

装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能提升策略

文 / 陈 云 机械工业第六设计研究院有限公司

摘要：随着建筑工业化进程加速，装配式混凝土建筑广泛应用，但连接节点力学性能问题突出，制约行业发展，亟需探索有效提升策略，本论文围绕装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能展开研究，阐述连接节点力学性能对建筑整体安全性与稳定性的重要意义，系统探讨提升连接节点力学性能的多种策略，旨在为装配式混凝土建筑的设计、施工与质量提升提供理论依据与实践指导，推动装配式建筑行业高质量发展。

关键词：装配式混凝土建筑；连接节点；力学性能；提升策略

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.023

引言

伴随着建筑工业化进程的不断加快，装配式混凝土建筑以高效、环保和质量可控的特点被广泛地应用于建筑领域。现阶段，连接节点具有如受力复杂、施工困难和质量控制困难等特点，致使一些连接节点的力学性能难以达到设计和使用的要求。所以，对装配式混凝土建筑中连接节点的力学性能改善策略进行深入的研究具有一定的实际意义。文章将针对装配式混凝土建筑中连接节点的力学性能的改善策略进行综合的论述。

一、装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能特点

装配式混凝土建筑结构连接节点是预制构件之间传递力的中心位置，在力学性能上表现出明显的复杂性和独特性，这和现浇混凝土结构有着本质区别，由传力机制可知，连接节点需要实现轴力、弯矩和剪力多向荷载高效传递，传力路径呈现非连续性。以一个典型梁柱节点为例，预制梁和柱之间采用钢筋连接来实现受力，这一过程包含了钢筋锚固、灌浆料粘结和界面摩擦几个步骤，与现浇结构连续浇筑相比较，其应力分布要复杂得多。尤其对于地震这种动态荷载，节点需要有较好的耗能能力才能使塑性较经过合理的设计而得到可控制的发展，从而避免由于节点提前失效而使结构整体发生破坏，从变形特征来看，装配式混凝土连接节点变形主要由弹性变形和非弹性变形两部分组成。在弹性阶段，节点的变形主要受到构件刚度、连接方式和材料性能等因素的影响；进入非弹性阶段，节点的变形发展与其破坏模式关系密切。如钢筋通过套筒灌浆联接，受拉时钢筋和灌浆料粘结滑移将使节点发生附加变形，这一变形特性显著影响结构的整体动力响应。不同连接形式节点的变形协调性有所区别，湿式连接节点采用后浇混凝土进行构件连接时变形协调性比较好；但干式连接节点多靠机械连接件的传力作用，其变形主要集中在连接部分，这就给节点的构造设计带来了更高的要求^[1]。

二、装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能提升的策略

（一）节点构造的优化设计

节点构造优化设计对增强装配式混凝土连接节点的力学性能至关重要，通过合理构造设计可以改善节点受

力状态，加强传力路径的连续性，提高节点延性和耗能能力，设计时需要考虑节点的结构形式、荷载工况和施工工艺，并采取创新的构造措施以达到节点性能的优化，首要任务是改进钢筋的连接方法，传统的套筒灌浆连接技术施工质量不可控，检测困难，机械连接、浆锚搭接等新的连接方式逐步被采用^[2]。机械连接是以螺纹和挤压的形式来达到连接钢筋的目的，其优点是施工方便，质量可靠；通过预留的孔洞和灌浆料，浆锚搭接连接实现了钢筋的搭接，从而降低了现场焊接的工作量。另外，还可以利用混合连接技术把不同的连接方式结合起来利用，充分发挥它们的优点。以梁柱节点为例，梁上的钢筋通过机械联接，梁下的钢筋通过浆锚搭接联接，这样既保证了联接的可靠性又方便了施工操作，之后，强化节点区域的配筋设计，合理的配筋方式能有效地改善节点的受力性能和提高其抗剪、抗弯等性能。节点核心区可以增加箍筋或者螺旋筋以加强混凝土约束和混凝土抗压强度；构件拼接面上，可以设置抗剪键和齿槽构造措施以提高界面的抗剪能力。同时对钢筋的布置形式进行了优化，避免因钢筋过密而造成混凝土浇筑不够致密。如钢筋桁架、U型筋以及其他新的配筋形式的应用可以提高施工效率同时确保节点承载力。

（二）高性能材料的使用

采用高性能材料是增强装配式混凝土连接节点力学性能重要手段。通过选择高强度、高韧性和耐久性良好的材料可以加强节点承载能力，提高节点变形性能和延长节点使用寿命，就连接节点而言，主要是对混凝土、灌浆料、钢筋以及连接件的性能进行改善，传统预制构件中使用的普通混凝土具有强度和耐久性上的局限性，而高性能混凝土则是通过配合比优化设计并掺加矿物掺合料、高效减水剂等，具有强度高、耐久性强、工作性好的特点^[3]。在与节点相连的位置，采用高性能混凝土可以改善节点的抗压强度、抗裂性能以及抗渗性能。如梁柱节点核心区使用高强度自密实混凝土不仅可以确保节点承载力而且方便施工和浇筑，同时避免了振捣不够密实而造成的质量问题，之后开发和专用灌浆料，灌浆料是钢筋连接中的关键材料，灌浆料性能的好坏直接关系到连接节点的可靠性。高性能灌浆料要有早

强、高强、微膨胀和高流动性，以保证灌浆丰满和钢筋与灌浆料黏结性好。目前市面上已经有很多专用灌浆料系列产品，这些灌浆料通过掺加特殊外加剂以及超细矿物掺合料使其综合性能得到显著改善。如使用环氧树脂灌浆料可以改善连接节点抗疲劳性能、耐腐蚀性等；纳米改性灌浆料可改善灌浆料微观结构、提高力学性能及耐久性，并且采用高强度钢筋和新型连接件等，推广使用HRB500级等高强度钢筋可以提高节点的承载能力，同时降低钢筋的使用量。新型连接件例如高强度螺栓和预应力筋由于其连接可靠和施工方便等特点被广泛用于装配式混凝土结构。以钢结构和混凝土结构连接节点为例，通过高强度螺栓进行连接可以达到快速安装和确保连接节点受力性能的目的。

(三) 施工工艺细化

施工工艺对装配式混凝土连接节点力学性能有直接影响，精细化施工可以保证设计意图得以实现和节点施工质量得到提升，施工时需要从预制构件的制造、运输、安装以及节点连接方面着手，严把施工质量关，降低施工误差对节点性能造成的影响，预制构件的制造环节要确保构件

的尺寸精度以及预留孔洞、预埋件的位置精度。通过使用高精度的模具和先进的生产设备，例如数控切割机和自动焊接机器人等，我们能够提高构件的制作精度。在加强混凝土浇筑及养护管理的同时保证构件混凝土的强度及外观质量。比如在预制梁的制作中严格控制梁端留设钢筋的长度及位置，以确保与柱节点的连接能使钢筋精确对接；通过蒸汽养护或者自然养护等措施，保证混凝土强度满足设计要求，在运输和吊装时，需要采取有效的措施来预防预制构件的破坏。对运输车辆及支撑装置进行了合理的设计，避免了运输时构件的碰撞、变形；吊装作业中选用适当的吊具及吊装方法来控制吊装速度及加速度以减小构件的受力变形。如大尺寸预制墙板使用特殊的吊装夹具及平衡梁等，以保证墙板起吊时的均匀受力，防止开裂，节点连接施工对确保连接节点的力学性能具有至关重要作用。以套筒灌浆联接为例，需要严格控制灌浆料配合比、搅拌时间及灌浆压力等，才能保证灌浆充实、密实。灌浆前应将套筒及钢筋清洗干净，以除去油污、铁锈及其他杂质；灌浆时，使用专用灌浆设备由下端口注浆，上端口出浆，确保套筒内空气完全排出。

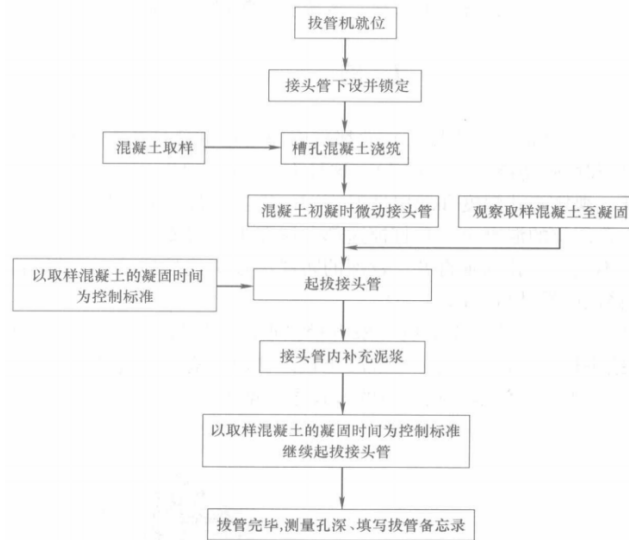


图 1: 施工工艺细化

(四) 质量智能监测

智能质量监测成为装配式混凝土连接节点在整个质量管理过程中的关键工具，通过先进传感技术、信息技术及数据分析技术的运用，实时监控节点在施工质量及服役期间力学性能，发现质量问题及安全隐患，并为节点性能评估及维护决策提供数据支撑，施工阶段节点的关键参数可以通过传感器技术实时监控。如在钢筋的连接点设置应变传感器来监控钢筋的受力；灌浆套筒内部埋设有用于监测灌浆时灌浆料压力变化的压力传感器。利用无线传输技术把监测数据实时上传到监控平台上，施工管理人员可以随时用手机或者电脑查看监测到的数据，及时发现异常。当发现钢筋应变大于设计限值或者灌浆压力不够时，可以马上采取调整措施，以免造成质

量事故，在服役阶段采用智能监测系统对连接节点的力学性能进行了长时间的监测，通过设置加速度传感器、位移传感器等来对环境荷载及使用荷载下结构动力响应及变形进行监测，利用光纤传感技术对混凝土内部应力及裂缝开展进行监测，以达到实时感知节点破坏状态的目的。比如在监测节点区域混凝土开裂的情况下，系统就会自动发出警报，通过对数据的分析来预测裂缝的发展态势，从而为结构的维修奠定基础，质量智能监测需要将大数据分析 with 人工智能技术相结合，实现监测数据的深度挖掘与分析。构建了节点力学性能评价模型，并对海量监测数据进行学习与分析以达到精确评价节点性能目的。比如用机器学习算法来识别节点的损伤特征和预测节点的剩余寿命；通过大数据分析，找到了影响

节点性能的主要因素，对节点设计及施工优化具有借鉴意义。

（五）力学性能的预评估

力学性能预评估就是在装配式混凝土联接节点的设计阶段及施工之前，采用理论分析、数值模拟与试验研究相结合的方法对节点的力学性能做出预测与评估，从而为节点的设计优化及施工方案的拟定奠定基础，通过预评估可以在节点设计与施工过程中预先发现问题并采取改进措施，从而避免了后期质量问题及安全隐患，设计阶段通过有限元分析方法模拟分析连接节点的力学性能。建立了考虑材料非线性、几何非线性及接触非线性的节点三维有限元模型并分析了不同荷载工况作用下节点受力性能。通过有限元分析可以获得节点的应力分布、变形特征及破坏模式，对节点的构造设计及配筋设计具有一定的借鉴意义。比如对梁柱节点进行有限元分析，发现在节点的核心区混凝土中存在着严重的应力集中现象，可以根据这种情况来调整箍筋的布置方式或者优化节点的构造形式以提高其受力性能，试验研究对检验节点力学性能具有重要意义，采用进行足尺或缩尺模型试验的方法来模拟节点的真实受力状态并检验其承载能力、变形性能及破坏模式。试验结果可用来验证有限元分析结果的正确性，并为节点的设计提供可靠依据。如开展了新型装配式预应力混凝土节点的低周反复加载试验来研究节点的抗震性能，并利用测试数据对节点的设计参数进行了优化。

（六）后期的养护和加固

后期养护和加固对确保装配式混凝土连接节点的长期力学性能具有重要意义，连接节点随使用时间延长而遭受环境侵蚀和荷载变化，造成性能退化。通过定期维护并采取必要的加固措施可以及时地发现并处理节点出现的各种问题，提高其使用寿命，确保结构的安全，其中要建立健全节点维护制度，制定定期检查计划以检查连接节点的外观、无损检测以及性能评估。外观检查重点观察节点有无裂缝、变形和渗漏；无损检测是利用超声和雷达技术手段对灌浆料的饱满度和钢筋的锈蚀进行检测；性能评估采用结构动力测试和荷载试验的手段对节点的承载能力及整体性能进行评价。依据检查结果有针对性地制定维护方案，之后根据不同病害类型采用相应加固措施，对较轻的裂缝可以用表面封闭的方法来处理，例如涂环氧树脂胶等；对比较严重裂缝可用压力灌浆法修复。在节点承载能力不够的情况下，可以采取增大截面法、粘贴钢板法或者碳纤维加固法等措施。如增大截面法应用于梁、柱节点的核心区，并通过增加混凝土、钢筋等材料来提高节点的抗剪、抗弯等性能，另外还加强节点维护及加固技术研究及运用，随着新材料和新技术的发展，出现了很多新的维修加固方法。比如用智能材料自修复节点，用形状记忆合金和自愈混凝土的性能自动修复节点损伤；采用预应力加固技术对节点的受力状态进行了预应力的施加，增强了节点的承载能力。

三、装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能提升效果

综合应用以上提升策略后，装配式混凝土建筑结构连接节点力学性能显著提高，承载能力、变形性能和耐久性均获得较好的效果，从承载能力上看，节点构造优化设计及高性能材料的使用显著提高了连接节点抗压、抗剪及抗弯等性能。新的钢筋连接方式及合理配筋设计加强了节点传力可靠度，高性能混凝土及灌浆料改善了节点材料强度并使其能承受较大荷载。举例来说，使用装配式预应力混凝土作为节点的建筑方式，其承载能力相对于传统的节点有15%-20%的提升。

从变形性能来看，优化连接节点延性及耗能能力较好。合理的节点构造设计使得塑性铰在期望位置开展，从而避免节点发生脆性破坏；采用高性能材料提高节点变形协调性和降低由于连接部位变形造成结构整体性能降低。在地震的影响之下，使用自复位节点的构造方式可以使其残留变形相较于传统节点降低30%-50%，从耐久性角度来看，采用高性能材料运用、施工工艺精细化以及后期维护加固等措施，使连接节点抗环境侵蚀能力得到显著提高。采用高性能混凝土及灌浆料，改善节点抗渗性及抗冻性等性能，精细化施工确保节点的施工质量并降低由于施工缺陷带来的耐久性难题；定期的维护与及时的加固措施可以有效应对节点的病害并延长其使用寿命。研究表明：经合理养护加固后连接节点使用寿命可提高20-30年，采用质量智能监测与力学性能预评估相结合的方法，对连接节点进行质量与性能全程控制，通过实时监测与准确评估可以及时发现节点出现的问题并有针对性地采取措施加以应对，从而避免重大质量事故发生，增强结构安全可靠。

结语

提高装配式混凝土建筑结构连接节点的力学性能是确保装配式建筑质量安全的关键环节。通过对连接节点力学性能的现状及存在问题进行分析，提出了包括优化设计和改进工艺在内的各种改进策略，最后以实际案例对该策略进行了验证。今后，要继续深化装配式混凝土建筑结构连接节点的力学性能研究，并不断优化和升级策略，促进装配式建筑技术创新和产业的可持续发展，为建筑行业向绿色化、工业化转变提供了强有力的支持。

参考文献

- [1] 朱晓钟. BIM下装配式钢结构建筑连接节点极限承载力评估[J]. 中国建筑金属结构, 2025, (09): 4-6.
- [2] 杨伯韬. 装配式建筑加固钢结构端板连接节点承载性能分析[J]. 建筑技术, 2025, (09): 1148-1152.
- [3] 王存杰. 高层建筑钢结构节点连接技术创新应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(18): 172-174.

作者简介：陈云，男，1981年5月15日，汉族，重庆，高级工程师（结构专业），结构专业负责人，本科，建筑结构。