

# 装配式混凝土结构连接节点力学性能试验与数值模拟分析

束 伟

中冶南方城市建设工程技术有限公司 湖北 武汉 430000

**摘 要：**本文围绕装配式混凝土结构连接节点展开。介绍了连接节点类型及力学性能指标；阐述了连接节点力学性能的试验设计、测试内容与方法及数据处理与分析；说明了数值模拟的建模技术、计算方法与结果验证；探讨了试验与数值模拟的对比、结合方式及其对节点设计的指导意义，为节点设计及技术发展提供支撑。

**关键词：**装配式混凝土结构；连接节点；力学性能；试验研究；数值模拟

引言：装配式混凝土结构作为建筑工业化发展的重要方向，其连接节点的力学性能是保障结构安全与耐久性的关键。当前，连接节点类型多样，性能各异，深入研究其力学性能对优化设计和工程应用至关重要。本文通过试验研究与数值模拟相结合的方法，系统探讨装配式混凝土结构连接节点的受力性能、破坏机理及设计优化策略，旨在为连接节点的科学设计与工程应用提供理论依据和技术支撑，推动装配式混凝土结构技术的进一步发展。

## 1 装配式混凝土结构连接节点概述

装配式混凝土结构作为现代建筑工业化发展的重要成果，其连接节点是确保整体结构性能的关键部位。连接节点的质量与性能直接决定了装配式混凝土结构在各种荷载作用下的安全性、稳定性和耐久性。按照连接方式的不同，装配式混凝土结构连接节点主要可分为套筒灌浆连接、浆锚搭接连接、螺栓连接以及焊接连接等类型，每种连接方式都具有独特的特点和适用范围。（1）套筒灌浆连接是装配式混凝土结构中应用较为广泛的一种连接方式。它通过在预制构件中预先埋设灌浆套筒，在现场安装时，将钢筋插入套筒内，然后灌注高强灌浆料，待灌浆料硬化后实现钢筋与套筒、构件之间的可靠连接。这种连接方式具有传力可靠、连接强度高的显著优点。其原理是利用高强灌浆料与钢筋和套筒之间的粘结力，将荷载有效地传递到相邻构件。在实际工程中，套筒灌浆连接常用于竖向构件（如柱、剪力墙）的连接，能够满足结构在竖向荷载和水平荷载作用下的受力要求。（2）浆锚搭接连接则是利用预留孔洞和高强砂浆来实现钢筋的搭接传力。在预制构件中预留一定直径和深度的孔洞，安装时将钢筋插入孔洞，再灌注高强砂浆。与套筒灌浆连接相比，浆锚搭接连接的构造相对简单，施工工艺也较为便捷。不过，其传力机制相对复杂，承载能力和变形性能可能略逊于套筒灌浆连接，适

用于一些对连接强度要求不是特别高的部位。（3）螺栓连接和焊接连接具有安装便捷、施工速度快的优势。螺栓连接通过螺栓将预制构件连接在一起，具有可拆卸、便于调整的特点，适用于一些需要后期维护或改造的结构部位。焊接连接则是通过高温使金属熔化，将构件连接成一个整体，连接强度高，但焊接质量对焊工的技术水平和施工环境要求较高。（4）不同类型的连接节点在受力性能、适用场景和施工工艺等方面存在明显差异。连接节点的力学性能主要包括承载能力、变形性能、延性和耗能能力等。承载能力决定了节点能够承受的最大荷载；变形性能反映了节点在荷载作用下的变形情况；延性是指节点在破坏前具有较大的塑性变形能力，能够吸收较多的能量；耗能能力则体现了节点在地震等动力荷载作用下消耗能量的能力。这些性能指标直接关系到装配式混凝土结构在荷载作用下的工作状态和安全性能，因此在设计和施工过程中，必须根据具体的工程要求和结构特点，选择合适的连接节点类型，并进行严格的质量控制和性能检测<sup>[1]</sup>。

## 2 连接节点力学性能试验研究

### 2.1 试验设计

试验设计是深入研究装配式混凝土结构连接节点性能的关键环节，需全面且细致地综合考量节点类型、受力工况以及研究目的等多方面因素。（1）在确定试验模型时，为降低试验成本，通常采用缩尺模型。但为确保模型能准确反映实际结构的力学性能，需依据相似理论，精确确定几何相似比、材料相似比、荷载相似比等关键参数。例如，几何相似比要保证模型与实际结构在形状和尺寸比例上合理对应，材料相似比需使模型材料与实际材料在力学特性上具有可比性。（2）加载方案的设计要紧密结合实际工程中节点可能承受的荷载类型及组合，如轴向力、弯矩、剪力等。可采用单调加载和低周反复加载等方式。单调加载能直接获取节点的极限承

载能力, 而低周反复加载可模拟地震作用, 研究节点的滞回性能。此外, 合理布置位移测点和应变测点至关重要, 通过这些测点能精准测量节点在加载过程中的位移变化和应力应变分布, 为后续分析提供可靠数据。

## 2.2 试验测试内容与方法

试验测试内容对于全面、精准地了解装配式混凝土结构连接节点的性能起着决定性作用, 主要涵盖节点的荷载-位移曲线、应变分布以及破坏形态等方面。(1) 荷载-位移曲线作为反映节点力学性能的核心数据, 在试验中, 借助先进的加载设备, 实时且精确地记录所施加的荷载大小以及节点产生的位移数值, 进而绘制出该曲线。通过此曲线, 能清晰、直观地剖析节点在弹性阶段、弹塑性阶段直至破坏阶段的力学行为特征, 为评估节点性能提供直观依据。(2) 应变测量选用应变片或应变传感器, 将其精准粘贴在节点关键部位, 像钢筋、混凝土表面等。在加载过程中, 持续监测应变的变化情况, 以此深入了解节点的应力分布规律和传力机制。(3) 破坏形态观察则贯穿于试验始终, 在试验进行期间及结束后, 详细记录节点裂缝的开展过程、破坏的具体位置和形式, 深入分析节点的破坏机理, 为后续节点设计提供坚实依据。

## 2.3 试验数据处理与分析

试验结束后, 对采集到的海量数据进行系统处理与分析是揭示装配式混凝土结构连接节点性能的关键步骤。(1) 针对荷载-位移曲线展开细致整理。通过专业方法精准计算节点的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载等重要荷载指标, 同时算出延性系数等反映节点变形能力的参数。这些关键性能指标能直观体现节点在不同阶段的力学表现。(2) 对比不同工况下的试验数据。深入分析节点在各种受力条件(如不同荷载大小、加载方式等)下的力学性能差异, 明确各因素对节点性能的影响程度。(3) 借助数据处理软件对大量应变数据进行统计分析。绘制应变分布云图, 以直观的方式展示节点内部的应力分布规律, 有助于理解节点在受力过程中的应力传递路径。(4) 紧密结合破坏形态, 深入探讨节点力学性能与破坏模式之间的内在联系。通过综合分析, 为节点性能的准确评价和设计优化提供坚实可靠的数据支持, 推动装配式混凝土结构连接节点技术的不断发展。

## 3 连接节点数值模拟分析

### 3.1 建模技术

在数值模拟分析领域, ANSYS、ABAQUS、MSC.Marc等建模软件凭借其强大的功能和广泛的适用性而备受青睐。进行建模时, 精准模拟节点的几何形状、材料

属性以及边界条件是确保模拟结果可靠性的关键。(1) 针对混凝土材料, 鉴于其复杂的力学特性, 可采用实体单元或壳单元进行细致模拟。同时, 充分考虑混凝土的非线性本构关系, 像塑性损伤模型能有效反映混凝土在受力时内部损伤的累积过程, 弥散裂缝模型则可精准模拟混凝土的开裂、压碎等力学行为, 从而更真实地展现混凝土在荷载作用下的性能变化。(2) 对于钢筋, 通常采用杆单元或梁单元进行模拟。通过合理定义钢筋与混凝土之间的相互作用关系, 如粘结滑移模型, 能够准确模拟钢筋与混凝土协同工作的过程。此外, 边界条件的设置至关重要, 需紧密结合实际工程中节点的约束情况, 精确施加位移约束和荷载边界条件, 保证模型与实际受力状态高度相符<sup>[2]</sup>。

### 3.2 计算方法

数值模拟计算中, 有限元法是分析装配式混凝土结构连接节点力学性能的核心手段。(1) 在有限元计算流程里, 首要步骤是将节点模型离散为众多有限单元。这一过程如同将复杂结构拆解为简单单元的组合, 随后通过求解各个单元的平衡方程, 进而获取节点整体的应力、应变和位移等关键结果。(2) 面对非线性问题, 常规的线性求解方法不再适用, 此时需采用迭代算法, 牛顿-拉夫逊迭代法便是常用且有效的一种。它通过不断迭代逐步逼近真实解, 以准确反映节点在非线性和非线性状态下的力学响应。(3) 在计算过程中, 计算精度与计算效率的平衡至关重要。可通过调整网格密度, 在保证计算精度的同时避免网格过密导致计算量过大; 合理选择求解器, 以提升计算速度。此外, 还需充分考虑节点在复杂受力工况下的几何非线性、材料非线性和接触非线性等因素, 如此才能全面且精准地模拟节点的力学行为, 为节点性能评估和设计优化提供可靠依据。

### 3.3 结果验证与分析

数值模拟结果的准确性直接关系到后续分析与设计的可靠性, 因此必须与试验结果进行严谨对比验证。(1) 对比内容涵盖多方面, 荷载-位移曲线能直观呈现节点在受力过程中的变形与承载能力关系; 应力应变分布可反映节点内部应力传递和材料受力状态; 破坏形态则能揭示节点最终的失效模式。(2) 若模拟结果与试验结果出现偏差, 需深入剖析原因。可能是模型参数设置未能精准反映实际材料特性, 边界条件设定与实际工程约束不符, 或是计算方法选择未能有效处理非线性问题等。针对这些问题, 对模型进行针对性修正和优化。(3) 通过反复验证和改进, 最终建立准确可靠的数值模型。在此基础上, 利用该模型开展参数分析, 系统研究

不同因素,如节点构造形式、材料强度、配筋率等对节点力学性能的影响规律,为连接节点的优化设计提供坚实的理论支撑。

#### 4 试验与数值模拟的对比与结合

##### 4.1 对比分析

试验研究与数值模拟分析在探究装配式混凝土结构连接节点力学性能方面各有优劣。(1)试验研究能直接呈现连接节点在实际受力状态下的力学表现,其结果直观且可靠,是验证节点性能的重要手段。然而,试验研究存在明显不足,成本高昂、周期漫长,且受试验场地、设备等条件限制,难以全面覆盖各种复杂工况。

(2)数值模拟分析则展现出显著优势,成本低、效率高,可轻松模拟多种不同工况,为深入研究提供了便利。但模拟结果的准确性高度依赖模型的合理性和参数设置的准确性。(3)对比试验与数值模拟得到的荷载-位移曲线、应力应变分布等结果,二者在整体趋势上往往较为吻合,但在局部细节上可能存在差异。这些差异恰恰体现了试验和模拟各自的特点与局限性,也为后续改进研究方法、优化节点设计提供了方向。

##### 4.2 结合方式

将试验与数值模拟有机结合,能充分释放二者的潜在优势,形成强大的研究合力。(1)在试验筹备阶段,借助数值模拟开展预分析至关重要。通过模拟不同试验方案,能精准优化试验模型尺寸、加载方式以及测点布置,避免盲目试验,显著提升试验效率。(2)试验进行时,实时将监测数据与模拟结果进行比对。一旦发现数据偏差过大等异常情况,可迅速调整试验方案,确保试验结果的可靠性。(3)试验结束后,以试验所得的真实数据为基准,对数值模拟模型进行细致修正与严格验证,提升模型的精确度。随后,利用验证后的数值模型开展大规模参数分析,突破试验条件限制,拓展研究范畴,为装配式混凝土结构连接节点的设计提供更为全面、深入的理论支撑,达成试验与数值模拟的优势互补<sup>[3]</sup>。

##### 4.3 对节点设计的指导意义

试验与数值模拟相结合的研究方法,为装配式混凝土结构连接节点设计筑牢了科学根基。通过试验直观呈现节点在实际受力下的力学表现与破坏形态,借助数值模拟深入剖析节点内部应力分布与传力机制,二者结合能全面且精准地了解节点的力学性能和破坏机理,明确影响节点性能的关键因素,如节点构造、材料特性、配筋方式等。基于这些研究成果,在节点设计环节,可针对性地优化节点构造形式,合理选用高强度、高性能材料,科学配置钢筋,有效提高节点的承载能力、延性和耗能能力,保障装配式混凝土结构在复杂荷载作用下的整体安全性和可靠性。此外,该研究方法还为制定连接节点设计标准和规范提供了详实的数据支持和坚实的理论基础,有力推动装配式混凝土结构技术的广泛应用与发展<sup>[4]</sup>。

#### 结束语

综上所述,装配式混凝土结构连接节点研究意义重大。试验研究直观可靠但成本高、周期长、工况受限,数值模拟成本低、效率高、可模拟多工况但依赖模型与参数。将二者有机结合,通过对比分析发现差异,以试验修正模拟模型,再利用验证后的模型开展参数分析。这种研究方法能全面了解节点性能,为节点设计提供科学依据,优化节点设计,保障结构安全可靠,有力推动装配式混凝土结构技术的蓬勃发展。

#### 参考文献

- [1]刘立新,王军.装配式混凝土结构连接节点研究现状与展望[J].建筑结构学报,2020,41(08):1-12.
- [2]陈强,赵华.浆锚搭接连接节点在装配式建筑中的应用与分析[J].工业建筑,2021,51(03):115-120.
- [3]王涛,孙勇.基于抗震性能的装配式混凝土结构连接节点设计优化[J].建筑科学,2022,38(04):78-85.
- [4]张辉,李刚.装配式混凝土结构连接节点施工质量控制研究[J].施工技术,2023,52(06):92-97.