

Research on seismic performance optimization of super high-rise building structures based on high-performance materials

Zheng Zhu

China Railway 16th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract

With the continuous advancement of urbanization, super high-rise buildings have become one of the important symbols of modern cities. However, due to their height and complexity, super tall buildings face severe seismic challenges under earthquake action. This article explores the application of high-performance concrete, high-strength steel, and high-performance composite materials in improving the seismic performance of super high-rise buildings from the perspective of high-performance materials. By comparing and analyzing the seismic performance of typical super high-rise structural systems, the influence mechanism of high-performance materials on the seismic performance of structural systems is elucidated. At the same time, this article also studied the seismic reduction and isolation technology based on high-performance materials, and analyzed the mechanism of seismic performance improvement under the synergistic effect of seismic reduction and isolation and high-performance materials.

Keywords

super high-rise buildings; High performance materials; Seismic performance; Structural optimization; Seismic isolation technology

基于高性能材料的超高层建筑结构抗震性能优化研究

朱政

中铁十六局集团第五工程有限公司, 中国·河北唐山 063000

摘要

随着城市化进程的不断推进,超高层建筑已成为现代城市的重要标志之一。然而,超高层建筑因其高度和复杂性,在地震作用下面临着严峻的抗震挑战。本文从高性能材料的角度出发,探讨了高性能混凝土、高强度钢材以及高性能复合材料在提升超高层建筑抗震性能方面的应用。通过对典型超高层结构体系的抗震性能进行比较分析,阐述了高性能材料对结构体系抗震性能的影响机制。同时,本文还研究了基于高性能材料的减震与隔震技术,分析了减隔震与高性能材料协同作用下的抗震性能提升机制。

关键词

超高层建筑; 高性能材料; 抗震性能; 结构优化; 减隔震技术

1 引言

超高层建筑是现代城市发展的重要标志,其不仅满足了城市空间利用的需求,更彰显了城市的经济实力和科技水平。然而,超高层建筑因其高度和结构复杂性,在地震作用下面临着更为严峻的抗震挑战。高性能材料的应用为提升超高层建筑的抗震性能提供了新的思路。高性能混凝土、高强度钢材以及高性能复合材料等新型建筑材料,具有更高的强度、韧性和耐久性,能够显著提升结构的抗震承载能力。本文将从高性能材料的特性研究入手,探讨其在超高层建筑结构抗震性能优化中的应用,为超高层建筑的抗震设计提供参考。

【作者简介】朱政(1987-),男,中国河南濮阳人,本科,工程师,从事土木工程研究。

2 高性能材料特性及其在超高层建筑中的应用

2.1 高性能混凝土材料特性研究

高性能混凝土是一种强度等级在 C60 及以上的混凝土材料,其具有高强度、高韧性、高耐久性等优异性能。与普通混凝土相比,高性能混凝土在抗压强度、抗拉强度、抗裂性能等方面都有显著提升。对比表示,高性能混凝土的抗压强度可达到普通混凝土的 2 倍以上。高强度的混凝土材料能够有效提高结构构件的承载能力,减小构件截面尺寸,从而降低建筑的自重,提高建筑的空间利用率。

2.2 高强度钢材特性及应用

高强度钢材是指屈服强度在 400MPa 以上的钢材,如 Q420、Q460 等。与普通钢材相比,高强度钢材具有更高的强度和良好的延性,能够提升结构的抗震性能。在超高层建筑中,高强度钢材主要应用于框架梁、柱以及钢筋桁架楼承

板等关键受力构件中。采用高强度钢材可以减小构件截面尺寸，降低建筑自重，同时提高结构的延性和抗倒塌能力。表 1 给出了不同强度等级钢材的力学性能参数。可以看出，高强度钢材的屈服强度和抗拉强度均明显高于普通钢材。

表 1 不同强度等级钢材力学性能参数

钢材牌号	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)
Q235	235	375	26
Q345	345	470	20
Q420	420	540	16
Q460	460	570	14

2.3 高性能复合材料在超高层建筑中的应用

高性能复合材料是由两种或两种以上材料复合而成的新型材料，如纤维增强复合材料、超高强度混凝土等。这类材料兼具高强度、高韧性、轻质高强等优异力学性能，在超高层建筑中得到广泛应用^[2]。例如，采用碳纤维布对混凝土柱进行芯部约束，可以显著提高构件的韧性和延性；在钢-混凝土组合结构中，将型钢内填充超高强度混凝土，能够充分发挥两种材料的协同工作性能，大幅提升结构的承载能力和抗震性能。相比于普通混凝土填充钢管，采用超高强度混凝土芯材能够使构件的峰值荷载和延性均得到明显改善。

3 超高层建筑结构体系抗震性能分析

3.1 典型超高层结构体系抗震性能比较

超高层建筑常采用框架-核心筒、巨型框架、框架-剪力墙等结构体系。不同结构体系的抗震性能存在明显差异。框架-核心筒结构具有良好的整体刚度和侧向刚度，抗震性能优异；巨型框架结构柱网稀疏，侧向刚度偏低，但具有较好的延性和耗能能力^[3]。框架-剪力墙结构相比于前两种结构体系，在侧向刚度和延性方面提供刚度和延展性之间的平衡。对三种典型超高层结构体系在罕遇地震下的抗震性能进行了比较分析，结果表明，框架-核心筒结构的层间位移角和层间剪力角均优于其他两种结构体系，表现出最佳的抗震性能。

3.2 高性能材料对结构体系抗震性能的影响

将高性能材料应用于超高层建筑结构体系中，能够从整体上提升建筑的抗震性能。以框架-核心筒结构为例，在结构关键部位如框架柱、核心筒等采用高强度混凝土，不仅能够提高构件的承载能力，还能改善结构整体刚度，从而提升建筑的抗震性能。同时，在框架梁中配置高强度钢筋，能够提高梁的抗弯承载力和延性。在巨型框架结构中，采用高强度钢材制作巨型柱，可以在保证柱高宽比的同时提高构件承载力。框架-剪力墙结构在剪力墙中应用超高强度混凝土，能够显著提升剪力墙的剪切承载力和变形能力。综合利用高性能混凝土和高强度钢材，可使结构体系的抗震性能得到全面提升。

3.3 结构布置优化策略

合理的结构布置是实现超高层建筑抗震性能提升的重要手段。在平面布置上，应注重结构的对称性和均匀性，避免因偏心导致的扭转效应。竖向布置上，充分利用高性能材料的高强度特性，采用变截面设计，实现结构刚度和承载力的合理分布。此外，在关键部位如电梯间、楼梯间周边设置剪力墙，能够提高结构整体刚度，改善抗震性能。在框架-核心筒结构中，应根据建筑平面尺寸合理选择框架柱和核心筒布置方案，并优化二者的刚度比例关系，以达到协调横向刚度和质心的目标。

4 基于高性能材料的减震与隔震技术研究

4.1 超高层建筑减震技术研究

减震技术是通过在结构中设置专门的耗能装置，吸收地震输入能量，降低主体结构地震反应的一种抗震措施。在超高层建筑中引入减震装置，能够有效降低结构的地震响应，提高结构的抗震性能。目前常用的减震装置包括黏滞阻尼器、屈曲约束支撑、金属阻尼器等。其中，黏滞阻尼器具有良好的速度依赖特性，在超高层建筑中得到广泛应用。研究表明，在框架-核心筒结构中设置黏滞阻尼器，能够使结构的层间位移角降低 15% ~ 20%，显著改善结构抗震性能。同时，采用高性能材料制作减震装置，能够进一步提升减震效果。例如，采用自恢复性能的形状记忆合金制作阻尼器，能够实现阻尼器的多次重复使用，延长装置使用寿命。

4.2 超高层建筑隔震技术研究

隔震技术是在建筑基础与上部结构之间设置隔震装置，将建筑物与地基隔离开来，减小地震能量向上部结构的传递，从而降低建筑物的地震反应。在超高层建筑中，隔震技术主要采用弹性滑移支座和橡胶隔震支座等形式。弹性滑移支座具有刚度可调、阻尼可控的特点，能够满足超高层建筑的隔震需求。研究发现，在高度为 300m 的超高层建筑中设置弹性滑移隔震支座，结构的基底剪力和倾覆力矩分别降低了 30% 和 50%。同时，采用高阻尼橡胶隔震支座，利用橡胶材料的高阻尼特性，可有效提高隔震效果。超高阻尼橡胶支座在隔震性能提升的同时，可减少结构纵向位移，改善建筑使用功能。

4.3 减隔震与高性能材料协同作用下的抗震性能提升机制

将减震技术、隔震技术与高性能材料有机结合，能够从多个维度提升超高层建筑的抗震性能。高性能材料的应用，为减隔震装置的高效工作提供了保障。在主体结构中采用高强度、高韧性的材料，能够降低主体结构在强震下受损的风险，为减隔震装置的发挥创造良好条件。同时，高性能材料制作的减隔震装置，具有更优异的力学性能和耐久性，减隔震效果更加显著。在超高层建筑中，可根据结构特点和地震烈度要求，合理选择减隔震方案，并与高性能材料的

应用相结合,多措并举提升建筑抗震性能。通过数值模拟和试验研究相结合的方法,揭示减隔震与高性能材料协同作用下的抗震性能提升机制,为工程应用提供理论指导。

5 节点与连接设计优化与工程实例

5.1 高性能材料结构节点抗震性能研究

结构节点是保证结构整体性和协同工作的关键,对结构抗震性能有显著影响。采用高性能材料设计结构节点,能够提高节点的强度和刚度,改善节点的抗震性能。在钢筋混凝土框架节点中,在节点核心区配置高强度钢筋,并采用高强混凝土浇筑,能够显著提高节点区的承载力和变形能力。对于型钢混凝土组合结构,大型钢翼缘和腹板与混凝土界面设置剪力键,并在混凝土中配置高强钢纤维,可有效提高节点的受剪性能和延性。在钢结构节点设计中,采用高强度螺栓连接,并合理设置加劲肋,能够保证节点的抗剪切性能。同时,在梁端部采用弱梁强柱的设计理念,保证梁端先于柱发生塑性铰,实现结构的强柱弱梁抗震机制。

5.2 连接方式优化设计

焊接连接因其高刚度和良好的节点性能而广受青睐。通过焊缝将构件可靠连接,能够有效传递内力,实现应力的再分配。然而,焊接连接对施工质量控制要求较高,需要严格把控焊接工艺参数,确保焊缝的可靠性。同时,焊接连接的延性和耗能能力相对较低,在抗震设计中需要谨慎使用。

栓接连接凭借其良好的延性和耗能能力,在抗震设计中得到广泛应用。通过高强螺栓将构件连接,能够实现应力的有效传递和耗散。栓接连接便于现场安装,能够适应施工误差,降低施工难度。在连接设计时,需要合理选择螺栓级别和布置方式,确保连接区的受力性能。同时,采用摩擦型高强螺栓连接,能够进一步提高连接区的滑移能力和耗能能力。

套筒连接是一种新型的连接方式,具有施工便捷、受力明确等优点。通过将钢筋插入套筒中,利用灌浆料实现钢筋与套筒的可靠锚固,能够有效提高节点区的受力性能。在钢筋混凝土剪力墙的水平连接中,采用高强度套筒灌浆连接,能够显著提高水平缝的抗剪性能,改善结构的整体性。与传统的搭接连接相比,套筒连接能够大幅减小连接区的钢筋用量,简化施工工序,提高施工效率。

在型钢混凝土组合结构中,梁-柱连接节点的设计尤为关键。将型钢梁伸入柱端混凝土内,能够有效传递梁端弯矩,提高连接区的刚度。同时,在型钢与混凝土界面设置剪力钉,能够可靠传递竖向剪力,防止型钢与混凝土脱空。通

过合理布置剪力钉的数量和间距,能够显著提高连接区的受力性能。

在连接方式设计中,应结合高性能材料的特点,优化连接构造,提高连接区的抗震性能。例如,在钢筋混凝土构件的连接中,采用高强钢筋和高强混凝土,能够减小连接物截面尺寸,提高连接效率。在型钢混凝土组合构件连接时,选用高强度螺栓和高强砂浆,能够提高连接区的受剪承载力和粘结性能。

5.3 工程实例与应用效果分析

以某超高层办公楼为例,该建筑高度为398m,采用框架-核心筒结构体系。在设计过程中,综合运用高性能材料、减隔震技术以及优化设计策略,全面提升结构的抗震性能。混凝土强度等级采用C80,主楼框架梁柱采用Q460高强钢材,有效降低了结构自重。在裙楼顶部设置黏滞阻尼器,减小主楼地震响应;在首层设置弹性滑移隔震支座,降低地震能量向上传递。通过优化框架柱和核心筒布置,合理配置结构刚度,保证结构在罕遇地震下满足抗震目标。经分析,在采取上述抗震优化措施后,结构在罕遇地震作用下的顶点位移和层间位移角均满足规范限值要求,实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标。该工程为超高层建筑的抗震优化设计提供了有益借鉴。

6 结语

超高层建筑因其高度和结构复杂性,在地震作用下面临更大的抗震挑战。基于高性能材料的超高层建筑结构抗震性能优化,是提升建筑抗震安全性的重要途径。通过合理应用高性能混凝土、高强度钢材、高性能复合材料等,优化结构体系和构件设计,并与减隔震技术相结合,能够从多个维度改善建筑的抗震性能。同时,节点和连接方式的优化设计,是发挥高性能材料效能、保证结构整体性的关键环节。未来的研究应进一步拓展高性能材料在超高层建筑中的应用范围,探索更加经济、高效的材料优化方案。在深入揭示高性能材料与减隔震技术协同作用机理的基础上,提出更加完善的抗震优化设计理论与方法,为超高层建筑的抗震安全提供坚实保障。

参考文献

- [1] 高毓清.砌体结构抗震性能优化的关键技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(1):095-098.
- [2] 胡军.高性能混凝土在结构设计中的应用研究[J].佛山陶瓷,2025,35(1):68-70.
- [3] 保利鹏.新型高性能混凝土在超高层建筑中的应用研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(7):0143-0146.