

国家体育馆双向张弦结构预应力施工技术

徐瑞龙 秦杰 张然 李国立 王泽强 陈新礼

(北京市建筑工程研究院 北京 100039)

摘要: 国家体育馆屋面采用双向张弦网格结构, 其预应力施工具有一定的难度。介绍了预应力施工方案及施工前期的一些准备工作, 如施工仿真模拟计算、张拉工装的设计。简单介绍了预应力施工监测方案和张拉过程中的同步控制措施, 并结合仿真计算结果和现场监测结果, 提出了此类结构的预应力施工技术和特点。

关键词: 国家体育馆 双向张弦结构 预应力 仿真计算

国家体育馆由比赛馆和热身馆两部分组成。

两个馆的屋顶平面投影均为矩形, 其中比赛馆平面尺寸 $114\text{m} \times 144\text{m}$, 热身馆平面尺寸 $51\text{m} \times 63\text{m}$, 整个屋顶投影面积约为 23700m^2 。屋面结构为双向张弦空间网格结构, 其上弦为由正交桁架组成的空间网格结构, 下弦为相互正交的双向拉索。

下弦拉索的平面布置如图1所示, 横向拉索从⑨轴到⑳轴, 共14榀, 纵向拉索从E轴到M轴, 共8榀。结构的横向为主受力方向, 因而横向索采用双索, 纵向索采用单索, 网格平面尺寸 $8.5\text{m} \times 8.5\text{m}$ 。钢索的预张力由设计院提供, 为预应力施工完成后钢索的拉力。

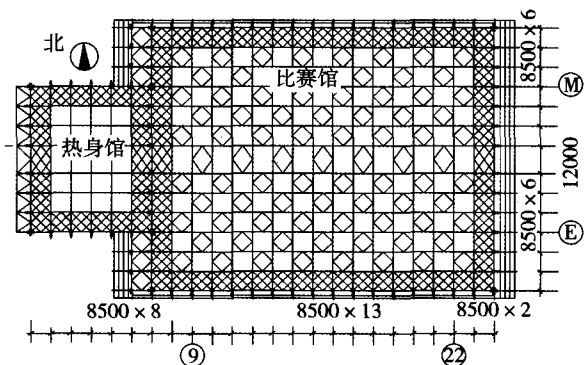


图1 结构平面布置

国家体育馆所采用的双向张弦结构是一种新型的结构形式, 其受力性能与单向张弦结构有很大不同, 空间作用明显。在预应力施工过程中, 钢索之间的张拉力会互相影响, 因而预应力施工的复杂性和难度均比单向张弦结构有所提高。

注: 《国家体育馆双向张弦结构预应力施工技术》项目获第三届欧维姆预应力技术奖三等奖。本文原载《施工技术》2007年第11期

1 张拉方案

对于单向张弦结构来说, 由于各榀拉索之间相互作用比较小, 同时张拉或者分批张拉对最终的预应力状态影响比较小。但是对于双向张弦结构来说, 由于各榀拉索之间空间作用明显, 后批张拉的钢索会对先前张拉的钢索的内力产生影响, 所以最好所有钢索同步进行张拉。在实际施工中, 受到张拉设备及其它施工条件的限制, 对所有钢索同时进行张拉较难, 一般采用分批张拉。为了保证张拉完成后的预应力状态与设计要求的预应力状态一致, 需对每一步的张拉力进行精确的模拟计算, 并在施工过程中进行严格的控制。

本工程采用对钢索分批张拉的方式。预应力施加分2级, 第1级张拉到控制应力的80%, 第2级张拉到控制应力的100%, 达到设计要求的预应力状态。

张拉过程考虑了2种方案: ①方案1 第1级张拉千斤顶由两边往中间移动, 对称张拉, 前4步每次同步张拉4根索(2根横向索, 2根纵向索), 在第4步张拉完成后, 纵向索张拉完毕, 5、6、7步分别张拉2根横向索; 第1级张拉完成后, 千斤顶移到结构中部, 然后进行第2级张拉, 第2级张拉千斤顶由中间往两边移动; ②方案2与方案1相反, 第1级张拉千斤顶由中间往两边移动, 第2级张拉千斤顶由两边往中间移动。

2 张拉过程仿真模拟计算

国家体育馆各榀钢索的张拉力互相影响, 施工过程复杂。为了保证施工质量, 需对张拉过程

进行精确的施工仿真模拟计算, 可达以下目的:

- ①验证张拉方案的可行性, 确保张拉过程安全;
- ②给出每张拉步钢索张拉力的大小, 为实际张拉力值的确定提供理论依据;
- ③给出每张拉步结构的变形及应力, 为张拉过程中的变形及应力监测提供理论依据;
- ④根据计算出来的张拉力的大小, 选择合适的张拉机具, 并设计合理的张拉工装;
- ⑤对两种张拉方案进行比较, 确定合理的张拉顺序。

根据上文所描述的张拉顺序, 对两种张拉方案用MIDAS/gen进行了模拟计算。经计算⑯轴拉索张拉力如图2所示。

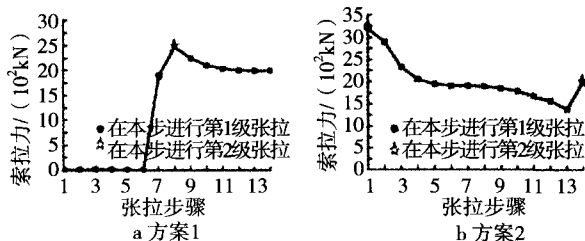


图2 ⑯轴拉索张拉力

对计算结果进行分析和总结, 可得以下结论: ①张拉完成后, 结构中部向上竖向位移177mm; ②张拉过程中, 方案1最大拉应力193MPa, 最大压应力128MPa, 方案2最大拉应力199MPa, 最大压应力128MPa, 结构应力均在弹性范围之内, 两种方案均满足安全要求; ③张拉过程中, 方案1横向双索最大张拉力为2730kN, 纵向单索最大张拉力为1850kN, 方案2横向双索最大张拉力为3200kN, 纵向单索最大张拉力为2050kN, 方案2的张拉力比方案1大得多, 对千斤顶及张拉设备的要求更高; ④根据张拉过程曲线, 由于方案2首先张拉中部钢索, 在后续的张拉步骤中先张拉的钢索的应力会受到较大的影响, 变化幅度也较大, 对索力的控制难度也会相应增加。

综合各种因素, 选择方案1作为最终张拉方案。

3 张拉工装的设计

张拉工装指预应力施工时所采用的一些张拉

机具和设备。张拉工装的设计须考虑索具的形式和索端铸钢结构的形式, 结合张拉力的大小进行设计, 其设计的合理与否直接影响预应力施工的效率和质量。国家体育馆拉索索体如图3所示。

根据索具形式和横向双索索端铸钢节点形式, 按照施工仿真计算所提供的拉索张拉力的大小, 所设计的张拉工装如图4所示。

由图4可以看出, 张拉工装主要由承力架、千斤顶和张拉杆组成。其受力原理为: 千斤顶支承在承力架上, 通过千斤顶对张拉杆施加拉力, 而张拉杆则通过1个张拉转换环(具有内螺纹和外螺纹)与拉索端部索具相连, 这样张拉杆中的拉力就可以传递到索端, 从而实现对接索的张拉。本张拉工装的设计充分考虑了索具和铸钢节点的形式, 传力过程明确, 安装和操作方便。

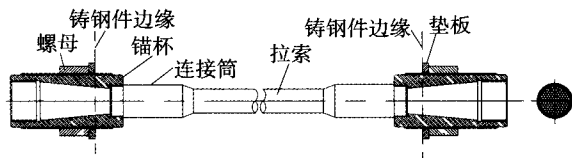


图3 索体示意

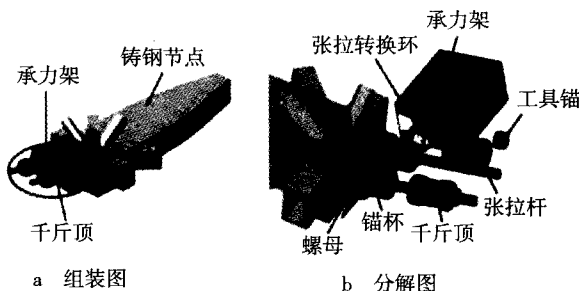


图4 张拉工装示意

4 张拉监测

4.1 施工监测目的

在未施加预应力之前, 结构不具有稳定的刚度。为使结构受力均匀, 并满足设计要求, 必须施加预应力, 此时需在张拉过程中进行施工监测。对预应力张拉过程中进行监测的目的如下:

- 1) 在未施加预应力之前, 结构刚度比较小, 因此在张拉过程中要进行施工监测, 防止某根杆件出现破坏, 甚至整体结构受到较大影响, 以保证张拉的安全进行。

2) 为保证桁架杆件应力能够在设计允许的范围之内, 并且满足整体结构的起拱要求, 不至于出现个别杆件应力过大或整体结构变形过大的情况, 必须对构件应力较大, 起拱值较大的部位进行应力监测和变形监测。

4.2 监测点布置

根据张拉施工要求, 将监测内容分为3部分: 拉索应力监测、钢结构应力监测、变形监测(竖向起拱和支座水平位移)。对钢索拉力的监测采用与油泵相连的油压传感器, 部分张拉端位置采用双控措施, 油压传感器和压力传感器共同使用, 每个张拉端都配备一个油压传感器。油压传感器具体布置如图5a所示; 对钢结构应力的监测采用振弦式应变计, 具体监测点布置如图5b所示; 对变形的监测采用全站仪, 具体变形监测点布置如图5c、d所示。

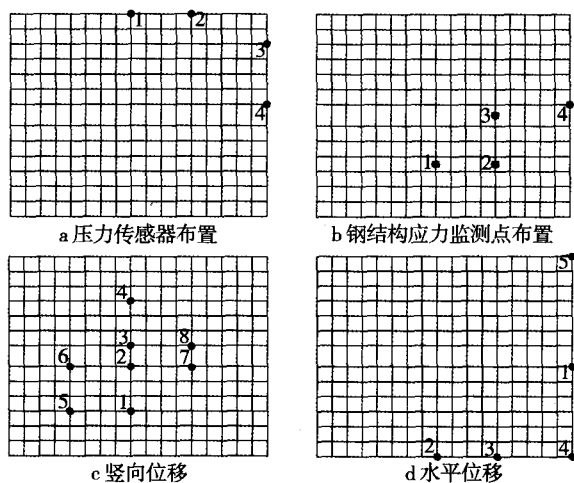


图5 各测点布置示意

在预应力施工过程中, 根据监测结果, 如果发现结构的变形、应力出现异常, 应立即停止张拉。对出现异常的原因进行分析, 对结构进行检查, 找出问题并解决后才可继续张拉。

4.3 监测结果

张拉过程进行监测, 实际油压传感器和压力传感器读数跟理论张拉力相差很小, 都控制在5%之内, 张拉完成后监测结果如图6所示。由图6可以看出:

1) 总体上钢结构实测应力值在理论计算

附近变化, 大部分实测应力值比理论计算应力值大。

2) 位移实测值在理论计算值附近变化, 实测值跟理论计算值变化都在15%以内, 满足规范 and 设计要求。

5 张拉过程的同步控制

根据张拉顺序, 每次同时张拉4根拉索(2根横向索, 2根纵向索, 共6根拉索), 共有12个千斤顶同时工作。如果千斤顶的工作不同步, 可能会造成预应力施工完成后撑杆不垂直地面或者结构受力不均匀, 因此张拉过程的同步控制是保证预应力施工质量的重要措施。控制张拉过程同步可采取以下措施:

1) 在张拉前调整索体锚杯露出螺母的长度相同, 即初始张拉位置相同。

2) 在张拉过程中, 将第1级张拉再细分为10小级, 第2级张拉再细分为4小级, 在每小级中尽量使千斤顶给油速度同步。张拉完成每小级后, 所有千斤顶停止给油, 测量索体伸长值。如果同一索体两侧的伸长值不同, 则在下一级张拉的时候, 伸长值小的一侧首先张拉出这个差值, 然后另一端再给油。如此通过每一个小级停顿调整的方法来达到整体同步的效果。

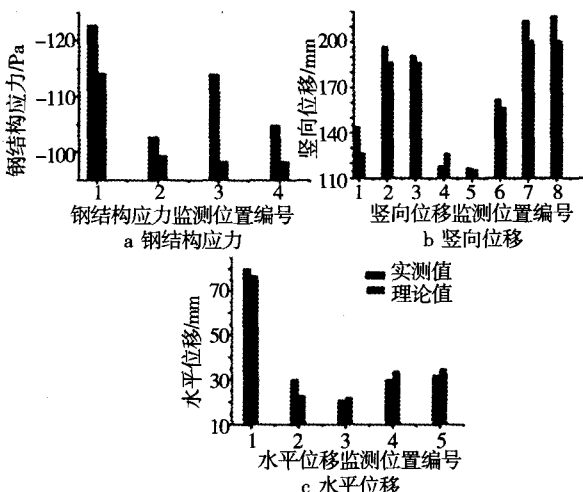


图6 张拉完成后监测结果

6 结语

1) 双向张弦结构的空问作用明显, 在预应

力施工过程中,各榀钢索的拉力相互影响,因而其施工过程与单向张弦结构相比复杂得多。

2) 在施工前期需进行大量的计算分析,并与设计院配合进行拉索节点设计和张拉工装的设计等。

3) 预应力施工方案的确定需综合考虑结构的特点、施工场地与工期等多种因素,并对多种方案进行比较,选出较优秀的方案。

4) 施工仿真模拟计算可以为施工过程提供理论依据,验证施工方案的可实施性,因而对张拉过程进行精确的模拟计算是保证预应力施工质量的重要措施。

5) 张拉工装的设计合理与否直接影响预应

力施工的效率和质量。设计张拉工装需考虑索具和节点的形式以及张拉力的大小,做到受力合理,操作方便。

6) 对施工过程中结构的变形、应力进行监测是保证结构施工安全及预应力施工质量的重要技术措施。

参考文献

- [1] 陆赐麟,尹思明,刘锡良.现代预应力钢结构[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 陈以一,傅攻义译.日本钢结构协会.钢结构技术总览—建筑篇[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [3] 余远逢,李维滨,董军等.烟台世界贸易中心张弦梁预应力拉索施工技术[J].施工技术,2007,36(3):28-30.

简讯

高峡飞彩虹 天堑变通途

采用柳工欧维姆关键技术的湖南矮寨大桥钢桁梁成功合龙

8月20日上午,湖南湘西矮寨大桥建设工地,彩旗招展,锣鼓喧天。一道雄伟瑰丽的“彩虹”飞跨峡谷两岸,天堑变通途。经过3个月的架设,矮寨大桥钢桁梁在这一天成功合龙,这标志着由中国人自主研发、在世界桥梁界极具分量的原创型科技成果——“轨索滑移法”取得成功。而实现这一方法的关键设备——由柳工集团欧维姆公司研制的悬索桥缆载吊机和运梁小车,在钢桁梁架设中大放异彩,居功至伟。

矮寨大桥是长沙至重庆高速公路吉首到茶峒段的关键控制性工程,跨越湘西德夯大峡谷,主跨1176米,桥面距地面355米,是世界上跨径最大的跨峡谷悬索桥。主桥采用钢桁加劲梁,梁高7.5米,梁宽27米,节段梁长14.5米,主梁全长1000.5米。全桥共设69个节段,标准节段重125吨,中间节段重达240吨。由于桥位地形险要,交通极为不便,使得大桥钢桁梁架设成为世界级的难题。

为攻克此难题,大桥建设者创造性地提出了“轨索滑移法”的架设方案,巧妙地利用主缆和

吊索作为轨索的支撑,通过运梁小车将钢桁梁节段平移到吊索下方,再利用缆载吊机进行吊装,由跨中向两岸架设,直至全桥贯通。要实现这一方案,对架设备的技术可行性、安全可靠要求非常高。欧维姆公司研制小组经刻苦攻关,终于研制成功国内第一台具有自主知识产权的缆载吊机以及运梁小车,用于矮寨大桥钢桁梁的架设。为确保顺利架设成功,欧维姆公司还派遣了一支精干的队伍参与架设施工。项目组成员与建设单位紧密合作,战酷暑,抢进度,解难题,除障碍,使矮寨大桥钢桁梁以平均每天10米的速度由跨中向两岸延伸,期间创造了每天拼接移运并安装一段梁的世界新纪录,仅用3个月便完成了架设任务,较常规架设方法节约工期近5个月。

矮寨大桥钢桁梁成功合龙,意味着大桥所有主要结构的完工,而“轨索滑移法”的架设方案的成功实施,则标志着我国架桥技术的重大突破,是我国由桥梁大国向桥梁强国迈进过程中的一座里程碑。

(玉进勇)