

组合钢板剪力墙的简化模型

孙飞飞^{1,2}, 刘桂然³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

摘要: 新型钢-混凝土组合钢板剪力墙在混凝土板与边缘构件之间留有缝隙, 避免混凝土板参与抵抗剪力, 从而可以避免其对钢板的约束作用发生退化. 观察这种组合钢板剪力墙的受力机理和破坏模式, 可以发现, 缝隙的设置使得无约束区域的钢板产生与钢板墙类似的斜拉场效应. 据此, 在钢板墙的斜拉杆模型中引入斜压杆, 提出了双向多斜杆简化分析模型. 通过理论分析, 给出了该模型中斜杆元件的截面特性、滞回模型. 经验证, 该模型能准确地模拟组合钢板剪力墙在单调加载和反复加载下的非线性性能.

关键词: 组合钢板剪力墙; 简化模型; 双向多斜杆模型; 滞回模型

中图分类号: TU 352.1

文献标识码: A

A Simplified Model for Composite Steel Plate Shear Walls

SUN Feifei^{1,2}, LIU Guiran³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Institute of Architecture Design & Research, Shanghai 200041, China)

Abstract: A new-type composite steel plate shear wall (CSPSW) is set with gaps between the concrete panel and the boundary members in order to prevent the concrete panel from resisting shear force and to avoid a deterioration caused by the restraining action of the concrete panel on the steel plate. The mechanism of CSPSW and its failure mode show that the gaps lead to diagonal tensile action within the unrestrained region of the steel plate. A simplified model, cross-strip model, was proposed by introducing diagonal compressive bars into the strip model for steel plate shear walls. The cross sectional properties and hysteretic model for

the cross strips in the model were determined on the basis of the theoretical analysis. Comparison with experimental results shows that the proposed model can capture accurately nonlinear behavior of CSPSW under monotonic and cyclic loading.

Key words: composite steel plate wall; simplified model; cross-strip model; hysteretic model

组合钢板墙由混凝土板为钢板提供平面外约束, 提高其承载力, 同时混凝土板还能抗火、保温、隔音等. 作为主要水平抗侧力体系, 组合钢板墙有较大的弹性初始刚度、大变形能力和良好的塑性、稳定的滞回特性等, 是一种非常具有发展前景的新型抗侧力构件, 尤其适用于高烈度地震区建筑. Zhao 和 Astaneh-Asl^[1] 等对组合钢板墙的构造形式进行了改进, 在混凝土板和边缘构件之间设缝, 可以避免混凝土板参与承受侧向力而被破坏, 失去对钢板的保护作用, 侧向力完全由钢板来承担^[1]. 本课题组对这种形式的组合钢板墙进行了试验研究和有限元分析^[2]. 目前, 针对这种组合钢板墙的简化分析模型的研究还很少, 不利于其在工程中的推广应用. 为此, 笔者提出一种能够用于组合钢板剪力墙计算的简化模型, 以期代替复杂的有限元分析而用于结构的弹塑性抗震计算, 从而大大提高计算效率.

1 组合墙的受力机理

对于薄钢板墙, 在侧向水平力作用下, 钢板次对角方向在较小的压应力作用下即发生屈曲, 主要依靠主对角方向的拉应力来承担水平荷载^[3] (图 1a),

收稿日期: 2008-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408036); 教育部科学技术研究重点资助项目(106069); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01B02)

作者简介: 孙飞飞(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢结构和组合结构、工程结构抗震.
E-mail: ffsun@tongji.edu.cn

其受力模式是形成主对角方向的拉力场效应;对于组合墙,如果混凝土板能给钢墙板提供完全的面外约束,则钢墙板在主、次对角方向能分别承受大小相当的拉、压应力,理论上应以纯剪切的模式工作(图1b),而不会形成拉力场效应.但根据文献[2,4]的试验结果,组合墙在破坏时,钢墙板形成了明显的斜拉带(图2).这是由于组合墙中的混凝土板只能为钢墙板提供一定程度的面外约束,而非完全约束,特别是钢板边缘,没有混凝土板约束,因此,斜拉带主要出现在这些部位.上述现象说明,适用于模拟钢板墙结构的斜拉带模型(strip model)^[3],经过合理修改,可以用于计算组合墙.

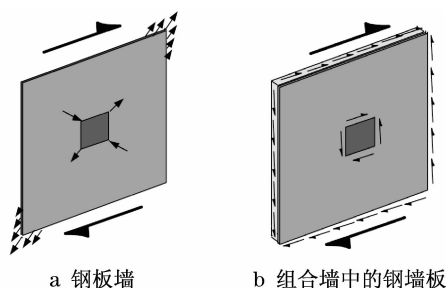
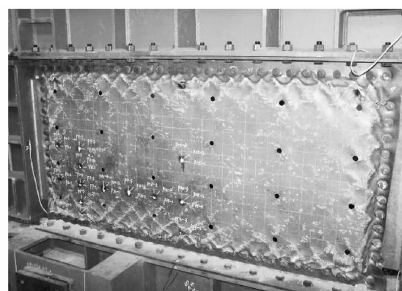


图1 受力机制
Fig.1 Mechanism



a 文献[2]的试验



b 文献[4]的试验

图2 组合墙试件中钢板残余变形

Fig.2 Residual deformation in the steel plate of composite wall specimens

斜拉带模型仅考虑钢板参与抵抗拉应力的贡献,忽略了钢板参与抵抗压应力的作用.由于受到混凝土板的面外约束,组合墙中的钢板不仅在主对角

方向能够抵抗较大的拉应力,在次对角方向也能抵抗压应力.所以,合理的组合墙计算模型,应能同时考虑组合墙斜拉带和“斜压带”的作用.

基于上述分析,笔者提出一种双向多斜杆模型(cross-strip model)计算组合墙,以期利用该模型得到组合墙的准确刚度和承载力,同时,合理地估计组合墙对框架梁和框架柱内力的影响.

2 双向多斜杆模型

图3所示即为双向多斜杆模型,是由钢板墙的斜拉带模型^[3]推广得到的:将组合墙中的钢墙板等效为双向布置的多个斜杆;斜杆的两端与梁柱铰接,且所有斜杆的横截面面积相等;每个方向的斜杆不少于10个,各斜杆的间距相等.需要说明的是,该模型中并没有设置属于混凝土板的元件.这是由于混凝土板与边缘构件不接触,不直接参与抵抗水平力的工作,其对钢板面外变形的约束使得斜杆能够在受压时发挥作用.

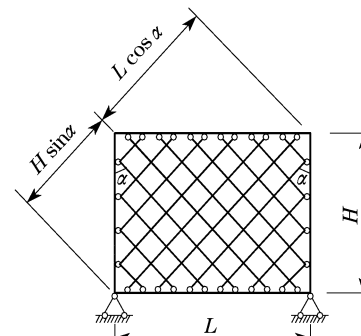


图3 双向多斜杆模型

Fig.3 Cross-strip model

2.1 斜杆尺寸的确定

每个方向的斜杆几何参数可以通过将钢板沿该方向划分为 n 个等宽的板带而得.如图3所示,每一个斜杆的横截面面积 A_s 可通过下式计算:

$$A_s = t(L \cos \alpha + H \sin \alpha) / n \quad (1)$$

式中: t 为钢墙板的厚度; L 为钢板的宽度; H 为钢板的高度; α 为斜杆与竖向的夹角; n 为单方向的斜杆数量.

利用钢板墙结构斜拉带模型理论^[3],用下式计算 α :

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + t L / 2 A_c}{1 + t h (1 / A_B + h^3 / 360 I_c L)} \quad (2)$$

式中: h 是层高; A_c 和 A_B 分别是边缘柱和边缘梁的横截面面积; I_c 是边缘柱的截面惯性矩.

Driver 等对钢板墙的试验证明,钢板墙形成的拉力场倾角在 $42\sim 50^\circ$ [5]. 由图 2 可见,组合墙中的钢板拉力带倾角也在上述范围. 计算表明,斜拉带的倾角在上述角度范围内变化时,对钢板墙的层剪力和层位移影响不大. 为此,取斜杆的倾角 α 为 45° ,则由式(1)得单根斜杆的横截面面积为

$$A_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{t(L+H)}{n} \quad (3)$$

在实际建模时,一般以梁柱为线单元,并按梁、柱轴线尺寸建模. 所以,模型中斜杆的长度偏大,从而使计算得到的结构抗侧刚度比实际略小.

2.2 斜杆受压强度的确定

斜杆所能承受的屈服拉应力和极限拉应力为钢材的屈服应力和极限应力. 值得指出的是,双向多斜杆模型的关键之一在于如何合理地评估斜杆抵抗压应力的作用. 下面对此分析.

假设斜杆中的钢材为理想弹塑性材料,其屈服拉应力 f_y 和屈服压应力 f'_y 并不相等, f_y 取为钢材的单向拉伸屈服强度. 在由受拉方向和受压方向组成的多斜杆模型中,钢板墙达到极限承载力时,受拉方向的斜杆所承担的水平剪力 V_T 可在所有斜杆均屈服的假定下推导出来 [6]. 即

$$V_T = 0.5f_y L t \sin 2\alpha \quad (4)$$

与式(3)相一致,为简化,将斜杆的倾角 α 取为 45° ,则 V_T 为

$$V_T = 0.5f_y L t \quad (5)$$

同理,受压方向的斜杆所承担的水平剪力 V_P 为

$$V_P = 0.5f'_y L t \quad (6)$$

则受拉斜杆和受压斜杆承受的总水平剪力为

$$V = V_T + V_P = 0.5(f_y + f'_y) L t \quad (7)$$

根据已有研究结果 [7],组合墙的极限承载力为钢墙板的抗剪承载力,即

$$V = 0.6f_y L t \quad (8)$$

由于钢材应变循环强化效应,该式取值比钢墙板全截面抗剪屈服承载力理论值略高.

由式(7)与式(8)可得

$$f'_y = 0.2f_y \quad (9)$$

即,斜杆的抗压强度 f'_y 可取为抗拉强度 f_y 的 20%.

2.3 恢复力模型的选取

组合墙的滞回曲线(图 4a)有如下特征:①骨架曲线有显著的双线性特征;②屈服以后,卸载刚度与弹性阶段的刚度几乎相同;③反向再加载时,刚度有所退化,且反向再加载刚度随位移的增大而减小;④有一定的“捏拢”效应,但不很突出.

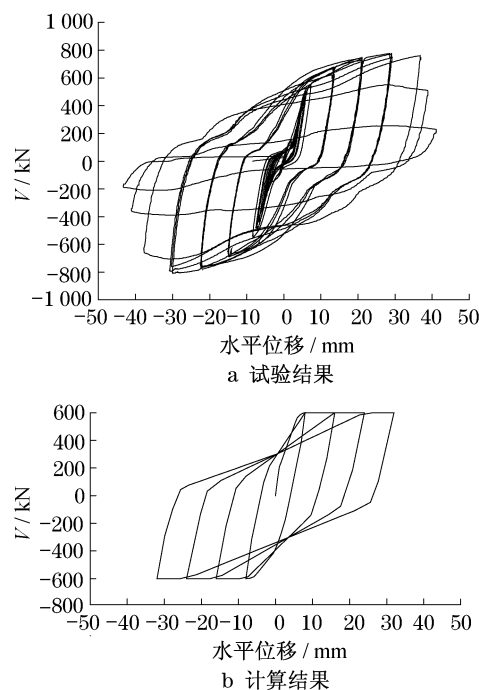


图 4 试件 CW4 的试验与计算结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and computational results for Specimen CW4

根据滞回曲线的上述特点,以克拉夫(Clough)退化双线性模型 [8] 为基础,将图 3 所示的恢复力模型应用到双向多斜杆模型的各斜杆中,来模拟组合墙的滞回性能.

该恢复力模型的滞回规律是:加载时,先沿骨架曲线循环;进入屈服段以后,卸载刚度 k_3 与弹性刚度 k_1 相同,即 $k_3 = k_1$;卸载至零再反向加载时,加载曲线指向反向变形的最大点(若反向未屈服,则指向屈服点);次滞回规则与主滞回规则相同. 在应用到双向多斜杆模型时, k_1 和 f_y 由钢材的材性决定,强化段刚度 k_2 和 f'_y 分别由下文 3.1 节和 3.2 节分析结果决定.

3 双向多斜杆模型的验证及分析

利用前文提出的双向多斜杆模型,以有限元分析软件 Sap2000 为平台,对双向多斜杆模型进行验证. 在 Sap2000 中建立的模型,利用了该软件中的纤维铰来考虑材料的非线性. 纤维铰实质是一种集中塑性模型,其作用相当于弹塑性弹簧,可用于静、动力非线性分析,具体方法参见文献 [9].

模拟的对象为文献 [2] 中四边连接的组合钢板墙试件 CW4,钢墙板的长度和高度分别为 1 800 mm 和 900 mm,厚度为 2 mm. 在整个试验中,加载框架

保持弹性. 钢墙板的材性试验结果如表1所示.

表1 组合钢板墙内填钢板材性试验结果

Tab.1 Material properties of the steel plate in the composite wall specimen CW4

钢板名义厚度 t/mm	实际厚度 t'/mm	抗拉强度 f_u/MPa	屈服强度 f_y/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率 $\delta/\%$
2	1.9	362.9	287.0	174 499.4	36.2

在应用该模型对组合墙结构模拟数值时,主要考察钢材的本构关系、斜杆的抗压强度和抗压刚度等因素的影响. 为了与前述理论分析结果对比,在模拟数值时,分别对钢材料本构关系、斜杆抗压强度和抗压刚度进行参数分析.

模拟时,单向斜杆采用10个,则根据式(1),得单根斜杆的横截面面积为

$$A_s = 0.707 \times 1.9 \times (1\ 800 + 900) / 10 = 363\ \text{mm}^2$$

3.1 钢材本构关系的试验验证及影响分析

在文献[2]组合墙试验的整个加载过程中,加载框架始终保持弹性状态,所以,在模拟时可不考虑钢材本构关系对钢框架的影响,只需考虑组合墙中的钢材本构关系的影响.

在整个分析过程中,将周边的加载框架设为弹性材料. 在分析钢材的本构关系影响时,由于斜杆拉、压强度不同,为使应变强化影响的分析结果比较直观,暂不考虑斜杆受压的贡献(即将斜杆的受压强度设为零),只考察斜杆受拉时的本构关系. 将受拉时的本构关系分别取为理想弹塑性和双线性强化模型. 对于双线性模型,强化段刚度是最重要的参数. 因此,将钢材强化段刚度与弹性段刚度的比值作为分析参数.

图5给出了斜杆应力应变关系对该多斜杆计算模型的影响. 图中,“强化0.5%”指钢材强化段刚度与弹性段刚度的比值为0.5%,其他表述的含义依此类推. 由图5可知,当组合钢板墙的水平位移为30 mm(层间位移角约为1/50)时,采用刚度强化为2%的双线性模型所得到的结构承载力,比理想弹塑性模型高约20%,材性试验结果的强化刚度比为0.27%,由图4可见,其对承载力的影响很小. 而式(8)已经考虑了影响更为显著的应变循环强化效应. 为此,建议在应用该模型时,将斜杆材料的应力应变曲线取为理想弹塑性.

3.2 斜杆抗压强度的影响分析及验证

将斜杆的抗压强度与抗拉强度的比值作为参数,以确定多斜杆模型中抗压强度的合理取值. 图6所示为计算得到的斜杆抗压强度不同时对结构静力推覆曲线的影响,并与试验结果^[5]曲线对比.

其中, f'_y/f_y 表示斜杆的抗压强度与抗拉强度的比值.

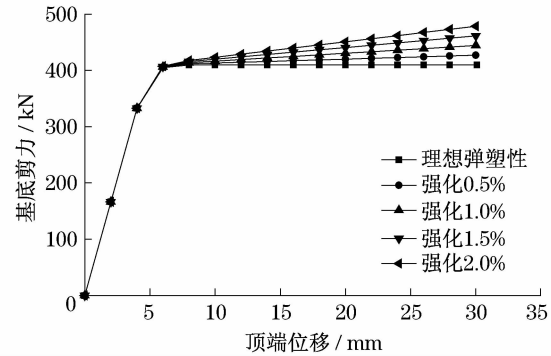


图5 钢材强化段刚度对计算结果的影响

Fig.5 Effect of post-yield stiffness of steel on computational results

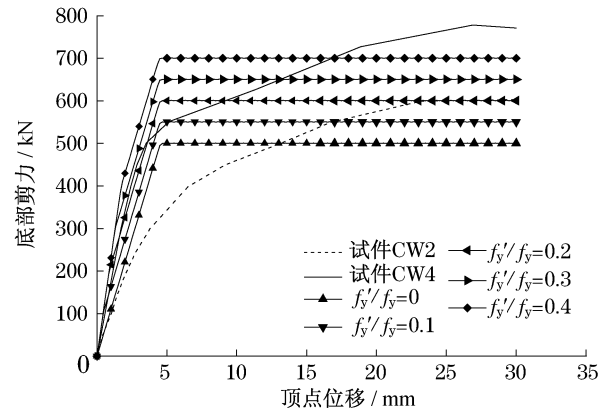


图6 斜杆抗压强度对结构整体静力性能的影响

Fig.6 Effect of strip compressive strength on global structural behavior

表2给出了试验和利用多斜杆模型计算得到的组合墙初始刚度和极限承载力. 其中,试件CW4和CW2的试验数值均出自文献[5]. CW2是两边连接组合墙, CW4为四边连接组合墙. 文献[2]提到,由于在试验后期, CW4中混凝土板与鱼尾板相接触,测得的极限承载力偏大,并根据混凝土板与鱼尾板之间的局部承压情况,修正得到了CW4的极限承载力试验值.

图6中,计算曲线与试验曲线在形状上存在差

异,原因主要是在无约束钢板区域局部屈曲过程中,组合墙抗侧刚度逐步软化.模型没有考虑这一因素.由图 2b 可见,无约束钢板区域较小,局部屈曲的程度不大.

表 2 斜杆抗压强度对计算结果的影响
Tab.2 Effect of strip compressive strength on computational results

项目	初始刚度/(kN·mm ⁻¹)	极限承载力/kN
CW2 的试验值	107	607
CW4 的试验值	149	620
$f'_y/f_y = 0$	117	500
$f'_y/f_y = 0.1$	234	550
$f'_y/f_y = 0.2$	234	600
$f'_y/f_y = 0.3$	234	650
$f'_y/f_y = 0.4$	234	700

由表 2 可见, f'_y/f_y 从 0 变化至 0.4 时,极限承载力增加了 40%.说明斜杆受压强度的取值变化对计算结果有很大的影响.表中, $f'_y/f_y = 0.2$ 时,给出的本模型预测结果与试验结果吻合较好.

3.3 斜杆抗压刚度的影响分析

在上节分析中,假定斜杆的抗压刚度与抗拉刚度相等时,得到的结构的初始刚度远大于试验结果.这说明,斜杆的抗压刚度尚需分析.为确定模型中斜杆抗压刚度的合理取值,需对其分析参数.此处所用模型中,斜杆的抗压强度与抗拉强度的比值取为 0.2,斜杆的抗压刚度与抗拉刚度的比值分别取 0, 1/4, 1/2, 3/4, 1. 计算得到了结构静力性能随斜杆抗压刚度的变化,如表 3 和图 7 所示.其中, k'/k 表示斜杆的抗压刚度与抗拉刚度的比值.

表 3 斜杆抗压刚度对计算结果的影响
Tab.3 Effect of strip compressive stiffness on computational results

项目	k'/k	初始刚度/(kN·mm ⁻¹)
计算值	0	117
	1/4	146
	1/2	175
	3/4	205
	1	234
试验值		149

由表 3 和图 7 的分析结果可知,结构的初始刚度随斜杆抗压刚度的增加而增加.斜杆抗压刚度与抗拉刚度相同时的结构初始刚度,是斜杆抗压刚度为零时的 2 倍.而当斜杆抗压刚度与抗拉刚度的比值取为 1/2 时,数值模拟得到的结构初始刚度与试验结果^[2]最为接近.原因是钢墙板四周约束不充分,

容易形成局部屈曲,使得初始刚度降低一定程度.由于试验结果有限,关于初始刚度的修正,需要进一步的试验与理论分析才能得到可靠的结果.

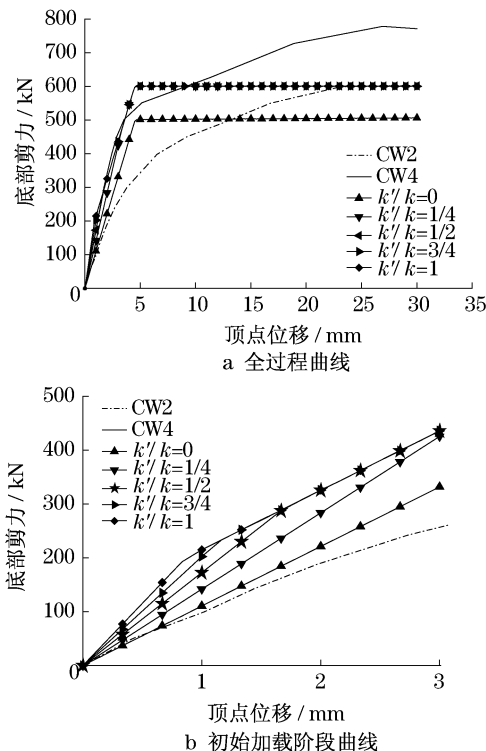


图 7 斜杆抗压刚度对结构整体静力性能的影响
Fig.7 Effect of strip compressive stiffness on global structural behavior

3.4 恢复力模型的试验验证

根据前文的分析结果,将斜杆中纤维铰的恢复力模型定义为退化双线性模型,对文献[2]的试验进行数值模拟,得到了组合墙顶部水平位移和水平荷载之间的滞回曲线,并与试验实测的滞回曲线对比(如图 4 所示).

由于 3.3 节提到的原因,图 4 中试验测得的组合墙强度偏高.但总体来看,试验与计算结果还是比较相似的.

为验证本文提出的双向多斜杆模型的通用性,利用该简化模型对文献[1]中的新型组合墙(innovative composite shear wall)低周反复试验进行了数值模拟.模拟得到滞回曲线与试验曲线的对比如图 8 所示.图 8 所示试验与数值模拟结果显示了两者之间较好程度的吻合.其中,试验曲线的滞回环强度退化很明显.这是由于该试件的混凝土板开裂,钢墙板出现显著的屈曲,而简化模型中假定混凝土板不发生破坏,强度不会退化.

由上述两个试验的模拟结果可见,利用本模型

模拟计算组合墙,所得到的滞回曲线与试验是比较吻合的.

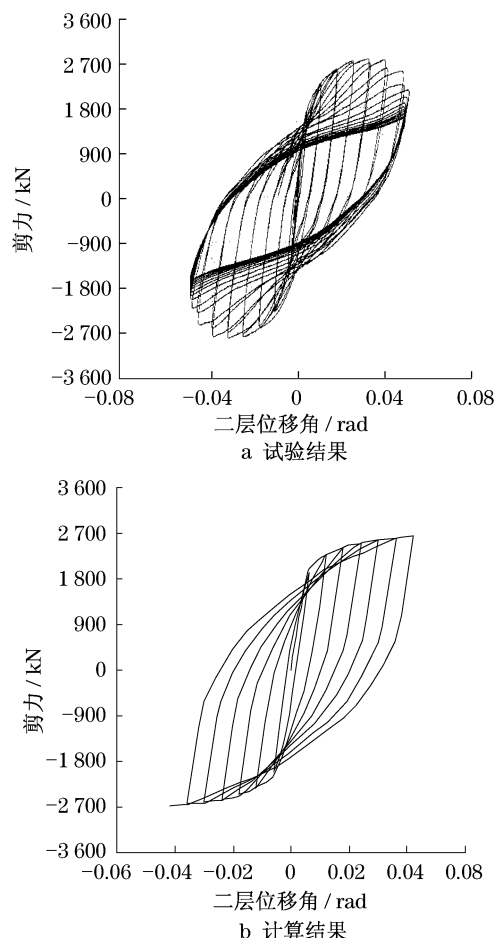


图8 新型组合墙的试验与计算结果对比

Fig.8 Comparison of experimental and computational results for innovative composite shear wall

4 结语

根据组合钢板墙受力机理和实际破坏模式,在钢板墙的斜拉带模型基础上,提出了组合墙结构的双向多斜杆简化计算模型,并给出了该分析模型骨

架曲线的具体计算方法和滞回规则的选择.试验表明,该模型能较为准确地得到组合墙的初始刚度、极限承载力和滞回曲线.由于已有组合墙的试验比较有限,必须进一步地进行试验和理论研究,提高模型精度.

参考文献:

- [1] Zhao Q, Astanteh-Asl A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 271.
- [2] 高辉. 组合钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2007.
GAO Hui. Experimental and theoretical study on composite steel plate walls [D]. Shanghai: Tongji University. Department of Building Engineering, 2007.
- [3] Thorburn L Jane, Kulak G L, Montgomery C J. Analysis of steel plate shear walls [R]. Structural Engineering Report. No. 107, Alberta: University of Alberta. Department of Civil Engineering, Canada, 1983.
- [4] 蔡克铨, 林盈成, 林志翰. 钢板剪力墙抗震行为与设计 [C] // 第四届海峡两岸及香港钢结构技术交流会论文集. 上海: 同济大学, 2006: 108 - 116.
CAI Kequan, LIN Yingcheng, LIN Zhihan. Seismic behavior and design of steel plate shear walls [C] // The proceedings of the fourth Across-strait and Hong Kong Symposium on Steel Structures. Shanghai: Tongji University, 2006: 108 - 116.
- [5] Driver R G, Kulak G L, Elwi A E, et al. FE and simplified models of steel plate shear wall [J]. ASCE Journal of Structure Engineer, 1997, 124(2): 121.
- [6] Jeffrey Berman, Michel Bruneau. Plastic analysis and design of steel plate shear walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1.
- [7] Astanteh-Ash A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear plate shearwalls [R]. Moraga: Structural Steel Educational Council, 2002.
- [8] 李杰, 李国强. 地震工程学导论 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
LI Jie, LI Guoqiang. Introduction to earthquake engineering [M]. Beijing: Seismology Press, 1992.
- [9] Computer & Structures Inc. Sap2000 analysis manual [M]. Berkeley: [s. n.], 2007.