

索穹顶结构的有限元分析及其在农业建筑中的应用*

宋娟, 王民, 王心勇

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 根据非线性有限元理论研究了索穹顶结构的受力情况, 用有限元分析软件 ANSYS 建立了某农用仓库的索穹顶结构模型, 探讨了其在不同预应力水平作用下的受力情况, 分析了索和杆在不同荷载下的内力变化情况以及对结构稳定性的影响。结果表明该模型受力合理, 可以应用于工程实践。

[关键词] 索穹顶结构; 结构稳定性; 有限元分析; 农用建筑

[中图分类号] TU 311.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)06-0151-04

索穹顶就是索-杆组合的预应力铰接体系, 属于张拉整体结构。“张拉整体”(Tensegrity)的概念是美国著名建筑师富勒(Fuller)的发明, 它是“张拉”(tensile)和“整体”(integrity)的缩合^[1-2]。在富勒创造的富勒张拉整体穹顶的基础上, 美国已故著名工程师盖格尔(Geiger)发明了支承于周边受压环梁上的一种索杆预应力张拉整体穹顶体系, 即索穹顶^[3]。这种结构非常适用于大跨度建筑的屋盖设计, 1992 年在美国建造了世界上最大的索穹顶体育馆——乔治亚穹顶(Georgia Dome), 其平面为椭圆形(193 m × 240 m), 这种双曲抛物面型张拉整体索穹顶的耗钢量极少(还不到 30 kg/m²)^[4]。作为一种受力合理、结构效率高的结构体系, 索穹顶结构同时集新材料、新技术、新工艺和高效率于一体, 被认为是代表当今国际空间结构发展最高水平的结构形式^[1]。但到目前为止, 这种结构还只是应用于体育建筑和展览建筑, 在其他方面还未得到尝试。本文根据非线性有限元理论, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立了某大型农用仓库的索穹顶结构模型, 并对其进行了受力分析, 探讨了在不同预应力水平作用下的力学性能, 以期将索穹顶结构引入农用大型仓库的建造提供参考。

1 基本理论

1.1 几何非线性问题

索穹顶结构是典型的索杆预应力结构, 具有明

显的几何非线性特征。一般应从以下几方面考虑其几何非线性^[5]:

1) 由于是柔性体系, 单元构件约束较少, 结构内部存在机构位移, 必须依靠预应力提供刚度, 通常形成的刚度矩阵是奇异的;

2) 在成形过程和荷载分析时应考虑大位移的影响;

3) 同索杆张力结构一样, 索穹顶结构一般不会发生结构整体失稳破坏, 通常是由于大量索的松弛, 使结构变得松散而丧失承载能力。

1.2 几何非线性有限元法

几何非线性有限元法就是根据能量变分原理或虚功原理, 利用基本方程建立以节点位移为未知量的非线性有限元方程, 以及讨论求解该方程所涉及的主要计算公式和计算过程^[6]。因为索穹顶结构具有明显的几何非线性特性, 故常采用增量非线性有限元分析方法。一般采用全 Lagrange(TL)法, 这种方法以物质坐标为变量, 以初始物形为参考系, 单元的局部坐标始终固定在结构发生变形之前的位置上。

TL 法的有限元方程可表示为:

$$(K_0 + K_L + K_S)\Delta d = P - P_s, \quad (1)$$

式中, K_0 为初应力矩阵; K_L 为线性刚度矩阵; K_S 为大位移矩阵; Δd 为 Δt 时间步长内结构的节点位移矢量; P 为时刻 $t + \Delta t$ 载荷的等效节点力矢量; P_s 为时刻 t 的应力场 S 的等效节点力矢量。

* [收稿日期] 2005-12-26

[作者简介] 宋娟(1979-), 女, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事建筑结构工程研究。

方程(1)可采用增量的New ton-Rap son 法进行求解。

1.3 索穹顶结构的失效模式

索穹顶结构的失效模式有3种,包括2种失稳和1种破坏^[7],即压杆的屈曲失稳、索的松弛失稳和拉索的拉断破坏。

1.3.1 压杆屈曲失稳 索穹顶结构中的杆是双向约束构件,但由于张拉整体结构特有的“压杆的孤岛存在于拉杆的海洋中”^[6]结构思想,杆只能承受压力,不能受拉。压杆的长度及长细比对结构的极限承载力有很大影响,节点对受压杆的约束性质也是正确计算受压杆件稳定性的重要因素。当压杆的受力随着外荷载的增大达到其临界荷载时,压杆就会产生屈曲破坏,从而使整个结构丧失承载能力。

1.3.2 索的松弛失稳和破断 由于索的破坏是脆性的,而且索只能承受拉力而不能受压,要防止索的破坏,应该控制拉索的拉力。当外荷载增大到索的破坏荷载时就会造成索的破断,索也会因为预应力的减小而松弛,从而使结构失稳。

2 索穹顶结构在农业建筑中的应用

“存储功能”是现代物流中心的必备功能,物流中心对于带动城市、地区乃至区域经济的发展具有重要作用,然而中国的物流业整体现代化水平低,与国外发达国家相比还有一定差距,伴随着世界经济一体化趋势的加快和中国经济的快速发展,作为“涉农”产品生产和需求大国,中国必将在未来几年内建立大量的农业储藏类建筑^[8]。而索穹顶结构作为目前国际上最先进的大跨度结构形式,不仅跨度大、用料省,施工和拆卸快速而方便,所用钢材可重新利用,不会造成能源的浪费,而且由于其屋面覆盖物是膜材,透光性好,结构自然形成的穹顶便于屋面排水,可以保证储藏物安全不受损伤。索穹顶结构的这些特点使其较传统结构更适合于建造大型仓库。为此,本文根据Pellegrino^[9]模型建立某农用仓库结构,如图1所示,并对其进行受力分析,以期证明该仓库在一定预应力及荷载条件下是否可以达到正常工作的要求。

2.1 模型建立

分析时索和杆单元分别采用L NK10单元和L NK8单元来模拟。L NK10是3维杆单向轴拉(或压)单元,具有双线性刚度矩阵的特性。对于单向轴拉,如果单元变成受压,则硬度消失。在拉(或压)中都没有抗弯能力,而具有应力强化和大变形的能

力。L NK8是3维杆单轴拉压单元,作为铰接结构,没有弯矩,而具有塑性、徐变、膨胀、应力强化和大变形的特性。两种单元每个节点都有 x, y, z 3个方向的自由度。

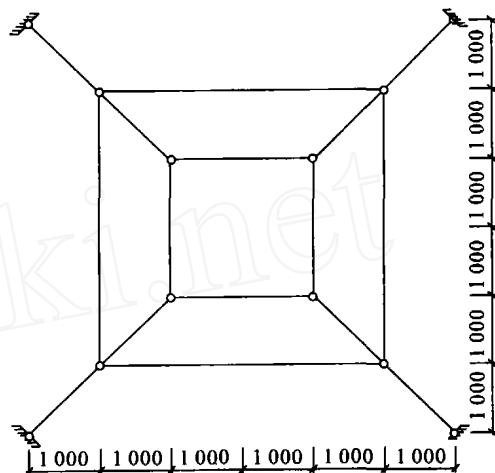


图1 索穹顶结构模型平面图

Fig. 1 Plane geometry of cable dome model

结构中索的弹性模量 $E_1 = 1.8 \times 10^{11}$ Pa, 截面面积 $A_1 = 78.54 \text{ mm}^2$ (直径为10 mm); 杆的弹性模量 $E_2 = 2.06 \times 10^{11}$ Pa, 截面面积 $A_2 = 1600 \text{ mm}^2$ 。分析时索与杆均取实际的弹性模量,泊松比均为0.33。结构索的预应力分别取12, 60, 120和180 MPa, 杆不施加预应力。考虑到结构覆盖物为极轻的薄膜,可忽略屋面刚度,由此引起的误差将使结构设计偏于安全^[4]。荷载仅考虑节点荷载,由于屋面具有一定的坡度,所以在索与杆的连接处(即节点上)分别施加竖向荷载 P , 1.5 P (图2),分析时取1/4结构模型,单元编号示意图如图3所示。

2.2 预应力对结构稳定性的影响

在用ANSYS软件分析中,当结构预应力取12 MPa时,因为预应力值太小,外荷载 P 取0.6 N时,部分杆产生拉应力,这与杆只能受压相矛盾,因此结构处于不稳定状态;外荷载 P 取0.8 N时,压杆全部受拉,部分索松弛,结构整体丧失稳定性。当预应力增加到60 MPa时,外荷载为0.6 N时,压杆就全部受拉,但随着外荷载的增大,索并没有产生松弛现象。

随着预应力的增加,当施加的预应力为120 MPa时,结构处于正常的能够抵抗一定外荷载的状态。各杆件也因结构的对称性,其受力在小于1 kN时是完全对称的,继续增大后,由于结构受荷过大,

承载力逐渐达到极限,单元受力不完全对称。当受力为 1.9 kN 时,压杆产生拉力,结构失稳。取预应力值为 180 MPa 时,由于索和杆初始刚度更大,结构

各单元内力变化情况与预应力为 120 MPa 时基本相同,只是结构的承载能力和杆件受力的对称性更加明显。

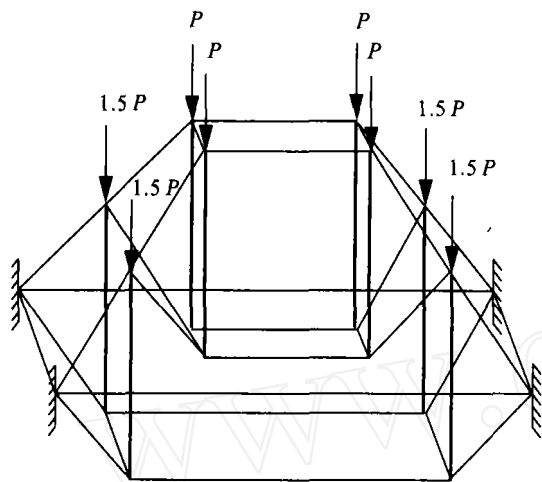


图 2 索穹顶结构模型三维图

Fig. 2 Three-dimensional geometry of cable dome model

由于预应力值的大小是由构件材料及初始张拉工艺决定的,在没有预应力时,索穹顶既没有确定的形状,也没有结构刚度,不能承受任何荷载。预应力越大,其承载力越高,节点位移愈小,但增加了拉索的初始内力,尤其是斜索和环索,易于造成斜索和环

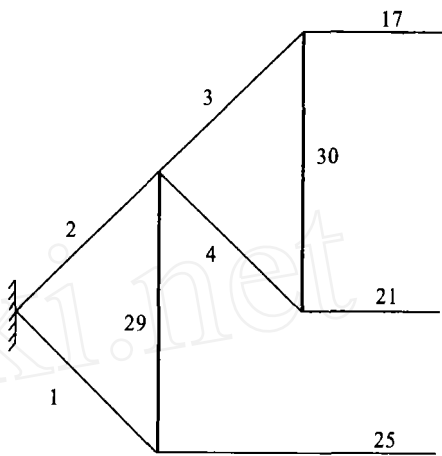


图 3 索穹顶结构单元编号示意图

Fig. 3 Numbers of the elements of cable dome model

索的破断。所以考虑综合因素认为,预应力取值为 120 MPa 时比较符合工程实际。

因为该模型结构与受力都是对称的,所以只需绘出预应力值为 120 MPa 时,1/4 结构中各单元在不同外荷载作用下的内力变化图,见图 4、5。

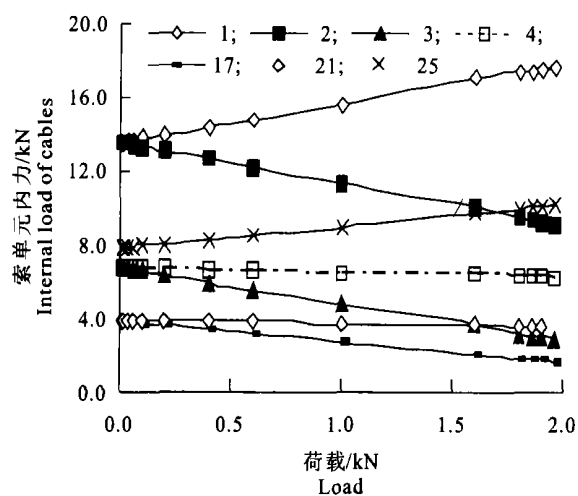


图 4 7 个索单元的荷载-内力变化关系

Fig. 4 Load-internal force of seven cables

2.3 索单元受力分析

从图 4 可以看出,2 号脊索和 3 号脊索的内力随荷载增大而逐渐减小,其变化规律基本呈线性分布,变化曲线的斜率也基本一样。当脊索内力减为零时,脊索就会松弛,结构失效。所以可通过增加脊索

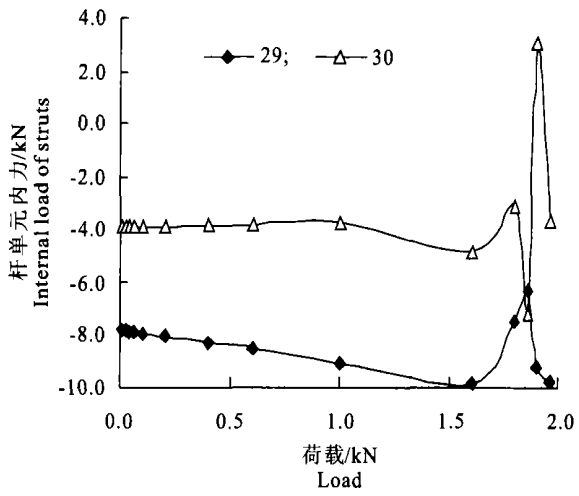


图 5 2 个杆单元的荷载-内力变化关系

Fig. 5 Load-internal force of two struts

的预应力来减缓脊索的松弛,从而增加结构的承载力。

1 号斜索内力随荷载增大而增大,4 号斜索内力随荷载变化幅度不是很大,但当外荷载足够大时,结构有可能因为 1 号索达到极限承载力被拉断或 4 号

索内力减为零产生松弛而失效。

17 和 21 号环索内力均随荷载增大基本保持不变,稍有减小趋势,25 号环索内力随荷载增大而增大,由此引起的结构失效模式同斜索一样。

2.4 杆单元受力分析

由图 5 可知,29 号压杆的内力随荷载增大整体呈上升趋势,30 号压杆内力则随荷载的增大整体呈下降趋势。只是当荷载增加到 1.86 kN 时,29 号压杆产生最小内力 - 6.3 kN,30 号压杆产生最大内力 - 7.2 kN。当荷载继续增加到 1.9 kN 时,29 号压杆内力变大,30 号压杆产生受拉力,结构失效。从图 5 也可以看出,外侧压杆的承载力较内侧的高,所以可以通过增加内侧压杆的预应力来提高结构的承载力。

3 结 论

(1) 索穹顶结构对预应力水平有一定的要求,只有在一定的预应力作用下,结构才能具备一定的刚度,并承受相应的荷载。

(2) 随着预应力水平的增加,各索的初始内力逐渐增大,且基本上呈线性关系。

(3) 随着荷载的增加,结构的脊索和部分斜索的内力呈下降趋势,外侧压杆的内力呈上升趋势,内侧压杆的内力呈下降趋势。

(4) 该结构模型受力合理,能够承受一定的荷载,可以用来建造农用仓库。

[参考文献]

- [1] 袁行飞,刘武文,董石麟.一种新型大跨空间结构——张拉整体索穹顶[J].新建筑,2002(2):74-75
- [2] 夏绍华,董明,钱若军.全张力、张力集成体系的基本概况[J].空间结构,1997,3(2):3-9
- [3] 刘永清,黄呈伟.索穹顶结构计算分析和节点与构件控制[J].淮阴工学院学报,2003,12(2):42-46
- [4] 袁行飞,董石麟.索穹顶结构有限元分析及实验研究[J].浙江大学学报:工学版,2004,38(5):587-592
- [5] 符刚.张拉整体结构的分析理论及其模型试验研究[D].浙江杭州:浙江大学,2003
- [6] 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
- [7] 唐建民,沈祖炎.索穹顶结构的静力性状分析[J].空间结构,1998,4(3):17-25
- [8] 刘光洪.构建现代粮食物流中心的思考[J].粮食科技与经济,2003,28(3):17-18
- [9] Pellegrino S. A class of tensegrity domes[J]. International Journal of Space Structures, 1992, 7(2): 127-142

Finite analysis of cable dome and its application in agricultural structure

SONG Juan, WANG Min, WANG Xin-yong

(College of Hydraulic and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the paper, the mechanical properties of cable dome was studied according to nonlinear finite element theory, a model of geoponic depository which attributes to cable dome structure was constituted by using the ANSYS software, the mechanical conditions of the structure under different prestress was discussed, and the inner force variation conditions under different force and its influence on the stability of the structure were analyzed. The results prove that the mechanics properties of the model is reasonable and it can be used in project.

Key words: cable dome structure; stability of structure; finite element analysis; agricultural structure