

宿迁市文体馆预应力网壳结构设计与施工

冯良慈 周友根 樊德润 栾文彬

摘要:在网壳中施加预应力,可以有效地调节各杆件及球节点内力,减小结构变形,同时可以平衡网壳在支座处产生的水平推力。本文结合工程实践,介绍了预应力筋在网壳中布置形式及相关的预应力设计及施工技术。

关键词:网壳 球节点 预应力 支座

1 工程概况

宿迁市文体馆位于宿迁市新区内,采用预应力网壳结构。其中建筑主体结构采用钢筋混凝土框架,屋盖部分采用预应力网壳结构,网壳厚为3m。该馆总建筑面积约10000m²,可容纳观众4300人。屋盖采用双曲抛物壳面,其支承点间跨度纵向为80m,横向62.5m,平面投影为椭圆形,展开面积约为6000m²,主体结构平面横向对称,纵向不对称,屋盖两端翘起高差约为3m,平面展开图见图1。

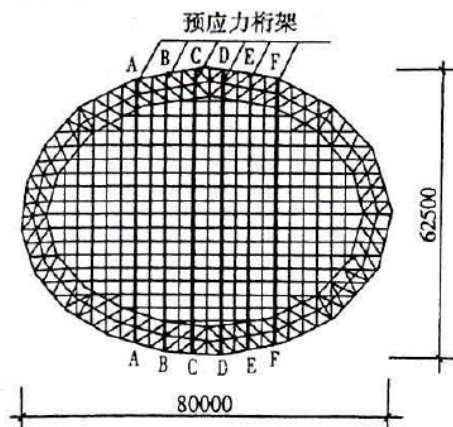


图1 网壳下弦平面布置示意图

2 结构设计与计算分析

2.1 设计特点

(1)由于宿迁市位于9°抗震设防区,因此为了减小水平地震作用对网壳结构的影响,本工程采用了基础隔震技术,使主体结构的水平地震作

用减少为9°作用的0.168倍,故水平地震作用在设计时按照7°考虑,竖向地震作用仍按照9°考虑;

(2)考虑到80m×62.5m巨大的网壳支承在4~9m不等的独立柱上,而独立柱无法抵抗网壳产生的巨大水平推力(计算表明支座固定后最大水平推力达到480kN)。为确保主体框架在地震和温差等因素的作用下能安全工作,在设计时必须考虑平衡恒载产生的水平推力;

(3)由于网壳屋盖和主体结构在空间上整体工作,但是主体结构和屋盖结构的刚度和质量分布存在较大的不均匀性,隔震层、主体框架和钢屋盖各有不同的刚度质量特性、阻尼比,因此在动力作用下,三者必然产生相互影响,设计时必须考虑(此部分笔者另文阐述)。

2.2 荷载及地震作用取值

计算时取用活荷载为0.3kN/m²,雪荷载为0.3kN/m²,设备吊挂荷载为0.5kN/m²,屋面材料为0.15kN/m²。

室内外最大温差15°,年平均温差20°。

动力分析重点为竖向地震作用下的结构反应。根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-XX试设计稿)中时程分析地震波的选择要求,本工程选用两条地震波(TAFT、E1-Centro)和一条宿迁人工波,人工波根据场地地震地质环境评价报告提供的地震动参数按照规范要求生成。竖向地震反应谱与水平向相同, $\alpha_{vmax} = 0.65\alpha_{max}$ =

冯良慈 栾文彬 江苏新筑预应力工程有限公司

周友根 樊德润 江苏省建筑设计研究院

0.208。竖向地震作用时程记录的峰值为 $0.65 \times 140 = 91(\text{Gal})$ 。

2.3 屋盖结构选型

考虑到施工因素,网壳结构采用双向正交桁架,焊接球结点,拉索采用钢绞线。为了便于论述,根据其受力特点分别将两个方向的桁架称为拱向横架(短方向)及索向桁架(长方向)。该工程所采用的一般的构件规格如下:上弦杆:拱向 $\phi 180 \times 10$;索向: $\Phi 76 \times 4.5$;腹杆: 83×5 ;下弦杆:拱向 $\Phi 114 \times 8$,索向: $\Phi 76 \times 4.5$;球结点: $\Phi 400 \times 14$ 。

2.4 预应力拉索方案的选择

为了有效控制网壳对柱顶的水平推力,优化构件截面,验算地震作用下的结构反应,在支座设定为滑移的前提下,初步选定了以下5个方案,并进行了系列分析比较。其中屋盖部分采用 TW-CAD 软件进行空间桁架位移分析;结构整体包括隔震垫、阻尼器等用 sap2000 进行有限元分析,由于索贯穿于钢管内,分析中索力以等效荷载的方式作用在结构主体上。初步选定的5种方案如下:

- (1) 普通网壳线性(方案 A)和非线性(方案 B)反应的比较;
- (2) 按照图 2.1 方案设置预应力索(方案 C);
- (3) 按照图 2.2 方案设置预应力索(方案 D);
- (4) 按照图 2.3 方案设置预应力索(方案 E);

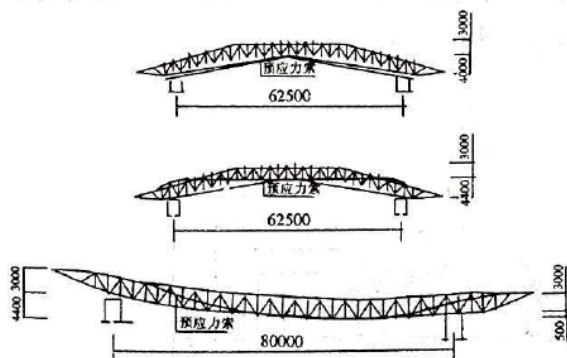


图2 预应力索束型图

2.5 计算分析

根据上述选定的方案,设计时对该5种方案进行了位移与内力分析、结构非线性分析、频谱分析和动力时程分析。其中竖向荷载作用下位移与内力分析结果见表一:

表一 竖向荷载作用下位移与内力结果比较

	$D_{H,max}$ (mm)	$D_{V,max}$ (mm)	索应力(N/mm ²)	受力较大区域分布
方案 A	176.1	334.1	/	拱向中部下弦受拉,上弦受压
方案 B	191.5	360.2	/	拱向中部下弦受拉,上弦受压
方案 C	22.6	137.7	540~830	拱向张拉端下弦受压,拱向中部上弦受拉,拱向腹杆受力加大
方案 D	60.2	95.6	650~780	拱向张拉端上弦受压
方案 E	159.4	301.0	740~860	索向上弦受压

注: $D_{H,max}$ 为最大的支座水平位移; $D_{V,max}$ 为最大的结点竖向位移

通过表一分析比较可以看出,通过张拉网壳内的预应力索,可以有效地改变构件内的内力分布,减小网壳支座的水平位移。同时,在设计中调整预应力拉索张拉力,可以平衡不同阶段的竖向荷载,使网壳对主体框架的影响被控制在合理的范围内。在拉索用量相差不大的情况下,方案 C 在控制位移方面效果较好。经过进一步的分析表明,方案 C 的杆件内力变化较为均匀,用钢也较为经济,故最终确定设计方案为 C。每根预应力桁架配置无粘结预应力筋数量为 $8U\Phi^{15.2}$, 预应力筋强度等级为 1860 级, 预应力筋的最终张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.3f_{ptk}$, 索的最终张拉力为 625kN。

3 预应力施工及主要技术措施

3.1 施工工艺流程

基础及柱施工→网壳分段制作(地面制作)→(分段穿钢绞线引导绳)→ $\left[\begin{array}{l} \text{网壳就位、安装} \\ \text{钢绞线引导绳连接} \end{array} \right]$ →搭设穿束、张拉工作平台→第1次张拉预应力筋→安装屋面板、暖通及灯光等设备→第2次张拉预应力筋→锚具端部防腐处理→安装锚具防松罩、密封罩→固定支座→拆除脚手架

3.2 预应力筋铺设工艺

本工程由于采用无粘结预应力筋,且预应力筋在网壳的下弦杆内穿过,因而预应力筋铺设施工务必与网壳的安装协调好,避免穿束工作受阻。同时由于预应力筋张拉端要与网壳球节点进行焊接,因此节点的处理较为复杂,施工精度要求较高。下面结合工程实际分别予以介绍。

(1) 无粘结预应力筋的选用

由于本工程无粘结预应力筋将在网壳下弦杆内长期放置且不进行其它封闭处理,故网壳施工完毕后,虽然整个杆件在使用期间密封,但杆件内仍充满了残余空气,残余空气必然导致无粘结筋外包塑材料的老化,若处理不当,将影响整个构件的耐久性,严重的甚至危及构件的安全。因而本工程所采用的无粘结预应力筋的外包层为双层聚乙烯套管,并且严格控制涂包质量。

(2) 预应力孔道的成型

本工程预应力筋束在网壳下弦杆内穿行,因此其孔道的成型较为简便,施工中只需处理好空心球与杆件之间的节点问题即可,具体做法如下:

首先在空心球与杆件相交部位开洞,以便于钢绞线的穿行,然后在此开洞节点处附加 $\Phi 76 \times 4.5$ 的钢套管,以补足节点强度。钢套管要与球节点密封焊接且要与网壳杆件同心。迎着钢绞线穿行方向的钢套管伸入空心球内 30mm 左右,且伸出部分的钢管切开 4 个切口,外翻制成喇叭状(见图 3),以减小无粘结筋穿束时的阻力,并防止钢管棱角划破无粘结筋塑料外套。

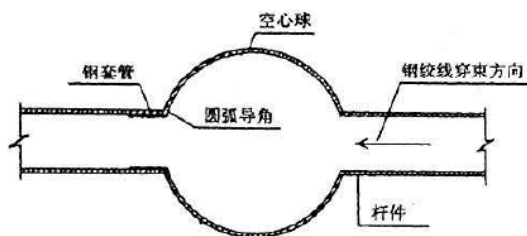


图 3 空心球与杆件节点处理示意图

(3) 穿无粘结钢绞线束

由于本工程无粘结预应力筋所处环境的特殊

性,因而除了要对无粘结预应力筋的涂油包塑提出特殊要求外,在施工期间尚要加强对无粘结筋的保护工作。同时由于无粘结筋较长,因而穿束工作也较为困难、复杂。

① 放置引导绳

由于网壳和主体结构体型复杂,因而网壳的安装采用地面分段制作,高空散拼法。本工程预应力部分的网壳分为 4 段拼装。施工时首先在地面将整榀网壳分为四段制作,制作的同时,要在杆件内放置预应力筋分段引导绳,各段引导绳露出杆件外的部分要进行临时固定。网壳高空拼装焊接时,应将相邻的引导绳连接,使分段引导绳在杆件拼装完成后,连成一整根引导绳。

② 穿牵引绳

为了便于施工操作,一般引导绳采用粗铁丝,因而其强度不足以承担牵引钢绞线束的牵引力,因而施工中通过引导绳要换穿一根钢丝绳作为牵引绳,钢丝绳强度要足以承担穿束时的牵引力。

③ 安装承压环

由于张拉力是通过锚具传递给承压环,然后由承压环传递给空心球,从而在球节点处产生一内向的平衡力,用于平衡网壳产生的向外的水平推力。因而施工中除了要确保承压环自身有足够的承载能力外,尚要验算空心球的局部承压情况,以防止空心球内陷、失稳。同时在安装承压环时,尚应保证承压环与空心球之间的焊接质量,以确保空心球内部密封,防止钢绞线束及空心球的内部老化、锈蚀。本工程张拉端球节点的安装示意图见图 4。

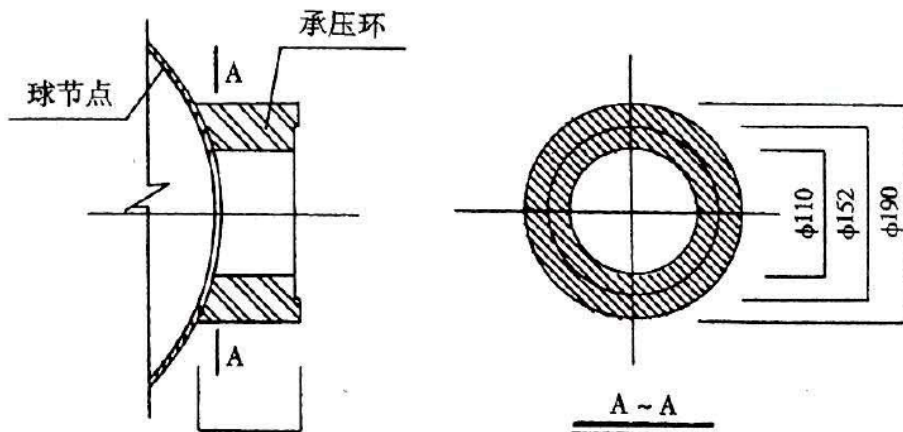


图 4 张拉端球节点安装示意图

④穿束

首先在牵引绳的一端安装特制的穿束器,然后将已编好束的钢绞线束逐根导入穿束器并进行预紧。在桁架的另一端安装固定好穿束机,待一切准备就绪,即可开动穿束机,从而完成穿束工作。在穿束过程中应注意以下几个问题:

- 无粘结钢绞线进入杆件前要保证有2~3m的平直段,以防杆件口划伤钢绞线塑料外套;

- 施工期间保护好预应力筋的外套管,发现有破损现象,则该根无粘结筋进行报废处理,严禁缠裹处理后继续使用;

- 处理好网壳杆件内表面,特别是空心球与杆件相交处的节点要进行相应处理(见预应力孔道的成型部分),避免杆件内的棱角划破无粘结筋外套管;

- 穿束遇阻,不得强行穿束,而应重新穿束,且重新穿束前要检查无粘结筋护套管情况。

3.3 预应力筋张拉及端部处理

(1) 预应力筋张拉

根据不同时期屋盖部分的荷载情况,本工程

预应力筋张拉分两个阶段进行:

第一阶段:在网壳安装完毕后进行。首先安装好锚板(不安装夹片),对所有预应力束进行空拉,以达到预紧及调匀预应力束的目的(空拉应力为 $0.1f_{pk}$)。空拉结束后,安装好锚具夹片,再依次、对称张拉所有预应力筋束,张拉控制应力为 $0.1f_{pk}$,待所有6束预应力筋张拉到 $0.1f_{pk}$ 后,再按照同样的方法和顺序张拉所有预应力筋束到 $0.2f_{pk}$,从而完成第一阶段的张拉。

第二阶段:在屋面板铺装、管道灯光架设等完毕,全部恒载作用后进行。张拉的顺序、方法与第一阶段相同,张拉控制应力为 $0.3f_{pk}$ 。

(2) 铰支座的处理

预应力筋张拉结束后,柱端的预应力便有效地平衡了网壳在柱顶产生的向外推力。由于网壳底部与柱顶之间采用铰支座,因而随着预应力的施加,支座随之产生向内侧的滑移,待预应力施加完毕及屋盖荷载基本到位,则整个结构将处于平衡状态,此时即可锚固柱顶的螺栓,使得网壳与下部柱子牢固连接(图5)。

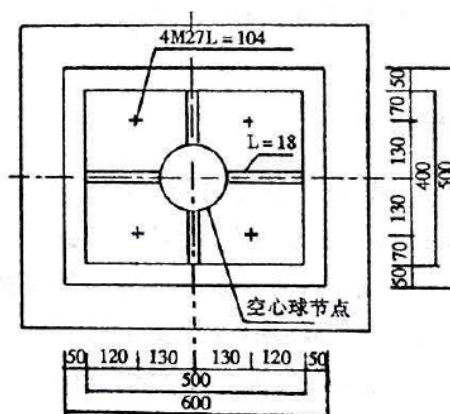
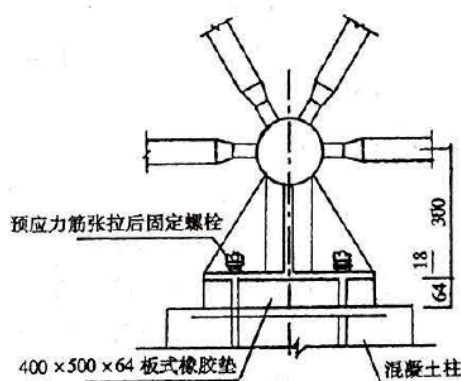


图5 铰支座节点示意图

(3) 防松罩的安装

由于该工程位于9°抗震设防区,而预应力筋自身的张拉控制应力又较小,锚具的锚固力较小,为了防止在地震等剧烈震动作用下,锚具的夹片发生滑脱现象,特在紧贴夹片部位安装了防松罩

(图7),防松罩安装过程如下:

首先在锚具安装之前,在图示位置打3个螺栓,然后加工一块厚10mm与锚具同等大小的钢板,并在钢板同样的位置相应打3个孔,待预应力筋张拉结束后,通过螺丝使得钢板紧贴在锚具表

面,从而达到防止夹片松动的目的。

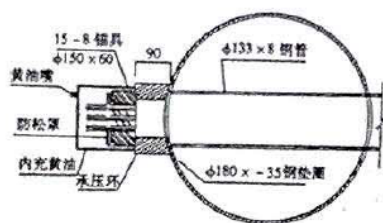


图6 预应力筋张拉端详图

(4) 张拉端防腐保护

由于张拉端锚具不象普通预应力构件一样埋置于混凝土内,因而若不对预应力筋束端部进行处理,将会导致预应力端部配件锈蚀,因而必须将其端部进行相应处理。本工程张拉端防腐处理方法如下:

首先制作一个与锚具配套的密封罩,待预应力筋张拉结束后,切除外部多余的钢绞线,然后按照图7的方法使得密封罩与承压环密封连接,连接完成后,通过油嘴向密封罩内灌注黄油,直至黄油充满整个密封罩,然后密堵住油嘴,从而使得密封罩内部与外界隔绝,最后在密封罩的表面及承压环外露部分涂上一层防腐漆,从而使得整个张拉端与外部空气隔绝,达到防腐的目的。

4 结束语

本工程通过在部分桁架下弦杆中施加适当的预应力,从而有效地平衡了网壳在支座处产生的向外水平推力,并且调整了杆件的内力。通过施工时对支座位移及部分关键点挠度进行监测,基本达到设计要求。

(上接第15页)

符号是相同的,由于混凝土结构径向尺寸大,因此温差要小于预应力索网的温差,但是,周边混凝土结构温度变形对预应力索网结构的稳定性是有利的。

三、施工方法

预应力索网结构的稳定性是建立在上下弦初始预拉力和节点不滑动基础上的,施工依此进行安排。基本施工顺序为:①分级将预应力筋张拉至其控制拉力,张拉控制力要根据施工时实际温度进行调整,张拉时腹杆及配件可以安装但不能固定;②固定竖向、斜向腹杆及节点配件使节点不能滑动;③通过力矩扳手进行斜向腹杆的预紧。施工时可以根据需要通过模板和垫块进行起拱,张拉最好两端进行以便预应力筋两端变形基本相同。

四、结论

(1)通过上、下弦施加预应力突破了常规平面网架在竖向荷载下部分杆件受压的束缚,使上、下弦预应力筋充分发挥其高强抗拉性能,截面尺寸减小,达到美观效果;

(2)通过腹杆及预应力的联合作用,使结构刚度比相同尺寸的网架还要高,避免了平面索结构变形大的弱点;

(3)双向斜腹杆的布置及斜腹杆的预紧避免了斜腹杆的受压,使斜腹杆尺寸减小;

(4)预应力网架结构对周边结构具有较大的拉力,在进行周边结构设计计算时应予以考虑,圆形周边结构是较佳的结构形式。

参考文献

[1]沈世钊,徐崇宝,赵臣. 悬索结构设计. 中国建筑工业出版社,北京,1997

[2]一种新型空间结构——张拉整体体系. 土木工程学报. 1995,4