

# 装配式混凝土结构节点抗震性能研究

刘勇

高安市住宅建筑工程有限责任公司

**摘要:** 装配式混凝土结构作为建筑工业化的重要形式,其节点连接区域的抗震性能直接影响整体结构的安全性及可靠性。本文系统分析装配式混凝土结构节点的受力机理与破坏模式,重点探讨不同连接方式下节点的抗震性能差异。研究从节点构造形式、材料特性、施工工艺等方面剖析影响抗震性能的关键因素,提出优化节点抗震性能的设计策略与构造措施。结合典型节点形式的受力特征分析,阐释其在低周往复荷载作用下的滞回性能、刚度退化与耗能能力。

**关键词:** 装配式混凝土结构; 节点连接; 抗震性能; 滞回特性; 耗能能力

装配式混凝土结构以其工业化程度高、施工速度快、质量易于控制等优势,在建筑领域得到广泛应用。节点作为预制构件连接的关键部位,其抗震性能直接决定了结构在地震作用下的整体响应特征。当前工程实践中,节点连接形式多样,包括套筒灌浆连接、螺栓连接、焊接连接及混合连接等,不同连接方式在受力机理、变形能力与耗能性能方面存在显著差异。

## 1 装配式混凝土结构节点连接形式与受力特征

### 1.1 主要节点连接形式及其构造特点

装配式混凝土结构节点按连接方式可分为湿连接与干连接两大类。湿连接主要包括套筒灌浆连接与浆锚搭接连接,其构造特点在于通过高强灌浆材料将预制构件中的钢筋进行连接,形成整体受力体系。套筒灌浆连接采用专用灌浆套筒,将两端钢筋插入套筒后灌注高强灌浆料,实现钢筋应力的有效传递。干连接则主要包括螺栓连接、焊接连接及预应力连接等,螺栓连接通过高强螺栓将预制构件上的连接钢板固定,焊接连接采用现场焊接方式实现构件间的刚性连接,预应力连接通过张拉预应力筋施加预压力,使节点在受力前即处于受压状态。

### 1.2 节点受力机理与传力路径

节点在结构中承担着传递内力和协调变形的关键作用,其受力机理与传力路径直接反映节点连接的可靠性。在竖向荷载作用下,节点主要承受梁端弯矩与剪力,通过钢筋的锚固与混凝土的承压实现内力传递。在水平地震作用下,节点核心区承受来自梁柱端部的反复弯矩与剪力,形成复杂的应力状态。传力路径的连续性体现在钢筋应力通过连接介质由预制构件传递至相邻构件,灌浆料的黏结强度、套筒的约束作用以及钢筋的锚固长度共同决定了传力的可靠性。节点受力过程中,混凝土与钢筋的协同工作性能直接影响内

力重分布能力,合理的节点构造应确保塑性铰在梁端形成而非节点核心区,从而实现结构整体延性性能的提升。

### 1.3 节点抗震性能的主要评价指标

节点抗震性能的评价需建立系统的指标体系,涵盖承载力、变形能力、刚度退化、耗能能力及延性系数等核心参数。承载力反映节点在低周往复荷载作用下能够承受的最大荷载水平,是节点抗震设计的基础指标。变形能力体现节点在达到极限承载力后维持承载性能而不发生显著强度衰减的能力,良好的变形能力是结构延性性能的保障。刚度退化表征节点在循环加载过程中刚度随加载循环次数增加而衰减的程度,退化速率过快将影响结构整体稳定性。耗能能力以滞回环所包围的面积衡量,反映节点吸收和耗散地震能量的能力,滞回环饱满程度越高,节点耗能性能越优。

## 2 影响节点抗震性能的关键因素分析

### 2.1 节点构造形式对性能的影响

节点构造形式是决定抗震性能的根本因素,不同构造形式在受力机理与破坏模式上呈现显著差异。套筒灌浆连接节点由于钢筋通过灌浆料在套筒内实现对接,其受力性能与现浇节点较为接近,在合理设计条件下能够实现等同现浇的抗震能力。浆锚搭接连接节点依靠灌浆料与钢筋的黏结力传递应力,搭接长度与灌浆质量直接影响连接可靠性。螺栓连接节点属于装配式干连接方式,其受力特征体现为连接钢板的变形与螺栓的滑移,节点的转动刚度较低,在强震作用下表现出较好的变形能力但耗能能力相对有限。焊接连接节点刚性较大,在往复荷载作用下应力集中现象突出,易在焊缝区域发生脆性断裂。

### 2.2 材料性能与施工质量的影响

材料性能与施工质量直接影响节点连接的可靠性

及抗震性能的稳定性。高强灌浆料的抗压强度与流动性是保证钢筋应力有效传递的关键,灌浆料强度不足或灌浆不饱满将导致黏结失效,使节点在受力初期即发生滑移破坏。套筒的材质与加工精度影响其对灌浆料的约束效果,优质套筒能够提供均匀的径向约束力,确保钢筋与灌浆料协同受力。预制构件混凝土强度等级直接影响节点核心区抗剪承载力,混凝土强度过低将导致节点区过早出现斜裂缝。钢筋的锚固长度与弯钩形式决定其在节点区的锚固可靠性,锚固不足将引发钢筋拔出破坏。施工过程中灌浆作业的饱满度、套筒定位的准确性、预制构件安装的精度均对节点质量产生重要影响,施工缺陷往往成为节点抗震性能劣化的直接诱因。

### 2.3 轴压比与剪跨比的影响规律

轴压比与剪跨比是影响节点抗震性能的两个重要设计参数。轴压比反映柱轴向压力与混凝土抗压强度的比值,轴压比过大会使节点核心区混凝土处于较高压应力状态,延性降低,破坏趋于脆性。适当降低轴压比能够提高节点核心区混凝土的约束效果,延缓混凝土压碎破坏的发生,改善节点的变形能力与耗能性能。剪跨比反映节点承受剪力与弯矩的相对关系,剪跨比较小的节点在受力过程中剪力效应突出,易发生剪切型破坏,破坏过程突然且延性差。剪跨比较大的节点以弯曲变形为主,破坏过程较为缓慢,能够发展出较好的塑性变形能力。

## 3 节点抗震性能试验研究与破坏模式

### 3.1 低周往复加载试验方法

低周往复加载试验是研究节点抗震性能的主要试验方法,通过在节点梁端施加循环往复荷载,模拟地震作用下的受力状态。试验装置通常包括反力墙、作动器、加载架及测量系统,作动器施加的荷载按照位移控制或力控制模式进行加载。位移控制模式以预设的位移幅值逐级加载,每级幅值下循环若干次,直至节点承载力下降至极限承载力的特定比例后终止试验。加载制度的设计需考虑地震作用的不确定性,通常采用变幅循环与等幅循环相结合的加载方式,以全面考察节点在不同位移幅值下的受力性能。测量系统布置位移计与应变片,实时采集节点核心区变形、钢筋应变及裂缝开展情况,为后续数据分析提供基础。

### 3.2 节点破坏模式与失效机理

节点在低周往复荷载作用下的破坏模式可分为梁端弯曲破坏、节点核心区剪切破坏及连接界面破坏三种基本类型。梁端弯曲破坏发生于节点区配筋合理、混凝土强度满足要求的条件下,塑性铰在梁端形成,

裂缝以弯曲裂缝为主,节点核心区损伤轻微,破坏过程表现为钢筋屈服后的塑性变形发展,具有较好的延性与耗能能力。节点核心区剪切破坏表现为核心区混凝土出现交叉斜裂缝,裂缝宽度随加载循环次数增加而扩展,最终核心区混凝土压碎剥落,箍筋屈服,破坏过程较为突然,延性较差。连接界面破坏发生于预制构件与后浇混凝土或灌浆料的结合面,表现为界面裂缝张开、滑移,钢筋与灌浆料之间的黏结失效,破坏模式呈脆性特征。不同破坏模式对应的失效机理各异,设计目标应引导节点破坏模式向梁端弯曲破坏转化。

### 3.3 滞回性能与耗能能力分析

滞回曲线是节点抗震性能最直观的特征,其形态特征反映节点在循环荷载作用下的刚度退化、强度衰减与耗能能力。采用套筒灌浆连接的现浇式节点,滞回曲线较为饱满,呈现明显的梭形特征,在加载过程中刚度退化平稳,强度衰减缓慢,累积耗能能力优异。干式连接节点的滞回曲线呈现捏缩现象,捏缩程度反映连接界面滑移与螺栓间隙的影响,捏缩严重时滞回环面积显著减小,耗能能力下降。螺栓连接节点在加载初期存在滑移阶段,滞回曲线呈现弓形特征,进入弹塑性阶段后耗能能力有所改善。焊接连接节点的滞回曲线刚度退化较快,强度衰减明显,延性表现相对不足。混合连接节点通过合理设计,能够在保持较高承载力的同时改善滞回环形状,提高耗能能力。

## 4 节点抗震性能提升的设计策略

### 4.1 节点核心区配筋优化设计

节点核心区配筋设计是提升抗震性能的关键环节,核心区箍筋的配置方式与数量直接影响节点抗剪承载力与延性。合理配置箍筋能够有效约束核心区混凝土,延缓混凝土压碎破坏的发生,提高节点极限变形能力。箍筋间距应根据核心区受力特点进行加密设置,在节点核心区高度范围内配置足够数量的封闭箍筋,形成有效的约束体系。箍筋直径与间距的选择需综合考虑节点受力需求与施工可行性,过密的箍筋配置虽有利于延性提升但可能影响混凝土浇筑质量。节点区纵向钢筋的布置应避免过密,保证混凝土与灌浆料的填充密实性,同时满足钢筋锚固长度要求。

### 4.2 连接界面增强处理措施

连接界面是预制装配式节点受力薄弱部位,界面处理质量直接影响节点整体性与抗震性能。预制构件结合面应进行粗糙化处理,通过拉毛、凿毛或设置抗剪键等方式增加界面粗糙度,提高新旧混凝土之间的黏结强度与抗剪能力。结合面涂刷界面剂能够改善界

面黏结性能,提高灌浆料与预制构件之间的协同工作能力。对于套筒灌浆连接节点,套筒定位精度与灌浆饱满度是界面可靠性的核心保障,灌浆作业应采用专用设备与工艺,确保灌浆料充满套筒并排除气泡。螺栓连接节点的界面处理需确保连接钢板与预制构件之间的密贴性,通过高强螺栓施加足够预紧力,防止界面滑移过早发生。

#### 4.3 延性节点构造创新方向

延性节点构造创新是提升装配式结构抗震性能的重要途径,通过构造创新改善节点的变形能力与耗能性能。可更换耗能节点通过在节点区设置可更换的耗能元件,将地震能量集中消耗于可更换构件,震后可通过更换耗能元件快速恢复结构功能,实现韧性抗震的目标。采用高延性材料替代普通混凝土,在节点核心区使用工程水泥基复合材料等,能够显著提高节点的变形能力与裂缝控制能力,抑制裂缝扩展,改善耗能性能。组合节点将不同连接方式的优势进行整合,如采用螺栓连接提供安装便利性,同时通过后浇混凝土增强节点整体性,在施工效率与抗震性能之间取得平衡。

### 5 节点抗震性能数值模拟与设计建议

#### 5.1 有限元建模方法与材料本构

有限元数值模拟是研究节点抗震性能的重要手段,能够弥补试验研究的局限性,拓展参数分析范围。有限元建模需合理选择单元类型,混凝土采用实体单元模拟,钢筋采用桁架单元或梁单元,连接界面采用接触单元或黏结单元模拟其受力行为。材料本构模型的选择直接影响模拟结果的准确性,混凝土本构应考虑受压硬化、受拉软化及损伤演化行为,选用混凝土损伤塑性模型能够较好反映混凝土在循环荷载作用下的刚度退化与强度衰减特征。钢筋本构采用双线性随动强化模型,考虑包辛格效应的影响。灌浆料与套筒的材料特性需根据实测数据输入,连接界面的黏结滑移本构关系应基于界面剪切试验确定。

#### 5.2 典型节点抗震性能模拟分析

基于验证的有限元模型可开展典型节点抗震性能的参数化分析,考察不同设计参数对抗震性能的影响规律。套筒灌浆连接节点在低周往复荷载作用下,其滞回曲线呈现饱满的梭形特征,模拟结果与试验结果

吻合良好,节点承载力、刚度退化及耗能能力均与现浇节点相当,验证了套筒灌浆连接实现等同现浇性能的可行性。螺栓连接节点的模拟分析表明,螺栓预紧力与连接钢板厚度是影响节点初始刚度与屈服荷载的关键因素,预紧力不足会导致界面滑移提前发生,削弱节点整体性能。焊接连接节点的模拟结果显示,焊缝区域的应力集中现象显著,在较大位移幅值下焊缝易发生开裂,节点延性较差。

#### 5.3 节点抗震设计建议与工程应用

基于理论与试验分析成果,提出装配式混凝土结构节点抗震设计的系统性建议。节点连接形式的选择应综合考虑结构抗震设防类别、施工条件及经济性要求,高烈度区宜优先选用套筒灌浆连接或混合连接,确保节点具备良好的延性与耗能能力。节点核心区配筋应满足抗剪承载力与延性双重需求,箍筋配置应符合现行规范要求并在核心区进行加密处理。连接界面处理应作为施工质量控制的关键环节,建立严格的界面粗糙度检查与灌浆饱满度检测制度。节点设计应遵循强节点弱构件的设计原则,确保塑性铰在梁端形成而非节点核心区,通过合理设置梁端削弱区或采用高延性材料等方式引导塑性铰位置。

### 6 结束语

装配式混凝土结构节点的抗震性能是影响装配式结构整体抗震能力的关键因素。本文从节点连接形式、受力机理、影响因素、破坏模式及性能提升策略等方面系统分析了节点抗震性能的核心问题。未来研究应进一步关注新型连接方式与高性能材料的应用,推动装配式混凝土结构在更高抗震设防要求下的工程实践。

#### 参考文献:

- [1] 苏群. 装配式混凝土结构套筒灌浆连接节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021,42(6):112-121.
- [2] 陈素文. 装配式混凝土结构节点连接技术研究进展 [J]. 土木工程学报, 2022,55(3):1-14.
- [3] 钱稼茹. 预制混凝土结构节点抗震性能与设计方法 [J]. 工程力学, 2020,37(8):1-12.
- [4] 聂鑫. 装配式混凝土结构连接节点抗震性能研究综述 [J]. 建筑结构, 2023,53(2):1-9.
- [5] 周春芳. 预制装配式混凝土结构抗震性能研究现状与展望 [J]. 土木工程学报, 2021,54(10):1-15.