

引用格式: 韩军强, 张国松, 王新堂, 等. 钢框架门式钢板剪力墙单元的防屈曲设计[J]. 工业建筑, 2026, 56(3): 93–99. HAN Junqiang, ZHANG Guosong, WANG Xintang, et al. Buckling-Resistant Design of Portal Steel Plate Shear Walls in Steel Frames[J]. Industrial Construction, 2026, 56(3): 93–99 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG24090802

钢框架门式钢板剪力墙单元的防屈曲设计^{*}

韩军强¹ 张国松¹ 王新堂² 冯 洪¹

(1. 浙江省二建钢结构有限公司, 浙江宁波 315207; 2. 宁波大学科学技术学院, 浙江宁波 315302)

摘 要 钢板剪力墙是一种广泛用于提高钢框架结构整体抗侧刚度的结构单元, 而确保该单元发挥抗剪作用的重要前提则是保证其在正常使用阶段不会发生面外失稳。为此, 对所创建的一种新型门式钢板剪力墙单元进行了多种受力工况下的稳定性分析, 并根据其自身的构造特征以及方便设计的需要, 提出了简单实用的防屈曲设计方法。该方法的主要创新之处为: 1) 对于钢板剪力墙的防屈曲设计无须设计人员二次分析, 仅通过简单计算或作图法可直接确定相关参数; 2) 该方法给出了门式钢板剪力墙单元多种有效的防屈曲加劲方案, 而且仅通过相关条件和要求可直接选取。

关键词 门式钢板剪力墙; 加劲方式; 防屈曲; 实用设计方法

Buckling-Resistant Design of Portal Steel Plate Shear Walls in Steel Frames

HAN Junqiang¹ ZHANG Guosong¹ WANG Xintang² FENG Hong¹

(1. Zhejiang Second Construction Steel Structure Co., Ltd., Ningbo 315207, China; 2. College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315302, China)

Abstract: Steel plate shear walls are structural units widely used to improve the overall lateral stiffness of steel frame structures. It is essential to prevent out-of-plane instability during normal service to ensure the unit fulfills its shear resistance. This paper analyzes the stability of a novel portal steel plate shear wall under various stress conditions. Based on its structural characteristics and practical design needs, a simple and practical buckling-restraint design method is proposed. The main innovations of this method are: 1) Designers can determine the required parameters through simple calculations or graphical methods without performing secondary analysis for the buckling-restraint design. 2) It provides multiple effective buckling-restraint stiffening schemes for portal steel plate shear wall elements, which can be directly selected based on relevant conditions and requirements.

Keywords: portal steel plate shear walls; stiffening scheme; buckling-resistant design; practical design methods

0 引 言

目前国内外学者对钢板剪力墙的主要研究集中在组合钢板剪力墙、非加劲钢板剪力墙、加劲钢板剪力墙、开缝钢板剪力墙和开洞钢板剪力墙等形式。关

于开洞钢板剪力墙, 国内外文献已有不少相关研究报告^[1–4]。王威等^[1]基于波形钢板剪切屈曲理论推导了波形开洞钢板剪力墙屈曲应力计算式。牟在根等^[2]在综合分析的基础上给出了考虑加劲肋作用的开洞

^{*} 浙江省公益基金项目(LGF21E080005); 宁波市自然科学基金项目(202003N4170)。

第一作者: 韩军强, 高级工程师, 主要从事组合结构和施工技术方向研究。

通信作者: 王新堂, 博士, 教授, 主要从事组合结构方向研究, wxt196322@126.com。

收稿日期: 2024-09-08

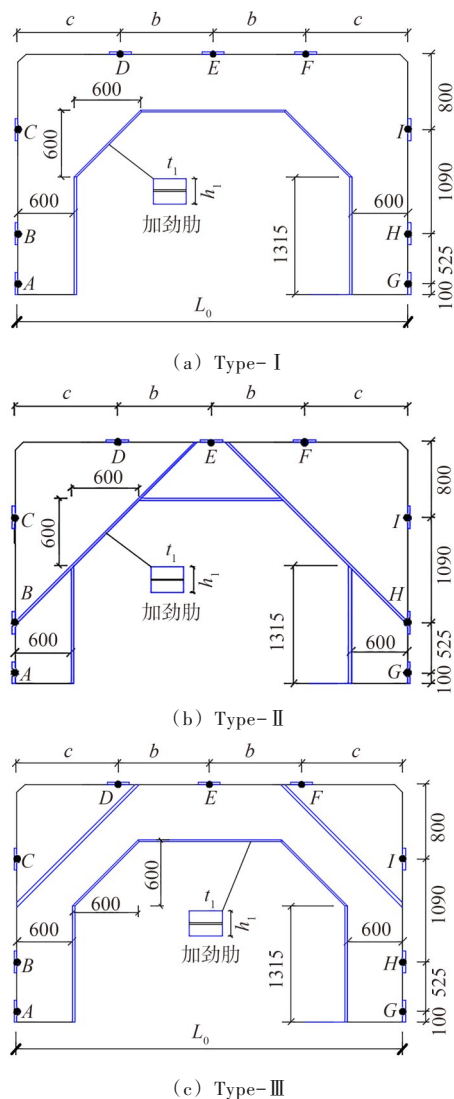


图2 钢板剪力墙的不同加劲方式 mm
Fig. 2 Stiffening schemes for portal steel plate shear wall elements

形随动强化模型。钢材屈服后的应力-应变关系简化为平缓的斜直线,并取屈服后的弹性模量为 $0.01E_s$ 。其本构关系式为:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y + 0.01E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_y 为屈服强度; ε_y 为屈服应变; E_s 为弹性模量。

所有加劲肋板与主钢板之间均完全黏结、协调工作,以模拟实际的连接方式。

2.2 数值模型验证

为验证门式钢板剪力墙屈曲荷载分析数值模型的可靠性,下面给出三组试件试验结果及数值模拟分析结果的比较。图3为钢框架内嵌钢板剪力墙的试件SJ1的基本构造。

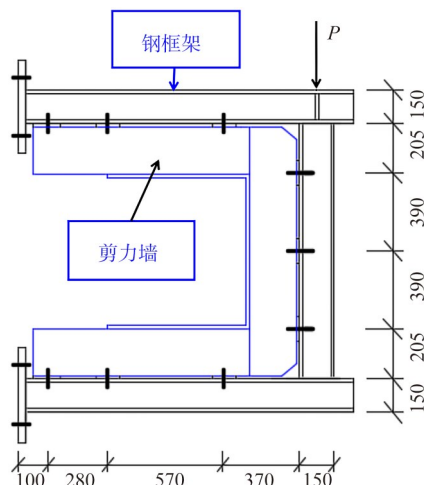


图3 试件SJ1基本构造 mm
Fig. 3 Basic configuration of specimen SJ1

三组试件均具有图3所示的基本构造特征,即由外围同样特征的钢框架与内嵌的不同剪力墙单元经9个节点连接而成。钢框架的梁柱截面均为H150×150×6×12,3组试件的区别仅在于内嵌的剪力墙单元的不同。图4为3个剪力墙单元的构造,分别记为PS-SJ1、PS-SJ2、PS-SJ3。三组试件选用材料的主要力学性能指标见表1。

图5为上述三组试件的实测荷载-位移曲线及有限元模拟结果的对比。可以看出,三组试件的有限元模拟分析结果与试验结果相当吻合。其中,三组试件的屈曲荷载试验值分别为105.2、140.3、90.1 kN;有限元模拟结果分别为103.7、138.5、88.9 kN。由图5(a)可以看出,虽然试件SJ1的两组曲线路径有一定的差异,但最终的屈曲荷载也相当接近,二者仅相差1.4%,其他两组试件的极限荷载相差也分别为1.3%、1.3%。由此可见,本文所建立的有限元分析模型具有极高的精度和可靠性。上述结果还表明:1)设有加劲肋的钢板剪力墙试件,其屈曲荷载明显高于未设加劲肋的剪力墙试件(即试件SJ1、SJ2的屈曲荷载高于试件SJ3);2)带有三角区域的门式钢板剪力墙试件SJ2,其屈曲荷载又高于直角形的门式钢板剪力墙试件SJ1。这也从一定程度上解释了最终选用图2所示门式钢板剪力墙的理由。

3 防屈曲实用设计方法的建立

3.1 曲线选定法(作图法)

基于上述建立的钢板剪力墙数值分析模型,通过对不同工况下门式钢板剪力墙单元屈曲性能分

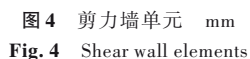


Fig. 5 Comparison of FEM and test results

为方便设计人员使用,该关系曲线针对实际钢框架结构及有关参数的取值范围,分别考虑了如下

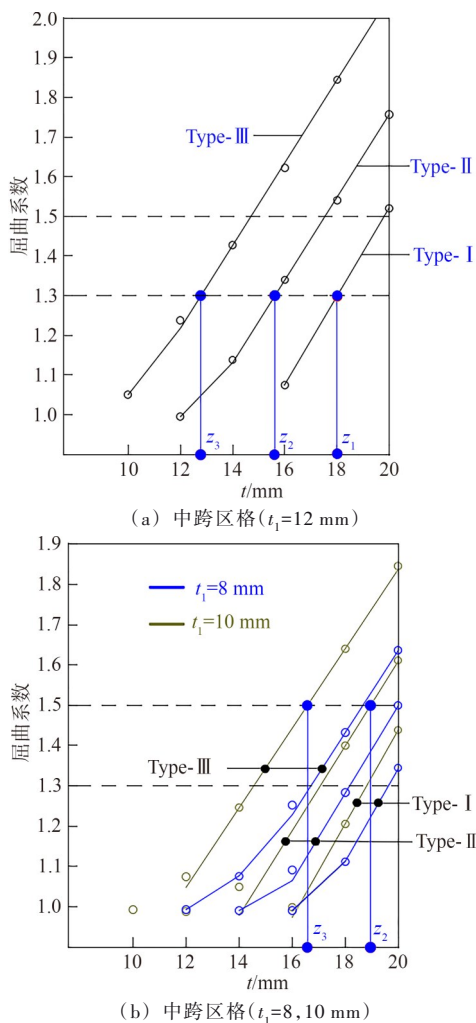


图6 屈曲系数与加劲肋壁厚 t 的关系曲线
Fig. 6 Relations between buckling coefficient and stiffener thickness t

参数的变化,即:结构总高度(框架层数 n);钢板剪力墙所在部位(底层、非底层、中间跨、边跨);钢板剪力墙所在框架区格的层高 H (2800, 3000, 3200 mm)、柱距 L (4000, 5000, 6000 mm)、区格钢柱截面高度 h (400, 500, 600 mm)。因篇幅有限,这里仅针对 $n \leq 10$ (总高度 ≤ 30 m)的钢框架结构进行分析,并建立门式钢板剪力墙的防屈曲实用设计方法。

基于对 $n \leq 10$ (总高度 ≤ 30 m)的钢框架结构屈曲分析的基本数据,图6给出了位于框架中层(非底层)门式钢板剪力墙单元的一组屈曲系数与钢板壁厚 t 之间的关系曲线,且分别给出了针对加劲肋几何参数 t_1 的变化规律。其中,图中数据对应钢框架柱距 $L=5000$ mm,层高 $H=3000$ mm,区格的钢柱截面高度 $h=500$ mm。且图6中的结果均对应加劲板高

度 $h_1=100$ mm。

图6结果显示,该区格钢板剪力墙单元的屈曲系数随钢板剪力墙壁厚 t 的变化在相当大的范围内呈线性关系,尤其当屈曲系数大于1.2时,可完全视为线性关系。针对其他参数的变化,也可得到同样的关系曲线(即可得到一组类似图6这样的曲线)。下面则给出利用该曲线进行防屈曲设计的方法。

1)首先根据整体框架分析确定门式钢板剪力墙所在区格的有关特征参数(所在部位、柱距 L 、层高 H 、区格钢柱截面最小高度 h)及该部位门式钢板剪力墙单元所需基本壁厚 t_0 (根据刚度要求所确定的最小壁厚)。

2)设定防屈曲设计安全系数 $k(>1)$ 。

3)根据该区格的对应屈曲系数曲线(即图6所示)选定所需要的加劲方式及最终确定的钢板剪力墙单元壁厚 t 。

具体方法为:根据防屈曲设计安全系数 k 确定所需要的屈曲系数(即屈曲系数=安全系数);然后在图6中做出一个通过某横坐标值的水平线(如图6中通过屈曲系数1.3或1.5的水平线,这里的1.3或1.5即为防屈曲设计安全系数);寻求水平线与图中各曲线的交点,并通过这些交点做向下的垂线得到与横坐标线的垂足,由此得到各垂足的横坐标值(即图中的 z_1, z_2, z_3)。该坐标值实际对应钢板剪力墙单元分别采用三种加劲方式(即Type-I、Type-II、Type-III)时所需要的钢板剪力墙壁厚,并进一步考虑取整;然后按下面两种原则之一确定设计结果:

a. 若遵循钢板剪力墙壁厚最小原则,则可选定钢板剪力墙的加劲方式为Type-III,所需要的壁厚为:

$$t = \max(13, t_0) \quad (3)$$

b. 若遵循加劲方式最为简单原则,则可选定钢板剪力墙的加劲方式为Type-I,所需要的壁厚为:

$$t = \max(18, t_0) \quad (4)$$

3.2 简化算法

上述分析已表明,图6显示的屈曲系数 k 与钢板剪力墙壁厚 t 之间的关系在屈曲系数的主要取值范围内(屈曲系数大于1.2)呈线性变化,由此可将相应的曲线关系转换为一种简单的算法。具体如下:

对于加劲方式 $i=1, 2, 3$ (分别对应加劲方式Type-I、Type-II、Type-III),可得到如下关系:

$$t_{zi} = C_{1i} + k C_{2i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (5a)$$

$$\text{其中 } C_{1i} = (t_{ai} k_{bi} - t_{bi} k_{ai}) / (k_{bi} - k_{ai}) \quad (5b)$$

C_{2i}=(t_{bi}-t_{ai})/(k_{bi}-k_{ai}) (5c)

式中:k为设计要求的稳定安全系数(屈曲系数);t_{zi}为加劲方式i(i=1,2,3)的门式钢板剪力墙单元壁厚;t_{ai}、t_{bi}为加劲方式i的钢板剪力墙单元线性控制壁厚,由图7所示k-t曲线中的线性段确定;k_{ai}、k_{bi}为图7所示k-t曲线中分别与t_{ai}、t_{bi}对应的屈曲系数。

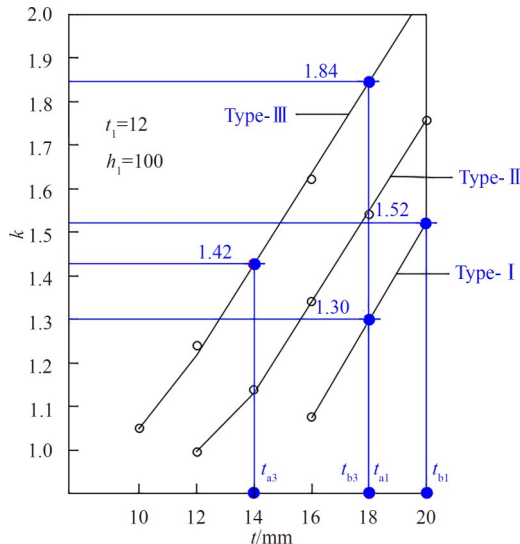


图7 线性控制参数示例
Fig. 7 Example of linear control parameters

基于图7结果,即可由式(5b)、式(5c)得到Type-I、Type-II和Type-III曲线所对应的参数C_{1i}、C_{2i}、C_{12}、C_{22}、C_{13}、C_{23}分别为6.18、9.09、3.24、9.52、0.48、9.52。

得到上述参数之后即可由式(5)直接获得各加劲方式下门式钢板剪力墙单元所需要的壁厚t_{zi},从而基于上述两种设计原则确定最终的门式钢板剪力墙壁厚及对应的加劲方式。由此可见,本节所述简化算法实际上是在将图7三组曲线转化为三组对应参数(C_{1i}, C_{2i})之后再由式(5)得到剪力墙单元所需要的壁厚t_{zi}的方法。因此,利用式(5)计算剪力墙单元壁厚的前提是根据各种工况所获得的图7来得到对应参数(C_{1i}, C_{2i})。

表2即给出了位于框架中跨(非底层)的门式钢板剪力墙单元对应三种加劲方式的参数(C_{1i}, C_{2i})。其中,结构总高度<30 m(n≤10)、剪力墙所在层高H=3000 mm,柱距分别考虑L=4000,5000,6000 mm,钢柱截面高度h=500 mm,加劲肋壁厚为12 mm。

如设稳定安全系数为1.3,则根据表2中的参数可以由式(5)求得柱距为5000 mm的位于中跨的钢板剪力墙单元对应各加劲方式(h_1=12 mm)所需要

的剪力墙壁厚分别为18,15.6,12.9 mm,取整后即 为18,16,13 mm。显然该结果与曲线选定法给出的 结果完全相同。

表2 剪力墙壁厚设计参数(h_1=12 mm)
Table 2 Design parameters for the thickness of shear walls (h_1=12 mm)

加劲方式	参数	4000 mm		5000 mm		6000 mm	
		中跨	边跨	中跨	边跨	中跨	边跨
Type-I	C_{11}	8.41	7.44	6.18	8.32	8.17	6.96
	C_{21}	5.88	6.25	9.09	6.45	8.70	8.70
Type-II	C_{12}	3.57	1.25	3.24	3.60	3.16	1.00
	C_{22}	7.14	8.33	9.52	8.00	10.53	11.11
Type-III	C_{13}	-0.92	-0.78	0.48	-1.49	-0.77	-0.10
	C_{23}	8.33	8.70	9.52	9.30	11.54	10.00

同样可进一步得到加劲肋壁厚为10 mm,其他 参数保持不变时钢板剪力墙壁厚计算所对应的 三组设计参数(C_{1i}, C_{2i}),结果见表3。

表3 剪力墙壁厚设计参数(h_1=10 mm)
Table 3 Design parameters for the thickness of shear walls (h_1=10 mm)

加劲方式	参数	4000 mm		5000 mm		6000 mm	
		中跨	边跨	中跨	边跨	中跨	边跨
Type-I	C_{11}	7.87	7.74	8.00	8.14	8.45	7.27
	C_{21}	6.45	6.45	8.33	7.14	9.09	9.09
Type-II	C_{12}	3.33	2.67	4.67	3.42	4.53	3.37
	C_{22}	7.84	8.33	9.52	8.89	10.53	10.53
Type-III	C_{13}	-0.36	1.58	1.60	0.51	4.82	2.38
	C_{23}	9.09	8.33	10.00	9.30	9.09	9.52

根据表3中的参数,也可由式(5)很方便地得到 柱距为5000 mm的钢板剪力墙对应三种加劲方式 (Type-I、Type-II、Type-III)及安全系数k=1.5所 需的壁厚,分别为20.5,19.0,16.6 mm。该结果与 曲线选定法给出的结果完全一致。

综上分析,基于式(5),最终可以按如下方法完 成门式钢板剪力墙单元的防屈曲设计。

1)按照钢板剪力墙壁厚最小原则:根据式(5) 所求得的t_{zi}(i=1~3)确定最小值t_{min}及对应的加劲方 式,之后由式(6)选定门式钢板剪力墙所需壁 厚,即:

t = max(t_{min}, t_0) (6)

2)按照加劲方式最为简单原则:根据式(5)所 求得的t_{zi}(i=1~3)确定最大值t_{max}及对应的加劲方 式,之后由式(7)选定门式钢板剪力墙所需壁厚,即:

$$t = \max(t_{\max}, t_0) \quad (7)$$

由此可见,这里给出的基于设计参数表与计算公式的简化算法不仅结果准确、且方法更为简单。

4 结 论

1)给出的三种加劲方式均对提高门式钢板剪力墙的屈曲荷载有明显效果,最终采取的加劲方式应根据设计要求综合考虑。

2)加劲肋的几何参数(高度与壁厚)对剪力墙的加劲效果均有明显影响,但考虑到加劲高度的限制,实际则主要考虑选取适当的壁厚。

3)对门式钢板剪力墙的防屈曲设计,可首选优化算法。该方法不仅有相当高的可靠性,且使用极为方便。

4)从优化设计的角度,门式钢板剪力墙的防屈曲设计应综合考虑各种参数的影响,主要为剪力墙壁厚 t 、加劲方式以及加劲肋板的壁厚。

参 考 文 献

- [1] 王威,孙壮壮,罗麒锐,等. 开洞波形钢板剪力墙受剪承载力及耗能能力分析[J]. 建筑结构学报,2022, 43(10):187-198.
- [2] 牟在根,杨雨青. 侧边开洞-斜向槽钢加劲钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020, 41(6):65-75.
- [3] WANG K, WANG Y H, GAO Y, et al. Lateral behaviour of steel plate shear wall with cold-formed steel strips reinforcing door opening[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 190: 109456.
- [4] KHAN N A, SRIVASTAVA G. Models for strength and stiffness of steel plate shear walls with openings[J]. Structures, 2020, 27:2096-2113.
- [5] 张爱林,苏磊,曹志亮,等. 钢框架+防屈曲钢板剪力墙结构体系在装配式钢结构住宅中的应用[J]. 建筑结构,2021, 51(17):85-90.
- [6] 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.
- [7] 傅学怡,魏木旺,张健. 防屈曲钢板剪力墙稳定性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(8):29-33.
- [8] 田炜烽,左进博,钟炜辉. 任意厚度非加劲钢板剪力墙与防屈曲钢板剪力墙的通用拉杆模型[J]. 建筑结构学报,2021, 42(9):148-158.
- [9] 钟恒,侯健,郭兰慧. 设置分块盖板的防屈曲钢板剪力墙滞回性能研究[J]. 建筑结构学报,2021, 42(12):410-418.
- [10] ZHAO Z W, JIN Z Y, ZHANG Z L, et al. Post-buckling shear capacity of steel plates with opening strengthened by fiber fabric[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 203: 108304.
- [11] CAO Q, HUANG J Y, ZHAO L, et al. Research on shear performance of corrugated steel plate shear walls with inelastic buckling of infilled plates under lateral loads[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 15:104406.
- [12] SHIN D H, KIM H J. Post-buckling strengths of steel-plate shear walls with two-side clamped boundary conditions[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 170:108499.