

装配式损伤可控钢质铰滞回性能研究

刘如月¹, 魏常贵¹, 吴应雄², 肖三霞³, 张晓曦⁴

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116;
3. 福建江夏学院 工程学院, 福建 福州 350108; 4. 永富建工集团有限公司, 福建 福州 350007)

摘要: 为提高装配式梁柱节点的滞回性能, 实现其损伤破坏区域的可控制性, 提出一种装配式损伤可控钢质铰, 钢质铰中设置狗骨式上下翼缘, 使塑性铰外移远离节点核心区。设计两种不同构造形式的装配式损伤可控钢质铰, 通过低周往复荷载试验与有限元参数分析, 考察损伤可控钢质铰的滞回性能与损伤可控性能。结果表明, 损伤可控钢质铰的塑性累积耗能发生在翼缘狗骨削弱区域, 翼缘非削弱区域未屈服; 损伤可控钢质铰的滞回曲线较为饱满, 具有稳定的滞回性能和良好的耗能能力, 两种钢质铰的延性系数都在 7.0 以上, 等效黏滞阻尼系数都达到 0.5 以上, 且强度无明显的退化; D 字型钢质铰的滞回性能优于 T 字形钢质铰。 L/b_f 、 b/L 和 c/b_f 的变化对翼缘狗骨削弱型钢质铰的初始刚度影响较小, 峰值承载力随着 L/b_f 、 b/L 和 c/b_f 的增大而减小, 且 c/b_f 对峰值荷载的影响较为明显。

关键词: 装配式梁柱节点; 损伤可控钢质铰; 翼缘狗骨削弱; 低周往复荷载实验; 滞回性能

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0165-07

Hysteretic Performance of Fabricated Damage-controllable Steel Hinges

LIU Ruyue¹, WEI Changgui¹, WU Yingxiong², XIAO Sanxia³, ZHANG Xiaoxi⁴

(1. Civil School of Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

2. Civil School of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

3. Engineering School of Fujian Jiangxia University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

4. Yongfu Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: A fabricated damage-controllable steel hinge is proposed to improve the hysteresis performance of fabricated beam-to-column joints and achieve controllability of the damaged region, the flanges of the fabricated damage-controllable steel hinge are bog-bone weakened to concentrate the plastic damage in the reduced section and achieve the outward movement of the plastic hinge away from core joint. Two damage-controllable steel hinges with different configuration were designed, and the hysteretic performance as well as the damage controllability was investigated through low-cycle reciprocating load tests and finite element parametric analysis. The results showed that the plastic accumulative energy dissipation of the proposed steel hinge concentrated in the dog-bone weakened area, while no yield was found in the non-weakened area of the flange. The hysteretic curve for the proposed steel hinge was plumped, with stable hysteresis behavior and good energy dissipation capacity. The ductility coefficient of the two steel hinges was more than 7.0, and the equivalent viscous damping coefficient is above 0.5, while no obvious strength degradation was found. The hysteretic performance of specimen D was better than that of specimen T, since the plastic behavior developed in the web segment of specimen D, leading to improvement of the flexural bearing capacity, stiffness degradation capacity and energy dissipation capacity. The change of L/b_f 、 b/L and c/b_f rarely affected the initial stiffness, while the bearing capacity decreased with the increase of L/b_f 、 b/L and c/b_f .

Keywords: fabricated beam-to-column joints; damage-controlled steel hinges; dog-bone weakened flange; low-cycle reciprocating load test; hysteretic performance

装配式结构具有生产效率高、节能环保、施工速度快等优势,目前处于快速发展和创新型发展期,但因装配式结构各部件间的装配拼接易导致其整体性降低,且拼接处成为装配式结构抗震性能的薄弱环节。为此,国内外学者着力研究装配式节点构造及预制构件连接形式,以提高装配式结构的抗震性能。潘鹏等^[1]、潘毅等^[2]研究了无黏结预应力装配式结构的抗震性能。杨墨等^[3]、张月等^[4]、Park 等^[5]开展了基于预制构件螺栓连接的装配式节点抗震性能研究。Im 等^[6]、于建兵等^[7]对梁端带键槽的装配式节点的抗震性能进行了试验研究。陈庆军等^[8]研究冷挤压套筒连接装配式梁柱节点的抗震性能。研究表明,装配式结构的抗震性能虽等同或优于现浇,但其破坏模式不可控,梁柱构件等易出现塑性损伤或产生较大残余变形,结构的震后修复难度较大或成本较高。王沛怡等^[9]提出一种带狗骨式梁段的框架梁柱节点,塑性损伤集中在狗骨式耗能段,实现损伤可控。

同时,国内外学者开展了装配式结构梁柱节点损伤可控性能研究。李祚华等^[10-11]提出了一种装配式 RC 梁柱塑性可控钢质节点,并通过试验研究发现该节点可有效控制混凝土损伤。马哲昊等^[12]研发了一种人工耗能塑性铰装配式混凝土框架节点并对其力学性能进行试验研究。颜桂云等^[13-14]提出一种可恢复功能装配式节点,实现了将装配式节点的损伤、破坏集中在耗能铰上,且耗能铰震后可更换修复。Wang Chunlin 等^[15]研究了预应力拼装式混凝土梁柱连接中无灌浆全钢竹形熔断式耗能装置,发现该装置可实现集中损伤、保护结构的性能目标。Deng Kailai 等^[16]提出一种新型装配式梁柱连接,变形集中在摩擦阻尼器。上述研究中涉及的梁柱节点均能在一定程度上减少结构损伤,部分实现结构震损可修复。

为进一步研究装配式结构抗震性能和损伤可控性能,本文提出一种装配式损伤可控钢质铰。损伤可控钢质铰主要由翼缘狗骨连接件和腹板销轴连接件组成,翼缘处进行狗骨削弱可保证荷载作用下装配式节点塑性铰外移,且钢质铰的削弱区域率先屈服进入塑性耗能阶段,节点的塑性损伤集中在削弱区域,梁柱构件仍保持良好状态,以达到装配式节点损伤可控。

1 装配式损伤可控钢质铰

在预制梁端部与节点核心区分别预埋带螺栓孔

端板的型钢,将装配式损伤可控钢质铰布置在预制梁端预期产生塑性铰的位置区域,并通过高强螺栓将预制节点核心区和预制梁进行连接。装配式损伤可控钢质铰上下翼缘连接件在中部区域进行狗骨削弱,使其率先发生屈服,并控制节点的塑性损伤及耗能集中在狗骨削弱区域,预制柱、预制梁、节点核心区无破坏或仅轻微破坏。装配式损伤可控钢质铰连接节点构造如图 1 所示。

损伤可控钢质铰上下翼缘连接件承受连接处的弯矩效应,腹板销轴连接件承受剪力。荷载作用下上下翼缘承受轴向拉压效应而破坏,结构损伤集中于翼缘连接件上,避免了框架预制梁、柱及节点核心区损伤或失效,实现节点损伤可控,有利于提高节点的震后可修复性。

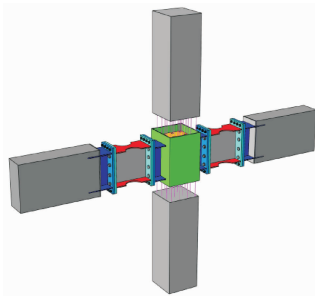


图 1 装配式损伤可控钢质铰连接节点构造

2 试验概况

2.1 试件设计

本试验基于等强度原则设计了两种不同形式的装配式损伤可控钢质铰试件,两试件钢材均为 Q235 级,翼缘连接件均作狗骨式削弱。试件 T 由翼缘狗骨连接件和腹板销轴连接件拼装组成,翼缘内侧焊接弧形加劲肋,翼缘沿梁长方向呈变截面 T 字型截面;试件 D 中腹板为“一”字型钢板,且与上下翼缘连接件焊接,截面呈工字型。两种试件具体构造如图 2 所示。

2.2 材料性能

参照《金属材料—室温拉伸试验方法》^[17](GB/T 228.1—2010)进行标准件拉伸试验,钢板材料的主要力学性能参数如表 1 所示。

2.3 试验装置与加载方案

图 3 为本试验的加载装置图,包括损伤可控钢质铰、钢质加载梁、底座、MTS 作动器、侧向支撑和反力墙等。损伤可控钢质铰两端带螺栓孔端板,可通过螺栓分别同加载梁与底座连接。

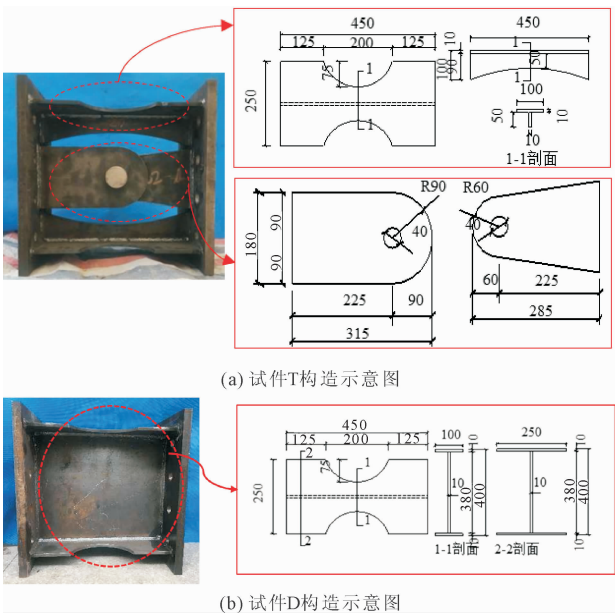


图 2 两种试件构造详图

表 1 钢材力学性能

编号	弹性模量 E_s/MPa	屈服强度 f_y/MPa	屈服应变 $\varepsilon/10^{-6}$	极限强度 f_u/MPa	泊松比 μ_s	延伸率 $\text{}/\%$
1	199695	268.3	1689	376.3	0.285	24.2
2	201324	269.5	1704	374.3	0.286	25.6
3	199984	271.6	1693	370.2	0.281	23.9
平均	200334	269.8	1695	373.6	0.284	24.5

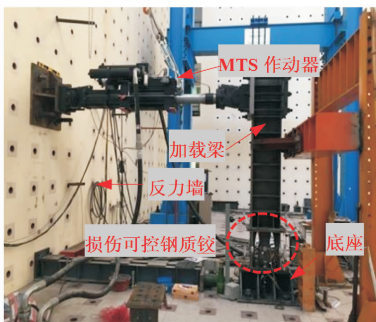


图 3 加载装置

采用荷载-位移双控制的方法进行加载,试件屈服前采用荷载控制方法,分级等级为 $0.25P_c$ 、 $0.5P_c$ 、 $0.7P_c$,每级循环一圈, P_c 为数值模拟得到的极限承载力;试件屈服后,采用位移控制方法,以试件屈服位移的倍数 ($1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$...) 为级差进行加载,并循环 3 次,直到试件的水平荷载下降到峰值荷载的 85% 以下或试件破坏,停止加载。

2.4 量测内容

本次试验的主要量测内容有:(1) 加载梁端的荷载 P 、位移 Δ ;(2) 翼缘的轴向变形;(3) 损伤可

控钢质铰上下翼缘的应变。其中,应变片布置在狗骨最大削弱截面为 C,削弱区域截面 B、D,非削弱区域截面 A、E,如图 4 所示。

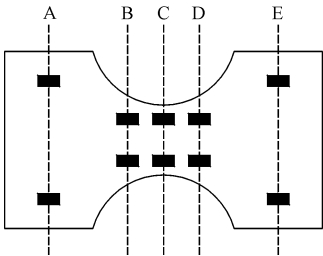


图 4 应变片布置

3 试验结果及分析

3.1 试验现象及破坏模式

3.1.1 试件 T

试验加载初期,试件 T 处于弹性阶段。当荷载加载为 $0.5P_c$ 时,试件 T 翼缘最大削弱截面 C 上的应变片,最大数值为 $1\,726\,\mu\varepsilon$,表明翼缘最大削弱截面处接近屈服。位移加载为 $2\Delta_y$ 时,试件 T 翼缘削弱区域,截面 C 上的应变片最大数值为 $3\,120\,\mu\varepsilon$,截面 B、D 上的应变片最大数值为 $1\,686\,\mu\varepsilon$ 、 $1\,713\,\mu\varepsilon$,表明试件 T 翼缘狗骨削弱区域接近整体屈服。位移加载为 $5\Delta_y$ 时,正向加载时远离加载点的受压侧翼缘出现局部屈曲现象,各应变片数值随着加载不断增大。位移加载为 $8\Delta_y$ 时,翼缘连接件受压侧局部屈曲现象逐渐明显。位移加载为 $11\Delta_y$ 时,两侧翼缘狗骨削弱区域屈曲现象明显。继续增大加载位移,受压翼缘局部屈曲不断加剧,试件 T 破坏严重,停止加载。整个加载阶段,试件 T 两侧翼缘非削弱区域截面 A、E 上的应变片均未达到屈服数值。试件 T 的破坏模式如图 5(a) 所示。

3.1.2 试件 D

试验加载初期,试件 D 处于弹性阶段。当荷载加载为 $0.5P_c$ 时,试件 D 翼缘最大削弱截面 C 上的应变片,最大数值为 $1\,735\,\mu\varepsilon$,表明翼缘最大削弱截面处接近屈服。位移加载为 $2\Delta_y$ 时,试件 T 翼缘削弱区域,截面 C 上的应变片最大数值为 $3\,938.3\,\mu\varepsilon$,截面 B、D 上的应变片最大数值为 $1\,764\,\mu\varepsilon$ 、 $1\,736\,\mu\varepsilon$,表明试件 D 翼缘狗骨削弱区域接近屈服。位移加载为 $5\Delta_y$ 时,两侧翼缘出现局部屈曲现象,各应变片数值随着加载不断增大。位移加载为 $9\Delta_y$ 时,远离加载点的翼缘局部屈曲现象逐渐明显,且靠近翼缘侧的腹板出现了轻微鼓曲现象,靠近加载点的翼缘局部屈曲现象较轻。位移加载为 $12\Delta_y$ 时,两侧翼

缘狗骨削弱区域屈曲现象较为明显,腹板靠近两侧翼缘处鼓曲现象较为明显,试件 D 破坏严重,停止加载。整个加载阶段,试件 D 两侧翼缘非削弱区域截面 A、E 上的应变片均未达到屈服数值。试件 D 的破坏模式如图 5(b)所示。

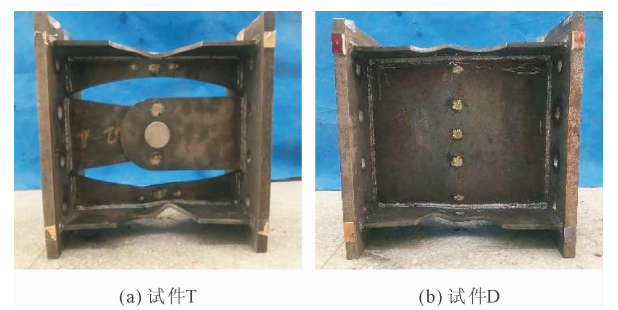


图 5 两种试件破坏模式

3.2 弯矩-转角滞回曲线

损伤可控钢质铰两侧翼缘布置导杆引伸仪,从而得到钢质铰的转角变形。图 6 给出了试件的弯矩-转角($M-\varphi$)滞回曲线,其中 $M=Pl$, P 为 MTS 输出的荷载, l 为加载点高度到铰中心的距离 2 500 mm; $\varphi=(\Delta_1+\Delta_2)/H$, Δ_1 、 Δ_2 分别为两侧导杆引伸仪测得的数值, H 为上下翼缘连接件间的垂直距离。

从图 6 可知,损伤可控钢质铰试件 T、试件 D 的滞回曲线均呈饱满的梭形,损伤可控钢质铰具有稳定的滞回性能和良好的耗能能力。试件达到峰值承载力后,随着翼缘狗骨削弱区域塑性损伤累积和局部屈曲加剧,承载力出现下降,表明损伤可控钢质铰的受力性能由翼缘削弱区域屈曲控制,损伤可控钢质铰的破坏区域损伤可控。试件 D 的滞回曲线比试件 T 更为饱满,试件 D 的极限转角更大,转动能力更强。

3.3 骨架曲线和延性系数

试件弯矩-转角($M-\varphi$)骨架曲线如图 7 所示。损伤可控钢质铰的承载能力与转角特征值如表 2 所示。由图 7 和表 2 可知,钢质铰试件 D 的峰值承载力比试件 T 高 18.6%,这是由于两种钢质铰的构造

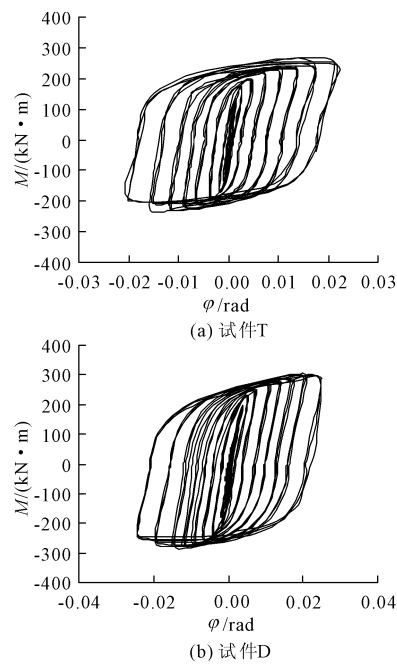


图 6 试件弯矩-转角($M-\varphi$)滞回曲线

形式不同,钢质铰试件 D 上下翼缘通过“一”字型钢板与狗骨削弱翼缘焊接,翼缘狗骨削弱区域屈服,截面塑性从翼缘狗骨削弱区域往腹板发展,而试件 D 的腹板的高度高于钢质铰 T 试件翼缘内侧的弧形加劲肋高度,因而其承载力高于试件 T。钢质铰试件 D 的平均延性为 7.47,钢质铰试件 T 的平均延性为 7.24,两种钢质铰的延性系数都在 7.0 以上,说明钢质铰具有很好的延性,具有很好的转动能力。

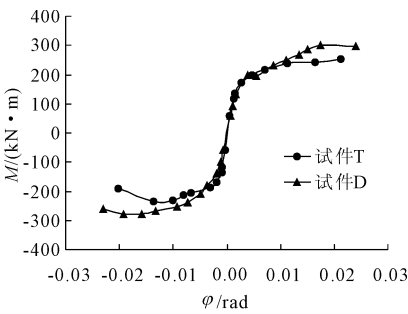


图 7 试件弯矩-转角($M-\varphi$)骨架曲线

表 2 两种试件损伤可控钢质铰特征值

构件类型	加载方向	φ_y /rad	M_y /(kN·m)	φ_{max} /rad	M_{max} /(kN·m)	φ_u /rad	M_u /(kN·m)	延性系数 μ	平均延性
试件 T	正向	0.0029	164.95	0.0211	254.68	0.0211	254.67	7.27	7.24
	负向	-0.0028	-182.3	-0.0137	-234.46	-0.0202	-191.73	7.21	
试件 D	正向	0.0031	171.43	-0.0158	289.18	0.0248	294.03	8.00	7.47
	负向	-0.0034	-173.65	0.0175	-279.48	-0.0236	-256.62	6.94	

3.4 承载力退化

依据文献[18]计算承载力退化系数 λ ,承载力退化曲线如图 8 (a)所示。各试件在翼缘削弱区域屈曲破坏前 λ 基本在 1.0 左右变化,表明试件 D、试件 T 在往复荷载作用下均具有稳定的承载性能。当各试件翼缘削弱区域屈曲破坏后,承载力退化系数 λ_i 随着转角位移级别的增大而减小,承载力开始明显退化;试件 T 在翼缘削弱区域屈曲破坏后,承载力退化速度相比试件 D 较快,说明试件 D 的承载力退化性能优于试件 T。

3.5 刚度退化

依据文献[18]计算得割线刚度 K_j ,将 K_j 除以试件初始刚度 K_0 ,得到无量纲化刚度退化系数。各试件刚度退化系数如图 8 (b)所示。对比两种损伤可控钢质铰的刚度退化曲线,加载前期试件 T 的刚度退化速度比试件 D 的退化速度快,主要是因为试件 T 由翼缘连接件和腹板连接件通过螺栓拼接而成,其整体刚度性能有所下降;加载后期,两种钢质铰的刚度退化速度均有所缓解,且二者的刚度退化情况基本相近。总体而言,试件 T 的刚度退化比试件 D 更加严重。

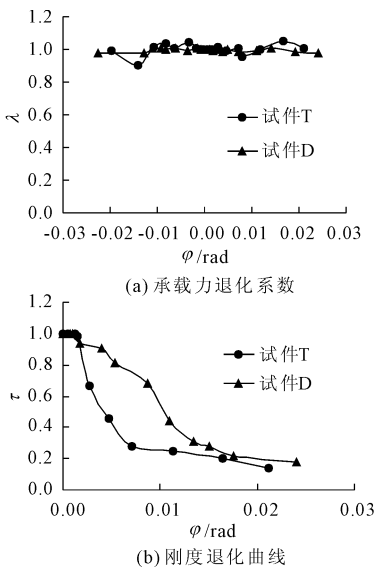


图 8 两种试件力学性能退化曲线对比

3.6 能量耗散能力

依据文献[18]计算得累积滞回耗能 E_p 、等效黏滞阻尼系数 ζ ,如图 9 所示。试件的耗能能力随着变形的增加而提高,较大变形时其提升幅度较高;加载初期,两种钢质铰的耗能能力接近;当钢质铰转角大于 0.01 rad 时,试件 D 的耗能性能明显优于试件 T,其累积耗能比试件 T 提升了 64.5%;各试件的等

效黏滞阻尼系数都达到 0.5 以上,同样表明损伤可控钢质铰具有较好的耗能能力。

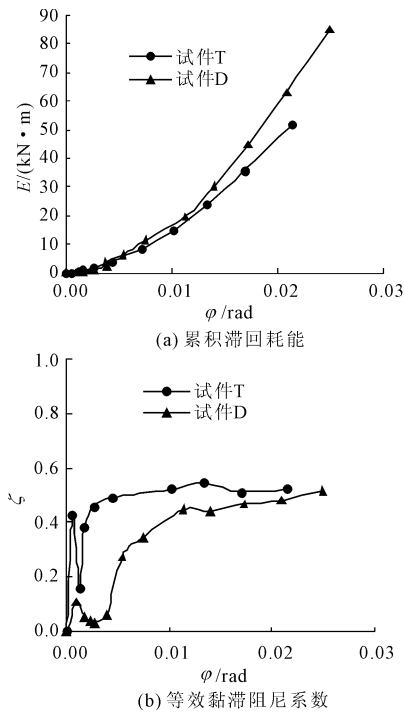


图 9 两种试件耗能能力对比

4 参数分析

试验表明,翼缘狗骨削弱型钢质铰总体性能较优。利用 ABAQUS 建立其有限元模型,模型中各部件的几何尺寸、截面形式、材性、边界条件等均与试验一致^[19]。图 10 给出了有限元得到的结果与试验结果的对比情况,可知,有限元计算得到的弯矩-转角曲线与试验结果吻合程度较高,表明建立的有限元模型及模拟方法具有较高的准确性。

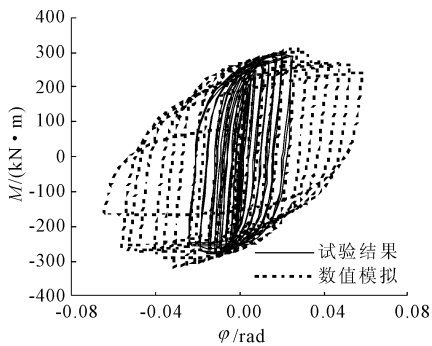


图 10 试验曲线与数值模拟对比

基于验证的有限元模型及模拟方法,开展翼缘狗骨削弱型钢质铰参数研究,考察翼缘长宽比 L/b_f 、翼缘狗骨削弱范围(b/L)和翼缘狗骨削弱程度(c/b_f)等参数对翼缘狗骨削弱型钢质铰力学性能的

影响。翼缘构造示意图如图 11 所示,表 3 给出了参数分析中所有的翼缘狗骨削弱型钢质铰算例编号。

表 3 翼缘狗骨削弱型钢质铰有限元算例编号

L/b_f	b/L	c/b_f				
		0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
1.5	0.4	RBS111	RBS112	RBS113	RBS114	RBS115
	0.5	RBS121	RBS122	RBS123	RBS124	RBS125
	0.6	RBS131	RBS132	RBS133	RBS134	RBS135
	0.7	RBS141	RBS142	RBS143	RBS144	RBS145
	0.8	RBS151	RBS152	RBS153	RBS154	RBS155
2.0	0.4	RBS211	RBS212	RBS213	RBS214	RBS215
	0.5	RBS221	RBS222	RBS223	RBS224	RBS225
	0.6	RBS231	RBS232	RBS233	RBS234	RBS235
	0.7	RBS241	RBS242	RBS243	RBS244	RBS245
	0.8	RBS251	RBS252	RBS253	RBS254	RBS255
2.5	0.4	RBS311	RBS312	RBS313	RBS314	RBS315
	0.5	RBS321	RBS322	RBS323	RBS324	RBS325
	0.6	RBS331	RBS332	RBS333	RBS334	RBS335
	0.7	RBS341	RBS342	RBS343	RBS344	RBS345
	0.8	RBS351	RBS352	RBS353	RBS354	RBS355

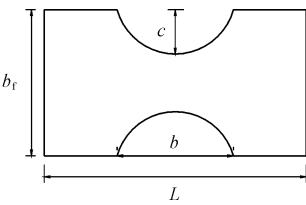


图 11 翼缘构造示意图

图 12 给出了各参数对翼缘狗骨削弱型钢质铰弯矩(M)–转角(φ)骨架曲线的影响。由图可知:

- (1) 各参数变化对算例的初始刚度影响较小,变形较小时各算例的骨架曲线几乎重合。
- (2) 当其他参数保持不变时,钢质铰峰值承载力均随着 L/b_f 、 b/L 和 c/b_f 的增大而减小,其中, c/b_f 对峰值荷载的影响较为明显。

经分析,翼缘狗骨削弱型钢质铰各参数的取值范围建议为:翼缘长宽比 $1.5 \leq L/b_f \leq 2$ 、翼缘狗骨削弱范围 $0.5 \leq b/L \leq 0.7$ 、翼缘狗骨削弱程度 $0.15 \leq c/b_f \leq 0.3$ 。

5 结 论

本文通过对两种不同构造形式的损伤可控钢质铰的试验研究,对比分析了二者的破坏过程,弯矩–转角曲线,性能退化特征和耗能能力等,得到了以下几个结论:

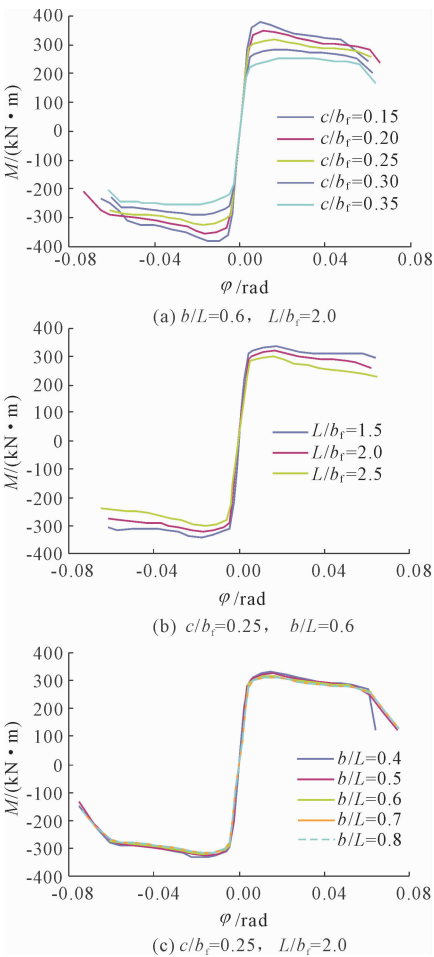


图 12 各参数对弯矩(M)–转角(φ)骨架曲线的影响

(1) 本文提出的损伤可控钢质铰具有稳定的滞回性能和良好的耗能能力。在钢质铰的上下翼缘处进行狗骨式削弱,可使节点连接处的塑性屈服及累积耗能集中在一定范围内,避免预制构件及节点核心区的损伤或失效,从而实现装配式结构的损伤可控。

(2) 不同形式损伤可控钢质铰具有相似的破坏过程,整个加载过程中仅在翼缘削弱区域发生屈服,较大变形下翼缘的屈曲现象明显。由于翼缘对腹板的约束,试件 D 的承载力与转动能力优于试件 T,但两种钢质铰的延性系数都在 7.0 以上,等效黏滞阻尼系数都达到 0.5 以上,且无明显的强度退化现象;但从震后可修复性的角度而言,试件 T 震后修复的难度和成本低于试件 D。

(3) 钢质铰翼缘屈服后,截面塑性往腹板处发展,整体式腹板钢质铰试件 D 的抗弯承载力、刚度退化能力和耗能能力等性能优于非整体式腹板钢质铰试件 T。

(4) 基于有限元参数分析结果,得到翼缘狗骨削弱型钢质铰各参数的建议取值范围为:翼缘长宽比 $1.5 \leq L/b_f \leq 2$ 、翼缘狗骨削弱范围 $0.5 \leq b/L \leq 0.7$ 、翼缘狗骨削弱程度 $0.15 \leq c/b_f \leq 0.3$ 。

参考文献:

- [1] 潘 鹏,王海深,郭海山,等.后张无黏结预应力干式连接梁柱节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(10):46-55.
- [2] 潘 毅,陈侠辉,王涵平,等.无黏结预应力装配式框架结构地震易损性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):71-77.
- [3] 杨 翌,吕 伟,包 亮.基于螺栓连接的新型钢筋混凝土框架装配式节点抗震性能研究[J].工业建筑,2019,49(8):93-99.
- [4] 张 月,李冬生.耗能螺栓连接装配式钢管混凝土梁柱节点恢复力模型研究[J/OL].建筑结构学报[2023-02-08]:1-9. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0557>.
- [5] Park S C, Hong W K, Kim S, et al. Mathematical model of hybrid precast gravity frames for smart construction and engineering[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(6):1-14.
- [6] Im Hyeong-Ju, Park Hong-Gun, EOM Tae-Sung. Cyclic loading test for reinforced-concrete-emulated beam-column connection of precast concrete moment frame[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(1):115-126.
- [7] 于建兵,石 灿,郭正兴,等.芯梁增强装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(S2):59-64.
- [8] 陈庆军,潘忠尧,蔡 健,等.冷挤压套筒连接装配式梁柱节点抗震性能试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(5):918-925.
- [9] 王沛怡,胡少伟,齐 浩,等.带狗骨式削弱梁段的装配式梁柱节点抗震性能研究[J/OL].建筑结构[2023-02-16]:1-8. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20220206>.
- [10] 李祚华,彭志涵,齐一鹤,等.装配式 RC 梁柱塑性可控钢质节点抗震性能足尺试验研究[J].建筑结构学报,2019(10):43-50.
- [11] Li Z H, Qi Y H, Teng J. Experimental investigation of prefabricated beam-to-column steel joints for precast concrete structures under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2020, 209.
- [12] 马哲昊,张纪刚,梁海志,等.装配式人工耗能塑性铰节点低周反复试验数值模拟研究[J].土木工程学报,2020,53(S2):162-168.
- [13] 颜桂云,余勇胜,吴应雄,等.可恢复功能预制装配式损伤可控钢质节点抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2021,54(8):87-100.
- [14] 叶建峰,郑莲琼,颜桂云,等.装配式可更换耗能铰滞回性能试验研究[J].工程力学,2021,38(8):42-54.
- [15] Wang Chunlin, Liu Ye, Zheng Xiaolong. Experimental investigation of a precast concrete connection with all-steel bamboo-shaped energy dissipaters[J]. Engineering Structures, 2019, 178:298-308.
- [16] Deng Kailai, Wang Tao, Masahiro Kurata, et al. Numerical study on a fully-prefabricated damage-tolerant beam to column connection for an earthquake-resilient frame[J]. Engineering Structures, 2018, 159(15):320-331.
- [17] 金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温拉伸试验方法:GB/T 228.1—2010[S].北京:中国质检出版社,2011.
- [18] 建筑抗震试验方法规程:JGJ/T 101—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [19] 魏常贵.钢质往复弯曲钢质铰及其装配式新型节点抗震性能研究[D].福州:福建工程学院,2019.