

# Study on mechanical properties and design methods of new beam-column joints in FRP-steel-concrete composite structures

Junjie Dou

Guangxi Rongtai Architectural Design Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530001, China

## Abstract

FRP-steel-concrete composite structures, owing to their superior mechanical properties and outstanding durability, have shown great potential in modern civil engineering. As the critical load transfer hub of these composite structures, the mechanical performance of beam-column joints directly affects the safety and stability of the entire structure system. This paper focuses on new FRP-steel-concrete composite beam-column joints, systematically exploring the stress evolution mechanisms, typical failure modes, and deformation characteristics under various loading conditions, including axial pressure, bending moment, and shear force. It emphasizes the collaborative working mechanism between FRP composite materials and steel-concrete interfaces, establishing a detailed mechanical model that considers the nonlinear constitutive relationship and geometric nonlinearity of the materials. The paper proposes a set of node design methods and construction techniques suitable for practical engineering applications, providing solid theoretical support and technical references for the engineering application of such composite structures.

## Keywords

FRP-steel-concrete composite structures; new beam-column joint mechanical performance; design methods

# FRP-钢-混凝土组合结构新型梁柱节点力学性能与设计方法研究

窦俊杰

广西荣泰建筑设计有限责任公司, 中国·广西南宁 530001

## 摘要

FRP-钢-混凝土组合结构凭借其优异的力学性能与突出的耐久性优势, 在现代土木工程领域展现出极为广阔的应用前景。作为该类组合结构中关键的荷载传递枢纽, 梁柱节点的力学性能直接关系到整体结构体系的安全性与稳定性。本文聚焦于新型 FRP-钢-混凝土组合梁柱节点, 系统探究节点在轴向压力、弯矩、剪力等不同荷载工况耦合作用下的受力演化机理、典型破坏模式及变形发展特征。重点剖析 FRP 复合材料与钢-混凝土界面的协同工作机制, 建立考虑材料非线性本构关系与几何非线性效应的精细化力学模型, 提出一套适用于工程实践的节点设计方法与构造技术措施, 为推动该类组合结构的工程化应用提供坚实的理论支撑与技术参考。

## 关键词

FRP-钢-混凝土组合结构; 新型梁柱节点力学性能; 设计方法

## 1 引言

基于当代土木工程结构朝着大跨度、超高层、重载化前行的背景, 传统单一材料结构在承载力、耐久性及施工便利等方面的性能缺陷愈发凸显, 学术与工程领域针对 FRP-钢-混凝土组合节点受力机理及设计方法的研究仍在摸索阶段, 还未形成一套系统完善的理论体系, 尤其对于界面粘结滑移机理、多材料协同工作机制等关键科学问题, 急需深度

研究, 开展新型梁柱节点力学性能跟设计方法的研究, 对促使组合结构于实际工程中得以广泛应用, 具备关键的理论价值与工程实践意义。

## 2 组合节点构造形式与受力特点

### 2.1 节点构造创新与材料组合机制

设计 FRP-钢-混凝土组合梁柱节点的构造时, 应充分顾及不同材料力学特性与结构传力效率的优化, 现阶段工程中常出现的构造形式主要有: 包含 FRP 包裹式、嵌入式及混合连接的三类节点, FRP 包裹式节点的核心构造理念为借助 FRP 材料环向约束效应, 大幅提升钢-混凝土界面的粘

【作者简介】窦俊杰 (1985-), 男, 中国河北丰润人, 本科, 工程师, 从事土木工程结构设计研究。

结性能：若节点承受外部荷载的施加，FRP 布采用有效把控核心区混凝土的横向扩张，显著削减钢材跟混凝土的相对滑移量，从而明显增进界面的协同工作实力，该构造形式不仅把 FRP 材料的抗拉性能优势充分展现出来，还借助环向约束效应切实优化了混凝土材料的脆性特性，促成了多材料性能互补、协同承重的高效结构组合。

嵌入式节点采用预先把 FRP 型材嵌入混凝土柱体内部的方式，采用特定连接构造达成与钢梁刚性连接关系，该构造形式依靠 FRP 型材与混凝土所产生的机械咬合作用，还有经表面粗糙处理产生的粘结力，实现 FRP 与混凝土的协同配合，混合连接节点创造性地将高强螺栓机械连接与 FRP 粘结连接的双重优势加以结合，借助螺栓赋予初始的连接刚度，长期荷载作用下的应力传递由 FRP 粘结层承担，构建出一种可靠性佳、耐久性优的连接样式<sup>[1]</sup>。

## 2.2 节点受力机理与破坏模式

轴向压力与弯矩共同作用下，FRP-钢-混凝土组合节点受力发展进程能明确地分成三个典型阶段：弹性运行阶段、界面滑动阶段与塑性损毁阶段，处于结构弹性阶段，若外部施加的荷载较小时，节点内各材料变形彼此协调统一，应力应变的关系契合线弹性规律；伴随荷载慢慢向上增加，节点迈进界面滑移阶段，在这一时刻，钢与混凝土间开始出现细微的相对滑动，FRP 材料渐渐发挥其环向约束功能，节点的刚度出现了一定幅度的退化；当荷载临近极限状态之际，节点迈入塑性阶段，FRP 材料达到自身抗拉强度的极限点，混凝土核心区遭受压溃破坏，或钢材出现塑性屈服现象，节点失去承载能力。

组合节点典型的破坏模式，主要为界面粘结破坏、FRP 断裂破坏及混凝土压碎破坏这三种，界面粘结破坏大多是因为钢-混凝土界面滑移量超过了允许界限，使节点失去传递力的功效；FRP 断裂破坏大多是在环向约束不充分的情形下出现，FRP 材料过早触及抗拉强度而出现断裂；混凝土压碎破坏是节点核心区混凝土应力集中引发的，在压应力的作用下出现脆性压溃。研究的结果说明，FRP 材料用量、钢-混凝土界面处理方式、节点几何尺寸以及配筋比例等因素，均与节点破坏模式密切相关，采用合理的构造设计举措，能够有效推动节点破坏模式从脆性的界面粘结破坏转化为延性的材料屈服破坏，由此大幅提升节点的抗震性能及安全储备总量。

## 3 节点力学性能分析模型

### 3.1 材料本构关系与界面模拟方法

搭建精准的组合节点力学模型，关键是精确刻画 FRP、钢材、混凝土等多种材料本构关系以及界面相互作用的机理，针对 FRP 材料而言，采用线弹性本构模型做模拟，根据实际采用的纤维类型（如碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维）确定其抗拉强度与弹性模量等参数；钢材本构关系采用的是

双线性随动强化模型，全面顾及材料屈服平台特征及应变硬化效应；混凝土本构模型采用的是修正后的受压损伤模型，采用引入 FRP 约束效应系数办法，对混凝土抗压强度及峰值应变进行恰当修正，以呈现 FRP 环向约束对混凝土力学性能的改良效果<sup>[2]</sup>。

就界面粘结滑移关系的模拟而言，采用 Tzou 等学者构建的非线性弹簧模型，经过对大量试验数据进行统计分析 with 拟合操作，获取可精准刻画钢-混凝土界面粘结应力与滑移关系的曲线，该模型可精准模拟界面在循环荷载作用情形下的刚度退化特征与能量耗散原理，为组合节点的非线性分析给予可靠的界面模拟策略。

### 3.2 非线性有限元模型的建立与验证

基于 ABAQUS 这一有限元分析平台，搭建兼顾几何非线性和材料非线性的 FRP-钢-混凝土组合节点精细化有限元模型，就单元类型的选择而言，混凝土模拟采用 C3D8R 八节点六面体实体单元，钢材与 FRP 材料采用的是 S4R 四节点壳单元，以此兼顾计算的精度与效率，采用“面-面”接触对来模拟界面接触关系，法向接触设定采用“硬接触”做法，切向接触采用的是罚函数摩擦公式，按照钢-混凝土界面处理方式对摩擦系数进行合理取值。

## 4 设计方法与构造措施

### 4.1 承载力设计理论与计算逻辑

应按多阶段性能控制原则开展组合节点的承载力设计，按照节点在各不同荷载阶段的受力特征情形，构建一套成体系的设计方法框架，在弹性工作推进阶段，设计的关键在于保证节点在日常使用荷载作用下维持线弹性状态，防止因局部应力超限引发材料的损伤现象。当下需借助线弹性力学理论对节点内力展开计算，为 FRP、钢材和混凝土三种材料各自设定应力限值，FRP 材料应力需被控制在其抗拉强度的 40%-50% 以内，钢材应力需被限制在屈服强度的 60% 范围以内，混凝土压应力应低于自身轴心抗压强度的 30%，从而保证材料处于弹性工作范畴，保证节点变形呈现协调性<sup>[3]</sup>。

步入弹塑性阶段以后，由于界面滑移效应，节点刚度出现退化，此刻设计聚焦于变形控制了，需引入刚度折减系数，对界面滑移对节点整体性能产生的影响加以量化，此系数取值与 FRP 包裹密度、界面处理方式呈直接相关性，倘若 FRP 包裹层数为 2 层，界面采用栓钉处理，刚度折减系数取值在 0.7~0.8 的区间，采用修正后的刚度参数对节点在持续荷载下的变形量进行计算，保证层间位移角不越过 1/500 的界限，满足正常使用极限状态有关变形的要求。

极限状态设计必须严格依照“强节点弱构件”理念，让节点极限承载力跟构件承载力构成梯度关系，要利用材料强度标准值计算节点核心区的极限承载力，还要乘以 1.2~1.3 的安全系数值，保证节点在梁、柱构件形成塑性铰状态后依旧能维持完整的传力途径，就抗弯承载力这一情况举例，

相连梁构件极限弯矩的1.2倍是节点极限弯矩需达到的最低值,此设计逻辑能有力规避结构在地震或者极端荷载下,出现节点比构件率先破坏的危险情况,提升结构整体的抗震水平。

## 4.2 节点构造优化的技术措施

### 4.2.1 界面处理的强化策略

钢和混凝土界面的粘结性能直接关联着节点的传力效率,应采用多维度处理技术加强界面间相互作用,机械刻痕工艺借助在钢材表面生成规则的凹凸纹理,提升界面粗糙度,应把刻痕深度控制在5~8mm以内,刻痕间距宜稳定在30~50mm,借助这种物理粗糙化处理,界面粘结强度可提升30%~40%。栓钉锚固依靠植入直径8到12mm的圆柱头栓钉来达到机械咬合效果,栓钉布置需依照“核心区密集、边缘区稀疏”的规则,节点核心区100mm范围中,栓钉间距不宜超过150mm,边缘区域可把间距放宽至200mm,借助栓钉的抗剪效能,有力抑制界面的滑移现象。就FRP和混凝土的界面而言,可利用喷砂处理使混凝土表面构建0.5~1mm的粗糙层,而在实施FRP粘贴时,施加0.2~0.3MPa的均匀压力,使得粘结胶层厚度控制在1~2mm范畴,这样能形成可靠的化学粘结及机械咬合的复合界面。

### 4.2.2 FRP约束体系的优化布置

FRP材料的布置途径直接影响到对混凝土的约束结果,要针对包裹层数、搭接长度和间距控制三个维度做优化处理,按照节点受力等级确定包裹层数,普通民用建筑的节点一般采用2~3层FRP布,工业建筑、重载节点所需层数为3~4层,每层FRP布的厚度选取0.11~0.16mm为佳,若单层布置过厚,约束效率会下降。层间的搭接长度起码要为100mm,且搭接的区域要处在节点非核心区,避免搭接缝对核心区约束效果形成干扰,处于节点的核心区域,需对FRP环向布置间距进行控制,范围为100~150mm,就矩形柱节点而言,矩形柱节点的四个棱角处,FRP要进行局部强化,可借助U型箍与环向布复合包裹手段,FRP于棱角处的重叠宽度需达到50mm及以上,从而缓解棱角处的应力集中现象,促使核心区混凝土接受均匀的环向约束效果<sup>[4]</sup>。

### 4.2.3 配筋系统的协同设计

需让混凝土柱内配筋设计与FRP约束形成协同,依靠箍筋与FRP的双重约束增进节点延性,双向箍筋应采用HRB400级、直径8~10mm的钢筋,针对节点核心区1.5倍梁高的范围,箍筋间距加密为100mm,非核心区处,间距可放宽为150mm。需把箍筋弯钩做成135°弯折,平直段长度起码为10倍箍筋直径d,使箍筋在混凝土受压膨胀的情况下依旧能维持有效约束,针对采用FRP包裹的混凝土

柱,可合理地把箍筋间距放宽至150mm,然而要保证每根FRP布带下方至少有一道箍筋就位,以箍筋对混凝土的侧向约束减少FRP所受的环向应力,延后FRP出现屈服现象的时间,处在钢梁与混凝土柱的连接地带,应配备间距50mm的加密箍筋束,预防局部承压让混凝土产生劈裂,加密区的长度应至少达到钢梁截面高度的1.5倍。

### 4.2.4 连接细节的可靠性设计

钢梁和FRP型材进行连接时需兼顾初始刚度与长期耐久性,采用复合连接技术让力实现可靠传递,高强螺栓连接部分需选用8.8级及以上的摩擦型螺栓才行,选用螺栓时直径应 $\geq 16\text{mm}$ ,把螺栓间距控制在 $3d\sim 6d$ ,端距应达到 $2d$ 及以上,保障螺栓群受力均匀性。螺栓连接处的钢材表面应开展喷砂处理,摩擦系数要在0.45及以上,预紧力生成的摩擦力承担起荷载初始传递,实施FRP粘结连接要选用高强度结构胶,胶层的抗拉强度应达到35MPa及以上,抗剪强度需达到25MPa及以上,粘结操作前,需对FRP与钢材表面开展清洁工作,采用压力注胶手段进行施工,保障胶层厚度均匀,排除气泡干扰。就重要连接节点而言,能在螺栓连接基础之上增添FRPU型箍连接,U型箍的宽度需达到200mm及以上,包覆钢梁上、下翼缘及腹板区域,采用螺栓与粘结的双重作用效果,让连接节点于循环荷载下的刚度退化率维持在15%以内,保证连接拥有可靠及延性特性。

## 5 结论

FRP约束效应、钢-混凝土界面粘结性能和多材料协同工作机制,在很大程度上左右着组合节点的受力性能,采用合理的构造设计可显著增进节点的承载力、刚度与延性,该领域的研究可进一步深入探究复杂荷载工况(像往复荷载、冲击荷载、地震荷载)下节点性能的退化机理;开展针对节点的长期耐久性试验,剖析环境因素(如湿度、温度、化学腐蚀)在节点性能上的影响体现,为土木工程结构创新发展探寻新的技术途径。

## 参考文献

- [1] 张鸿泽,王波,贾艳明,等.钢筋混凝土梁柱框架节点抗剪承载力预测研究[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册).中建深圳装饰有限公司,2024:875-878.
- [2] 苏佑智,王公成,乔文涛,等.模块墙建筑新型钢-混凝土组合梁柱节点静力性能研究[J].建筑钢结构进展,2025,27(05):10-18.
- [3] 龙永焯,田景杨,黎智坚,等.装配式方钢混凝土法兰外环连接梁柱施工探索[J].广州建筑,2023,51(05):53-56.
- [4] 张鑫.新型装配式钢-混凝土组合结构梁柱节点在教学楼中的应用[J].甘肃科技纵横,2022,51(05):57-59.