

高层建筑结构抗震设计方法研究

张 昆

天津城建大学建筑设计研究院有限公司 天津 300380

摘 要: 高层建筑因高度大、柔性强,地震作用下高阶振型效应显著,传统抗震设计面临严峻挑战。本文系统阐述了高层建筑抗震设计基本理论,分析了框架、框架-剪力墙、剪力墙、框架-核心筒、筒中筒及巨型结构六类体系的抗震性能与适用条件,重点论述了底部剪力法、振型分解反应谱法、时程分析法等计算方法及弹塑性分析技术,探讨构件延性设计与薄弱层加强策略,并结合减隔震技术的工程应用,为高层建筑抗震设计的方法选型与性能优化提供系统参考。

关键词: 高层建筑; 抗震设计; 性能化设计; 减隔震技术

引言: 随着城市高层建筑持续增长,结构抗震安全已成为工程设计核心议题。地震作用具有随机动态、往复交变特征,高层建筑高阶振型效应与扭转耦联使抗震计算远比低层建筑复杂。我国规范确立“小震不坏、中震可修、大震不倒”三水准设防目标,要求从结构体系选型、计算方法、构件构造到薄弱层处理全方位把控。本文围绕高层建筑结构体系抗震性能、关键设计技术及减隔震应用展开分析,旨在为工程实践提供系统性设计参考。

1 高层建筑抗震设计的基本理论

1.1 地震作用特点

地震作用属随机动态荷载,区别于恒载、活载等静力荷载,具备突发性、往复交变、短时脉冲三大特征,是高层建筑抗震设计的控制荷载。地面运动含水平、竖向两个分量,多数高层以水平地震作用为控制因素,高烈度区与大跨度楼层需补充验算竖向效应。场地条件直接改变地震波频谱特性,软土地基会放大地震加速度,加剧结构破坏。地震作用沿高度呈不均匀分布,高层结构高阶振型效应显著,中上部楼层地震内力往往大于底层^[1]。刚度突变、质量偏心会催生扭转耦联效应,极易造成局部构件率先损毁,抗震计算须综合考量场地类别、结构动力特性、设防烈度多重参数。

1.2 三水准设防目标

我国抗震规范确立“小震不坏、中震可修、大震不倒”三水准设防准则,是高层建筑抗震设计的根本依据。第一水准多遇小震,超越概率约63%,烈度低于设防烈度,结构保持弹性,主体构件无损伤,可正常使用,采用弹性方法验算。第二水准设防烈度地震,超越概率约10%,部分次要构件进入塑性变形,出现局部可修复损坏,主体承重构件完好,作为构件延性设计的控制标准。第三水准罕遇大震,超越概率约2%~3%,地震作用远超

设防烈度,结构进入弹塑性阶段,允许部分构件屈服耗能,但整体不得倾覆、连续倒塌,依靠构造措施与弹塑性变形储备实现生命安全兜底。

2 高层建筑结构体系的抗震性能分析

2.1 框架结构体系

框架结构由梁、柱刚性连接形成承重骨架,楼板传递竖向荷载,空间布置灵活,是中低层高层建筑常用结构形式,抗震性能优缺点突出。框架侧向刚度偏小,地震作用下层间位移偏大,抗侧力全部依靠梁柱构件,遵循“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”抗震设计原则,通过梁端塑性铰耗散地震能量。地震作用下若柱端先出现塑性铰,会形成楼层倒塌机构,因此规范严格限制框架适用高度,高设防烈度区域适用层数大幅缩减。框架质量与刚度均匀布置时扭转效应可控,但若存在凹凸平面、错层布置,极易产生应力集中^[2]。实际工程中通过加大柱截面、增设约束箍筋提升柱延性,优化梁柱线刚度配比,控制层间位移限值,以此改善框架整体抗震耗能能力,规避大震下整层垮塌风险。

2.2 框架-剪力墙体系

框架-剪力墙结合框架与剪力墙两类构件协同受力,剪力墙承担大部分水平地震剪力,框架补充承受剩余水平力与全部竖向荷载,是10~30层高层建筑主流结构体系。剪力墙刚度大,可有效约束结构侧移,大幅降低层间变形,框架负责灵活分割建筑空间,二者协同优化整体动力特性,规避纯框架刚度不足、纯剪力墙布置受限的短板。地震作用下剪力墙率先抵御侧向荷载,进入塑性后由框架接续耗能,双重抗侧防线显著提升抗震冗余度。平面布置不合理、剪力墙零散布置时易出现刚度偏心,诱发扭转震害,因此剪力墙宜均匀、成片、周边布置。设计需合理分配框架与剪力墙剪力比例,保证框架

具备二道防线承载能力,严格控制剪力墙洞口尺寸,避免洞口集中造成墙体薄弱开裂。

2.3 剪力墙结构体系

剪力墙以钢筋混凝土墙体作为竖向承重与抗侧力构件,整体性强、侧向刚度大,地震作用下层间位移小,适用于住宅、公寓等平面规整的高层居住建筑。墙体兼具承重、抗剪、围护多重功能,楼板仅传递竖向荷载,结构整体动力周期短,对长周期地震波敏感度较低。剪力墙分为整体墙、小开口墙、联肢墙等形式,洞口无序开设会割裂墙体受力路径,形成薄弱截面,地震时洞口周边极易出现斜向剪切裂缝。抗震设计遵循“强墙肢弱连梁”理念,让连梁优先屈服形成耗能构件,保护墙肢不提前破坏。高烈度区需控制剪力墙轴压比,通过边缘约束构件配置箍筋提升墙体延性,避免墙体发生脆性剪切破坏。

2.4 框架-核心筒体系

框架-核心筒由中部钢筋混凝土筒体与外围框架组合而成,核心筒依托电梯井、设备井墙体闭合形成空间筒体,承担绝大部分水平地震作用,外围框架承担竖向荷载与少量水平剪力,广泛应用于高层写字楼。闭合筒体空间刚度优越,抗扭性能远优于单片剪力墙,地震作用下整体变形均匀,抗侧与抗扭双重优势适配高层建筑高度需求。外围框架与核心筒通过楼板协同工作,楼板作为水平刚性隔板传递楼层剪力,楼板开大洞会削弱水平传力路径,加剧筒体与框架受力不均。竖向刚度沿高度变化过大、筒体墙体局部开大洞会形成抗震薄弱部位,大震下筒体易出现底部剪切破坏。设计严控筒体墙肢轴压比与连梁配筋,合理控制外围框架柱截面尺寸,保证框架作为第二道抗震防线,弥补筒体受损后的结构承载力空缺。

2.5 筒中筒体系与束筒体系

筒中筒由内部核心筒与外围密柱深梁外筒组成,内外筒体依靠楼面楼板协同受力,空间整体刚度极强,多用于超高层建筑;束筒由多个独立筒体拼接组合,各筒体相互约束,刚度与稳定性进一步提升。内外筒分工明确,外筒抵御倾覆弯矩与水平剪力,内筒承担竖向荷载与部分地震作用,双重筒体结构大幅提升抗震冗余。地震作用下结构整体变形呈弯剪型,抗扭能力优异,平面凹凸带来的扭转影响远小于常规框架剪力墙^[3]。但外筒密柱布置受限、筒体层高突变时,易出现竖向刚度薄弱层,筒体底部应力集中显著。束筒依靠筒体之间隔墙协同受力,单个筒体破损后剩余筒体仍可继续承载,抗倒塌性能突出。设计重点控制筒体底部配筋与约束构造,均匀

分配各筒体受力,避免局部筒体超载率先发生震损。

2.6 巨型结构体系

巨型结构包含巨型框架、巨型筒体两类,以巨型梁柱、巨型筒体作为主体抗侧构件,楼层普通梁柱仅承担局部竖向荷载,是超高层地标建筑常用体系。巨型构件截面尺寸巨大,整体刚度与承载力富余度高,大震下主体巨型构件保持弹性,依靠次级结构塑性变形耗散地震能量,抗震储备充足。结构竖向受力分层明确,主次构件受力路径清晰,可实现大跨度、大空间建筑布局。但巨型构件节点构造复杂,节点区域钢筋密集、应力集中,是抗震关键控制部位;竖向主次结构刚度悬殊,地震作用下二者变形不协调,易引发次级构件过早破坏。设计优化巨型节点配筋构造,设置合理变形缝缓解变形差,控制次级框架延性指标,使其成为主要耗能构件,保护巨型主体结构在罕遇地震中不发生不可逆损毁。

3 高层建筑抗震设计关键技术

3.1 地震作用计算方法

现阶段高层建筑地震作用主流计算包含底部剪力法、振型分解反应谱法、时程分析法三类,依据建筑高度、结构复杂程度分级选用。底部剪力法计算简便,适用于高度40m以内、刚度质量均匀的规则高层框架结构,以等效总水平地震剪力分配各楼层荷载,忽略高阶振型影响。振型分解反应谱法是高层常规计算手段,提取前若干阶有效振型,结合反应谱曲线计算各振型地震内力,通过平方和开根号组合效应,可精准考虑高阶振型、扭转耦联影响,适配框剪、剪力墙等多数高层体系。时程分析法输入实测地震波模拟地面运动,动态追踪结构内力变形全过程,作为超高层、不规则复杂结构的补充验算方法。计算需匹配场地特征周期,选用符合场地类别、设防烈度的地震波,保证地震作用取值贴合实际场地震动特性^[4]。

3.2 弹塑性分析方法

弹塑性分析用于罕遇地震下高层建筑变形与损伤验算,弥补弹性计算无法模拟构件屈服后的受力缺陷,分为静力弹塑性Pushover分析与动力弹塑性时程分析。静力Pushover通过逐级施加侧向荷载,绘制结构能力曲线,对比地震需求谱判定塑性铰出现位置、楼层变形与倒塌风险,计算效率高,多用于常规高层薄弱层预判,快速定位抗震短板。动力弹塑性时程导入多条天然或人工地震波,跟随地震时间步长模拟构件开裂、屈服、失效全过程,精准反映刚度退化、内力重分布规律,适用于超高层、竖向不规则等复杂结构。分析前需合理定义材料本构关系、构件塑性铰参数,模拟混凝土开裂、钢筋屈服

等非线性特征,结合规范变形限值,依据分析结果优化构造配筋,对变形超标薄弱部位采取加固加强措施。

3.3 构件抗震设计要点

高层建筑梁柱、剪力墙、筒体等承重构件均需遵循延性抗震设计思路,通过构造措施提升变形耗能能力,避免脆性破坏。框架柱严控轴压比,轴压比超标会大幅降低延性,加密柱端箍筋形成约束混凝土,提升受压变形能力;梁端合理配置纵向钢筋与箍筋,控制配筋率,实现梁端先于柱端出现塑性铰。剪力墙约束边缘构件与构造边缘构件按设防烈度差异化配筋,约束墙体端部,防止墙肢端部脆性崩裂,连梁通过配置交叉箍筋提升剪切延性。筒体连梁控制跨高比,跨高比过小易发生剪切破坏,必要时设置耗能配筋。所有构件抗震锚固、搭接长度依据抗震等级放大,节点区箍筋按规范加密。

3.4 薄弱层与加强层设计

高层建筑因竖向刚度突变、楼板大开洞、局部抽柱等因素易形成抗震薄弱层,薄弱层刚度偏小,地震下变形急剧放大,是大震倒塌高发区域。规范要求计算楼层侧向刚度比,刚度小于上层70%或连续三层平均刚度80%即判定为薄弱层,薄弱层地震剪力乘以增大系数,提高构件设计承载力。加强层常设置于超高层筒体与外围框架之间,利用刚度巨大的桁架、大梁连接内外抗侧构件,协调竖向变形、减小内外筒位移差,一般布置在设备层、避难层位置。加强层刚度不宜过大,避免上下楼层形成新薄弱层,加强层大梁与筒体节点为关键抗震部位,需强化节点配筋。设计优先优化建筑布局从源头规避薄弱层,无法规避时加厚楼板、加密构件配筋,通过构造补强提升薄弱层整体抗震储备。

4 减隔震技术在高层建筑中的应用

高层建筑因高度大、柔性强,水平荷载效应随高度递增而起决定性作用,传统“硬抗”抗震已难以满足高烈度区安全需求。减隔震技术的引入,为高层建筑抗震开辟了全新路径。隔震技术通过在基础与上部结构之间设置叠层橡胶隔震支座,将建筑自振周期延长2—3倍,有效

避开地震卓越周期,从传力路径上阻隔能量传递。实测表明,隔震建筑上部结构水平加速度、层间位移可降低60%—80%,主体构件基本保持弹性状态,震后自动复位,功能不中断。该技术已在北京盈泰中心、长沙世茂广场等超高层项目中成功应用^[5]。减震技术则在结构支撑、连梁、伸臂桁架等关键部位设置黏滞阻尼器、摩擦耗能装置等,通过滞回变形耗散地震能量,可将上部结构地震作用减小20%—30%。其布置灵活,适用于框架剪力墙、框架核心筒等各类高层体系,施工对正常使用影响极小。当前,云南已强制要求8度及以上区域学校、医院采用减隔震技术,组合应用——隔震与减震协同、多种耗能装置配合——正成为高层建筑抗震的主流趋势,从根本上提升了建筑的安全裕度与震后韧性。

结束语

高层建筑抗震设计是一项系统性工程,需从结构体系选型、计算方法、构件构造到减隔震技术综合考量。框架体系灵活但刚度不足,筒体体系抗扭优越但构造复杂,设计须依据建筑高度与功能合理选型。弹塑性分析与薄弱层加强是保障大震安全的关键手段,减隔震技术则从传力路径上提升了结构安全裕度。未来,性能化设计与智能监测技术的深度融合,将推动高层建筑抗震设计向更精准、更韧性的方向持续发展。

参考文献

- [1]郭志辉.复杂高层建筑结构抗震设计方法研究[J].砖瓦,2023(3):95-97.
- [2]刘琼,雷新凯.基于抗震性能优化的高层建筑结构设计方法研究[J].砖瓦世界,2025(18):19-21.
- [3]沈冲.高层建筑结构抗震设计与优化方法研究[J].建筑·建材·装饰,2025(1):127-129,111.
- [4]张伟,封名扬,朱敦诚.高层建筑剪力墙结构抗震性能影响因素及优化设计研究[J].中州建设,2026(4):119-120.
- [5]张潇之.高层建筑框架结构抗震设计优化方法研究[J].工程技术研究,2025,7(13):40-42.