

DOI: 10.7672/sjgs2026070147

# 钢纤维增强现浇连接预制梁柱节点抗震性能研究\*

梁山

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

**[摘要]** 基于湖南省南山大桥项目,通过3个等比例的外接预制混凝土梁柱节点试件,研究了现浇区采用钢纤维增强混凝土对节点抗震性能的影响。节点采用带牛腿的预制柱、U形开口预制梁及后浇纤维混凝土构成。现浇混凝土中钢纤维的体积掺量分别为0,0.5%,1%。试验中对梁端施加竖向准静态荷载,结果表明:现浇混凝土中掺入钢纤维可提升节点极限承载力,能量耗散提高17.7%,并显著增强节点刚度。钢纤维有效延缓裂缝出现并抑制其扩展,使节点核心区裂缝长度明显缩短,表现出明显的挠度硬化特征,与材性试验结论一致。试验结果表明,该连接构造施工简便、抗震性能良好。

**[关键词]** 预制混凝土;节点;抗震性能;钢纤维;能量耗散;试验

**[中图分类号]** TU528

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)07-0147-06

## Study on Seismic Performance of Precast Beam-column Joints of Steel Fiber Reinforced Cast-in-place Connection

LIANG Shan

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** Based on the Nanshan Bridge Project in Hunan Province, the influence of steel fiber reinforced concrete on the seismic performance of joints in cast-in-place areas is studied through three equal proportion external precast concrete beam-column joints. The joints are composed of precast columns with corbels, U-shaped open precast beams, and post-pouring fiber reinforced concrete. The volume content of steel fiber in cast-in-place concrete is 0, 0.5%, and 1%, respectively. The vertical quasi-static load was applied to the beam end in the test. The results indicate that the ultimate bearing capacity of the joint can be improved by adding steel fiber to the cast-in-place concrete, the energy dissipation can be increased by 17.7%, and the stiffness of the joint can be significantly enhanced. The steel fiber effectively delays the occurrence of cracks and inhibits their expansion, so that the crack length in the core area of the joint is significantly shortened, showing obvious deflection hardening characteristics, which is consistent with the conclusion of the material test. The test results indicate that the connection structure is simple in construction and has good seismic performance.

**Keywords:** precast concrete; joints; seismic performance; steel fiber; energy dissipation; tests

### 0 引言

预制混凝土结构体系因其经济效益显著、质量控制更优、环境污染小、施工效率高且适应性强等优势,成为替代现浇钢筋混凝土及钢结构的重要选择<sup>[1-2]</sup>。然而该体系在建筑结构与抗震设计中的应用仍较为有限,这主要归因于缺乏既能有效传递预制混凝土框架中梁柱间弯矩又便于施工生产的连

接构造方案<sup>[3-4]</sup>。因此梁柱连接一直被视为关键部位,不仅直接影响结构的整体性能,也关系到建造成本与施工效率。

目前预制混凝土抗弯框架中的梁柱连接形式主要包括螺栓连接、焊接连接、预应力连接、现浇连接及其多种组合形式。焊接连接虽可满足强度与刚度要求,但高温作业易导致邻近混凝土受损或开裂<sup>[5]</sup>。此外,该类连接需由熟练工人操作以保证质量<sup>[6]</sup>。螺栓连接是现场装配预制构件最便捷的方式,但该方法需在构件浇筑前精确预埋通道或钢

\* 中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目(C2022-051)

[作者简介] 梁山,助理工程师,E-mail: dudule08@163.com

[收稿日期] 2026-01-05

板,且存在滑移风险<sup>[7]</sup>。研究表明,增大螺栓孔公差虽可避免滑移,但会降低连接的初始刚度<sup>[8]</sup>。现浇混凝土连接继承了钢筋混凝土结构的整体性优势,有利于形成连续或组合截面。该类混合体系适用于抗震建筑<sup>[9]</sup>,并对预制连接的施工偏差具有更好的适应性。然而,其安装周期较长,需等待混凝土强度发展。为保证整体结构性能的提升,会导致成本上升和工期延长。

为解决这一矛盾,纤维增强混凝土作为一种新型水泥基复合材料,显示出独特的应用潜力<sup>[10]</sup>。纤维的掺入有助于增强混凝土与受力钢筋之间的黏结性能<sup>[11]</sup>。其中钢纤维因其较高的强度和弹性模量得到广泛应用,水泥基体的碱性环境可保护其免于腐蚀,同时通过机械锚固或表面粗糙处理可进一步提升混凝土与纤维的黏结强度<sup>[12]</sup>。相较于平直纤维,端钩型纤维能显著增强端部锚固效果,有效提升混凝土的能量吸收能力与韧性<sup>[13-14]</sup>。此外,纤维的掺入可有效提升梁柱节点在重力与循环荷载作用下的力学性能,还能降低节点区对横向钢筋的配置需求。

## 1 工程概况

本研究基于湖南省南山大桥项目中的铁路站台框架结构,针对其预制混凝土梁柱节点的抗震性能开展试验研究。项目中的桥梁主体为多梁型组合铁路桥,而本研究对象聚焦于其站台部分的框架结构。该框架采用预制装配方案,同时包含一种新型纤维增强梁柱连接节点。

该节点设计源于项目前期研发成果,主要采用预制 U 形开口梁兼作永久模板,显著减少现场模板工程量;通过牛腿支承预制梁,最大限度降低脚手架需求;连接区采用现浇钢纤维混凝土浇筑,形成整体受力节点。此构造避免了现场焊接与预应力张拉,降低了对特种作业工人的依赖,提高了施工效率,尤其适用于精度控制与工期要求严格的铁路站台工程。

本研究旨在通过拟静力试验,重点分析在该节点现浇区掺入钢纤维后,对其极限荷载、能量耗散能力及裂缝形态发展的影响,以评估其对提升站台框架结构抗震韧性的实际效果。

## 2 试验

### 2.1 节点结构与试件设计

本试验所研究的结构原型为 1 个 3 层 3 跨的预制混凝土框架结构,其平面呈矩形布置。试件设计以上述框架结构中的外部梁柱节点为对象,依据框架结构受力分析确定其反弯点位置,按 1:2 的缩尺

比例确定试件中梁与柱的几何尺寸。预制混凝土梁柱试件钢筋布置如图 1 所示。

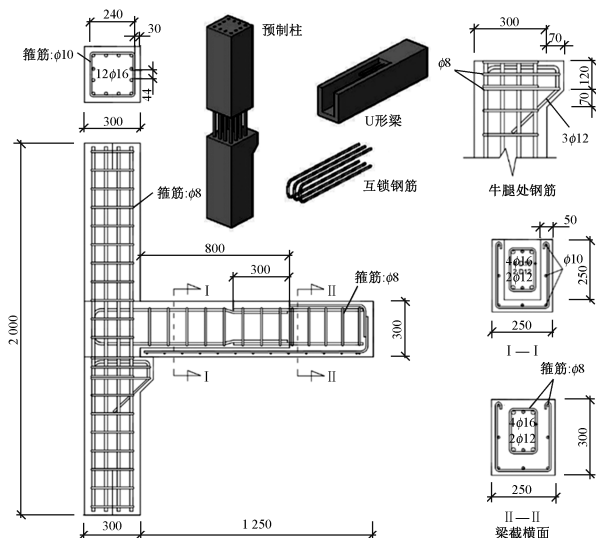


图 1 梁柱节点试件钢筋布置

Fig. 1 Layout of reinforcement arrangement for beam-column joint specimen

试件由预制混凝土柱、预制 U 形开口梁及节点区现浇混凝土连接部位构成,共设计制作了 3 个尺寸与配筋完全相同的试件,编号为 P2, P3, P4, 其区别仅在于节点区现浇混凝土中的钢纤维体积掺量(分别为 0, 0.5%, 1%)。各部件具体设计参数如下:预制部件混凝土抗压强度为 30MPa;现浇节点区采用的钢纤维混凝土抗压强度为 45MPa。

试件配筋采用 4 种直径的钢筋:梁箍筋直径为 8mm, U 形梁纵筋直径为 10mm, 梁受拉区与柱体受弯钢筋直径分别为 12mm 与 16mm。所用钢筋均采用 HRB500 级,通过对各规格钢筋取样进行单轴拉伸试验,获得实测值如表 1 所示。为统一计算标准,屈服强度取标准值 500MPa,屈服应变 0.002 5。钢纤维采用端钩型,其材料性能如表 2 所示,混凝土配合比如表 3 所示。

表 1 钢筋实测力学性能

Table 1 Mechanical properties of reinforcing steel

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
8	512	648	202
10	508	635	201
12	505	630	199
16	515	655	203

### 2.2 安装流程

试件制作安装流程参考实际施工过程,首先固定预制柱,将预制 U 形梁一端搁置于牛腿,另一端设置临时支撑。然后在节点区绑扎安装互锁纵筋

表 2 钢纤维性能参数

Table 2 Steel fiber performance parameters

项目	参数值
长度 $l_f$ /mm	35
直径 $d_f$ /mm	0.55
长径比 ( $l_f/d_f$ )	63.6
抗拉强度/MPa	1 345
弹性模量 $E_{mod}$ /MPa	210 000

表 3 预制构件及现浇连接部位材料配合比

Table 3 Material mix proportions for precast components and cast-in-place joints

材料	预制构件	P2 现浇连接部位	P3 现浇连接部位	P4 现浇连接部位
粗骨料/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1 000.55	1 028.40	1 028.40	1 028.40
细骨料/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	818.63	685.60	685.60	685.60
水泥/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	335.82	441.00	441.00	441.00
水/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	208	210	213	213
钢纤维/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	—	—	39.25	78.50
水灰比 ( $w/c$ )	0.62	0.47	0.52	0.52
坍落度/mm	150	140	125	85

与箍筋,并支设模板浇筑节点区钢纤维混凝土,最后养护至规定龄期。

### 2.3 加载制度与测量方案

试验加载装置如图 2 所示。柱底通过底板螺栓固定于试验台座,梁端自由,并于梁端施加竖向荷载。柱顶未施加轴向压力,以模拟最不利受力工况。

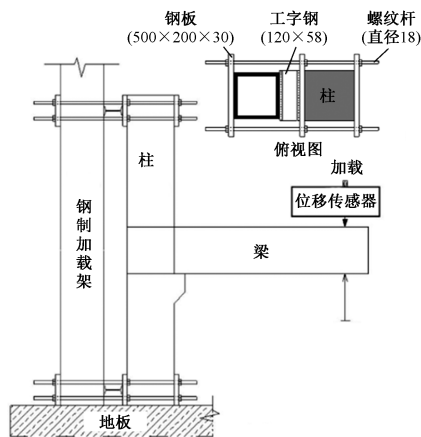


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test loading device

加载采用位移控制的准静态方式进行,加载制度如图 3 所示。按照正弦曲线逐级提升位移幅值的形式加载 16 个周期,其中每 2 个周期增大 1 次加载幅值。加载过程中起始位移量为 0,位移幅值等级依次设置为 3, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 60mm。同时记录加载处对应荷载值,形成荷载位移曲线。加载过程中在试件表面采用不同颜色标记各主要位移级别下的裂缝发展过程,以辨识裂缝形态的演化。

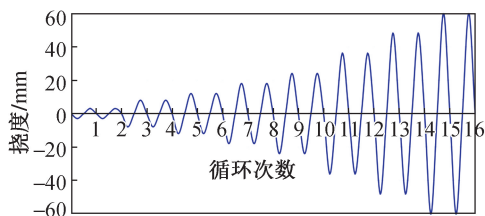


图 3 低周反复荷载试验的加载制度

Fig. 3 Loading protocol for low-cyclic reversed loading test

## 3 结果与讨论

### 3.1 混凝土力学性能

试件 P2, P3, P4 的预制构件与现浇混凝土的平均立方体抗压强度、弹性模量和抗折模量测试结果如表 4 所示,各项数据均为 3 个试样的平均值。不同钢纤维掺量下现浇混凝土的力学性能如表 5 所示。

表 4 抗压强度、弹性模量和抗折强度测试结果

Table 4 Test result of compressive strength, modulus of elasticity, and modulus of rupture

试件	平均抗压强度/MPa	平均弹性模量/GPa	平均抗折模量/MPa
P2	预制梁	40.95	4.03
	预制柱	55.87	5.42
	现浇混凝土	50.86	5.99
P3	预制梁	36.82	5.36
	现浇混凝土	47.36	6.06
P4	预制梁	50.58	5.88
	预制柱	51.35	5.65
	现浇混凝土	60.26	7.76

表 5 预制组合箱梁试件现浇混凝土力学性能对比

Table 5 Comparison of the mechanical properties of the CIP-concrete of the PCBC specimens

力学性能	$V_f = 0$	$V_f = 0.5\%$	$V_f = 1.0\%$	与 $V_f = 0$ 相比的增长率/%	
				$V_f = 0.5\%$	$V_f = 1.0\%$
平均抗压强度/MPa	50.860	47.360	60.260	-6.88	18.48
平均弹性模量/GPa	31.518	33.782	42.679	7.18	35.41
平均抗折模量/MPa	5.990	6.060	7.760	1.17	29.55

抗折棱柱体试件的破坏形态如图 4 所示。素混凝土棱柱体 ( $V_f = 0$ ) 在初裂出现后发生突然破坏,并断裂成两段。相比之下,钢纤维混凝土棱柱体虽出现裂缝但保持结构完整。这是由于随机分布的钢纤维通过脱黏和拔出机制产生桥接裂缝,有效抑制了裂缝的扩展,从而避免了脆性断裂的发生。

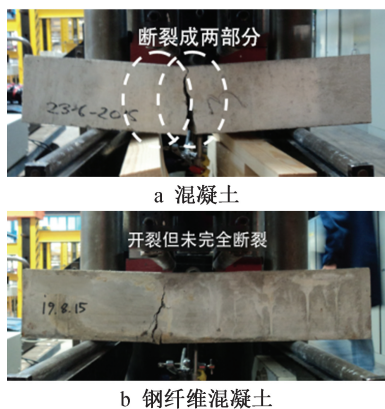


图 4 抗折棱柱体试件的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of flexural prism specimens

棱柱体试验中钢纤维对荷载-挠度关系的影响如图 5 所示。由图 5 可知,素混凝土( $V_f=0$ )表现出典型的脆性特征,初裂即宣告破坏,其初裂荷载即为峰值荷载。相比之下,用于 P3 和 P4 现浇连接的钢纤维混凝土性能更优:P4 试件( $V_f=1\%$ )的荷载-挠度曲线显示,开裂后荷载仍持续增长,达到峰值后随着挠度显著增加而缓慢下降;P3 试件( $V_f=0.5\%$ )的曲线则表现为开裂后荷载随挠度增大逐步降低。两种纤维掺量的钢纤维混凝土均展现出优于素混凝土的延性。

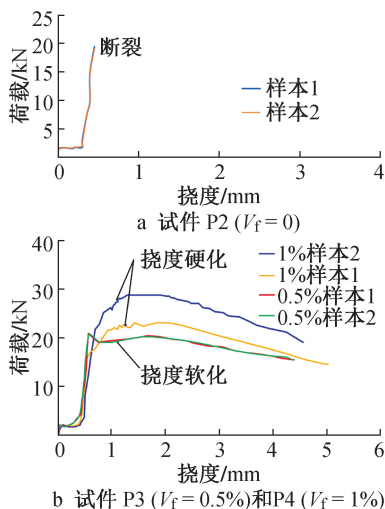


图 5 现浇连接部混凝土的棱柱体荷载-挠度曲线

Fig. 5 Prismatic load-deflection curve for cast-in-place concrete at joints

其中掺量为 1% 的钢纤维混凝土表现出典型的挠度硬化特征,其峰值荷载高于初裂荷载;而掺量为 0.5% 的试件呈现挠度软化行为,初裂荷载与峰值荷载基本相当。掺量为 1% 的钢纤维混凝土试件其荷载-挠度曲线存在一定离散性,这反映出钢纤维在混凝土拌合物中均匀分布的难度,也反映了纤维

掺混工艺可能引起的性能波动。

### 3.2 钢纤维对梁柱节点性能的影响

对采集的原始滞回曲线数据进行预处理,剔除了加载失效阶段因仪器回程间隙及零点漂移产生的异常数据点,得到 P2, P3, P4 试件梁柱节点的荷载-挠度滞回曲线如图 6 所示。此外,由于前 4 个周期节点变形基本处于弹性阶段,因此并未形成明显的滞回圈,图 6 中仅绘制了后 12 个周期已经形成的滞回圈曲线。试验采用梁端加载的方式,测量点位于梁端,绘制的滞回曲线可用于分析节点耗能性能。

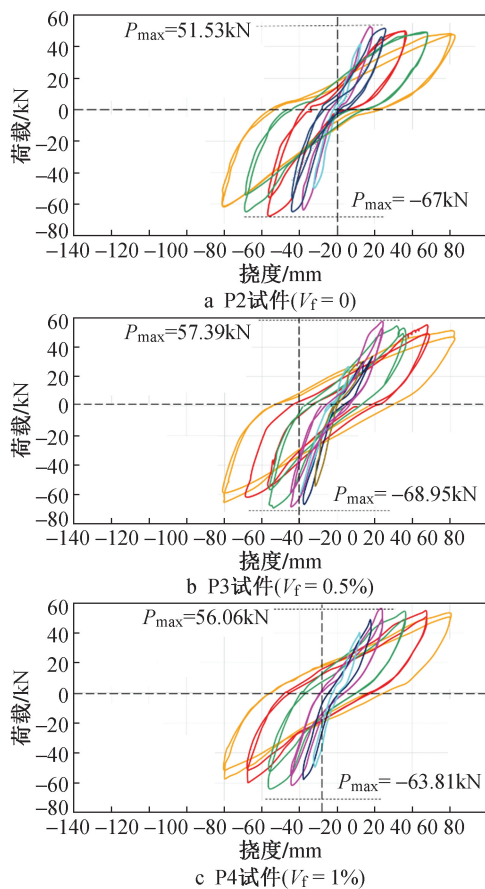


图 6 梁柱节点试件的荷载-挠度滞回曲线

Fig. 6 Load-deflection hysteresis curve of beam-column joint specimens

由图 6 可知,现浇混凝土中掺入钢纤维显著改善了节点的滞回特性。不仅小幅提升峰值荷载,各位移级别下的滞回环更显饱满,表明能量耗散能力增强。钢纤维同时延缓了裂缝生成并抑制其扩展。

如图 7a 所示,采用素混凝土连接的 P2 试件在加载幅值为 12mm 时节点核心区突然出现贯通斜裂缝;而掺入 1% 钢纤维的 P4 试件(见图 7b),其斜裂缝长度更短,且在 12, 18, 36mm 等多个位移阶段分阶段发展,裂缝分布更为分散。

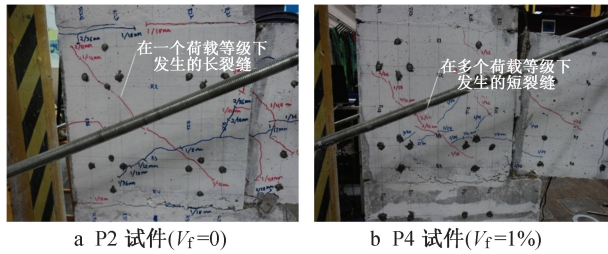


图7 节点核心区裂缝分布

Fig.7 Crack pattern in the joint core

该现象与抗折试验结果一致,素混凝土试件初裂后荷载-挠度曲线急剧下降(见图5a),而钢纤维混凝土试件初裂后仍能持续变形(见图5b)。这表明混凝土开裂后,钢纤维通过桥接作用有效抑制裂缝扩展,从而推迟内部裂缝贯穿至表面的时间,使试件在更大位移下保持承载力。

结构的能量耗散能力反映了其通过非弹性变形抵抗地震作用的能力,更强的耗能能力通常意味着更优的抗震性能。本研究基于梁端荷载-挠度滞回曲线所围面积计算能量耗散值。在循环加载试验中,累计能量耗散通过累加各循环的耗能值得到。为消除试件间混凝土强度差异的影响,将能量耗散值按对应循环的理想弹塑性矩形应力图面积进行归一化处理,归一化能量耗散 NED 计算公式如下:

$$NED = \frac{A}{4V_{\max}\delta_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $V_{\max}$  为正向与负向最大荷载平均值;  $\delta_{\max}$  为双向位移平均值;  $A$  为滞回环包围面积。

试件 P2, P3 与 P4 的累积能量耗散及归一化能量耗散结果如图 8, 9 所示。由图 8 可知, 掺加钢纤维的试件其累积耗能均优于无纤维试件, 增幅约为 17.7%。由图 9 可见, 试件 P4 的归一化耗能结果最高。尤其在试验初期阶段, 试件产生了更多裂缝。现浇混凝土中掺入钢纤维可有效提升节点的能量耗散能力。各试件在加载初期的低位移阶段均出现了一个归一化耗能峰值。这可能是由于纤维在混凝土微裂缝开展初期的桥接与拔出机制即开始发挥作用, 贡献了早期的能量耗散。随着位移增大, 界面行为趋于稳定, 耗能发展也呈现出与位移增长更为一致的单调上升趋势。

本研究采用割线刚度(峰-峰刚度)来表征刚度退化, 其计算方式为: 在每个位移级别(3, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 60mm)的最后一个循环中, 取正向与负向峰值荷载连线的斜率。刚度-挠度关系曲线对比了各梁柱试件在不同循环间的刚度退化规律, 如图 10

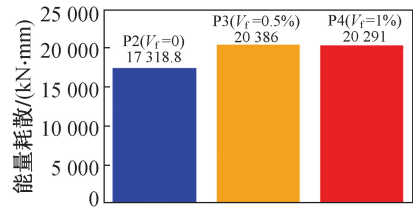


图8 预制混凝土梁柱试件的累积耗能

Fig.8 Cumulative energy dissipation of precast concrete beam-column specimens

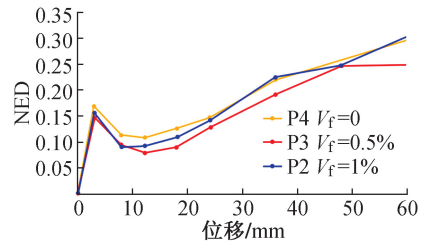


图9 预制混凝土梁柱试件的归一化耗能

Fig.9 normalized energy dissipation of precast concrete beam-column specimens

所示。图 10 表明, 所有试件均呈现挠度增大、刚度减小的规律。试验初期(3mm 挠度时), P4 试件割线刚度最高。

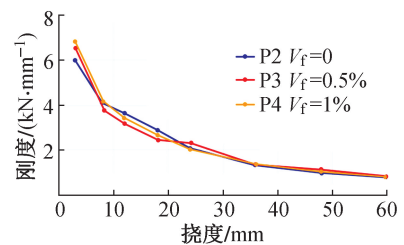


图10 预制混凝土梁柱试件的割线刚度退化

Fig.10 Secant stiffness degradation of precast concrete beam-column specimens

高耗能能力并不等同于高刚度。能量耗散源于荷载-位移滞回曲线所包围的面积。现浇混凝土中的钢纤维通过使滞回环更加饱满而提升了耗能能力; 而割线刚度则由正、负向峰值荷载连线的斜率所定义。当位移达到 36, 48, 60mm 时, 各试件的双向峰值荷载趋于接近, 因此其割线刚度值也基本相当。

钢纤维对刚度的改善主要体现在试验前期(挠度 3~24mm 阶段)。在挠度 36~60mm 区间, 各试件的刚度曲线逐渐收敛。尽管后期刚度趋于一致, 但含钢纤维的节点仍表现出更优的能量吸收特性: 其滞回环更加饱满, 且曲线平台段的延长反映了塑性变形能力的提升。均匀分布的钢纤维能够提高未开裂混凝土基体的刚度, 进而增强节点的初始刚

度,且该效应随纤维用量的增加而更为明显。然而,这种刚度的增强作用具有阶段性:混凝土开裂后,钢纤维对刚度的贡献逐渐减弱。

#### 4 结语

基于钢纤维混凝土材料性能试验及其在预制梁柱节点循环荷载作用下的结构响应,得出以下结论。

1) 钢纤维掺入可显著改善混凝土的破坏模式。掺量为 0.5% 和 1.0% (体积率) 时,混凝土由脆性破坏转向延性破坏。抗折试验表明:0.5% 掺量试件表现为挠度软化,1.0% 掺量试件呈现挠度硬化特性,说明混凝土初裂后仍具备继续承载的能力。该过程中,均匀分布的钢纤维通过桥接作用抑制裂缝扩展,直至纤维逐渐被拔出。

2) 钢纤维混凝土用于梁柱节点现浇连接区可有效改善其抗震性能。节点滞回曲线的“捏拢”效应显著减弱,曲线形态更为饱满。与普通混凝土节点相比,钢纤维混凝土节点的累积耗能提升约 17%,延性明显增强。纤维的加入主要贡献在于通过界面摩擦机制控制裂缝发展,从而提升材料韧性及耗能能力,而非大幅提高强度。试验中钢纤维延缓了裂缝出现并抑制其扩展,使节点核心区及梁体裂缝长度显著缩短(如 P4 试件),该现象与材性试验中的挠度硬化特征一致。

3) 钢纤维可提高节点在开裂前的初始刚度,但混凝土开裂后其对刚度的增强作用逐渐减弱。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李星乾,张锡治,赵有山,等. 预制混凝土管组合柱-钢梁混合框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2025,58(11): 25-41.  
LI X Q,ZHANG X Z,ZHAO Y S, et al. Experimental study on seismic performance of hybrid frames composed of concrete-filled precast concrete tubular columns and steel beams[J]. China civil engineering journal, 2025,58(11): 25-41.
- [ 2 ] 李楠,张季超,楚先锋,等. 预制混凝土结构后浇整体式梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2009,26(S1):41-44.  
LI N,ZHANG J C,CHU X F, et al. Experimental study on seismic behavior of pre-cast concrete beam-column sub-assembly with cast-in-situ monolithic joint[J]. Engineering mechanics, 2009,26(S1):41-44.
- [ 3 ] 陈适才,闫维明,王文明,等. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6): 60-67.  
CHEN S C,YAN W M,WANG W M, et al. Seismic behavior of exterior beam to column joints with layered slab of large precast concrete structures [J]. Journal of building structures, 2011, 32

(6):60-67.

- [ 4 ] POLAT G. Precast concrete systems in developing industrialized countries[J]. Journal of civil engineering and management, 2010, 16(1):85-94.
- [ 5 ] 刘振华,刘立军,杨湘枝,等. 预制混凝土框架梁底部纵向钢筋锚固性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 ( S2 ): 1017-1022.  
LIU Z H, LIU L J, YANG X Z, et al. Experimental study on anchorage performance of longitudinal reinforcement at the bottom of prefabricated concrete frame beam [J]. Building structure, 2023,53(S2):1017-1022.
- [ 6 ] DING K W, YE Y, MA W. Seismic performance of precast concrete beam-column joint based on the bolt connection [J]. Engineering structures, 2021, 232:111884.
- [ 7 ] 钱凯,李治,何畔,等. 螺栓连接预制混凝土梁-板子结构抗连续倒塌机理研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(1):173-180.  
QIAN K, LI Z, HE P, et al. Progressive collapse mechanism of PC beam-slab substructure with bolted connections [J]. Journal of building structures, 2020,41(1):173-180.
- [ 8 ] AL-SALLOUM Y A, ALRUBAIDI M A, ELSANADY H M, et al. Strengthening of precast RC beam-column connections for progressive collapse mitigation using bolted steel plates [J]. Engineering structures, 2018, 161:146-160.
- [ 9 ] ZHOU B, SI Q, LI B, et al. Experimental and numerical study on seismic behavior of shear wall with cast-in situ concrete infilled walls[J]. Structural concrete, 2024, 25(6):5056-5070.
- [ 10 ] 郑七振,魏林,朱斌. 钢纤维混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 上海理工大学学报,2004,26(4):323-327.  
ZHENG Q Z, WEI L, ZHU B. Experimental study on the seismic resistance behavior of steel fiber reinforced concrete frame joints [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004,26(4):323-327.
- [ 11 ] 赵燕茹,郭子麟,王磊,等. 低周反复荷载作用下纤维混凝土柱抗震性能有限元分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 822-828.  
ZHAO Y R, GUO Z L, WANG L, et al. Finite element analysis on the seismic performance of fiber reinforced concrete column under low cyclic loading [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017,36(3):822-828.
- [ 12 ] 王德弘,郑文忠,鞠彦忠,等. 钢纤维活性粉末混凝土梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 161-171.  
WANG D H, ZHENG W Z, JU Y Z, et al. Experimental study on seismic behavior of interior steel fiber reinforced RPC beam-column joints [J]. Journal of building structures, 2019, 40(3): 161-171.
- [ 13 ] PANG Y T, CAI L, ZHONG J. Seismic performance evaluation of fiber-reinforced concrete bridges under near-fault and far-field ground motions [J]. Structures, 2020, 28:1366-1383.
- [ 14 ] LÓPEZ I, BUSTURIA J M, NIJMEIJER H. Energy dissipation of a friction damper [J]. Journal of sound and vibration, 2004, 278(3):539-561.