

浦东足球场的关键建造技术研究

张弛 李伟 朱伟敏

上海建工二建集团有限公司, 上海 200080

[摘要]文中首先介绍了浦东足球场的工程概况。其次,给出了建筑设计的参数。尤其是钢屋盖是国际上首次采用的中置压环轮辐式张拉结构体系。主体结构采用了钢框架+屈曲约束支撑(BRB)体系。采用分区跳仓法开挖大基坑,混凝土结构配合局部劲性钢柱构成地下室结构。详细介绍了钢屋盖结构的建造过程,以及使用的特殊材料。在高超的施工技术与数字化建造能力的支持下,以较短的工期,高性价比地建成了一座现代化多功能下沉式足球场。

[关键词]浦东足球场;屈曲约束支撑;预制装配看台板;轮辐式张拉

DOI: 10.33142/ec.v6i7.8904

中图分类号: TU245

文献标识码: A

Research on Key Construction Technology of Pudong Football Stadium

ZHANG Chi, LI Wei, ZHU Weimin

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

Abstract: The article first introduces the engineering overview of the Pudong Football Stadium. Secondly, the parameters of the architectural design are provided. Especially, the steel roof is the first internationally adopted central compression ring spoke tension structure system. The main structure adopts a steel frame+buckling constraint support (BRB) system. Excavation of a large foundation pit using the zoning skip method, with a concrete structure combined with locally stiffened steel columns to form the basement structure. This article provides a detailed introduction to the construction process of steel roof structures and the special materials used. With the support of advanced construction technology and digital construction capabilities, a modern multifunctional sunken football field has been built with a shorter construction period and high cost-effectiveness.

Keywords: Pudong Football Stadium; buckling restrained support; prefabricated assembly stand board; spoke tensioning

引言

在传统的大型足球场建造领域,随着近些年来多方面建造水准的提升,新建场馆将呈现出更多样的造型与更多的科技元素^[1-3]。以浦东足球场为例,采用全钢看台结构。分块拼装预制清水混凝土看台板。数字化平台下跨季温控施工地下室大顶板^[4-6]。钢屋盖采用中置压环椭圆形轮辐式索承网格结构,将常规放置在外圈的压力环向内移动,形成能更好适应矩形足球场的椭圆形中置压环^[7]。仅屋面部分,就在阶梯区和曲面区采用了双层铝蜂窝板,在屋面边缘采用聚碳酸酯阳光板和铝单板收边。内外檐口采用铝复合板,并整体张拉膜结构^[8]。而幕墙系统更是包括聚碳酸酯板屋面、铝镁锰合金板与蜂窝铝板屋面、幻彩铝塑板、吊顶膜结构、肌理板、红色铝塑板、玻璃幕墙,以及玻璃栏板等。运用BIM等数字化技术,对工程中的钢结构、屋面系统、膜结构吊顶系统、立面幕墙系统、预制清水看台板系统都进行了多专业统一管理。

1 工程概况

上海浦东足球场项目位于上海浦东新区张家浜楔形绿地,锦绣东路以南,金滇路以东,规划金葵路以北,规划金湘路以西。地上3层,地下1层,其中地上建筑面积为64186m²,地下建筑面积为75118m²。本工程相对标高

±0.000,绝对标高+8.000,自然地面相对标高约-3.700m。场外交通道路主要为北侧锦绣东路及西侧金滇路。南侧和东侧均为规划道路,尚未施工。场内交通道路采取“环向临时便道”加“十字贯通道路”布置,宽度6~9m。划分通行道路、规划道路,和临时便道来组织交通。

1.1 建筑设计

采用“一主两副”的球场设计。主球场南北向布置,项目用地面积约100842m²,总建筑面积139304m²,地下一层,地下部分建筑面积约7.5万m²、地上三层,局部四层,地上部分建筑面积约6.4万m²,初始设计固定座席数为33765个,屋面最高点38.30m。西侧沿足球场东西中线平行对称布置两片室外训练场。后由于电子竞技赛事座位改扩建至5万个。浦东足球场,兼顾足球比赛与电子竞技体育现场直播的双重需求,完成了设备安装与装饰工程。其采用的斜拉索与轮辐式主屋盖的轻质高强的受力体系,完美实现了大跨空间。清水混凝土、钢结构、外立面装饰工程,与屋盖的拉索结构体系搭接精准。

尤其,中置压环轮辐式张拉结构体系,在国际尚属首例。其施工难度远大于常规轮辐式张拉结构。轮辐式张拉结构是一种柔性结构,其内力和位形有着密切的关系。内力的变化将牵动位形的变化,同样位形的变化也会带来内

力的变化,这决定了屋盖钢结构深化、加工、现场安装的过程是一体化的过程。

表1 浦东足球场建筑设计参数

建筑层数	标高(m)	层高(m)	部位及用途	建筑面积(m ²)
地下一层	-6.4	6.4	赛事用房&车库	75118
地下一层夹层	-3.2	3.2	非机动车车库	1881
一层	±0.0	5.5	公共服务设施	23585
二层	5.5	3.6	公共服务设施&VIP用房	13490
二层夹层	9.1	3.6	公共服务设施&VIP用房	8177
媒体夹层	12.7	3.0	媒体用房及设备机房	4406
屋面层	36.268		屋面顶	



图1 浦东足球场的建筑外立面

1.2 结构设计

拟建的足球场地下室结构平面尺寸约为331.8×272.0m。钢结构屋盖外轮廓尺寸约为211.0×173.4m。地上足球场主体结构采用钢框架+屈曲约束支撑(BRB)体系(图2.b)。钢结构屋盖采用轮辐式张拉体系(图2.c)。

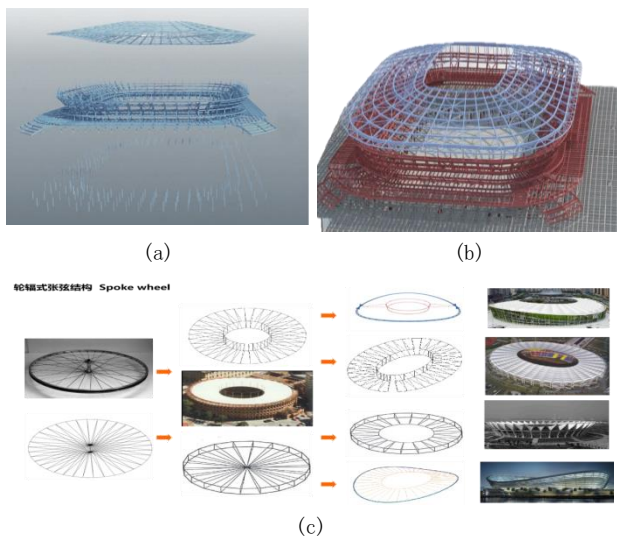


图2 (a) 屋盖钢结构、地上钢结构,与地下室钢柱;(b) 浦东足球场主赛场采用的钢框架+屈曲约束支撑(BRB)体系的主结构图;(c) 轮辐式张弦结构

浦东足球场项目基础采用桩基+承台+防水板的形式。地下室结构采用钢筋混凝土框架-抗震墙体系,考虑到地下室周边道路标高为-3.500m,比赛场地场芯部位标高为-6.350m,嵌固端取为基础顶。

2 关键技术

2.1 基坑跳仓施工

基坑面积约87052m²,周长约1190m,地下室普遍区域开挖深度约4.75m、西侧训练场挖深6.75m。基坑面积大且保证无缝施工,用跳仓法结合流水施工大作业面。地上钢结构体量大,导致整个施工工期十分紧迫。地下室结构根据挖土顺序进行分区分块流水施工,先开挖场芯区域土方,及时施工底板;再由东南角向西、北开挖足球场看台区域土方;最后由东南角向西、北两侧开挖剩余盆边土方。地下室区域基础采用桩基承台+防水板的形式,承台之间设置承台联系梁。场芯区域基础防水板厚度350/500mm,其他区域防水板厚度500/550mm。承台最大厚度1600mm,开挖深度:场芯及裙房区域为4.5m;南侧降板区域5.5m;西侧雨水回收机房6.0m;西侧训练场区域6.5m。

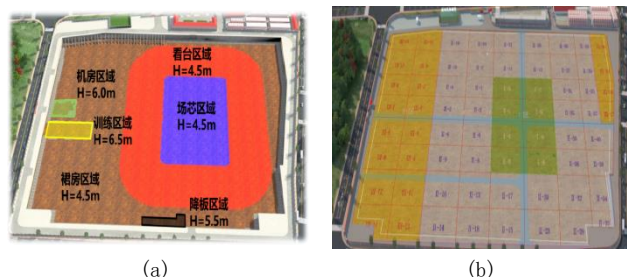


图5 (a) 主赛场基坑示意图;(b) 主赛场桩基平面图

大底板采用分区分块:分为场芯区域、看台区域,和普遍区域。场芯区域分8个分块;看台区域分40个分块;普遍区域分20个分块。地下室侧墙分块随顶板分块,同步浇筑。

2.2 地下室结构

地下室属于超长、薄底板混凝土结构。拟建的足球场地下室结构平面尺寸约为331.8m×272.0m。地下室结构部分主要为钢筋混凝土结构及局部劲性柱,劲性钢柱共295根,主要分布于看台区域,桩结构平面尺寸约为331.8×272.0m,地下室底板、承台、承台连梁、地下室外墙及其相连柱等级为C35,混凝土结构水平构件(梁、板、组合楼盖、预制混凝土看台板)等级C40。地下室结构施工阶段计划布置9台塔吊(2台7030+7台6513)。

水泥应采用硅酸盐水泥,普通硅酸盐水泥、矿渣水泥,不应采用硫铝酸盐水泥,铁铝酸盐水泥,高铝水泥,早强水泥,快硬水泥,砂的粒径应在5mm以下,细度模数 μ_f 控制在2.3~3.0的河砂(中砂),不得采用细砂、特细砂,砂的含泥量小于3%,砂率控制在35%~45%,粗骨料含泥量小于1%。粉煤灰掺量不应大于15%水泥用量,矿粉掺量

不得超过水泥用量 20%。水胶比控制在 0.35~0.50。商品混凝土生产企业必须控制混凝土坍落度,保证现场浇筑时的坍落度小于 15cm。掺入膨胀剂,补偿收缩混凝土每立方的胶凝材料用量应 $\geq 300\text{kg}$,填充用膨胀剂混凝土每立方的胶凝材料用量应 $\geq 350\text{kg}$,用于有抗渗要求的收缩补偿混凝土的每立方米水泥用量应 $\geq 320\text{kg}$,当掺入掺合料时,其水泥用量应 $\geq 280\text{kg}$ 。具体混凝土材料使用如下表所示。

表 2 地下室混凝土选用表.

序号	类型	等级	备注
1	基础垫层	C20	150mm 厚
2	地下室底板、承台、承台连梁、地下室外墙及相连柱	C35	抗渗等级 P6
3	地下室外墙以外的墙、柱	C40	-
4	混凝土结构水平构件(梁、板、组合楼盖、预制混凝土看台板)	C40	地下室地面与顶板抗渗等级 P6
5	构造柱、拉结圈梁等后浇非主体混凝土构件	C25	-

采用 5~25mm 连续粒级碎石,质量指标按《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》(JGJ52)的要求进行验收。加抗裂纤维外加剂,确保抗拉、抗弯,和抗折性能;底板、侧墙、顶板分别施做试块,按照“标养+同条件”原则养护。

表 3 地下室混凝土配合比表.

部位	强度等级	坍落度	水	水泥	黄砂	5~25 碎石	矿粉	粉煤灰	外加剂
1	C35 P6	140 土 30mm	155	213	800	1067	62	80	3.17
2	C35 P6	140 土 30mm	155	228	806	1068	52	70	3.17
3	C40 P6	140 土 30mm	155	253	744	1066	57	73	3.83

注:部位 1:地下室基础底板;部位 2:地下室外墙;部位 3:混凝土水平构件。

高分子防水卷材防水层施工完成后设置 80~100mm 厚砖墙进行保护。地下室外墙拆模后,待混凝土强度上到设计值 80%后,进行外墙防水与回填工作。混凝土分层浇筑,分层厚度不超过 500。对于部分落差大的外墙采取溜槽、串桶及于墙中开设浇灌孔等措施以防止混凝土离析。在墙体高度的水平中线部位上下 500mm 范围内,水平筋的间距不宜大于 100mm,水平筋放置在墙体竖向筋的外侧。底板混凝土一定要二次振捣,养护时间不小于 14 天。底板采用二次压光技术,在混凝土浇筑完成 4h 后进行二次压光技术,有效消除表面早期塑性裂缝。

保温层采用充气塑料薄膜+土工布,在充气塑料薄膜、土工布覆盖的综合条件下,定期洒水,保温保湿,可充分发挥混凝土徐变特性,降低温度应力,减少混凝土降温梯

度,控制有害裂缝出现。地下室底板与墙体交接处做法,止水钢板向内;底板混凝土施工缝位置做法,止水钢板上翘;施工缝处设置竖向钢筋网片,底部向内设置钢筋网片,以达到混凝土浆液收拢效果。在已硬化的混凝土表面上(浇筑完成至少 24 小时后),用錾子清除水泥薄膜和松动的石子以及软弱的混凝土层,并加以凿毛。施工缝混凝土浇筑前一天用水冲洗干净并充分湿润,并在施工缝处铺一层与混凝土内成分相同的水泥砂浆。从施工缝处开始浇筑时,应避免直接靠近缝边下料。机械振捣前宜向施工缝处逐渐推进,并距 800~1000mm 处停止振捣,但应加强对施工缝接缝的捣实工作。

混凝土采用“一个坡度、分层浇筑、循序推进、一次到顶”的浇灌工艺,分层厚度不超过 500mm。对于部分落差大的外墙采取溜槽、串桶及于墙中开设浇灌孔等措施以防止混凝土离析。每层浇筑间隔时间不得超出前一层混凝土的初凝时间,在浇筑接茬处应振捣到位。临仓分块浇筑时间 7~14 天。

2.3 屋盖钢结构

地上足球场主体结构采用钢框架+屈曲约束支撑(BRB)体系。钢结构屋盖外轮廓尺寸约为 211.0m×173.4m。屋盖钢结构和看台结构根据看台的形式,立面高度在 24.5 到 26.9m 间变化,高差为 2.4m。钢结构屋盖采用轮辐式张拉体系。将轮辐式结构常规放置在外圈柱顶的压力环向内移动,形成中压环。既适应了专业足球场矩形外轮廓的建筑要求,又通过中置近似椭圆形的压力环满足了结构优化的要求,为索承网格结构增添了活力。依据力流的传递途径,分为承力主结构、悬挑结构和圈梁支撑次构件三大部分。

屋盖钢结构主要由径向梁、立柱、压环梁、圈梁,以及 V 柱组成(图 6a)。屋盖钢结构平面长轴 211m,短轴 173m,看台罩棚短轴向悬挑长度为 50.0m,长轴向悬挑长度为 48.3m;索杆系由径向索、环向索、V 撑构成,其中径向索为一段直线布置,共有 46 根;环索成空间曲线,45 度角处标高最高,平面投影成环形。通过在径向索和环索中施加预应力,平衡上部网格的重量。

2.3.1 结构

基于零状态位形,进行施工过程的初步分析,并与设计一次成型状态对比,优化施工总体步骤,验证总体施工思路的合理性。根据规范要求的拉索制作长度误差和索力控制标准,进行误差影响分析,并结合钢构制作和安装工艺,确定合理的索端节点安装偏差控制标准,以保证定长拉索张拉锚固就位后索力符合设计要求。根据施工流程,进行施工全过程的精细化分析,包括:钢构拼装、环索提升、径向索张拉、屋面安装、胎架卸载等,提供详尽的力和位形参数,指导现场施工,为监测提供理论值。

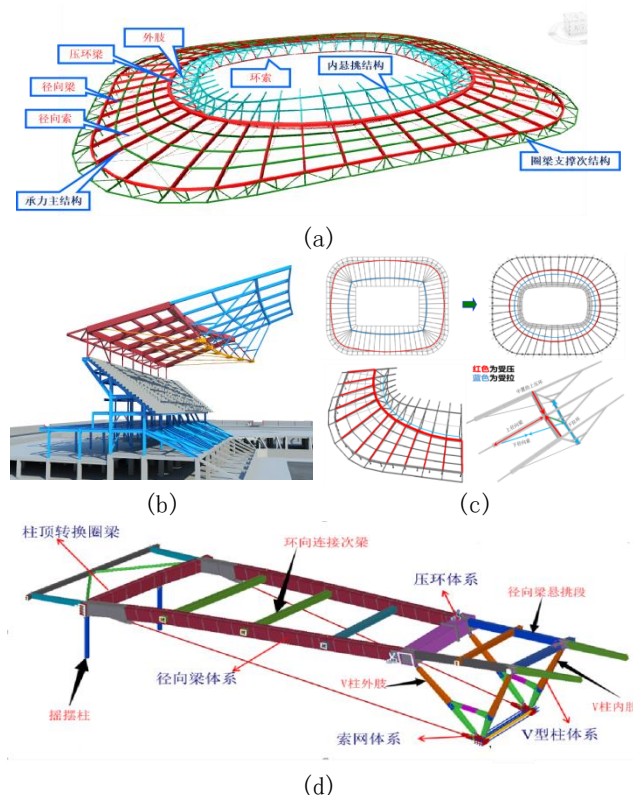


图6 (a) 钢屋盖构件数字化模型图; (b) 地上钢结构、看台板与钢屋盖的纵向数字化模型^[7]; (c) 压环梁与内悬挑索的拉压受力示意图^[7]; (d) 圈梁、径向梁、压环体系、索网体系、V型柱协同工作体系示意图

2.3.2 特殊材料

除了白色铝合金的外墙的特殊材料外,钢屋盖体系中的诸多构件均采用了特殊材料。径向索与环索之间通过索夹连接,索夹总共46套;铸钢索夹按宽度分三类:S号,宽度400mm;M号,宽度470mm;L号,宽度640mm。索夹上下夹板共计46套,分为大中小三种:盖板每套8件共计368件尺寸相同;中间板46块,分为两种板厚50mm(26块)板厚40mm(20块);贴板92块,分为两种板厚50mm(52块)板厚35mm(40块)。V撑节点共46套,含V撑底板46块(板厚50mm)、V撑中间板46块(板厚36mm)、V撑贴板92块(板厚12mm)、V撑挡块92块(尺寸70mm*50mm*40mm)。径向索和环向索均采用全封闭钢绞线索;拉索不设调节量,索的长度误差不超过0.01%;其中环索由8根拉索并列构成,共16套。环向索材质采用优质回火钢42CrMo4+QT;索头表面热浸锌(ISO 1461)外螺纹热浸锌处理、内螺纹光面处理;内螺纹临时防腐措施保护;索头浇注:树脂(WIRELOCK)索头浇注标准:DIN EN 13411-4。索头为热铸锚叉耳式连接件,材料G18NiMoCr3-6, Rp0.2≥630MPa。径向索一端部与径向主梁通过节点板的销轴连接。本工程在看台结构顶部(非

BRB处摇摆柱底部)设置球铰支座,球铰支座由厂商根据受力参数深化供应成品支座,本工程共使用48处球铰支座。BRB支撑共12组(24根),共24根立柱与BRB支撑相连。BRB支撑顶部、底部两端设置关节轴承。甚至详细列出了每一条焊缝的质量要求等级与焊接方法。本工程在摇摆柱两端设置关节轴承节点。详见下表。

表4 钢屋盖体系中所用的特殊材料

序号	类型	位置	数量
1	球铰支座	摇摆柱底部	48个
2	BRB支座	底端摇摆柱,顶端径向梁	12组(24根)
3	关节轴承	摇摆柱两端	96套
		BRB两端	48套
		V撑外肢两侧	92套
		V撑内肢两侧	92套
4	环向索	公共服务设施&VIP用房	共16套
5	径向索	公共服务设施&VIP用房	共46根
6	索夹铸钢件	媒体用房及设备机房	46套
7	钢棒	屋面顶	72根

2.4 幕墙系统

幕墙系统包括外立面复合板单元系统(面积约11000 m²)、肌理系统(面积约2148 m²)、玻璃栏杆系统(面积约2890 m²)及玻璃系统(面积约2346 m²)。其中铝复合板加工精度处理、双曲面单元板块的安装方法及精度控制、如何克服结构变形实现双曲面造型等技术问题均难度极大。屋面吊顶深化设计采用反吊吸音膜结构。

立面幕墙铝复合板采用先进数控设备加工从开料到拆边一次成形,外立面幕墙采用单元组合模块化、标准化、工厂化、数据化等先进的理念加工,并利用BIM大数据合模,建立施工模型,现场实测坐标,克服结构变形,并采用单元组合一体化方式安装板块,且使用登高车取代传统脚手架作业。利用先进的BIM手段,实测各个工序的实际数据导入设计模型进行模拟对比,根据对比数据调整龙骨及连接件,并建立施工模型,实现参数化、工业化、现场模块化拼装的先进理念,通过模拟手段,调节施工误差,满足安装精度。

2.5 机电安装

机电采用虹吸雨水安装技术和真空排水系统。训练场看台屋面设置60kW的光伏系统,其提供的电量并网接入低压配电系统,可实现再生能源光伏发电和一氧化碳监控。体育场弱电工程系统较多,其中包括:扩声系统、BA系统、CATV系统、程控数字交换系统、广播系统、闭路电视监控系统、综合布线系统,卫星电视转播系统、汽车库电脑收费系统等。体育馆内扩声系统同时适用于语言和音乐,传播范围较大,对声场的不均匀性和失真率要求很高。同时电子记分牌是体育场所特有的工艺设备,本项目

南北各设一块 14.5m*8.5m 的 P16 规格 LED 显示屏。

3 结论

浦东足球场,探索了数字化设备和技术在高难度工程中的落地应用,提高了施工质量和服务水准。在高超的施工技术和数字化建造能力的支持下,践行了“人民城市人民建,人民城市为人民”的服务理念。以超高的性价比(18.46 亿),简约大气的外观,轻盈合理的结构,完美实现了全新的建筑设计理念;以 3 年不到的总工期,高效且低耗能地建造了一座现代化多功能的下沉式足球场。

浦东足球场,敞开胸怀,面向大海,宛如扬子江边一只经典传世的白瓷碗,正舀起一场场足球与电子竞技的饕餮盛宴。

[参考文献]

- [1]徐晓明,张士昌,高峰等.苏州奥体中心体育场屋盖结构设计[J].建筑结构,2019,49(3):1709-1712.
- [2]王剑峰.软膜天花与格栅组合吊顶施工上海浦东足球场屋盖钢结构安装施工工艺研究[J].建筑施工,2021,43(9):1701-1704.

- [3]王群,杨清,伍彩单.上海浦东足球场金属屋面施工工艺研究[J].建筑施工,2021,43(9):1705-1708.

- [4]杨清,陈文俊,王维刚.上海浦东足球场屋盖吊顶膜的深化与施工工艺研究[J].建筑施工,2021,43(9):1713-1715.

- [5]中国建筑科学研究院,中国建筑标准设计研究院.建筑幕墙,GB/TZ1086-2007[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.

- [6]钱晓村,卢俊,柯敦华.上海浦东足球场钢结构深化创新应用[J].建筑施工,2021,43(9):1709-1712.

- [7]张胜杰.上海浦东足球场屋盖钢结构安装施工工艺研究[J].建筑施工,2021,43(9):1701-1704.

- [8]曾旭东,王大川,陈辉.RHINOCEROS&RASSHOPPER 参数化建模[M].武汉:华中科技大学,2011.

作者简介:张弛(1985.6—),毕业院校:加拿大拉瓦尔大学博士,清华大学助理研究员,博士后,所学专业:土木工程,就任单位:上海建工二建集团,职务:技术主管,职称:高级工程师。