

高层建筑结构与抗震性能分析

姜红军

山东省菏泽市曹县王集镇农业农村服务中心

DOI: 10.12238/jpm.v5i4.6701

[摘要] 本文综合探讨了高层建筑结构与抗震性能分析的重要议题。引言部分论述了高层建筑结构特点和良好抗震性能的重要性。其后，针对高层建筑结构设计，涵盖了结构体系选择、基础设计、框架结构设计、板柱系统设计、钢结构设计、混凝土结构设计以及玻璃幕墙设计等关键方面。在抗震性能分析部分，聚焦于地震力作用机制、抗震设计原则、设防目标、加固措施、减震技术、数值模拟方法以及实验研究。最后，通过案例分析展示了典型事故案例与成功抗震设计案例，为今后相关领域的研究提供了启示。

[关键词] 高层建筑；结构设计；抗震性能

Design and seismic performance analysis of high-rise building structures

Jiang Hongjun

Agricultural and Rural Service Center in Wangji Town, Cao County, Heze City, Shandong Province

[Abstract] This article comprehensively discusses important issues in the design and seismic performance analysis of high-rise building structures. The introduction discusses the characteristics of high-rise building structures and the importance of good seismic performance. Subsequently, for the design of high-rise building structures, it covered key aspects such as structural system selection, foundation design, frame structure design, slab column system design, steel structure design, concrete structure design, and glass curtain wall design. In the seismic performance analysis section, the focus is on the mechanism of seismic force action, seismic design principles, fortification objectives, reinforcement measures, seismic reduction techniques, numerical simulation methods, and experimental research. Finally, typical accident cases and successful seismic design cases were demonstrated through case analysis, providing inspiration for future research in related fields.

[Key words] high-rise buildings; Structural design; Seismic performance

高层建筑以其高度、复杂结构、严格地基要求、高安全性标准、多功能性、精美立面设计和有效的交通组织而著称。设计中需要考虑各类力的作用，如重力、风力和地震力。这些建筑通常包含住宅、商业和办公等多种功能，外观美观、采光良好且节能。综合考虑这些因素，高层建筑的设计与施工对工程师和设计者提出了严峻挑战。

由于地震具有潜在的破坏性影响，尤其是对高层建筑的影响更为显著，因此在结构设计中要考虑抗震性能提升问题，保障建筑结构完整性和居住者安全。高层建筑结构设计中，工程师需考虑地震力对建筑的影响和破坏机制，遵循抗震设计原则确保建筑安全。制定合理的抗震设防目标、采取有效的加固措施和减震技术，通过数值模拟方法和实验研究评估结构的抗震性能，以确保建筑在地震环境下的安全稳定。

1. 高层建筑结构设计

1.1 结构体系选择

选择合适的结构体系是高层建筑设计的关键，它决定了结构的整体稳定性、强度和性能^[1]。高层建筑的常见结构体系包括抗弯框架、剪力墙体系、支撑框架和组合体系。影响选择的因素包括建筑高度、施工限制、抗震考虑和成本效益。工程师必须仔细评估这些因素，以确定满足项目要求的最合适的系统。

1.2 基础设计

基础设计关注建筑物的荷载分配和防止地基沉降和倾覆。高层建筑通常需要深厚地基，例如采用桩基础或沉箱施工技术，以将垂直荷载安全地传递到地面。土壤条件、地下水位和地震考虑因素是影响基础设计的关键因素。工程师可以采用先

进的分析技术，包括有限元分析和土壤-结构相互作用建模，来优化基础设计并确保长期稳定性。

1.3 框架结构设计

框架结构由梁和柱组成，构成高层建筑的骨干，抵抗重力和侧向荷载。工程师精心设计框架系统，以确保足够的强度、刚度和延展性。有限元分析和基于性能的设计等先进的分析方法使工程师能够在考虑建筑和功能要求的同时优化框架配置和构件尺寸。

1.4 板柱系统的设计

板柱系统又称平板系统，因其有效利用空间和简化施工而常用于高层建筑。在该系统中，直接支撑在柱上的楼板取消了对梁的需求，从而更好地体现结构设计的时尚性^[2]。工程师精心设计板柱连接，以确保足够的强度、刚度和抗冲剪能力。先进的建模技术和规范规定控制板和柱系统的设计，确保各种负载条件下的结构完整性和安全性。

1.5 钢结构设计

钢结构具有多功能性、强度和施工速度，使其成为高层建筑的流行选择。工程师设计钢结构以承受重力和横向载荷，同时优化材料使用并最大限度缩短施工时间。非线性有限元分析和基于性能的设计等先进的分析方法使工程师能够准确预测钢结构在地震和风荷载下的行为，从而实现高效、弹性的设计。

1.6 混凝土结构设计

混凝土结构因其耐久性、防火性和多功能性而广泛应用于高层建筑。工程师设计混凝土结构以抵抗重力和横向载荷，同时确保适用性和长期耐用性。高强度混凝土和纤维增强等先进混凝土技术可提高混凝土建筑的结构性能和弹性。工程师采用复杂的分析技术，包括非线性有限元分析和推覆分析，来优化混凝土结构的抗震性和性能。

1.7 玻璃幕墙设计

玻璃幕墙在高层建筑中提供审美价值，保障自然光摄入和全景视野，但其设计需要仔细考虑结构、隔热与保温、环境因素^[3]。工程师设计幕墙系统以抵抗风荷载和地震荷载，同时适应热膨胀和建筑运动。先进的结构玻璃系统，例如单元式幕墙和缆索支撑系统，可提高高层环境中玻璃幕墙的性能和耐用性。

2. 抗震性能分析

2.1 地震力作用机理

地震时能量突然释放，对高层建筑施加地震力，引起地面震动和结构动荷载^[4]。地震力作用机制涉及建筑物的质量、刚度和地震波特性的复杂相互作用。主要地震力包括由于建筑物加速度、倾覆力矩和横向地面运动引起的剪力而产生的惯性力。分析这些力，以了解它们对建筑构件的影响，并制定减

轻其对结构完整性影响的策略。

2.2 抗震设计原则

高层建筑的抗震设计原则包含一种综合方法，以确保其抗震能力。首先，整体结构稳定性至关重要，这是通过坚固的结构系统和基础设计来实现的。其次，建立合理的荷载传递路径确保地震力有效分布在整个结构中。第三，平衡强度、刚度和韧性设计旨在提高建筑的承受动态载荷同时允许受控变形。第四，遵守相关建筑规范和标准，满足最低安全要求。第五，结构元件的适当支撑和加固，增强其抵抗地震力的能力。第六，考虑不同方向的地震力，确保对多方向震动的全面防护。最后，利用新技术和材料可以实现创新解决方案，进一步提高抗震性能和弹性。

2.3 抗震设防目标

抗震设防目标以设计地震动参数（例如峰值地面加速度（PGA）和频谱响应加速度（ S_s 和 S_1 ））表示，定义了建筑物必须承受的地震危险级别^[5]。这些目标根据建筑物的位置、土壤条件、占用情况和结构重要性而有所不同。工程师根据概率地震风险分析（PSHA）和特定地点的地震危险评估来确定抗震设防目标，同时考虑该地区潜在地震的频率和强度。设计规范和标准为确定适当的抗震设防水平提供了指导，以确保针对地震危害有足够的裕度。

2.4 抗震加固措施

抗震加固措施通过加强易损结构构件和改善整体结构性能来增强高层建筑的抗震性能。常见的加固技术包括添加剪力墙、支撑系统和阻尼装置，以增加横向刚度并耗散地震能量。工程师还采用改造技术，例如添加外部钢框架或用碳纤维增强聚合物（CFRP）或钢板加固现有混凝土构件，以增强延展性和抗地震力。先进的分析方法，包括非线性动力分析和基于性能的设计，可帮助工程师评估加固措施的有效性并优化其抗震设计。

2.5 结构减震技术

结构减震技术通过消散和减轻地震能量，增强高层建筑的抗震能力。为此目的，使用了各种设备和系统，包括基础隔离器、阻尼器和调谐质量阻尼器（TMD）。基础隔振器是安装在建筑物地基和上部结构之间的地震支座，使建筑物在地震期间能够独立于地面运动而移动，从而减少传递到结构的地震力。阻尼器，例如粘性阻尼器、摩擦阻尼器和流体粘性阻尼器，用于通过将地震能量转化为热量来吸收和耗散地震能量，从而减少结构振动和损坏^[6]。TMD 是安装在建筑物内的被动或主动质量弹簧阻尼系统，用于抵消地震力引起的过度振动，从而提高稳定性和居住者舒适度。将结构减震技术融入高层建筑设计中，以提高其抗震性能和弹性，为抵御地震灾害提供额外的保

护。

2.6 数值模拟方法

数值模拟方法是评估高层建筑抗震性能和预测其在地震荷载条件下行为的不可缺少的工具^[7]。有限元分析 (FEA)、有限差分法 (FDM) 和边界元法 (BEM) 是常用的数值模拟技术, 用于对结构在地震力作用下的复杂行为进行建模, 这些方法使工程师能够模拟各种场景, 包括非线性材料行为、土壤-结构相互作用和动态响应分析, 以评估地震荷载下的结构响应和性能。先进软件包有利于数值模拟方法的实施, 使工程师能够进行全面的抗震分析、优化设计和评估抗震加固措施的有效性。

2.7 实验研究

实验研究是验证数值模型、验证设计假设以及增进我们对高层建筑抗震性能的理解的重要媒介。进行物理振动台试验、离心机建模和全尺寸结构试验, 以研究模拟地震条件下建筑构件和系统的动态响应和失效机制。这些实验为校准数值模型、制定设计指南和改进地震性能预测方法提供了宝贵的数据。研究人员、工程师和测试机构之间的通力合作, 有助于推进地震工程实验研究的发展, 并开发出增强高层建筑抗震能力的创新解决方案。

3. 案例分析

3.1 典型高层建筑事故案例

近年来, 我国发生了多起备受瞩目的高层建筑事故, 凸显了严格的结构设计和安全规程的重要性。比如, 2009年上海莲花河畔综合体倒塌事件。该事件是由邻近建筑地下室的挖掘引发的, 导致一栋13层建筑的顶层倒塌, 压倒了附近的建筑物。调查显示基础设计和施工实践不足, 强调在施工过程中需要采取严格的质量控制措施和结构监测。2015年, 深圳又发生一起重大事件, 山体滑坡导致恒泰裕工业园多栋高层建筑倒塌。土壤稳定措施不力和忽视地质调查被认为是导致这场灾难的关键因素, 这凸显了现场调查和岩土工程在高层建筑项目中的重要性。

这些案例强调了遵守结构设计标准、进行彻底的风险评估和实施强有力的质量控制措施的必要性, 是防止事故并确保高层建筑结构稳定性和保障居民安全的重要举措。

3.2 成功的抗震设计案例

上海中心大厦是一栋2015年竣工的632米超高摩天大楼, 采用了先进的地震阻尼系统, 包括调谐质量阻尼器和摆式阻尼器, 以减轻风和地震力的影响。这些被动阻尼装置显著增强了塔的稳定性和弹性, 确保地震期间人员的安全和结构的完整性。2008年夏季奥运会而建造的北京国家体育场, 也称为“鸟巢”, 该体育场的创新结构系统采用由相互连接的柱和梁网络支撑的钢格壳, 可有效消散地震能量并最大限度减少地震期间

的结构损坏。本次抗震设计不仅能够承受2008年汶川地震产生的地震力, 而且也是中国工程实力和抗震能力承诺的象征。

这些成功的抗震设计案例体现了在高层建筑项目中融入先进技术、严谨运用工程原理和促进跨学科协作的重要性。通过优先考虑抗震能力和采取积极的风险缓解措施, 可以建设安全、有韧性的高层建筑, 抵御地震灾害。

总之, 对典型高层建筑事故的分析强调了遵守结构设计标准和实施严格的质量控制措施以预防灾害的重要性。相反, 成功的抗震设计案例凸显了创新工程解决方案和主动风险缓解策略在增强高层建筑抗震能力方面的有效性。通过从过去的失败中吸取教训并采用抗震工程的最佳方法, 高层建筑设计和施工水平将会不断提升, 确保其建筑环境的安全性。

结束语:

该研究为高层建筑的结构设计和抗震性能分析提供了宝贵的见解, 强调选择适当的结构系统、实施抗震加固措施以及整合先进技术以增强抗震能力的重要性。

高层建筑结构设计和抗震性能加强领域的未来研究可能会侧重于创新材料、先进分析技术和可持续设计实践, 以进一步提高抗震性能并应对城市发展中不断变化的挑战。此外, 智能技术和弹性设计策略的整合将提高居住者安全和减轻地震对高层建筑的影响。还可以探索地震工程的新兴趋势, 研究新型结构系统的性能, 并进行全面的震后评估, 以确定抗震设计规范和标准中需要改进的领域。同时, 跨学科合作和知识共享可以促进技术创新和经验传递。

[参考文献]

- [1]胡道航.某特别不规则高层建筑结构设计与分析[J].建筑结构, 2022, 52(23): 8.
- [2]姜宝龙, 李英民, 唐洋洋, 等.钢-混凝土组合柱复杂节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2023, 44(S01): 129-137.
- [3]陈志军, 杨为, 彭宁, 等.武汉某超限高层住宅楼结构设计[J].建筑结构, 2023, 53(13): 97-103.
- [4]董一桥, 刘志强, 何喜, 等.高烈度区某旋转斜柱框架-核心筒超限高层结构设计要点分析[J].建筑结构, 2023, 53(15): 96-104.
- [5]黄存智.转换层隔震的地铁上盖高层剪力墙结构设计与分析[J].工程抗震与加固改造, 2023, 45(4): 50-57.
- [6]余勇, 陈焰周, 肖飞, 等.某超限高层结构抗震性能分析[J].山西建筑, 2023(23): 55-58.
- [7]余楚江.广州某项目A栋超高层住宅结构抗震设计[J].广东土木与建筑, 2023, 30(9): 45-49.