

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.173

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 人工消能塑性铰构造低周往复试验研究

马哲昊<sup>1a</sup>, 张纪刚<sup>1a,1b</sup>, 梁海志<sup>1a,1b</sup>, 李芦钰<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033;  
2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**为提高装配式钢筋混凝土框架结构的抗震性能,针对震后梁、柱构件损伤严重等问题,提出了一种新型框架梁端构造——人工消能塑性铰,即在框架梁端通过预埋机械铰实现梁、柱构件铰接,同时安装附加钢板承载并耗能。设计制作了8组不同截面形式和构造的附加钢板试件,并对装有不同附加钢板的人工消能塑性铰构造进行低周往复荷载试验,研究该构造的破坏模式,并通过滞回曲线、骨架曲线、等效粘滞阻尼系数、延性等研究其抗震性能。结果表明:塑性损伤可控制在附加钢板中间开缝段,有效利用钢板弯曲变形实现耗能,使该构造具有损伤可控和损伤构件可更换,其中,卷边槽型附加钢板可防止耗能段钢板过早屈曲并提高耗能能力。

**关键词:**人工塑性铰; 框架结构; 拟静力试验; 附加钢板; 滞回曲线

**中图分类号:** TU375.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0059-08

## Experimental research on artificial dissipative plastic hinge construction under low-reversed loading

MA Zhehao<sup>1a</sup>, ZHANG Jigang<sup>1</sup>, LIANG Haizhi<sup>1</sup>, LI Luyu<sup>2</sup>

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** To enhance the seismic performance of precast-reinforced concrete frame structure, and aim at the severe damage of beam and column members after earthquake, an innovative construction at beam end called artificial dissipative plastic hinge (ADPH) is proposed. ADPHs are constructions that connect precast beam and column through an embedded mechanical hinge, and additional steel plates are installed to carry the load and dissipate energy. Eight groups of additional steel plate specimens with different sections and structures were designed and fabricated. The low-reversed loading tests are carried out on the artificial dissipative plastic hinge structures with different additional steel plates, the failure modes are analysed, and the seismic performance of ADPH are studied through the hysteresis curves, skeleton curves, equivalent viscous damping coefficient and ductility. The results show that the plastic damage will concentrate only on

**收稿日期:** 2020-07-12

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFC0703600); 山东省重点研发计划(2018GSF117029)

**作者简介:** 马哲昊(1991-), 男, 博士生, 主要从事装配式结构抗震研究, E-mail: mazhehao@qut.edu.cn。

张纪刚(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jingangzhang@126.com。

**Received:** 2020-07-12

**Foundation items:** The National Key R & D Program of China (No. 2017YFC0703600); The Key R & D Program of Shandong Province (No. 2018GSF117029)

**Author brief:** MA Zhehao (1991-), PhD candidate, main research interest: seismic precast reinforced concrete structure, E-mail: mazhehao@qut.edu.cn.

ZHANG Jigang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jingangzhang@126.com.

middle part of steel plates, and prove the effectiveness of energy dissipation by bending, ADPH construction possesses the features of damage-control and rapid-replacing, and the U-shape steel plates could enhance the capacity of buckling-delayed and energy-dissipating.

**Keywords:** artificial plastic hinge; frame structure; quasi-static test; additional steel plates; hysteresis curves

随着中国进入高质量发展的阶段,装配式建筑因其环保、高效等特点将成为未来建筑发展的主流形式。其中,装配式混凝土框架结构传力途径清晰,装配效率高,是近年来应用发展较快的装配式建筑体系之一<sup>[1]</sup>,但仍面临一系列挑战,相较于传统现浇框架结构,装配式混凝土框架节点的整体性相对不足,导致其对于抗震性能的需求更高。因此,许多学者提出了多种适应装配式特点的抗震框架节点形式,并对此展开研究,包括通过预应力筋<sup>[2-5]</sup>、螺栓连接及焊接连接等<sup>[6-9]</sup>方式的梁柱节点。其中,李向民等<sup>[10]</sup>提出一种预埋高延性连杆的装配式节点并进行试验研究,结果表明,该节点承载力和延性均高于现浇节点。程万鹏等<sup>[11]</sup>提出一种预埋钢骨焊接连接的装配式节点并进行拟静力试验研究,结果表明,该节点承载力约为普通节点的 3 倍。Eom 等<sup>[12]</sup>对若干种改变梁端配筋以实现塑性铰转移的装配式混凝土节点进行试验研究,结果表明,该构造可有效减少纵筋在节点区域内的滑移,增强节点耗能能力。Qiong 等<sup>[13]</sup>提出一种梁端通过预埋 U 型槽,螺栓连接的装配式混凝土节点并进行试验研究,结果表明,该节点可实现梁铰屈服机制,具有良好的抗震性能。上述研究表明,通过节点构造措施可使装配式节点具有“等同”或“高于”现浇节点的抗震性能,但在节点耗能能力、损伤控制及损伤构件可更换方面仍有提升空间。

为此,笔者提出了一种人工耗能塑性铰构造(Artificial Plastic Dissipative Hinge, ADPH)。相比传统的钢筋混凝土梁柱构件中形成的塑性铰,该构造可以控制塑性损伤集中在可装配更换的附加钢板上,从而保护节点核心区域,并通过附加钢板弯曲耗能,同时实现结构装配式施工、耗能构件的震后可更换。围绕上述构造形式,对附加不同钢板的人工塑性铰进行低周往复加载试验,验证其塑性铰外移及损伤控制的机制,并对比研究附加钢板截面及构造形式对耗能能力的影响,并提出合理的附加钢板的构造形式。

## 1 人工耗能塑性铰构造

### 1.1 构造设计

人工耗能塑性铰构造是由机械铰接装置和附加钢板两部分组成,附加钢板的左右两端设有螺栓孔,同时,机械铰上下端板有对应的开孔,如图 1 所示。在梁、柱构件浇筑前,预先将机械铰和端板分别与梁、柱内的纵筋网焊接固定;装配安装时,将预埋有铰接头的梁吊装至柱端对齐,完成安装,然后将附加钢板通过螺栓安装于机械铰上下。

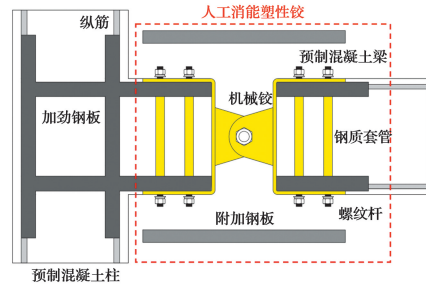


图 1 人工耗能塑性铰构造

Fig. 1 The ADPH configuration

传统钢筋混凝土框架的耗能能力及延性主要依靠梁、柱构件上产生的塑性铰变形实现,在地震往复作用下,柱表面处梁上的钢筋易屈服并传递到节点核心区域,导致粘结破坏,大大降低了节点的滞回性能,容易使塑性铰丧失承载力,形成近似于理想铰的机械铰<sup>[14]</sup>。设置人工耗能塑性铰,则可以避免上述问题,为保证人工耗能塑性铰在地震作用下有效产生延性转动,耗散地震能量,需使其先于相邻的梁构件进入塑性状态。

### 1.2 承载力设计

图 2 为人工耗能塑性铰框架梁端的受力分析,由图可知,人工耗能塑性铰的转动是通过附加钢板中段弯曲变形实现,因此,将附加钢板中段的截面屈服弯矩作为人工耗能塑性铰设计屈服承载力。

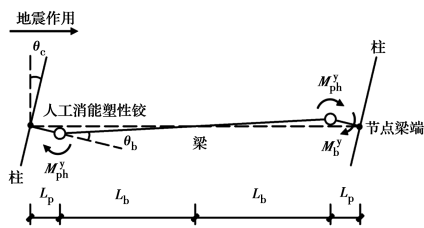
参考 Calado 等<sup>[15]</sup>、Valente 等<sup>[16]</sup>的研究,引入屈服弯矩降低系数  $\gamma$  对人工耗能塑性铰进行承载力设计<sup>[17]</sup>,如式(1),其中,ADPH 附加钢板中部耗能段截面屈服承载力可根据《钢结构设计规范》(GB

50017—2017)受弯梁截面设计,计算如式(2),ADPH 截面设计刚度与梁截面刚度相同,通过调整截面的几何参数和材料强度等参数对人工耗能塑性铰承载力进行设计。

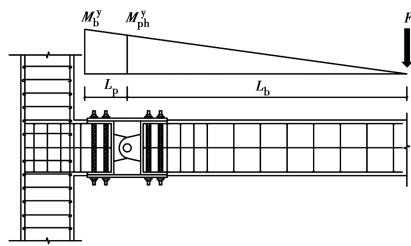
$$0.65 \leq \gamma = \frac{M_{ph}^y}{M_b^y} \left( \frac{L_b + L_p}{L_b} \right) \leq 0.85 \quad (1)$$

$$M_{ph}^y = \gamma_x W_n f_y \quad (2)$$

式中: $M_{ph}^y$ 为人工耗能塑性铰屈服弯矩; $M_b^y$ 为梁端截面屈服弯矩; $L_b$ 为反弯点至人工耗能塑性铰中心距离; $L_p$ 为柱端截面至人工耗能塑性铰中心距离; $\gamma_x$ 为截面塑性发展系数; $W_n$ 为梁净截面模量; $f_y$ 为钢材屈服强度。



(a) 梁端受力分析



(b) 承载力设计

图 2 人工耗能塑性铰受力分析

Fig. 2 Mechanical model of ADPH

## 2 试验研究

### 2.1 试件设计

试验目的是在满足可装配、可更换的基础上研究人工耗能塑性铰构造的塑性损伤控制效果,及对不同形式的附加钢板的承载力及滞回性能。

人工耗能塑性铰构造采用 1:2.5 缩尺,具体尺寸如图 3 所示,机械铰及构造加载梁采用 NM400 高强度钢材制作,附加钢板采用 Q235B 钢材,螺栓采用 M20 高强螺栓。附加钢板试件共制作 8 组,其中 A 类为开缝钢板, B 类为槽型开缝钢板,开缝形式分为分段开缝和不分段开缝,开缝宽度为 10、20 mm,厚度为 6 mm。例如,试件编号 B20f 表示附加钢板为槽型,中部分段开缝,缝宽度为 20 mm,各个附加钢板试件如图 4 所示。

### 2.2 加载方案及加载制度

试验在青岛理工大学结构试验室进行,如图 5 所示,包括反力架、人工耗能塑性铰构造和竖向液压加载系统。人工耗能塑性铰构造通过端板与反力架刚接,竖向作动器与加载梁连接,对构造施加低周往复荷载,加载设备为 MTS-100 kN 高性能线性作动器,同轴安装有 LVDT 位移传感器,位移范围 250 mm。

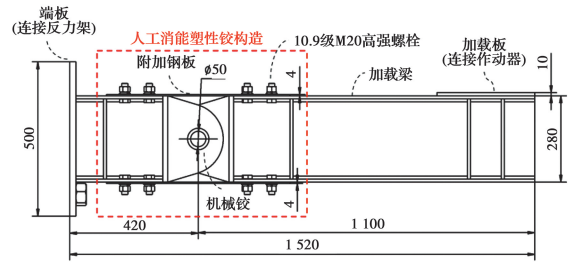


图 3 人工塑性铰构造 (mm)

Fig. 3 Artificial dissipative plastic hinge configuration (mm)

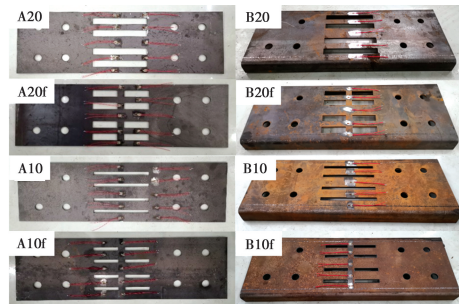
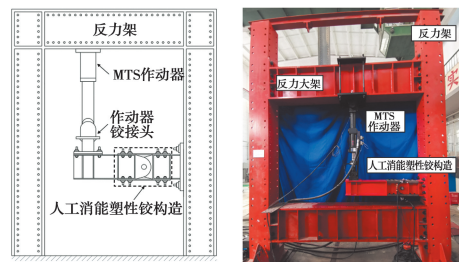


图 4 附加钢板试件

Fig. 4 Detachable plates specimens



(a) 试验装置示意 (b) 试验现场

图 5 结构试验装置

Fig. 5 View of test equipment

以此,对装有可更换附加钢板试件的节点构造进行低周往复加载试验,试验采用位移控制的方式加载,根据有限元模拟结果,以屈服位移  $\Delta_y$  为增量,每级循环 2 次。本试验为破坏性试验,当附加钢板出现明显破坏时或梁端荷载下降到峰值荷载的 85% 以下时,停止加载,试验终止,并更换附加钢板。



### 3 试验结果分析

#### 3.1 试验现象及破坏模式

对 8 组试件加载过程中的变形情况和实时滞回曲线进行观察,以 A20 试件为例,试验加载初始阶段,荷载位移曲线呈线性变化,钢板与梁段间没有出现相对滑移;加载至第 2 级( $\pm 1.2\%$ )时,螺栓连接位置发出响声,实时滞回曲线中反映出明显的滑移现象,滑移荷载较小;当加载至第 3 级( $\pm 1.8\%$ )时,钢板中部出现明显屈曲现象,且钢板已有部分进入塑性阶段,如图 6(a)所示;在此后逐级加载中,钢板一侧保持受压屈曲状态,另一侧保持受拉状态;加载至第 7 级( $\pm 4.2\%$ )时,试件实时荷载-位移曲线开始升高,附加钢板的螺栓与孔壁之间出现挤压现象;在加载至第 10 级( $\pm 6\%$ )时,附加钢板塑性区域不断扩展,随着残余变形的进一步增大,荷载-位移曲线出现拐点,荷载出现下降段,钢板件与梁段的滑移仍然存在;加载至第 13 级( $\pm 7.8\%$ )时,如图 6(b)所示,下侧钢板中部截面发生断裂,停止加载。

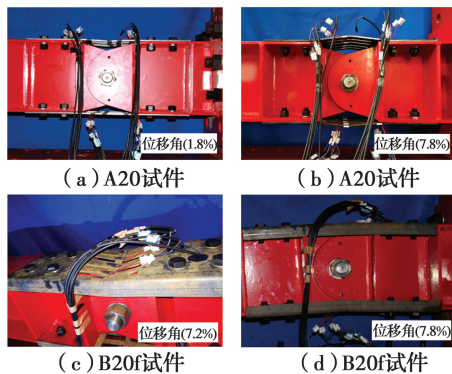


图 6 试验现象

Fig. 6 Test phenomena of ADPH

相较于 A 类钢板, B 类钢板的承载力及抗弯刚度明显提高。以 B20f 为例,在前 4 级( $\pm 2.4\%$ )加载过程中,未见钢板有明显变化,没有明显屈曲现象,仅在钢板开缝部分出现轻微鼓屈,持续至第 12 级( $\pm 7.2\%$ )时,钢板中部开缝处出现明显屈曲,如图 6(c)所示,荷载-转角骨架曲线出现拐点,此后趋于平稳,加载至第 13 级( $\pm 7.8\%$ )时,钢板中部严重屈曲,如图 6(d)所示,直至第 15 级( $\pm 9\%$ )时,钢板中部开缝处有一段截面断裂,停止加载。其中, A20f 试件由于加工误差造成板材存在初始缺陷,导致该钢板负向加载时过早屈曲,荷载突然降低停止加载。其余试件试验现象大致相似,最终破坏形式均为附

加钢板中部鼓曲严重导致的中部开缝位置撕裂破坏,由于篇幅限值,在此不再赘述。

#### 3.2 滞回曲线

图 7 为 8 组试件的梁端弯矩-转角滞回曲线,可见 8 组试件滞回曲线规律基本相似,在加载过程中均有滑移段出现,主要原因在于,往复加载过程中,附加钢板与梁接触的摩擦面不断磨损,降低了表面间的抗滑移系数。其次,螺栓与梁段孔径存在一定加工误差。

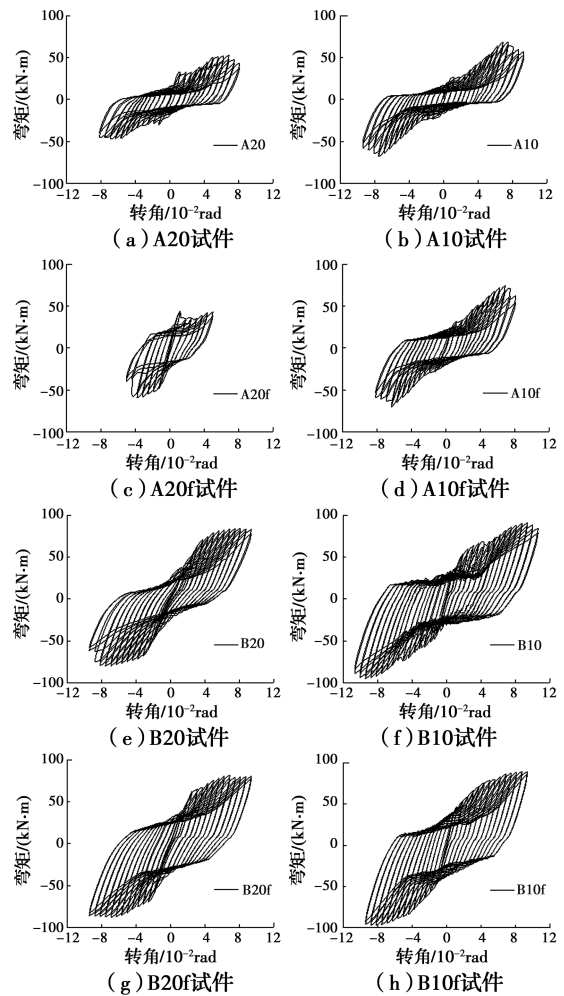


图 7 试件滞回曲线

Fig. 7 Moment rotation diagrams

观察图 7 可见, A 类试件滑移量较大,且滑移段明显,滞回曲线成 Z 型。相比之下, B 类钢板滑移量明显较小,滞回曲线相较 A 类钢板更加饱满,滞回曲线形状接近梭型。与传统钢筋混凝土构件中形成的塑性铰相比,采用 B 类槽型钢板的人工消能塑性铰具有更饱满且稳定的滞回曲线。A20f 试件滞回曲线圈数相较其余试件明显较少,原因同上,由于板材存在初始缺陷,导致该钢板负向加载时因过早屈

曲破坏而停止加载。

### 3.3 耗能能力

以 8 组附加钢板试件的滞回环包络面积作为试件总耗能的参考依据,表 1 为 8 组附加钢板试件的极限弯矩及总耗能。经计算可知,B 类试件累积耗能总量相对于 A 类试件有较大提高,平均总耗能提升 92%;采用分段开缝的钢板相对不分段开缝的钢板总耗能提升 30.7%;开缝宽度 10 mm 的钢板相对开缝宽度 20 mm 的钢板总耗能提升 19.2%。

表 1 试件总耗能及极限弯矩

Table 1 Energy dissipation and maximum moment of specimens			
试件 编号	极限弯矩 $M_u/(kN \cdot m)$		总耗能 $W/kJ$
	正向	负向	
A20	52.98	47.11	42.52
A20f	44.69	59.78	23.90
A10	69.05	69.70	59.52
A10f	74.47	70.74	59.70
B20	84.77	79.88	84.32
B20f	81.48	88.21	124.58
B10	91.09	95.21	92.90
B10f	89.54	96.85	133.86

同时,采用等效粘滞阻尼系数  $h_e$  对附加钢板的耗能能力进行评价,等效粘滞阻尼系数  $h_e$  越大,表示耗能效率越高, $h_e$  为某循环滞回环包围的面积与滞回环卸荷段至横坐标轴之间三角形面积之比, $h_e$  计算示意如图 8(a)所示,计算如式(3)所示。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{E_d}{S_{OAG} + S_{ODH}} \quad (3)$$

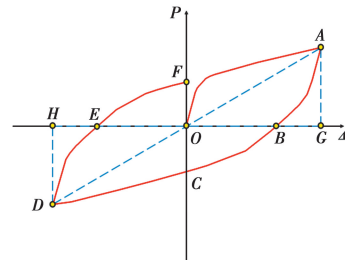
式中: $E_d$  为某循环滞回环包围的面积; $S_{OAG}$  和  $S_{ODH}$  为滞回环卸荷段至横坐标轴之间三角形面积。图 8(b)为 8 组钢板试件的  $h_e$ ,可见,A 类试件总体趋势较为一致,在加载的前 5 级( $\pm 3\%$ ), $h_e$  不断提高,附加钢板的耗能能力逐渐达到最大,但随着构件塑性损伤的不断累积和板件的受压屈曲以及滑移的影响, $h_e$  开始减小,耗能效率不断降低,例如 A20 试件  $h_e$  在第 2 级第 1 圈达到最大值,随即下降较快。相比 A 类钢板,B 类钢板  $h_e$  最大值小于 A 类,但  $h_e$  随着加载逐渐提高,在第 6 级( $\pm 3.6\%$ )后提高至较高水平并保持平稳。

综上,在人工消能塑性铰构造下,B 类钢板总体耗能能力强于 A 类,开缝宽度、截面形式和接触面

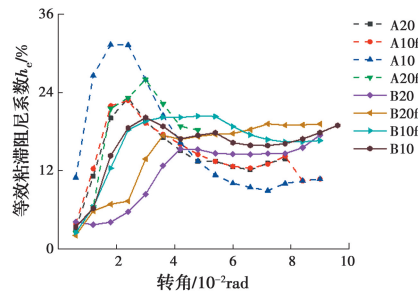
摩擦系数将影响节点耗能总量。

### 3.4 骨架曲线

将 8 组附加钢板的弯矩-转角骨架曲线进行对比,如图 9 所示。可见,正向加载和反向加载的骨架曲线并不完全对称,这是由于附加钢板拼接区域存在安装误差。



(a) 等效粘滞阻尼系数计算示意



(b) 各试件等效粘滞阻尼系数

图 8 等效粘滞阻尼系数

Fig. 8 Equivalent viscous damping coefficient

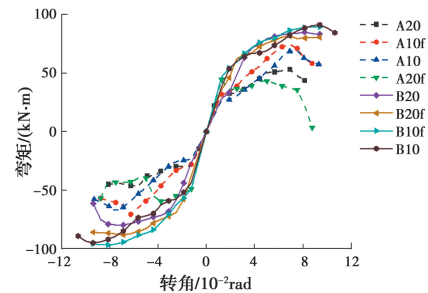


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

承载力方面,观察骨架曲线可见,B 类槽型钢板由于边缘经过弯折,提高了钢板平面外抗弯刚度,使得受压钢板未出现过早屈曲,承载力明显大于 A 类钢板,且承载力退化慢,滑移量相对较小;分段及开缝宽度小的试件承载力相对略有提高。

延性方面,根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015),延性系数  $\mu$  用试件极限荷载相应的变形值与屈服荷载相应的变形值的比值表示,用来反映试件塑性变形能力。表 2 为 8 组试件的延性系数,可见 8 组试件的延性系数均大于 5,满足抗震设

计中 RC 节点梁端延性系数不小于 4 的要求。其中, A 类钢板试件屈服转角约为 1.2%, 极限转角均达到 7% 以上, 而 B 类钢板屈服转角约 1.9%, 极限转角均达到 10% 以上, B 类试件极限转角相较于 A 类试件平均提高 23.5% 以上。同时, 分段开缝及开缝宽度对试件的极限转角及延性系数影响不大。综上所述可知, 相较于传统钢筋混凝土框架梁端形成的塑性铰, 人工耗能塑性铰的极限转动能力明显提高, 延性也有明显提高。

表 2 延性系数

Table 2 Ductility factor of specimens

试件编号	屈服转角/%	极限转角/%	延性系数
A20	1.26	8.08	6.41
A20f	1.27	7.54	5.94
A10	1.26	8.71	6.91
A10f	1.28	8.15	6.37
B20	1.87	10.10	5.40
B20f	1.89	10.65	5.63
B10	1.88	10.65	5.66
B10f	1.90	10.65	5.60

### 3.5 刚度退化

图 10 为 8 组试件的刚退化曲线, 可见 8 组试件在正、负加载方向的刚度退化规律大致相同, 试件刚度退化的原因主要是由于附加钢板与加载梁端板之间螺栓连接位置的滑移以及附加钢板中部耗能段的塑性变形和损伤累积所致。

由图 10 可知, A 类试件在转角处于  $\pm 1.2\%$  至  $\pm 2.4\%$  时退化较快, 而 B 类试件整体刚度明显高于 A 类试件, 且刚度退化相对平稳, 在转角达到  $\pm 2.4\%$  之后, 仍保持一定的抗弯刚度, 可见 B 类试件采用冷弯折边形式的槽型钢板可有效提高刚度, 减缓刚度退化速度; 相较不分段开缝试件, 分段开缝试件刚度略有提高, 退化速度相对较慢, 开缝宽度则对试件刚度退化速度影响相对较小。

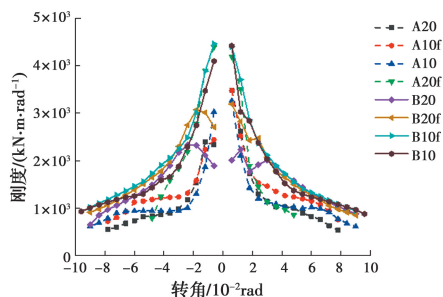


图 10 刚度退化曲线

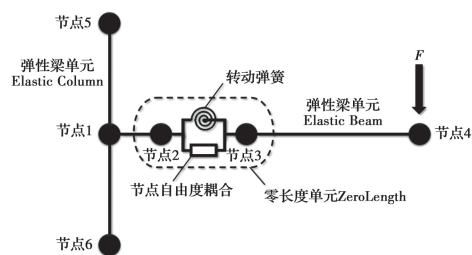
Fig. 10 Stiffness degradation curves

B 类试件中 B20f、B20 试件的刚度在加载初始时较低, 在加载初期的  $\pm 1.8\%$  内刚度有提高, 之后开始退化降低, 原因在于 B 类试件采用的槽型冷弯折边形式导致钢板存在一定初始曲率, 因而影响初始刚度及其退化, 且梁端与钢板之间摩擦面的损伤对初始刚度也有影响, 但加载中、后期试件正、负向刚度基本相同。

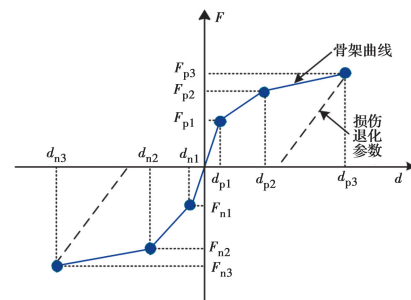
## 4 数值模拟分析

### 4.1 有限元模型

使用 OpenSEES<sup>[18]</sup> 软件对人工塑性铰构造建立简化有限元模型, 以模拟该构造的滞回行为, 为后续基于该构造的节点及框架结构模拟提供依据。图 11(a) 为人工耗能塑性铰模型。加载梁端及反力架柱端均采用弹性梁单元模拟, 附加钢板及机械铰部分采用零长度单元 Zero Length 模拟, 通过该零长度单元连接左、右梁单元, 释放节点 2 与节点 3 加载方向的弯矩, 并赋予该单元符合非线性本构及滞回准则的弯矩-转角关系, 且左右节点 2 与节点 3 其余自由度均相等。



(a) OpenSEES 模型



(b) Hysteretic 本构模型骨架曲线

图 11 人工耗能塑性铰构造有限元模型

Fig. 11 ADPH OpenSEES model

上述零长度非线性转动弹簧单元采用非线性 Hysteretic<sup>[19]</sup> 本构模型, 该材料模型的骨架曲线如图 11(b) 所示, 可以模拟钢材在往复加载过程中的刚度退化及滑移导致的滞回曲线捏缩, 该本构模型的骨架曲线由正负向的 3 个数据点确定, 依据人工



消能塑性铰构造的试验结果,将试验骨架曲线中3个关键点坐标值输入该本构模型。

#### 4.2 有限元模拟与试验结果对比

采用通过上述方法建立的 OpenSEES 简化模型模拟 B 类钢板试件的低周往复加载试验,图 12 为有限元模拟结果与试验结果的滞回曲线对比。可以看出,在试件的模拟结果中,模拟的骨架曲线与试验所得骨架曲线吻合较好,其刚度退化及滑移导致的捏拢规律基本相符。可见,采用 Hysteretic 本构模型的零长度单元可以在宏观上较为准确地模拟人工消能塑性铰构造的滞回行为,为下一步基于该构造的装配式节点及框架结构的抗震性能分析研究提供依据。

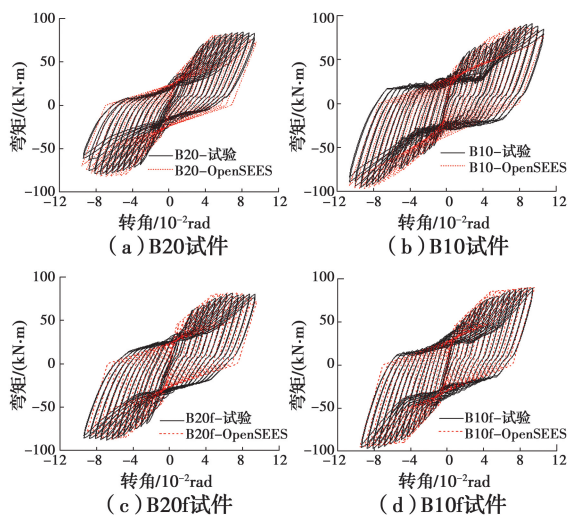


图 12 OpenSEES 模拟

Fig. 12 OpenSEES simulation

## 5 结论

1)人工消能塑性铰构造的破坏模式为附加钢板受压屈曲后开缝截面位置撕裂破坏。

2)相比传统钢筋混凝土框架梁端形成的塑性铰,人工消能塑性铰构造具有更稳定的滞回特性、良好的延性及极限转动能力,能有效实现损伤控制。

3)OpenSEES 软件中采用非线性 Hysteretic 本构模型的零长度单元可以较好地模拟人工消能塑性铰的滞回行为。

#### 参考文献:

[1] 吴刚,冯德成. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 1-16.  
WU G, FENG D C. Research progress on fundamental

performance of precast concrete frame beam-to-column connections [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 1-16. (in Chinese)

- [2] PRIESTLEY M J N, TAO J R. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons [J]. PCI Journal, 1993, 38(1): 58-69.
- [3] SONG L L, GUO T, GU Y, et al. Experimental study of a self-centering prestressed concrete frame subassembly [J]. Engineering Structures, 2015, 88: 176-188.
- [4] 柳炳康,张瑜中,晋哲锋,等. 预压装配式预应力混凝土框架接合部抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 60-65, 116.  
LIU B K, ZHANG Y Z, JIN Z F, et al. Experimental study on seismic behavior of prestressed fabricated PC frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 60-65, 116. (in Chinese)
- [5] 郭彤,宋良龙,张国栋,等. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 23-32.  
GUO T, SONG L L, ZHANG G D, et al. Experimental study on beam-column connections of self-centering prestressed concrete frame with web friction devices [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 23-32. (in Chinese)
- [6] MORGEN B G, KURAMA Y C. Seismic design of friction-damped precast concrete frame structures [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1501-1511.
- [7] 赵斌,吕西林,刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 81-87.  
ZHAO B, LV X L, LIU L Z. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column subassembly with fully assembled joint [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 81-87. (in Chinese)
- [8] PAN Z H, SI Q, ZHOU Z B, et al. Experimental and numerical investigations of seismic performance of hybrid joints with bolted connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 867-876.
- [9] LI S F, LI Q N, ZHANG H, et al. Experimental study of a fabricated confined concrete beam-to-column connection with end-plates [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 208-216.

- [10] 李向民, 高润东, 许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3453-3463.  
LI X M, GAO R D, XU Q F. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3453-3463. (in Chinese)
- [11] 程万鹏, 宋玉普, 王军. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(2): 171-178.  
CHENG W P, SONG Y P, WANG J. Experimental study of seismic performance for interior beam-column joints of precast and discontinuous steel reinforced concrete frames [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(2): 171-178. (in Chinese)
- [12] EOM T S, PARK H G, HWANG H J, et al. Plastic hinge relocation methods for emulative PC beam-column connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(2): 04015111.
- [13] LIU Q, CHEN S H, LIN W, et al. Experimental study on novel energy-dissipating prefabricated beam-column joints [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-17.
- [14] 王初翀, 魏智辉, 陈侠辉, 等. 机械铰的量化准则及其在倒塌分析中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup2): 1-5.  
WANG C C, WEI Z H, CHEN X H, et al. A quantitative criterion for mechanical hinge and its application on collapse analysis of reinforced concrete structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Sup2): 1-5. (in Chinese)
- [15] CALADO L, PROENCA J M, ESPINHA M, et al. Hysteretic behavior of dissipative welded fuses for earthquake resistant composite steel and concrete frames [J]. Steel and Composite Structures, 2013, 14(6): 547-569.
- [16] VALENTE M, CASTIGLIONI C A, KANYILMAZ A. Dissipative devices for earthquake resistant composite steel structures: bolted versus welded solution [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(12): 3613-3639.
- [17] 马哲昊, 张纪刚, 梁海志. 人工耗能塑性铰装配式钢筋混凝土框架结构抗震性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 535-540.  
MA Z H, ZHANG J G, LIANG H Z. Seismic performance of precast-reinforced concrete frames with artificial dissipative plastic hinges [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 535-540. (in Chinese)
- [18] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees command language manual [M]. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006.
- [19] DOWELL R K, SEIBLE F, WILSON E L. Pivot hysteresis model for reinforced concrete members [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(5): 607-617.

(编辑 王秀玲)