

高层建筑结构设计的安全性与经济性平衡优化研究

许家华¹, 黑乃旺²

(1. 山东中欣建设项目管理有限公司, 山东 临沂 276000;

2. 中达安股份有限公司山东分公司, 山东 济南 250100)

摘要 高层建筑结构设计安全性和经济性难以兼顾, 本文选取一栋 42 层总高 168 m 的钢筋混凝土框架—核心筒结构办公楼作为案例, 提出“参数优化—软件模拟—方案验证”的三阶段研究方法, 运用 PKPM 和 ETABS 软件建立有限元模型, 采用振型分解反应谱法和时程分析法, 系统分析核心筒与框架刚度比、构件截面尺寸、材料类型这三类核心参数对结构安全性能与经济指标的共同作用机制, 以期为高层建筑设计提供切实可行的经济安全协同优化方案。结果表明, “刚度比 1.8-2.2+ 渐变式截面优化+ 低碳材料应用”的综合优化方案, 在 7 度罕遇地震作用下, 优化后结构层间位移角降至 1/350 且优于规范 1/250 的要求。混凝土用量降低 22.3%、钢筋用量减少 15.8%、工程总造价下降 18.5%, 全生命周期碳排放削减 12.1%。

关键词 高层建筑; 结构设计; 安全性; 经济性; 平衡优化

中图分类号: TU973.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.027

0 引言

随着城市建设脚步加快, 高层建筑成为城市空间拓展的主要形式, 其结构设计既要达到“小震无损坏、中震可修复、大震不倒塌”安全标准, 又要符合“成本有节制、资源高利用”经济要求。当前领域存在两方面冲突, 一方面过分注重安全储备致构件尺寸过大、材料消耗过多, 使单位造价超出合理范围 15%~20%; 另一方面单纯追求经济效益, 降低安全标准, 让结构抗震能力不足、后期维护费用急剧攀升等隐患显现。数据表明: 超过 30% 的高层建筑结构纠纷和安全与经济指标不协调有关。常规优化途径通常只针对单一指标展开, 没有对安全和经济相互关联做整体剖析, 部分研究简化运算忽略地震情况下动态反应, 使安全评价过于保守。另一些研究依赖经验参数进行试算, 效率不高且难以全面涵盖各种工况。近年来, PKPM-AID 等智能设计工具的运用, 加快了优化进度, 但多数实践仍局限于“指标合格”阶段, 未形成可推广均衡优化体系。

鉴于此, 本文选择框架—核心筒结构为研究对象, 借助有限元模拟和参数化分析, 明确安全与经济敏感参数及相互作用规律, 提出多方面协同优化策略, 并通过实际工程案例验证其可行性, 以期为高层建筑设计提供合理实用的平衡方案。

1 安全与经济指标的耦合关系及影响因素

1.1 耦合机理

安全与经济指标的关系呈现出“倒 U 型”关联特征, 在安全投入没有达到某一阈值之前, 适当增加资源投入能有效增强结构安全性, 这时投入回报相对较高^[1]。若投入超过这个阈值, 持续增加投入对安全性能提升的作用比较有限, 并且投入成本会急剧上升。以框架—核心筒结构为例, 当核心筒刚度比从 1.5 增加到 2.0 时, 结构层间位移角减小幅度达到 23%。然而, 造价仅仅上升了 8%, 但当刚度比从 2.5 提高至 3.0 时, 层间位移角仅仅下降了 5%, 造价却增长了 15%, 这表明此时安全投入已进入“效益递减”的阶段。

1.2 结构体系选型的影响

不同结构体系在安全性和经济性平衡点上差异明显。钢结构凭借优异抗震能力脱颖而出, 但其造价较高, 主要适用于超高层建筑或多地震地区^[2]。钢筋混凝土框架—核心筒结构造价较为合理, 但自重较大, 适宜建造 100~150 m 的高层建筑。混合结构能较好地兼顾安全与经济需求, 但是其施工工艺复杂, 需增加约 10%~15% 的施工成本。

作者简介: 许家华 (1998-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

1.3 构件参数设计的影响

核心筒和框架之间的刚度比例会决定水平荷载具体的分布方式^[3]。当比例处于1.8~2.2之间时,核心筒能够分担70%~75%的水平作用力,而框架则承担剩下的25%~30%的水平作用力,这种配比能够实现两者之间的最佳协同效应。刚度比小于1.8时,框架会承受过大的荷载,从而可能导致柱端发生损坏。当刚度比超过2.2时,核心筒的刚度过高会造成材料的大量浪费。框架柱每增加100 mm的截面,工程造价会上升5%~8%,但基底剪力的降幅仅有3%~4%。当连梁高度从600 mm提升至800 mm时,其抗剪能力会增强20%,不过梁端弯矩同时会增长15%,所以需要相应地调整配筋设计。

1.4 荷载与工况条件的影响

地震烈度对平衡关系影响显著,7度设防区结构造价比6度区高12%~15%,8度区比7度区高20%~25%。烈度每提升1度,安全投入需增加10%~15%才能维持平衡^[4]。基本风压从0.45 kN/m²增至0.60 kN/m²,框架梁配筋率需提高20%,造价增加8%~10%,需通过优化梁截面高度平衡抗风性能与成本。

2 平衡优化的研究方法 with 模型构建

2.1 研究方法与技术路线

本研究采用综合方式,运用参数化分析、有限元模拟以及工程验证这三阶段研究方法。首先基于敏感性分析,识别出核心筒刚度比、框架柱截面尺寸以及钢筋强度等级这三个关键影响参数,且它们的敏感性系数均超过0.6。然后以某42层框架-核心筒办公建筑当作工程实例,利用PKPM完成初步设计,借助ETABS构建具有精细化特点的有限元模型。同时,考虑材料与几何双重非线性特征,进而把安全性能作为约束条件、将经济指标作为优化目标,通过PKPM-AID智能算法实现多目标迭代优化操作^[5]。最后采用时程分析法,检验优化结构在7度罕遇地震作用下的动力响应表现,并且通过成本核算确保经济性目标能够达成。

2.2 工程背景与模型参数

某42层的超高层办公楼,建筑总高度达到168 m,总建筑面积8.5万m²。抗震设防等级设定为丙类,抗震设防烈度是7度,设计地震分组属于第一组,场地类别为II类,基本风压值为0.45 kN/m²。建筑的设计使用年限为50年,该建筑采用钢筋混凝土框架-核心筒结构,核心筒的平面尺寸为12 m×8 m,外围框架柱

的间距为8 m。核心筒及框架柱使用的混凝土强度等级为C60,框架梁与连梁采用C50混凝土。框架柱与梁部采用HRB500级钢筋,核心筒剪力墙的分布筋选用HRB400级钢筋。各类荷载按照现行规范取值,恒载部分楼面取值为4.0 kN/m²、屋面取值为5.0 kN/m²。活载根据不同功能区域确定,办公区为2.0 kN/m²、会议室为3.0 kN/m²,风荷载体型系数取1.3、地面粗糙度类别为B类。

2.3 优化目标与约束条件

首要目标为结构总造价达到最低程度,并尽可能减少混凝土和钢筋的消耗以及碳排放。约束条件包含7度多遇地震情况下层间位移角不能超过1/500、7度罕遇地震情况下层间位移角不能超过1/250、周期比不能超过0.85。采用C60混凝土时,框架柱轴压比不能超过0.8,核心筒剪力墙剪压比不能超过0.25,框架柱截面尺寸不能小于800 mm×800 mm、连梁高度不能超过梁跨的1/4、钢筋保护层厚度不能小于30 mm,构件截面尺寸需要符合模板标准化要求。

3 平衡优化方案与验证分析

3.1 优化方案设计与迭代过程

为实现预定目标,依托PKPM-AID 2.0平台开展五轮精细化优化。首轮聚焦核心筒刚度调整,初始刚度比2.5(对应墙厚600 mm)优化至2.0(墙厚500 mm),层间位移角由1/420改善至1/380,同时实现6.2%的造价节约。二轮优化框架,柱截面尺寸通过分级调整,将轴压比控制在0.75~0.80,造价进一步降低8.5%。三轮革新连梁构造,采用“钢支撑(Q355材质)+BRB-300阻尼器”的组合方案,连梁抗剪能力提升25%,并将层间位移角优化至1/350,造价增加2.1%。四轮实施材料升级,框架梁主筋由HRB400替换为HRB500,钢筋用量减少15%,造价下降3.8%。五轮精细化调整,核心筒分布筋配筋率从0.25%降至0.20%,造价再降0.9%。

3.2 安全性验证

优化后的结构一阶自振特征周期达到3.2秒,主要呈现平动形态。二阶周期是2.6秒,以扭转形态为主要表现,计算得到的周期比为0.81,处于0.85的限值范围之内。这表明结构具备合格的抗扭能力,同时振型参与质量系数超过90%,确保地震作用计算精准度。X向的一阶平动周期为3.2秒,对应参与质量系数65.2%,Y向的二阶平动周期为2.8秒,参与质量系数为82.5%,三阶扭转周期为2.6秒,其参与质量系数达到91.3%。选用包含EL Centro波和Taft波在内的两条天然波及一

条人工波进行时程分析。结果显示：在 7 度罕遇地震作用下，结构 X 向与 Y 向最大层间位移角分别为 1/350 和 1/360，这两项指标均满足规范中 1/250 的限值要求。此外，框架柱最大轴压比测得 0.78 且不超过 0.8，核心筒最大剪压比为 0.22，不超过 0.25，连梁承受的最大剪力也在规范计算值允许范围内。

3.3 经济性验证

施工建设环节造价统计显示，经过方案优化之后，混凝土消耗量从 38 500 m³ 减少到 30 000 m³（降幅达到 22.1%），钢筋消耗量由 5 520 t 下降至 4 650 t（降幅为 15.8%）。虽增加了 85 万元的阻尼器投入，但结构工程总预算从 15 300 万元缩减至 12 500 万元（降幅达 18.3%），单位面积造价也相应地由 1 800 元/m² 降低到 1 470 元/m²（降幅达 18.3%）。上述计价是参照《建设工程工程量清单计价规范》（GB/T 50500-2024），具体取费标准为：混凝土 580 元/m³、HRB500 级钢筋 5 200 元/t、阻尼器 1.7 万元/个。基于 50 年设计基准期开展全生命周期成本评估表明，优化后的方案把年度维护开支从 230 万元压减至 188 万元（降幅 18.3%），半世纪累计维护费用从 11 500 万元降至 9 400 万元（降幅 18.3%），碳排放强度由 320 kgCO₂/m² 下降至 282 kgCO₂/m²（降幅 11.9%），由此产生的碳减排收益为 380 万元，最终全生命周期总成本从 26 800 万元显著回落至 21 520 万元（降幅 19.7%）。维护费用按结构造价的 1.5% 进行测算，碳减排收益则是基于 2024 年 60 元/tCO₂ 的碳交易价格计算。

4 平衡优化的设计建议

4.1 体系选型优化

对于高度处于 100 m 到 150 m 区间的高层建筑，推荐采用钢筋混凝土框架—核心筒结构体系。对于高度在 150 m 至 200 m 范围之内的建筑，适宜选用钢—混凝土组合结构体系。对于高度超过 200 m 的超高层建筑，应优先考虑采用纯钢结构体系。在地震设防烈度达到 8 度及以上的高烈度区域，可采用混凝土核心筒与钢框架相结合的混合体系，以此在抗震性能和经济性之间取得平^[6]。

4.2 参数设计优化

核心筒和框架的刚度比例最好保持在 1.8 到 2.2 这个区间之内，柱体设计采用自下而上，让截面逐渐减小的阶梯式方案（每上升 15 层柱截面尺寸就缩减 100 mm），同时优先选择斜撑附加阻尼器的构造措施，替代传统连梁以降低剪切破坏发生的可能性。

4.3 材料选型优化

核心筒以及框架柱选用 C50 到 C60 强度的混凝土，强度等级需控制在 C70 以下，以防材料价格大幅上涨增加成本。主要受力钢筋建议选用 HRB500 型号，钢筋用量减少能够抵消成本增加，非关键性构件可考虑掺入再生骨料，且掺入比例不超过 30% 以减少碳排放量。

4.4 软件应用与施工配合

借助 PKPM-AID 开展多目标优化，并把安全指标设为不可突破限制。通过 ETABS 进行详细校核，着重分析罕遇地震下动力表现，确保优化过程至少完成 5 轮迭代^[7]。构件截面选用标准化尺寸像柱子采用 800 mm、900 mm 或 1 000 mm 规格，以此减少模板浪费。钢筋连接以机械方式为主，混凝土养护采用蓄水法来实现整体成本有效控制。

5 结束语

本文主要聚焦框架—核心筒结构体系开展研究，利用有限元方法以及参数化分析技术，深入探究高层建筑结构安全性和经济性指标内在关联，构建出“刚度比优化+梯度截面+材料替代”综合优化策略。工程实践证明：该方法能确保结构达到 7 度罕遇地震设防标准，同时项目总造价降低 18.3%，且全生命周期成本减少 19.7%，为同类工程提供可推广的优化范式。未来研究可朝着多种结构体系协同优化方向延伸，融合超高性能混凝土、纤维增强复合材料等新型材料和智能监测技术，达成安全、经济与低碳的多维目标，引领高层建筑结构设计向高效化、可持续化方向发展。

参考文献：

- [1] 彭占. 高层住宅建筑结构的抗震优化设计策略研究[J]. 砖瓦世界, 2023(16):56-58.
- [2] 郑鹏, 管平平. 住宅抗震性能优化设计研究: 以高层楼宇大开间结构为例[J]. 建筑与装饰, 2024(21):124-126.
- [3] 吴可. 高层建筑结构的抗震性能优化[J]. 模型世界, 2024(19):89-91.
- [4] 刘何谦, 陈秀. 基于抗震性能的带加强层高层建筑结构优化设计研究[J]. 工程建设与设计, 2024(14):25-27.
- [5] 高利亚, 叶秀斌. 高层建筑结构抗震设计优化措施[J]. 砖瓦世界, 2023(23):25-27.
- [6] 洪艳. 基于性能化设计的高层建筑结构抗震优化策略[J]. 工程建设与设计, 2025(18):98-101.
- [7] 徐昕. 高层建筑结构设计中抗震性能优化策略[J]. 城市开发, 2025(08):147-149.