

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2501015

三心圆柱面张弦结构静力性能研究

苗慧, 罗兆辉

(天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384)

摘要: 本文利用 MIDAS GEN 有限元分析软件建立三心圆柱面张弦结构的计算模型. 改变影响结构静力性能的相关参数, 包括拉索的布置范围和拉索的垂度, 研究不同参数条件下对此类结构变形以及杆件所受内力的影响, 并研究结构内力和跨中挠度的变化趋势; 对结构进行拉索布置方案分析, 对比单道拉索与双道拉索的优缺点; 根据结构在自重和初始预应力的作用下达到平衡状态为目标原则, 确定拉索的预应力值, 分析施加预应力对结构的影响. 分析结果表明, 拉索的布置范围越大, 拉索的垂度越大, 结构的受力性能越优越; 预应力拉索的施加也能大幅度优化结构的受力性能.

关键词: 张弦结构; 静力分析; 预应力确定; 双道拉索

中图分类号: TU399 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-719X(2025)01-0015-06

Study on Static Properties of Three-centered Cylindrical Tensioned String Structures

MIAO Hui, LUO Zhaohui

(School of Civil Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: MIDAS GEN finite element analysis software was used in this study to establish the calculation model of a three-centered cylindrical tensioning structure. The effect of parameters, such as the arrangement and sag of the cable on the static behavior of the structure was investigated. Parametric analyses were conducted to study the influence of different parameters on the deformation of the structure and the internal force of the member. The cable arrangement scheme of the structure was analyzed, and the advantages and disadvantages of single cable and double cable were compared. According to the principle that the structure achieves the equilibrium state under the combined action of self-weight and initial prestress, the prestress value of the cable was determined, and the influence of prestress on the structure was analyzed. The analysis results show that the mechanical behavior of the structure is improved when the layout range and sag of the cable increase. In addition, prestressing the cable can also greatly optimize the mechanical behavior of the structure.

Key words: tensioning string structure; static analysis; determination of prestress; double cable

随着社会对能源需求日益增加, 我国的电力产业中, 火力发电仍然占据主导地位, 因此储煤、储料设施的建设得到了很大程度的发展^[1]. 露天料场会造成物料流失、扬尘污染等问题. 为了落实国家有关全面贯彻生态文明建设的政策要求, 对煤棚结构的封闭改造和全封闭建设得到了广泛应用. 本文以封闭料场结构为应用背景, 对此类结构的静力性能进行研究.

20 世纪 80 年代之前, 料场结构常采用双铰拱或三铰拱结构, 如今在我国多采用拱架、门式刚架、柱面网壳、预应力张弦桁架等结构体系, 其中空间结构体系更适用于大跨度料场的使用要求. 张弦结构的概念最早由日本学者 Masao^[2]提出, 此后得到了广泛的研

究. 本文选用的结构形式为大跨度空间张弦结构^[3]. 张弦结构由刚性上弦、柔性拉索下弦以及中间撑杆组成, 充分发挥了刚柔两种材料的优势. 与单一的空间结构相比受力性能更优越, 也更经济, 在大型公共建筑中得到了广泛的应用. 例如, 迁安文化会展中心^[4]、深圳北站无站台柱雨篷结构^[5]、合肥滨湖国际会展中心综合馆^[6]等.

1 结构方案分析

由于煤棚料场结构的有效使用空间为梯形, 作业空间包络线接近弧形^[7]. 所以将张弦结构的结构形式

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-09-10

作者简介: 苗慧(1999—), 女, 河北唐山人, 天津城建大学硕士生.

与柱面煤棚结构的使用要求相结合,选用剖面为三心圆弧形的柱面张弦桁架结构作为研究对象. 结构剖面由三段圆弧拼接而成,连接处采用公切线的原则进行圆滑过渡. 与半圆形柱面结构相比,三心圆形状更接近合理拱轴,尽可能减少结构产生的弯矩,应力分布均匀,充分发挥材料的作用,空间利用率高,结构形式合理^[8]. 柱面张弦桁架结构与柱面网壳结构相比在一定程度上也降低了结构的节点数目.

2 有限元模型建立

利用 MIDAS GEN 有限元分析软件建立一榀三心圆柱面张弦结构模型,分析在静力荷载作用下,参数的不同取值对结构内力和跨中挠度的影响. 桁架结构以一个四角锥作为基本单元,如图 1 所示,四角锥的高度为 3.4 m,厚度为 4 m. 建立矢跨比为 1/3,结构跨度为 120 m 的柱面空间桁架结构. 结构由三段圆弧拼接而成,结构各部分的尺寸参考规范中的要求与文献中的经验参数确定^[9]. 结构两侧大曲率圆弧的半径 r 为 31.32 m,中间部位小曲率圆弧的半径 R 为 83.04 m,圆心分别在 O_1, O_2 处. 将预应力拉索布置在桁架的下弦节点,得到结构体系剖面示意图如图 2 所示. 整体结构体系三维示意图如图 3 所示.

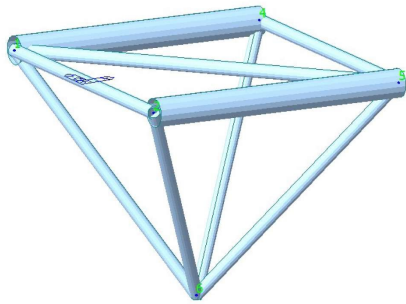


图 1 桁架基本单元示意图

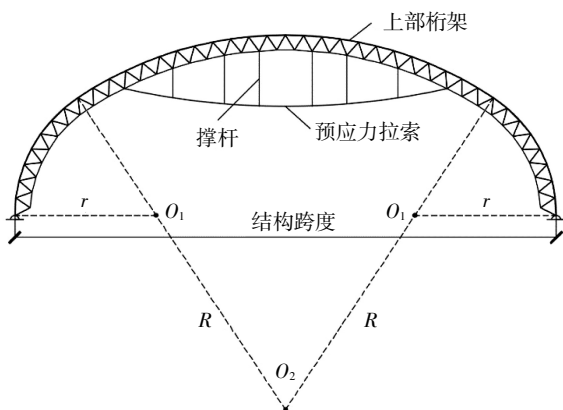


图 2 结构体系剖面示意图

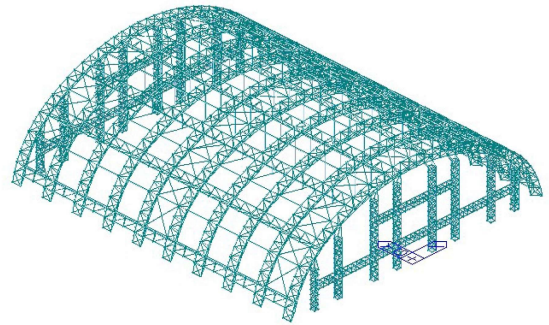


图 3 结构体系三维示意图

3 设计条件

根据建筑结构荷载规范^[10]中的规定,恒荷载取 0.6 kN/m^2 ,活荷载为不上人屋面取 0.5 kN/m^2 ,天津地区百年一遇基本雪压为 0.45 kN/m^2 ,基本风压为 0.6 kN/m^2 . 将上述面荷载分别转化为节点荷载施加在有限元计算模型上. 构件自重由程序自动计算. 模型上部桁架中两侧大曲率圆弧的网格数各定为 8 个,小曲率圆弧的网格数定为 24 个,即一榀结构模型共包含 40 个网格,上弦节点数为 82 个. 由节点荷载计算公式

$$F_i = \frac{F \times L \times d}{N} \tag{1}$$

式中: F 为结构所受的面荷载; L 为结构跨度; d 为每榀桁架间距; N 为一榀桁架的节点数. 计算得到结构的节点荷载取值. 由荷载规范确定出荷载的基本组合进行设计计算,由于篇幅限制,选取两种荷载工况. 工况一: $1.3 \times$ 恒荷载 $+1.5 \times$ 活荷载;工况二: $1.0 \times$ 恒荷载 $+1.5 \times$ 风荷载.

4 工况一荷载作用下结构静力分析

分别改变结构的拉索布置范围及拉索垂度,对整体结构进行挠度值和杆件内力值的分析. 通过迭代法确定预应力值并对结构布置不同道拉索,选取合理方案. 对桁架的下弦节点自左向右依次编号为 1-40 号. 如图 4 所示.

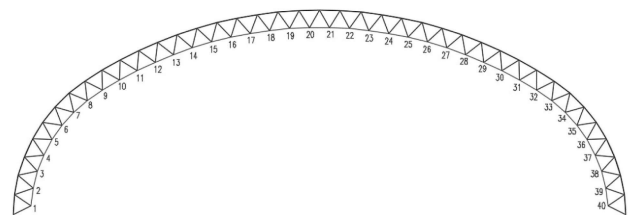


图 4 桁架节点编号图

4.1 拉索布置范围影响分析

柱面张弦桁架与用于普通屋盖结构的张弦桁架不同,拉索锚固位置并不在桁架的两端,而是在桁架结构中间部分的某一位置.由于三心圆柱面结构多用于作为煤棚或料场结构,而煤棚内斗轮机的工作需要一定的作业空间^[1].拉索的锚固位置关系到结构是否能满足使用要求和受力的合理性^[2].

将最初拉索锚固位置定在两段不同半径圆弧相互连接处,然后3次改变拉索的锚固位置,每次向上移一个网格高度,即拉索最初锚固在第9号下弦节点和第32号下弦节点处,其余3种情况分别锚固在第10-31号节点处、11-30号节点处和12-29号节点处,如图5所示.拉索的垂度为3 m,每隔3个网格布置一道撑杆,建立单榀桁架的结构模型对结构进行静力分析.拉索锚固位置不同对结构挠度的影响如图6所示,对结构内力的影响如图7、图8所示.

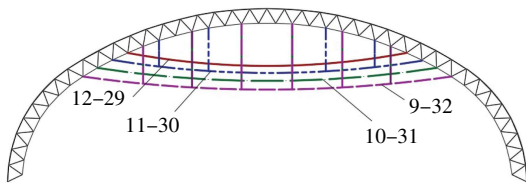


图5 单道拉索布置在不同节点示意图

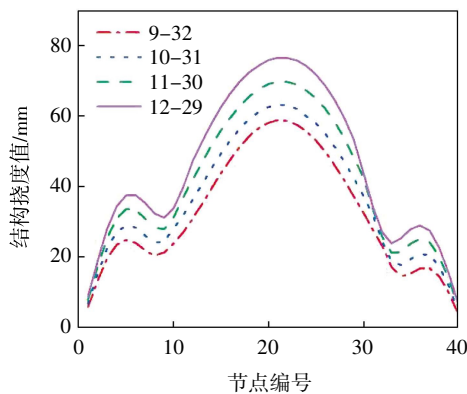


图6 拉索布置在不同节点结构挠度图

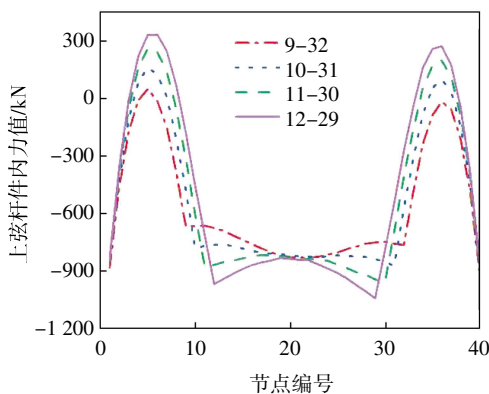


图7 拉索布置在不同节点时上弦杆件内力图

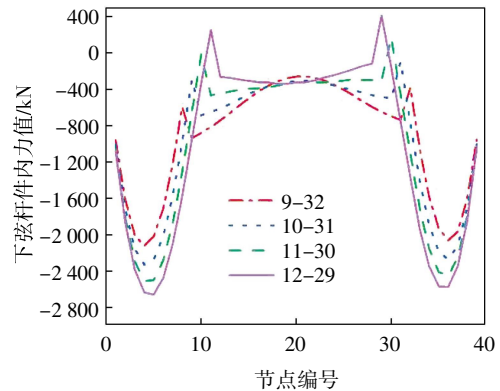


图8 拉索布置在不同节点时下弦杆件内力图

从图6可以看出,拉索的锚固位置距离结构顶端越远,结构的挠度值越小.结构的跨中挠度由76.6 mm减小到58.8 mm.然而,距离过大,也存在着一定的空间浪费的问题.从图7和图8可得出,拉索的位置越低,即预应力布置的范围越大,结构的杆件内力越小,主要表现在对大曲率圆弧中间区段和拉索锚固位置影响显著,如在下弦杆件10号节点处杆件内力值由-2 668 kN减小到-2 028 kN.

综合考虑,在下文的分析中,选取拉索锚固位置位于11-30号节点处进行研究,即拉索的布置范围约为跨度的60%.

对同一种拉索布置情况下的柱面张弦结构的挠度和内力的变化趋势进行分析.如图6可以得出,结构的下弦节点挠度值从支座处到跨中呈现出先增大后减小再次增大的趋势.以12-29号节点布置方案为例,在第5号节点处,挠度达到极大值37 mm,随后便稍有下降,下降到31 mm,并在两段圆弧相互连接处开始呈现上升趋势,并在跨中位置达到结构挠度的最大值77 mm.

从图7可以得出,上弦杆件的内力在大曲率圆弧区段,两侧受压,中间部分受拉.在小曲率圆弧区段,上弦杆件受压力,并在拉索锚固位置处开始,结构的内力值趋于平稳.同样以12-29号节点为例,结构内力最大的位置主要出现在跨中为-843 kN,或者预应力拉索锚固处为-969 kN,其次是支座处为-834 kN.

从图8可以得出,结构下弦杆的内力整体受压,呈现先增大后减小,并在跨中趋于平稳的趋势.同样以12-29号节点为例,即在小半径圆弧中段内力达到最大值-2 668 kN.但是在拉索锚固位置处的杆件内力发展趋势产生转变,紧连拉索起始点的外侧杆件甚至达到了受拉状态,达到244 kN.这主要是由于拉索锚固对杆件内力产生了一定的影响,应予以重视.综上所述,在对此类结构进行结构设计时,应当考虑对下

弦杆件在两侧大曲率圆弧处进行加强措施.

4.2 拉索垂度影响分析

根据空间网格结构技术规程^[13]中的要求,张弦结构的垂度可取 1/12~1/30,对于 120 m 跨度的柱面张弦结构,拉索的两侧锚固点的距离约为 71.5 m,可以得到结构的垂度范围为 2.4 m 到 6 m. 则分别取垂度为 3 m、4 m、5 m 和 6 m 的结构进行静力分析.

拉索垂度影响下结构的跨中挠度如表 1 所示,上部桁架的上下弦杆的内力如图 9、图 10 所示.

表 1 拉索垂度影响下结构跨中挠度

拉索垂度/m	3	4	5	6
跨中挠度/mm	69.7	66.7	64.2	64.1

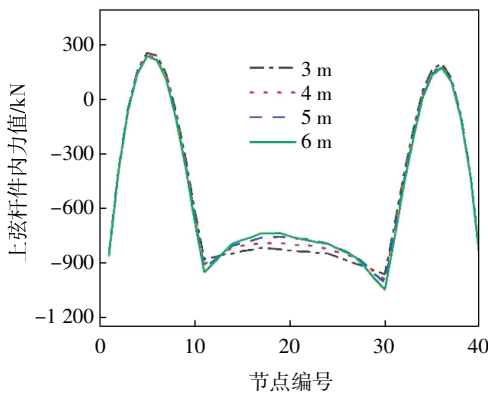


图 9 拉索垂度影响下上弦杆件内力图

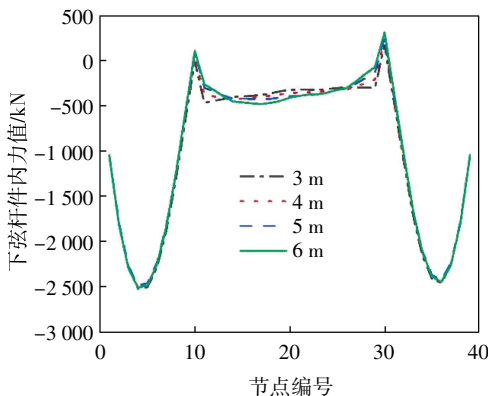


图 10 拉索垂度影响下下弦杆件内力图

由表 1 可得,拉索的垂度越大,跨中挠度越小. 随着拉索垂度的变化,每增加 1m 的垂度,结构的跨中挠度分别减小 4.3%、3.9%和 1.3%. 因此,在满足结构净空要求的前提下,选择 4 m 的垂度更合适.

由图 9 和图 10 可得,拉索垂度的变化只对拉索布置范围内的桁架杆件内力有影响. 上弦杆件所受的内力在拉索锚固位置附近随着拉索垂度的增加而增大,而在跨中位置随着拉索垂度的增加而减小;但下

弦杆件所受的内力在拉索锚固位置附近随着拉索垂度的增大而减小,在跨中位置随着拉索垂度的增大而增大. 以 4 m 垂度为例,上弦杆在锚固处的内力值为 -907 kN, 下弦杆在跨中的内力值为 -393 kN. 总体来说,拉索垂度的变化对结构内力影响并不显著.

4.3 预应力取值分析

柱面张弦桁架将柱面桁架与张弦结构相结合,既有上部抗弯受压的桁架又有下部抗拉的高强拉索,以撑杆相互连接,形成了一种更为高效的空间结构体系. 通过对下部拉索施加预应力,从而产生与结构在竖向荷载作用下相反的变形,对结构产生反拱作用. 预应力的取值过小对结构性能的优化效果小,取值过大又会使结构的反拱过大,增加结构的负担,拉索也可能因为达到强度限值而破坏. 因此,为了使刚性上弦与柔性下弦相互配合,将张弦结构的优势发挥到最大,预应力值的确定尤为关键.

为了得到满足设计要求的最经济的设计方案,通过多次迭代的方式,以结构变形来控制预应力的取值. 对于初始预张力的确定,结合参考书目中,对结构在自重和初始预应力的作用下,结构的形态接近于建筑施工图上的形态为目标^[14]. 利用 MIDAS GEN 有限元分析软件,采用初始内力法的施加方式,通过多次迭代试算,找到结构的平衡状态,最终确定结构的预应力值为 1 100 kN. 施加预应力对结构受力性能的影响如表 2 所示.

表 2 施加预应力对结构受力性能的影响

预应力情况	跨中挠度/mm	桁架上弦杆内力/kN	支座水平推力/kN	拉索内力均值/kN
未施加预应力	56.3	-800	649.3	741.9
施加预应力	38.9	-703	628.2	930.3

由表 2 可以得出,通过施加预应力,在最不利荷载工况下,跨中挠度由 56.3 mm 减小到 38.9 mm,减小幅度为 30.9%,减小了结构的变形;桁架上弦杆内力由 -800 kN 减小到了 -703 kN,减小幅度为 12%;支座处的水平推力由 649.3 kN 减小到 628.2 kN,在一定程度上减小了支座的水平推力;拉索的内力均值为 930 kN,满足最大索力不超过破断索力 40%~55%的要求,拉索处于安全的工作范围内,拉索也不会出现因松弛而退出工作的情况. 结构在恒荷载与活荷载标准值作用下的最大挠度也满足规范中注明的立体桁架跨度的 1/250 的要求.

4.4 拉索不同道数影响分析

分别建立单道拉索和双道拉索的布置方案,并与未布置拉索的桁架结构进行对比. 其中未布置拉索的

桁架结构为方案一,单道拉索为方案二,双道拉索为方案三.方案二拉索布置在11-30号节点处,共布置6道撑杆,跨中撑杆高度为12 m,结构净空为24.3 m,如图2所示;方案三的第一道拉索的锚固位置与方案二相同,第二道拉索锚固在17-24号节点处,共布置6道撑杆,跨中撑杆高度为4.2 m,结构净空为24.8 m,如图11所示.拉索的预应力值均为1 100 kN.

方案三可以使结构的净空得到相应的提高,结构跨中的净空增加了0.5 m,降低了撑杆高度,增加了撑杆的安全性^[15].

结构上部桁架的上弦杆件和下弦杆件内力值及结构跨中挠度计算结果如表3所示,3种方案的用钢量分析如表4所示.

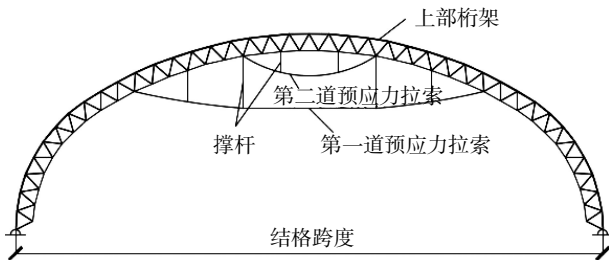


图11 方案三双道拉索结构体系剖面示意图

表3 工况一荷载作用下结构的跨中挠度及最大内力

方案编号	方案一	方案二	方案三
跨中挠度/mm	139	51	51
桁架上弦 最大内力/kN (杆件编号)	-1 209 (41号)	-1 051 (21号)	-1 025 (21号)
桁架下弦 最大内力/kN (杆件编号)	-3 224 (10号)	-2 346 (8号)	-2 414 (8号)
拉索内力/kN		1 084	1 005

表4 拉索布置方式的影响下用钢量分析表

拉索布置方案	方案一	方案二	方案三
用钢量/t	125.76	141.06	143.96

如表3所示,方案二和方案三相比于方案一跨中挠度减小了88 mm.可以得出,相比于不设置拉索的柱面桁架结构,布置拉索能够很大程度减小结构的竖向变形.

对比方案一与方案二内力结果,上弦杆件的内力峰值由-1 209 kN减小到-1 051 kN,减小了13%;下弦杆件的内力峰值由-3 224 kN减小到-2 346 kN,减小幅度为27%.下弦内力变化更明显主要是由于预应力

拉索的施加加大了下弦杆件的预压力作用.方案三的上弦内力峰值与拉索内力均小于方案二.

由表4可知,从用钢量的角度考虑,单道拉索的布置方案更经济,双道拉索的用钢量更高.

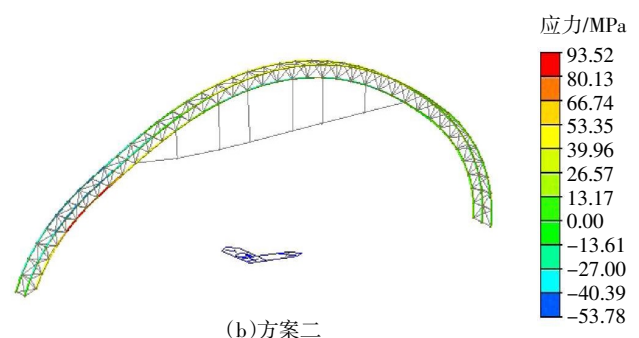
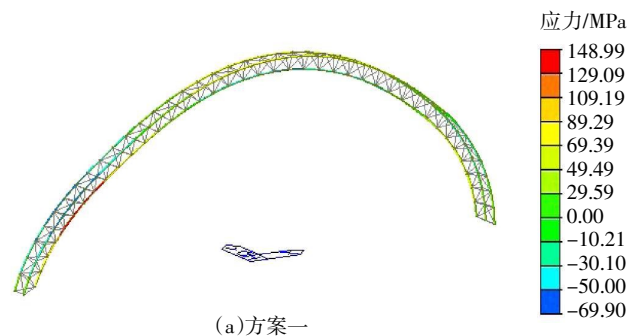
5 工况二荷载作用下结构验算

为了分析结构在极端风荷载作用下的安全性,引入工况二荷载:1.0×恒荷载+1.5×风荷载,且风荷载为百年一遇.设左侧风荷载作用在结构上,即“左吹右吸”,在此风荷载作用下对结构进行验算.4.4节中3种方案在工况二作用下,结构内力值和挠度值如表5所示,分别列举了上部桁架左右两侧的内力最大值.在工况二作用下梁单元应力及变形图如图12所示.

表5 工况二作用下结构的挠度及最大内力

方案编号	方案一	方案二	方案三
跨中挠度/mm	-95	-52	-62
桁架上弦 内力/kN (杆件编号)	-914 (13号)	-763 (13号)	-812 (13号)
桁架下弦 内力/kN (杆件编号)	889 (43号)	476 (43号)	549 (43号)
桁架下弦 内力/kN (杆件编号)	2 756 (12号)	1 717 (12号)	1 810 (12号)
桁架下弦 内力/kN (杆件编号)	1 267 (70号)	160 (70号)	231 (70号)
拉索内力/kN		158	226

注:1-40号杆件在结构左侧,41-79号杆件在结构右侧.



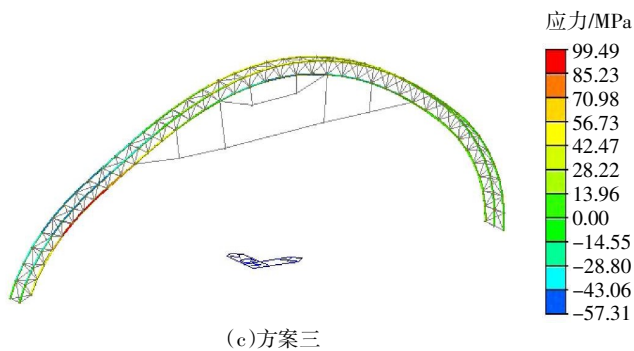


图 12 工况二梁单元应力图

由表 5 可知,结构在工况二作用下结构的跨中挠度由原本的向下转变为向上.方案二的结构跨中挠度比方案三小 10 mm,可知单道拉索在风荷载作用下对挠度控制的效果更好.

桁架上弦杆件在迎风面受风压力作用呈受压状态,在背风面受风吸力作用呈受拉状态,例如方案二左侧内力最大值为-763 kN,右侧内力最大值为 476 kN.与工况一作用相比,下弦杆件由受压转化为受拉状态,方案二与方案三的拉索内力均有一定程度减小.如方案二的拉索内力由 1 084 kN 减小到 158 kN,可知,拉索在风荷载作用下仍然处于工作状态.

由图 12 可知,结构在工况二作用下,迎风面受风压力处的下弦杆达到应力的最大值,例如方案三达到 99 MPa.

6 结 论

通过建立三心圆柱面张弦桁架的结构模型,改变影响结构静力性能的相关参数,进行静力分析,得出以下结论:

(1)在竖向荷载作用下,增大预应力拉索的布置范围和垂度都会使结构的跨中挠度减小,杆件所受的内力值减小.在实际工程中也应根据结构的净空要求综合考虑.

(2)分析拉索布置不同道数的影响,单道拉索和双道拉索均能大幅度减小结构跨中挠度和内力峰值,优化结构的受力性能,且对下弦杆件作用效果更明显.从经济性的角度考虑,单道拉索的布置方案优于双道

拉索的布置方案.

(3)在工况二风吸力的作用下,结构的跨中挠度由原本的向下转变为向上,部分杆件内力也由受压转化为受拉状态.杆件的应力最大值出现在迎风面的下弦杆件处.在结构设计时应特别注意.

参考文献:

- [1] 李峰,姚建,景华.三心圆柱面巨型网络结构静力性能研究[J].建筑结构,2021,51(20):82-87.
- [2] MASAO S. Principle of beam string structure, word congress on shell and spatial structure[C]//Proceeding of IASS Symposium. Madrid, Spain, 1979: 617-638.
- [3] MASAO S, AKIRA O. The role of string in hybrid string structure[J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 756-769.
- [4] 陈志华.张弦结构体系研究进展及发展展望[J].工业建筑, 2015, 45(8): 1-9.
- [5] 董石麟,赵阳.三十年来中国现代大跨空间结构的体系发展与创新[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会.第十四届空间结构学术会议论文集.浙江,中国,2012: 19-35.
- [6] 孙求知,许建立,李亚明,等.合肥滨湖国际会展中心综合馆大跨度钢-铝组合张弦空间桁架屋盖体系设计技术研究[J].建筑结构,2023,53(1):23-28.
- [7] 胡成功,赵奇.浅析几种储煤场储煤形式的优缺点[J].露天采矿技术,2013(2):88-90.
- [8] 吴碧野,孙寅健.某电厂 200 m 跨度煤场封闭钢结构设计与分析[J].建筑结构,2016(增刊 1):514-518.
- [9] 涂建山.新型三心圆弧拱设计方法[J].煤炭工程,2008(10): 12-14.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部:GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].北京:北京建筑工业出版社,2012.
- [11] 古莉.超大跨张弦桁架结构分析设计方法研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [12] 王树,黄季阳,刘鑫刚,等.大跨度煤场封闭结构预应力体系研究[J].建筑结构学报,2022,43(5):51-61.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部:JGJ 7—2010 空间网络结构技术规程[S].北京:北京建筑工业出版社,2010.
- [14] 曹正罡.大跨度预应力钢结构干煤棚设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [15] 侯欣琛,白正仙,徐常泽.双层弦张弦梁的受力性能分析[C]//天津大学.第六届全国现代结构工程学术研讨会论文集.北京:工业建筑杂志社,2006:220-225.