

高层建筑结构抗震性能优化设计研究

韩小燕¹ 夏传建²

1. 中汽迈赫（天津）工程设计研究院有限公司青岛分公司 山东 青岛 266520

2. 山东法恩泰科技公司有限公司 山东 青岛 266520

摘要：地震作为一种极具破坏力的自然灾害，给人类社会带来了惨痛损失，高层建筑因体量大、人员密集，在地震中受损后果更为严重。本文聚焦高层建筑结构抗震性能优化设计研究。首先强调其重要性，指出优化设计关乎高层建筑在地震中的安全与稳定。接着分析影响抗震性能的因素，涵盖结构体系、布置、材料性能及场地条件等方面。随后提出优化设计策略，包括基于性能的抗震设计理念、结构优化设计方法、抗震构造措施优化以及采用新型结构技术与材料等。通过这些策略的探讨，旨在为高层建筑结构抗震性能的提升提供理论支持与实践指导，推动建筑行业在抗震设计领域的发展与进步。

关键词：高层建筑；结构抗震；性能优化；设计研究

引言：随着城市化进程的加速，高层建筑如雨后春笋般涌现。然而，地震作为一种极具破坏力的自然灾害，对高层建筑的安全构成严重威胁。在地震作用下，高层建筑若抗震性能不足，将导致严重的人员伤亡和财产损失。因此，开展高层建筑结构抗震性能优化设计研究迫在眉睫。通过深入探究影响抗震性能的因素，并制定科学合理的优化设计策略，能够有效提升高层建筑的抗震能力，保障其在地震中的安全性与可靠性，这对于促进城市可持续发展、保护人民生命财产安全具有至关重要的意义。

1 高层建筑结构抗震性能优化设计的重要性

在当今城市化高速发展的时代，高层建筑大量涌现，成为城市景观的重要组成部分。然而，地震这一自然灾害的频繁发生，给高层建筑的安全带来了巨大挑战，凸显出抗震性能优化设计的极端重要性。从保障生命安全角度看，高层建筑内人员密集，一旦在地震中发生破坏甚至倒塌，将造成不可估量的人员伤亡。优化抗震性能设计，能增强建筑结构的整体稳定性和延性，使其在地震作用下保持相对完整，为人员疏散和救援争取宝贵时间，最大程度保护生命安全。从减少经济损失方面而言，高层建筑往往投资巨大，涉及众多资产。良好的抗震性能可降低建筑在地震中的损坏程度，减少修复成本和重建费用，避免因建筑损毁导致的企业停产、商业中断等间接经济损失，保障经济的稳定运行^[1]。

2 高层建筑结构抗震性能的影响因素

2.1 结构体系的影响

结构体系是高层建筑抗震的骨架，不同体系抗震性能差异显著。框架结构依靠梁、柱节点承受和传递荷

载，具有空间分隔灵活的优点，但侧向刚度相对较小，在地震作用下层间位移较大，易发生非结构构件破坏。剪力墙结构抗侧刚度大，能有效抵抗水平地震作用，适用于高层住宅等建筑，但空间划分不够灵活。框架-剪力墙结构结合了两者的优点，框架提供较大空间，剪力墙增强抗侧能力，通过合理布置可使结构受力更均匀。筒体结构则具有更大的抗侧刚度和抗扭刚度，能很好地抵抗地震作用，常用于超高层建筑。选择合适的结构体系需综合考虑建筑高度、使用功能、抗震设防要求等因素，以充分发挥其抗震优势。

2.2 结构布置的影响

合理的结构布置对高层建筑抗震至关重要。平面布置应尽量规则、对称，使结构的质量中心和刚度中心重合，减少地震作用下的扭转效应。若平面不规则，如存在凹凸、角部重叠等，会导致应力集中，加剧结构破坏。竖向布置方面，应避免侧向刚度突变，楼层侧向刚度不宜小于其上一层侧向刚度的70%，否则易形成薄弱层，在地震中率先破坏。同时，要控制结构的高宽比，过大的高宽比会使结构在地震作用下产生较大侧移，影响结构安全。

2.3 材料性能的影响

材料性能直接影响高层建筑结构的抗震能力。混凝土强度等级越高，其抗压、抗剪能力越强，但过高的强度可能导致结构脆性增大，不利于抗震。因此，需根据结构类型和受力特点选择合适的混凝土强度等级。钢材具有良好的延性和强度，其屈服强度、抗拉强度和伸长率等指标对结构抗震影响重大。优质钢材能在地震作用下通过塑性变形消耗大量能量，提高结构的抗震性能。

此外,新型材料如纤维增强复合材料(FRP)具有高强、轻质、耐腐蚀等优点,用于结构加固可显著提升结构的抗震承载力和延性。

2.4 场地条件的影响

场地条件是高层建筑抗震设计的重要外部因素。不同的场地土质对地震波具有不同的放大和滤波作用。软弱场地土(如淤泥、软黏土等)会使地震波的周期变长,放大地震作用,加剧结构的破坏;而坚硬场地土(如岩石、密实砂土等)则对地震波有较好的衰减作用。此外,场地地形也会影响地震反应,山坡、山脊等地形可能使地震动加剧。地下水位的高低也有影响,高地下水位可能降低土体的强度和稳定性,增加地震时的液化风险。因此,在进行高层建筑抗震设计前,必须进行详细的场地勘察,了解场地的地质、地形和水文条件,为合理确定抗震设计参数提供依据,确保建筑在地震中的安全^[2]。

3 高层建筑结构抗震性能优化设计策略

3.1 基于性能的抗震设计理念

3.1.1 性能目标的设定

性能目标设定是基于性能抗震设计的关键起始点。需综合考虑建筑的重要性、使用功能、所处地震环境及业主需求等因素。一般将地震水平划分为小震、中震、大震等不同等级,针对每个等级设定相应的性能水准,如在小震下建筑保持正常使用功能;中震下结构无明显损坏,经简单修复可继续使用;大震下不倒塌,保障人员生命安全。合理设定性能目标能为后续设计提供明确方向。

3.1.2 基于性能目标的设计流程

依据设定的性能目标开展设计。先进行结构分析与建模,考虑不同地震作用和结构响应。接着进行结构选型与布置优化,确保结构体系合理、传力明确。然后进行构件设计与验算,保证各构件在不同地震水准下满足性能要求。过程中还需进行多轮迭代与调整,通过性能评估不断优化设计方案。最后完成施工图设计,确保设计意图能在施工中准确实现,实现建筑预期的抗震性能。

3.1.3 性能化设计在实际工程中的应用分析

在实际工程中,性能化设计优势显著。以某超高层建筑为例,根据其作为城市地标和重要商业设施的特点,设定了较高性能目标。设计时采用新型结构体系和先进分析方法,精准模拟地震作用。通过优化结构布置和构件设计,使建筑在不同地震水准下均能满足性能要求。施工过程中严格监控,确保设计落地。该建筑经历地震考验后,结构完好,功能正常,充分验证了性能化设计能有效提升建

筑抗震性能,保障建筑安全与正常使用。

3.2 结构优化设计方法

3.2.1 优化设计的数学模型建立

建立优化设计数学模型是结构优化的基础。首先明确设计变量,如构件尺寸、材料参数等,它们是可调整以实现优化目标的因素。接着确定目标函数,常见目标有结构重量最小、成本最低或抗震性能最优等,需根据实际需求选定。然后考虑约束条件,包含强度、刚度、稳定性等力学性能约束,以及几何尺寸、施工条件等现实约束。通过将这些要素用数学表达式准确描述,构建出能反映结构优化本质的数学模型,为后续采用合适算法求解提供精确的数学框架。

3.2.2 优化算法介绍与应用

优化算法是求解数学模型的关键工具。传统算法如梯度下降法,通过计算目标函数的梯度来逐步逼近最优解,适用于连续可微的问题。而智能算法如遗传算法,模拟生物进化过程,通过选择、交叉、变异等操作在解空间中搜索最优解,能处理复杂的非线性问题。粒子群算法则模拟鸟群觅食行为,通过个体间的信息共享寻找最优。在实际应用中,需根据数学模型的特点选择合适算法。例如对于复杂高层建筑结构优化,智能算法往往能更好地处理多变量、非线性问题,有效找到满足约束条件的最优设计方案。

3.2.3 结构优化设计实例分析

以某高层框架-剪力墙结构为例,其原设计存在结构自重大、材料用量多的问题。采用优化设计方法,以结构总重量最小为目标函数,以构件强度、变形等为约束条件建立数学模型。运用遗传算法进行求解,对梁、柱、剪力墙的尺寸进行优化调整。优化后,结构总重量减轻了约15%,在保证结构抗震性能满足规范要求的前提下,显著降低了材料成本。同时,通过优化结构布置,改善了结构的受力性能,减少了应力集中现象。该实例表明,结构优化设计方法能有效提升高层建筑结构的经济性和合理性,具有较高的实际应用价值。

3.3 抗震构造措施的优化

3.3.1 构件的配筋优化

构件配筋优化是提升高层建筑抗震性能的重要环节。在梁构件中,合理调整纵筋和箍筋的配置。增加纵筋数量可提高梁的抗弯承载力,但需避免纵筋破坏;适当加密箍筋能增强梁的抗剪能力和约束混凝土,防止混凝土过早压碎。对于柱构件,要根据轴压比等参数精确计算纵筋配筋率,保证柱在地震作用下有足够的延性。同时,采用复合箍筋可有效提高对核心混凝土的约束作

用,增强柱的抗震性能。在剪力墙中,合理布置分布钢筋和边缘构件钢筋,能提高剪力墙的抗剪和抗弯能力。通过精确计算和合理配置钢筋,不仅能满足抗震设计要求,还能避免钢筋浪费,降低工程成本,实现结构安全与经济性的平衡。

3.3.2 节点连接的加强措施

节点是高层建筑结构传力的关键部位,其连接强度直接影响结构的整体抗震性能。对于梁柱节点,可采用加大节点核心区箍筋配置的方式,提高节点区的抗剪承载力和约束能力,防止节点在地震作用下发生剪切破坏。在钢框架结构中,梁柱节点的连接可采用栓焊混合连接或全焊接连接,并设置加劲肋,增强节点的刚度和强度。对于剪力墙与连梁的连接节点,要保证连接钢筋的可靠锚固和搭接,避免因连接薄弱导致结构破坏。此外,还可采用节点区混凝土增强措施,如采用高强混凝土或添加纤维等,提高节点区的抗裂性能,确保节点在地震作用下能可靠地传递内力,保障结构的整体稳定性。

3.3.3 增设耗能构件与阻尼装置

增设耗能构件与阻尼装置是提升高层建筑抗震性能的有效手段。耗能构件如金属阻尼器、摩擦阻尼器等,在地震作用下能通过自身的塑性变形或摩擦作用消耗大量地震能量,减少主体结构的地震反应。金属阻尼器一般安装在结构的层间或节点部位,当地震发生时,阻尼器先进入塑性状态,吸收和耗散地震能量,保护主体结构不受损坏。阻尼装置如黏滞阻尼器,利用液体的黏滞特性来消耗能量,具有较好的减震效果。将黏滞阻尼器安装在结构的关键部位,能有效减小结构的位移和加速度响应。通过合理布置耗能构件与阻尼装置,可显著提高高层建筑的抗震能力和延性,降低地震对建筑结构的破坏程度,保障人员生命安全和建筑的正常使用。

3.4 采用新型结构技术与材料

3.4.1 新型结构体系的应用与抗震性能优势

新型结构体系为高层建筑抗震带来新突破。如隔震结构体系,通过在建筑物底部设置隔震支座,将地震能量与上部结构隔离,大幅降低地震对上部结构的作用,可减小地震反应 60% - 80%,有效保护结构和内部设施。耗能减震结构体系则是在结构中设置耗能装置,如金属屈服阻尼器等,地震时耗能装置率先进入塑性状态,消耗大量地震能量,减轻主体结构损伤。这些新型结构体

系改变了传统抗震思路,从被动抵抗地震转为主动耗能隔震,显著提升了高层建筑的抗震能力和安全性。

3.4.2 高性能材料在高层建筑抗震中的应用前景

高性能材料在高层建筑抗震领域前景广阔。高强度钢材具有更高的屈服强度和抗拉强度,用于结构构件可减小构件尺寸,降低结构自重,从而减小地震作用。同时,其良好的延性能在地震时能通过塑性变形消耗能量,提高结构抗震性能。高性能混凝土具有更高的强度和耐久性,能有效抵抗地震产生的应力,减少结构裂缝和破坏。纤维增强复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等优点,可用于结构加固和修复,增强结构的承载力和抗震能力。随着材料技术发展,高性能材料将在高层建筑抗震中发挥更大作用。

3.4.3 组合结构与混合结构的发展与应用

组合结构与混合结构结合了不同材料的优势,在高层建筑抗震中表现出色。钢-混凝土组合结构,如型钢混凝土柱、钢-混凝土组合梁等,充分发挥钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能,提高构件的承载力和刚度,增强结构的抗震性能。混合结构则是将不同结构体系组合在一起,如框架-核心筒混合结构,框架部分提供较大空间,核心筒增强抗侧刚度,两者协同工作,有效抵抗地震作用。组合结构与混合结构能根据建筑功能需求和抗震要求灵活设计,优化结构受力,已成为高层建筑抗震设计的重要发展方向,广泛应用于各类高层建筑中^[1]。

结束语

高层建筑结构抗震性能优化设计研究,是保障城市安全与发展的关键课题。通过对基于性能的抗震设计理念、结构优化方法、抗震构造措施优化以及新型结构技术与材料应用等多方面的深入探讨,我们找到了提升高层建筑抗震能力的有效途径。这些研究成果不仅能增强建筑在地震中的安全性,减少人员伤亡和财产损失,还能推动建筑行业的技术进步与创新。

参考文献

- [1]罗天娣.建筑结构基于性能抗震设计的几个问题[J].中国标准化,2021(14):69-70.
- [2]车申.建筑结构设计中的抗震设计探讨[J].工程技术研究,2022(02):224-225.
- [3]黄山.探究建筑结构设计中的抗震设计[J].中国住宅设施,2022(02):15-16.