

# Experimental Study on Hysteretic Behavior of Prefabricated and Replaceable Energy Dissipation Hinge Connections

Qiong Chen<sup>1</sup> Feng Zhang<sup>2</sup> Yongchao Ma<sup>3</sup>

1. MCC TianGong Group Corporation Limited, Tianjin, 300000, China

2. Fujian Zhejiang Construction Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361100, China

3. Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian, 350118, China

## Abstract

Prefabricated and replaceable energy-dissipating hinge connection component is proposed to enhance the seismic performance of prefabricated structures, and research is conducted on the repair functionality of the energy-dissipating hinge connection after earthquake damage. The prefabricated replaceable energy-dissipating hinge connection component is installed in the plastic hinge zone of the precast beam end of a new type of prefabricated joint. A low-cycle repeated loading test is carried out on the energy-dissipating hinge connection. Based on this test, only the damaged energy-dissipating steel plate restraining connectors within the energy-dissipating hinge connection are replaced, and a repair specimen test is conducted to investigate the failure modes, hysteretic behavior, and post-earthquake recoverable functionality of the prefabricated replaceable energy-dissipating hinge connection. The results indicate that the damage and failure of the new type of prefabricated joint are concentrated in the energy-dissipating steel plate restraining connectors of the replaceable energy-dissipating hinge connection; the prefabricated replaceable energy-dissipating hinge connection exhibits good performance in terms of load-bearing capacity, energy dissipation capacity, and stiffness degradation; and the hysteretic behavior of the energy-dissipating hinge connection can be restored after replacing the damaged energy-dissipating steel plate restraining connectors.

## Keywords

Prefabricated T-joint; replaceable energy-dissipating plastic hinge; energy-dissipating steel plate restraint connector; recoverable functionality; hysteretic performance

## 装配式可更换耗能铰连接滞回性能试验研究

陈琼<sup>1</sup> 张峰<sup>2</sup> 马永超<sup>3</sup>

1. 中冶天工集团有限公司, 中国·天津 300000

2. 福建浙建建设工程有限公司, 中国·福建 厦门 361100

3. 福建理工大学, 中国·福建 福州 350118

## 摘 要

提出一种装配式可更换耗能铰连接构件, 提高装配式结构的抗震性能, 并对耗能铰连接震损后修复功能展开研究。装配式可更换耗能铰连接构件设置在新型装配式节点的预制梁端塑性铰区域, 开展耗能铰连接低周往复荷载试验, 然后在该试验的基础上仅更换耗能铰连接中破坏的耗能钢板约束连接件, 进行修复试件试验, 考察装配式可更换耗能铰连接的破坏模式、滞回性能和震损后可恢复功能。结果表明: 新型装配式节点的损伤破坏集中在可更换耗能铰连接中的耗能钢板约束连接件; 装配式可更换耗能铰连接具有良好的承载能力、耗能能力和刚度退化等性能; 耗能铰连接在更换破坏的耗能钢板约束连接件后其滞回性能可恢复。

## 关键词

新型装配式节点; 可更换耗能铰连接; 耗能钢板约束连接件; 可恢复功能; 滞回性能

## 1 引言

装配式混凝土结构具有质量稳定性高、施工效率高、

节能减排、施工安全分险低等优势。为提高装配式钢筋混凝土结构的抗震性能, 国内外学者围绕装配式梁柱节点消能减震、震损后修复功能等展开研究。欧进萍等<sup>[1]</sup>提出了一种预制装配式结构梁柱摩擦-金属屈服两级耗能节点, 构建了一个高性能的预制装配建筑抗震体系。焦志安等<sup>[2]</sup>提出新型可恢复功能半刚性节点, 通过替换 T 形耗能板, 结构功能可迅速复原。郭荡<sup>[3]</sup>提出了带可更换低屈服点钢耗能梁段的梁柱节点, 可更换低屈服点钢耗能梁段具有理想的损伤

【基金项目】福建省住房和城乡建设科学技术计划项目(项目编号: 2025-K-60)。

【作者简介】陈琼(1984-), 男, 中国重庆人, 本科, 高级工程师, 从事道路桥梁研究。

分布和发展顺序，能够实现损伤位置的有效控制。Song L L 等<sup>[4]</sup>提出带有腹板摩擦装置的自复位混凝土梁柱新型连接方式。李芳玉等<sup>[5]</sup>提出一种装配式可更换分级屈服耗能连接，实现结构屈服损伤可控并增强震后可恢复性。

基于上述研究背景，提出一种装配式可更换耗能铰连接构件，设置在新型装配式节点梁端，形成损伤可控耗能区域。开展装配式可更换耗能铰连接低周往复荷载试验，考察耗能铰连接构件的破坏模式、滞回性能等，探讨耗能铰连接中破坏的耗能钢板约束连接件更换后其滞回性能可恢复。

## 2 装配式可更换耗能铰连接构件

装配式可更换耗能铰连接构件，如图 1 所示。可更换耗能铰连接由销轴连接件和耗能钢板约束连接件组成，销轴连接件和耗能钢板约束连接件端部焊接带螺栓孔端板的型钢；耗能钢板约束连接件由耗能钢板（菱形开孔削弱）和约束套筒组成；通过高强螺栓完成可更换耗能铰连接与预制梁、柱构件的拼接，可更换耗能铰连接的销轴连接件和耗能钢板约束连接件可独立拼装。在遭遇强烈地震时，新型装配式节点的损伤与能量耗散主要集中于耗能铰连接，其中销轴连接件承担剪力作用，而上下耗能钢板约束连接件则主要承受弯矩。若节点在地震中受损，仅需通过替换耗能铰连接中的耗能钢板约束连接件，即可迅速恢复耗能铰连接构件的原有功能，从而实现震后的快速修复与功能重建。

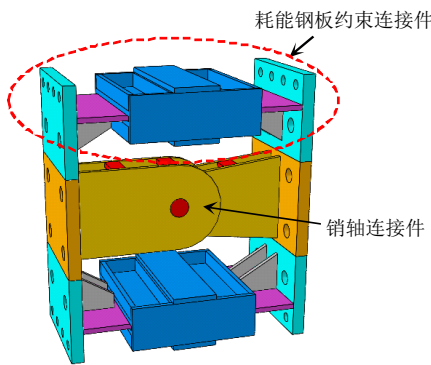


图 1 装配式可更换耗能铰连接构件

## 3 耗能铰连接滞回性能试验

### 3.1 试件设计

装配式可更换耗能铰连接构件设置在新型装配式节点梁端，节点试件的柱高 3040mm，柱截面尺寸为 400 mm × 400mm；梁长 1800mm，梁截面尺寸为 250 mm × 500mm；混凝土强度为 C50。各部位的构造图与几何尺寸如图 2、图 3 所示。

### 3.2 材料性能

本次试验中，所有预制构件均采用了 C50 级别的商品混凝土，其物理性能如下：混凝土抗压强度为 56MPa、混凝土抗拉强度为 7.6MPa、弹性模量为 35400MPa、泊松比为 0.194。耗能钢板（菱形开孔削弱）采用 Q235 级钢材，其余

部位所用的钢材均为 Q345 级钢材。梁柱的纵向钢筋与箍筋均为 HRB400 级。钢材力学性能，如表 1 所示。

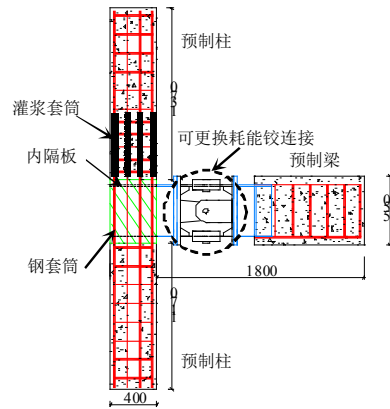
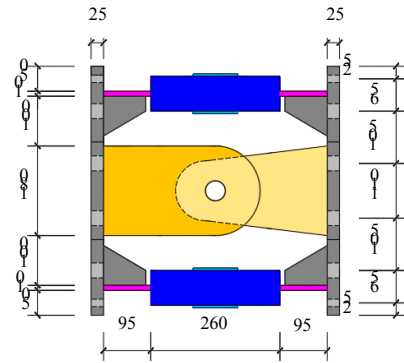
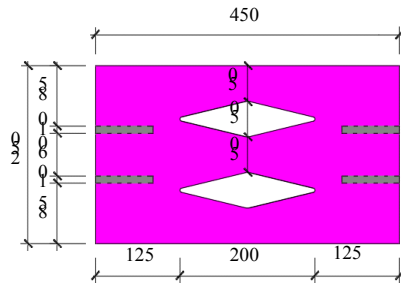


图 2 新型装配式节点构造（单位：mm）



(a) 可更换耗能铰连接正视图



(b) 耗能钢板（菱形开孔削弱）

图 3 可更换耗能铰连接构造（单位：mm）

### 3.3 试验装置与加载方案

试验加载装置如图 4 所示。柱底采用了铰接连接方式，而梁端则通过可灵活调节的支撑系统同样实现了铰接。在试验加载阶段，柱顶位置利用液压千斤顶稳定地施加恒定的轴力，大小为 1100kN，轴压比精确控制在 0.3。为了模拟低周往复荷载，预制柱上端的左侧安装了一个 500kN 的 MTS 液压伺服作动器。柱顶配置了滑动支座，模拟二阶效应。试验严格遵循了《建筑抗震试验方法规程》（JGJ101-2015）要求，并采用了荷载 - 位移双控制的加载方法，以确保试验结果的准确性和可靠性。

表 1 钢材力学性能

钢材(筋)型号	板厚(直径)t(d)/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	屈服应变 $\mu \epsilon$	极限强度 $f_u$ /MPa
Q235	10	269.8	1659	373.6
Q345	10	374.2	2322	489.7
HRB400	8	432.2	2612	572.5
HRB400	18	419.9	2446	558.5
HRB400	22	414.9	2527	563.7

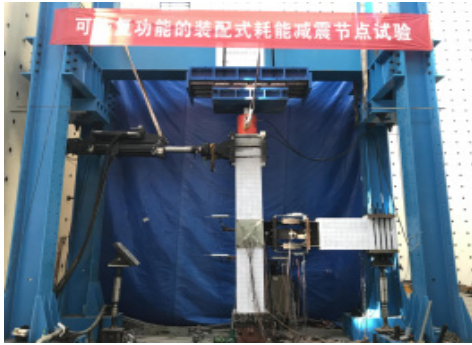
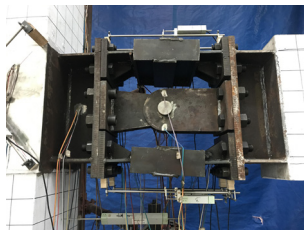


图 4 试验装置

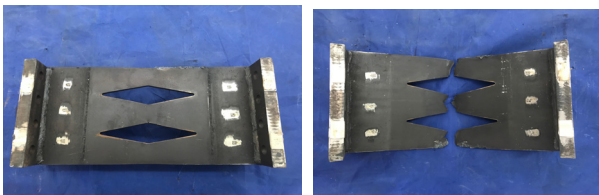
## 4 试验现象及破坏形态

### 4.1 装配式可更换耗能铰连接 R1 加载试验

图 5 为耗能铰连接 R1 破坏模式。新型装配式节点试件 J-R-1 加载到  $6\Delta_y$  时, 下可更换耗能钢板约束连接件发出声响, 试件 J-R-1 承载力大幅下降, 试验终止, 上、下柱未出现裂缝。试验结束后, 为进一步分析耗能钢板(菱形开孔削弱)的破坏模式, 切开约束套筒, 如图 5 (b)、(c) 所示。图 5 (b) 表明, 上耗能钢板(菱形开孔削弱)削弱截面最大开孔处出现开裂与颈缩现象; 图 5 (c) 表明, 下耗能钢板(菱形开孔削弱)削弱截面最大开孔处出现整体断裂, 颈缩现象明显。



(a) 耗能铰连接破坏模式



(b) 上钢板破坏局部详图 (c) 下钢板破坏局部详图

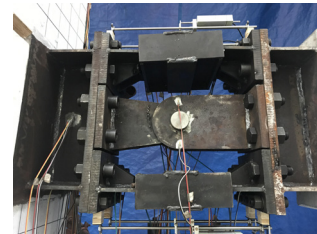
图 5 耗能铰连接 R1 破坏模式

### 4.2 装配式可更换耗能铰连接 R2 加载试验

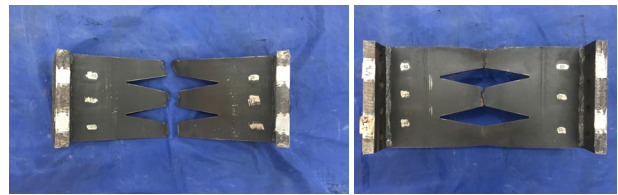
在试件 J-R-1 试验后, 仅通过更换可更换耗能铰连接中破坏的上、下耗能钢板约束连接件, 完成节点修复, 进行装配式可更换耗能铰连接 R2 加载试验。

新型装配式节点试件 J-R-2 在加载位移达到  $6\Delta_y$  时, 滞回曲线出现下降; 加载的第二圈循环中, 上可更换耗能钢板约束连接件发出轻微声响, 滞回曲线明显下降; 加载的第三圈循环中, 上可更换耗能钢板约束连接件发出声响, 承载力大幅下降, 试验终止。

试验结束后, 切开约束套筒观察耗能钢板(菱形开孔削弱)的破坏模式, 如图 6 (b)、(c) 所示。图 6 (b) 表明, 上耗能钢板(菱形开孔削弱)削弱截面最大开孔处出现断裂, 颈缩现象明显; 图 6 (c) 表明, 下耗能钢板(菱形开孔削弱)削弱截面最大开孔处出现开裂、断裂, 颈缩现象明显。两次试验的破坏模式相近。



(a) 耗能铰连接破坏模式



(b) 上钢板破坏局部详图 (c) 下钢板破坏局部详图

图 6 耗能铰连接 R2 破坏模式

## 5 试验结果及分析

### 5.1 节点荷载 P- 位移 $\Delta$ 滞回曲线

图 7 为节点试件 J-R-1、J-R-2 在低周往复荷载试验中的荷载 P- 位移  $\Delta$  滞回曲线。由图 7 可知, 新型装配式节点试件在屈服后, 对试件进行位移加载, 可更换耗能铰连接中耗能钢板约束连接件的耗能钢板(菱形开孔削弱)进入塑性耗能阶段, 试件的耗能和塑性变形集中在耗能钢板的菱形开孔削弱截面处, 节点承载力随位移加载增加而逐渐增大; 约束套筒有效保护耗能钢板(菱形开孔削弱), 防止其发生面外屈曲。在加载到  $6\Delta_y$  之后, 由于耗能钢板(菱形开孔削弱), 最大削弱截面处出现开裂、断裂和颈缩现象, 承载力出现明显下降。试件 J-R-1 与 J-R-2 的滞回曲线呈现出饱满且几乎重合的特征, 这意味着两者在承载力、变形能力以及耗能能力等抗震性能指标上高度相近。表明仅更换受损的耗能钢板约束连接件, 试件的抗震性能可以得到有效的恢复。

### 5.2 节点能量耗散能力

依据文献《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-2015), 计算获得各级荷载下的累积滞回耗能, 如图 8 所示。图 8 表

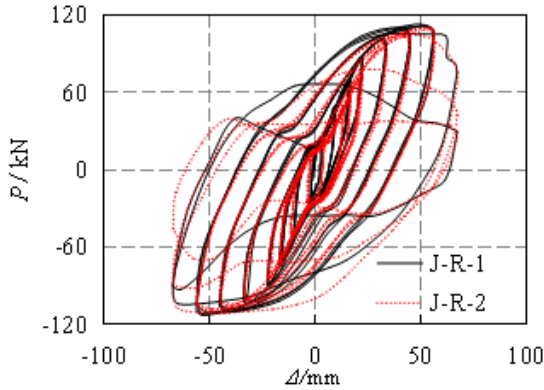


图 7 试件荷载 P- 位移 Δ 滞回曲线

明, 新型装配式节点试件 J-R-1 总耗能 46.33 kN·m, 试件 J-R-2 总耗能 44.52 kN·mm。表明仅更换破坏的耗能钢板约束连接件, 修复新型装配式节点后, 能恢复其能量耗能能力。

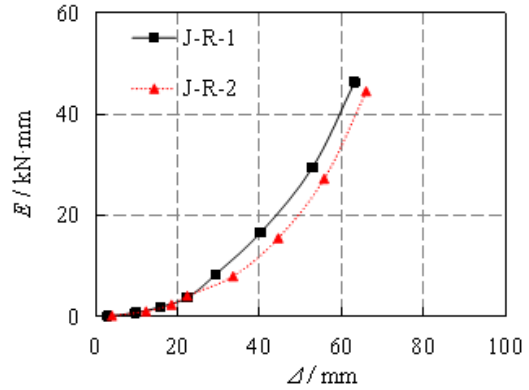


图 8 试件累积滞回耗能

### 6 结论

新型装配式节点的损伤破坏集中在可更换耗能铰连接中的耗能钢板约束连接件, 主体构件基本无损坏; 节点试件 J-R-1、J-R-2 中的耗能铰连接 R1、R2 各项抗震性能基本一致, 更换破坏的耗能钢板约束连接件, 耗能铰连接的滞回性能可恢复; 新型装配式节点的耗能主要集中在耗能铰连接, 耗能铰连接的耗能占试件的 68.6% 以上, 能够较好的改善节点的耗能能力。

### 参考文献

[1] 许高娟, 欧进萍. 预制装配式结构梁柱节点被动耗能减振技术研

究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(06): 1183-1199.

[2] 焦志安, 魏建鹏, 郭杨, 等. 新型可恢复功能半刚性节点抗震性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(06): 1090-1099+1119.

[3] 郭荡, 赵明城, 李露, 等. 带可更换低屈服点钢耗能梁段的梁柱节点抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 712-717.

[4] Song L L, Guo T, Cao Z L. Seismic response of self-centering prestressed concrete moment resisting frames with web friction devices [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 71: 151-162.

[5] 李芳玉, 杜永峰, 李虎, 等. 装配式可更换分级屈服耗能连接疲劳试验及变形性能研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 49-59.