

高层建筑结构抗震性能分析研究

章 欣

南昌市建筑科学研究所有限公司, 江西 南昌 330000

[摘要]高层建筑作为城市空间拓展的重要载体,其抗震安全性直接关系到人民生命财产安全和城市功能的正常运转。文中从高层建筑的结构特点出发,系统分析了当前高层建筑结构抗震设计中存在的突出问题,包括结构布置不合理、抗侧力体系设计不足、构件延性设计欠缺以及消能减震与抗震性能分析精度不足等方面。在此基础上,从结构体系选型与布置优化、关键构件抗震承载能力提升、延性设计加强以及消能减震、隔震与智能监测技术综合应用等角度,提出了针对性的抗震性能优化措施。研究发现,高层建筑抗震设计要从结构体系选型、性能指标确定、响应分析方法、数值建模等各方面进行系统整合;抗震设计理念应该从原来的“规范导向”转变为“性能控制”,用精细化的弹塑性分析和多目标性能评价来实现从“防倒塌”到“性能可控”的转变,给高层建筑抗震设计提供系统的技术参考。

[关键词]高层建筑;抗震设计;结构布置;延性设计;消能减震;隔震技术

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20047

中图分类号: TU973.31

文献标识码: A

Research on Seismic Performance Analysis of High-rise Building Structures

ZHANG Xin

Nanchang Institute of Building Science Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

Abstract: As an important carrier of urban spatial expansion, the seismic safety of high-rise buildings is directly related to the safety of people's lives and property and the normal operation of urban functions. Starting from the structural characteristics of high-rise buildings, the article systematically analyzes the prominent problems in the current seismic design of high-rise building structures, including unreasonable structural layout, insufficient lateral force system design, lack of component ductility design, and insufficient accuracy in energy dissipation, seismic reduction, and seismic performance analysis. On this basis, targeted seismic performance optimization measures are proposed from the perspectives of structural system selection and layout optimization, improvement of seismic bearing capacity of key components, strengthening of ductility design, and comprehensive application of energy dissipation, seismic isolation, and intelligent monitoring technology. Research has found that seismic design of high-rise buildings requires a systematic integration of structural system selection, performance indicator determination, response analysis methods, numerical modeling, and other aspects; The seismic design concept should shift from the original "specification orientation" to "performance control", using refined elastic-plastic analysis and multi-objective performance evaluation to achieve the transition from "collapse prevention" to "controllable performance", providing systematic technical reference for seismic design of high-rise buildings.

Keywords: high-rise buildings; seismic design; structural layout; ductility design; energy dissipation and shock absorption; seismic isolation technology

引言

随着城市开发向着高密度、垂直化方向不断发展,高层建筑在城市结构中所占比例越来越大,抗震安全问题也成了结构设计的主要问题。高层建筑由于结构体系复杂、振型多而密集、高阶模态参与较多,所以具有高度非线性地震响应特点。高层建筑在地震作用下受力机理比多层建筑要复杂得多,不但要承受更大的水平地震作用,还要承

受高阶振型的影响、扭转效应明显和重力二阶效应突出等许多复杂的问题。传统的抗震设计方法过分强调依靠强度储备和构造措施来保证安全,对于超限、不规则等情况很难同时达到安全性和经济性的要求。近些年来,基于性能的抗震设计理念渐渐被重视起来,它的关键之处在于促使抗震设计由“规范导向”转向“性能控制”。本文在对高层建筑结构特点进行梳理的基础上,对高层建筑抗震设计

中存在的主要问题进行分析,并提出相应的优化措施,以供高层建筑抗震设计使用。

表 1 存在问题与优化措施对应关系

存在问题	对应优化措施
结构布置不合理	优化结构体系选型与布置
抗侧力体系设计不足	提高关键构件抗震承载能力
结构构件延性设计不足	加强结构延性设计
消能减震与性能分析精度不足	消能减震、隔震与智能监测综合优化

1 高层建筑结构特点分析

高层建筑结构形式同低、多层建筑相比,有明显的不同。从高度上看,高层建筑高宽比较大,侧向变形是控制设计的主要因素,随着高度的增大,水平地震作用引起的层间位移和顶点位移迅速增大, $P-\Delta$ 效应不能忽略。从结构体系上来说,高层建筑一般会使用框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、框架-核心筒结构以及筒中筒结构等不同的结构形式,各种体系在抗侧刚度、承载能力以及耗能方式上各有利弊。高层建筑的抗震性能同民众的生命财产安全息息相关,在地震频发地区,要分析抗震特性并探究其性能水平,区分认识各类结构系统。从荷载及作用来看,高层建筑除了竖向重力荷载之外,水平地震作用、风荷载也成了控制性荷载,而且随着高度的增大,地震作用的分布规律与低层建筑有本质区别,高阶振型的影响越来越明显。从抗震设计角度来讲,高层建筑对于延性、冗余度以及多道防线的要求更加严格,要从概念设计、计算分析到构造措施等各个方面进行全过程的系统控制。这些特点决定高层建筑抗震设计要以性能化为导向,在结构选型、布置、构件设计以及减隔震技术的应用上采取相应的措施。

2 高层建筑结构抗震设计存在的问题

2.1 结构布置不合理问题

高层建筑为了满足使用功能和建筑造型的要求,经常采用复杂的平面和竖向布置,因此会产生一系列的抗震不利因素。在平面布置上,凹凸不规则、楼板大开洞、扭转偏心等现象比较普遍,当多项不规则情况同时出现的时候,超高层建筑的安全与合理设计难度就比较大。平面不规则造成结构质心和刚心不重合,在地震作用下产生较大的扭转效应,使远离刚心的构件承受过大的附加剪力。竖向布置方面,刚度突变、收进过大、错层、转换层等造成结构在某一层出现薄弱层,地震作用下变形集中于此,容易引起层屈服甚至倒塌。高层建筑中框支剪力墙结构为不连续的竖向抗侧力结构,下部刚度不如上部,因此侧向刚度和抗剪力承载之间就会产生矛盾^[1]。高宽比超限时,应进行专门的抗倾覆验算和论证,基础边缘容易出现拉应力区;

楼板开洞过大或者连接部位设计不合理,水平地震力不能有效地传递到各个抗侧构件上。布置层面的问题从根本上降低了结构整体抗震性能。

2.2 抗侧力体系设计不足问题

抗侧力体系属于高层建筑抵御水平地震作用的关键部分,它的设计是否恰当关乎结构的安全储备。目前的设计中经常出现剪力墙布置位置不合理或者数量较少,造成结构侧向刚度不够,层间位移角过大等问题,框架柱受轴向压力作用,其延性一般比梁小,轴压比控制不好也会削弱柱端在大震动下变形的能力,支撑体系选型不合理或者节点构造薄弱,支撑在地震中不能发挥出应有的耗能和约束作用。更突出的是多道抗震防线的设置没有被清楚地表达出来。多道抗震防线指的是结构中应该由不同的抗侧力构件共同工作,各道防线应具有明确的屈服次序,第一道防线屈服后,第二道防线应能继续承担地震作用。但是,在实际工程中,各个防线之间剪力的分配没有系统优化,层次划分不清,一旦主要抗侧构件失效,结构缺少足够的安全储备。对于框支剪力墙等竖向不连续的结构,底部框架和上部剪力墙的协同工作机理比较复杂,抗震性能差的问题更加明显。

2.3 结构构件延性设计问题

延性指的是结构在屈服之后还能保持一定的承载能力,并且可以消耗掉地震能量的能力,它是实现大震不倒抗震设防目标的重要保证。但是在实际工程中,构件延性设计存在着许多不足。在塑性铰处,梁柱端部箍筋配置少或者间距大,不能够对受压区混凝土起到有效的约束作用,造成混凝土过早地压碎剥落,塑性转动能力受到限制。高层建筑抗震设计中轴压比、剪跨比是决定构件延性最核心的两个因素。框架设计中,强柱弱梁属于设计延性框架的基本措施之一。如果不对柱端进行强柱弱梁处理,则柱端容易出现塑性铰,并且塑性转动过大,甚至会出现同层各柱上下端同时出现塑性铰的“柱铰机构”,从而危及结构承受竖向荷载的能力。但是,由于现浇楼板对梁端承载力的增强效应未得到充分考虑,导致梁端实际受弯承载力大于设计值,从而削弱了“强柱弱梁”的实现。节点核心区是梁柱交界处,配箍不足、抗剪承载力低的节点较多,地震中节点一旦出现脆性剪切破坏,就会造成相邻构件失去约束而整体失稳。钢筋锚固与搭接长度未按抗震要求加长、机械连接质量参差不齐等问题也制约着构件延性的充分发挥。

2.4 消能减震与抗震性能分析精度不足问题

消能减震、隔震技术是提高高层建筑结构抗震性能的

重要手段,但是在高层建筑中还存在着很多不足。消能减震方面消能支撑设计理论只停留在平面结构层次,造成现有的技术与双向地震变形特征不适应;消能节点削弱了结构的刚度和承载力,使主体结构的承载、抗震、韧性多目标难以协调;消能器的布置没有根据结构的动力特性进行系统性的优化,与主体结构的匹配度不高,减震的效果不能得到充分发挥^[2]。在隔震技术方面,相对成熟的一些隔震技术已经应用于多层建筑、桥梁、大跨结构等,在超高层建筑中应用仍面临较大挑战(如高宽比较大导致支座受拉、高阶振型影响等),主要是由于高层建筑高宽比较大,容易造成边缘隔震支座受拉破坏甚至结构倾覆,而且高阶振型影响较大。高层建筑结构周期延长比中低层建筑结构小得多,减震效率也比中低层建筑低。在抗震性能分析方面,计算模型对材料非线性、节点半刚性、楼板与梁柱共同作用等重要因素的模拟过于简化,地震波选取没有考虑到场地条件和结构特点的充分论证,罕遇地震下弹塑性分析的精度不能得到保证,从而不能正确评价结构在极限状态下真实的抗震性能。目前抗震性能分析主要采用弹性反应谱法,对于基于位移的抗震设计方法以及 IDA 方法的应用研究较少,不能很好地评价结构在不同水准地震作用下所达到的性能水平及损伤情况。

3 高层建筑结构抗震性能优化措施

3.1 优化结构体系选型与布置

对于结构布置不合理的情况,应该在概念设计阶段就对结构进行系统的优化。首先,根据建筑高度、功能要求、场地条件、设防烈度等各方面因素,合理选择框架剪力墙、框架核心筒、筒中筒等结构形式,保证结构体系有足够的抗侧刚度和冗余度。其次,在平面布置上要严格控制扭转不规则性指标,通过改变剪力墙、柱等竖向构件的平面位置来使质心和刚心尽量重合,减小偏心距。抗震设计时,高层建筑宜调整平面形状和结构布置,不能设置防震缝,体型复杂的建筑要根据不规则程度综合判断。在竖向布置上,应保证刚度沿高度均匀连续变化,避免突变和错层,必须设置转换层时应采取加强措施并严格控制转换层上下刚度比。合理控制建筑高宽比,对超限项目应做专门的抗倾覆验算。优化楼盖刚度和完整性,保证水平地震力在各个抗侧构件之间可靠传递。

3.2 提高关键构件抗震承载能力

针对抗侧力体系设计不足的问题,应从构件层面逐项提升承载能力。剪力墙应双向布置,形成空间结构,特别强调在抗震结构中,应避免单向布置剪力墙,并宜使两个方向刚度接近;在底部加强区适当提高配筋率并控制墙肢

轴压比。框架柱应严格限制轴压比,并按抗震等级配置足够数量的封闭箍筋以形成约束混凝土,改善其在大震下的变形能力。支撑体系要根据结构特点合理选择,优先选用偏心支撑或者屈曲约束支撑等具有较好耗能性能的支撑形式,加强节点连接构造。防线设置要明确多道抗震防线的层次关系,合理分配各个防线所承担的楼层剪力^[3]。对框支剪力墙等竖向不连续的结构要进行专项抗震分析,对底部框架及转换构件进行加强,保证上下部结构共同工作。

3.3 加强结构延性设计

为了解决构件延性设计不够的问题,应该从塑性铰控制、内力调整、构造措施等各方面进行系统的加强。在塑性铰预期出现的区域,应加密箍筋并采用复合箍筋形式,通过约束混凝土提高核心区混凝土的极限压应变和塑性转动能力。刚度太大或者太小对结构都会产生不利影响,结构单纯抗震设计时需要足够的延性。为了提高高层建筑的结构延性,要实现强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱杆件的效果,可以促使结构在地震发生的时候迅速进入弹塑性阶段,有效地吸收地震所释放出来的能量。就具体而言,采用梁端弯矩调幅、柱端弯矩增大系数的合理取值来保证强柱弱梁机制的实现。我国建筑抗震规范中通过柱端弯矩增大系数的构造措施来提高框架结构在罕遇地震下的延性储备仍有所不足,为了进一步提高框架结构在罕遇地震下的延性储备能力,需要在设计中有意识地加强相关构造要求。增大节点核心区的配箍率并增设交叉斜筋来提高节点的抗剪承载力,防止节点发生脆性剪切破坏。所有的受力钢筋均要按照抗震等级的要求采用机械连接或者足够长度的弯锚搭接,保证大变形条件下钢筋和混凝土可以共同工作不出现失效现象。对剪跨比小、抗震性能差的短柱等构件,应采用提高剪跨比或加外包钢等方法提高其抗震能力。

3.4 消能减震、隔震与智能监测技术综合优化

为了解消能减震、隔震技术及性能分析精度问题,应该从技术应用和分析方法两方面综合改进。消能减震上,利用动力时程分析对消能部件的平面、竖向布置进行优化设计,根据结构振型特点选择最合适的消能器;通过安装适当的阻尼装置可以大大提高原有的结构抗震性能。高层建筑宜采用组合隔震方案;大高宽比引起的支座受拉问题,可采取差异化布置隔震支座型号、设抗拉装置等方式予以解决;建立隔震支座定期检测、更换和维护制度。

在抗震性能分析方法上应该积极采用基于性能的抗震设计方法体系。具体而言,其一,推广基于位移的抗震设计方法,用结构的层间位移角作为主要的性能控制指标,按照不同的抗震设防水准来确定具体的性能目标(小震不

坏、中震可修、大震不倒的多级设防要求);其二,大量开展弹塑性时程分析,用精细的纤维模型或者分层壳模型模拟梁、柱、剪力墙等关键构件的非线性行为,考虑材料损伤发展和刚度衰减的规律;其三,采用增量动力分析(IDA)的方法,对结构施加不同的地震动输入,得到结构从弹性到弹塑性再到倒塌的全过程响应曲线,从而评价结构的抗倒塌储备系数(CMR),给超限高层建筑的抗震性能评价提供定量的依据。同时选取多组符合场地条件的天然波和人工波进行罕遇地震时程分析时,应对地震波的频谱特性、持时、峰值加速度等进行充分论证,保证分析结果的可靠性^[4]。将IDA分析同地震危险性评价相结合,可以对超高层建筑的抗震性能进行量化,促使抗震设计从原来的“防倒塌”向“性能可控”转变。智能监测要创建起以物联网为基础的智能监测体系。强震动监测属于结构健康监测的一种有效手段。目前在武汉市100多座超高层建筑上已经设置了建筑结构地震安全监测系统,形成了全国最大的超高层建筑强震动监测台阵。利用加速度、位移、应变传感器在重要部位布置,可以对由于风振、地震等引起的结构动力响应进行监测。该系统可以对大楼结构安全监测数据进行实时采集、分析、预报警信息快速推送、震害报警处置。智能监测体系可以给震后快速决策、性能验证提供可靠依据。

4 结语

高层建筑抗震性能提高是结构体系选择、构件设计、

减隔震技术使用、分析监测手段等诸多方面综合性的工程。本文对目前高层建筑抗震设计中结构布置、抗侧力体系、构件延性和消能减震、抗震性能分析精度等各方面存在的主要问题进行了系统的分析,提出了相应的优化措施。研究显示,抗震设计要由原来的“规范导向”向“性能控制”转变,在结构选型时重视规则的体型和均匀的刚度分布,在构件方面加强延性设计和多道防线设置,在技术手段上积极引进消能减震、隔震和智能监测等先进技术和方法。将IDA分析与地震危险性评价相结合,可以对超高层建筑的抗震性能进行量化评价,促进抗震设计由原来的“防倒塌”向“性能可控”转变。伴随着高性能材料、智能化监测手段、精细化分析方法的发展,高层建筑抗震安全水平将会得到提高。

[参考文献]

- [1]韩晶.高层建筑结构设计中的抗震性能优化路径分析[J].新发现,2025(19):76-78.
- [2]张春明.高层建筑结构抗震性能处理措施分析与设计[J].房地产世界,2020(24):32-34.
- [3]曹维科,秦世奇,王浩屹.高层建筑结构抗震性能处理措施分析与设计[J].城市建设理论研究(电子版),2020(17):93.
- [4]蒋新新,李梦琪.某超高层建筑结构抗震性能分析与抗震构造措施[J].低温建筑技术,2020,42(6):86-90.

作者简介:章欣(1990—),女,汉族,江西南昌人,本科,任职于南昌市建筑科学研究所有限公司。