

抗震技术在装配式建筑结构中的应用研究

文 / 李振环 暨南大学

摘要：装配式建筑凭借工厂预制、现场组装的特点，在施工效率与环保性上优势显著，但预制构件连接节点等部位的抗震性能是其发展短板。本文聚焦抗震技术在装配式建筑结构中的应用，分析装配式建筑的特点及抗震需求，探讨预制构件连接节点强化、整体抗震性能优化、耗能减震及剪力墙加固等具体技术的应用方式，阐述这些技术对结构承载能力、变形性能和整体稳定性的提升作用，为提升装配式建筑抗震水平提供参考，助力其在建筑领域更广泛、安全地应用。

关键词：抗震技术；装配式建筑；结构；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.021

引言

城市化进程加快推动建筑行业转型升级，装配式建筑因符合高效建造与绿色发展理念，成为行业重要发展方向。地震作为常见自然灾害，对建筑结构安全威胁极大，装配式建筑由于构件拼接的特殊性，其抗震性能一直是行业关注的焦点。连接节点易成为抗震薄弱环节，整体结构刚度分布也需合理设计以应对地震作用。提升装配式建筑抗震性能，使其在地震发生时能保障人员安全与结构稳定，是促进其广泛应用的关键。研究抗震技术在装配式建筑结构中的应用，明确技术应用路径与效果，对推动装配式建筑技术进步、保障建筑安全具有重要意义。

一、装配式建筑结构特点与抗震需求

（一）装配式建筑结构的主要特点

装配式建筑结构采用工厂预制构件，通过标准化生产流程完成构件加工。构件生产过程中，能够严格控制材料质量和施工精度，减少现场作业可能出现的误差。这种生产方式改变了传统建筑依赖现场浇筑的模式，将大量施工环节转移至工厂内部，降低受自然环境影响的概率。构件运输至施工现场后，通过连接节点进行组装，形成完整的结构体系。连接节点的设计需要考虑构件之间的协同工作，确保结构整体稳定性。

现场施工阶段，装配式建筑结构的安装流程相对简化，减少了混凝土养护等耗时环节，缩短整体施工周期。施工过程中产生的建筑垃圾数量较少，有利于环境保护。构件重量和尺寸经过预先设计，便于运输和吊装，降低对大型施工设备的依赖。结构布局具有一定灵活性，可根据使用需求调整构件组合方式，适应不同建筑功能要求。材料利用效率较高，避免传统施工中的材料浪费现象。

（二）装配式建筑结构的抗震需求

装配式建筑结构的抗震需求源于其自身构造特点。预制构件之间的连接部位是抗震薄弱环节，需要保证节点具有足够的强度和延性。节点在承受拉力、剪力和弯矩共同作用时，不能发生脆性破坏，需具备一定的塑性变形能力。地震作用下，结构各部分会产生相对位移，连接节点需能够吸收部分地震能量，减少结构主体损伤。



图1 装配式建筑构件工厂与现场组装图

节点耗能能力的大小直接影响结构整体抗震性能，设计时需通过试验确定节点的耗能系数。抗震设计需考虑整体结构的刚度分布，避免出现刚度突变导致应力集中。结构刚度沿高度方向应逐渐变化，相邻楼层的刚度比不宜过大。

建筑使用过程中，可能面临不同强度的地震作用。装配式建筑结构需满足相应的抗震设防等级要求，确保在地震发生时能够保障人员安全。丙类建筑需在多遇地震作用下保持正常使用，在罕遇地震作用下不倒塌。结构抗震性能需通过合理的构造措施实现，包括构件截面尺寸设计、配筋方式选择等。框架梁的配筋应保证梁端出现塑性铰时，梁跨中仍能承受弯矩，形成“强柱弱梁”的受力机制。抗震需求还涉及结构的变形能力，地震发生后，结构应具有一定的塑性变形能力，避免发生脆性破坏。结构的层间位移角需控制在允许范围内，钢筋混凝土框架结构的最大层间位移角不宜超过1/500。设计中需结合建筑所处地震烈度区域，制定针对性的抗震方案，使结构在地震作用下保持稳定。8度设防区的装配式结构，其抗震措施需比6度设防区更为严格，如增加节点配筋数量、减小构件间距等。

二、抗震技术在装配式建筑结构中的具体应用

(一) 预制构件连接节点的抗震强化技术

预制构件连接节点的抗震强化技术聚焦于提升节点的承载能力和变形性能。通过改进节点构造形式，采用高强度螺栓或焊接工艺增强连接刚度。节点处设置耗能装置，地震发生时可吸收约 30% 的地震能量，减少构件主体受力。节点构造设计需结合构件受力特点，考虑拉力、剪力和弯矩的共同作用。不同类型的节点采用不同的连接方式，框架梁柱节点多采用螺栓连接与焊接组合形式，既保证连接强度又保留一定柔性。

节点设计需考虑构件之间的相对转动能力，确保地震作用下节点不发生脆性破坏。采用柔性连接方式，允许节点在一定范围内产生位移，释放部分地震应力。材料选择上，节点区域使用高性能混凝土，其抗压强度较普通混凝土提高 40%，提升节点整体抗震性能。节点表面进行粗糙处理，增加与相邻构件的摩擦力，防止相对滑动。在节点内部设置加强钢筋，形成立体配筋体系，增强节点抗裂性能。施工过程中，节点灌浆需保证饱满度，采用压力注浆技术确保浆体填充所有缝隙，避免因灌浆不密实导致节点强度下降^[2]。

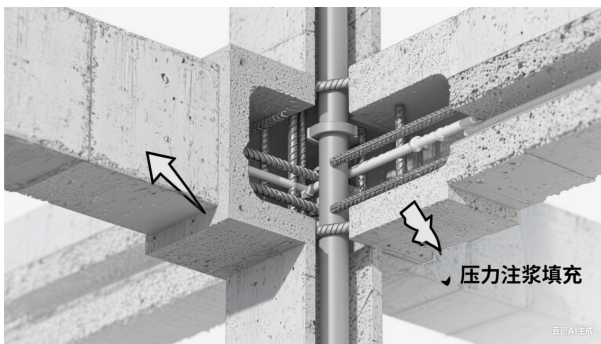


图 2 装配式建筑预制构件连接节点抗震强化构造示意图

(二) 装配式结构整体抗震性能优化技术

装配式结构整体抗震性能优化技术从结构体系层面进行设计调整。通过调整构件布置方式，使结构刚度分布均匀，降低地震响应。采用有限元分析方法，模拟不同地震波作用下结构的受力状态，优化结构参数。结构体系选择需结合建筑高度和抗震设防烈度，低层建筑可采用装配式框架结构，高层建筑则适合框架-剪力墙组合体系^[3]。

结构抗震性能优化需考虑构件惯性矩和截面尺寸的匹配关系。增大关键部位构件截面，提高结构抗侧移能力。优化后的结构在遭遇设防烈度地震时，顶点位移可控制在建筑高度的 1/500 以内，满足抗震安全要求。对结构抗侧力构件进行合理布局，使水平力传递路径简洁直接，减少力流转折导致的应力集中。调整构件刚度比例，使框架与剪力墙承担的地震力分配合理，避免某一构件受力过大提前破坏。在结构薄弱部位增设支撑构件，形成多道抗震防线，第一道防线受损后，第二道防线能继续承担荷载。通过优化结构质量分布，降低结构重心高度，减少地震作用下的倾覆力矩。

(三) 耗能减震技术在装配式建筑中的应用

耗能减震技术通过在结构中设置减震装置，消耗地震输入能量。减震装置安装在构件连接部位，当结构发生振动时，装置产生摩擦或塑性变形，转化地震能量。减震装置的布置位置需经过计算确定，通常在结构刚度较大的部位设置，以提高能量消耗效率。不同类型的减震装置适用不同的结构形式，黏滞阻尼器适合高层建筑，屈曲约束支撑更适用于多层框架结构。几种常见抗震技术的对比可见表 1。

表 1 常见抗震技术性能对比表

抗震技术类型	适用结构部位	抗震提升 (相对值)	成本增加 比例
节点强化技术	构件连接节点	40%	15%
耗能减震技术	框架梁柱节点	35%	20%
整体优化技术	结构整体体系	30%	10%

常用的耗能装置包括黏滞阻尼器和屈曲约束支撑，其耗能效率可达 60% 以上。在装配式框架结构中，合理布置减震装置可使结构地震响应降低约 25%。减震装置与结构主体协同工作，地震后可更换受损装置，减少结构修复成本^[4]。黏滞阻尼器通过内部流体流动产生阻尼力，其阻尼系数可根据结构需求调整，适应不同强度的地震作用。屈曲约束支撑在受拉和受压时均能屈服耗能，避免普通支撑受压屈曲的问题，充分发挥材料塑性性能。减震装置与构件的连接需保证强度，采用刚性连接方式确保力的有效传递，使装置在地震发生时及时发挥作用。装置工作温度范围需与建筑所在地气候条件匹配，避免极端温度影响阻尼性能。安装过程中需进行精度校准，确保装置在结构振动时能准确触发耗能机制。

(四) 装配式剪力墙结构的抗震加固技术

装配式剪力墙结构的抗震加固技术注重提升墙体的抗剪能力和延性。在剪力墙边缘设置暗柱，采用配筋砌块增强墙体整体性。墙体之间采用榫卯连接，增加接触面积，提高协同工作能力。剪力墙上下层之间设置连接钢筋，通过灌浆套筒实现可靠连接，确保竖向力传递和水平力抵抗。墙体预制时预留键槽，增强与后浇混凝土的结合力。

加固后的剪力墙在低周反复荷载作用下，其位移延性系数可达到 3.5 以上。通过增加墙体厚度，使墙体抗剪承载力提高 50%，满足高烈度地震区的抗震要求。在剪力墙中部设置开洞时，洞口周边采用加强边框，避免洞口角部应力集中导致开裂。采用高性能钢筋网片增强墙体受拉性能，钢筋网片间距控制在 150mm 以内，提高墙体抗裂性。墙体与框架柱的连接部位设置拉结筋，确保两者协同工作，共同抵抗水平地震力。施工过程中，严格控制墙体安装垂直度，避免因安装偏差导致受力不均，影响整体抗震性能。

（五）预制楼板与梁体的抗震协同技术

预制楼板与梁体的抗震协同技术关注两者之间的受力传递，楼板与梁体连接部位设置抗剪键，增强竖向和水平方向的约束力^[5]。楼板铺设时预留后浇区，通过混凝土二次浇筑形成整体受力体系。抗剪键设计为楔形或梯形，嵌入梁体预留槽口，增加抗剪面积。后浇区宽度根据楼板跨度确定，通常不小于200mm，确保连接强度。

协同技术可使楼板与梁体的协同工作系数提升至0.9以上，减少两者之间的相对滑移。在地震作用下，楼板参与梁体受力，使梁体弯矩分布更加合理，梁端塑性铰出现时间延迟约20%，提高结构整体抗震性能。楼板配筋在连接部位进行加强，钢筋伸入梁体内部，锚固长度满足规范要求。采用叠合楼板时，板底预制层与梁体紧密结合，板面后浇层与梁体整体浇筑，形成组合截面。楼板安装时设置临时支撑，确保施工阶段受力安全，待后浇混凝土达到设计强度后拆除，使楼板与梁体共同受力。考虑温度变化对楼板与梁体协同工作的影响，在适当位置设置伸缩缝，减少温度应力对连接部位的破坏。

三、抗震技术对装配式建筑性能的提升

（一）抗震技术对结构承载能力的提升

抗震技术通过优化构件连接方式和材料性能，增强装配式建筑结构的承载能力。节点强化处理使连接部位的抗拉承载力提高30%以上，避免地震作用下节点过早破坏。采用高性能钢材制作的预制构件，其屈服强度较普通钢材提升25%，能承受更大的地震荷载。整体结构体系经过抗震优化，竖向承载力可提高约20%，水平承载力提升更为显著。合理布置的耗能装置分担部分结构荷载，使主要承重构件受力减少15%左右。结构在长期使用中，抗震技术的应用降低了材料疲劳损伤速度，延长结构承载能力的保持时间。构件截面经过抗震设计调整，在相同材料用量下，承载效率提高10%，实现材料的高效利用。抗震技术的综合应用让装配式建筑在遭遇超出设防烈度的地震时，仍能保持基本承载功能，为人员疏散争取时间。

（二）抗震技术对结构变形性能的改善

抗震技术通过调整结构刚度分布和设置柔性连接，改善装配式建筑结构的变形性能。采用减震装置的结构，在地震作用下的最大层间位移可减少25%，避免因变形过大导致非结构构件损坏。节点处的柔性设计允许结构产生一定的塑性变形，变形能力较传统刚性连接提升40%，通过变形吸收地震能量。结构整体延性系数提高至3.0以上，在地震作用下能经历更大的变形而不倒塌。预制构件之间的连接方式优化后，相对位移控制精度提升15%，保证结构变形的协调性。抗震技术的应用使结构在往复荷载作用下的残余变形减少30%，地震后修复难度降低。合理的抗震设计让结构在不同强度地震作用下，变形模式更符合预期，避免出现局部过大变形集中。

不同抗震技术对结构变形性能的改善效果存在差异，相关对比数据可见表2。

表2 不同抗震技术对结构变形性能的改善效果

抗震技术类型	层间位移减少比例	延性系数提升幅度	残余变形减少比例
节点柔性设计	20%	35%	25%
减震装置应用	25%	40%	30%
整体刚度优化	15%	25%	20%

（三）抗震技术对结构整体稳定性的增强

抗震技术通过多道防线设计和协同工作机制，增强装配式建筑结构的整体稳定性。结构体系中设置的支撑构件与主体框架形成空间受力体系，抗侧移刚度提高35%，减少地震作用下的整体晃动。节点连接的抗震处理使构件之间的协同工作系数提升至0.9以上，避免结构因局部失稳引发整体倒塌。耗能装置与主体结构的协同工作，使结构的振动周期延长15%，远离地震波的主要频率范围，降低共振效应影响。抗震技术的应用让结构在地震作用下的内力重分布更加合理，避免局部应力集中导致的结构破坏。预制构件的安装精度经过抗震技术控制，轴线偏差减少至5mm以内，保证结构整体受力的均匀性。结构基础经过抗震加固，抗倾覆力矩提高25%，在强震作用下保持稳定，防止结构整体倾斜或倒塌。抗震技术的综合应用使装配式建筑结构的整体稳定性达到传统现浇结构的水平，甚至在某些方面表现更优。

结语

抗震技术在装配式建筑中的应用，有效解决了其抗震短板问题。通过对连接节点的强化处理，提升了节点的强度与延性；整体性能优化让结构受力更均衡；耗能减震装置则能高效吸收地震能量。这些技术的综合应用，显著提升了装配式建筑在地震作用下的安全性，使其兼具高效施工、环保等优势与可靠抗震性能。未来还需结合实际工程需求，不断优化技术方案，降低应用成本，让抗震技术更好地服务于装配式建筑发展。持续探索与实践，将推动装配式建筑在建筑领域发挥更大作用，为社会提供更安全、优质的建筑产品。

参考文献

[1] 郝文波. 装配式建筑施工中的抗震设计与施工技术措施[J]. 住宅与房地产, 2025, (11): 38-40.
 [2] 王英. 影响装配式建筑构件连接节点质量的因素分析[J]. 混凝土, 2024, (12): 175-177.
 [3] 王二元. 装配式建筑工程的抗震设防施工技术探讨[J]. 甘肃科技纵横, 2020, 49(06): 60-62+59.
 [4] 蒋盈盈. 不同抗震技术对预制混凝土墙体抗震性能的影响[J]. 四川水泥, 2025, (01): 119-121.
 [5] 王东旭, 齐华伟. 超高层装配式建筑结构设计及抗震性能分析[J]. 住宅产业, 2024, (05): 51-53.

作者简介：李振环，1995.9.19，男，汉族，河南焦作，硕士，助理工程师，主要研究方向：建筑与土木工程。