

四边连接圆形压痕钢板剪力墙滞回性能分析

陈砾舟¹, 孙国华^{1*}, 陈 诚¹, 杨文侠², 黄建维³

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 江苏沪宁钢机股份有限公司, 江苏 宜兴 214231; 3. 中亿丰建设集团股份有限公司, 江苏 苏州 215131)

摘要: 提出了一种四边连接圆形压痕钢板剪力墙, 采用数值方法评估了其滞回性能, 并与传统平钢板剪力墙和开圆孔钢板剪力墙的滞回性能进行了对比分析。此外, 系统地研究了压痕孔径、压痕孔距、压痕深度、钢板厚度、钢材强度和压痕布置方式等参数对四边连接圆形压痕钢板剪力墙滞回性能的影响。分析结果表明: 该压痕钢板剪力墙的抗侧刚度和水平承载力介于传统平钢板剪力墙与开圆孔钢板剪力墙的相应值之间, 通过优化压痕设置, 可实现其抗侧刚度与抗剪承载力的合理匹配。钢板厚度和钢材强度对压痕钢板剪力墙滞回性能影响显著, 随着钢板厚度、钢材强度等级的增加, 其水平承载力呈增大趋势。压痕孔径、压痕孔距和压痕深度对压痕钢板剪力墙滞回性能有一定影响, 随着压痕孔径的增加, 其水平承载能力呈下降趋势; 随着压痕孔距的增加, 其水平承载力与抗侧刚度呈增大趋势; 随着压痕深度的增加, 其水平承载力、抗侧刚度均呈降低趋势, 但耗能能力呈增大趋势。压痕布置方式对压痕钢板剪力墙的滞回性能、抗侧刚度及水平承载力影响不显著。

关键词: 圆形压痕; 钢板剪力墙; 滞回性能; 耗能能力; 抗侧刚度

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0069-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231025002

Hysteretic Behavior of Four-Side Connected Steel Plate Shear Walls with Circular Dents

CHEN Luozhou¹, SUN Guohua^{1*}, CHEN Cheng¹, YANG Wenxia², HUANG Jianwei³

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Jiangsu Huning Steel Mechanism Co., Ltd., Yixing 214231, China; 3. Zhongyifeng Construction Group Co., Ltd., Suzhou 215131, China)

*Corresponding author: sungh-529@163.com

Abstract: In this paper, a novel four-side connected steel plate shear wall (SPSW) with circular dents is proposed. The hysteretic behavior of the SPSW with circular dents was compared with that of plane SPSW and SPSW with circular hole through numerical simulation. The effects of dent diameter, dent spacing, dent depth, steel plate thickness, steel strength and dent arrangement type on its hysteretic behavior were systematically investigated. The results show that the lateral stiffness and strength of SPSW with circular dents are between those of plane SPSW and SPSW with circular holes. By optimizing dent arrangement, the reasonable matching of lateral stiffness and strength could be realized. The relative parameters, including steel plate thickness and steel strength, play a significant effect on the mechanical behavior of SPSW with circular dents, and the lateral strength of SPSW with circular dents increase with the increase of steel plate thickness and steel strength. The other parameters, such as dent diameter, dent distance,

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(52378173), 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA560003)

作者简介:

陈砾舟(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构抗震方面的研究。E-mail: 402855887@qq.com。

通信作者:

孙国华(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事新型组合结构抗震方面的研究。E-mail: sungh-529@163.com。

and dent depth, play a certain influence on its mechanical behavior. The lateral strength of SPSW with circular dents takes on the decreasing tendency with the increase of dent diameter, and the lateral stiffness and strength of SPSW with circular dents exhibit the increasing tendency with the increase of dent distance. The lateral stiffness and strength of SPSW with circular dents exhibit the decreasing tendency with the increase of dent depth, but its energy dissipation capacity increase. The effect of dent arrangement on its hysteretic behavior, lateral stiffness and strength is not obvious.

Keywords: circular dent; steel plate shear wall; hysteretic behavior; energy dissipation capacity; lateral stiffness

钢板剪力墙(steel plate shear wall, SPSW)具有抗侧刚度大、水平承载力高、变形能力强等优点,备受工程师青睐。目前,国内外学者已对不同类型 SPSW 进行了大量试验研究、理论分析及数值模拟。CACCESE 等^[1]较早地发现,薄 SPSW 可充分利用剪切屈曲所形成的拉力场来提供水平承载力,但在往复荷载作用下褶皱屈曲处易发生撕裂。此外,薄 SPSW 周边需具有较强的约束部件方可确保形成充分的拉力场,已有研究也表明钢柱的弯曲破坏往往会导致薄 SPSW 的极限水平承载力不能充分发挥^[2-5]。与之相比,厚 SPSW 可降低对周边构件的依赖程度。陈国栋^[6]开展的厚 SPSW 试验证实了其具有稳定的滞回性能和良好的变形能力,但用钢量偏大。郭彦林等^[7]通过设置加劲肋来抑制薄 SPSW 的屈曲行为,获得了较为理想的抗震效果。ZHAO 等^[8]、QI 等^[9]、WANG 等^[10]通过在 SPSW 单侧和双侧焊接栓钉并浇筑混凝土,形成了钢-混凝土组合剪力墙结构,试验结果表明钢板的屈曲被有效抑制,滞回性能稳定,但施工过程略为繁琐。聂建国等^[11]通过在薄 SPSW 双侧设置混凝土约束板,有效地抑制了薄 SPSW 的剪切屈曲,使其呈现出剪切屈服破坏特征,抗震性能稳定。

此外,在钢板上引入孔洞是一种不依赖于面外约束,并且能够抑制钢板面外屈曲变形的有效方法。基于此,国内外学者对各种形式的开孔洞 SPSW 进行了系统而广泛的研究,例如垂直竖缝^[12-13]和斜槽^[14-15],圆形孔^[16]和矩形孔^[17]等。VALIZADEH 等^[18]设计了一种填充板中心有圆孔的薄 SPSW,并对 8 组比例尺为 1:6 的试件进行了拟静力试验,结果表明:即使在大位移下,这种形式的 SPSW 仍保持稳定的滞回性能,但孔洞的存在导致其初始刚度和强度降低,且孔洞直径的增大加剧了其力学响应的降低。PURBA 等^[19]对具有规则间距圆孔的 SPSW 进行了有限元研究,提出了穿孔填充板抗剪强度的计算公式,该公式是关于相应实心填充板尺寸、孔直径和间距的函数。EGOROVA 等^[20]提出了一种新型环形 SPSW,即在钢板上留下环形形状的独特切口图案,通过圆形改为椭圆形的机制来缓解钢板的屈曲。结果表明:受压过程中对角线的缩短量与张力引起的对角线的伸长量相当,几乎消除了垂直于张力场方向的松弛问题,证明其具有优良的滞回性能,且刚度和能量耗散得到了显著改善。VALIZADEH 等^[21-22]提出了一种新型的蝶形连接

SPSW,即在腹板上设置外围蝶形连杆,通过连杆的抗剪强度来确定其抗侧承载机理,并在不同的几何参数下进行了 4 组拟静力试验。结果表明:蝶形连接的极限状态控制着试件的刚度、强度和延性,但这种设计可能会导致薄弱连接处过早发生屈曲破坏。刘佳伟^[23]通过设置圆形孔洞来削弱 SPSW 的抗侧能力,从而减轻往复荷载导致的墙板褶皱撕裂,同时也降低了对周边构件的刚度需求。

除在钢板上引入孔洞外,采用预折痕或波纹钢板也是抑制钢板面外屈曲变形、提升 SPSW 性能的有效方法。QIU 等^[24]开展了波纹 SPSW 的相关研究,由于波纹钢板的几何构造在一定程度上起到了加劲肋的作用,避免了直接在墙板上焊接,有效解决了焊接残余应力及变形问题。WEN 等^[25]在波纹 SPSW 双侧浇筑混凝土形成组合墙体,并布置系列拉杆将其连接成整体。试验结果表明,该波纹 SPSW 具有较为稳定的滞回性能,破坏时的最大层间位移角约为 2%。陆金钰等^[26]借鉴折纸原理提出了一种新型带预折痕的 SPSW,钢板由若干带折痕的子单元组成,与平 SPSW 相比,带预折痕 SPSW 具有较好的延性,其塑性带均沿子单元折痕处发展,并吸收了大部分能量。

以往的研究表明,在钢板上引入孔洞能够抑制钢板的面外屈曲变形,但会显著降低钢板在循环荷载作用下的抗侧刚度、极限承载力。在此基础上,本文提出了一种水平承载力及抗侧刚度可控的圆形压痕 SPSW,即对薄 SPSW 预设具有一定深度的压痕。基于精细化数值模拟及参数化分析评估了带圆形压痕 SPSW 的滞回性能,明确了压痕孔径、压痕孔距、压痕深度、钢板厚度、跨高比等参数对其滞回性能的影响规律,可为类似工程应用提供参考。

1 3种典型 SPSW 模型的滞回性能

1.1 圆形压痕 SPSW 的提出

通过在薄 SPSW 中预设一系列规则排列的圆形压痕,在一定程度上消除或缓解因地震等往复荷载作用而出现的褶皱撕裂现象,提升其极限变形能力。同时,优化压痕布局还可合理控制 SPSW 的水平承载力及抗侧刚度。圆形压痕 SPSW 的具体构造如图 1 所示。

1.2 3种典型 SPSW 模型滞回特征

以文献[27]中薄 SPSW 试件 T-16 为基准算例,其几

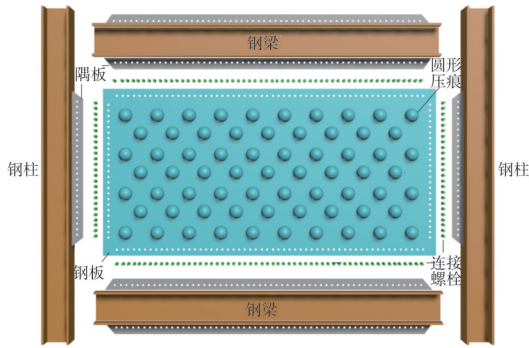


图1 圆形压痕 SPSW 的构造

Fig. 1 Details of SPSW with circle dents

何尺寸如图2所示。其中,钢板高度和宽度均为711.2 mm,厚度为1.47 mm,高厚比为480,弹性模量 E 为 2.02×10^5 MPa,屈服强度 f_y 为388 MPa,抗拉强度 f_u 为450 MPa。

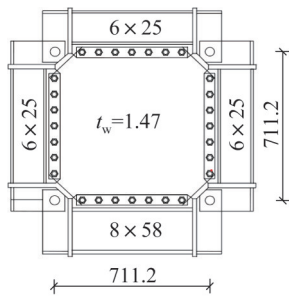


图2 试件 T-16 的几何尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Geometric dimensions of specimen T-16 (unit: mm)

为评估设置压痕与开设圆洞对薄SPSW滞回性能的影响,基于文献[27]中试件T-16,采用ABAQUS软件建立其有限元模型,以及开孔SPSW模型T-16-HOLEs和压痕SPSW模型T-16-DENTs,开孔直径为40 mm,孔心距离为80 mm,钢板厚度仍为1.47 mm。其中,模型T-16-DENTs如图3所示。剪力墙板采用S4R壳单元模拟,周边钢柱与钢梁采用Beam单元模拟。对于梁柱间连接,采用Join功能来模拟其铰接特征。钢材本构关系采用双线性随动强化模型考虑材料的包辛格效应,采用von Mises屈服准则考虑钢材的塑性行为,钢材屈服后切线模量 $E_t=0.01E$ 。引入剪力墙板的一阶模态来考虑其初始几何缺陷,缺陷幅值取 $H/1\ 000$ (H 为试件高度)。

图4给出了3种SPSW模型的Mises应力分布。图5给出了3种SPSW模型同一节点的应力变化。由图4可知,试件T-16的模拟结果与试验现象吻合良好,即非加劲薄SPSW发生面外屈曲,形成典型的拉力场。模型T-16-HOLEs的剪力墙板上设置了一系列圆形孔洞,阻断了拉力场的传递,拉力倾角仍沿墙板对角线方向分布,

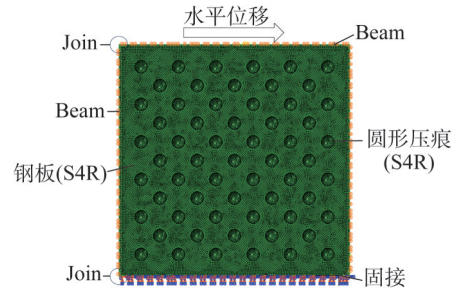


图3 典型试件 T-16-DENTs 的精细化有限元模型

Fig. 3 Refined FEM of typical specimen T-16-DENTs

但在圆孔周边出现了略显复杂的应力状态,并导致了应力重分布。模型T-16-DENTs与T-16-HOLEs的Mises应力分布结果相似,但压痕并未完全阻断钢板拉力带的传递,其在传力路径上作用的相当于增加若干预变形,可在一定程度上减少了往复荷载作用下的褶皱现象,提升了结构的变形能力。由图5可以看出,模型T-16-HOLEs的单点应力变化幅值明显高于模型T-16、T-16-DENTs的单点应力变化幅值,而当层间位移角小于2%时,模型T-16-DENTs与T-16的单点应力变化趋势基本一致,但当层间位移角超过2%后,模型T-16-HOLEs的单点应力有明显增长,增幅约为20%。综上所述,孔洞的存在会使钢板在受力期间出现较为明显的应力集中现象,而采用圆形压痕的方式,当层间位移角小于2%时,几乎不会引起应力集中;当层间位移角超过2%之后,应力集中现象相较于孔洞的对应情况得到了明显改善。

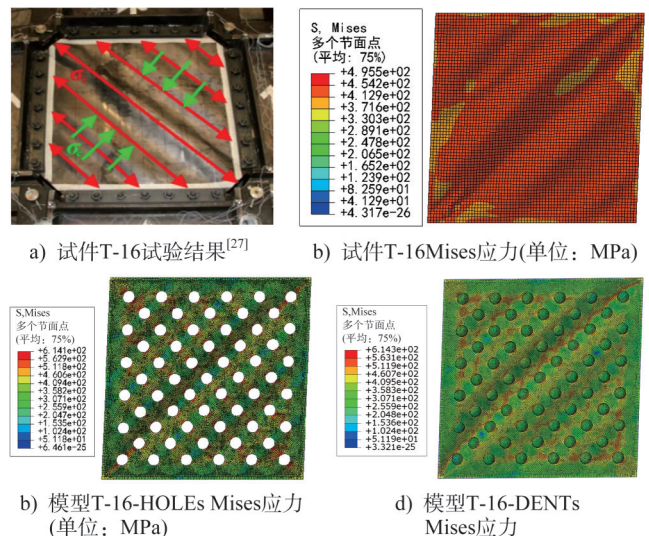


图4 3种SPSW的Mises应力分布

Fig. 4 Mises stress distributions of three kinds of SPSW

3种SPSW模型的滞回曲线如图6所示。由图6可知,模型T-16的模拟结果与试验结果吻合良好,说明有限元模型可有效预测其滞回特征和水平承载力。与模型T-16相比,模型T-16-HOLEs的曲线更为饱满,滞回性

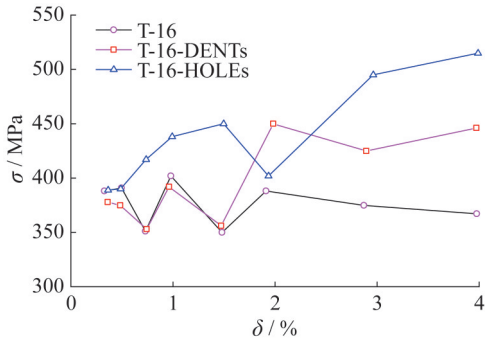


图5 3种SPSW模型同一节点应力变化对比
Fig. 5 Comparison of stress variation at the same nodes of three SPSW models

能得到了改善,但水平承载力降低了约20%。模型T-16-DENTs因压痕的贡献而保持了良好的滞回性能,其水平承载力相比于模型T-16-HOLEs的水平承载力,提高了约10%,抗侧性能介于模型T-16和T-16-HOLEs之间。

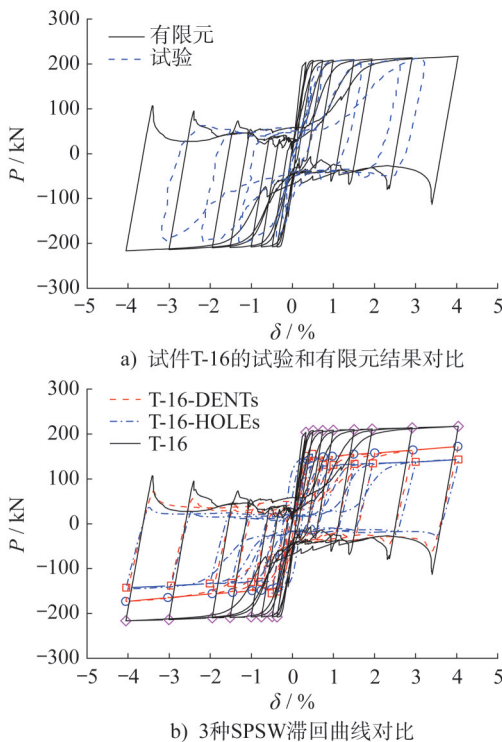


图6 3种SPSW模型滞回曲线对比
Fig. 6 Comparison of hysteretic curves of three SPSW models

1.3 3种典型SPSW模型抗侧刚度对比

3种SPSW模型抗侧刚度的对比如图7所示。由图7可知,模型T-16-HOLEs由于孔洞的存在,截面被削弱,初始抗侧刚度约为 $80 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,比模型T-16的相应值低约30%。采用压痕的模型T-16-DENTs的初始抗侧刚度

约为 $90 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,比模型T-16的相应值低约21%,比模型T-16-HOLEs的相应值高约12%,但在弹性阶段,其抗侧刚度降低幅度更大。整体而言,无论设置圆孔还是压痕,均会降低剪力墙板的水平承载力和抗侧刚度。

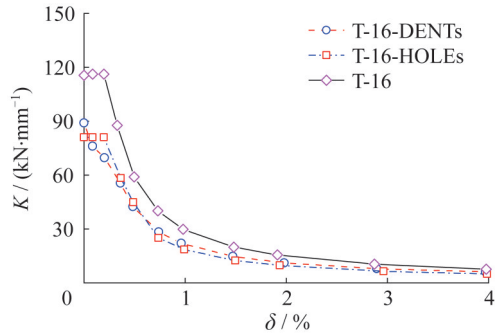


图7 3种SPSW模型抗侧刚度对比
Fig. 7 Comparison of lateral stiffness of three SPSW models

1.4 3种典型SPSW模型耗能能力对比

3种SPSW模型等效黏滞阻尼比的对比如图8所示。由图8可知,相较于模型T-16,模型T-16-HOLEs在受力初期等效黏滞阻尼比更大,耗能能力得到了改善,但进入塑性受力阶段后,其等效黏滞阻尼比降至约15%,耗能能力反而低于模型T-16的耗能能力。模型T-16-DENTs设置压痕后,在受力初期的等效黏滞阻尼比仍略高于模型T-16的相应值,且后续耗能能力也未有下降,最终其等效黏滞阻尼比约为25%。

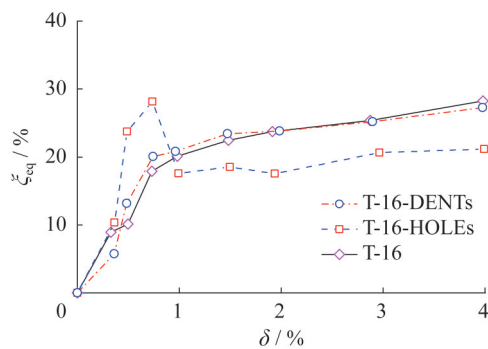


图8 3种SPSW模型等效黏滞阻尼比对比
Fig. 8 Comparison of equivalent viscous damping ratio of three SPSW models

1.5 3种典型SPSW模型平面外变形对比

3种SPSW模型在层间位移角为4%时的面外变形对比如图9所示。由图9可知,3种SPSW模型的面外凸曲形态大致相同,均沿斜向受拉条带发生凸曲。模型T-16-HOLEs的中间条带面外位移约为25mm,较T-16的相应值增大约31%,但钢板其余部分的面外变形较

SPSW的面外变形均减小约29%。在模型T-16-HOLEs的基础上,模型T-16-DENTs通过压痕的作用,使得所有条带的面外变形均得到了良好改善,面外位移幅度平均减小约7%。虽然模型T-16-DENTs中间条带的面外变形仍比模型T-16的相应值高约10%,但整体上,压痕的存在仍使得钢板的整体面外变形减小约32%,减轻了钢板在往复荷载作用下的褶皱撕裂程度。

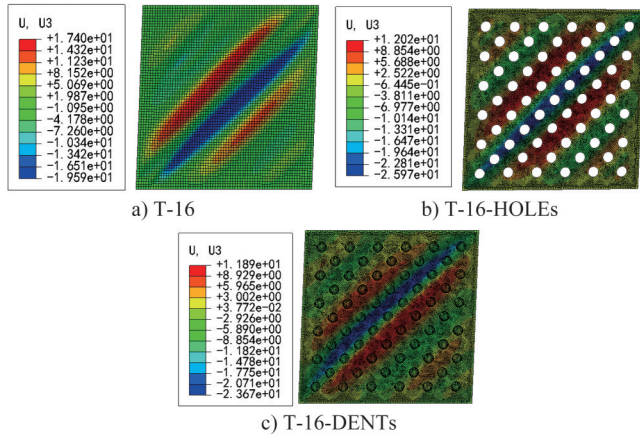


图9 3种SPSW模型面外变形对比(单位:mm)

Fig. 9 Comparison of out-of-plane deformation of three SPSW models (unit:mm)

2 圆孔压痕SPSW的影响因素分析

2.1 算例设计

为研究新型带圆孔压痕的SPSW在不同情况下的受力性能,开展了参数分析。主要研究参数包括压痕孔径 d 、压痕孔距 D 、压痕深度 d_c 、钢板厚度 t 、钢板强度 f_y 、压痕类型和跨度 L ,具体参数示意如图10所示。参数分析算例的具体取值如表1所示。

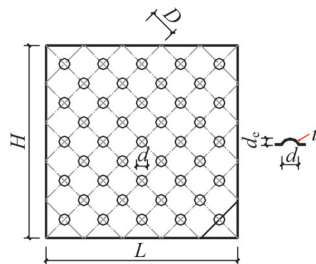


图10 参数分析算例的几何示意

Fig. 10 Geometric illustration of parametric analysis examples

2.2 压痕孔径的影响

压痕孔径对压痕SPSW滞回性能的影响如图11所示,其中 P 为水平荷载, δ 为层间位移角。由图11可知,压痕孔径对压痕SPSW滞回曲线的影响较小,滞回曲线

表1 算例参数信息

Table 1 Parameter information of examples

算例编号	d/mm	D/mm	d_c/mm	t/mm	f_y/MPa	压痕类型
d-20	20	80	20	4	235	单侧同向
d-30	30	80	20	4	235	单侧同向
d-40	40	80	20	4	235	单侧同向
d-50	50	80	20	4	235	单侧同向
D-60	40	60	20	4	235	单侧同向
D-80	40	80	20	4	235	单侧同向
D-100	40	100	20	4	235	单侧同向
D-120	40	120	20	4	235	单侧同向
d_c -5	40	80	5	4	235	单侧同向
d_c -10	40	80	10	4	235	单侧同向
d_c -15	40	80	15	4	235	单侧同向
d_c -20	40	80	20	4	235	单侧同向
t-1	40	80	20	1	235	单侧同向
t-2	40	80	20	2	235	单侧同向
t-4	40	80	20	4	235	单侧同向
t-6	40	80	20	6	235	单侧同向
f_y -235	40	80	20	4	235	单侧同向
f_y -355	40	80	20	4	355	单侧同向
f_y -420	40	80	20	4	420	单侧同向
f_y -460	40	80	20	4	460	单侧同向
TYP-1	40	80	20	4	235	单侧同向
TYP-2	40	80	20	4	235	双侧错列

仍呈现出屈曲所导致的捏缩特征。总体上,随着压痕孔径的增大,压痕SPSW的水平承载力呈下降趋势。随着压痕孔径由20 mm增加至50 mm,压痕SPSW的水平承载力由338.9 kN降低至264.6 kN,降低幅度约为21%。

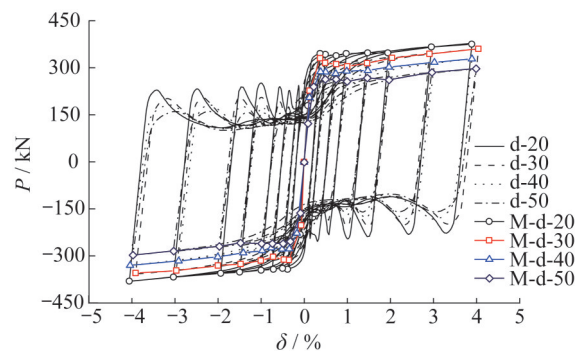


图11 压痕孔径对SPSW滞回性能的影响

Fig. 11 Influence of dent diameters on SPSW hysteretic behavior

压痕孔径对压痕SPSW抗侧刚度的影响如图12所示。由图12可知,压痕孔径对压痕SPSW的初始抗侧刚度有显著影响,对加载后期抗侧刚度退化趋势的影响不显著。随着压痕孔径由20 mm增大至50 mm,压痕SPSW初始抗侧刚度由 $307.8 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 降低至 $210.6 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,降低幅度约为30%。

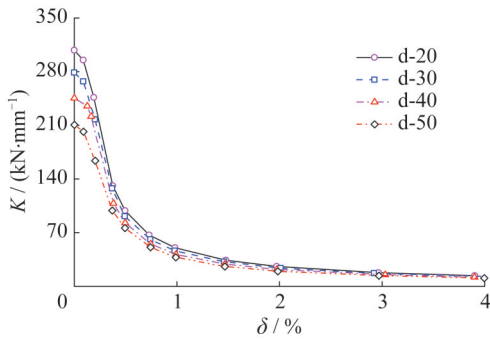


图12 压痕孔径对SPSW抗侧刚度的影响
Fig. 12 Influence of dent diameters on SPSW lateral stiffness

压痕孔径对压痕SPSW等效黏滞阻尼比的影响如图13所示。由图13可知,当层间位移角大于0.7%时,压痕SPSW进入明显的塑性耗能阶段,等效黏滞阻尼比随着压痕孔径的增加呈增大趋势。但压痕孔径对压痕SPSW等效黏滞阻尼比的影响总体较小,其等效黏滞阻尼比约为35%。

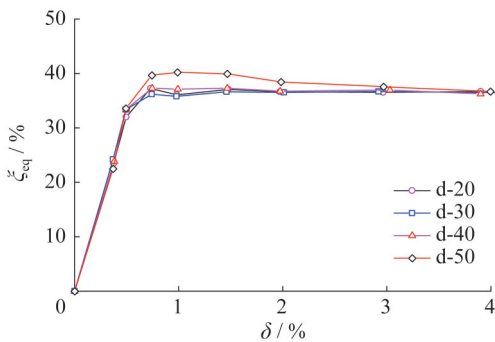


图13 压痕孔径对SPSW等效黏滞阻尼比的影响
Fig. 13 Influence of dent diameters on SPSW equivalent viscous damping ratio

2.3 压痕孔距的影响

压痕孔距对压痕SPSW滞回性能的影响如图14所示。由图14可知,压痕孔距对压痕SPSW滞回性能的影响较小,随着压痕孔距的减小,滞回曲线的包围面积略微减小,压痕SPSW水平承载力呈降低趋势。随着压痕孔距由60 mm增大至120 mm,压痕SPSW水平承载力从280.1 kN提升至317.2 kN,提升幅度约为13%。

压痕孔距对压痕SPSW抗侧刚度退化的影响如图

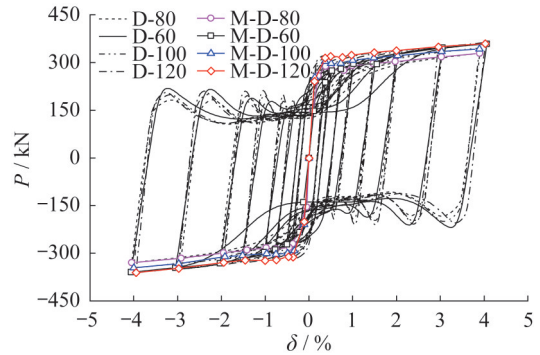


图14 压痕孔距对SPSW滞回性能的影响
Fig. 14 Influence of dent spacings on SPSW hysteretic behavior

15所示。由图15可知,压痕孔距对压痕SPSW的初始抗侧刚度有一定影响。随着压痕孔距由60 mm增大至120 mm,压痕SPSW初始抗侧刚度由 $198.8 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 提升至 $288.3 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,提升幅度约为45%。

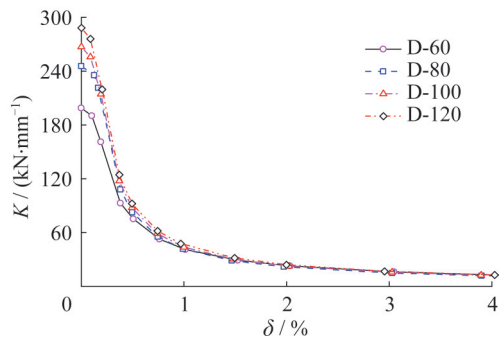


图15 压痕孔距对SPSW抗侧刚度的影响
Fig. 15 Influence of dent spacings on SPSW lateral stiffness

压痕孔距对压痕SPSW等效黏滞阻尼比的影响如图16所示。由图16可知,随着压痕孔距的增大,压痕SPSW的等效黏滞阻尼比呈降低趋势。由此表明圆形压痕的数量越多或越密集,压痕SPSW的耗能能力越强。

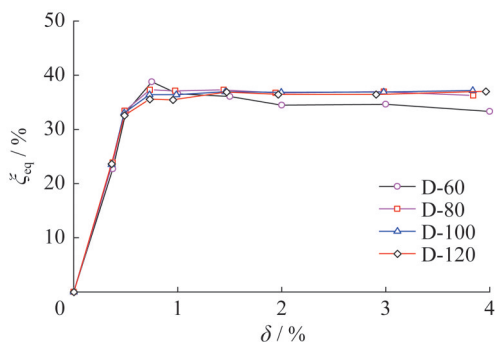


图16 压痕孔距对SPSW等效黏滞阻尼比的影响
Fig. 16 Influence of dent spacings on SPSW equivalent viscous damping ratio

2.4 压痕深度的影响

压痕深度对压痕SPSW滞回性能的影响如图17所示。由图17可知,压痕深度越小,压痕SPSW滞回性能越趋近于平SPSW的滞回性能。随着压痕深度的增加,压痕SPSW滞回曲线趋于重叠,水平承载力逐渐降低。随着压痕深度由5 mm增大至20 mm,压痕SPSW水平承载力从318.1 kN降低至281.5 kN,降低幅度约为11%。

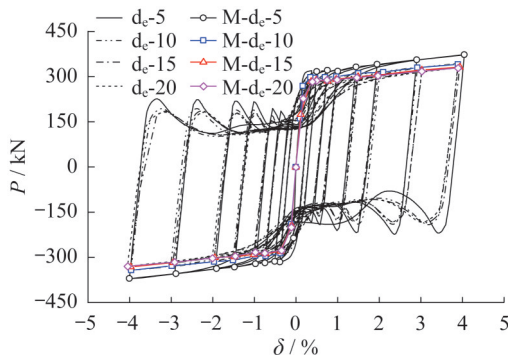


图17 压痕深度对SPSW滞回性能的影响
Fig. 17 Influence of dent depths on SPSW hysteretic behavior

压痕深度对压痕SPSW抗侧刚度的影响如图18所示。由图18可知,压痕深度对压痕SPSW初始抗侧刚度及刚度退化的影响不显著。随着压痕深度由5 mm增大至20 mm,压痕SPSW初始抗侧刚度由281.5 kN·mm⁻¹降低至245.6 kN·mm⁻¹,降低幅度约为10%。

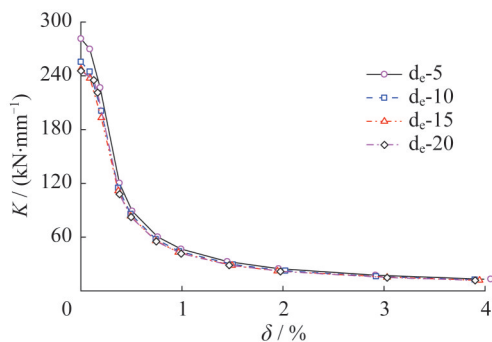


图18 压痕深度对SPSW抗侧刚度的影响
Fig. 18 Influence of dent depths on SPSW lateral stiffness

考虑压痕深度影响的压痕SPSW等效黏滞阻尼比如图19所示。由图19可知,随着压痕深度的增加,压痕SPSW的耗能能力略有提升,等效黏滞阻尼比呈增加趋势。但随着层间位移角的增大,压痕SPSW耗能能力的提升幅度逐渐减小。

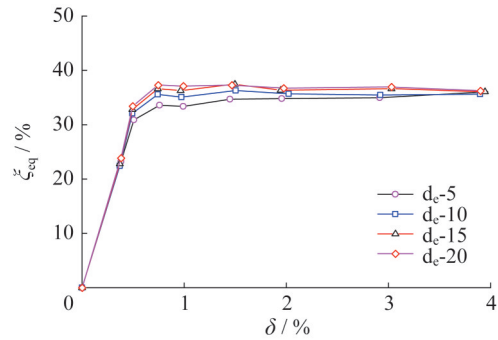


图19 压痕深度对SPSW等效黏滞阻尼比的影响
Fig. 19 Influence of dent depths on SPSW equivalent viscous damping ratio

2.5 钢板厚度的影响

钢板厚度对压痕SPSW滞回曲线的影响如图20所示。由图20可知,钢板厚度的增加会显著改变压痕SPSW的滞回特征。随着钢板厚度的增加,压痕SPSW的滞回曲线逐渐趋于饱满,耗能能力和水平承载力均显著提高。随着钢板厚度由1 mm增大至6 mm,压痕SPSW的水平承载力由136.3 kN提升至657.2 kN,提升幅度约为382%。

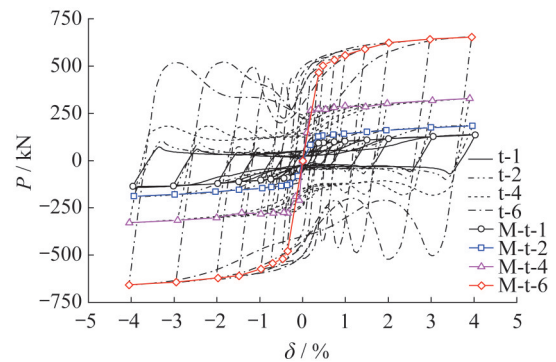


图20 钢板厚度对SPSW滞回性能的影响
Fig. 20 Influence of steel plate thicknesses on SPSW hysteretic behavior

钢板厚度对压痕SPSW抗侧刚度的影响如图21所示。由图21可知,钢板厚度对压痕SPSW的抗侧刚度退化无显著影响,但对其初始抗侧刚度影响显著。钢板越厚,压痕SPSW初始抗侧刚度越大。随着钢板厚度由1 mm增大至6 mm时,压痕SPSW的初始抗侧刚度由89.1 kN·mm⁻¹提升至379.1 kN·mm⁻¹,提升幅度约为325%。

钢板厚度对压痕SPSW等效黏滞阻尼比的影响如图22所示。由图22可知,不同厚度压痕SPSW的等效黏滞阻尼比变化趋势一致,且随着钢板厚度的增大,等效黏滞阻尼比增加,压痕SPSW的耗能能力显著提高。6 mm厚

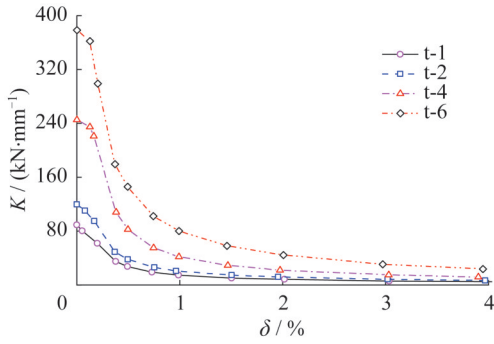


图 21 钢板厚度对 SPSW 抗侧刚度的影响
 Fig. 21 Influence of steel plate thicknesses on SPSW lateral stiffness

压痕 SPSW 的等效黏滞阻尼比已达到了 42%。

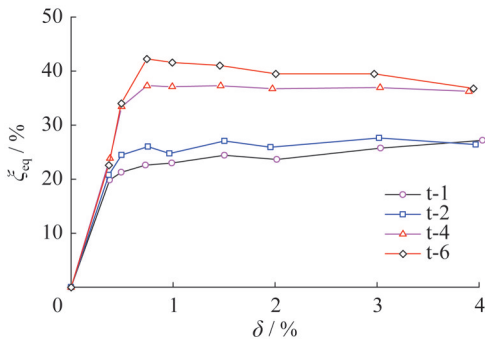


图 22 钢板厚度对 SPSW 等效黏滞阻尼比的影响
 Fig. 22 Influence of steel plate thicknesses on SPSW equivalent viscous damping ratio

2.6 钢材强度的影响

钢材强度对压痕 SPSW 滞回曲线的影响如图 23 所示。由图 23 可知,钢材强度对压痕 SPSW 的滞回曲线无显著影响,但对其水平承载力影响较大。随着钢材强度由 235 MPa 提升至 460 MPa,压痕 SPSW 的水平承载力由 281.5 kN 提升至 482.5 kN,提升幅度约为 70%。

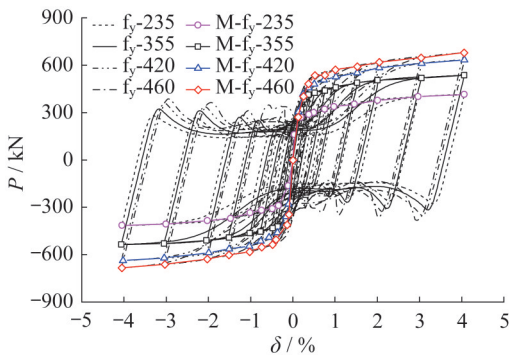


图 23 钢材强度对 SPSW 滞回性能的影响
 Fig. 23 Influence of steel strengths on SPSW hysteretic behavior

钢材强度对压痕 SPSW 抗侧刚度的影响如图 24 所示。由图 24 可知,使用不同钢材强度等级的压痕 SPSW 的初始抗侧刚度均为 245.6 kN·mm⁻¹,但钢材强度等级越高,压痕 SPSW 的抗侧刚度退化趋势越平缓。

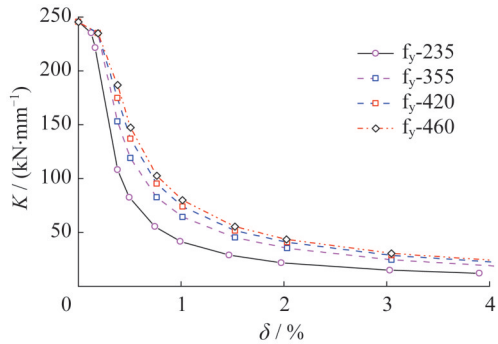


图 24 钢材强度对 SPSW 抗侧刚度的影响
 Fig. 24 Influence of steel strengths on SPSW lateral stiffness

钢材强度对压痕 SPSW 等效黏滞阻尼比的影响如图 25 所示。由图 25 可知,钢材强度等级对压痕 SPSW 的耗能能力有显著影响,钢材强度为 235 MPa 的压痕 SPSW 的等效黏滞阻尼比为 37.3%,钢材强度为 460 MPa 的压痕 SPSW 的等效黏滞阻尼比为 30.6%。总体上,钢材强度越低,压痕 SPSW 的耗能能力越优。

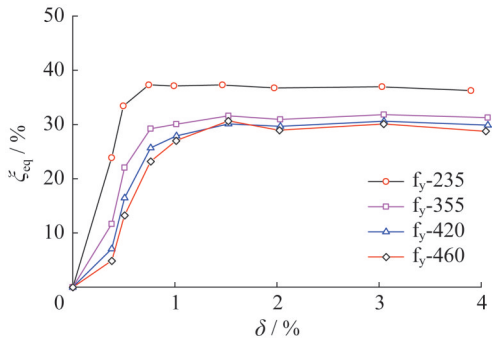


图 25 钢材强度对 SPSW 等效黏滞阻尼比的影响
 Fig. 25 Influence of steel strengths on SPSW equivalent viscous damping ratio

2.7 压痕布置方式的影响

压痕布置方式对压痕 SPSW 滞回性能的影响如图 26 所示。由图 26 可知,无论压痕单侧同向还是双侧凹凸错列布置,压痕 SPSW 的滞回曲线基本重合。压痕布置方式对此类 SPSW 滞回性能的影响不显著。

压痕布置方式对压痕 SPSW 抗侧刚度的影响如图 27 所示。由图 27 可知,压痕单侧同向或双侧错列布置的 SPSW 的初始抗侧刚度均为 245.6 kN·mm⁻¹,两条抗侧刚度退化曲线均匀、缓慢且重合。

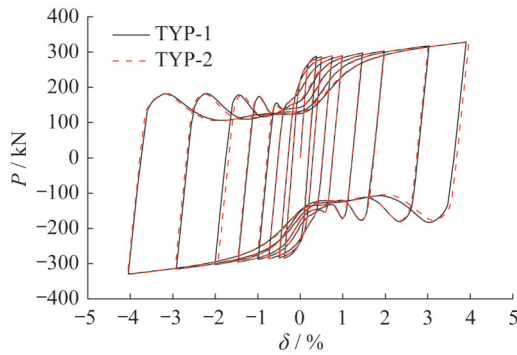


图 26 压痕布置方式对 SPSW 滞回性能的影响

Fig. 26 Influence of dent arrangement types on SPSW hysteretic behavior

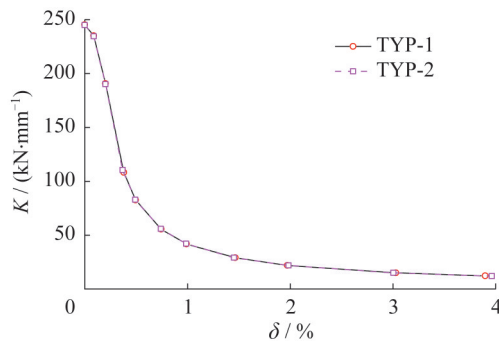


图 27 压痕布置方式对 SPSW 抗侧刚度的影响

Fig. 27 Influence of dent arrangement types on SPSW lateral stiffness

压痕布置方式对压痕 SPSW 等效黏滞阻尼比的影响如图 28 所示。由图 28 可知,压痕单侧同向或双侧错列布置的 SPSW 的等效黏滞阻尼比均为 37.3%,压痕布置方式对压痕 SPSW 耗能能力的影响不显著。

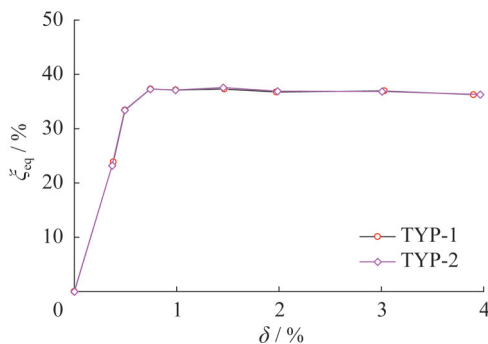


图 28 压痕布置方式对 SPSW 等效黏滞阻尼比的影响

Fig. 28 Influence of dent arrangement types on SPSW equivalent viscous damping ratio

3 结论

本文在传统平 SPSW 的基础上,提出了一种新型四边连接的圆形压痕 SPSW,通过压痕的合理布置,优化

SPSW 的水平承载力及抗侧刚度,在试验验证的基础上,通过 ABAQUS 软件对压痕孔径、压痕孔距、压痕深度、钢板厚度、钢材强度、压痕布置方式等影响因素进行了参数分析,得出以下主要结论:

(1) 圆形压痕 SPSW 的滞回性能、水平承载力及抗侧刚度等性能介于平 SPSW 和开孔 SPSW 的相应性能之间,可实现抗侧刚度及水平承载力可调控的目标。

(2) 压痕孔径、压痕孔距、压痕深度均对压痕 SPSW 的滞回性能有一定影响。随着压痕孔径的增加,压痕 SPSW 的水平承载能力下降约 21%,抗侧刚度下降约 30%,耗能能力则呈增大趋势;随着压痕孔距的增加,压痕 SPSW 的水平承载能力增长约 13%,抗侧刚度增长约 45%,耗能能力则呈降低趋势;随着压痕深度的增加,压痕 SPSW 的水平承载能力下降约 11%,抗侧刚度下降约 10%,耗能能力则呈增大趋势。

(3) 钢板厚度与钢材强度均对压痕 SPSW 的滞回性能有显著影响,均表现为随着钢板厚度与钢材强度的增加,压痕 SPSW 的水平承载力显著增大,其中钢板厚度由 1 mm 增大至 6 mm,压痕 SPSW 的水平承载力增幅约为 382%,抗侧刚度增幅约为 325%;钢材强度由 235 MPa 增大至 460 MPa,压痕 SPSW 的水平承载力增幅约为 70%;钢材强度对压痕 SPSW 的抗侧刚度并无影响;钢板越厚、钢材强度越低,压痕 SPSW 的耗能能力越强。

(4) 在对采用相同压痕孔径、压痕孔距、压痕深度、钢板厚度与钢材强度的圆形压痕进行布置时,其布置方式对压痕 SPSW 的滞回性能无显著影响。

参考文献:

- [1] CACCESE V, ELGAALY M, CHEN R B. Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (2) : 573-587. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(573).
- [2] ELGAALY M, CACCESE V, DU C. Postbuckling behavior of steel-plate shear walls under cyclic loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (2) : 588-605. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:2(588).
- [3] BERMAN J W, BRUNEAU M. Capacity design of vertical boundary elements in steel plate shear walls [J]. Engineering Journal, 2008, 45(1) : 57-72. DOI:10.62913/engj.v45i1.925.
- [4] MOGHIMI H, DRIVER R G. Column demands in steel plate shear walls with regular perforations using performance-based design methods [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103:13-22. DOI:10.1016/j.jcsr.2014.07.020.
- [5] YU J G, FENG X T, LI B, et al. Performance of steel plate shear walls with axially loaded vertical boundary elements [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 125:152-163. DOI:10.1016/j.tws.2018.01.021.
- [6] 陈国栋. 钢板剪力墙结构性能研究 [D]. 北京:清华大学,

2002.
CHEN Guodong. Research on the performance of steel plate shear wall structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese)
- [7] 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. DOI: 10.3969/j. issn.1000-4750.2006.02.015.
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. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750.2006.02.015. (in Chinese)
- [8] ZHAO Q H, ASTANEH-ASL A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 271-284. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(271).
- [9] QI Y, GU Q, SUN G H, et al. Shear force demand on headed stud for the design of composite steel plate shear wall[J]. Engineering Structures, 2017, 148: 780-792. DOI: 10.1016/j. engstruct.2017.07.023.
- [10] WANG H F, GU Q, QI Y. Thickness demand for concrete panel in design of C-PSW/CE under cyclic loading [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 48: 104011. DOI: 10.1016/j.job.2022.104011.
- [11] 聂建国, 樊健生, 黄远, 等. 钢板剪力墙的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 1-8. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.09.015.
NIE Jianguo, FAN Jiansheng, HUANG Yuan, et al. Experimental research on steel plate shear wall[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 1-8. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2010.09.015. (in Chinese)
- [12] HITAKA T, MATSUI C. Experimental study on steel shear wall with slits[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586-595. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(586).
- [13] LU J Y, YU S J, XIA J, et al. Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147: 477-487. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.05.002.
- [14] JIN S S, BAI J L. Experimental investigation of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 144-156. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.12.021.
- [15] JIN S S, YANG S C, BAI J L. Numerical and experimental investigation of the full-scale buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106362. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106362.
- [16] BHOWMICK A K. Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 75: 30-42. DOI: 10.1016/j. tws.2013.09.027.
- [17] HOSSEINZADEH S A A, TEHRANIZADEH M. Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 77: 180-192. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.05.010.
- [18] VALIZADEH H, SHEIDAI M, SHOWKATI H. Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 308-316. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.09.016.
- [19] PURBA R, BRUNEAU M. Finite-element investigation and design recommendations for perforated steel plate shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(11): 1367-1376. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000061.
- [20] EGOROVA N, EATHERTON M R, MAURYA A. Experimental study of ring-shaped steel plate shear walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 179-189. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.09.002.
- [21] VALIZADEH H, VELADI H, FARAHMAND AZAR B, et al. The cyclic behavior of butterfly-shaped link steel plate shear walls with and without buckling-restrainers [J]. Structures, 2020, 27: 607-625. DOI: 10.1016/j. istruc. 2020.06.012.
- [22] VALIZADEH H, AZAR B F, VELADI H, et al. The shear capacity assessment of steel plate shear walls with peripheral circular holes [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 163: 107638. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107638.
- [23] 刘佳伟. 开圆洞的钢板剪力墙耗能性能和承载能力研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
LIU Jiawei. Research on Energy dissipation capacity and bearing capacity of perforated Steel plate shear walls [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [24] QIU J, ZHAO Q H, YU C, et al. Experimental studies on cyclic behavior of corrugated steel plate shear walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(11): 04018200. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002165.
- [25] WEN C B, GUO Y L, SUN H J, et al. Experimental and numerical study on seismic performance of concrete-infilled double steel corrugated-plate walls [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106171. DOI: 10.1016/j. job. 2023.106171.
- [26] 陆金钰, 谯旭东, 陈水荣, 等. 新型带预折痕钢板剪力墙滞回性能分析[J]. 钢结构, 2016, 31(2): 38-42. DOI: 10.13206/j. gjg201602007.
LU Jinyu, QIAO Xudong, CHEN Shuirong, et al. Hysteretic analysis of a novel pre-folded steel plate shear wall[J]. Steel Construction, 2016, 31(2): 38-42. DOI: 10.13206/j. gjg201602007. (in Chinese)
- [27] WEBSTER D J. The inelastic seismic response of steel plate shear wall web plates and their interaction with the vertical boundary members[D]. Seattle: University of Washington, 2013.