

基于响应面法的剪力板阻尼器设计优化*

DESIGN OPTIMIZATION OF A SHEAR PANEL DAMPER BASED ON THE RESPONSE SURFACE METHOD

马俊峰** 唐立平 迟圣威 张 韬 钱王欢

(无锡职业技术学院 机械技术学院, 无锡 214121)

MA JunFeng TANG LiPing CHI ShengWei ZHANG Tao QIAN WangHuan

(Mechanical Institute of Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China)

摘要 为了提高剪切面板阻尼器(Shear Panel Dampers, SPD)在大塑性应变范围内的稳定性和变形能力。利用响应面法对 SPD 进行优化,采用有限元法对不同宽度和厚度的 SPD 进行分析,并选取应变集中系数作为优化目标,当迭代计算收敛时,得到了 SPD 的最佳参数,并通过试验验证。试验结果表明,基于响应面法的优化后的阻尼器能够同时表现出良好的稳定性和变形性,为大塑性变形范围内的结构优化设计提供有效方法。

关键词 剪切面板阻尼器 面外屈曲 稳定性 响应面法 参数优化

中图分类号 TB535.1

Abstract To improve stability and deformability of shear panel dampers (SPD) in the large plastic strain range, issues the optimization of an SPD which was attempted to use the response surface method and verified by tests. SPD with different widths and thicknesses were primarily analyzed by the finite element method (FEM), and the strain concentration factor was selected as the optimization target. Optimal parameters were obtained for the SPD when the iterative calculation is converged. According to the experimental results, the optimized damper based on the response surface method exhibits simultaneously a good stability and perfect deformability. This paper provides an effective method for the optimal design of the structure in the large plastic deformation range.

Key words Shear panel damper; Out-of-plane buckling; Stability; Response surface method; Parameter optimization

Corresponding author: MA JunFeng, E-mail: 604939220@qq.com, Tel: +86-510-81838711, Fax: +86-510-82838710

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51605280), and the Fifth Phase of "333 Project" Scientific Research Project Funding Plan of Jiangsu Province (No.BRA2019291).

Manuscript received 20200527, in revised form 20200818.

引言

近年来,剪切面板阻尼器(SPD)在高层建筑和桥梁的抗震设计中得到了广泛的应用。低屈服强度钢(LYS)由于其良好的塑性变形能力,通常被选为阻尼器材料。阻尼器具有良好的塑性变形能力和稳定的滞回性能,如图1所示。在建筑结构中安装阻尼器,可以有效消减地震所产生的大部分能量,从而保证主体结构的安全。一般来说,裂纹和面外屈曲是限制阻尼器材料利用率和结构性能的两个重要因素。当面板的宽厚比极小时,容易在面板的四角产生裂纹^[1]。相反,当面板的宽厚比极大时,很容易发生面外屈曲^[2-3],因

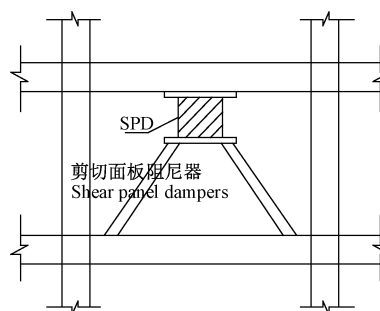


图1 阻尼器安装图

Fig.1 Installation diagram of a damper

* 20200527 收到初稿, 20200818 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51675182), 江苏省第五期“333 工程”科研项目计划 (BRA2019291) 资助。

** 马俊峰, 男, 1978 年 9 月生, 江苏如皋人, 汉族, 无锡职业技术学院讲师, 硕士。主要研究方向为机械结构性能优化。

此存在一个理想宽厚比。在以往的研究中,学者们尝试过几种优化方法以获得 SPD 的最大变形能力。为了缓解面板转角处的应力集中问题,国内外学者进行了基于裂纹破坏模式的板形优化设计。采用双向进化结构优化算法对 Ghabraie K 和 Chan R 等提出的槽型减振器进行拓扑优化,可以有效提高阻尼器的耗能能力和应力分布^[4]。Liu Y 和 Masatoshi S 利用响应面法对正方形 SPD 的形状进行了优化,SPD 的优化后的形状由直线组成^[5]。针对非线性问题,Deng K 等采用模拟退火算法对矩形 SPD 的形状进行优化,SPD 的优化形状由圆弧组成^[6]。上述研究表明,在不显著提高 SPD 变形能力的前提下,对 SPD 进行变截面形状优化,以提高其耗能能力,最多只能达到变形能力的 25%。

面外屈曲是获得 SPD 大变形能力的主要障碍,而面内变形是获得 SPD 最大变形能力的关键因素。因此,提出了横向、纵向和交叉加强筋^[7]来防止 SPD 的面外屈曲。虽然加强筋可以抑制平面外屈曲,但由于加强筋焊缝容易产生裂纹,SPD 的变形能力实际并没有提高。

如上所述,提高 SPD 变形能力的有效途径是检测无加强筋时板的稳定性。Love A E H 首次研究了剪切载荷下薄板稳定性的理论分析^[8]。Poniatovskii V^[9]研究了中厚板剪切变形对稳定性的影响。根据稳定性理

论,在不考虑塑性变形的情况下,当强度达到临界值时,就会发生屈曲。此外,SPD 的稳定性也会受到边界条件和加载顺序的影响。

在本文中,采用最新为 SPD 开发的理想边界条件^[10],确定面板尺寸变量,并在试验前对 SPD 有限元分析。随后根据有限元分析的结果选择应变集中作为优化目标,通过响应面回归分析法得到面板的最优变量。最后,通过试验验证优化后 SPD 的变形能力。

1 仿真和测试

1.1 LYS 的组成方程

为了保证仿真的有效性,通常需要建立一个精确模型来描述低屈服强度钢剪切板阻尼器(LYSPD)的滞回特性。在最近的研究中,通过结合试验结果和双表面模型理论,提出具有物理解释的 LYS 精确模型,如图 2a 所示,其公式为

$$\sigma = \sigma_y + c\varepsilon^n + \alpha \quad (1)$$

其中, σ_y 取 100 MPa, c 取 1.85, n 取 0.267, α 取 53, ε 为塑性应变。

用该模型计算 LYSPD 在剪切荷载作用下的滞回性能,与仿真结果高度吻合,如图 2b 所示^[11],试验与仿真结果误差不超过 5%。因此,在本文研究中,将上述模型的表达式直接作为有限元法中 LYS 的本构方程。

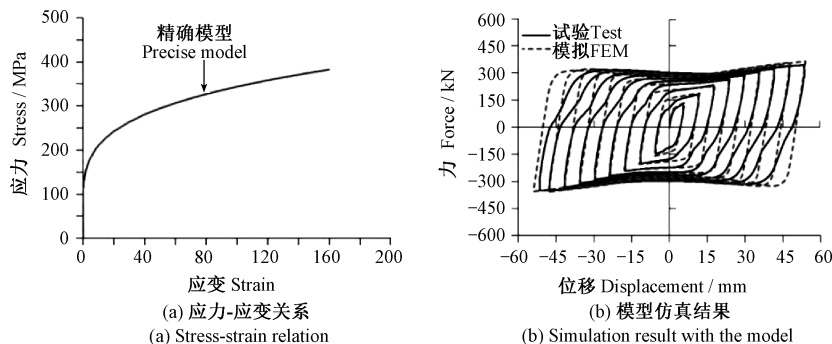


图 2 LYS160 本构模型

Fig.2 Constitutive model for LYS160

1.2 LYSPD 仿真细节

选取 Solid186 网格,其支持塑性、超弹性和大变形。此外,面板的大塑性变形使得有限元模型具有高度的非线性,通过 Ansys 中使用 Nlgeom 选项开发的模型包含该功能。采用多种网格尺寸模拟了 LYSPD 的力-位移响应,当网格尺寸小于面板总尺寸的 1/20 时,力-位移响应没有变化。为了达到良好的收敛性,本文的网格尺寸选择为面板大小的 1/100。与自由网格法相比,容积扫描法,更能准确地描述 LYSPD 的剪切特性,如图 3 所示。

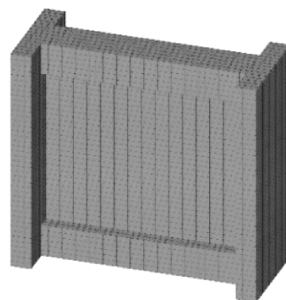


图 3 网格生成细节

Fig.3 Mesh generation detail

1.3 试验设备和加载路径

试验设备如图 4 所示,剪切夹具的两部分固定在基座上,而剪切夹具的一个滑块连接到执行器。由于滑块的两组滚动轴承被限制在垂直轨道上时,滑块只能垂直运动。因此,可通过诱导试样两端相对运动来进行剪切试验。

加载过程由计算机控制,如图 5 所示。本研究采用控制速度为 0.5 mm/s 的滞回增量准静态加载和 $\pm 5\%$ 的增量剪切应变(水平位移/高度)加载步。当力下降到历史最大力的 90% 时,试验暂停^[12-14]。

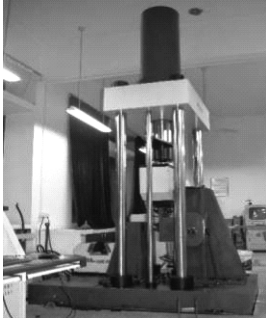


图 4 试验设备

Fig.4 Loading device

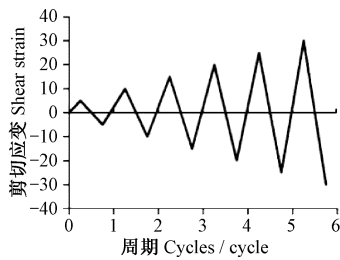


图 5 加载序列

Fig.5 Loading history

2 优化过程和结果

2.1 优化参数

由于面外屈曲对 LYSPD 的力学性能影响很大,因此以往的研究主要集中在薄板的稳定性分析上。根据经典薄板理论提出了屈曲比 R ,其公式为

$$R = \frac{W}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\tau_y}{k\pi^2 E}} \quad (2)$$

其中, E 是弹性模量(取 $206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$), ν 是泊松比(取 0.3), τ_y 是剪切屈服应力, t 和 W 分别表示剪切板两肋之间的厚度和距离。系数 k 是剪切屈曲系数,取决于腹板的边界条件和纵横比 w/d ,其中 d 是面板的高度。一般来说

$$\begin{cases} k = 5.35 + 4.0 (w/d)^2 & w/d \leq 1 \\ k = 5.35 (w/d)^2 + 4.0 & w/d \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

根据公式(3),在弹性变形假设的前提下,屈曲比 R 同时取决于材料性能和面板尺寸。当剪切面板呈方形,系数 k 固定为 9.35 时,材料性能和 w/t 是影响面板稳定性的两个重要因素。

然而,LYSPD 的稳定性不能用公式(3)来预测,因为薄板理论没有考虑剪切变形和塑性变形。此外,屈服强度随加载周期和加载幅度在塑性范围内的变化而变化,因此公式(1)中的屈服剪应力无法被接受。此外,即使强度的变化可以忽略不计,仍可以观察到连续的剪切变形,这一现象使得 LYSPD 的塑性稳定性分析更具挑战性。因此,到目前为止还没有有效的公式来准确地预测塑性阻尼结构的稳定性。

通过试验直接验证 LYSPD 的塑性稳定性具有最高可信度。由于试验耗时且成本较高,试验前往往需要通过模拟来寻找最优参数。一旦确定好阻尼器材料,阻尼器的滞回力学性能将主要取决于面板形状和尺寸。当面板是矩形时(图 6), w/d 和 w/t 成为影响面板稳定性的两个重要因素^[15]。因此,本文选择这两个参数作为优化设计变量。

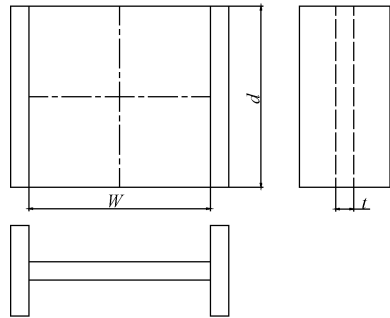


图 6 简化阻尼器的形状和截面尺寸

Fig.6 Shape and sectional dimension of simplified damper

2.2 优化目标

利用 LYS 的极限性能来实现 LYSPD 的耗能能力是确定阻尼器结构优化设计的唯一标准。往往通过完全限制 LYS 的应力和应变,来得到 LYSPD 的优化设计。根据 LYS 的应力-应变关系,应力随应变的增大而增大,呈正相关。因此,充分利用 LYS 的极限应变可以达到优化设计的目的。

事实上,由于面板尺寸效应的影响,LYS 的极限应变在 LYSPD 中因应变集中而往往不能被利用。面外屈曲和角部裂纹都是导致非均匀变形和产生应变集中的关键因素。通常,应变集中系数定义为

$$K_\varepsilon = \varepsilon_{\max} / \varepsilon_{\text{ave}} \quad (4)$$

其中, $\varepsilon_{\max}$ 是最大塑性应变, ε_{ave} 是平均塑性应变。

当 $\varepsilon_{\max}$ 等于 ε_{ave} ,也就是 $K_\varepsilon = 1$ 时,表示结构中产生均匀变形。较大的应变集中系数意味着面板的非均匀变形更严重。在这种情况下,非均匀变形会导致结构

早期失效,从而影响材料极限性能的利用。因此,应变集中系数是评价 LYSPD 变形能力和优化设计的理想参数。

本文以方形面板为研究对象,参数 w 和 t 作为优化设计变量,优化目标是获得最佳的应变集中系数 K_e ,收敛准则为应变集中系数 K_e 相邻两次迭代偏差小于 1%,优化问题可以简单地归纳为

$$\begin{cases} K_e(w, t)_{\min} \\ 48 \leq w \leq 192 \\ 2 \leq t \leq 11 \end{cases}$$

2.3 优化方法

为了解决上述参数优化问题,采用全因子实验法和循环弹塑性分析相结合的响应面法。同时,将求解非线性约束优化问题的连续二次规划算法加入到优化过程中。优化问题流程图如图 7 所示。

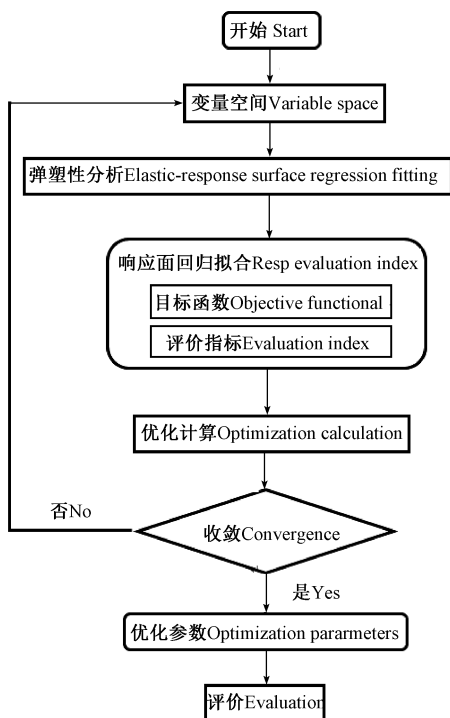


图 7 优化流程图

Fig.7 Optimized flow chart

设计参数的主要变量空间是根据以往研究的试验结果所确定的。在设计变量发生变化后,用 Ansys 进行 LYSPD 的相应弹塑性响应分析,就可得到不同设计变量下的应变集中系数。根据响应面回归分析,利用多项式方程拟合应变集中系数的三维轮廓。当优化结果没有达到收敛时,将提出一个新的变量空间,重复上述过程,直到得到最终设计目标^{[16]1460-1465}。基于回归方程的最优参数可以作为 LYSPD 的临界稳定性。

响应面法的基本原理是一种统计技术,用于获得一组自变量与系统响应之间的近似关系,其表达式如

下

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq p} \beta_{ij} x_i x_j + \delta \quad (5)$$

其中, Z 是 K_e 的预测响应值。 Z 取决于 x_i 和 x_j 的变量水平; x_i 和 x_j 表示 w 和 t ; $\beta_0, \beta_i, \beta_j$ 和 β_{ij} 分别表示回归系数, δ 表示随机误差^{[16]1460-1465}。

2.4 优化流程

基于全因子实验法,选取两个变量时,初始设计空间中有 9 个实验点。根据以往的研究,当宽度与厚度比小于 10 时,容易产生角裂纹^[17]。因此,初始设计空间设置为 $w=48 \sim 192$ 和 $t=2 \sim 11$ 。通过对每个试样弹塑性分析得到的应变集中系数如表 1 所示。

表 1 第一次迭代中的设计空间

Tab.1 Design space in the first iteration

样本 Specimen	宽度 Width w/mm	高度 Height d/mm	厚度 Thickness t/mm	w/d	w/t	K_e
CP48-2	48	120	2	0.4	24	5.589
CP48-6	48	120	6	0.4	8	2.478
CP48-10	48	120	10	0.4	4.8	1.767
CP120-2	120	120	2	1	60	4.154
CP120-6	120	120	6	1	20	2.340
CP120-10	120	120	10	1	10	1.584
CP192-2	192	120	2	1.6	96	6.094
CP192-6	192	120	6	1.6	32	2.643
CP192-10	192	120	10	1.6	19.2	1.964

根据正交多项式,应变集中系数可表示为

$$K_e = 21.3687 - 12.8426W + 3.8198t - 17.0080W^2 + 10.2281t^2 - 3.0422Wt + 5.3083W^2t - 3.1927Wt^2 + 0.9496W^2t^2 \quad (6)$$

拟合指数见表 2。这些统计指标并非完全独立,在回归分析中有一定的相关性。确定系数 R -square 达到 0.959 1,说明拟合精度很好。SSE 和 RMSE 分别表示误差平方和与拟合标准差,分别为 0.929 9 和 0.556 7,表明拟合效果也很好。

表 2 响应面拟合的评价指标

Tab.2 Evaluation indices of the response surface fitting

目标响应 Target response	确定系数 R -square	误差平方和 SSE	拟合标准差 RMSE
评估标准 Judge value K_e	1	0	0
	0.959 1	0.929 9	0.556 7
误差 Error/%	4.09	—	—

图 8 为基于第一次迭代的应变集中系数的三维响应面图。宽度空间两端应变集中系数相对较大,中间较小。与宽度的规律性相反,当厚度约为 9 mm 时,应变集中系数随厚度的增加而减小。从图中可以推断,最佳宽度和厚度值位于初始设计变量空间中。

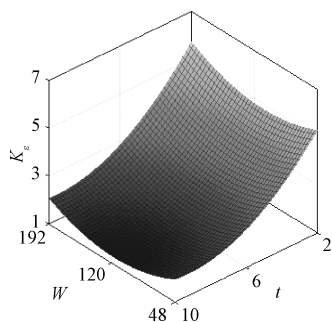


图 8 第一次迭代中的三维响应曲面图

Fig.8 Three-dimensional response surface plot in the first iteration

2.5 优化结果

根据第一次优化计算,设计变量的 w 和 t 最优值分别为 116.0 mm 和 9.4 mm,目标响应值为 1.25。由于响应面法迭代计算时存在线性化误差,因此需要多次迭代优化直至收敛。第二次最优迭代的设计变量空间是根据第一次优化结果而确定一个对称范围, w 和 t 的范围很窄(w 从 96 mm 到 136 mm, t 从 7 mm 到 11 mm),以此类推循环进行弹塑性分析得到的优化结果如表 3 所示^[18]。

表 3 每次优化设计的迭代空间

Tab.3 Iteration space for each optimization design

迭代次数 Iterations	w	t	Opt. w, t	K_s
1	48 120 192	2, 6, 10	116.0, 9.4	1.25
2	112 117 122	8.5, 9, 9.5	118.4, 9.3	1.29
3	108 118 128	8, 9, 10	117.3, 9.2	1.32
4	96 116 136	7, 9, 11	118.7, 9.3	1.33

经过四次响应面迭代计算,如图 9 所示,应力集中系数 K_s 的迭代误差曲线逐渐收敛,第四次应变集中系数为最优极值,优化阻尼器的宽度和厚度为 118.7 mm 和 9.3 mm。根据优化后 LYSPD 的宽度和厚度,通过仿真分析得到了阻尼器的最大塑性应变和平均塑性应变。应变集中系数由方程(5)计算得出,近似等于 1.4。与第四次优化结果相比,误差约为 5%,表明理论计算与仿真分析一致。图 10 结果表明,优化后的 LYSPD 的塑性应变分布不均匀,角部塑性应变集中得到缓解,变形能力得到提高。

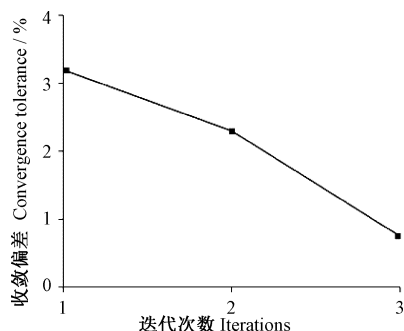


图 9 应力集中系数收敛曲线

Fig.9 Convergence curve of stress concentration factor



图 10 优化设计后的应变分布

Fig.10 Strain distribution after optimal design

3 试验验证

为了验证优化结果的有效性,设计了不同尺寸的 LYSPD,如表 4 所示。将所有 LYSPD 的宽度尺寸和高度尺寸作为常数,采用四种不同的厚度尺寸进行试验。

表 4 试样参数的细节

Tab.4 Details of the specimen parameters

样本 Specimen	宽度 Width w /mm	高度 Height d /mm	厚度 Thickness t /mm	模拟 Simulation	试验 Test
CP118-6	118	120	6		✓
CP118-8	118	120	8	✓	✓
CP118-10	118	120	10		✓
CP118-12	118	120	12	✓	✓

3.1 故障模式

试验样本的失效模式如图 11 所示。当 CP118-6 的剪切应变达到 30% 时,观察到随着加载幅度的增大,面外屈曲变形变大,导致试样失效。在 CP118-8 角出现裂纹之前,可以观察到轻微的面外屈曲(图 11b)。CP118-10 和 CP118-12 的破坏模式(图 11c 和图 11d)都是面板角部应力集中引起的裂纹。

在 LYSPD 试样中的应变分布如图 12 所示。图 12 的仿真结果与图 11 中的试验失效模式一致。面外屈曲在 CP118-6 占主导地位。当厚度大于 6 mm(CP118-8)时,应变分布高度均匀。然而随着面板厚度的增加(CP118-10 和 CP118-12),角部应变集中变得很高。

3.2 滞后曲线

从模拟和试验中获得的力-剪应变滞后曲线如图 13 所示。实线和虚线分别表示试验和模拟的滞后曲线。可以看出,只有 CP118-6 剪切应变大于 30% 时除外,其余试验结果与模拟结果几乎重叠。与试验结果相比,CP118-6 模拟中受力减小是由于失稳现象所导致,因为在分析中没有考虑失稳后本构方程的修正。总的来说,在本研究中,模拟结果是可信的。

试验结果表明,试样的最大变形能力为 55% (CP118-8)。这意味着变形能力可能受到面外屈曲和

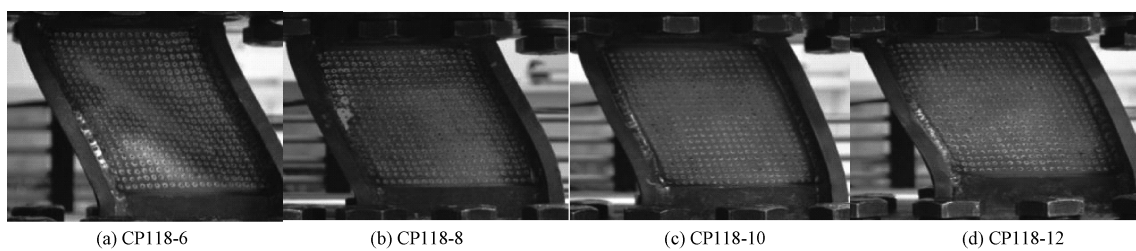


图 11 试验样本的失效模式

Fig.11 Failure modes of the specimens

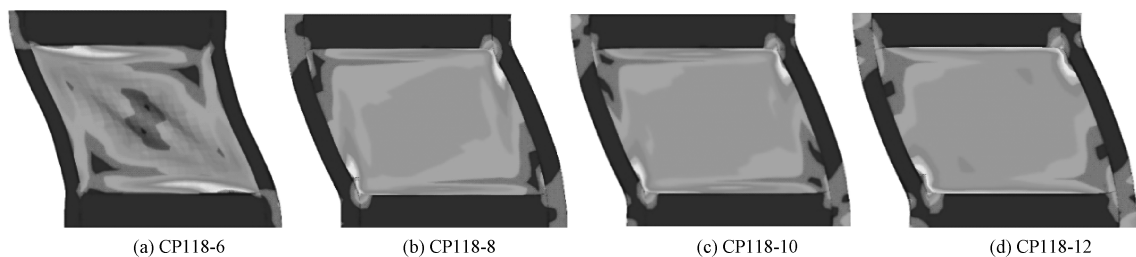


图 12 样本中的应变分布

Fig.12 Strain distribution in the specimens

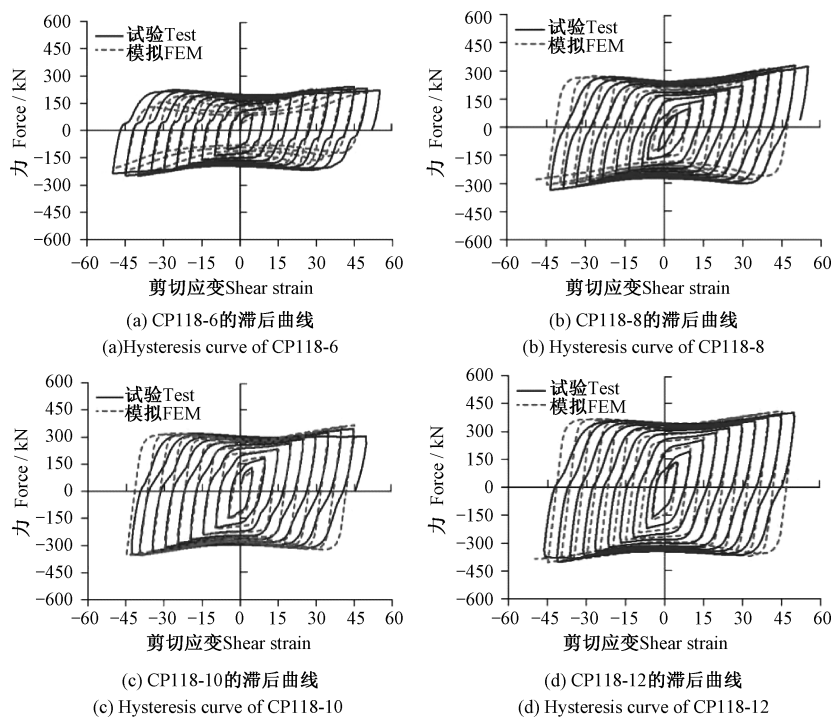


图 13 试验和模拟得到的滞后曲线比较

Fig.13 Comparison of the hysteresis curves obtained from the tests and simulations

角应力集中的影响。只有当剪切板在大塑性变形下处于临界稳定状态时,结构才能获得最大变形能力。响应面法是预测 LYSPD 最优参数的有效方法。

此外,当厚度大于 8 mm 时,阻尼力 (CP118-8、CP118-10 和 CP118-12) 无显著性差异。CP118-8 具有最大的变形能力和剪切力,其耗能能力也是最好的,这与优化设计中提出的参数接近。因此,应变集中系数是评价 LYSPD 性能的最佳指标。

4 结论

本研究提出了一种基于有限元结果的响应面方法来优化 LYSPD 的参数,将应变集中系数作为反映 LYSPD 性能的优化指标。对优化后的参数进行了几次试验验证,主要结论可归纳如下:

1) 面外屈曲和角应力集中都会导致 LYSPD 变形能力的下降。剪切面板的临界稳定性保证了 LYS 极

限性能的利用。

2) 利用 LYS 的精确本构关系, 通过仿真可以很好地描述 LYSPD 的性能, 响应面法也是一种有效的优化方法。

3) LYSPD 的最佳宽度和厚度值约为 118.7 mm 和 9.3 mm。

参考文献 (References)

- [1] Liu Y, Aoki T, Takaku T, et al. Cyclic loading tests of shear panel damper made of low yield steel [J]. Kozo Kogaku Ronbunshu A, 2007(53):560-567.
- [2] Alinia M, Hosseinzadeh S A, Habashi H. Influence of central cracks on buckling and post-buckling behaviour of shear panels [J]. Thin-Walled Struct, 2007(45):422-431.
- [3] Maurya A, Egorova N, Eatherton M R. Development of buckling resistant steel plate shear walls [J]. In: Proceedings of the 2013 ASCE Structures Congress, 2013(3):2-4.
- [4] Ghabraie K, Chan R, Huang X, et al. Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy [J]. Eng. Struct., 2010, 32(8):2258-2267.
- [5] Liu Y, Masatoshi S. Shape optimization of shear panel damper for improving the deformation ability under cyclic loading [J]. Struct Multidisc Optim, 2013(48):427-435.
- [6] Deng K, Pan P, Sun J, et al. Shape optimization design of steel shear panel dampers [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014(99):187-193.
- [7] 黄 镇, 李芮秋, 刘 峰, 等. 改进型防屈曲剪切钢板阻尼器受力性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8):85-92.
HUANG Zhen, LI RuiQiu, LIU Feng, et al. Research on mechanical performance of improved buckling restrained shear panel damper [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8):85-92 (In Chinese).
- [8] Love A E H. The small free vibrations and deformation of a thin elastic shell [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1887(43):352-353.
- [9] Poniatovskii V. Theory for plates of medium thickness [J]. Journal of Applied Mathematics & Mechanics, 1962, 26(2):478-486.
- [10] Zhang C F, Zhu J J, Wu M P, et al. The lightweight design of a seismic low-yield-strength steel shear panel damper [J]. Materials, 2016, 9(6):424.
- [11] Zhang C, Wei Y, Wang L, et al. Hysteretic mechanical property of low-yield strength shear panel dampers in ultra-large plastic strain [J]. Eng. Struct., 2017(148):11-22.
- [12] 宋中霜, 李冀龙, 韩 露, 等. 低屈服点钢剪切板阻尼器滞回性能试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3):289-295.
SONG ZhongShuang, LI JiLong, HAN Lu, et al. Experimental study on hysteretic behavior of shear panel dampers made of steel with low yield point [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3):289-295 (In Chinese).
- [13] 张超锋, 张志胜, 武美萍, 等. 机能分离型软钢阻尼器的性能 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1):96-100.
ZHANG ChaoFeng, ZHANG ZhiSheng, Wu MeiPing, et al. Performance of low-yield-strength steel shear panel damper with function separate [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 35(1):96-100 (In Chinese).
- [14] 林 煜, 杨 森, 郭正兴, 等. 双拼工字型钢板阻尼器滞回性能试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5):911-917.
LIN Yu, YANG Sen, GUO ZhengXing, et al. Experimental study on hysteretic behaviors of duplex assembled I-shaped steel panel dampers [J]. Journal of South East University (Natural Science Edition), 2019, 49(5):911-917 (In Chinese).
- [15] Abebe D Y, Choi J H, Jeong S J. Effect of width-to-thickness ratio on large deformation in shear panel hysteresis damper using low yield point steel [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013:446-447; 2013:1460-1465.
- [16] 孙 权, 鹿业波, 陈建钧. 基于响应面法剪切修正 GTN 模型损伤参数的确定 [J]. 机械强度, 2019, 41(6):1460-1465.
SUN Quan, LU Ye Bo, CHEN JianJun. Determination of damage parameters of shear modified GTN model by response surface method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(6):1460-1465 (In Chinese).
- [17] Zhang C, Zhu T, Wang L, et al. Ultra-low cycle fatigue performance evaluation of the miniaturized low yield strength steel shear panel damper [J]. Construct. Steel Res., 2017(135):277-284.
- [18] 冀 伟, 邵天彦. 波形腹板钢箱-混凝土箱梁桥的有限元模型修正 [J]. 西南交通大学学报, 2020(5):1-8.
JI Wei, SHAO TianYan. Finite element model updating of box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020(5):1-8 (In Chinese).