

建筑工程结构中的抗震性能优化策略

文 / 梁 树 合肥昌华建筑安装工程有限责任公司

摘要: 为了提升建筑工程结构的抗震性能,降低地震灾害对建筑的破坏程度,对建筑结构抗震性能的优化策略展开研究。通过分析结构自身特性、材料的抗震性能以及地震波的影响等建筑结构抗震性能的影响因素,从结构形式、材料选择与应用以及先进抗震技术的应用等方面提出优化策略。结构形式方面,针对多层和高层建筑分别进行抗震设计优化;材料上,选用高强度材料并应用先进材料;技术上,采用阻尼器技术、隔震技术和智能化抗震技术等。分析认为,合理运用这些优化策略,能有效提高建筑结构的抗震性能,增强建筑在地震中的安全性和稳定性。

关键词: 抗震性能; 建筑工程; 结构优化; 抗震设计; 地震灾害

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.015

引言

在全球范围内,地震灾害的频发对人类生命财产安全构成了严重威胁。近年来,数次强烈地震导致大量建筑物遭受毁灭性破坏,众多家庭流离失所,社会经济体系遭受重创。建筑作为人类生活与生产活动的核心承载空间,其结构的抗震性能与使用者的生命安全以及社会的稳定发展密切相关。然而,传统建筑结构在应对复杂地震作用时,暴露出结构体系不合理、构件延性不足等诸多薄弱环节。基于此,深入探究建筑工程结构的抗震性能优化策略具有重要的现实意义与紧迫性。通过提升建筑结构的抗震能力,可有效降低地震灾害造成的损失,为保障人民生命财产安全、促进社会可持续发展提供有力支撑。

一、建筑结构抗震性能的影响因素

(一) 结构自身特性

建筑结构的自身特性在很大程度上决定了其抗震性能。首先是结构体系的选型,不同的结构体系,如框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构等,在地震作用下的受力特点和变形模式差异显著。框架结构较为灵活,空间布置方便,但侧向刚度相对较小,在强震作用下易产生较大的侧向位移,导致结构破坏。剪力墙结构则凭借其较高的侧向刚度,能有效抵抗水平地震力,然而其空间布置的灵活性受限。框架-剪力墙结构结合了两者的优点,既具有一定的空间灵活性,又能在地震中提供较强的抗侧力能力。其次,结构的规则性至关重要。规则的建筑结构在地震作用下受力分布均匀,传力路径明确,能有效避免应力集中现象。反之,不规则结构,如平面形状凹凸不规则、竖向刚度突变等,在地震时会因结构的扭转效应和应力集中,导致部分构件承受过大的内力,从而过早破坏。例如,一些建筑为追求独特造型,在平面设计上存在过多的凹进凸出,地震发生时,这些部位极易成为结构的薄弱点,引发严重破坏。此外,结构的竖向布置也对抗震性能有影响。合理的竖向布置应保证结构的刚度和质量沿高度均匀变化,避免出现软弱层或薄弱层。若存在竖向刚度突变,地震力会在突变处集中,使该楼层的构件承受过大的剪力和弯矩,大大增加结构倒塌的风险。

(二) 材料的抗震性能

建筑材料的抗震性能直接关系到整个结构在地震中的表现。钢材因其良好的延性和较高的强度,成为抗震结构的理想材料之一。在地震作用下,钢材能够通过自身的塑性变形吸收和耗散大量的地震能量,从而减轻结构的整体破坏程度。例如,采用高强度钢材制作的钢结构框架,在地震中可以经历较大的变形而不发生脆性断裂,为人员疏散和结构修复争取时间。

混凝土材料的性能也对结构抗震性能有重要影响。普通混凝土的抗压强度较高,但抗拉强度相对较低,在地震作用下容易出现裂缝。而高性能混凝土,如添加纤维的混凝土,能有效改善其抗拉性能和韧性。纤维的加入可以抑制混凝土裂缝的开展,提高混凝土的变形能力,使其在地震作用下能更好地协同工作,增强结构的整体性和抗震性能。砌体材料在传统建筑中应用广泛,但因其脆性较大,抗震性能较差。然而,通过对砌体结构进行适当的加固和改进,如设置构造柱、圈梁等,可以提高砌体结构的整体性和抗震能力。新型砌体材料,如加气混凝土砌块等,相比传统砖砌体,具有质量轻、保温性能好等优点,同时在合理设计和施工的情况下,也能具备一定的抗震性能。

(三) 地震波的影响

地震波是地震能量传递的载体,其性能直接影响到建筑物的抗震性能。地震波的主要成分是P、S波和表面波。P波传播速度快,造成地表起伏不平,对建筑物垂直构件有很大影响;剪切波传播速度略慢,引起地面水平晃动,是建筑物水平破坏的主要原因;而面波通过地表传播,对建筑结构造成更复杂的损伤,其能量大,传播距离远,会引起结构的剧烈扭转与摇摆。地震动的频谱特征与建筑物自振周期有很大关系^[1]。当地震波的卓越周期接近建筑物自振周期时,结构将出现共振现象,从而使结构响应急剧增加,从而增加结构失效的可能。例如,某些高层建筑在长周期地震动作用下,易产生强烈的共振,从而导致结构损伤。地震动幅值对结构的抗震性能也有重要影响。振幅越大,地震能量越大,作用

在建筑物上的力也就越大。在地震作用下，结构构件可能因承受过大的内力而发生破坏，如梁柱弯折破坏和剪切破坏等。另外，地震作用下结构的损伤还存在累积效应，地震持续时间越长，结构在多次荷载作用下可能发生损伤累积，最终导致结构倒塌。

二、建筑结构抗震性能优化策略

（一）结构形式优化

1. 多层建筑抗震设计

多层建筑在进行抗震设计时，需综合考虑多方面因素。从结构体系选择上，砖混结构在多层建筑中曾较为常见，但因其抗震性能相对较弱，如今逐渐被框架结构所取代。框架结构的梁柱体系能够较好地承受竖向和水平荷载，通过合理设计梁柱的截面尺寸与配筋，可有效提高结构的抗震能力。例如，在地震频发地区的多层教学楼设计中，框架结构可提供较大空间，满足教学功能需求，同时在遭遇地震时，框架能通过梁、柱的塑性变形耗散地震能量。结构的规则性对于多层建筑抗震同样关键。平面布置应尽量简单、对称，减少凹凸不规则情况，使地震力能均匀传递。竖向布置上，各楼层的刚度和质量分布应均匀，避免出现薄弱层。在实际工程中，一些多层商业建筑因底层设置大空间，上部楼层布置较多隔墙，导致竖向刚度突变，地震时底层极易发生破坏^[2]。因此，可通过合理设置转换层，采用渐变的结构形式，使上下层刚度平稳过渡，增强结构的整体性与抗震性能。此外，合理设置圈梁和构造柱也是提升多层建筑抗震性能的有效手段。圈梁能增强楼盖的水平刚度，将各竖向构件连接成整体，构造柱则可约束墙体，提高墙体的抗剪能力和延性。在砌体结构的多层建筑中，二者相互配合，能显著改善结构的抗震性能。

2. 高层建筑抗震设计

高层建筑因其高、自重大等特点，在地震时承受的水平地震作用要比高层建筑大得多，其抗震设计也更加复杂、苛刻。在结构形式的选择上，多采用框-芯筒、筒中筒等形式。在框架-核心筒结构中，核心筒是主要抗侧构件，其抗侧刚度强，可有效抵抗水平地震，框架承担竖向荷载，辅助抵抗水平荷载，两者协同工作，在保证结构抗震性能的前提下，既能满足大空间使用要求，又能保证结构抗震性能。例如，许多超高层办公建筑都采用了这种结构体系，以保证其在地震中的稳定。在高层建筑中，扭转控制是非常重要的。由于平面布局不合理，容易产生扭转效应，导致结构在地震作用下受力不均匀，破坏加剧。因此，在进行结构设计时，应尽可能使结构质量中心和刚度中心重合，以减小扭转效应。同时要增强竖向刚度一致性，避免刚度突变。在此基础上，提出了一种新的抗震设计方法，即通过对垂直构件截面尺寸及材料强度的合理设计，实现了结构刚度沿高度渐变的渐变，从而避免了因刚度突变而引起的应力集中^[3]。在

高层建筑中设置加强层，对改善结构的抗震性能具有重要意义。加强层通常位于顶层和设备层等特殊部位，通过设置刚性水平伸臂构件，将核心筒和周边框架柱连接起来，增强结构整体协同工作能力和抗侧刚度，有效减小地震作用下结构侧移。

（二）材料选择与应用

1. 高强度材料的使用

在建筑结构抗震设计中，高强度材料的合理运用能显著提升结构的抗震性能。以高强度钢材为例，其屈服强度和极限强度相较于普通钢材有大幅提高。在地震作用下，高强度钢材制作的构件能够承受更大的荷载，延迟结构进入塑性变形阶段的时间，从而为结构提供更强的初始刚度和承载能力。例如，在高层钢结构建筑的框架柱中采用高强度钢材，可有效减小柱的截面尺寸，减轻结构自重，同时增强结构抵抗水平地震力的能力。在混凝土材料方面，高强度混凝土具备更高的抗压强度和弹性模量。应用于建筑结构中，能使构件在相同受力条件下，减少变形和裂缝的产生。像在大跨度桥梁的桥墩、高层建筑的基础等关键部位使用高强度混凝土，可增强结构的整体性和稳定性，提高结构在地震作用下的耐久性和可靠性。此外，高强度钢筋在建筑结构中的应用也日益广泛，其较高的强度可使钢筋混凝土构件在满足设计强度要求的前提下，减少钢筋用量，优化结构配筋，提升结构的抗震性能。

2. 先进材料在抗震中的应用

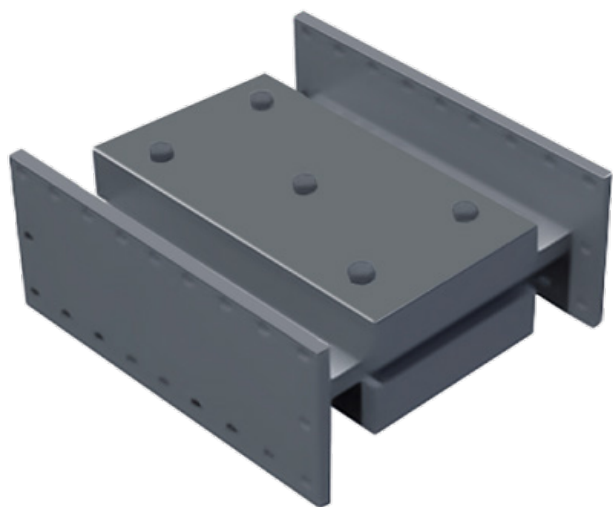
先进材料为建筑结构的抗震性能优化提供了新的途径。纤维增强复合材料（FRP）便是其中典型代表，它具有高强度、轻质、耐腐蚀等特性。在抗震加固中，通过在混凝土构件表面粘贴 FRP 片材，可显著提高构件的抗弯、抗剪和抗压能力。例如，对老旧砌体结构的墙体进行 FRP 加固，能有效约束墙体变形，提高墙体的延性和耗能能力，增强结构整体的抗震性能。形状记忆合金（SMA）也是一种极具潜力的先进材料，它具有独特的形状记忆效应和超弹性特性。在建筑结构中，将 SMA 制作成阻尼器或连接件，地震发生时，SMA 材料可通过自身的变形和回复吸收大量地震能量，减小结构的振动响应^[4]。比如，在一些重要建筑的节点处设置 SMA 连接件，能够在地震作用下保持节点的完整性，防止结构因节点破坏而倒塌。此外，智能材料如压电材料、磁流变液等也逐渐应用于建筑抗震领域。压电材料可将机械能转化为电能，通过合理布置在结构中，能对结构的振动进行监测和控制；磁流变液在不同磁场作用下，其黏度可迅速改变，基于此制成的磁流变阻尼器，能根据地震响应实时调整阻尼力，为建筑结构提供高效的减震效果。

（三）先进抗震技术的应用策略

1. 阻尼器技术

阻尼器技术是提升建筑结构抗震性能的重要手段。阻尼器的工作原理基于能量耗散机制，通过将地震输入

结构的能量转化为其他形式的能量，如热能、机械能等，从而有效降低结构的振动响应。常见的阻尼器类型包括粘滞阻尼器、金属阻尼器（见图一）和摩擦阻尼器等。粘滞阻尼器利用液体的粘性阻力消耗能量，其出力与速度相关，在结构振动速度较大时，能产生较大的阻尼力，快速耗散地震能量。在一些高层商业建筑中，于关键部位设置粘滞阻尼器，可显著减小结构在地震作用下的位移和加速度反应，保护建筑内部的非结构构件和设备免受损坏。金属阻尼器则依靠金属材料的塑性变形来耗散能量，如采用软钢制作的阻尼器，具有良好的延性和耗能能力，在地震中能经历多次反复加载而不失效。在工业厂房等建筑结构中应用金属阻尼器，可提高结构的整体抗震能力，保障生产活动的连续性。摩擦阻尼器通过摩擦面之间的相对滑动来耗散能量，其构造简单、成本较低，适用于一些对造价较为敏感的建筑结构，如普通住宅等，通过合理设置摩擦阻尼器，能有效提升结构在地震中的安全性。



图一：金属阻尼器

2. 隔震技术

隔震技术旨在通过在建筑物基础与上部结构之间设置隔震层，改变结构的动力特性，减少地震能量向上部结构的传递。常见的隔震装置有橡胶隔震支座、摩擦摆隔震支座等。橡胶隔震支座一般由多层橡胶和钢板交替叠合而成，具有较大的竖向刚度以承受建筑物的竖向荷载，同时在水平方向具有良好的柔性，能延长结构的自振周期，避开地震波的卓越周期，从而减小结构的水平地震作用。在一些学校、医院等重要建筑中广泛应用橡胶隔震支座，可有效保护建筑内的人员和重要设备安全^[5]。摩擦摆隔震支座利用球面滑动和摩擦耗能的原理，其水平刚度可变，能适应不同强度的地震作用。在地震发生时，摩擦摆隔震支座可使建筑物在水平方向产生较大的位移，通过摩擦耗散大量地震能量，同时其自复位

能力能确保地震后建筑物基本恢复到初始位置，减少震后修复成本。例如，在一些桥梁工程中采用摩擦摆隔震支座，可有效降低地震对桥梁结构的破坏，保障交通的畅通。

3. 智能化抗震技术

智能抗震技术是利用先进的传感、通讯、控制等技术，对建筑物的地震反应进行实时监控和智能控制。文章采用加速度传感器和位移传感器等多种传感器对结构进行实时监控，实现对结构振动信号的实时采集，并将数据通过网络传输到控制系统中。该控制系统采用先进算法分析、处理数据，根据结构的实时反应状况，自动调整结构参数或启动储备抗震措施。例如，智能阻尼器可以通过传感器反馈的结构振动信息，对阻尼力进行实时调整，从而达到最优的减振效果。部分超高层建筑采用智能控制系统，可依据地震波特征及结构振动状态自动调整结构刚度、阻尼，提高结构抗震性能。同时，智能抗震技术可以实时评估结构的健康状态，及早发现安全隐患，为维护与加固提供依据。本项目拟采用物联网技术，将监测数据上传到云平台，利用大数据分析人工智能算法，实现结构性能的长期跟踪与预测，以保证结构的安全性，提高结构抗震能力与可靠性。

结语

综上所述，建筑结构抗震性能受多因素制约。结构自身特性，如合理选型、规则性与竖向布置，是基础保障；材料的抗震性能，尤其是高强度及先进材料的运用，能强化结构；地震波特性直接影响破坏程度。针对这些，从结构形式、材料选用及先进技术应用着手优化，像多层、高层建筑依自身设计，采用阻尼器等技术。多措并举，可显著提升抗震性能，守护生命财产安全。

参考文献

- [1] 米繁亮. 房屋建筑工程结构优化设计分析 [J]. 四川建材, 2023, 49(06): 54-56.
- [2] 周彪. 建筑土木工程结构抗震性能优化设计研究 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 工程技术与施工管理交流论文集 (上). 中国建集团江西省电力设计院有限公司; , 2024: 3.
- [3] 李涛. 高层建筑工程结构抗震设计及其大震弹塑性分析 [J]. 四川水泥, 2022, (12): 79-81+84.
- [4] 马国平. 建筑工程结构抗震性能提升分析 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(13): 214-215.
- [5] 胡宏. 面向抗震性能的建筑工程结构优化设计 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2018, (21): 138-139.

作者简介：梁树（1984 年 11），男，汉，安徽合肥人，工程师，本科，专业：建筑工程。