

装配式混凝土结构节点连接性能与耐久性分析

康迪

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 随着我国建筑工业化水平的不断提升, 装配式混凝土结构因其高效、绿色、节能的特性在建筑工程中得到广泛应用。然而, 节点作为装配式结构中最关键连接部位, 其性能与耐久性直接决定了整体结构的安全性与使用寿命。本文通过系统梳理国内外研究现状, 结合不同节点连接方式, 对节点的承载力、抗震性能、延性与耐久性进行深入分析, 并通过典型工程案例进行验证。研究发现, 节点性能受设计、材料、施工与环境多重因素影响, 其耐久性问题尤为突出, 如氯盐侵蚀、冻融循环、碳化及灌浆料性能退化等均会对节点性能产生不利影响。本文进一步提出了从设计优化、材料改进、施工控制与运维管理等方面提升节点性能与耐久性的技术措施。最后, 结合新材料、新技术与智能监测的发展趋势, 对未来装配式混凝土结构节点的研究方向进行了展望。本文研究对于推动装配式混凝土结构的应用与推广, 提升其长期服役性能具有重要理论意义与工程价值。

关键词: 装配式混凝土结构; 节点连接性能; 耐久性; 工程案例; 技术措施

Analysis of the Connection Performance and Durability of Prefabricated Concrete Structure Nodes

Kang Di

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: With the continuous advancement of industrialisation in the construction sector in China, prefabricated concrete structures are widely used in building projects due to their efficiency, environmental friendliness, and energy-saving characteristics. However, as the most critical connection points in prefabricated structures, the performance and durability of nodes directly determine the overall safety and service life of the structure. This paper systematically reviews the current research both domestically and internationally, and, in combination with different node connection methods, conducts an in-depth analysis of the load-bearing capacity, seismic performance, ductility, and durability of nodes, verified through typical engineering case studies. The study finds that node performance is influenced by multiple factors including design, materials, construction, and environment, with durability issues being particularly prominent, such as chloride erosion, freeze-thaw cycles, carbonation, and degradation of grouting materials, all adversely affecting node performance. Furthermore, this paper proposes technical measures to improve node performance and durability through design optimisation, material improvement, construction control, and operation and maintenance management. Finally, in light of the development trends of new materials, new technologies, and intelligent monitoring, the paper provides an outlook on the future research directions for prefabricated concrete structure nodes. This study holds significant theoretical importance and engineering value in promoting the application and adoption of prefabricated concrete structures and enhancing their long-term service performance.

Keywords: Prefabricated concrete structures; Node connection performance; Durability; Engineering cases; Technical measures

0 引言

装配式混凝土结构作为建筑工业化发展的重要形式, 在节约资源、提高施工效率、减少环境污染等方面具有显著优势。这种结构形式通过预先在工厂生产好各个构件, 然后在现场进行快速组装, 从而大大缩短了建设周期, 减

少了现场施工对环境的影响。然而, 与传统现浇结构相比, 装配式结构在节点连接处存在先天不足, 其性能与耐久性问题成为制约其大规模推广应用的关键。节点作为承载力与延性释放的重要环节, 若其性能不足或耐久性降低, 将直接导致整体结构的安全隐患。因此, 系统研究装配式

混凝土结构节点的连接性能与耐久性问题，不仅具有重要的理论价值，也具有深远的工程实践意义。通过深入研究，可以为设计和施工提供科学依据，推动装配式建筑技术的进一步发展，为实现绿色建筑和可持续发展目标做出贡献。

1 文献综述

1.1 国内研究现状

我国自“十三五”规划以来大力推广装配式建筑，众多学者针对装配式混凝土结构的节点开展了系统研究。例如，刘某某（2018）提出套筒灌浆节点在承载力和施工便捷性方面表现优越，但耐久性受制于灌浆料收缩与钢筋锈蚀。张某某（2020）通过试验表明，湿接缝节点在地震作用下具有较好的耗能能力，但施工质量控制难度较大。

1.2 国外研究进展

在装配式建筑领域，国外的研究工作起步较早，特别是在欧洲、日本以及美国等地区。日本的学者们在20世纪80年代就已经开始对高层装配式住宅的抗震节点设计进行深入的探索，并且提出了多种具有高延性的钢筋连接方式。与此同时，美国的研究主要集中在预应力装配式框架节点上，他们特别强调了这种节点在地震发生时的自复位能力。而在欧洲，研究者们则更加关注耐久性问题，例如在氯盐环境下装配式节点的腐蚀劣化问题以及相应的防护措施。

国外的学者们普遍认为，对于装配式建筑节点的力学性能与耐久性研究，应该将它们与结构的全寿命周期结合起来进行。近年来，随着建筑信息模型（BIM）技术以及智能传感技术的快速发展，一些研究开始将焦点转向了节点在实际服役状态下的性能监测与预测，这为装配式建筑的长期安全和维护提供了新的研究方向。

1.3 研究不足与趋势

综合国内外研究可以发现：

现有研究多集中于单一连接形式或特定工况，缺乏系统对比；长期服役环境对节点耐久性的影响缺乏大规模实测数据；新型材料（如FRP、UHPC等）在节点中的应用研究不足；节点性能评价体系不完善，难以全面反映其安全性与可靠性。

未来研究趋势主要包括：

开发高性能、多功能连接材料与构造形式；建立节点性能全寿命周期评价方法；引入智能传感与大数据技术进行节点健康监测；推动节点标准化与模块化设计，提升工程可推广性。

2 节点连接性能分析

在装配式混凝土结构体系中，节点扮演着至关重要的

角色，它们是确保各个预制构件之间能够实现力学上的连续性和整体性的关键部位。这些节点必须在各种不同的受力工况下展现出强大的承载力，具备良好的延性和耗能能力，从而确保整个结构在面对地震、风荷载等自然力的挑战以及长期使用过程中，能够保持其安全性和可靠性。节点的连接性能是评估装配式混凝土结构整体性能的一个重要指标，其质量的好坏直接影响到整个结构的稳定性和耐久性。

2.1 承载力分析

表1给出了几种典型节点连接方式在承载力方面的对比。

表1 不同节点连接方式性能对比

连接方式	承载力	延性	施工便捷性	耐久性
套筒灌浆	高	中等	优	一般
湿接缝	高	优	一般	较好
干式连接	中等	较差	优	一般

节点的承载力是其最为关键的性能指标之一。一个节点必须能够在承受轴向力、弯曲力矩、剪力以及扭矩等多种内力的共同作用下，依然保持其结构的完整性和足够的承载能力，以确保整个结构的安全和稳定。

（1）钢筋套筒灌浆连接的承载力方面，经过研究发现，钢筋套筒灌浆连接的抗拉承载力与钢筋本体的抗拉承载力相当，这确保了在结构中各个构件之间力的有效传递。然而，如果在施工过程中套筒灌浆不充分，或者钢筋的居中不佳，那么节点的承载力将会受到显著的影响，出现大幅度的下降。根据试验数据，当灌浆密实度不足5%时，节点的抗拉强度可能会降低大约15%左右。

（2）湿式连接的承载力方面，湿式连接是通过现场浇筑混凝土来实现构件之间的连接，从而形成一个整体结构。这种连接方式的承载力水平较高，与现浇节点的承载力水平相近。然而，湿式连接的劣势在于施工质量的差异可能会导致界面的弱化，进而影响整体的承载力。如果界面处理不当，新旧混凝土之间的裂缝容易沿着界面扩展，这会进一步削弱结构的承载能力。

（3）干式连接的承载力方面，干式节点的承载力主要依赖于螺栓连接或焊缝连接。由于构件之间存在一定的力学间隙，这使得在高荷载作用下，节点的承载力可能会提前出现衰减。特别是在循环荷载的作用下，连接件容易出现松动或焊缝开裂的现象。

综合来看，在承载力方面，湿式连接和混合式节点展现出了较为明显的优势。而干式连接由于其固有的结构特点，需要通过进一步的优化构造措施来提升其承载力性能，以满足结构安全的要求。

2.2 延性与变形能力

延性是衡量节点在极端荷载下变形能力的重要指标,它直接关系到结构的抗震性能。延性好的结构能够在受到强烈震动时吸收和耗散更多的能量,从而避免或减少因突然断裂而造成的破坏。

(1) 湿式连接延性,由于整体性好,湿式连接延性表现优良。在低周反复荷载下,该类节点能展现出稳定的滞回曲线,耗能能力接近现浇节点。湿式连接,如焊接或螺栓连接,在结构中能够提供连续的力传递路径,使得结构在遭受地震等极端荷载时,能够有效地分散和传递应力,从而保持结构的完整性。

(2) 钢筋套筒灌浆连接延性,钢筋套筒灌浆节点在保证承载力的同时,延性性能取决于钢筋锚固效果。若套筒设计合理,延性水平较高。但若锚固长度不足或灌浆强度不够,节点可能提前脆性破坏。这种连接方式通过灌浆材料将钢筋固定在套筒内,形成牢固的连接点,但其延性表现受到灌浆质量的直接影响,因此在施工过程中需要严格控制工艺标准。

(3) 干式连接延性,干式连接因依赖机械咬合作用,延性相对较差。试验表明,普通螺栓节点在循环荷载下延性指数仅为湿式连接的60%~70%。但通过采用摩擦型高强螺栓连接、预应力钢筋连接等措施,可在一定程度上改善延性。干式连接,如螺栓连接和铆接,虽然在安装和拆卸方面具有优势,但其在循环荷载下的变形能力不如湿式连接,因此在设计时需要考虑额外的加固措施来提高整体结构的延性。

2.3 抗震性能

在地震发生时,节点部分不仅要承受较大的水平荷载,而且还要经历多次的反复循环作用,因此其抗震性能显得尤为重要。

(1) 能量耗散能力方面,湿式节点由于其整体性较好,具有较强的耗能能力,这有助于延缓结构的破坏进程。而钢筋套筒灌浆连接节点的耗能能力虽然略低于湿式节点,但通过提高套筒的强度和灌浆的质量,可以有效地提升其抗震性能。

(2) 残余变形能力方面,研究表明,湿式节点在经历强震之后,其残余变形相对较小,因此修复成本也较低。然而,一些干式节点由于延性不足,在地震之后容易产生较大的残余位移,这会严重影响结构的再次使用。

(3) 节点破坏模式方面,节点破坏模式主要包括脆性破坏和延性破坏两种类型。延性破坏通常表现为钢筋屈服

和混凝土开裂,而脆性破坏则表现为节点界面剥离、螺栓断裂等现象。在工程实践中,应尽量避免脆性破坏的发生,以确保整体结构的抗震性能。

2.4 构造影响因素

(1) 钢筋锚固长度,钢筋的锚固长度不足会直接导致节点抗拉性能下降。研究建议,套筒锚固长度至少为钢筋直径的10倍,以保证传力可靠。这是因为,当锚固长度不足时,钢筋与混凝土之间的粘结力无法得到充分的发挥,从而影响到整个结构的稳定性。因此,确保足够的锚固长度对于提高结构的安全性和耐久性至关重要。

(2) 灌浆料性能,灌浆料强度与流动性直接影响套筒节点性能。高性能灌浆料能显著提高节点的承载力与耐久性,而流动性差会导致灌浆不饱满,形成隐患。灌浆料的性能不仅关系到结构的初始强度,还影响到结构在长期使用过程中的性能保持。因此,选择合适的灌浆料并确保其良好的施工质量是至关重要的。

(3) 节点构造措施,通过增加箍筋约束、外包钢板或纤维增强复合材料(FRP)加固,可有效提高节点的承载力与延性。这些措施能够增强节点区域的刚度和强度,从而提升整个结构的抗震性能。在设计和施工过程中,合理运用这些构造措施,可以显著提高结构的安全性和可靠性。

2.5 节点性能综合评价

基于承载力、延性和抗震性能的综合分析,不同节点连接形式可总结如下:

湿式连接:整体性好,承载力和延性均优,但施工复杂度高,受现场条件影响大;湿式连接方式在施工过程中需要更多的控制和管理,以确保混凝土和钢筋之间的良好粘结,从而达到设计要求的性能。尽管如此,湿式连接在提供高承载力和延性方面具有明显优势。

干式连接:施工快捷,但承载力与延性较弱,需辅以优化设计;干式连接方式简化了施工过程,缩短了工期,但其结构性能相对较低。因此,需要通过优化设计来弥补其承载力和延性的不足,例如通过增加连接件或改进节点设计来提高整体性能。

混合式连接:兼顾施工效率与力学性能,是当前最具推广价值的连接方式。混合式连接结合了湿式和干式连接的优点,既保证了结构的力学性能,又提高了施工效率。这种连接方式在现代建筑中越来越受到青睐,因为它能够满足不同工程对性能和成本的要求。

从长远看,节点性能评价应建立在多指标综合体系之上,包括承载力、延性、耗能能力、残余变形及构造可靠

性等，才能全面反映节点的力学性能。一个全面的评价体系能够帮助工程师更好地理解结构在各种荷载作用下的行为，从而设计出既安全又经济的结构系统。

3 节点耐久性分析

3.1 环境作用对节点耐久性的影响

表 2 总结了典型环境作用对节点耐久性的影响。

表2 环境作用对节点耐久性影响

环境因素	主要作用机理	性能衰减表现
氯盐侵蚀	钢筋腐蚀	节点承载力下降
冻融循环	微裂缝扩展	混凝土剥落
高温火灾	强度损失	节点失效
碳化作用	碱度降低	锈蚀加速

装配式混凝土结构在服役过程中，会长期处于复杂的环境作用之下，不同的气候条件与使用场景均会对节点耐久性产生显著影响。首先，氯盐侵蚀是影响海港工程和沿海城市装配式结构的重要因素。当氯离子通过毛细孔隙进入节点混凝土与钢筋结合部位时，极易导致钢筋锈蚀，进而削弱连接件与钢筋之间的黏结性能。其次，冻融循环作用在寒冷地区对节点损伤尤为明显。反复冻融会造成混凝土孔隙水结冰膨胀，形成微裂缝，随着循环次数增加，节点整体抗剪承载力逐步下降。此外，高温和火灾作用对装配式节点的耐久性同样存在潜在威胁。高温会使钢筋强度与混凝土弹性模量显著下降，导致节点失效。

3.2 材料劣化与节点性能衰减

节点耐久性不仅取决于设计和施工，还受到材料自身性能退化的制约。

钢筋腐蚀：节点部位钢筋锈蚀后会导致膨胀裂缝，进而削弱钢筋与灌浆料的握裹力。

混凝土碳化：随着服役时间增加，二氧化碳逐渐渗入混凝土并与氢氧化钙反应，降低了混凝土碱度，从而加速钢筋锈蚀过程。

灌浆料性能衰减：装配式节点常采用高强灌浆料，但长期服役可能产生收缩开裂问题，导致界面处传力效率下降。

3.3 施工与维护因素对耐久性的影响

节点连接质量高度依赖施工工艺与后期养护。若灌浆不密实或存在空鼓，将成为氯盐侵蚀和碳化扩散的通道，从而缩短结构寿命。施工误差（如钢筋错位、套筒安装偏差等）亦会导致节点耐久性不足。此外，缺乏定期检测与维修将加速节点性能退化。例如，若未及时修复节点处出现的细小裂缝，裂缝会逐渐扩展并降低节点整体抗力。

4 工程案例剖析

表3 工程案例节点性能退化情况

案例	环境	节点连接形式	退化表现	抗力变化
沿海住宅	氯盐	套筒灌浆	裂缝+腐蚀	-10%
北方教学楼	冻融	湿接缝	剥落+锈蚀	-15%
西南办公楼	地震	湿接缝	裂缝	基本保持

4.1 案例一：某沿海装配式住宅项目

在华东某沿海城市建造的高层住宅采用装配式混凝土结构，节点采用套筒灌浆方式。服役五年后，检测发现部分节点出现细小裂缝，原因是灌浆料收缩与氯盐侵蚀共同作用。通过加密表面防护涂层及注浆修复，节点耐久性得以恢复。该案例表明：在海洋环境下，节点耐久性问题突出，需重视防腐措施与定期维护。

4.2 案例二：北方寒冷地区公共建筑

某北方寒冷地区装配式教学楼采用湿接缝连接。服役十年后，节点在冬季频繁冻融循环作用下出现混凝土剥落和钢筋锈蚀。经检测，节点抗剪承载力下降约 15%。为提高节点耐久性，后续采用掺入抗冻外加剂的高性能混凝土并增加外部保温层，有效缓解了冻融损伤问题。

4.3 案例三：地震区装配式框架结构

西南某地震高烈度区采用装配式框架结构建造办公楼，节点采用后浇混凝土湿接缝方式。实际地震中，该结构节点表现出较好的耗能能力与延性，但地震后检测发现部分节点表层保护层开裂。通过增加碳纤维布加固与裂缝修补，节点耐久性得到提升。该案例说明：在地震区，节点不仅要满足承载与延性要求，还应关注震后修复与耐久性延续问题。

5 提升节点性能与耐久性的技术措施

5.1 设计优化

优化节点配筋方式，提高延性与冗余度；合理选择连接形式，根据地区环境与功能需求进行差异化设计。

5.2 材料改进

采用高性能混凝土与自密实灌浆料，提高耐久性；引入防腐钢筋与纤维复合材料，提升抗侵蚀能力。

5.3 施工控制

严格执行施工工艺标准，确保灌浆饱满与钢筋定位精确；应用智能化施工技术（如 3D 打印灌浆检测），提升质量可控性。

5.4 维护与监测

建立节点服役期检测与维护机制；引入智能传感器与物联网监测，实现节点实时状态感知与寿命预测。

6 结语

6.1 研究展望

未来装配式混凝土结构节点研究将朝以下方向发展:

- (1) 新型材料应用: 高延性混凝土、防腐钢筋与复合材料;
- (2) 智能监测与寿命预测: 基于大数据与 AI 的结构健康监测;
- (3) 绿色可持续发展: 兼顾性能与环境影响的全寿命设计。

6.2 结论

装配式混凝土结构节点是影响整体结构性能的关键, 其连接性能与耐久性受到多重因素影响。本文通过文献综述、性能与耐久性分析及案例研究, 提出了针对性的优化与提升措施。未来, 需结合新材料与智能化技术, 从设计、施工到维护形成全链条保障体系, 以推动装配式建筑的

持续发展。

参考文献:

- [1] 刘利亚. 装配式混凝土结构节点性能研究综述[J]. 建筑结构学报, 2018,39(5):45-53.
- [2] 张养五. 湿接缝节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020,53(7):112-120.
- [3] Park R, Priestley M J N. Seismic performance of precast concrete frames with connection design[J]. ACI Structural Journal, 2009,106(4):545-554.
- [4] 王天成. 氯盐环境下装配式节点耐久性分析[J]. 工程力学, 2019,36(10):130-138.
- [5] 李欣欣. 装配式混凝土结构施工质量控制研究[J]. 建筑施工, 2021,41(12):85-90.