

doi: 10.14098/j.cn35-1288/z.2021.03.014

框架-密肋复合墙结构的优化设计

刘 静,郑仁亮,王军芳,张仁巍

(三明学院 建筑工程学院,福建 三明 365004)

摘要:将框架结构和密肋复合墙相结合形成新的结构——框架-密肋复合墙结构。利用 SAP2000 有限元分析软件建立框架-密肋复合墙结构的分析模型,模拟地震波输入。研究地震波作用下密肋复合墙分布于不同位置以及密肋复合墙墙体采用不同肋格组合方式的地震响应,寻找结构最优布置方式,为框架-密肋复合墙结构的设计提供参考。

关键词:框架-密肋复合墙结构;地震反应;时程分析

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-4343(2021)03-0099-07

Research on Optimization Design of Frame Structure with Multi-ribbed Composite Wall

LIU Jing, ZHENG Ren-liang, WANG Jun-fang, ZHANG Ren-wei

(School of Architectural and Civil Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China)

Abstract: The frame structure and multi ribbed composite wall are combined to form the frame structure with multi-ribbed composite wall. The analysis model of frame structure with multi-ribbed composite wall is established to simulate seismic wave input by using SAP2000 finite element analysis software. Through the structure dynamic analysis, the seismic response of multi ribbed composite wall distributed in different locations and different rib combination modes under the action of seismic wave are studied and the optimal layout of the structure is found, which provides a reference for the design of frame structure with multi-ribbed composite wall.

Key words: frame structure with multi-ribbed composite wall; seismic response; optimization design

框架结构中框架梁和框架柱是结构仅有的一道抗震防线,在地震作用下破坏后很难修复,其抗震性能不好。密肋复合墙结构不仅是一种新型节能结构,而且具有很好的抗震性能。将框架与密肋复合墙组合在一起形成的框架-密肋复合墙结构是一种新型双重抗侧力的结构体系,在不大幅度增加造价的基础上拥有多道抗震防线,抗震性能好,在中高地震烈度区域具有良好的应用前景。文献[1]对框架-密肋复合墙体的抗震性能做了试验研究,文献[2]给出了框架-密肋复合墙结构协同工作的计算方法,文献[3]对框架-密肋复合墙结构进行了非线性地震反应分析。

多年来,前人不仅对单块标准密肋复合墙在尺寸、框格跨数、造价、斜截面抗剪承载力等方面的优化设计已经进行了深入研究^[4-5],还对密肋复合墙的形式进行了探索和改进,研究了斜交肋格、型钢替代钢筋等方法形成的斜交密肋框架结构、框支斜交密肋复合墙、钢骨外框密肋复合墙、轻钢龙骨框格密肋复合墙及装配式型钢斜交密肋复合墙等新型单一密肋复合墙体的抗震性能^[6-10]。

收稿日期:2020-11-16

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目基金暨三明学院科学研究发展基金(JAT190725、B201938、JAT190712、B201925);福建省中青年教师教育科研项目(JT180508);福建省自然科学基金项目(2018J01514、2018J01515)

作者简介:刘静,女,福建明溪人,讲师。主要研究方向:混凝土结构。

与新型式的密肋复合墙结构相比,传统密肋复合墙结构的相关研究理论比较成熟、施工难度低、普及性更广。在满足文献[11]中对密肋复合墙结构布置要求的基础上,对于拥有相同数量密肋复合墙且具有不同布置方式的框架-密肋复合墙结构的抗震性能还没有进行过详细分析。此外,虽然目前已经完成了在砌块尺寸相同的条件下肋格组成对密肋复合墙性能的影响分析,但在密肋复合墙总尺寸不变的情况下分析肋格组成对密肋复合墙性能的影响的研究还比较少,且之前的研究只针对单片密肋复合墙的优化设计,对于由框架和密肋复合墙组成的框架-密肋复合墙结构进行整体优化设计的研究还比较缺乏。因此,本文对框架-密肋复合墙结构整体在密肋复合墙布置方式和肋格组成方面进行了优化分析,为框架-密肋复合墙的设计应用提供参考。

1 分析模型

分析对象为六层框架-密肋复合墙结构,柱网布置如图 1 所示。框架结构中框架梁和框架柱的截面尺寸及配筋如图 2 所示。密肋复合墙厚度为 200 mm,尺寸如图 3 所示,各构件尺寸及配筋如图 4 所示,肋格中填充的砌块选用硅酸盐砌块,砌块的材料性能如表 1 所示。结构中各构件混凝土强度等级均选用 C30 混凝土,楼板厚 100 mm。

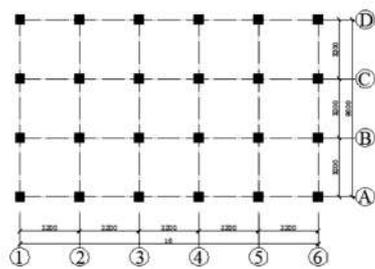


图 1 柱网布置图

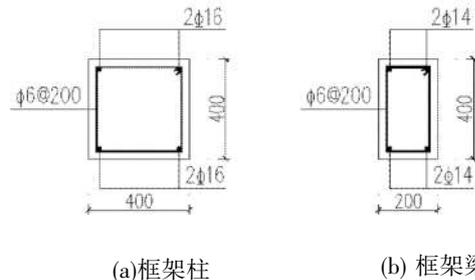


图 2 框架柱、框架梁截面尺寸及配筋(单位:mm)

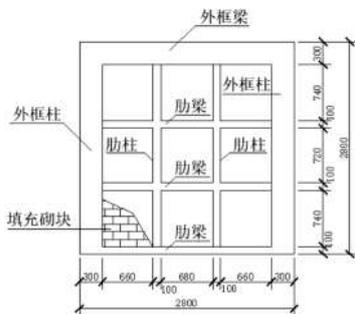


图 3 密肋复合墙尺寸

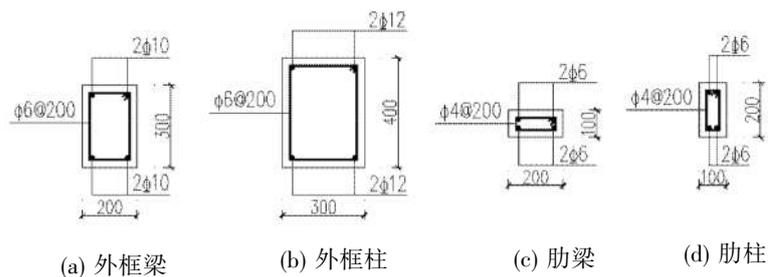


图 4 肋格梁柱尺寸及配筋(单位:mm)

表 1 砌块材料性能

| 项目 | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 干容重/kN·m ⁻³ | 弹性模量/MPa |
|-------|----------|----------|------------------------|----------|
| 硅酸盐砌块 | 3 | 0.3 | 6 | 2000 |

抗震设防烈度为 8 度($0.2g$),设计地震分组第二组,选用不同场地类别下的两条典型地震波,如表 2 所示。

表 2 地震波

| 名称 | A_{max}/gal | 特征周期/s | 场地类别 |
|-------------|---------------|--------|------|
| 迁安波 | 132.39 | 0.3 | I |
| EL-Centro 波 | 341.70 | 0.4 | II |

2 密肋复合墙布置位置的优化

2.1 模型选取

选用美国 Computer and Structures Inc 公司于 2017 年发布的 SAP2000V19 版本有限元分析软件对框架-密肋复合墙结构进行模拟。多层密肋复合墙结构布置时宜使结构平面形状简单、规则,刚度承载力分布均匀^[1],在 SAP2000 中分别在柱网不同位置布置 10 片密肋复合墙,建立如图 5 所示 5 种框架-密肋复合墙结构模型,以满足规范要求和经济性指标。

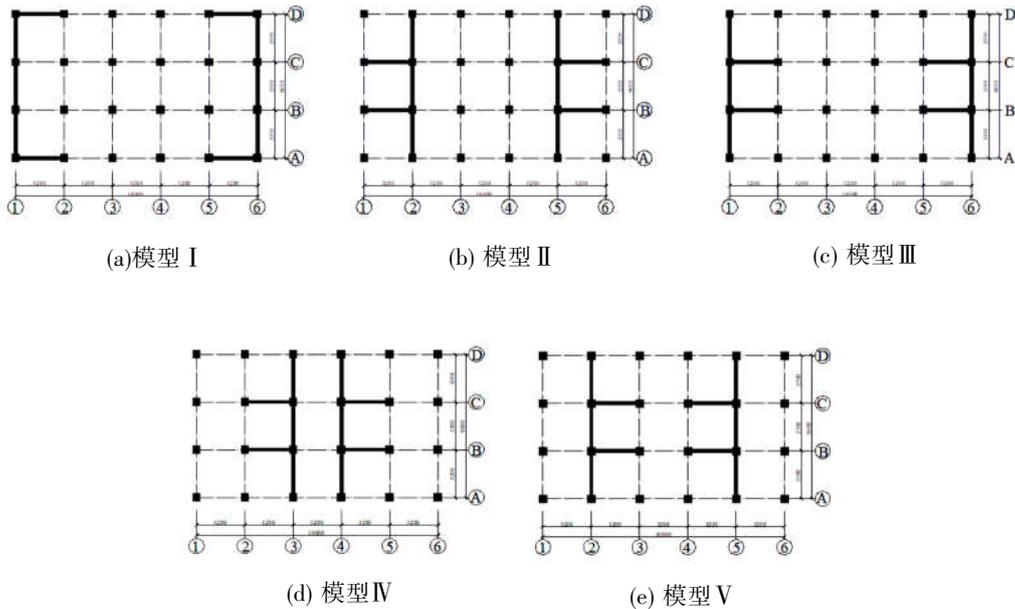


图 5 框架-密肋复合墙结构模型

2.2 地震反应分析

在 8 度($0.2g$)多遇地震和罕遇地震作用下,结构层间位移最大值如表 3~4 所示。结构层间位移角如表 5、表 6 所示,五种模型的层间位移角均小于框架-密肋复合墙结构的层间位移角限值^[1]。

由表 3~6 的数据可知,在迁安波作用下模型 I 和模型 III 的数据近乎相同,在 EL-Centro 波作用下模型 III 的数据优于模型 I 的数据。两模型中左右两部分墙体的形心距离相等,但模型 III 纵向墙体的间距小于模型 I。故在左半部分墙体和右半部分墙体形心距离相同的情况下,减小墙体的距离可以提高结构的侧移刚度。这一结论与文献 12 中规定的多层砌体房屋应在房屋宽度方向的中部设置内纵墙的要求相符合。

表 3 迁安波作用下结构层间位移最大值/mm

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | | |
|----|---------------|-------|--------|-------|-------|---------------|-------|--------|-------|-------|
| | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V |
| 1 | 0.595 | 0.592 | 0.596 | 0.627 | 0.628 | 3.396 | 3.378 | 3.404 | 3.580 | 3.583 |
| 2 | 0.491 | 0.490 | 0.493 | 0.511 | 0.513 | 2.805 | 2.799 | 2.813 | 2.915 | 2.929 |
| 3 | 0.443 | 0.441 | 0.441 | 0.429 | 0.430 | 2.527 | 2.519 | 2.517 | 2.452 | 2.458 |
| 4 | 0.373 | 0.374 | 0.370 | 0.346 | 0.342 | 2.132 | 2.134 | 2.116 | 1.973 | 1.950 |
| 5 | 0.355 | 0.360 | 0.351 | 0.291 | 0.286 | 2.020 | 2.050 | 2.000 | 1.660 | 1.630 |
| 6 | 0.317 | 0.322 | 0.318 | 0.253 | 0.259 | 1.820 | 1.840 | 1.820 | 1.450 | 1.480 |

表 4 EL-Centro 波作用下结构层间位移最大值/mm

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | | |
|----|---------------|-------|--------|-------|-------|---------------|--------|--------|-------|-------|
| | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V |
| 1 | 1.977 | 1.960 | 1.936 | 1.513 | 1.508 | 12.800 | 11.190 | 11.050 | 8.635 | 8.606 |
| 2 | 1.772 | 1.764 | 1.732 | 1.360 | 1.351 | 8.600 | 10.060 | 9.880 | 7.765 | 7.714 |
| 3 | 1.729 | 1.726 | 1.688 | 1.333 | 1.321 | 9.860 | 9.860 | 9.640 | 7.600 | 7.540 |
| 4 | 1.555 | 1.558 | 1.516 | 1.196 | 1.184 | 8.880 | 8.890 | 8.650 | 6.830 | 6.750 |
| 5 | 1.302 | 1.31 | 1.267 | 0.986 | 0.971 | 7.430 | 7.400 | 7.230 | 5.630 | 5.550 |
| 6 | 0.998 | 1.005 | 0.971 | 0.715 | 0.709 | 5.700 | 5.810 | 5.540 | 4.080 | 4.040 |

表 5 迁安波作用下结构层间位移角/rad

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | | |
|----|---------------|--------|--------|---------|---------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V |
| 1 | 1/5043 | 1/5070 | 1/5031 | 1/4783 | 1/4780 | 1/883 | 1/888 | 1/881 | 1/838 | 1/837 |
| 2 | 1/6107 | 1/6118 | 1/6088 | 1/5871 | 1/5843 | 1/1069 | 1/1071 | 1/1066 | 1/1029 | 1/1024 |
| 3 | 1/6772 | 1/6802 | 1/6802 | 1/6993 | 1/6976 | 1/1187 | 1/1190 | 1/1191 | 1/1223 | 1/1220 |
| 4 | 1/8042 | 1/8021 | 1/8108 | 1/8670 | 1/8771 | 1/1407 | 1/1405 | 1/1417 | 1/1520 | 1/1538 |
| 5 | 1/8450 | 1/8333 | 1/8547 | 1/10309 | 1/10489 | 1/1485 | 1/1463 | 1/1500 | 1/1807 | 1/1840 |
| 6 | 1/9463 | 1/9316 | 1/9433 | 1/11857 | 1/11583 | 1/1648 | 1/1630 | 1/1648 | 1/2068 | 1/2027 |

表 6 EL-Centro 波作用下结构层间位移角/rad

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | | |
|----|---------------|--------|--------|--------|--------|---------------|-------|--------|-------|-------|
| | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V | 模型 I | 模型 II | 模型 III | 模型 IV | 模型 V |
| 1 | 1/1517 | 1/1530 | 1/1549 | 1/1982 | 1/1989 | 1/234 | 1/268 | 1/271 | 1/347 | 1/348 |
| 2 | 1/1693 | 1/1700 | 1/1732 | 1/2205 | 1/2220 | 1/348 | 1/298 | 1/303 | 1/386 | 1/389 |
| 3 | 1/1735 | 1/1738 | 1/1777 | 1/2250 | 1/2271 | 1/304 | 1/304 | 1/311 | 1/394 | 1/398 |
| 4 | 1/1929 | 1/1925 | 1/1978 | 1/2508 | 1/2533 | 1/337 | 1/337 | 1/346 | 1/439 | 1/444 |
| 5 | 1/2304 | 1/2290 | 1/2367 | 1/3042 | 1/3089 | 1/403 | 1/405 | 1/414 | 1/532 | 1/540 |
| 6 | 1/3006 | 1/2985 | 1/3089 | 1/4195 | 1/4231 | 1/526 | 1/516 | 1/541 | 1/735 | 1/742 |

模型 V 的数据优于模型 II 的数据,比较两模型,模型 V 中左右两部分墙体的形心距离小于模型 II。模型 IV 的数据与模型 V 的数据非常接近,比较两模型,两模型左右两部分墙体的形心距离较小且差距不大。模型 II 的数据与模型 III 的数据非常接近,比较两模型,模型 II 中左右两部分墙体的形心距离小于模型 III,且两模型左右两部分墙体的形心均较大。故当左半部分墙体和右半部分墙体的形心距离在一定范围内时,左右两部分墙体的距离越小,结构侧移刚度越大;反之,亦然。当左半部分墙体和右半部分墙体形心距离超过一定范围时,左右两部分墙体的形心距离对侧移刚度的影响不大。这一结论与框架-剪力墙结构布置原则相符合,即剪力墙间距不宜过大,应满足楼盖平面刚度的要求,否则应考虑楼盖平面的变形影响^[13]。因此,框架-密肋复合墙在纵横墙的布置上可以参考框架-剪力墙结构的纵横墙布置原则。

3 密肋复合墙的肋格布置优化

3.1 模型选取

框架-密肋复合墙结构布置形式选用模型 V,密肋复合墙外部尺寸为 2 800 mm × 2 800 mm,依据工程经验及规范^[5,10]中对密肋复合墙内梁柱距离的规定,墙体内柱间距取 400~900 mm,内梁间距取 400~800 mm,故肋格的跨数和层数取 3 或 4。在密肋复合墙外部尺寸相同的情况下选取不同跨数、层数的肋格组合方式,如图 6 所示。

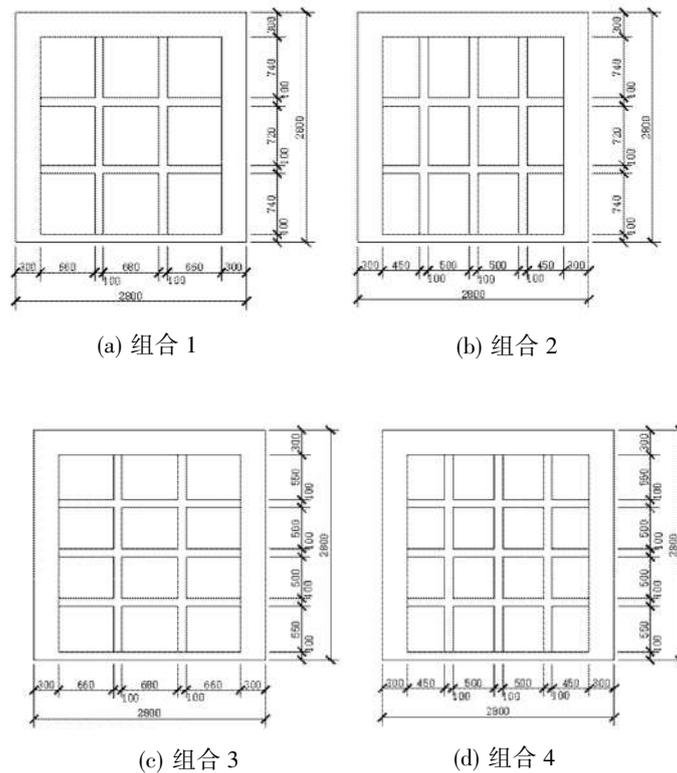


图 6 密肋复合墙内梁柱的组合布置方式

3.2 地震反应分析

在抗震设防烈度 8 度(0.2g)多遇和罕遇地震波作用下,结构的层间位移最大值如图 7~8 所示,楼层位移最大值如表 7~8 所示。

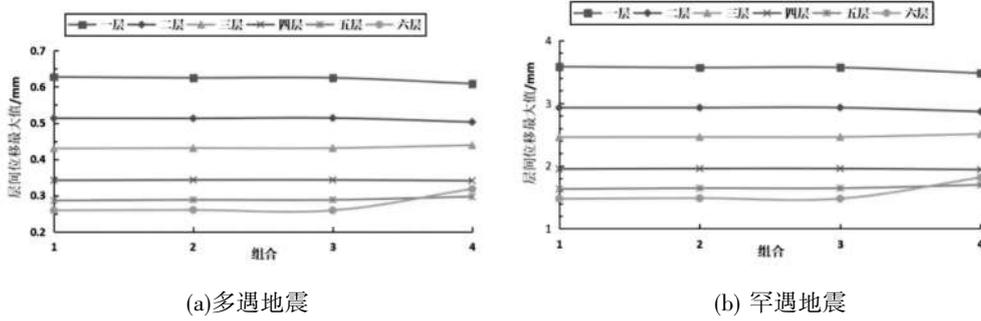


图 7 迁安波作用下层间位移最大值

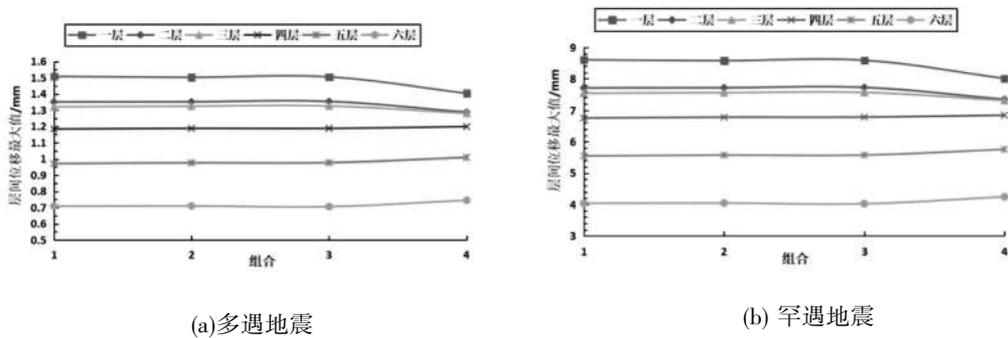


图 8 EL-Centro 波作用下层间位移最大值

表 7 迁安波作用下结构楼层位移最大值/mm

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | |
|----|---------------|-------|-------|-------|---------------|--------|--------|--------|
| | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 | 组合 4 | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 | 组合 4 |
| 1 | 0.628 | 0.625 | 0.625 | 0.609 | 3.583 | 3.569 | 3.570 | 3.479 |
| 2 | 1.141 | 1.138 | 1.139 | 1.112 | 6.512 | 6.498 | 6.500 | 6.346 |
| 3 | 1.571 | 1.569 | 1.570 | 1.551 | 8.970 | 8.959 | 8.962 | 8.856 |
| 4 | 1.913 | 1.912 | 1.913 | 1.892 | 10.921 | 10.916 | 10.919 | 10.798 |
| 5 | 2.199 | 2.200 | 2.201 | 2.189 | 12.553 | 12.561 | 12.564 | 12.496 |
| 6 | 2.458 | 2.460 | 2.460 | 2.507 | 14.030 | 14.047 | 14.043 | 14.311 |

表 8 EL-Centro 波作用下结构楼层位移最大值/mm

| 楼层 | 8 度(0.2g)多遇地震 | | | | 8 度(0.2g)罕遇地震 | | | |
|----|---------------|-------|-------|-------|---------------|--------|--------|--------|
| | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 | 组合 4 | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 | 组合 4 |
| 1 | 1.508 | 1.503 | 1.505 | 1.404 | 8.606 | 8.580 | 8.590 | 8.014 |
| 2 | 2.859 | 2.855 | 2.859 | 2.692 | 16.317 | 16.297 | 16.317 | 15.363 |
| 3 | 4.180 | 4.180 | 4.185 | 3.973 | 23.858 | 23.855 | 23.884 | 22.678 |
| 4 | 5.364 | 5.368 | 5.373 | 5.172 | 30.613 | 30.635 | 30.668 | 29.521 |
| 5 | 6.335 | 6.344 | 6.350 | 6.181 | 36.160 | 36.209 | 36.244 | 35.279 |
| 6 | 7.044 | 7.054 | 7.056 | 6.926 | 40.204 | 40.258 | 40.270 | 39.526 |

从图 7~8、表 7~8 中可以看出,在地震波作用下前三种组合各楼层的层间位移及楼层位移最大值相近,大致在一条直线上;组合 4 与前 3 种组合相比,虽然楼层 3 层至 6 层的层间位移略有增大,但是楼层 1 层至 2 层的层间位移却减小了,故组合 4 结构顶点总位移与前三种组合相比相差不多。增加密肋复合墙中的肋格数量虽然提高了肋格的侧移刚度,但同时减少了密肋复合墙中砌块的面积,导致砌块的侧移刚度减小了,因此,两相抵消导致整个结构的侧移刚度没有明显提高。故综合考虑成本及规范要求,增加肋格的数量对框架-密肋复合墙的作用不明显,这一结论与肋柱数量对密肋复合墙体力学性能的影响规律相符合^[14]。

4 结论

(1) 框架-密肋复合墙结构布置时,除了应满足“均匀、分散、对称、周边”的规定外,还应考虑结构两侧的密肋复合墙形心的位置。在结构两侧墙体形心距离相同的情况下,墙体距离越近,结构侧移刚度越大。当结构两侧墙体形心的距离在一定范围内时,结构侧移刚度随两侧墙体形心距离的减小而增大;反之,亦然。当结构两侧墙体形心的距离超过一定范围时,两侧墙体形心距离对结构的侧移刚度影响不大。

(2) 在框架-密肋复合墙结构中,通过增加密肋复合墙肋格的数量不能有效地提高结构的侧移刚度,故依据规范并考虑经济性,建议长度在 2~3 m 范围内的密肋复合墙中肋格的跨数和层数均取 3。

参考文献:

- [1] 郭猛,姚谦峰,袁泉,等.框架-密肋复合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(3):50-56.
- [2] 钱坤,贾光辉,邹建奇.框架-密肋复合墙板结构协同工作的计算方法[J].建筑技术,2017,29(5):548-551.
- [3] 钱坤,王怀远,王森.框架-密肋复合墙非线性地震反应分析[J].低温建筑技术,2016(7):78-80.
- [4] 张杰.密肋复合墙受力性能及斜截面承载力实用设计计算方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.
- [5] 曹好.密肋复合墙体优化设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [6] 郭猛,姚谦峰,李鹏飞.基于 ETABS 的斜交密肋框架结构地震反应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(5):842-846.
- [7] 常鹏,李强军,贾穗子.底框-斜向网格复合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(3):85-92.
- [8] 廖小锋.型钢混凝土边框柱密肋复合墙体抗震性能试验研究与延性分析[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- [9] 刘佩,郭猛,李挺,等.轻钢龙骨框格密肋复合墙体抗震性能试验研究[J].工程力学,2012(1):128-133.
- [10] 袁泉,赵媛媛,宗明齐,等.装配式型钢斜交密肋复合墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(11):122-130.
- [11] 北京交通大学. JGJ/T 275-2013 密肋复合板结构技术规程[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [12] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[M]. 建筑工业出版社,2006.
- [13] 东南大学,同济大学,天津大学.混凝土结构(中册)[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [14] 谷俊斌,韩学礼.肋柱数量对密肋复合墙体力学性能的影响规律[C]//北京力学会第 26 届学术年会论文集.北京:北京力学会,2020:1089-1091.

(责任编辑:朱联九)