

# 浅析体育场馆类结构的设计过程与方法

熊天齐/上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041

## 1 体育场馆类结构设计过程

体育场馆结构形式多样, 造型各异, 结构设计遇到的问题往往是多方面的。目前体育场馆结构多采用下部混凝土框架或混凝土框架-剪力墙体系, 上部采用大跨钢屋盖或悬挑罩棚体系(图1, 2)。体育场馆结构的设计一般包括以下过程: 结构的选型与布置→设定相关设计参数与设计控制指标→结构分析→杆件截面的选择与强度校核→反复计算分析与优化设计→节点设计。结构设计的“好”、“坏”主要取决于结构选型、结构布置以及结构概念设计。

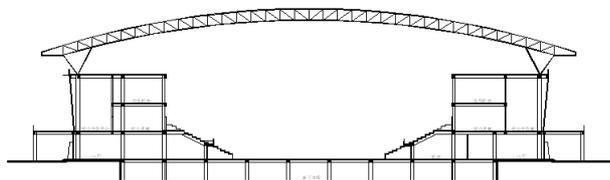


图1 混凝土框架看台+大跨钢屋盖体育馆剖面图

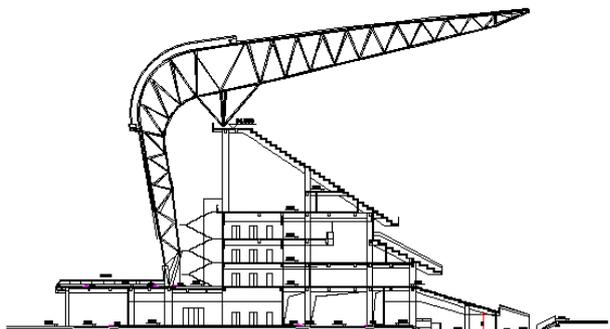


图2 混凝土框架-剪力墙看台+悬挑罩棚体育场剖面图

结构概念设计一般指不经过数值计算, 从整体的角度来确定建筑结构的总体布置以及保证结构具有良好抗震性能的一种方法。概念设计包含广泛的内容, 涉及到体育场馆结构, 如选择对抗震抗风有利的结构方案和布置、结构整体是增加刚度还是减小刚度、释放温度应力还是硬抗温度应力、尽可能多地使构件处于轴向受力状态而充分发挥材料强度、尽可能多地使构件处于受拉状态而避免稳定性问题、结构传力路径的选择等, 都与结构概念设计息息相关。

从计算的角度讲, 体育场馆结构主要的问题有: 整体结构力学属性在软件中的模拟、整体结构传力路径的确定、边界条件属性的模拟、温度作用与风荷载以及地震作用的考虑、构件计算长度的确定、整体结构稳定分析以及复杂节点应力分析等<sup>[1]</sup>。

体育场馆结构的计算过程可以分为计算模型的

建立、模型的分析、结构构件的设计三个步骤。模型的建立为前处理部分, 主要是从几何和力学属性上模拟结构及其承受荷载的过程, 包括模型几何的建立、定义约束、定义荷载以及定义边界条件等。结构在计算模型建立之后, 需要定义分析工况、荷载组合、检查模型, 然后进行模型的分析。分析结果将提供周期、振型、位移、构件内力、支座反力等信息。结构构件的设计为后处理部分, 主要是与规范相结合的构件截面验算, 包括混凝土构件的配筋设计以及钢结构的应力计算与控制, 这个步骤中构件的计算长度问题非常重要, 需要有足够的重视。

## 2 软件配合应用

体育场馆结构的分析需要采用三维空间有限元分析软件, 混凝土看台的设计会有“层”的概念, 但上部钢结构部分往往不具备“层”的概念, 软件的选用应根据结构的力学特性有所选择。目前市面上的大型商业软件很多, 且各具特色, 设计人员可以根据自己的习惯选择。但无论采用哪种软件, 一定要能够比较真实地模拟结构的力学性能, 能够建立合理、正确的结构力学模型。因此对设计者而言, 了解软件中材料的属性与各种单元的力学属性是非常重要的。笔者在几个体育场馆的设计过程中采用的设计软件情况如表1所示。

体育场馆设计常采用的软件及计算内容 表1

软件名称	计算内容
ETABS	单独混凝土结构的计算分析
3D3S	钢结构几何建模、加载、初步计算、生成SAP2000模型
SAP2000	单独钢结构及总装结构的计算分析
MIDAS	单独钢结构、单独混凝土结构、总装结构计算分析
ABAQUS	节点承载力分析、风洞试验数据分析、钢结构非线性极限承载力分析
SolidWorks	复杂节点实体建模

对于复杂、曲面、异形的大型体育场馆屋盖钢结构, 节点坐标的定位、构件之间相互空间关系的确定往往需要耗费较大的工作量。在CAD平台绘制三维空间线条模型, 往往难以保证线段的节点重合, 绘制过程中看似重合的节点可能在空间存在距离。在SAP2000等软件中通过设置小于一定距离的节点合并

功能可以强制合并大多未能重合的节点。对于大型复杂的体育场馆模型,借助 3D3S 的前处理功能,通过查询标注编号的不同节点之间的空间距离可以比较方便地建立几何模型。利用 Rhino 软件或者在 BIM 团队的支持配合下导出 CAD 模型,将空间曲面精确地转变为结构模型,并与绘图软件结合,使结构模型和施工图数据与建筑曲面形状完全一致,可以给结构设计带来较大的便利。

### 3 控制指标

#### 3.1 混凝土结构控制指标

位移、轴压比、配筋率、配箍率、剪压比等各项指标应根据结构类型、抗震等级等按相关规范、规程控制。

#### 3.2 钢结构控制指标

变形指标:对于桁架挠度控制为  $L/400$ ( $L$  为桁架跨度);对于网架、立体桁架屋盖结构控制为  $L/250$ ( $L$  为屋盖短向跨度);对于悬挑罩棚前端挠度控制为  $L/150$ ( $L$  为罩棚悬挑长度)<sup>[2]</sup>。

动力特性指标:钢屋盖与悬挑罩棚竖向自振频率  $\geq 1.0\text{Hz}$ 。

构件应力控制指标:主要受力构件最大应力不大于  $0.85f$ ( $f$  为钢材设计强度)。

稳定指标:结构线弹性整体稳定屈曲荷载系数  $K \geq 10$ ;结构非线性整体稳定屈曲荷载系数  $K \geq 4.2$ <sup>[2]</sup>。

#### 3.3 抗震性能化指标

根据体育场馆使用功能以及重要性程度,应选择合理的抗震性能目标。笔者在几个较重要的体育场馆设计中采用如下抗震性能化指标:上部钢结构及其支承构件承载力和下部混凝土结构竖向构件承载力满足中震弹性,其他构件满足小震设计。

#### 3.4 结构整体指标

体育场馆类结构由于一般为空旷、开口结构,且往往会产生较多的局部振动,对于周期比是否控制的问题,不同的设计单位有不同的理解。对于单独混凝土模型与总装模型,建议控制扭转主振型与第一平动主振型的周期比小于 0.9,满足规范要求。

### 4 温度作用在计算中的考虑

《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2011)(征求意见稿)(简称荷载规范)已增加温度作用的相关规定,温度作用即结构或结构构件在规定时段内由于温度场的变化所引起的作用,为可变荷载,在荷载组合中分项系数取 1.4,组合值系数取 0.6。

考虑温度作用的混凝土结构分析可以考虑结构因刚度退化以及混凝土材料的徐变、收缩作用等而对温度作用进行折减。笔者在进行体育场馆的设计过程

中,考虑温度荷载与地震荷载进行组合时,温度荷载组合值系数取 0.3。

大型体育场馆结构往往为超长结构,温度作用效应不可忽视。通过设置适宜的后浇带、采用低水化热的普通硅酸盐水泥和级配良好的碎石骨料配制混凝土、低温合拢、加强混凝土养护、采用高效减水剂降低水泥用量、配置适当的构造钢筋等措施都可以有效地减小施工阶段温度应力以及混凝土收缩的影响。

体育场馆结构中采用滑动支座、弹性支座等方案均可有效地释放处于工作状态的体育场馆结构温度应力。设计大师傅学怡在几个大型体育场馆的温度作用处理中,采用基础面弹性支撑的做法,考虑桩基的水平刚度,结构整体的温度应力有一定的释放,值得在实际工程中借鉴。

### 5 风荷载作用在计算中的考虑

体育场馆结构由于跨度大、立面与屋面样式复杂且造型多变,且钢结构部分往往具备自重轻、强度高的特点,大多为风荷载敏感结构。此类结构风荷载的体型系数确定往往会具备一定的难度。

对于常规体育馆屋盖,一般可以按照荷载规范对风荷载体型系数的规定取值。对于悬挑罩棚体育场结构,根据工程设计经验,结构初步计算风荷载体型系数可按图3所示取值。



图3 风荷载体型系数取值

对于造型复杂、规范中未明确给出体型系数和风振系数的取值计算方法的结构,需要通过风洞试验确定建筑表面的实际风压分布情况与结构风振响应,为确定主体钢结构的风荷载提供设计依据。对于体型系数的研究,采用CFD与风洞模型试验相结合,可以得到较为准确的结果。需要提醒的是,对于屋面局部边角位置,风荷载体型系数往往会很大,设计中需要有足够的重视。

### 6 地震作用在计算中的考虑

多遇地震作用时,计算可根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(简称抗规)和安评报告的要求进行包络设计,设防地震和罕遇地震可按抗规的规定进行设计。同时体育场馆结构须考虑竖向地震作用的计算,对于体型复杂或跨度较大的结构,宜进行多维地震作用下的效应分析。体育场馆结构阻尼比的取值可按下列情况取值:

- $\xi=0.02$  控制上部钢结构（钢结构单体模型）  
 $\xi=0.05$  控制下部混凝土结构（混凝土单体模型）  
 $\xi=0.035$  控制下部混凝土结构（总装模型）

## 7 模型总装分析的重要性

体育场馆类结构一般都由上部大跨空间钢结构支承于下部钢筋混凝土结构构成。上下部结构是一个密不可分的整体。上部结构对下部结构既有作用又有刚度约束，下部结构对上部结构既有支承又有效应放大。本文提到的总装分析设计方法是将上部大跨空间结构与下部混凝土结构作为一个整体结构进行分析。

传统的大跨空间结构上部钢结构和下部混凝土分开单独设计的方法存在安全隐患，既不能反映上部结构刚度对整体结构的贡献，也不能反映下部结构有限刚度对上部结构的效应放大。模型总装分析能够得到上下部结构在重力、风、地震、温度作用下较为合理可靠的效应，尤其能够揭示上部钢结构与下部混凝土结构连接界面结构构件的不利受力状态。

总装分析的必要性：1)温度作用下，上部钢结构、下部混凝土结构以各自平面内抗侧力刚心为不动点收缩(负温)或膨胀(正温)，由于上部钢结构与下部混凝土结构在温度作用不动点的位置不同，导致温度作用下，钢、混凝土结构及其连接界面构件将产生局部应力；2)单独钢结构分析中，其支座按理想不动铰或固定端处理，但实际结构中连接界面下部混凝土结构刚度有限，且混凝土结构收缩、徐变带来的长期刚度的退化对上部钢结构的影响尤为重要；单独混凝土结构分析中，仅计算上部钢结构质量而未计入其刚度，难以考虑上部钢结构对下部混凝土结构的约束作用，不能真实反映结构的整体工作性能；3)地震作用下，由于上部钢结构高位、弹性支承于下部混凝土结构带来地震作用的放大，同时对下部混凝土结构的约束作用的影响也必须通过总装分析才能反映。

总装分析的目的如下：1)求解钢、混凝土连接界面各构件在各种工况组合下的内力，与单独钢结构以及单独混凝土结构分析结果对比，确保连接界面各构件的承载力满足规范要求，确保整体结构安全；2)揭示混凝土结构对钢结构的弹性支承以及混凝土结构收缩、徐变带来的长期刚度退化对上部钢结构的影响，校核上部钢结构，确保整体结构安全；3)揭示上部钢结构的质量和刚度对下部混凝土结构的影响，复核下部混凝土结构，同时揭示上部钢结构高位、弹性支承于下部混凝土单体带来的地震作用放大等不利效应<sup>[3,4]</sup>。

文[3]通过济南奥体中心体育场的工程实例揭示体育场馆结构单体分析的局限性与总装分析的必要

性，并通过振动台试验论证总装分析结果的正确性和重要性，值得体育场馆类结构设计借鉴。

## 8 包络设计

包络设计法就是针对实际工程中可能出现的情况分别计算，按不利值进行设计。“可能出现”的情况需要根据结构的实际构造、受力特性以及相关规范进行必要的分析和判断。可以对整体结构进行包络，也可以对结构的重要区域、重要部位，甚至是局部的重要节点等进行包络设计。

在大型复杂体育场馆的设计过程中，合理使用包络设计方法，对解决工程设计中的疑难问题或者具备一些不确定性的问题大有益处。体育场馆结构中经常可能涉及到的、且需要进行包络的情况如下：1)管桁架设计中腹杆与弦杆固接和铰接双控包络设计，特别当腹杆节间长度与截面高度较小时，不可忽略节点刚度的影响；2)上部钢结构与混凝土部分的连接界面刚接和固接双控包络设计，特别当支座通过预埋型钢与混凝土部分连接，支座的弯矩承载力须进行考虑；3)地震作用时，规范与安评报告包络双控；4)风荷载作用时，规范与风洞试验双控；5)单独模型与整体模型的包络设计。

## 9 结语

本文根据体育场馆结构的设计经验，介绍体育场馆类结构的设计过程和方法，为此类结构设计提供一些建议。同时对广大设计人员而言，随着体育场馆项目的“新、奇、特”发展趋势，越来越多的问题逐步呈现在我们面前，如高强材料的应用、防连续倒塌问题、风荷载CFD数值模拟问题、混凝土的刚度退化问题等，需要从事大跨度空间结构领域的科研、设计人员施展更多的才能。

## 参 考 文 献

- [1] 北京金土木软件技术有限公司. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社,2006.
- [2] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [3] 傅学怡, 高颖, 杨想兵. 总装分析对大跨空间结构设计的重要性[J]. 空间结构,2009,15(1):3-10.
- [4] 傅学怡, 杨想兵, 高颖, 等. 济南奥体中心体育场结构设计[J]. 空间结构,2009,15(1):11-19.

作者简介: 熊天齐, 硕士, 一级注册结构工程师, 先后就职于中建国际设计顾问有限公司、上海建筑设计研究院有限公司, 从事大型复杂钢结构、超高层结构的分析设计工作。  
Email: xiongtq@siadr.com.cn.