

管肋开孔双钢板剪力墙滞回性能研究

李成玉^{1,2}, 孙方志¹, 陈焰周^{3*}, 吴东平^{1,2}

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 武汉科技大学 城市更新湖北省工程研究中心, 武汉 430065; 3. 中南建筑设计院股份有限公司, 武汉 430071)

摘要: 为改善钢板剪力墙滞回性能,使其具备稳定耗能能力,本文提出了一种管肋开孔双钢板剪力墙。利用ABAQUS有限元软件建立了包括管肋开孔双钢板剪力墙在内的7种不同类型钢板剪力墙的有限元数值模型,对其破坏模式、滞回性能、承载力、刚度和耗能能力等方面进行了对比分析。结果表明:在墙体钢板横截面总厚度一定的情况下,管肋开孔双钢板剪力墙具有较高的承载能力和良好的滞回性能;钢管作为板间加劲肋,通过合理布置对两侧的墙面板起到较好屈曲约束的效果,平面外变形较小,同时减小了由于墙面板预开孔洞造成的承载力、强度和刚度的损失;使用圆形钢管或方形钢管作为加劲肋对墙体承载能力影响较小,而使用方形钢管具有较好的屈曲约束效果和耗能能力,故使用方形钢管作为管肋开孔双钢板剪力墙的加劲肋时综合性能最优。

关键词: 开孔双钢板剪力墙; 钢管加劲肋; 有限元分析; 滞回性能; 耗能能力

中图分类号: TU398⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0044-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231218001

Research on Hysteretic Performance of Perforated Double Steel Plate Shear Walls with Tube Stiffeners

LI Chengyu^{1,2}, SUN Fangzhi¹, CHEN Yanzhou^{3*}, WU Dongping^{1,2}

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

*Corresponding author: chenyanzhou1983@qq.com

Abstract: To enhance the hysteresis behavior of steel plate shear walls (SPSWs) and enable them to effectively dissipate energy, a novel design incorporating perforated double steel plates with tube stiffeners is introduced. Finite element models of seven distinct SPSW configurations, including the proposed design, were developed using ABAQUS software. Comparative assessments were conducted to evaluate the failure modes, hysteretic performance, structural strength, stiffness, and energy dissipation capabilities of the various SPSW configurations. The findings indicate that the perforated double steel plate shear wall with tube stiffeners exhibits a high load carrying capacity and favorable hysteretic performance compared to a wall with the same total thickness of steel plate. The incorporation of steel tubes as stiffeners between the wall panels enhances buckling restraint and reduces out-of-plane deformation through strategic placement. Additionally, this design approach mitigates the loss of load-carrying capacity, strength, and

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51878522), 湖北省住建厅科技计划项目([2023]1656号-004)

作者简介:

李成玉(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构地震损伤控制方面的研究。E-mail: lee_chengyu@163.com。

孙方志(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构抗震方面的研究。

通信作者:

陈焰周(1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事钢结构设计与研究。E-mail: chenyanzhou1983@qq.com。

stiffness resulting from pre-perforation in the wall panels. The utilization of square or round steel tubes as stiffening elements minimally impacts the load-carrying capacity of the wall. However, square steel tubes exhibit superior buckling restraint and energy dissipation capabilities. Optimal performance is achieved when employing square steel tubes as stiffeners in perforated double steel plate shear walls.

Key words: perforated double steel plate shear wall; tube stiffener; finite element analysis; hysteretic performance; energy dissipation capacity

钢板剪力墙是在框架中内填钢板而形成的一种抗侧力结构,自20世纪70年代被首次提出以来,因其优良的性能受到学术界和工程界的广泛关注^[1]。早期的研究主要以非加劲单层平钢板剪力墙为主,利用其屈曲后形成的拉力带继续为结构提供侧向承载力,然而薄钢板剪力墙在较小荷载作用下容易发生屈曲,在往复荷载作用下伴有较大的鼓曲声响,影响建筑的舒适度和使用功能。对此,学者们相继提出了竖向加劲^[2]、井字加劲^[3]、对角加劲^[4]等形式的加劲钢板剪力墙以改善薄钢板墙的性能,并研究了使用槽钢^[5]、L形和T形钢板^[6]等作为加劲肋时不同加劲钢板墙的效果。周绪红等^[7]研究了使用帽形冷弯薄壁型钢作为加劲肋时不同布置形式对剪力墙屈曲约束性能的影响。YU等^[8]提出了一种密肋屈曲约束钢板剪力墙,通过多条斜向垂直布置的密集加劲肋使得钢板墙的平面外屈曲得到了有效的约束。

框架-剪力墙结构中,由于内填钢板刚度过大,或屈曲后产生的拉力带对框架柱产生较大的附加弯矩,导致框架柱先于墙体发生破坏。为了进一步满足“强框架、弱墙板”的设计理念,除使用低屈服钢外,开缝^[9]、开洞^[10]钢板剪力墙应运而生,旨在通过在钢板上开设孔缝或洞口以调整墙板的刚度和极限承载力。近年来,对开设圆形^[11]、方形^[12]、菱形^[13]、环形^[14]孔洞的钢板剪力墙进行了大量试验和数值研究,并给出了关于孔洞间距和孔洞大小的设计建议,研究了预制开孔的墙板抗剪承载力折减系数等。王萌等^[15]对比分析了8种不同改进形式钢板剪力墙的抗震性能,研究结果表明开洞式钢板剪力墙能够使平面外变形得到一定程度的抑制和改善,但其承载能力有较大损失;加劲肋钢板剪力墙对承载能力提高有限,但对刚度有较大提高作用。为了改善开孔洞钢板剪力墙的抗震性能、减少平面外屈曲,EMAMYARI等^[16]对开洞加劲钢板剪力墙进行了抗震性能试验研究,结果表明洞口处的加劲肋抑制了由于开洞造成的刚度和承载力的降低,并提高了能量耗散能力;HAMED等^[17]和WANG等^[18]对具有“负泊松比”性质的开洞钢板剪力墙进行了研究,设计出了具有优良性能的剪力墙开洞形式。

具有一定间隔的双层钢板内置加劲肋形成的带肋双层钢板剪力墙,能够较大地提高钢板剪力墙的平面外刚度,使得该种类型双钢层板剪力墙具有承担较大荷载的能力且不会过早地发生平面外屈曲^[19]。JIANG等^[20]研

究了加劲双钢板剪力墙与特殊钢框架的适配性及抗震性能,该种加劲双钢板剪力墙由边柱、两层墙面板和内部纵向加劲肋构成,试验结果表明钢板屈曲和整体失稳是其失效形式,加载后期墙面板和边柱易发生撕裂。舒兴平等^[21]提出了一种由圆形芯管连接两侧墙面板组成的不锈钢芯板一字形剪力墙,研究结果表明墙体内部芯管在整个受力过程中对两侧面板具有较好的连接作用,但各试验构件延性系数最大仅为2.1。

基于以上研究中不同类型钢板剪力墙的优缺点,提出了一种管肋开孔双钢板剪力墙,如图1所示。该剪力墙通过短钢管将两块预开孔洞的墙面板相连,墙体两侧使用方钢管作为边缘约束构件,通过上下端板与框架梁相连。板间钢管既作为加劲肋同时又起到连接作用,旨在提高钢板剪力墙的平面外刚度,并减小由于开洞造成的刚度和承载力的降低,使其具有良好的延性以及稳定耗能能力的同时又具有屈曲自约束的效果。该剪力墙可以通过调整开洞率来满足不同结构对承载力和刚度的不同需求,在施工工艺上也便于了内部加劲肋与墙面板之间的焊接。为了验证该种钢板剪力墙性能的预期效果,通过有限元软件设计了不同类型钢板剪力墙的有限元模型并进行了对比分析。

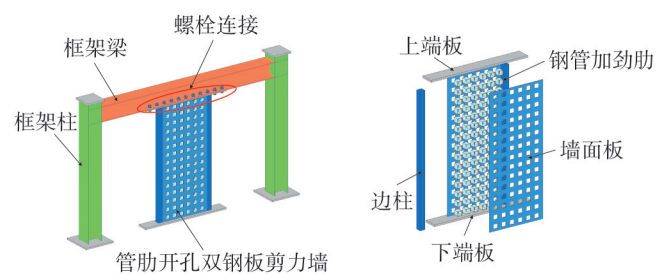


图1 管肋开孔双钢板剪力墙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of perforated double steel plate shear wall with tube stiffeners

1 钢板剪力墙有限元模型

1.1 钢板剪力墙模型设计

本文建立了7种不同类型钢板剪力墙的有限元分析模型,并与提出的管肋开孔双钢板剪力墙进行全面对比分析。各模型试件高度 H 取典型层高3 m,墙宽 L 为1 580 mm,墙厚 B 为140 mm,边缘构件选用100 mm×100 mm×8 mm方钢管,各钢板剪力墙模型具体参数如表1所示。

表1 钢板剪力墙模型参数

Table 1 Parameters of steel plate shear wall models

编号	类型	板厚/mm	有无加劲肋	是否开孔洞
SP	平钢板剪力墙	6	无	否
SP-L	加劲钢板剪力墙	6	平钢板加劲	否
SP-H	开孔钢板剪力墙	6	无	圆孔
DSP-YL	管肋双钢板剪力墙	3	圆钢管加劲	否
DSP-FL	管肋双钢板剪力墙	3	方钢管加劲	否
DSP-YLH	管肋开孔双钢板剪力墙	3	圆钢管加劲	圆孔
DSP-FLH	管肋开孔双钢板剪力墙	3	方钢管加劲	方孔

模型SP为单层平钢板剪力墙;模型SP-L为竖向加劲钢板剪力墙,单侧加劲肋宽度为72 mm,厚度为4 mm;模型DSP-YL和DSP-FL是在保证剪力墙墙面板总工作厚度(6 mm)不变的情况下,由单钢板变为具有一定间隔的双钢板,并在板间设置圆钢管(直径d=100 mm,厚度2 mm)或方钢管(边长l=100 mm,厚度2 mm)作为加劲肋,以形成管肋双钢板剪力墙;模型SP-H是在SP的基础上对墙面板开设孔洞(直径d=100 mm),形成开孔钢板剪力墙;模型DSP-YLH和DSP-FLH是分别在DSP-YL和DSP-FL两侧墙板与管肋连接处开设与管肋同截面尺寸的孔洞形成管肋开孔双钢板剪力墙。加劲肋及孔洞布置如图2所示。

1.2 有限元数值模型

1.2.1 材料本构模型

石永久等^[22]在Chaboche钢材本构模型基础上,通过试验标定,确定了常用钢材本构模型的各项同性强化以及随动强化材料参数,并拟合了可用于有限元软件ABAQUS模拟的关键材料参数,本文选用其中Q235B钢材的循环强化参数,如表2所示。表中, σ_0 为材料初始屈服面应力的大小; Q_∞ 和 b_{iso} 为表示材料等向强化能力的参数; $C_{kin,1}、\gamma_1、C_{kin,2}、\gamma_2、C_{kin,3}、\gamma_3、C_{kin,4}、\gamma_4$ 为表示材料随动强化能力参数。

1.2.2 接触关系及网格划分

加劲肋与两边墙板通过“merge”命令合并成一个整

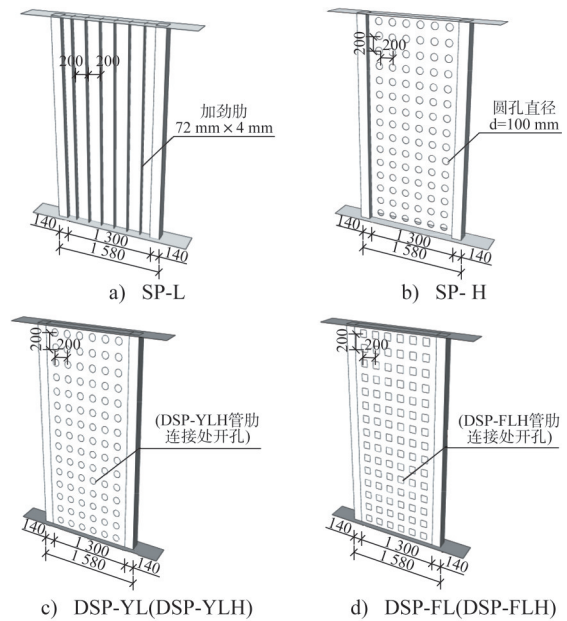


图2 钢板剪力墙有限元模型尺寸

Fig. 2 Dimensions of steel plate shear wall finite element models

体,墙体钢板与边柱采用绑定连接。剪力墙墙板及连接钢管均采用四边形线性减缩壳单元(S4R)进行模拟,避免剪力自锁现象。当钢板发生屈曲后,模型属于高度几何非线性和材料非线性,因此,壳单元厚度方向采用9个积分点的Simpson积分方法。通过对网格尺寸进行40 mm、30 mm、20 mm、10 mm逐级划分,分析网格大小对模型受力性能和破坏形态的影响,最终确定采用20 mm×20 mm的网格尺寸。

表2 ABAQUS模型材料参数

Table 2 Material parameters of ABAQUS model

钢材	σ_0 /MPa	Q_∞ /MPa	b_{iso}	$C_{kin,1}$ /MPa	γ_1	$C_{kin,2}$ /MPa	γ_2	$C_{kin,3}$ /MPa	γ_3	$C_{kin,4}$ /MPa	γ_4
Q235B	407	21	1.2	6 013	173	5 024	120	3 026	32	990	35

1.2.3 边界条件与加载方式

考虑到上下层钢板对中间框架梁的平衡作用,近似假定钢板剪力墙下端完全固定,即约束三个方向的平动与转动($U=U_R=0$);上端仅能发生平面内位移,顶部耦合至一点,仅释放加载方向和竖直方向平动,约束其他方向平动和转动($U_3=U_R=0$),如图3所示。

加载过程分为两步,第一步对顶部耦合点按0.2轴压比施加轴压,第二步施加低周往复荷载。采用层间位移角控制加载,加载级、循环次数以及对应位移如图4所示。在罕遇地震作用下,《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[23]对钢结构弹塑性层间位移角的限值为2%(对应的位移为60 mm),文中最大加载层间位移角为6%(对应的位移为180 mm)。采用ABAQUS/Standard隐式计算模块提供的Newton-Raphson法求解。

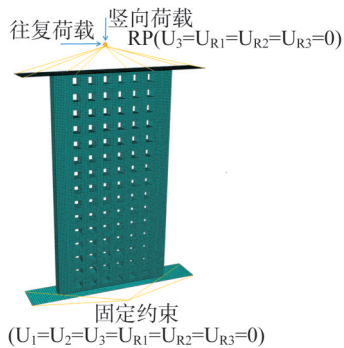


图3 边界条件和加载方式

Fig. 3 Boundary condition and loading method

1.2.4 初始几何缺陷

为尽可能准确模拟钢板剪力墙的受力状态,通过改写inp文件实现初始缺陷的施加。利用ABAQUS软件中的Buckle求解命令计算各钢板剪力墙模型的屈曲模态,选取墙体高度的1/1 000作为一阶屈曲模态幅值模拟初始缺陷,再使用*imperfection命令,修正模型节点坐标,进而实现对结构施加初始缺陷这一过程。各模型一阶典型屈曲模态如图5所示。

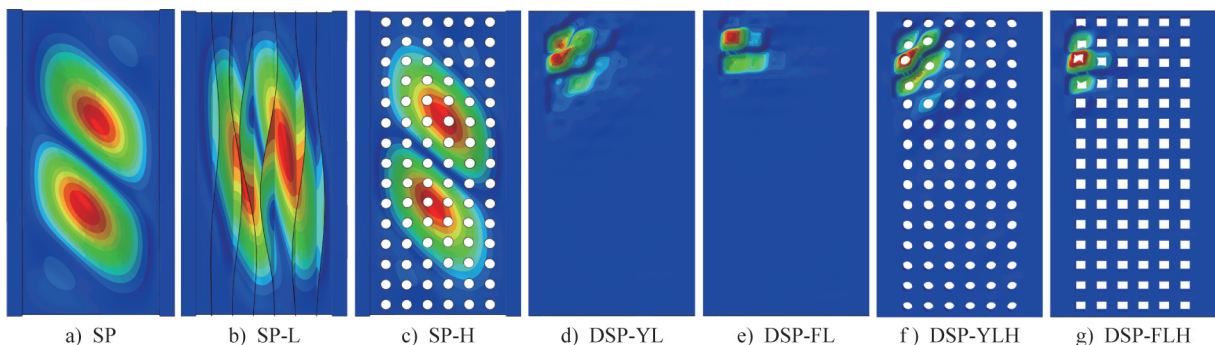


图5 各模型典型屈曲模态

Fig. 5 Typical buckling modes of models

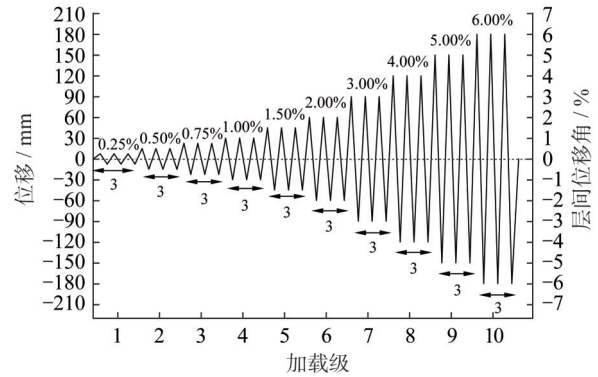


图4 加载制度

Fig. 4 Loading system

1.3 模型验证

为了验证建模方法的准确性,选用文献[21]中不锈钢芯板一字形剪力墙YWH2.5-1构件进行分析以进行模型验证,根据上述的建模方法建立有限元模型,并对其进行了低周往复加载计算,计算结果如图6所示。

由图6a)和图6b)可知,构件有限元模型的变形模式与试验构件的破坏模式较为一致:墙体上部未发生明显变形,墙体底部沿着芯管布置方向发生平面外变形,同时侧板发生局部鼓曲。

由图6c)可以看到有限元计算水平荷载-位移曲线与试验曲线吻合较好,计算结果能够较好地拟合出试验构件水平承载力的变化趋势及退化现象,说明本文有限元模型建立方法可靠。

2 钢板剪力墙滞回性能有限元分析

2.1 破坏模式对比分析

以构件承载力下降至峰值承载力的85%时作为极限状态,在最大加载位移下承载力仍未下降到峰值承载力85%时则以最大位移加载点作为极限状态。图7为各模型加载至极限状态时墙面板的平面外变形发展图。从图中可以看到各模型破坏失效模式大致可分为三类:单层平钢板剪力墙(SP)、加劲钢板剪力墙(SP-L)和开孔钢

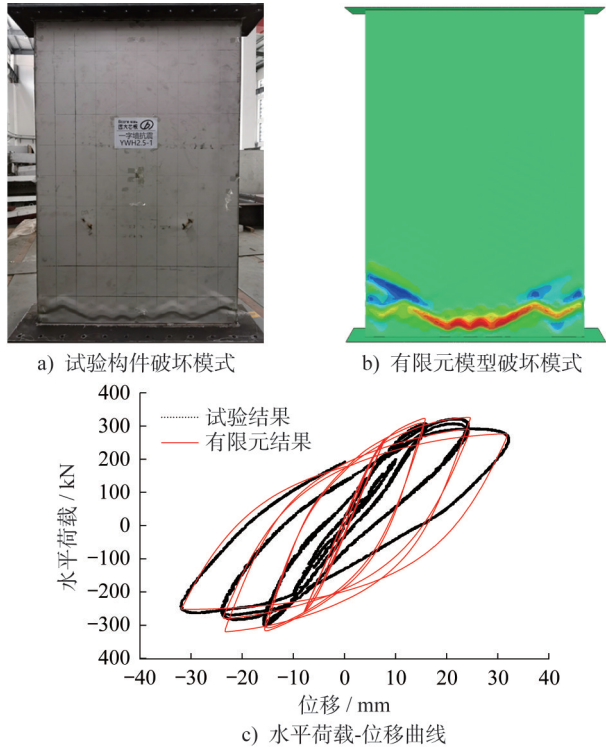


图6 试验与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of the results between test and FEA

板剪力墙(SP-H)均沿剪力墙对角线方向出现斜向拉力带,平面外屈曲变形严重,随着往复荷载加载的进行最终

出现“X”状贯通屈曲破坏;圆管加劲双钢板剪力墙(DSP-YL)、方管加劲双钢板剪力墙(DSP-FL)和圆管加劲开孔双钢板剪力墙(DSP-YLH)呈现出多条斜向45°贯通拉力带,但由该种形式拉力带产生的最大平面外变形仅为SP的1/2,表明板间管肋能够有效阻止钢板平面外变形。其中DSP-YLH与DSP-YL相比出现的拉力带条数减少,表明开孔后屈曲约束效果进一步改善;方管加劲开孔双钢板剪力墙(DSP-FLH)仅在管肋间隔处出现了较小的局部变形,未出现贯通拉力带,表明在方钢管加劲肋和预开孔洞的协同作用下墙面板具有良好的屈曲约束效果。

表3对不同类型剪力墙加载至三个不同阶段时的最大平面外变形进行了对比。由表3可知,SP-L和SP-H加载达到屈服之前平面外变形较小,加载达到峰值承载力期间平面外变形迅速增大,这表明加劲肋和预开孔洞的存在阻止了墙面板的过早屈曲,使其在加载初期平面外变形较小。SP-L中加劲肋在加载后期出现了严重屈曲变形,不能起到持续抑制墙面板屈曲的作用;SP-H也同样在加载位移较大时产生拉力带变形,这表明加劲肋或开孔对单层平钢板剪力墙的屈曲变形约束效果均有限,并未改变剪力墙的伤害模式。管肋双钢板形式剪力墙(DSP)与SP相比,平面外变形减小50%以上,屈曲约束效果明显改善。其中DSP-FLH平面外变形显著减小,与SP相比减小约80%。

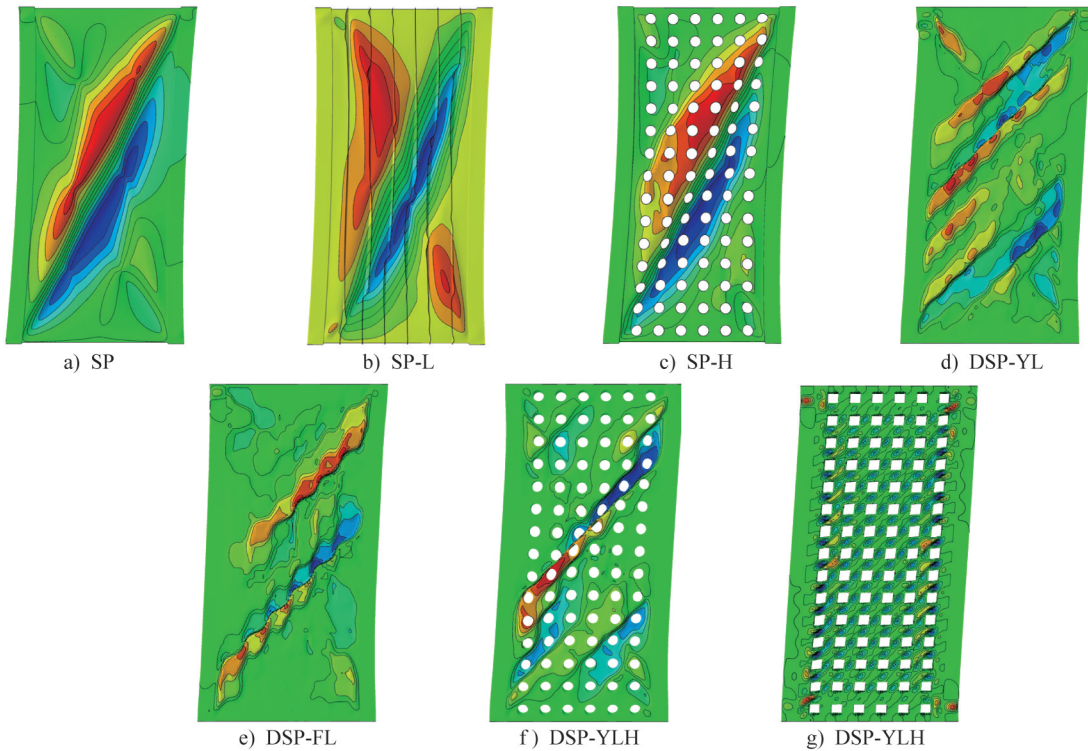


图7 墙体破坏形态对比

Fig. 7 Comparison of wall failure modes

表3 平面外变形对比分析

Table 3 Comparison of out-of-plane deformation

模型编号	加载至不同时刻平面外变形最大值/mm		
	屈服时刻	峰值时刻	极限时刻
SP	27.85	47.67	105.24
SP-L	2.16	53.68	130.84
SP-H	0.10	66.28	118.73
DSP-YL	12.54	19.98	57.72
DSP-FL	8.78	13.41	55.42
DSP-YLH	4.77	36.34	62.15
DSP-FLH	0.20	11.90	19.42

2.2 滞回曲线对比分析

在往复荷载的作用下,钢板剪力墙易产生双向拉力带,滞回曲线出现“捏缩”现象。从图8可以看出,不同类型钢板剪力墙滞回曲线捏缩现象并不一致。SP-L与SP相比其承载能力有较大提升,但是承载力的退化较为明显,滞回曲线捏缩现象并没有明显改善,且每一加载级中随着循环加载次数的增加都伴随较为明显的强度退化;SP-H相较于SP拉力带交汇处应力相对较小,表明孔洞的存在使得墙板应力重新分布,滞回曲线形状较未开孔时无明显区别,但承载能力降低。由此可见对单层平钢板剪力墙设置加劲肋或预开孔洞并不能很好地改善滞回曲线的捏缩现象。

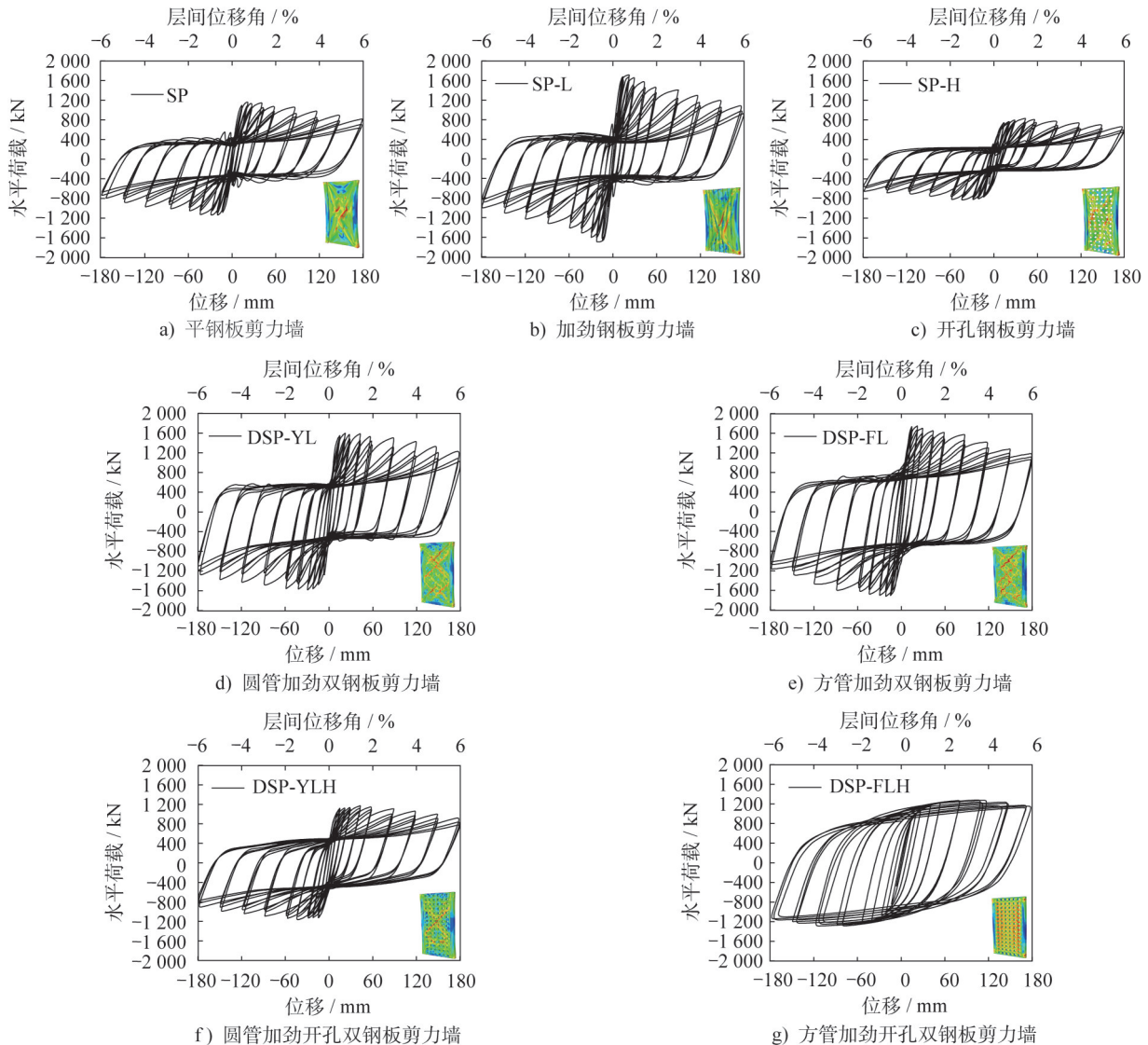


图8 钢板剪力墙滞回曲线对比分析图

Fig. 8 Comparison of hysteretic curves of steel plate shear walls

管肋双钢板形式剪力墙(DSP)滞回曲线相对较为饱满,其中DSP-FL滞回性能较为优良,相较于SP滞回曲

线捏缩值从300 kN提高到600 kN左右,提高约一倍,峰值承载力从1100 kN提高到1700 kN左右,提高约50%;

DSP-FLH滞回曲线更是呈现为饱满“梭形”,应力分布均匀,塑性区域发展充分,未产生贯通拉力带,表明其承载力稳定,塑性变形能力优良,具有良好的自约束防屈曲效果。

2.3 骨架曲线及延性对比分析

从图9中各模型骨架曲线的对比可以看出,不同类型的钢板剪力墙承载力退化的起始位置、退化程度、稳定性各不相同。其中SP-L、DSP-YL和DSP-FL峰值承载力较高,但SP-L达到峰值承载力之后较早发生承载力的退化,且退化速度较快;而DSP-YL和DSP-FL承载力退化较为缓慢,表明管肋双钢板形式的剪力墙承载能力较为稳定。墙面板开设孔洞情况下,SP-H承载力最小,这是由于预开孔洞对墙面板进行了削弱且未设置加劲肋;DSP-YLH与SP承载力及退化程度相近,骨架曲线表现出相同的规律;DSP-FLH峰值承载力相对较高,承载力退化程度较小,表明其具有极高的稳定承载能力。

表4列出了各模型的特征荷载及延性系数等。由表可知SP-L、DSP-FL峰值承载力相较于SP提升约50%,DSP-YL相较于SP峰值承载力提升约36%,表明对单层平钢板设置加劲肋或对双层钢板内置管肋均能较好提升钢板剪力墙的水平承载能力。墙面板开设孔洞后,SP-H相较于SP峰值承载力降低了40%;DSP-YLH和DSP-FLH相较于DSP-YL和DSP-FL峰值承载力分别下降了25%和28%,由此可见DSP-YLH、DSP-FLH中墙板

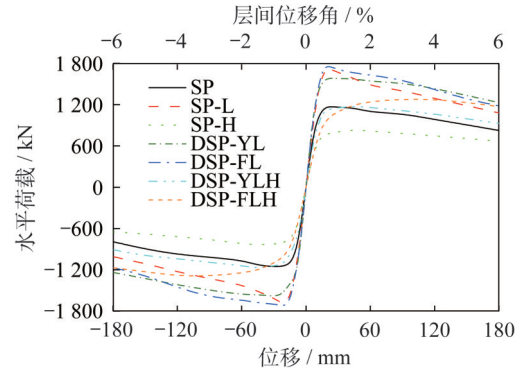


图9 骨架曲线对比

Fig. 9 Comparison of skeleton curves

间钢管加劲肋的存在使其开设孔洞后承载力损失降低,且DSP-FLH与SP相比峰值承载力仍提升了10%。

延性方面,各类型钢板剪力墙延性系数均大于5.0,体现出钢板剪力墙高延性的特点。SP-L延性系数相对较小,这是由于加劲肋发生屈曲后不能持续抑制墙面板的屈曲导致其极限承载能力迅速下降;管肋双钢板形式的剪力墙(DSP)相较于平钢板剪力墙(SP)延性均有不同程度的提升,其中DSP-FLH由于其屈服位移较大,且在极限加载位移下承载力仍未下降至峰值承载力的85%,故计算出的延性系数不能较好地反映出其真实延性。综上可以得出,管肋开孔双钢板形式剪力墙与传统平钢板剪力墙和加劲钢板剪力墙相比具有更为优良的承载能力和变形性能。

表4 各钢板剪力墙承载力特征参数

Table 4 Characteristic parameters of load bearing capacity of all steel plate shear walls

模型编号	屈服点		峰值点		极值点		μ
	P_y/kN	θ_y	P_m/kN	θ_m	P_u/kN	θ_u	
SP	1 015.56	0.004 5	1 166.65	0.009 8	991.65	0.037 4	8.37
SP-L	1 623.33	0.004 6	1 710.71	0.007 5	1 446.02	0.023 5	5.10
SP-H	752.80	0.004 7	833.62	0.014 9	708.58	0.046 4	9.78
DSP-YL	1 372.02	0.004 0	1 584.09	0.007 4	1 346.48	0.047 2	11.76
DSP-FL	1 624.00	0.004 5	1 735.86	0.007 4	1 475.48	0.037 9	8.43
DSP-YLH	1 043.15	0.005 0	1 180.66	0.014 7	1 003.56	0.048 9	9.82
DSP-FLH	1 044.13	0.008 0	1 286.00	0.029 6	1 293.10	0.060 0	7.53

注:表中 P_y 、 P_m 与 P_u 分别为屈服荷载、峰值荷载与极限荷载; θ_y 、 θ_m 与 θ_u 分别为屈服位移角、峰值荷载所对应的位移角与极限位移角,延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。以上数据均为推上和拉向的平均值。

2.4 刚度退化对比分析

图10为各模型刚度退化曲线对比图。从图中可以看出,各模型的刚度退化曲线呈现“人”字型,退化曲线基本维持相似形状。在加载初期刚度退化曲线比加载后期

较陡,刚度退化初期比较快,主要原因是墙板塑性变形在不断扩展;当层间位移角超过2%时,各试件刚度开始缓慢下降,此时墙板塑性变形基本稳定。7种不同类型的钢板剪力墙模型初始刚度大致可分为四个水平,其中管肋

双钢板剪力墙(DSP-YL和DSP-FL)初始刚度最大,约为160 kN/mm,相较于SP提高了34%;SP-L次之,约为145 kN/mm,相较于SP提高了25%;DSP-YLH与SP初始刚度相近,约为105 kN/mm;SP-H与DSP-FLH初始刚度最小,仅为73 kN/mm,相较于SP降低了30%。DSP-FLH的初始刚度最小,但其退化程度最小,且退化曲线的斜率最小,表明其退化最为缓慢。

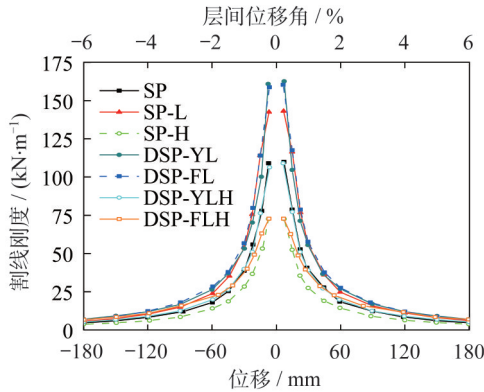


图10 刚度退化曲线对比

Fig. 10 Comparison of stiffness degradation curves

2.5 耗能能力对比分析

图11为各模型的累积耗能曲线。从图中可以看出,各模型累积耗能均随位移的增大而快速增大,加载至屈服后,累积耗能增长较快。除SP-H外,其余各类型钢板剪力墙的累积总耗能及累积耗能随位移增大而增大的速率均大于SP。使用方钢管作为加劲肋的双钢板剪力墙(DSP-FL和DSP-FLH)累积总耗能最高,相较于SP耗能能力提高约1倍;使用圆钢管作为加劲肋的双钢板剪力墙(DSP-YL、DSP-YLH)与普通加劲钢板剪力墙(SP-L)相较于SP总耗能分别提高了60%、28%和27%。由此可见管肋构造形式可以大幅度提高钢板剪力墙的耗能能力,其中使用方钢管作为加劲肋的管肋双层连接钢板剪力墙的耗能能力最为优良。

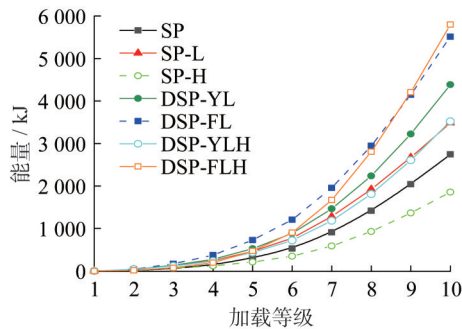


图11 累积滞回耗能曲线对比

Fig. 11 Comparison of cumulative hysteretic energy curves

3 结论

本文共建立了包括管肋开孔双钢板剪力墙在内的7种不同类型钢板剪力墙的有限元模型,对比分析了在循环荷载作用下的承载能力及滞回性能,根据有限元数值模拟结果,得到以下结论:

(1) 管肋双钢板剪力墙与同等工作板厚的单层平钢板、开孔钢板和加劲钢板剪力墙等相比具有更为优良的承载能力和滞回性能。

(2) 单层平钢板、开孔钢板和加劲钢板剪力墙的墙面板随加载位移的增加沿对角线方向易出现屈曲进而形成拉力带,并产生较大的平面外变形;而管肋形式双钢板剪力墙沿45°方向出现屈曲变形,平面外变形相较于前者降低50%以上,表明其具有较好的屈曲约束效果。

(3) 方形钢管更适合作为管肋开孔双钢板剪力墙的加劲肋,管肋连接处开设孔洞后对剪力墙的变形性能及屈曲约束效果均有进一步的提升,其平面外变形较小,滞回曲线呈饱满梭形,滞回性能稳定。管肋与墙板间的协同作用机理有待后续的进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 郝际平. 钢板剪力墙的原理和性能[M]. 北京: 科学出版社, 2020. HAO Jiping. Principle and performance of steel plate shear walls[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 聂建国, 朱力, 樊健生, 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.01.010. 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): 61-69. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.01.010. (in Chinese)
- [3] 马尤苏夫, 崔聪, 周清汉, 等. 联肢加劲钢板剪力墙滞回性能试验研究与数值分析[J]. 工程力学, 2021, 38(9): 212-227. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0795. MA Yousufu, CUI Cong, ZHOU Qinghan, et al. Experimental study and numerical analysis on hysteretic behavior of coupled steel plate shear walls with stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 212-227. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0795. (in Chinese)
- [4] CAO Z G, WANG Z C, DU P, et al. Research on steel plate shear walls stiffened with X-shaped restrainers: Hysteretic behavior and effect of height-to-thickness ratio of steel plate [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106316. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106316.
- [5] 牟在根, 杨雨青. 对角槽钢加劲钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 214-227, 238. MU Zaigen, YANG Yuqing. Experimental study on seismic behavior of steel plate shear walls with diagonal channel stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 214-227, 238. (in Chinese)

- [6] 门进杰,杨运杰,兰涛,等. 箱板式钢结构住宅底部加强区组合加劲钢板墙抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2):82-91. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.C121.
MEN Jinjie, YANG Yunjie, LAN Tao, et al. Seismic behavior of composite stiffened steel plate wall at bottom stiffened area of box-type steel structure [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 82-91. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.C121.(in Chinese)
- [7] 周绪红,曹昀琦,谭继可,等. 不同屈曲约束形式的钢板剪力墙往复剪切性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(1):1-10. DOI: 10.19815/j.jace.2020.12049.
ZHOU Xuhong, CAO Yunqi, TAN Jike, et al. Experiment on cyclic shear performance of steel plate shear wall with different buckling restraints [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(1): 1-10. DOI: 10.19815/j.jace.2020.12049.(in Chinese)
- [8] YU J G, BU F, LI B, et al. Seismic behaviour of steel plate shear wall with non-welded oblique multi-ribs[J]. Structures, 2021, 31:1216-1229. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.02.048.
- [9] 白杨,王卫华,张伟,等. 开缝钢板剪力墙滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(2):28-35. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.02.004.
BAI Yang, WANG Weihua, ZHANG Wei, et al. Research on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with slits[J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(2): 28-35. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2018.02.004.(in Chinese)
- [10] VIAN D. Steel plate shear walls for seismic design and retrofit of building structures[D]. Buffalo:State University of New York at Buffalo, 2005.
- [11] ZARRINKOLAEI F A, NASERI A, GHOLAMPOUR S. Numerical assessment of effect of opening on behavior of perforated steel shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 181: 106587. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106587.
- [12] KORDZANGENEH G, REZAEIAN A, SHOWKATI H, et al. Experimental study on the effect of square opening size and location on cyclic response of steel plate shear walls [J]. Structures, 2021, 33: 4655-4669. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.07.045.
- [13] ZHAO X F, TAN P, LIN Y H, et al. Theoretical and experimental investigations of steel plate shear walls with diamond openings [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 189: 110838. DOI:10.1016/j.tws.2023.110838.
- [14] PHILLIPS A R, EATHERTON M R. Computational study of elastic and inelastic ring shaped-steel plate shear wall behavior [J]. Engineering Structures, 2018, 177: 655-667. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.008.
- [15] 王萌,杨维国. 不同改进形式钢板剪力墙滞回性能研究[J]. 工程力学, 2016, 33(8):110-121.
WANG Meng, YANG Weigu. Study on hysteretic performances of the improved steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 110-121. (in Chinese)
- [16] EMAMYARI A, SHEIDAII M R, KOOKALANIFAR A, et al. Experimental study on cyclic behavior of stiffened perforated steel shear panels [J]. Structures, 2020, 27: 2400-2410. DOI:10.1016/j.istruc.2020.08.027.
- [17] AKBARI HAMED A, SAMADI A, BASIM M C. Topology and shape optimization of steel plate shear walls for enhancing the seismic energy dissipation capacity [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104828. DOI: 10.1016/j.job.2022.104828.
- [18] WANG J J, ZHU Y, CAI X N, et al. Hysteresis behavior of auxetic perforated steel plate shear walls with elliptical and peanut-shaped cutouts [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79:107875. DOI:10.1016/j.job.2023.107875.
- [19] 徐亚飞,谭平,陈林,等. 内加劲双钢板剪力墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4):113-124. DOI:10.13197/j.eeed.2022.0413.
XU Yafei, TAN Ping, CHEN Lin, et al. Seismic performance of double steel plate shear wall with internal stiffeners [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 113-124. DOI: 10.13197/j.eeed.2022.0413. (in Chinese)
- [20] JIANG Z Q, YAN T, ZHANG A L, et al. Experimental research on special steel frame with stiffened double steel plate shear wall [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189:107067. DOI:10.1016/j.jcsr.2021.107067.
- [21] 舒兴平,熊志奇,张再华. 不锈钢芯板一字形剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(18):1-8. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.18.001.
SHU Xingping, XIONG Zhiqi, ZHANG Zaihua. Experimental research on seismic behavior of the I-shaped shear wall of stainless steel core plate [J]. Building Structure, 2021, 51(18): 1-8. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.18.001.(in Chinese)
- [22] 石永久,王萌,王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 293-300. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.001.
SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 293-300. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.001.(in Chinese)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011—2010 [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)