

大跨度钢框架结构的稳定性分析与设计优化

谷煜椿

博丰建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]大跨度钢框架稳定问题比较突出, 受压构件、板件容易失稳。从基本理论、影响因素、分析方法、设计优化四个方面展开论述, 对整体稳定分析、局部稳定分析、几何非线性分析、有限元模拟等分析方法加以阐述, 并提出结构体系、构件截面、节点支撑、综合优化措施。大跨度钢结构设计要根据工程条件综合分析确定, 用考虑初始缺陷的直接分析设计法结合非线性有限元模拟, 可以更准确地评价结构稳定性能。

[关键词]大跨度钢框架; 结构稳定性; 直接分析设计法

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20046

中图分类号: TU378.3

文献标识码: A

Stability Analysis and Design Optimization of Large-span Steel Frame Structures

GU Yuchun

Bofeng Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The stability problem of large-span steel frames is quite prominent, and the compression members and plates are prone to instability. This article discusses the analysis methods of overall stability analysis, local stability analysis, geometric nonlinear analysis, finite element simulation, etc. from four aspects: basic theory, influencing factors, analysis methods, and design optimization. It also proposes structural systems, component sections, node supports, and comprehensive optimization measures. The design of large-span steel structures should be determined based on comprehensive analysis of engineering conditions. The direct analysis design method considering initial defects combined with nonlinear finite element simulation can more accurately evaluate the stability performance of the structure.

Keywords: large span steel frame; structural stability; direct analysis design method

引言

随着社会经济和体育文化事业的发展, 建筑功能越来越多样化, 大空间需求量也越来越大, 大跨度钢结构因此被广泛应用于体育场馆、会展中心、航站楼等大型公共建筑中。但是大跨度空间钢结构达到极限承载力时, 结构一般会产生较大的变形, 如果仍然用结构变形前的位置来建立平衡方程进行结构整体稳定分析, 得到的结构极限承载力会偏高, 所得结果偏于不安全。因此, 稳定分析在大跨度钢结构的设计中起着十分重要的作用。怎样才能正确地评价结构的稳定性, 在保证安全的基础上达到经济性的最优状态, 这是工程设计中迫切需要解决的问题。系统研究大跨度钢框架结构稳定性机理、影响因素及分析方法, 提出相应的设计优化措施。

1 大跨度钢框架结构稳定性的基本理论与工程特点

大跨度钢框架结构稳定性问题本质就是结构在荷载

作用下保持原来平衡状态的能力。与强度问题不同的是, 稳定问题一般会突然发生失稳, 从而丧失承载能力, 具有很强的脆性。对于大跨度钢框架结构梁构件, 在控制截面宽厚比, 使局部失稳不早于整体失稳的前提下, 由于跨度大, 梁的平面外长细比较大, 在荷载作用下容易发生弯扭失稳。当构件整体失稳时, 容易引发安全事故, 构件应力远小于构件材料的强度屈服极限, 材料的强度储备没有得到充分利用。

根据稳定理论可知大跨度钢框架结构失稳可以分为整体失稳、局部失稳、整体局部相关失稳三种。由于大跨空间钢结构具有材料非线性的影响, 所以在进行结构整体稳定分析时要考虑到几何非线性以及材料非线性之间的相互耦合。结构失稳时, 构件切线刚度矩阵趋于奇异, 刚度矩阵行列式为零, 这时结构不能承受增量荷载。大跨度钢框架结构工程特点明显。结构内部可以设置落地柱、转换柱和吊挂柱等不同的传力构件, 属于多向传力路径的一

种特殊结构。跨度大造成构件长细比大、板件宽厚比大, 稳定问题成了设计的主要控制因素; 结构形式多样, 传力路径复杂, 对整体稳定性要求高; 施工过程复杂, 各个施工阶段结构受力状态不一样, 临时支撑体系的设置和拆除对结构稳定性的影响不能忽视。

2 大跨度钢框架结构稳定性影响因素分析

2.1 结构布置与构件参数对稳定性的影响

结构布置属于决定稳定性的重要因素。合理的结构布置要保证传力路径清楚, 不能出现传力突然变化、不连续的情况。结构体系中包含落地柱、转换柱和吊挂柱等多种传力构件, 结构布置及支承方式应使结构有较好的传力途径和整体稳定性, 平面结构应设置平面外的支撑体系。支撑系统的设置对提高整体稳定性起着非常重要的作用, 在每一个温度区段或者防震区段中, 都应该设置独立的支撑系统。构件几何参数对稳定性有直接影响。钢构件应按结构形式、抗震等级及节间荷载等来控制长细比、板件宽厚比, 必要时设加劲肋。框架柱的长细比关系到钢结构的整体稳定, 框架梁、柱板件宽厚比的限值是以强柱弱梁的抗震设计原则为前提确定的。构件截面形式的选择也十分重要, 箱形截面在双向抗弯、抗扭方面性能较好, H 形截面在单向抗弯方面效率较高, 但对受压为主的构件来说, 应优先选用箱形等闭口截面来提高抗扭刚度。

2.2 荷载作用与边界约束对稳定性的影响

大跨钢结构分析、设计时, 当大跨钢结构的跨度较大或者平面尺寸较大且支座水平约束作用较强时, 大跨钢结构的温度作用不能忽略, 对结构构件及支座设计均有较大影响。荷载作用类型、大小及组合方式都会对稳定承载力

产生较大的影响。竖向荷载对受压构件有轴力作用, 水平荷载会增加结构的侧移及二阶效应^[1]。边界约束条件决定着结构的计算长度系数和有效刚度。支座约束强度影响结构失稳模态及极限承载力。受压为主的拱形结构、单层网壳和跨厚较大的双层网壳要进行非线性稳定分析。大跨度钢结构温度作用不能忽略, 支座沉降会使以受弯为主的大型钢结构产生附加弯矩, 使以受压为主的大型钢结构产生水平推力, 增大结构应力。从以上分析可知, 结构布置、构件参数、荷载作用、边界约束这四个方面的因素都会对大跨度钢框架结构的稳定性产生影响, 并且相互之间存在着一定的联系, 因此为了更好地掌握这些因素的作用规律, 表 1 给出了各个主要影响因素的作用机理以及对稳定性的影响趋势。

3 大跨度钢框架结构稳定性分析方法研究

3.1 整体稳定分析方法

整体稳定分析主要考虑结构在整体上失稳的情况, 是设计中首先要进行分析的内容。使用子空间迭代法对结构进行线弹性整体稳定分析, 得到结构屈曲载荷的上限, 了解屈曲形状, 为非线性整体稳定分析提供初始缺陷引入依据。特征值屈曲分析属于整体稳定分析的基本方法, 它通过求解结构刚度矩阵和应力刚度矩阵的广义特征值问题, 得到屈曲荷载系数和屈曲模态^[2]。钢结构稳定设计新进展有框架先进分析法的实用化、目前广泛应用的计算长度法的改进、弱支撑框架和半刚性连接框架的稳定研究。计算长度法是目前工程设计中应用最广的方法, 把稳定问题转化为等效受压构件的承载力验算。但是这种方法对于复杂的结构适用性较差, 先进的分析方法正在逐渐取代传统的分析方法。

表 1 大跨度钢框架结构稳定性主要影响因素及作用机理

影响因素类别	具体因素	作用机理	对稳定性的影响趋势
结构布置	结构体系选型	决定整体传力路径和刚度分布	传力路径明确、刚度均匀者稳定性优
结构布置	支撑系统设置	提供侧向约束, 减小构件计算长度	支撑完备可显著提高整体稳定承载力
结构布置	柱网布置	影响框架侧移刚度和二阶效应	柱距均匀、落地柱贯通者稳定性佳
构件参数	构件长细比	决定受压构件欧拉临界力	长细比越大, 稳定承载力越低
构件参数	板件宽厚比	控制局部屈曲的发生条件	超过限值时局部失稳先于整体失稳
构件参数	截面形式选择	影响回转半径和抗扭刚度	闭口截面抗扭性能优于开口截面
荷载作用	竖向荷载	产生轴压效应和弯曲效应	荷载水平越高, 二阶效应越显著
荷载作用	水平荷载 (风/地震)	增大结构侧移和 P-Δ 效应	水平荷载作用下稳定性明显降低
荷载作用	温度作用	产生温度应力, 改变内力分布	大跨度结构中温度效应不可忽视
边界约束	支座约束刚度	决定构件计算长度系数	约束越强, 计算长度越小, 稳定性越高
边界约束	支座沉降	引起附加弯矩或释放水平推力	不均匀沉降导致内力重分布, 降低稳定裕度

3.2 局部稳定分析方法

局部稳定分析研究的是构件板件受压力时的屈曲情况,是防止局部失稳先于整体失稳的一个重要环节。限制板件的宽厚比以及设置加劲肋,都是保证构件局部稳定的重要构造措施。板件宽厚比限值属于局部稳定设计的主要参数,翼缘宽厚比、腹板高厚比要依照应力状况及钢材强度等级来合理选取。局部稳定和整体稳定有耦合作用。当局部失稳先于整体失稳出现的时候,构件的有效截面变小,承载能力明显降低。当构件整体失稳时,容易引发安全事故,构件的应力远小于构件材料的强度屈服极限。局部失稳的判定一般用板件的弹性屈曲应力计算加有效宽度法。

3.3 几何非线性稳定分析

大跨度钢框架结构接近极限承载力的时候会产生较大的变形,必须考虑几何非线性效应。由于大跨度空间钢结构在达到极限承载力时,结构一般会形成较大的变形,如果仍然用结构变形前的位置来建立平衡方程进行结构整体稳定分析,得到的结构极限承载力会偏高,所得结果偏于不安全,所以有必要对结构进行几何非线性稳定分析。用载荷增量法或者牛顿-拉夫森法等迭代法来求解,当结构切线刚度矩阵奇异的时候,就可以得到几何非线性整体稳定分析的极限承载力。初始缺陷对结构稳定性能的影响不能小视。由于施工过程中存在一定的偏差,实际完成的结构与设计结构之间存在一定的差异(缺陷),而这种缺陷会使得实际结构的极限承载力降低,因此在对大跨空间钢结构进行几何非线性分析的时候,需要考虑初始几何缺陷的影响,即用一致缺陷模态法把结构的最低阶屈曲曲线当作初始缺陷分布模态。初始缺陷的幅值一般取结构最大跨度的一定比例,比如 1/300。

3.4 有限元数值模拟分析

有限元模拟技术依靠创建高精度模型,模拟各种复杂的工况下结构的响应,全面探究影响稳定性的主要因素。通用有限元分析软件都具有完备的非线性分析功能,可以满足大跨度钢框架结构稳定分析的精度要求。有限元建模时单元类型的选择十分重要,梁单元适合模拟框架梁柱构件,壳单元适合模拟钢板以及节点区。材料本构模型要能反映钢材的弹塑性行为,用双线性或者三线性随动强化模型。边界条件的确定要真实体现实际支座的约束情况,几何初始缺陷用一致缺陷模态法来引入。当结构构件达到屈服时,构件的弹性模量下降,结构切线刚度矩阵变小,结构极限承载力比只考虑几何非线性时低。

4 大跨度钢框架结构设计优化措施

4.1 结构体系优化设计

结构体系优化要以建筑功能需求、受力特点为依据,选用合适的结构形式。大跨度钢结构体系按受力特点可分为桁架、拱、钢索和钢拉杆形成的预应力结构等。对于以受压为主的拱形结构要设置可靠的侧向支撑来约束平面外失稳;对于以受弯为主的框架结构,应该通过合理的布置支撑来提高侧向刚度。结构选型要根据工程的平面形状、体型、跨度、支承情况进行综合分析来确定^[3]。多向传力路径改善是提高结构安全冗余度的好方法。按照桥梁结构以及以前类似项目的经验,利用顶部斜拉式大跨多层钢框架结构体系,经由适当的分析与构造措施来确保结构传力途径清楚、受力均衡。传力路径应尽可能短捷直接,不能有过多的转换层次。对有吊挂、转换等特殊传力方式的结构要做专门的受力分析。

4.2 构件截面优化设计

构件截面优化要以满足强度、稳定、刚度要求为前提,力求材料用量最小化。通过对参数化的分析可知,对于大跨度桁架结构,当杆件截面面积增大 10%的时候,结构的屈曲荷载可以提高 15%,说明合理优化截面尺寸可以有效地提高结构的稳定性。截面优化要兼顾构件的受力状况、长细比限制和板件宽厚比限制。受压构件截面的选择要先考虑回转半径大的截面形式来提高稳定承载力。受弯构件要控制截面高宽比和翼缘宽厚比,防止弯扭失稳。大直径缓粘结预应力技术可以保证大跨度混凝土结构的安全,同时采用变截面次梁设计方法可以解决支承主梁剪扭计算超限的问题,该技术思路也可以借鉴到钢框架结构的设计优化中。

4.3 节点与支撑体系优化设计

节点是结构传力的重要部位,节点的刚度、强度影响整个结构的稳定性能。梁柱节点应采用刚性或者半刚性连接,保证节点域有足够的抗剪承载力。对关键节点做有限元分析,可以改进销轴节点局部承压的计算方法,节点构造要防止应力集中,保证传力顺畅。支撑体系属于提高整体稳定性的关键措施,需要依照结构几何形态、建造进程以及受力状况来布置可靠的支撑体系。支撑形式、数量、布置应通过计算分析来确定,既要满足稳定的要求,又要防止过度加强造成地震作用增大。

4.4 基于稳定性能的综合优化设计

根据稳定性能进行综合优化设计要贯穿于概念设计、计算分析以及构造措施的各个环节。对大跨度钢结构屋盖进行线性及非线性稳定分析,结果表明结构的稳定性较好;用动力法对大跨度钢屋盖结构进行防连续性倒塌分析,并对关键节点做有限元分析。综合优化设计要兼顾整体稳定

和局部稳定、弹性稳定和弹塑性稳定、承载能力和变形能力的协调。施工过程中对结构稳定性能的影响,在设计中应予以充分考虑。对施工过程中复杂的大跨度钢结构进行施工过程分析。不同的施工阶段结构受力状态和最终使用状态不一样,要对各个施工阶段进行稳定性验算,并且合理布置临时支撑。结构形态、结构状态随着施工过程而变化,施工过程各个阶段的结构内力与最终状态不同,应通过施工过程分析对结构的承载力、稳定性进行验算。

5 结语

大跨度钢框架结构稳定性分析属于保证结构安全的重要部分。钢材轻质高强的特点在给结构提供跨越能力的同时,也带来了稳定问题突出的技术难题。根据大跨度结构的受力特点进行分类,可以体现结构的受力特性。直接分析设计法逐渐取代传统的计算长度法,成为大跨度钢结构稳定设计的主要方法。单层网壳或者跨度较大的双层网壳、拱桁架的受力特征主要是受压,存在整体失稳的可能,

稳定性甚至会成为结构设计的控制因素,因此需要对这类结构进行几何非线性稳定分析,重要的结构还需要考虑几何和材料双非线性进行承载力分析。设计时统筹结构体系、构件截面、节点构造、支撑布置,形成从概念设计到施工过程的全过程稳定控制措施,才能达到安全与经济兼顾的目的。

[参考文献]

- [1]程睿,刘冰.具有多向传力路径的超限高层大跨钢结构设计[J].工业建筑,2025,55(10):184-192.
- [2]丁祝红.顶部斜拉式大跨多层钢框架结构分析与设计[J].建筑结构,2021,51(1):6-12.
- [3]阳升,雷蕾,赵仕兴,等.某建筑功能复杂的综合体育馆大跨结构设计[J].建筑结构,2023,53(7):56-63.

作者简介:谷煜椿(1998—),男,河北唐山人,初级助理工程师,中国矿业大学银川学院土木工程专业毕业,现就职于博丰建筑设计有限公司,从事结构设计工作。