

现代高层建筑设计优化与抗震性能分析

张泳鑫

安徽建工(马鞍山)建设投资有限公司 安徽 马鞍山 243000

摘要: 高层建筑是现代城市空间集约化发展的关键,其结构安全性与经济性取决于科学设计方法。本文聚焦“结构设计优化”与“抗震性能提升”两大议题。结构优化上,不泛泛而谈,着重阐述四大可工程实施的策略,包括基于刚度-重量平衡的构件尺寸分级优化、面向动力性能调控的几何形态优化、以传力路径高效化目标的拓扑优化及多目标协同优化。抗震性能方面,先剖析高层建筑在地震下的典型破坏机理、关键性能指标和非线性响应特征,再针对性提出三大提升策略:靠精细化设计与构造强化自身抗震能力、用被动控制技术主动耗散地震能量、借智能材料与健康监测构建韧性防御体系。研究表明,精准优化与系统抗震提升结合,是实现高层建筑一体化设计的关键。

关键词: 高层建筑; 结构优化策略; 抗震性能分析; 消能减震; 韧性设计

引言

全球城市化进程中,高层及超高层建筑成为都市标志,但其“高耸”特性带来结构设计难题,巨大的重力荷载、复杂风致效应和关键地震作用,对结构安全性等提出严苛要求。传统“试错式”设计方法难以满足现代高层建筑复杂需求。因此,运用科学系统优化策略,在兼顾建筑美学与功能的同时,实现结构经济高效,并通过深入抗震性能分析制定提升策略,保障其在罕遇地震下的生命安全,成为结构工程领域核心课题。本文提供清晰实用技术路线,分为两大主体部分:第一部分详细阐述现代高层建筑设计可具体实施的四大类优化策略;第二部分系统分析高层建筑抗震性能,揭示内在规律与薄弱环节,提出针对性、多层次抗震性能提升策略,为工程实践提供理论与技术支持。

1 现代高层建筑设计的具体优化策略

结构优化并非抽象的理论,而是贯穿于方案、初设到施工图全过程的、一系列可量化、可执行的技术手段。针对高层建筑的特点,本文提炼出以下四类核心优化策略。

1.1 构件尺寸分级优化:刚度-重量的精细平衡

这是最基础、应用最广泛的优化策略,其核心在于避免“一刀切”式的构件设计,而是根据构件在结构体系中的受力重要性进行差异化、精细化的尺寸设计。

1.1.1 竖向构件分级

对于框架-核心筒或巨型结构体系中的外框柱或巨型柱,可依据其承受的轴力大小进行分级。底部楼层轴力最大,采用高强混凝土(如C60-C80)和较大截面;随着高度增加,轴力递减,可逐级减小截面尺寸并降低混凝土强度等级(如C50-C40)。这种“上小下大”的分级设

计,既能保证底部关键区域的承载力与延性,又能有效减轻上部结构自重,从而降低整体地震作用。

1.1.2 水平构件分级

核心筒的连梁是关键耗能构件。可采用“强墙弱梁”的设计原则,将连梁设计为在中震下即进入塑性耗能状态。通过精确计算,可优化连梁的截面高度和配筋,使其具有足够的延性和转动能力,同时避免因截面过大而导致剪力墙过早开裂^[1]。对于楼盖梁板,可采用预应力技术或优化板厚,在满足刚度(控制挠度)和舒适度(控制振动频率)的前提下,最大限度地减轻自重。

1.1.3 剪力墙厚度优化

核心筒剪力墙的厚度并非越厚越好。过厚的墙体不仅增加自重,还会因刚度过大而吸引过多的地震剪力,可能导致底部墙体发生脆性剪切破坏。应通过多方案比选,找到既能满足层间位移角限值,又能使墙体在大震下以弯曲破坏为主(具有更好延性)的最优墙厚。

1.2 几何形态优化:调控动力性能与风荷载

高层建筑的几何形态直接影响其动力特性和风荷载分布,是优化设计的重要切入点。

1.2.1 立面收进与锥度设计

有意识地设计建筑立面的收进(Setback)或锥度(Taper),可以有效改变结构的质量和刚度分布,从而调整其自振周期,避开场地的卓越周期,减小地震共振效应。同时,这种形态能显著削弱风致涡激振动和横风向共振,降低风荷载。

1.2.2 伸臂桁架与环带桁架的精准定位

伸臂桁架是提升结构整体刚度的有效手段,但其位置至关重要。通过参数化分析,可以找到使结构顶点位移和层间位移角最小的最优布置高度。通常,将伸臂桁

架布置在结构高度的1/2至2/3处效果最佳。此外,环带桁架的设置不仅能协同伸臂桁架工作,还能有效减小外框柱的内力差,优化其受力状态。

1.2.3 平面形状优化

对于非矩形平面(如圆形、三角形、Y形等),应通过风洞试验和数值模拟,优化其转角、切角或开洞形式,以减小风阻系数和风致扭矩,从而降低对结构抗扭刚度的要求。

1.3 拓扑优化:构建高效传力路径

拓扑优化旨在回答“材料应该放在哪里”的根本问题,为概念设计阶段提供最优的结构布局方案。

1.3.1 巨型支撑布局优化

在巨型框架-核心筒体系中,巨型斜撑是关键的反侧力构件。通过拓扑优化(如SIMP法),可以在设计域内生成材料密度云图,清晰地指示出最高效的巨型斜撑布置路径。这不仅能最大化结构刚度,还能避免不必要的材料浪费。

1.3.2 核心筒开洞优化

电梯井、管道井等在核心筒上形成开洞,会削弱其整体性。拓扑优化可以帮助确定在满足建筑功能的前提下,开洞的最佳位置和尺寸,以最小化对核心筒抗弯和抗扭刚度的不利影响^[2]。

1.3.3 楼盖结构体系选型

对于大跨度或复杂平面的楼盖,可通过拓扑优化比较不同结构体系(如密肋楼盖、空腹桁架、空间网架等)的传力效率,选择最优方案。

1.4 多目标协同优化:集成化设计决策

现代高层建筑的设计是多目标、多约束的复杂决策过程。单一目标(如重量最轻)的优化可能牺牲其他性能(如舒适度或造价)。因此,必须采用多目标协同优化策略。

1.4.1 目标函数构建

将结构总造价(与混凝土、钢筋、模板等工程量相关)、基底剪力(与地震作用相关)、顶点加速度(与风振舒适度相关)等多个指标,通过加权或Pareto前沿法,构建综合目标函数。

1.4.2 智能算法求解

利用遗传算法(GA)或粒子群算法(PSO)等智能优化算法,在庞大的设计变量空间(如各层墙厚、柱截面、伸臂位置等)中进行全局搜索,寻找满足所有规范约束(强度、稳定、位移等)的Pareto最优解集。

1.4.3 BIM平台集成

将优化算法与建筑信息模型(BIM)平台集成,实

现设计-分析-优化的闭环。设计师可以在BIM环境中直观地查看不同优化方案的三维模型、工程量清单及性能指标,从而做出更科学的最终决策。

2 高层建筑抗震性能分析

在实施优化设计后,必须对其抗震性能进行深入、准确的评估,这是确保结构安全的最后一道防线。

2.1 地震作用下的典型破坏机理

高层建筑在强震下的破坏并非单一模式,而是多种机理的耦合。

2.1.1 P-Δ效应失稳

巨大的重力荷载在侧向位移下会产生附加弯矩(P-Δ效应)。当层间位移角过大时,附加弯矩可能超过结构的抗弯承载力,导致结构整体失稳倒塌。这是高层建筑特有的、最危险的破坏模式。

2.1.2 薄弱层/薄弱部位集中破坏

由于刚度或承载力突变(如底层架空、设备层刚度突变、伸臂层上下刚度差异),地震能量会在这些薄弱部位集中释放,导致该层或该部位的构件(如连梁、剪力墙、柱)发生严重损伤甚至失效。

2.1.3 扭转耦联破坏

当建筑平面不规则,质量中心与刚度中心严重偏心时,地震作用会引发强烈的平扭耦联振动。这会导致结构角部的竖向构件承受远超预期的内力,极易发生剪切或压弯破坏。

2.1.4 节点核心区失效

梁柱节点或伸臂桁架与核心筒/巨柱的连接节点是力流交汇的关键区域,受力极为复杂。若节点核心区抗剪承载力不足或构造措施不当,极易发生脆性剪切破坏,导致结构整体性丧失。

2.2 关键抗震性能指标

评估高层建筑的抗震性能,需依赖一系列定量指标。

2.2.1 层间位移角(θ)

这是规范控制的首要指标,直接关系到非结构构件的完好性和P-Δ效应的大小。《建筑抗震设计规范》对不同结构体系在多遇和罕遇地震下的 θ 限值有明确规定。

2.2.2 基底剪重比

用于检验结构的最小地震作用是否满足要求,防止因结构过柔而导致设计地震力过小。

2.2.3 塑性耗能分布

通过非线性分析,观察塑性铰在结构中的形成顺序和分布。理想的状态是塑性铰首先出现在延性好的构件(如连梁、框架梁)上,形成耗能机构,而关键竖向构件(如底部剪力墙、巨柱)应保持弹性或仅有轻微损伤。

2.2.4 动力特性参数

包括结构的基本自振周期 T_1 、振型参与质量系数、扭转周期与平动周期之比(T_t/T_1)等。 T_1 过长可能导致位移过大, $T_t/T_1 > 0.9$ 则表明结构抗扭能力不足。

3 提升高层建筑抗震性能的策略

3.1 强化结构自身抗震能力：精细化设计与构造

这是最根本、最经济的策略，强调“强身健体”。

3.1.1 贯彻“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”原则

通过精确的内力调整和配筋设计，确保塑性铰优先在梁端等延性好的部位形成，而柱、墙、节点等关键部位保持足够的承载力储备。

3.1.2 加强底部加强区设计

高层建筑底部区域承受最大的弯矩和剪力，是抗震设计的重点。应提高底部几层剪力墙和框架柱的混凝土强度等级、增加箍筋加密区的范围和配箍率，以提高其延性和抗剪能力。

3.1.3 优化关键连接节点

对于伸臂桁架、环带桁架等与核心筒或巨柱的连接节点，应采用三维实体有限元进行精细化分析，明确其复杂的应力状态，并通过设置型钢暗柱、加强环板、穿筋等构造措施，确保节点的传力可靠和延性充足^[3]。

3.1.4 控制结构规则性

在方案阶段就应尽量避免平面和竖向的严重不规则，如扭转不规则、楼板局部不连续、侧向刚度突变等，从源头上消除薄弱环节。

3.2 采用被动控制技术：主动耗散地震能量

当结构自身能力难以满足高烈度区或超高层建筑的抗震要求时，可引入外部耗能装置。

3.2.1 消能减震技术

(1) 金属屈服阻尼器：利用软钢在往复变形下的塑性滞回耗能。可将其作为斜撑布置在结构的设备层或伸臂层，形成“消能桁架”，在小震下提供附加刚度，在大震下大量耗能，保护主体结构。其优势在于性能稳定、成本较低、易于更换。(2) 粘滞阻尼器：利用高粘度硅油通过小孔产生的阻尼力耗能。其出力与速度相关，对风振和地震均有良好的控制效果，且在小震下基本不产生附加刚度，不影响建筑正常使用。上海中心大厦的TMD即结合了粘滞阻尼器。

3.2.2 基础隔震技术

虽然在超高层中应用受限，但对于200米以下的高层建筑，特别是位于高烈度区的重要公共建筑（如医院、应急指挥中心），基础隔震是一种革命性的技术。通过

在基础设置橡胶隔震支座，将结构的自振周期延长至2-4秒，远离地震动的主要能量频段（0.1-1秒），可将上部结构的地震响应降低60%-80%，实现“以柔克刚”。

3.3 构建韧性防御体系：面向未来的智能与可恢复性

未来的抗震设计将超越“生命安全”，追求“震后可快速恢复功能”的韧性目标。(1) 应用高性能与智能材料：一是高韧性混凝土：如掺加聚丙烯纤维或钢纤维的混凝土，能显著提高构件的抗裂性和延性^[4]。二是形状记忆合金(SMA)：SMA具有超弹性与形状记忆效应，用其制成的阻尼器或连接件，在地震后能自动恢复原状，实现结构的“自复位”，极大减少震后修复工作量。(2) 部署结构健康监测(SHM)系统：在建筑关键部位安装传感器网络，实时监测其在地震等灾害下的响应。震后，通过分析数据可快速评估结构损伤状态，为应急决策和修复方案提供精准依据，缩短建筑功能中断时间。(3) 推行可更换构件设计理念：将结构中预期会严重损伤的耗能构件（如连梁、阻尼器、特定梁段）设计成螺栓连接的模块化单元。震后，只需更换这些“保险丝”式的构件，即可快速恢复结构功能，大幅降低修复成本和时间。

4 结语

本文围绕现代高层建筑设计展开，阐述了结构优化策略与抗震性能提升路径。研究指出，结构优化要具体精细，借助构件尺寸分级、几何形态调控等四大策略，能在保障安全的同时兼顾经济与高效；抗震性能评估是优化设计的验证与深化，需理解高层建筑破坏机理，用非线性分析手段精准量化；抗震性能提升是多层次系统工程，先靠精细化设计强化“内功”，不足时用消能减震等“外功”技术，未来要融合智能材料等理念构建韧性建筑。总之，将精准优化策略与系统抗震分析及提升路径结合，是实现高层建筑安全、经济、绿色、韧性一体化设计的必经之路，对全球高层建筑技术可持续发展意义重大。

参考文献

- [1]刘威.论现代高层建筑设计优化[J].建材与装饰,2020,(14):110-111.
- [2]陈孟乐.高层建筑设计中抗震性能优化分析[J].新城镇科技,2025,34(06):65-67.
- [3]冷玉霞.现代高层建筑设计中的风荷载分析与优化设计研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(11):31-33.
- [4]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):1-3.