引用格式：栾海涛，贺雄，段劲松，等. 平-波钢板组合墙承载力计算与设计方法[J]. 工业建筑，2026，56(4)：94-101. LUAN Haitao，HE Xiong，DUAN Jinsong，et al. Calculation and Design Methods for the Bearing Capacity of Flat-Corrugated Steel Plate Composite Walls[J]. Industrial Construction，2026，56(4)：94-101 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25051903

平-波钢板组合墙承载力计算与设计方法

栾海涛[1]　贺　雄[2]　段劲松[1]　俞　果[1]　侯彦果[2]　闻陈宝[2]　朱博莉[3]

（1. 北京城建集团有限责任公司，北京　100088；2. 清华大学土木工程系，北京　100084；3. 北京科技大学未来城市学院，北京　100083）

摘　要　提出了一种新颖的平-波钢板剪力墙，研究了其弹性屈曲性能与稳定承载力设计计算方法。平-波钢板剪力墙由平钢板和波形钢板标准单元连接而成，后者在工厂通过自动化生产线加工而成，因而生产效率高。通过大量算例的有限元数值计算，分别研究了焊接连接型与螺栓连接型平-波钢板剪力墙的受剪弹性屈曲模态、弹性屈曲荷载、破坏模式、失稳机理及弹塑性稳定承载力，其中包含不同参数对屈曲与承载力性能的影响，并提出了受剪稳定承载力设计方法。

关键词　钢板剪力墙；剪切弹性屈曲；受剪承载力

Calculation and Design Methods for the Bearing Capacity of Flat-Corrugated Steel Plate Composite Walls

LUAN Haitao[1]　HE Xiong[2]　DUAN Jinsong[1]　YU Guo[1]　HOU Yanguo[2]　WEN Chenbao[2]　ZHU Boli[3]

(1. *Beijing Urban Construction Group Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100088, *China*; 2. *Department of Civil Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*; 3. *School of Future Cities*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: This paper proposes a novel flat-corrugated steel plate shear wall (FCSPSW) and explores its elastic buckling performance along with the design and calculation methods for its stability bearing capacity. The FCSPSW is constructed by connecting flat and corrugated steel plate standard units. The latter are fabricated in a factory using a fully available and automatic production line, which ensures high production efficiency. Through the finite element numerical analysis of a large number of examples, the shear elastic buckling modes, elastic buckling loads, failure modes, instability mechanisms, and stability bearing capacity prediction for both welded and bolted connection types of FCSPSWs were studied respectively. This numerical investigation revealed the influence of different design parameters on the buckling and bearing capacity. Finally, design methods for predicting the shear stability bearing capacity of two types of FCSPSWs were proposed.

Keywords: steel plate shear wall; shear elastic buckling; shear-bearing capacity

0　引　言

随着我国城镇化水平不断提高，多高层建筑适应了城镇住宅、医院、学校、商业、办公等市场的发展需求。多高层建筑的抗侧力设计备受人们关注，而常见的抗侧力构件大都可以归结为支撑和剪力墙两类。理论分析和工程实践都证明，钢板剪力墙体系不仅能够有效提升建筑结构的抗侧刚度、抗侧承载力及结构延性，也能有效解决设置门窗洞等功能需求，在实际工程得到长足发展和广泛应用[1-3]。

第一作者：栾海涛，高级工程师，主要从事混凝土和钢结构施工方面研究。

电子信箱：2353916282@qq.com

收稿日期：2025-05-19

1　平-波钢板组合墙组成及设计受力原理

波浪腹板工字形构件(图 1)由波浪腹板与翼缘板组成,能在波浪腹板工字形构件全智能自动化生产线上制造(图 2),产品质量稳定,生产效率极高。在我国,此类全智能生产线有 6~10 条之多,在全国各地均有分布。波浪腹板工字形构件(下称“波浪腹板标准单元”)广泛应用在门式刚架轻型房屋钢结构中,作为门式刚架的梁柱构件采用。在结构跨度较大的情况下,波浪腹板标准单元作为梁构件能取得很好的经济效益。目前全智能生产线能够加工波浪腹板标准单元高度达到 1.5 m、波浪腹板厚度在 2~6 mm 之间,其截面尺寸变化比较灵活。可以想象,适当调整波浪腹板标准单元尺寸,将翼缘尺寸适当收窄(不大于 200 mm),腹板高度适当加大,再通过翼缘板与平钢板组合形成一种组合剪力墙。将这种组合墙应用在多高层建筑中,不失为一种新的尝试。

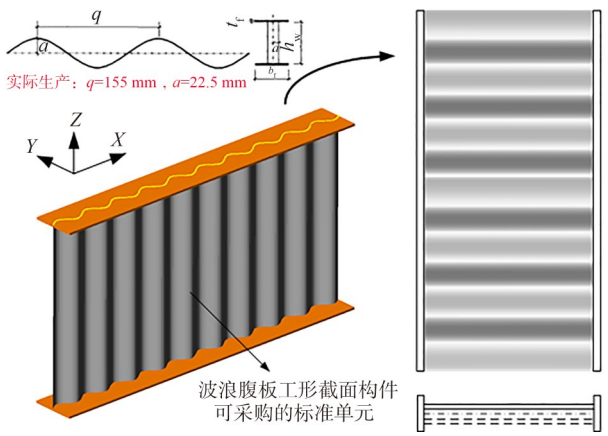


图 1　波浪腹板工字形构件(波浪腹板标准单元)

Fig. 1　Corrugated web I-shaped section member(standard units of corrugated steel plates)



图 2　波浪腹板工字形构件(波浪腹板标准单元的自动化生产线)

Fig. 2　Automated production line for corrugated web I-shaped section members (standard units of corrugated steel plates)

将两块标准单元与若干块平钢板通过翼缘连接形成组合墙,按照连接类型分别定义为焊接连接型平-波钢板剪力墙与螺栓连接型平-波钢板剪力墙,如图 3 所示。考虑到组合墙是在波浪腹板标准单元基础上扩展形成的,前者是在两块波浪腹板标准单元之间焊接一块平钢板连接,在其外侧焊接一 T 形截面构件;后者在两块波浪腹板标准单元之间采用螺栓对扣连接,外侧连接与前者一致。为了方便起见,在此将标准单元腹板称为波形钢板,T 形截面构件腹板也称为平钢板,标准单元和 T 形截面构件翼缘均称为翼缘板。

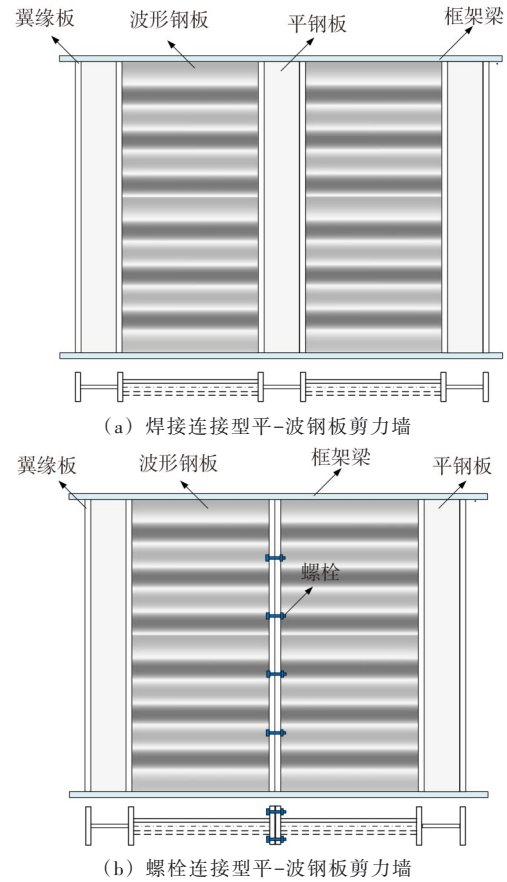


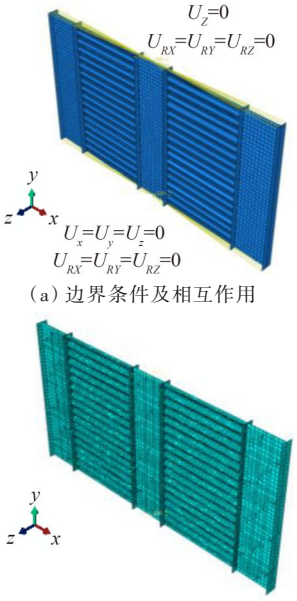
图 3　平-波钢板剪力墙示意

Fig. 3　Schematic diagrams of FCSPSWs

平-波钢板剪力墙一般内置在框架结构内,前者承担水平剪力,后者承担轴力与弯矩。结构具有如下优势:在设计上,平-波钢板剪力墙与框架梁相连接,一般非满布设置,可偏框架一侧布置,也可居中布置,因而结构布置比较灵活,可躲开门窗洞口位置设置;剪力墙在制造和施工上,工厂制造便捷,施工方便,装配化水平高;在力学性能上,剪力墙承载效率高,易于实现屈服而不屈曲的设计,耗能减震性能较好。

依据组合墙波浪钢板和平钢板宽厚比的变化,可分别建立两种受剪承载力设计计算方法。第一种设计方法对应于波浪钢板和平钢板宽厚比较大

的情况，允许波浪钢板和平钢板局部屈曲，此时其受剪承载力近似分解为钢板受剪承载力与翼缘板柱框架抗侧承载力之和。考虑后者刚度非常有限，其贡献可忽略不计。第二种设计方法对应于波浪钢板高厚比较大的情况，允许其受剪局部屈曲，而平钢板宽厚比较小，限制其发生受剪局部屈曲，因而组合墙的受剪承载力可近似等于波浪钢板受剪承载力与组合框架抗侧承载力之和。此时，组合框架由外侧工形截面柱、中间工形截面柱（焊接连接型）或中间双翼缘板柱（螺栓连接型）形成的两跨框架组成，其抗侧刚度较大，对抗侧承载力贡献不能略去。本文研究对象为第二种情况，通过设计大量数值算例、建立有限元模型进行受剪屈曲性能与受剪承载力数值计算与分析，并考虑波浪钢板与框架之间的相互作用，最终建立组合墙受剪承载力设计计算方法。



（a）边界条件及相互作用

（b）单元网格划分

图 4 焊接连接型平-波钢板剪力墙有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the welded-type FCSPSW

2 焊接连接型平-波钢板剪力墙

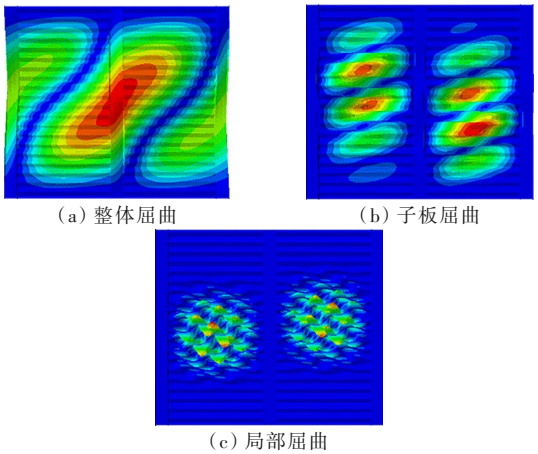
2.1 有限元模型

采用有限元软件建立焊接连接型平-波钢板剪力墙有限元模型，如图4所示。在边界条件上，由于上下框架梁刚度远大于组合剪力墙刚度，因此框架梁刚度视为无限大，认为钢板组合墙在平面内转角等于零，仅发生侧向位移，因此将剪力墙顶端和底端剪力墙截面所有自由度分别耦合在位于截面形心的参考点上，顶端释放面内平动自由度（U_x，U_y），底端约束所有自由度，如图4(a)所示。有限元模型网格划分如图4(b)所示，模型采用四结点缩减积分壳单元（S4R），适用于此类薄壁结构，波形板高度方向网格尺寸为1/6波长，宽度方向为1.5倍波幅，其余部分网格尺寸均为1.5倍波幅，满足工程所需要的计算精度要求。材料均为钢材，弹性模量E_s=206 GPa，泊松比ν_s=0.3。

弹性屈曲分析时，对顶端参考点施加单位剪力，提取一阶屈曲模态及弹性屈曲荷载。弹塑性分析时，RP-1施加x方向单位位移荷载，目标位移为2%层高[4]。钢材采用理想弹塑性本构，屈服准则为von Mises准则，提取顶端参考点反力、位移数据。基于波形钢板尺寸的工程应用[5]，有限元模型参数取值如表1所示。

2.2 弹性屈曲性能

弹性屈曲分析结果表明，受剪工况下焊接连接型平-波钢板剪力墙一阶屈曲模态呈现为整体屈曲、子板屈曲和局部屈曲，如图5所示。由于有限元软件算法限制，子板屈曲的屈曲波不会同时在波形钢板和平钢板中同时出现。整体屈曲一般出现在波形钢板和平钢板刚度较为接近的情况，屈曲波贯



（a）整体屈曲　（b）子板屈曲

（c）局部屈曲

图 5 焊接连接型平-波钢板剪力墙弹性屈曲模态

Fig. 5 Elastic buckling modes of the welded-type FCSPSW

表 1 焊接连接型平-波钢板剪力墙参数取值范围

Table 1 Parameter value range for the welded-type FCSPSW

剪力墙高度 h/mm	波形钢板宽度 b_c/mm	波形钢板厚度 t_c/mm	平钢板宽度 b_f/mm	平钢板厚度 t_f/mm	翼缘板宽度 b_1/mm	翼缘板厚度 t_1/mm	钢材屈服强度 f_y/MPa	波形波幅 a/mm	波形波长 λ/mm
2635~4650	1000~2500	4~8	100~640	4~20	50~200	5~20	355	45	155

穿波形钢板和平钢板两部分；而平钢板部分较强则会出现子板屈曲，在波形钢板部分沿高度分析出现多个相似的屈曲波。此外，如果波形钢板单个波形部分宽厚比较大则会出现局部屈曲，即出现很多个小屈曲波。

为了防止平钢板发生局部屈曲，依据 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》[4]的取值限制平钢板的宽厚比，并设计波形钢板宽厚比以规避其局部屈曲的发生[6]。此外，翼缘板按照 GB 50017—2017《钢结构设计标准》[7]的 a 类工字形截面梁规定取值，即翼缘板伸出长度应当满足 $0.5b_1/t_1 \leqslant 9$。

2.3　弹塑性承载力性能

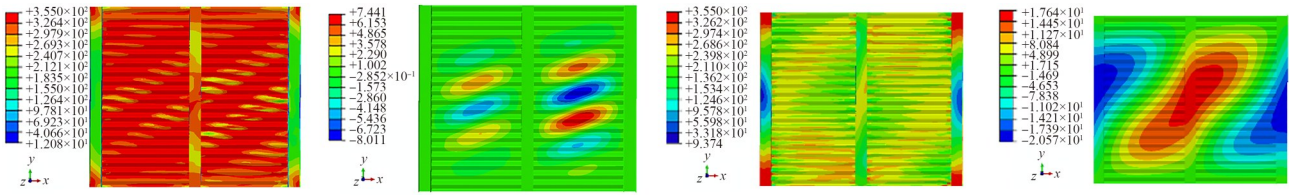
波形钢板波浪棱线横放的情况下，由于“手风琴”效应，只能由工形截面柱承担轴力。为确保其在轴力作用下不先于波形钢板屈服，其截面面积 A_f 需要满足式(1)。

$$A_f \geqslant \frac{f_{y,c} t_c h}{2\sqrt{3}\, f_{y,f}} = \frac{t_c h}{2\sqrt{3}} \tag{1}$$

式中：$f_{y,c}$ 与 $f_{y,f}$ 分别为波形钢板和平钢板钢材的屈服强度；简便起见认为二者采用同种钢材。

选取满足式(1)的算例进行极限承载力分析，分别提取焊接连接型平-波钢板剪力墙两种典型破坏模式对应的 von Mises 应力云图和面外位移云图，如图 6 所示。从应力云图可见，子板破坏模式下更容易实现屈服而不屈曲的设计。此时要求波形钢板自身实现屈服而不屈曲，同时要求翼缘板刚度足够大。整体破坏模式下，von Mises 应力分布明显不均匀，说明设计的经济性更差。

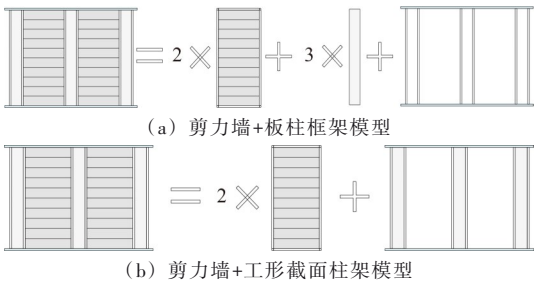
如前所述，在平-波钢板各自的宽度较大时，平-波钢板剪力墙受剪承载力可以近似等于波形钢板和平钢板承担之和，板柱框架的抗侧承载力可忽略不计，如图 7(a)所示。在平钢板宽度较小时，平-波钢板剪力墙受剪承载力近似等于波形钢板抗剪贡献与工形截面柱框架抗侧承载力之和，如图 7(b)所示。为了更好地发挥波形钢板承载性能和滞回性能优越的特点，本文研究第二种情况，建立其受剪稳定承载力计算公式。



(a) 子板破坏模式　　(b) 整体破坏模式

图 6　焊接连接型平-波钢板剪力墙破坏模式

Fig. 6　Failure modes of the welded-type FCSPSW



(a) 剪力墙+板柱框架模型

(b) 剪力墙+工形截面柱架模型

图 7　焊接连接型平-波钢板剪力墙拆解

Fig. 7　Decomposition of the welded-type FCSPSW

对此，平-波钢板剪力墙仅考虑波形钢板屈曲，平钢板看成工形截面柱腹板，且必须满足受剪屈服而不屈曲的设计原则。

Zhao 等[8]研究了波形钢板的承载力，其计算结果表明，在波形展开长度和波高接近的情况下，四边固支的波浪形和波折形波形钢板剪力墙的稳定性能相似。当四边固支时，剪力工况下在 x 方向和 y 方向实际上是等效的。因此，直接采用 Wen 等[9]提出的四周固支波形钢板剪力墙设计曲线，其表达式如式(2)所示。

$$k_0 = 50 + 207\frac{\beta}{m} + \frac{102}{\beta m} + 161\theta\beta^3 \tag{2a}$$

$$\lambda_{nc} = \sqrt{\frac{f_{vy}}{\tau_{cr}}} \tag{2b}$$

$$\varphi_c = \frac{\tau_u}{f_{vy}} \tag{2c}$$

$$\varphi_c = \frac{1}{\left(1 + 0.8\lambda_{nc}^{1.2}\right)^{\frac{1}{1.6}}} \tag{2d}$$

$$V_c = \varphi_{y,c} V_{y,c} \tag{2e}$$

式中：k_0 为剪切弹性屈曲系数；m 为波数；β 为等效宽高

比[9]；θ为扭转刚度参数[9]；λ_{ne}为正则化宽厚比；f_{vy}为钢材抗剪强度设计值；τ_{cr}为波形钢板受剪弹性屈曲应力；$\varphi_{y,c}$为稳定系数；τ_u为波形钢板受剪弹性屈服应力；V_c为四边固支波形钢板剪力；$V_{y,c}$为四边固支波形钢板全截面屈服剪力。

在波形钢板-工形截面柱架模型中[图7(b)]，工形截面柱仍为弹性，采用铁木辛柯梁模型[10-11]考虑剪切效应，其工字形框架模型的抗侧承载力，按照式(3)计算。

$$k = \left(1 + \frac{b_1 t_f}{6 b_f t_1}\right)\frac{A_f}{b_f t_f} \tag{3a}$$

$$\beta_f = \frac{12EI_f}{GA_f h^2} \tag{3b}$$

$$K_v = \frac{12}{1+\beta_f}\frac{EI_f}{h^3} \tag{3c}$$

$$V_{f1} = K_v \delta \tag{3d}$$

式中：k为剪力不均匀系数；β_f为剪切变形对刚度影响的无量纲参数；G为剪切模量；E为钢材弹性模量；I_f为工形截面柱面外抗弯刚度；K_v为工形截面柱抗侧刚度；V_{f1}为考虑剪切效应下工字形框架模型的抗侧承载力；δ为波形钢板峰值承载力对应转角。

组合墙承载力到达峰值点时，波形钢板承载力也达到峰值点，因此根据Dou等[12]的研究结果，波形钢板峰值点转角计算如式(4a)所示。由于波形钢板和工形截面柱剪力平衡，因此波形钢板对工形截面柱产生的附加剪力V_{f2}如式(4b)所示，工形截面柱抗剪贡献V_f如式(4c)所示。

$$\delta = \frac{q}{a}\frac{f_{vy}}{G} \tag{4a}$$

$$V_{f2} = \frac{b_f}{2b_e}V_c \tag{4b}$$

$$V_f = V_{f1} + V_{f2} \tag{4c}$$

式中：q为波长；a为波高。

考虑工形截面柱对波形钢板的作用，工形截面柱约束能力并不能达到四边固支，因此按照左佳奇[13]定义的刚度比得到约束折减系数，对波形钢板抗剪贡献进行折减，如式(5)所示。

$$\eta_b = \frac{EI_t b^3}{D_x h^4} \tag{5a}$$

$$\eta_t = \frac{GI_t b}{D_x h^2} \tag{5b}$$

$$\alpha = \frac{\eta_b}{\eta_b + 0.12\lambda_{ne}^3}\frac{\eta_t}{\eta_t + 0.002\lambda_{ne}^3} \tag{5c}$$

$$V_c = \alpha\varphi_{y,c}V_{y,c} \tag{5d}$$

式中：η_b为弯曲刚度比；η_t为扭转刚度比；D_x为波形钢板在强轴方向单位宽度的弯曲刚度；I_t为工形截面柱的自由扭转惯性矩；α为刚度折减系数。

联立式(4c)、(5d)得到焊接连接型平-波钢板剪力墙剪力到达峰值点时，工形截面柱仍处于弹性阶段的极限承载力计算式，如式(6)所示。

$$V_u = 2\varphi_{y,c}V_{y,c}\left(1 + \frac{b_f}{b_c}\right) + 3K_v\delta \tag{6}$$

在算例满足工形截面柱截面最小面积要求的前提下，将由焊接连接型平-波钢板剪力墙公式计算得到的极限承载力和有限元结果进行对比，如图8所示，可知，极限承载力计算值与有限元值误差基本上为0~10%。

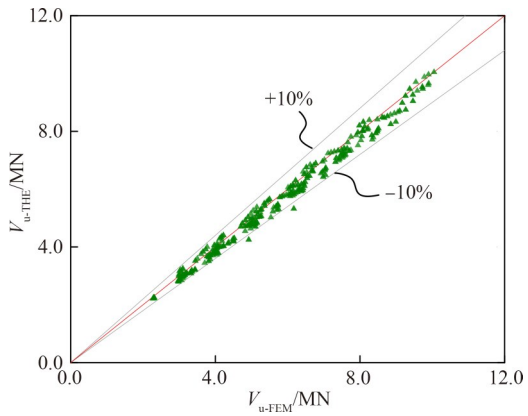


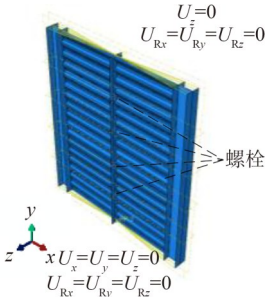
图8 焊接连接型平-波钢板剪力墙极限承载力计算值与有限元计算值对比

Fig. 8 Comparison of the ultimate load capacity predicted by the formula with the FEA results for the welded-type FCSPSW

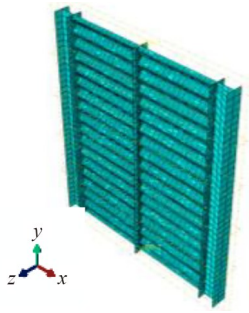
3 螺栓连接型平-波钢板剪力墙

3.1 有限元模型

建立螺栓连接型平-波钢板剪力墙有限元模型开展特征值屈曲分析，获得一阶屈曲模态和弹性屈曲荷载，开展弹塑性分析提取顶部参考点反力-位移曲线，其边界条件及相互作用、网格划分分别如图9(a)、(b)所示。假设螺栓在结构中始终处于弹性状态，采用Connector(连接)单元模拟，选择Cartesian+Cardan(笛卡尔+卡丹)连接类型，三个平动方向设置为Rigid(刚性)，放开三个扭转自由度。两排螺栓分别布置在中间翼缘板两侧伸出翼缘的中心位置，并且在竖直方向上螺栓均匀分布。提取螺栓两个方向的剪力和轴力，其余有限元模型设置与2.1节一致。螺栓连接型平-波钢板剪力墙参数范围如表2所示，相较于表1主要增加了单排螺栓的数目。



（a）边界条件及相互作用



（b）网格划分

图 9　螺栓连接型平-波钢板剪力墙有限元模型

Fig. 9　Finite element model of the bolted-type FCSPSW

3.2　弹性屈曲性能

弹性屈曲分析结果表明，螺栓连接型平-波钢板剪力墙一阶屈曲模态同样有三种，分别是整体屈曲、子板屈曲和局部屈曲，如图 10(a)、(b)和(c)所示。同样地，参照 2.2 节进行防局部屈曲设计。

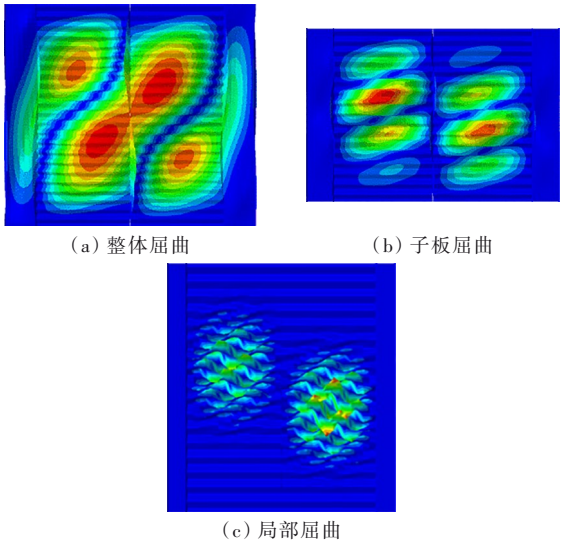
Easley 等[14-15]提出波形钢板剪力墙弹性屈曲荷载公式形式如式(7a)所示，基于螺栓密布假定，将螺栓连接型平-波钢板剪力墙等效为两侧边缘构件约束的竖向加劲波形钢板剪力墙。定义无量纲参数肋板刚度比μ如式(7b)所示，其反映了肋板面外抗弯刚度和波形钢板y方向弯曲刚度之比。

$$N_{cr} = k\frac{D_x^{3/4}D_y^{1/4}}{b^2} \tag{7a}$$

$$\mu = \frac{EI_s h^3}{D_y b_c^4} \tag{7b}$$

式中：I_s为加劲板面外抗弯刚度；D_y为波形钢板在弱轴方向单位宽度的弯曲刚度。

如图 11 所示，当肋板刚度比为 0 时，结构等效为两边固支、两侧边缘构件约束的波形钢板剪力墙，弹性屈曲系数为k_1；当肋板刚度比为无穷大时，



（a）整体屈曲　（b）子板屈曲　（c）局部屈曲

图 10　螺栓连接型平-波钢板剪力墙弹性屈曲模态

Fig. 10　Elastic buckling modes of the bolted-type FCSPSW

半结构等效为三边固支、一侧边缘构件约束的波形钢板剪力墙，弹性屈曲系数为k_2。两侧边缘构件约束的竖向加劲波形钢板剪力墙弹性屈曲系数k介于k_1与$4k_2$之间。定义插值系数ξ_c，两侧边缘构件约束的竖向加劲波形钢板剪力墙弹性屈曲系数k插值公式如式(8)所示。

$$k = (1-\xi_c)k_1 + 4\xi_c k_2 \tag{8}$$

相较于四边固支波形钢板剪力墙，两边固支、两侧边缘构件约束的波形钢板剪力墙和三边固支、一侧边缘构件约束的波形钢板剪力墙弹性屈曲系数因为边缘构件约束相较于固支约束条件约束不足产生了折减，拟合得到的弹性屈曲系数公式及插值系数如式(9)所示。拟合得到的插值系数公式和有限元结果对比如图 12 所示，误差基本在 20% 以内。尽管偏差较大，但作为设计过程的中间参数，当其用于正则化长细比的计算时，应在最后受剪承载力设计公式数值拟合时再进一步校核修正。

$$k_1 = \frac{\eta_b^{0.9}}{\eta_b^{0.9}+0.04}\frac{\eta_t^{0.5}}{\eta_t^{0.5}+0.05}k_0 \tag{9a}$$

$$k_2 = \frac{\eta_b}{\eta_b+0.003}\frac{\eta_t}{\eta_t+0.0012}k_0 \tag{9b}$$

$$\xi_c = 1 - \frac{1}{1+1.07\beta^{3.8}\mu^{0.93}} \tag{9c}$$

表 2　螺栓连接型平-波钢板剪力墙参数取值范围

Table 2　Parameter value range of the bolted-type FCSPSW

剪力墙高度 h/mm	波形钢板宽度 b_c/mm	波形钢板厚度 t_c/mm	平钢板宽度 b_f/mm	平钢板厚度 t_f/mm	翼缘板宽度 b_1/mm	翼缘板厚度 t_1/mm	钢材屈服强度 f_y/MPa	波形波幅 a/mm	波形波长 λ/mm	单排螺栓数 n_{sb}
2635~4650	1000~2500	4~8	200	20	200	20	355	45	155	2~8

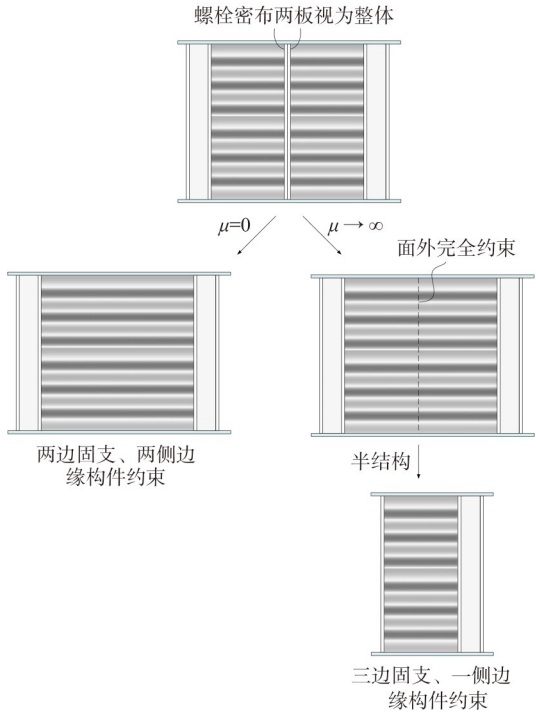


图 11 螺栓连接型平-波钢板剪力墙弹性屈曲荷载分析框架

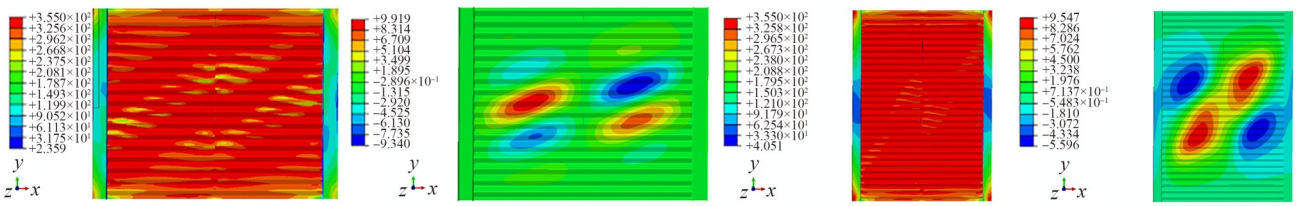
Fig. 11 Analysis framework for the elastic buckling load of the bolted-type FCSPSW

3.3 弹塑性承载力性能

同样地，参照焊接连接型平-波钢板剪力墙分析过程，螺栓连接型平-波钢板剪力墙剪力到达峰值点时，工形截面柱仍处于弹性阶段的极限承载力计算式如式(10)所示。此外，螺栓连接型平-波钢板剪力墙两侧工形截面柱以及中间翼缘板面积和同样需要满足最小面积要求。

$$V_{\mathrm{u}} = \alpha\varphi_{\mathrm{y,c}} V_{\mathrm{y,c}}\left(1 + \frac{b_{\mathrm{f}}}{b_{\mathrm{c}}}\right) + 2K_{\mathrm{v}}\delta \tag{10}$$

分别提取螺栓连接型平-波钢板剪力墙两种典型破坏模式对应的 von Mises 应力云图和面外位移云图，如图 13 所示。同样地，要求波形钢板自身实现屈服而不屈曲，以及要求翼缘板刚度足够大，才能实现整体屈服而不屈曲的设计。



(a) 子板破坏模式　　(b) 整体破坏模式

图 13 螺栓连接型平-波钢板剪力墙破坏模式

Fig. 13 Failure modes of the bolted-type FCSPSW

分别按照式(2b)、(2c)和式(10)计算螺栓连接型平-波钢板剪力墙正则化宽厚比 λ_{ncb} 和稳定系数 φ_{cb}，将两者绘制在图 14 中，并采用如式(11)所示的曲线对其进行下包络。可知，下包络曲线能实现经济且保守的设计。此外，λ_{ncb} 较小时，部分算例 $\varphi_{\mathrm{cb}}>1$，其原因一是工形截面柱假设承载力峰值点对应层间位移角和实际有一定误差，二是弹性屈曲荷载公式拟合存在一定误差。但其在设计上稍偏保守，进而按照 φ_{cb}-λ_{ncb} 曲线设计是合理的。而螺栓起到连接中间两块翼缘板，传递轴力的作用，稳定曲线反映了在有螺栓的情况下，螺栓数量变化对于弹塑性承载性能影响很小。

$$\varphi_{\mathrm{cb}} = \begin{cases} 1 - 0.26\lambda_{\mathrm{ncb}}^2 & \lambda_{\mathrm{ncb}} \leqslant 0.8 \\ \dfrac{1}{0.24 + 0.90\lambda_{\mathrm{ncb}} + 0.38\lambda_{\mathrm{ncb}}^2} & \lambda_{\mathrm{ncb}} > 0.8 \end{cases} \tag{11}$$

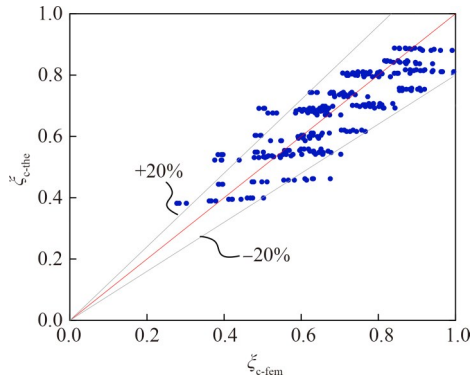


图 12 插值系数公式值 $\xi_{\mathrm{c-the}}$ 和有限元结果 $\xi_{\mathrm{c-fem}}$ 对比

Fig. 12 Comparison of interpolation coefficient formula predictions with finite element results

最后，对比设计计算式(10)与有限元数值分析结果，在算例满足工形截面柱截面及中间翼缘板满足最小面积要求[式(1)]的前提下，将计算得到的螺栓连接型平-波钢板剪力墙极限承载力和有限元结果对比如图 15 所示。可知，计算式(10)与有限元极限承载力误差基本上在 10% 以内。

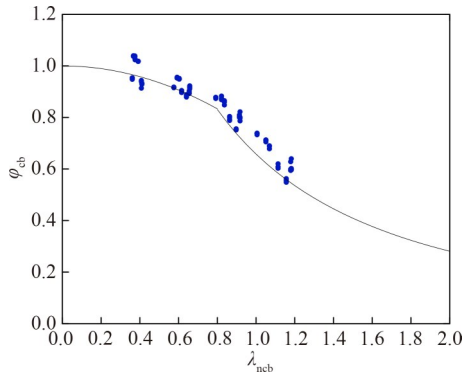


图 14　螺栓连接型平-波钢板剪力墙 φ_{cb}-λ_{ncb} 散点图及下包络曲线

Fig. 14　φ_{cb}-λ_{ncb} scatter plot and lower envelope curve of the bolted-type FCSPSW

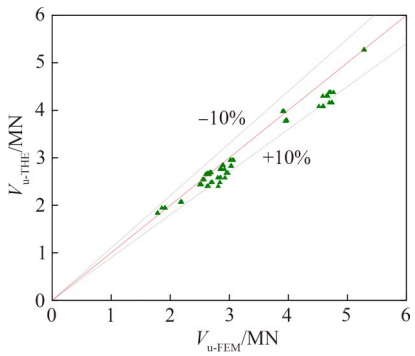


图 15　螺栓连接型平-波钢板剪力墙极限承载力计算值与有限元值对比

Fig. 15　Comparison of ultimate load capacity formula predictions with finite element results of the bolted-type FCSPSW

4　结　论

提出了两种新形式的平-波钢板剪力墙，即焊接连接型平-波钢板剪力墙与螺栓连接型平-波钢板剪力墙，并对其受力机理和设计方法进行了研究，得到以下结论：

1）建立焊接连接型平-波钢板剪力墙弹塑性有限元模型，为了避免作为约束构件的工形截面柱先于波形钢板屈服，因此规定其最小截面面积；提出焊接连接型平-波钢板剪力墙弹塑性极限承载力设计公式，其相对于有限元计算结果偏保守 10% 左右。

2）假设螺栓密布，将螺栓连接型平-波钢板剪力墙等效为两侧边缘构件约束的竖向加劲波形钢板剪力墙。考虑将加劲肋刚度设置为零和无限刚性的两种情况，插值得到两侧边缘构件约束的竖向加劲波形钢板剪力墙弹性屈曲系数。

3）建立螺栓连接型平-波钢板剪力墙弹塑性有限元模型，按照理论公式获得正则化宽厚比和稳定系数，并拟合得到偏于保守的设计曲线，按设计公式设计剪力墙承载力误差基本上在 10% 以内。

参　考　文　献

[1] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of steel shear walls[R]. Berkeley: Structural Steel Educational Council, 2001.

[2] 郭彦林，朱靖申. 剪力墙的型式、设计理论研究进展[J]. 工程力学，2020，37(6)：19-33.

[3] 孙军浩，赵秋红. 钢板剪力墙的工程应用[J]. 建筑结构，2015，45(16)：63-70.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程：JGJ 99—2015 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.

[5] 中国工程建设标准化协会. 波形钢板结构技术规程：T/CECS 290—2022 [S]. 北京：中国计划出版社，2022.

[6] SUN H, GUO Y, WEN C, et al. Local and global buckling prevention design of corrugated steel plate shear walls[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 106055.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准：GB 50017—2017 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.

[8] ZHAO Q, SUN J, LI Y, et al. Cyclic analyses of corrugated steel plate shear walls[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(16): 1-17.

[9] WEN C, GUO Y, ZUO J, et al. Global shear stability capacity of trapezoidally corrugated steel plate shear walls with boundary elements [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 72: 106553.

[10] TIMOSHENKO S P. On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars [J]. Philosophical Magazine, 1921, 41: 744-746.

[11] TIMOSHENKO S P. On the transverse vibrations of bars of uniform cross-section [J]. Philosophical Magazine, 1922, 43 (253): 125-131.

[12] DOU C, PI Y, GAO W. Shear resistance and post-buckling behavior of corrugated panels in steel plate shear walls[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 816-826.

[13] 左佳奇. 单元式波形钢板剪力墙设计理论与试验研究[D]. 北京：清华大学，2023.

[14] EASLEY J T, MCFARLAND D E. Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95: 1497-1516.

[15] EASLEY J T. Buckling formulas for corrugated metal shear diaphragms[J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(7): 1403-1417.