

# 混凝土异形柱薄弱区局部增强与节点恢复力模型研究

周峰华<sup>1</sup>, 黄建华<sup>2</sup>

(1. 衢州市建设工程质量安全监督站, 衢州 324000; 2. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 为提升异形柱结构在水平荷载作用下的抗震性能与薄弱区抗损伤能力, 以杭衢高铁衢州西站综合交通枢纽项目中 W 形截面异形柱为对象, 针对其阴角与节点核心区等应力集中区域, 提出了 CFRP 外贴增强与“内钢外纤”复合增强两种局部增强方案, 开展了足尺模型低周反复加载试验。结果表明: 两种增强措施均能有效提升节点的承载力、刚度、变形能力与耗能性能, 其中 CFRP 外贴增强使承载力峰值荷载提高 10.6%, 复合增强提高 16.5%, 后果的提升效果更为显著; 复合增强在控制阴角混凝土主拉应变 (降幅 53.1%)、抑制裂缝宽度 (降幅 62.3%)、降低节点残余位移 (降幅 56.4%) 以及提升等效黏滞阻尼系数 (达 26.8%) 等方面表现更优, 显示出内设斜筋与外部 CFRP 协同工作的综合增强效果。构建了考虑局部增强效应的 Bouc-Wen 恢复力模型, 模型参数经识别标定后, 能准确预测增强后节点的承载力、滞回耗能与刚度退化行为, 预测误差在  $\pm 3.5\%$  以内。研究成果可为异形柱结构的局部抗震增强设计与非线性分析提供理论依据与工程参考。

**关键词:** 异形柱; 薄弱区; 局部增强; 恢复力模型

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0064-08

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.010

## Study on Local Reinforcement of Weak Zone of Special-Shaped Column and Restoring Force Model of Joint

ZHOU Fenghua<sup>1</sup>, HUANG Jianhua<sup>2</sup>

(1. Quzhou Construction Engineering Quality and Safety Supervision Station, Quzhou 324000, China;  
2. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

**Abstract:** In order to improve the seismic performance of the special-shaped column structure under horizontal load and the damage resistance of the weak area, the W-shaped cross-section special-shaped column in the comprehensive transportation hub project of Quzhou West Railway Station of Hangzhou-Quzhou high-speed railway was taken as the object. In view of the stress concentration areas such as the inner corner and the core area of the joint, two local reinforcement schemes of CFRP external reinforcement and ‘inner steel and outer fiber’ composite reinforcement were proposed, and the low-cycle repeated loading test of the full-scale model was carried out. The test results show that the two strengthening measures can effectively improve the bearing capacity, stiffness, deformation capacity and energy dissipation performance of the joints. Among them, the peak load is increased by 10.6% by CFRP external reinforcement, and the peak load is increased by 16.5% by composite reinforcement. The composite reinforcement performs better in controlling the main tensile strain of the inner corner concrete (a decrease of

53.1%), inhibiting the crack width (a decrease of 62.3%), reducing the residual displacement of the joint (a decrease of 56.4%), and increasing the equivalent viscous damping coefficient (up to 26.8%), which shows the comprehensive enhancement effect of the internal inclined reinforcement and the external CFRP. Based on the experimental data, the Bouc-Wen restoring force model considering the local reinforcement effect is constructed. After the model parameters are identified and calibrated, the bearing capacity, hysteretic energy dissipation and stiffness degradation behavior of the reinforced joints can be accurately predicted, and the prediction error is within  $\pm 3.5\%$ . The research results can provide theoretical basis and engineering reference for local seismic enhancement design and nonlinear analysis of special-shaped column structures.

**Key words:** special-shaped column ; weak area ; local enhancement ; restoring force model

## 0 引言

异形柱结构因其良好的建筑空间适应性和灵活的建筑布局能力,在现代建筑结构中得到了广泛应用。然而,相较于传统矩形截面柱,异形柱在截面形状复杂处(如阴角、节点核心区等)往往存在明显的应力集中现象,导致这些区域成为结构的薄弱环节,在地震或强风等水平荷载作用下易发生开裂、变形甚至破坏,影响结构的整体抗震性能和耐久性<sup>[1-2]</sup>。因此,如何对异形柱薄弱区进行有效增强,提升其受力性能与变形能力,成为结构工程领域亟待解决的关键问题之一。

目前,相关学者已对异形柱及其节点开展了较为丰富的研究。乔金丽等<sup>[3]</sup>研究表明,人字形防屈曲约束支撑可显著提升异形柱框架的抗震性能;张锡治等<sup>[4]</sup>通过试验发现,在预制异形柱-钢梁节点核心区加设 X 形钢筋或钢板,可有效提升其受剪承载力和抗震性能;滕振超等<sup>[5]</sup>研究发现,对于 RC T 形柱,提高配筋率可增强其延性和耗能能力;而增大轴压比虽能提高峰值荷载,但会削弱延性和耗能,加速刚度退化;柳阳等<sup>[6]</sup>通过有限元模拟表明,采用弥散裂缝模型可有效分析十字形柱框架节点的裂缝发展与应力分布;戎贤等<sup>[7]</sup>通过试验表明,在核心区配置 X 形钢筋能显著改善高强钢筋异形柱中节点的抗震性能,增强其变形与耗能能力,延缓刚度退化,尤其对 HRB500 钢筋试件效果更明显;李艳艳等<sup>[8]</sup>通过试验与模拟证明,在异形柱节点核心区加入钢骨,可提升节点的承载能力、变形能力及核心区混凝土的抗压能力,改善其受力性能;丁景花等<sup>[9]</sup>对新型装配式人字撑复合墙板异形柱框架的试验与模拟表明,该结构呈现分级破坏顺序,人字撑与框架形成双重抗震体系,可显著提高抗震能力。

然而,现有研究多集中于整体结构或节点宏观性能的增强,针对异形柱局部薄弱区的局部增强研究仍较为缺乏,尤其是在增强措施的协同作用机理、损伤发展过程、恢复力特性等方面仍有待深入探讨<sup>[10-13]</sup>。此外,现有恢复力模型多基于常规截面柱或节点,尚未充分考虑局部增强措施对异形柱节点滞回性能的影响,难以准确预测其在复杂受力状态下的非线性行为<sup>[14-15]</sup>。

基于此,以杭衢高铁衢州西站综合交通枢纽项目中的 W 形截面异形柱为工程背景,针对其阴角与节点核心区等薄弱区域,提出环氧树脂胶粘贴双向碳纤维布(CFRP)外贴增强与“内钢外纤”复合增强两种局部增强方案,开展足尺模型试验研究,分析不同增强措施对节点承载力、刚度、变形能力、裂缝控制、能量耗散等方面的提升效果。构建考虑局部增强的异形柱节点恢复力模型,为异形柱结构的抗震设计与性能评估提供理论依据。

## 1 工程概况

杭衢高铁衢州西站综合交通枢纽项目落客平台采用大型钢结构网架与混凝土主体结构相结合的形式,其中部分作为关键竖向承重构件的柱子设计为 W 形截面异形柱,以兼顾建筑效果与结构受力性能要求。W 形柱截面总宽约 1 200 mm,总高 800 mm,由三个主要肢翼构成,形成两个内凹的“阴角”区域。柱体混凝土设计强度等级为 C50,纵筋采用 HRB500 级钢筋,箍筋采用 HRB400 级钢筋。该柱通过节点与上部钢结构网架连接,受力状态较为复杂。

通过对 W 形柱在竖向荷载及水平风、地震荷载组合作用下的弹性应力场分析,发现在两个内凹阴角区域以及柱顶与钢梁连接的节点核心区,存在明显的应力集中现象,其主拉应力显著高于其他部位。

2 异形柱薄弱区增强方案与性能测试

2.1 局部增强方案设计

设计了三种不同工况的 W 形异形柱-节点足尺模型试验,包括基准模型(无增强)、CFRP 外贴增强模型和复合增强模型。模型按 1:1 比例制作,真实模拟实际结构中的材料、尺寸与构造细节,混凝土强度等级为 C50,纵筋采用 HRB500 级钢筋,箍筋为 HRB400 级钢筋。

2.1.1 CFRP 外贴增强模型

在混凝土施工完成后,对异形柱的薄弱区域(包括两个内凹阴角表面及节点核心区外表面)采用环氧树脂胶粘贴双向碳纤维布(CFRP)两层,纤维布铺设方向与主拉应力方向一致,呈±45°交叉布置。

2.1.2 复合增强模型

该模型采用“内钢外纤”协同增强体系,在浇筑混凝土前,于阴角及节点核心区等薄弱区域内部预埋井字形交叉斜筋,斜筋采用 HRB400 级钢筋,直

径 φ14,斜向布置角度约为 45°。待混凝土达到设计强度并拆模后,再按 CFRP 外贴增强方案粘贴双向碳纤维布两层,形成内部斜筋与外部 CFRP 共同工作的复合增强体系。

2.2 试验加载与试验方案

2.2.1 试验加载

采用电液伺服作动系统进行加载。水平加载由一台 1 000 kN 量程的双向电液伺服作动器实现。竖向荷载则通过两台 500 kN 量程的液压千斤顶施加。

2.2.2 试验方案

建立了多参数、多测点的综合监测体系,主要监测参数及布置见表 1。试验以层间位移角( $\Delta/H$ ,其中  $\Delta$  为柱顶水平位移, $H$  为柱净高)为主要控制参数,按照 0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%、2.00%、2.50%、3.00%、3.50%、4.00% 的顺序逐级递增。每级位移角下循环加载 3 次,以充分考察试件的强度、刚度退化及滞回特性。

表 1 试验监测方案

| Table 1 Test monitoring scheme |                  |                         |                        |
|--------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|
| 监测参数                           | 测量位置             | 物理意义                    | 测量方法/设备                |
| 柱顶水平荷载-位移滞回曲线                  | 柱顶中心             | 反映试件整体承载力、变形能力及耗能能力     | 1 000 kN 作动器内置荷载与位移传感器 |
| 节点核心区剪切变形角                     | 节点区对角线布置位移计      | 表征节点刚度退化与累积损伤           | 对角布置高精度位移计,通过几何关系计算    |
| 阴角混凝土表面主拉应变                    | 阴角表面粘贴应变花        | 监测薄弱区混凝土表面开裂趋势与应力集中程度   | 应变花(三向应变片)配合静态应变仪      |
| 阴角主裂缝宽度                        | 最宽主裂缝处           | 损伤可视化指标,反映裂缝发展程度        | 裂缝宽度观测仪(0.01 mm 精度)    |
| CFRP 表面有效应变                    | CFRP 表面中心位置      | 评估 CFRP 材料利用率及增强有效性     | 单向应变片粘贴于 CFRP 表面       |
| 声发射累计振铃计数                      | 阴角及节点核心区布置声发射传感器 | 监测混凝土内部微裂缝萌生、扩展等损伤累积    | 声发射系统(多通道)             |
| 混凝土表面与 CFRP 界面剪应力              | CFRP 端部及跨中应变片    | 评估 CFRP 与混凝土界面黏结性能及剥离风险 | 应变梯度法计算界面剪应力           |
| 节点区域残余位移                       | 节点区域布置位移计        | 反映节点塑性变形累积及可恢复性         | 位移计测量卸载后残余变形           |
| 等效黏滞阻尼系数                       | 整柱滞回曲线计算得到       | 评价试件在往复荷载下的能量耗散能力       | 根据滞回曲线面积计算得到           |

3 异形柱薄弱区的增强效果分析

3.1 柱顶水平荷载峰值承载力

由图 1 可知,随着层间位移角的增大,三种工况下柱顶水平荷载承载力均呈现先增长后略有下降的趋势,符合构件在往复荷载作用下的滞回特征。在位移角为 2.00% 时,荷载承载力达到峰值:基准模型为 850 kN,CFRP 外贴增强为 940 kN,复合增强

为 990 kN。与基准模型相比,CFRP 外贴增强工况的峰值荷载承载力提高了 10.6%,复合增强工况的峰值荷载承载力较基准模型提高了 16.5%,后者的提升幅度更大。

在中小位移阶段(位移角≤1.50%),复合增强工况的荷载值承载力始终高于 CFRP 外贴增强,说明预埋斜筋与 CFRP 的协同作用在弹性及弹塑性初期阶段对刚度与承载力有更显著的作用。进入大位移阶

段后（层间位移角 $\geq 2.50\%$ ），荷载承载力开始缓慢下降，但复合增强工况的荷载衰减略缓于 CFRP 外贴增强，体现出更好的后期承载稳定性。

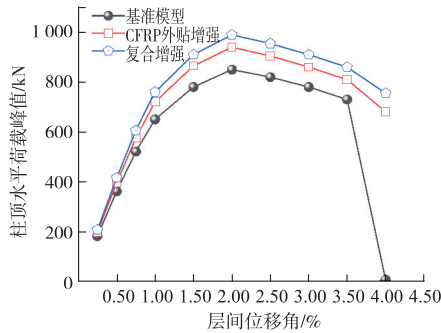


图1 柱顶水平荷载承载力峰值

Fig. 1 Peak value of horizontal load bearing capacity of column top

### 3.2 节点核心区剪切变形角

由图2可知，随着位移角的增加，三种工况下节点核心区的剪切变形角均逐步增大，表明节点区域在往复荷载作用下发生累积损伤，刚度逐渐退化。在相同位移角下，CFRP 外贴增强与复合增强工况的剪切变形角均显著小于基准模型。位移角为4%时，基准模型的剪切变形角为  $14.0 \times 10^{-3}$  rad，而 CFRP 外贴增强与复合增强分别降低至  $11.2 \times 10^{-3}$ 、 $9.3 \times 10^{-3}$  rad，说明两种增强措施均能有效约束节点核心区的剪切变形，延缓刚度退化进程。

在各级位移角下，复合增强工况的剪切变形角均略低于 CFRP 外贴增强，尤其是在中高位移阶段（位移角 $\geq 2\%$ ），其控制变形的优势更为明显。这表明内设斜筋与外部 CFRP 的协同作用能够更有效地分担节点区的剪力，增强节点整体性与抗剪切变形能力。

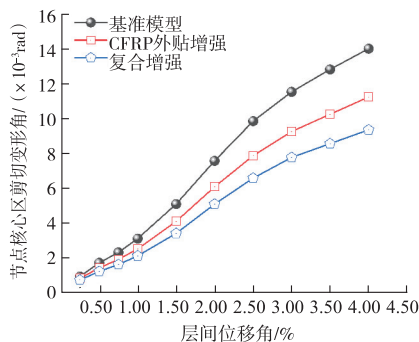


图2 节点核心区剪切变形角

Fig. 2 Shear deformation angle of joint core area

### 3.3 阴角混凝土表面主拉应变

由图3可知，随着位移角的增大，三种工况下的混凝土表面主拉应变均持续增长，表明该区域应力集中现象随荷载增加而加剧。然而，增强工况的应变值显著低于基准模型，说明增强措施有效抑制了阴角区的拉伸应变发展。位移角为4%时，基准模型的应变高达1450，而 CFRP 外贴增强和复合增强分别降至980和680，这说明复合增强在控制混凝土拉伸应变方面具有明显优势。尤其是进入中高位移阶段（位移角 $\geq 2\%$ ）后，复合增强相较于 CFRP 外贴增强的应变降低幅度进一步扩大，反映出“内钢外纤”协同体系在约束混凝土变形、延缓开裂方面的综合作用更为显著。

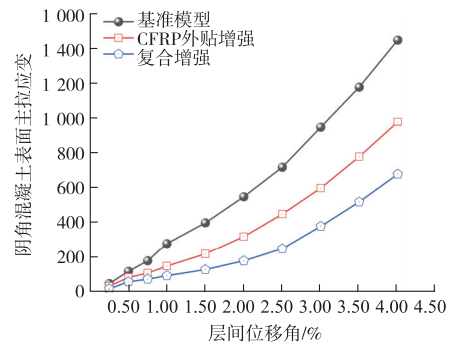


图3 阴角混凝土表面主拉应变

Fig. 3 The main tensile strain on the surface of negative corner concrete

### 3.4 阴角区主裂缝宽度

由图4可知，随着位移角增大，阴角区主裂缝宽度均呈逐渐扩大趋势，表明该区域损伤持续发展。对比不同工况可知，CFRP 外贴增强与复合增强均能显著抑制裂缝开展。在位移角为4%时，基准模型主裂缝宽度达3.85 mm，而 CFRP 外贴增强与复合增强分别为2.55、1.45 mm，降幅分别为33.8%与62.3%。说明复合增强在控制裂缝宽度方面优势明显，尤其在进入高位移阶段后（层间位移角 $\geq 3.00\%$ ），复合增强工况的裂缝宽度增长显著趋缓，表明其增强体系能更有效地约束裂缝扩展，维持混凝土的整体性。

此外，基准模型在位移角为0.75%时即出现裂缝，而 CFRP 外贴增强与复合增强在1%位移角下才分别出现0.08、0.03 mm的裂缝，表明增强措施能显著延迟裂缝出现时机，延缓损伤进程。

## 材料科学

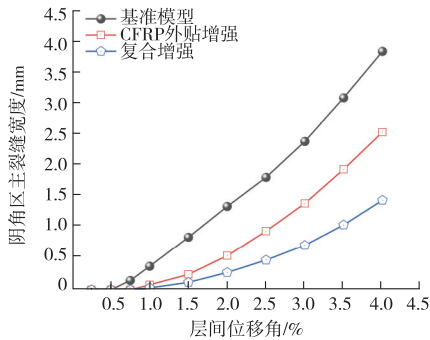


图4 阴角区主裂缝宽度

Fig. 4 Width of main crack in negative corner area

## 3.5 CFRP 表面有效应变

由图 5 可知,随着层间位移角增加,CFRP 表面有效应变均持续增长,说明 CFRP 材料在加载过程中逐渐发挥增强作用,并有效分担了外部荷载。在相同位移角下,CFRP 外贴增强工况的 CFRP 表面应变均显著高于复合增强。以位移角为 4% 为例,CFRP 外贴增强的应变值高达 6 800,而复合增强仅为 4 600,后者为前者的 67.6%。这一差异说明,在复合增强体系中,由于内部预埋斜筋的存在,其承担了部分拉应力,从而降低了对 CFRP 材料的直接依赖,改善了 CFRP 的受力状态,避免其过早达到极限应变而发生脆性剥离或断裂。

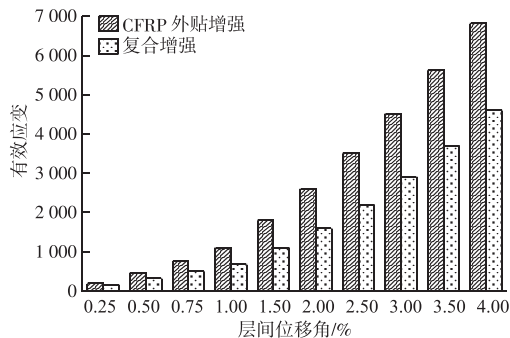


图5 CFRP 表面有效应变

Fig. 5 Effective strain of CFRP surface

从应变增长趋势来看,两种工况的应变增长曲线均近似线性,表明 CFRP 在整个加载过程中均处于有效工作状态。但复合增强工况的应变增长率相对较低,进一步说明其增强体系受力更为合理,内外部增强材料协同作用更为均衡。

## 3.6 声发射累计振铃计数

由图 6 可知,随着层间位移角的增大,三种工况

下累计振铃计数均呈指数型增长趋势,反映了异形柱薄弱区内部损伤的持续累积。位移角为 4% 时,基准模型累计振铃计数高达 750.0,而 CFRP 外贴增强与复合增强分别降至 320.0 与 158.0,分别相当于基准模型的 42.7% 与 21.1%。表明两种增强措施有效抑制了混凝土内部微裂缝的萌生与扩展,其中复合增强的效果尤为显著。

从损伤发展阶段来看,在小位移阶段(层间位移角  $\leq 1.00\%$ ),增强工况的累计振铃计数已明显低于基准模型,说明增强措施能在早期即发挥抑制损伤的作用。随着层间位移角增加,复合增强与 CFRP 外贴增强的累计振铃计数差距逐渐扩大,表明复合增强体系中预埋斜筋与 CFRP 的协同作用能更有效地约束内部损伤发展,提升结构整体韧性。

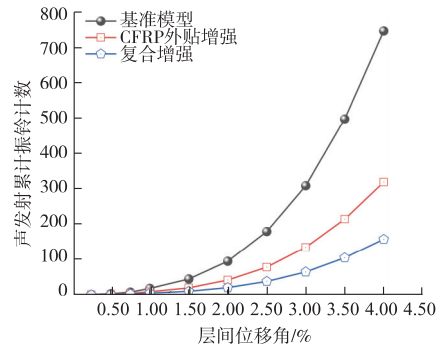


图6 声发射累计振铃计数

Fig. 6 Acoustic emission cumulative ringing count

## 3.7 混凝土表面与 CFRP 界面剪应力

由图 7 可知,随着层间位移角的增加,两种增强工况下界面剪应力均呈现逐渐增大的趋势,说明 CFRP 与混凝土之间的黏结应力随荷载水平提升而逐步发挥。在相同层间位移角下,复合增强工况的界面剪应力始终低于 CFRP 外贴增强工况。层间位移角为 4.00% 时,CFRP 外贴增强工况的界面剪应力为 5.0 MPa,而复合增强仅为 3.3 MPa,后者为前者的 66%。这一差异表明,复合增强体系中由于预埋斜筋承担了部分剪力,显著减轻了 CFRP 与混凝土界面的剪应力负担,降低了界面剥离风险,提升了增强体系的整体可靠性和耐久性。

从增长趋势来看,两种工况下界面剪应力的增长均呈现近似线性关系,说明在整个加载过程中 CFRP 与混凝土之间保持着有效的黏结。但在中高位

移阶段（层间位移角 $\geq 2.00\%$ ），复合增强工况的剪应力增长斜率更为平缓，说明其受力体系更为合理，内外部增强材料的协同作用更有效，能实现更均衡的应力传递与分配。

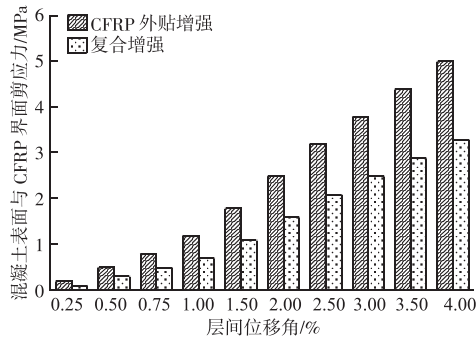


图 7 混凝土表面与 CFRP 界面剪应力

Fig. 7 Shear stress between concrete surface and CFRP interface

### 3.8 节点区域残余位移

由图 8 可知，随着层间位移角的增大，三种工况下节点区域残余位移均持续增加，表明在往复荷载作用下，节点区域产生不可恢复的塑性变形，累积损伤不断加重。增强措施显著降低了残余位移，其中复合增强效果最为明显。在各级层间位移角下，CFRP 外贴增强与复合增强工况的残余位移均明显小于基准模型。以层间位移角 4.00% 为例，基准模型残余位移达 11.0 mm，CFRP 外贴增强残余位移为 7.2 mm（降幅 34.5%），复合增强残余位移为 4.8 mm（降幅 56.4%）。说明增强措施能有效抑制节点区域的塑性变形累积，提高结构的可恢复性和抗变形能力。

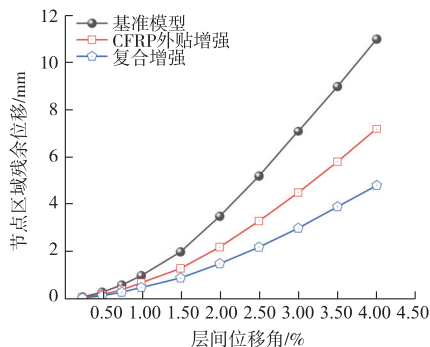


图 8 节点区域残余位移

Fig. 8 Residual displacement of node area

从小位移阶段开始（层间位移角 $\leq 1.00\%$ ），增强工况的残余位移已低于基准模型，表明增强措施在加载早期即发挥作用。随着位移增加，复合增强与

CFRP 外贴增强的差距逐步扩大，说明内设斜筋与外部 CFRP 的协同作用能更有效地分担节点区应力，减少不可恢复变形，提升节点整体韧性与变形恢复能力。

### 3.9 等效黏滞阻尼系数

由图 9 可知，随着层间位移角的增大，三种工况的等效黏滞阻尼系数均呈现持续上升趋势，表明试件在进入弹塑性阶段后耗能能力逐步增强。在相同位移角下，增强工况的阻尼系数始终高于基准模型，且复合增强工况表现最优。在层间位移角为 4.00% 时，基准模型的等效黏滞阻尼系数为 18.2%，CFRP 外贴增强工况提升至 23.5%，而复合增强工况进一步提升至 26.8%，说明两种增强措施均能显著提升异形柱节点的滞回耗能能力，且“内钢外纤”的复合增强体系由于内外材料的协同工作，在塑性阶段能更有效地通过钢筋屈服、混凝土微裂缝以及 CFRP 的弹性变形等多种机制耗散能量。

此外，在中小位移阶段（层间位移角 $\leq 1.50\%$ ），复合增强工况的阻尼系数增长更为平缓，但仍稳定高于 CFRP 外贴增强，说明其增强体系在弹性及初塑性阶段即能提供更优的耗能机制。进入大位移阶段后（层间位移角 $\geq 2.00\%$ ），复合增强工况的阻尼系数增长显著加快，并逐渐拉开与 CFRP 外贴增强的差距，表明其内部预埋斜筋在塑性阶段充分发挥作用，与外部 CFRP 共同形成了多道、高效的抗震与耗能防线，极大地提升了节点在罕遇地震作用下的延性和生存能力。

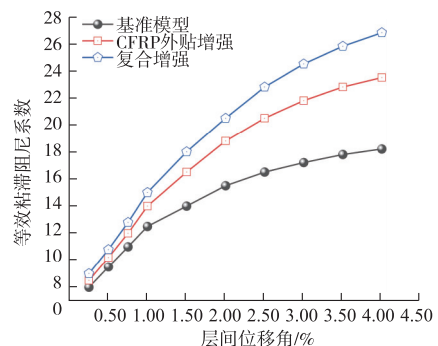


图 9 等效黏滞阻尼系数

Fig. 9 Equivalent viscous damping coefficient

## 4 考虑局部增强的节点恢复力模型

### 4.1 节点恢复力模型构建

以 Bouc-Wen 模型为基础，引入局部增强系数来

材料科学

反映不同增强方式对节点刚度、承载力及滞回特性的影响。模型采用如下形式的微分方程描述恢复力  $F$  与位移  $x$  的关系：

$$F(x) = \alpha K_0 x + (1 - \alpha) K_0 z \tag{1}$$

式中： $K_0$  为初始刚度，kN/mm； $\alpha$  为刚度退化系数，反映增强后刚度退化程度； $z$  为滞回变量，由以下方程控制：

$$z = Ax - \beta |x| |z|^{n-1} z - \gamma x |z|^n \tag{2}$$

式中： $A$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $n$  为模型参数，控制滞回曲线的形状、耗能能力与软化特性。

4.2 模型参数识别

基于试验实测的柱顶水平荷载-位移滞回数据，采用非线性最小二乘优化算法（Levenberg-Marquardt 算法）对 Bouc-Wen 模型的参数进行识别与标定。目标函数定义为模型预测恢复力与实测恢复力之差的平方和最小化。参数识别过程中，考虑了不同增强工况对节点力学性能（尤其是刚度、承载力及滞回退化特性）的影响，确保模型具有明确的物理意义和良好的数值稳定性。各工况识别出的模型参数见表 2。

表 2 Bouc-Wen 模型参数识别结果  
Table 2 Identified parameters of Bouc-Wen model

|           | $K_0 / (\text{kN/mm})$ | $\alpha$ | $A$  | $\beta$ | $\gamma$ | $n$ |
|-----------|------------------------|----------|------|---------|----------|-----|
| 基准模型      | 340                    | 0.020    | 1.00 | 0.80    | 0.20     | 1.5 |
| CFRP 外贴增强 | 381                    | 0.018    | 1.08 | 0.68    | 0.15     | 1.5 |
| 复合增强      | 391                    | 0.016    | 1.12 | 0.56    | 0.12     | 1.5 |

4.3 模型预测与实测对比

为验证模型的准确性，将模型预测的滞回曲线与实测滞回曲线进行对比。选取层间位移角为 1.00%、2.00%、3.00% 和 4.00% 四个典型工况进行对比分析。

4.3.1 承载力对比

在各级层间位移角下，模型预测的峰值承载力与实测值对比见表 3。模型预测的峰值承载力与实测值吻合良好，最大相对误差在  $\pm 3.5\%$  以内。在各级位移角下，模型的预测精度均较高，且能准确捕捉到增强措施带来的承载力提升。在层间位移角为 2.00% 时，模型准确预测了 CFRP 增强和复合增强工况的峰值承载力（950、990 kN）与实测值（940、980 kN）相近，且反映出复合增强模型承载力略高于 CFRP 增强模型的特点。表明“局部增强系数”

能有效反映不同增强方案对节点极限承载力的贡献。

表 3 峰值承载力实测值与预测值对比  
Table 3 Comparison of measured and predicted peak bearing capacity

| 层间位移角/% | 基准模型 |     | CFRP 增强 |     | 复合增强 |     |
|---------|------|-----|---------|-----|------|-----|
|         | 实测   | 预测  | 实测      | 预测  | 实测   | 预测  |
| 1.00    | 650  | 640 | 720     | 715 | 780  | 775 |
| 2.00    | 850  | 860 | 940     | 950 | 980  | 990 |
| 3.00    | 780  | 790 | 860     | 870 | 920  | 930 |
| 4.00    | 680  | 690 | 755     | 765 | 810  | 820 |

4.3.2 滞回耗能对比

通过计算滞回环面积，得到累积耗能对比结果见表 4，模型预测的累积耗能与实测值具有很高的吻合度，预测误差基本控制在  $\pm 3.0\%$  以内。模型准确反映了增强措施显著提升节点耗能能力的效果，且复合增强模型的耗能优势更为突出。在层间位移角为 4.00% 时，复合增强模型预测累积耗能为 39 380 kN·mm，与实测值 39 500 kN·mm 非常接近，而相较于基准模型（预测值 31 850 kN·mm），其耗能提升幅度达 23.6%，验证了复合增强体系在多机制协同耗能方面的优越性。此外，模型预测的耗能增长趋势与实测一致，表明 Bouc-Wen 模型中的滞回参数  $A$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  能够合理描述节点在不同损伤阶段的能量耗散特征。

表 4 累积耗能实测值与预测值对比  
Table 4 Comparison of measured and predicted cumulative hysteretic energy dissipation

| 层间位移角/% | 基准模型   |        | CFRP 增强 |        | 复合增强   |        |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
|         | 实测     | 预测     | 实测      | 预测     | 实测     | 预测     |
| 1.00    | 5 200  | 5 150  | 5 800   | 5 760  | 6 200  | 6 160  |
| 2.00    | 12 500 | 12 400 | 13 800  | 13 720 | 14 800 | 14 720 |
| 3.00    | 21 000 | 20 850 | 23 500  | 23 400 | 25 500 | 25 400 |
| 4.00    | 32 000 | 31 850 | 36 000  | 35 880 | 39 500 | 39 380 |

4.3.3 刚度退化趋势对比

为考察模型对节点刚度退化历程的模拟能力，选取层间位移角为 2.00% 的工况进行分析。节点当前刚度定义为该位移角下第一循环滞回环卸载段的割线刚度，与初始刚度  $K_0$  的比值即为刚度退化系数，结果对比见表 5。实测与预测的刚度退化系数高度一致。与基准模型（退化至初始刚度的 68%）相比，CFRP 增强模型和复合增强模型的刚度保持能力更强，分别退化至初始刚度的 75% 和 78%。模型准确捕捉了这一趋势，预测值与实测值的偏差均在 0.3% 以内。表明通过参数  $\alpha$  和滞回变量  $z$  的有效控

制，本文模型能够合理模拟增强措施对节点刚度退化进程的延缓作用，特别是复合增强体系在维持节点整体刚度方面的优势。

表 5 层间位移角 2.00% 时刚度退化系数对比  
Table 5 Comparison of stiffness degradation coefficients at drift ratio of 2.00%

| 模型      | 实测   | 预测    |
|---------|------|-------|
| 基准模型    | 0.68 | 0.677 |
| CFRP 增强 | 0.75 | 0.748 |
| 复合增强    | 0.78 | 0.778 |

5 结论

以实际工程中的 W 形截面异形柱为研究对象，通过足尺模型试验研究了不同增强措施对节点力学性能与滞回特性的影响，得到主要结论如下：

(1) CFRP 外贴增强与“内钢外纤”复合增强均能显著提升异形柱节点的抗震性能。在峰值承载力方面，两种增强方案均能提高峰值荷载；在变形控制方面，复合增强效果更为突出，可使阴角混凝土主拉应变降低 53.1%、主裂缝宽度降低 62.3%、节点残余位移降低 56.4%，并显著延缓裂缝出现与损伤发展。

(2) 采用“内钢外纤”复合增强体系，通过内部预埋斜筋与外部 CFRP 的协同工作，可有效分担拉剪应力、降低 CFRP 剥离风险，在提升节点耗能能力（等效黏滞阻尼系数达 26.8%）与刚度保持能力的同时形成多道抗震防线；该局部增强措施兼顾施工可行性与性能提升效果，适用于异形柱薄弱区的抗震加固与新建结构性能优化，具有明确的工程应用价值。

(3) 基于 Bouc-Wen 模型构建的考虑局部增强的节点恢复力模型，能够准确模拟增强后节点的滞回行为。模型参数经试验标定后，在承载力、累积耗能及刚度退化等方面的预测值与实测值吻合良好，误差控制在±3.5%以内，验证了模型的有效性与适用性，可为异形柱结构的抗震设计与非线性动力分

析提供可靠工具。

参 考 文 献

[1] 陈海彬, 赵寅鹏, 张皓铭, 等. L 形内置钢管混凝土异形柱火后双向偏心受压性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46 (增刊 1): 124-132.

[2] 张相勇, 马彬, 俞浩, 等. 异形柱-双钢板组合剪力墙结构体系的设计研究与工程应用 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (21): 114-119.

[3] 乔金丽, 丁冬, 任泽民, 等. 防屈曲约束支撑对异形柱框架结构抗震性能增强作用的试验研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (16): 112-119.

[4] 张锡治, 高华超, 张佳玮, 等. 混凝土异形柱-钢梁装配式节点受剪性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (9): 84-94.

[5] 滕振超, 赵添佳, 刘宇, 等. T 形截面 RC 异形柱抗震性能数值分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41 (3): 1-7.

[6] 柳阳, 刘洪兵, 任兴民. 钢筋混凝土十字形柱框架节点裂缝开展数值模拟研究 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (5): 14-21.

[7] 戎贤, 杨春晖, 张建新. 高强钢筋混凝土异形柱中节点抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2017, 47 (6): 22-25.

[8] 李艳艳, 苏恒博, 张学辉. 钢骨增强异形柱框架节点受力性能及有限元分析 [J]. 世界地震工程, 2017, 33 (1): 144-150.

[9] 丁景花, 钱坤, 秦兰兰. 装配式人字撑复合墙板异形柱框架抗震性能研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (3): 103-110.

[10] 韦志成, 周世武, 黄子宁, 等. CFRP 条带加固圆端形铝管混凝土柱轴压力学性能 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (2): 15-20.

[11] 马江萍. 圆多腔体中空钢管混凝土抗扭承载力分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 102-109.

[12] 张胜利, 张哲畅, 柴方华, 等. 模块墙装配式建筑 T 形轻钢混凝土组合异形柱偏压受力性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27 (9): 83-90.

[13] 焦立颖, 宋少民, 马永胜, 等. Y 型钢管混凝土配比优化试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 39-44.

[14] 范夕森, 王伟历. 混凝土异形柱-钢梁组合结构节点抗震性能研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2024, 39 (6): 8-16.

[15] 刘祖强, 陈炜灿, 毛冬旭, 等. 型钢混凝土异形柱框架空间受力性能分析 [J]. 工程力学, 2021, 38 (7): 120-132, 158.