

文章编号:1673-2049(2017)06-0051-08

竖向闭口槽钢加劲钢板剪力墙在非均匀压剪作用下的屈曲性能

王先铁¹, 林麟珩¹, 宋文俊¹, 罗 遥¹, 张 力¹, 刘海锋²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100055)

摘要:对竖向闭口槽钢加劲钢板剪力墙在非均匀压应力和剪应力共同作用下的屈曲性能进行了有限元分析,得到了竖向闭口槽钢加劲钢板剪力墙的临界屈曲剪应力随加劲肋加劲系数的变化曲线及阈值刚度,提出了剪应力和竖向压应力共同作用下加劲肋阈值刚度的计算公式。结果表明:加劲肋阈值刚度随着小区格宽高比、竖向压应力非均匀系数、加劲肋数目和加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比增大而减小;提高加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比能显著降低加劲肋阈值刚度;加劲肋阈值刚度公式计算结果与有限元分析结果吻合较好。

关键词:钢板剪力墙;竖向加劲;非均匀压剪;屈曲性能;阈值刚度

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

Buckling Behavior of Steel Plate Shear Wall Stiffened by Vertical Closed Channel Stiffeners Under Non-uniform Pressure and Shear Load

WANG Xian-tie¹, LIN Lin-hui¹, SONG Wen-jun¹, LUO Yao¹, ZHANG Li¹, LIU Hai-feng²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: The buckling behavior analysis of steel plate shear wall (SPSW) stiffened by vertical closed channel stiffeners under the combination of non-uniform vertical compression stress and shear stress was carried out by using finite element software. The curves relating the critical buckling shear stress of SPSW stiffened by vertical closed channels to the stiffening coefficient of stiffeners and threshold stiffness were obtained. The formulas were proposed to calculate the threshold stiffness of the stiffeners under the combination of shear stress and non-uniform vertical compression stress. The results show that threshold stiffness decreases with the increase of the width-to-height of portion, non-uniform compressive stress coefficient, the number of stiffeners and the ratio of the torsional stiffness to the flexural stiffness of the stiffeners. The threshold stiffness of stiffeners decreases significantly with the increase of the ratio of the torsional stiffness to the flexural stiffness of stiffeners. The formula calculation results of threshold stiffness agree well with the finite element analysis results.

Key words: steel plate shear wall; vertical stiffening; non-uniform pressure and shear; buckling behavior; threshold stiffness

收稿日期:2017-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51678474, 51408569)

作者简介:王先铁(1979-),男,湖南常德人,教授,工学博士, E-mail: wangxiantie@163.com。

0 引言

钢板剪力墙(以下简称钢板墙)结构是一种新型抗侧力结构体系^[1-3]。一般情况下,钢板墙按只承受水平剪力进行设计^[4-5],但实际情况中,钢板墙不可避免会承受一定的竖向荷载,这对于设计为只承受剪力的钢板墙来说,会降低其结构性能。因此,需对钢板墙在竖向压应力和水平剪应力共同作用下的稳定性能进行研究。

钢板墙的厚度相对于楼层的高度和跨度来说很薄,容易发生局部屈曲,需要设置加劲肋来提高钢板墙的屈曲强度^[6]。文献[7]~[9]对板条加劲钢板墙进行了试验研究,结果表明,钢板墙屈曲后板条加劲肋破坏严重,会对钢板墙后期强度和刚度产生不利影响,即屈曲后的加劲效果不理想。童根树等^[10]对设置多道竖向闭口槽钢加劲钢板墙的剪切屈曲进行了有限元弹性屈曲分析,结果表明,将加劲肋设计为槽形截面,贴焊于钢板墙两侧,加劲肋可为钢板墙提供扭转约束,能够显著提高钢板墙的临界屈曲剪应力。聂建国等^[11]推导了竖向加劲钢板墙在竖向荷载作用下的弹性屈曲应力计算公式,结果表明,合理设置加劲肋能够有效防止钢板墙在竖向荷载作用下发生提前屈曲。何欢欢等^[12]对考虑竖向荷载作用的稀疏竖向加劲钢板墙进行了试验和数值模拟,分析了竖向荷载大小对加劲钢板墙性能的影响,结果表明,有限竖向荷载对加劲钢板墙的初始刚度基本没有影响,但会降低加劲钢板墙的极限荷载和极限侧移。杨嘉胤等^[13]对竖向闭口槽钢加劲钢板墙在非均匀压力作用下的弹性屈曲性能进行了研究,提出了加劲肋门槛刚度计算公式。

综上所述,以往主要研究加劲钢板墙在竖向压应力或剪应力作用下的屈曲性能,尚未开展非均匀压应力和剪应力共同作用下竖向闭口槽钢加劲钢板墙的屈曲性能研究。本文对非均匀压应力和剪应力共同作用下竖向闭口槽钢加劲钢板墙(以下简称加劲钢板墙)的屈曲性能进行了研究,提出了剪应力和竖向压应力共同作用下加劲肋阈值刚度计算公式。

1 计算模型及其验证

加劲钢板墙和加劲肋尺寸如图1所示,其中, l 为加劲钢板墙宽度, l_s 为加劲钢板墙小区格宽度, h 为加劲钢板墙高度, b 为单侧闭口槽钢加劲肋翼缘宽度, b_s 为闭口槽钢加劲肋腹板高度, q_{\max} , q_{\min} 分别为屈曲分析时施加在钢板上的最大压应力和最小压

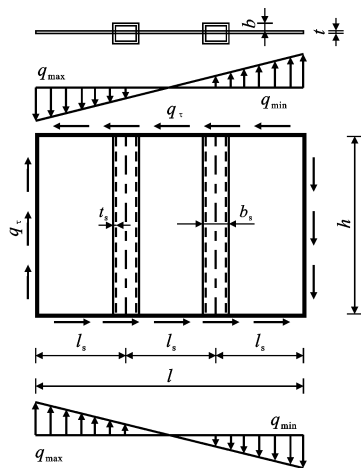


图1 加劲钢板剪力墙示意

Fig. 1 Diagram of Stiffened SPSW

应力, q_{τ} 为屈曲分析时施加在钢板四周的剪力, t 为加劲钢板墙厚度, t_s 为闭口槽钢加劲肋厚度。

竖向压应力的非均匀系数 $\zeta = (q_{\max} - q_{\min}) / q_{\max}$,不同的 ζ 取值分别代表不同的竖向压应力分布形式, $\zeta=0$ 为均匀受压, $\zeta=1$ 为三角形分布压应力, $\zeta=2$ 为纯弯;非均匀压应力与剪应力比 $\delta = q_{\max} / q_{\tau}$,取 $q_{\tau} = 1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。定义加劲肋加劲系数 $\gamma = E_s I_s / (D l_s)$,加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比 $K = G_s J_s / (E_s I_s)$,其中, D 为抗弯刚度, E_s 和 G_s 分别为加劲肋的弹性模量和剪切模量, I_s 和 J_s 分别为加劲肋的惯性矩和自由扭转常数。加劲钢板墙单位宽度板的抗弯刚度 $D = Et^3 / (12 - 12\nu^2)$ ^[10],其中, E 和 ν 分别为钢板墙的弹性模量和泊松比^[14]。加劲肋惯性矩 I_s 和自由扭转常数 J_s 分别为 $I_s = 2(2b^3 t_s / 3 + b^2 b_s t_s)$, $J_s = 2b_s^2 (2b)^2 t_s^2 / (2bt_s + b_s t_s)$ 。其他参数不变时,通过改变加劲肋弹性模量 E_s 可以得到临界屈曲剪应力 τ_{cr} 与加劲系数 γ 的关系^[13]。

采用有限元软件 ABAQUS6.10 对在非均匀压应力和剪应力共同作用下的加劲钢板墙进行屈曲分析。为了验证分析方法的正确性,对 $l=3\,600 \text{ mm}$, $h=3\,600 \text{ mm}$, $t=12 \text{ mm}$, $q_{\max}=0.5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$, $\zeta=0$ 的四边简支矩形钢板进行特征值屈曲分析。钢板墙采用理想弹性本构关系,弹性模量 $E=206 \text{ GPa}$,泊松比 ν 取 0.3。钢板墙采用壳单元 S4R,沿钢板墙宽度方向施加的压力为非均匀线荷载,在钢板墙周边施加大小为 $1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的剪力。约束钢板墙周边节点 z 方向平动自由度,即平面外位移,同时约束其左下角节点沿 x , y 轴的平动自由度和右下角节点沿 y 轴的平动自由度,以防止发生刚体位移。有限元计算得到的屈曲应力与理论值比较如表1所示,

表 1 有限元结果与理论结果的比较

Tab. 1 Comparison Between Finite Element and Theoretical Results

应力	σ_{FEA}/MPa	σ_{TH}/MPa	$(\sigma_{FEA}-\sigma_{TH})/\sigma_{FEA}/\%$
剪应力	11.09	11.07	0.18
压应力	5.55	5.54	0.18

注: σ_{FEA} 为有限元结果; σ_{TH} 为理论结果。
二者吻合很好。因此,有限元分析方法是可靠的。

2 加劲钢板墙屈曲分析

对图 1 所示加劲钢板墙进行分析,其中, $h=3\ 600\ \text{mm}$, $\zeta=2$, $\delta=1$, $b=150\ \text{mm}$, $b_s=100\ \text{mm}$, $t=12\ \text{mm}$, $t_s=6\ \text{mm}$,加劲肋数目 $n_s=2$,小区格宽高比 $\beta=l_s/h=0.4$ 。加劲钢板墙临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 和加劲肋加劲系数 γ 的关系曲线如图 2 所示。图 2 中水平虚线为边缘小区格板块发生局部屈曲的临界应力 $\tau_{\sigma\tau p}$,计算时扣除半个加劲肋宽度。当加劲系数 γ 较小时,加劲钢板墙临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 小于小区格板块局部屈曲应力 $\tau_{\sigma\tau p}$,且临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 随着加劲系数 γ 的增大而增大;当 $\gamma\geq 22.45$ 时,临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 等于小区格板块局部屈曲临界应力 $\tau_{\sigma\tau p}$,加劲钢板墙发生局部屈曲。

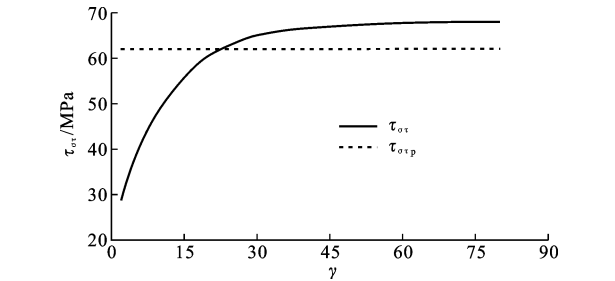


图 2 $\tau_{\sigma\tau}$ - γ 曲线
Fig. 2 $\tau_{\sigma\tau}$ - γ Curves

通过上述分析,定义图 2 中两曲线交点处加劲系数 γ 为加劲肋的阈值刚度 γ_{TH} 。当 $\gamma<\gamma_{TH}$ 时,加劲钢板墙临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 取有限元计算结果;当加劲系数 $\gamma\geq\gamma_{TH}$ 时,加劲钢板墙发生局部屈曲,临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 取小区格板块局部屈曲临界应力 $\tau_{\sigma\tau p}$ 。图 3 为 $\zeta=2$, $n_s=1\sim 3$, $\beta=0.4$ 时,加劲钢板墙在不同加劲系数时的屈曲模态。由图 3 可知,当 $\gamma=2$ 时,加劲钢板墙发生整体屈曲,当 $\gamma=32$ 时,加劲钢板墙发生局部屈曲。 γ 由小到大时,加劲钢板墙逐渐由整体屈曲过渡到局部屈曲。由于 $\zeta=2$ 为纯弯,因此加劲钢板墙屈曲发生在受压侧。

对 $b_s=100\ \text{mm}$, $t_s=6\ \text{mm}$, $t=12\ \text{mm}$, $h=3\ 600\ \text{mm}$ 的加劲钢板墙进行参数分析,研究竖向压应力

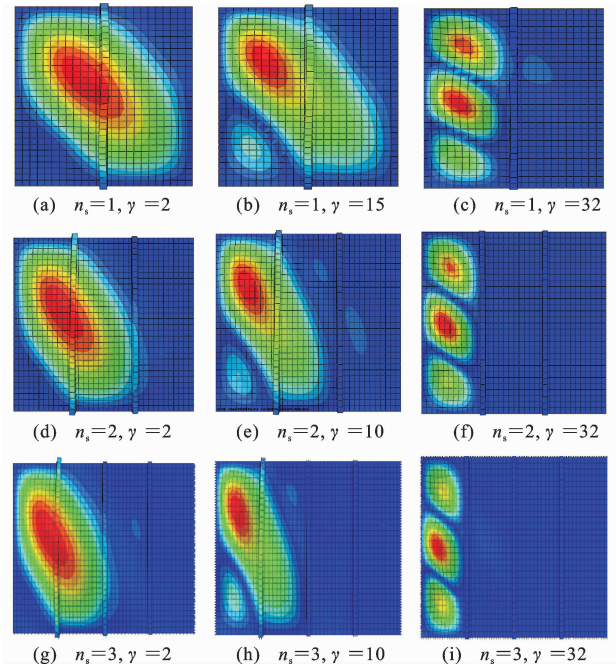


图 3 不同加劲系数加劲钢板墙的屈曲形态
Fig. 3 Buckling Patterns of SPSW with Various Stiffening Coefficients

对加劲钢板墙屈曲性能的影响。参数取值如表 2 所示,其中, β 增量步取 0.2, ζ 取值为 0,1,2, $\delta=1$ 。随着单侧闭口槽钢加劲肋翼缘宽度 b 的变化,抗扭刚度与抗弯刚度比如表 3 所示。通过有限元计算,得到不同 β , n_s , K , ζ 时的 $\tau_{\sigma\tau}$ - γ 曲线,部分 $\tau_{\sigma\tau}$ - γ 曲线如图 4 所示。

表 2 参数取值
Tab. 2 Values of Parameters

参数	β	ζ	n_s	b/mm
取值	0.2~1.0	0~2	1~3	25~250

表 3 加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比
Tab. 3 Ratio of Torsional Stiffness to Flexural Stiffness of Stiffeners

b/mm	25	50	75	100	125	150
K	0.88	0.58	0.41	0.31	0.24	0.19

由图 4 可知,当加劲系数 γ 较小时,临界屈曲剪应力 $\tau_{\sigma\tau}$ 随着 γ 的增加而迅速增大,达到加劲肋阈值刚度 γ_{TH} 后缓慢增大。其他条件相同时,随着 β , ζ , n_s 的增大, $\tau_{\sigma\tau}$ 更快达到小区格板块局部屈曲临界应力值,即 γ_{TH} 随着 β , ζ , n_s 增大而减小。除个别情况 ($\beta=0.2$) 外, γ_{TH} 随着 K 的增大而减少。当 $n_s=2$, $\zeta=2$, $\beta=0.2$ 时,2 个达到阈值刚度的加劲钢板墙屈曲形态如图 5 所示。由图 5 可知,当 $\beta=0.2$ 时,加劲钢板墙发生局部屈曲,加劲肋主要发生弯曲变形,因此加劲肋的抗弯刚度发挥主要作用,故 $\beta=0.2$,

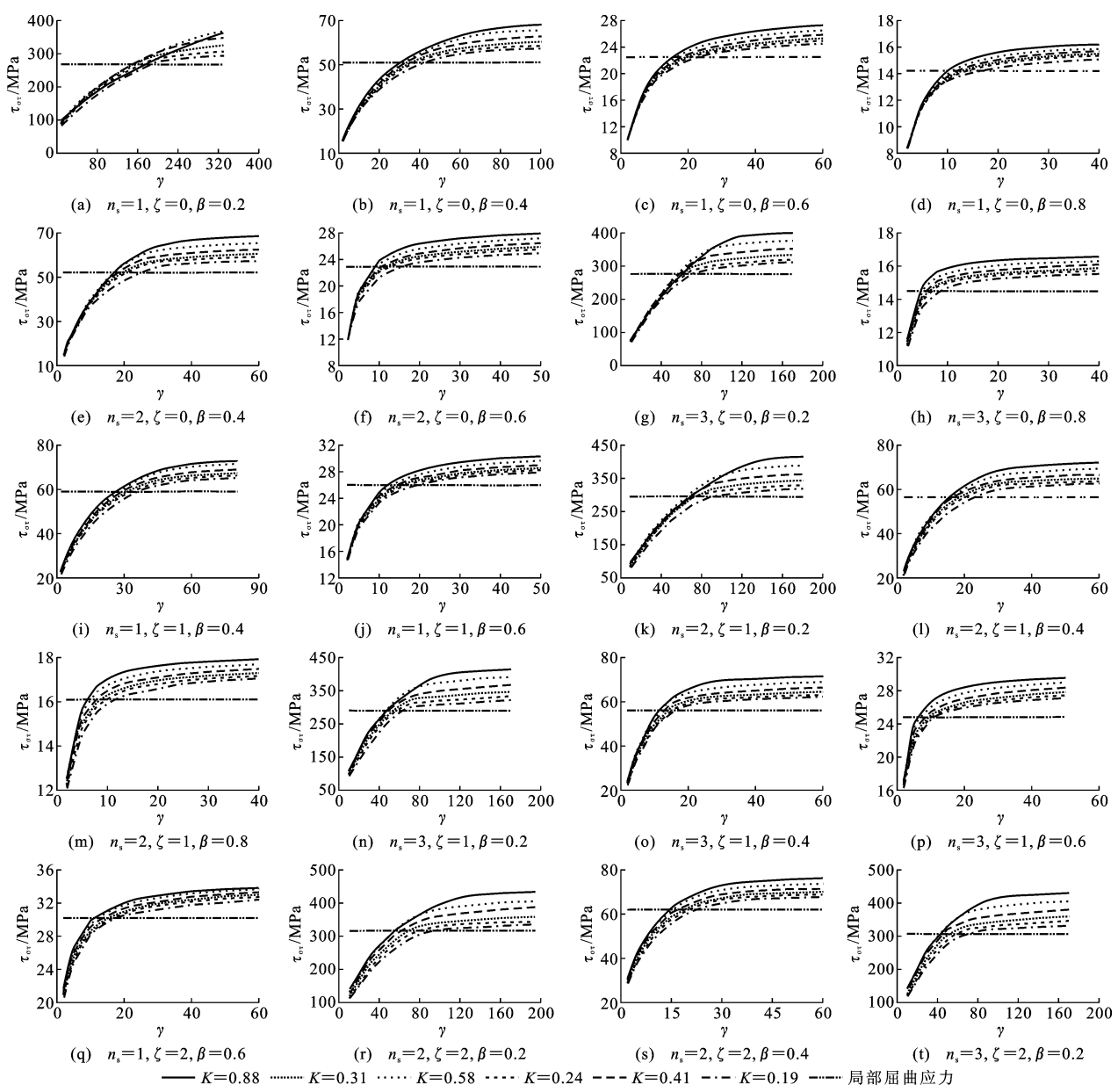


图 4 不同 β, n_s, K, ζ 时的 $\tau_{cr}-\gamma$ 曲线

Fig. 4 $\tau_{cr}-\gamma$ Curves with Various β, n_s, K, ζ

值刚度,其他情况类似。

3 加劲肋阈值刚度

3.1 设置 1 道加劲肋

定义 γ_{TH1} 为设置 n_s 个加劲肋的阈值刚度。对取不同加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比 K 、小区格宽高比 β 的加劲钢板墙进行有限元分析。加劲肋外伸长度为 25~150 mm,加劲肋厚度为 6 mm,加劲肋宽度为 100 mm,对称布置。不同情况下的阈值刚度 γ_{TH1} 见表 4 和图 6。

由表 4 可知,设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋时,加劲肋的阈值刚度随着小区格宽高比 β 的增大而减

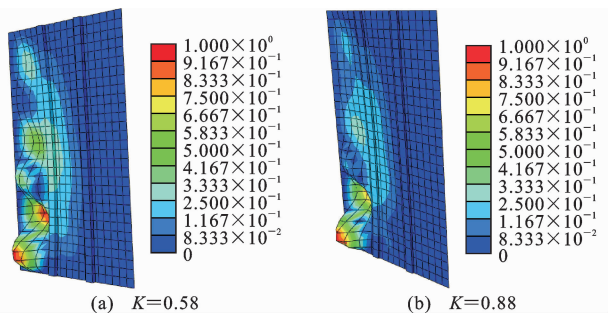


图 5 $\zeta=2, n_s=2, \beta=0.2$ 时的屈曲形态(单位:mm)

Fig. 5 Buckling Patterns when $\zeta=2, n_s=2, \beta=0.2$ (Unit:mm)

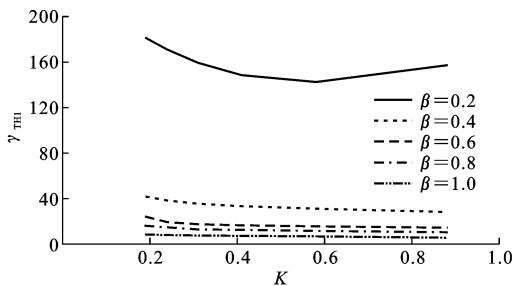
$K=0.88$ 时,加劲肋阈值刚度大于 $K=0.58$ 时的阈

表 4 设置 1 道加劲肋时的阈值刚度

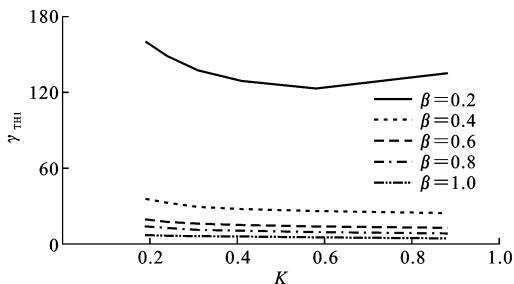
Tab. 4 Threshold Stiffness with One Stiffener

ζ	β	不同 K 时的 γ_{TH1}						$K_{0.88}/K_{0.19}$
		0.88	0.58	0.41	0.31	0.24	0.19	
0	0.2	157.04	144.33	148.39	159.42	171.25	181.45	0.86
	0.4	28.12	31.04	33.26	35.34	38.25	41.51	0.69
	0.6	14.52	15.12	16.12	17.55	19.01	23.52	0.65
	0.8	10.21	11.23	12.23	12.51	14.32	16.08	0.63
	1.0	5.41	6.32	6.81	7.22	7.84	8.41	0.66
1	0.2	135.25	123.47	129.55	137.42	148.25	160.45	0.84
	0.4	24.51	25.92	27.66	29.53	32.91	35.51	0.73
	0.6	12.92	13.81	15.17	16.34	17.42	19.61	0.66
	0.8	8.51	9.23	10.81	11.42	12.71	14.06	0.57
	1.0	4.33	4.98	5.68	6.24	6.88	7.25	0.61
2	0.2	94.11	89.22	95.78	104.37	113.75	120.31	0.77
	0.4	20.52	21.84	23.23	24.92	26.52	31.21	0.66
	0.6	11.51	12.24	13.57	15.01	16.04	16.91	0.67
	0.8	6.84	7.47	8.15	8.59	9.56	11.25	0.61
	1.0	3.21	3.99	4.42	5.11	5.61	6.13	0.52

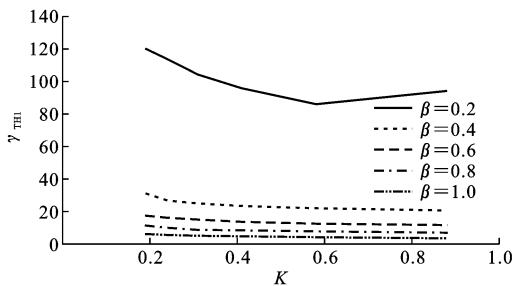
注: $K_{0.88}$, $K_{0.19}$ 分别为 $K=0.88$ 和 $K=0.19$ 时的阈值刚度。



(a) γ_{TH1} - K 曲线 ($\zeta=0$)



(b) γ_{TH1} - K 曲线 ($\zeta=1$)



(c) γ_{TH1} - K 曲线 ($\zeta=2$)

图 6 设置 1 道加劲肋时的阈值刚度

Fig. 6 Threshold Rigidity of One Stiffener

小。这是由于小区格宽高比 β 越大, 小区格愈趋近方形, 非加劲钢板墙的失稳形态与加劲钢板墙的失稳形态几乎一致, 是否设置加劲肋对钢板墙的稳定性没有太大影响, 故要求的阈值刚度较小。同时, 一般情况下, 加劲肋的阈值刚度随加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比的增大而减小, 加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比较大时 ($K=0.88$) 的计算值约为加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比较小时 ($K=0.19$) 计算值的 52%~86%。这表明, 提高加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比能显著降低其阈值刚度, 从而减小用钢量, 获得较好的经济性。

由表 4 和图 6 还可知: 除个别数据 ($\beta=0.2$) 外, 加劲肋阈值刚度随 K 的增大而减小; 相同情况下, $\zeta=0$ 时的加劲肋阈值刚度最大。因此, 拟合 $\zeta=0$ 时的加劲肋阈值刚度公式。承受剪力、均匀压力共同作用时的加劲钢板墙, 其加劲肋阈值刚度与只承受均匀压力的加劲肋阈值刚度及只承受剪力作用时的加劲肋阈值刚度有关^[15]。只承受剪力作用时, 钢板墙设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋时的阈值刚度为 $\gamma_{TH1,\tau}$ 计算公式为^[10]

$$\gamma_{TH1,\tau} = |f(\beta)| \left\{ 1 - 0.7 \tan \left[h \left(1.24 K^{0.15} - \frac{0.112}{K^{0.85}} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$f(\beta) = 66.6 \cos \left[h \left(1.4 \beta^{0.6} - \frac{1.442}{\beta^{0.4}} \right) \right] - 63.8 \quad (2)$$

只承受均匀压力作用时, 钢板墙设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋时的阈值刚度 $\gamma_{TH1,\sigma}$ 的计算公式为^[16]

$$\gamma_{TH1,\sigma} = 86 - 90 \tan \left[h \left(\frac{1.8 |\beta - 0.205|}{\beta^{0.94}} \right) \right] \quad (3)$$

由于 $\zeta=0$ 时, 钢板墙受剪力、均匀压力共同作用, 当钢板墙设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋时, 所需要的阈值刚度 $\gamma_{TH1,\sigma\tau}^*$ 与 $\gamma_{TH1,\tau}$ 和 $\gamma_{TH1,\sigma}$ 之间存在相关关系, 因此通过数值拟合可以得到

$$\gamma_{TH1,\sigma\tau}^* = 0.47 \gamma_{TH1,\tau} + 0.53 \gamma_{TH1,\sigma} \quad (4)$$

由于加劲肋阈值刚度随 ζ 的增大而减小, 故 $\zeta=1, 2$ 时加劲肋阈值刚度为

$$\gamma_{TH1,\sigma\tau}^* = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.6\zeta)^2}} \gamma_{TH1,\sigma\tau}^0 \quad (5)$$

式中: $\gamma_{TH1,\sigma\tau}^0$ 为钢板墙在剪力和均匀压力共同作用下, 设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋所需要的阈值刚度。

式(5)即为剪应力和竖向压应力共同作用下, 设置 1 道竖向闭口槽钢加劲肋时, 加劲肋阈值刚度计算公式。

为了检验公式(5)的通用性,通过改变参数取值,进行不同模型的有限元分析,有限元计算结果与公式计算结果的比较如表 5 所示。由表 5 可知,公式计算值与有限元结果吻合较好。

表 5 有限元结果与公式结果比较 1

Tab. 5 Comparison 1 Between Results of Finite Element and Formula

β	ζ	K	有限元值 x_1	公式值 x_2	$X/\%$
0.2	0	0.58	144.33	151.25	4.51
		0.19	169.78	181.45	6.43
	1	0.58	123.47	130.08	5.34
		0.19	160.45	156.05	2.74
	2	0.58	89.22	96.80	7.83
		0.19	120.31	116.11	4.78
0.6	0	0.58	15.12	15.94	5.14
		0.19	23.52	24.22	2.89
	1	0.58	13.81	13.71	1.00
		0.19	19.61	20.83	5.85
	2	0.58	12.24	11.31	7.59
		0.19	16.91	15.64	7.51

注: $X=|x_2-x_1|/\max\{x_2,x_1\}$ 。

3.2 设置 2 道以上加劲肋

为了考察加劲肋数量对加劲肋阈值刚度 γ_{THn} 的影响,取 K,β,ζ 和第 3.1 节相同,对 $n_s=2,3$ 的加劲钢板墙进行分析,得到一系列阈值刚度,如表 6,7 和图 7 所示。由表 6,7 和图 7 可知,与设置 1 道加劲肋类似, γ_{THn} 随着 β,ζ 的增大而减小,除个别情况($\beta=0.2$)外, γ_{THn} 随 K 的增大而减小,相同情况下, $\zeta=0$ 时的加劲肋阈值刚度最大。

只承受剪力作用时,钢板墙设置多道竖向闭口槽钢加劲肋时的阈值刚度为 $\gamma_{THn,\tau}$, $n_s=2,3$ 时其计算公式为^[10]

$$\gamma_{THn,\tau}=\alpha_n\gamma_{TH1,\tau}$$

(6)

$$\alpha_n=\frac{1}{2}(\epsilon^2-\sqrt{\epsilon^2-\frac{400}{n_s^2}})$$

(7)

$$\epsilon=1+\frac{100+10\omega(n_s-1)}{n_s^2}$$

(8)

$$\omega=7.22-4.78\tan[h\frac{2(\beta+0.53)}{\beta^{-2.1}}]$$

(9)

只承受均匀压力作用时,钢板墙设置多道竖向闭口槽钢加劲肋时的阈值刚度 $\gamma_{THn,\sigma}$ 的计算公式为^[16]

$$\gamma_{THn,\sigma}=\{86-90\tan[h(\frac{1.8|\beta-0.205|}{\beta^{0.94}})]\}/\beta^{0.18}$$

(10)

剪力和压力共同作用下,设置多道竖向闭口槽钢加劲肋所需要的阈值刚度 $\gamma_{THn,\sigma\tau}^*$ 为

表 6 设置 2 道加劲肋时的阈值刚度

Tab. 6 Threshold Stiffness with Two Stiffeners

ζ	β	不同 K 时的 γ_{TH2}					
		0.88	0.58	0.41	0.31	0.24	0.19
0	0.2	96.64	90.51	93.25	97.45	100.52	110.25
	0.4	16.52	17.53	18.74	19.82	22.12	25.33
	0.6	8.95	9.57	10.42	12.32	14.61	16.51
	0.8	6.52	7.31	8.02	9.81	11.61	13.14
	1.0	3.61	4.32	4.83	5.51	6.26	6.82
1	0.2	70.25	64.35	68.75	73.22	80.21	88.11
	0.4	15.51	16.22	17.03	18.24	20.21	23.02
	0.6	8.33	9.25	11.08	12.51	13.73	14.42
	0.8	5.71	6.24	7.13	8.41	9.92	11.57
	1.0	3.23	3.72	4.24	4.83	5.47	5.84
2	0.2	55.25	53.18	60.25	65.28	73.13	84.35
	0.4	14.22	15.14	16.26	17.34	19.62	22.45
	0.6	9.22	9.51	10.22	11.23	13.06	14.61
	0.8	5.66	6.39	7.41	8.86	10.31	12.14
	1.0	3.13	3.69	4.18	4.91	5.38	5.79

表 7 设置 3 道加劲肋时的阈值刚度

Tab. 7 Threshold Stiffness with Three Stiffeners

ζ	β	不同 K 时的 γ_{TH3}					
		0.88	0.58	0.41	0.31	0.24	0.19
0	0.2	56.62	51.52	53.42	56.58	64.48	71.25
	0.4	12.51	13.22	14.14	14.95	16.21	18.12
	0.6	7.51	7.93	8.62	9.21	10.24	11.31
	0.8	5.12	5.24	5.51	6.52	7.91	9.32
	1.0	2.72	3.11	3.82	4.42	4.71	5.27
1	0.2	46.35	44.26	46.22	50.37	58.12	63.25
	0.4	11.21	12.12	13.06	13.71	15.12	16.14
	0.6	6.48	7.02	7.58	8.22	9.05	10.21
	0.8	5.02	5.16	5.91	6.42	7.13	8.12
	1.0	2.25	2.62	3.32	3.75	4.11	4.51
2	0.2	42.27	41.25	44.35	49.56	58.55	65.32
	0.4	9.98	10.26	12.12	13.03	14.62	15.18
	0.6	6.41	6.92	7.41	7.92	8.74	10.01
	0.8	4.85	5.08	5.85	6.38	7.08	8.04
	1.0	2.28	2.58	3.28	3.71	4.08	4.48

$$\gamma_{THn,\sigma\tau}^*=0.47\gamma_{THn,\tau}+0.53\gamma_{THn,\sigma}$$

(11)

设置多道竖向闭口槽钢加劲肋时, $\zeta=1,2$ 时钢板墙小区格所承受的荷载相差较小,且 ζ 取值对钢板墙阈值刚度影响较小。因此, $\zeta=1,2$ 时加劲肋阈值刚度 $\gamma_{THn,\sigma\tau}^*$ 为

$$\gamma_{THn,\sigma\tau}^*=\frac{1}{\sqrt{1+0.6^2}}\gamma_{THn,\sigma\tau}^0=0.86\gamma_{THn,\sigma\tau}^0$$

(12)

因此,设置多道竖向闭口槽钢加劲肋时,加劲肋阈值刚度为

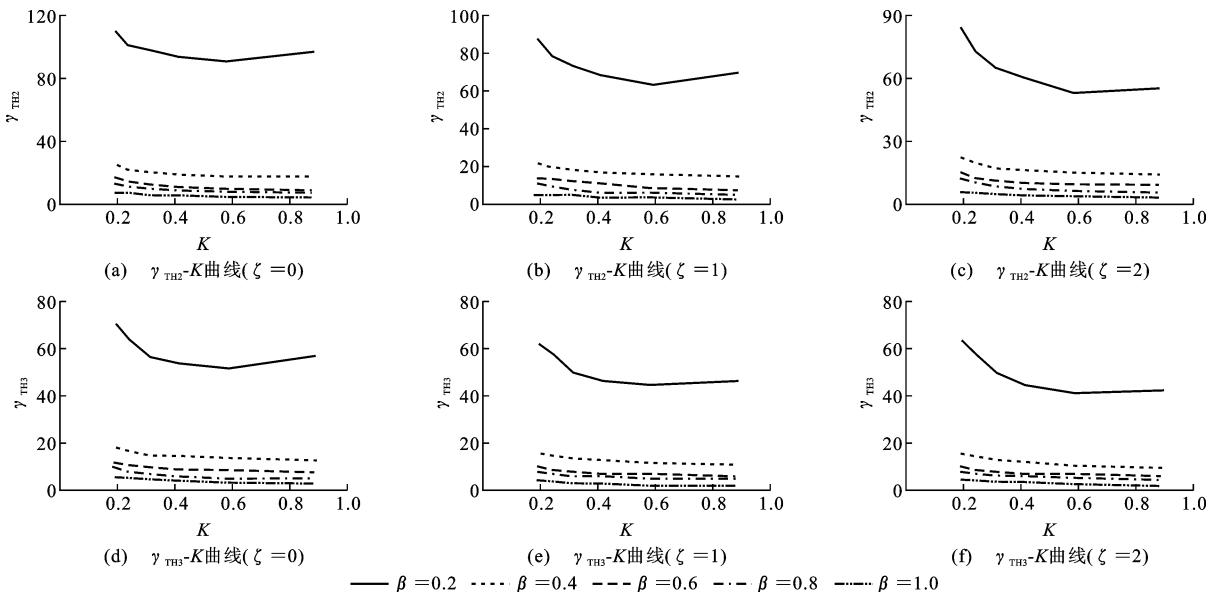


图 7 设置 2 道和 3 道加劲肋时的阈值刚度

Fig. 7 Threshold Stiffness with Two and Three Stiffeners

$$\gamma_{THn,\sigma\tau}^* = \begin{cases} \gamma_{THn,\sigma\tau}^0 & \zeta=0 \\ 0.86\gamma_{THn,\sigma\tau}^0 & \zeta=1,2 \end{cases} \quad (13)$$

为了检验公式(13)的通用性,通过改变参数取值,进行不同模型的有限元分析,有限元计算结果与公式结果的比较如表 8 所示。由表 8 可知,公式值与有限元值吻合较好,公式具有较高的精度。

表 8 有限元结果与公式结果比较 2

Tab. 8 Comparison 2 Between Results of Finite Element and Formula						
n_s	β	ζ	K	有限元值 y_1	公式值 y_2	$Y/\%$
2	0.4	0	0.41	18.74	19.52	3.99
			0.19	25.33	26.74	5.27
		1	0.41	17.03	16.78	1.47
			0.19	23.02	22.99	0.13
		2	0.41	16.26	16.78	3.10
			0.19	22.45	22.99	2.39
3	0.6	0	0.58	7.93	8.25	3.87
			0.19	11.31	11.95	5.36
		1	0.58	7.02	7.10	1.13
			0.19	10.21	10.28	0.69
		2	0.58	6.92	7.10	2.54
			0.19	10.01	10.28	2.63

注: $Y = |y_2 - y_1| / \max\{y_2, y_1\}$ 。

4 结 语

(1)加劲肋阈值刚度随着小区格宽高比 β 、竖向压应力非均匀系数 ζ 、加劲肋数目 n_s 增大而减小。除个别情况($\beta=0.2$)外,加劲肋阈值刚度随着加劲

肋抗扭刚度与抗弯刚度比增大而减少。
(2)提高加劲肋抗扭刚度与抗弯刚度比能显著降低其阈值刚度,从而减小用钢量,获得较好的经济性。
(3)提出了不同情况下加劲肋阈值刚度计算公式,公式计算结果与有限元结果吻合较好。

参考文献:
References:

[1] 郭彦林,周 明. 钢板剪力墙的分类及性能[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(3):1-13.
GUO Yan-lin, ZHOU Ming. Categorization and Performance of Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 1-13.

[2] 王迎春,郝际平,李 峰,等. 钢板剪力墙力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39(2):181-186.
WANG Ying-chun, HAO Ji-ping, LI Feng, et al. Study on Mechanical Property of Steel Plate Shear Walls [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(2): 181-186.

[3] 邵建华,顾 强,申永康. 多层钢板剪力墙水平荷载作用下结构性能的有限元分析[J]. 工程力学,2008,25(6):140-145.
SHAO Jian-hua, GU Qiang, SHEN Yong-kang. Finite Element Analysis for Performance of Multi-storey Steel Plate Shear Walls Subjected to Horizontal Load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 140-145.

- [4] SABOURI-GHOMI S, VENTURA C E, KHARRAZI M H. Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(6): 878-889.
- [5] 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(1): 1-6.
GUO Yan-lin, DONG Quan-li. Research and Application of Steel Plate Shear Wall in High-rise Buildings [J]. Steel Construction, 2005, 20(1): 1-6.
- [6] KULAK G L, KENNEDY D J L, DRIVER R G, et al. Steel Plate Shear Walls — An Overview[J]. Engineering Journal, 2001, 38(1): 50-62.
- [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.
GUO Yan-lin, CHEN Guo-dong, MIAO You-wu. Elastic Buckling Behavior of Steel Plate Shear Wall with Cross or Diagonal Stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 84-91, 59.
- [8] 陈国栋, 郭彦林, 范 珍, 等. 钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 19-26, 38.
CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin, FAN Zhen, et al. Cyclic Test of Steel Plate Shear Walls [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 19-26, 38.
- [9] 侯 蕾, 郝际平, 董子建, 等. 十字加劲肋钢板剪力墙低周反复荷载的试验[J]. 钢结构, 2006, 21(2): 12-16.
HOU Lei, HAO Ji-ping, DONG Zi-jian, et al. Cyclic Test of Cross-stiffened Steel Plate Shear Wall [J]. Steel Structures, 2006, 21(2): 12-16.
- [10] 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 Gen-shu, TAO Wen-deng. Elastic Shear Buckling of Steel Shear Walls Strengthened Vertically by Closed Section Stiffeners [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 1-9.
- [11] 聂建国, 黄 远, 樊健生. 钢板剪力墙结构竖向防屈曲简化设计方法[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 1-4, 18.
NIE Jian-guo, HUANG Yuan, FAN Jian-sheng. Vertical Buckling-resistant Design of Steel Plate Shear Wall Structure [J]. Building Structure, 2010, 40(4): 1-4, 18.
- [12] 何欢欢, 赵 伟, 赵剑丽. 稀疏竖向加劲钢板剪力墙性能研究[J]. 施工技术, 2013, 42(8): 46-49.
HE Huan-huan, ZHAO Wei, ZHAO Jian-li. Experimental Research of Discrete Vertical Stiffened Steel Plate Shear Wall [J]. Construction Technology, 2013, 42(8): 46-49.
- [13] 杨嘉胤, 童根树, 张 磊. 竖向闭口加劲钢板剪力墙在非均匀压力下的弹性稳定性研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 132-139, 159.
YANG Jia-yin, TONG Gen-shu, ZHANG Lei. Research of Elastic Buckling of Steel Shear Walls Stiffened by Vertical Tubes Under Nonuniform Compression [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 132-139, 159.
- [14] 陈 骥. 钢结构稳定: 理论与设计 [M]. 6 版. 北京: 科学出版社, 2014.
CHEN Ji. Stability of Steel Structures: Theory and Design [M]. 6th ed. Beijing: Science Press, 2014.
- [15] 赵 伟, 杨强跃, 童根树. 钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力研究[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 15-23.
ZHAO Wei, YANG Qiang-yue, TONG Gen-shu. Stiffener Stiffness and Elastic Buckling Stress of Steel Plate Shear Wall [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 15-23.
- [16] 陶文登, 童根树, 干 钢, 等. 竖向槽钢加劲钢板剪力墙轴压屈曲[J]. 建筑结构, 2013, 43(15): 37-43.
TAO Wen-deng, TONG Gen-shu, GAN Gang, et al. Elastic Buckling of Steel Shear Walls Vertically Stiffened by Channels Under Axial Compression [J]. Building Structure, 2013, 43(15): 37-43.