

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201811039

交叉加劲薄钢板剪力墙简化模型

杨雨青, 牟在根

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:薄钢板剪力墙依靠内填钢板屈曲后形成拉力带以抵抗水平荷载,是一种适用于高烈度地区的新型抗侧力结构.采用精细模型进行钢板剪力墙的计算和设计耗时长,为提高钢板墙结构设计的效率,基于拉力带简化模型,提出了交叉支撑-拉力带简化模型(CBSM)用于模拟交叉加劲钢板剪力墙的抗侧性能.推导了交叉加劲钢板墙的初始刚度和承载力计算公式,通过ABAQUS有限元软件建立精细模型和CBSM简化模型,与理论公式计算结果对比,验证简化模型的准确性.结果表明,在不同的跨度、内填板厚度和加劲肋刚度的情况下,精细模型、CBSM简化模型和理论公式3种方法预测的交叉加劲钢板剪力墙承载力有良好的一致性,说明CBSM简化模型能够较准确地预测交叉加劲钢板剪力墙的承载力,反映出加劲肋对钢板剪力墙结构抗侧能力的贡献.初始刚度理论计算公式与精细模型吻合得较好,CBSM简化模型预测刚度低于精细模型,是偏于安全的.

关键词:钢板剪力墙;斜向加劲;简化模型;承载力;刚度

中图分类号: TU392.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0180-07

Simplified model of diagonally stiffened thin steel plate shear walls

YANG Yuqing, MU Zaigen

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Thin steel plate shear wall (SPSW) is a new type of lateral resistance structure suitable for high seismic intensity area, which relies on the tension field formed by the buckling of infilled thin steel plate to resist the horizontal load. It takes a long time to calculate and design SPSW using the detailed model. Thus, in order to improve the efficiency of the SPSW structure design, a simplified model of cross brace-strip model (CBSM) based on the strip model (SM) was proposed to simulate the lateral behavior of diagonally stiffened thin SPSW. The calculation formulas of initial stiffness and bearing capacity of the diagonally stiffened SPSW were derived. The detailed model and the CBSM were established by finite element software ABAQUS. The accuracy of the CBSM and the detailed model were verified by comparing the calculated results with the theoretical formula. The results showed that the detailed model, the simplified CBSM, and the theoretical formula had good consistency in predicting the bearing capacity of the diagonally stiffened thin SPSW with different spans, thicknesses, and stiffener stiffness. It was indicated that the simplified CBSM could accurately predict the bearing capacity of the diagonally stiffened thin SPSW and reflect the contribution of stiffeners to the lateral resistance of the SPSW structure. The theoretical formula of the initial stiffness agreed well with that of the detailed model, and the predicted stiffness of the CBSM was lower than that of the detailed model and therefore proved to be safe.

Keywords: steel plate shear wall; diagonally stiffener; simplified model; bearing capacity; stiffness

钢板剪力墙由边缘框架和内填钢板组成,是具有良好延性、耗能能力的抗侧力体系.随着发现薄钢板在屈曲后形成斜向拉力带,并能承担水平荷载后,薄钢板剪力墙屈曲后的受力性能受到学者关注.但薄钢板容易在较小荷载作用下发生屈曲,一般通过

加劲或限制平面外变形等措施以改善薄钢板墙性能^[1].钢板剪力墙的分析和设计过程中,若采用精细的有限元模型则会花费较长的时间,不少学者提出了简化分析模型以提高钢板剪力墙结构的分析和设计效率.目前已有文献研究主要为薄钢板剪力墙和防屈曲钢板剪力墙的简化模型,而对斜向加劲薄钢板剪力墙的简化模型尚未见有研究.

本文通过理论分析,推导出了交叉加劲钢板剪力墙的初始刚度计算公式,并提出了交叉支撑-拉力带模型(cross brace-strip model,简称CBSM),通过有限元软件ABAQUS建立了一系列在不同跨高比、

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51578064);
北京市自然科学基金(8172031)

作者简介: 杨雨青(1993—),男,博士研究生;
牟在根(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者: 牟在根, zgmu@ces.ustb.edu.cn

高厚比和斜向加劲肋刚度情况下的单层单跨交叉加劲薄钢板剪力墙精细模型与 CBSM 简化模型,并和理论计算结果进行对比分析. 结果表明,精细模型、CBSM 简化模型和理论结果吻合良好,说明 CBSM 简化模型能够较好地反映出斜加劲肋对结构抗侧能力的贡献,为交叉加劲薄钢板剪力墙的设计和提供提供参考.

1 简化模型简介

1983 年 Thorburn 等^[2]提出了拉力带简化计算模型(strip model,简称 SM),见图 1(a). 并根据最小能量原理,推导了斜杆的倾角计算公式. Timler 等^[3]在此基础上考虑了边缘构件的刚度贡献,修正了倾角计算公式. 美国钢结构抗震规范 AISC 341-10^[4]中推荐使用 SM,是目前使用最为广泛的简化模型之一. Elgaaly 等^[5]认为墙板的拉力带两端应力比中部

大,提出了拉杆-等效角板模型(strip-gusset model,简称 SGM),见图 1(b). Shiskin 等^[6]在 SM 基础上增加了一根压杆以模拟钢板的受压贡献,提出了修正拉力带模型(modified strip model,简称 MSM),见图 1(c).

国内学者针对非加劲钢板剪力墙也提出了不同形式的简化模型,郭慧兰等^[7]沿推、拉两个拉力带方向布置只拉杆和拉压杆,提出了混合杆系模型(combined strip model,简称 CSM),见图 1(d). 并针对 CSM 中的拉压杆数量的合理取值进行了研究,国内现行规范 JGJ/T 380-2015《钢板剪力墙技术规程》^[8]中推荐使用 CSM. 周明^[9]考虑钢板厚度不同,受力中“剪切作用”和“拉力场作用”所占比例不同,提出了统一等代模型(unified strip model,简称 USM),见图 1(e). 樊春雷等^[10]考虑刚度、柱最大轴力、柱最大弯矩等效提出了三拉杆模型(three strip model,简称 TSM),见图 1(f).

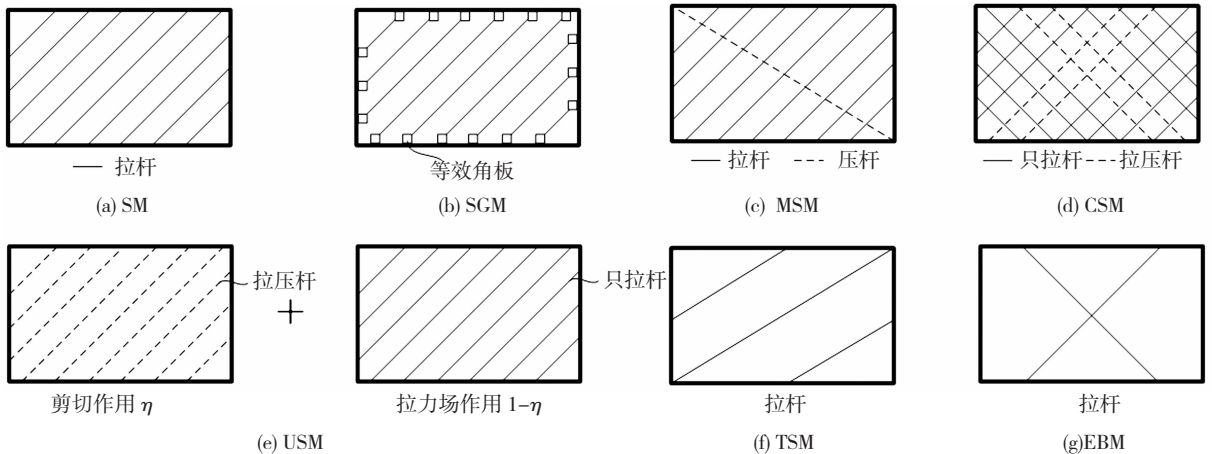


图 1 钢板剪力墙简化模型

Fig. 1 Simplified model of SPSW

钢板剪力墙有许多种类,如加劲钢板剪力墙、两边连接钢板剪力墙、防屈曲钢板剪力墙、开缝钢板剪力墙等等. 马欣伯等^[11]对两边连接组合剪力进行了研究,提出了偏心交叉支撑模型. Ozelek 等^[12]研究了适用于两边连接形式的拉力带模型. 陆金钰等^[13]和蒋路等^[14]提出了开缝钢板剪力墙简化模型用于对结构的弹塑性分析. 李国强等^[15]提出两边连接屈曲约束钢板剪力墙的等效交叉支撑模型(equivalent brace model,简称 EBM),见图 1(g).

薄钢板剪力墙在往复荷载作用下,滞回曲线出现明显的“捏缩”. 通过加劲的方式,可以改善钢板剪力墙的性能. 加劲形式大致可分为竖向加劲、十字加劲和交叉加劲. 其中,交叉加劲不仅能在弹性阶段提高内填板的弹性屈曲荷载,并且在拉力带形成后,起到增大拉力带的作用,能明显提高钢板剪力墙的承载能力^[16]. 曹春华^[17]对交叉加劲钢板剪力墙的屈曲性能、抗剪性能和滞回性能进行了系统研究和

有限元参数分析. Alavi 等^[18]推导了交叉加劲钢板剪力墙的极限承载力理论计算公式并进行了试验研究,理论公式与试验结果基本吻合.

《钢板剪力墙技术规程》中规定加劲钢板剪力墙的承载力计算可考虑屈曲后强度,但并未详细给出计算和设计公式,而斜向加劲肋对钢板剪力墙屈曲后承载力的贡献较为明显,对框架柱的附加作用较大,设计时应当考虑其增大拉力带的作用,避免出现“强墙板,弱框架”的情况. 本文在拉力带模型基础上,提出了适用于斜加劲钢板剪力墙的简化模型,对比精细模型和理论公式计算结果,验证了 CBSM 简化模型的准确性.

2 理论分析及 CBSM 简化模型提出

2.1 薄钢板剪力墙拉力带模型

SM 模型(图 1(a))忽略薄板的屈曲强度,将钢板等效为一系列相互平行的斜向拉杆,铰接于周边

框架. 忽略框架节点的抗侧能力, 框架梁、柱连接形式为铰接, 并且当拉杆数量大于 10 根时, SM 简化模型能够较准确预测非加劲薄钢板剪力墙的极限承载力.

拉杆截面面积 A 为拉杆间距 S 与板厚 t 的乘积:

$$A = St = \frac{(L\cos\alpha + H\sin\alpha)t}{n}, \quad (1)$$

式中: H 为钢板高度, L 为钢板宽度, α 为拉杆与竖直方向的夹角, t 为钢板厚度, n 为斜拉杆数量.

2.2 CBSM 简化模型的提出

考虑简单情况, 根据加劲肋布置方向, 加劲肋会受拉或受压, 将斜加劲肋等效为拉(压)杆, 即形成交叉支撑 - 拉力带的简化模型 (cross brace-strip model, CBSM), 见图 2.

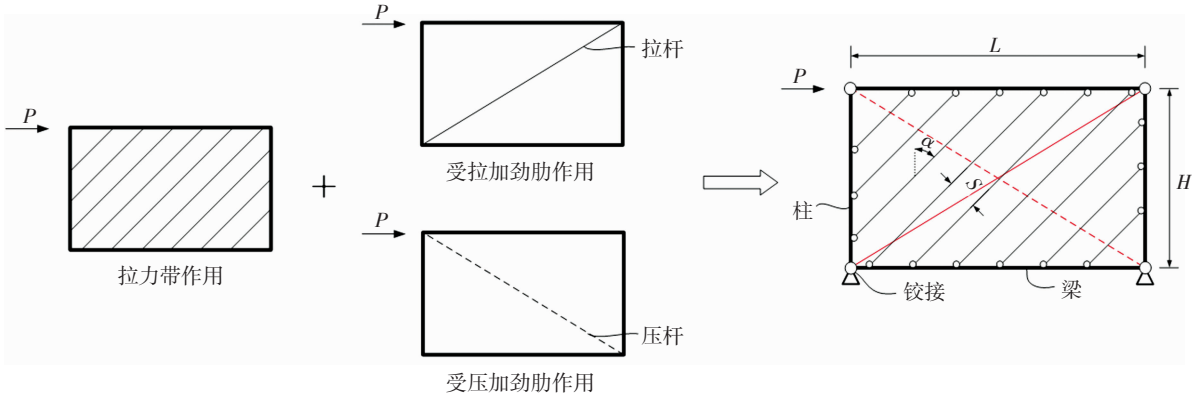


图 2 交叉支撑 - 拉力带模型

Fig. 2 Cross brace-strip model

交叉支撑 - 拉力带模型在 SM 基础上, 考虑交叉加劲肋对钢板剪力墙结构刚度和承载力的贡献, 等效为拉(压)杆. 内填钢板屈曲后形成拉力带, 在拉力带作用下继续抵抗水平力, 而压应力不在增加, 随着拉力带的发展, 内填钢板逐渐屈服. Alavi 等^[18]将斜加劲钢板剪力墙看作梁腹板斜加劲结构, 交叉加劲肋钢板剪力墙的理论抗剪承载力为

$$V = 0.5\sigma_y L t \sin 2\alpha + A_s \sigma_{st} \cos \theta_s + A_s \sigma_{sc} \cos \theta_s + \frac{4M_{fpc}}{H}, \quad (2)$$

式中: M_{fpc} 为框架柱塑性弯矩, A_s 为加劲肋截面面积, θ_s 为加劲肋与水平方向的夹角, σ_{st} 和 σ_{sc} 为加劲肋受拉(压)应力, 基于胡克定律 (Hooke's law) 和莫尔应力圆 (Mohr's circle), 由式 (3a)、(3b) 计算给出:

$$\sigma_{st} = \sigma_t [1 - (1 + \nu) \sin^2(\theta_s - \theta)] + [(1 + \nu) \tau_{cr} \sin(2\theta_s)] \leq \sigma_y, \quad (3a)$$

$$\sigma_{sc} = -\sigma_t [1 - (1 + \nu) \sin^2(\theta_s + \theta)] + [(1 + \nu) \tau_{cr} \sin(2\theta_s)] \leq \sigma_{cr}. \quad (3b)$$

式中: ν 为泊松比, 钢材取 0.3; σ_y 为屈服应力; σ_{cr} 为受压屈曲应力; σ_t 为拉力带应力, 由 von Mises 屈服准则推导出, 见式 (4a)、(4b).

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sqrt{(3\tau_{cr} \sin 2\theta)^2 - 12\tau_{cr}^2 + 4f_y^2} - \frac{3}{2} \tau_{cr} \sin 2\theta, \quad (4a)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha. \quad (4b)$$

当板较薄时, 弹性屈曲荷载 τ_{cr} 较小, 提供的剪力可忽略不计. 因此在简化时, 忽略薄板的弹性屈曲荷载, 式 (4a) 中拉力带应力 σ_t 近似取钢材屈服应力 σ_y , 再由式 (3a), 受拉加劲肋应力 σ_{st} 近似取 σ_t , 受压加劲肋应力 σ_{sc} 近似取 $\nu\sigma_t$, 即 CBSM 简化模型中, 对于双面单板加劲肋的交叉加劲钢板剪力墙, 受拉杆的截面面积 A_{st} 和受压杆截面面积 A_{sc} 由下式计算:

$$\text{受拉杆} \quad A_{st} = A_s = 2b_s t_s, \quad (5a)$$

$$\text{受压杆} \quad A_{sc} = \nu A_s = 0.6b_s t_s. \quad (5b)$$

2.3 钢板剪力墙初始刚度分析

结构在水平荷载作用下的荷载 - 位移曲线在接近原点处的斜率即为结构的初始刚度, 是建立结构简化模型的基础. 假设仅在水平力 V 作用下, 钢板剪力墙发生剪切变形和弯曲变形.

非加劲内填板在水平荷载 V 作用下, 发生水平侧移 Δu , 可由下式计算:

$$\Delta u = \Delta u_M + \Delta u_V = V \left(\frac{H^3}{12EI_p} + \frac{kH}{GA_p} \right), \quad (6)$$

式中: Δu_M 为弯曲变形; Δu_V 为剪切变形; $I_p = \frac{tL^3}{12}$ 为内填板水平截面对中轴线的惯性矩; k 为截面剪力不均匀系数, 对于矩形取 1.2; $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ 为剪切模量; $A_p = Lt$ 为内填板水平截面面积.

当水平荷载 V 取 1 时, 非加劲内填板抗侧刚度 K_p 为式 (6) 的倒数, 即

$$K_p = \frac{Et \left(\frac{L}{H}\right)^3}{1 + 2k(1+v) \left(\frac{L}{H}\right)^2} = \frac{Et\gamma^3}{1 + 2k(1+v)\gamma^2}, \quad (7)$$

式中 γ 为内填板的跨高比。

交叉加劲钢板墙在水平荷载作用下,斜加劲肋参与了抵抗水平荷载产生变形. 根据惯性矩理论中的平行移轴定理,若加劲肋为竖向布置,则加劲肋对板水平截面中线的惯性矩为 $I_{s,c} + A_{s1}l^2$,其中 $I_{s,c}$ 为加劲肋对自身中性轴惯性矩, $A_{s1} = b_s t_s$ 为单根斜加劲肋截面积, b_s, t_s 分别为加劲肋板的高度和厚度, l 为加劲肋到板水平截面中线的距离; 而对于斜向布置的加劲肋,其对板水平截面中线的惯性矩由其定义积分计算可得,为 $I_{s,c} + \frac{1}{3}A_{s1}l_1^2$,其中 l_1 为斜加劲肋在水平方向上的投影长度。

考虑斜加劲肋弯曲变形影响,因此加劲肋的弯曲变形 Δu_M 为

$$\Delta u_M = \frac{VH^3}{12E(I_p + I_{s,m})} = \frac{VH^3}{12E\left(\frac{tL^3}{12} + 2I_{s,c} + \frac{2A_{s1}L^2}{3}\right)}, \quad (8)$$

式中: $I_{s,m}$ 为加劲肋对板水平截面中线的惯性矩, $I_{s,c}$ 为加劲肋对自身中性轴惯性矩,计算中可忽略不计。

考虑斜加劲肋剪切变形影响,加劲肋的剪切变形 Δu_V 为

$$\Delta u_V = \frac{kVH}{G(A_p + A_s)} = \frac{kVH}{G(tL + mA_{s1})}, \quad (9)$$

式中: m 为斜加劲肋数量,对于双面单板斜加劲钢板墙取 4; A_s 为斜加劲肋截面总面积。

根据式(8)、(9),斜加劲肋的位移可简化并表示为

$$\Delta u = \frac{VH^3}{12E\left(\frac{tL^3}{12} + \frac{2A_{s1}L^2}{3}\right)} + \frac{kVH}{G(tL + 4A_{s1})}. \quad (10)$$

当水平荷载 V 取 1 时,斜加劲肋的弹性刚度即为式(10)的倒数,令 $\varphi = \frac{4A_{s1}}{tL}$,表示斜加劲肋截面积与内填板水平截面积比,可得

$$K_p = \frac{Et\gamma^3(1+\varphi)(1+2\varphi)}{1+\varphi+2k(1+v)(1+2\varphi)\gamma^2}. \quad (11)$$

3 有限元模型建立及分析

3.1 模型的建立和 SM 验证

本文采用有限元软件 ABAQUS 进行模型的建立,梁、柱连接形式采用铰接,模型中梁柱通过 MPC 中的 Pin 连接,内填板、斜杆与框架的连接采用 Tie 连接. 精细模型的梁、柱采用 B31 梁单元,墙板及加劲肋采用 S4R 壳单元,并取第一阶屈曲模态作为缺陷分布,最大几何缺陷幅值取 $H/1000$ 施加于结构. 简化模型中,梁、柱采用 B31 梁单元,拉杆采用只受轴向力的 T3D2 桁架单元. 非加劲钢板剪力墙精细模型及 SM 简化模型见图 3. 网格尺寸取 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. 约束框架梁、柱的平面外自由度和底梁的位移自由度,防止结构发生刚体位移。

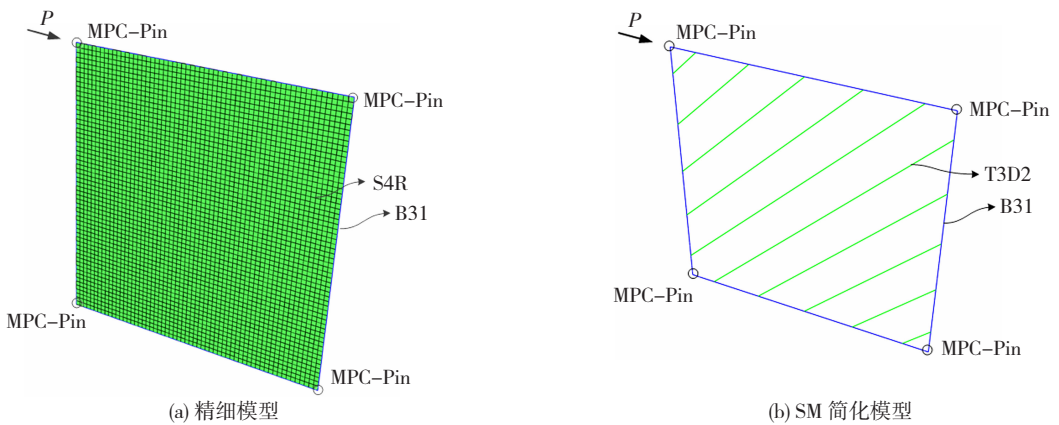


图 3 非加劲钢板墙有限元模型

Fig. 3 Finite element models of unstiffened SPSW

模型具体模型参数和截面尺寸见表 1. 为方便计算和布置,简化模型的斜杆倾斜角取 45° ,斜杆数量取 10,斜杆截面面积根据式(1)计算. 精细模型和简化模型中,梁、柱均为 Q345 钢,内填板、加劲肋及

斜杆为 Q235 钢,屈服强度分别为 $345 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 和 $235 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. 钢材弹性模量 E 为 $206\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,泊松比为 0.3,以 von Mises 准则为屈服准则,采用双折线理想弹塑性本构模型。

表 1 钢板剪力墙模型参数

Tab. 1 Parameters of SPSW model

柱截面尺寸/mm	梁截面尺寸/mm	层高 H/mm	跨度 L/mm	板厚 t/mm	高厚比 λ
				5	600
				6	500
600×600×18×36	750×600×18×36	3 000	3 000	8	375
				10	300

为方便对比分析,本文将承载力进行归一化处理,即用精细模型和简化模型计算结果除以理论计算值,由式(2)可得,式中后三项为零,忽略薄板的弹性屈曲荷载,即非加劲钢板墙的水平承载力取 $V = 0.5\sigma_y L t \sin 2\alpha$ (为方便计算, α 近似取 45°), 跨高比 $\gamma = 1$ 时,计算结果见图 4.

从图 4 可看出,精细模型、SM 简化模型与理论公式计算结果吻合良好,说明精细模型和 SM 简化模型均能反映钢板剪力墙结构的抗侧性能,能较为准确地预测非加劲钢板剪力墙的抗剪承载能力. 其中 SM 简化模型的建立和计算耗时相比精细模型大大减小,能够有效地提高钢板剪力墙的设计效率. 由于 SM 简化模型忽略了钢板受压承载力,其预测的初始刚度要偏低,当高厚比越小时此现象越明显.

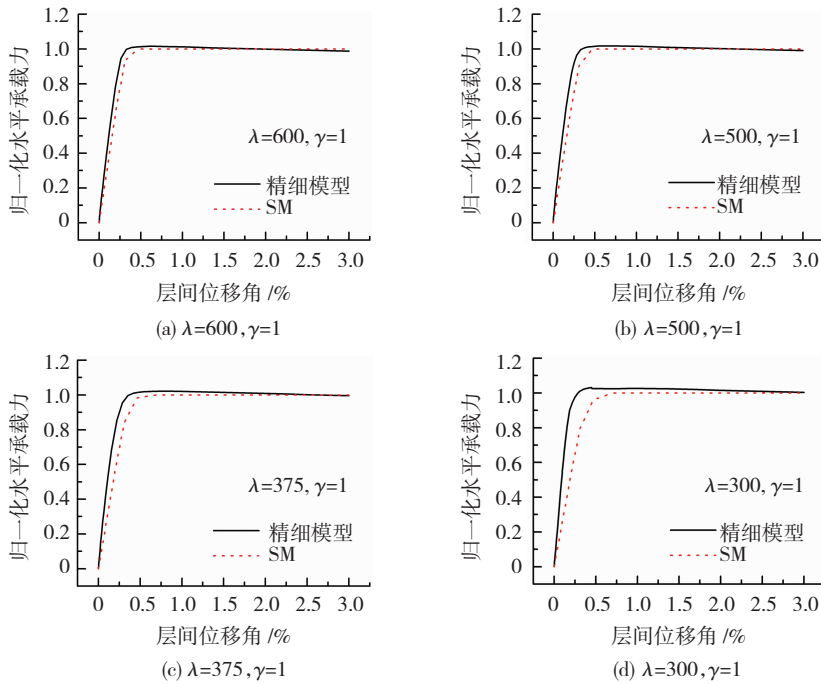


图 4 精细模型与 SM 简化模型单调推覆曲线

Fig. 4 Pushover curves of the detailed model and SM simplified model

从图 6 可看出,在不同板厚、不同跨高比和不同加劲肋厚度的情况下,CBSM 模型能很好地预测交叉加劲薄钢板剪力墙在单向推覆作用下的抗侧性能,精细模型、CBSM 简化模型结果与理论公式计算结果吻合良好. CBSM 模型由 SM 模型改进,忽略钢

3.2 CBSM 简化模型建立

在上述验证的模型基础上,建立交叉加劲钢板剪力墙精细模型和 CBSM 简化模型,见图 5. 精细模型中的加劲肋为常用的平板形加劲肋截面, CBSM 简化模型在 SM 模型基础上沿框架对角线布置受压杆和受拉杆以模拟交叉加劲肋,单元类型为 T3D2, 拉压杆面积按式(5a)、(5b)取值. 改变钢板墙跨度从而改变跨高比,取常用跨度 2 000、3 000、4 500、6 000 mm,对应跨高比为 0.67、1、1.5、2;薄钢板内填板常用高厚比为 300 ~ 600,板厚取 5、6、8、10 mm,对应高厚比为 600、500、375、300;加劲肋板为平板加劲肋,高度取 100 mm,加劲肋厚度分别取 8、10、12 mm. 通过比较简化模型和精细模型与理论公式在常用尺寸下的计算结果,验证 CBSM 简化模型的适用性和准确性.

3.3 承载力结果分析对比

为方便对比分析,将承载力进行归一化处理,即用精细模型和简化模型计算结果除以理论计算值,由式(2)可得,式中第四项为零,忽略薄板的弹性屈曲荷载,即交叉加劲薄钢板墙水平承载力近似取 $V = 0.5\sigma_y L t \sin 2\alpha + 1.3A_s \sigma_y \cos \theta_s$ (为方便计算, α 近似取 45°),为减小篇幅,部分计算结果见图 6.

板垂直于拉力场的方向的受压承载力,低估了结构的初始刚度,并且内填板高厚比越大, CBSM 的结果越接近精细模型. 从极限承载力看, CBSM 模型能很好地反映斜向加劲肋对结构抗侧能力的贡献,能够较好地预测结构的极限承载力.

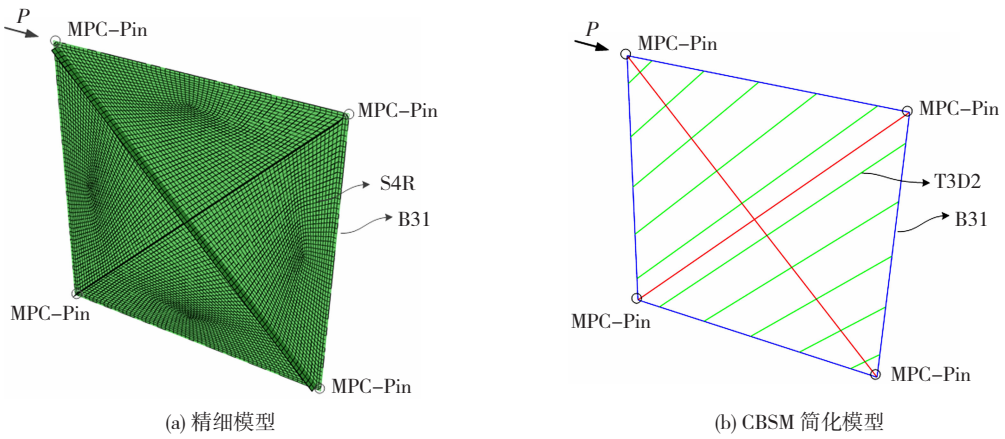


图 5 交叉加劲钢板墙有限元模型

Fig. 5 Finite element models of the diagonally stiffened SPSW

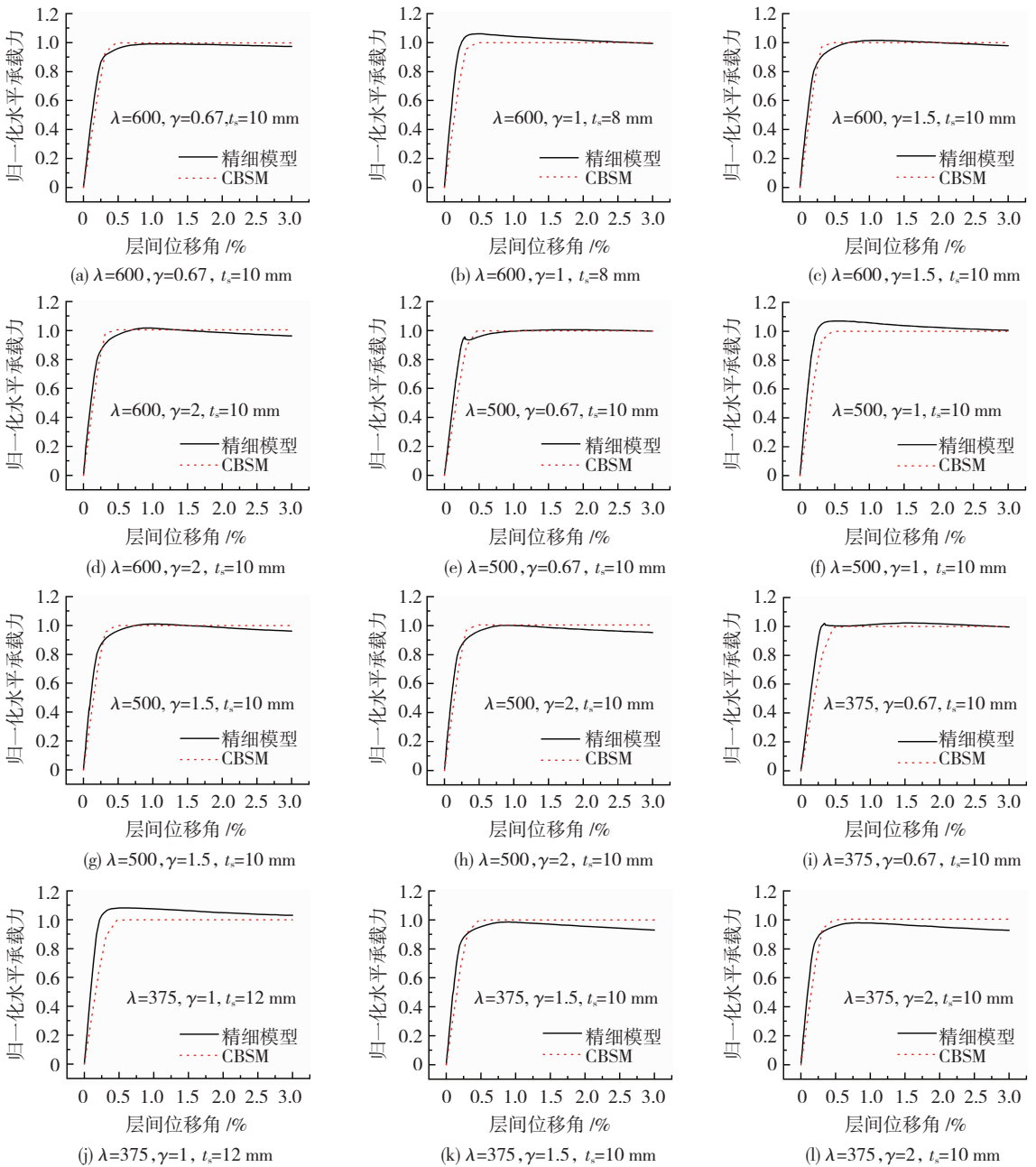


图 6 精细模型与 CBSM 简化模型单调推覆曲线

Fig. 6 Pushover curves of the detailed model and the CBSM

3.4 初始刚度对比分析

从图 6 的精细模型和 CBSM 简化模型单调推覆曲线可看出,精细模型和简化模型预测交叉加劲钢板剪力墙的初始刚度较为接近,并且简化模型的预测值略低于精细模型.精细模型、CBSM 简化模型结果和理论刚度计算结果(由式(11)计算)进行对比,结果见图 7.

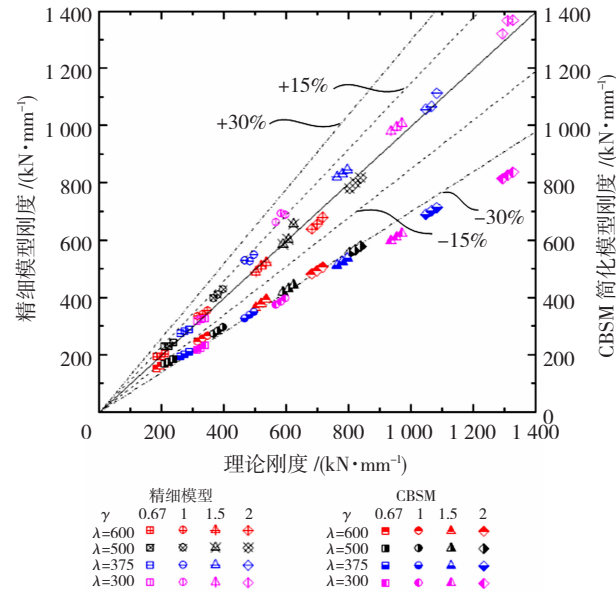


图 7 初始刚度对比

Fig. 7 Comparison of initial stiffness

从图 7 可看出,交叉加劲钢板墙的初始刚度随跨高比的增加而增大,随内填板高厚比的减小而增大.改变加劲肋厚度对交叉加劲钢板墙的初始刚度有一定的影响,加劲肋越刚强,结构的初始刚度也越高,且基本呈线性相关,表明斜向加劲肋对结构的侧向刚度贡献与加劲肋刚度呈正相关.精细模型的初始刚度与理论计算值比较吻合,相对误差在 15% 以内;而 CBSM 简化模型预测刚度均低于精细模型,与理论计算值的相对误差在 30% 左右.这是因为简化模型由于将钢板用数根杆件替代,在计算受剪位移变形时,斜杆不能充分的反映出钢板整体的受剪位移,得到的刚度要低于精细模型.

4 结 论

1)斜向布置的加劲肋能起到增大拉力带作用,加劲肋参与抵抗水平荷载,能有效提高交叉加劲钢板剪力墙结构的承载能力和初始刚度.

2)本文提出的交叉支撑 - 拉力带简化模型(CBSM)与理论公式、精细模型预测的交叉加劲薄钢板剪力墙承载力吻合较好,表明 CBSM 简化模型可用于交叉加劲薄钢板剪力墙的计算和设计.

3)CBSM 简化模型在保证与精细模型有一定的

准确性的基础上,能够大大缩短计算时间,提高交叉加劲薄钢板剪力墙结构设计效率,方便该类型钢板剪力墙结构的设计.

4)交叉加劲钢板剪力墙的初始刚度理论计算公式与精细模型吻合良好,误差基本在 15% 以内.CBSM 预测的初始刚度低于精细模型,是偏于安全的.

参考文献

- [1] 曹正罡,吴鹏程,杜鹏. 预应力索网抑制屈曲钢板剪力墙力学性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):184
CAO Zhenggang, WU Pengcheng, DU Peng. Mechanical properties of buckling restrained steel plate shear wall with prestressed cable nets[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(6):184
- [2] THORBURN L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls [R]. Alberta, Canada; Structural Engineering Report. No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta,Edmonton, 1983
- [3] TIMLER P A, KULAK G L. Experimental study of steel plate shear walls[R]. Alberta, Canada; Structural Engineering Report. No. 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, 1983
- [4] Seismic provisions for structural steel buildings; ANSI/AISC 341 - 10[S]. Chicago, USA; American Institute of Steel Construction; 2010
- [5] ELGAALY M, LIU Y. Analysis of thin-steel-plate shear walls[J]. Journal of Structural Engineering,1997,123(11):1487
- [6] SHISKIN J J, DRIVER R G, GRONDIN G Y. Analysis of steel plate shear walls using the modified strip model [J]. Journal of Structural Engineering,2009,135(11):1357
- [7] 郭兰慧,李然,张素梅. 薄钢板剪力墙简化分析模型[J]. 工程力学,2013,30(增刊1):149
- [8] 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
- [9] 周明. 非加劲与防屈曲钢板剪力墙结构设计方法研究 [D]. 北京:清华大学,2009
- [10] 樊春雷,郝际平,田炜烽. 薄钢板剪力墙结构试验研究及简化模型分析[J]. 工程力学,2016,33(6):34
- [11] 马欣伯,张素梅,郭兰慧,等. 两边连接钢板混凝土组合剪力墙简化分析模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(3):352
- [12] OZCELIK Y, CLAYTON P M. Strip model for steel plate shear walls with beam-connected web plates[J]. Engineering Structures, 2017,136:369
- [13] 陆金钰,范圣刚,闫鲁南,等. 带缝钢板剪力墙弹塑性简化分析模型[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(2):46
- [14] 蒋路,陈以一,王伟栋. 带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(3):115
- [15] 李国强,刘文洋,陆焯,等. 两边连接屈曲约束钢板剪力墙受力机理与等效支撑模型[J]. 建筑结构学报,2015,36(4):33
- [16] 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
- [17] 曹春华. 斜加劲钢板剪力墙性能研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2008
- [18] ALAVI E, NATEGHI F. Experimental study of diagonally stiffened steel plate shear walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2013,139(11):1795

(编辑 赵丽莹)