

装配式建筑结构连接节点性能研究

苏式清

广东桦建道建筑设计有限公司 广东 广州 524000

【摘要】：装配式建筑结构受力连续性高度依赖连接节点，节点刚度差异、连接精度不足及施工偏差容易削弱构件间荷载传递能力，并影响整体抗震性能。针对节点承载、变形协调及连接质量控制中的关键问题，从构造形式、传力路径、连接参数及施工控制入手优化节点设计，强化灌浆、套筒及拼缝部位质量管理。合理配置节点刚度和连接强度后，可改善局部应力集中，提高结构变形协调性，使装配式结构在复杂荷载条件下保持稳定可靠的整体受力状态。

【关键词】：装配式建筑；结构连接节点；节点性能；传力机制；连接质量

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.034

引言

装配式建筑由预制构件在施工现场完成拼装，梁、柱、墙板及楼板之间不再依靠连续浇筑形成完整受力体系，连接节点因而成为荷载传递和结构协同变形的关键部位。实际工程中，套筒灌浆密实度不足、连接钢筋定位偏差、节点刚度配置不合理及拼缝处理不到位，均可能改变局部受力路径，使应力集中、滑移和变形累积更加明显。单纯满足连接强度要求，已难以全面反映节点工作状态，还需把承载能力、延性、刚度退化及施工质量纳入统一分析，由节点性能控制延伸至结构整体受力稳定。

1 装配式结构连接节点的受力控制特征

1.1 梁柱节点荷载传递路径及应力分布

梁柱节点承担竖向荷载、水平作用及弯矩的集中传递，受力状态取决于预制梁端、柱端连接区及后浇核心区之间的协同程度。梁端弯矩通过纵向钢筋、连接套筒和节点混凝土向柱身传递，剪力则主要依靠界面咬合、箍筋约束及核心区混凝土共同承担。装配误差、连接刚度突变或锚固长度不足，会使节点边缘形成应力集中，改变原有传力路径。性能控制应关注钢筋应变、节点转角、核心区剪切变形及裂缝开展位置，使塑性变形尽量集中于可控区域，避免连接界面先于构件主体发生脆性破坏。

1.2 墙板拼缝节点刚度变化规律

墙板拼缝节点决定预制墙体能否形成连续受力单元，其刚度并非固定不变，而是会随荷载增大、界面开裂和连接件滑移逐步衰减。竖向拼缝主要承担墙板间剪力传递和变形协调，水平拼缝同时受轴力、弯矩及局部压应力影响^[1]。灌浆饱满度不足、连接钢筋偏位或接缝材料性能离散，会放大节点初始滑移，使墙板整体侧向刚度下降。评价节点性能时应同步考察开裂荷载、峰值承载力、割线刚度及循环加载后的刚度退化速率，并控制拼缝两侧变形差，防止局部薄弱区改变结构侧向受力分配。

1.3 楼板连接部位变形协调机制

楼板连接部位既要保证竖向荷载连续传递，也需协调相邻预制板之间的转角、挠度和面内变形。叠合层、板缝钢筋及后浇带共同构成受力连续体系，连接质量不足时容易出现板缝开裂、局部滑移和挠度差增大，使楼面整体刚度受到削弱。节点设计不能只校核单一承载力，还应结合板端负弯矩、接缝剪切传递和长期变形进行控制。通过提高界面粗糙度、合理配置横向连接钢筋、优化后浇层厚度及锚固构造，可改善新旧混凝土之间的协同工作状态，使相邻板块的变形响应更加接近。

2 连接节点性能衰减的关键影响因素

2.1 连接钢筋定位偏差引起局部受力变化

连接钢筋偏离设计位置后，节点内部受力关系会由均匀传递转向局部集中，钢筋实际保护层厚度、锚固长度及连接区有效受力面积也随之改变。偏位较小时可能表现为界面应力重新分配，偏差继续增大则会使受拉钢筋提前进入高应力状态，局部混凝土压应力同步升高，并增加裂缝沿连接边缘发展的可能。预制构件吊装误差、预留孔尺寸控制不足、钢筋固定不牢均会扩大这一影响。数字化定位、构件进场复核和安装全过程测量可提前识别偏差，降低节点承载性能离散程度。

2.2 套筒灌浆缺陷削弱连接承载能力

套筒灌浆连接依赖灌浆料、钢筋和套筒之间形成稳定黏结体系，灌浆不密实、内部空腔、浆体离析或灌浆高度不足都会破坏应力连续传递^[2]。受拉状态下，缺陷区无法充分约束钢筋滑移，黏结应力会向完整灌浆区域集中，使局部界面更早达到极限状态；循环荷载作用下，反复滑移还会加快刚度退化和残余变形积累。施工环节应控制浆料流动度、搅拌时间、注浆压力及封堵质量，并结合饱满度检测和全过程记录，提高隐蔽连接质量的可追溯性。

2.3 节点刚度配置失衡诱发应力集中

节点刚度过大或过小都会改变预制构件之间原有的协同受力关系。刚度偏高时，节点附近容易吸引更多内力，使梁端、墙端或连接核心区出现较大的弯矩和剪力峰值；刚度不足则会

产生过量转角和相对滑移,增加相邻构件之间的变形差。不同节点刚度差异过大,还可能改变结构整体内力分配,使局部区域承担超出设计预期的荷载。节点设计宜结合构件截面、连接形式、材料性能及抗震等级进行刚度匹配,并利用全过程性能分析校核弹塑性阶段的内力转移规律。

3 结构节点性能评价的关键控制指标

3.1 承载力判定对应节点安全储备

承载力判定不能停留于节点达到极限荷载时的单一数值,还应结合设计荷载水平、屈服荷载、峰值荷载及破坏形态识别安全储备。装配式节点受力过程中,钢筋屈服、灌浆连接滑移、核心区混凝土压碎及界面开裂往往具有先后关系,若峰值承载力较高但连接部位提前出现脆性破坏,节点实际安全水平仍然不足。评价时应将节点极限承载力与设计需求进行对比,同时关注荷载增长阶段的应力重分布、裂缝扩展速度及连接件受力均匀程度。对于承担地震作用或较大水平荷载的节点,还需考察正反向受力差异和重复加载后的承载保持能力,以避免一次性强度指标掩盖连接性能衰减问题。基于全过程监测数据建立承载性能分级,可使节点安全储备判断更加接近真实工作状态。

3.2 延性指标反映节点耗能水平

延性评价关注节点进入屈服阶段后继续维持变形和承载的能力,其核心不只是变形量大小,还涉及塑性发展是否稳定、耗能区域是否合理以及破坏是否具有突发性。装配式连接节点若延性不足,荷载达到较高水平后可能迅速出现钢筋拔出、套筒连接失效或混凝土局部压溃,结构缺少必要的变形缓冲空间。评价过程中可结合屈服位移、极限位移、位移延性系数及滞回曲线面积,分析节点由弹性阶段向塑性阶段转化后的性能变化^[3]。滞回曲线是否饱满、捏缩是否明显、塑性转角能否持续发展,都能够反映节点耗能能力。对于抗震要求较高的结构,还应控制塑性区位置,避免耗能集中于连接薄弱部位,使节点具备较稳定的循环变形能力。

3.3 刚度退化揭示循环荷载损伤过程

刚度退化能够较敏感地反映节点内部裂缝发展、界面滑移和材料损伤积累,是判断循环荷载作用下性能演化的重要指标。加载初期,节点整体刚度主要由混凝土完整性、钢筋约束和连接界面共同维持;裂缝逐步形成后,受拉区混凝土退出部分工作,连接钢筋承担的内力增加,节点割线刚度开始下降。反复受力会进一步扩大拼缝开口、套筒连接滑移及核心区剪切变形,使刚度衰减呈现非线性特征。评价时可采用各级循环荷载对应的割线刚度、等效刚度及刚度下降率进行连续分析,并结合残余位移和裂缝宽度识别损伤程度。通过建立荷载级别、循环次数和刚度退化之间的关联,可更加准确判断节点从轻微损伤向明显性能劣化转变的临界阶段。

4 装配式结构连接节点的性能优化方法

4.1 优化节点构造改善内部传力路径

节点构造优化应从受力连续性出发,将预制构件端部、连接钢筋、灌浆区、后浇区及核心受力区视为完整的传力单元,避免连接部位出现刚度突变和应力传递中断。梁柱节点可通过调整纵筋锚固位置、箍筋加密范围及节点核心区尺寸,使弯矩、剪力和轴力分别沿清晰路径传递,减少钢筋集中布置造成的局部拥挤和混凝土浇筑缺陷。墙板节点应控制竖向连接钢筋间距、拼缝宽度及边缘构件约束程度,使墙肢受力能够跨越接缝连续传递,并限制拼缝处剪切滑移。楼板节点则需协调叠合层厚度、板端钢筋搭接及接缝界面处理,避免板缝成为楼面刚度薄弱带。构造设计还应考虑节点塑性发展顺序,将可能出现较大变形的区域布置于具有充分延性和约束能力的位置,使钢筋屈服先于脆性连接破坏。结合标准化设计、模块化构件和工业化生产理念,可减少节点形式过度复杂造成的施工误差,使结构安全、装配效率和质量一致性在同一构造体系中得到兼顾。

4.2 调整连接参数增强变形协调能力

连接参数优化需要兼顾强度、刚度和延性,单纯提高钢筋直径、连接件数量或灌浆强度,可能造成节点刚度过大,反而使内力向局部集中。参数确定宜依据构件截面、轴压水平、抗震等级和连接形式,对钢筋锚固长度、套筒长度、拼缝宽度、灌浆层厚度及后浇区尺寸进行协同控制,使连接区既具备足够承载能力,又保留必要变形空间。对于循环受力明显的节点,应重视屈服位移、塑性转角和连接滑移之间的匹配关系,避免钢筋尚未形成稳定塑性变形时连接界面已经发生显著开裂^[4]。材料参数同样需要纳入协调范围,灌浆料弹性模量过高可能加剧界面应力集中,过低则会增加连接变形,因此应根据主体混凝土强度和套筒约束条件进行合理匹配。数字化设计条件下,可通过参数化建模分析不同连接尺寸和材料组合对节点响应的影响,把承载力、刚度退化和延性指标同时纳入优化目标,使参数选择由经验控制转向性能控制,提高节点在正常使用和极端荷载状态下的协调变形能力。

4.3 强化施工精度控制降低节点性能离散

施工精度直接决定设计连接性能能否真实转化为结构实际性能,控制重点应贯穿预制生产、运输吊装、临时固定、钢筋对位、灌浆施工和节点验收全过程。构件生产阶段需严格控制预埋钢筋、套筒和预留孔的位置偏差,建立基于尺寸复核和坐标校验的出厂检查机制,防止微小偏差在现场拼装时叠加。吊装定位过程中,应同步控制构件轴线、标高、垂直度及接缝尺寸,临时支撑调整完成后再实施永久连接,避免构件自重和安装偏差共同作用于节点。灌浆作业应控制材料配合比、流动度、搅拌时间、注浆顺序和封堵状态,对出浆情况、灌浆量及作业时间形成完整记录,降低空洞和欠灌概率。隐蔽节点可引

入无损检测、数字影像记录及施工信息追溯,提高质量问题识别能力。工业化建造背景下,构件二维码、BIM模型和现场测量数据可形成节点质量档案,将设计参数、生产偏差、安装数据和检测结果关联起来,使性能离散由事后发现转向过程控制,并为后续结构运维提供可追踪的数据基础。

5 节点优化后的结构性能验证及控制

5.1 节点承载提升检验连接可靠程度

节点优化效果需要通过承载水平、破坏形态及受力稳定性共同检验,不能仅以峰值荷载增大作为判断依据。优化后的连接区应在设计荷载范围内保持较小裂缝宽度和稳定应变增长,进入高荷载阶段后,钢筋屈服、界面滑移和混凝土损伤应具有清晰的发展顺序。试验或数值分析可重点比较屈服荷载、极限承载力、荷载保持率及残余承载能力,判断构造调整是否真正改善节点安全储备。若套筒、拼缝或后浇区未出现提前失效,说明连接体系能够持续完成荷载传递。对于承受反复作用的节点,还需检验正反向加载中的承载差异,避免单向强度提高掩盖循环受力下的连接弱化,使承载提升建立在稳定传力基础之上。

5.2 变形协调改善检验整体受力状态

变形协调验证应关注节点转角、构件位移、接缝开口及残余变形之间的匹配程度,以判断局部优化是否转化为结构整体受力改善。连接参数调整合理后,相邻预制构件的位移差应得到控制,梁柱节点不应出现异常转角集中,墙板拼缝的滑移增长应趋于平缓,楼板连接区域也需保持连续挠曲状态^[9]。循环

荷载条件下,可结合位移延性、残余位移、刚度变化及裂缝分布判断节点是否形成稳定塑性发展过程。若变形主要集中于预定耗能区域,而连接核心区仍保持完整,说明结构内力传递和变形释放较为协调。借助数字化监测记录关键节点位移响应,可进一步识别不同荷载阶段的异常变化,为结构整体性能判定提供连续数据。

5.3 质量闭环控制保障节点性能稳定

节点性能稳定不能依赖单次验收,需要把设计参数、构件生产、现场安装、连接施工、质量检测及运行反馈纳入连续控制链。设计阶段形成节点关键性能指标后,生产环节应对应钢筋位置、套筒尺寸和预埋精度建立检验数据;现场拼装则记录轴线偏差、标高、接缝尺寸及灌浆状态,使质量信息能够追溯至具体节点。验收发现的偏差应形成复核、处置和再检测记录,避免缺陷处理停留在单次整改。BIM模型、构件编码和检测数据可用于建立节点数字档案,将施工实测值与设计控制值自动比对,对超限信息及时预警。运行阶段再结合裂缝、位移和连接状态检查结果回传质量数据库,使节点性能控制由施工阶段延伸至全寿命周期。

6 结语

装配式建筑结构连接节点性能直接关系到构件协同受力及结构安全。合理优化节点构造、连接参数和施工精度,可改善传力连续性,降低应力集中及性能离散。结合承载力、延性、刚度退化开展综合评价,并建立设计、施工、检测相衔接的质量闭环,可持续提高节点连接可靠性和整体结构稳定水平。

参考文献:

- [1] 甘双乾,吴傅国,李壮,等.装配式建筑主体结构节点连接技术[C]//广西网络安全和信息化联合会.第二届工程技术管理智能化转型学术交流会议论文集(上册).2026:335-336.
- [2] 孙璟康.装配式建筑节点连接性能提升及抗震设计方法创新研究[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.第三届数字技术赋能工程建设领域数字化转型学术交流会议论文集.2026:511-512.
- [3] 余浩瀚.装配式建筑结构连接节点的设计改进研究[J].城市开发,2025,(24):61-63.
- [4] 叶德概.装配式建筑中梁柱节点连接性能及施工质量控制[J].中国住宅设施,2025,(10):212-214.
- [5] 袁用帅.装配式建筑钢结构连接节点施工技术实践与性能优化[J].建筑工人,2025,46(10):7-9.