

# 高层建筑抗震结构体系的优化设计研究

文 / 朱 萍 山东经纬工程管理有限公司

**摘要:** 针对某位于8度抗震设防区的168.5m高层办公建筑,为统筹解决其超高、超限带来的安全性与经济性挑战,项目采用了框架-核心筒结构体系并实施了系统化的多目标优化设计。通过建立以控制造价与提升性能为核心目标的优化模型,对核心筒、巨型框架及伸臂桁架等关键构件参数进行决策优化。分析验证表明,优化方案在保证结构安全的前提下,实现了综合造价降低7.2%的显著经济效益,同时结构抗震性能得到同步提升。本项目的优化实践,为同类超高层建筑在设计与决策阶段实现安全与成本的平衡提供了明确的技术路径与管理依据。

**关键词:** 高层建筑; 抗震结构体系; 优化设计; 性能化设计; 时程分析; 框架-核心筒

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.110

## 引言

随着城市化进程加速,高层建筑数量持续增长,其抗震安全问题日益突出。传统抗震设计方法侧重于满足规范要求,较少考虑结构体系的整体优化。地震灾害调查显示,不合理的结构布置以及构件设计致使部分高层建筑震害严重。性能化抗震设计理念的提出为结构优化提供新思路,能够通过量化不同性能目标下的结构响应,进而实现多重抗震设防的目标<sup>[1]</sup>。采用先进优化算法与有限元分析技术相结合,对抗震结构体系进行系统全面的优化,在保证安全性的前提下提高经济效益,这已成为高层建筑设计的重要研究方向。本文基于某实际工程案例,旨在通过一套完整的“性能目标-优化设计-验证评估”技术流程,为核心筒-巨型框架结构在超高烈度区的方案选型与成本控制,探索并提供一套兼顾安全性与经济性的系统性解决方案。

### 一、项目概况

某超高层办公建筑位于8度抗震设防区,总建筑面积168.5m,地上36层,地下3层,标准层层高4.2m。结构体系采用框架-核心筒结构,外围设置型钢混凝土巨型柱,在避难层及关键楼层设置伸臂桁架与带状桁架形成空间协同受力体系。建筑平面呈矩形布局,长宽比为1.8,核心筒尺寸为24m×18m,承担约60%的水平地震作用。场地类别为II类,设计地震分组为第二组,基本风压0.55kN/m<sup>2</sup>。由于建筑高度超过规范限值,结构高宽比达到6.2,传统设计方法难以同时满足承载力、刚度及经济性要求,亟需通过系统化优化设计提升抗震性能并控制工程造价。

### 二、框架-核心筒结构体系设计

#### (一) 核心筒-巨型框架结构

核心筒剪力墙厚度沿高度分段设置,底部至12层采用600mm厚C50混凝土,13层至24层采用500mm厚C45混凝土,25层至顶部采用400mm厚C40混凝土。外围巨型柱采用型钢混凝土组合结构,截面尺寸1200mm×1200mm,内置H型钢,柱距8.4m,形成周边约束体系。在第12层、24层避难层位置设置伸臂桁架,

桁架高度4.2m,主弦杆采用H800×400×16×28型钢,腹杆采用H600×300×12×20型钢。带状桁架沿建筑外周布置,与伸臂桁架形成空间刚度环,如图1所示。该体系通过伸臂桁架将核心筒与外框柱连接,显著提高结构整体抗侧刚度,使水平荷载在核心筒与巨型框架间合理分配。

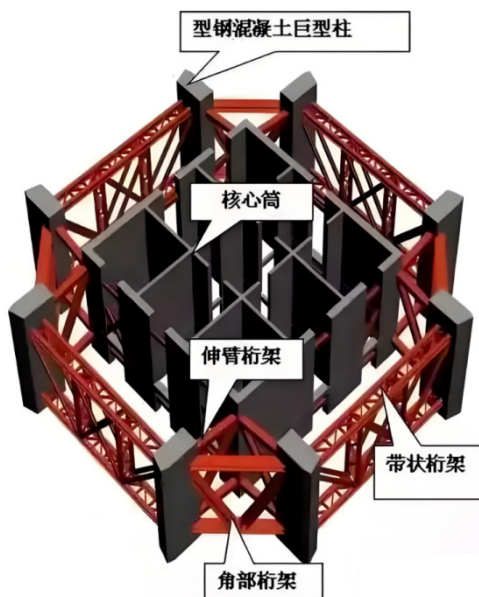


图1 核心筒-巨型框架-伸臂桁架结构体系轴测图

#### (二) 外框架梁柱体系设计

外框架梁采用钢梁与型钢混凝土组合梁相结合的方式。标准层主梁采用H700×300×12×20型钢,跨度8.4m,次梁采用H500×200×10×16型钢,间距2.8m。避难层及伸臂桁架所在楼层,框架梁截面加强至H900×400×16×28,以承受桁架传递的集中荷载。外围巨型柱与框架梁采用刚接节点,确保框架整体性。梁柱线刚度比控制在0.8~1.2范围内,避免梁端过早出现塑性铰,型钢混凝土组合梁通过栓钉与楼板连接,形成组合作用,有效降低梁跨中挠度。框架体系承担约40%的水平地震作用,与核心筒协同工作,形成双重抗侧力体系。

(三) 楼盖结构与连接节点设计

楼盖采用 120mm 厚现浇钢筋混凝土楼板，混凝土强度等级 C30，钢筋直径 12mm，间距 150mm。避难层及设备层楼板厚度增至 150mm，配筋率提高至 0.6%，增强楼板刚度。梁柱节点是结构传力关键部位，型钢混凝土柱与钢梁连接采用高强螺栓与焊接组合方式。工字形截面巨型柱节点构造如图 2(a) 所示，钢梁通过端板与柱翼缘采用 M24 高强螺栓连接，每侧布置 8 颗螺栓，节点域设置加劲板增强抗剪能力，圆管柱节点构造如图 2(b) 所示，钢梁通过引爆弧板与钢管柱焊接，焊缝采用全熔透焊，并设置圆环加劲板保证节点承载力。节点设计满足“强节点、弱构件”原则<sup>[2]</sup>，节点承载力超过连接构件承载力的 1.2 倍。

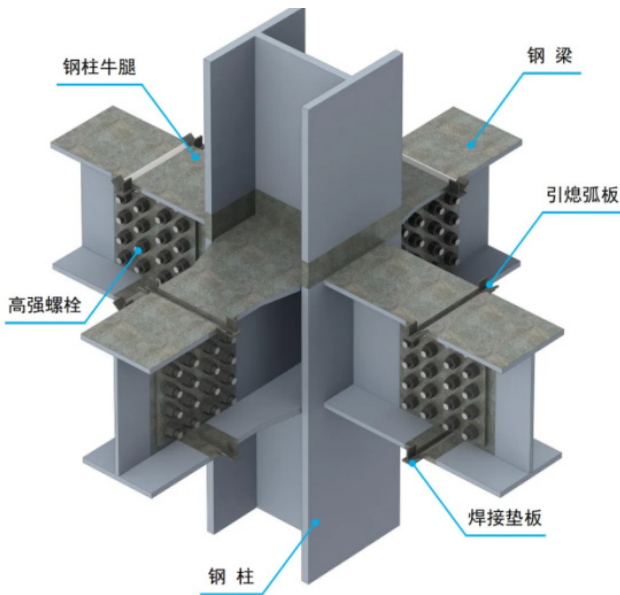


图 2(a) 工字形钢柱与钢梁节点连接构造

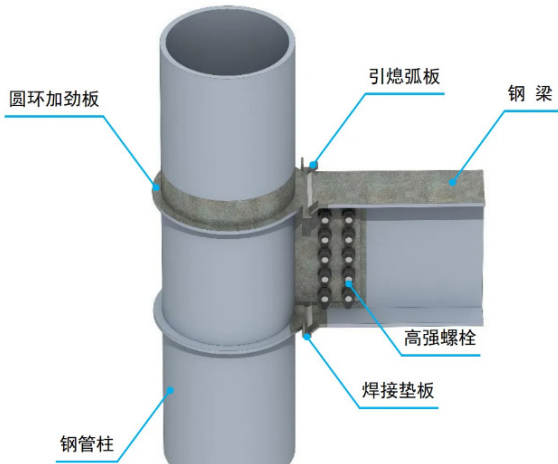


图 2(b) 钢管柱与钢梁节点连接构造

三、结构体系多目标优化

(一) 优化模型与约束条件建立

为统筹应对该超限项目在结构安全、技术规范与工程成本之间的多重挑战，本章将开展系统的多目标优化

设计，其核心在于寻求抗震性能与建造成本之间的最佳平衡点。结构优化设计以结构自重最小化和抗震性能最优化为目标，目标函数表达为结构总重量的最小化问题：

$$\min F(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i$$

式中： $\rho_i$  为第  $i$  个构件的材料密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $A_i$  为构件截面面积 ( $\text{m}^2$ )； $L_i$  为构件长度 ( $\text{m}$ )； $n$  为构件总数。

优化过程需满足层间位移角约束条件<sup>[3]</sup>：

$$\theta_i = \frac{\Delta_i}{h_i} \leq [\theta]$$

式中： $\theta_i$  为第  $i$  层层间位移角； $\Delta_i$  为第  $i$  层相对位移 ( $\text{mm}$ )； $h_i$  为第  $i$  层层高 ( $\text{mm}$ )； $[\theta]$  为规范限值，多遇地震取  $1/800$ 。

同时构件应力比需满足承载力要求：

$$\gamma_i = \frac{S_i}{R_i} \leq 1.0$$

式中： $\gamma_i$  为第  $i$  个构件应力比； $S_i$  为构件内力设计值 ( $\text{kN}$ )； $R_i$  为构件承载力设计值 ( $\text{kN}$ )。采用遗传算法进行迭代寻优，种群规模设定为 50，最大迭代次数 200 次。设计变量包括核心筒墙厚、巨型柱截面、伸臂桁架杆件截面等共计 48 个参数。采用遗传算法进行迭代寻优，种群规模设定为 50，最大迭代次数 200 次，交叉概率 0.8，变异概率 0.05，收敛准则为连续 20 代目标函数变化率小于 0.1%。

(二) 核心筒与巨型框架截面优化

核心筒剪力墙厚度优化以满足轴压比要求为前提，通过调整不同高度区段的墙厚实现自重降低<sup>[4]</sup>。巨型柱截面优化需确保轴压比满足规范限值，优化过程中引入轴压比计算式：

$$\mu = \frac{N}{f_c A_c + f_y A_s}$$

式中： $\mu$  为轴压比； $N$  为柱轴向压力设计值 ( $\text{kN}$ )； $f_c$  为混凝土抗压强度设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )； $A_c$  为混凝土截面面积 ( $\text{mm}^2$ )； $f_y$  为型钢屈服强度设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )； $A_s$  为型钢截面面积 ( $\text{mm}^2$ )。

优化分析表明，底部 12 层巨型柱轴压比从初始方案的 0.78 降至 0.72，核心筒墙厚在保证剪压比满足要求的前提下，中部楼层由初始设计的 550mm 优化至 500mm。通过截面参数调整，结构竖向构件混凝土用量减少 6.8%，型钢用量减少 4.2%，在满足承载力和延性要求的同时实现了经济性提升。

(三) 伸臂桁架与带状桁架参数优化

伸臂桁架的布置位置直接影响结构整体刚度和内力分布，优化分析确定最优布置高度。根据伸臂桁架最优位置系数计算：

$$\alpha_{opt} = \frac{H_{truss}}{H_{total}}$$

式中： $\alpha_{opt}$  为伸臂桁架最优位置系数； $H_{truss}$  为桁架布置高度 (m)； $H_{total}$  为结构总高度 (m)。

对于双层伸臂桁架体系，通过参数化分析得到最优位置系数分别为 0.33 和 0.67，对应第 12 层和第 24 层位置。桁架弦杆截面从初始  $H850 \times 400 \times 18 \times 30$  优化至  $H800 \times 400 \times 16 \times 28$ ，腹杆截面从  $H650 \times 300 \times 14 \times 22$  优化至  $H600 \times 300 \times 12 \times 20$ 。带状桁架刚度参数通过与伸臂桁架协同工作效率确定，优化后桁架用钢量降低 9.5%，结构顶点位移减小 8.7%，基底剪力分配更加均匀，核心筒与外框架受力比由初始的 65:35 调整至 60:40。

#### (四) 材料强度等级与刚度分布优化

材料强度等级优化遵循“强度匹配、经济合理”原则<sup>[5]</sup>，核心筒混凝土强度沿高度分三段布置，底部区域采用 C50 保证承载力储备，中部区域采用 C45 实现强度与刚度的平衡过渡，顶部区域采用 C40 满足基本受力要求。巨型柱内置型钢采用 Q355B，框架梁采用 Q345B，材料性能充分发挥。结构侧向刚度沿高度分布进行优化调整，避免刚度突变引起的薄弱层。优化后结构整体刚度分布更加均匀，刚度中心与质量中心偏心距控制在 5% 以内，有效减小扭转效应。材料强度等级的合理配置使混凝土总用量降低 5.6%，综合造价降低约 7.2%。

### 四、抗震性能验证与评估

#### (一) 基于性能目标的抗震设计验证

为评估优化方案是否达成预设性能目标，采用 ETABS 软件对结构进行多水准地震作用分析。结果表明：在多遇地震下，结构最大层间位移角为 1/952，满足并优于规范限值，保证了建筑正常使用功能。在设防地震下，结构塑性较发展处于可控范围，符合“可修”的设计预期。在罕遇地震下，结构最大层间位移角为 1/185，且承重体系保持稳定，成功实现了“大震不倒”的最终性能目标，验证了优化方案的安全可靠性。

#### (二) 优化前后方案对比评价

优化设计显著提升了结构抗震性能并实现了经济性改善。如表 1 所示，优化后结构自重降低 8.3%，混凝土用量减少 6.8%，钢材用量减少 7.5%，综合造价降低约 7.2%。罕遇地震作用下最大层间位移角从 1/167 优化至 1/185，结构损伤程度明显减轻。关键构件应力比普遍降低，底部核心筒剪力墙应力比从 0.92 降至 0.85，巨型柱轴压比从 0.78 降至 0.72，安全储备显著提高。结构基本周期由 4.28s 优化至 4.15s，整体刚度增强 3.1%。优化方案在满足规范各项指标的前提下，实现了安全性与经济性的协调统一。

表 1 优化前后结构关键指标对比

指标项目	优化前	优化后	变化幅度
结构自重 (t)	42680	39140	-8.3%
混凝土用量 (m <sup>3</sup> )	18650	17380	-6.8%
钢材用量 (t)	3280	3034	-7.5%
多遇地震最大层间位移角	1/845	1/952	-12.5%
罕遇地震最大层间位移角	1/167	1/185	-10.8%
底部剪力墙应力比	0.92	0.85	-7.6%
巨型柱轴压比	0.78	0.72	-7.7%
基本周期 (s)	4.28	4.15	-3.0%
综合造价 (万元)	8560	7944	-7.2%

#### (三) 结构薄弱部位识别与性能评价

塑性铰首先出现在第 12 层和第 24 层伸臂桁架与框架梁连接处，共形成 18 个塑性铰，均为梁端塑性铰，符合“强柱弱梁”设计原则。核心筒底部 3 层剪力墙出现斜向裂缝，最大裂缝宽度 0.8mm，损伤指数 0.32，处于轻微损伤状态。巨型柱在整个地震过程中保持弹性，未出现明显损伤。楼层能量耗散主要集中在避难层框架梁及伸臂桁架连接区域，该部位累计耗能占总耗能的 62%。结构损伤分布合理，关键竖向构件保持完好，满足预期抗震性能目标，验证了优化设计的有效性。

#### 结语

高层建筑抗震结构体系优化设计需建立完善的优化模型，综合考虑承载力、刚度及经济性等多重目标。通过对核心筒、巨型框架、伸臂桁架等关键构件参数的系统优化，结构受力性能得到显著改善。本项目优化实践表明，合理的构件截面配置和材料强度分级可实现结构自重降低 8.3%、综合造价降低 7.2% 的经济效益。多工况地震作用分析验证了优化方案的可靠性，罕遇地震下结构损伤集中于耗能构件，关键竖向构件保持完好，满足预期性能目标。薄弱部位识别为后续加固改造提供依据，研究成果可为同类超高层建筑抗震优化设计提供参考。

#### 参考文献

- [1] 居刚. 基于抗震设计的密肋复合墙新型抗震结构体系设计 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (14): 157-159.
- [2] 刘蔚晓. 基于性能化设计的高层建筑抗震结构优化与动力响应分析 [J]. 城市建设, 2025, (09): 65-67.
- [3] 王述超. 复杂钢结构体系抗震结构与隔震结构的抗震响应探究 [J]. 江西建材, 2023, (10): 154-156.
- [4] 王勋. 基于最优设防烈度的抗震结构优化设计探究 [J]. 砖瓦, 2022, (07): 82-83.
- [5] 许航, 解恒燕, 郑鑫. 某超高层框架-核心筒结构减震性能研究 [J]. 低温建筑技术, 2023, 45 (11): 52-55+60.

作者简介：朱萍（1990 年 04 月），女，汉族，山东省寿光市，本科学历，中级工程师，主要从事建筑工程方面的研究工作。