安排、合理分区分块进行设计施工。

2) 超大型复杂地下综合体基坑支撑体系的布置应结合三维整体计算进行调整优化;分区支撑布设应避免制约分隔桩的拆除进而影响工期;混凝土支撑采用微差爆破拆除可有效节约投资和工期。

3) 超大型复杂地下综合体结构体系应结合使用功能和设备要求,合理布置柱网和梁系,并应充分考虑温度应力影响和解决措施;基础设计应结合竣工工况和使用工况综合考虑。

4) 超大型复杂地下综合体结构计算应采用三维有限元方法,对竣工工况、使用工况、地震工况下的结构变形、内力进行整体计算分析,并根据计算结果对桩基布置、结构布置、构件截面进行优化调整,确保结构安全、经济、合理。

参考文献

[1] 梁志勇.地下工程中主体与抗浮结构设计的完善措施[J].工程建设与设计,2017(11): 34.

[2] 赵兴.结构设计中优化设计应用[J].工程建设与设计,2017(13): 25.

[3] 柴家远.大型复杂地下空间总体设计研究[J].铁道工程学报,2012(7): 77.

[4] 还毅,方秦,陈力,等.大型地下空间结构地震风险评估方法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2010(4): 445.

[5] 齐锋,陈晓宝.谈复合式地铁站的有限元数值仿真[J].地下空间与工程学报,2006(B08): 1465.

[6] 刘高俭,万琳辉,万桂芬.地下结构上浮及抗拔桩设计[J].山西建筑,2008(16): 99.

[7] 谢婷蜓.大型地下空间工程基坑围护设计[J].城市建筑,2017(9): 146.

[8] 李大华,胡志勇,陈艳梅.大体积混凝土基础施工与温度控制技术[J].建筑技术,2012(1): 24.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范: GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

(收稿日期:2019-03-25)