

装配式拼装型减震墙板框架单元性能试验研究

张 超 邓雪松 龙佳栋 余 坤

(广州大学, 广东广州 510006)

摘要: 为研究装配式拼装型减震墙板框架的减震机理与性能, 设计 4 榀单层单跨装配式减震墙板框架、普通墙板框架和空框架模型试件, 通过低周反复加载试验对比研究其破坏特征、滞回曲线、刚度退化和耗能能力等。试验结果表明: 装配式拼装型减震墙板框架滞回曲线饱满、耗能能力强; 拼装型减震墙板所提供的附加抗侧刚度和水平承载力有限, 释放对装配式框架的过强约束作用, 从而减轻或避免普通填充墙板附加刚度效应所带来的结构抗震不利影响; 无论拼装与否, 减震墙板通过合理构造与设计均可减小或避免大位移加载工况下墙板自身的破坏; 拼装型减震墙板应注意墙板施工精度控制, 否则会影响其减震性能, 导致不必要的墙板破坏。

关键词: 装配式框架; 拼装型减震墙板; 拟静力试验; 抗震性能; 减震机理

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)01-0053-07

Experimental study on performance of precast assembled damping wall-frame unit

Zhang Chao Deng Xuesong Long Jiadong Yu Kun

(Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To learn energy dissipation mechanism and performance of precast assembled damping wall-frame, four reduced scale specimens of one-story and single-bay precast frame including prefabricated damping wall-frame, conventional wall-frame and bare frame were designed and tested for a comparison of the failure characteristics, hysteretic curves, energy-dissipating capacity and degradation of stiffness of the specimens. Test results indicate that the precast assembled damping wall-frame exhibits rounded hysteresis loops and well-performed energy dissipation capacity; compared to the conventional wall, the assembled damping wall can provide less additional horizontal bearing capacity and lateral stiffness of the frame, and therefore, by releasing the excessive restraint to the assembled frame, the adverse effects in seismic resistance of structure attributed to the additional stiffness from conventional infill walls can be alleviated or even avoided; the damping wall with rational constitution and design, whether it is assembled or not, can performs well in the cases of large loading displacement; the construction precision for assembled damping wall shall be controlled, otherwise its damping performance may be impaired, so that some unnecessary damage of walls may be produced.

Keywords: precast frame; assembled damping wall; quasi-static test; seismic performance; energy dissipation mechanism

E-mail: zhch2013@gzhu.edu.cn

引 言

装配式建筑是我国“十三五”规划重点发展的建筑结构体系, 随着装配式建筑的普及, 致力于装配式建筑的抗震安全性研究十分紧迫。目前, 国内外研究主要关注于装配式结构及连接节点的抗震性

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703600)、国家自然科学基金青年基金(51508117)、广东省自然科学基金(2016A030310259)、广州市科技计划项目(201607010026)和广州大学新进“优秀青年博士”培养计划项目(YB201714)

作者简介: 张超, 博士, 副教授

收稿日期: 2017-11-14

能,对填充墙(板)等围护系统的抗震研究相对较少^[1-9]。然而,多次地震灾害调查表明:框架填充墙在地震中破坏严重,普通填充墙约束效应和附加刚度对结构性能影响很大,容易导致框架结构出现扭转破坏、短柱破坏等^[10-11]。因此,为减小装配式建筑中普通填充墙(板)约束效应和附加刚度所带来的抗震不利影响,本文作者提出一种新型减震墙板,并通过前期试验验证了其用于装配式 RC 框架中的可行性^[12]。工程应用中,考虑到横条型减震墙板不利于框架跨度的灵活布置且不利于装配式结构的施工和标准化生产,基于标准墙板模数的拼装型减震墙板成为备受青睐的新选择。然而,拼装型减震墙板的实际减震效果以及由于分块墙板拼装施工所带来的减震性能影响和可能出现的抗震问题仍值得深入研究,为此,拟设计并制作 4 榀单层单跨装配式混凝土(采用不同墙板,包括普通墙板、减震墙板和拼装型减震墙板)框架单元试件,对比分析各不同框架单元的工作机理及破坏特征、滞回性能、耗能能力等。

1 装配式拼装型减震墙板框架单元设计

装配式拼装型减震墙板框架单元由拼装型减震墙板和装配式框架构成,如图 1 所示。其中拼装型减震墙板由分块标准墙板拼接而成,即墙板长度采用统一模数(尺寸),分块墙板之间在水平向通过拉结筋搭接拼装,在竖向设置减震层。分块墙板可采用轻质加气混凝土墙材,减震层选用具有良好变形能力及耗能性能的减震材料。在构造上,拼装型减震墙板一侧与框架柱固接,另一侧与框架柱之间留有缝隙并通过一定构造进行柔性连接,该柔性连接只约束墙板平面外运动而不限制其平面内滑移。

装配式拼装型减震墙板框架单元的工作原理是:在地震作用下,框架柱带动墙板单元发生往复水平运动,而墙板单元由于水平分缝和预留空间设置使其变形主要集中于减震层,如此通过单元之间相对运动释放了墙板对框架的约束效应和附加刚度作用,同时减震层的相对变形又可以耗散一部分地震能量,从而改善框架的抗震性能。

拼装型减震墙板与装配式框架的连接:①在墙板顶部和框架梁之间以及墙板柔性端与框架柱之间采用发泡聚氨脂填缝处理。②墙板柔性端采用“L”形卡件和盖板与框架柱连接,具体构造及做法见图 2。为避免影响减震层的平整性,对墙板柔性端进行

局部下沉处理以安放“L”形卡件和盖板;“L”形卡件一端有两个螺栓孔用于与柱子连接,另一端留有长孔确保其有一定滑动空间;盖板包括一块钢板和两个螺杆,钢板用来隔开“L”形卡件的滑动空间并保证减震层的平整,螺杆用来与墙板固定并限制其平面外移动。③墙板固定端通过钢筋搭接与框架柱连接,如图 3 所示,具体做法为在墙板端部开槽,露出拉结筋与框架柱预留钢筋搭接连接,最后回填砂浆。

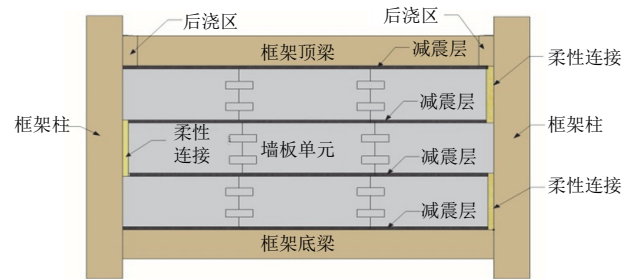


图 1 拼装型减震墙板框架示意图

Fig.1 Schematic diagram of precast assembled damping wall frame

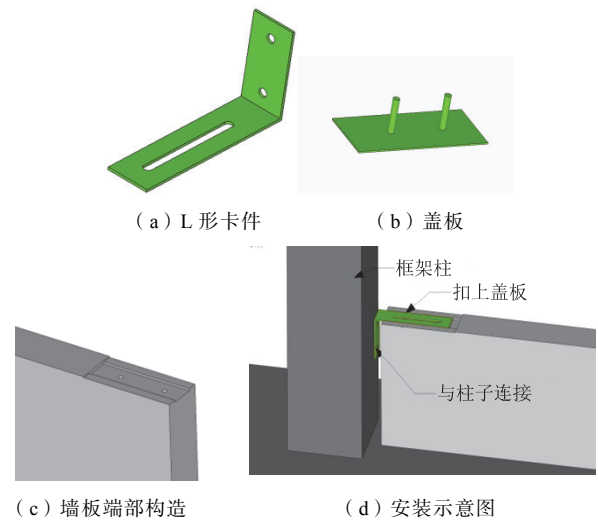


图 2 柔性端连接构造示意图

Fig.2 Schematic diagram of connection between flexible end of damping wall and column

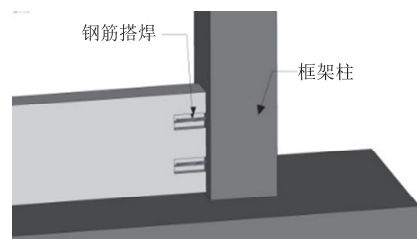


图 3 固定端连接构造示意图

Fig.3 Schematic diagram of connection between fixed end of damping wall and column

2 试验概况

2.1 试件制作及材料性能

设计制作了 4 榀单层单跨的装配式混凝土框架 1/2 缩尺模型试件, 分别为装配式拼装型减震墙板框架 (ADWF)、装配式减震墙板框架 (DWF)、装配式普通填充墙板框架 (CWF)、装配式空框架 (BF), 试件几何尺寸及配筋见图 4, 其中框架柱截面为 200mm×200mm、框架梁截面为 160mm×200mm、底梁截面为 600mm×350mm。框架梁、柱采用 C30 混凝土, 梁柱后浇区采用 C40 混凝土, 构件配筋按 (GB 50010—2010)《混凝土结构设计规范》^[13]和 (GB 50011—2010)《建筑抗震设计规范》^[14]的要求执行。预制墙板由广州某建材生产企业提供, 用于 CWF、DWF、ADWF 三个试件的单块墙板尺寸 (宽×高×长) 分别为 100mm×320mm×2050mm、100mm×320mm×2010mm、100mm×320mm×670mm, 墙板配筋采用双层 $\Phi 6@50$ 钢筋网, 墙板减震层材料采用低强度砂浆。本次试验为课题后续试验研究, 所用试验材料与前期试验相同, 故相关墙板技术参数、混凝土实测抗压强度、钢筋实测力学性能等详见参考文献[12]。

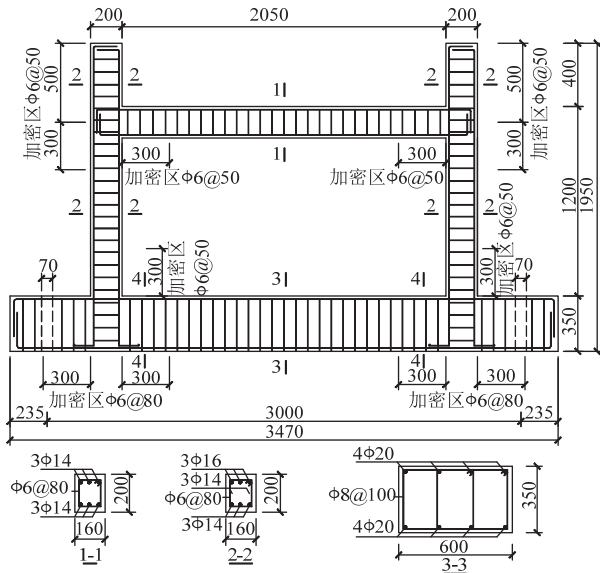


图 4 试件配筋图

Fig.4 Dimensions and steel detailing of specimens

2.2 加载方案及量测

试验加载装置如图 5 所示, 其中竖向荷载由悬挂在反力架上的液压千斤顶施加于柱顶, 加载过程中千斤顶通过与反力架间设置滚轴支座得以沿水平方向自由滑动, 通过与柱顶间的力传感器得以控制

竖向加载恒定 (300kN); 水平往复荷载由 MTS 作动器 (100T 级) 施加于柱顶端, 作动器末端固定在竖向反力墙上, 前端通过高强螺杆和连接钢板与柱顶相连, 使加载点与作动器变形一致。水平加载制度采用荷载+位移混合控制, 加载时先按荷载控制进行分级加载 (5kN 一级), 每级荷载循环 1 次; 当加载至试件荷载-位移曲线出现明显拐点时转入位移控制加载, 拐点处的加载位移取整后作为首次加载位移 δ , 之后以 δ 的整倍数依次加载, 每级循环 3 次, 直至试件 (墙板) 出现明显破坏或承载力下降到峰值荷载 85%。

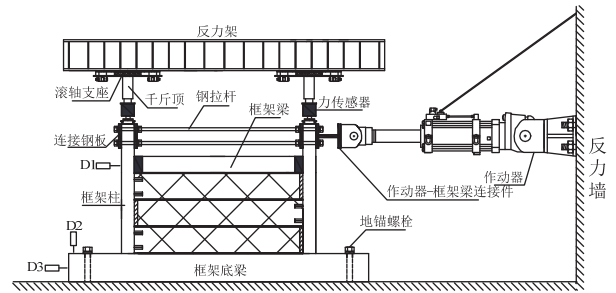


图 5 试验加载装置示意图及测点布置

Fig.5 Test setup and arrangement of measurement points

试验通过 MTS 电液伺服加载系统量测框架加载点水平荷载和水平位移, 并布置 3 个位移传感器监测框架变形和固定情况 (见图 5)。其中, D1 为拉绳式位移传感器, 用于测量框架梁中轴线的水平位移; D2、D3 为拉杆式位移传感器, 用以监测试验过程中框架底梁的水平 and 竖向滑移情况。

3 试验现象与破坏特征

3.1 主要试验现象

对试件 BF 先进行荷载加载, 当加载至 60kN 时, 荷载-位移加载曲线出现拐点, 试件进入屈服, 对应位移为 3.2mm, 故后续加载以 3mm 级差进行位移加载模式, 直至加载至 42mm (层间位移角超过 1/30), 试验结束。试验中为便于对比研究, 其他三个试件 CWF、DWF、ADWF 均采用相同的位移加载制度, 相应于四个不同试件的试验现象描述及对比见表 1。

3.2 破坏特征及震害分析

上述四个试件的结构破坏特征均为框架梁端后浇区及柱脚开裂, 梁端形成塑性铰破坏, 主要区别在于框架破坏程度和墙板破坏位置及破坏原因有所不同, 具体为:

(1) 试件 CWF 梁端破坏较试件 BF 更为严重,且出现较长斜裂缝,呈现明显的受剪破坏特征,其原因为普通墙板在框架往复加载中形成等效斜撑,既对框架造成一定的约束效应,又造成普通墙板本身出现端部剪切挤压开裂,混凝土剥落。

(2) 试件 DWF 框架破坏接近于试件 BF,这是由于减震墙板单元之间的滑移作用释放了墙板对框架的约束作用(见图 6(a)),框架梁端以弯曲破坏(竖向裂缝)为主,而墙板自身由于变形集中于减震层也避免了端部的剪切挤压破坏。值得注意的是,减震墙板在固定端拉结筋搭接位置出现部分填缝砂浆开裂脱落,这是由于柱中预留钢筋与墙板拉结筋在搭接施工中难以保证面内焊接,故在框架往复加载过程中,框架柱与减震墙板间通过拉结筋传递荷载作用,容易导致拉结筋在搭接位置出现平面外失稳,并对外剥落表层填缝砂浆。

(3) 试件 ADWF 框架破坏亦接近于试件 BF,

但稍劣于试件 DWF,这是由于拼装型减震墙板施工中既存在墙板单元之间的竖向间隙,也存在水平减震层的不平整问题(见图 6(b)),故在框架往复加载过程中,拼装型减震墙板的相对滑移要晚于试件 DWF,墙板对框架的约束效应难以第一时间释放,造成框架梁端出现部分受剪斜裂缝,同时墙板角部及固定端拉结筋搭接焊部位也出现类似于试件 DWF 的填缝砂浆开裂脱落现象,但主体框架及墙板破坏程度均明显轻于试件 CWF。



(a) DWF 试件减震墙板相对滑移 (b) ADWF 试件减震层缺陷

图 6 框架减震墙板滑移和缺陷

Fig.6 Relative slip and defect of frame-damping wall

表 1 4 个试件的试验现象描述及对比

Table 1 Description and comparison of four specimens in tests

		试件表现			
加载工况		试件 BF	试件 CWF	试件 DWF	试件 ADWF
荷载	荷载	■加载至 30kN 时,梁左端后浇区出现 6cm 竖向裂缝;加载至 50kN 时,梁右端后浇区出现 7cm 竖向裂缝;加载至 60kN 时,原有裂缝继续开展,构件屈服。	■加载至 40kN 时,梁右端后浇区出现 2cm 竖向裂缝;加载至 50kN 时,梁右端出现斜裂缝;加载至 55kN 时,墙板左下角出现裂缝;加载至 70kN 时,构件屈服。	■加载至 40kN 时,梁右端后浇区出现 3cm 竖向裂缝;加载至 55kN 时,梁左端后浇区出现竖向裂缝;加载至 70kN 时,梁右端后浇区表面通缝;转为位移加载。	■加载至 60kN 时,梁左端后浇区出现竖向裂缝和斜裂缝;加载至 65kN 时,梁右端后浇区较长竖向裂缝,非后浇区出现两条短裂缝;转为位移加载。
位移	6mm	■梁左端后浇区出现 8cm 斜裂缝,梁右端裂缝继续扩展。	■梁端出现新裂缝,中部墙板右端压裂翘起。	■梁端后浇区出现交叉裂缝,减震层有滑动迹象。	■梁端裂缝继续扩展,梁左端后浇区形成表面通缝。
	9mm	■梁端后浇区裂缝扩展形成交叉裂缝,右柱脚出现水平裂缝。	■梁端后浇区裂缝扩展形成竖向通缝,左柱脚出现表面贯通裂缝。	■梁端后浇区裂缝进一步扩展,右柱脚出现水平裂缝。	■墙板固定端在拉结筋开槽补浆处出现表层裂缝。
	15mm	■梁端裂缝继续扩展,左柱脚出现水平贯通裂缝。	■梁端和柱脚裂缝继续开展,中部墙板左下端出现长裂缝,右端翘起几乎掉落。	■梁端裂缝继续扩展,右柱脚出现表面贯通裂缝,左柱脚出现斜裂缝。	■左柱侧面出现水平通缝,左、右柱脚出现斜裂缝,减震层有明显滑动。
	21mm	■梁端形成塑性铰,局部混凝土剥落,柱侧面出现裂缝。	■左侧节点区出现长斜裂缝,左柱侧面出现水平裂缝,上部墙板左下角压碎掉落。	■右柱侧面出现多条水平通缝,上部墙板右上角拉结筋外鼓引起表面抹浆脱落。	■上部墙板右端背面部分掉落,梁左端后浇区混凝土轻微剥落。
	42mm	■梁端出现严重破坏,层间位移角超过 1/30,试验终止。	■梁端出现严重破坏,层间位移角超过 1/30,试验终止。	■梁端出现严重破坏,层间位移角超过 1/30,试验终止。	■梁端出现严重破坏,层间位移角超过 1/30,试验终止。
试件破坏图					

4 试验结果及分析

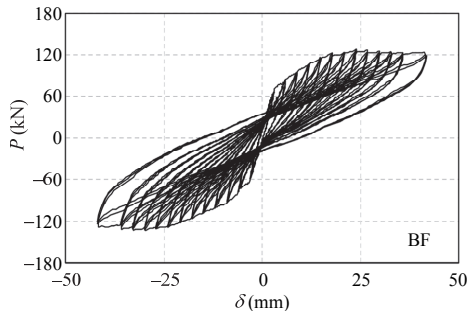
4.1 滞回曲线

各试件加载点荷载-位移滞回曲线如图 7 所示, 由图可知:

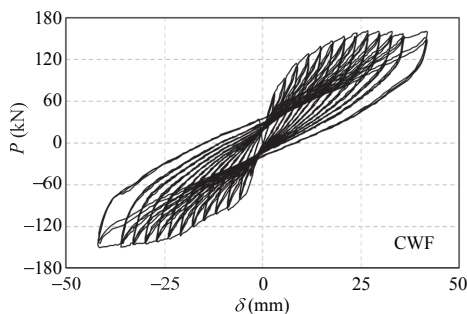
(1) 试件 BF 在加载初期, 加卸载曲线基本重合, 滞回曲线接近直线; 随着荷载增加, 试件逐渐进入塑性阶段, 滞回曲线近似于反 S 形, 因梁柱纵向钢筋存在黏结滑移, 滞回曲线出现明显捏缩现象。

(2) 试件 CWF 滞回曲线总体上呈弓形, 这是由于普通墙板的附加作用, 提高了试件的刚度与承载力。值得一提的是, 加载过程中分块设置的普通墙板之间也会发生一定的滑移, 但因墙板两端施工间隙有限导致滑移空间不足, 在较大加载位移下普通墙板易遭受剪切挤压破坏, 墙板滑移及墙板自身破坏都有一定耗能效果, 使滞回曲线面积增大。

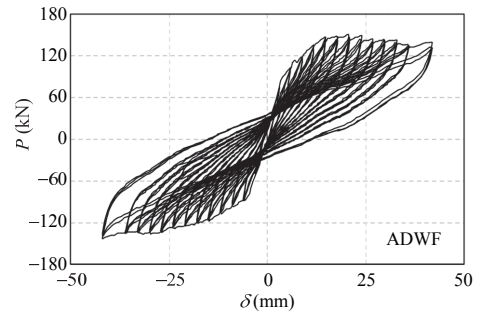
(3) 试件 DWF 和 ADWF 的滞回曲线较试件 BF 更为饱满, 这是由于减震墙板的减震机制起作用, 在加载过程中, 通过减震层(低强度砂浆摩擦层)的相对变形来耗散能量。另需注意得是, 试件 ADWF 因墙板拼装施工问题, 存在墙板单元之间的竖向间隙和减震层的不平整问题, 导致墙板滑移晚于试件 DWF, 故前期试件 ADWF 加载荷载偏大, 待减震层开始滑移后又减小至与试件 DWF 滞回表现相接近。



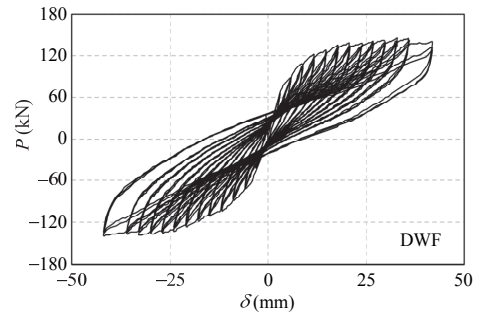
(a) 试件 BF



(b) 试件 CWF



(c) 试件 DWF3



(d) 试件 DWF2

图 7 试件的荷载-位移滞回曲线

Fig.7 Load-displacement hysteretic loops of specimens

4.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 8 所示。由图 8 可知。

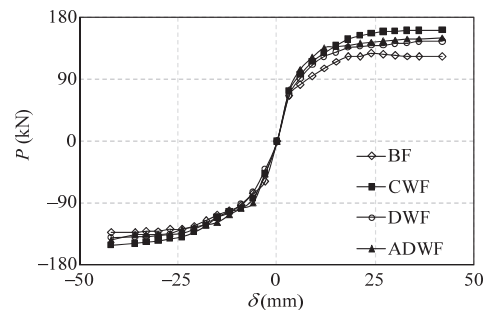


图 8 各试件的骨架曲线

Fig.8 Skeleton curves of specimens

(1) 试件 CWF、DWF、ADWF 的峰值荷载均值为 156.5kN、143.0kN、147.1kN, 分别为试件 BF (130.5kN) 的 120%、109.6%、112.8%, 说明减震墙板提高了装配式框架的水平承载能力, 但其增加幅度略低于普通墙板的效应。

(2) 试件 DWF、ADWF 的骨架曲线总体上介于试件 BF 和 CWF 的曲线之间, 这说明减震墙板经合理构造设计后实现了减震滑移机制, 其所提供的附加刚度和抗力有限, 用于装配式框架中可避免普通墙板的过强约束效应。

(3) 试件 ADWF 的骨架曲线在小位移下出现

“跳跃”异常,这是由于加载前期拼装型减震墙板的滑移滞后问题,待其后减震层正常滑移后其曲线又回落至与试件 DWF 的骨架曲线相一致。

4.3 刚度退化

试件的刚度退化情况可采用滞回曲线中的割线刚度来反映,图 9 为各试件的刚度退化对比曲线。由图 9 可以看出。

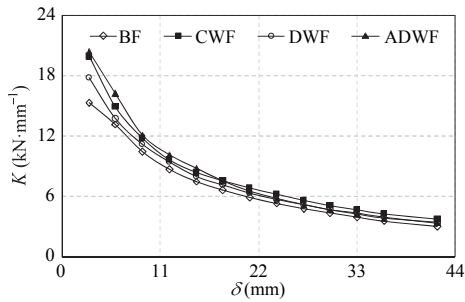


图 9 各试件的刚度退化曲线

Fig.9 Stiffness degradation curves of specimens

(1) 试件 CWF 的刚度退化速率相对较快,反映了普通墙板脆性破坏所带来的刚度效应问题,但其刚度退化反差并不显著,主要由于:①试验中框架设计较为保守,墙板在整体框架中的附加刚度贡献比重不大;②普通墙板由单元分块设置,设计中虽未预留有充分的滑移空间,但由于墙板与框架柱之间存在施工间隙,试验中普通墙板单元之间也会表现出一定的滑移机制,释放了部分刚度效应。

(2) 试件 DWF 在整个加载过程中的刚度曲线均介于试件 BF 与试件 CWF 之间;试件 ADWF 加载初期刚度超过试件 CWF,加载后期($\delta > 15\text{mm}$ 时)刚度回落于试件 BF 与试件 CWF 之间,这一方面由于加载初期试件 CWF 墙板有限滑移释放了部分刚度,另一方面由于试件 ADWF 墙板滑移滞后导致附加刚度第一时间得不到释放,故待墙板正常滑移后试件 ADWF 的刚度表现与试件 DWF 一致。以上表现说明拼装型减震墙板同样具有可靠的滑移减震机制,可以有效释放墙板的附加刚度效应,因此用于装配式结构中有助于减轻普通填充墙板竖向不均匀布置时所致的楼层刚度突变或平面不对称布置所引起的结构扭转效应。

4.4 耗能能力

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[15],按试件在各级加载第 1 次循环的滞回曲线计算其等效黏滞阻尼系数。图 9 给出了各试件等效黏滞阻尼系数 η_e 与位移 δ 之间的关系曲线。由图 10 可知。

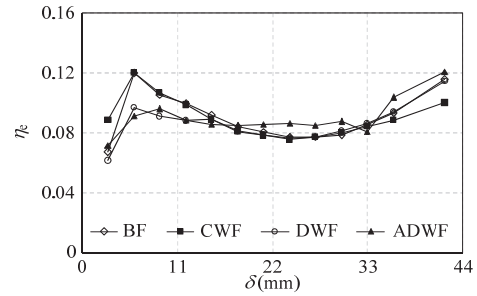


图 10 各试件的等效黏滞阻尼系数 η_e

Fig.10 Equivalent viscous damping coefficients of specimens

(1) 试件 CWF 的等效黏滞阻尼系数随加载位移增大呈先降后升趋势,当加载至 27mm (层间位移角约为 1/50) 时,等效黏滞阻尼系数由最大的 12.03% 逐渐减小至 7.73%,而且整个加载后期试件 CWF 的等效黏滞阻尼系数总体上最小。这是由于加载初期普通墙板开裂及摩擦起到了耗能的作用,随着持续加载,普通墙板开始破坏并退出工作,墙板的耗能作用失效,故试件的等效黏滞阻尼系数逐渐回落,并趋向于试件 BF 的延性耗能趋势。

(2) 试件 DWF 和试件 ADWF 的等效黏滞阻尼系数曲线相对比较接近,在加载后期($\delta > 15\text{mm}$ 时)均高于试件 CWF 的曲线,表明减震墙板通过减震层滑移的耗能机制增加了框架试件的耗能能力。试件 ADWF 的等效黏滞阻尼系数较试件 DWF 的更大,其随加载位移增大总体上呈平稳上升趋势,这是由于拼装型减震墙板存在的施工误差导致墙板滑移滞后,滑动后不平整的接触面提供了更大的摩擦系数,故在加载后期试件 ADWF 表现出更强的耗能能力。

5 结论

(1) 装配式拼装型减震墙板框架滞回曲线饱满、耗能能力强,用于工程实际中既满足拼装型减震墙板的施工便利性,又具有常规装配式减震墙板框架的减震效果和性能。

(2) 试件 DWF、ADWF 的峰值荷载均值为 143.0kN、147.1kN,分别为试件 BF (130.5kN) 的 109.6%、112.8%,为试件 CWF (156.5kN) 的 91.4%、94%;加载后期($\delta > 15\text{mm}$ 时)试件 DWF、ADWF 的刚度曲线均介于试件 BF 与试件 CWF 之间,可见减震墙板对框架水平承载力和抗侧刚度的附加效应小于普通墙板,因此用于装配式结构中既可减少普

通填充墙板的过强约束效应, 还可减轻普通填充墙板竖向不均匀布置时所致的楼层刚度突变或平面不对称布置时所引起的结构扭转效应。

(3) 当结构层间位移角达到 1/30 时, 普通墙板出现端部严重破坏, 而试件 ADWF 和试件 DWF 的减震墙板破坏程度均比较轻微, 可见无论拼装与否, 减震墙板通过合理构造与设计均可减小或避免大位移加载工况下墙板自身的破坏。

(4) 实际设计应用中, 拼装型减震墙板应注意墙板施工精度控制, 同时保证拼装墙板的竖向间隙及水平减震层接触面的平整度, 否则会影响其减震性能, 出现墙板滑移滞后问题, 导致墙板刚度不能及时释放, 从而引起不必要的墙板破坏。

参 考 文 献

- [1] 吕西林, 范力, 赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 58-65 (Lu Xilin, Fan Li, Zhao Bin. Pseudo-dynamic test on a reduced scale jointed precast concrete frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 58-65 (in Chinese))
- [2] 柳炳康, 黄慎江, 宋满荣, 等. 预压装配式预应力混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 1-8 (Liu Bing kang, Huang Shenjiang, Song Manrong, et al. Experimental study on seismic performance of prestressed fabricated PC frame [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(11): 1-8 (in Chinese))
- [3] Negro P, Bournas D A, Molina F J. Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: Global response [J]. Engineering Structures, 2013, 57: 594-608
- [4] Parastesh H, Hajirasouliha I, Ramezani R. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation [J]. Engineering Structures, 2014, 70: 144-157
- [5] Yuksel E, Karadogan H F, Bal I E, et al. Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 157-172
- [6] Gavridou S, Wallace J W, Nagae T, et al. Shake-table test of a full-scale 4-story precast concrete building. I: overview and experimental results [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(6): 1-13
- [7] 吴从晓, 赖伟山, 周云, 等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 23-30 (Wu Congxiao, Lai Weishan, Zhou Yun, et al. Experimental study on seismic behaviors of new energy-dissipative prefabricated concrete frame structure joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(9): 23-30 (in Chinese))
- [8] 李正良, 徐姝亚, 刘红军, 等. 新型装配式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁框撑体系振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 22-30 (Li Zhengliang, Xu Shuya, Liu Hongjun, et al. Shake table test on a new type of precast CFST column-RC beam braced frame structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2): 22-30 (in Chinese))
- [9] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 26-38 (Qian Jiaru, Han Wenlong, Zhao Zuozhou, et al. Pseudo-dynamic substructure test on a 3-story full-scale model of prefabricated concrete shear wall structure with rebar splicing by grout sleeves [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 26-38 (in Chinese))
- [10] 中国建筑科学研究院. 2008 年汶川地震建筑震害图集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008(Compiled by China Academy of Building Research. Photo collection of 2008 Wenchuan earthquake damage to buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))
- [11] 王亚勇, 黄卫. 汶川地震建筑震害启示录 [M]. 北京: 地震出版社, 2009
- [12] 邓雪松, 张超, 曹均勇, 等. 装配式减震墙板 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 170-176 (Deng Xuesong, Zhang Chao, Cao Junyong, et al. Experimental study on seismic performance of precast damping wall-RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37 (5): 170-176 (in Chinese))
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese))
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese))
- [15] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997 (JGJ 101—96 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997 (in Chinese))

张 超 (1984—), 男, 博士, 副教授。主要从事结构抗震加固与减隔震控制研究。

邓雪松 (1967—), 女, 硕士, 教授。主要从事结构抗震与减震控制技术研究。

龙佳栋 (1990—), 男, 硕士, 工程师。主要从事工程抗震、减震控制研究。

余 坤 (1993—), 男, 硕士, 工程师。主要从事工程抗震、减震控制研究。