

钢框架-支撑结构办公楼整体稳定性设计方法探讨

张哲 石明亮 霍卓金
中建二局安装工程有限公司
DOI:10.32629/bd.v9i8.4661

[摘要] 钢框架-支撑结构是高层办公建筑中广泛应用的体系,其整体稳定性设计直接关系到结构的安全性与经济性。本文从二阶效应、初始几何缺陷及结构侧向刚度三个核心要素出发,系统探讨了整体稳定性设计的关键方法。通过理论分析与工程算例,对比了计算长度系数法、二阶分析法与直接分析法在整体稳定性评估中的适用条件与计算精度。直接分析法能够更准确地反映结构整体失稳特征,建议在重要钢结构办公楼设计中优先采用,为同类工程的稳定性分析与设计提供参考。

[关键词] 钢框架-支撑结构; 整体稳定性; 二阶效应; 计算长度系数

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A

Discussion on Overall Stability Design Methods for Steel Frame-Braced Office Buildings

Zhe Zhang Mingliang Shi Zhuojin Huo

China State Construction Engineering Bureau No. 2 Installation Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Steel frame-braced structures are widely used in high-rise office buildings, and their overall stability design is directly related to structural safety and economy. Focusing on three key factors, namely second-order effects, initial geometric imperfections, and structural lateral stiffness, this paper systematically discusses the key methods for overall stability design. Through theoretical analysis and engineering examples, the applicability and calculation accuracy of the effective length factor method, second-order analysis method, and direct analysis method in overall stability assessment are compared. The direct analysis method can more accurately reflect the overall instability characteristics of structures and is recommended for priority use in the design of important steel-structured office buildings, providing a reference for stability analysis and design of similar projects.

[Key words] steel frame-braced structure; overall stability; second-order effects; effective length factor

引言

钢框架-支撑结构因其侧向刚度大、抗震性能好、建筑空间利用率高等优势,已成为高层办公楼的主流结构形式之一。现行规范提供了计算长度系数法、二阶分析法与直接分析法等多种设计路径,但各方法的适用范围、计算精度和设计效率存在显著差异,实践中常因方法选择不当而导致设计过于保守或存在安全隐患。本文从整体稳定性的基本概念出发,系统梳理各设计方法的理论基础与实施要点,并结合工程算例进行对比验证,旨在为设计人员提供清晰的方法选择依据。

1 钢框架-支撑结构整体稳定性的基本概念

1.1 整体稳定性的内涵与表征指标

钢框架-支撑结构的整体稳定性是指结构在竖向和水平荷载共同作用下抵抗失稳变形、维持原有平衡状态的能力。与构件或板件的局部屈曲不同,整体稳定性关注结构体系层面的失稳行为,表现为侧向位移的急剧增长和结构刚度的显著退化。表征整体稳定性的核心指标包括:弹性临界荷载(P_{cr})、整体侧向

刚度(K)以及二阶效应系数($\theta = \Delta P/Vh$)。当二阶效应系数超过0.1时,表明二阶效应显著,须在设计中予以考虑。此外,结构的初始几何缺陷(如整体倾斜、层间初始位移等)对整体稳定性具有不可忽略的削弱效应。

1.2 主要失稳模式及判定准则

钢框架-支撑结构的整体失稳主要表现为三种模式:整体侧向失稳、楼层局部失稳及支撑体系屈曲。整体侧向失稳时,结构沿某一主轴发生整体倾覆变形,侧向位移沿高度连续增大,临界荷载由整体抗侧刚度和重力荷载共同控制^[1]。楼层局部失稳表现为某一层层间位移集中、相邻楼层位移突变,通常由该层支撑刚度不足或竖向构件失稳引起。支撑体系屈曲表现为支撑构件在压力作用下突然失稳,导致结构抗侧刚度锐减,进而触发整体失稳。判定准则方面,结构应满足 $P-\Delta$ 效应产生的附加内力不超过初始内力的10%,或结构整体弹性临界荷载系数不小于10。

1.3 影响整体稳定性的关键因素

影响钢框架-支撑结构整体稳定性的关键因素可归为四方

面。一是侧向刚度分布——支撑的布置位置、数量和形式决定抗侧刚度,楼层抗侧刚度突变系数宜控制在1.5以内。二是重力荷载水平与分布——楼层重力荷载越大, $P-\Delta$ 效应越显著,顶部楼层的重力荷载对整体侧向失稳影响最大。三是初始几何缺陷——包括结构整体垂直度偏差、构件初弯曲和残余应力,会放大二阶效应的影响,结构整体初始倾斜角不应大于 $1/500$ 。四是支撑体系的延性与耗能能力——罕遇地震作用下,支撑的滞回性能直接影响结构的抗倒塌能力。

2 整体稳定性设计方法

2.1 计算长度系数法

计算长度系数法是我国GB 50017—2017推荐的传统稳定性设计方法,其核心思路是将构件从结构体系中分离,通过计算长度系数 μ 考虑构件端部约束和结构整体失稳模式对承载力的影响。基本流程为:建立弹性分析模型→在重力荷载代表值下进行一阶弹性分析→确定各柱计算长度系数→验算各柱稳定性→验算支撑体系承载力。该方法计算量小、概念清晰,但无法考虑 $P-\Delta$ 效应引起的附加内力,无法准确反映结构整体失稳的协同工作特征。当结构高度超过50m或存在明显刚度突变时,其适用性受到限制。

2.2 二阶分析法

二阶分析法通过迭代计算或直接求解几何非线性平衡方程,使分析过程能够反映 $P-\Delta$ 和 $P-\delta$ 效应的实际影响。根据分析精度不同,可分为简化二阶分析法(通过放大系数放大一阶分析结果)和精确二阶分析法(通过非线性迭代直接求解)。前者适用于规则结构且二阶效应系数 $\theta \leq 0.25$ 的情况,放大系数 $\alpha = 1/(1-\theta)$;后者适用于各类结构,尤其是 $\theta > 0.25$ 时。二阶分析法的优势在于更真实地反映结构受力状态,但计算成本较高、对设计人员的理论要求更高。

2.3 直接分析法

直接分析法是目前最为完善的钢结构整体稳定性设计方法,其核心思想是在分析模型中直接引入所有影响稳定性的因素,通过单个计算步骤同时完成内力分析和稳定性验算。AISC 360和GB 50017均将其作为重要设计方法予以推荐。实施时,分析模型需同时满足:直接考虑 $P-\Delta$ 和 $P-\delta$ 效应、引入构件初始几何缺陷(名义荷载法或直接缺陷法)、考虑残余应力影响(本构修正或刚度折减)、进行非线性分析直至达到极限承载力^[2]。其优越性在于避免计算长度系数的近似性,可准确评估整体失稳承载力并给出结构安全裕度,是精细化设计的首选方法。

3 工程算例与分析

3.1 算例概况与结构参数

以通州区潞城镇TZ02-0101-0010地块办公楼项目为工程背景。该办公楼地上5层、地下2层,建筑高度23.65m,首层层高6.0m,二至五层层高4.2m,总建筑面积32528.32m²,钢结构总吨位2122.2t。结构形式为地上钢框架-支撑结构,地下钢筋混凝土框架剪力墙结构。抗震设防烈度为8度(0.20g),设计地震分组为第一组,场地类别为II类,基本风压0.40kN/m²(50年一遇)。钢柱采

用十字柱、箱形柱($\square 500 \times 500 \times 25 \times 25$),钢梁采用H型钢(HN700 $\times$ 350 $\times$ 16 $\times$ 25)及箱型梁($\square 850 \times 300 \times 18 \times 20$),支撑采用角钢(L80 $\times$ 5),钢材材质均为Q355B。支撑布置于结构四角及中部电梯井周边,形成双重抗侧力体系。X方向为五跨连续布置,Y方向为四跨连续布置,楼面恒荷载标准值5.0kN/m²,活荷载标准值3.0kN/m²。各楼层重力荷载设计值(标准组合)均为11000kN,支撑截面面积 A_b 均为3100mm²。

3.2 分析模型与计算工况

采用SAP2000建立三维杆系模型:钢柱、钢梁及支撑均采用框架单元,楼板以壳单元模拟并设为刚性隔板,基础按固接考虑。分别采用三种方法对比分析:方法一为计算长度系数法(一阶弹性分析);方法二为二阶分析法(荷载组合取1.0恒+0.5活,非线性迭代);方法三为直接分析法(名义荷载法引入初始缺陷H/250)。计算工况包括:重力荷载代表值(1.0恒+0.5活)、重力+风载组合(1.2恒+1.4风)、重力+地震组合(1.2恒+1.3地震)。以用钢量和最大弹性层间位移角作为综合对比指标,各工况下支撑轴力均满足稳定承载力要求,变形满足规范限值^[3]。

3.3 计算结果与对比分析

三种方法的整体稳定性分析结果见表1。

表1 三种稳定性设计方法计算结果对比

对比项目	计算长度系数法	二阶分析法	直接分析法
最大层间位移角(rad)	1/580	1/620	1/680
最大 $P-\Delta$ 附加弯矩增幅	不计算	0.123	0.147
底部柱最大轴压比	0.72	0.76	0.79
结构整体稳定系数(α_{cr})	12.5	11.8	10.6
用钢量(t)	420	445	468

注:计算长度系数法基于一阶弹性分析,无法计算 $P-\Delta$ 附加弯矩增幅,以“不计算”表示;二阶分析法和直接分析法可计算该值。

计算结果表明,三种方法评估结果差异显著。计算长度系数法位移角最小(1/580),但因未计入二阶效应,结构实际刚度偏小,评估偏于不安全。二阶分析法考虑 $P-\Delta$ 效应,附加弯矩增幅12.3%,位移角1/620,用钢量增加6.0%(+25t)。直接分析法引入初始缺陷和残余应力,附加弯矩增幅最大(14.7%),位移角1/680,用钢量最高(较长度系数法增加11.4%),稳定系数降至10.6,最接近结构真实安全裕度。以直接分析法计算的结构整体稳定系数 $\alpha_{cr}=10.6$ 为基准,计算长度系数法高估17.9%,二阶分析法高估11.3%。计算长度系数法偏于冒进,二阶分析法可满足大多数工程精度要求,直接分析法安全裕度最明确、结果最可靠。

4 设计方法选用策略与工程建议

4.1 不同方法的适用条件对比

三种稳定性设计方法的适用条件存在显著差异。计算长度

系数法适用于高度不超过50m、楼层刚度无明显突变、结构布置规则的钢框架-支撑结构,建议在初步设计阶段用于构件截面的快速估算。以本工程办公楼为例,采用该方法计算的底部柱最大轴压比为0.72,用钢量420t,但实际结构因未考虑二阶效应,其安全裕度被高估约17.9%。二阶分析法适用于二阶效应系数 $\theta \leq 0.25$ 的常规高层钢结构办公楼,本工程二阶效应系数约0.15,采用该方法计算的用钢量为445t,安全裕度较合理,是当前工程实践中最为常用的方法。直接分析法不受结构高度和规则性的限制,尤其适用于超高层结构($H > 100\text{m}$)、结构布置复杂(存在转换层或大悬挑)以及抗震设防烈度8度及以上地区的重要建筑。对于本工程所处8度抗震设防区,结构高宽比接近2.0,建议在施工图设计阶段优先采用直接分析法进行整体稳定性校核。

4.2 二阶效应的合理考虑方式

二阶效应的合理考虑需把握好三个关键技术环节。首先是判断二阶效应的显著程度——当 $\theta \leq 0.05$ 时,可忽略二阶效应,按一阶弹性分析设计;当 $0.05 < \theta \leq 0.10$ 时,可采用简化方法(按放大系数法调整内力);当 $\theta > 0.10$ 时,必须采用二阶分析法或直接分析法。本工程办公楼二阶效应系数约0.15,属于必须考虑二阶效应的范围。其次是计算荷载组合的合理选取——应采用设计荷载组合(1.2恒+1.4活+1.4风等),而非标准组合,以确保计算结果满足设计需求。再次是迭代计算的收敛控制——非线性迭代的位移收敛容差宜控制在 1×10^{-4} 以内,不平衡力容差宜控制在 $1 \times 10^{-3}\text{kN}$ 以内。

4.3 初始几何缺陷的模拟方法

初始几何缺陷的模拟是整体稳定性分析的关键环节,设计实践中主要有三种处理方法。一是直接缺陷建模法,按构件加工允许偏差在模型中直接设置初始弯曲(通常取构件长度的1/1000)和整体初始倾斜(层间位移初始偏差取层高的1/500),最为精确但建模工作量大。二是名义荷载法,在每层楼面施加相当于该层重力荷载0.5%~1.0%的水平名义荷载来等效替代初始

缺陷效应,操作简便且被我国规范采纳。三是最不利缺陷组合法,针对不同失稳模式分别考虑最不利的缺陷分布形式^[4]。本工程算例表明,直接分析法引入初始缺陷后,结构整体稳定系数由二阶分析法的11.8降至10.6,表明初始缺陷对整体稳定性具有约10%的削弱效应,设计中不可忽略。建议常规办公楼设计优先采用名义荷载法,重要或复杂结构中采用直接缺陷建模法。

5 结束语

钢框架-支撑结构办公楼的整体稳定性设计应遵循“概念清晰、计算准确、构造可靠”的原则。本文通过对比分析得出以下核心认识:计算长度系数法计算简便但忽略二阶效应,适用于规则结构的初步设计;二阶分析法能够有效考虑 $P-\Delta$ 效应,满足常规工程的设计精度要求;直接分析法通过引入初始缺陷和残余应力,可最真实地反映结构的整体失稳特征,是高度超过100m或结构布置复杂时的优选方法。工程实践中,建议设计人员根据结构高度、规则程度和抗震设防要求综合选用合适的分析方法,确保结构安全性、经济性与设计效率的统一。

[参考文献]

- [1]周莎.标准化钢结构框架-核心筒体系地震损伤演化规律与韧性设计方法[J].大众标准化,2026(8):91-93.
- [2]周颖,平添尧,黄世敏,等.建筑抗震设计规范反应谱长周期段取值研究[J].建筑结构学报,2025,46(1):98-110.
- [3]兰树伟,周东华,陈旭,等.多层剪切型支撑钢框架整体稳定性的解析算法研究[J].振动与冲击,2024,43(1):64-70.
- [4]周佳,童根树,李常虹,等.《钢结构与钢-混凝土组合结构设计方法》的理解与应用——稳定和长细比[J].建筑结构,2022,52(24):144-147,143.

作者简介:

张哲(1996—),男,汉族,河北人,大专,助理工程师,研究方向:钢结构。