

市高层建筑抗震设计的方法研究

温建明

5101211981****4018

摘要: 市高层建筑因高度大、功能密集、构造复杂,对地震动的长周期分量更为敏感,一旦设计取值与受力路径不清,易发生层间位移集中与扭转放大,影响疏散与抢修。围绕安全、经济与可恢复三重目标,本文梳理目标分级与规范边界,阐释结构体系选择、受力路径优化与延性细部做法,探讨屈曲约束支撑、阻尼器与调谐质量阻尼等装置化耗能策略,构建“目标—方法—验证”的性能化流程,并以分析步骤与实施要点给出落地路径,为市高层建筑在多级地震作用下实现稳定与韧性提供技术支持。同时讨论非结构系统与机电幕墙的位移兼容与限位要求,提出样板先行与留痕管理的实施机制,以确保设计意图在施工与运维环节保持一致性。

关键词: 高层建筑; 抗震设计; 结构体系; 延性构造; 减震耗能

DOI: 10.69979/3029-2727.25.01.067

引言

城市建成区中高层建筑密度高、功能复合,地震发生时的动力相互作用与次生风险显著。传统以弹性反应为主的设计路径在面对不规则形体、转换结构和新材料装置时,在参数取值与性能评估上存在不确定性,易出现“强度满足而位移失控”的隐患。为在现实约束内获得更稳健的安全边界,需以分级目标统领方案,以规则化布置与受力路径连续性降低扭转与薄弱层风险,以延性构造和装置化耗能分担输入能量,并以反应谱、时程与推覆等方法交叉校验。本文依次讨论原则与规范、关键技术方法、计算分析与实施要点,给出与功能定位和经济投入相匹配的控制指标与协同机制。城市更新与存量改造的叠合约束、超长周期振动与近断层脉冲等因素,使传统简化方法的适用边界不断收缩,设计方、施工方与运维方需要在目标、方法与证据之间建立统一语言,以便在审查、招采与现场环节保持一致,减少返工与信息断裂。针对关键节点与装置参数,应形成样板与复验机制,结合监测数据进行滚动校准。

1 市高层建筑抗震设计的基本原则与规范要求

1.1 抗震目标与功能定位

抗震目标应覆盖结构安全与功能韧性两个层面。基于设防理念,小震弹性、中震可修、大震不倒是底线,但市域核心功能建筑需兼顾震后短期可用。目标量化宜以层间位移角、残余变形、扭转比、构件塑性转角与非结构损伤阈值为主控,并与人员疏散、管线运行与救援通道通畅度关联^[1]。不同功能分区的容忍度差异明显,

住宅更关注室内可居住性与设备抗坠落,办公强调可恢复运营,公共服务设施强调连续运行与关键岗位可达性。方案阶段应将功能需求折算为可度量指标,通过平面规整、质量与刚度中心接近、竖向刚度与质量渐变、受力路径闭合等手段,降低扭转耦联与层间位移集中。对转换层、连廊、大悬挑及不规则体量,宜通过分区缝隔、加强区与限位构造化解应力集中。目标设置还应考虑施工便利与运维成本,以全寿命角度确定合理的安全余度,避免单纯堆叠材料造成资源浪费与维修困难。地震动不确定性要求在参数与模型层面给出稳健性设计。场地类别、近断层效应、长周期成分与竖向分量都会改变需求谱与楼层剪力分配,目标体系应配套波形选取、谱拟合与持续时间约束,设置多记录集群进行响应包络。针对机电与幕墙等非结构系统,需在目标中明确位移兼容与连接限位,以免主体满足而二次系统失效导致功能丧失。为控制修复时间,可在目标中增加“可更换构件比例”“装置可复位性能”“震后评估时限”等管理性指标,使设计与运维形成闭环。存量改造工程应在目标中单列约束,兼顾安全与运营中断成本,形成渐进达标路径。

1.2 规范框架与适用边界

规范体系提供了可操作的底线控制与构造细则。《建筑抗震设计规范》界定地震动参数、分析方法及限值,《高层建筑混凝土结构技术规程》《钢结构设计标准》与装配式相关规程,对不同体系与材料的受力机理和细部做法给出明确要求。项目实施需在“条文底线”之上,结合城市功能定位与场地特征,建立“项目指标”层,形成分级控制^[2]。场地类别与近断层条件影响谱形

与持续时间,规则体系可采用反应谱法配以关键部位加强;存在竖向不规则、扭转显著或转换构件时,应引入线性与非线性时程分析,并对地震动记录进行谱拟合与持续时间约束,确保位移与加速度响应的代表性。采用高强材料与新型装置时,参数取值须以试验或权威指南为据,并以敏感性分析评估安全边界。在构造层面,强柱弱梁、强节点、弱部位受控延性仍是核心逻辑,节点约束、边缘构件配筋与连梁耗能模式需与目标一致。非结构系统与机电、幕墙、管线支吊架应纳入同一验算边界,以位移兼容与连接限位防止功能性失效。对超限与创新方案,应建立专家论证与第三方校核机制,通过模型验证、试验比对与施工样板先行,确保从计算到落地的一致性。高烈度区与软弱土层应结合场地反应分析,必要时开展一维反应分析,修正输入谱并落实基础减震与抗液化措施。在审查与交付环节,建议以“限值+证据”的方式固化成果:限值体现为分级指标,证据体现为分析报告、装置参数来源、构造详图与样板验收记录,使设计意图与现场施工形成可追溯链条,并加强复核把关。

2 市高层建筑抗震设计的关键技术方法

2.1 结构体系选择与布置优化

结构体系的确定决定了周期、受力路径与延性形成机制。市高层项目常见路线包括框架—剪力墙、框架—核心筒、筒中筒与巨型框架—支撑等。框架—剪力墙体系刚度与延性平衡,适合以住宅为主的规则体量;框架—核心筒体系由核心筒提供抗侧主刚度,外围框架承担竖向荷载并参与抗侧,更适合办公与综合体;筒中筒通过内外筒协同形成较高整体稳定;巨型框架—支撑有利于超高层与大跨开放空间^[3]。体系比选应以功能组织与设备布置为前提,明确竖向交通、机电井道与避难层位置,以减少对受力单元的切割与弱化。平面规则性通过对称与紧凑提高扭转稳定,质量与刚度中心应尽量接近,必要时施行调质与局部加劲以降低扭转比。立面规则性强调刚度和质量沿高渐变,严控突变层与薄弱层,转换层宜设置闭合框与加强带,通过连梁与周边构件形成稳定的“拉—压—剪”环路。受力路径优化旨在让地震剪力与弯矩在“楼层—竖向单元—基础”间连续传递,避免次要构件承担主抗侧功能。核心筒墙肢端部与角柱应具备足够抗弯、抗剪与锚固能力,外围框架需控制梁柱刚度比,实现延性先行与屈服序列可控。住宅类项目应控制墙肢开洞率,保证剪切面连续;办公类项目需兼顾开敞空间与连梁耗能,可采用短粗连梁或设置阻尼连梁

以分担能量输入。为降低输入需求与层间位移,可在竖向合理布置阻尼墙、屈曲约束支撑或剪力耗能构件,并通过楼层剪力分配与位移模式分析确定最佳布置层位。方案阶段通过 BIM 与多尺度有限元建立方案库,结合反应谱与快速时程进行参数化比选,以层间位移角、扭转比、材料用量与设备净高为综合评价,得到在安全、功能与成本间较优的体系组合。对高柔体系可评估风地震耦合,必要时配置调谐质量阻尼器控振;基础—上部相互作用可用等效弹簧与阻尼修正,软弱土层宜配合桩筏与地基改良。

2.2 抗震构造措施与耗能减震技术

延性构造与耗能装置共同决定强震下的损伤分配与可修复性。构造层面,剪力墙端部设置边缘构件并配以箍筋加密区,控制压碎与斜压破坏;梁柱节点核心区需闭合箍与足够锚固,限制剪切开裂与穿剪;柱脚与首层建立加强区与楼层加强带,抑制薄弱层与层间位移集中^[4]。对于连梁,可根据跨高比采用短粗连梁实现剪切耗能,或通过钢板/钢筋加强形成稳定滞回;钢结构遵循强柱弱梁与强节点思路,节点型式应经足尺或成熟型式验证其转角能力与稳定性。装置化耗能宜服务于“降低需求、控制位移、易于更换”的目标。屈曲约束支撑提供稳定滞回,适合在巨型斜撑与边框内布置;黏滞阻尼器对速度敏感,适合抑制层间位移与加速度;黏弹阻尼器在中小震下能量分担稳定,维护便捷;摩擦阻尼器可设定滑移阈值形成限位;调谐质量阻尼器针对顶点位移与风振控制,在长周期结构中效果显著。布置策略应基于位移模式与楼层剪力分配,优先投放在位移峰值与软弱楼层,并形成“装置—构件—体系”的调谐关系。参数通过等效阻尼比、屈服力与刚度匹配,并校核耐久性与可更换性。为避免单点失效,装置节点应设旁路与机械限位,采用可视化标定与位移传感监测,运维阶段据监测开展评估与维护。非结构系统往往决定震后功能是否可用,应与主体位移兼容设计。幕墙与机电支吊架按目标位移设置滑移、限位与抗拔,管线用柔性接头与隔振连接。楼梯、避难层节点设置伸缩与限位,电梯导轨与设备按地震工况验算固定与缓冲。设计交底与施工阶段建立样板段,明确配筋、节点、装置安装与复验流程,并以“首件认可—过程抽检—结果留痕”的方式固化质量,使延性与耗能的设计意图在现场得到一致落实。装置与构造应协同:形体规则时用于降低需求,难以规则化时作为补偿,但须经非线性分析验证并明确检修周期,并留存记录。

3 市高层建筑抗震设计的计算分析与案例研究

3.1 地震作用分析与结构反应计算方法

计算分析以代表性地震动输入为起点,结合多方法交叉验证获得稳健结果。小震弹性阶段可采用反应谱法求取内力与位移分布,作为构件尺寸与刚度分配的初步依据;中震与大震阶段应采用时程分析,线性时程用于评估中震下的层间位移与加速度,非线性时程用于刻画塑性发展、屈服序列与残余变形。静力推覆分析通过逐步增载获得能力曲线,判读体系延性与冗余度,结合性能点法或双曲线拟合可估计需求位移。地震动选取需满足谱形、峰值与持续时间三方面一致性,采用多记录集群并进行幅值调整与基线校正,必要时考虑脉冲效应。模型层面,整体模型用于周期与剪力分配,关键部位建立细化模型描述连梁、节点与装置的滞回;非线性采用集中塑性铰或纤维截面,参数来源于试验或指南。结果评判以分级指标为主:层间位移角、扭转比、残余位移、构件塑性转角与装置变形需求,并检查非结构系统的位移兼容。为应对不确定性,应开展参数敏感性分析,通过包络与统计指标给出设计边界;对超限部位开展局部优化与构造强化,直至各级指标满足目标。流程建议分为若干环节:先在方案比选阶段确定体系与布置并给出初步截面;随后建立三维模型,采用反应谱法校核层间位移与内力分配,必要时调整刚度与质量中心;再选取符合场地条件的记录集,完成谱拟合与持续时间校核;之后开展设防与罕遇地震的线性及非线性时程分析,输出层间位移、加速度、塑性发展与装置变形;结合推覆结果检查能力曲线与屈服序列,确认延性与冗余度;对不满足部位通过构造加强、装置参数调整或布置优化处理,并复算至达标。成果表达宜采用“指标清单+证据链”的组合:前者列出限值与计算值,后者包含模型假定、材料参数来源、地震动处理与关键详图,便于审查与实施对齐。必要时实施同等强度的第三方复核,并形成留痕资料。

3.2 工程实例的设计过程与效果评估

以某市一座高 220 米的综合体为例,场地类别 II,设防烈度 8 度,建筑功能包含办公、商业与酒店。体系比选阶段,综合核心筒—外框方案与巨型框架—支撑方案的周期、材料用量与功能适配性,考虑机电竖井与避难层布置后,确定核心筒—外框路线,并在塔冠预留装置空间。反应谱分析显示,初步方案在 30~40 层出现层间位移集中与扭转偏大,通过调整墙肢厚度、增加外

框约束与优化质量分布,使扭转比降至规范限值的七成左右。在此基础上选取 7 条与场地谱匹配的记录,开展设防与罕遇地震的线性与非线性时程分析,结果表明设防地震下最大层间位移角约 1/600,罕遇地震下少量梁端进入塑性,核心筒与柱保持弹性,残余变形控制在允许范围。为降低顶层加速度并改善可使用性,于塔冠设置 300 吨调谐质量阻尼器并对连梁配置黏滞阻尼器,二次分析显示顶点位移降低约三成,峰值加速度下降近四分之一,装置变形处于工作区间。推覆结果给出的能力曲线与时程结果一致,屈服由连梁先行、框架梁次之,柱与核心筒保持安全储备。非结构系统方面,幕墙与机电支吊架按目标位移进行限位与柔性连接,电梯导轨与设备经过地震工况复核。施工阶段样板先行与首件认可,装置完成后出厂复验与现场复测,并留存数据。运营期布设层间位移与加速度监测点,风日与小震记录与模型吻合良好,维保按季度巡检与年度校准。综合评估显示,在满足安全目标的同时,材料用量较初始方案下降约 8%,设备净高得到保障,施工组织未明显复杂化,装置维护成本可控,经济性与功能性更均衡、稳健。

4 结语

围绕市高层建筑的地震需求,宜以分级性能目标统领方案,以规则化形体与受力路径连续性降低不确定性风险,以延性细部与装置化耗能分担输入能量,并用多方法分析与证据链固化结果。通过“体系比选—细部强化—装置调谐—联合验证—运维监测”的闭环,可在安全、功能与成本之间取得更稳健的平衡,为密集城市空间提供可复制的抗震设计路径。同时明确装置维护周期与责任界面,形成闭环。以降低震后恢复的不确定性。保障城市运行韧性。

参考文献

- [1] 孟梅, 亓鹏飞. 高层建筑抗震设计中的结构优化策略分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (05): 68-70.
- [2] 吴华伟. 高层建筑抗震设计的优化与应用[J]. 水泥, 2024, (08): 96-99. DOI: 10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2024.08.025.
- [3] 彭琴. 关于高层建筑抗震设计及周边民房的保护对策[J]. 居业, 2024, (02): 141-143.
- [4] 崔威, 冼剑华, 苏成. 广东省高层建筑抗震设计用地震动功率谱[J]. 华南地震, 2021, 41(01): 117-122. DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.16.