

树形结构稳定性分析

袁海峰 乐慈 季圆圆

(天津市建筑设计院 天津市 300074)

摘要: 结合工程实例对树形进行线性屈曲分析, 在线性屈曲分析的基础上考虑初始缺陷、几何非线性和材料非线性作进一步的屈曲分析, 根据屈曲荷载位移曲线得到十字柱在整体弹性约束作用下的极限承载力。由柱的极限荷载反推出变截面十字柱的计算长度系数。为树形结构及非规则截面的承载力计算提供参考。

关键词: 树形结构 非线性屈曲分析 十字柱 极限承载力

一、引言

树形结构是德国建筑师提出的一种新型的结构形式, 该结构形式具有造型新颖优美、受力简捷合理的特点, 因而受到建筑师的普遍青睐, 在工程实践中得到了较多应用。近年来国内外树状结构在各类建筑中应用越来越多, 对其承载力的计算尚未形成对工程实践具有普遍指导意义的规范方法, 这在一定程度上制约了这种新型结构体系应用。目前国内外的研究集中于树状结构找形方法、受力性能、节点构造和施工工艺等方面。本文结合工程实例探讨其极限承载力计算方法。

二、有限元模型屈曲分析

(一) 模型简介

以天津国际会展中心东入口大厅项目为工程背景, 重点研究树形结构承载力计算方法。入口大厅是由 20 个 14MX14M 树形结构通过连系梁连接成一个整体作为大厅屋面, 树形结构树干部分采用变截面十字柱, 截面由 1600X1600X300X300X15X15 到 800X800X300X300X15X15, 二级分叉采用箱型变截面从箱 740X300X10X10 到箱 580X300X10X10, 三级分叉采用箱型截面, 外部四角分叉截面为箱 560X300X5X5, 外侧中部分叉截面为箱 360X300X5X5, 内部分叉截面为箱 440X300X5X5。单体结构如图 1, 整体模型如图 2, 建筑效果图如图 3。树干高度 11.8m, 二级分叉高度 2.95m, 三级分叉高度 5.87m, 整体高度 20.62m。



图 1. 树形结构单体图

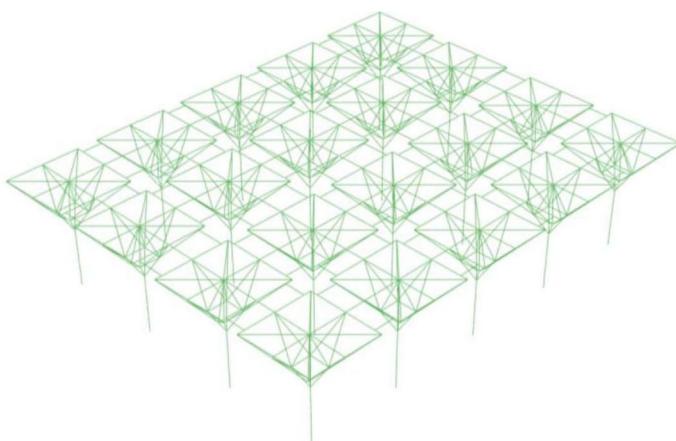


图 2. 整体模型单线图

(二) 线性屈曲分析

线特征值屈曲常用于理想线性结构的稳定性分析, 它以线性理论为基础, 假定结构在荷载作用下的变形



图 3. 建筑效果图

可以忽略，分析过程中采用初始构形作为参考基准。由于实际结构存在着初始缺陷，因此，特征值屈曲通常会高估结构的稳定承载力。但特征值屈曲得到的结构临界荷载和相应的屈曲模态可以作为下一步分析的参考，为非线性分析中施加初始缺陷或扰动位移提供依据，因此对结构进行特征值屈曲分析是必要的。线性屈曲分析可以找到结构容易发生屈曲的薄弱部位。图 3-图 5 所示为线性屈曲分析得到结构前三阶失稳模态，可以看出前两阶失稳均为整体屈曲，均是树干均往一个方向屈曲，第三阶屈曲显示的反对称整体屈曲。屈曲荷载系数分别为 75.88、77.51、81.41。

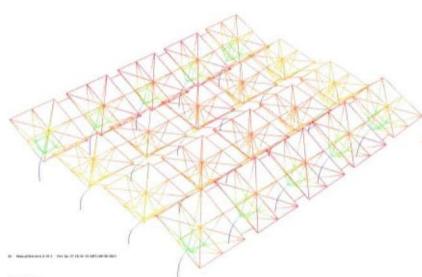


图 4. 1 阶屈曲模态

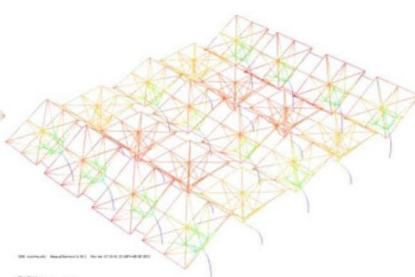


图 5. 2 阶屈曲模态

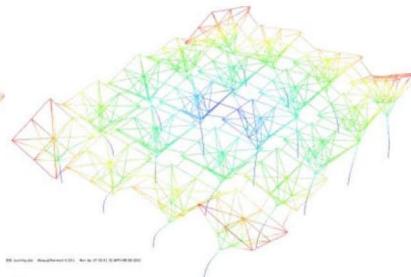


图 6. 3 阶屈曲模态

从线性屈曲分析数据可知，结构整体承载力较高，整体性较强。通过连系梁能够较好地把各个单体连成一个整体。树干顶部是整个结构中最容易失稳的部位。

(三) 非线性屈曲分析

非线性稳定分析是以静力刚度准则来判断结构稳定性，即以切线刚度矩阵是否正定来判断结构的稳定状态，结构计算采用 LDL^T 法，根据矩阵 $[D]$ 主元符号变化来判定临界点^[2]。

本文按一致缺陷模态法考虑结构初始几何缺陷的影响，初始缺陷取跨度的 1/300，对树形结构进行非线性分析。非线性屈曲分析是在分析过程中根据每个荷载步的分析结果不断修正结构的刚度矩阵，并且可以考虑初始几何缺陷、材料非线性等因素的影响，所得到的结果也更加符合结构的真实失稳模式。本文采用弧长法进行分析，用结构的最低阶屈曲模态来模拟结构的初始缺陷分布。只考虑几何非线性的分析结果如图6所示，其中图7为变形最大节点位移-荷载曲线。由图7可以看出，屈曲荷载系数接近68，但在位移达0.4m后荷载已经开始减小而位移快速增大，说明结构已经失稳。结构整体变形较大，杆件应变较大，部分杆件可能已经进入塑性。结构考虑几何非线性的荷载系数与线性屈曲荷载系数较为接近，其原因是结构竖向刚

度较好，竖向荷载作用下变形较小，几何非线性效应不明显。图8给出了同时考虑几何非线性和材料非线性的分析结果，可以看出，结构的失稳模态与仅考虑几何非线性的分析结果的趋势基本一致，但结构的承载力显著下降，屈曲荷载系数为20。该值仍远大于《空间网格技术规程》规定的2.0，主要该结构安全冗余度较高，荷载作用下不易发生杆件失稳。

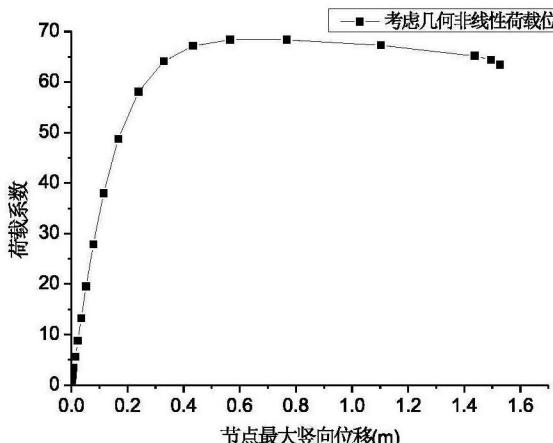


图7.考虑几何非线性荷载位移曲线

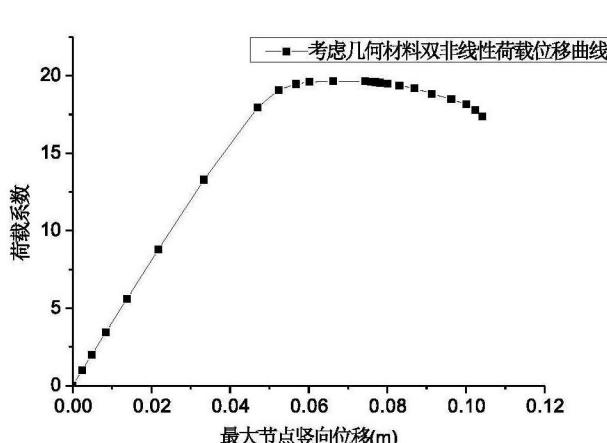


图8.考虑双重非线性荷载位移曲线

(四) 树干计算长度系数确定

工程结构的承载力取决于整体屈曲分析所确定的稳定承载能力。一般认为特征值屈曲计算值是非线性屈曲计算值的上限，而按照第一阶屈曲模态施加初始缺陷，考虑几何非线性材料非线性的影响得到屈曲荷载位移曲线，其曲线的极值点对应的荷载即为结构极限承载力。由图7的荷载位移曲线即可得到树干的极限承载力，由此反推计算长度系数。 $N_{cr}=\pi^2 EI/(\mu l)^2$ 。由于树干本身为变截面，本文中以树干上端最小截面以及树干原长来计算树干的计算长度系数。 $N_{cr}=17687.5\text{Kn}$ ，由上述公示计算 $\mu=1.6$ 。树形结构的承载力计算不同于一般框架，也不同于一般空间网格结构。其承载力计算不能套用规范方法。

三、结论

通过上述分析可以得到以下结论：

1. 树形结构通过线性屈曲分析可以找到结构相对容易失稳部位，利用线性屈曲分析数据可以对结构进行优化，使结构各部位的屈曲荷载系数接近。
2. 考虑几何非线性屈曲分析与特征屈曲对比，对于树形结构几何非线性效应不明显。
3. 通过引入初始缺陷，考虑双重非线性屈曲分析可以得到结构极限承载力。
4. 树形结构不同于一般框架结构，也不同于一般空间网格结构，各杆件的极限承载力现阶段只能通过屈曲分析得到，更一般的规律还需通过大量分析和试验。

参考文献

- [1]乐慈.天津梅江会展中心张弦桁架静、动力稳定性分析[J].建筑结构, 2015. 第14期
- [2]李忠学.初始几何缺陷对网壳结构静、动力稳定性承载力的影响 [J].土木工程学报, 2002. 第35卷, 第1期
- [3]武岳, 张建亮, 曹正罡.等黑龙江省新博物馆树状结构形态创建与稳定性分析 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(9)
- [4]马洪步, 沈莉, 高博青, 等.钢管树状仿生结构的稳定性设计 [J]. 建筑结构, 2009, 39(12): 97-99.
- [5]陈俊, 张其林, 谢步瀛. 树状柱在大跨度空间结构中的研究与应用 [J]. 钢结构, 2010, 25(3): 1-4.