

偏心竖缝耗能预制剪力墙抗震性能试验研究

张玉敏^{1,2}, 蔡占军^{1,2}, 徐礼贤^{1,2}, 王宇亮^{1,2}

(1. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省地震工程研究中心, 河北 唐山 063009)

摘要: 提出一种新型竖缝耗能预制剪力墙结构, 对偏心设置竖向缝的耗能预制剪力墙试件进行低周往复加载试验, 分析研究试件的刚度退化、承载力、破坏形态、耗能能力以及延性等力学性能, 并将试验结果与现浇剪力墙的试验结果进行对比分析。结果表明: 偏心竖缝耗能剪力墙与现浇剪力墙表现为弯剪破坏; 与现浇整体剪力墙试件对比, 偏心竖缝耗能剪力墙的刚度与承载力相差不大, 延性和耗能能力较好, 变形能力得到改善。偏心竖缝耗能预制剪力墙具有很好的抗震性能。

关键词: 偏心; 竖缝; 耗能; 预制剪力墙; 抗震性能

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0478-07

Experimental study on seismic performance of prefabricated energy dissipation shear walls with eccentric vertical joints

ZHANG Yumin^{1,2}, CAI Zhanjun^{1,2}, XU Lixian^{1,2}, WANG Yuliang^{1,2}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Hebei Tangshan 063210, China;

2. Earthquake Engineering Research Center of Hebei Province, Hebei Tangshan 063009, China)

Abstract: A type of prefabricated energy-dissipating shear wall specimen with eccentric vertical joints was designed and low-cycle reciprocating loading test was carried out to analyze the stiffness degradation, bearing capacity, failure form, energy-dissipating capacity and ductility of the specimen, and the test results were compared with the cast-in-place shear wall specimen. Results show that the eccentric vertical joint energy dissipation shear wall and cast-in-place shear wall are characterized by destruction of the bending. The stiffness and bearing capacity of the energy-dissipating shear wall with eccentric vertical joint are similar to the cast-in-place shear wall specimen, but the ductility and energy-dissipating capacity are better. The deformation capacity of the energy-dissipating prefabricated shear wall with eccentric vertical joint has good seismic performance.

Key words: eccentric; vertical joint; energy dissipation; precast shear wall; seismic performance.

装配式剪力墙拼装时会存在水平缝和竖向缝, 其连接性能对整体剪力墙结构起到十分重要的影响。为了改善预制剪力墙的抗震性能, 达到现浇剪力墙的承载力, 且在水平作用时破坏减轻甚至没有破坏产生, 提出了新型耗能剪力墙。对剪力墙设置竖缝的设计理念^[1]被提出后, 许多专家学者对竖缝剪力墙进行研究^[2-4], 发现带竖缝剪力墙的整体刚度弱于现浇剪力墙。金属阻尼器作为结构被动能量吸收的耗能元件^[5], Kelly^[6]、Pall^[7]、周云^[8-10]等对阻尼器进行研究。在竖缝剪力墙中设置金属阻尼器, 不但能够提高开缝剪力墙的刚度, 而且可以提高剪力墙的延性、变形能力, 从而剪

力墙的抗震性能得到提高。李爱群^[11]提出在带垂直缝剪力墙的基础上放入摩擦阻尼器, 经试验研究发现放入摩擦阻尼器的竖缝剪力墙耗能充分, 抗震性能提高。李敏^[12]基于 Opensees 平台对其提出的带耗能装置的开缝剪力墙进行分析。袁新禧等^[13]设计了带两条竖缝及金属阻尼器剪力墙及一个现浇剪力墙对比试件。黄祖桓^[14]提出在剪力墙中间开缝并将边缘构件设置钢管混凝土并进行试验研究, 结果表明新型开槽耗能剪力墙的主要抗震性能指标表现良好。

利用已有的竖缝剪力墙的研究理论, 考虑到装配式剪力墙结构构件的生产与运输, 以及构件

收稿日期: 2020-02-28 修改稿日期: 2020-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678237)

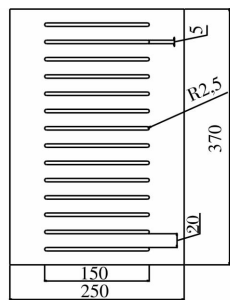
第一作者: 张玉敏, (1973—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事工程抗震、钢筋混凝土结构理论方面的科学研究. E-mail: 710765269@qq.com

通讯作者: 王宇亮, (1980—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事工程抗震、钢筋混凝土结构理论方面的科学研究. E-mail: 14522466@qq.com

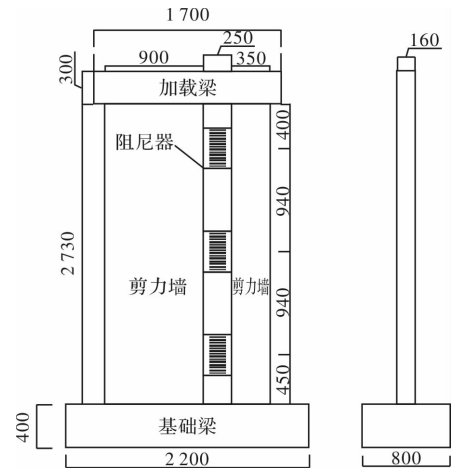
模数对结构尺寸的限制等影响。本课题组设计了偏心竖缝耗能预制剪力墙,利用预制剪力墙拼装形成的水平缝采用“湿式设计”,将其等同于现浇剪力墙,使结构在垂直方向的承载力更好地传递和抵抗水平剪力。偏心竖向缝中使用金属或摩擦阻尼器相连形成“半干式结构”,既能保证结构的整体性,大震作用下,阻尼器又发挥耗能作用,提高剪力墙结构的抗震性能。对偏心竖缝耗能剪力墙进行低周往复加载试验,研究留置偏心竖缝对剪力墙的抗震性能影响,并与整体现浇剪力墙进行对比。

1 试验概况

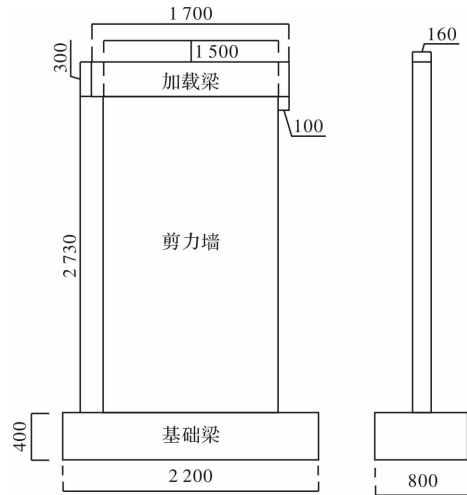
设计了1个偏心竖缝的预制剪力墙试件及现浇整体剪力墙对比试件,编号分别为YW-1、XYW-1,现浇整体剪力墙试件XYW-1的几何截面尺寸为 $1\,500\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,带竖缝预制剪力墙YW-1短墙肢几何截面尺寸为 $350\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,长墙肢几何截面尺寸为 $900\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,预制剪力墙设置竖缝缝宽为 250 mm ,竖向通缝中纵向等间距放置三个耗能阻尼器。通过课题组前期试验研究^[15-16],对比较钢阻尼器与摩擦阻尼器的力学性能及耗能情况,选择耗能效果较好的软钢阻尼器。本试验中选择使用的软钢阻尼器开缝形式为横向缝。横缝软钢阻尼器的弯曲单元为 20 mm ,横缝宽度为 5 mm ,软钢阻尼器的厚度为 8 mm ,其屈服位移为 1.75 mm ,极限位移为 20.2 mm ,屈服荷载为 55.77 kN ,极限荷载为 94.74 kN ,阻尼器详细尺寸见图1(a)。两个试件均使用HRB400级钢筋制作,使用的混凝土强度等级为C30。预制剪力墙在浇筑混凝土前预埋连接坠板,耗能阻尼器与预制剪力墙通过预埋板采用焊接方式进行连接,为了方便进行加载和加载过程中保证剪力墙试件底部完全固定,设计了加载梁和基础底座。试件加载全过程有限位装置,试件的几何尺寸图见图1(b、c)。



(a) 横缝软钢阻尼器几何尺寸



(b) 试件YW-1几何尺寸



(c) 试件XYW-1几何尺寸

图1 阻尼器及剪力墙试件尺寸图

Fig. 1 Dimensions of damper and shear wall specimens

2 加载装置及制度

2.1 加载装置

试验的加载装置见图2,竖向轴压加载由液压千斤顶施加完成,水平加载装置为MTS作动器,MTS作动器最大力为 $1\,000\text{ kN}$ 。保证试件加载时剪力墙底部固定,试件基础底座通过压梁与地锚固定在刚性台座上。为了方便加载,加载支架通过螺杆将加载梁夹紧并与MTS作动器加载头连接。

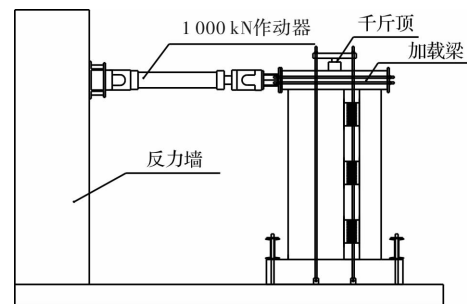


图2 试验加载装置图

Fig. 2 Diagram of test loading device

加载时,避免轴压力局部集中受力过大,在加载梁顶部放置一块钢板保证均匀受力。

2.2 加载制度

本试验中耗能阻尼器两侧连接的墙肢非对称,保证加载过程中两部分墙肢受力均匀,对剪力墙试件进行低周往复位移加载,每级加载工况循环2次,整个加载过程水平加载采用位移控制。在进行水平加载前,首先使用千斤顶施加轴压力。试件的加载制度如下:

竖向加载:实验过程中,试件施加轴压比 N 为 0.1,轴压力见表 1。

水平加载:水平加载采取位移控制的加载方式,加载速率为 0.5 mm/s,每级加载均循环两次。《建筑抗震设计规范》^[17] 中规定钢筋混凝土抗震剪力墙的弹塑性层间位移角限值 θ_p 是 1/120,剪力墙试件高 2 880 mm,本试验中对应加载位移为 24 mm。未达到弹塑性位移角限制时,位移角以 1/840、2/840、4/840 进行加载,位移角为 1/120 之后,位移角以 0.5 倍增加,加载至试件破坏或者试件承载力下降到峰值荷载的 85% 停止加载。具体加载制度如表 2 所示。

表 1 各试件施加轴压力

Tab. 1 Axial pressure applied on each specimen

试件编号	截面尺寸 A/mm^2	f_c	N	轴压力 /kN
YW-1	1 250 × 160	14.3	0.1	286
XYW-1	1 500 × 160	14.3	0.1	343.2

表 2 各试件加载制度

Tab. 2 The loading system of each specimen

编号	层间位移角	水平顶点位移
1	1/840	3.4
2	2/840	6.9
3	4/840	13.7
4	7/840	24
5	10.5/840	36
6	14/840	48
7	17.5/840	60
8	21/840	72
9	24.5/840	84
...

2.3 测点布置与测点内容

主要测试内容为应变、位移、荷载及变形四部分。每个耗能阻尼器布置 4 个应变片,分别是阻

尼器上部第一个弯曲单元及中间弯曲单元的两侧,暗柱纵向钢筋、剪力墙竖向分布筋均在剪力墙底部上方 80 mm 处粘贴应变片。在各剪力墙试件底部上方 1 000 mm 以下范围内的水平分布筋的中间部位同样放置应变片。在试件纵向水平放置三个位移计,位置分别是加载梁的中心、剪力墙纵向中心、基础底座的上边缘。由于实验室目前位移计最大量程为 75 mm,还需要在加载梁的中心安装拉线传感器以防剪力墙位移超出位移计量程。每个耗能阻尼器下方竖向布置两个位移计,采集加载过程中阻尼器的相对位移。本试验中的荷载采用 MTS 作动器采集的数据。肉眼观察试件在荷载作用下的裂缝开展、剪力墙变形、混凝土压碎剥落、耗能阻尼器等变化。

3 试验过程及破坏形态

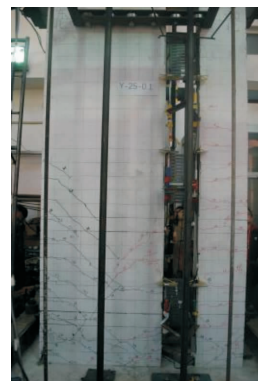
本文中规定作动器伸出为正(图 2 向右为伸出方向),收缩为负(图 2 向左为收缩方向)。

3.1 YW-1 试件试验现象

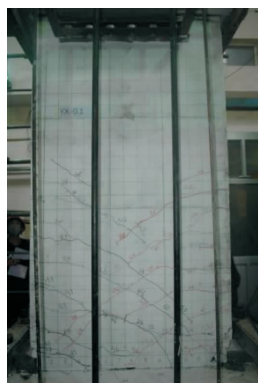
试件加载初期试件没有明显变化,位移加载至 3.91 mm 时,剪力墙底部出现一条水平裂缝。位移加载至 13.7 mm 时,原有裂缝继续延伸开展,并伴随混凝土轻微咔咔的开裂声。加载至 24 mm 时,正向加载时长肢剪力墙左侧边缘出现斜裂缝并向下延伸;负向加载时,长肢剪力墙的右侧边缘出现斜向下 45° 开展的斜裂缝,形成第一条“X”交叉裂缝,短肢剪力墙出现数条水平裂缝。加载至 48 mm 时,长肢剪力墙远离竖缝端底角混凝土出现剥落。短肢剪力墙的中部继续开展水平裂缝。位移继续加载,原有裂缝的宽度增加,混凝土被压碎。

3.2 XYW-1 试件试验现象

试件加载初期无明显变化,位移加载至 7.74 mm 时,剪力墙远缝端底部出现一条斜裂缝,加载至 13.7 mm 时,剪力墙受压区出现数条斜裂缝;



(a) 试件 YW-1 裂缝分布图



(b) 试件XYW-1裂缝分布图

图3 各试件裂缝分布图

Fig. 3 Crack distribution of each test piece

剪力墙受拉区出现水平裂缝,随着位移增加,裂缝沿主对角线延伸.加载至 24 mm 时,上级裂缝继续延伸,形成“X”交叉裂缝.加载至 36 mm 时,原有裂缝继续开展且缝宽增大,裂缝缝宽增大至 6 mm.加载至 48 mm 时,上级缝宽增大的裂缝延伸至剪力墙底部形成水平缝.加载至 60 mm 时,剪力墙梁端底角混凝土被压碎剥落.位移继续加载至 72 mm,剪力墙加载端底部混凝土大块剥落,钢筋弯曲变形,停止加载.

3.3 破坏形态

两个试件的破坏形态均表现为弯剪破坏.具体的破坏形态分为三个阶段:

(1) 弹性阶段:耗能竖缝剪力墙试件的两片墙肢、三个耗能阻尼器以及现浇试件的剪力墙均未出现明显变化.

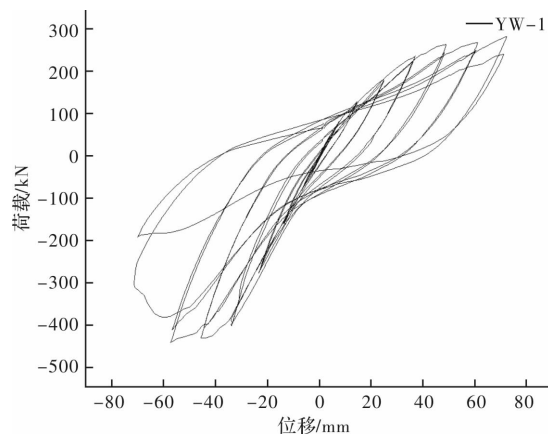
(2) 弹塑性阶段:耗能剪力墙长墙肢的自由端出现数条裂缝,裂缝沿剪力墙对角开展,短墙肢受拉区出现水平弯曲裂缝,随着位移增加,裂缝逐渐延伸形成贯通裂缝.现浇剪力墙墙体两侧边缘出现数条裂缝,裂缝并沿对角发展形成交叉裂缝,位移继续增加,新的裂缝继续产生,裂缝宽度也在不断增大.

(3) 破坏阶段:一字形耗能剪力墙的加载端底部混凝土被压碎并伴有剥落现象,长肢剪力墙的裂缝分布均匀;没有新裂缝产生,前期阶段产生的裂缝在此阶段宽度增大.现浇剪力墙在此阶段主要是裂缝宽度增加.位移继续增加,剪力墙底部出现混凝土剥落现象,钢筋被压弯变形.

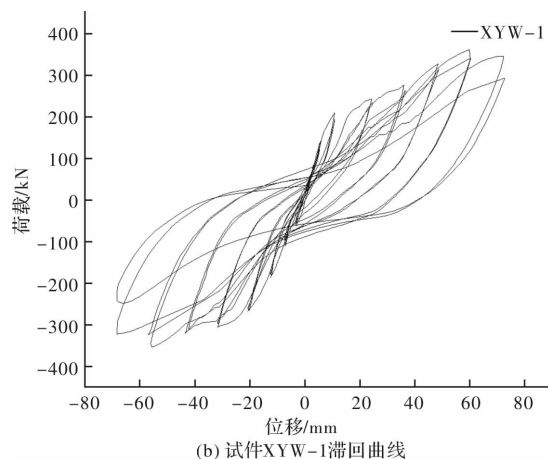
4 试验结果分析

4.1 试件滞回曲线

试件 YW-1、XYW-1 的荷载-位移滞回曲线如图 4 所示.曲线图中荷载为 MTS 作动器采集的水



(a) 试件YW-1滞回曲线



(b) 试件XYW-1滞回曲线

图4 各试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curve of each specimen

平荷载,位移为加载梁处布置的水平向位移计实测的位移.加载初期,加载和卸载均呈现线性关系,滞回环包围面积小,滞回曲线呈梭形,此刻试件处于弹性阶段.随着控制位移增加,滞回环面积增大,具有良好的耗能能力及抗震性能.滞回曲线斜率逐渐减小,残余变形增加.试件 XYW-1 的“捏缩”现象较试件 YW-1 明显,表明滞回曲线受到钢筋滑移的影响.

4.2 试件骨架曲线及延性

试件 YW-1、XYW-1 的骨架曲线如图 5 所示.试件 XYW-1 的骨架曲线对称,试件 YW-1 由于偏心设置竖缝,其骨架曲线呈非对称现象.由骨架曲线可以看到,竖缝耗能剪力墙通过设置竖缝减小自身刚度,现浇剪力墙试件初始刚度,随着荷载的增加,竖缝耗能剪力墙骨架曲线斜率小于现浇剪力墙,说明耗能剪力墙耗能能力优于现浇剪力墙.正向加载时,将剪力墙开竖缝使之成为连续的高宽比增加的剪力墙,阻尼器对剪力墙试件的作用力向上,与轴压力方向相反,现浇剪力墙试件的屈服荷载大于开缝剪力墙的屈服荷载.负向加载时,阻尼器对剪力墙试件的作用力向下,

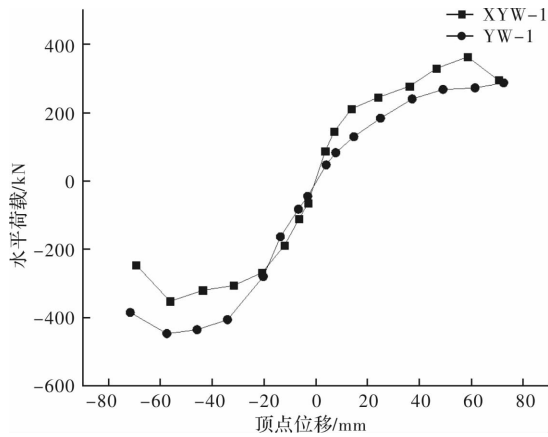


图5 各试件骨架对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of skeleton of each specimen

与轴压力方向一致,耗能竖缝剪力墙荷载大于现浇剪力墙,表明较大荷载作用下,金属阻尼器可以消耗能量,提高剪力墙承载力。

延性系数是评判剪力墙变形能力的重要指标。由表3可知,带有竖缝的耗能剪力墙试件的延性系数大于现浇剪力墙试件,试件 YW-1 的延性系数比试件 XYW-1 提高了 36.1%、41.78%, 偏心竖缝耗能剪力墙的变形能力强于现浇剪力墙。偏心竖缝耗能预制剪力墙试件延性系数均大于 3, 表现出良好的延性性能。

4.3 试件刚度退化曲线

考虑到耗能剪力墙偏心设置竖缝,采用等效刚度 k 研究试件的刚度退化。刚度退化曲线对比图如图6。试件 XYW-1 的初始刚度大于试件 YW-1, 开竖缝削弱了剪力墙的刚度。弹性阶段内,随着加载位移的增加,试件 XYW-1 刚度退化曲线逐渐平缓。试件 YW-1 的刚度曲线斜率变化的缓慢,说明耗能剪力墙试件中的阻尼器开始工作,改善剪力墙结构的耗能能力。进入塑性变形阶

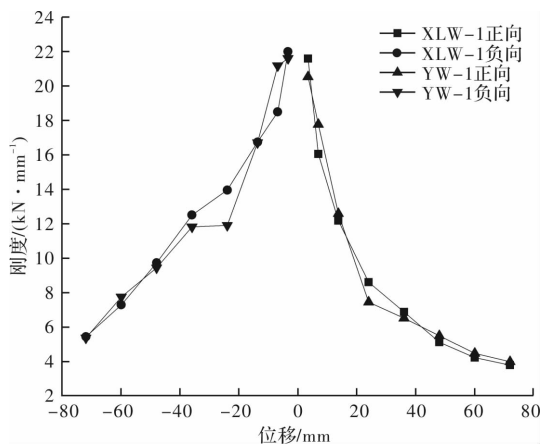


图6 各试件刚度退化曲线

Fig. 6 Stiffness degradation curve of each specimen

段,两个试件的刚度退化速率下降,二者刚度退化曲率相似,表明耗能剪力墙中的软钢阻尼器提高了试件的耗能能力。试件 YW-1 在正负向加载时,刚度退化曲线不同,由于负向加载时,由于短墙肢受弯带动阻尼器,小墙肢受压,增大大墙肢的受力面积,软钢阻尼器可以实现耗能,消耗部分能量。

$$H_s = \frac{S_1}{2\pi(S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODG})} \quad (1)$$

其中: S_1 为滞回环的面积, $S_{\triangle OBE}$ 、 $S_{\triangle ODG}$ 分别为上下两个三角形的面积。图6为耗能能力计算示意图。

各试件等效粘滞阻尼系数对比见图8,由图可以清楚得知,设置偏心竖缝削弱了剪力墙的刚度,同时削弱了耗能预制剪力墙的耗能能力。随着加载位移的增加,试件 YW-1 的等效阻尼系数一直增加,说明竖缝耗能剪力墙试件加载过程中,在垂直缝中设置的软钢阻尼器提高了剪力墙试件的耗能性能。直至加载结束两个试件的耗能系数相差不大,两个试件均表现良好的耗能能力。

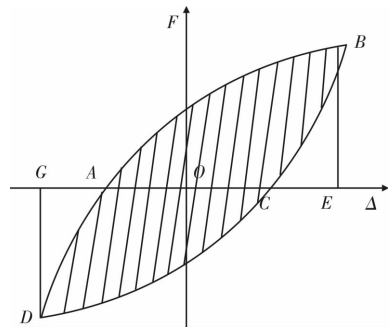


图7 耗能计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of energy consumption calculation

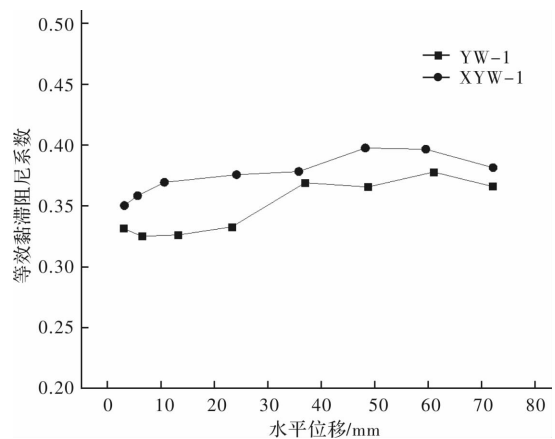


图8 等效粘滞阻尼系数

Fig. 8 Equivalent viscous damping coefficient

表 3 试件特征点荷载
Tab. 3 Load at characteristic point of specimen

试件编号	加载 方向	开裂点 Δ_{cr}/mm		屈服点		峰值点		极值点		延性系数 μ
		P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	Δ_{\max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
XYW-1	正向	177.57	7.66	216.57	19.96	363.39	58.32	235.13	62.42	3.13
	负向	112.61	8.18	239.70	19.61	351.63	56.42	298.89	48.79	2.49
YW-1	正向	82.915	3.92	129.734	14.413	286.962	72.235	243.918	61.4	4.26
	负向	118.29	5.639	279.476	20.932	446.245	57.738	384.803	73.85	3.53

5 结论

本文对偏心竖缝耗能剪力墙在往复荷载作用下进行试验研究，对比新型耗能预制剪力墙与现浇整体剪力墙的力学性能及耗能情况，得出以下结论：

(1)偏心竖缝耗能剪力墙试件的大墙肢的破坏形态与整体现浇剪力墙均为弯剪破坏，小墙肢的破坏形态为受弯破坏。试件底部两侧的混凝土被压碎，裂缝分布均匀，走势清晰。加卸载过程中，产生残余变形，两个试件的滞回曲线均分“捏缩”现象，表明发生不同的钢筋滑移现象。

(2)偏心竖缝耗能剪力墙试件设置垂直竖缝，削弱了其初始刚度与承载力，正负加载方向承载力不同，对结构性能产生一定影响。但其变形性能优于现浇剪力墙试件，偏心竖缝的耗能剪力墙的延性系数比现浇剪力墙提高了 36.1%、41.78%，刚度退化速度缓慢。偏心竖缝耗能预制剪力墙表现出良好的抗震性能。

(3)预制耗能剪力墙试件的等效黏滞阻尼系数与现浇整体剪力墙试件较为接近，但由于偏心竖缝的削弱，装配式剪力墙结构的等效粘滞阻尼系数略低些。阻尼器在加载过程中屈服耗能，提高了预制装配式剪力墙结构的抗震性能，并起到了很好的连接作用。

参考文献 References

[1] 武藤清. 结构动力设计[M]. 藤家禄,译 北京:中国建筑工业出版社,1984.
MUTO KIYOSHI. Structure dynamic design, [M]. TENG Jialu Tanslated. Beijing: China Building Industry Press, 1984.

[2] 叶列平,康胜,曾勇. 双功能带缝剪力墙的弹性受力性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999,39(12):79-81.
YE Lieping, KANG Sheng, ZENG Yong. Elastic be-

havior analysis of double-function shear wall with joint [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1999,39 (12): 79-81.

[3] 蒋焕军. 沿竖向耗能剪力墙抗震理论和应用研究[D]. 上海:同济大学,1999.
JIANG Huanjun. Seismic theory and application research along vertical energy-dissipated shear wall [D]. Shanghai: Tongji University, 1999.

[4] 张建伟,曹万林,刘建民,等. 带双层暗支撑开竖缝剪力墙抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程,2000,16(4):87-91.
ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, LIU Jianmin, et al. Experimental study on seismic behavior of shear wall with double dark support [J]. World Seismic Engineering, 2000,16 (4): 87-91.

[5] 章丛俊,李爱群,赵明. 软钢阻尼器耗能减震结构的研究与应用综述[J]. 工业建筑,2006,36(9):17-21.
ZHANG Congjun, LI Aiqun, ZHAO Ming. Summary of research on and application of passive energy dissipation sytem of mild steel damper[J]. Industrial Architecture, 2006,36(9):17-21.

[6] KELLY J M, SKINNER R I, HEINE A J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures [J]. Society for Earthquake Engineering. 1972.5(3):63-88.

[7] PALL A S & MARSH C. Seismic response of friction damped braced frames[J]. ASCE, Journal of Structural Division,1982,108(6):1313-1323.

[8] 周云,刘季. 双环软钢耗能器的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(2):117-123.
ZHOU Yun, LIU Ji. Experimental research on dual-ring mild steel energy dissipation device [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 117-123.

[9] 周云,刘季. 耗能减震技术研究与应用进展[J]. 世界地震工程,1995,1(1):7-9.
ZHOU Yun, LIU Ji. Research and application progress of energy dissipation and shock absorption technology[J]. World Earthquake Engineering,1995,1(1):7-9.

[10] 王涛,邓雪松,周云. 不同构造参数对圆环耗能器性能的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报,2012,32(4):429-435.
WANG Tao, DENG Xuesong, ZHOU Yun. Analysis of the influence of different structural parameters on

- the performance of the ring damper [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32 (4): 429-435.
- [11] 李爱群. 钢筋混凝土剪力墙结构抗震控制及控制装置研究[D]. 南京:东南大学, 1992.
- LI Aiqun. Research on seismic control and control device of reinforced concrete shear wall structure [D]. Nanjing: Southeast University, 1992.
- [12] 李敏. 带耗能装置开缝剪力墙的设计研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
- LI Min. Design research of slotted shear wall with energy dissipation device [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [13] 袁新禧. 带竖缝及金属阻尼器的混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2015.
- YUAN Xinxi. Experimental study on seismic performance of concrete shear walls with vertical joints and metal dampers [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [14] 黄祖桓. 开缝耗能组合墙的抗震性能研究[D]. 广州:广州大学, 2017.
- HUANG Zuhuan. Research on seismic performance of slotted energy dissipation composite wall [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [15] 丁祖贤. 钢板阻尼器在预制剪力墙结构竖缝的应用研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2019.
- DING Zuxian. The study on application of steel plate dampers in vertical joints of prefabricated shear wall structures[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology
- [16] 谷玉珍. 摩擦阻尼器在预制剪力墙竖缝的应用研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2019.
- GU Yuzhen. Application of friction damper in vertical joints of prefabricated shear wall [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010. [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

(编辑 沈波)

(上接第 469 页)

- [16] BEfron. 1977 Rietz2dx Lecture-Bootstrap methods; Another look at the Jackknife[J]. The Annals of Statistics. 1979, 7(1):1-26.
- [17] 陈立宏,陈祖煜,刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005(1): 37-40, 45.
- CHEN Lihong, CHEN Zuyu, LIU Jinmei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics. 2005, 26(1): 37-40, 45.
- [18] 苏永华,何满潮,孙晓明. 大子样岩土随机参数统计方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 117-119.
- SU Yonghua, HE Manchao, SUN Xiaoming. Approach on asymptotic approximations of polynomials for probability density function of geotechnics random parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 117-119.
- [19] ZHE Luo, ATAMTURKTUR Sez, JUANG Hsein. Bootstrapping for characterizing the effect of uncertainty in sample statistics for braced excavations[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(1): 13-23.
- [20] Harianto Rahardjo, Alfredo Satyanaga, Eng-choon Leong et al. Variability of residual soil properties[J]. Engineering Geology, 2012, 141: 124-140.
- [21] ASklar. Fonctions de répartition à dimensions et leurs marges[J]. Publications de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris, 1959, 8: 229-231.
- [22] AKAIKE, H. New look at statistical-model identification[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 716-723.
- [23] ZHANG Lan. Multivariate hydrological frequency analysis and risk mapping[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2005.
- [24] Genest Christian, Remillard Bruno, Beaudoin David. Goodness of fit tests for copulas: A review and a power study[J]. Insurance Mathematics & Economics, 2009, 44(2): 199-213.
- [25] KOJADINOVIC Ivan, YAN Jun. Modeling multivariate distributions with continuous margins using the Copula R Package[J]. Journal of Statistical Software, 2010, 34(9): 1-20.
- [26] NELSEN R B. An introduction to copulas [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.
- [27] SHAMIRI A, HAMZAH N A, PIRMORADIAN A. Tail dependence estimate in financial market risk management: Clayton-gumbel Copula approach[J]. Sains Malaysiana, 2011, 40(8): 927-935.
- [28] BUCKLAND S T; BURNHAM K P; AUGUSTIN N H. Model selection: An integral part of inference[J]. Biometrics, 1997, 53(2): 603-618.
- [29] 骆飞. 小样本岩土参数统计特征估计及边坡稳定可靠性分析[D]. 重庆, 西南交通大学, 2017.
- LUO Fei. Small samples and reliability analysis of slope stability [D]. Chongqing, Southwest Jiaotong University, 2017.

(编辑 沈波)