

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.172

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



柱根加劲肋高度对可恢复摇摆柱抗震性能的影响

黄泽伟^a, 刘阳^{a,b}, 许一鹏^a, 郭子雄^{a,b}, 刘小娟^{a,b}

(华侨大学 a. 土木工程学院; b. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:为实现框架结构的震后性能快速恢复,提出一种新型性能可恢复摇摆柱(简称 IRR 柱)。为研究柱根加劲肋高度对 IRR 柱抗震性能的影响,制作并完成了 2 个足尺试件的往复加载试验。试验结果表明:两个试件均表现出良好的滞回性能,滞回曲线饱满,有较好的变形能力。水平荷载作用下,柱根内部加劲肋高度不足会导致钢柱侧面板发生平面外屈曲,进一步导致与之相连的钢板阻尼器塑性变形发展滞后。当柱根内部加劲肋高度足够时,柱身始终处于弹性状态,钢板阻尼器塑性变形发展充分,最终撕裂拉断,实现了“强柱弱阻尼”的设计目标。加劲肋高度由 100 mm 提高至 420 mm,IRR 柱的最大承载力和初始刚度分别提高了 11.5% 和 25.1%,极限变形降低了 39.3%。

关键词:可恢复结构;摇摆柱;钢板阻尼器;加劲肋;试验研究

中图分类号:TU398.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)03-0101-08

Seismic performance of IRR columns with different height of stiffeners at the column bottom

HUANG Zewei^a, LIU Yang^{a,b}, XU Yipeng^a, GUO Zixiong^{a,b}, LIU Xiaojuan^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, P. R. China)

Abstract: An innovative resilient rocking (IRR) column was developed to achieve the rapid recovery of the performance of the frame structure after earthquakes. Quasi-static cyclic tests on two full-scaled IRR columns were carried out to further investigate the influence of stiffener height at the column end on the seismic performance of IRR columns. The test results show that the hysteresis curves of the two specimens are full, which shows good hysteresis performance and deformation ability. When the height of the internal stiffener of the IRR column root is insufficient, the horizontal load will cause out-of-plane buckling of the side panel of the steel column, which will further cause the plastic deformation of the steel plate damper lags behind. When the height of the internal stiffener is sufficient, the column body is always in an elastic

收稿日期:2020-07-12

基金项目:国家自然科学基金(51878304);福建省自然科学基金杰出青年项目(2020J06020);福建省科技重大专项基金(2019HZ07011);福建省自然科学基金(2018J01074);泉州市科技计划(2018Z013)

作者简介:黄泽伟(1992-),男,主要从事钢-混凝土组合结构研究,E-mail:362883790@qq.com.

刘阳(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lyliuyang@hqu.edu.cn.

Received:2020-07-12

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51878304); Natural Science Foundation of Fujian Province for Distinguished Young Scholars(No. 2020J06020);Science and Technology Major Program of Fujian Province (No. 2019HZ07011); Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2018J01074); Science and Technology Project of Quanzhou (No. 2018Z013)

Author brief:HUANG Zewei (1992-), main research interest: steel - concrete composite structures, E-mail: 362883790@qq.com.

LIU Yang (corresponding author), professor, doctoral supervisor,E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

state. And the steel dampers finally ruptured after full development of plastic deformation, achieving the design philosophy of “strong column and weak damper”. As the stiffener height increased from 100 mm to 420 mm, the maximum loading capacity and the initial stiffness of IRR columns increased by 11.5% and 25.1% respectively, while the ultimate deformation dropped by 39.3%. The findings can be referenced for application of earthquake resilience structures.

Keywords: resilient structures; rocking column; steel slit dampers; stiffener; experimental study

随着社会经济的不断发展和结构工程领域研究的不断深入,结构在遭遇罕遇地震后的“性能可恢复能力”已经得到全世界结构工程专家的重视。工程结构抗震理念从抗倒塌逐渐转向结构功能或性能的可恢复已经成为一个重要趋势^[1-2]。

目前的研究主要通过两种途径实现结构的性能可恢复,一种是通过放松基础与上部结构或者梁柱节点间的部分自由度约束,使结构在地震作用下发生摇摆耗散地震能量,同时,使用预应力筋提供复位能力,从而实现震后变形的可恢复。自 1963 年 Housner^[3] 提出摇摆结构的概念以后, Priestley 等^[4] 和 Eatherton 等^[5] 都对摇摆框架进行了研究。中国对摇摆结构的研究起步较晚,2014 年,吕西林等^[6] 设计了一个自复位可摇摆钢筋混凝土框架结构,通过振动台试验对结构的可恢复性进行了验证。鲁亮等^[7-8] 提出了梁端铰型和柱端铰型的受控摇摆式钢筋混凝土框架。杨溥等^[9] 则将预应力钢绞线与消能杆引入钢桁架梁以消耗构件的变形能,从而实现结构的自复位功能。实现结构可恢复性的另一种途径是在结构中设置可更换构件,将地震损伤集中在可更换的耗能构件中,震后更换损伤构件即可恢复结构性能。目前,学者们对可更换构件开展了大量研究,Oh 等^[10]、Shen 等^[11]、郭子雄等^[12]、刘阳等^[13]、邵铁锋等^[14]、Calado 等^[15]、何乐平等^[16] 围绕钢框架和混合框架结构中的梁和混合节点等部位开展研究,提出了多种不同的可替换钢梁构造,并通过试验验证其可行性。

为了实现框架结构体系的震后性能恢复,底层柱脚塑性铰区的可替换问题不可避免(如图 1(a)所示)。由于较大轴力的存在,框架柱的性能恢复难度要明显高于框架梁,目前,关于这方面的研究还相对不足。为研究柱脚的性能可恢复性,本课题组前期已开展了部分框架柱震损可替换构造的试验研究^[17-18]。另外,桥梁墩柱的部分研究也可提供有益参考^[19-23]。但相比之下,建筑结构中框架柱的构件

尺寸较小、轴压比较大,桥梁的可更换技术很难直接应用在框架柱中。

在前期研究的基础上,本课题组提出了一种带开缝钢板阻尼器的新型性能可恢复摇摆柱(Innovative resilience rocking column,简称 IRR 柱)^[24-26],其构造如图 1(b)所示。前期已通过拟静力试验研究了单向布置钢板阻尼器 IRR 柱的抗震性能,并分析了 IRR 柱的受力机理^[24]。试验研究表明,合理设计的 IRR 柱具有优越的抗震性能和良好的性能可恢复能力。当柱身采用矩形钢管时,需要在柱根部设置一定数量的竖向加劲肋板来防止柱底的压曲和柱侧面钢板的平面外变形。为进一步研究柱根加劲肋高度对 IRR 柱抗震性能的影响,笔者开展试验研究工作。

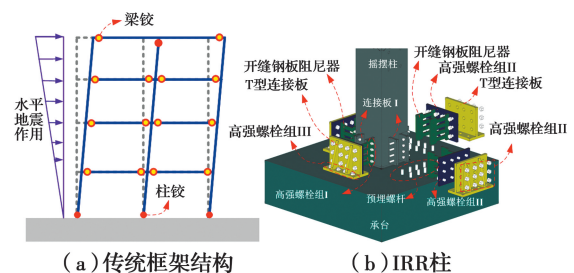


图 1 新型可恢复摇摆柱

Fig. 1 Innovative resilient rocking column

1 试验概况

1.1 试件设计

设计并制作了 2 个足尺 IRR 柱模型。柱身采用 400 mm×400 mm 焊接方钢管,侧面板壁厚 10 mm,底板厚 20 mm,加载点至承台表面高度 2 200 mm,计算剪跨比 5.5,试件尺寸如图 2 所示。

试件 IRRC-1 柱根内部纵向加劲肋高度为 100 mm(如图 2(c)),防止 IRR 柱摇摆过程中底部边角出现局部压曲。试件 IRRC-2 柱根内部纵向加劲肋高度为 420 mm(如图 2(d)),除防止柱底部压曲作用外,还可用于传递柱根侧面连接板 I 传来的拉压应力,防止柱侧面板发生平面外屈曲。除此之外,两个试

件的其他参数完全一致。

柱顶施加恒定竖向轴力 893 kN。开缝钢板阻尼器采用 10.9 级 M22 高强摩擦型螺栓与柱身相连,采用 10.9 级 M30 高强摩擦型螺栓与 T 型连接板相连,T 型连接板采用 M30 预埋螺杆与承台连接。

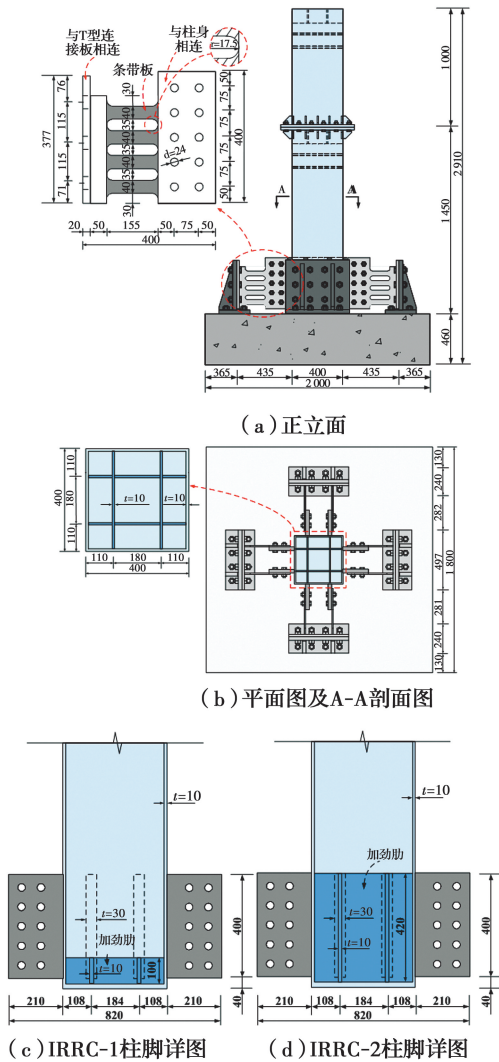


图 2 试件尺寸详图 (mm)

Fig. 2 Dimension details of specimens (mm)

开缝钢板阻尼器厚度均为 8 mm,采用 Q235 级钢材,其他钢部件均采用 Q345 级钢材。试件材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	t/mm	f_{yk}/MPa	f_{uk}/MPa	E_s/MPa	$\epsilon_y/10^6$
阻尼器	8	316	465	2.10×10^5	1 505
钢柱	10	366	499	2.10×10^5	1 743

1.2 加载及量测装置

试验加载装置如图 3 所示。首先采用 1 000 kN 液压千斤顶施加预定的竖向轴力,然后通过 1 000 kN MTS 伺服作动器施加往复水平荷载。试验水平加载采用位移控制的加载制度,1/100 位移角之前每个位移角幅值循环 1 次,随后,每个位移幅值循环 3 次,其中,试件 IRRC-2 加载至 1/25 位移角第 1 循环终止试验。

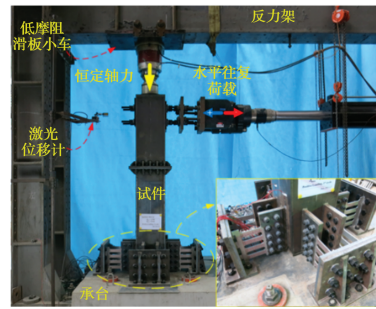


图 3 加载装置

Fig. 3 Test setup

试验位移计、引伸仪和应变片等布置如图 4 所示。采用非接触式激光位移计量测水平荷载加载点位移,通过千斤顶和作动器自带力传感器采集力信号。钢板阻尼器和柱根部应变采用 3 mm × 5 mm 电阻应变片量测,阻尼器的剪切变形角通过在阻尼器焊接螺杆安装引伸仪量测,所有信号均通过 MTS-GT 控制系统和 IMP 数据采集仪自动采集。

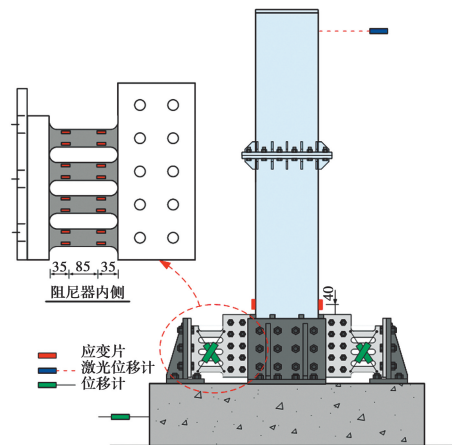


图 4 量测方案

Fig. 4 Layout of instrumentations

2 试验结果

2.1 主要试验现象

在水平荷载作用下,IRR 柱绕柱根一侧转动点转动。柱根部抬起使得左侧钢板阻尼器产生向下的

剪切变形,处于压弯剪复合受力状态(定义为压剪侧),而右侧钢板阻尼器产生向上的剪切变形,处于拉弯剪复合受力状态(定义为拉剪侧)。试件破坏形态如图 5 所示。

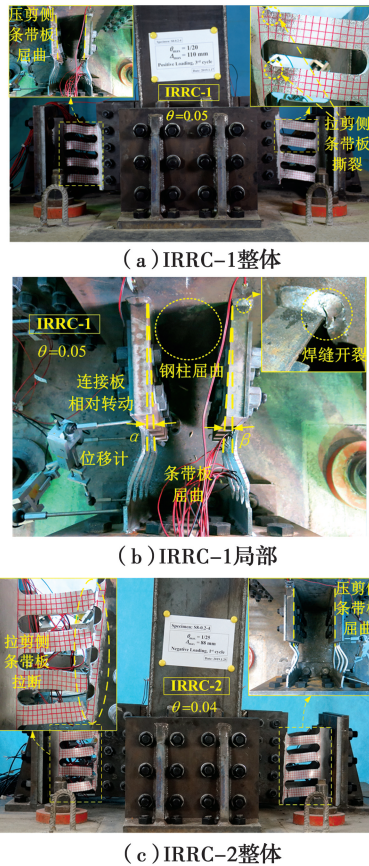


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

1) 试件 IRRC-1 1/100 位移角下,阻尼器条带板屈服,最大应变为 $2\ 214\mu\epsilon$ 。1/35 位移角下,压剪侧阻尼器开始屈曲,钢管柱柱身受压一侧开始屈曲,导致两片连接板 I 出现平面外转角(如图 5(b))。1/20 位移角下,拉剪侧 4 条条带板靠近柱身一侧发生不同程度的撕裂,裂缝宽度最大约为 1.5 mm(如图 5(a))。压剪侧条带板屈曲明显,同时,由于钢柱侧板的反复受压凹陷和受拉外鼓,连接板 I 与柱身的焊接裂缝出现疲劳裂缝,如图 5(b)所示。柱身最大压应变为 $-3\ 885\mu\epsilon$,钢柱产生较大塑性变形无法重复使用,即无法实现性能可恢复。

2) 试件 IRRC-2 由于加劲肋的作用,柱身侧板在整个加载过程中无明显平面外变形,塑性变形集中于钢板阻尼器上,因此,相同部位应变在相同位移角下均大于试件 IRRC-1。1/250 位移角下,阻尼器条带板屈服,最大应变为 $2\ 546\mu\epsilon$ 。在 1/75 位移角

下,压剪侧条带板开始屈曲。1/35 位移角下,拉剪侧条带板开始撕裂。试件最终加载至 1/25 位移角,整体变形如图 5(c)所示。拉剪侧 4 条条带板均完全拉断,压剪侧条带板屈曲明显,柱身未发现屈曲现象,始终处于弹性状态,最大压应变为 $-974\mu\epsilon$,实现了“强柱身弱阻尼”的设计目标。原位替换钢板阻尼器后,试件性能即可恢复。

2.2 滞回曲线

试件荷载-变形滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可见:

1) 在加载初期($\theta < 1/100$),试件处于弹性受力阶段,刚度大,残余变形较小。两个试件的曲线形状整体差异不大。柱根内部加劲肋高度较小的试件 IRRC-1,钢板阻尼器在 1/100 位移角首次屈服,而加劲肋高度较大的试件 IRRC-2 钢板阻尼器在 1/250 位移角即达到首次屈服。

2) 阻尼器屈服后,试件进入塑性变形发展阶段,刚度明显降低,但试件承载力仍有不同程度强化,滞回曲线呈饱满的梭型,表现出良好的变形性能和滞回耗能性能。加劲肋高度较大的试件 IRRC-2 卸载刚度明显高于试件 IRRC-1。

3) 较大位移角幅值下($\theta > 1/50$),两个试件的滞回曲线形状出现明显差异。试件 IRRC-2 由于柱根内部加劲肋作用,柱身始终保持弹性状态,塑性变形全部集中在钢板阻尼器上。由于柱根的往复摇摆,滞回曲线呈现带一定的捏拢形状。试件 IRRC-1 由于柱根内部加劲肋高度较低,柱身钢板出现平面外鼓曲,摇摆对滞回曲线形状的影响不明显,但试件最大承载和刚度均明显小于试件 IRRC-2。

4) 由于柱身侧面钢板的平面外变形,试件 IRRC-1 的钢板阻尼器塑性变形发展明显滞后,其初始屈服、压曲、撕裂等现象和对应的位移角和试件的极限变形均大于试件 IRRC-2。但由于柱身塑性变形发展过大,试件的震后修复受到不利影响,无法实现震后性能恢复的设计目标。

5) 试件 IRRC-2 的塑性变形均集中在钢板阻尼器上,1/25 位移角下,钢板阻尼器水平条带即全部撕裂,试件承载力下降,试验终止。柱身和其他连接部位均保持弹性状态,试验后钢板阻尼器可以方便替换,性能可快速恢复。

综上,柱根内部加劲肋高度较低时,试件的塑性

变形包括钢板阻尼器和柱身两部分,试件的极限变形能力优越,但无法实现震后快速修复。反之,试件的塑性变形集中于钢板阻尼器上,极限变形能力降低,但强度和刚度均有不同程度提高,可以实现震后性能的快速恢复。

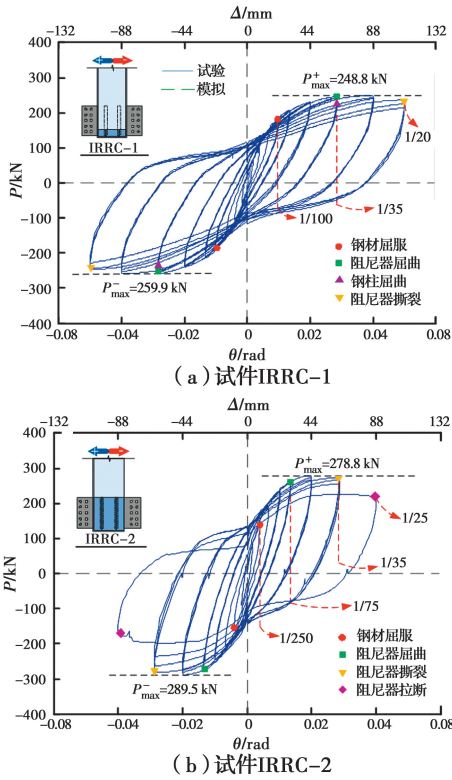


图 6 试件滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic curves of specimens

2.3 骨架曲线及刚度曲线

试件的骨架曲线如图 7 所示,骨架曲线的特征点见表 2。其中,试件的屈服位移采用能量等值法确定^[27]。试件的刚度曲线如图 8 所示。由图 7、图 8 和表 2 可见:柱根内部加劲肋高度较大的试件 IRRC-2 初始刚度和最大承载力均明显高于试件 IRRC-1。试件 IRRC-2 的最大承载力和初始刚度分别比试件 IRRC-1 提高了 11.5% 和 25.1%。

试件 IRRC-2 在 1/50 位移角达到荷载峰值,1/25 位移角下,由于钢板阻尼器水平条带板的撕裂,承载力迅速下降并终止试验。试件 IRRC-1 的承载力在达到峰值荷载后没有明显衰减,试件 IRRC-1 正、反方向的极限变形分别比试件 IRRC-2 提高了 32.1% 和 46.5%,平均提高 39.3%。但试件 IRRC-1 在两个方向的位移延性系数分别比试件 IRRC-2 降低了 6.1% 和 6.3%,平均降低 6.2%。

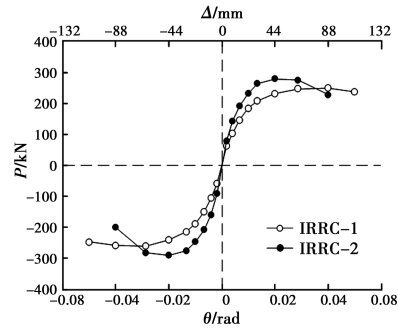


图 7 试件骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves of specimens

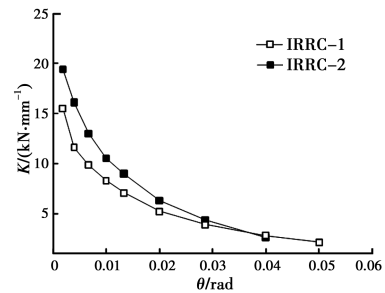


图 8 试件刚度曲线
Fig. 8 Stiffness curves of specimens

表 2 骨架曲线特征点试验结果

Table 2 Test results of characteristic point of skeleton curves

No.	方向	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ
IRRC-1	+	214	33.5	249	86.5	236	110.0	3.3
	-	223	34.3	260	86.1	248	110.0	3.2
IRRC-2	+	238	23.5	279	43.7	237	83.3	3.5
	-	248	22.4	289	43.6	246	75.1	3.4

注: P_y 和 D_y 分别为试件的屈服强度和屈服位移; P_m 和 D_m 分别是试件的最大承载力及其对应的位移; D_u 和 P_u 分别为极限荷载下降到 85% 时对应的位移与荷载值; $m = D_u/D_y$, 为试件的位移延性系数。

2.4 耗能性能

各试件在不同位移角下 3 次循环总的耗能如表 3 所示。由表 3 可见:

1) 1/35 位移角前,试件 IRRC-2 的耗能明显大于试件 IRRC-1。说明较大的柱根内部加劲肋高度保证了钢板阻尼器塑性耗能的充分发展。加劲肋高度较小的试件 IRRC-1 由于钢柱侧面板的平面外变形,钢板阻尼器的塑性耗能发挥滞后。

2) 超过 1/25 位移角后,由于试件 IRRC-2 的钢板阻尼器水平条带板撕裂导致加载终止,其耗能总量小于试件 IRRC-1。

综上所述,合理的柱根内部加劲肋构造可以保证钢板阻尼器在较小位移角下充分发挥耗能能力。

表 3 不同位移幅值下的耗能

Table 3 Dissipated energy at different drift ratios

No.	位移角					总耗能 kJ
	为 1/75	为 1/50	为 1/35	为 1/25	为 1/20	
IRRC-1	18.68	37.32	68.22	109.84	136.71	384.05
IRRC-2	32.83	62.38	98.46	40.03*	*	257.83

注: * 表示该试件未加载完该水平位移角的 3 个循环。

2.5 主要应变变量测结果与分析

1) 钢管柱身应变 两个试件的钢管柱柱身应变随加载过程的变化曲线如图 9 所示。试件 IRRC-1 钢管柱柱身在加载前期处于弹性状态, 加载至 1/35 位移角达到屈服应变, 并在之后的位移幅值下不断增大, 最大应变达到了 $-3885\mu\epsilon$, 钢管柱屈曲明显, 难以实现震后损伤修复。试件 IRRC-2 的柱身应变则始终处于弹性范围内, 最大应变为 $-974\mu\epsilon$, 实现了“强柱弱阻尼”的设计目标, 有利于进行震损钢板阻尼器的原位替换, 构件性能恢复易于实现。

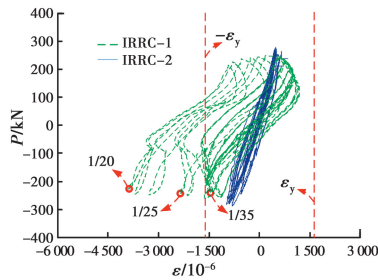


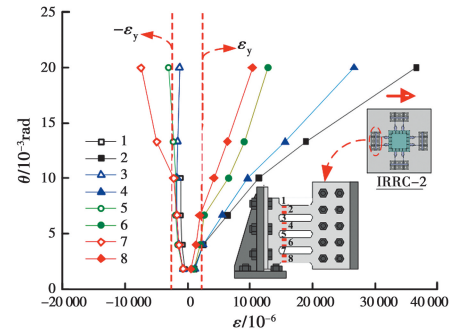
图 9 柱身荷载-应变滞回曲线

Fig. 9 Load vs strain hysteretic curves of steel columns

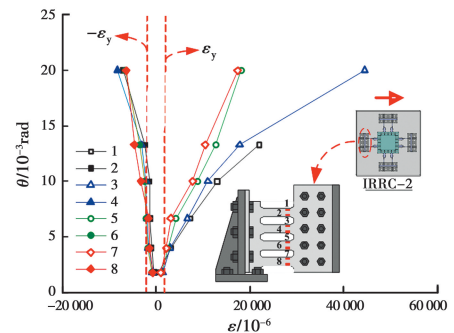
2) 钢板阻尼器应变 两个试件的阻尼器应变整体发展规律相近, 以正向水平荷载作用下试件 IRRC-2 左侧阻尼器条带板应变随加载位移角的变化曲线为例进行说明, 如图 10 所示。

由图 10 可见, 条带板左下端和右上端受拉而左上端和右下端受压, 受拉处的应变值明显高于受压处, 阻尼器整体处于拉剪状态。上部条带板应变数值高于下部条带板, 这是由于柱身摇摆过程中上部条带板的水平变形分量较大所致, 这也与条带板的撕裂发展现象一致。同理, 右侧阻尼器处于压剪状态, 有相似规律。

图 11 为两个试件阻尼板同一位置处应变随水平荷载的发展曲线, 由图 11 可见, 柱根内部加劲肋高度较小的试件 IRRC-1 钢板阻尼器应变发展明显滞后于试件 IRRC-2, 这也与之前的分析一致。



(a) 阻尼器条带板左侧应变分布



(b) 阻尼器条带板右侧应变分布

图 10 阻尼器条带板应变分布曲线

Fig. 10 Development of displacement angle vs damper strain

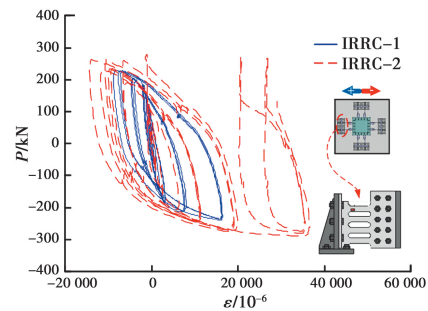


图 11 阻尼器荷载-应变滞回曲线

Fig. 11 Load vs strain hysteretic curves of damper

3 结论

通过两个足尺 IRR 柱试件的低周往复加载试验, 研究柱根内部纵向加劲肋高度对试件抗震性能的影响, 得到以下主要结论:

1) 柱根内部纵向加劲肋高度对试件破坏形态有显著影响。加劲肋高度较小的试件 IRRC-1 最终破坏时柱身塑性变形较大, 难以实现震后快速修复。而加劲肋高度较大的试件 IRRC-2 最终破坏时钢板阻尼器撕裂拉断, 柱身则始终保持弹性, 震后可方便替换损伤阻尼器, 从而实现性能快速恢复。

2) 加劲肋高度较大的试件 IRRC-2 初始刚度、最大承载力分别比试件 IRRC-1 提高了 25.1% 和 11.5%。由于钢板阻尼器塑性变形的提前发挥, 试

件 IRRC-2 的极限变形比试件 IRRC-1 降低了 39.3%,但两个试件的位移延性系数差异不大。

3)1/35 位移角之前,试件 IRRC-2 耗能明显高于试件 IRRC-1。1/25 位移角下,试件 IRRC-2 由于钢板阻尼器拉断,终止加载,其总耗能量小于试件 IRRC-1。

4)加劲肋高的试件,柱身应变明显小于加劲肋低的试件,而加劲肋高度小的试件阻尼板应变发展明显滞后。

参考文献:

- [1] 吕西林,周颖,陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 130-139.
LV X L, ZHOU Y, CHEN C. Research progress on innovative earthquake-resilient structural systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 130-139. (in Chinese)
- [2] 周颖,吴浩,顾安琪. 地震工程:从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.
ZHOU Y, WU H, GU A Q. Earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [3] HOUSNER G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-417.
- [4] 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.
- [5] EATHERTON M R, HAJJAR J F, DEIERLEIN G G, et al. Controlled rocking of steel-framed buildings with replaceable energy-dissipating fuses [C]//Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering, 2008: 12-17.
- [6] 吕西林,崔晔,刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 19-26.
LV X L, CUI Y, LIU J J. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 19-26. (in Chinese)
- [7] 鲁亮,江乐,李鸿,等. 柱端铰型受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震性能的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 193-198, 216.
LU L, JIANG L, LI H, et al. Shaking table tests for aseismic performance of a controllable rocking reinforced concrete frame with column-end-hinge joints [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(4): 193-198, 216. (in Chinese)
- [8] 鲁亮,李鸿,刘霞,等. 梁端铰型受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 59-66.
LU L, LI H, LIU X, et al. Shaking table test on seismic performance of controlled rocking reinforced concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 59-66. (in Chinese)
- [9] 杨溥,高浩捷,蔡森,等. 新型自复位钢桁架梁的受力机理及抗震性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 12-18.
YANG P, GAO H J, CAI S, et al. Analysis of stress mechanism and seismic behavior of a new self-centering steel truss beam [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(2): 12-18. (in Chinese)
- [10] OH S H, KIM Y J, RYU H S. Seismic performance of steel structures with slit dampers [J]. Engineering Structures, 2009, 31(9): 1997-2008.
- [11] SHEN Y L, CHRISTOPOULOS C, MANSOUR N, et al. Seismic design and performance of steel moment-resisting frames with nonlinear replaceable links [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1107-1117.
- [12] 郭子雄,朱奇云,刘阳,等. 装配式钢筋混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 98-105.
GUO Z X, ZHU Q Y, LIU Y, et al. Experimental study on seismic behavior of a new type of prefabricated RC column-steel beam frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 98-105. (in Chinese)
- [13] 刘阳,郭子雄,戴镜洲,等. 不同破坏机制的装配式 RCS 框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 18-28.
LIU Y, GUO Z X, DAI J Z, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated RCS frame joints with different failure mechanisms [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 18-28. (in Chinese)
- [14] 邵铁峰,陈以一. 采用耗能角钢连接的部件可更换梁

- 试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(7): 38-45.
- SHAO T F, CHEN Y Y. Experimental study on steel H-beams with replaceable energy dissipation angle [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(7): 38-45. (in Chinese)
- [15] CALADO L, PROENÇA J M, ESPINHA M, et al. Hysteretic behaviour of dissipative bolted fuses for earthquake resistant steel frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 151-162.
- [16] 何乐平, 凌霄, 胡启军, 等. 矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通节点抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 118-126.
- HE L P, LING X, HU Q J, et al. Experimental analysis of seismic performance of the joint of rectangular tube concrete column-SRC beam steel [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 118-126. (in Chinese)
- [17] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 45-54.
- LIU Y, GUO Z X, JIA L P, et al. Experimental study on seismic performance of innovative replaceable composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 45-54. (in Chinese)
- [18] 吕英婷, 郭子雄, 黄婷婷, 等. 装配式震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 1-10, 22.
- LV Y T, GUO Z X, HUANG T T, et al. Experimental study on the seismic performance of earthquake-resilient prefabricated composite columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 1-10, 22. (in Chinese)
- [19] MARRIOTT D, PAMPANIN S, PALERMO A. Biaxial testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replacable dissipaters [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(15): 1723-1741.
- [20] GUO T, CAO Z L, XU Z K, et al. Cyclic load tests on self-centering concrete pier with external dissipaters and enhanced durability [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(1): 04015088.
- [21] 孙治国, 谷明洋, 司炳君, 等. 外置角钢摇摆-自复位双柱墩抗震性能分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 40-49.
- SUN Z G, GU M Y, SI B J, et al. Seismic behavior analyses of rocking self-centering double column bridge piers using external angles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 40-49. (in Chinese)
- [22] 韩强, 贾振雷, 何维利, 等. 自复位双柱式摇摆桥梁抗震设计方法及工程应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 169-177.
- HAN Q, JIA Z L, HE W L, et al. Seismic design method and its engineering application of self-centering double-column rocking bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 169-177. (in Chinese)
- [23] 吕英婷, 郭子雄, 刘阳, 等. 震损可原位修复钢桥墩设计及其抗震性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1960-1970.
- LV Y T, GUO Z X, LIU Y, et al. Seismic behavior and design method of an innovative replaceable-on-site steel bridge pier [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1960-1970. (in Chinese)
- [24] LIU Y, GUO Z X, LIU X J, et al. An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: Experimental program on seismic performance [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 830-840.
- [25] 许一鹏, 刘阳, 林茂彬, 等. IRR 柱承台局部压应力分布及其计算方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 439-446.
- XU Y P, LIU Y, LIN M B, et al. Distribution of local bearing stress at foundation of IRR columns and calculation method [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2020, 41(4): 439-446. (in Chinese)
- [26] 黄婷婷, 郭子雄, 刘阳, 等. 震损可原位修复组合柱抗震性能[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 686-690.
- HUANG T T, GUO Z X, LIU Y, et al. Study on seismic behavior of repairable-on-site composite column [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, 37(6): 686-690. (in Chinese)
- [27] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155-166.