

套筒全螺栓连接节点转动特性与控制方法研究

牛 乐 胡晓丽 陈田宁 石宝春 马嘉文

中国建筑一局（集团）有限公司 北京 100161

【摘 要】：在国家大力推进建筑工业化、绿色化背景下，装配式混凝土结构因其节能环保、施工便捷、质量可控等优势迎来了快速发展。节点区往往存在材料不连续、连接形式多样、内力传递复杂等特征，其受力可靠性直接关系到结构的延性、耗能能力与整体抗震性能。震害调查表明：大量装配式结构破坏均源于节点构造不合理、转动能力不足、塑性区无法有效外移等问题。本文通过节点滞回试验揭示其受力机理、失效模式、转动能力与耗能特征；随后基于有限元参数分析构建节点性能影响规律，并提出包括螺栓预紧调控、套筒约束增强、塑性区外移设计及多源耗能优化在内的节点控制方法；进一步将节点性能外推至混合框架体系，对其抗震需求与构造要求进行研究。同时结合叠合板施工工艺，形成成套化装配式施工技术体系，旨在为新型装配式连接技术的工程应用提供理论、试验与施工一体化支撑。

【关键词】：套筒；全螺栓；连接节点；转动特性；控制方法；措施探究

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.057

在我国建筑工业化高质量发展的时代背景下，装配式混凝土结构正逐步从政策推动进入技术深化阶段。其能否大规模推广，关键在于建立稳定、可靠且可工业化复制的连接技术体系。传统装配式节点多依赖后浇湿接、灌浆套筒或附加钢筋搭接等方式，这类节点在力学上存在应力集中、施工上存在受环境影响大、质量上存在一致性不足的问题，使结构整体抗震性能及施工效率难以满足当前工业化与韧性化建造的需求^[1]。当下行业对于叠合板施工技术、混合框架抗震表现以及施工成套化体系提出了更高标准，需要一条能把节点性能、结构性能和施工体系连接起来的技术路线。正是因为有这样的需求，本文围绕“套筒全螺栓连接节点”展开，从节点机理、试验验证、设计优化直至施工体系集成进行系统研究，为装配式结构的全面产业化提供稳固的技术支持。

1 套筒全螺栓连接节点的力学机理

套筒全螺栓连接节点的力学机理实际上是基于“钢—混凝土组合传力、螺栓轴向受力主导、节点区约束提高以及塑性区外移”这四类机制共同发挥作用而建立的，其受力过程呈现出多尺度耦合的特性^[2]。节点端部运用厚壁钢管套筒构建高约束区，钢管会对核心混凝土施加三向侧压，让混凝土在受压状况下维持较高的延性以及抗剪承载能力，以此有效抑制节点核心区早期出现开裂以及剥离破坏的情况。钢管套筒与外部盖板一同构成受力边界，使得节点内部的应力流沿着“盖板—螺栓—套筒—核心混凝土”的路径实现连续传递，达成力学层面上的整体性。预埋螺栓在水平方向荷载作用时承担主要的拉力以及部分弯矩，螺栓轴向拉伸、滑移以及弯曲变形共同对节点的转动刚度与滞回性能起到主导作用，并且螺栓预紧力直接影响节点的初始刚度以及力流初始分配。因为节点区约束强度较高，

其刚度远远大于梁端混凝土区，构件受弯时的应变分布在梁端迅速聚集，促使塑性铰从节点核心向外移动，达成“强节点—弱构件”的目标^[3]。套筒外约束抑制核心混凝土剪切变形，使得节点转动主要由螺栓拉伸与滑移来贡献，保证节点在地震反复作用下依旧可保持稳定的滞回耗能能力。该节点的力学机制继承了钢结构干式连接快速、可控的特点，又借助套筒约束与混凝土受压优势形成高强度节点区，使其可在地震构造需求下同时有高承载力、足够的延性以及可控的转动能力，为装配式混凝土结构的抗震性能提升提供了关键的传力基础。套筒全螺栓连接节点构造形式如图1所示。

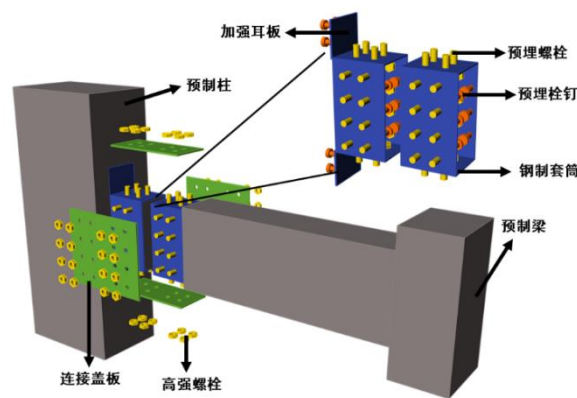


图1 套筒全螺栓连接节点构造形式

2 套筒全螺栓连接节点转动特性分析

套筒全螺栓连接节点的转动特性主要是由螺栓滑移、螺栓轴向拉伸、钢管套筒对核心混凝土的约束效应以及梁端应变集中等多种因素共同耦合形成的。该节点的转动刚度、延性指数以及滞回耗能能力都呈现出复合受力体系的特征，套筒全螺栓连接节点转动特性的具体情况如表1所示。

表1 套筒全螺栓连接节点转动特性

指标类别	指标名称	测试值/特征	工程意义
初始刚度指标	初始转动刚度 K_0 ($\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$)	9.8×10^3	控制弹性阶段变形，决定节点初期刚度水平
变形能力指标	屈服转角 θ_y (rad)	0.0065	反映节点进入塑性阶段的门槛
延性指标	极限转角 θ_u (rad)	0.032	表征节点在大变形下的持续稳定性
耗能性能指标	滞回能量 E ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	15.4	体现地震反复加载下的能量耗散能力
滞回曲线特征	曲线形状	“梭形+轻微钉头”	说明螺栓滑移与混凝土约束协同作用明显

套筒全螺栓连接节点的转动特性呈现出十分突出的“刚度分阶段递减”规律，也就是说在弹性阶段主要依靠螺栓预紧力和套筒约束共同给予较高的初始转动刚度， K_0 值比传统湿接节点高不少。随着水平位移逐渐增大，螺栓进入拉伸—滑移复合阶段，节点开始出现可控制的非线性转动，其屈服转角 θ_y 明显小于传统后浇节点^[4]。螺栓滑移机制让节点更早释放部分转动能力，避免核心区脆性破坏。进入大变形阶段后，钢管套筒营造强约束环境，抑制核心混凝土损伤发展，使梁端塑性较外移。节点的极限转角 θ_u 能维持在较高水平，其延性系数 $\mu=\theta_u/\theta_y$ 大于4，有十分突出的延性优势。这一延性特征使节点在强震作用下能够形成稳定的滞回环，保持较强的耗能能力与变形协调性，从而确保整体框架在地震输入持续累积时依旧具备可靠的抗震韧性与安全储备。

3 套筒全螺栓连接节点的控制方法

3.1 基于滞回性能与转动能力表征的节点力学性能控制方法

套筒全螺栓连接节点的核心控制目标在于确保其在水平荷载作用下呈现可预期的转动能力与滞回耗能表现，使节点在地震响应中既不成为结构薄弱点，又能实现塑性区外移的抗震设计意图。为达成该性能控制目标，需要构建以滞回试验数据为基础的节点力学性能控制体系^[5]。首先，通过节点水平低周

反复加载试验获取荷载—位移滞回曲线、骨架曲线、耗能面积及残余变形等数据，对节点的强度、刚度退化、延性和自复位能力进行精确评估，并根据失效模式判断节点区是否满足“强节点弱构件”的抗震设计原则。如果试验中出现节点板屈曲、螺栓孔边缘撕裂等破坏征象，则需通过优化钢板厚度、加强板布置、螺栓孔边缘加固等方式调整节点构造。为了形成可工程化应用的控制标准，试验数据需进一步输入有限元模型开展参数化分析，获得钢板厚度、节点套筒长度、螺栓数量与排布方式、节点核心区宽度等关键参数对节点转动刚度与滞回性能的敏感性规律，从而构建节点性能与几何构造之间的映射关系。最终形成一个可用于工程设计与施工验收的性能目标体系：包括节点初始转动刚度限值、等效塑性转角需求值、屈服前后刚度比、节点核心区应变限值等指标。通过上述方法，使节点力学性能的控制从经验判断走向基于滞回响应的量化控制，为后续施工控制、工厂加工和现场验收提供统一的技术依据。

3.2 基于参数优化与受力路径调控的节点构造与连接力学控制方法

套筒全螺栓连接节点需通过结构构造调整与受力路径优化，实现承载力、延性与转动能力之间的平衡，确保地震作用下塑性发展能够稳定外移至梁端，而非集中在节点核心区。控制方法首先需要构建覆盖多种结构尺度的参数优化体系，通过有限元模型对节点核心区的受力状态进行模拟，包括梁端应力分布、螺栓群受力比例、套筒区域混凝土压区扩展模式等，从而识别其对整体节点性能的控制因素^[6]。在此基础上，通过调整螺栓阵列数量与布局、钢板厚度、套筒外伸尺度及节点约束边界条件，使节点在不同受力阶段呈现出稳定的刚度过渡，避免产生脆性破坏。为了确保节点构造能够在实际工程中完全复现受力模型，构件生产及施工阶段必须实施严格的尺寸精度控制，包括套筒轴线偏差控制、钢板平整度检测、孔位偏差的数控加工、节点构件端面贴合度控制等，确保受力路径在装配结构中是连续、统一且不扭曲的。同时需对螺栓预紧力实施分级施拧制度，通过扭矩—角度复合控制或超声轴力检测，使单一螺栓和螺栓群形成一致的轴力水平，保证节点受力分配符合试验与仿真条件。对于受力敏感的拼缝区域，还需引入钢筋机械连接、局部加固钢板以及后浇混凝土密实度控制，使节点区受力路径可控、连续且稳定。

3.3 基于施工过程状态监测与节点一体化装配的工程化控制方法

节点性能是否最终可达设计水平，在很大程度上取决于施工过程的状态控制与质量监测，因此需要建立一套面向现场装配条件的工程化控制方法。首先，在施工前需根据试验与模型分析结果制定节点施工参数表，包括螺栓目标预紧力、安装顺

序、节点贴合度限值、叠合板拼缝允许偏差、后浇层混凝土强度达到节点锁定条件的龄期要求等,使施工环节具备明确的操作标准^[7]。

在节点装配阶段,需依托激光全站仪与三维定位技术对节点轴线、标高、构件端面间隙等关键几何量进行实时复核;同时引入“装配限位—微调千斤顶—扭矩施拧”三步骤体系,使节点在装配过程中保持线形稳定,不因钢构件自重或局部受力而产生过大变形。节点螺栓施拧需采用分区、分级、对称施拧制度,并辅以抽检式超声轴力检测,以确保螺栓群内轴力分布均匀,避免局部螺栓失效导致节点转动刚度异常。

节点与叠合板楼盖系统的协同控制同样关键。叠合板拼缝底部钢筋连接方式(焊接、搭接、机械连接、螺栓连接)需根据空间受限条件分类选用,以确保后浇带形成完整受力整体;上部面筋与梁筋的布置需通过刚性支架体系精确限位,避免浇

筑混凝土时发生位移,使节点—楼板—梁三者形成整体。施工过程中设置节点状态监测点,实时记录节点转角、梁端相对位移、临时荷载作用下的节点刚度响应,通过“施工期结构健康监测”方式避免节点在未形成稳定受力体系前发生突发性变形。通过上述工程化控制体系,使节点性能在装配式建造条件下仍可稳定复现试验与设计水平。

4 结语

套筒全螺栓连接节点不仅在受力模式上突破了传统湿接节点对后浇混凝土与灌浆料的依赖,也在可控转动、延性塑化、快速装配及多源耗能等方面展现出更契合现代装配式结构需求的性能优势。从节点尺度的试验揭示,到参数化模型的力学机制辨析,再到构造优化、螺栓预紧调控、套筒约束设计及塑性区外移策略的系统提出,研究逐渐构建起一套具有结构可解释性与工程可落地性的节点性能提升路径。

参考文献:

- [1] 王振山,朱金鹏,田鹏刚,et al.套筒式全螺栓装配式节点滞回性能及转动模型研究[J].振动工程学报,38(7):1565.
- [2] 马强强,王燕,杨松森,等.全装配式组合螺栓连接节点抗震性能研究[J].钢结构,2017,32(3):5.
- [3] 蔡宏昊.钢管混凝土束剪力墙与H型钢梁全螺栓连接节点抗震性能研究[D].:华南理工大学,2023.
- [4] 刘学春,王丹,张爱林,等.L形钢管混凝土柱-H型钢梁全螺栓装配节点抗震性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(1):42-58.
- [5] 林樱,王元清,叶全喜,等.穿心板式钢管混凝土柱-钢梁栓焊连接节点力学性能分析[J].工程力学,2023,40(S1):136-146.
- [6] 李玉熙,周婷,陈志华,等.下栓上焊梁柱连接节点纯弯试验研究与有限元分析[J].建筑钢结构进展,2021,23(4):43-52.
- [7] 王萌,柯小刚,吴照章.可更换延性耗能连接组件的钢框架节点抗震性能研究[J].工程力学,2018,35(12):151-163.