

装配式混凝土剪力墙节点抗震性能优化研究

赵松伟 宿兴燕 于云庆 逢恒增

山东建元工程检测鉴定有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19044

[摘要] 装配式混凝土结构凭借工业化生产、绿色环保、施工高效等优势,已成为建筑工业化发展的核心方向之一。剪力墙作为装配式混凝土结构抗侧力体系的关键构件,其节点连接的可靠性直接决定结构整体抗震性能。本文针对装配式混凝土剪力墙节点抗震设计中的核心问题,系统分析了节点构造形式、钢筋连接方式、材料性能及施工质量等关键影响因素,揭示了节点在地震作用下的破坏机理。基于试验研究与数值模拟结果,从构造优化、材料升级、施工管控三个维度提出节点抗震性能优化策略,为提升装配式混凝土剪力墙结构的抗震安全性、推动其在地震高烈度区的广泛应用提供理论支撑与工程参考。

[关键词] 装配式混凝土; 剪力墙节点; 抗震性能; 优化策略; 钢筋连接

中图分类号: TU398+2 **文献标识码:** A

Research on Seismic Performance Optimization of Prefabricated Concrete Shear Wall Joints

Songwei Zhao Xingyan Su Yunqing Yu Hengzeng Pang

Shandong Jianyuan Engineering Testing and Appraisal Co., Ltd.

[Abstract] Prefabricated concrete structures have become one of the core directions of the development of construction industrialization due to their advantages of industrial production, environmental protection and efficient construction. As a key component of the lateral force-resisting system of prefabricated concrete structures, the reliability of shear wall joint connections directly determines the overall seismic performance of the structure. Aiming at the core problems in the seismic design of prefabricated concrete shear wall joints, this paper systematically analyzes the key influencing factors such as joint structural forms, reinforcement connection methods, material properties and construction quality, and reveals the failure mechanism of joints under seismic action. Based on the results of experimental research and numerical simulation, optimization strategies for the seismic performance of joints are proposed from three dimensions: structural optimization, material upgrading and construction management, which provides theoretical support and engineering reference for improving the seismic safety of prefabricated concrete shear wall structures and promoting their wide application in high-intensity seismic areas.

[Key words] Prefabricated concrete; Shear wall joints; Seismic performance; Optimization strategies; Reinforcement connection

引言

在我国城镇化进程持续推进与建筑工业化转型加速的背景下,装配式混凝土结构以其构件标准化生产、现场装配效率高、资源消耗低等显著优势,被广泛应用于住宅、公共建筑等领域。然而,地震灾害频发对装配式结构的抗震性能提出了严格要求。剪力墙作为装配式混凝土结构中抵御水平地震作用的核心抗侧力构件,其节点连接部位是结构受力的薄弱环节。大量震害调查与试验研究表明,地震作用下装配式混凝土剪力墙结构的破坏多集中于节点区域,节点的延性不足、承载力衰减过

快、耗能能力较差等问题,易导致结构发生脆性破坏,严重威胁建筑安全。

1 装配式混凝土剪力墙节点的构造特点与抗震破坏机理

1.1 节点构造特点

装配式混凝土剪力墙节点主要包括墙板拼接节点、剪力墙与梁连接节点、剪力墙与基础连接节点等,其中墙板拼接节点(水平拼接与竖向拼接)是影响结构抗震性能的核心节点类型。根据钢筋连接方式的不同,常见的节点构造形式主要分为

套筒灌浆连接、浆锚搭接连接、机械连接及后浇混凝土整体连接四类。套筒灌浆连接凭借连接可靠性高、适应变形能力强等优势,成为当前装配式混凝土剪力墙节点的主流连接形式,其通过在预制墙板预留套筒,现场插入钢筋后灌注高强灌浆料,实现钢筋的有效传力;浆锚搭接连接则通过预留孔道灌浆,利用灌浆料与钢筋的粘结力传递内力,构造相对简单但对施工精度要求较高;后浇混凝土整体连接通过现场支模浇筑节点区域混凝土,使节点形成整体受力体系,抗震性能优异但现场湿作业较多,降低了装配式结构的施工效率。

1.2 抗震破坏机理

地震作用下,装配式混凝土剪力墙节点需承受水平剪力、弯矩及轴力的共同作用,其破坏机理复杂,主要表现为以下几种形式:一是钢筋连接失效破坏,如套筒灌浆不密实导致钢筋与灌浆料粘结滑移,或浆锚搭接长度不足引发钢筋拔出破坏,进而导致节点承载力骤降;二是节点区混凝土受压破坏,地震反复荷载作用下,节点区混凝土承受交替剪切与挤压作用,易出现斜裂缝、劈裂裂缝,严重时发生混凝土剥落,丧失承载能力;三是节点延性不足破坏,传统节点构造中,钢筋锚固长度不足、箍筋配置不合理等问题,导致节点在屈服后难以通过塑性变形消耗地震能量,发生脆性破坏;四是节点与墙板协同工作失效,预制墙板与节点区连接不牢固,在地震作用下出现相对滑移或转动,破坏结构整体受力体系。

试验研究表明,节点的破坏模式与连接形式密切相关。套筒灌浆连接节点若灌浆密实度不足,易发生粘结滑移破坏;浆锚搭接连接节点在大震作用下,易因搭接长度不足出现钢筋屈服后拔出;后浇混凝土节点则多因箍筋约束不足,发生节点区混凝土剪切破坏。因此,明确不同构造形式节点的破坏机理,是开展抗震性能优化的前提。

2 装配式混凝土剪力墙节点抗震性能的关键影响因素

2.1 节点构造形式

节点构造形式是决定其抗震性能的核心因素,不同连接方式的传力效率、变形能力存在显著差异。套筒灌浆连接的传力可靠性取决于套筒内壁构造、灌浆料性能及灌浆密实度,合理的套筒内壁螺纹设计可增强灌浆料与套筒、钢筋的粘结力,提升节点的抗滑移能力;浆锚搭接连接的抗震性能受搭接长度、孔道直径及灌浆料强度影响较大,搭接长度不足会导致钢筋粘结锚固失效,孔道直径过大则易引发灌浆料收缩开裂;后浇混凝土节点的抗震性能主要依赖于节点区箍筋约束程度与新旧混凝土粘结质量,箍筋加密区范围不足、箍筋间距过大,会降低节点区混凝土的抗剪承载力与延性。此外,节点的拼接形式(如平缝拼接、企口拼接)也会影响其受力性能,企口拼接通过增加接触面积与抗剪齿槽,可显著提升节点的抗剪承载力。

2.2 材料性能

节点区材料性能直接影响节点的抗震承载力与耐久性。灌浆料作为套筒灌浆连接与浆锚搭接连接的核心材料,其抗压强

度、粘结强度及体积稳定性是保障节点传力可靠的关键。高性能灌浆料需具备早期强度发展快、流动性好、收缩率小等特点,若灌浆料强度不足或收缩开裂,会导致钢筋与灌浆料之间的粘结力下降,引发节点传力失效;节点区混凝土的强度等级、延性性能也会影响节点抗震性能,高强度混凝土虽能提升承载力,但延性较差,需通过掺加纤维等方式改善其韧性;钢筋的屈服强度、抗拉强度及塑性性能同样重要,高强钢筋的合理选用可提升节点的承载能力,但需匹配相应的锚固措施,避免发生脆性破坏。

2.3 施工质量控制

装配式混凝土剪力墙节点的施工质量对其抗震性能具有决定性影响,施工过程中的偏差易导致节点存在先天缺陷。对于套筒灌浆连接节点,灌浆密实度是施工控制的核心难点,灌浆不饱满、存在气泡或孔洞,会大幅降低钢筋与灌浆料的粘结性能,在地震作用下易发生滑移破坏;浆锚搭接连接施工中,钢筋插入位置偏差、孔道清理不彻底,会影响灌浆料的填充效果与粘结可靠性;后浇混凝土节点施工中,新旧混凝土结合面处理不当、振捣不密实、养护不及时等问题,会导致新旧混凝土粘结失效,节点区出现裂缝。此外,预制构件的生产精度不足,如预留钢筋位置偏差、套筒定位不准确,会导致现场装配困难,强行拼接易使节点产生初始应力,降低抗震性能。

2.4 配筋设计

节点区的配筋设计直接影响其抗剪承载力与延性。节点区箍筋的主要作用是约束混凝土、抵抗水平剪力,若箍筋配置不足(如间距过大、直径过小),会导致节点区混凝土在地震荷载作用下过早发生剪切破坏,延性不足;箍筋弯钩形式、锚固长度不符合要求,会降低箍筋的约束效果,影响节点的抗震性能。因此,合理的配筋设计是保障节点抗震性能的重要手段。

3 装配式混凝土剪力墙节点抗震性能优化策略

3.1 构造优化设计

首先优化套筒灌浆连接构造。采用内壁带双螺旋槽的高强套筒,增强灌浆料与套筒、钢筋的机械咬合力,提升粘结滑移性能;在套筒两端设置密封胶圈,防止灌浆过程中灌浆料渗漏,保障灌浆密实度;对于竖向拼接节点,采用“上压下”的拼接形式,结合企口构造,增加节点的抗剪齿槽,提升抗剪承载力。其次改进浆锚搭接连接构造。通过试验确定合理的搭接长度,一般不应小于35倍钢筋直径,同时在孔道内壁设置环形凹槽,增强灌浆料与孔道的粘结力;采用分级灌浆工艺,确保灌浆料填充密实。再次优化后浇混凝土节点构造。扩大节点区后浇混凝土范围,加密箍筋配置,箍筋间距不应大于100mm,且需设置复合箍筋,增强对混凝土的约束效果;在新旧混凝土结合面采用凿毛处理,并涂刷界面剂,提升粘结强度。四是增设耗能构件,在节点区设置阻尼器或软钢耗能件,利用其塑性变形消耗地震能量,降低节点区的受力负荷,提升结构整体延性。

3.2 材料性能升级

一是研发应用高性能灌浆料。采用超细掺合料、高效减水

剂及膨胀剂复合改性技术,制备抗压强度 $\geq 80\text{MPa}$ 、初始流动度 $\geq 300\text{mm}$ 、24h竖向膨胀率为 $0.02\%\sim 0.1\%$ 的高性能灌浆料,提升其粘结强度与体积稳定性;添加纤维增强材料,改善灌浆料的韧性,减少收缩开裂。

二是优化节点区混凝土性能。采用高强韧性混凝土,通过掺加聚丙烯纤维或钢纤维,提升混凝土的抗裂性能与延性,避免混凝土发生脆性破坏;对于地震高烈度区,节点区混凝土强度等级应比墙板混凝土提高一个等级,且不应低于C40。三是合理选用钢筋材料。优先采用HRB500级高强钢筋,提升节点的承载能力;对钢筋表面进行微刻痕处理,增强与灌浆料、混凝土的粘结力。

3.3 施工质量管控强化

一是建立全流程施工质量控制体系。预制构件生产阶段,严格控制套筒、预留钢筋的定位精度,偏差不应超过 3mm ;加强构件出厂检验,确保预留孔道、套筒无堵塞。现场施工阶段,装配前对预制墙板进行清理、找平,确保拼接面平整;采用专用灌浆设备,实行“从下至上”的灌浆顺序,在灌浆过程中实时监测灌浆压力与流量,确保灌浆密实;对浆锚搭接连接节点,孔道清理完成后需进行吹气检测,确保无杂物残留。

二是推广智能化施工技术。采用超声波检测、X射线探伤等技术,对套筒灌浆密实度进行无损检测,及时发现并处理灌浆缺陷;利用BIM技术进行施工模拟,优化施工流程,减少装配偏差。

三是加强施工人员培训。定期开展装配式结构施工技术培训,提升施工人员对套筒灌浆、构件装配等关键工序的操作熟练度,确保施工工艺规范落实。

3.4 配筋设计优化

节点区箍筋应采用HRB400级钢筋,直径不应小于 8mm ,加密区范围应覆盖节点核心区及上下各 500mm 范围;箍筋弯钩应采用 135° 弯钩,锚固长度不应小于10倍箍筋直径,确保箍筋约束效果。对于预制墙板预留钢筋,根据不同连接形式确定合理的锚固长度与搭接长度,套筒灌浆连接钢筋锚固长度不应小于10倍钢筋直径,浆锚搭接连接钢筋搭接长度不应小于35倍钢筋直径。此外,在节点区增设抗剪钢筋,提升节点的抗剪承载力,避免发生剪切破坏。

4 优化效果验证

为验证上述优化策略的有效性,选取常见的套筒灌浆连接竖向节点作为研究对象,分别制作优化前与优化后的节点试件,进行低周反复加载试验。优化前试件采用普通套筒与常规灌浆料,箍筋间距 150mm ;优化后试件采用双螺旋槽套筒、高性能灌浆料,箍筋间距 100mm 并设置复合箍筋。试验结果表明:优化后节点试件的屈服承载力提升 23.5% ,极限承载力提升 18.7% ,极限

位移增大 31.2% ,延性系数提升 28.9% ,耗能能力显著增强。在水平位移角达到 $1/50$ 时,优化前试件出现明显的灌浆料与钢筋滑移,节点区混凝土开裂严重;优化后试件仅出现少量细微裂缝,钢筋无明显滑移,节点整体性良好。

同时,采用ABAQUS有限元软件建立节点三维模型,对优化前后节点的抗震性能进行数值模拟,模拟结果与试验数据吻合度较高,进一步验证了优化策略的合理性。数值模拟结果显示,优化后的节点在地震作用下,应力分布更加均匀,节点核心区的最大剪应力降低 25.3% ,有效避免了节点区混凝土的过早剪切破坏。

5 结论与展望

本文通过对装配式混凝土剪力墙节点抗震性能的系统研究,明确了节点构造形式、材料性能、施工质量及配筋设计是影响其抗震性能的关键因素,揭示了节点在地震作用下的主要破坏机理为钢筋连接失效、混凝土剪切破坏及延性不足。基于此,提出了“构造优化-材料升级-施工管控-配筋优化”四位一体的抗震性能优化策略,通过优化套筒灌浆连接构造、应用高性能材料、强化施工质量管控及合理配筋,可显著提升节点的承载力、延性及耗能能力。试验研究与数值模拟结果表明,优化后的节点抗震性能大幅提升,能够满足地震高烈度区的设计要求。

未来,装配式混凝土剪力墙节点抗震性能优化研究可向以下方向深入:一是开展极端地震工况下节点的抗震性能研究,完善优化策略;二是研发智能化监测技术,实现节点受力状态的实时监测与损伤预警;三是推动优化技术的标准化与规范化,编制相应的设计与施工指南,促进优化技术在工程实践中的广泛应用。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50011-2010建筑抗震设计规范(2016年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2]李忠献,王强.装配式混凝土剪力墙结构节点抗震性能研究进展[J].建筑结构学报,2020,41(8):1-18.
- [3]刘琼祥,赵军.套筒灌浆连接装配式剪力墙节点低周反复加载试验研究[J].施工技术,2021,50(12):45-49+62.
- [4]王清湘,张延年.高性能灌浆料对装配式剪力墙节点抗震性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(3):421-428.
- [5]肖建庄,胡翔.装配式混凝土结构节点优化设计与工程应用[J].土木工程学报,2022,55(7):1-12.

作者简介:

赵松伟(1982--),男,汉族,山东省青岛市黄岛区人,工程师,本科,研究方向:房建类建筑工程检测及市政材料检测等。