

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 钢板剪力墙振动台试验的等效模型

冯力强<sup>1</sup>, 牛昌林<sup>2</sup>, 李锋<sup>3</sup>, 何翰卿<sup>3</sup>, 杨溥<sup>3</sup>, 刘立平<sup>3</sup>, 李英民<sup>3</sup>

(1. 甘肃省建设投资(控股)集团有限公司, 兰州 730050; 2. 甘肃建投科技研发有限公司, 兰州 730050;  
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为解决钢框架-钢板剪力墙结构振动台试验缩尺模型中的剪力墙钢板厚度过薄的问题,依据结构初始抗侧刚度或承载能力等效的原则,提出中心支撑和 I 形钢板剪力墙两种等效模型,采用数值分析的方法,通过有限元软件 ABAQUS 建立精细化模型,对原型结构的钢板剪力墙和等效模型的刚度与承载力等抗震性能进行了对比分析。研究表明:两种等效替代模型均具有良好的耗能能力,能够在抗侧刚度或承载能力方面满足原型结构的等效设计要求,解决了模型结构中剪力墙钢板厚度小的难题;中心支撑等效方案仅可实现剪力墙的刚度或承载力单目标等效,而 I 形钢板剪力墙可以通过控制开洞口的尺寸,实现其刚度和承载力同时等效,为钢板剪力墙振动台试验模型的等效替代提供了参考。

**关键词:**振动台试验;钢板剪力墙;等效模型;抗震性能

中图分类号: TU391; TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2021)03-0016-08

## Equivalent model of steel plate shear walls in shaking table tests

FENG Liqiang<sup>1</sup>, NIU Changlin<sup>2</sup>, LI Feng<sup>3</sup>, HE Hanqing<sup>3</sup>, YANG Pu<sup>3</sup>, LIU Liping<sup>3</sup>, LI Yingmin<sup>3</sup>

(1. Gansu Construction Investment (Holdings) Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, P. R. China; 2. Gansu Construction Investment Technology Research Co., Ltd., Lanzhou 730050, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In the shaking table test of steel frames-steel shear wall system, a problem is that the thickness of the steel plate shear wall (SPSW) in the scale model is too small. In order to solve this problem, this paper proposes two equivalent models: concentrically braced frames and I shape of steel plate shear walls. Both of the two models are based on principles of equivalent initial lateral stiffness or bearing capacity of the structure. The finite element analysis program ABAQUS was used to establish the refined model, using the method of numerical analysis. And the stiffness, bearing capacity and other seismic performance of the prototype SPSW and equivalent models were compared and analyzed. The results show the two equivalent substitution models both have good energy consumption capacity and can solve the problem of small thickness. In addition, the concentrically braced frames model can only make sure either stiffness or bearing capacity equivalent, but I shape of steel plate shear walls model can ensure both stiffness and bearing capacity equivalent, which provides some suggestions for the equivalent models of SPSW in shaking table tests.

**Keywords:** shaking table tests; steel plate shear wall; equivalent model; seismic performance

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2018-K9-072); 国家自然科学基金(51638002)

作者简介: 冯力强(1967-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事绿色建造与装配式建筑研究, E-mail: wei.hl@163.com。

Received: 2020-08-24

**Foundation items:** Ministry of Housing and Urban-Rural Development Research Project (No. 2018-K9-072); National Natural Science Foundation of China (No. 51638002)

**Author brief:** FENG Liqiang (1967-), PhD, senior engineer, main research interests: green construction and prefabricated building, E-mail: wei.hl@163.com.

钢板剪力墙作为一种抗震性能理想的抗侧力构件,多应用于高层和超高层建筑中,受力性能类似于底端嵌固的竖向悬臂梁<sup>[1]</sup>。近年来的试验和理论研究表明<sup>[2-3]</sup>,利用钢板屈服后强度可以提高结构的承载力和延性。目前,对四边连接钢板剪力墙研究比较充分,发现四边连接钢板剪力墙存在一些不足<sup>[4-7]</sup>,如拉力场会在框架柱中产生较大弯矩,对边缘构件刚度需求较高;不利于设置门窗洞口,对建筑使用功能有一定限制等。

针对以上不足,Xue等<sup>[8]</sup>提出了两边连接钢板剪力墙,即仅仅通过框架梁与钢板的上下两边进行连接,释放柱与钢板左右两侧连接,该形式的钢板剪力墙可以避免柱过早破坏;Shekastehband等<sup>[9]</sup>、李国强等<sup>[10]</sup>、张增德等<sup>[11]</sup>及赵秋红等<sup>[12]</sup>对两边连接组合剪力墙和波纹钢板剪力墙的受力机理和抗震性能进行了研究;陆焯<sup>[13]</sup>提出了大高宽比的I形防屈曲钢板剪力墙,在钢板中部的左右两侧开窗洞,钢板形状类似于字母“P”,并设置外包混凝土板,防止钢板发生屈曲,I形钢板剪力墙不仅可以满足开洞口的使用功能要求,也方便通过调整窗洞的尺寸改变钢板剪力墙的抗侧刚度和承载力。在钢框架-钢板剪力墙结构进行振动台试验时,钢板剪力墙缩尺后厚度过小的问题是无法避免且必须解决的难题,即实际工程中钢板剪力墙一般比较薄,最小厚度可以达到6~10 mm,在振动台试验时,即使采用较大的几何相似比,例如1:8,缩尺后Q345B级钢板的厚度仅有1 mm左右,目前市场上不提供该规格的钢板;即使可以轧制1 mm厚度的钢板,但是在将钢板和边缘构件焊接时,非常容易焊穿钢板,残余应力较大,难以保证焊接质量。钢板剪力墙是结构中关键的抗侧力构件,对整体结构的动力特性和抗震性能有显著的影响。选择合理的钢板剪力墙等效替代模型是亟待解决的问题之一。

由于常用的设计软件PKPM或者ETABS不能很好地模拟纯钢板剪力墙在罕遇地震下的性能,文献<sup>[14-15]</sup>依据钢板剪力墙的弹塑性简化分析模型,将其转化为中心支撑参与结构受力计算,笔者在设计振动台试验钢板剪力墙等效替代模型时,借鉴该设计思路,根据原模型和等效模型的简化分析模型,以抗侧刚度或承载力相等为设计原则,考虑了中心支撑方案和I形钢板剪力墙两种方案,通过改变中

心支撑或I形钢板剪力墙的尺寸大小,来实现抗侧刚度或承载力的等效。利用有限元软件ABAQUS建立钢板剪力墙精细化模型,对比了原模型(四边连接带加劲肋钢板剪力墙)和两种等效模型的初始抗侧刚度和极限承载力,分析了两种等效模型的特点和适用范围。

## 1 原型结构钢板剪力墙构件受力分析

参考的原型结构取自某实际住宅工程,该住宅为钢框架-钢板剪力墙结构体系。图1是原型结构钢板剪力墙示意图,钢板四边通过鱼尾板与边缘构件焊接相连,并在钢板平面单侧布置纵向与横向的加劲肋。钢梁截面为HN250×125×6×9,钢柱截面为HW350×350×10×15,钢梁轴线的间距为3 050 mm,钢柱轴线间距为1 750 mm,钢板厚度沿高度分布为:1~3层厚度为10 mm,4~6层厚度为8 mm,7~10层厚度为6 mm,分别考虑3种厚度钢板的等效模型。

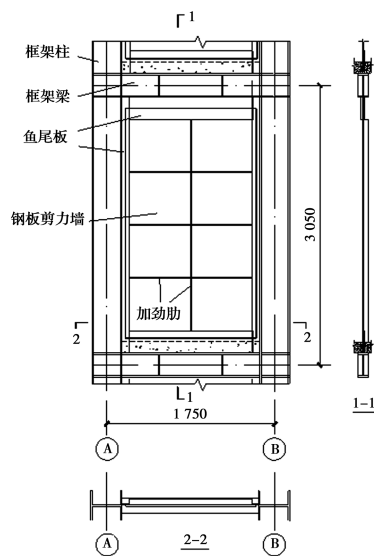


图1 原型结构钢板剪力墙示意图

Fig. 1 SPSW of prototype structure

### 1.1 有限元模型建立

为了得到原四边连接加劲钢板剪力墙的初始抗侧刚度和承载力,采用有限元软件ABAQUS建立钢板剪力墙非线性分析模型(见图2)。其中,钢梁、钢柱、剪力墙等构件均采用六面体八节点实体单元(C3D8R),选择结构化(Structured)划分方法,对不同构件选择合适尺寸大小的网格。

钢梁和钢柱、柱的加劲肋通过焊缝连接,采用绑

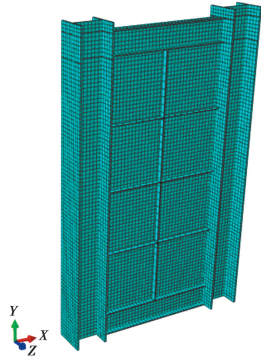


图 2 原型结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of prototype structure

定(Tie)模拟,钢板墙和钢梁或钢柱通过鱼尾板焊接,也采用 Tie 模拟,实际工程中梁的上翼缘往往与楼板连接,不会发生弯扭失稳,因此,设置钢梁约束  $U_z=0$ ,限制其面外变形。将柱翼缘在梁高度范围内耦合(Coupling)一点,作为水平加载点。同时打开大变形开关(NLGEOM, ON)以计入二阶效应的影响。

所有钢材均选用 Q345B 级,弹性模量  $E$  取  $2.06 \times 10^5$  MPa,名义屈服强度  $f_y$  取 335 MPa(软件 ABAQUS 中的真实应力转化为 335.5 MPa),名义极限强度  $f_u$  取 580 MPa(真实应力为 603.9 MPa),采用双折线强化模型和 Von mises 屈服准则,强化阶段模量  $E_t=0.03E$ ,单调加载本构关系采用各向同性强化模型,低周往复加载采用随动强化模型。

模型的加载分两步:1)在柱顶施加竖向荷载,定义轴压比为 0.2;2)在柱翼缘耦合点施加水平荷载。先分析得到有限元模型的单向水平加载曲线,计算结构的初始抗侧刚度和极限承载力,并用等能量原理确定结构的显著屈服点  $\Delta_y$ ,再施加以位移控制的水平荷载,按照  $\Delta_y/4$ 、 $\Delta_y/2$ 、 $3/4\Delta_y$ 、 $\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ ……的方式进行,屈服前循环一圈加载,屈服后循环两圈,直到层间位移角达到  $1/50$  rad。

## 1.2 有限元模拟与理论分析的对比

为了验证建模过程的合理性以及保证计算结果的准确性。对工程中的四边连接钢板剪力墙建立有限元模型,进行静力推覆分析得到荷载位移曲线,钢板剪力墙厚度取 10 mm。

文献[16]利用钢板剪力墙 PFI(Plate Frame Interaction)理论,对传统四边连接钢板剪力墙的初始刚度和极限承载力进行了分析,该理论考虑了周

边框架与钢板剪力墙的相互作用。图 3 和表 1 为 ABAQUS 模拟分析与 PFI 理论计算结果对比。

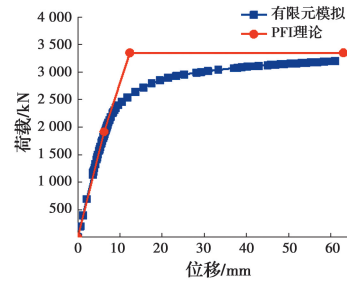


图 3 单调加载荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Monotone load-displacement curves comparison

表 1 初始刚度和极限承载力对比分析

Table 1 Initial stiffness and ultimate bearing capacity

获得方法	初始刚度/ (kN · mm <sup>-1</sup> )	误差/%	承载力/kN	误差/%
PFI 理论	307.5		3 348.1	
ABAQUS 模拟	324.8	5.6	3 196.0	-4.7

从分析结果看,加载初期两条曲线几乎重合,当钢板剪力墙发生面外屈曲,两条曲线存在一定差异,两种方法得到的初始刚度和承载力的误差均保持在 5%左右,误差较小。

## 1.3 四边连接钢板剪力墙刚度和承载力

在确定原型四边连接钢板剪力墙的刚度和承载力时,考虑了钢板剪力墙和框架边缘约束构件的相互作用,因为对于四边连接的钢板剪力墙而言,采用纯框架与钢板的剪力叠加的方法无法准确估计钢板剪力墙的极限承载力<sup>[17]</sup>,即结构的承载力不等于内嵌钢板和钢框架线性叠加。

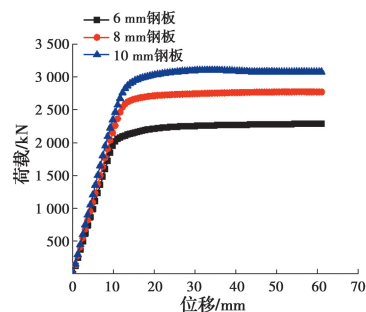


图 4 原型钢板剪力墙单推荷载-位移曲线

Fig. 4 Monotone load-displacement curves of prototype structure

图 4 是原型结构的 3 种不同厚度的钢板剪力墙的单推计算结果,表 2 汇总了 3 种厚度的钢板剪力墙的力学性能,可以看出 10 mm 厚度的钢板剪力墙

承载力最高,曲线初始斜率最大,即抗侧刚度随着钢板厚度的增加呈现增大趋势。

表 2 原型钢板剪力墙初始刚度和承载力

Table 2 Initial stiffness and ultimate bearing capacity of prototype SPSW

钢板厚度 <i>t</i> /mm	初始刚度 $K_1/(kN \cdot mm^{-1})$	极限承载力 $Q_1/kN$
6	202.1	2 288.4
8	223.3	2 773.7
10	246.3	3 102.2

$K_1$  和  $Q_1$  为原型结构的初始抗侧刚度和极限承载力,该结果考虑了钢板剪力墙和周边约束构件的相互影响。此外,对纯框架(无内嵌钢板)也进行了单推分析,得到纯框架的初始抗侧刚度  $K_2$  为 22.5 kN/mm 和承载力  $Q_2$  为 588.9 kN,分别与  $K_1$  和  $Q_1$  比较,可以发现钢板剪力墙几乎提供了结构的全部抗侧刚度,纯框架的刚度可以忽略,但是钢框架分担了相当一部分的剪力,对承载力的贡献不可忽略。

## 2 等效模型 1——中心支撑受力分析

### 2.1 中心支撑初始刚度和屈服承载力

图 5 为中心支撑等效模型示意图。

中心支撑提供的抗侧刚度

$$K_3 = \frac{2E \cdot A \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{H} \quad (1)$$

中心支撑屈服承载力

$$Q_3 = 2A \cdot f_y \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

式中: $H$  为支撑的竖向高度; $B$  为支撑的水平宽度; $A$  为单根支撑的横截面面积; $\alpha$  为支撑和钢梁的

夹角。

对于中心支撑-钢框架结构体系来说,结构的抗侧刚度是由中心支撑(主要)和钢框架(次要)两部分组成,适用于叠加原理,即

$$K_5 = K_2 + K_3 \quad (3)$$

$$Q_5 = Q_2 + Q_3 \quad (4)$$

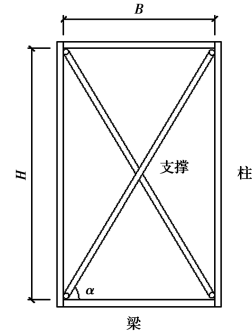


图 5 中心支撑等效模型示意图

Fig. 5 Equivalent model of concentrically braced frame

### 2.2 中心支撑等效模型设计

在设计中心支撑等效模型时,希望同时保证抗侧刚度和屈服承载力与原型四边连接加劲钢板剪力墙相等。

因为边缘构件(即钢梁和钢柱)的尺寸以及轴线的间距均已经确定,则  $\alpha$ 、 $H$  已经确定,仅有参数  $A$  是可变的,所以,理论上讲,无法同时满足模型的刚度和承载力与原型四边连接钢板剪力墙相等。基于此,有必要在初始抗侧刚度和承载力等效之间进行取舍和优化,考虑到应该优先保证等效模型的动力特性,如周期等,与原型结构相同,所以首先保证刚度等效,等效计算结果见表 3。

表 3 等效支撑面积及误差

Table 3 Size of concentrically braced frames equivalent model and errors

支撑面积 $A/mm^2$	纯框架刚度 $K_2/(kN \cdot mm^{-1})$	支撑刚度 $K_3/(kN \cdot mm^{-1})$	整体刚度 $K_5/(kN \cdot mm^{-1})$	刚度 误差/%	纯框架承 载力 $Q_2/kN$	支撑承载力 $Q_3/kN$	整体承载力 $Q_5/kN$	承载力 误差/%	原型钢板 厚度/mm
6 823	22.5	179.6	202.1	0	588.9	2 044.5	2 633.3	15.1	6
7 628	22.5	200.8	223.3	0	588.9	2 285.8	2 874.7	3.6	8
8 502	22.5	223.8	246.3	0	588.9	2 547.6	3 136.5	1.1	10

计算结果表明,刚度误差为 0,即等效支撑的抗侧刚度与原四边连接钢板剪力墙刚度完全相等,但是承载力误差最高达到 15.1%,存在一定的误差。

## 3 等效模型 2—I 形钢板剪力墙受力分析

### 3.1 I 形钢板剪力墙初始刚度和屈服承载力

文献[13]中对 I 形防屈曲钢板剪力墙破坏机理

和抗震性能进行了深入的理论分析和试验研究,参照文献[13]中 I 形钢板剪力墙,采用如图 6 所示的钢板剪力墙,即仅有上下两边与钢梁焊接,左右两侧与钢柱没有连接。

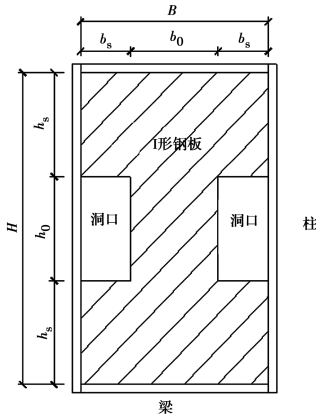


图 6 I 形钢板剪力墙示意图

Fig. 6 Details of I shape SPSW

I 形钢板的总高度和总宽度分别为  $H$  和  $B$ , 分别为 2 800、1 400 mm, 洞口的高度为  $h_0$ , 宽度为  $b_s$ , 钢板厚度为  $t$ 。

对采用的钢板剪力墙作以下说明。

1) 有限元模拟过程中, 通过设置钢板剪力墙的面外约束  $U_z=0$ , 防止钢板发生面外变形。

2) 钢板剪力墙高宽比为 2, 属于剪跨比较大的钢板剪力墙, 水平力作用下, 钢板的剪切变形和弯曲变形均需要考虑。

I 形钢板剪力墙初始刚度

$$K_6 = \frac{E \cdot t}{2.6 \frac{H}{\beta_b \cdot b_0} + \left(\frac{H}{\beta_b \cdot b_0}\right)^3} \quad (5)$$

$$\beta_b = 1.053 + 4 \frac{h_s \cdot b_s}{H \cdot b_0} \quad (6)$$

式中:  $\beta_b$  指相对于两边连接矩形钢板而言 I 形钢板剪力墙端部增加面积的参数。

钢板剪力墙屈服时剪力

$$Q_6 = \frac{M_p \cdot Q_p}{\sqrt{Q_p^2 \cdot H_y^2 + M_p^2}} \quad (7)$$

$Q_p$  和  $M_p$  分别为纯剪切屈服剪力和屈服弯矩,  $H_y$  是屈服线距离钢板中部的距离。

$$Q_p = b \cdot t \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$M_p = \frac{t \cdot b_0^2}{4} \cdot f_y \quad (9)$$

$$H_y = 0.88 \left( \frac{H}{2} - h_s \right) \quad (10)$$

I 形钢板剪力墙的简化骨架曲线如图 7 所示。

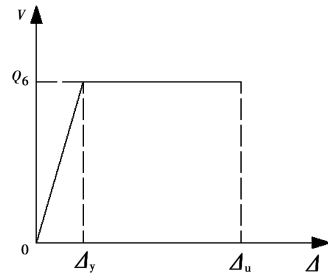


图 7 I 形钢板剪力墙骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve of I SPSW

由图 7 可以发现, 当钢板的总高度  $H$  和总宽度  $B$  不发生改变时, I 形防屈曲钢板剪力墙的初始刚度和承载力是由窗洞的高度  $h_0$ 、宽度  $b_0$  以及厚度  $t$  这 3 个参数共同决定的。

对于两边连接的钢板剪力墙, 结构的抗侧刚度也可看成由钢板剪力墙(主要)和钢框架(次要)两部分组成, 同样适用于叠加原理, 即

$$K_7 = K_2 + K_6 \quad (11)$$

$$Q_7 = Q_2 + Q_6 \quad (12)$$

### 3.2 I 形钢板剪力墙等效尺寸

为了避免钢板太薄被焊穿, 建议钢板剪力墙的最小厚度为 10 mm, 这样 1/8 缩尺比例的振动台试验模型中钢板厚度仍可以达到 1.25 mm, 基本可以满足施工要求。

表 2 中给出了原型结构 3 种厚度尺寸钢板剪力墙的初始刚度  $K_1$  和极限承载力  $Q_1$  的计算结果, 将计算结果带入到式(11)和式(12), 并考虑最小厚度的要求, 取厚度  $t$  为 16 mm 进行试算, 该问题转化为求解式(11)和式(12)对应的二元高次方程组, 经计算发现, 该问题在实数域中没有数值解, 即不能同时精确满足初始抗侧刚度和承载力等效, 但是可以得到近似的解, 保证刚度和承载力均有较好的精度。表 4 给出了 I 形钢板剪力墙等效模型的尺寸、初始刚度和极限承载力。

从表 4 看出, 通过改变开洞口的尺寸会引起初始刚度和承载力的变化, 相比于表 2 中结果, 不仅刚度的误差均控制在 4% 以内, 同时承载力误差均可以控制在 8% 以内, 与中心支撑的方案相比较, 该方案同时考虑了刚度和承载力, 更加合理。

表 4 I 形钢板剪力墙等效模型尺寸及误差

Table 4 Size of I SPSWequivalent model and errors

等效厚度 $t'/\text{mm}$	窗洞高度 $h_0/\text{mm}$	窗洞宽度 $b_s/\text{mm}$	整体刚度 $K_7/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	刚度 误差/%	极限承载力 $Q_7/\text{kN}$	承载力 误差/%	原型钢板 厚度 $t/\text{mm}$
16	1 960	170	204.4	1.1	2 336.7	2.1	6
20	1 980	200	229.3	2.7	2 600.9	-6.2	8
23	2 000	205	255.3	3.6	2 924.3	-8.0	10

### 4 两种钢板剪力墙等效模型耗能能力对比

限于文章篇幅,仅给出原型结构中 6 mm 厚的原型钢板剪力墙及其等效模型对应的分析结果。图 8、9、图 10 分别为模拟分析得到的滞回曲线、骨架曲线和刚度退化曲线,表 5 是屈服后加载级的能量耗散系数。

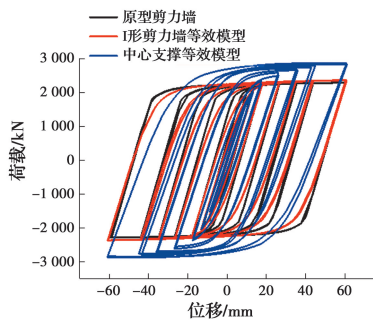


图 8 滞回曲线对比

Fig. 8 Hysteresis curves

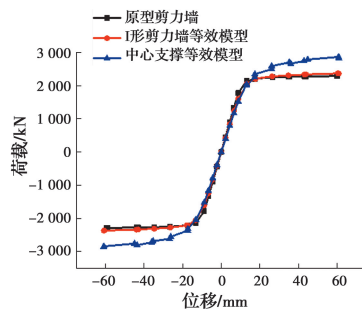


图 9 骨架曲线对比

Fig. 9 Skeleton curve

表 5 能量耗散系数

Table 5 Energy dissipation coefficient

结构类别	加载级	加载级	加载级	加载级
	$3\Delta_y$	$4\Delta_y$	$5\Delta_y$	$6\Delta_y$
原型钢板剪力墙	2.13	2.57	2.77	3.11
I形剪力墙等效模型	1.86	2.37	2.65	2.95
中心支撑等效模型	1.48	2.12	2.29	2.63

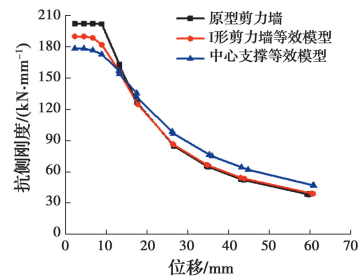


图 10 刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves

由此可见:

1)从滞回曲线来看,原型四边连接和 I 形钢板剪力墙模型的滞回曲线几乎重合,均十分饱满、稳定,中心支撑的滞回面积更大,主要是因为承载力较高;从能量耗散系数看,I 形钢板剪力墙等效模型与原型误差更小,如当加载级为  $6\Delta_y$  时,两个等效模型的能量耗散系数分别为 2.95 和 2.63,与原型的误差为 5.1%和 15.4%,表明 I 形钢板剪力墙等效模型滞回曲线的形状与原型结构更加接近。

2)从承载力来看,图 10 中 I 形钢板模型的承载力与原型结构承载力很接近,在加载级达到  $6\Delta_y$  ( $61\text{ mm}$ )时,中心支撑模型的承载力为 2 870 kN,较原型结构高出 21.7%,误差较大,而 I 形钢板模型承载力为 2 371 kN,仅高出 3.5%。从抗侧刚度来看,图 11 中两个模型的初始抗侧刚度均略小于原型的刚度,但是误差并不大,均在 7%以内,随着位移增加,结构进入弹塑性阶段,刚度出现降低,3 条曲线的下降趋势一致,最终的抗侧刚度大小也接近。表明对于抗侧刚度两个等效模型均可以保证原型钢板剪力墙很接近,但是对于承载力,中心支撑模型无法同时保证与原型结构近似,有一定误差。

综上所述,I 形钢板剪力墙等效模型与原型结构的抗震性能(初始抗侧刚度、极限承载力和滞回面积等)更接近。

## 5 等效替代方案评估及设计流程

在中心支撑等效方案中,因为缩尺模型中框架的尺寸以及轴线的距离无法改变,所以仅改变中心支撑面积理论上无法同时满足抗侧刚度和承载力等效,计算结果也表明,在满足抗侧刚度等效的情况下,承载力的误差较大。

在 I 形防屈曲钢板剪力墙方案中,虽然框架尺寸已经确定,但是可以通过改变多个参数,如钢板厚度、开洞尺寸等,来近似满足刚度和承载力的等效,因此 I 形防屈曲钢板剪力墙更加适合进行等效设计。

图 11 给出了钢板剪力墙等效替代方案的设计流程,主要分两项工作:1)利用有限元软件或参考相关理论,确定原型钢板剪力墙的抗震性能,如骨架特性等;2)根据中心支撑或 I 形钢板剪力墙的刚度和承载力计算方法,经过迭代计算确定支撑的截面面积或者 I 形钢板的开洞尺寸和钢板厚度,使得刚度和承载力的误差小于预期值。

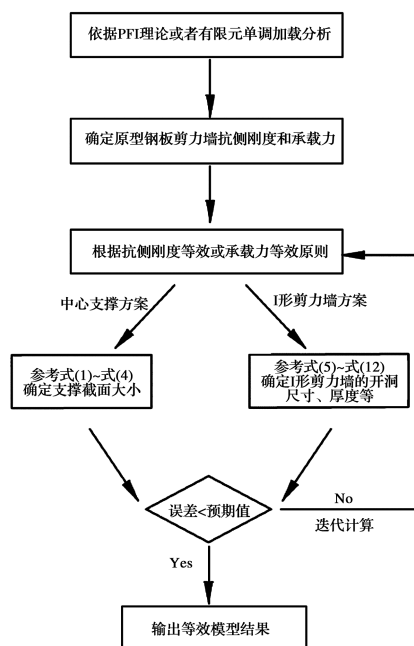


图 11 等效替代方案设计流程

Fig. 11 Design process of equivalent alternatives

## 6 结论

通过对原型结构钢板剪力墙及其等效模型在单调加载和低周往复加载工况下的有限元模拟分析,得到以下结论:

1)提出的两种钢板剪力墙等效模型在初始刚度或承载能力方面均能满足原型结构设计要求,具有良好的耗能能力。

2)中心支撑等效模型可以满足与原型结构的初始抗侧刚度或承载能力相等。I 形钢板剪力墙等效模型具有多参数控制的优势,可以同时满足初始抗侧刚度、承载力以及耗能能力等效要求,更加适合于钢板剪力墙振动台试验。

3)钢板剪力墙在振动台试验中等效替代模型可参考等效方案设计流程。

### 参考文献:

- [1] 聂建国,朱力,樊健生,等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(1), 34: 61-69.  
NIE J G, ZHU L, FAN J S, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2013,34(1), 34: 61-69. (in Chinese)
- [2] SAHEBJAM A, SHOWKATI H. Experimental study on the cyclic behavior of perforated CFRP strengthened steel shear walls [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 365-379.
- [3] 于敬海,张雪涛,郑达辉,等. 方钢管混凝土组合异形柱框架-钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(Sup2): 38-45.  
YU J H, ZHANG X T, ZHENG D H, et al. Experimental study of the seismic behavior of the frame composed of special-shaped concrete-filled square steel tube columns and steel plate shear walls [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (Sup2): 38-45. (in Chinese)
- [4] WANG M, YANG W G, SHI Y J, et al. Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107: 194-210.
- [5] YU J G, FENG X T, LI B, et al. Performance of steel plate shear walls with axially loaded vertical boundary elements [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 125: 152-163.
- [6] 赵均海,胡壹,张冬芳. 装配式复式钢管混凝土框架-梁端连接钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程

- 学报, 2020, 53(5): 78-88.
- ZHAO J H, HU Y, ZHANG D F. Experimental investigation on seismic performance of assembly CFDST frame with beam-connected steel plate shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53 (5): 78-88. (in Chinese)
- [7] 于金光, 刘利明, 郝际平. 部分组合框架-钢板剪力墙边框柱设计方法研究[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 98-110.
- YU J G, LIU L M, HAO J P. Study on design method of vertical boundary element of partially encased composite frame-steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37 (2): 98-110. (in Chinese)
- [8] XUE M, LU L W. Interaction of infilled steel shear wall panels with surrounding frame members [C]// Proceedings of Structural Stability Research Council Annual Technical Session, Bethlehem, PA, 1994: 339-354.
- [9] SHEKASTEBAND B, AZARAXSH A A, SHOWKATI H. Experimental seismic study on shear walls with fully-connected and beam-only-connected web plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141: 204-215.
- [10] 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): 33-41.
- LI G Q, LIU W Y, LU Y, et al. Stressing mechanism and equivalent brace model for buckling restrained steel plate shear wall with two-sided connections [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4): 33-41. (in Chinese)
- [11] 张增德, 王静峰, 龚旭东, 等. 两边连接钢板剪力墙-装配式钢管混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(7): 38-47.
- ZHANG Z D, WANG J F, GONG X D, et al. Study on seismic performance of prefabricated CFST frames with beam-only-connected SPSWs [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52 (7): 38-47. (in Chinese)
- [12] 赵秋红, 邱静, 郝博超, 等. 两边连接竖向波纹钢板剪力墙的抗侧性能[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(Sup2): 46-53.
- ZHAO Q H, QIU J, HAO B C, et al. Lateral behavior of vertically-corrugated steel plate shear walls connected with beams only [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (Sup2): 46-53. (in Chinese)
- [13] 陆焯. 大高宽比屈曲约束组合墙钢框架束柱体系性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- LU Y. Research on the steel frame of bound-column system with buckling restrained steel plate shear wall in large aspect ratio [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [14] 沈金, 干钢, 童根树. 钢板剪力墙设计与施工的工程实例[J]. 建筑结构, 2013, 43(15): 19-22.
- SHEN J, GAN G, TONG G S. Practical application of design and construction of steel shear walls [J]. Building Structure, 2013, 43(15): 19-22. (in Chinese)
- [15] 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): 46-51.
- LU J Y, FAN S G, YAN L N, et al. Simplified elasto-plastic analytical model for stiffened steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(2): 46-51. (in Chinese)
- [16] SABOURI-GHOMI S, VENTURA C E, KHARRAZI M H. Shear analysis and design of ductile steel plate walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(6): 878-889.
- [17] 金双双, 欧进萍. 钢板剪力墙钢板与框架相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(Sup1): 283-287.
- JIN S S, OU J P. Characteristics of the wall-frame interaction in steel plate shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (Sup1): 283-287. (in Chinese)

(编辑 胡玲)