

密肋网格约束型钢板剪力墙结构抗震性能试验研究

于金光, 贺迪, 王雪军, 郝际平, 冯啸天

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究密肋网格约束型钢板剪力墙结构的抗震性能, 通过对一榀密肋网格约束型钢板剪力墙结构的拟静力试验研究, 获取了结构的滞回曲线、骨架曲线及各阶段荷载和位移值。试验分析了结构的破坏模式、滞回性能、延性、承载能力及耗能等抗震性能指标。试验结果表明: 密肋格板将钢板分成小区格板件, 减小了墙板的高厚比, 有效规避了薄板墙的声响和震颤现象, 避免了滞回环体的捏缩现象, 降低了边框柱的破坏程度。墙板变形以小区格板件的局部屈曲为主。

关键词: 钢板剪力墙; 密肋网格约束; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0682-06

Experimental study on seismic behavior of ribbed grid restrained steel plate shear wall structure

YU Jinguang, HE Di, WANG Xuejun, HAO Jiping, FENG Xiaotian

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of ribbed grid restrained steel plate shear wall structure, a one-bay experimental specimen of steel plate shear wall structure with ribbed grid restrained was tested under the quasi-static loading, the hysteretic curves, skeleton curves and load and displacement values of each stage were obtained. Seismic properties, such as the failure mode, hysteretic behavior, ductility, bearing capacity and energy dissipation capacity were evaluated in the experiment. The results show that the steel plate was divided into several cell plates by the multi-rib stiffeners, reducing height-thickness ratio of the steel plate, lessening the noise and tremor of panels, moreover, avoiding the pinching phenomenon of the hysteretic loops, alleviating the failure of boundary column. The deformation of wall plate is mainly based on local buckling of cell plate parts.

Key words: steel plate shear wall structure; ribbed grid constraints; quasi-static test; seismic behavior

随着对钢板剪力墙结构研究的深入, 越来越多不同类型的钢板剪力墙被开发并研究。非加劲钢板剪力墙是早期常用的一种钢板剪力墙形式, 根据内嵌钢板剪切屈服与屈曲的先后次序可将其分为厚板墙和薄板墙, 厚板墙由于耗钢量大, 结构整体刚度调整不便等因素, 现已较少使用。薄板墙滞回曲线存在“捏缩”, 屈曲变形时伴随噪音、震颤且框架柱在附加弯矩下易发生“沙漏现象”^[1-4], 使用性能欠佳。通过设置墙板加劲肋可限制薄钢板剪力墙的屈曲, 有效提高薄钢板剪力墙的弹性刚度和延性。关于加劲钢板剪力墙方面, Takanashi Y^[5]最早开展了一系列纵向、纵横双向加劲钢板剪力墙的试验研究。郭彦林等^[6]开展了一系列加劲钢板墙结构的研究, 加劲形式包括: 十字加劲和斜加劲等。Sabouri-Ghomi S等^[7]研究表明设

置加劲肋提高了钢板剪力墙的耗能能力和抗剪刚度, 但对钢板剪切强度的影响不大。赵伟等^[8]对钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力进行了分析和研究, 提出了加劲肋刚度的判定标准和计算公式。在组合钢板剪力墙基础上, 郭彦林等^[9]提出了防屈曲钢板墙结构, 通过约束钢板墙的面外变形, 减少拉力场作用, 从而减少了柱刚度要求。

借鉴加劲钢板墙和防屈曲钢板墙的各自优势, 课题组提出了密肋网格约束型钢板剪力墙结构。为了研究该种新型结构的抗震性能, 通过一榀单跨双层密肋网格约束型钢板剪力墙试件的拟静力试验, 分析了结构的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、承载能力、抗侧刚度、耗能及延性等。为该种结构在工程中的应用及理论分析提供基础。

收稿日期: 2016-11-07

修改稿日期: 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578442、51408461); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701201); 陕西省教育厅专项科研项目(17JK0438); 陕西省自然科学基金研究计划(2017JQ5064)

第一作者: 于金光(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究钢结构基本理论和抗震性能。E-mail: yjggordon@163.com

1 密肋网格件构造措施

网格密肋板是在薄钢板两侧布置网格状的钢板肋条。网格肋条由纵横两个方向的肋条正交互嵌形成，在肋条相交处开细长槽，两个方向的肋条在开槽处互相嵌入形成整体。该构造措施避免了加劲肋焊接造成的焊接缺陷，嵌入式肋条省去了大量焊接作业，便于现场拼装。在肋条互嵌处布置内径大于对穿螺杆的细圆管，其长度与肋条宽度一致，将细圆管与肋条点焊在一起，使单侧的网格密肋形成整体。最后将两侧的网格密肋与开圆孔的薄钢板通过摩擦型高强螺栓连接，将三者装配形成网格密肋板，网格密肋板装配过程见图 1。将网格密肋板与周边框架通过耳板焊接形成网格密肋约束型钢板剪力墙。

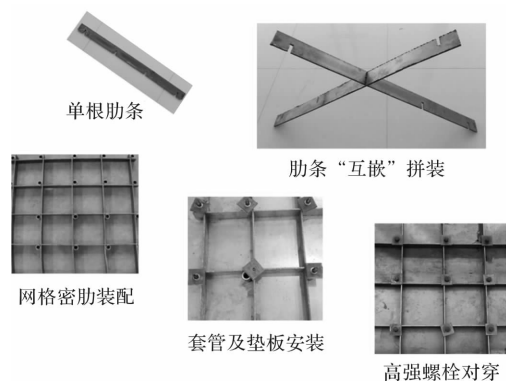


图 1 网格密肋板装配过程图
Fig. 1 Assembly of grid ribbed plates

2 试验概况

2.1 试件设计

试件几何相似比例为 1 : 3。试件框架采用 3 层结构：上部 2 层为试件主体结构，下部设置 1 矮层框架，矮层层高 $H=300\text{ mm}$ ，在矮层框架中设置厚度为 5 mm 的钢板，近似作为上部 2 层结构的嵌固端，避免柱脚焊缝开裂导致结构最终破坏^[2]。试件柱轴线跨度 1 350 mm，总高度 3 270 mm，钢材均为 Q235B，连接螺栓均为 10.9 级摩擦型高强螺栓，材质为 20MnTiB。框架柱截面为 HW175×175×7.5×11，中、底梁截面为 HN200×100×5.5×8，顶梁截面为 HN300×150×6.5×9，梁柱连接节点形式为端板连接，顶端板为 -405×154×20，下部端板为 -250×145.5×12，内填钢板厚度为 3.3 mm，约束构件截面为 -60×6 的钢板，密肋格板排布形成 4×3，方格边长为 230 mm，螺栓排布方式 5×4，螺栓选用 M12，长度按照构造要求确定。试件详图见图 2。

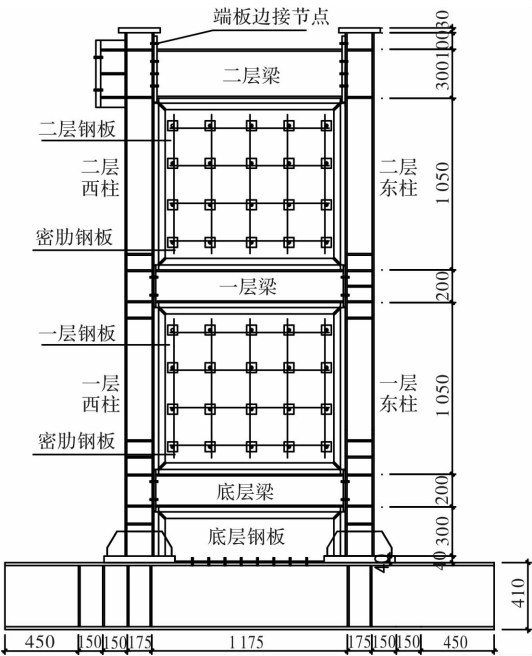


图 2 试件几何尺寸及构造
Fig. 2 Details of specimen

2.2 材性试验

根据 GB/T228-2010《金属材料室温拉伸试验方法》^[10]、GB/T2975-1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[11]的有关规定进行材性试验，结果见表 1。

表 1 钢材性能
Tab. 1 Steel properties

| 试样类型 | f_y/MPa | f_u/MPa | 伸长率 /% | $E_s/\text{MPa}\times 10^5$ |
|-----------|------------------|------------------|-----------|-----------------------------|
| 柱 | 285.03 | 455.35 | 27.70 | 2.04 |
| 顶梁 | 323.23 | 465.30 | 24.66 | 2.04 |
| 中间梁 | 331.80 | 470.35 | 21.16 | 2.05 |
| 顶梁端板 | 262.50 | 462.50 | 20.51 | 2.05 |
| 中梁端板 | 276.30 | 399.90 | 22.59 | 2.00 |
| 3.3 mm 钢板 | 345.27 | 521.80 | 19.06 | 2.10 |
| 5 mm 钢板 | 314.73 | 477.83 | 23.64 | 2.00 |
| 6mm 钢板 | 335.07 | 463.07 | 37 | 1.92 |

2.3 试验加载及量测方案

试验加载装置如图 3 所示，竖向荷载由 2 个 200 t 同步油压千斤顶提供。在柱顶施加竖向荷载，每柱柱顶施加 430 kN，加载分为两级，每级加载 215 kN。水平反复荷载由 1 台 100 t 的 MTS 作动器施加。试件屈服前采用荷载控制，首先预加载至 100 kN，之后每个加载级荷载增量为 100 kN。试件接近屈服时，以 50 kN 为每个加载级荷载增量，加载至屈服荷载 P_y ，每个加载级循环一圈。

试件屈服后进入位移控制阶段,此后以 $0.5\delta_y$ 为位移增量,每个加载级循环三圈,直至试件破坏或者承载力降低到峰值荷载 85% 以下,则停止试验。

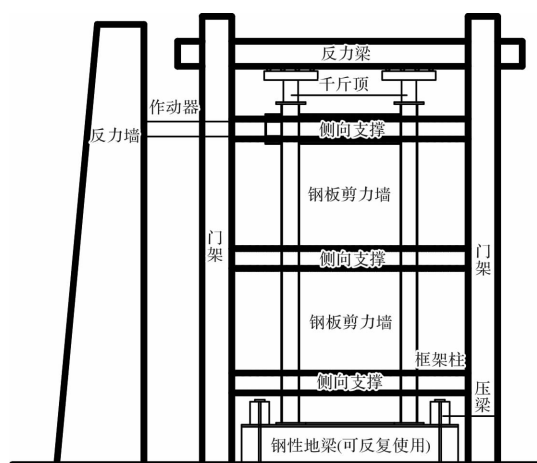


图 3 试验装置简图

Fig. 3 Test setup

为测量试件整体位移和框架变形,位移计具体布置如图 4 所示。

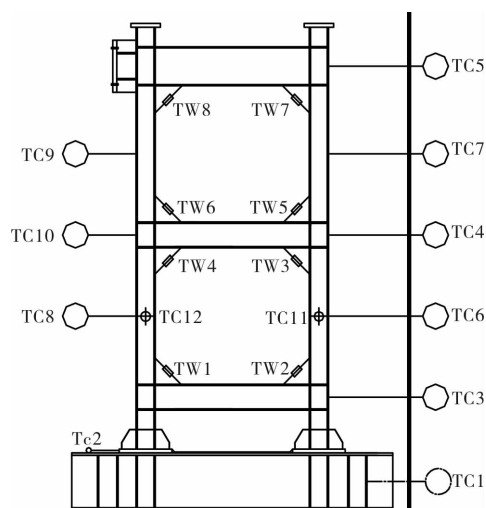


图 4 位移计布置图

Fig. 4 Measuring points distribution

3 试验现象及破坏模式

3.1 试验现象

试件平面内方向为东西方向,规定作动器推向(向东)为正,拉向(向西)为负。为方便叙述将一层墙板小区格进行编号,如图 6(a)所示。竖向加载结束后,进入水平加载。水平位移加载至 $\delta_y = 13.98 \text{ mm}$ 时试件屈服,随后进入位移控制阶段。1. $5\delta_y$ 加载级时根据试验量测数据可确定一层及二层内填板受剪屈服。2. $2\delta_y$ 加载级时,西柱柱脚区域内隔板间隔内柱外侧翼缘向外屈曲见图 5(a)。

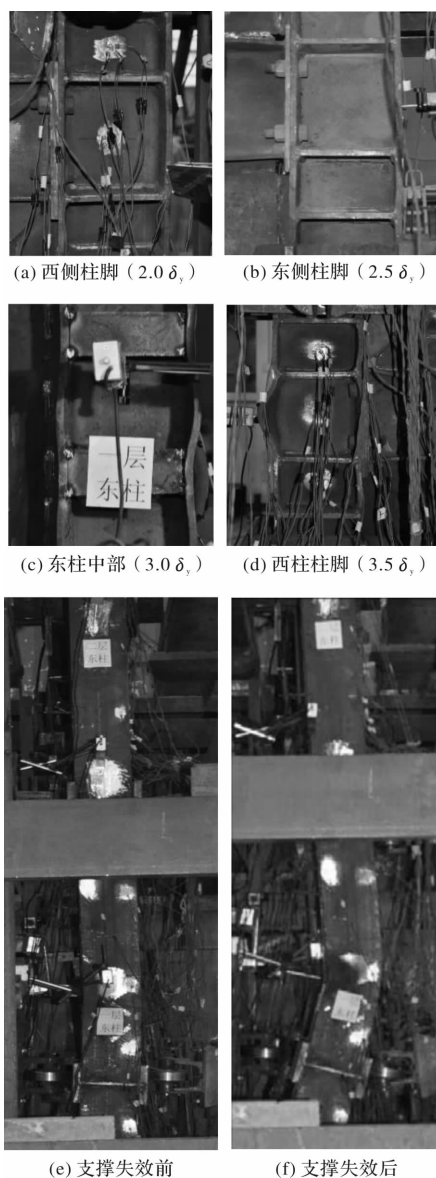


图 5 框架的破坏情况

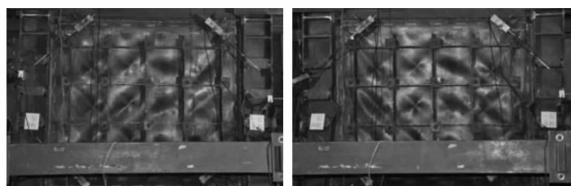
Fig. 5 Damage of frame

2. $5\delta_y$ 加载级时,东柱柱脚外翼缘屈曲外凸见图 5(b)。一层板 3、4、8 区格发生屈曲形成小区格拉力场,拉力场与水平方向夹角约为 45° ,卸载后变形未完全恢复。底层梁腹板发生屈曲向南凸起,底半层板向北鼓起。3. $3\delta_y$ 加载级时,一层东柱屈曲现象加重见图 5(c)。推方向加载,一层板区格 1-7、9 均发生屈曲。拉向加载,1-12 所有区格均小区格内发生屈曲。3. $5\delta_y$ 加载级时,达到推向峰值荷载 845.86 kN,一层东柱及试件柱脚区域屈曲严重,形成 S 型残余变形,底梁节点区域附近的西柱柱脚翼缘向外凸曲严重,导致底梁端板随之变形(图 5d)。一层板在推向卸载到零位移时一层板各区格的局部屈曲情况见图 6(b)。4. $4\delta_y$ 加载级时,达到拉向峰值荷载 906.47 kN。加载过程中,东柱北侧中间侧向支撑发出巨响,发生承压破坏,

东柱面外变形明显. 4. $5\delta_y$ 加载级时, 第一循环时中间侧向支撑失效与试件脱离, 试件整体面外受力剧增, 东、西柱翼缘瞬间变形突增, 一层部分小区格面外密肋约束构件的竖向肋板瞬间屈曲, 试件面外变形前后的对比情况见图 5(e)、图 5(f), 一层面内变化见图 6(c)、图 6(d). 恢复侧向支撑试验继续, 第三循环时, 中间侧向支撑再次失效, 试件面外弯扭失稳严重, 最终丧失承载力, 试验结束. 最终内填板以小区格内的局部屈曲为主, 内填板两上角部有裂缝.



(a) 一层板区格划分及变形 ($2.5\delta_y$) (b) $3.5\delta_y$ 第三循环拉方向峰值



(c) 侧向支撑失效前 (d) 侧向支撑失效后

图 6 内填板变形情况

Fig. 6 Deformation of panels

3.2 破坏模式

由于密肋网格约束构件的设置, 将钢板分成小区格板件, 减小了墙板的高厚比, 其设置改善了钢板的受力模式, 有效的抑制了钢板墙的面外屈曲, 导致内填钢板弹性屈曲荷载大于屈服荷载, 因而试件内填钢板首先发生屈服, 后发生屈曲. 边缘构件在往复荷载作用下发生屈服及屈曲, 最终面外出现弯扭失稳, 结构承载力迅速下降试件破坏. 试件面内呈弯曲破坏模式, 面外弯扭失稳控制了最终承载力.

4 试验结果及分析

4.1 滞回性能

试件的滞回曲线分别如图 8 所示. 当施加的荷载较小时, 试件荷载和位移近似呈线性关系, 滞回环包围面积很小, 刚度退化不明显. 随着水平荷载的增大, 试件进入弹塑性工作阶段, 小区格内板屈服后屈曲, 结构塑性变形增加, 试件抗侧刚度下降, 滞回环逐渐开展. 通过图 8(a)—图 8(b)对比可知, 一层墙板在弯剪作用下塑性变形及耗能均大于二层, 后期由于一层东西柱的面外失

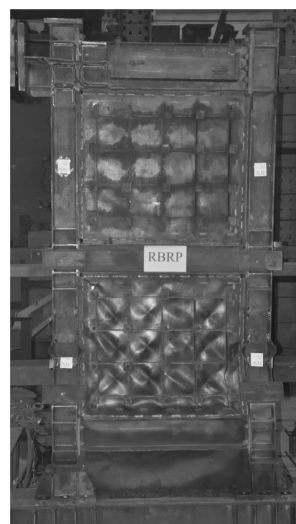


图 7 试件整体破坏

Fig. 7 General damage of specimen

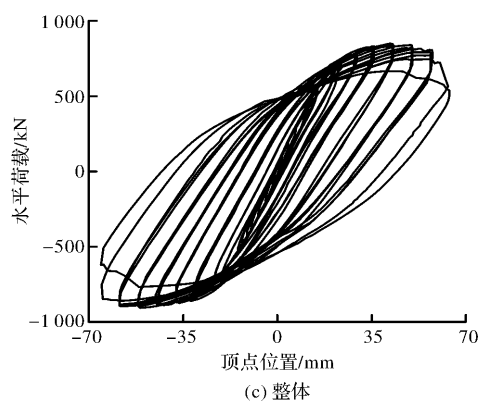
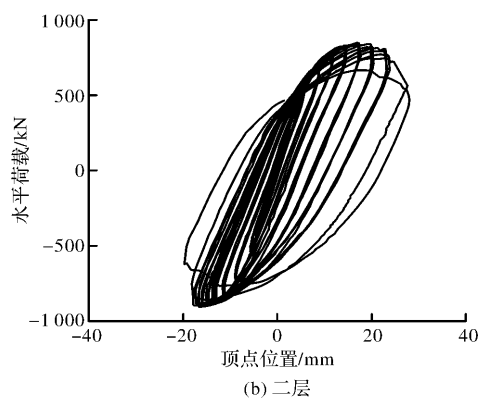
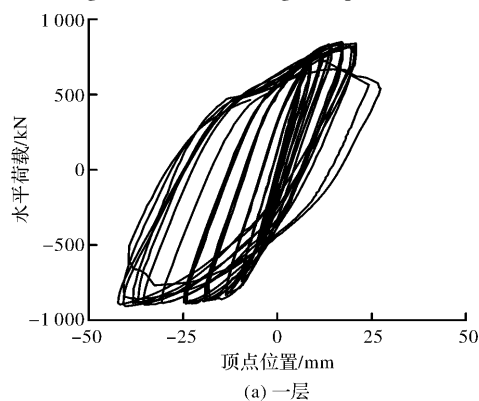


图 8 荷载-位移曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of load-displacement

稳导致其刚度退化明显. 由图 8 可以看出, 结构滞回曲线为饱满的梭形, 未出现捏缩, 表明该种结构有良好的塑性变形能力, 同时说明屈曲约束作用明显.

试件的骨架曲线见图 9. 由图 9 可知, 试件在塑性流动阶段, 下降较为平缓, 整体侧移可达 61.93 mm, 层间侧移角为 1/47, 试件的极限承载力较屈服承载力提高 18.8%.

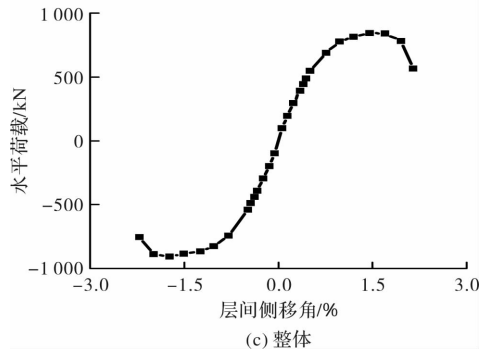
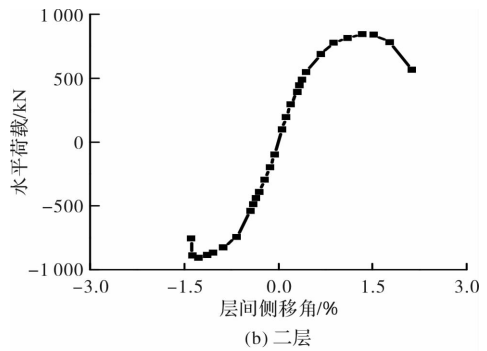
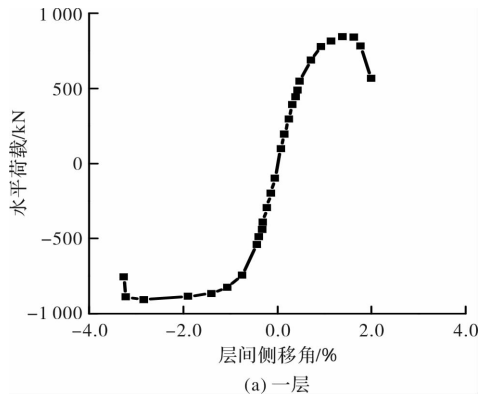


图 9 荷载位移骨架曲线

Fig. 9 Load-displacement envelope

表 2 试验结果

Tab. 2 Test results of specimen

| 试件编号 | 加载方向 | 屈服荷载/kN | | | 峰值荷载/kN | | | 极限位移/mm | | 延性系数 |
|------|------|------------|--------|--------------|------------|--------|--------------|------------|--------------|-------|
| | | Δ_y | P_y | Δ_y/h | Δ_m | P_m | Δ_m/h | Δ_u | Δ_u/h | μ |
| 整体 | 推 | 21.79 | 707.38 | 1/135 | 42.96 | 845.86 | 1/69 | 59.39 | 1/50 | 2.73 |
| | 拉 | 23.47 | 767.56 | 1/126 | 50.94 | 906.47 | 1/58 | 64.48 | 1/46 | 2.75 |
| | 平均 | 22.63 | 737.47 | 1/131 | 46.95 | 876.17 | 1/63 | 61.93 | 1/48 | 2.74 |
| 二层 | 推 | 9.14 | 699.83 | 1/142 | 17.34 | 845.86 | 1/75 | 24.32 | 1/53 | 2.66 |
| | 拉 | 10.10 | 784.38 | 1/129 | 16.56 | 906.47 | 1/79 | 18.09 | 1/72 | 1.79 |
| | 平均 | 9.62 | 742.10 | 1/135 | 16.95 | 876.17 | 1/77 | 21.21 | 1/63 | 2.20 |
| 一层 | 推 | 10.27 | 730.99 | 1/122 | 17.24 | 845.86 | 1/73 | 22.28 | 1/56 | 2.17 |
| | 拉 | 9.73 | 752.80 | 1/128 | 40.22 | 906.47 | 1/31 | 40.14 | 1/31 | 4.13 |
| | 平均 | 10.00 | 741.90 | 1/125 | 28.73 | 876.17 | 1/52 | 31.21 | 1/44 | 3.12 |

采用通用屈服弯矩法确定试件的屈服点、峰值点和破坏点. 试件各特征点的荷载和位移见表 2. 由表 2 可知, 试件延性系数为 2.74, 相较而言偏小. 其主要原因是由于屈曲约束构件的设置, 结构刚度提升, 导致试件延性发生下降. 此外, 试验中边框柱发生弯扭失稳, 试件侧向支撑脱落, 导致试件性能未能得以充分发挥.

4.2 性能退化

按照 JGJ 101-2015^[12] 采用承载力退化系数 λ_i 来表征等幅荷载下承载力的稳定性. 由表 3 知, 结构承载力退化系数均在 0.96 以上, 表明结构具有稳定的承载力, 不会发生突然破坏.

表 3 试件承载力退化系数

Tab. 3 Capacity degeneration coefficient

| 加载 位移 | 1.0 δ_y | 1.5 δ_y | 2.0 δ_y | 2.5 δ_y | 3.0 δ_y | 3.5 δ_y | 4.0 δ_y | 4.5 δ_y |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| λ_1 | 0.98 | 1.02 | 1.01 | 1.02 | 0.98 | 0.98 | 1 | 0.96 |
| λ_2 | 1.01 | 1 | 1.01 | 1 | 1.01 | 0.99 | 0.96 | — |

注: λ_1 为某一屈服位移加载级下第 2 循环峰值点荷载值与第 1 循环峰值点荷载值的比值; λ_2 为同一屈服位移加载级下第 3 循环峰值点荷载值与第 2 循环峰值点荷载值的比值.

试件刚度退化情况见图 10(纵坐标为加载级刚度与初始刚度的比值 k , 试件初始刚度选用第一加

载级对应的峰值刚度)。由图 10 知,荷载较小时,一层二层刚度退化基本一致。随着加载进行,一层二层刚度出现分化,从 $1.5\delta_y$ 加载级开始 1 层结构刚度小于 2 层刚度, $2.5\delta_y$ 加载级时试件刚度损失达 61%。2 层框架柱底部出现屈服以后,框架作为位移的主要抗侧力构件,试件的刚度降幅约 83%,1 层结构在弯-剪-压复合用下,刚度退化最为严重。

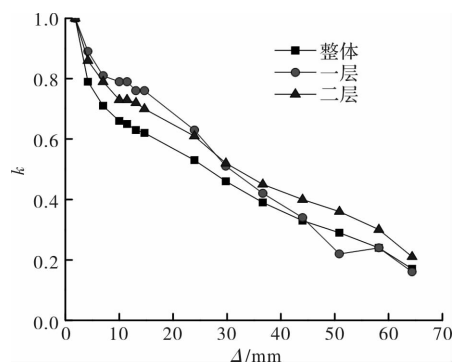


图 10 刚度退化

Fig. 10 Degradation law of rigidity

4.3 耗能性能

将试件的两层单独耗能量占结构总耗能的比值定义为耗能比。试件屈服后,耗能比如图 11 所示。由图 11 知,试件屈服后,一层墙板在弯剪复合作用下,先屈服后小区格屈曲,其残余塑性变形明显大于二层墙板。总体而言,结构耗能较为均匀,底半层耗能仅占结构整体耗能量的 10% 左右。

采用试件黏滞阻尼系数作为标准对试件的耗能作出评价。试件在弹性阶段、非弹性阶段试件的黏滞阻尼系数分别为 0.023 和 0.09,其明显优于我国抗震规范 GB 50011-2010^[13] 8.2.2 对高层钢结构阻尼比的规定(弹性阶段 0.02、塑性阶段 0.05),由此可见试件具有一定富余度。

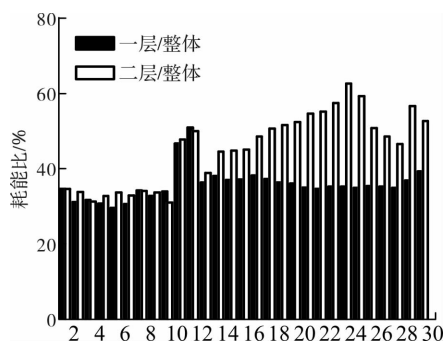


图 11 耗能比

Fig. 11 Equivalent viscosity of specimen

5 结论

(1)密肋网格构件的布置,将薄钢板分割为了小区格板件,减小了板件的高厚比,改善了钢板的受力,延缓了钢板的屈曲,提高了墙体承载力及刚度。

(2)结构具有较高承载力,极限承载力较屈服承载力提高 18.8%;结构具有优越的变形能力,整体侧移角可达 $1/47$;结构初始刚度大,但刚度下降较快,弹性阶段损失 37%。

(3)密肋网格约束型钢板剪力墙结构的黏滞阻尼系数在弹性阶段大于 2.3%,弹塑性极限状态大于 9%,高于 GB 50011-2010 对高层钢结构的要求。

参考文献 References

- [1] THORBURN L J, KULAK G L. Analysis of steel plate shear walls[R]. Edmonton: Structural Engineering Rep. No. 107. Canada: Dept of Civil Engineering, University of Alberta, 1983.
- [2] 于金光,郝际平. 半刚性连接钢框架—非加劲钢板剪力墙结构性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 74-82.
YU Jinguang, HAO Jiping. Study on the behavior of semi-rigid connection sheet frames with unstiffened steel plate shear wall structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 74-82.
- [3] 聂建国,朱力,樊建生,等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 61-69.
NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 64-69.
- [4] LUBELL A S, HELMUT G L. Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading[J]. Journal of structural Engineering, 2000, 126(4): 453-460.
- [5] TAKANASHI Y, TAKEMOTO T, TAGAKI M. Experimental study on thin steel shear walls and particular bracing under alternative horizontal load[C]// International Association for Bridge and Structural Engineering. Schweiz: Ein Diemst der ETH-Bibliothek, 1973.
- [6] 郭彦林,陈国栋,缪友武. 加劲钢板剪力墙弹性抗剪屈曲性能研究[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 84-91, 59.
GUO Yanlin, CHEN Guodong, MIAO Youwu. Elastic buckling behavior of steel plate shear wall with cross or diagonal stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 84-91, 59.

- University(Natural Science), 2015, 43(6): 859-865.
- [15] 芮海田, 吴群琪. 高铁运输与民航运输选择下的中长途距离出行决策行为[J]. 中国公路学报, 2016, 29(3): 134-141.
- RUI Haitian, WU Qunqi. Decision-making behavior of medium and long distance travel under the choice of high-speed rail transportation and civil aviation transportation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 134-141.
- [16] 史峰, 邓连波, 霍亮. 铁路旅客乘车选择行为及其效用[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 117-121.
- SHI Feng, DENG Lianbo, HUO Liang. The choice behavior and effectiveness of railway passengers' cars[J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 117-121.
- [17] 干宏程. 交通信息与出行者路线选择[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- GAN Hongcheng. Traffic information and traveler route selection [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [18] 李颖. 中国铁路旅客出行选择行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Ying. Research on traveling choice behavior of Chinese railway passengers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [19] 杨金云. 通道交通方式服务水平的用户感知[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- YANG Jinyun. User perception of channel traffic mode service level [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [20] 孙朝苑. 客运专线对沿线城市铁路客运量分流问题的研究[J]. 铁道经济研究, 2004(3): 44-46.
- SUN Chaoyuan. Research on passenger traffic line diversion of urban railway passenger traffic volume along the line[J]. Railway Economic Research, 2004(3): 44-46.
- [21] 郭寒英. 基于出行者生理心理的城市客运交通出行行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- GUO Hanying. Research on Urban Passenger Transportation Travel Behavior Based on Traveler's Physiology and Psychology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [22] 丁卫东. 用多目标决策方法研究公、铁客运合理分流[D]. 成都: 西南交通大学, 1991: 20-21.
- DING Weidong. Using multi-objective decision-making method to study the rational diversion of public and railway passenger transport [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1991: 20-21.

(编辑 沈 波)

(上接第 687 页)

- [7] SABOURI-GHOMI S, SAJJADI S R A. Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 75(7): 152-159.
- [8] 赵伟, 杨强跃, 童根树. 钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力研究[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 15-23.
- ZHAO Wei, YANG Qiangyue, TONG Genshu. Stiffener stiffness and elastic buckling stress of steel plate shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 15-23.
- [9] 郭彦林, 董全利, 周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 31-47.
- GUO Yanlin, DONG Quanli, ZHOU Ming. Tests and analysis on hysteretic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 31-47.
- [10] 钢铁研究总院. 金属材料室温拉伸试验方法: GB/T 228.1-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Central Iron & Steel Research Institute. Metallic materials; tensile testing at ambient temperature; GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [11] 钢铁研究总院. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975-1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- Central Iron & Steel Research Institute. Steel and steel products; location and preparation of test pieces for mechanical testing; GB/T 2975-1998 [S]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验方法规程: JGJ (101-96)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- China Academy of Building Research. Specification of testing methods for earthquake resistant building; JGJ (101-96)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [13] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings; GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 沈 波)