

潘钦锋, 陈亚辉, 吴应雄, 等. 2024. 水平缝钢制连接的可修复装配式剪力墙结构抗剪性能研究[J]. 地震研究, 47(1): 135 – 145, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0001.

Pan Q F, Chen Y H, Wu Y X, et al. 2024. Study on shear performance of repairable precast shear wall with horizontal steel connections [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 135 – 145, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0001.

水平缝钢制连接的可修复装配式剪力墙结构 抗剪性能研究*

潘钦锋^{1,2}, 陈亚辉^{1,2}, 吴应雄^{3♣}, 颜桂云^{1,2}, 余勇胜^{1,2}, 林相春⁴

(1. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 4. 飞阳建设工程有限公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 为实现剪力墙结构震损后的快速修复, 提出一种水平缝钢制连接的可修复装配式剪力墙结构 (Repairable precast shear wall with horizontal steel connections, RPW-HSC), 采用 ABAQUS 软件对高宽比为 1.0 的 RPW-HSC 试件进行建模分析, 数值模拟结果与试验结果吻合良好。通过有限元参数化建模, 研究钢制连接中剪切板的厚度、开缝处小钢柱的高宽比、钢板强度及轴压比对 RPW-HSC 试件抗剪性能的影响, 建立 RPW-HSC 抗剪承载力设计方法。结果表明: RPW-HSC 试件的刚度与抗剪承载力随剪切板厚度、钢材强度及轴压比的增加而增加, 但参数过大会导致该试件由钢制剪切板破坏转变为上部预制混凝土墙体破坏; 当钢制剪切板开缝处小钢柱高宽比小于 3 时, 试件的破坏由开缝处小钢柱的弯曲破坏变成上部预制混凝土墙体的剪切破坏。因此, 需控制合理的设计参数以实现 RPW-HSC 试件结构损伤可控及震损可修复。RPW-HSC 试件抗剪承载力设计方法获得的理论计算值与试验值及有限元结果吻合较好, 验证了抗剪承载力设计方法的准确性。

关键词: 水平缝钢制连接; 装配式剪力墙; 有限元分析; 参数分析; 抗剪承载力设计

中图分类号: TU317⁺.1; TU318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)01-0135-11
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0001

0 引言

剪力墙是一种重要的抗侧力构件, 被广泛应用于高层建筑结构中。然而传统钢筋混凝土剪力墙结构的抗震设计更侧重于在地震发生时保证人们的安全, 对震损后的可修复性并未做出要求。研究表明, 传统剪力墙在震后无法修复或修复困难, 会造成巨大的经济损失 (肖魁, 张其林, 2016; 刘春阳等, 2021; 李想等, 2021)。因此, 为实现剪力墙结构在震后快速经济的可修复功能,

实现“可恢复功能城市” (PEER, 2010) 的抗震目标成为众多学者研究的新方向。

针对具有可恢复功能的剪力墙结构, 许多学者进行了研究, 如吕西林和毛苑君 (2012)、毛苑君和吕西林 (2014) 首先提出采用可更换拉压支座替换剪力墙柱脚来实现震后可修复, 给出了具体的设计方法, 并对该结构进行低周往复荷载试验研究, 结果表明该剪力墙具有较好的耗能和变形能力, 能明显减少混凝土墙体裂缝的产生; 刘其舟和蒋欢军 (2016)、Liu 和 Jiang (2017) 则研究了一种带防屈曲软钢内芯耗能的、可更换墙脚

* 收稿日期: 2022-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51578152); 福建省自然科学基金资助项目 (2021J011058); 福建省建设厅科技研究开发计划项目 (2022-K-302).

第一作者简介: 潘钦锋 (1975-), 副教授, 主要从事结构工程与防灾减灾研究. E-mail: phnpan@163.com.

♣通信作者简介: 吴应雄 (1969-), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构工程抗震与减隔震研究.
E-mail: WYXFD2006@fzu.edu.cn.

的、新型剪力墙, 具有较好的变形和耗能能力, 且可通过更换受损的耗能墙角装置来恢复该结构的抗震性能; 汪梦甫和曾雨薇 (2020) 对带可更换摩擦耗能器组合的剪力墙进行试验研究, 结果表明可更换摩擦耗能墙脚能减少墙体的损伤, 提高结构的耗能能力和延性; 马少春等 (2021) 研究了不同连接形式的横向钢筋对装配式剪力墙抗震性能的影响, 结果表明采用合理配筋的连接形式, 可有效提高整个装配试件的抗震性能; 王威等 (2021a, b) 提出在组合剪力墙墙脚设置可更换阻尼器, 并对该结构进行低周往复拟静力试验, 结果表明带有阻尼器的组合剪力墙可将结构的损伤集中在阻尼器上, 更换阻尼器之后墙体仍具有较好的抗震性能; 徐龙河等 (2021)、肖水晶等 (2018) 通过在剪力墙两侧墙角设置自复位碟簧装置, 来减少剪力墙在地震作用下的损伤和残余变形, 并给出碟簧装置的设计方法。在上述的研究中, 对剪力墙的可修复性能进行了较为深入的研究, 且大多都是通过采用可更换元件将剪力墙柱脚区替换掉, 但剪力墙底部与基础相连的部分仍主要通过现浇墙体进行连接, 底部现浇区域承担全部墙体剪力, 在地震过程中易出现内力和变形过大的情况, 从而发生不可逆的塑性变形, 给震后的修复带来一定的困难。

本文提出了一种水平缝钢制连接的可修复装配式剪力墙 (RPW-HSC), 该剪力墙通过在上部墙体和基础之间设置水平缝钢制连接区域, 用以实现上部预制墙体与基础的装配连接。本文在 RPW-HSC 试件受剪性能试验工作基础上, 通过

ABAQUS 软件对其进行数值分析, 并与试验结果进行对比分析。在验证有限元模型合理的基础上, 重点研究轴压比、连接区中剪切型连接钢板的厚度、小钢柱高宽比、钢板强度等级等参数对 RPW-HSC 抗剪性能影响, 并提出 RPW-HSC 抗剪承载力设计方法, 为后续 RPW-HSC 剪力墙在实际工程中的应用提供理论支撑。通过合理的设计, 保证结构在“大震”下, 可将主要损伤集中在水平缝钢制连接区域, 利用装配式钢制连接件的易装易拆特点, 做到对震后损伤件的便捷更换, 进而实现剪力墙结构的震后可修复功能。

1 RPW-HSC 试件

1.1 试件构造

试件由上部预制混凝土墙体、水平缝钢制连接区域和下部基础梁 3 部分组成, 如图 1 所示。水平缝钢制连接区域设置在剪力墙结构易受损的底部区域, 设计时适当削弱该区域的抗剪强度, 让其在结构中以“薄弱区”存在。将该装配式剪力墙的变形和损伤集中在连接区域, 并利用该区域中变形优良的耗能钢构件进行耗能, 保证上部预制混凝土墙体不发生损伤破坏。在震后通过更换连接区域受损的钢构件便可实现其可修复的功能。

水平缝钢制连接区域由受拉钢板、剪切板、承压垫梁和连接角钢等组成。承受荷载时, 承压垫梁承受上部结构传递的轴向荷载; 受拉钢板底端设有长条形螺栓孔, 墙端受压时螺栓沿开槽方向滑动释放压力, 不考虑受拉钢板受压, 受拉时

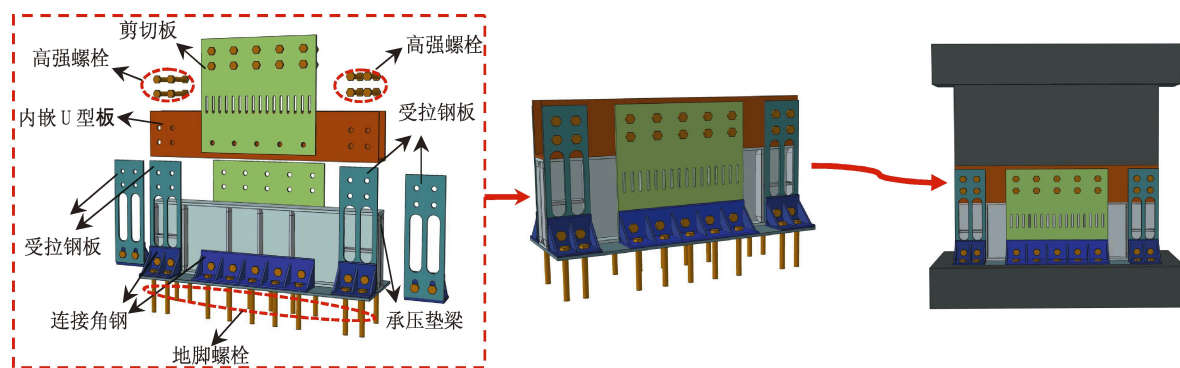
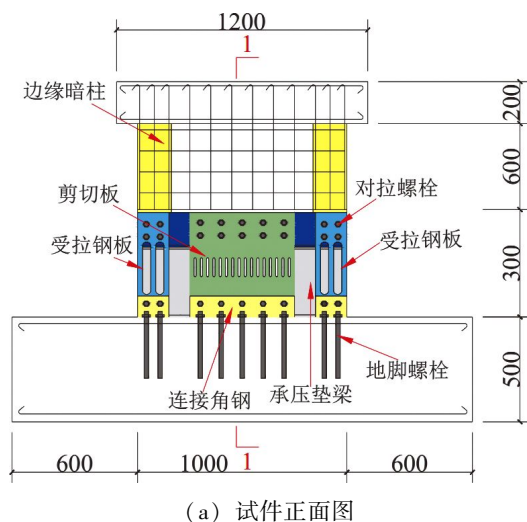


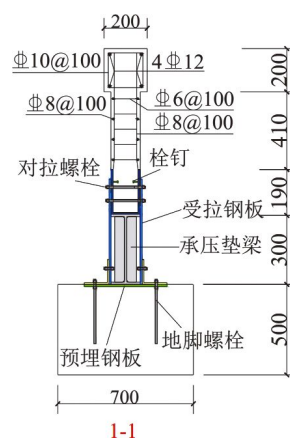
图 1 RPW-HSC 试件构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen RPW-HSC

其通过螺栓与螺栓孔挤压产生抵抗拉力，并与承压垫梁在另一端部承受的压力形成一对力偶，以抵抗构件截面弯矩，同时受拉钢板开孔形成数条高宽比较大的长条形钢柱，受拉变形及耗能能力良好；剪切板则主要用来承受连接区域的剪力，其中开有竖缝，可将剪切板的剪切变形转换成缝间小钢柱的弯曲变形，可提高墙体的抗剪变形能力。



(a) 试件正面图

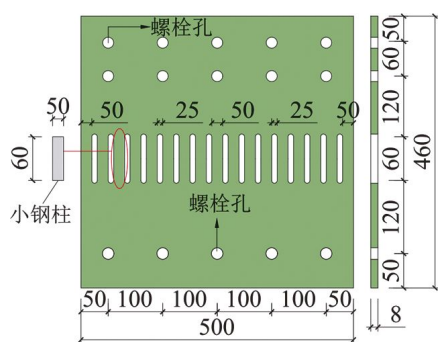


(b) 试件侧面图

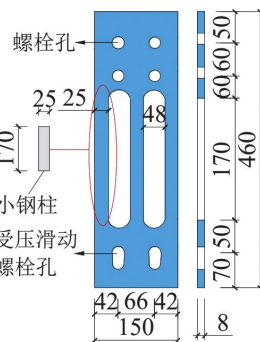
单位: mm

图2 RPW-HSC 试件的几何尺寸及配筋

Fig. 2 Geometric dimensions and reinforcement of the specimen RPW-HSC



(a) 剪切板



(b) 受拉钢板



(c) 承压垫梁

单位: mm

图3 RPW-HSC 试件钢构件详图

Fig. 3 Detail of steel members of RPW-HSC

2 ABAQUS 有限元建模与验证

选取余勇胜 (2022) 的试验结果与本文试件模型进行有限元模拟与试验结果的破坏形态和滞回性能对比, 评估本文有限元模型的准确性及合理性。

1.2 试件设计

本文选取余勇胜 (2022) 研究中的试验, 设计并制作 1 片 RPW-HSC 试件, 墙体截面长 1 000 mm、宽 120 mm、高 1 000 mm, 墙内边缘暗柱宽度为 150 mm, 该剪力墙高宽比 $\lambda = 1$ 。各试件的配筋及细部尺寸如图 2、3 所示。试验所用的钢材型号均为 Q235, 钢筋型号为 HRB400, 混凝土强度等级为 C40, 材料都为同一批次。

2.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件建立 RPW-HSC 试件有限元模型, 加载制度与试验保持一致。钢筋采用 T3D2 桁架单元, 开竖缝的剪切板采用 S4R 壳单元, 混凝土剪力墙和其余连接构件则用 C3D8R 实体单元, 有限元模型及网格划分如图 4a 所示。在剪力墙建立一参考点耦合顶部平面用以施加轴力,

如图 4a 所示的 RP1 点；将上部加载梁左面耦合在另一参考点施加水平位移荷载，如图 4a 所示的

RP2 点，加载级数为屈服位移的整数倍，具体的加载制度如图 4b 所示。

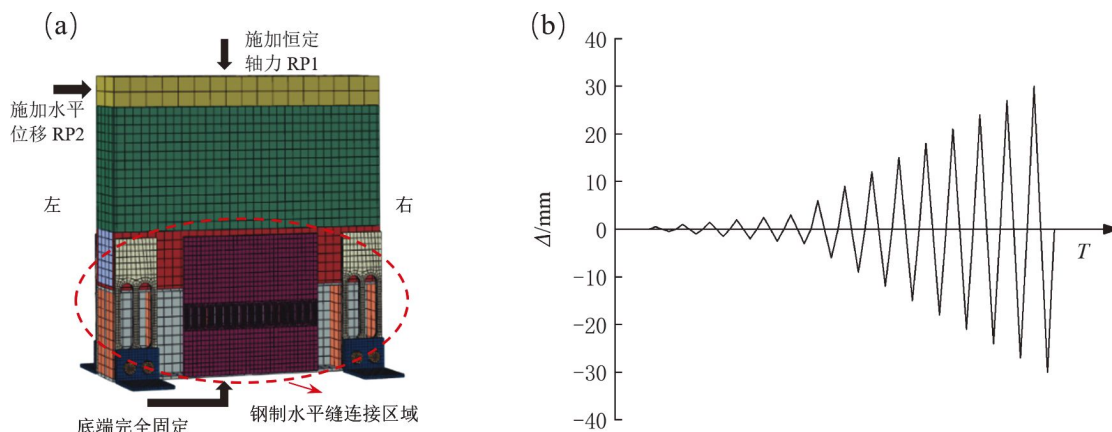


图 4 试件有限元模型 (a) 及其加载制度示意 (b)

Fig. 4 Finite element model of the specimen (a) and schematic diagram of the loading scheme (b)

一共设置 5 个分析步，前三步是对螺栓施加预紧力，后两步分别施加竖向轴压力和水平力，采用 ABAQUS 结构化网格技术将试件划分为规则六面体，钢筋采用 Truss 单元分割。为了使模型更容易计算和收敛，在不影响计算结果的情况下，本次建模忽略了基础梁和中间连接角钢。

钢筋采用双折线流动模型本构，弹性模量 E_s 取 2.0×10^5 MPa、屈服强度 f_y 取 297 MPa、极限强度 f_u 取 437 MPa，钢材强化段的刚度取 $0.01E_s$ 。钢材选用二次塑流模型本构，并参考周天华等 (2014) 研究的应力三轴度损伤准则的本构关系考虑损伤退化的情况。混凝土采用软件自带的混凝土塑性损伤模型，参考美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318M-05) 的规定，混凝土的弹性模量取 $4730\sqrt{f'_c}$ ，泊松比取 0.2，混凝土的拉压本构使用 Attard 和 Setunge (1996)、沈聚敏等 (1993) 研究中的本构模型。

2.2 试验验证

2.2.1 破坏模式

图 5 为有限元模型破坏与试验的失效破坏模式对比图。从图 5a 中可以看出试件的应力主要集中在剪切板和受拉钢板对应的小钢柱上，表明该试件可将应力集中在延性较为优异的部件，利用小钢柱较好的变形能力来耗能；由图 5b、c 可看出试件最终破坏都是由于中间剪切板开缝处的小钢柱断裂所导致，而受拉钢板有明显的变形，但在破

坏时仍处于耗能阶段；由此表明，该有限元模型能较为准确地模拟出该试件的失效破坏模式。

2.2.2 滞回性能

将有限元计算得到的滞回曲线和骨架曲线与试验结果进行对比，如图 6 所示。从图中可以看出，有限元计算得到的刚度略大于试验结果，这是由有限元模拟中各构件的连接是理想化的，而试验中各构件采用螺栓连接，在加载过程中会有少量的滑移导致的，但是两者的误差不大；且由图 6b 可看出试验和有限元计算得到的拉压刚度有较小差距，主要是由试件中材料的离散性及试件加工焊接的微小变形造成。由表 1 可以看出，有限元计算的峰值荷载平均值为 625.64 kN，试验值为 609.18 kN，两者的误差在 5% 以内，表明该有限元模型建模及数值分析方法较为准确，可依据此建模方法对该剪力墙进行参数分析。

表 1 试验承载力与有限元承载力对比

Tab. 1 Comparison between the bearing capacity from the test and the bearing capacity from finite element analysis

方向	试验结果 F_{uc}/kN	有限元计算结果 F_{FE}/kN	F_{uc}/F_{FE}
正向	599.80	622.75	0.96
负向	618.56	628.53	0.98
平均值	609.18	625.64	0.97

注： F_{uc} 表示试验试件峰值荷载； F_{FE} 表示有限元试件计算峰值荷载。

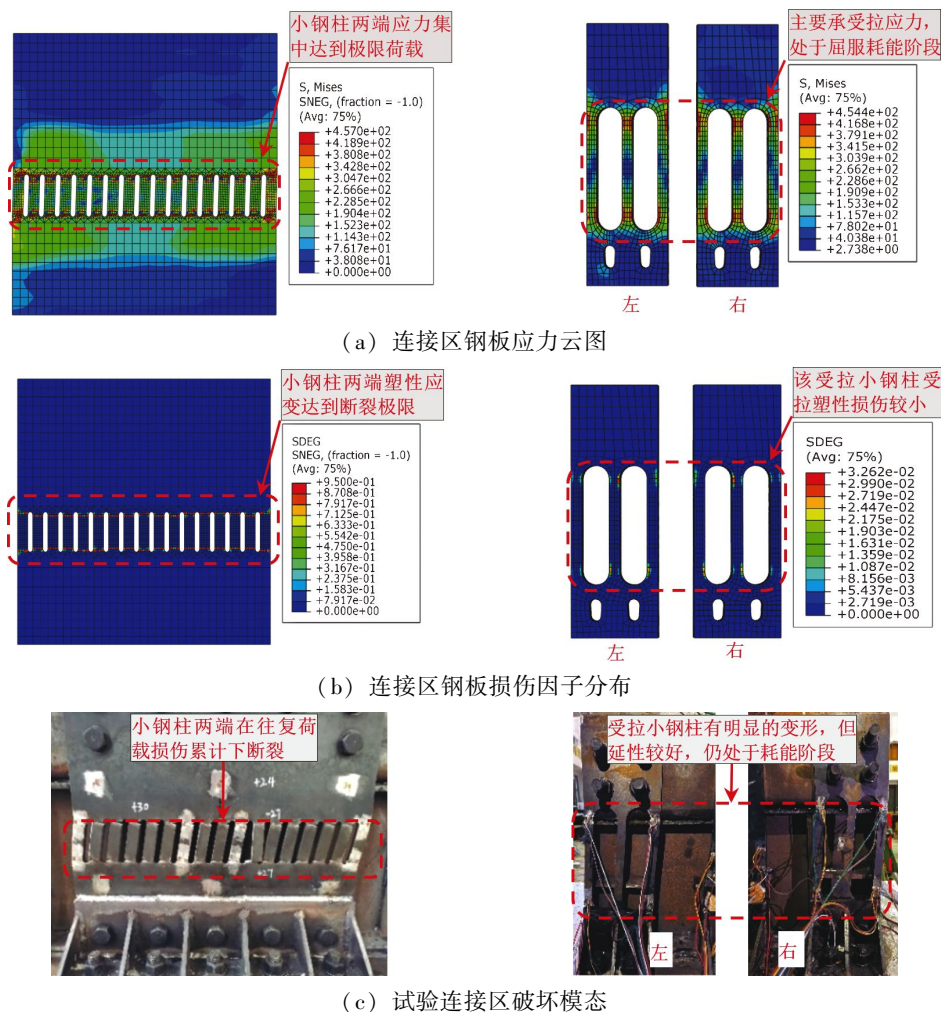


图5 有限元模型与试验的失效破坏模式对比图

Fig. 5 Comparison between the failure mode of the finite element model and the failure mode of the test

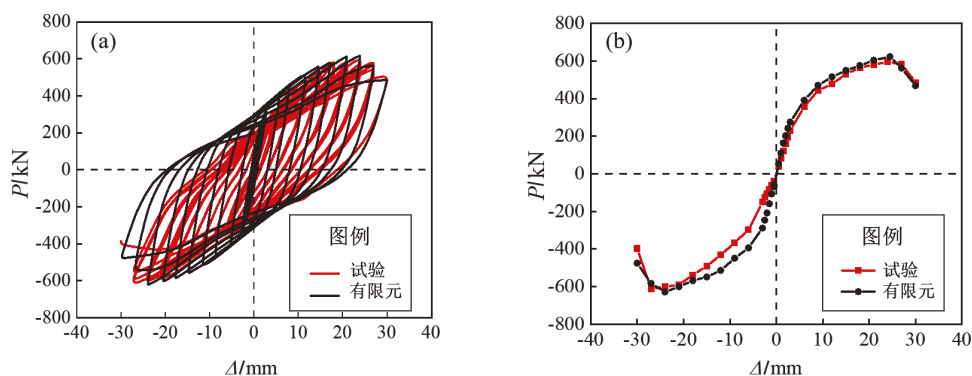


图6 试验与有限元计算得到的滞回曲线 (a) 和骨架曲线 (b) 对比

Fig. 6 Hysteretic curve (a) and skeleton curve (b) from the test and from the finite element calculation

3 参数分析

以经试验验证的 RPW-HSC 试件有限元模型为

基本模型, 其基本参数为: 高宽比为 1, 轴压比 n 为 0.15, 混凝土强度等级为 C40, 钢材强度等级为 Q235, 连接钢板和剪切板的厚度均为 8 mm, 剪切板中开缝处的小钢柱高度为 60 mm、宽度为 50 mm。

在以上分析的基础上,对影响 RPW-HSC 试件抗剪性能的主要参数进行分析,包括剪切板的厚度、剪切板开缝处小钢柱的高度及宽度、剪切板的强度以及轴压比。主要系数具体取值为:轴压比 n 分别为 0、0.15、0.3、0.45、0.6;剪切板的强度分别为 Q235、Q345、Q460;剪切板开缝处小钢柱高度 h 分别取 40、60、80、100、120 mm;剪切板厚度 t 分别取 6、8、10、12 mm;剪切板宽度 b 分别取 10、15、20、30、60 mm。

3.1 厚度

图 7a 为不同剪切板厚度对试件的抗剪承载

力影响。从图中可以看出,随着剪切板厚度的增加,试件的峰值抗剪承载力逐渐提升,但延性却逐渐变差;当剪切板厚度大于 10 mm 时,试件的破坏不再集中在水平缝钢制区域,而是上部预制墙体发生了剪切破坏,这表明当剪切板厚度大于 10 mm 后,水平缝钢制区域不再是该结构的薄弱区,此时连接区域的抗剪承载力强于上部预制剪力墙结构。故为了将损伤和变形集中在水平缝钢制区域,从而达到震后结构的可修复功能,需在设计时保证剪切板的厚度不大于 10 mm (表 2)。

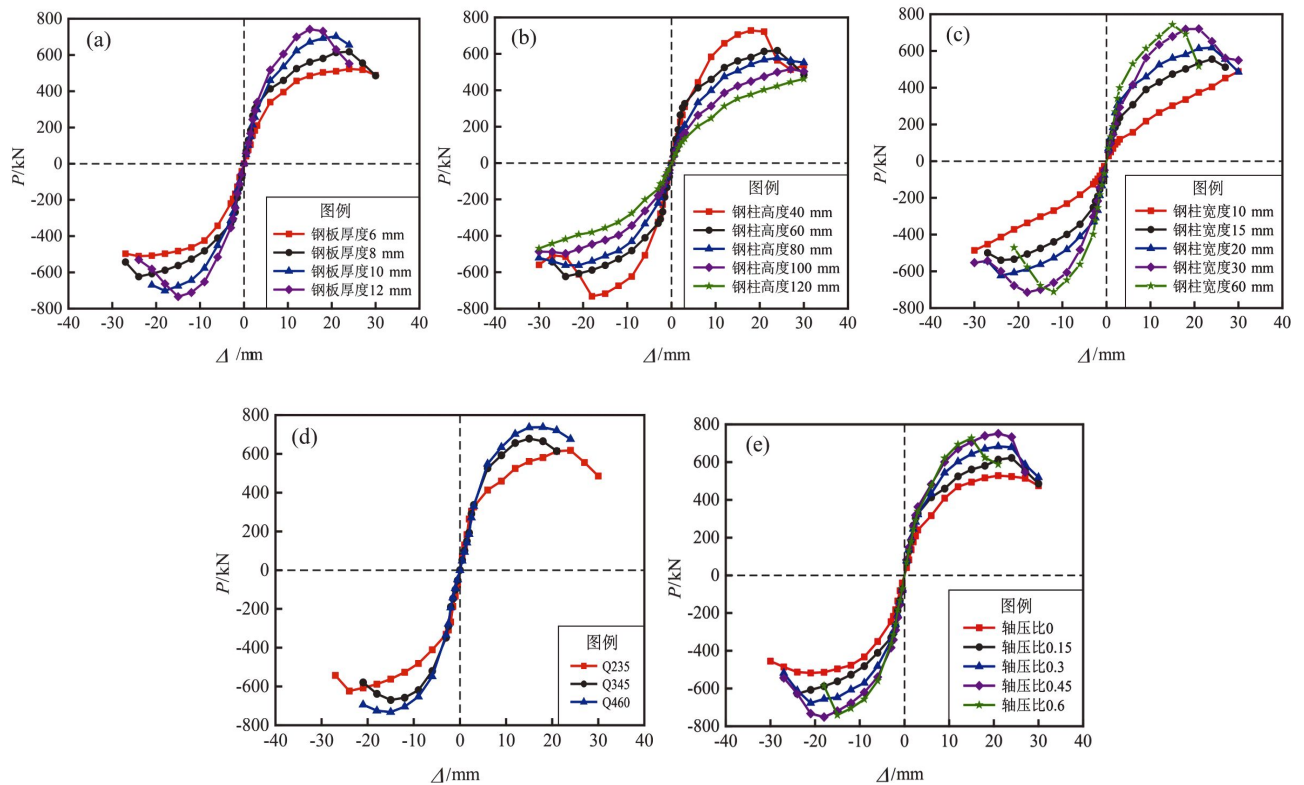


图 7 剪切板厚度 (a)、开缝处小钢柱高度 (b)、小钢柱宽度 (c)、剪切板钢材强度 (d) 及轴压比 (e) 对试件的抗剪承载力影响

Fig. 7 Effect of shearing plate thickness (a), small steel-column height (b), small steel-column width (c), shearing plate steel strength (d), and axial compression (e) on shear-resistance bearing capacity

3.2 开缝处小钢柱高度

图 7b 为剪切板开缝处小钢柱高度对试件的抗剪承载力影响。从图中可以看出,在保证开缝处的小钢柱宽度为 20 mm 不变的情况下,随着小钢柱高度的增加,试件的延性逐渐提高,初始刚度

和峰值抗剪承载力却不断减小。但当高度小于 60 mm,即小钢柱高宽比小于 3 时,此时由于高宽比较小,不再发生弯曲变形,剪切板的抗剪承载力有较大提高,试件的最终破坏发生在上部预制剪力墙体上。故为了保证试件的损伤可控,设计

时应确保剪切板开缝处的小钢柱高宽比不小于3 (表2)。

3.3 开缝处小钢柱宽度

图7c为剪切板开缝处小钢柱宽度对试件的抗剪承载力影响。从图中可以看出,在保证小钢柱高度60 mm不变的情况下,随着小钢柱宽度增加,试件的刚度和承载力有显著提升,但延性逐渐减小。小钢柱宽度大于20 mm时,即小钢柱高宽比小于3时,试件的破坏同样由上部混凝土剪力墙剪切破坏导致,因此在设计时应保证开缝处小钢柱的高宽比不小于3 (表2)。

3.4 钢材强度

从图7d剪切板钢材强度对试件的抗剪承载力影响可以看出,随着钢材强度的提高,试件的刚度和承载力都有显著的提升,延性则逐渐降低,这是由于随着剪切板强度的提高,剪切板的抗剪承载力也随之增大,当钢板强度高于Q235时,上部预制剪力墙的抗剪承载力弱于水平缝钢制连接区,故其先于连接区发生破坏,且上部预制混凝土墙体破坏后无法修复。因此为保证试件的震后可恢复性能,设计时应保证剪切板的强度不高于Q235 (表2)。

3.5 轴压比

图7e为轴压比对试件抗剪承载力的影响。从图中可以看出,随着轴压比的增加,试件的刚度和抗剪承载力也随之提升,延性却在降低,当轴压比大于0.6时,抗剪承载力不再随轴压比的增加而增加;且轴压比大于0.3时,试件的破坏由上部预制混凝土剪力墙体发生剪切破坏,导致试件无法进行修复,因此在设计时应保证试件轴压比不大于0.3 (表2)。

表2 影响RPW-HSC试件性能参数的建议取值

Tab. 2 Recommended values of the parameters that impact RPW-HSC performance

参数选取	建议取值
剪切板钢板厚度 t	≤ 10 mm
剪切板中小钢柱高度 h	≥ 60 mm
剪切板中小钢柱宽度 b	≤ 20 mm
剪切板钢板强度 f_y	$\leq Q235$
轴压比 n	≤ 0.3

4 RPW-HSC 试件抗剪设计

为实现试件结构损伤可控,将破坏集中在水平缝钢制连接区,在设计时对连接区的剪切板进行削弱,让连接区域先于上部墙体屈服,故设计时应保证连接区达到极限抗剪承载力时,上部混凝土墙体钢筋刚发生屈服,结构的抗剪承载能力可以表示为:

$$V \leq V_w \quad (1)$$

式中: V 为连接区极限抗剪承载力; V_w 为混凝土剪力墙抗剪承载力设计值。

4.1 上部混凝土剪力墙设计

试件上部墙体为一片普通钢筋混凝土剪力墙,计算公式可根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)进行推导。

4.2 连接区抗剪承载力设计

水平缝钢制连接区的抗剪承载能力由受拉钢板、内嵌U型板底面与受压垫梁之间摩擦力和剪切板3部分提供,如图8所示,图中 V_{end} 、 V_{con} 和 V_f 分别表示受拉钢板、剪切型连接板和摩擦力提供的抗剪承载力。

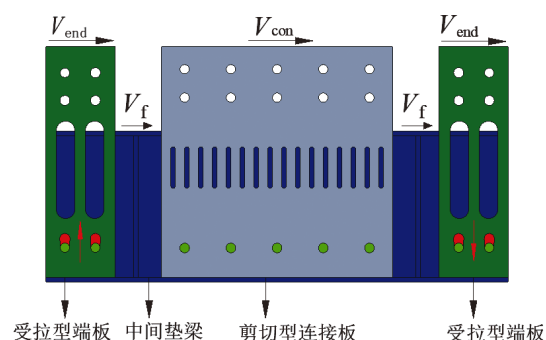


图8 水平缝钢制区域受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of force transmission on horizontal steel joint area

4.2.1 受拉钢板抗剪承载力

受拉钢板通过在中间开缝削弱和在下端开设长条形螺栓孔,使其仅承受拉力。因此,可根据陈以一和蒋路(2010)提出的开缝钢板剪力墙的抗剪承载力计算方法来计算受拉型连接钢板所提

供的抗剪承载力, 计算公式如下:

$$V_{\text{end}} = 4V'_{\text{end}} = \frac{ntb^2f_u}{2h} \quad (2)$$

式中: V'_{end} 为一块受拉钢板的极限承载力; t 为钢板厚度, b 为小钢柱宽度; n 为小钢柱个数; h 为小钢柱高度; f_u 为钢板极限强度 (受拉钢板小钢柱位置如图 2c 所示)。

4.2.2 摩擦力提供的抗剪承载力

上部混凝土剪力墙通过内嵌 U 型板底面和承压垫梁上翼缘之间面面接触, 在水平推力的作用下两者之间会有摩擦产生, 摩擦力提供的抗剪承载力为:

$$V_f = \mu N \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦系数, 本文取值为 0.2; N 为轴压力。

4.2.3 剪切板抗剪承载力

经过计算和参数分析得出, 试件水平缝钢制连接区域的抗剪承载力主要由剪切板提供, 因此在计算其提供的抗剪承载力时, 在陈以一和蒋路 (2010) 提出的开缝钢板剪力墙的抗剪承载力基础上加一个修正系数, 来计算开竖缝剪切型连接板的抗剪承载力, 表示为:

$$V'_{\text{con}} = \eta_0 \frac{ntb^2f_u}{2h} \quad (4)$$

式中: V'_{con} 为一块开竖缝剪切板的极限抗剪承载力, 其它符号含义同式 (2)。

根据试验和参数分析, 在试件的抗剪承载力计算公式的基础上, 提出了剪切板修正系数的求解公式为:

$$\eta_0 = \frac{(F_E - V_{\text{end}} - V_f) \times h}{ntb^2f_u} \quad (5)$$

式中: F_E 为有限元计算得到的试件抗剪承载力, 其它符号含义同上。

根据试验和有限元计算结果的对比分析结果, 选取符合设计要求的有限元分析结果进行线性回归, 回归得到 $\eta_0 = 1.36$, 回归结果如图 9 所示。

综上所述, 试件的抗剪承载力设计公式为:

$$V = \frac{2ntb^2f_u}{h} + 0.2N + \eta_0 \frac{ntb^2f_u}{h} \quad (6)$$

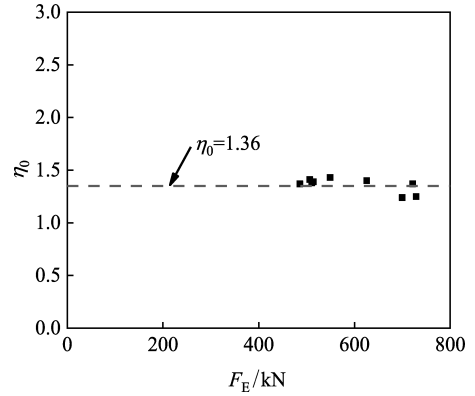


图 9 修正系数回归图

Fig. 9 Correction coefficient regression diagram

4.3 抗剪设计公式验证

为进一步验证试件抗剪承载力设计公式的准确性, 对两次试验结果及各参数的有限元分析结果进行列举 (表 3), 并将两次试验和各参数有限元分析得到的抗剪承载力同采用式 (6) 计算的抗剪承载力进行对比分析。图 10 为试件抗剪承载力设计计算值与试验和有限元得到的承载力比值, 图中 F_{uc} 表示抗剪承载力计算值, F_E 为试验或有限元的抗剪承载力。从图可以看出, 除去一个离群点, 其余误差均在 10% 以内, 验证了式 (6) 设计的可靠性。

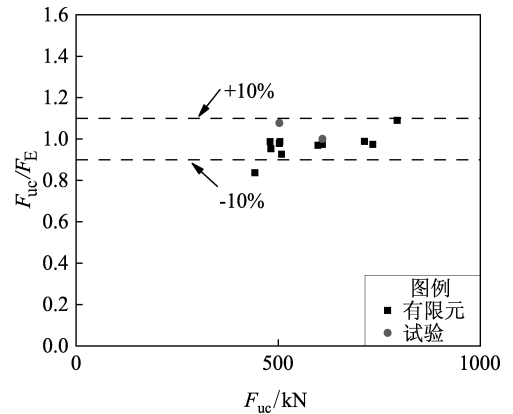


图 10 理论计算值和数值模拟计算值比值

Fig. 10 Comparison of the results from theoretical calculation and the results from the numerical simulation

表3 理论公式计算值与试验或有限元值

Tab.3 Calculated values from the theoretical formula and the values from the experiment or the finite element analysis

参数	t/mm	h/mm	b/mm	开缝形式	f_y/MPa	n	试验或有限元 结果 F_E/kN	式(6) 计算 F_{uc}/kN	F_{uc}/F_E
试验第一次加载	8	60	20	竖缝	345	0.15	609.18	614.06	1.008
试验震损修复后再次加载	8	60	20	竖缝	345	0.15	565.82	614.06	1.085
t	6	60	20	竖缝	345	0.15	514.17	506.62	0.985
	10	60	20	竖缝	345	0.15	721.7	718.7	0.996
h	8	80	20	竖缝	345	0.15	510.76	507.98	0.994
	8	100	20	竖缝	345	0.15	528.48	445.42	0.843
b	8	60	15	竖缝	345	0.15	548.93	512.06	0.933
	8	60	30	竖缝	345	0.15	728.95	800.38	1.098
开缝形式	8	60	20	双竖缝	345	0.15	616.84	602.83	0.977
f_y	8	60	20	竖缝	250	0.15	485.92	483.50	0.995
n	8	60	20	竖缝	345	0	505.56	485.57	0.960
	8	60	20	竖缝	345	0.3	699.75	739.44	1.057

5 结论

为实现装配式剪力墙结构震损后的快速修复,本文提出一种水平缝钢制连接的可修复装配式剪力墙结构(RPW-HSC),通过ABAQUS有限元软件对该水平缝钢制连接的装配式剪力墙抗剪性能进行参数分析,研究钢制连接中剪切板的厚度、开缝处小钢柱的高宽比、钢板强度及轴压比对试件RPW-HSC抗剪性能的影响,并建立RPW-HSC抗剪承载力设计方法,主要得出以下结论:

(1) 建立的RPW-HSC有限元模型能较好模拟该结构在拟静力试验中的抗剪性能,证明了该有限元模型的准确性。

(2) 随着RPW-HSC试件中剪切板厚度、钢材强度及轴压比的提高,试件的刚度和抗剪承载力有明显提升,但延性有所降低,且当剪切板厚度大于10mm、钢材强度大于Q235或轴压比大于0.3时,试件的破坏由连接区的可修复破坏转为上部预制墙体不可修复的塑性破坏。

(3) 当RPW-HSC试件中剪切板开缝处小钢柱高宽比小于3时,剪切板抗剪承载力过大,使得连接区域的抗剪承载力大于上部墙体,导致墙体先发生剪切破坏,故建议设计时将剪切板中的小

钢柱的高宽比限制在3以上。

(4) RPW-HSC试件的试验结果及有限元分析结果表明,该装配式剪力墙结构可将损伤集中在水平缝钢制连接区域,并利用该连接区域中延性较好的剪切板消耗地震能量,实现了结构的损伤可控和震后可快速修复。

(5) 基于试验和有限元参数分析,提出了RPW-HSC试件的抗剪承载力设计公式,且验证了该设计公式的可靠性,可为RPW-HSC结构的应用提供理论设计依据。

参考文献:

- 陈以一,蒋路. 2010. 带缝钢板剪力墙的承载力和开缝参数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 27(3): 109-114.
- Chen Y Y, Jiang L. 2010. Research on bearing capacity and slit parameters of steel plate shear wall with slits[J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 27(3): 109-114. (in Chinese)
- 李想,孙建刚,张书进,等. 2021. 一种基于再生混凝土的装配式结构抗震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 34(5): 899-910.
- Li X, Sun J G, Zhang S J, et al. 2021. Experimental study on seismic performance of a fabricated structure based on recycled concrete[J]. Journal of Vibration Engineering, 34(5): 899-910. (in Chinese)
- 刘春阳,史若凡,王乐超,等. 2021. 钢筋混凝土耗能墙抗震性能试验研究及结构地震响应分析[J]. 地震研究, 44(4): 689-699.
- Liu C Y, Shi R F, Wang L C, et al. 2021. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete energy dissipation wall and analysis

- of seismic response of structure [J]. Journal of Seismological Research, 44(4): 689–699. (in Chinese)
- 刘其舟, 蒋欢军. 2016. 新型可更换墙脚部件剪力墙设计方法与分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 44(1): 37–44.
- Liu Q Z, Jiang H J. 2016. Design method of new type of reinforced concrete shear wall with replaceable corner components and its analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 44(1): 37–44. (in Chinese)
- 吕西林, 毛苑君. 2012. 带有可更换墙脚构件剪力墙的设计方法 [J]. 结构工程师, 28(3): 12–17.
- Lyu X L, Mao W J. 2012. Design method for RC shear walls with replaceable foot parts [J]. Structural Engineer, 28(3): 12–17. (in Chinese)
- 马少春, 方宏远, 鲍鹏, 等. 2021. 水平钢筋连接对装配式复合剪力墙节点抗震性能的影响 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 43(3): 44–50.
- Ma S C, Fang H Y, Bao P, *et al.* 2021. Influence of horizontal steel bar connection on seismic performance of assembled composite shear wall joints [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese & English), 43(3): 44–50. (in Chinese)
- 毛苑君, 吕西林. 2014. 带可更换墙脚构件剪力墙的低周反复加载试验 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 45(6): 2029–2040.
- Mao Y J, Lyu X L. 2014. Quasi-static cyclic tests of RC shear wall with replaceable foot parts [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 45(6): 2029–2040. (in Chinese)
- 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 1993. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 北京: 清华大学出版社.
- Shen J M, Wang C Z, Jiang J J. 1993. Finite element analysis of reinforced concrete and limit analysis of plate shell [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- 汪梦甫, 曾雨薇. 2020. 带可更换摩擦耗能器组合剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 40(6): 36–46.
- Wang M F, Zeng Y W. 2020. Experimental study on seismic performance of combined shear wall with replaceable friction dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 40(6): 36–46. (in Chinese)
- 王威, 黄元昭, 苏三庆, 等. 2021a. 墙趾可更换组合剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 工程科学与技术, 53(4): 33–44.
- Wang W, Huang Y Z, Su S Q, *et al.* 2021. Experimental research on seismic performance of composite shear wall with replaceable wall toe member [J]. Engineering Science and Technology, 53(4): 33–44. (in Chinese)
- 王威, 宋鸿来, 权超超, 等. 2021b. 横波钢板混凝土剪力墙震损修复及抗侧刚度分析 [J]. 浙江大学学报, 55(9): 1694–1704.
- Wang W, Song H L, Quan C C, *et al.* 2021. Seismic damage repair and lateral stiffness analysis of horizontal corrugated steel plate concrete composite shear wall [J]. Journal of Zhejiang University, 55(9): 1694–1704. (in Chinese)
- 肖魁, 张其林. 2016. RC 框架-内填带竖缝剪力墙结构的滞回性能及计算模型研究 [J]. 振动工程学报, 29(6): 1108–1118.
- Xiao K, Zhang Q L. 2016. Cyclic behavior and analytical model of RC frame with infill slit shear walls [J]. Journal of Vibration Engineering, 29(6): 1108–1118. (in Chinese)
- 肖水晶, 徐龙河, 卢啸. 2018. 具有复位功能的钢筋混凝土剪力墙设计与性能研究 [J]. 工程力学, 35(8): 130–137.
- Xiao S J, Xu L H, Lu X. 2018. Design and behavior study on reinforced concrete shear walls with self-centering capability [J]. Engineering Mechanics, 35(8): 130–137. (in Chinese)
- 徐龙河, 陈曦, 肖水晶. 2021. 内置碟簧自复位钢筋混凝土剪力墙拟静力试验及损伤分析 [J]. 建筑结构学报, 42(7): 56–64.
- Xu L H, Chen X, Xiao S J. 2021. Quasi-static test and damage analysis on self-centering reinforced concrete shear wall with disc spring devices [J]. Journal of Architectural Structure, 42(7): 56–64. (in Chinese)
- 余勇胜. 2022. 可更换钢制耗能连接装配式混凝土剪力墙抗剪性能研究 [D]. 福州: 福建工程学院.
- Yu Y S. 2022. Study on shear behavior of prefabricated concrete shear wall with replaceable steel energy dissipation connection [D]. Fuzhou: Fujian Institute of Technology. (in Chinese)
- 周天华, 李文超, 管宇等. 2014. 基于应力三轴度的钢框架循环加载损伤分析 [J]. 工程力学, 31(7): 146–155.
- Zhou T H, Li W C, Guan Y, *et al.* 2014. Damage analysis of steel frames under cyclic load based on stress triaxiality [J]. Engineering Mechanics, 31(7): 146–155. (in Chinese)
- JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程 [S].
- JGJ 3—2010, Technical code for concrete structures in high-rise buildings [S]. (in Chinese)
- ACI 318M–05, Building code requirements for structural concrete and commentary [S].
- Attard M M, Setunge S. 1996. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. Materials Journal, 93(5): 432–442.
- Liu Q, Jiang H. 2017. Experimental study on a new type of earthquake resilient shear wall [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46(14): 2479–2497.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. 2010. Report of the seventh joint planning meeting of NEES/E–defense collaborative research on earthquake engineering [R]. Miki: Hyogo Earthquake Engineering Research Center.

Study on Shear Performance of Repairable Precast Shear Wall with Horizontal Steel Connections

PAN Qinfeng^{1,2}, CHEN Yahui^{1,2}, WU Yingxiong³, YAN Guiyun^{1,2}, YU Yongsheng^{1,2}, LIN Xiangchun⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fuzhou 350118, Fujian, China)

(2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China)

(3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

(4. Feiyang Construction Engineering Co., Ltd., Putian 351100, Fujian, China)

Abstract

To realize structure's reparability after being damaged by earthquakes, a repairable precast shear wall with horizontal steel connections (RPW-HSC) was proposed. The finite element model of RPW-HSC with the height-width ratio of 1.0 was established based on ABAQUS, the numerical simulation was in good agreement with the experimental results. The effects of the shear-plate thickness of steel connection, the height-width ratio of small steel column at the slit, the steel-plate strength and the axial compression ratio on the shear performance of specimen RPW-HSC were investigated by finite element parametric modeling, and the design method of shear-resistance bearing capacity of RPW-HSC was established. It's found that the stiffness and shear-resistance bearing capacity of specimen RPW-HSC increased with the increase of shearing plate thickness, steel strength and axial compression ratio. However, excessive parameters caused the failure of the specimen changing from steel shearing plate damage to upper precast concrete wall damage. When the height-width ratio of the small steel column at the slit was less than 3, the failure of the specimen changed from the bending failure of the small steel column at the slit to the shear failure of the upper precast concrete wall. Therefore, it was necessary to control the reasonable design parameters to realize the controllable structural damage and earthquake-damage reparability of the specimen RPW-HSC. The theoretically calculated values obtained from the shear-resistance bearing capacity design method of the specimen RPW-HSC were in good agreement with the test values and finite element results, which verified the accuracy of the shear load capacity design method.

Keywords: horizontal seam steel connection; precast shear wall; finite element analysis; parametric analysis; design formula of shear-resistance bearing capacity