

地震作用下装配式建筑结构设计及抗震性能分析

耿锦彦

石家庄圣帝建筑工程设计咨询有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着城市化进程的快速推进,装配式建筑通过预制构件的工厂化生产,结合现场的模块化组装,装配式建筑能够有效提高施工效率、保障建筑质量,并最大限度地减少资源浪费。然而,装配式建筑的抗震性能仍然是一个亟待深入研究的课题,特别是在地震频发的区域,确保建筑的安全性成为设计中的关键考量。文中探讨装配式建筑的抗震性能,分析其结构特性对抗震能力的影响,并探讨如何通过优化设计提高其抗震性能。

[关键词]装配式建筑;结构设计;抗震性能;地震作用

DOI: 10.33142/aem.v6i12.14876 中图分类号: TU375 文献标识码: A

Design and Seismic Performance Analysis of Prefabricated Building Structures under Earthquake Action

GENG Jinyan

Shijiazhuang Shengdi Architectural Engineering Design Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the rapid advancement of urbanization, prefabricated buildings can effectively improve construction efficiency, ensure building quality, and minimize resource waste through factory production of prefabricated components and modular assembly on site. However, the seismic performance of prefabricated buildings is still an urgent research topic, especially in areas with frequent earthquakes, ensuring the safety of buildings has become a key consideration in design. The article explores the seismic performance of prefabricated buildings, analyzes the influence of their structural characteristics on seismic resistance, and explores how to improve their seismic performance through optimized design.

Keywords: prefabricated building; structural design; seismic performance; earthquake action

引言

地震多发地区对建筑抗震性能提出了严峻挑战,传统建筑结构虽然具备一定的抗震能力,但相比之下,装配式建筑作为一种新兴形式,凭借其施工效率高、质量可控及资源利用率高的特点,逐渐得到广泛关注。越来越多的研究者开始探讨装配式建筑的抗震性能,尤其是在地震频发地区,如何确保其在地震中的安全性。装配式建筑由多个预制构件通过节点连接而成,而节点的设计直接关系到建筑的抗震表现。节点的刚度、延性、能量吸收等特性,直接影响装配式建筑在地震中的响应。现有的研究显示,合理的节点设计能够显著提升建筑的抗震能力。

1 地震作用与装配式建筑概述

1.1 地震作用的基本理论

地震作用指的是地震波通过地壳传播至建筑基础,产生震动荷载并对建筑物产生影响。地震波主要包括纵波(P波)、横波(S波)与表面波,各自对建筑物的作用不同。纵波速度较快,对建筑物的影响相对较小;相比之下,横波与表面波传播速度较慢,能量较大,通常对建筑物造成更显著的破坏。纵波通过压缩和膨胀的方式影响建筑结构,而横波与表面波则通过剪切力对建筑物产生较强冲击,尤其在建筑物刚度较弱时,破坏效应更为突出。地震烈度反映了地震波到达某一区域后造成的破坏程度。震中距离越

短,地震波的强度通常越大,建筑物的受损程度也越严重。土壤类型也会影响地震波的传播特性,软土层通常会加剧地震波的放大效应,导致震动强度增加,建筑物的破坏性也随之加大。在地震作用下,建筑物会受到动载荷的影响,表现为变形、振动与位移等反应。地震波不仅能引发瞬时震动,还可能导致建筑物在震后持续变形,进而影响其稳定性。地震的强度、建筑物的刚度、质量分布及支撑系统等因素会显著影响建筑物的响应。若地震波频率接近建筑物的固有频率,可能会引发共振,增加振动幅度,从而加剧建筑物的破坏。

1.2 地震对建筑结构的影响机制

地震波的作用力主要表现为振动、位移、弯曲与剪力,这些力会导致建筑物发生变形,甚至可能引发部分或整体破坏。建筑物的抗震性能受到固有频率、刚度与延性等多个因素的影响。固有频率是指建筑物在不受外力作用时的自由振动频率。如果地震波的频率接近建筑物的固有频率,可能会引发共振,导致建筑物振动加剧,进而发生结构损坏。结构刚度较大时,建筑物抵抗地震力的能力增强,但过高的刚度可能导致脆性破坏。延性是指建筑物通过塑性变形来吸收地震能量的能力,具备较高延性的结构可以有效分散地震能量,减少破坏风险。耐震性指建筑物在地震中的稳定性,延性则表现为通过塑性变形吸收能量

的能力,能量吸收能力则通过材料的变形或其他手段减少地震能量对结构造成的破坏。要提高建筑物的抗震能力,设计中必须重点考虑延性与能量吸收能力,以确保在地震中的安全。

1.3 装配式建筑的概念及特点

与传统建筑相比,装配式建筑在施工周期、质量控制及环境影响等方面具有明显优势。工厂生产的构件保证了精度,减少了现场施工误差。装配式建筑采用标准化与模块化设计,不仅提高了施工效率,还显著缩短了工期,尤其适用于需要快速建设的大规模项目。构件在工厂批量生产,现场组装显著提高了施工速度,简化了施工过程。标准化设计确保了构件的精度与一致性,从而减少了施工中的不确定性。构件在工厂预制,减少了施工现场废料、噪音与污染,建筑过程中的资源利用率提高,废弃物可回收利用。这种设计不仅节约了资源,也减少了对环境的负面影响,符合绿色建筑的可持续发展理念。随着技术进步与标准化生产体系的逐步完善,装配式建筑在提升抗震性能方面展现了巨大的潜力,成为提高建筑物抗震能力的重要途径。

1.4 装配式建筑结构体系分类

装配式建筑的结构体系通常按构件的连接方式与承载功能进行划分。常见的结构形式包括框架结构、剪力墙结构以及框架-剪力墙结构,这些体系在抗震能力上的表现各有差异,因此,选择时应根据建筑的性质与地震烈度综合考虑。框架结构通过梁、柱等构件的节点连接组成,适合中低层建筑。该结构具有轻便、施工灵活等特点,但抗震能力相对较弱,主要依靠延性与韧性来吸收地震力。在震中较近或地震烈度较高的地区,框架结构常常需要额外的加固措施来提升抗震性能。剪力墙结构通过竖向墙体与横向构件的协作提供强大的抗侧力能力,广泛应用于高层建筑。由于剪力墙具备较强的刚度与承载能力,它能够有效抵御水平地震力,因此在抗震性能上明显优于框架结构。尽管剪力墙结构施工更为复杂,且占用较大空间,但它适用于地震烈度较高的区域。框架-剪力墙结构结合了框架与剪力墙的优势,不仅保留了框架结构的灵活性,还增强了抗侧力能力。

2 装配式建筑设计原则与方法

2.1 装配式建筑的设计规范与标准

装配式建筑的设计应依据《建筑结构荷载规范》及《建筑抗震设计规范》等标准,这些规范详细阐述了建筑在地震等极端条件下的荷载要求、抗震能力等方面的设计准则。《建筑结构荷载规范》针对建筑物所承受的活荷载、风荷载、雪荷载等做出了明确规定,设计时,必须根据这些规范计算各构件的承载能力,避免超出其极限承载能力。而《建筑抗震设计规范》则为抗震设计提供了细致的标准,包括地震烈度、抗震等级的要求及各构件的抗震能力。通

过遵循这些规范,装配式建筑能够在地震等灾害中保持足够的稳定性。

2.2 结构布置与连接节点设计

在装配式建筑的结构设计中,合理的节点设计能够优化荷载传递,提高建筑的抗震能力,确保建筑在地震中的整体稳定性。由于装配式建筑是通过现场组装预制构件来完成的,节点设计对于连接各个构件至关重要。常见的连接方式包括螺栓连接、焊接连接等,每种连接形式的选择都应考虑建筑的类型及地震烈度^[1]。在设计过程中,合适的节点不仅能有效分散地震荷载,还能在结构受到外力作用时保持相对稳定。节点设计还需要确保在地震发生时,建筑能够保持适度的延性,合理配置刚性与延性结构,有助于提高抗震性能。刚性节点能够有效传递荷载,而延性结构则通过变形吸收能量,减轻地震冲击。

2.3 抗震设计原则与策略

装配式建筑的抗震设计应遵循“强柱弱梁”和“刚性连接、柔性结构”的原则,确保建筑能在地震时保持较高的稳定性。根据“强柱弱梁”的设计理念,柱的承载能力要高于梁,以避免梁在地震中出现过度变形,确保荷载有效传递至柱。在“刚性连接、柔性结构”的设计策略下,刚性节点有助于荷载的顺畅传递,而柔性结构能够通过变形吸收能量,减少地震对建筑的影响。在具体设计时,优化结构布置尤为重要,合理的布局能够有效分散地震荷载,减少局部过载的发生。

2.4 预制构件与连接构造设计

设计时,预制构件的延性需要得到充分保证,避免构件在地震中发生脆性破坏。同时,连接构造的设计应确保各构件能够协调工作,保证荷载的有效传递,从而维持整个结构的稳定性。在预制构件设计中,构件材料的选择,如预应力混凝土、钢筋混凝土等,其优越的延性及能量吸收特性可为结构提供强有力的抗震支撑。此外,预制构件的制造精度同样重要,精确的构件尺寸能够确保各连接节点的严密性与结构的整体性^[2]。连接构造设计应保证各构件之间的有效配合,确保荷载传递的顺畅。常见的连接方式如螺栓连接、焊接连接等,选择时要根据建筑的功能需求及地震烈度来确定。

3 装配式建筑的抗震性能分析

3.1 抗震性能评价指标与方法

在评估装配式建筑的抗震性能时,通常考虑变形能力、延性及能量吸收能力这三项指标。变形能力体现了建筑在地震荷载作用下的稳定性,是确保建筑物能有效分散地震能量的关键因素。延性则反映了建筑在地震荷载作用下能够有效进行有效变形的能力,增强延性可以有效避免脆性破坏。能量吸收能力则是建筑抗震性能的另一项重要指标,它表征了建筑物在地震中消耗并转化地震能量的能力。有限元分析通过建立建筑的虚拟模型,能够模拟建筑在地震荷载

下的反应。振动试验则可以通过地震模拟实验来验证计算模型的准确性。

3.2 非线性动力时程分析方法

非线性动力时程分析方法广泛应用于建筑抗震研究中，它能更全面地反映地震荷载作用下建筑结构的响应。与传统的线性分析方法相比，非线性动力时程分析具有更高的精确度，能够揭示出在强震作用下，建筑可能出现的破坏模式^[3]。采用非线性动力时程分析时，建筑的材料非线性、几何非线性以及动力学特性等因素都会被综合考虑。

3.3 数值模拟与模型建立

数值模拟作为评估装配式建筑抗震性能的重要手段，能够通过建立准确的有限元模型来分析建筑在地震中的响应。通过数值模拟，可以对装配式建筑不同构件、节点在地震荷载下的受力与变形进行详细研究。有限元模型的建立需要考虑建筑的结构类型、材料特性及节点连接方式等多个方面。特别是装配式建筑中的构件连接，节点的设计对于建筑抗震性能至关重要。通过数值模拟，研究人员能够模拟不同地震波作用下的建筑反应，进而对结构设计方案进行优化。

3.4 地震作用下装配式建筑的响应分析

通过响应分析，能够全面了解装配式建筑在地震荷载作用下的变形、内力分布及节点受力等情况。响应分析帮助设计人员评估建筑在地震中的整体表现，从而为进一步的抗震设计提供数据支持。在地震作用下，建筑的变形模式、内力分布以及节点的受力情况均可能发生显著变化，正确分析这些因素是确保建筑安全的关键。响应分析着重研究建筑在地震作用下的变形程度与内力分布，尤其是对节点的受力情况进行重点评估。节点作为装配式建筑中最为关键的连接部分，决定了建筑的整体稳定性。若节点设计不合理，可能会导致建筑在地震中的局部破坏，从而影响整体抗震性能。

4 关键技术与影响因素研究

4.1 连接节点抗震性能研究

连接节点的抗震性能直接影响整个装配式建筑的抗震能力。节点的设计决定了构件间的连接效果，关键参数包括刚度、延性及能量吸收能力。节点刚度的选择至关重要。如果刚度过大，容易导致应力集中，增加破坏风险；刚度过小，则可能无法承受足够的地震荷载。合理的刚度设计可确保节点稳定，避免地震中应力分布不均，保障建筑的整体性。节点延性决定了其在地震作用下的变形能力。具备良好延性的节点能够承受更多塑性变形，吸收地震能量，降低破坏可能。能量吸收能力同样重要。合理设计的节点能分散传递的地震能量，减少对建筑结构的破坏。

4.2 装配式建筑结构的延性与耗能能力

延性表明结构在地震作用下的塑性变形能力，而能量吸收能力则指建筑吸收并消耗地震能量的能力，二者共同影响建筑的抗震表现。具备良好延性的构件在地震中能够

发生较大的塑性变形，吸收地震能量，减少破坏风险。对构件与节点的设计优化，有助于增强建筑的整体延性，提升抗震能力。通过设计专门的耗能构件，如缓冲层等，可以有效吸收地震能量，减少震动对建筑的影响。此类设计不仅提升了建筑的延性，还增强了能量消散功能，进一步减轻了地震带来的破坏。

4.3 预制构件接缝处理技术

由于装配式建筑由多个构件拼装而成，接缝的质量直接影响建筑的整体稳定性。接缝设计不当可能导致连接部位失稳，进而影响抗震效果。合理设计接缝能够确保构件间的紧密连接，采用高强度钢筋或缓冲层技术，可以增强接缝的抗震能力，从而提高建筑的整体抗震表现。此外，接缝的施工精度也应严格控制，确保连接牢固，避免因接缝失效而导致的结构破坏。

4.4 施工质量对抗震性能的影响

构件加工精度、安装质量以及连接节点质量直接影响建筑在地震中的表现。任何施工环节的疏忽都可能导致结构不稳定，从而降低建筑的抗震能力。只有确保构件尺寸准确，才能保证安装时各构件之间的紧密配合^[4]。尺寸误差可能导致连接不稳，进而影响建筑的稳定性。节点作为建筑荷载传递的关键部位，若连接质量不合格，荷载将无法有效传递，可能导致建筑局部失稳。施工过程中必须严格按照设计要求执行节点加工与安装，确保节点能有效承受地震荷载，保障建筑整体的稳定性。

5 结语

装配式建筑以其高效的施工模式、稳定的质量控制及资源优化利用，逐渐成为建筑行业的重要发展方向。然而，装配式建筑的抗震性能，特别是连接节点、构件延性以及能量吸收能力等方面，依然存在改进空间。随着技术的不断进步与实践经验的积累，装配式建筑的抗震设计将趋向更精细化，为建筑行业提供更全面的抗震标准，确保建筑结构在地震中的安全性。未来，通过对装配式建筑抗震性能的提升，不仅可以增强建筑抗震能力，还能够为人们提供更加安全、稳定的居住环境。

[参考文献]

- [1]邢慧荣,黄昆.不同地震作用下装配式建筑结构选型与抗震性能分析[J].中国新技术新产品,2024(2):101-103.
 - [2]宁国辉,姜玲浩.基于连续单元模拟的装配式建筑弹塑性分析[J].中国新技术新产品,2024(18):110-112.
 - [3]许海珍.装配式混凝土剪力墙结构抗震性能分析[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(3):15-18.
 - [4]文一茗.全装配式RC楼盖建筑结构地震响应规律与平面内刚性性能研究[D].河南:河南工业大学,2024.
- 作者简介:耿锦彦(1987.6—),毕业院校:北华航天工业学院,专业:土木工程,单位:石家庄圣帝建筑设计咨询有限公司,职务:结构设计,现职称:工程师。