

编者按:随着各种新型复杂钢结构建设项目的增多,人们开始对复杂钢结构的施工技术及施工过程中表现出的诸多力学及关键技术问题愈来愈重视。一般来说,对于现代大型和大跨度复杂钢结构,施工及安装方案对结构成型后的受力状态有直接的影响。因此,设计人员不仅要重视结构的设计状态及而且也要关心结构的成型过程,确保成型后的结构满足设计要求。大跨度钢结构的成型过程是通过施工技术,如吊装、整体(或部分)滑移、整体提升(或顶升)等施工技术从一系列准结构逐渐安装形成最终结构的过程,其中可能在施工过程中结构失去平衡而倾覆、或由于结构失去稳定而倒塌、或由于局部构件和节点强度不足而破坏,也可能成型后的结构与设计状态相差甚远。因此,设计、研究和施工技术人员均要了解结构的设计状态及结构性能,正确选择结构成型及施工方法,特别对于大跨度复杂钢结构要跟踪分析结构施工过程的不同工况状态,检查安装过程中结构的安全性及安装完成后结构的可靠性。对特殊结构,还可以通过试验方法进行研究,以便更全面地了解结构各项性能,为相关工程提供借鉴。

大跨度复杂钢结构施工过程中的 若干技术问题及探讨

郭彦林 崔晓强

(清华大学 北京 100084)

摘要:大跨度钢结构施工过程表现出诸多力学及技术问题,应引起设计和施工工程师足够的重视。结合我国一些重点钢结构工程项目,对安装过程中需要解决的力学及技术问题进行分类,论述其重要性及解决办法。这些问题包括:1)吊装过程中结构及构件的稳定性计算;2)滑轮力学问题及计算;3)设置临时支撑柱对结构安全的影响;4)拆撑过程中的安全问题及计算;5)预应力张拉全过程跟踪模拟计算及方法;6)施工过程的跟踪模拟计算及方法;7)柔性结构的成型问题及计算;8)大跨度结构的整体提升设计及计算。

关键词:大跨度钢结构 施工过程 施工力学问题

KEY TECHNICAL PROBLEMS AND DISCUSSION IN CONSTRUCTION PROCESS OF LARGER SPAN STEEL STRUCTURES

Guo Yanlin Cui Xiaoqiang

(Department of Civil Engineering of Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract: It is classified and discussed that some key technical problems met in the construction process of large span steel structures. These problems are as follows: 1) stability checking of the structure and component members during the lifting process; 2) pulley-structure analysis under applied loads; 3) temporary supports influence on the structural safety; 4) safety problem due to the removal of the temporary supports; 5) tracing analytical computation and method for the pre-stress steel structure during the construction process; 6) continuous tracing computational approach in structural erection process; 7) computation and forming of flexible structures; 8) design and computation of integral hoisting of the large span structures.

Keywords: large span steel structure construction process mechanical problem in construction

0 引言

随着各种新型复杂大跨度钢结构建设项目的增多,人们对大跨度结构的施工技术及施工过程中表现出的诸多力学及技术问题愈来愈重视。从沈阳博览中心钢结构施工技术^[1]、新加坡 MEGA 会展中心大跨度钢结构施工技术^[2]、广州新体育馆结构安装过程的动态跟踪模拟计算^[3]、广州新白云国际机场

大型机库钢屋盖结构的整体提升技术及提升设计^[4]、广州新白云国际机场主航站楼钢屋盖结构的整体曲线滑移方案及计算^[5]、澳门东亚多功能体育馆的主桁架的整体提升技术及计算^[6,7]等,愈来愈多的设计和施工人员已认识到安装方案及施工计算的

第一作者:郭彦林 男 1958 年 10 月出生 教授 博导
收稿日期:2004 - 06 - 20

重要性。一般来说,对于现代大型和大跨度复杂钢结构,设计人员不仅要重视结构的最终设计状态,而且更要关心结构的成型过程。大跨度钢结构的成型过程是通过吊装或滑移或顶(提)升或其他施工技术从一系列准结构逐渐集成形成最终结构的过程,其中可能在施工过程中结构失去平衡而倾覆,或由于结构或构件失去稳定而倒塌,或由于局部构件或节点的强度不足而破坏。施工技术人员也要了解结构的设计状态,以便选择正确的施工方法和程序,有时也要经过施工计算检验安装的结束状态是否达到结构的设计状态及满足设计要求。

现代大型和大跨度复杂钢结构的施工过程表现出了诸多力学及技术问题,而且有一定的难度。笔者归纳为以下八大问题:

- 1) 吊装过程中结构及构件的稳定性计算;
- 2) 滑轮力学问题及计算;
- 3) 设置临时支承柱对结构安全的影响及分析;
- 4) 拆撑过程中的安全问题及分析;
- 5) 预应力张拉全过程跟踪模拟计算及方法;
- 6) 施工过程的跟踪模拟计算及方法;
- 7) 柔性结构的成型问题及计算;
- 8) 大跨度结构的整体提升设计及其计算。

本文结合国内一些大型钢结构工程项目,逐个阐述这些力学问题,探讨其解决问题的办法及其途径。

1 平面和空间桁架在吊装过程中的稳定问题及解决办法

以整榀平面和空间桁架为吊装单元可以大大提高工作效率,减少空中焊接拼装所带来的缺陷,降低难度。但是对于大跨度的平面和空间桁架结构,在吊装过程中要重点考虑和解决以下几个问题:如何选择吊点(包括吊点的数量和分布),如何保证吊装过程中桁架不发生平面外失稳,如何解决滑轮力学问题。

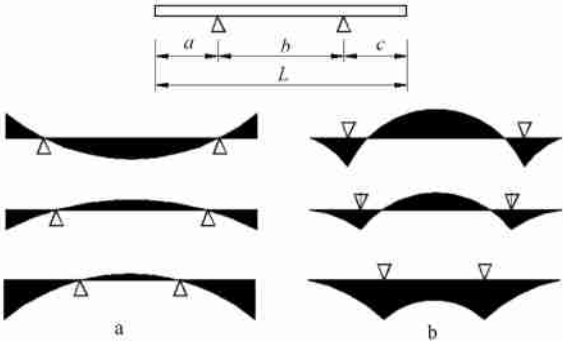
1.1 吊点的选择及原则

在决定大跨度平面和空间桁架结构的吊装方案时,吊点的选择和吊点的分布是首先要考虑的问题。如图 1 所示,一平直的简支梁结构,要吊装到设计标高与两柱头连接,其吊点的选择和吊点的分布要保证起吊后的梁在自重作用下两端的轴向相对变形等于或接近零,这样吊装到设计位置的梁就能准确就位,不会超长也不会缩短。依据这个原则,吊点的选择要满足以下两条:

- 1) 吊件两端的轴向相对变形等于或接近零;
- 2) 吊件的变形和弯矩分布比较均匀,且数值最小。

经理论推导,上述简支梁最合适的吊点位置是:

$$a = c = \frac{(\sqrt{2} - 1)L}{2}; b = (2 - \sqrt{2})L$$



a - 不同吊点位置的变形; b - 不同吊点位置的弯矩
图 1 等截面简支梁

如果吊件截面沿轴向是变化的或结构自重分布不均匀,则吊点的选择按上述原则通过有限元结构分析计算确定。一般情况下,吊绳与吊件轴线之间有一定的夹角,吊绳水平分力会对构件产生轴向压力,计算时要考虑到它们对吊件平面内外稳定性的影响。

1.2 平面外屈曲模态及分析

在制定吊装方案时,确定吊点及其分布,对于大跨度桁架结构仅凭经验是不够的,必须通过必要的分析和计算才能确定。最重要的是在起吊过程中,桁架在保证平面内稳定条件下,不发生平面外失稳。平面内稳定主要是验算桁架的单个构件不失稳或不发生强度破坏。平面外失稳是一个整体失稳破坏,与吊点的多少和分布有密切关系。吊点愈多,愈不会发生平面外失稳。图 2 给出了一片状桁架(图 2a)在一个吊点(图 2b)、两个吊点(图 2c)、三个吊点(图 2d)提升的情况下,平面外可能的失稳模式。

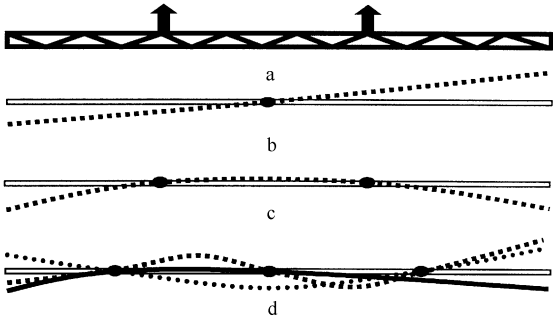


图 2 片状桁架平面外可能的失稳模式

桁架结构平面外整体稳定性计算是一个比较复杂的问题,可把桁架模拟成实腹式构件进行简化分析,也可应用 ANSYS 有限元软件计算其平面外失稳荷载,进而判断吊装方案的可行性。

2 滑轮力学问题及计算

结构或构件在吊装过程中常常要配置许多滑轮,其作用一是能调整提吊结构的内力,二是能方便结构或构件在空中调整姿态和位置,以便与相邻构件和支座准确连接。由原有结构、缆索与滑轮所形成的新结构(图 3)具有其独特性,其内力和位移的计算极其复杂,需要应用刚体力学和弹性力学联合求解。为了求解和寻找图 3a 结构在满足平衡状态的位形和内力分布,可以在桁架两端加一水平连杆,并对其进行有限元分析。结构达到平衡位形的条件是通过反复的迭代,使水平连杆的内力为零。为了论述方便,笔者把这一类问题称为滑轮力学问题。

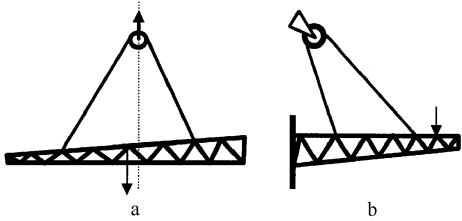


图 3 滑轮力学问题

作者建立了冷冻升温结构分析方法^[7],能够方便地分析带有滑轮结构的内力和位移问题,使滑轮力学问题得到了很好的解决。

3 设置临时支承柱对结构安全的影响及分析

设置临时支承柱几乎是所有大跨度钢结构安装过程中必然要遇到的问题,但临时支承柱的存在,改善了结构的受力性能,也改变了结构的设计受力状态,可能造成临时支承点处及附近区域的内力加大,引起安装过程中结构构件的破坏。

如图 4 所示,在有临时支承的情况下,拱脚的水平推力和竖向反力将大大降低。但在临时支承柱柱顶附近的桁架构件,其内力分布与设计状态则完全不同,必须进行验算以确保结构在增加临时支承后的安全。如果拿掉临时支承,拱脚的水平推力和竖向反力将显著提高。本文以澳门体育馆为例^[6]来说明。

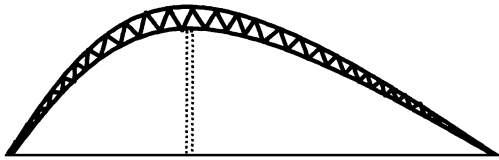


图 4 设置临时支承柱

澳门体育馆由半椭圆形屋盖、主场馆围护钢结构和通道两侧支承钢结构组成,如图 5a 所示。该场馆平面投影呈椭圆形,长约 328m,短轴约 223m。

椭圆形屋盖由主桁架拱和次桁架及联系构件组成。施工首先安装主桁架,而后安装次桁架。主桁架安装采用整体提升法,即将两榀主桁架分为左右两个吊装单元,如图 5b 所示。用提升法同时吊装左右段主桁架,在高空对接完成主桁架的安装工作。吊装计算结果显示,主桁架对接及拱脚安装完成后,拱脚支座处的水平推力较大,拱脚设计不能满足要求。于是,确定在两段主桁架中部增设临时支承柱,以降低主桁架对底板的水平推力和桁架的最大竖向挠度,并便于次桁架与主桁架的顺利拼接。表 1 给出了有无临时支承柱左段主桁架拱脚的水平推力和跨中挠度值,从中看到增设支承柱后的显著作用。

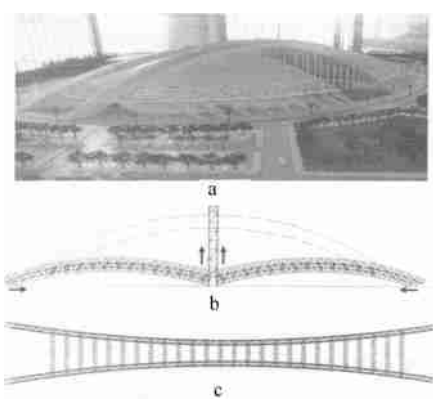


图 5 澳门体育馆

表 1 有无临时支承柱的分析结果对比

| 比较项目 | 无支承情况 | 有支承情况 |
|------------------------|---------|---------|
| 水平推力 F_x/kN | 3 110.7 | 1 377.5 |
| 最大竖向挠度 U_z/mm | 40 | 12 |

4 拆撑过程中的安全问题及计算

在结构成型过程中,必然要设置一些临时支承柱,如图 6 所示。待全部构件安装就位后,就得拆掉所有的临时支承柱。拆除临时支承柱的过程,是结构受力逐渐转移和内力重分布的过程。拿掉最后一根临时支承柱后,结构即完全进入设计状态。

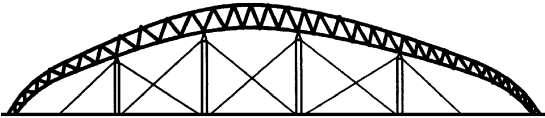


图 6 拆除临时支承柱

拆撑过程应考虑如下原则:1) 受力体系转化引起的内力变化应是缓慢的过程;2) 参与受力的各杆件应在弹性范围内进行调整并逐渐趋近设计状态,不允许结构构件出现永久变形;3) 拆撑易于控制,安全可靠。

以广州新体育馆^[3]主场馆的拆撑方案为例,其

支承柱布置如图 7 所示。当主场馆内所有主桁架、辐射桁架、刚性檩条、拉索均安装完毕并与钢环梁可靠连接,拉索处于设计张紧应力状态时,就可拆除场馆内临时钢管支承柱。临时钢管支承柱的拆除过程(拆撑过程)也是屋盖受力体系的转变过程,即从带临时钢管支承柱的受力状态逐渐转化为无支承的设计受力状态。

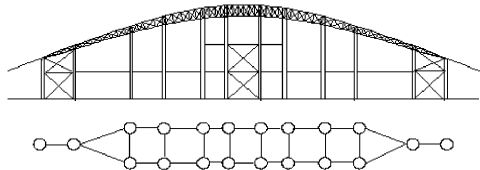


图 7 广州新体育馆主桁架支承布置

拆撑过程是屋盖结构在临时钢管支承柱处支座条件的动态下沉过程。动态计算模型除考虑吊装过程的因素外,尚需考虑以下 3 个方面:1) 吊装结束后调整临时支承柱顶部的油压千斤顶使主桁架达到设计控制标高,拆撑过程的初始条件(拆撑初始模型)应是吊装调整过程的终止条件(吊装终止模型),即模型连续化。但吊装调整过程伴随着临时支承柱逐渐受力并压缩,拆撑初始模型应计及上述影响,即应保证拆撑初始模型在各临时支承柱处的计算位移为零,同时保证临时支承柱中存在着吊装调整终止时的压力值。2) 要跟踪每一动态计算模型中支承力方向的变化(压力或拉力)。因实际临时支承柱不是拉力支座,当计算的支承力为拉力时,该支承柱应退出工作并人为地改变整个屋盖临时支承柱的支座条件重新迭代计算。3) 由于临时钢管支承柱长度较大(最长达 35m),临时支承柱自身的压缩变形影响不能忽略。当某一支承柱顶部油压千斤顶相对缩短值为 s 时,由于该支承柱卸载,压力随之减小并产生回弹,主桁架该点下沉量则小于 s 值,因此千斤顶控制下沉量大于实际下沉量。

考虑上述模型计算的 3 个主要因素,共进行了 78 次屋盖全模型的有限元内力和变形计算。计算结果显示,拆除某一支承柱时,该支承柱压力就卸给邻近的左右两个支承。因此,对于邻近的千斤顶而言载荷加大,需确定拆撑次序和每次的卸载量,以确保安全。

5 预应力张拉全过程跟踪模拟计算及方法

预应力钢结构是实现大跨度和超大跨度结构的最好形式之一。通过给结构施加预应力,可以调整结构内力幅值并改善结构内力分布,进而达到提高结构刚度的目的。预应力钢结构的设计与预应力钢

结构的施工联系十分紧密。

预应力钢结构可分为两种形式,一是完全由预应力提供结构刚度的结构形式,如索穹顶、索网结构等;另一种是预应力增加结构刚度的形式,如张弦梁结构、弦支穹顶结构等。前一种的施工过程是由机构变为结构的过程,由于结构刚度柔性,必须考虑几何非线性的影响。第二种形式属于混合结构形式,可以参照广州新体育馆的分析方法^[3]。

6 施工过程跟踪模拟计算及方法

为了保证大跨度和超大跨度结构在安装过程中安全可靠,常常需要施工过程跟踪模拟计算,以确定结构或构件满足强度、刚度及稳定性要求。

大跨度结构的施工是一个连续化的过程,在这个过程中,每一个阶段的结构或构件内力和位移都在不断地发生变化。需要对每个阶段的内力和位移进行跟踪计算,找到施工过程最危险的阶段进行准确控制,才能确保结构施工的安全。另外,由于安装过程中,结构或构件产生了位移,会影响到后续构件的加工尺寸,因此必须跟踪计算,才能采取有效措施避免或者准确更改加工尺寸。澳门综合体育馆的安装方案及安装过程控制^[6],就是依据全过程跟踪模拟计算结果确定的。

7 柔性结构的成型问题及计算

索穹顶结构属于典型的空问张拉结构体系,其成型工法及计算是这种新型结构施工过程中的主要问题。索穹顶结构由脊索、斜索、环索、撑杆及中心受拉钢环和外圈受压钢环梁等组成,如图 8d 所示。文献[8]对索穹顶结构的成型过程进行了较详尽的理论分析,通过按不同顺序和不同预应力的施加方法,使结构逐渐成型。总体上,索穹顶结构的施工不外乎两种次序和方法:

1) 首先将中央桁架或中间拉力环提升至设计位置并用临时施工塔架支承,在中间结构定位后,再由外环起逐个向内张拉斜拉索。

2) 先固定脊索、斜索与外环的连接,然后由外环起逐个向内张拉斜索,提升桅杆,最后提升内拉环。

但由于技术保密的原因,上述施工方法在国外的文献上只有简单的介绍,国内一些学者近几年也开展了这方面的研究工作,取得了一定的成果,为索穹顶在我国的应用奠定了理论基础。

8 大跨度结构的整体提升设计及计算

近年来,大跨度钢结构的施工整体提升项目愈

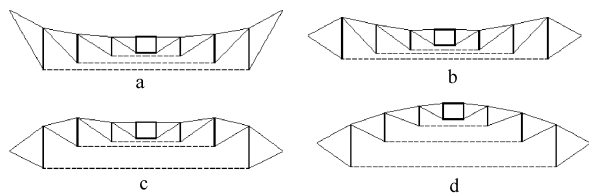


图8 索穹顶的成形过程

来愈多,如近年来完成的北京西客站巨型桁架、北京首都国际机场四机位库、上海大剧院、深圳市民中心、广州新白云国际机场10号机库^[4]、澳门多功能体育馆主桁架^[6]等。在提升过程中,应重点解决两个问题,一是被提升的结构和提升柱不应该遭受损伤和破坏;二是提升系统的设计和计算。众所周知,结构的提升状态与结构的设计状态一般不同,结构工程师应根据结构的受力特点对提升系统提出要求,并验算结构及提升柱的强度、刚度和稳定性。

根据提升柱和提升结构的安全程度,在提升过程中可以人为地改变结构提升过程的受力状态。有两种处理措施:一是根据提升柱刚度及稳定性的强弱程度,可以调整提升柱之间提升力的大小分布,把弱柱的提升力转嫁到强柱上以保证弱柱在提升过程中的安全,相应的提升结构的内力和变形也发生变化,要特别检验它的强度和稳定性。二是在一个提升柱中,可能由于两个提升力偏心不等对柱产生极为不利的影响,可以通过调整两个提升力的大小使柱达到或接近中心受压以改善柱子的受力状态,但也要检验提升结构的内力和变形。当然,也可以在柱顶设置提升平台,通过调整提升平台的悬臂长度使两侧的弯矩相等或接近相等。

整体提升过程可分为三个阶段,第一阶段是结构脱离胎架;第二阶段是结构匀速提升;第三阶段是结构落位。很显然,首末两个阶段提升力的变化较大,它直接涉及到对提升柱与结构安全的影响,因为在结构脱离胎架和落位的过程中,提升点离开胎架和结构落到设计标高的先后顺序会引起提升力的较大变化。可以把这两个阶段比喻为飞机的起飞和降落,而第二阶段可比喻为飞机的平稳飞行。

在脱离胎架阶段,为安全起见可以选择逐步小行程循环提升的原则,可以选择提升力小的点优先提升,然后再提升力大的点。不过,落位与提升过程正好相反,在落位阶段,先落提升力大的点,再落提升力小的点。

以广州新白云机场飞机维修设施工程10号机库^[4]为例来说明整体提升技术所应考虑的施工力学问题及解决方法。

10号机库整体提升施工方法的基本步骤为:首

先在地面拼装好钢屋盖的各级桁架及其内部必要的支撑体系;然后以安装在各钢柱顶部的提升支架作为支座,在其上布设穿心式千斤顶并通过钢绞线将钢屋盖整体提升;最后待钢屋盖整体提升到位时,安装钢柱和桁架之间的牛腿结构。提升布置如图9所示。在整个10号机库钢屋盖整体施工技术方案的实施过程中,存在以下技术问题:1)选择提升点、确定提升力进而布设千斤顶;2)设计用于架设千斤顶的提升支架;3)将钢柱和提升支架作为一个整体,验算其稳定性并设计必要的加固措施;4)F、B桁架提升吊点的设计;5)地锚体系的设计及验算;6)提升过程中不同步验算。

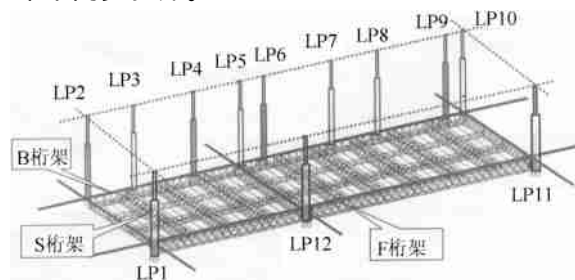


图9 提升柱布置及机库桁架

为了防止在提升过程中由于提升点不同步对桁架强度和稳定性的影响,需进行不同步验算。提升系统中设置一个标准提升点,系统动态采样其他提升点的位移值,并保证差值在 $\pm 15\text{mm}$ 以内。千斤顶只能给结构提供向上的力,即仅能提供竖向的单向约束,所以对计算结果的合理性应加以检验。

各提升点位移差的出现会使结构的受力状态发生改变,因此需要计算在可能出现位移差时结构的受力情况,以确保提升过程中桁架安全可靠。

提升点有数十个之多,有多种位移不同步的工况,需要从中选出比较危险的情况。提升点的位移差会造成构件内力变大甚至变号,通过计算桁架体系在各种位移差工况下的杆件内力,并进行稳定分析,可以保证在提升过程中,只要严格控制各提升点与标准点LP12之间的位移差不超过 $\pm 15\text{mm}$,那么结构是安全的。在实际提升过程中,由于提升点与标准点之间的位移差控制在允许范围内,桁架体系没有杆件发生局部失稳。

9 结 语

我国大跨度钢结构的建设进入了快速增长时期,不仅设计有诸多技术问题需要解决,而且施工过程中也遇到了愈来愈多的技术挑战。虽然已经成功

(下转第22页)

塔刹为雷峰塔重要部位,高度为 16.877m,塔刹中心采用无缝钢管,钢管外侧有八角基座、覆盆、相轮、圆光宝珠、宝瓶、宝盖、仰月等古建筑装饰构件,装饰构件均采用钢结构外包金。根据建筑外形要求,中心无缝钢管从下部至塔顶,其直径从 560mm 变为 120mm。

塔刹结构自重重大,构件自重达 200kN 以上,同时构件尺寸大,下部构件八角基座最大直径为 4.08m,设计难点有以下几部分:1)变截面无缝钢管的拼接连接构造;2)古建构件与无缝钢管的连接;3)塔刹与主体塔身的构造连接节点。经研究商榷,无缝钢管拼接及构件连接处核心区处采用内衬加劲套管,八角基座等构件内部加劲钢板处采用开洞等措施减轻自重,为保证塔刹中心钢管将荷载直接传至斜向立柱,有效传递上部水平风荷载,除设塔刹基座外,中心钢管与基座及覆盆之间的钢套管中的空隙用砂浆填实,斜柱在塔刹根部增设 2I20a 水平梁,以保证钢管的有效锚固,构造如图 5 所示。

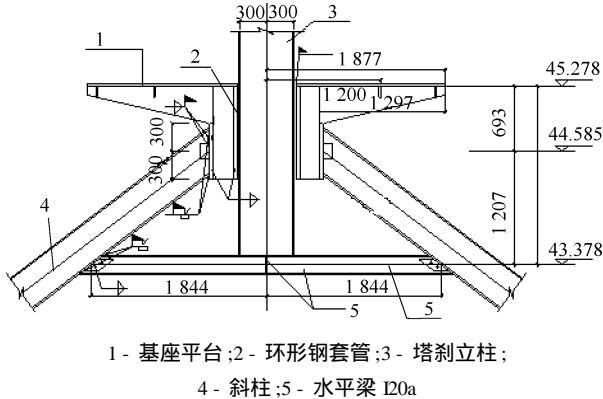


图 5 塔刹与主体塔身的构造连接节点

5.4 钢结构防火、防锈及施工

(上接第 5 页)
建成了很多大跨度钢结构项目,但在施工过程中遇到了诸多的施工力学问题并没有进行系统的研究和总结,使得大跨度钢结构施工力学理论研究滞后于工程实践。本文结合我国的一些重点的大跨度钢结构项目,对施工力学的 8 个主要方面的问题进行了探讨,总结了一些技术经验和应该注意的问题,期望能对大跨度施工力学的研究起到抛砖引玉的作用,并能指导实际工程,使大跨度钢结构的施工更加安全、高效和经济。

参考文献

1 鲍广镹,李国荣,黄建川,等.沈阳博览中心钢结构施工技术.施工

本工程耐火极限为一级,钢结构表面须经防锈及防火处理,钢结构表面经喷砂处理达到 Sa2.5 级,底层涂料为水性无机锌底漆,厚度 75μm,钢梁涂刷厚型防火涂料,耐火极限 2h,钢柱涂刷厚型防火涂料,耐火极限 3h,外包 2.5mm 厚铝板,表面为灰色氟化碳喷涂。

本工程钢构件截面尺寸大,构件形状复杂,局部钢板较厚,同时由于柱为斜柱,箱型柱箱板与内加劲板斜置,为焊缝连接带来很大困难。为保证焊接质量,减少焊接变形,避免出现焊接裂缝,达到一级焊缝的标准,施工单位采用合理焊接、矫正工艺,采用高电压、低电流、慢送丝起弧燃烧、对称焊接等措施,经超声波探伤及 X 光拍片检测后,所有焊缝均符合一级焊缝的标准。

6 结 语

经实测雷峰塔基础沉降观测及主梁变形观测均小于计算值,符合设计要求。

1)主体采用钢框架及双向井字压型钢板-混凝土组合楼盖结构,结构体系选择合理,结构抗侧性能良好,并能满足文物遗址保护的需要。

2)基础采用人工挖孔桩,桩基之间设后张法有粘结预应力混凝土环梁,这对于该类塔形框架结构及复杂地质条件是安全及合理的选择。

3)造型复杂、楼阁式塔钢结构节点构造复杂,因此选择受力明确、构造合理的节点形式是很重要的。

本工程在大跨、高层特种钢结构设计及古建文物保护等方面均作了一些探索,希望能为类似工程设计提供参考。

技术,2001(3)
2 侯兆欣,张海军,季小莲,等.新加坡 MEGA 会展中心大跨度钢结构施工技术.施工技术,2000(8)
3 陈国栋,郭彦林,等.广州市新体育馆屋盖吊装及拆模过程动态分析.建筑结构,2002(1)
4 郭彦林,邓科,等.广州新白云机场飞机维修设施工程整体提升方案及设计.工业建筑,2004,31(12):6~11
5 鲍广镹,郭彦林,等.广州新白云机场主航站楼钢结构整体曲线滑移施工技术.建筑结构学报,2002(5)
6 郭彦林,缪友武,等.澳门某体育馆钢结构屋盖主桁架整体提升方案及塔架分析.建筑结构学报,2005(1)
7 郭彦林,崔晓强.滑动索系结构的统一分析方法——冷冻升温法.工程力学,2003(8)
8 唐建民.索穹顶体系的结构理论研究:[博士学位论文].上海:同济大学,1999