

# 高层建筑抗震性能分析与减震控制策略

刘 娜

山东金宇杭萧装配建筑有限公司 山东 东营 257000

**摘要:** 高层建筑抗震性能分析需综合考量地震动特性与结构响应,通过弹性/非线性分析方法评估结构安全性与损伤程度。减震控制策略涵盖被动(隔震支座、阻尼器)、主动(质量阻尼器)及混合控制技术,结合基于性能的减震设计方法优化参数布置。案例表明,隔震技术可降低地震加速度响应60%-80%,消能减震装置可减少主体结构内力与变形,显著提升超限高层抗震冗余度与经济性。

**关键词:** 高层建筑;抗震性能;减震控制策略

引言:在城市化高速推进的当下,高层建筑如雨后春笋般涌现,其中不乏超限与复杂体型结构,其抗震安全问题愈发凸显。传统抗震设计以“抗”为主,在强震下结构损伤难以避免。而减震控制技术通过隔震、耗能等装置,主动削弱地震能量传递,有效提升结构安全性与经济性。本文聚焦高层建筑抗震性能分析理论,探讨减震控制策略优化,为工程实践提供科学依据。

## 1 高层建筑抗震性能分析理论

### 1.1 地震作用与结构响应特性

(1) 地震动特性是影响结构抗震的核心外部因素,主要包括频谱特性、幅值大小和持续时间三大关键指标。频谱特性决定地震动能量在不同周期的分布,与建筑自振周期匹配时易引发共振;幅值直接反映地震动强度,决定作用于结构的荷载量级;持续时间则影响结构累积损伤程度,长持续时间地震易加剧非线性损伤。(2) 高层建筑动力响应特征呈现显著的高度相关性,核心包括侧向位移、层间位移角和扭转效应。侧向位移随建筑高度增加而增大,需控制在规范允许范围;层间位移角是评估结构构件损伤的关键指标,直接反映层间相对变形合理性;扭转效应多由结构刚度不对称引发,会加剧局部构件受力集中,放大破坏风险。

### 1.2 抗震分析方法

(1) 弹性分析方法适用于小震工况,主要包括反应谱法和底部剪力法。反应谱法通过地震反应谱将地震动转化为等效静力荷载,计算结构弹性响应,兼具精度与效率;底部剪力法是简化的反应谱法,将总地震剪力按高度分布至各楼层,适用于高度较低、刚度均匀的建筑。(2) 非线性分析方法用于评估大震下结构性能,涵盖静力弹塑性Pushover分析和动力时程分析。Pushover分析通过单调加载模拟结构屈服后受力过程,直观反映承载力与变形能力变化;动力时程分析直接输入地震波,动态

模拟结构非线性响应,精度更高但计算复杂度大。(3) 多维度地震动输入聚焦双向/三向地震耦合效应。实际地震多为多维激励,双向或三向地震输入会引发构件空间受力状态,耦合效应可能加剧结构损伤,需在复杂高层建筑分析中重点考虑<sup>[1]</sup>。

### 1.3 抗震性能评估指标

(1) 安全性指标核心是承载力和变形能力。承载力确保结构在地震作用下不发生脆性破坏;变形能力反映结构屈服后延性,延性越好,抗震冗余度越高。(2) 损伤评估模型常用Park-Ang模型和基于位移的损伤指数。Park-Ang模型综合考虑荷载与变形的累积损伤;基于位移的损伤指数通过位移响应量化损伤程度,简洁直观。(3) 抗震性能水准划分为IO(立即使用)、LS(生命安全)、CP(防止倒塌)三级。IO级要求小震后结构可立即使用;LS级要求大震后不危及生命安全;CP级要求极端地震下避免倒塌。

## 2 高层建筑减震控制技术

### 2.1 减震控制技术分类

(1) 被动控制是应用最广泛的减震技术,无需外部能源驱动,通过结构自身或附加装置耗散地震能量,核心形式包括隔震、耗能减震和质量调谐阻尼器(TMD)。隔震技术通过设置隔震层延长结构自振周期,减少地震作用传递;耗能减震利用耗能构件吸收地震能量,保护主体结构;TMD通过质量块与主体结构的相对运动产生阻尼力,抑制结构振动。(2) 主动控制需依赖外部能源和实时控制系统,通过传感器监测结构响应,驱动执行机构施加反向控制力抵消地震影响,主要包括主动质量阻尼器(AMD)系统和主动调谐质量阻尼器(ATMD)。AMD通过移动质量块产生控制力,响应速度快;ATMD结合主动控制与TMD的优势,可动态调整参数,适应不同地震工况<sup>[2]</sup>。(3) 混合控制融合被动控制与主动控制的

优势,通过组合搭配提升减震可靠性,常见形式有隔震+耗能组合、主动+被动组合等。隔震+耗能可进一步提升能量耗散效率,主动+被动组合能降低主动控制的能耗和控制难度,兼顾减震效果与经济性。

## 2.2 关键减震装置原理与设计

(1) 隔震支座是隔震技术的核心构件,主流类型为铅芯橡胶支座和摩擦摆支座。铅芯橡胶支座通过橡胶垫提供弹性变形,铅芯耗散地震能量,兼具隔震与耗能功能;摩擦摆支座利用球面滑动产生摩擦耗能,同时通过摆长控制结构自振周期,适用范围广、耐久性强,设计需重点匹配结构重量和地震强度。(2) 阻尼器是耗能减震的关键装置,按工作机理分为金属阻尼器、黏滞阻尼器和黏弹性阻尼器。金属阻尼器通过金属构件的屈服变形耗散能量,构造简单、成本低廉;黏滞阻尼器利用黏滞液体流动产生阻尼力,阻尼力与速度相关,适用于多工况振动控制;黏弹性阻尼器通过黏弹性材料的剪切变形耗能,兼具弹性支撑与耗能功能,设计需根据结构需求匹配阻尼参数<sup>[3]</sup>。(3) TMD/ATMD系统设计的核心是参数优化,需结合结构自振周期、质量分布等特性确定质量块重量、弹簧刚度和阻尼系数。TMD优化以调谐频率与结构固有频率匹配为核心,最大化振动抑制效果;ATMD需额外优化控制算法参数,确保主动控制力的精准性与及时性,兼顾控制效果与系统稳定性。

## 2.3 减震控制设计方法

(1) 基于性能的减震设计(PBSD)以预设的结构抗震性能目标为核心,通过量化分析确定减震装置的参数和布置方案,确保结构在不同地震水准下达到预期性能,如小震不坏、中震可修、大震不倒,契合现代抗震设计的核心需求。(2) 多目标优化设计综合考量安全性、经济性与舒适性三大目标,通过优化算法平衡各目标权重。安全性需保证结构与减震装置的可靠工作;经济性需控制减震系统的造价与维护成本;舒适性需抑制风振或小震下的结构振动,提升使用体验。(3) 减震装置布置原则需遵循“均匀对称、优先关键部位”的要求,避免结构产生附加扭转效应;数量优化需通过数值模拟分析,在满足减震性能目标的前提下,确定最少装置数量,实现减震效果与经济性的最优平衡<sup>[4]</sup>。

## 3 高层建筑抗震性能数值模拟分析

### 3.1 有限元模型建立

(1) 结构模型简化需兼顾精度与效率,单元选择针对性匹配构件特性:梁-柱单元用于模拟框架梁柱等线构件,计算效率高;壳单元适配楼板、剪力墙等面构件,可反映平面内受力;实体单元用于核心区等关键部位,

精准捕捉三维应力状态。(2) 材料本构模型需准确表征非线性特性:混凝土采用考虑损伤的弹塑性本构,模拟开裂、屈服及承载力退化过程;钢材采用理想弹塑性或双线性本构,反映屈服强化与塑性流动特性,为非线性响应分析奠定基础。(3) 边界条件按实际约束设置,固定支座模拟基础与地基刚性连接;地震动输入需选取符合场地类别、震级的典型波,采用加速度时程形式施加,同时考虑多向地震耦合效应,确保模拟工况贴近实际地震作用。

### 3.2 案例工程概况

(1) 案例工程为超限高层建筑,因高度超限、平面体型不规则(呈L型),存在明显刚度突变问题,属于抗震设计难度较大的复杂体型结构,地处7度抗震设防区,对抗震性能要求严苛。(2) 结构体系采用框架-核心筒结构,为提升抗震性能,采用混合减震方案:在基础层设置铅芯橡胶隔震支座,减小地震作用传递;在框架梁端布置金属阻尼器,耗散地震能量,形成“隔震+耗能”的双重防护体系。

### 3.3 抗震性能对比分析

(1) 动力特性对比显示:减震结构自振周期较传统抗震结构延长35%,振型更均匀,有效避开地震卓越周期,大幅降低共振风险,提升结构整体抗震冗余度。(2) 地震响应对比表明:减震结构顶点最大位移、楼层最大加速度较传统结构分别降低42%、38%,内力时程曲线峰值显著减小,且波动更平缓,说明减震装置有效削弱了地震能量传递。(3) 损伤评估与性能水准验证:基于Park-Ang模型分析,传统结构中震下部分梁端达到LS级损伤,而减震结构仅少量阻尼器进入塑性,主体结构保持IO级性能,大震下未出现倒塌风险,满足预设抗震性能目标。

## 4 高层建筑减震控制策略优化与工程应用

### 4.1 减震效果影响因素分析

(1) 地震动特性对减震效果影响显著。近场地震含高幅值脉冲成分,易引发高层建筑强烈瞬时响应,对减震装置的耗能与抗冲击性能要求更高;远场地震能量传播远,频谱平缓但持续时间可能更长,需注重结构累积损伤控制。此外,超长高层建筑中行波效应不可忽视,地震波沿结构长度传播延迟会导致各部位受力不同步,加剧扭转与局部破坏,减震策略需考虑空间响应协调性。(2) 结构自身参数决定减震系统适配性与效果。建筑高度增加使结构柔性增强、自振周期延长,提升对隔震技术的依赖,需控制减震装置行程避免超限;刚度分布不均会导致地震响应集中,需通过减震装置布置优化实现

刚度补偿,缓解应力集中;质量偏心引发显著扭转效应,减震装置需对称布置,必要时增设抗扭阻尼器,平衡质量与刚度分布。(3)减震装置参数敏感性是优化设计关键。隔震支座的橡胶层刚度、铅芯直径直接影响隔震周期与耗能效率,参数偏差会大幅衰减隔震效果;阻尼器的阻尼系数、屈服力需与结构动力特性精准匹配,参数不当会降低减震效率甚至引发二次灾害;TMD/ATMD系统的质量比、调谐频率对振动抑制效果敏感,需通过参数优化实现与结构的共振抵消。

#### 4.2 多目标优化设计方法

(1)优化目标函数需综合涵盖减震性能与经济性核心需求。位移控制目标以层间位移角不超过规范限值为核心,确保结构变形可控;加速度控制目标聚焦于减少地震引发的结构振动,提升建筑使用舒适性,尤其适用于超高层建筑的风震耦合控制;经济性目标需量化减震系统的造价、施工成本及后期维护费用,构建“性能-成本”平衡的目标体系,避免过度设计。(2)优化算法是实现多目标优化的核心工具,遗传算法与粒子群算法应用最为广泛。遗传算法基于生物进化原理,通过选择、交叉、变异操作实现参数全局寻优,适用于复杂多约束优化问题,能有效规避局部最优解;粒子群算法模拟群体智能行为,通过粒子位置与速度的迭代更新寻找最优解,具有收敛速度快、计算效率高的优势,适合减震装置参数的快速优化。实际应用中可根据问题复杂度选择单一算法或混合算法,提升优化精度与效率<sup>[5]</sup>。(3)工程案例优化结果验证是优化方法实用性的重要保障。以某超限框架-核心筒高层建筑为例,采用遗传算法对黏滞阻尼器的布置位置与阻尼系数进行多目标优化,优化后结构顶点最大位移较优化前降低32%,减震系统造价降低15%,经动力时程分析验证,结构在多组地震波作用下均能达到IO/LS级抗震性能水准,充分证明了优化方法的有效性与工程适用性。

#### 4.3 实际工程应用建议

(1)减震装置施工与维护需严格把控关键要点。施工阶段,隔震支座安装需保证水平度与平整度,避免安装偏差导致受力不均;阻尼器连接节点需采用刚接设计,

确保力的有效传递,同时预留足够的变形空间。维护阶段,需定期对减震装置进行外观检查、性能检测,及时更换老化的橡胶构件、渗漏的黏滞液体,对金属阻尼器进行防锈处理,保障减震系统长期可靠工作。(2)推广应用抗震性能监测与健康诊断技术。在高层建筑关键部位布置加速度传感器、位移传感器,实时采集地震响应数据;基于物联网与大数据技术构建健康诊断平台,通过数据对比分析识别减震装置与主体结构的损伤状态,实现故障预警。对于重要公共建筑,可增设实时监测系统,为震后快速评估与修复提供数据支撑。(3)严格遵循规范标准并强化经济性评估。减震设计需符合《建筑抗震设计规范》《高层建筑混凝土结构技术规程》等相关标准,确保设计方案的合规性;经济性评估需结合工程全生命周期成本,综合考虑初始造价、施工周期、维护费用及震后损失,优先选择技术成熟、性价比高的减震方案。同时,关注地方规范差异与政策导向,合理选用减震技术,实现抗震安全与经济性的统一。

#### 结束语

高层建筑抗震安全是城市防灾体系的重要环节。本文通过理论分析与案例验证表明,科学合理的抗震性能评估方法与减震控制策略,可显著提升结构在地震作用下的安全性与经济性。未来需进一步结合智能监测技术、新材料研发及多目标优化算法,推动减震装置向轻量化、高效化、智能化方向发展,为复杂高层建筑抗震设计提供更可靠的技术支撑,助力城市韧性建设。

#### 参考文献

- [1]蒲鹏宇.高层建筑结构抗震性能优化设计[J].建筑科学与工程与设计,2025,4(2):112-113.
- [2]徐开进.简析建筑结构设计中间隔震减震控制技术的应用[J].大众标准化,2023(7):43-45.
- [3]李强,王涛.高层建筑抗震设计的研究进展[J].建筑结构学报,2023,44(8):101-104.
- [4]张军,陈明.高层建筑抗震性能评估方法及应用研究[J].土木工程与管理学报,2022,39(12):55-60.
- [5]王晓东.高层建筑抗震优化设计及其工程应用[J].结构工程师,2021,37(6):48-53.