

几种预应力局部单层网壳结构的研究设计与应用

马克俭 黄勇 安竹石 肖建春 江绍飞

摘要 本文介绍三种类型的预应力局部单层网壳结构的研究、设计与工程应用。通过工程实践,讨论它们的构造与力学特点及其良好的技术经济指标。

关键词 预应力 网壳结构 研究设计

一、概述

随着国民经济发展和精神文明的建设,体育建筑兴建与改建日趋迫切。在体育事业发展较好的地区,原有露天球场较多,如广东全省有1000个露天球场,如果其中1/10改建为体育馆,即100座体育馆。按目前造价分析,建造一座较现代化的3500座位中型体育馆,一般需2700~3000万元,100座即25亿元。显然,就是在经济发达的广东地区也是有难度的。

如何多、快、好、省地建造体育馆,广东省高要市做了有益的尝试,仅以500万元建造了一座3200座位、具有电子荧光屏的较现代化的体育馆,建造工期仅半年(1995年6月~1995年12月),创造了全国体育馆建造时间最短,投资最少的先例。该市在1977年兴建的露天球场(带钢筋砼看台),平面尺寸为45.9m×54.3m,在其两对主对称轴(东南、西北)上离看台边3m处有四根变截面钢筋砼空心柱。采用四点支承预应力组合扭网壳结构(图1),改建成一座造型美观、大方的体育馆,平面尺寸54.9m×69.3m,屋盖投影面积3805m²。原设计为四点支承四块组合双层扭网壳,用钢量为57.8kg/m²(四点支承平板网架为68.5kg/m²),最大挠度16.5cm(L/314.5),采用预应力方案后,用钢量下降为38.5kg/m²,最大挠度仅5.8cm(L/894),用钢量下降33.4%,刚度增大2.84倍。

1996年,广东省清远市体育馆建成(图2),由六点支承,由六块双层扭网壳组成,对角线跨度93m,投影面积6000m²。采用预应力后,用钢量由

原设计68.9kg/m²下降为44.3kg/m²,即下降35.7%,经济效益显著。

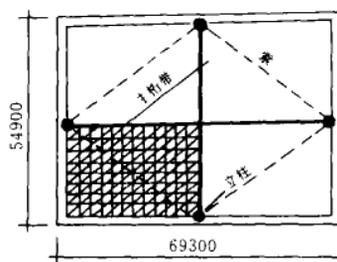


图1

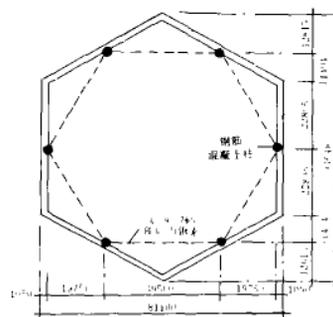


图2

曲面网壳(正、负高斯曲率网壳)采用预应力技术后优越性体现在以下几方面:

其一:扩大利用材料强度幅值,导致内力重分布,改善其受力状态,预应力索起着双重作用,即对整个结构施加预应力和承受结构本身的拉力,

马克俭 黄勇 安竹石 肖建春 贵州工业大学空间结构研究所
江绍飞 广东高要市建委

一发千钧。

其二,预应力可使结构本身产生反变形,除调整内力分布外,提高结构刚度。众所周知网格结构设计中的两大要素强度控制与变形(挠度)控制,缺一不可。网壳被施加预应力后,两者均能达到较理想的技术水平,且相辅相成。

其三,网壳结构边缘桁架的拉杆(扭网壳的系杆)承受的拉力最大,采用普通建筑钢用强度控制时,截面面积过大。此处往往不由强度控制而是由变形控制,因强度达到设计允许值时,拉伸变形已经很大,自然网壳结构本身的挠度增加显著。因此,必须控制拉杆的拉伸变形,而此时其强度远远未达到允许值,导致用钢量急剧增加。如果恰如其份地将强度比普通钢高近9倍多的高强钢绞线取代此处拉杆(或系杆),情况就发生“质”的变化。对曲面网壳而言,它不同其他吊挂、斜拉预应力结构体系,不存在赘余构件,此类预应力结构体系,在杆系组成和分布上与一般曲面网壳完全一致。

通过理论分析、模型试验、实际工程实践和现场测试与分析,此类新型空间结构日益成熟,逐渐形成“预应力钢网格体系”,1996年获贵州省科技进步一等奖。

科学技术的发展是永无止境的,利用预应力上述多方面的优点,在双层网壳的基础上研制了局部单层、局部双层预应力网壳,从而解决当跨度增大时单层网壳整体稳定难以保证的难题,在保证强度、刚度和整体稳定的前提下,进一步节约用钢量的目的。现通过几项工程的设计,讨论预应力局部单层网壳的构造与力学特点。

二、三种预应力局部单层网壳简介

(一)预应力鱼骨式组合扭网壳

此类体系已在两项体育馆屋盖工程中应用,其一为广东省兴新县露天球场改建为体育馆工程,网壳屋盖面积为 $54\text{m} \times 76.06\text{m}$, 3945m^2 ,图3为其网格杆件及预应力布置图。在原体育场东南、西北主对称轴上,离原看台2m处立四根钢筋砼空心柱(集水管在空心部分),四块局部组合扭网壳分别两两支撑在柱顶,在需设置系杆处分别以2束 $7 \times 7\Phi 5$ 钢绞线取代系杆建立预应力,为了达到建筑造型雄伟挺拔的目的,四边悬挑1.5m,悬挑部分和主桁带作成双层;主对称轴也是主要受

力部分,亦作成双层(图3)。在保证整体稳定和强度、刚度的前提下做了三种结构方案对比,其用钢量分别为 $51.2\text{kg}/\text{m}^2$ (非预应力四块组合双层扭网壳)、 $36.4\text{kg}/\text{m}^2$ (预应力双层组合扭网壳)、 $28.2\text{kg}/\text{m}^2$ (预应力鱼骨式单层组合扭网壳)。以非预应力双层网壳预应力为基数,用钢量分别下降29%和45%,两类预应力体系比较,局部单层网壳用钢量又下降22.6%,经济效益显著。

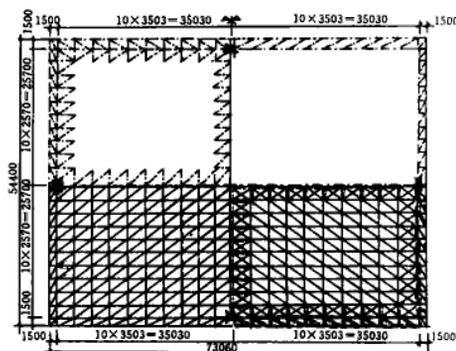


图3

其二为贵州省翁福磷矿基地体育馆,也采用此类网壳结构,在四方设四根柱,采用鱼骨式单层预应力组合扭网壳,无悬挑,外墙将网壳封闭。其网格划分,杆件及预应力索($2 \times 7 \times 7\Phi 5$)布置如图4所示,用钢量下降明显。

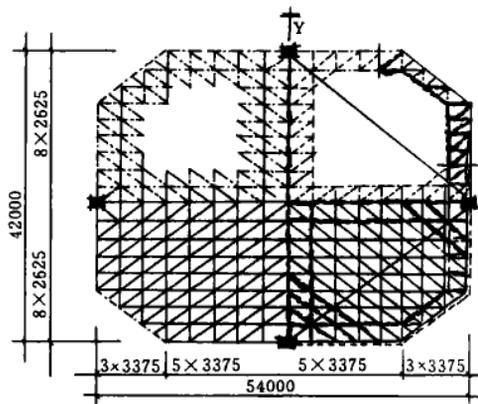


图4

(二)预应力中央单层、周边双层双曲扁网壳

广东省阳山县兴建的八柱支承的体育馆屋盖,平面尺寸 $44\text{m} \times 56\text{m}$,网格及预应力索布置如图5。设计中仍采用三种方案对比(非预应力双层网壳、预应力双层网壳、预应力局部单层网壳),用钢量分别为 $52.2\text{kg}/\text{m}^2$; $38.8\text{kg}/\text{m}^2$; $29.5\text{kg}/\text{m}^2$ 。以非预应力双层网壳为基数,用钢量分别下降

26%和43%，后两者相比用钢量下降24%。

(三)预应力周边双层中央单层双曲率穹顶式网壳

深圳市横岗镇文化中心体育馆，设计平面尺寸为椭圆，台阶式座席亦椭圆布置，以便较佳视线座席较多。其长轴80m，短轴77.79m，原设计椭圆形三向格子式网壳，网格变化复杂，不利于施工。后将整个屋盖绕长轴倾斜15°原短轴变成80m，即形成倾斜式穹顶，采用凯威特型。中央 $d_1=36m$ 部分为单层，周边双层带宽22m，采用双曲率中心法(周边曲率半径大，中央单层曲率半径小)，即双曲率式穹顶式网壳结构。按圆心角 10° (弧长6.38m)设置钢筋砼悬臂式柱，看台悬挑柱为36根。

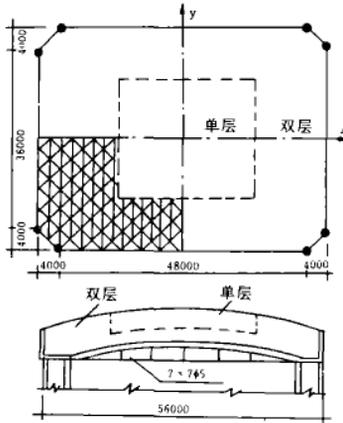


图5

为了建立预应力，理论上应设置36根预应力索，需要36台双作用千斤顶，显然是不现实的。于是在圆心角 60° 对应支座处建立预应力，即形成六边形索平面，用六台张拉机进行分级同步张拉。由于建立了预应力，网壳屋面90%以上的重量传到六根主要悬挑柱上，故在六根悬挑柱下方设斜撑，其他悬挑柱主要承受看台座席重量。预应力索采用 $3 \times 7 \times 7\Phi 5$ ，索的安全度 $K=2.35$ 。由于采用预应力，用钢量显著下降。采用不同结构形式用钢量分别为 $72.5\text{kg}/\text{m}^2$ (周边环向支承球网壳)、 $65\text{kg}/\text{m}^2$ (周边双层中央单层周边环向支承球网壳)、 $46.2\text{kg}/\text{m}^2$ (六点支承六边形预应力局部单层穹顶式网壳)。以非预应力双层球网壳为基数，用钢量下降百分率为18.5%和36.3%。由于采用

变曲率，单层网壳不仅改良了座席的分布，改善了网格布置，其建筑造型也富有动感。图6为网格与拉索布置平面。

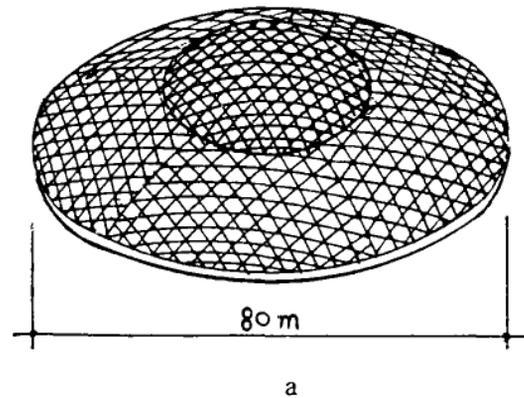


图6

三、构造与力学特点

三类预应力网壳分别属于负高斯曲率网壳(1类)和正高斯曲率网壳(2、3类)，其构造与力学特点有共性也有个性。

(一)共性

1. 支座球必须是大直径焊接空心球，其作用有几方面：其一为支座各杆交汇点；其二是预应力建立的张拉与锚固点；其三，压力灌浆形成预应力的自锚头。

2. 单层部分最好采用焊接空心球，双层部分螺栓球与焊接球两者均可，保证单层部分杆端为固端，计算分析时应考虑部分铰接和部分刚铰连接。

3. 由于预应力作用，网壳高度(双层部分)可相应减小，网格可适当放大，导致夹角偏小，焊接球径一般偏大，文献(1)、(2)中介绍的补偿板方法可以适用。

4. 根据网壳的力学特点，单层尽量布置在薄膜内力区，双层布置在弯曲内力较大处(即单块扭网壳周边及边界附近区域)。

5. 单层与双层交接处，构造上尽理避免刚度突变，应建立刚度渐变区。

6. 网壳最大挠度不是在跨中，一般发生在单、双层交接处第二节点处。

7. 预应力建立时，必须同步张拉，其安全度参照“预应力砼设计与施工规范”并适当放大。

8. 一个支座球节点有两组以上预应力索

($2 \times n \times 7 \times 7 \Phi 5, n=2, 3, 4 \dots$) 交叉穿过, 当 $n=1$ 时, 对支座造成偏心, 应尽量避免。每根索的施工张力均可参照文献(1)的刚度聚合法计算。

9. 预应力的建立均按“多阶段设计”, 充分利用材料强度幅值, 一般为“三阶段设计”和“五阶段设计”。

10. 整个预应力网壳形成一个“自平衡体系”, 温度应力必须考虑, 不考虑支承柱的抗推刚度, 以橡胶滑块支座板为宜。

11. 跨度 $L \leq 35\text{m}$ 范围内, 预应力对网壳用钢量影响不大, 一般无需设计成预应力网壳结构。

12. 各类预应力损失, 设计计算方法相同。

(二) 个性

1. 预应力鱼骨式单层组合扭网壳的特点如下: (1) 预应力索设在原系杆处, 即预应力索取代系杆。单块扭网壳设在对角线处, 三块组合为三角形平面, 四块组合为四边形平面, 多块组合时为 $n=5, 6, 7, 8 \dots$ 边形平面。预应力索高度在支座球心标高, 占据扭网壳部分净空, 在确定柱高, 设计看台楼座时必须加以考虑; (2) 在竖向均布荷载作用下, 鱼骨(即双层)的交叉点(跨中)挠度向下, 各角隅挠度反向, 预应力作用下均产生向上“隆起”作用; (3) 单层部分两正交(或斜交)直线平移杆以受压力为主即拱向杆, 其对角线连线杆以受拉为主, 即索向杆。预应力作用下, 一般不能改变索向杆的性质, 从整体稳定分析, 局部单组层合扭网壳可以覆盖比正高斯曲率局部单层网壳更大的跨度。

2. 预应力中央单层周边双层扁网壳的特点: (1) 预应力索即边桁架的下弦, 它不占馆内净空, 扁网壳边拱架在建筑功能和造型方面要求设置采光、通风窗, 其下弦为预应力索, 除设置刚性吊杆处, 预应力建立后, 应以型钢包裹预应力索, 形成安装铝合金玻璃窗的骨架; (2) 在竖向荷载作用下产生向下挠度, 无上翘点, 预应力作用下网壳变形反向; (3) 单层部分均为拱向杆, 除了杆件的强度和单杆稳定控制外, 其整体稳定是控制单层扁网壳尺寸大小的关键因素; (4) 在单层与双层角隅区, 内力值较大, 此区杆系布置极为重要, 必须根据所选网格布置方案妥善处理。

3. 预应力周边双层中央单层穹顶式网壳特点: (1) 由于在六边弦长方向施加预应力, 预应力拉索即形成六边形边拱架的下弦拉杆, 网壳的力

学特性已经改变。因为周边环向支承时, 球壳内力必需聚集于 36 个支承点处, 六边建立预应力, 形成六个边拱架, 网壳力流主要集中在建立预应力的六根柱上, 实质上它已经变成六边形扁网壳的力学特性, 如图 7 所示; (2) 由于力流聚集点的改变, 柱顶环形边梁拉力由预应力索承担, 实际上环形边梁只承担拱架以外弓形平面内部分内力; (3) 由于力学特征改变, 边拱架的双层桁架受力加大, 其杆件截面也较大, 拱架以外(弓形平面内)受力很小, 施工时可以在建立预应力以后再安装; (4) 单层与双层曲率不同, 改善了单层部分的刚度, 其单层与双层交接处第 2 节点处的最大挠度由原来等曲率时的 186mm 变为 86mm, 即刚度增大 2.16 倍, 体现了双曲率的优越性。

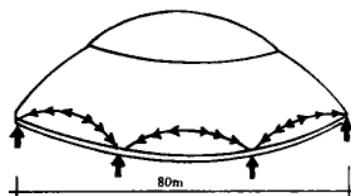


图 7

第 3 类网壳命名为“穹顶式”预应力局部单层网壳, 即其形式像穹顶, 其力学特性实质上是双曲扁网壳, 从矢高 F 与跨度 L 之比分析, 即 $F/D=8/80=1/10 < 1/6$, 也属扁网壳范畴。

四、技术经济指标

技术经济指标分析的基础是确保结构物的强度, 刚度和整体稳定均满足设计规范、规定的要求。多阶段预应力设计能充分利用材料幅值, 达到用钢量最省的目的, 但在实际工程中却很困难, 除了分次张拉钢索的难度外, 外加荷载(活载、风载、竖向地震作用)的随意性, 也不是人们能控制的, 只有网壳自重、屋面板及檩条自重、马道吊灯的自重是已知的。实际上只有“三阶段”和“五阶段”设计是符合实际工程需要的。

预应力曲面网壳在跨度 $L \leq 35\text{m}$ 以内其作用不明显, 主要是指采用复合采钢板的轻屋面。若为钢丝网水泥带肋板, 细石砼带肋板或组合网壳, 对屋盖来说, 恒载远大于活载, 预应力的效果又将显示出来。

当曲面网壳跨度小时, 网格中杆件有很大一部分为构造杆($\Phi 60 \times 3$ 等), (下转第 28 页)

- ②预张力控制应力 20%
- ③预张力控制应力 40%
- ④预张力控制应力 60%
- ⑤预张力控制应力 80%
- ⑥预张力控制应力 100%

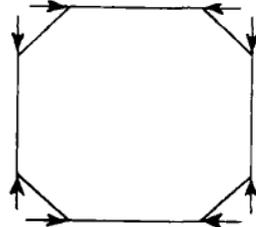


图3 预应力施加方向图

(3)预应力张拉:

预应力张拉过程中,必须严密监视网架的应力态势,确保网架安全。在张拉的同时,我公司委托电力部郑州焊接技术监督检验中心对网架周边杆件进行应力测试。根据实际情况,我们选取网架的西北两条边测试静载预应力(见图4)。西北两边分别沿网架轴线方向对称布置六个测点,应变片沿杆件方向贴置,测试结果表明,预应力张拉完全达到预期效果(见表1、表2)。

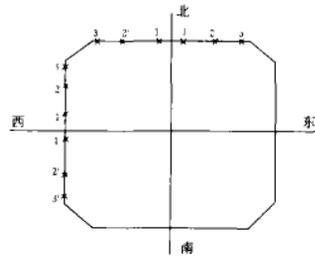


图4 应变片测点布置图

表1 西边各测点应力和内力值

测点	3	2	1	1'	2'	3'
σ (MPa)	61	55	30	33	52	52
F(kN)	560	210	140	160	200	480

表2 北边各测点应力和内力值

测点	3	2	1	1'	2'	3'
σ (MPa)	74	73	22	27	59	52
F(kN)	680	280	110	130	230	500

六、网架检测评定

预应力张拉完毕后,将过渡板与预埋板焊接固定,整个网架处于稳定状态。施工单位、建设单位及监理部门,对网架整体尺寸、网格尺寸、高度、挠度及支座偏移情况等各项技术指标,进行综合检测评定,质量均为合格,优良率为98%,被评为优良工程。

(上接第25页)

施加预应力后虽然许多杆件内力减小,但构造要求也不宜减小杆直径,这也是预应力作用不明显的原因。我们曾在广东省连州市第一中学体育馆进行过对比,该馆平面尺寸为36×40m,采用中央18×24m为单层,周边双层,四点支承扁网壳,非预应力时用钢量为23.4kg/m²;在四个边拱下弦以预应力索取代拉杆建立预应力后,刚度提高,用钢量为19.8kg/m²,下降15%。考虑钢索,锚板夹片及张拉费用后,其技术经济指标并不明显。

上述三类网壳,即双层非预应力网壳、局部单层非预应力网壳和局部单层预应力网壳的设计方案,我们进行计算对比,其刚度与用钢量指标如表1所示。

预应力曲面双层网壳结构在国内发展的历史仅仅四年多,点支承情况下其优良的力学特性和经济指标已为工程实践所证明。预应力局部单层曲面网壳结构是在预应力双层曲面网壳基础上的开拓与发展,实际工程不多。本文仅起抛砖引玉的作用。

表1 三类网壳结构的技术经济指标

类型	对比内容	建造地点	新建式改建	座席数网壳面积	支承条件	最大跨度(米)	最大相对挠度	用钢量(kg/M ²)	总用钢量(T)	用钢量下降
组合扭网壳	四块组双层扭网壳	广东新兴县	露天球壳改建(平面尺寸) 51×76.6m	3200座	四点支承	15.2	1/355	51.2	210.3	1
	9.8					1/551	76.4	149.5	29%	
	8.5					1/635	28.7	117.9	44%	
曲面扁网壳	双层双曲面网壳	广东阳山县	新建(平面尺寸) 44×56m	2000座	八点支承	12.5	1/352	52.2	108.6	1
	9.2					1/478	36.8	95.6	25.6%	
	7.4					1/545	29.5	72.7	43.5%	
倾斜穹顶网壳	双层穹顶网壳	深圳市横岗镇	新建(平面尺寸) D=80m	4200座	周边支承	21.5	1/372	72.5	364.4	1
	17.2					1/465	60.8	302.7	17%	
	14.1					1/567	46.2	230.2	36.2%	

注:用钢量下降百分数均以非预应力体系为基数

参考文献

- (1)马克俭等,大跨度组合式预应力扭网壳结构的设计、构造与力学特点,空间结构创刊号,1994年8月。
- (2)马克俭等,预应力曲面网壳结构的研究与应用,空间结构,1996年第2期。
- (3)钟善桐,预应力钢结构,哈尔滨工业大学出版社,1986年。
- (4)Z. S. Makowski, Analysis, Design and Construction of Braced Domes.