

# 竖向加劲薄钢板剪力墙的抗侧性能研究

王应生, 贾贵强, 王先铁, 谢川东, 梁旭东

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 分析了竖向加劲薄钢板剪力墙的受力和变形, 提出了考虑加劲肋贡献的竖向加劲薄钢板剪力墙的抗侧刚度, 以及考虑屈曲后强度的竖向加劲薄钢板剪力墙的抗侧承载力计算公式. 构建梁柱铰接足尺模型进行有限元分析. 公式计算结果与有限元结果对比表明: 抗侧刚度及抗侧承载力计算值与有限元结果吻合较好; 竖向加劲肋的设置提高了薄钢板剪力墙的弹性屈曲应力, 考虑屈曲后强度的竖向加劲薄钢板剪力墙的抗侧承载力应包含弹性屈曲荷载和屈曲后强度的贡献. 竖向荷载会降低竖向加劲薄钢板剪力墙的抗侧刚度和抗侧承载力, 增大加劲肋数量可显著减小竖向荷载对竖向加劲薄钢板剪力墙抗侧刚度的影响, 增大加劲肋截面积对其影响较小.

**关键词:** 竖向加劲; 薄钢板剪力墙; 抗侧刚度; 抗侧承载力; 竖向荷载

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0495-10

## Investigation of lateral-resistant behaviour of thin steel plate shear walls with vertical stiffeners

WANG Yingsheng, JIA Guiqiang, WANG Xiantie, XIE Chuandong, LIANG Xudong

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In this paper, the mechanical behaviour and deformation of the thin steel plate shear wall with vertical stiffeners (SPSW-VS) were studied. The formulas of lateral stiffness with the contribution of stiffeners and lateral-resistant capacity of thin SPSW-VS considering post-buckling strength were obtained. Then the finite element analysis of full-scale models with pinned boundary connections was conducted, followed by comparison works. It is indicated that the predicted lateral stiffness and lateral-resistant capacity consisting buckling strength and post-buckling strength agree well with the numerical analysis results. An introduction of vertical stiffeners would increase the elastic buckling stress of the thin SPSW-VS. Moreover, vertical load would decrease the lateral stiffness and lateral-resistant capacity of the thin SPSW-VS, but this effect would be reduced significantly when increasing the number of stiffeners rather than the area of the stiffeners.

**Key words:** vertical stiffened; thin steel plate shear wall; lateral stiffness; lateral-resistant capacity; vertical load

钢板剪力墙(以下简称钢板墙)是一种新型抗侧力构件, 主要通过其抗剪性能来抵抗风或横向地震作用等侧向荷载. 薄钢板墙利用“拉力带”抵抗水平荷载, 具有刚度大、承载力高、延性好、抗震性能优异和经济性好等优点<sup>[1]</sup>, 受到研究者的广泛关注.

非加劲薄钢板墙屈曲噪声和面外变形较大, 滞回曲线“捏缩”明显, 风荷载或地震作用下, 舒适度不理想<sup>[2]</sup>. 合理设置加劲肋可缓解滞回曲线“捏缩”, 提高耗能能力、刚度和承载力. Alavi等<sup>[3]</sup>对 3 个 1/2 比例的单层钢板墙进行了试验研究, 结果表明, 斜加劲适用于中部开洞钢板墙,

提高了结构的刚度和强度. 陈国栋等<sup>[4]</sup>提出了以板的平均剪切应变相应的剪应力作为钢板墙承载能力的极限状态, 进而提出了十字加劲钢板墙抗剪极限承载力简化计算公式. 王先铁等<sup>[5]</sup>对方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板墙的研究表明, 加劲肋可有效限制钢板墙的面外变形, 提高结构的抗侧承载力和刚度.

以往研究中钢板墙大多采用十字加劲或斜加劲, 易发生加劲肋交叉焊接处钢板墙撕裂<sup>[6]</sup>. 此外, 虽然钢板墙主要作为水平抗侧力构件使用, 但实际工程中钢板墙会承受一定的竖向荷载. 为此, 研究者们提出对钢板墙设置竖向加劲肋. 聂

收稿日期: 2018-07-09

修改稿日期: 2020-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108369, 51678474), 陕西省自然科学基金资助项目(2018JM5065)

第一作者: 王应生(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事钢结构检测、鉴定与设计. E-mail: 813133700@qq.com

通信作者: 贾贵强(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢结构设计与研究. E-mail: 877045922@qq.com

建国等<sup>[7-8]</sup>对竖向加劲开洞钢板墙进行了数值分析,提出了适用于开洞加劲钢板墙的抗侧刚度和抗侧承载力计算公式和理论模型,但未考虑加劲肋的影响。童根树等<sup>[9]</sup>研究了竖向闭口加劲钢板墙的屈曲性能,得到了竖向闭口加劲肋的门槛刚度。马尤苏夫等<sup>[10]</sup>对竖向槽钢加劲钢板墙进行了屈曲分析和静力弹塑性分析,研究了加劲肋距边缘构件距离、钢板墙宽厚比、高宽比、肋板刚度比及柱子刚度等对钢板墙性能的影响。

本文提出了考虑竖向加劲肋影响的薄钢板墙抗侧刚度和考虑薄钢板墙屈曲后强度的抗侧承载力计算公式,并与有限元分析结果进行对比,验证了公式的合理性。研究了竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙抗侧性能的影响,可为工程应用提供参考<sup>[11]</sup>。

## 1 抗侧刚度

对于高厚比  $\lambda \geq 300$  的薄钢板墙,初始状态下,水平荷载作用下的总水平位移由弯矩引起的水平位移和剪力引起的水平位移两部分组成。

设置竖向加劲肋可以延缓薄钢板墙的屈曲,改善薄钢板墙的屈曲性能,即将薄钢板墙由整体失稳转变为被加劲肋分隔的区格板局部失稳,提高薄钢板墙的屈曲应力,减轻滞回曲线的“捏缩”,提高其耗能能力。此外,还可提高薄钢板墙的抗侧刚度。对于常用宽高比  $L/H = 1 \sim 3$  范围内,薄钢板墙的变形需同时考虑弯曲变形和剪切变形的影响。

图1所示为竖向加劲薄钢板墙的分析模型及计算简图。其中,薄钢板墙宽度为  $L$ ,高度为  $H$ ,  $EI_b$ 、 $EI_c$ 、 $EI_s$  分别为梁、柱及加劲肋抗弯刚度。为简化分析,采用如下假定:①框架梁、柱铰接;②框架梁、柱抗弯刚度无限大;③忽略梁、柱的轴向变形。因主要研究竖向加劲薄钢板墙的抗侧性能,假定①中将梁柱节点设计为铰接即可剔除框架的影响;假定②中梁柱抗弯刚度无限大是为

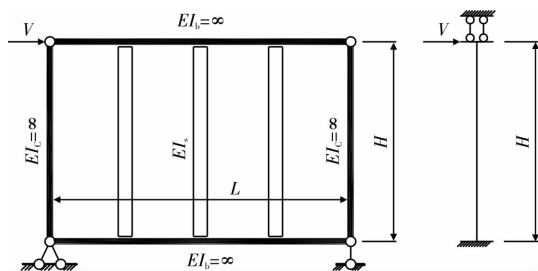


图1 分析模型及计算简图

Fig. 1 Analysis model and calculation diagram

了使钢板墙能够充分锚固,钢板墙拉力场能够充分开展;假定③基于水平荷载作用下,框架梁、柱因拉、压作用而产生的轴向变形与钢板墙的水平变形相比较小,可以忽略不计。

非加劲薄钢板墙的抗弯刚度  $K_{pf}$  为<sup>[8]</sup>

$$K_{pf} = \frac{12EI_p}{H^3} \quad (1)$$

其中,  $I_p = \frac{1}{12}tL^3$ 。

式中:  $E$  为钢材弹性模量;  $L$  为钢板墙宽度;  $H$  为钢板墙高度;  $t$  为钢板墙厚度。

考虑加劲肋对钢板墙弹性刚度的贡献。由于加劲肋两端的约束很弱,取加劲肋端部约束影响系数为 3<sup>[12]</sup>。为简化计算,取加劲肋长度为钢板墙高度  $H$ 。因此,加劲肋的抗弯刚度  $K_{sf}$  为

$$K_{sf} = \frac{3EI_s}{H^3} \quad (2)$$

其中,

$$I_s = mI_{s0} + \frac{1}{12}A_sL^2 \frac{m-1}{m+1} = mI_{s0} + \frac{1}{12}\varphi tL^3 \frac{m-1}{m+1}.$$

式中:  $I_{s0}$  为加劲肋自身中性轴惯性矩;  $A_s$  为加劲肋总截面积;  $\varphi$  为加劲肋总截面积与钢板墙横截面面积之比,  $\varphi = A_s/tL$ ;  $m$  为加劲肋数目。

竖向加劲薄钢板墙的抗弯刚度  $K_f$  为钢板墙抗弯刚度与加劲肋抗弯刚度之和,即

$$K_f = K_{pf} + K_{sf} = \frac{12EI_p}{H^3} + \frac{3EI_s}{H^3} \quad (3)$$

由此可得单位水平荷载作用下,竖向加劲薄钢板墙的弯曲变形  $\Delta_f$  为

$$\Delta_f = \frac{1}{K_f} = \frac{H^3}{EtL^3} \left[ 1 + \frac{3mI_{s0}}{tL^3} + \frac{1}{4}\varphi \frac{m-1}{m+1} \right]^{-1} \quad (4)$$

影响剪切变形的主要因素是截面面积。单位水平荷载作用下,竖向加劲薄钢板墙的剪切变形为

$$\Delta_s = \frac{kH}{GA} = \frac{kH}{G(tL + A_s)} = \frac{2(1+\mu)kH}{EtL(1+\varphi)} \quad (5)$$

式中:  $G$  为钢材剪切模量,  $G = E/2(1+\mu)$ ;  $k$  是与截面形状有关的系数,矩形截面取 1.2<sup>[13]</sup>;  $\mu$  为泊松比,取 0.3。

竖向加劲薄钢板墙的总变形  $\Delta$  为

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_s \quad (6)$$

因此,竖向加劲薄钢板墙的抗侧刚度  $K$  为

$$K = \frac{1}{\Delta} = \frac{Et}{\frac{4\alpha^3}{4 + 12 \frac{mI_{s0}}{tL^3} + \varphi \frac{m-1}{m+1}} + 2 \frac{k\alpha(1+\mu)}{1+\varphi}} \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为钢板墙的高宽比,  $\alpha = H/L$ ,  $k = 1.2$ .

计算表明, 加劲肋绕自身中性轴惯性矩对弹性抗侧刚度的影响很小, 可忽略不计, 公式(7)可简化为

$$K = \frac{1}{\Delta} = \frac{Et}{\frac{4\alpha^3}{4 + \varphi \frac{m-1}{m+1}} + 2 \frac{k\alpha(1+\mu)}{1+\varphi}} \quad (8)$$

由上式可知, 影响竖向加劲薄钢板墙抗侧刚度的因素有钢板墙厚度、高宽比、加劲肋数目以及加劲肋与钢板墙横截面积比。

## 2 抗侧承载力

### 2.1 竖向加劲薄钢板墙的受力

承受水平剪力的竖向加劲薄钢板墙, 其受力包括三个阶段, 即弹性屈曲阶段、拉力带形成阶段和塑性阶段。

弹性屈曲阶段: 在弹性屈曲前, 钢板墙受力为平面剪切状态, 板中的主拉应力和主压应力相等, 并与力作用方向成  $45^\circ$ , 如图 2(a)所示。竖向加劲肋的设计满足加劲肋门槛刚度要求, 即竖向加劲薄钢板墙能够发生局部屈曲。其区格弹性屈曲应力为<sup>[14]</sup>

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 D}{l_0^2} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

其中,  $k_s = \chi \left[ 5.34 + 4 \left( \frac{l_0}{H} \right)^2 \right]$ 。

式中:  $D$  为单位宽度钢板墙的弯曲刚度,  $D = Et^3 / 12(1-\mu^2)$ ;  $f_y$  为钢板墙屈服强度;  $l_0$  为钢板墙区格宽度, 对于闭口加劲肋钢板墙, 需扣除半个加劲肋宽度;  $\chi$  为嵌固系数, 对于闭口加劲肋, 取 1.23。

拉力带形成阶段: 当钢板墙剪应力达到临界剪应力时, 主压应力方向的钢板墙屈曲, 沿对角线方向形成拉力带, 继续增加的荷载由钢板墙拉力场  $\sigma_t$  承担, 而压应力  $\tau_{cr}$  不再增加。如图 2(b)所示。

塑性阶段: 薄膜拉应力达到屈服强度。

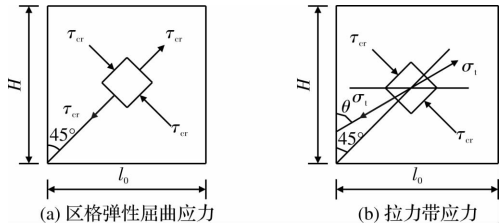


图 2 钢板墙应力状态

Fig. 2 Stress state of SPSW

### 2.2 考虑屈曲后强度的抗侧承载力

竖向加劲肋的设置将钢板墙分为若干小区格, 减小了钢板墙的计算宽度, 增大了屈曲应力, 提高了屈曲承载力。非加劲薄钢板墙与竖向加劲薄钢板墙的弹性屈曲应力对比如表 1 所示。与非加劲薄钢板墙相比, 竖向加劲薄钢板墙的弹性屈曲荷载较大。因此, 抗侧承载力应考虑弹性屈曲荷载。

表 1 非加劲与竖向加劲薄钢板墙屈曲应力/MPa

Tab. 1 Buckling stress of non-stiffened and vertical stiffened thin SPSWs/MPa

薄钢板墙类型	加劲肋数目	薄钢板墙尺寸/mm		
		—6×3 600 ×3 600	—8×3 600 ×3 600	—8×3 600 ×5 400
非加劲	0	3.62	8.58	6.51
	1	18.35	32.03	15.53
竖向加劲	2	41.66	73.08	30.41
	3	77.78	135.85	57.51

图 3 所示为竖向加劲薄钢板墙主拉应力分布, 由图可知, 相邻区格钢板墙拉力带在加劲肋处保持连续。因此, 可将竖向加劲薄钢板墙屈曲后因薄膜力而形成的拉力场等效为拉力带模型, 如图 4 所示。

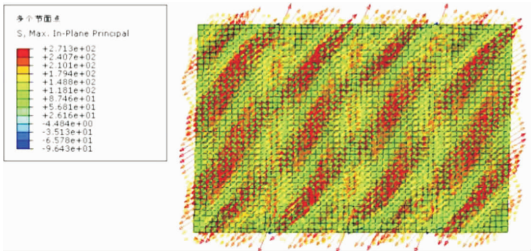


图 3 竖向加劲薄钢板墙主拉应力分布

Fig. 3 Principal tensile stress distribution of thin SPSW-VS

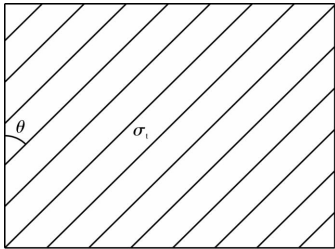


图 4 拉力带模型

Fig. 4 Tension strip model

因此, 对于竖向加劲薄钢板墙, 加劲肋的设置未改变薄钢板墙的受力性质, 钢板墙先屈曲, 然后形成拉力带抵抗侧向荷载。考虑屈曲后强度的竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力应考虑屈曲荷

载和屈曲后拉力带的贡献. 根据薄腹板梁理论<sup>[15]</sup>, 竖向加劲薄钢板墙的计算简图如图5所示. 其中, 薄钢板墙宽度为 $L$ , 高度为 $H$ , 拉力带与竖直方向夹角为 $\theta$ , 竖向加劲薄钢板墙的抗剪极限承载力为 $V_u$ , 弹性屈曲抗剪承载力为 $V_{cr}$ , 屈曲后抗剪承载力为 $V_t$ . 与薄腹板梁不同之处在于: 薄腹板梁的翼缘对腹板的约束较弱, 薄腹板不能形成充分拉

力场, 而薄钢板墙的边缘构件有足够的刚度使钢板墙能够形成充分拉力场.

薄钢板墙屈曲后, 板中沿斜对角线方向形成一系列拉力带. 根据“纯对角拉力”理论<sup>[16]</sup>, 薄钢板墙可被替换为 $n$ 条倾角为 $\theta$ 的条带, 条带拉应力 $\sigma_t$ , 假定拉力带沿高度方向宽度为单位1<sup>[17]</sup>, 其受力如图6所示.

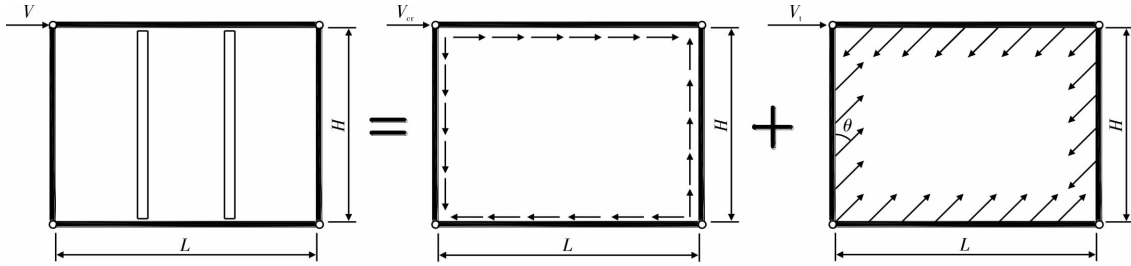
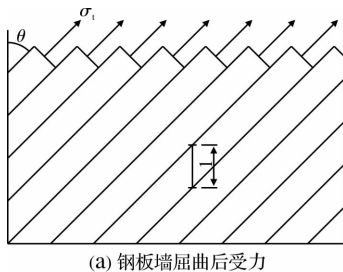
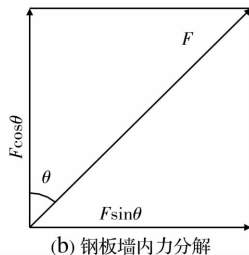


图5 竖向加劲薄钢板墙抗侧承载力计算简图

Fig. 5 Calculation diagram of lateral bearing capacity of SPSW-VS



(a) 钢板墙屈曲后受力



(b) 钢板墙内力分解

图6 拉力带受力状态

Fig. 6 Force state of tension strip

得: 单个拉力带截面面积为  $A_1 = t \sin \theta$ ;  
单个拉力带作用的拉力为  $F_1 = \sigma_t A_1 = \sigma_t t \sin \theta$ ;  
水平方向单个拉力带宽度为  $l_1 = \sin \theta / \cos \theta$ ;  
拉力带数目为  $n = L / l_1 = L \cos \theta / \sin \theta$ ;  
拉力带合力为  $F = n F_1 = \sigma_t t L \cos \theta$ ;  
拉力带水平方向分量的合力, 即为竖向加劲薄钢板墙屈曲后强度抗剪承载力.

$$V_t = F \sin \theta = \sigma_t t L \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sigma_t t L \sin (2\theta) \quad (10)$$

为简化计算, 假定  $\tau_{cr}$  和  $\sigma_t$  的方向一致.  $\sigma_t$  取最大值的条件为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\sigma_t}{f_y} + \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = 1 \quad (11a)$$

或者

$$\sigma_t = \sqrt{3} (\tau_y - \tau_{cr}) \quad (11b)$$

将式(11b)代入式(10)可得

$$V_t = \frac{\sqrt{3}}{2} (\tau_y - \tau_{cr}) t L \sin 2\theta \quad (12)$$

假定拉力带与竖直方向夹角  $\theta = 45^\circ$ , 则竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力为

$$V_u = V_{cr} + V_t = \tau_{cr} t L + \frac{\sqrt{3}}{2} (\tau_y - \tau_{cr}) t L \quad (13)$$

### 3 有限元验证

为验证公式(8)和(13)的精度, 采用有限元软件 ABAQUS 建立足尺分析模型, 对 24 个不同参数的竖向加劲薄钢板墙进行分析, 将有限元结果与公式计算结果进行对比.

#### 3.1 有限元模型

竖向加劲薄钢板墙模型为单层单跨足尺有限元模型, 钢板墙与加劲肋均采用 4 节点线性缩减积分壳单元(S4R), 钢板墙选用 Q235 钢材 ( $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ ), 加劲肋选用 Q345 钢材 ( $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$ ), 均采用理想弹塑性模型, 钢材弹性模量为  $E = 206\,000 \text{ N/mm}^2$ . 框架梁、柱均采用梁单元, 框架梁截面尺寸为  $H700 \times 400 \times 20 \times 25$ , 柱截面尺寸为  $H800 \times 500 \times 20 \times 25$ , 框架梁、柱弹性模量均取  $100E$ . 梁、柱与钢板墙采用绑定约束, 梁柱节点采用 MPC 栓以模拟铰接. 加劲肋的选取满足门槛刚度的要求, 采用槽钢截面, 双面布置组成  $\square 200 \times 8$ . 有限元模型如图 7 所示.



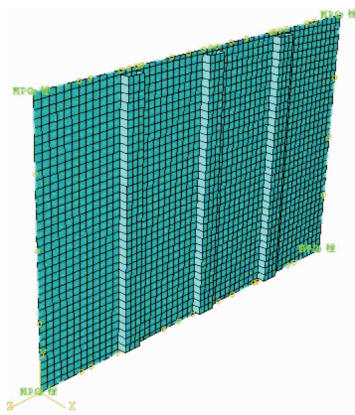


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

3.2 结果对比

竖向加劲薄钢板墙分析参数为: 钢板墙高度  $H=3\ 600\text{ mm}$ , 宽高比  $\beta=L/H=1.5、2.0$ ; 薄钢

板墙高厚比  $\lambda=H/t=300、400、500、600$ . 表 2 给出了宽高比为 1.5 和 2.0 时抗侧刚度和抗侧承载力理论计算值与有限元结果的对比情况.

由表 2 可知, 抗侧刚度理论公式值与有限元分析结果吻合较好, 除个别情况外, 误差均在 5% 以内. 最大误差出现的原因是: 由于在加劲肋数量较多的情况下, 竖向加劲薄钢板墙的截面形状类似于工字形或十字形, 截面上剪应力分布与矩形截面相比更不均匀, 其  $k$  值大于 1.2, 而理论公式为了简化计算仍取 1.2, 因此, 理论计算值较有限元分析结果偏大. 随着高厚比的增大, 竖向加劲薄钢板墙的抗侧刚度减小; 保持钢板墙高厚比不变, 竖向加劲薄钢板墙抗侧刚度随加劲肋数量的增大而增大; 保持薄钢板墙高厚比和加劲肋数量不变, 竖向加劲薄钢板墙抗侧刚度随薄钢板墙宽高比的增大而显著增大.

表 2 公式计算结果与有限元结果对比

Tab. 2 Comparison of the formula results with the finite element results

$\beta$	$m$	$\lambda$	$K_T/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_{\text{FEA}}/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_T/K_{\text{FEA}}$	$V_{uT}/\text{kN}$	$V_{u\text{FEA}}/\text{kN}$	$V_{uT}/V_{u\text{FEA}}$
1.5	1	300	1 122.96	1 103.11	1.02	7 928.52	8 079.26	0.98
		400	863.25	899.70	0.96	5 843.19	6 004.86	0.97
		500	707.27	725.82	0.97	4 636.34	4 758.49	0.97
		600	603.19	629.24	0.96	3 846.31	3 938.62	0.98
	2	300	1 206.45	1 238.01	0.97	8 231.36	8 345.83	0.99
		400	946.70	961.79	0.98	5 970.95	6 156.06	0.97
		500	790.45	798.65	0.99	4 701.75	4 864.90	0.97
		600	685.96	715.84	0.96	3 884.17	4 016.60	0.97
	3	300	1 289.49	1 314.80	0.98	8 680.79	8 797.71	0.99
		400	1 029.46	1 094.95	0.94	6 160.55	6 278.41	0.98
		500	872.71	880.72	0.99	4 798.83	4 936.35	0.97
		600	767.63	747.10	1.03	3 940.35	4 069.40	0.97
2.0	2	300	1 653.88	1 646.25	1.00	10 655.15	10 432.50	1.02
		400	1 288.09	1 339.36	0.96	7 826.27	7 913.20	0.99
		500	1 068.41	1 130.98	0.94	6 199.88	6 334.85	0.98
		600	921.78	940.89	0.98	5 138.89	5 268.58	0.98
	3	300	1 747.42	1 873.72	0.93	10 975.14	10 893.90	1.01
		400	1 381.87	1 431.63	0.97	7 961.26	8 155.53	0.98
		500	1 162.14	1 156.78	1.00	6 269.00	6 453.06	0.97
		600	1 015.33	964.58	1.05	5 178.89	5 343.10	0.97
	4	300	1 840.63	1 927.51	0.95	11 405.04	11 724.30	0.97
		400	1 475.20	1 462.49	1.01	8 142.62	8 296.19	0.98
		500	1 255.31	1 190.87	1.05	6 361.86	6 541.30	0.97
		600	1 108.23	997.44	1.11	5 232.63	5 408.72	0.97

注:  $K_T$  和  $V_{uT}$  分别为抗侧刚度和抗侧承载力公式计算值;  $K_{\text{FEA}}$  和  $V_{u\text{FEA}}$  分别为抗侧刚度和抗侧承载力有限元分析值.

由表 2 可知,抗侧承载力理论值与有限元值吻合较好,误差在 3% 以内,结果偏于安全.保持薄钢板墙宽高比和加劲肋数量不变,竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力随薄钢板墙高厚比的增大而减小;保持薄钢板墙宽高比和高厚比不变,竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力随加劲肋数量的增大而增大,但承载力提高幅度不明显;保持薄钢板墙加劲肋数量和高厚比不变,竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力随薄钢板墙宽高比增大而增大.

## 4 竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙抗侧性能的影响

### 4.1 模型建立及分析参数定义

采用 3.1 节中的有限元模型尺寸,仍采用铰接框架模型,此时框架柱为有限刚度.竖向荷载以集中力施加于框架柱顶,由于框架梁的刚度无限大,因此可认为结构的竖向压缩变形是均匀的.水平荷载以水平位移的形式施加在梁端.

为了分析竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙的影响,竖向荷载定义为钢板墙的整体轴压比  $\mu_N$ ,通过公式(14)计算.

$$\mu_N = \frac{N}{2F_{yc}A_c + \sigma_{yw}Lt} \quad (14)$$

式中:  $N$  为框架柱的轴压力;  $F_{yc}$  和  $\sigma_{yw}$  分别为边缘框架和钢板墙的屈服强度;  $A_c$ 、 $L$  和  $t$  分别为框架柱截面积、钢板墙宽度和厚度.整体轴压比  $\mu_N$  的

取值分别为 0、0.1、0.2、0.3 和 0.4.

### 4.2 加劲肋效应分析

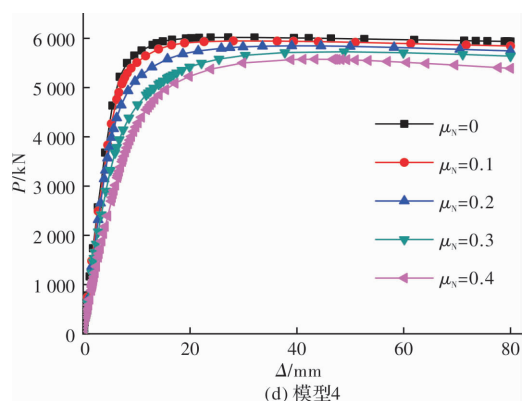
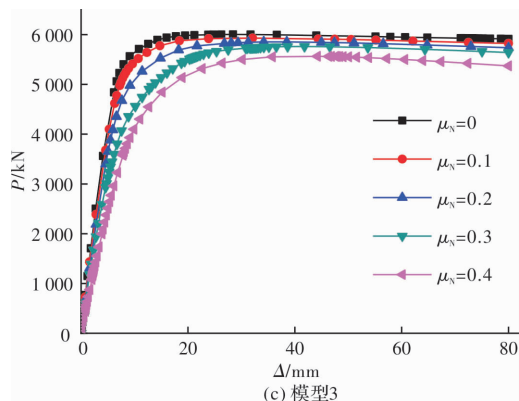
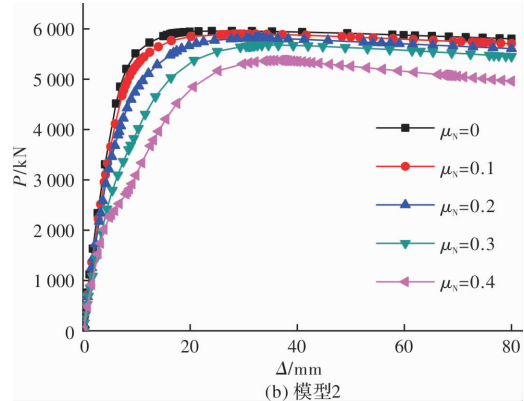
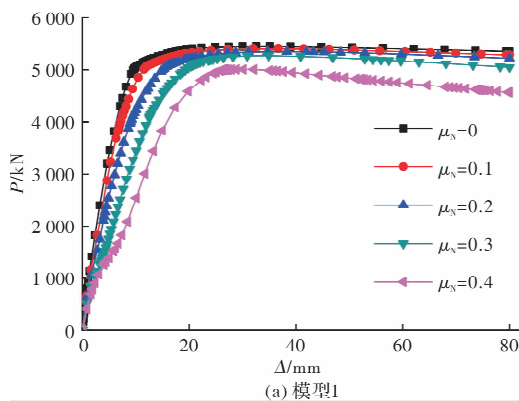
为了分析竖向加劲肋对于薄钢板墙在竖向荷载作用下的影响,对加劲肋进行参数化分析.对有限元模型在不同竖向荷载作用下进行水平荷载的单向推覆分析,具体过程为:对竖向加劲薄钢板墙分别采用增大加劲肋截面和加劲肋数量两种方式对比竖向加劲与未加劲薄钢板墙在竖向荷载作用下的抗侧性能.其中,薄钢板墙的高度  $H=3\,600\text{ mm}$ ,加劲肋截面采用双槽形组成“□”截面,加劲肋截面选用□80×6、□160×6 和□200×8.各模型尺寸如表 3 所示.

表 3 不同加劲肋的模型尺寸

Tab. 3 Model sizes of various stiffeners

模型编号	$L/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	加劲肋数量	加劲肋尺寸/mm
1	5 400	3 600	9	0	—
2	5 400	3 600	9		□80×6
3	5 400	3 600	9	2	□160×6
4	5 400	3 600	9		□200×8
5	5 400	3 600	9		□80×6
6	5 400	3 600	9	3	□160×6
7	5 400	3 600	9		□200×8
8	7 200	3 600	9		□80×6
9	7 200	3 600	9	3	□160×6
10	7 200	3 600	9		□200×8

图 8 给出了各模型的荷载-位移曲线.



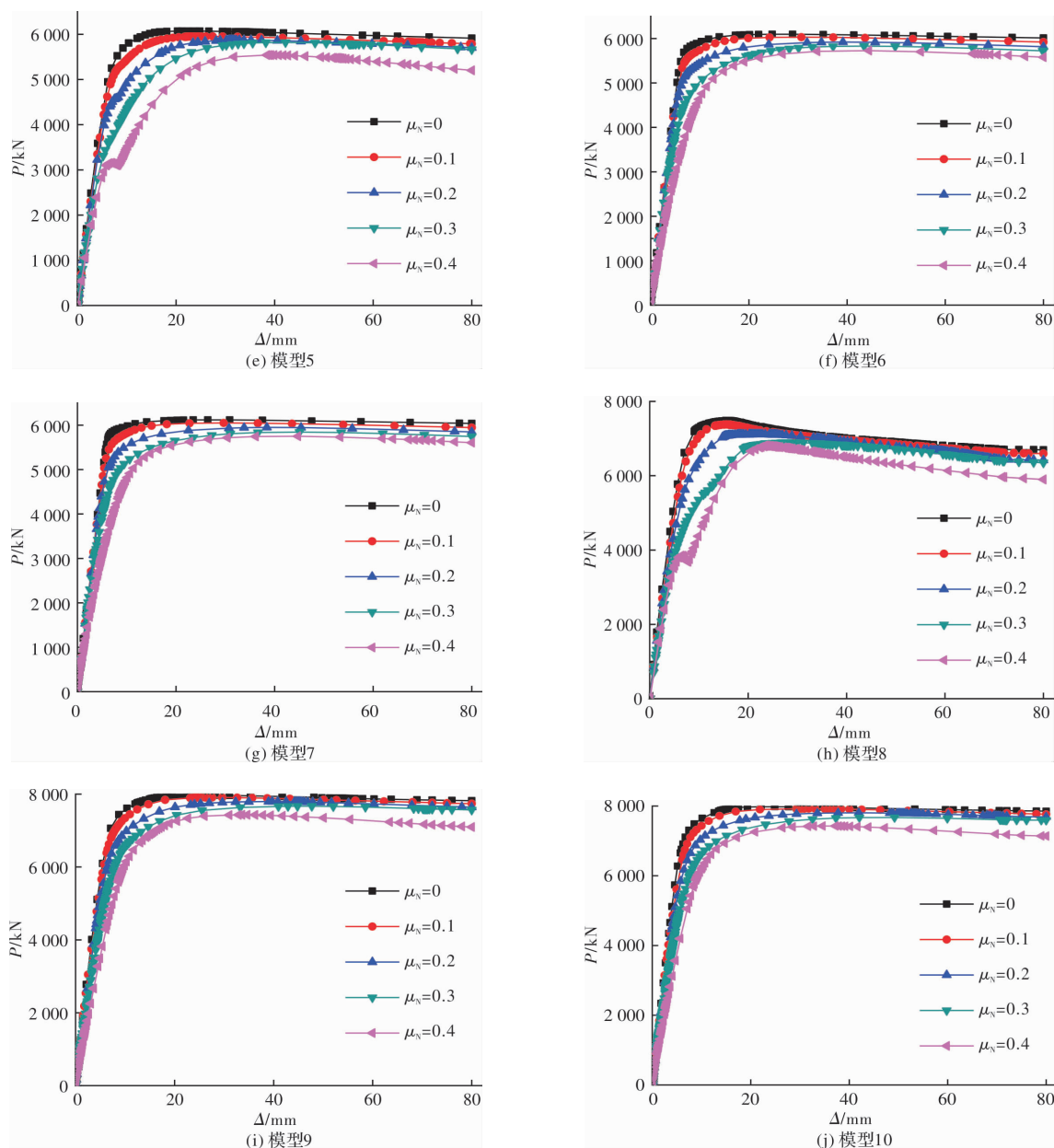


图8 不同加劲形式薄钢板墙的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of thin SPSW with various stiffeners

为了研究竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙抗侧性能的影响,以初始刚度和抗侧承载力来表征其性能,由图8可得各模型的初始刚度和抗侧承载力折减系数,如表4、表5所示,其中,初始刚度为结构层间位移1/1000对应的刚度<sup>[18]</sup>。

由图8及表4、表5可知,竖向荷载会降低薄钢板墙的初始刚度和抗侧承载力。当宽高比为1.5时,对于非加劲薄钢板墙,其面外刚度很弱,随着竖向荷载的增大,薄钢板墙的初始刚度显著降低, $\mu_N=0.4$ 比 $\mu_N=0$ 的初始刚度下降了55.6%。对于弱加劲薄钢板墙(加劲肋尺寸为 $80 \times 6$ ),加劲肋数量从2增加至3, $\mu_N=0.4$ 比 $\mu_N=0$ 的初始刚度分别下降了37.6%和31.2%;对于满足肋板

刚度比阈值的竖向加劲薄钢板墙(加劲肋尺寸为 $160 \times 6$ ),加劲肋数量从2增加至3, $\mu_N=0.4$ 比 $\mu_N=0$ 的初始刚度分别下降了42.3%和35.2%;增大加劲肋截面积(加劲肋尺寸为 $200 \times 8$ ),加劲肋数量从2增加至3, $\mu_N=0.4$ 比 $\mu_N=0$ 的初始刚度分别下降了41.3%和35.0%。综上所述,竖向荷载对薄钢板墙的初始刚度影响较大,设置竖向加劲肋可减轻竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙的影响,增大加劲肋数量能够显著减小竖向荷载对薄钢板墙初始刚度的影响,而增大加劲肋截面积对其影响较小。当宽高比为2,加劲肋数量相同时,薄钢板墙宽度越大,其抗侧刚度和抗侧承载力越大。但随着竖向荷载增大,宽高比为2的竖向

加劲薄钢板墙抗侧刚度和抗侧承载力下降越大,这是由于相同加劲肋数量的薄钢板墙,宽高比为2的区格钢板墙宽度大于宽高比为1.5的区格钢板墙,因此加劲肋对较大区格钢板墙的锚固能力低于对较小区格钢板墙的锚固。

对于非加劲薄钢板墙和弱竖向加劲薄钢板墙,当 $\mu_N \leq 0.3$ 时,承载力降低幅度较小,荷载-位移曲线也较为接近。而当 $\mu_N > 0.3$ 时,薄钢板墙的承载力降低幅度明显,此时受较大竖向荷载作用的薄钢板墙延性也明显降低。如图8(a)、(b)、(e)和(h)中 $\mu_N = 0.4$ 时的荷载-位移曲线所示,曲线出现了较为明显的下降,这是由于结构产生水

平位移时,竖向荷载随之产生附加弯矩,降低了薄钢板墙的水平抗剪能力,水平位移越大,附加弯矩也越大。而对于满足肋板刚度比要求的竖向加劲薄钢板墙,不同竖向荷载作用下的荷载-位移曲线趋势相同。随着竖向荷载的增大,其承载力降低幅度较小,且随着加劲肋数量的增大,减小了区格钢板墙的宽度,加劲肋对薄钢板墙的锚固更强,因此承载力降低幅度进一步减小。同时还可以发现,加劲肋满足阈值刚度要求,且加劲肋数量相同时,进一步增大加劲肋截面面积,并不能减轻竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙抗侧承载力的影响。

表4 不同加劲肋时竖向加劲薄钢板墙初始刚度的折减( $K_i/K_0$ )

Tab. 4 Reduction of the initial stiffness of SPSW-VS with various stiffeners ( $K_i/K_0$ )

模型编号	$m$	加劲肋/mm	$\mu_N$				
			0	0.1	0.2	0.3	0.4
1	0	—	1.000	0.880	0.737	0.459	0.444
2	2	□80×6	1.000	0.910	0.831	0.671	0.624
3	2	□160×6	1.000	0.935	0.863	0.746	0.577
4	2	□200×8	1.000	0.944	0.886	0.774	0.587
5	3	□80×6	1.000	0.945	0.905	0.785	0.688
6	3	□160×6	1.000	0.980	0.943	0.854	0.648
7	3	□200×8	1.000	0.992	0.965	0.870	0.650
8	3	□80×6	1.000	0.915	0.832	0.734	0.696
9	3	□160×6	1.000	0.955	0.875	0.767	0.609
10	3	□200×8	1.000	0.961	0.897	0.782	0.622

表5 不同加劲肋时竖向加劲薄钢板墙抗侧承载力的折减( $V_{ui}/V_{u0}$ )

Tab. 5 Reduction of the Lateral bearing capacity of SPSW-VS with various stiffeners ( $V_{ui}/V_{u0}$ )

模型编号	$m$	加劲肋/mm	$\mu_N$				
			0	0.1	0.2	0.3	0.4
1	0	—	1.000	0.993	0.982	0.968	0.919
2	2	□80×6	1.000	0.990	0.977	0.953	0.902
3	2	□160×6	1.000	0.988	0.975	0.960	0.927
4	2	□200×8	1.000	0.988	0.971	0.951	0.926
5	3	□80×6	1.000	0.980	0.967	0.959	0.912
6	3	□160×6	1.000	0.989	0.971	0.956	0.939
7	3	□200×8	1.000	0.988	0.972	0.955	0.940
8	3	□80×6	1.000	0.987	0.951	0.922	0.910
9	3	□160×6	1.000	0.992	0.978	0.962	0.932
10	3	□200×8	1.000	0.993	0.978	0.961	0.931

注:  $K_0$ 和 $V_{u0}$ 为无竖向荷载时,薄钢板墙的刚度和抗侧承载力;而 $K_i$ 和 $V_{ui}$ 为施加竖向荷载时,薄钢板墙的刚度和抗侧承载力。

## 5 结论

(1)考虑竖向加劲肋对加劲薄钢板墙抗侧刚度的贡献,提出了适用于竖向加劲薄钢板墙的抗侧刚度计算公式,与有限元结果吻合较好。

(2)竖向加劲肋的设置提高了薄钢板墙的弹性屈曲应力,竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力应包含弹性屈曲荷载和屈曲后强度的贡献。提出了适用于竖向加劲薄钢板墙的抗侧承载力计算公式,与有限元结果吻合较好。

(3)竖向荷载会降低竖向加劲薄钢板墙的抗侧性能,竖向荷载对抗侧刚度影响较大,对抗侧承载力影响较小。

(4)增大加劲肋数量可显著减小竖向荷载对竖向加劲薄钢板墙抗侧刚度的影响,增大加劲肋截面积对其影响较小。

## 参考文献 References

- [1] THORBURN L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls [R]. No.107. Edmonton, Alberta: Edmonton Department of Civil Engineering, University of Alberta, 1983.
- [2] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构, 2005, 20(77): 1-6.  
GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise buildings [J]. Steel Construction, 2005, 20(77): 1-6.
- [3] ALAVI E, NATEGHI F. Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89(5): 9-20.
- [4] 陈国栋,郭彦林. 十字加劲钢板剪力墙的抗剪极限承载力[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 71-78.  
CHEN Guodong, GUO Yanlin. Ultimate shear carrying capacity of steel plate shear wall with cross stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 71-78.
- [5] 王先铁,白连平,王连坤,等. 方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板剪力墙的力学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 103-109.  
WANG Xiantie, BAI Lianping, WANG Liankun, et al. Study on mechanical behavior of concrete-filled square steel tubular frame-cross-stiffened thin steel plate shear walls[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 103-109.
- [6] 王先铁,刘立达,高娅静,等. 方钢管混凝土框架-斜加劲薄钢板剪力墙的抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(4): 503-510.  
WANG Xiantie, LIU Lida, GAO Yajing, et al. Study on the seismic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with diagonal stiffeners[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(4): 503-510.
- [7] 聂建国,朱力,樊健生,等. 开洞加劲钢板剪力墙的抗侧承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 79-88.  
NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Lateral force resistant capacity of stiffened steel plate shear walls with openings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 79-88.
- [8] 朱力,聂建国,樊健生. 开洞钢板剪力墙的抗侧刚度分析[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 200-210.  
ZHU Li, NIE Jianguo, FAN Jiansheng. Lateral stiffness of steel plate shear walls with openings [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 200-210.
- [9] 童根树,陶文登. 竖向槽钢加劲钢板剪力墙剪切屈曲[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 1-9.  
TONG Genshu, TAO Wendeng. Elastic shear buckling of steel shear walls strengthened vertically by closed section stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 1-9.
- [10] 马尤苏夫,王先铁,杨航东,等. 槽钢加劲钢板剪力墙受力性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(10): 152-157.  
MA Yousufu, WANG Xiantie, YANG Hangdong, et al. Mechanical behavior study on steel plate shear walls with channel stiffeners [J]. Industrial Construction, 2014, 44(10): 152-157.
- [11] 贾贵强. 方钢管混凝土框架-竖向加劲薄钢板剪力墙结构的抗震性能研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.  
JIA Guiqiang. Seismic behavior study of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with vertical stiffeners [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [12] 李达,牟在根,薛园. 新型钢板剪力墙 VV-SPSW 初始侧向刚度研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 161-164.  
LI Da, MOU Zaigen, XUE Yuan. Research into the initial lateral stiffness of the new type steel plate shear walls VV-SPSW [J]. Industrial Construction, 2016, 46(1): 161-164.
- [13] 王荫长,刘铮,周文群,等. 结构力学[M]. 北京:冶金出版社, 1998.  
WANG Yinchang, LIU Zheng, ZHOU Wenqun, et al. Structural mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.
- [14] 钢板剪力墙技术规程: JGJ/T 380-2015 [S]. 北京:中

- 国建筑工业出版社,2015.
- Technical specification for steel plate shear wall: JGJ/T 380-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [15] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计 [M]. 第六版. 北京: 科学出版社, 2012.
- CHEN Ji. Stability of steel structure theory and design [M]. 6th ed. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] WANGER H. Flat steel metal girder with very thin metal web [R]. Springfield: National Advisory Committee for Aeronautics, 1931:524-558.
- [17] 刘锋. 无粘结加劲钢板墙设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- LIU Feng. Studies on design method of the unbounded stiffened steel plate wall[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [18] 刘克智. 考虑竖向荷载的钢板剪力墙和防屈曲钢板剪力墙滞回性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LIU Kezhi. Hysteretic behavior of steel plate shear walls and buckling-restrained steel plate shear walls considering vertical load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

(编辑 沈 波)

(上接第 494 页)

- [13] 王鸿, 许江, 杨秀贵. 循环荷载条件下岩石塑性滞回环的演化规律[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(4):80-82.
- WANG Hong, XU Jiang, YANG Xiugui. Characteristics of evolution of rock plastic hysteresis loop under cyclic loading [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(4):80-82.
- [14] 王鸿, 许江, 李树春, 等. 不同水饱和度下岩石滞回曲线演化的实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(3):18-21.
- WANG Hong, XU Jiang, LI Shuchun et al. Experimental study on evolution of rock hysteresis curve under different water saturation [J]. Mining Research and Development, 2007, 27(3):18-21.
- [15] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4):712-717.
- LIU Jianfeng, XIE Heping, XU Jin, et al. Experimental study on rock damping characteristics under cyclic loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4):712-717.
- [16] 陈运平, 王思敬. 多级循环荷载下饱和岩石的弹塑性响应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4):1030-1034.
- CHEN Yunping, WANG Sijing. Ecoplastic-plastic response of saturated rock under multi-stage cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4):1030-1034.
- [17] 邓华峰, 胡玉, 李建林, 等. 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(12):3402-3409, 3418.
- DENG Huafeng, HU Yu, LI JianLin, et al. The influence of frequency and amplitude of cyclic load on the dynamic characteristics of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12):3402-3409, 3418.
- [18] 张向阳, 成建, 康永红, 等. 循环加卸载下岩石变形破坏的损伤、能量分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2011, 63(5):41-45.
- ZHANG Xiangyang, CHENG Jian, KANG Yonghong, et al. Damage and energy analysis of rock deformation and failure under cyclic loading and unloading[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2011, 63(5):41-45.
- [19] 张媛, 许江, 杨红伟, 等. 循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2):320-326.
- ZHANG Yuan, XU Jiang, YANG Hongwei, et al. The influence of confining pressure on the evolution of sandstone hysteretic loop under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):320-326.

(编辑 沈 波)