

## 开缝钢板墙等效交叉支撑模型

孙飞飞<sup>1,2</sup>, 贺旻斐<sup>2,3</sup>, 李国强<sup>1,2</sup>, 金华建<sup>2</sup>

(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. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

**摘要:** 作为一种用于高层建筑钢结构抗侧力构件, 开缝钢板墙已被验证具有良好的滞回耗能能力. 在先前的 1:4 缩尺开缝组合钢板墙试验中, 发现开缝组合钢板墙在循环加载作用下, 其极限承载力受循环应变强化的影响. 通过足尺开缝组合钢板墙试验进一步验证了循环应变强化效应的存在; 基于开缝钢板墙的受力性能, 对普通开缝钢板墙和开缝组合钢板墙提出了统一的等效交叉支撑模型和等效支撑的恢复力模型, 用于模拟开缝钢板的滞回特性. 对 4 个普通开缝钢板墙试件和 3 个开缝组合钢板墙试件进行了计算机数值模拟, 验证了等效交叉支撑简化模型的合理性.

**关键词:** 开缝钢板墙; 开缝组合钢板墙; 等效交叉支撑模型; 恢复力模型

**中图分类号:** TU 317

**文献标识码:** A

### Study on an Equivalent Cross Brace Model of Steel Plate Wall with Slits

SUN Feifei<sup>1,2</sup>, HE Minfei<sup>2,3</sup>, LI Guoqiang<sup>1,2</sup>, JIN Huajian<sup>2</sup>

(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. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

**Abstract:** A full-scale composite slit steel plate walls (CSSPW) specimen was tested, which further verified the cyclic strain hardening phenomenon. In the meanwhile, a unified model of equivalent cross brace (ECB) model and corresponding hysteretic models were proposed to simulate the hysteresis behavior of steel plate shear walls with slits and CSSPW. Numerical simulation was conducted for four specimens of steel plate shear walls and three specimens of CSSPWs, showing good accuracy of the proposed model.

**Key words:** steel plate shear wall with slits; composite slit steel plate walls; equivalent cross brace model; hysteretic model

开缝钢板墙是日本学者在带竖缝混凝土剪力墙的基础上提出的<sup>[1-2]</sup>. 由于在钢板上开设一定数量的竖缝, 降低了钢板宽厚比和高宽比, 从根本上改变了钢板墙的受力性能: 使得开缝钢板墙的受力性能与并列的壁柱相似, 在水平力作用下, 钢板墙的变形主要由缝间弯曲杆的弯曲变形和整体剪切变形构成.

为了研究开缝形式对墙板的影响, 魏德敏等<sup>[3]</sup>将带缝钢板剪力墙简化成 2 根理想的弹塑性弹簧单元, 弹簧抗力即为带缝钢板剪力墙的抗侧力. 汪文辉等<sup>[4]</sup>进一步研究了足尺带缝钢板剪力墙的抗震性能, 考察了影响其性能的 3 个因素: 墙体上下框架梁的刚度、墙梁连接处螺栓的布置以及墙体的边缘加劲.

与普通薄钢板墙相比, 开缝钢板剪力墙的滞回性能有了一定的改善, 但当缝间弯曲杆宽厚比较大或高宽比较小时, 墙板仍会发生弯扭失稳, 使得滞回曲线出现捏拢现象. 为了防止大宽厚比缝间墙的屈曲, 孙飞飞等<sup>[5]</sup>提出了一种屈曲约束开缝钢板墙, 通过设置约束龙骨来防止大宽厚比缝间墙的屈曲.

孙飞飞等<sup>[6]</sup>提出了一种大高宽比组合开缝钢板墙, 通过设置具有较强面外约束的混凝土板, 可以提高开缝钢板的宽厚比, 提高开缝钢板墙的整体抗侧承载力. 缩尺试验研究发现, 这种墙板在反复荷载作用下有明显的循环应变强化现象, 导致其极限承载力明显高于开缝钢板墙, 同时两者的滞回曲线形状也有明显区别. 本文将通过足尺试验进一步验证上述强化现象, 并对普通开缝钢板墙和组合开缝钢板墙建立统一的等效交叉支撑模型和相应的支撑恢复力模型, 用于模拟不同类型的开缝钢板墙的滞回性能.

收稿日期: 2010-01-27

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ01B02); 国家自然科学基金重大研究计划(90815029)

第一作者: 孙飞飞(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗震. E-mail: ffsun@tongji.edu.cn

## 1 足尺开缝组合钢板墙试验

开缝钢板墙极限承载力可按下式计算<sup>[1-2]</sup>:

$$Q_{ul} = \frac{ntb^2}{2l} \sigma_y \quad (1)$$

式中:  $t$  为钢板厚度;  $b, l$  分别为缝间弯曲杆宽度、长度(图 1);  $n$  为缝间弯曲杆个数;  $\sigma_y$  为钢材材料屈服强度. 另, 图 1 中  $m$  为开缝行数,  $h$  为钢板高度,  $B$  为钢板宽度. 本课题组通过缩尺试验研究发现, 开缝组合钢板墙的极限承载力应采用下式计算<sup>[6]</sup>:

$$Q_{u2} = \frac{ntb^2}{2l} \sigma_u \quad (2)$$

式中:  $\sigma_u$  为钢材材料极限强度. 为了进一步验证开缝组合钢板墙在反复荷载作用下的循环应变强化现象, 本文进行了足尺试件的试验研究.

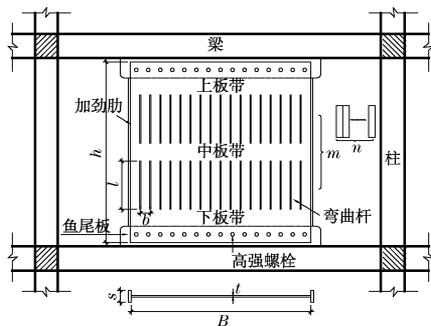


图 1 典型开竖缝钢板墙示意图

Fig.1 Typical steel plate wall with slits

本次试验在同济大学结构试验室进行, 试验采用大型加载机加载. 该设备的水平最大推力和最大拉力均为 630 kN, 试验中不施加竖向荷载. 为了满足单片剪力墙上下边缘的边界条件, 本次试验采用带有四连杆机构的试验装置, 以此来约束墙体面内转动自由度, 同时释放面内的 2 个水平自由度. 如图 2 所示, 试验装置由加载梁、四连杆机构以及地梁等部分组成, 地梁通过地锚螺栓与地面相连. 四连杆机构由 4 根矩形截面的方管通过销轴连接而成, 用于限制试件在平面内的转动; 在对应于加载梁首尾两端的位置分别放置两对面外支撑架, 用于约束加载梁的侧向位移. 足尺开缝组合钢板墙试件采用 Q235 钢材, 钢材的力学性能试验结果见表 1. 足尺试件 S1 相关尺寸见图 3. 图 4 为钢板安装照片. 图 5 为试件安装完毕照片. 混凝土板在钢板的双侧布置其作用是约束钢板的平面外变形, 而本身并不参与横向受力. 混凝土板的尺寸为 2 472 mm × 1 500 mm, 板厚为

100 mm, 配筋采用 HPB235 级钢筋, 钢筋直径为 6 mm, 采用构造配筋, 钢筋间距为 200 mm, 上下双层配筋; 混凝土采用 C50 混凝土外加早强剂. 混凝土板在光滑模板表面上浇筑, 起到减小钢板与混凝土板接触面上摩擦力的作用, 使钢板和混凝土板各自的受力更加明确.

表 1 钢板材料力学性能

Tab.1 Material mechanical properties of steel plate

试件厚度/mm	试件编号	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_u$ /MPa	$E$ /GPa	$\delta$ /%	$\sigma_u/\sigma_y$
10	hj-1	295	450	204	33.0	1.52
10	hj-2	295	450	227	33.5	1.52
10	hj-3	290	450	213	33.5	1.54
10	平均值	293	450	218	33.3	1.53

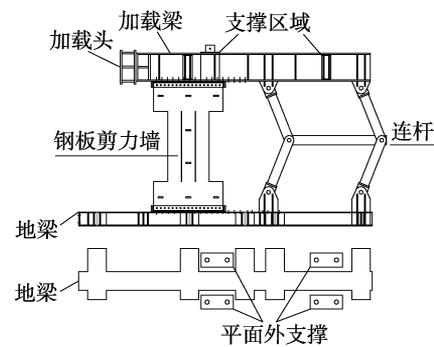


图 2 加载架

Fig.2 Loading frame

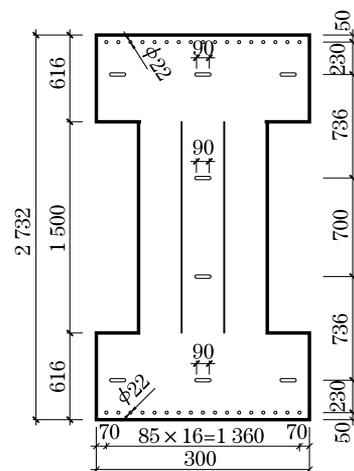


图 3 钢板尺寸图(单位:mm)

Fig.3 Dimensions of steel plate(unit:mm)

由图 6 和图 7 可见, 钢板的破坏主要是缝端开裂, 混凝土板的破坏主要集中于角部, 该破坏模式与文献[6]中的缩尺试件一致. 试件最后破坏时的极限承载力  $Q_u = 418$  kN. 采用式(1)和式(2)计算足尺试件 S1 和文献[6]中试件 S4-3, S5-3 的理论极限荷

载,并与试验结果进行对比,如表2所示.可见式(1)计算结果与试验结果的误差较小.这表明,该足尺试验与文献[6]中的缩尺试验一样存在循环应变强化现象.



图4 钢板安装照片

Fig.4 Installing steel plate



图5 试件安装完毕照片

Fig.5 Specimen S1 Installed



图6 钢板破坏图

Fig.6 Failure of steel plate



图7 混凝土板角部破坏

Fig.7 Failure of concrete panel

表2 试件极限承载力理论公式计算结果

Tab.2 Results by theoretical equations of ultimate bearing capacity

试件	实测值/kN	式(1)结果/kN	式(1)误差/%	式(2)结果/kN	公式(2)误差/%
S1	418	264.0	-36.8	403	-3.7
S4-3	265	186.6	-29.5	242	-9.3
S5-3	280	186.6	-33.3	242	-15.0

## 2 开缝钢板墙等效交叉支撑简化模型

由已有试验结果可知,普通开缝钢板墙和开缝组合钢板墙在弹性状态下受力机理一致,在进入塑性后由于面外失稳变形的模式不同会造成滞回曲线差异.下文提出统一的等效支撑简化模型对普通开缝钢板墙和开缝组合钢板墙进行模拟.

### 2.1 等效支撑的截面面积的确定

简化模型中等效交叉支撑与梁铰接,不考虑支撑受压屈曲.当梁的顶部作用水平荷载 $F$ ,如图8所示.

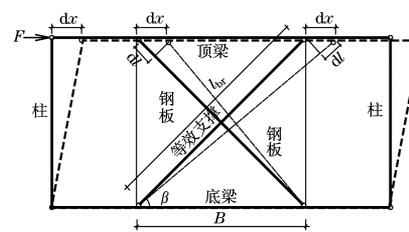


图8 等效交叉支撑模型侧向变形示意图

Fig.8 Displacement of equivalent cross brace model

等效交叉支撑模型顶部发生侧向变形为

$$dx = \frac{Fl_{br}^3}{2EA_{br}B^2} = \frac{Fl_{br}}{2EA_{br}\cos^2\beta} \quad (3)$$

按位移相等原则进行等效,可以得到等效交叉支撑杆的面积为

$$A_{br} = \frac{K_{wt}l_{br}}{2E\cos^2\beta} \quad (4)$$

式中: $K_{wt}$ 为开缝钢板墙初始侧向刚度; $E$ 为钢材弹性模量; $l_{br}$ 为等效交叉支撑长度, $l_{br} = B/\cos\beta$ ; $A_{br}$ 为交叉支撑的面积; $\beta$ 为等效交叉支撑与水平面的夹角.

### 2.2 等效交叉支撑的轴力——变形的骨架曲线

如图9所示,本文对于开缝钢板墙和开缝组合钢板墙提出统一的开缝钢板墙三折线骨架曲线,其中第1个转折点为初始屈服点,第2个转折点为缝间弯曲杆全截面屈服点.对于两种墙板,第2个转折点前骨架曲线完全重合.此后,开缝组合墙产生循环应变强化现象,骨架曲线有明显强化.普通开缝钢板墙按缝的疏密程度不同分为两种情况:①钢板开缝较疏时,骨架曲线出现软化现象.这是由于此类钢板墙的承载力大于缝间弯曲杆的弹性弯扭屈曲荷载或者墙板整体弹性受剪屈曲荷载,墙板会在弹性阶段发生屈曲.并随荷载增大,弹性面外变形会持续增大,墙板在塑性阶段会发生整体失稳,导致承载力下降.②当钢板开缝较密时,骨架曲线会出现平台段,这是由于钢板墙在达到极限承载力前不会出现弹性面外变形,当缝间弯曲杆杆端进入塑性后,墙板在塑性阶段不发生整体失稳,钢板承载力保持不变,弯曲杆的塑性弯扭失稳使得墙板平面内变形增大.经换算可以得到单根等效交叉支撑采用统一的三折线荷载位移关系的骨架曲线,如图10所示.

等效交叉支撑骨架曲线的主要参数有支撑的屈服承载力 $F_y$ ,初始刚度 $K_{br}$ 和切线刚度 $K_2, K_3$ .其中 $K_{br}$ 和 $F_y$ 可以按下式计算:

$$K_{br} = \frac{K_{wt}}{2\cos^2\beta} \quad (5)$$

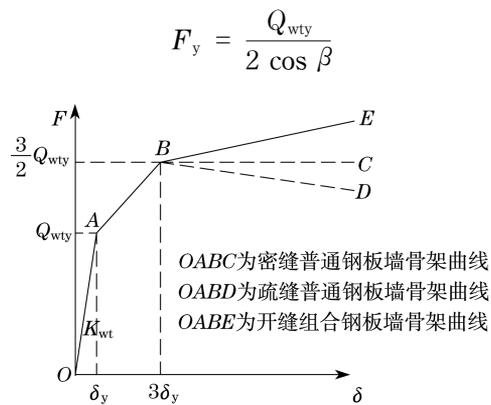


图9 统一的开缝钢板墙骨架曲线

Fig.9 Unified skeleton curve of steel plate wall with slits

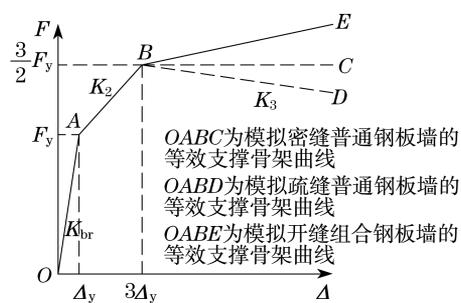


图10 统一的等效支撑骨架曲线

Fig.10 Unified skeleton curve of equivalent brace

由分析可知,普通开缝钢板墙的初始刚度和屈服承载力的计算公式同样也适用于开缝组合钢板墙,即墙板初始刚度  $K_{\text{wt}}$  和屈服承载力  $Q_{\text{wty}}$  可采用下式计算<sup>[1-2]</sup>:

$$K_{\text{wt}} = \frac{1}{\frac{\kappa(h - ml)}{Gbt} + \frac{\kappa l}{Gbt} \frac{m}{n} + k(\alpha, \beta) \frac{l^3}{Etb^3} \frac{m}{n}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{wty}} = \frac{ntb^2}{3l} \sigma_y \quad (8)$$

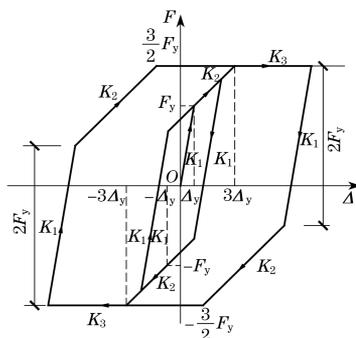


图11 密缝普通钢板墙等效支撑恢复力模型

Fig.11 Hysteretic model for steel plate wall with dense slits

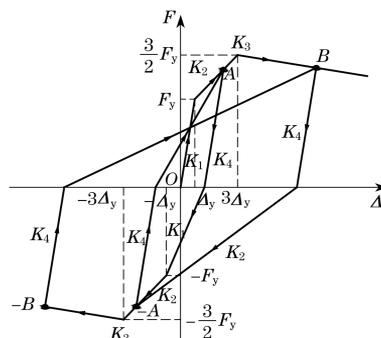


图12 疏缝普通钢板墙等效支撑恢复力模型

Fig.12 Hysteretic model for steel plate wall with sparse slits

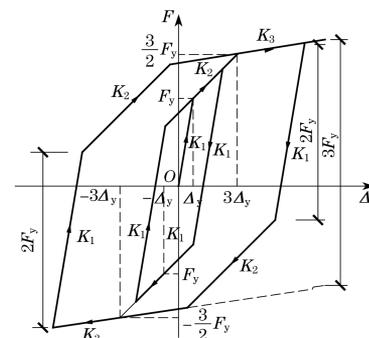


图13 开缝组合钢板墙等效支撑恢复力模型

Fig.13 Hysteretic model for composite slit steel plate wall

式中:  $\kappa$  为剪切变形形状系数(矩形截面取 1.2);  $G$  为钢材剪切模量;  $k(\alpha, \beta)$  为计算长度影响系数,  $k(\alpha, \beta) = (1 + b/l)^3$ .

在钢板缝间弯曲杆杆端截面进入部分塑性后,具有一定的强化刚度,经大量分析提出单根等效支撑刚度  $K_2 = 0.25K_{\text{br}}$ . 如前所述,  $K_3$  与墙板构造形式有关. 对于开缝组合墙,由于存在循环应变强化现象,根据试验结果,可取  $K_3 = 0.1K_{\text{br}}$ ; 对普通开缝钢板墙,竖缝的疏密不同对  $K_3$  的取值有影响.

当墙板的开缝设计满足式(9)的要求时,钢板的极限承载力低于墙板的两种弹性屈曲承载力,即墙板不会发生弹性屈曲,可称为密缝钢板墙,其  $K_3 = 0$ ; 反之,则可称为疏缝钢板墙,其骨架曲线会出现软化现象,可取  $K_3 = -0.05K_{\text{br}}$ .

$$Q_{\text{ul}} \leq \min(Q_{\text{tr}}, Q_{\text{scr}}) \quad (9)$$

式中:  $Q_{\text{tr}}$ ,  $Q_{\text{scr}}$  分别为开缝钢板墙的缝间弯曲杆扭转失稳与开缝钢板墙整体剪切失稳的屈曲临界承载力;  $Q_{\text{tr}} = n \frac{4.013}{(k(\alpha, \beta) \cdot l/2)^2} \sqrt{B_1 C}$ ;  $Q_{\text{scr}} =$

$$\frac{\pi^2 k_{\text{cr}} E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{h}\right)^2 Bt; B_1 \text{ 为缝间弯曲杆的弯曲刚度, } B_1 = Ebt^3/12; C \text{ 为缝间弯曲杆的扭转刚度, } C =$$

$$Gbt^3/3; k_{\text{cr}} \approx 8.98 + 3.3h/B; \nu \text{ 为泊松比.}$$

### 2.3 等效交叉支撑的恢复力模型

根据开缝钢板墙开缝形式和是否设置有混凝土约束板,在上述等效交叉支撑骨架曲线模型上采用如下滞回规则:卸载时均不考虑刚度的退化,卸载刚度  $K_4 = K_{\text{br}}$ ; 反向加载时,密缝普通钢板墙和开缝组合钢板墙采用随动强化,疏缝普通钢板墙指向上次循环的峰值点. 由此可以得到如图 11 到图 13 所示的等效支撑的恢复力模型.

### 3 试验数值模拟

本节采用 Sap 2000 有限元软件对 4 个普通开缝钢板墙试验<sup>[1]</sup>、2 个缩尺开缝组合钢板墙试验<sup>[6]</sup>以及本文的足尺试件进行数值分析.各试件尺寸参数如表 3 所示,试件主要尺寸参数含义如图 1 所示.模型

中等效交叉支撑与边界梁为铰接连接,仅在等效交叉支撑单元杆件内设置塑性单元,采用 Fiber 铰塑性单元模拟支撑的受力性能.等效支撑材料的等效屈服强度和等效屈服应变  $\sigma_e$  和  $\epsilon_e$  按下式计算:

$$\sigma_e = \frac{F_y}{A_{br} \cos \beta} \quad (10)$$

$$\epsilon_e = \sigma_e / E \quad (11)$$

表 3 开缝钢板墙尺寸及参数

Tab.3 Dimensions and parameters of steel plate walls with slits

试件编号	t/mm	b/mm	l/mm	B/mm	h/mm	m	l/b	b/t	混凝土板厚度/mm
A102	4.5	42	235	800	800	2	5.6	9.3	
A201	4.5	86	424	800	800	1	4.9	19.1	
A202	4.5	86	168	800	800	2	1.9	19.1	
A301	4.5	131	335	800	800	1	2.6	29.1	
S4-3	4.0	180	540	900	890	1	2.0	45.0	60
S5-3	4.0	150	450	900	890	1	3.0	37.5	60
S1	10.0	300	1 500	900	2 732	1	5.0	30.0	100

#### 3.1 普通开缝钢板墙试验模拟

图 14 为普通开缝钢板墙试件 A102, A201, A202, A301<sup>[1]</sup>的 SAP 2000 模型.图 15 为相应的简化模型计算结果.可见,使用上述简化模型较好地模拟了普通开缝钢板墙的滞回性能.由于简化模型没有考虑钢板面外失稳对卸载刚度的影响,所以简化模型计算的结果相对于实测结果偏饱满.

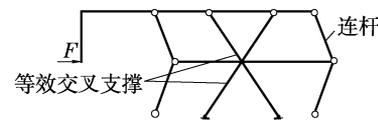


图 14 普通开缝钢板墙试验 SAP 2000 简化模型  
Fig.14 SAP 2000 simplified model for steel plate wall with slits

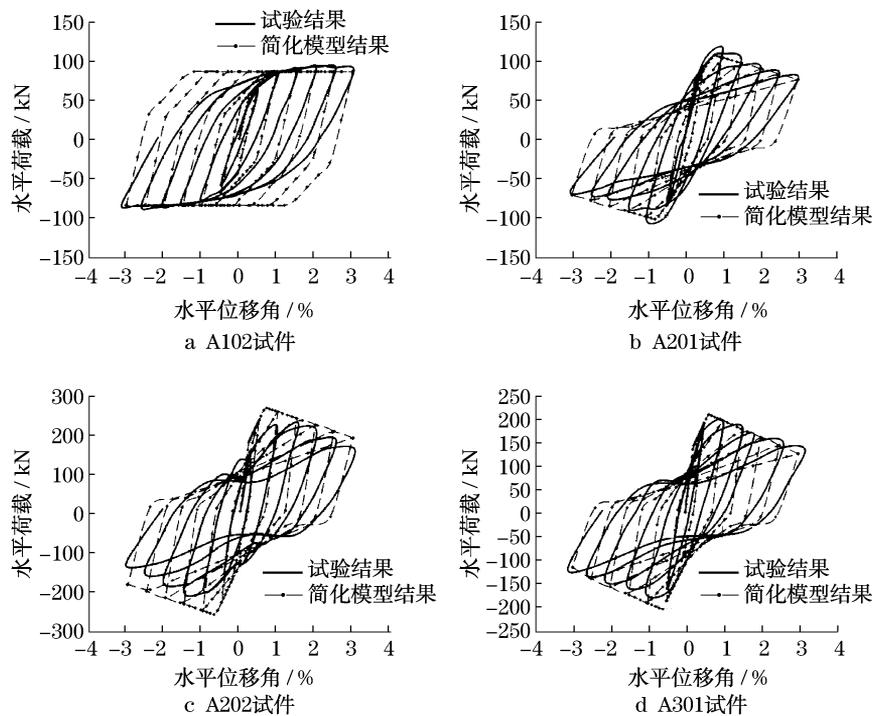


图 15 各开缝钢板墙试件简化模型计算结果

Fig.15 Computation results of simplified model for each specimen of steel plate wall with slits

### 3.2 开缝组合钢板墙试验模拟

图16为缩尺开缝组合钢板墙试件S4-3和S5-3<sup>[6]</sup>的SAP 2000模型.图17为相应的简化模型计算结果.可见简化模型计算结果与试验结果一致,当荷载卸载为零时试验的残余变形与简化模型计算结果吻合较好,但是计算所得的卸载曲线的形状与试验结果不同,这是由于动态油压变化与千斤顶作用力之间有时间滞后.

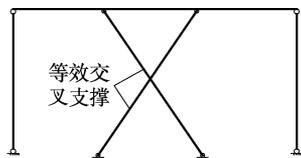


图16 缩尺开缝组合钢板墙试验 SAP 2000 简化模型  
Fig.16 SAP 2000 simplified model for small-scale CSSPW

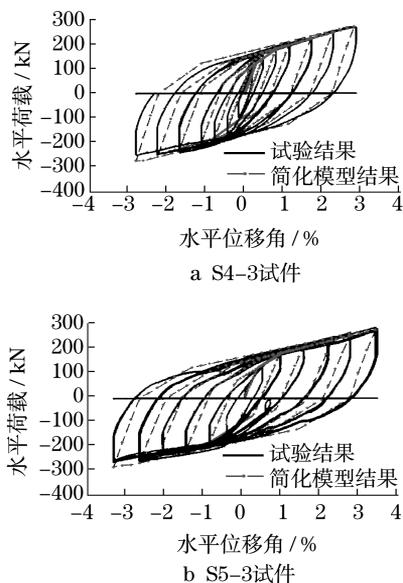


图17 缩尺开缝组合墙试件简化模型计算结果  
Fig.17 Computation results of simplified model for small-scale CSSPW

图18和图19分别为足尺开缝组合钢板墙的SAP2000模型和计算结果.可见计算结果相对于试验结果偏小.这是由于加载梁刚度较小,加载梁和作动器发生偏转,使得墙板整体受弯曲强化的影响.

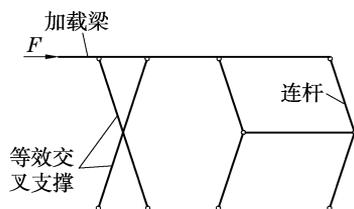


图18 足尺开缝组合钢板墙试验 SAP 2000 简化模型  
Fig.18 SAP 2000 simplified model for full-scale CSSPW specimen

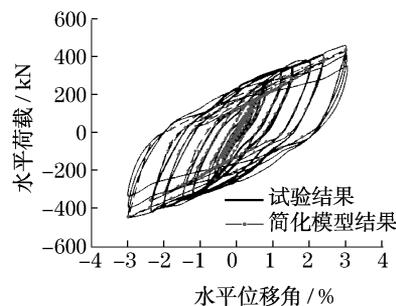


图19 S1试件简化模型计算结果

Fig.19 Computation results of simplified model for S1

## 4 结论

(1)开缝组合钢板墙足尺试验表明,开缝组合钢板墙由于具有较强的面外约束,内填钢板在反复荷载作用下有明显的循环应变强化现象.

(2)提出统一的等效支撑三折线骨架曲线模型和恢复力模型,可用于普通开缝钢板墙和开缝组合钢板墙的简化模拟.

(3)算例分析表明,所提简化模型的计算结果与试验结果吻合良好,既可以模拟开缝组合钢板墙的循环应变强化,又可以模拟疏缝普通钢板墙的负刚度现象,模拟密缝普通钢板墙的计算滞回曲线略偏于饱满.

### 参考文献:

- [1] Hitaka T, Matsui C. Experimental study on steel shear wall with slits[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129: 586.
- [2] Hitaka T, Matsui C, Sakai J. Cyclic test on steel and concrete-filled tube frames with slit walls[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36: 707.
- [3] 魏德敏, 温冲刚, 卞宗舒. 新型带缝钢板剪力墙的试验研究及其数值模拟[J]. 地震工程与工程震动, 2006, 26(2): 129.  
WEI Demin, WEN Peigang, BIAN Zongshu. Experimental investigation and simulation analysis of new steel plate shear walls with slits[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 129.
- [4] 汪文辉. 带缝钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2009.  
WANG Wenhui. Experimental and theoretical study on steel plate shear wall with slits[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [5] 王文涛. 屈曲约束开缝组合钢板剪力墙试验研究与理论分析[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.  
WANG Wentao. Experimental and theoretical study on buckling restrained steel plate shear wall with slits[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2008.
- [6] 孙飞飞, 戴成华, 李国强. 大宽厚比开缝组合钢板墙低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 72.  
Sakai SUN Feifei, DAI Chenghua, LI Guoqiang. Cyclic test on large flakiness ration composite steel plate walls with slits[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 72.