

# 防屈曲钢板墙屈服后刚度影响因素分析

胡大柱\*, 曹俊, 金元泽, 杜俊伟, 吴志平, 赵娟

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

**摘要:** 金属消能构件进入屈服状态后产生阻尼,从而达到消能的作用,通常采用等效阻尼系数来度量消能的效果,而等效阻尼系数由滞回曲线形状、屈服承载力、屈服后刚度等因素决定。基于双线性滞回模型,推导了屈服后刚度比与等效阻尼系数的关系式。研究表明,随着屈服后刚度比的增大,等效阻尼系数减小,且减小幅度随着消能构件延性系数的增大而逐渐增大。为研究防屈曲钢板墙这种金属消能构件的屈服后刚度特征,设计了网状分布加劲肋夹板的防屈曲钢板墙试件,通过试验确定其滞回特性,并通过试验结果校核有限元模型。通过有限元分析芯板材料类型、芯板高厚比、高宽比对防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响。分析结果表明,防屈曲钢板墙芯板材料类型、高宽比对屈服后刚度的影响较为显著。对于高宽比为1.2的试件,在变形幅值为1/100的墙高时,相较于芯板材料为Q235的钢板墙,芯板材料为LYP100和LYP160的钢板墙屈服后刚度比分别下降了80.23%和72.77%。而对于芯板材料同样为Q235钢板墙但高宽比为2.0的试件,其屈服后刚度比是高宽比为1.0试件的2倍。通过参数分析拟合得到了不同芯板材料类型的防屈曲钢板墙屈服后刚度比的计算式。

**关键词:** 防屈曲钢板墙; 屈服后刚度; 阻尼比; 等效阻尼系数; 影响参数; 拟合公式

中图分类号: TU352.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0072-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230825001

## Influential Parameter Analysis of Post-Yield Stiffness for Buckling-Restrained Steel Plate Walls

HU Dazhu\*, CAO Jun, JIN Yuanze, DU Junwei, WU Zhiping, ZHAO Juan

(School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology University, Shanghai 201418, China)

\*Corresponding author: dazhuhu@163.com

**Abstract:** When the steel yields, the metal energy dissipation device enters the energy dissipation state and produces damping. The equivalent damping coefficient is usually used to measure the effect of energy dissipation. The value of the equivalent damping coefficient is determined by the shape of the hysteretic curve, the yield bearing capacity, and the post-yield stiffness. Based on the bi-linear hysteretic model, the relationship between the post-yield stiffness ratio and the equivalent damping coefficient was derived. The results of the formula show that the equivalent damping coefficient decreases with the increase of the post-yield stiffness ratio, and the downward trend gradually increases with the increase of the ductility coefficient of the energy dissipation member. In order to study the post-yield stiffness characteristics of buckling-restrained steel plate wall, a test specimen with mesh distributed stiffeners was designed, and its hysteretic characteristics were determined by experiment. The finite element model was verified by the test

收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51408361)

作者简介:

胡大柱(1980—),男,博士,副教授,主要从事结构抗震与减震方面的研究。E-mail: dazhuhu@163.com。(通信作者)

曹俊(1996—),男,硕士研究生,主要从事装配式减震结构方面的研究。

results. The influence of core plate material type, core plate height-thickness ratio and height-width ratio on the post-yield stiffness of buckling-restrained steel plate wall were analyzed by finite element method. The analysis results show that the material type and height-width ratio of the core plate of the buckling-restrained steel plate wall have significant effect on the post-yield stiffness. For the member with height-width ratio of 1.2, the post-yield stiffness ratios with core materials of LYP100 and LYP160 decreased by 80.23% and 72.77% respectively compared with Q235 under the deformation amplitude of 1/100 wall height. For the buckling-restrained steel plate wall with the same core material as Q235, the post-yield stiffness ratio of the specimen with the height-width ratio of 2.0 was twice that of the specimen with the height-width ratio of 1.0. Through parameter analysis, the calculation formulae of post-yield stiffness ratio of buckling-restrained steel plate wall with different core plate material types were fitted.

**Keywords:** buckling-restrained steel plate wall; post-yield stiffness; damping ratio; equivalent damping coefficient; influential parameter; fitting formula

震后残余变形显著影响结构的修复成本<sup>[1]</sup>,而屈服后刚度是影响结构震后残余变形的重要因素之一。叶列平等<sup>[2]</sup>研究发现当结构的屈服后刚度比大于0.5时,可有效避免结构的变形集中问题。为降低主体结构的损伤,经杰等<sup>[3]</sup>指出采用主-次结构体系可以防止结构屈服后的刚度退化过于剧烈。次结构可以采用改进后的砌体隔墙,也可采用耗能器<sup>[4]</sup>。次结构作为主要的损伤构件,其耗能能力越强、延性越好,对主体结构的保护程度越高。在主体结构中安装比其他部件更早屈服的耗能构件作为次结构,可以耗散结构中的大量地震能量,将主体结构损伤降至最低<sup>[4-5]</sup>,从而减小结构的震后残余变形,提高整体结构的抗震性能,已经成为复杂建筑和需重点抗震防护结构的主要抗震措施。

耗能装置种类繁多,但根据其耗能机理,目前应用较为广泛的耗能构件可分为金属屈服型、摩擦耗能型、黏滞耗能型三大类。黏滞耗能型耗能构件的阻尼力主要与相对速度有关,金属屈服型耗能构件与摩擦耗能型耗能构件的阻尼力与相对位移有关。对于金属屈服型耗能构件,由于钢材的强化特性,其屈服后刚度一般大于0,耗能能力与屈服力、相对变形及屈服后刚度有关。在目前的研究中,对耗能构件的形状参数、屈服力影响因素、耐疲劳性能等研究较多,对于屈服后刚度比的确定,仅根据试验测试数据给出相应的建议值,但关于屈服后刚度比对耗能减震结构性能的影响分析较少。

金属屈服型耗能构件包括剪切型金属耗能构件、弯曲型金属耗能构件、屈曲约束支撑、防屈曲钢板墙等类型。对于前三种耗能构件,试验的实测值较多且工程师能够查阅的工程资料也较为充分,而防屈曲钢板墙作为一种新型的耗能构件,其应用目前相对较少,屈服后刚度取值的试验数据不足,需要进一步分析屈服后刚度的影响因素及取值方法。

为此,本文首先从理论上研究屈服后刚度对阻尼系数的影响,再根据防屈曲钢板墙试验和有限元分析的结

果,确定该类耗能构件屈服后刚度的主要影响因素,并通过参数分析及数据拟合提出了屈服后刚度的计算方法。

## 1 屈服后刚度比对等效阻尼系数对的影响

耗能构件屈服后刚度也称第二刚度,本文将屈服后刚度与初始刚度的比值定义为屈服后刚度比。以图1所示的双线性模型为例,其中 $F_y$ 为初始屈服力, $F_m$ 为设计阻尼力, $u_y$ 为屈服位移, $u_m$ 为设计位移, $K_b$ 为初始刚度, $q$ 为屈服后刚度比。

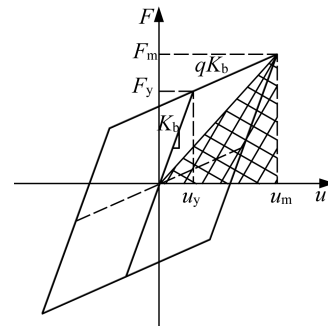


图1 双线性模型等效阻尼系数计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of equivalent damping coefficient in bi-linear model

假定耗能构件的设计位移为 $u_m$ ,依据等效阻尼系数的定义,可得到设计位移下的等效阻尼系数表达式如下:

$$\xi_{eq} = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad (1)$$

$$W_s = \frac{1}{2} F_m u_m \quad (2)$$

式中: $\xi_{eq}$ 为等效阻尼系数; $W_d$ 为耗能构件在设计位移下往复一周所消耗的能量; $W_s$ 为结构应变能。

依据相应参数之间的关系,可以得到双线性模型等效阻尼系数的计算式如下:

$$\xi_{eq} = \frac{W_d}{4\pi W_s} = \frac{4(F_y u_m - F_m u_y)}{2\pi[F_y + qK_b(u_m - u_y)]u_m} \quad (3)$$

定义延性系数 $\mu$ 为:

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (4)$$

将延性系数 $\mu$ 代入式(3),可得到双线性模型等效阻尼系数与延性比的关系,如式(5)所示:

$$\xi_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-q)}{\pi\mu(1-q+q\mu)} \quad (5)$$

根据已有研究<sup>[6-10]</sup>,金属屈服型消能构件的屈服后刚度比一般在0.01~0.10范围内。由式(5)可进一步分析屈服后刚度比与等效阻尼系数的关系,延性系数分别为4、6、8、12、18和24时屈服后刚度比与等效阻尼系数的关系曲线如图2所示,从图中可以看出,在延性系数相同时,随着屈服后刚度比的增大,等效阻尼系数减小。随着延性系数增大,等效阻尼系数随屈服后刚度比变化的幅度增大,当延性系数为24时,屈服后刚度比为0.01所对应的等效阻尼系数是屈服后刚度比为0.05时等效阻尼系数的1.82倍。当延性系数为6时,该比值为1.24。

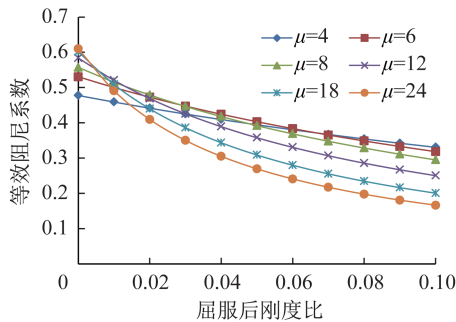


图2 屈服后刚度比与等效阻尼系数的关系

Fig. 2 Relationship between post-yield stiffness ratio and equivalent damping coefficient

由以上分析可知,屈服后刚度比对阻尼的影响较大。常规减震设计中,金属消能构件的延性系数一般为8~24,按照减震设计中消能构件附加阻尼比的计算方法<sup>[11]</sup>,如果金属消能构件的屈服后刚度比设计值与实测值相差较大,其附加阻尼比计算误差将达到40%~70%。

## 2 防屈曲钢板墙刚度计算

由上述分析可知,屈服后刚度会影响金属消能构件的消能能力。防屈曲钢板墙是一种十分有效的承载-消能构件,其承载能力高、抗侧效果好,且对建筑结构的性能影响较小,适用于多高层钢结构<sup>[12]</sup>。防屈曲钢板墙的芯板形式包括开缝芯板、波纹钢板、矩形钢板和I型芯板<sup>[13-16]</sup>等,其中I型芯板的防屈曲钢板墙抗侧刚度相对较大,本文选取该类钢板墙作为研究对象。

根据已有研究<sup>[9]</sup>,I型芯板的防屈曲钢板墙初始刚度 $K$ 计算方法如式(6)所示。

$$K = \frac{Et}{2.6 \frac{H}{\beta b_0} + \left(\frac{H}{\beta b_0}\right)^3} \quad (6)$$

式中: $E$ 为弹性模量; $t$ 为钢板厚度; $H$ 为墙高; $b_0$ 为屈服段芯板宽度,如图3所示; $\beta$ 为一个与端部面积增加相关的参数,该参数用于控制防屈曲钢板墙芯板的屈服位置,确保屈服发生于中间削弱部位,其取值的变化幅度较小。

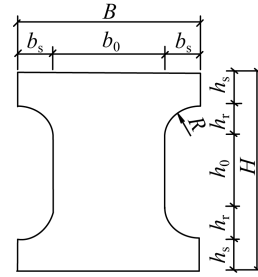


图3 防屈曲钢板墙I型芯板

Fig. 3 I-type core plate in of buckling-restrained steel plate wall

对式(9)进行分析可知,钢板墙的刚度与芯板的高宽比、厚度以及弹性模量有关。根据钢构件特征,当构件进入屈服状态后,如果未发生屈曲变形,其屈服后刚度比主要受塑性模量影响,而塑性模量主要与钢材类型有关。

因此,为研究防屈曲钢板墙屈服后刚度,对芯板钢材类型、高宽比以及钢板厚度3个主要参数进行分析。

## 3 防屈曲钢板墙试验

本文首先对I型芯板的防屈曲钢板墙进行试验测试,根据试验结果建立有限元模型,再研究芯板材料类型、高厚比、高宽比对防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响。

### 3.1 试件设计

设计制作了1个防屈曲钢板墙试件,芯板所用钢材强度等级为Q235B,尺寸为925 mm×800 mm×10 mm,芯板的面外设有带有加劲肋的纯钢约束板,加劲肋呈网状分布。试件具体构造如图4所示。

试验测试装置如图5所示,作动器端部的移动横梁与加载盖梁组成传力机构,试验构件下连接板与自平衡反力架连接,上连接板与加载盖梁连接,两个竖向边为自由边。作动器往复加载带动加载盖梁水平移动,加载盖梁移动驱动防屈曲钢板墙变形,以此模拟试验构件在水平地震作用下的往复变形。

参考防屈曲钢板墙的验收标准<sup>[17]</sup>,同时为探讨小变

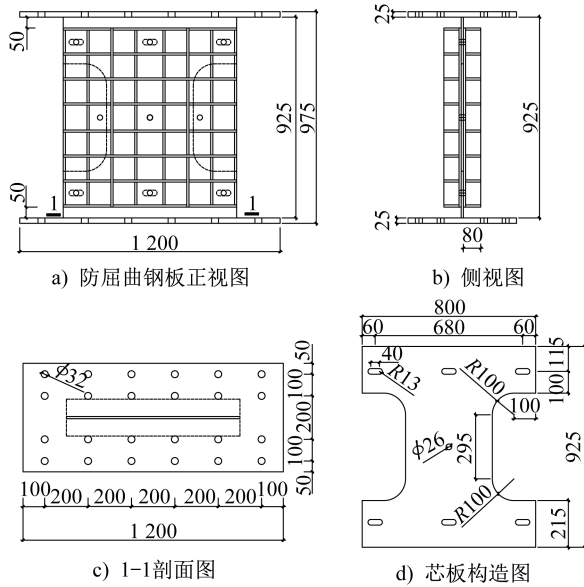


图4 防屈曲钢板墙构造

Fig. 4 Detail of buckling-restrained steel plate wall

形状态下构件的力学性能,试验的全过程均采用位移控制的往复加载模式,各控制点往复加载3圈,试验的加载制度如表1所示。

表1 加载制度

Table 1 Loading system

幅值/mm	循环次数	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )
0.50	3	2
1.20	3	2
1.80	3	2
2.50	3	2
3.00	3	2
3.70(H/250)	3	5
6.17(H/150)	3	5
9.25(H/100)	3	5
12.33(H/75)	3	5
18.50(H/50)	3	5

试验前对防屈曲钢板墙的芯板进行了材性试验,实测得到其屈服强度为299 MPa,抗拉强度为453 MPa,伸长率为35.8%。

### 3.2 试验现象及结果

试验加载至1.2 mm时,正负荷载出现不一致,其中正向荷载为201.61 kN(正荷载方向指作动器由左至右)、负向荷载为140.51 kN(负荷载方向指作动器由右至左),经检查发现移动横梁在侧滑槽内与外平衡架之间出现卡槽,正向荷载作用下该位置处产生压力,负向荷载时,该接触位置逐渐脱离。试验装置的卡槽导致正向刚度大于

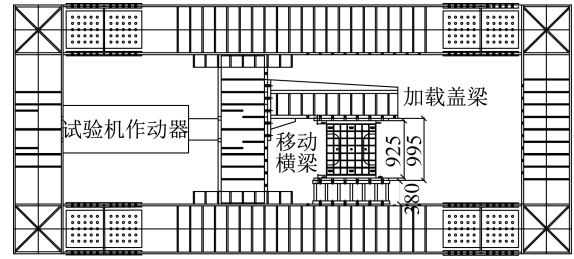


图5 试验装置构造

Fig. 5 Detail of test setup

负向刚度。滞回曲线如图6所示,可以看出试验的前6级加载均出现正负刚度不一致的现象。但当加载幅值变大后,正负刚度基本一致。同时由于设备影响,每级加载至±140 kN时,加载油缸出现顿挫现象,导致滞回曲线在该位置处出现1个拐点。

试验得到的滞回曲线如图6所示,曲线呈梭形。试验过程未出现强度退化现象,在变形幅值为构件高度的1/50时往复3个循环,3个循环所测试的强度和刚度误差仅为3%。

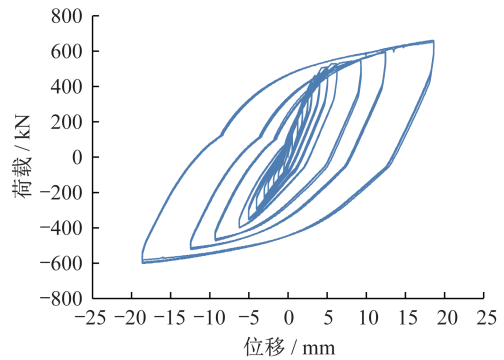


图6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve

上海市《建筑消能减震及隔震技术标准》(DG/TJ 08-2323—2020)<sup>[18]</sup>中分别定义了金属消能构件骨架曲线屈服后刚度及滞回曲线屈服后刚度,其中滞回曲线屈服后刚度的确定方法如图7所示。在图7中,首先找到该级加载幅值下荷载开始下降的点(B点),并与荷载卸载至0时的点(C点)连线,BC连线的斜率可定义为弹性刚度。过原点(O点)做一条与BC连线斜率相同的斜线OA,斜线OA与滞回曲线相交的点记为A点,连接AB两点,线段AB的斜率即为滞回曲线的屈服后刚度。屈服后刚度比定义为线段AB与线段OA的斜率之比。

$$q = \frac{K_{AB}}{K_{OA}} \quad (1)$$

式中:q为屈服后刚度比;K<sub>AB</sub>为滞回曲线屈服后刚度;K<sub>OA</sub>为弹性刚度。

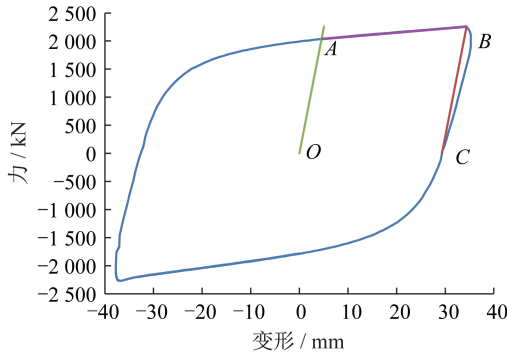


图7 滞回曲线屈服后刚度确定方法

Fig. 7 Determination of post-yield stiffness according to hysteretic curve

按照上海市《建筑消能减震及隔震技术标准》(DG/TJ 08-2323—2020)<sup>[18]</sup>的规定,滞回曲线屈服后刚度与变形幅值有关,不同变形幅值加载级下的屈服后刚度会发生变化。试验测得的不同变形幅值下屈服后刚度比及等效阻尼系数如表2所示。由表2可知,当变形幅值由 $H/250$ ( $H$ 为墙高)逐渐加载至 $H/50$ 时,构件的屈服后刚度比由0.60减小至0.08,变形越大构件的屈服后刚度比越小,这是因为随着变形增大,防屈曲钢板墙的芯板屈服程度加深,而变形达到 $H/50$ 时,塑性变形充分发展,模型呈现良好的消能状态。

表2 不同变形幅值下的屈服后刚度比

Table 2 Post-yield stiffness ratios under different deformations

变形幅值	屈服后刚度比/%	等效阻尼系数
$H/250$	60.93	0.06
$H/150$	43.51	0.10
$H/100$	25.74	0.18
$H/75$	17.05	0.25
$H/50$	8.57	0.35

#### 4 屈服后刚度影响参数分析

为研究防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响参数,采用ABAQUS软件,建立有限元模型并依据试验结果校核有限元模型,基于校核后的有限元模型分析不同参数对屈服后刚度的影响程度。

##### 4.1 模型建立

在有限元模型中采用C3D8R单元来模拟试件钢材,金属耗能板与约束钢板之间产生的摩擦接触设置为表面与表面接触,由于耗能板的两面均设有无黏结材料,从而降低了钢板间的摩擦力,因此接触属性中切向摩擦

系数设为0.02,法向定义为硬接触。边界条件和加载制度与试验一致,下连接板采用固定约束,同时约束上连接板的竖向自由度,通过在上连接板施加水平耦合位移模拟试验的加载模式。由于钢材在循环荷载作用下的本构关系与单调加载有较大差异<sup>[19]</sup>,采用ABAQUS软件中的混合强化combined模型来模拟钢材的材料性能时,各参数的设置参考文献[20]的研究成果。有限元模型如图8所示。

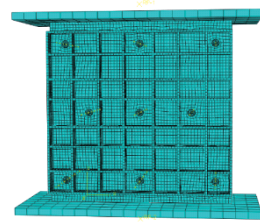


图8 有限元模型

Fig. 8 FEM

##### 4.2 试验结果与有限元结果对比

对比有限元模拟得到的滞回曲线与试验结果如图9所示。从图中可以看出,试验测试结果与有限元模拟结果基本接近。初始刚度和屈服后刚度(变形幅值为 $H/50$ )的对比如表3所示,可以看出,有限元分析与试验结果的误差约为10%,说明本文建立的有限元模型可以模拟防屈曲钢板墙的力学性能,可用于屈服后刚度的参数分析研究。

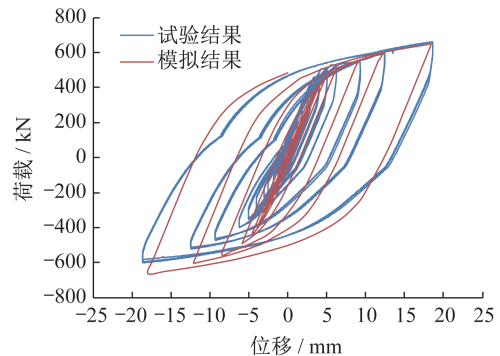


图9 试验与有限元滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of hysteretic curve between test and finite element

##### 4.3 关键参数对屈服后刚度的影响分析

以模型BRW-1为标准模型,设计了10组不同尺寸和芯板强度的模型,采用有限元模拟进行参数分析,模型设计参数如表4所示。

根据第2节分析可知芯板钢材类型、芯板高厚比、芯板厚度是影响刚度的主要因素,因此分别对这3个因素

表3 试验与有限元结果的对比

Table 3 Comparison between test and finite element results

来源	初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )
试验结果	118.78	10.18
有限元结果	117.71	11.38
误差	0.90%	10.54%

表4 模型设计参数

Table 4 Model design parameters

模型编号	材料	高厚比	高宽比
BRW-1	Q235B	92.5	1.2
BRW-2	LYP100	92.5	1.2
BRW-3	LYP160	92.5	1.2
BRW-4	Q355B	92.5	1.2
BRW-5	Q235B	116.0	1.2
BRW-6	Q235B	77.0	1.2
BRW-7	Q235B	66.0	1.2
BRW-8	Q235B	92.5	1.5
BRW-9	Q235B	92.5	1.8
BRW-10	Q235B	92.5	2.0

的影响进行分析。

芯板材料类型考虑了目前消能构件常用的低屈服点钢材 LYP100、LYP160 以及 Q235 低碳钢、Q355 低合金钢。

芯板高宽比定义为芯板高度与芯板最小宽度的比值。而芯板厚度通过高厚比来进行研究,高厚比定义为芯板高度与芯板厚度的比值。根据常用的防屈曲钢板墙设计参数,高宽比分别为 1.2、1.5、1.8、2.0。高厚比的改变则通过变化芯板厚度来实现,板厚分别为 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm。

4.3.1 芯板材料的影响

设计4组不同芯板材料的防屈曲钢板墙模型 BRW-1、BRW-2、BRW-3、BRW-4,芯板高厚比均为 92.5,高宽比

均为 1.2,研究不同材料的芯板对防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响。有限元分析中,芯板的材料模型均参考已有试验研究中的钢材应力-应变实测曲线模型<sup>[19-21]</sup>。不同材料防屈曲钢板墙的滞回曲线如图 10 所示。

从图中可以看出,改变芯板材料会使得防屈曲钢板墙的屈服承载力与屈服后刚度均发生较大变化。在变形幅值为  $H/100$  时 4 个模型的屈服后刚度比数值如表 5 所示。

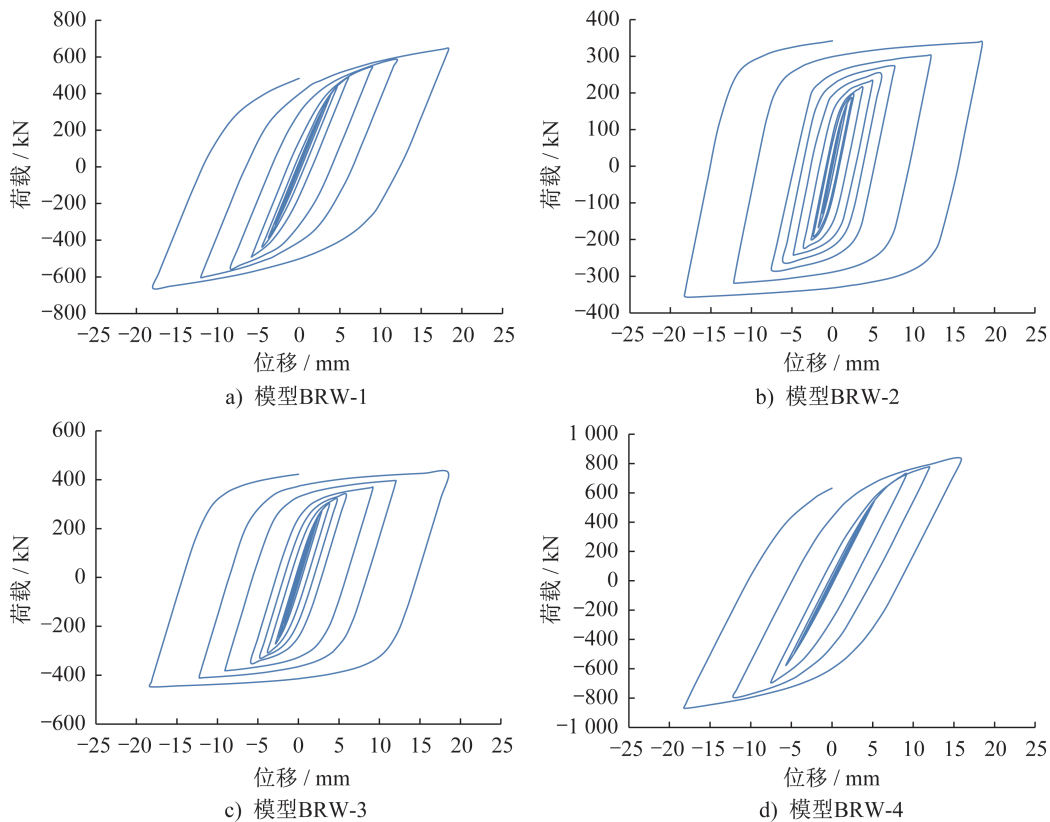


图 10 不同芯板材料的滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves with different core materials

表5 不同芯板材料的防屈曲钢板墙的屈服后刚度比

Table 5 Post-yield stiffness ratio of buckling-restrained steel plate wall with different core materials

模型编号	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度 比/%
BRW-1	117.71	11.38	9.66
BRW-2	112.73	2.15	1.91
BRW-3	111.02	2.92	2.63
BRW-4	110.71	22.23	20.08

通过分析以上结果可以发现,芯板材料强度的变化对构件的屈服后刚度影响较大,采用低屈服点钢材时,模型的屈服后刚度比较小。随着材料强度的降低,防屈曲钢板墙的屈服后刚度比均减小。相较于芯板材料为Q235的钢板墙,芯板材料为LYP100和LYP160的钢板

墙屈服后刚度比分别下降了80.23%和72.77%。模型BRW-4的芯板采用Q355钢材,由于该材料的屈服应变较大,因此,在其变形幅值与其他3种钢板墙的变形幅值相同时,模型BRW-4的屈服程度相对较低。这导致其屈服后刚度比相较于其他钢板墙的屈服后刚度比更大。因此,降低芯板材料强度可以降低防屈曲钢板墙的屈服后刚度,提高其耗能能力。

#### 4.3.2 芯板高厚比的影响

为研究芯板高厚比对防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响,以模型BRW-1为标准,另外设计了4个芯板高厚比不同的钢板墙模型BRW-1、BRW5、BRW-6、BRW-7,高厚比分别为92.5、116.0、77.0、66.0,芯板材料类型均为Q235B,芯板高宽比均为1.2,有限元分析得到的滞回曲线如图11所示。

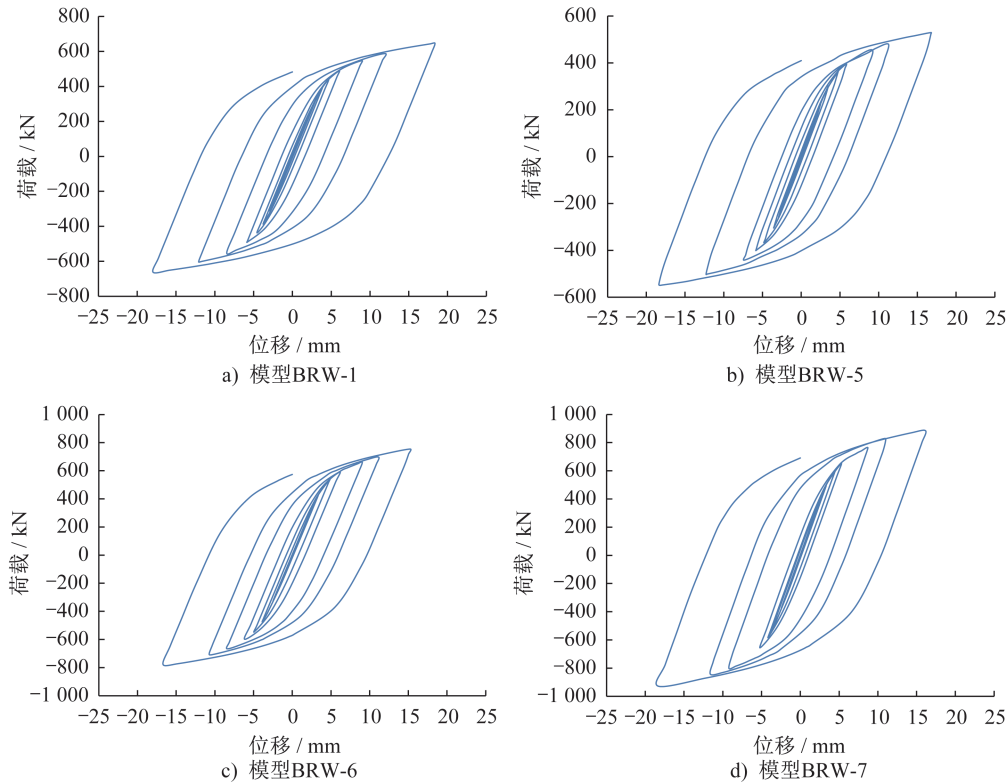


图11 不同高厚比的滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves with different height-thickness ratios

从图11可以看出,改变芯板厚度对屈服后刚度的影响较小,但对防屈曲钢板墙的屈服承载力和初始刚度影响较大,芯板厚度越厚,其屈服承载力与初始刚度越大。不同高厚比防屈曲钢板墙的初始刚度、屈服后刚度以及屈服后刚度比如表6所示。

对比分析表6的结果可以看出,随着高厚比增大,屈服后刚度逐渐变大,但相较于芯材强度,高厚比对其屈服后刚度的影响较小。

#### 4.3.3 芯板高宽比的影响

为研究芯板高宽比对防屈曲钢板墙屈服后刚度的影响,同样设计了4种芯板高宽比不同的钢板墙模型BRW-1、BRW-8、BRW-9、BRW-10,高宽比分别为1.2、1.5、1.8、2.0,芯板钢材均采用Q235B钢材,芯板厚度均为10 mm。不同高宽比防屈曲钢板墙的滞回曲线有限元模拟结果如图12所示。

从图12的结果可以看出,高宽比对防屈曲钢板墙屈

表6 不同高厚比防屈曲钢板墙的屈服后刚度比

Table 6 Post-yield stiffness ratio of buckling-restrained steel plate wall with different height-thickness ratios of core plate

模型编号	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度 比/%
BRW-1	117.71	11.38	9.66
BRW-5	110.62	10.63	6.91
BRW-6	132.35	15.19	11.48
BRW-7	152.60	18.38	12.04

屈服后刚度以及初始刚度均有较大影响,4个模型的初始刚度、屈服后刚度以及屈服后刚度比如表7所示。

对比分析表7的结果可以看出屈服后刚度比随着芯板高宽比的增加而增大。模型BRW-10的屈服后刚度比为模型BRW-1屈服后刚度比的2倍。对于防屈曲钢板墙构件,其抗弯刚度和抗剪刚度均不可忽视,但随着高宽比增大,抗弯刚度对构件整体刚度的影响也变大,而防屈曲钢板墙的主要屈服形式为钢板剪切屈服,构件进入屈服阶段后抗剪刚度降低,抗弯刚度仍然基本保持在与弹性刚度接近的水平,因而,随着高宽比增大,屈服后刚度变大。这也说明高宽比对防屈曲钢板墙的屈服后刚度比有较大影响,在空间条件允许的情况下,应尽量避免设置大高宽比的防屈曲钢板墙,防止其屈服后刚度比过大,影响构件的耗能性能。

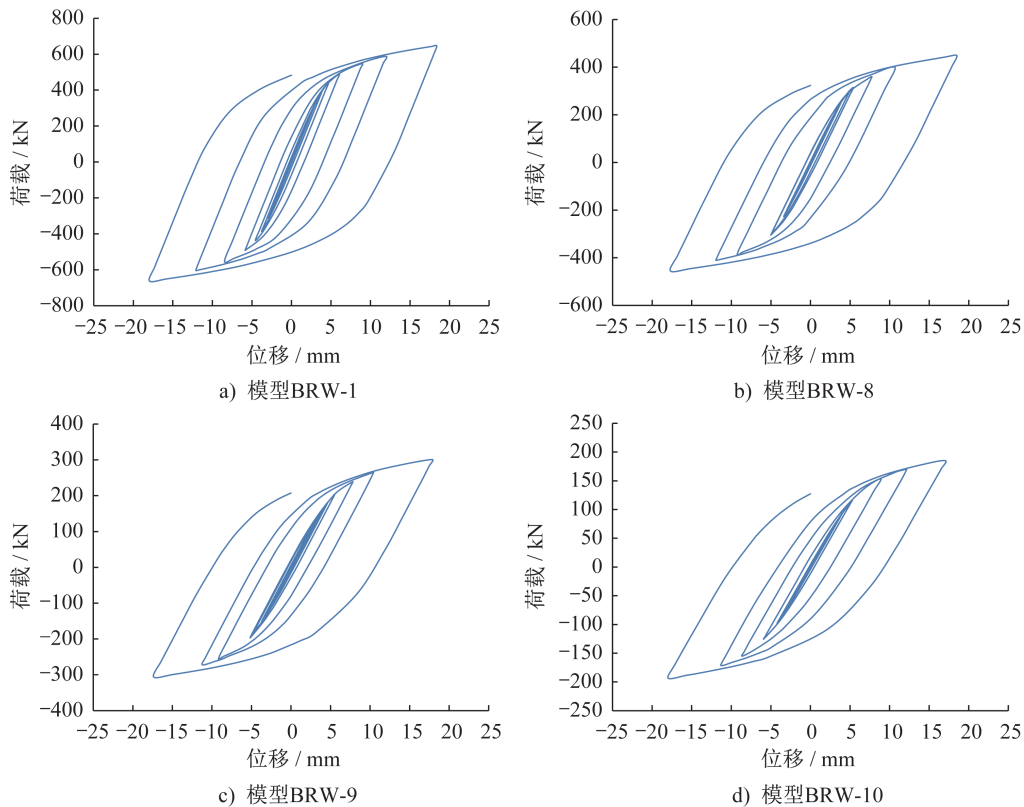


图12 不同高宽比的滞回曲线

Fig. 12 Hysteretic curves with different height-width ratios

表7 不同高宽比防屈曲钢板墙的屈服后刚度比

Table 7 Post-yield stiffness ratio of buckling-restrained steel plate wall with different height-width ratios

模型编号	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度 比/%
BRW-1	117.71	11.38	9.66
BRW-8	80.66	9.58	11.88
BRW-9	50.37	7.13	14.15
BRW-10	30.34	5.67	18.68

4.3.4 屈服后刚度影响参数小结

根据上述分析,芯板的钢材类型和高宽比对防屈曲钢板墙屈服后刚度影响较大,因此针对两个主要影响因素进行进一步分析,并通过数值分析结果拟合出不同芯板钢材类型的防屈曲钢板墙的屈服后刚度比与芯板高宽比之间的关系式。

5 屈服后刚度比拟合式

防屈曲钢板墙一般应用于钢结构建筑,而钢结构建筑的弹塑性层间位移角限值为1/50,因此在确定屈服后

刚度比的计算式时,基于1/50钢板墙高度变形状态下的力-变形滞回曲线计算得到。

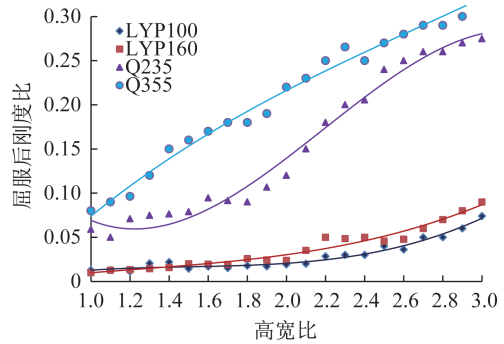
基于有限元分析软件ABAQUS分别建立芯板为LYP100、LYP160、Q235、Q355四种材料的防屈曲钢板墙分析模型。采用实测的应力-应变曲线模拟材料性能,高宽比在1.0~3.0范围内变化。不同高宽比构件在变形幅值为H/50下的屈服后刚度比计算结果如表8所示。

**表8 防屈曲钢板墙的屈服后刚度比分析结果**  
**Table 8 Post-yield stiffness ratio of buckling-restrained steel plate wall**

高宽比	屈服后刚度比			
	LYP100 芯板	LYP160 芯板	Q235芯板	Q355芯板
1.0	0.01	0.01	0.06	0.08
1.1	0.01	0.01	0.05	0.09
1.2	0.01	0.01	0.07	0.10
1.3	0.02	0.01	0.07	0.12
1.4	0.02	0.02	0.08	0.15
1.5	0.01	0.02	0.08	0.16
1.6	0.02	0.02	0.09	0.17
1.7	0.02	0.02	0.09	0.18
1.8	0.02	0.03	0.09	0.18
1.9	0.02	0.02	0.11	0.19
2.0	0.02	0.02	0.12	0.22
2.1	0.02	0.04	0.15	0.23
2.2	0.03	0.05	0.18	0.25
2.3	0.03	0.05	0.20	0.27
2.4	0.03	0.05	0.21	0.25
2.5	0.04	0.05	0.24	0.27
2.6	0.04	0.05	0.25	0.28
2.7	0.05	0.06	0.26	0.29
2.8	0.05	0.07	0.26	0.29
2.9	0.06	0.08	0.27	0.30
3.0	0.07	0.09	0.27	0.33

从表8可以看出,材料强度越高,屈服后刚度比越大,同时屈服后刚度比随着高宽比增大而增大。

基于表8的计算结果,运用曲线拟合法,将离散数据公式化,采用多项式拟合,为提高拟合精度,相关系数 $R^{2y}$ 应不低于0.95,拟合曲线如图13所示,拟合式如表9所示。



**图13 屈服后刚度比拟合曲线**  
**Fig. 13 Fitting curve of post-yield stiffness ratio**

拟合得到的防屈曲钢板墙屈服后刚度比与芯板高宽比的函数如式(9)所示:

$$q = \alpha_1 \left(\frac{H}{B}\right)^3 + \alpha_2 \left(\frac{H}{B}\right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{H}{B}\right) + \alpha_4 \quad (9)$$

式中:q为屈服后刚度比;H为芯板的高度;B为芯板的宽度。该计算式适用于I型芯板,且芯板高宽比在1~3范围内的防屈曲钢板墙。

- 对于LYP100芯板防屈曲钢板墙有:  
 $\alpha_1=0.014\ 3, \alpha_2=-0.064\ 2, \alpha_3=0.100\ 4, \alpha_4=-0.037\ 7$ ;
- 对于LYP160芯板防屈曲钢板墙有:  
 $\alpha_1=0.007\ 5, \alpha_2=-0.027\ 0, \alpha_3=0.048\ 9, \alpha_4=-0.019\ 5$ ;
- 对于Q235芯板防屈曲钢板墙有:  
 $\alpha_1=-0.062\ 6, \alpha_2=0.411\ 2, \alpha_3=-0.724\ 6, \alpha_4=0.445\ 3$ ;
- 对于Q355芯板防屈曲钢板墙有:  
 $\alpha_1=0.009\ 1, \alpha_2=-0.073\ 6, \alpha_3=0.299\ 1, \alpha_4=-0.160\ 7$ 。

## 6 结论

(1) 基于等效阻尼系数的基本理论,针对呈现双线

**表9 曲线拟合式**  
**Table 9 Curve-fitting formula**

芯板材料	拟合式	相关系数 $R^2$
LYP100	$y=0.014\ 3x^3-0.064\ 2x^2+0.100\ 4x-0.037\ 7$	0.967 5
LYP160	$y=0.007\ 5x^3-0.027\ 0x^2+0.048\ 9x-0.019\ 5$	0.960 5
Q235	$y=-0.062\ 6x^3+0.411\ 2x^2-0.724\ 6x+0.445\ 3$	0.980 9
Q355	$y=0.009\ 1x^3-0.073\ 6x^2+0.299\ 1x-0.160\ 7$	0.985 4

性随动强化特征的金属消能构件,推导了等效阻尼系数与屈服后刚度比的计算式,计算结果表明,屈服后刚度比对等效阻尼系数的影响较大,随着屈服后刚度比的增大,等效阻尼系数减小。延性系数为24,屈服后刚度比为0.01所对应的等效阻尼系数是屈服后刚度比为0.05对应值的1.82倍。

(2) 对于工程中应用的防屈曲钢板墙这种新型金属消能构件,其屈服后刚度主要与芯板钢材类型、芯板高宽比有关,当采用低屈服点钢材时,其屈服后刚度较小,消能力更强。相同高宽比的防屈曲钢板墙,在变形幅值为1/50的构件高度下,以Q355钢材为芯材的构件屈服后刚度比为LYP100芯材对应值的5~11倍。

(3) 基于有限元分析结果,提出了不同芯板材料类型的防屈曲钢板墙屈服后刚度比的近似计算方法,可供工程参考。

## 参考文献:

- [1] CHRISTOPOULOS C, PAMPANIN S. Towards performance-based seismic design of mdof structures with explicit consideration of residual deformations [J]. IEST Journal of Earthquake Technology, 2004, 41(1): 53-73.
- [2] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 17-29. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.02.009.  
YE Lieping, LU Xinzheng, MA Qianli, et al. Influence of post-yielding stiffness to seismic response of building structures[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 17-29. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.02.009. (in Chinese)
- [3] 经杰, 叶列平, 钱稼茹. 双重抗震结构体系在高层建筑中的应用[J]. 建筑科学, 2001, 17(1): 42-45, 58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2001.01.010.  
JING Jie, YE Lieping, QIAN Jiaru. Applications of dual seismic structural system in highrise buildings [J]. Building Science, 2001, 17(1): 42-45, 58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2001.01.010. (in Chinese)
- [4] 傅秀岱, 王振永, 谭昆仑. 新型减震耗能双重抗震结构体系[J]. 工程力学, 2003(增刊): 557-560.  
FU Xiudai, WANG Zhenyong, TAN Kunlun. New dual seismic structural system with shock absorption and energy dissipation [J]. Engineering Mechanics, 2003 (Suppl.): 557-560. (in Chinese)
- [5] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural control: past, present, and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897).
- [6] 郭彦林, 董全利, 周明. 防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 31-39, 47. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.01.005.  
GUO Yanlin, DONG Quanli, ZHOU Ming. Tests and analysis on hysteretic behavior of buckling-restrained steel plate shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 31-39, 47. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.01.005. (in Chinese)
- [7] 李国强, 金华建, 孙飞飞, 等. 屈曲约束钢板剪力墙约束板研究(II): 承载力需求及试验验证[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 49-56, 67. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.07.004.  
LI Guoqiang, JIN Huajian, SUN Feifei, et al. Research on buckling restrainers in buckling-restrained steel plate shear walls (II)—strength requirement and experimental validation [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 49-56, 67. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.07.004. (in Chinese)
- [8] 谭平, 李高仰, 李洋, 等. 防屈曲加劲肋钢板剪力墙试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4): 190-197. DOI: 10.13197/j.eeev.2015.04.190.tanp.022.  
TAN Ping, LI Gaoyang, LI Yang, et al. Experimental study on buckling-restrained and stiffened steel plate shear wall [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(4): 190-197. DOI: 10.13197/j.eeev.2015.04.190.tanp.022. (in Chinese)
- [9] 陆烨, 李国强, 孙飞飞. I形大高宽比屈曲约束钢板剪力墙的试验和理论研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 45-52. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.10.016.  
LU Ye, LI Guoqiang, SUN Feifei. Experimental and theoretical study on slim I-shape buckling-restrained steel plate shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 45-52. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.10.016. (in Chinese)
- [10] 马宁, 苏利刚. 剪切型防屈曲钢板阻尼器的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 148-157. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.11.017.  
MA Ning, SU Ligang. Experimental study on hysteretic behavior of shear type buckling restrained shear panel dampers [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 148-157. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.11.017. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Seismic Energy Dissipation of Buildings: JGJ 297—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [12] JIN S S, BAI J L, OU J P. Seismic behavior of a buckling-restrained steel plate shear wall with inclined slots [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 1-11. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.10.005.
- [13] 王威, 张龙旭, 苏三庆, 等. 波形钢板剪力墙抗震性能试验研

- 究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 36-44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.05.005.
- WANG Wei, ZHANG Longxu, SU Sanqing, et al. Experimental research on seismic behavior of corrugated steel plate shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 36-44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.05.005. (in Chinese)
- [14] JIN S S, BAI J L, et al. Experimental investigation of buckling-restrained steel plate shear walls with inclined-slots [J]. Journal of Constructional Steel Research, 155: 144-156.
- [15] EMAMI F, MOFID M, VAFAI A. Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls [J]. Engineering Structures, 2013, 48: 750-762. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.11.028.
- [16] 张延年, 杨哲, 吴献, 等. 全钢防屈曲钢板剪力墙抗震性能模型试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(3): 336-341. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2021.03.17.
- ZHANG Yannian, YANG Zhe, WU Xian, et al. Model test of seismic behavior of all-steel anti-buckling steel-shear-wall [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(3): 336-341. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2021.03.17. (in Chinese)
- [17] 孙飞飞, 李国强, 宫海, 等. 耗能钢支撑及钢板剪力墙结构设计指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015: 14-141.
- SUN Feifei, LI Guoqiang, GONG Hai, et al. Guide for structural design of energy dissipation steel bracings and steel plate shear walls [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015: 14-141. (in Chinese)
- [18] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 建筑消能减震及隔震技术标准: DG/TJ 08-2323—2020[S]. 上海: 同济大学出版社, 2020.
- Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of Shanghai. Standard for Building Energy Dissipation and Isolation Design: DG/TJ 08-2323—2020[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2020. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 王元清, 关阳, 刘明, 等. 建筑结构钢材及其焊缝循环本构模型的实验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(增刊2): 1-8. DOI: 10.11784/tdxbz201904092.
- WANG Yuanqing, GUAN Yang, LIU Ming, et al. Experimental study of a cyclic constitutive model of building structure steel and its weld [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (Suppl. 2): 1-8. DOI: 10.11784/tdxbz201904092. (in Chinese)
- [21] 王萌, 钱凤霞, 杨维国, 等. 低屈服点钢材与Q345B和Q460D钢材本构关系对比研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 60-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0051.
- WANG Meng, QIAN Fengxia, YANG Weiguo, et al. Comparison study on constitutive relationship of low yield point steels, Q345B steel and Q460D steel [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 60-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0051. (in Chinese)