

弦支穹顶结构的稳定性分析^{*}陈志华 窦开亮 左晨然
(天津大学建筑工程学院 300072)

[摘要] 用非线性有限元法编制了稳定分析程序,进行了算例分析、验证。以跨度 35.4m、矢高 4.6m 的弦支穹顶为例,用自编的程序和 ANSYS 进行了弦支穹顶的特征值屈曲、非线性屈曲分析,初始缺陷的影响分析和半跨荷载作用下的结构稳定性分析。同时,还讨论了撑杆长度对弦支穹顶结构稳定性的影响。

[关键词] 弦支穹顶 稳定性分析 屈曲模态 初始缺陷 半跨荷载

A nonlinear finite element program for stability analysis of suspensome is carried out. Some examples are analyzed by the program. The eigenvalue buckling, nonlinear buckling, influence of initial defect and stability features under half-span load of a suspensome with span of 35.4m and rise of 4.6m are analyzed using ANSYS and the compiled program. The influence of strut to the stability of suspensome is also discussed.

Keywords suspensome; stability analysis; buckling model; initial defect; half span load

穹顶网壳屈曲后,结构的承载能力急剧下降,造成整个结构的破坏^[1-3]。因此,对弦支穹顶进行稳定性分析同样是十分必要的。利用编制的专用程序和 ANSYS 软件对弦支穹顶结构进行稳定性研究。对弦支穹顶进行特征值屈曲和非线性屈曲分析,并考虑初始缺陷、半跨荷载以及撑杆长度等因素对弦支穹顶稳定性的影响,以全面了解弦支穹顶这种新型的复合结构。

一、计算模型

对弦支穹顶结构来讲,最基本的要求就是每一层撑杆上部连接的单层网壳节点必须在同一水平面上,即每层撑杆下部也在同一个水平面上。同时,为了使径向索的布置更为有利,应尽可能使相邻两层节点交错布置。有利于弦支穹顶结构实现的单层球面网格形式莫过于凯威特和联方型了。因此,以文[7]中图3所示的凯威特-联方型组合的单层球面网壳为基础的弦支穹顶为主要研究对象,不同的是索的弹性模量 $E_2 = 1.8 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 。在实际结构中,各圈的环索和径向索有时是一整根索,有时是分段的,在计算中,都将其设定为一段一段的。

二、网壳稳定性非线性有限元程序的编制

根据结构的稳定性理论,采用 FORTRAN 结构化程序设计语言,编制了网壳稳定性非线性有限元程序。程序可以对铰接的网壳结构进行荷载-位移路径的全过程跟踪,并可分析具有初始缺陷的网壳结构的稳定性。在进行全过程路径跟踪中,程序可以求得精确的临界荷载和精确的临界点位置。自编程序可以控制出入口,前后处理和结果分析直观,并且中间过程可以输出,全过程分析更有效。为了验证自编程序的正确性,

将其计算结果同 ANSYS 的结果进行了对比。

图1所示的60单元铰接穹顶结构为比较复杂的分枝点屈曲的典型结构。采用自编程序和 ANSYS 软件分别进行分析。

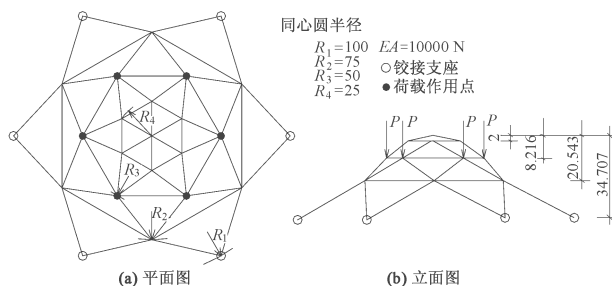


图1 60单元铰接穹顶

ANSYS 程序给出的基本平衡路径的上临界荷载为 31.3N,下临界荷载为 -25.52N。自编程序给出的基本平衡路径的上临界荷载为 31.2N,下临界荷载为 -25.32N。文[6]给出的上临界荷载为 31.5N,下临界荷载为 -25.33N。计算结果相当吻合。

图2为 ANSYS 和自编程序分别计算的荷载-位移曲线的比较,两者计算结果是一致的。图4为分枝屈曲后的荷载-位移曲线。

三、特征值屈曲分析

特征值屈曲分析可以为非线性稳定分析提供可供参考的临界荷载,且可求得第一阶屈曲模态,作为缺陷分析的依据。

从表1中可以看出,对于弦支穹顶来说,施加的预

^{*} 国家自然科学基金项目:50008010

不同预应力弦支穹顶和单层网壳屈服特征值 表 1

屈曲模态		第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
单层网壳		9.910	10.994	10.994	13.459
弦支穹顶	$P=0\text{ kN}$	9.546	10.704	10.704	14.500
	$P=50\text{ kN}$	11.794	13.168	13.168	17.591
	$P=100\text{ kN}$	15.489	17.179	17.179	20.739

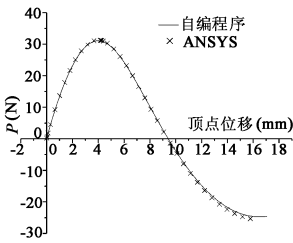


图 2 自编程序与 ANSYS 计算结果的比较

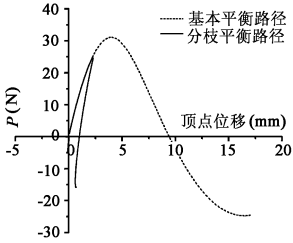


图 3 分枝屈曲后的 荷载-位移曲线

应力越大,其第一阶特征值也就越大。比较单层网壳和未施加预应力的弦支穹顶的特征值,可以发现单层网壳和未施加预应力的弦支穹顶的特征值非常接近,单层网壳的前三阶特征值甚至都超过了未施加预应力的弦支穹顶。这是因为特征值屈曲分析是一种线性分析,忽略了非线性的影响,因此特征值屈曲分析经常得出非保守的结果。

由于篇幅限制,在此仅给出施加 100kN 预应力的弦支穹顶的前四阶屈曲模态的 ANSYS 分析图(图 4)以作比较。在程序中,采用 Link 8 单元作为杆单元,采用 Link 10 单元作为索单元,单元位置与参数见文[7]。

四、非线性屈曲分析

对未施加预应力和施加预应力的弦支穹顶进行几何非线性全过程分析,可以求出网壳结构可以承受的极限荷载,并可分析网壳结构的荷载-位移变化过程,即进行平衡路径的跟踪。利用 ANSYS 程序可以得到未施加预应力以及施加预应力的弦支穹顶的 8 个节点的荷载-位移全过程曲线,弦支穹顶模型及节点编号参见文[7]中图 3。利用本文程序进行全过程分析也可以得到弦支穹顶在加荷过程中若干时刻结构的位移形

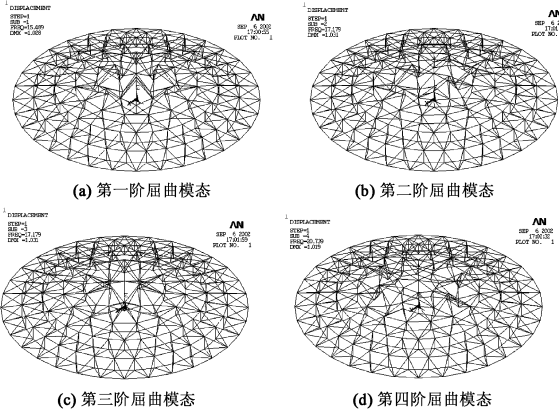


图 4 弦支穹顶 $P=100\text{ kN}$ 前四阶屈曲模态

态。由于图示众多,在此不一一列出。从图 5 可以看到,未加预应力的结构首先在节点 3 处发生屈曲,在弦支穹顶上层的单层网壳的第三圈,与节点 3 类似的一圈节点都发生了失稳,这是一种环状失稳。在前一节的特征值屈曲分析中,未施加预应力的弦支穹顶的失稳发生在单层网壳的第六圈节点和第五圈的一圈相隔节点。虽然两种分析都属于环状失稳,但是失稳的位置却不一样,可见特征值屈曲分析只可作为非线性稳定分析的参考。

施加预应力的弦支穹顶结构首先在节点 5 处开始失稳,见图 5,同未施加预拉力的弦支穹顶的一样也为一种环状失稳,所不同的是施加了预应力的弦支穹顶的失稳位置更靠近中心。从图中还可以看出,其失稳临界荷载也高于未施加预拉力的弦支穹顶的临界荷载,这说明预拉力改善了整个结构的受力性能,即提高了极限承载力。

同样,从未施加与施加预应力的弦支穹顶的屈曲模态中也可以看到后者的失稳位置更靠近中心。由于篇幅限制,图示从略。

表 2 为单层网壳和不同预应力下弦支穹顶进行特征值屈曲分析和非线性

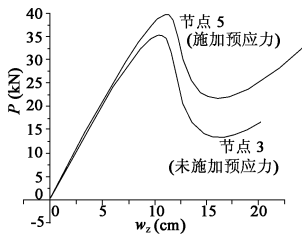


图 5 荷载-位移曲线

屈曲分析得到的临界荷载。从表中可以看出,特征值屈曲分析的临界荷载要高于非线性分析的临界荷载,因此特征值屈曲分析的结果具有非保守性;另外还可以看出弦支穹顶的临界荷载要高于单层网壳的极限荷载,而且随着预拉力的增加,临界荷载也随之增大。

不同预应力下弦支穹顶和单层网壳特征值

屈曲与非线性屈曲临界荷载比较 kN) 表 2

极限承载力	单层网壳	弦支穹顶最外圈环索预拉力		
		0	50	100
特征值屈曲分析	49.55	47.73	58.97	77.45
非线性屈曲分析	31.22	35.41	38.85	40.61

五、初始缺陷、半跨荷载、撑杆长度等对弦支穹顶稳定性的影响

1. 初始缺陷的影响

初始缺陷包括结构的几何偏差、杆件的初应力、材料缺陷及荷载偏心等等。一般认为,结构的初始偏差对结构的稳定性影响远大于其它缺陷的影响。采用一致缺陷模态法对弦支穹顶结构及相应的单层球面网壳进行了初始缺陷分析。

根据屈曲模态的定义,只要求出屈曲前、后两个邻近状态之差即为该临界点屈曲模态的精确形式。图 6(a) 单层网壳的屈曲模态显示,初始缺陷极大地影响

了结构的临界荷载值,随着初始缺陷的增大,结构的临界荷载值下降得很快,而弦支穹顶临界荷载的下降速度远远低于单层网壳临界荷载的下降速度。当初始缺陷分别取 3,6mm 时,单层网壳的临界荷载分别为无初始缺陷单层网壳的 49.28%和 24.12%;弦支穹顶则分别为 95.6%和 82.06%。由此可以看出,弦支穹顶对初始缺陷的敏感度要远远低于单层网壳。

2. 半跨荷载的影响

网壳屋盖有时弦支穹顶需要考虑半跨雪荷载的影响。从承受半跨均布荷载在临界点处的变形图中可以看出,承受荷载的半跨结构变形较大,未承受外荷载的半跨变形相对要小得多。通过分析结构在临界状态的杆件受力情况发现,部分的索单元已经完全丧失了预拉力,从而使整个结构的刚度矩阵发生变化。在分析中,结构的失稳并不是因为节点位移的增大所致,而是因为结构中索单元刚度的丧失而导致结构的失稳。

在弦支穹顶这种索杆单元组成的结构中,索拉力的存在加强了结构的整体刚度,从而提高了整体结构的稳定性,一旦索拉力丧失,就会导致索退出整个工作,结构从而发生失稳。所以,在弦支穹顶的设计中一定要考虑多种荷载组合情况,必要时加大索的预拉力,来避免索拉力的丧失。

3. 撑杆长度的影响

在弦支穹顶结构中,撑杆的作用主要是连接索,并将索中的力传递到上部单层网壳中,以达到调整上部单层网壳受力的目的。从减小支座受力的角度来讲,当径向索的应力一定时,该应力在水平方向上的分量随 β 角的减小而增大。而撑杆的长度与 β 角的大小成正比,因此对于与水平面夹角 α 一定的上弦杆来讲,撑杆越短,越有助于减小结构对下一层单元的水平推力。同时从减小受压杆长度的角度来讲,撑杆长度的减小也是有利的。但从对上部单层网壳杆件受力状况的改变角度来讲,撑杆的长度越长,也就是 β 角越大,结构上部单层网壳的受力状况就越好。

如果保持环索的预拉力不变,则径向索对单层网壳的水平拉力并不随着 β 角的改变而改变,但是撑杆对单层网壳的向上的力则与 β 角成正比。为此,特别对 β 角为 $11^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 的弦支穹顶进行了稳定性分析。

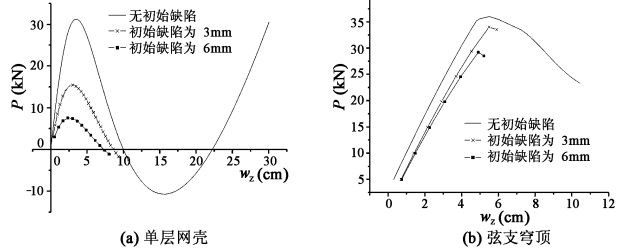


图6 初始缺陷对临界荷载的影响

不同 β 角的弦支穹顶 由外向内各圈 撑杆长度 (m) 表 3

夹角 β	第一圈	第二圈	第三圈	第四圈	第五圈
11°	2.088	1.777	1.490	1.227	0.977
20°	2.548	2.237	1.950	1.687	1.437
30°	3.176	2.865	2.578	2.315	2.065

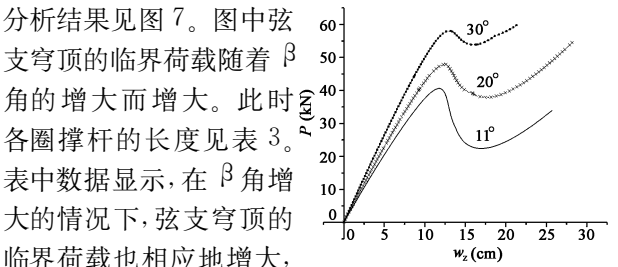


图7 不同 β 角的临界荷载

分析结果见图 7。图中弦支穹顶的临界荷载随着 β 角的增大而增大。此时各圈撑杆的长度见表 3。表中数据显示,在 β 角增大的情况下,弦支穹顶的临界荷载也相应地增大,各圈撑杆的长度也增加许多,使其长细比也相应增大,由于撑杆承受的都为压力,这对于其稳定性是不利的。另外随着撑杆长度的增加,径向索的长度也必然随之增加。因此,在弦支穹顶单层网壳几何形式和荷载确定的情况下,选择合适的撑杆长度也是非常重要的。总的原则是在保证安全的前提下,尽量节省材料,对整个结构进行优化。

六、结论

以几何非线性有限元法为基础,采用 ANSYS 软件和专用非线性有限元网壳稳定性分析程序进行弦支穹顶的特征值屈曲分析、非线性屈曲分析、初始缺陷的影响分析和半跨荷载作用下的结构稳定性分析。分析发现:弦支穹顶的预应力越大,其第一阶特征值也就越大,单层网壳和未施加预应力的弦支穹顶的特征值非常接近,甚至单层网壳的前三阶特征值都超过了未施加预应力的弦支穹顶;施加预应力的弦支穹顶同未施加预拉力的弦支穹顶一样,失稳形式为一种环状失稳,所不同的是施加了预应力的弦支穹顶的失稳位置更靠近中心,其失稳临界荷载也高于未施加预拉力的弦支穹顶的临界荷载;弦支穹顶对初始缺陷的敏感度要远远低于单层网壳;撑杆长度对弦支穹顶的受力特性和经济性有较大影响。

参 考 文 献

1. 沈士钊,陈 昕.网壳结构稳定性.科学出版社,1999.
2. 董石麟,钱若军.空间结构分析理论与计算方法.中国建筑工业出版社,2000.
3. 蓝 天,张毅刚.大跨度屋盖结构抗震设计.中国建筑工业出版社,2000.
4. 刘剔良.现代空间结构.天津大学出版社,2003.
5. 尹德钰,刘善维,钱若军.网壳结构设计.中国建筑工业出版社,1996.
6. Choong K K, Hangai Y. Review on methods of bifurcation analysis for geometrically nonlinear structures. Bulletin of IASS, 1993, 34 (112).
7. 陈志华.弦支穹顶结构体系及其结构特性分析.建筑结构,2004, 34(5).