

箱板式钢结构住宅组合加劲钢板墙抗震承载力分析

兰 涛^{1,2}, 谭鲁怀^{1,3}, 门进杰^{1,3}, 郭昌灵^{1,3}, 秦广冲²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国船舶重工集团国际工程有限公司, 北京 100021;

3. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 与传统钢板剪力墙结构不同, 箱板式组合加劲钢板墙没有周边框架梁和框架柱, 并且由墙板与加劲肋共同承受水平与竖向荷载。为解决一般加劲钢板墙在地震作用下面外变形大、刚度退化快、滞回捏缩严重等不足, 提出一种组合加劲钢板墙形式。在对 3 个组合加劲钢板墙试件进行拟静力试验研究的基础上, 对其进行有限元分析, 探讨了钢板墙高厚比 λ 、肋板刚度比 η_L 和 η_T 及螺栓排布形式等三种参数对组合加劲钢板墙抗震承载力的影响。研究结果表明, 肋板刚度比 η 对极限承载力的影响较小, 钢板墙高厚比 λ 与螺栓排布形式对组合加劲钢板墙的抗侧刚度和极限承载力影响显著。基于试验和参数分析结果, 提出组合加劲钢板墙受力模型; 并考虑高厚比、加劲肋与钢板的滑移两个关键参数的影响, 建立了组合加劲钢板墙抗剪承载力计算公式。分析结果表明, 所提计算公式能准确的反映该种钢板墙截面的受剪屈服程度, 具有良好的计算精度和适用性。

关键词: 箱板式钢结构; 组合加劲钢板墙; 有限元分析; 参数分析; 承载力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0788-09

Seismic capacity analysis of the composite stiffened steel plate wall in box-type steel structure

LAN Tao^{1,2}, TAN Luhuai^{1,3}, MEN Jinjie^{1,3}, GUO Changling^{1,3}, QIN Guangchong²

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

2. CSIC International Engineering Co. Ltd, Beijing 100021, China;

3. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Different from the traditional steel plate shear wall structure, the box-plate composite stiffened steel plate wall has no surrounding frame beam and column. And the wall panel and stiffeners jointly bear the horizontal and vertical loads. In order to solve the disadvantages of general stiffened steel plate wall under earthquake action, such as large external deformation, fast stiffness degradation and severe hysteresis pinching, a composite stiffened steel plate wall (CSSPW) is proposed. The finite element analysis of three CSSPW specimens are carried out on the basis of quasi-static tests. The three parameters of the depth-thickness ratio λ of CSSPW, stiffness ratio η_L and η_T and arrangement of bolts on the seismic capacity of CSSPW were explored. Results show that the stiffener-plate stiffness ratio η of the ribbed plates has less influence on the ultimate bearing capacity. The depth-thickness ratio λ and the arrangement of bolts of CSSPW has a significant influence on the lateral stiffness and ultimate bearing capacity. Based on the results of test and parameter analysis, the force models of CSSPW are put forward. In addition, considering the influence of two key parameters, the thickness ratio and the slip between stiffener plate and steel plate, the formula for calculating the shear capacity of CSSPW is established. Results show that the proposed formula can accurately reflect the shear yield degree of the wall section of this kind of steel plate, and has good accuracy and applicability.

Key words: box-type steel structure; CSSPW; finite element analysis; parameter analysis; bearing capacity

箱板式钢结构住宅是基于船舶上层建筑而提出的一种肋板结构, 墙体主要采用交错设置 L 型与 T 型肋组成的加劲钢板墙, 其设计理念有别于现有

普通钢板剪力墙结构, 其周边没有框架梁和框架柱。多年来, 大量文献通过试验与数值分析仅研究钢板墙的抗侧力, 展示了其较大的初始刚度、良好

收稿日期: 2020-03-27

修改稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878542); 首规委支持科研基金资助项目(2017-016)

第一作者: 兰 涛(1976-), 男, 博士, 研究员, 主要从事钢结构研究. E-mail: qd_lantao@163.com

通信作者: 门进杰(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事组合结构和结构抗震性能研究. E-mail: men2009@163.com

的塑性性能、稳定的滞回特性等特点^[1-3]。传统钢板剪力墙结构主要利用框架柱承受竖向荷载, 墙板承受水平荷载; 然而, 在箱板式钢结构中, 加劲钢板墙中的墙板与加劲肋共同承受水平荷载和竖向荷载, 若采用一般的钢板墙, 则在地震作用下会产生严重的滞回捏缩、过大的面外变形和刚度急剧退化等问题比较突出, 因此寻找一种滞回性能好、刚度大、强度高的加劲钢板墙成为工程界和学术界研究的热点之一。

近年来, 国内外对加劲钢板墙的研究仍然只是针对其仅承受水平荷载的工况。郭彦林等^[4]研究了不同形式加劲钢板墙的抗震性能, 结果表明, 适当的加劲肋可显著提高薄钢板墙的承载能力。赵伟^[5]认为设置竖向加劲肋能有效提高钢板墙的抗剪承载力, 钢板高宽比、加劲肋抗弯刚度和加劲肋数目对钢板墙屈曲系数有显著影响。于金光^[6]研究的槽钢十字形约束件可有效改善滞回曲线的“捏缩”现象。杨雨青^[7]证明斜向加劲肋比竖向加劲肋更明显提高抗侧刚度和承载力。本课题组前期对同时承受竖向荷载和水平荷载的组合加劲钢板墙试件进行了系列研究^[8-9], 结果表明, 墙板的高厚比越大, 滞回曲线捏缩现象越明显, 钢板越容易产生面外屈曲形成拉力带, 屈服承载力和极限承载力越低。

本着传力明确, 构造简单的设计原则, 本文进一步提出了一种新型带网格加劲板的组合加劲钢板墙, 并基于三个墙体试件的低周往复加载试验, 对墙体试件进行有限元分析, 研究影响组合加劲钢板墙抗震承载力的主要参数, 进而提出组合加劲钢板墙的极限抗剪承载力计算式。

1 组合加劲钢板墙构造

组合加劲钢板墙是利用螺栓将仅一侧带竖向加劲的墙板与网格加劲板连接而成的, 加劲肋与钢板墙共同承受竖向和水平荷载, 预留螺栓孔的钢板与 L 型、T 型加劲肋竖向焊接形成竖向加劲钢板墙, 带不同孔径的网格加劲板通过螺栓与竖向加劲钢板墙组装, 从而形成组合加劲钢板墙结构。图 1 为组合加劲钢板墙的构成示意图。

对已进行过低周往复试验的 3 类组合加劲钢板墙^[10]进行有限元分析, 采用与试验试件相同的 1/3 缩尺比例建立有限元分析模型, 通过改变网格加劲板螺栓孔径将试件分为不可滑移试件 SSPW-CP1 与可滑移试件 SSPW-CP2、SSPW-CP3, 其试件参数见表 1, 其中 T 型加劲肋截面尺寸为 T67 mm×

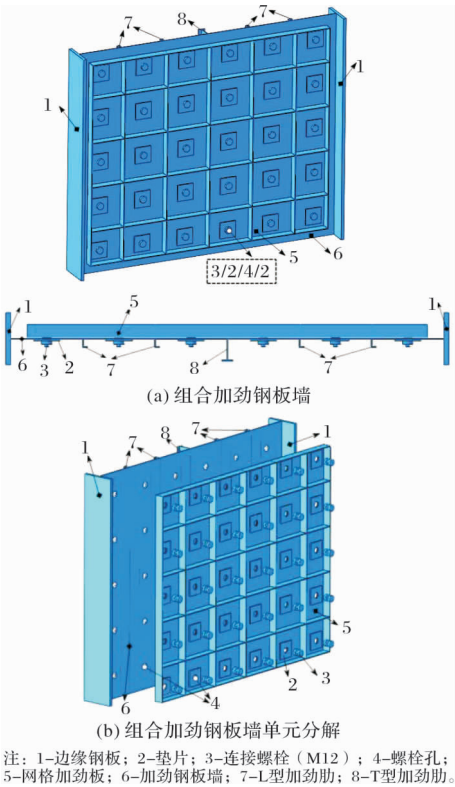


图 1 组合加劲钢板墙的构成图
Fig. 1 Composition drawing of composite stiffened steel plate wall

34 mm×3 mm×4 mm, L 型加劲肋截面尺寸为 L25 mm×25 mm×3 mm, 边缘钢板截面尺寸为 160 mm×15 mm, 网格加劲板的钢板截面尺寸为 1 220 mm×3 mm, 网格加劲板的肋条截面为 40 mm×3 mm。

表 1 试件参数 Tab. 1 Parameters of specimens				
试件编号	钢板尺寸/mm	L 型加劲肋	网格加劲板 螺栓孔径/mm	
SSPW-CP1	1 320×1 100×3	有	14	
SSPW-CP2	1 320×1 100×3	有	30	
SSPW-CP3	1 320×1 100×3	无	30	

2 有限元建模和验证

2.1 有限元模型建立

利用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 其中螺栓连接采用点-面耦合, 网格加劲板与钢板墙采用面-面接触, 接触面的切线方向采用“罚函数”计算库伦摩擦, 摩擦系数取 0.45^[11], 法线方向采用“硬接触”。模型所有部件均采用 C3D8I 单元, 网格尺寸采用 15 mm。钢材材质均选用 Q235b, 采用双线性强化本构模型, 如图 2 所示。根据试验设置,

取轴压比为 0.2, 并在墙体顶部的参考点设置恒定不变的 220 kN 竖向力; 然后在墙体顶部的水平荷载采用图 3 所示的位移加载制度。

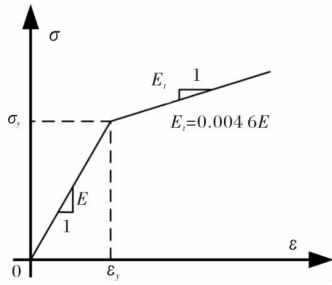


图 2 材料本构关系曲线

Fig. 2 Constitutive relation curve of material

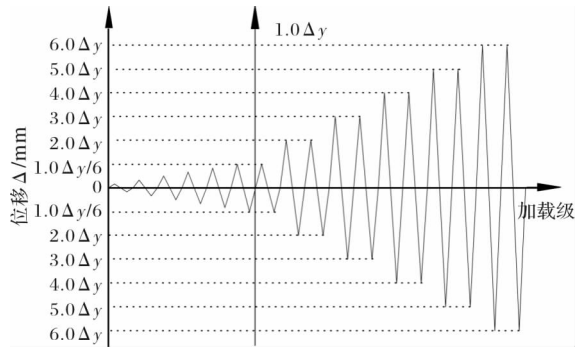


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading system

2.2 有限元模型验证

图 4 为 3 个带网格加劲板组合加劲钢板墙试件有限元模拟的荷载位移滞回曲线与试验荷载位移滞回曲线对比图。

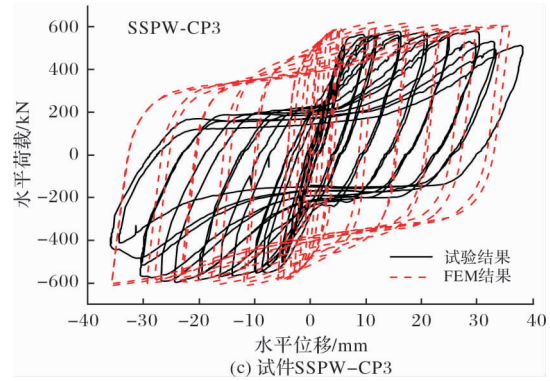
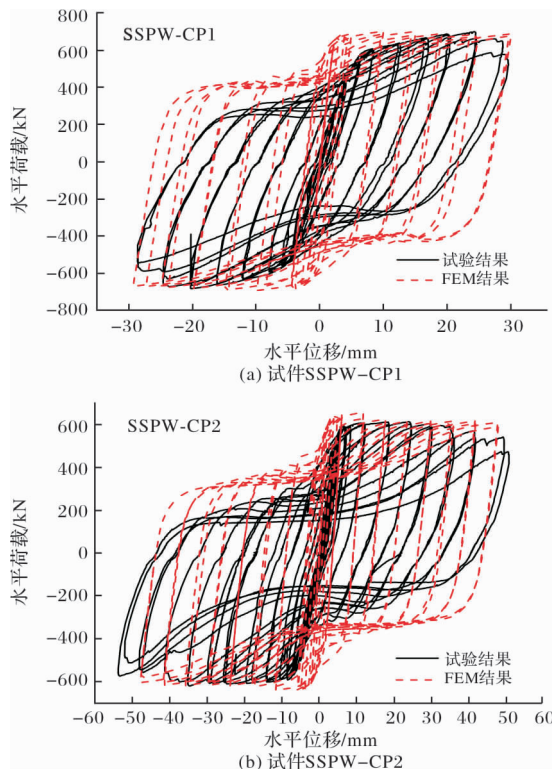


图 4 有限元与试验的滞回曲线对比

Fig. 4 The hysteresis curves of finite element and test compared

由图可知, 带网格加劲板的组合加劲钢板墙在低周往复荷载作用下, 试验滞回曲线与有限元滞回曲线吻合良好。经验证, 各试件的滞回环均有明显的捏缩, 有限元模型破坏时应力云图与试验试件破坏模式相符。在试件 SSPW-CP1 中, 有限元模型的峰值荷载比试验试件分别高出 0.33%(推向)和 1.49%(拉向); 在试件 SSPW-CP2 中, 有限元模型的峰值荷载比试验试件分别高出 6.99%(推向)和 5.14%(拉向); 在试件 SSPW-CP3 中, 有限元模型的峰值荷载比试验试件分别高出 7.15%(推向)和 2.51%(拉向)。究其原因, 是由于试验试件中的残余变形大、底座的滑动、加载存在偏心等因素引起的。但是, 有限元分析的主要特征和试验值吻合良好, 说明能够使用有限元方法对节点进行分析计算。

3 影响参数分析

3.1 影响参数选取

文献^[12-13]研究表明, 钢板墙的高厚比、肋板刚度比等对组合加劲钢板墙的滞回性能和承载力影响较大, 并考虑到本文研究的组合加劲钢板墙需通过螺栓连接网格加劲板, 而且钢板与加劲肋需直接承受竖向荷载, 因此, 参数分析选取以下参数: 钢板墙的高厚比 λ 、T 型加劲肋的肋板刚度比 η_T 、L 型加劲肋的肋板刚度比 η_L 、螺栓排布方式, 选取抗震性能优异的组合加劲钢板墙 SSPW-CP1 的试验模型为标准模型, 主要参数见表 2。

(1) 钢板墙的高厚比 λ

高厚比的计算公式如式(1)所示, 可通过改变钢板厚度来实现钢板墙高厚比 λ 的参数变化, λ 取 300、350、400、500 和 600, 保持其他参数不变。

$$\lambda = \frac{h}{t_p} \quad (1)$$

式中: h 为钢板墙的高度, t_p 为钢板墙的厚度.

表 2 有限元模型主要参数

Tab. 2 The main parameters of the finite element model

试件编号	钢板高厚比 λ	T 型肋板刚度比 η_T	L 型肋板刚度比 η_L	螺栓排布形式
SSPW-CP-nB	350	250	20	6×5 排布
SSPW-CP-1A	300	250	20	6×5 排布
SSPW-CP-1C	400	250	20	6×5 排布
SSPW-CP-1D	500	250	20	6×5 排布
SSPW-CP-1E	600	250	20	6×5 排布
SSPW-CP-2A	350	200	20	6×5 排布
SSPW-CP-2C	350	300	20	6×5 排布
SSPW-CP-2D	350	350	20	6×5 排布
SSPW-CP-3A	350	250	10	6×5 排布
SSPW-CP-3C	350	250	40	6×5 排布
SSPW-CP-3D	350	250	60	6×5 排布
SSPW-CP-4A	350	250	20	6×3 排布
SSPW-CP-4C	350	250	20	梅花排布

注: $n=1, 2, 3, 4$.

(2) 肋板刚度比 η

L 型加劲肋的肋板刚度比与 T 型加劲肋的肋板刚度比取值如下: 即 η_L 取 10、20、40、60; η_T 取 200、250、300、350. 其计算公式为

$$\eta = \frac{EI_s}{Da} \quad (2)$$

式中: E 为杨氏弹性模量, N/mm^2 ; I_s 为竖向加劲肋对钢板中面的惯性矩, mm^4 ; a 为墙体钢板的宽度, mm ; D 为墙体钢板的刚度, $\text{N} \cdot \text{mm}$; $D = \frac{Et_p^3}{12(1-\nu^2)}$, 泊松比取 0.3.

(3) 螺栓排布形式

由文献^[14]可知, 钢板墙的抗震性能与螺栓的排布形式有较大的关系, 故设计以下三种典型的螺栓排布形式: 梅花形排布螺栓、6×3 排布螺栓和 6×5 排布螺栓, 如图 5 所示.

3.2 参数分析

(1) 对承载力的影响

在单向荷载作用下的不同高厚比有限元模型的荷载-位移曲线如图 6(a)所示. 可以看出, 各曲线的发展趋势是一致的, 都经历弹性阶段、屈服阶段和弹塑性阶段. 随着高厚比的变大, 初始弹性刚度变低, 组合加劲钢板墙的屈服荷载变小, 水平极限荷载变小. 水平荷载加载至位移达 35 mm 时, 钢板高厚比从 300~600 的极限荷载分别为: 938.58 kN、753.22 kN、685.89 kN、542.17 kN 和 448.43 kN, 高厚比从 300~400 时, 极限承载

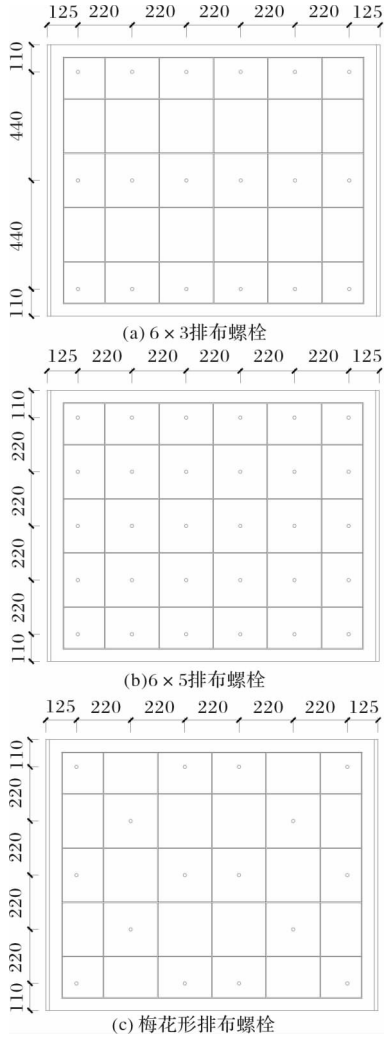


图 5 三种典型的螺栓排布形式

Fig. 5 Three typical bolt configurations

力变化较明显, 初始刚度下降较多. 故高厚比对水平极限承载力和初始刚度的影响较大, 考虑到组合加劲钢板墙的承载力、安全性和经济性, 其高厚比的建议取值为 300~400 之间.

不同肋板刚度比的荷载-位移曲线如图 6(b)、(c)所示. 从两图可知, 弹性阶段时, 各曲线基本重合, 说明肋板刚度比对加劲钢板墙的初始刚度影响很小. 水平加载至 35 mm 时, 极限荷载分别为: 748.96 kN ($\eta_L = 10$)、753.22 kN ($\eta_L = 20$)、695.45 kN ($\eta_L = 40$)和 769.35 kN ($\eta_L = 60$). T 型肋的肋板刚度比 η_T 从 200~300 时, 模型承载力提高较小; η_T 从 300~350 时, 模型承载力有所降低. 由此可知, 加劲肋在一定程度上可提高组合加劲钢板墙的承载力. 考虑到结构的承载力和经济性, 肋板刚度比 η_L 建议取值为 20~30 之间, 肋板刚度比 η_T 建议取值为 250~300 之间.

不同排布形式下的荷载-位移曲线如图 6(d)所示. 从图中可清晰显出, 弹性阶段时, 三条曲线几

乎重合, 构件均未达到屈服, 不同螺栓排布形式的曲线的发展趋势是一致的, 故受力性能相同. 在水平位移达到 35 mm 时, 6×5 排布、 6×3 排布和梅花形排布的极限荷载分别为: 753.22 kN、698.48 kN、655.22 kN, 所以螺栓数量较多的模型极限荷

载较大, 且 6×5 排布形式的荷载-位移曲线未出现下降趋势, 而其他两种排布形式的荷载-位移曲线均出现下降趋势. 模型螺栓数量越多, 极限承载力越大, 故螺栓排布形式对组合加劲钢板墙的承载力影响显著.

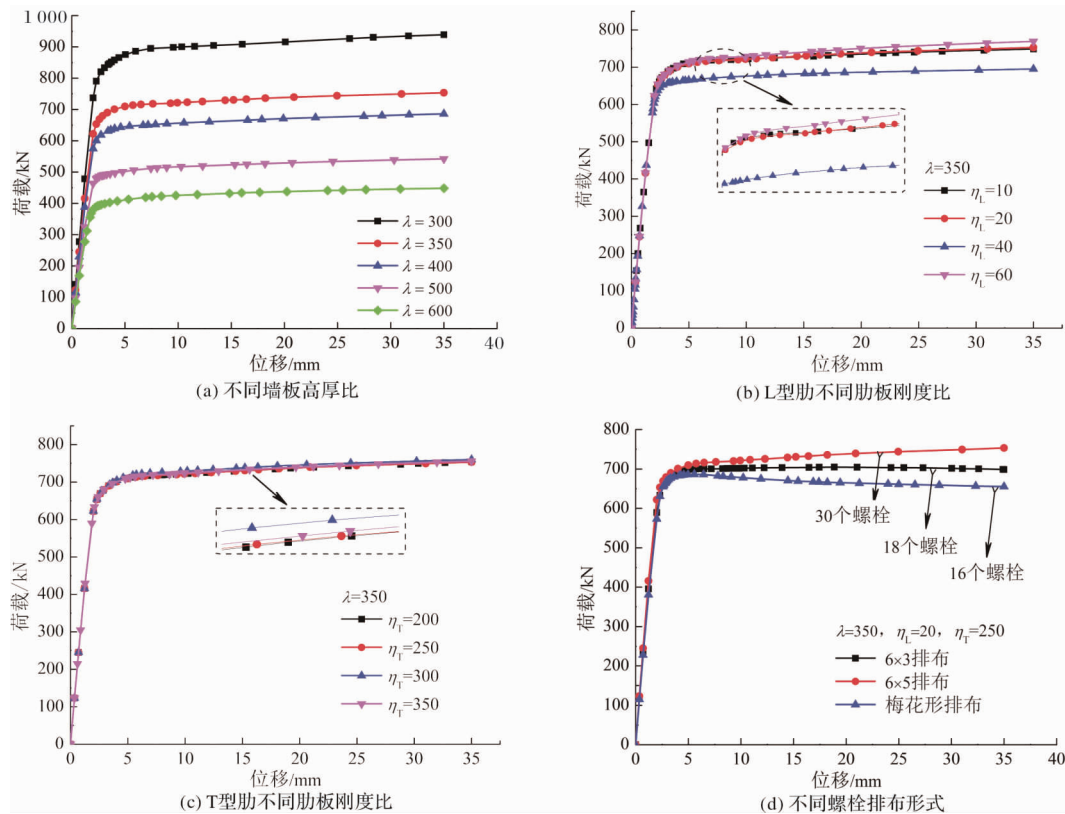


图6 各参数荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of each parameter

(2) 对破坏模式的影响

组合加劲钢板墙在单向荷载作用下, 当位移为 35 mm 时不同参数的 Mises 应力云图如图 7 所示. 由图 7(a)~(e)可知, 高厚比 λ 越大, 钢板墙的最大应力值越小, 加劲肋的嵌固作用更明显, 钢板墙四周拉力带发展更加充分. 高厚比为 300 时, 最大应力位于板上下边缘区域, 拉力带主要出现在各个区格的顶部和底部, 由于网格加劲板的面外约束作用, 加劲肋的应力值两端较大, 钢板墙中部应力较小; 高厚比大于 500 以后, 钢板墙中部的拉力带开始出现, 左上角和右下角邻近区格的部分拉力带贯通, 整块钢板墙的最大应力值增大.

由图 7(a)、(i)、(j)、(k)可知, 不同 L 型肋的肋板刚度比 η_L 模型最大应力相差不大, 且应力呈分区分布. 由墙体钢板的应力云图可知, 板中部应力较小, 四周边缘的应力较大. 从拉力带形成的区格可看出, 其主要出现在中间区格上下端部和左右边缘区格内, 说明 L 型肋的嵌固作用明显, 对

板面外约束作用较好, 其初始刚度也较大, 与此同时, 肋板刚度比 η_L 取太大时作用不明显, 也不经济. 由图 7(a)、(f)、(g)、(h)可知, 不同 T 型肋的肋板刚度比模型中钢板墙四周边缘区域的应力大于中部应力, 且拉力带在各个区格内发展, T 型肋的端部应力大于中部应力.

由图 7(a)、(l)、(m)可知, 不同螺栓排布形式的应力分布云图有较大差异, 但钢板墙的最大应力值相差较小. 6×5 排布形式的模型中, 由于螺栓数目较多, 墙板和网格加劲板连接作用较强, 板面拉力带较短, 主要分布于各个区格内, 中部区格无拉力带且应力值较小; 6×3 排布螺栓的模型中, 由于三行螺栓竖向间距较大, 板面拉力带相比于 6×5 排布时明显变长, 拉力带主要分布于板四周边缘区域; 梅花形排布螺栓的模型中, 拉力带沿斜向分布, 主要出现在无螺栓区域, 整块板应力值较大, 最大应力位置与 6×3 排布一样, 位于螺栓连接点处.

由以上分析可知, 墙板高厚比对组合加劲钢板

墙的承载力有较明显的影响, 特别是在 300~400 之间, 随着高厚比的增大, 承载力明显下降; 提高

螺栓数量对承载力能产生较为显著的影响. 故合理布置螺栓排布, 减少高厚比可提高墙体承载力.

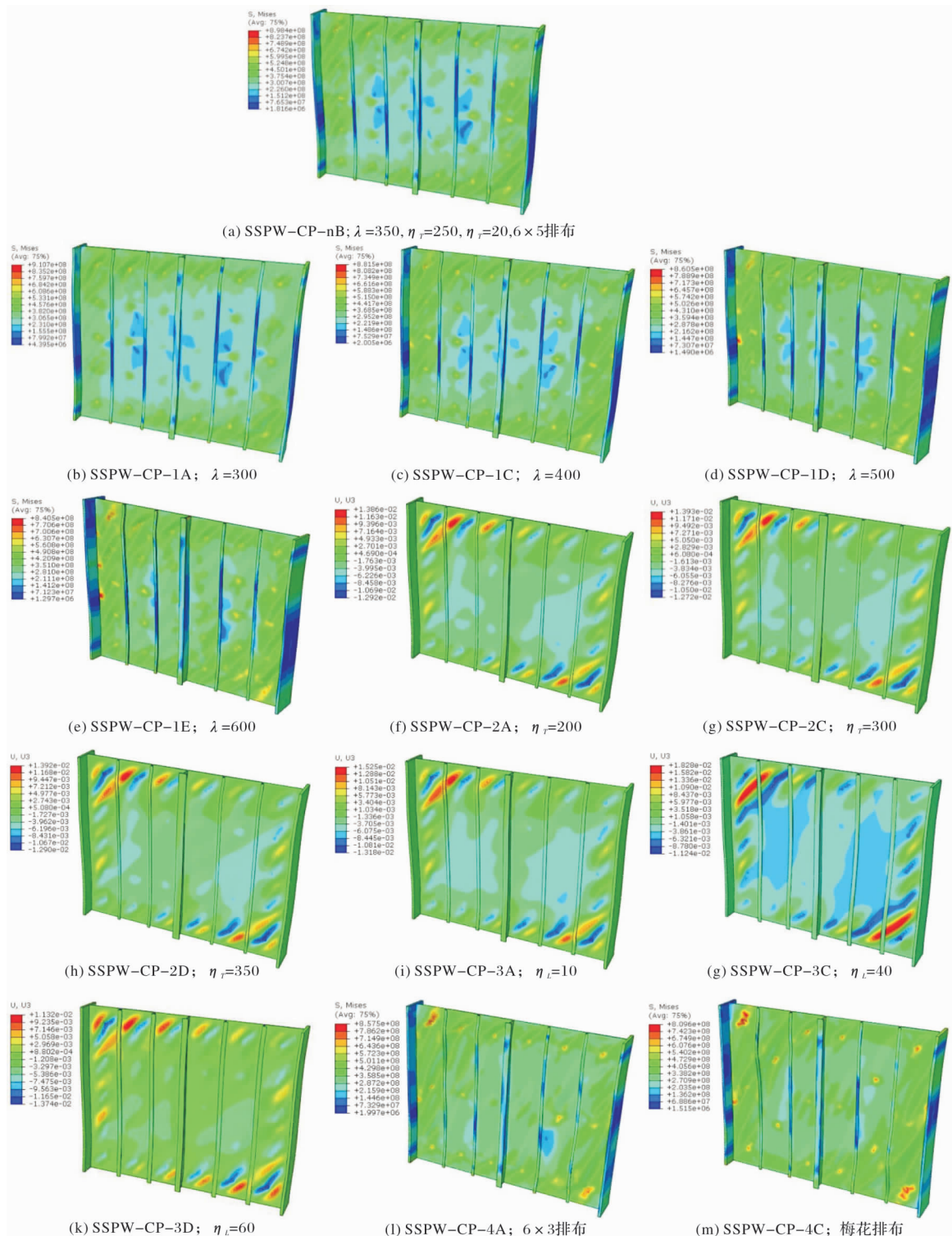


图 7 不同墙体试件的 Mises 应力云图

Fig. 7 The Mises stress cloud images of different wall specimens

4 组合加劲钢板墙抗剪承载力计算

4.1 分析模型

以不可滑移试件 SSPW-CP1 为基础模型, 在组合加劲钢板墙的影响承载力和破坏模式的关键参

数的基础上, 提出以下分析模型.

理论分析假定: (1) 板与加劲肋为固结. (2) 水平边缘构件与竖向边缘构件节点为铰接. (3) 竖向边缘构件(边缘钢板)抗弯刚度有限, 水平边缘构件的抗弯刚度无限大. 由试验与模拟的破坏模式可

知, 钢板墙屈曲后局部斜向拉力带在各个区格内均有发生, 拉力带的拉力作用于加劲肋、边缘钢板和加载横梁上。边缘钢板需要承担左右端部区格拉力带产生的横向力, 但其刚度较小, 因此假定其有限抗弯刚度是合理的。如果上下相邻两层的加劲钢板墙均产生斜向拉力带, 当斜向拉力带作用于中间的加载横梁上时, 其竖向分量则相互抵消, 因此不会产生太大影响。分析模型如图8所示。

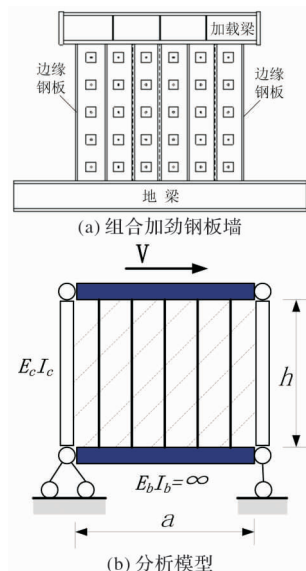


图8 组合加劲钢板墙分析模型

Fig. 8 Analysis model of composite stiffened steel plate wall

4.2 抗剪承载力公式

根据规范^[15], 钢板组合剪力墙的抗剪承载力 V_u 为

$$V_u = 0.6 f_y \cdot A_{sw} \quad (3)$$

式中: V_u 为抗剪承载力; f_y 为钢材的屈服强度; A_{sw} 为平行于剪力墙受力平面的钢板面积。

陈国栋等^[3]通过大量的有限元模拟和数值分析, 认为十字加劲钢板墙主要通过剪切屈服承载水平荷载, 抗剪承载力与钢板的高厚比 λ 的关系最为紧密, 给出十字加劲钢板墙的抗剪承载力计算公式如下:

$$V_u = \tau_y \cdot b \cdot t \quad (4)$$

式中: b 为钢板墙的高度; t 为钢板厚度。

缪友武等^[16]对两侧开缝钢板剪力墙结构性能进行了研究, 得到极限承载力公式:

$$V_u = C_\lambda \cdot a \cdot t \cdot f_y \quad (5)$$

式中: C_λ 为极限承载力系数; a 为钢板宽度。

基于上述计算公式, 根据有限元参数分析结果, 组合加劲钢板墙的受力性能与其高厚比、肋板刚度比和螺栓排布方式有关。尤其是抗剪承载力随高厚比的增加而显著下降。考虑加劲钢板墙与网格

加劲板之间相互滑移的影响(折减系数)和构件出现全截面受剪屈服情况, 得到如下抗剪承载力公式:

$$V_u = \alpha \cdot C_\lambda \cdot a \cdot t \cdot \tau_y \quad (6)$$

式中: C_λ 为极限承载力系数, 其考虑了钢板高厚比 λ 的影响, 当钢板全截面受剪屈服状态时, 其值取1; τ_y 为抗剪屈服应力, 根据 Mises 屈服准则确定, $\tau_y = f_y / \sqrt{3}$; α 为滑移折减系数。

4.3 算式待定参数的确定及算式验证

由于有限元模拟得到的荷载-位移曲线中不能明显地看出下降段, 不能准确得到极限位移和峰值荷载等关键数据点, 因此, 取 1/50 层间位移角处对应的荷载为组合加劲钢板墙的极限荷载, 并由式(6)求得不同高厚比 λ 时的极限承载力系数 C_λ 计算式如(7)式所示, 其拟合曲线如图9所示。

$$C_\lambda = 0.391 \cdot e^{(-\lambda/141)+0.949} \quad (7)$$

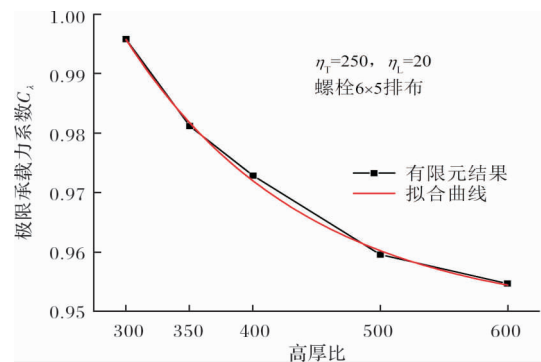


图9 极限承载力系数 C_λ 拟合

Fig. 9 Ultimate bearing capacity coefficient C_λ fitting

通过有限元模拟的极限荷载回归分析, 拟合得到的极限承载力系数 C_λ 公式与有限元结果有一定偏差, 其拟合函数相关系数 R^2 为 99.7%, 且小于1; 继而利用极限承载力系数 C_λ 公式反算出不同墙板高厚比 λ 时的抗剪承载力 V_u , 验证拟合公式的有效性, 见表3。由表可知, 极限承载力系数 C_λ 公式反算出的结果与有限元模拟的极限荷载(取 1/50 层间位移角处对应的荷载)吻合良好, 偏差均不大于 0.1%, 说明拟合公式是有效的。

表3 拟合公式结果与有限元结果对比

Tab. 3 The result of is finite element method compared with that of fitting formula

高厚比 λ	公式 V_u /kN	有限元 V_u /kN	极限承载力系数 C_λ	有限元-公式/有限元
300	920.80	920.98	0.996	0.02%
350	742.18	741.77	0.982	-0.06%
400	673.58	674.17	0.972	0.09%
500	532.41	531.97	0.960	-0.08%
600	440.22	440.27	0.955	0.01%

基于不可滑移试件 SSPW-CP1 的试验结果可知, 滑移折减系数 α 取 1 时, 网格加劲板与钢板之间不可滑移. 试件 SSPW-CP2/CP3 的滑移折减系数 α 由其抗剪承载力试验值求得, 见表 4.

表 4 滑移折减系数值
Tab. 4 The reduction coefficient of sliding

试件	L 型加劲肋	可滑移	高厚比 λ	试验 V_u/kN	α
SSPW-CP1	有	否	367	692.86	1.00
SSPW-CP2	有	是	367	611.19	0.83
SSPW-CP3	无	是	367	589.45	0.80

5 结论和建议

通过对三类组合加劲钢板墙进行有限元模拟, 对比分析滞回曲线等, 探讨了肋板刚度比 η 、钢板高厚比 λ 及螺栓排布形式对组合加劲钢板墙的抗剪承载力的影响, 从而可得到以下结论:

- (1)有限元模拟与试验加载时的最终破坏形态一致, 滞回曲线吻合良好.
- (2)组合加劲钢板墙的影响参数建议值如下: 高厚比 λ 取 300~400, 肋板刚度比 η_L 取 20~30, 肋板刚度比 η_T 取 250~300, 螺栓排布形式采用满布的形式. 三种影响因素中, 钢板高厚比 λ 对加劲钢板墙抗震承载力影响最为显著, 肋板刚度比对极限承载力的影响最小.
- (3)对组合加劲钢板墙提出了计算抗剪承载力的公式, 并拟合不同墙板高厚比 λ 时有限元结果, 得到极限承载力系数 C_k 的拟合公式, 并验证其有效性. 考虑了网格加劲板与钢板之间的滑移, 求得三类试件的滑移折减系数 α , 进一步提高了公式的准确性和适用性.

参考文献 References

[1] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构,2005(1):1-6.
GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and applicating of steel plate shear wall in high-rise buildings[J]. Steel Construction,2005,(1):1- 6.

[2] WANG Meng, YANG Weiguo, SHI Yongjiu, et al. Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials[J]. Journal of Constructional Steel Research,2015,107:194-210.

[3] ERFAN A, FARIBORZ Nateghi. Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation[J]. Journal of Constructional Steel Research,2013,89:9-20.

[4] 郭彦林,周明. 钢板剪力墙的分类及性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 1-13.
GUO Yanlin, ZHOU Ming. Categorization and performance of steel plate shear wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2009,26(3):1-13.

[5] 赵伟,周观根,吴冲,等. 竖向加劲钢板剪力墙门槛刚度研究[J]. 工业建筑,2013,43(1):104-107.
ZHAO Wei, ZHOU Guangen, WU Chong, et al. Elastic buckling property of steel plate shear wall with vertical stiffeners[J]. Industrial Construction,2013,43(1):104-107.

[6] 于金光,郝际平,宁子健,等. 半刚性框架-槽钢十字形约束钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(6):75-83.
YU Jinguang, HAO Jiping, NING Zijian, et al. Experimental study on seismic behavior of semi-rigid connection steel frame-unbonded cross buckling-restrained steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures,2014,35(6):75-83.

[7] 杨雨青,牟在根. 交叉加劲薄钢板剪力墙简化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(12):180-186.
YANG Yuqing, MU Zaigen. Simplified model of diagonally stiffened thin steel plate shear walls[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(12):180-186.

[8] 兰涛,赵廷涛,刘贵,等. 箱板式钢结构住宅底部加强区的单片组合墙体有限元分析[J]. 钢结构,2017,32(11):84-90.
LAN Tao, ZHAO Tingtao, LIU Gui, et al. Finite element analysis of single composite wall in the bottom reinforced zone of box-type steel structure residence[J]. Steel Construction,2017,32(11):84-90.

[9] 兰涛,赵廷涛,门进杰,等. 带肋箱板式钢结构住宅底部加强区墙体抗震性能试验研究[J]. 工业建筑,2018,48(9):56-62,160.
LAN Tao, ZHAO Tingtao, MEN Jinjie, et al. Experimental research on the seismic behavior of the wall of reinforced area at the bottom of box-type steel structure residential buildings with stiffening ribs[J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 56-62, 160.

[10] 郭昌灵,箱板式钢结构住宅组合加劲钢板墙抗震性能及隔声性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
GUO Changling, Tests for performance and sound insulation performance of composite stiffened steel plate walls in box-plate steel structure house[D]. Xi'an:Xi'an Univ. of Arch. & Tech.,2018.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程:JGJ 82-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for high strength bolt connections in steel structures; JGJ 82-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] ALINIA M M, SHIRAZI R S. On the design of stiffeners in steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10): 2069-2077.
- [13] 兰涛, 郭琳颖, 门进杰, 等. 箱板式钢结构住宅底部加强区组合钢板墙有限元分析和抗剪承载力计算式[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 28-35.
- LAN Tao, GUO Linying, MEN Jinjie, et al. Finite element analysis and shear capacity formula of the composite steel plate shear wall at the bottom reinforced area of box-type steel structure residential buildings[J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 28-35.
- [14] 兰涛, 廖钊志, 门进杰, 等. 带肋箱板式钢结构住宅底部加强区墙体抗震性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 63-69, 197.
- LAN Tao, LIAO Fanzhi, MEN Jinjie, et al. Finite element analysis of seismic behavior of the wall at the bottom reinforced area of box-type steel structure residential buildings with stiffening ribs[J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 63-69, 197.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢板剪力墙技术规程; JGJ/T 380-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the people's Republic of China. Technical specification for steel plate shear walls; JGJ/T 380-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [16] 缪友武. 两侧开缝钢板剪力墙结构性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- MIAO Youwu. The investigation to structural behavior of steel plate shear wall slotted at two edges[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 778 页)

- [11] KAZUYUKI Mizuguchi, KENTARO Yamada, et al. Rationalized steel deck structure and large model test of developing new type of structure[C]//Proceedings of 2004 Orthotropic Bridge Conference, USA; Sacramento, [s. n.], 2004.
- [12] ROMAN Wolchuk. Prefabricating standard orthotropic steel decks[J]. Model Steel Construction, 2006(12): 49-51.
- [13] TANG Manchung. A new concept of orthotropic steel bridge deck[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011(7): 587-595.
- [14] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限单元法[M]. 北京: 水利水电出版社, 1978.
- East China University of Water Resources. Finite element method for elastic problems[M]. Beijing: China Water Power Press, 1978.
- [15] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- ZHU Bofang. The finite element method theory and applications[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范; JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts; JTG D60-2015[S]. Beijing: China communication press, 2015.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准; JTG B01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering; JTG B01-2014[S]. Beijing: China Communication Press, 2014.
- [18] 崔晨, 孙立军. 正交异性钢桥面铺装的力学分析[J]. 公路工程, 2010, 35(6): 49-50.
- CUI Chen, SUN Lijun. Mechanical analysis of pavement on orthotropic steel bridge deck[J]. Highway Engineering, 2010, 35(6): 49-50.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范; JGT D64-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge; JGT D64-2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.

(编辑 吴海西 沈 波)