

Finite Element Buckling Analysis of Triangular Three-dimensional Truss

Jie Zhao¹ Hao Tang^{2*} Zhibo Zhang²

1. The Second Supervision and Inspection Station of Construction Engineering Quality of Anhui Province, Hefei, Anhui, 230000, China

2. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150080, China

Abstract

Triangular three-dimensional trusses are widely used in large-span spatial structures, which can not only increase the net height of the structure, but also achieve reasonable force and low cost, so the analysis of the buckling characteristics of the triangular three-dimensional truss can provide a reference for the engineering design of the space structure. In this paper, finite element software is used to carry out the natural vibration characteristics, static analysis and buckling analysis of the triangular three-dimensional truss. The structure shows that the mass participation coefficients in the X, Y and Z directions of the first six modes are 87.15%, 84.80% and 14.94%, respectively; the maximum translation displacement of 1.037mm occurs at the cantilever end of the truss; the maximum internal forces in the X and Y directions are 36.6kN and 32.2kN, respectively, both of which occur at the rods at the fixed end of the structure; the front eighth order buckling load of the truss is 29.8~77.4kN, the two adjacent buckling eigenvalues are the same, and the buckling modes have symmetry and orthogonality to each other.

Keywords

triangular three-dimensional truss; natural vibration characteristics; static analysis; buckling analysis

三角立体桁架有限元屈曲分析

赵杰¹ 唐浩^{2*} 张智博²

1. 安徽省建筑工程质量第二监督检测站, 中国·安徽 合肥 230000

2. 黑龙江大学建筑工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150080

摘要

三角立体桁架在大跨度空间结构中应用广泛, 不仅可以增加结构净高, 而且能够做到受力合理, 成本低廉, 三角立体桁架的屈曲特性分析可以为空间结构工程设计提供参考。论文采用有限元软件对三角立体桁架进行自振特性、静力分析和屈曲分析。结构表明: 前六阶振型X、Y和Z方向的质量参与系数分别为87.15%、84.80%和14.94%; 结构最大平动位移为1.037mm发生在桁架悬臂端; X方向和Y方向最大内力分别为36.6kN和32.2kN, 均发生在结构固定端的杆件; 桁架前八阶屈曲载荷为29.8~77.4kN, 相邻两阶屈曲特征值相同, 屈曲模态具有对称性和彼此的正交性。

关键词

三角立体桁架; 自振特性; 静力分析; 屈曲分析

1 引言

随着中国经济的发展, 机场、车站及各种体育场馆等大跨度空间结构建设数量逐年增加, 三角立体桁架由于其增加结构净高、受力合理且节省建造成本已经成为大跨度结构承载构件设计的主要选择之一, 但三角立体桁架具有大长度、

结构轻柔等特点在荷载作用下很容易屈曲破坏。

为此, 国际上相关学者对三角立体桁架的屈曲分析进行了一系列研究。在中国, 桂睿^[1]采用有限元方法对钢桁架屈曲模态进行分析, 根据欧拉公式推算杆件计算长度。方超^[2]利用有限元软件进行斜四棱柱式焊接桁架结构静态分析、屈曲分析和响应面分析。张明^[3]针对桁架结构稳定承载力改进弹塑性屈曲承载力计算方法, 并对单杆桁架模型和简单桁架进行弹塑性屈曲承载力分析。杨大彬^[4]对单榀圆弧形张弦桁架结构和不同端部倾角的两端直线形张弦桁架结构进行屈曲承载力分析。杨文涛^[5]采用屈曲分析方法计算钢桁架结构其临界力, 掌握其强度、稳定及刚度等性能。在其他国家, Mohammad^[6]

【作者简介】赵杰(1994-), 男, 中国安徽合肥人, 硕士, 助理工程师, 从事结构风工程研究。

【通讯作者】唐浩(1995-), 男, 中国湖南邵阳人, 硕士, 从事结构风工程研究。

针对简单的平面和空间桁架通过改善非线性求解方法观察具有不同临界点的复杂屈曲后行为。Wang^[7] 推导桁架约束屈曲支撑 (TC-BRB) 的弹性屈曲载荷公式。研究具有初始几何缺陷的 TC-BRB 的承载力及失效准则。Sejkt^[8] 研究支撑系统的刚度如何有助于桁架屋顶结构的平面外稳定性,发现压缩构件可能会产生很大的支撑力。

上述研究仅仅对一些简单平面桁架和空间桁架进行屈曲分析和承载力分析,而对三角立体桁架的特征值屈曲分析和静力分析十分有限。基于此,论文采用有限元软件对三角立体桁架进行建模、赋予材料属性、划分网格并最后进行静力计算与屈曲载荷计算,为此类结构的屈曲破坏及承载力设计提供参考。

2 工程背景

论文基于某大跨度空间体育场结构项目,如图1所示,该体育场罩棚由三角立体桁架和网壳组成,由于三角立体桁架为主要承载结构,其受力状态和屈曲分析尤为重要。论文选取一榀三角立体桁架进行屈曲分析,主桁架为三角形腹杆式结构,由上弦杆、下弦杆、和斜腹杆组成。立体桁架跨度为15m,高0.6m,宽0.8m,在跨度方向分成15节,每节1m。桁架采用直径为500mm圆钢管连接而成,钢材材质为Q345B,节点均采用铰接。

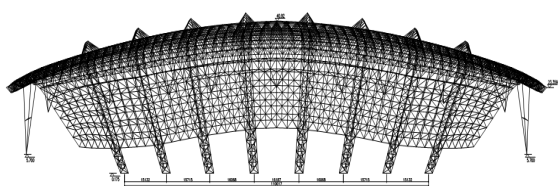


图1 某大跨度体育场结构

3 有限元模型

论文通过有限元软件建立三角立体桁架结构几何模型,圆钢管采用 Beam188 梁单元进行模拟, Beam188 梁单元具有六个方向的自由度,满足节点绕三个方向的转动和沿 X、Y、Z 三个方向的平动。钢材弹性模量 $E=1.5E11\text{MPa}$,泊松比 $\nu=0.35$,密度 $\rho=7850\text{kg/m}^3$,屈服强度 $f_y=345\text{Mpa}$,圆钢管内径为400mm,外径为500mm。图2和图3分别为建模流程和有限元模型。

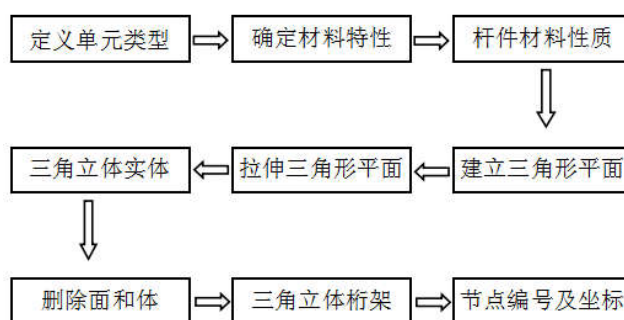


图2 建模流程

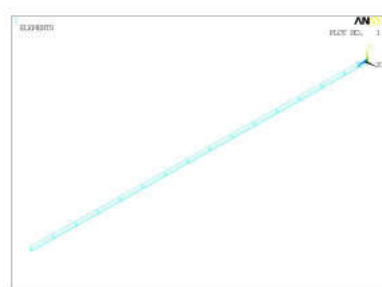


图3 有限元模型

4 结果分析

4.1 特征值屈曲基本方程

论文采用特征值屈曲分析,特征值屈曲分析可以预测出屈曲载荷的上限。设结构的应力刚度矩阵 $[S]$ 基于膜应力的任意基准强度,则 $\lambda [S]$ 是对应另一个强度的应力刚度矩阵, λ 为特征值。在线性条件下, $[S]$ 和通常的刚度矩阵 $[K]$ 都不是位移的函数。如果基准条件下的位移矩阵 $\{D\}$ 加上虚位移矩阵 $\{\Phi\}$,而作用的载荷 $[F]$ 保持不变,那么为了使状态 $\{D\}$ 和 $\{D+\Phi\}$ 保持平衡状态,必须满足(1)式和(2)式:

$$([K]+\lambda [S]) \{D\}=[F] \quad (1)$$

$$([K]+\lambda [S]) \{D+\Phi\}=[F] \quad (2)$$

以上两式相减,得式(3):

$$([K]+\lambda [S]) \{\Phi\}=0 \quad (3)$$

式中, $[K]$ 为刚度矩阵; $[S]$ 为应力刚度矩阵; $\{\Phi\}$ 为位移特征矢量; λ 为特征值; (3)式用于求解结构特征值 λ 与位移特征矢量 $\{\Phi\}$,它决定结构的分叉点(载荷-变形曲线的相交点)。

4.2 自振特性

三角立体桁架前6阶自振周期及各振型质量参与系数如表1所示,可以发现,结构前4阶振型自振周期分别为1.17s、0.89s、0.72s和0.64s,前6阶振型中,X方向的质量参与系数为87.15%,Y方向的质量参与系数为84.80%,Z方向的质量参与系数为14.94%,X和Y向质量参与系数分布为Z向的5.83倍和5.68倍,表明自振主要为X和Y方向的振动。

表 1 特高压变电构架前 6 阶自振特性

振型	周期 (秒)	各振型质量参与系数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
1	1.17	82.43%	0.04%	0.00%
2	0.89	0.04%	66.82%	0.00%
3	0.72	0.00%	14.12%	0.00%
4	0.64	0.00%	0.29%	12.16%
5	0.53	0.00%	3.57%	2.46%
6	0.35	4.68%	0.00%	0.32%

4.3 静力分析

图 4 为三角桁架的位移及内力计算结果等效云图, 分析 4 (a) 和图 4 (b) 可知在给定的载荷和约束条件下, 最大平动位移为 1.037mm 发生在桁架悬臂端, 最大转动位移为 0.58rad 出现在固定端。由图 4 (c) 和图 4 (d) 可知, X 方向和 Y 方向结构最大内力分别为 36.6kN 和 32.2kN, 均发生在结构固定端的杆件。

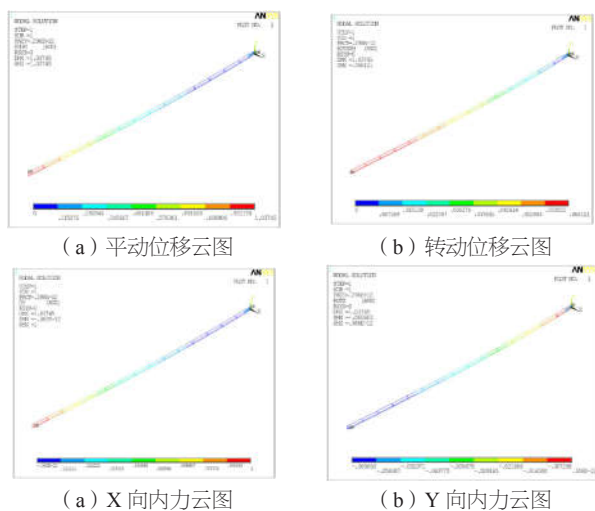


图 4 结构位移和内力等效云图

4.4 屈曲分析

图 5 所示为前八阶特征值屈曲模态, 各阶模态的屈曲载荷和屈曲位移如表 2 所示, 分析可知三角立体桁架的屈曲载荷为 29.8~77.4kN, 由于三角立体桁架的横截面为等边三角形, 屈曲模态具有对称性, 所以一阶和二阶、三阶和四阶、五阶和六阶、七阶和八阶的屈曲特征值相同, 但屈曲模态具有彼此的正交性。

表 2 前八阶特征值屈曲模态的屈曲载荷和位移

参数	特征值屈曲模态							
	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶	第六阶	第七阶	第八阶
屈曲载荷	29.8kN	29.8kN	67.4kN	67.4kN	75.0kN	75.0kN	77.4kN	77.4kN
屈曲位移	1.04mm	1.04mm	1.41mm	1.41mm	1.36mm	1.36mm	1.35mm	1.35mm

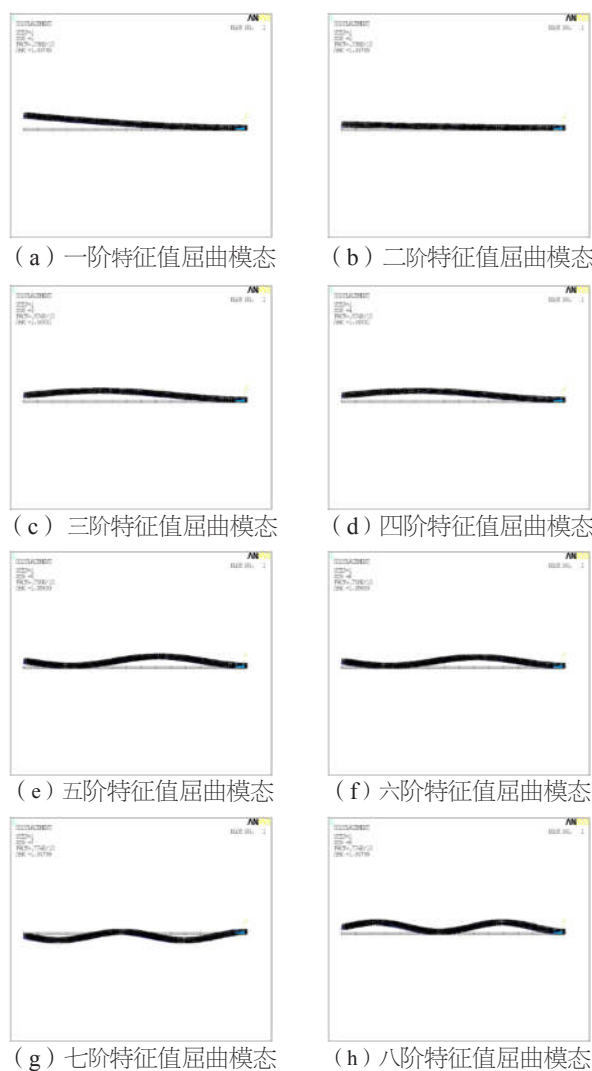


图 5 前八阶特征值屈曲模态

5 结论

①前六阶振型 X、Y 和 Z 方向的质量参与系数分别为 87.15%、84.80% 和 14.94%, 自振主要以 X 和 Y 方向的振动为主。

②在给定的载荷和约束条件下, 三角立体桁架最大平动位移为 1.037mm 发生在桁架悬臂端, 最大转动位移为 0.58rad 出现在固定端。

③三角立体桁架 X 方向和 Y 方向最大内力分别为 36.6kN 和 32.2kN, 均发生在结构固定端的杆件。

④三角立体桁架的前八阶屈曲载荷为 29.8~77.4kN, 相邻 (下转第 47 页)

搭接悬托主梁结构下面的主梁两条搭接水平桥主梁之间只有需要相互连接的一条增强梁配筋,直径长度相当于悬托原梁的两条配筋,采用搭绑扎法将其进行相互搭接,该水平梁配筋经过搭接悬托主梁结构的配筋浇筑后,强度控制在原梁达到 100% 之后再将其搭接断开。

架体密封安装工作完毕后,用密目式架体安全网框架制作一个圆形整体进行密封^[6],并全面主动组织技术人员现场进行了各项综合性质量检查和合格验收、签证,对所有的操作节点逐一地扣件进行了复杂的拧、复紧,扣件的松紧螺栓松动扭力矩也一般不得大于超过 4 或小于 40nm,且螺栓扭力矩不得大于 65nm,检查工作完毕时然后用一支彩色的水粉笔仔细检查作出一个规范化的检查标记,确保一个好的阀门滴水不漏。

27 层以上混凝土的整体强度等级应当同时提高一级,使之不仅能够同时达到较早的整体强度以及能够提高其整体承载能力,27 层以上必须至少需要待 27 层以上混凝土的整体强度值到达 75% 之后施工方能开始进行分层施工。

6 结语

论文就建筑高处大悬挑结构模板支撑架施工技术进行了

详细的探究,以实际工程为参照,提出模板支撑系统具体设计难点以及高空斜拉刚平台设计要点,随着针对施工关键技术进行详细的分析,总结拟定总体施工方案、模板定位、支设模板、搭设满堂架、混凝土施工以及施工过程中的注意事项,以望能够为后续类似施工提供参考。

参考文献

- [1] 穆立春,唐志勃,苏钢.高层建筑大跨度混凝土挑檐模板支撑设计与应用[J].建筑施工,2021,43(1):65-68.
- [2] 倪张江.建筑高处大悬挑结构模板支撑架施工技术[J].建筑施工,2021,43(3):425-428+432.
- [3] 朱恺,阳小刚,邹月,等.高层建筑超长悬挑结构模板支撑架施工技术[J].建筑技术开发,2020,47(20):5-6.
- [4] 王伟,邢国然,金建昌,等.高空大悬挑混凝土结构施工技术[J].浙江建筑,2014,31(8):45-47.
- [5] 冯宜玺.建筑物高空大跨度悬挑结构模板支撑施工技术研究:甘肃省第六建设集团股份有限公司[Z].
- [6] 雷雄武.高空悬挑混凝土结构施工支架平台技术:广东省广州市建筑机械施工有限公司,CN200820051970.4[P].2009-04-01.

(上接第 44 页)

两阶屈曲特征值相同,屈曲模态具有对称性和彼此的正交性。

参考文献

- [1] 桂睿,赵兴宏,肖永铭.悬索桥钢桁梁加劲梁局部受力及屈曲特性有限元分析[J].特种结构,2019,36(2):48-52.
- [2] 方超,施一丰,段宇航,等.基于有限元的轻量化焊接桁架结构优化设计[J].机电工程技术,2020,49(3):124-127.
- [3] 张明,谷任奇,童万波.桁架结构弹塑性屈曲承载力计算方法[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(9):1281-1286.
- [4] 杨大彬,刘斌,魏晔,等.两端直线形张弦桁架结构的力学性能研究[J].工业建筑,2020,50(10):138-144.
- [5] 杨文涛,王向荣,王超,等.首钢滑雪大跳台结构设计及要点分析[J].建筑结构,2021,51(6):74-78.
- [6] Mohammad Rezaiee-Pajand, Niloofar Rajabzadeh-Safaei. Exact post-buckling analysis of planar and space trusses[J].Engineering Structures,2020,223(11):1146.
- [7] Mengzheng Wang, Yanlin Guo, Peng Zhou. Load-carrying mechanism of truss-confined buckling-restrained braces: Numerical and theoretical analyses[J]. Engineering Structures, 2020,212(11):500.
- [8] Petr Sejkot, Sigurdur Ormarsson, Johan Vessby, et al. Numerical out-of-plane stability analysis of long span timber trusses with focus on buckling length calculations[J].Engineering Structures,2020,204(10):9670.