

建筑结构抗震性能评估与加固设计研究

柳 逊

河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]地震灾害给建筑物带来严重破坏,合理进行抗震性能评价以及采取有效的加固措施可以保证现有房屋抗震安全。本文总结了影响建筑物抗震性能的主要因素包括结构体系、材料、地基基础及结构规则性等,并在此基础上提出加强抗震性能评价工作、改善加固方法、推广减隔震技术应用、注重工程质量控制以及加强健康监测等五点建议。研究表明,采用以抗震性能为基础精确评估并结合多种加固手段才是提高建筑物整体抗震性能、建设韧性城市的必然选择。

[关键词]建筑结构;抗震性能评估;加固设计;减隔震技术

DOI: 10.64635/ja.2026.1203

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Research on Seismic Performance Assessment and Reinforcement Design of Building Structures

Liu Xun

Hebei Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract: Earthquake disasters can cause serious damage to buildings. Reasonable seismic performance assessment and effective reinforcement measures can ensure the seismic safety of existing buildings. This paper summarizes the main factors affecting the seismic performance of buildings, including structural systems, materials, foundations, and structural regularity. On this basis, five recommendations are proposed: strengthening seismic performance assessment, improving reinforcement methods, promoting the application of seismic isolation and energy dissipation technologies, emphasizing engineering quality control, and enhancing structural health monitoring. The study shows that accurate assessment based on seismic performance, combined with multiple reinforcement methods, is an essential approach to improving the overall seismic performance of buildings and building resilient cities.

Keywords: building structure; seismic performance assessment; reinforcement design; seismic isolation and energy dissipation technology

引言

我国位于环太平洋地震带及欧亚地震带交汇地带,地震频发且范围广泛,是世界上遭受地震灾害最严重的国家。历次大地震告诫人们,建筑物抗震安全不是一劳永逸的事情。大量不同年代建成的老房子由于当时设计理念和技术水平所限,在抗震方面都有不同程度的问题。随着时间流逝,建筑材料老化、构件损伤等问题会使得它们抵抗地震的能力下降。同时,我国抗震设防标准也在逐步提高和完善中,新建建筑抗震设防目标也从过去的“以人的生命安全为底线”,转变到现在的“整个建筑生命全周期韧性”。为此就需要对现有的建筑物进行抗震性能检测以及合理有效的加固设计工作来保证人们的生命财产安全,促进韧性城市理念的发展。

1 建筑结构抗震性能评估与加固设计的重要意义

抗震性能鉴定及加固设计是国家防震减灾工作的重要组成部分,在整个建筑物寿命周期内发挥着重要作用。就实际情况而言,那些在抗震规范发布之前所建造房屋,由于当时的技术条件限制以及对地震认识不足等原因,导致这些房屋的抗震性能远远不能达到现在的抗震规范的要求,如果不进行定期检查及时加固,一旦发生地震就会造成严重后果。另外,从城市的安全性和韧性角度来看,建筑的抗震安全性也是关乎整个地区抗御自然灾害的能力的问题,《建筑抗震鉴定标准》提出了一个分级分类的方法,把既有建筑物的后续使用寿命分为 30 年、40 年、50 年三个阶段,分别对应 A、B、C 类建筑的不同鉴定方式,这实际上也是做到“有的放矢、区别对待”。此外,

抗震加固有明显的经济效益和社会效益,在经济上比拆除重建节约资金,节省时间,对建筑正常使用影响较小。尤其是对于学校的教学楼、医院等需要重点设防的建筑,良好的加固可以使它们在罕遇地震下仍能正常发挥功效,便于救援工作开展。

2 建筑结构抗震性能影响因素分析

2.1 结构体系对抗震性能的影响

结构体系是影响建筑抗震能力的主要因素。钢筋混凝土框架体系具有较好的延性和耗能能力,但是填充墙设置不合理会产生“短柱”,框架—剪力墙体系由于剪力墙有较高的抗侧刚度,在高层建筑中大量采用;钢结构由于钢材良好的塑性,抗震性能优越,但是对节点的质量要求非常高;砌体结构由于其材料脆性以及整体性差,在强烈地震下容易造成脆性破坏。而框架—剪力墙体系以及框架—核心筒体系由于剪力墙或者核心筒具有较大的抗侧刚度可以有效地限制建筑物的水平位移所以在高层建筑中得到广泛应用。

2.2 建筑材料性能影响

建筑材料的性能是抗震能力的基础。混凝土强度等级决定构件抗压承载力,钢筋延性决定构件在反复荷载作用下变形能力^[1]。传统的钢筋选择一般只关注其抗拉强度等一些静态参数,在最新规范中对于钢筋延展性、韧性以及施工可操作性都提出了更高的要求,尤其对钢筋最大力总伸长率有更高的规定,同时对于HRB400、HRB500等高强钢筋在抗震建筑中使用提出了严格的强屈比和超屈比的要求。另外,混凝土与钢筋之间的粘结性能、填充墙砌体的砂浆强度均会对整个结构的工作起到至关重要的影响。

2.3 地基基础条件影响

地基基础条件对于抗震性能起着重要作用。不同场地土质会导致地震动频谱及地表峰值加速度发生变化。等效剪切波速、覆盖层厚度以及地基土动力非线性都会给建筑物带来不利影响。深厚软土地段容易产生对长周期地震动放大的作用,在1985年墨西哥城地震中,离震中大约400km处由于深厚软土的作用造成场地放大作用,导致该地区的房屋几乎全部倒塌。因此,对于软土地基的建筑,宜按照更高的抗震设防烈度来确定抗震构造措施。地基液化也是一个关键影响因素,在地震作用下饱和砂土或者粉土中的孔隙水压力迅速增加,从而造成地基失去承载能力而产生建筑物不均匀沉降或倒塌等。

2.4 结构规则性与刚度分布影响

结构平面及竖向规则性是抗震设计基本要求。平面不

规则包括凹凸不规则、楼板局部不连续以及扭转不规则;竖向不规则包括侧向刚度突变和承载力突变。建筑物扭转是由于平面不规则造成的最危险后果,在地震作用下,当建筑物质心与刚心不一致时,角部首先发生过大位移而破坏。竖向方面,若相邻楼层之间侧向刚度或抗剪承载力差别较大,则地震力会集中在薄弱层使其先于整体结构产生破坏,从而造成整个建筑物倒塌。对于平面或立面不规则、质量和刚度明显不对称建筑物,在进行抗震性能评估时要特别注意考虑扭转对建筑物不利影响,确定薄弱区域并采取相应措施加强。所以设计时要尽可能地使结构布置均衡对称,合理布置抗侧力构件并控制好各层层间刚度比,防止出现薄弱层及突变层,在此基础上采取加固构造来增强建筑的整体抗震性能。

3 建筑结构抗震性能评估与加固优化措施

3.1 完善抗震性能评估体系

科学合理的抗震性能评价标准,是进行加固设计的前提和基础。目前我国抗震鉴定已经形成了比较完整的体系,采用两阶段递进式的鉴定方法,即第一阶段为宏观管理及构造合规性检查,如果符合要求则不需要进入第二阶段;如果不符合,则开始以抗震验算为主的第二阶段工作。分级鉴定模式既可以保证鉴定的严谨性,又可以防止资源的浪费。在此基础上,完善评估体系需从以下两个方面扩展评估维度:首先,是建立建全覆盖建筑全生命周期的评估机制。即建筑物设计阶段的抗震性能评估验算、建造过程中关键部位及关键构件的重点检查、建成后的日常监测、发生地震后快速评估响应的全链条机制,将建筑物的抗震性能评估贯穿整个生命周期;再者,需将非结构构件纳入评估体系。如幕墙、管线、设备支架等非结构主体构件常因震后损坏导致巨大的经济损失和次生灾害,因此现有评估体系必须超越对主体结构的关注,避免非结构构件的震后损害造成的影响。

3.2 优化抗震加固设计方案

抗震加固设计是提高建筑物抗震性能技术关键所在。根据不同的建筑结构类型,要采用不同的加固方法。对于钢筋混凝土框架结构,可以增大截面增加柱子来提高其轴压比以及抗弯能力,在梁、柱节点处外包型钢或者粘贴碳纤维布加强。而对于抗震变形能力较差建筑物,则需要增加剪力墙或者支撑来加强整个结构刚性和耗散能量的能力。砌体结构可采用增加圈梁、构造柱、在外墙表面增加钢筋混凝土墙面以及增加钢拉杆等方法形成整体约束骨架,在改进方案中要以“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱

构件”为原则进行设计。此外，加固后结构的安全性也不能忽视，竖向严重不规则的建筑更应如此，利用增量动力分析法或者其它方法对加固情况进行全面的检查。

3.3 推广新型减震隔震技术

推广新型减震隔震技术是提高建筑抗震设防水平一条革命性手段。传统的抗震是以结构自身承受塑性变形来耗散地震能量，而减隔震则是以改变结构动力学性质为基础降低地震影响。隔震是利用位于建筑物底部与地基之间的柔性隔震层，在叠层橡胶支座作用下使建筑物自振周期大幅增长从而避开地震主要能量频率范围。在 2023 年土耳其 7.8 级双震中，使用隔震技术德尔特约尔国立医院震后完好无损并正常运转，而在其附近未采取隔震措施普通医院却遭到重创。消能减震技术是在结构的某几层之间布置黏滞阻尼器、金属屈服阻尼器或者摩擦阻尼器等耗能元件，使结构产生相对位移来消耗地震能量。采用消能减震技术的框架建筑装配式加固方案已经得到了广泛的应用^[2]。此外，还可以采用混合减震加固方案，即将不同种类的耗能元件（屈曲约束支撑和黏滞流体阻尼器等）组合在一起使用的加固方法。研究发现，采用底层设 BRB、上层设 VFD 的混合减震方案，所增加的阻尼比为 2.61%~2.84%，比单一种类的阻尼器加固方案可以更有效地减少建筑物最大层间位移角，增加建筑物的耗能能力，同时也避免了由于布设 BRB 而引起的底部剪力及加速度增加的问题，可显著降低建筑物的受损程度。

3.4 提高施工质量管理水平

抗震设计图纸最后还是要经过良好施工变成真正有抗震能力建筑。而在施工过程中出现一点失误或偏差，在地震中都会被成倍放大成为严重结构问题。首先，材料进场检验必须符合标准，保证混凝土强度、钢筋力学性能、焊接接头质量等各项指标达到设计标准。其次，关键环节

管理十分必要。如现浇钢筋混凝土结构要关注梁柱节点区箍筋加密范围、钢筋搭接长度以及混凝土浇筑密实程度等问题；而预制构件则需检查钢筋套筒灌浆饱满与否等试验资料并选取部分节点在现场取样检测，以保证该部位能否有效传递荷载并且能达到同等现浇效果。同时大力推行基于 BIM 技术施工仿真以及物联网技术在线监控等新型管理模式，在施工现场做到精确化可视化管理。

3.5 建立结构健康监测机制

结构健康监测技术是进行建筑物抗震性能评价及全寿命期管理的重要保障手段。不同于传统的事后检查鉴定方法，在线监测是在建筑物服役期内布置大量传感器，对建筑物所受环境荷载、结构响应以及重要部位工作状态等进行连续或者准连续监视，可以及早发现微小缺陷和发展趋势。伴随着传感器技术以及信息技术的进步以及应用，为保证结构在整个使用寿命期间的安全可靠性和耐久性，结构健康监测已经成为了一项必要的技术，可对结构的状态进行连续或者定期地监测。一般而言，一个完整的健康监测系统包括传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据分析与处理子系统以及报警评估子系统等几个部分。传感器类型需依据建筑物自身情况进行选择，在重要部位安装应变片测量关键构件的变形情况，在各层设置加速度计记录结构的振动响应，在各层层间安装位移计观测层间相对位移变化。结构健康监测也越来越多使用机器学习以及数字孪生等方法，可有效提高监测精度及效率^[3]。此外，基于监控摄像头的结构地震响应监测系统可以实现对亚像素级层间位移进行监测。随着数字化进程的发展，还可以通过建立整个建筑从设计到服役全过程数字孪生体，将获取信息及时反馈给数字孪生体，并结合有限元分析及损伤检测技术进行判断，在损伤发生初期给予及时维修建议。下表对结构健康监测的主要内容进行了系统梳理。

表 1 建筑结构健康监测主要内容与技术指标

监测类别	关键监测指标	常用技术手段	监测频率	预警参考阈值
环境与作用	温度、湿度、风速、风压	温湿度传感器、风速仪、风压计	连续（分钟级）	超出设计基准值
荷载与响应	结构加速度、层间位移角	加速度计、位移计、倾角仪	高采样率（地震时触发）	罕遇地震下层间位移角（1/50~1/100）
构件应力应变	钢筋应力、混凝土应变	振弦式应变计、光纤光栅传感器	准连续（日/月）	屈服应变或强度设计值
地基与基础	地基沉降、基础倾斜	静力水准仪、沉降观测点、测斜仪	阶段性（季度/年）	差异沉降限值及倾斜率（2‰~4‰）
损伤与裂缝	裂缝宽度与发展趋势	振弦式裂缝计、图像识别系统	准连续	混凝土裂缝宽度（0.2mm~0.3mm）
振动与模态	自振频率、阻尼比	加速度计阵列、环境激励法	年度/重大事件后	自振频率下降超过 5%~10%

4 结语

建筑结构的抗震性能评价以及加固设计是复杂的工作,主要是在对隐患进行判断基础上对其采取相应措施来避免隐患发生。本文主要对结构体系、材料性能、地基条件以及结构规则性四个方面对建筑结构抗震性能影响进行详细阐述,并从改进评估方法、优化加固方案、普及减隔震技术、提高施工质量及加强健康监测等方面提出建议。未来随着人工智能、数字孪生以及高精度传感器的发展进步,抗震性能评价将越来越智能化精确化,而加固设计也将越来越定制化便捷化。依托数字化技术搭建全生命

周期建筑抗震管控体系,将科学的评价标准以及有效的加固技术相结合才能有效预防地震带来的危害切实保护人民生命财产安全。

【参考文献】

- [1]陈森林.建筑主体结构检测评估及加固措施的研究[J].砖瓦,2025(07):113-116.
- [2]鲁松,李爱群,徐文希.既有混凝土结构抗震性能提升技术研究及工程应用[J].建筑结构,2020,50(24):48-55.
- [3]王旭.钢筋混凝土建筑结构抗震性能以及其加固方法的研究[J].工程建设与设计,2017(08):17-18.。