

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.008

## 带缝钢板剪力墙弹塑性简化分析模型

陆金钰, 范圣刚, 闫鲁南, 王恒华

(东南大学 混凝土与预应力混凝土教育部重点实验室; 国家预应力工程技术研究中心, 南京 210096)

**摘要:** 基于带缝钢板剪力墙的基本受力特点和变形特征, 提出了一种弹塑性简化分析模型, 并分别定义了模型的几何参数与非线性参数。为验证简化模型的正确性, 分别对带缝钢板剪力墙以及钢框架-带缝钢板剪力墙结构进行 Pushover 分析。分析结果表明: 简化模型计算得到的荷载-位移曲线与试验及有限元分析结果较为接近, 可反映带缝钢板剪力墙的主要受力特征; 简化模型可较为准确地反映协同工作时墙板对周边框架的附加作用力。

**关键词:** 钢板剪力墙; 开缝; 弹塑性; 简化模型; pushover 分析

**中图分类号:** TU391; TU392.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)02-0046-06

## Simplified Elasto-Plastic Analytical Model for Stiffened Steel Plate Shear Wall with Slits

Lu Jinyu, Fan Shenggang, Yan Lunan, Wang Henghua

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education;  
National Prestress Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** Based on the mechanism of steel slit wall, a simplified elasto-plastic analytical model which allows for nonlinear dynamic and static analysis was proposed. The parameters of simplified model related to configuration and nonlinear behavior were defined. In order to validate the simplified model, the pushover analysis of steel slit wall and a frame with steel slit wall were conducted. The results show that the load-displacement curves obtained from simplified models, experiments and FEM are similar. The proposed model can fully represent the mechanism of steel slit wall, and it can correctly predict the internal forces and deformations of each member in the model.

**Key words:** steel plate shear wall; slitting; elasto-plasticity; simplified model; pushover analysis

带缝钢板剪力墙制作安装方便, 抗震性能优良, 经合理设计后可同时具备高延性、高耗能能力, 应用前景良好。为推进其应用, 国内外学者进行了一系列试验及有限元研究, 分析了各种参数对墙板承载力、刚度、延性、耗能能力及稳定性能的影响, 获得了许多有益的成果<sup>[1-7]</sup>。但因目前的常规设计软件难以实现墙板的直接建模, 无法考虑壳单元的材料非线性, 在分析嵌有带缝钢板剪力墙的结构时存在困

难, 一定程度上阻碍了该抗震组件的设计分析与工程应用。

带缝钢板剪力墙的几何模型如图 1 所示, 由开缝钢板和两侧边缘加劲肋组成。实际应用中, 可通过调整缝间墙肢宽度  $b$ 、高度  $l$  及  $m$  等开缝参数来满足工程中对刚度及承载力的不同要求; 钢板采用激光切割机开缝以减小残余应力和残余变形, 为减小应力集中, 竖缝端部采用圆弧过渡<sup>[1,8]</sup>。图 2(a)

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51008065, 51178098); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2012200, BY2009151)

作者简介: 陆金钰(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢结构、空间结构研究, (E-mail) davidjingyu@gmail.com。

给出了整块墙板在侧向荷载作用下的变形,图2(b)则显示了其中一根缝间墙肢的变形。侧向荷载作用下,墙板以缝间墙肢的弯曲变形为主,各缝间墙肢的变形类似于底端固支、顶端为滑移支座的双曲率梁段;且试验结果显示,当某层的缝间墙肢均在端部形成塑性铰时,墙板达到极限状态,相应的承载力为极限承载力<sup>[1]</sup>。

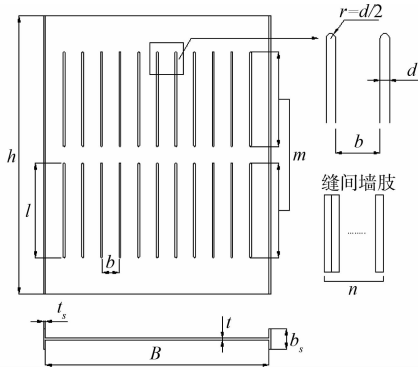


图1 带缝钢板剪力墙的几何模型

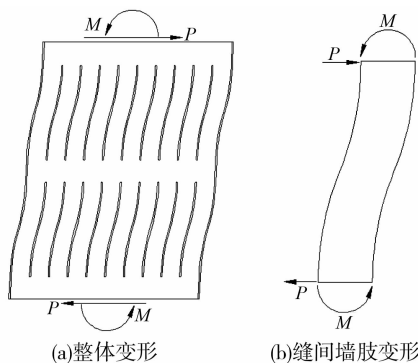


图2 带缝钢板剪力墙在侧向荷载作用下的变形

为方便带缝钢板剪力墙结构的整体分析,文献[2]基于刚度等效原则,提出了等效交叉支撑模型。文献[9]、[10]同样基于刚度等效原则,提出采用人字形支撑和“两斜支撑杆加两竖杆”替代钢板剪力墙进行整体分析的观点。文献[11]采用交叉支撑替代带缝钢板墙进行受力分析,在等效过程中同时考虑了刚度等效和承载力等效。文献[12]基于刚度和承载力等效原则,提出采用非线性弹簧替代墙板进行受力分析的简化模型。

上述简化模型均基于刚度或刚度/承载力等效原则,由墙板处于理想刚性边界条件下的刚度和承载力换算得来。但文献[3]指出,实际结构中墙板与上下框架梁相连,边界条件并非理想刚性,且这种边界条件变化对墙板刚度的影响在绝大多数情况下是不可忽略的。这说明仅由理想刚性边界条件下的刚度和承载力换算得到的简化模型的分析结果与实际

结构有可能不符。另外,实际结构中带缝钢板剪力墙与周边框架协同受力,会对上下横梁产生附加剪力作用,而采用基于刚度等效的支撑模型代替墙板,往往无法准确给出墙板对横梁的附加剪力,易造成对框架的不安全设计<sup>[13]</sup>。因此有必要研究更精确的简化模型。

笔者提出一种带缝钢板剪力墙的弹塑性简化分析模型,该模型基于墙板的基本受力特点和变形特征,无须对墙板的刚度和承载力进行等效换算。与试验及有限元分析结果的对比表明,该简化模型不仅能够全面反映墙板的主要受力特征,而且可以较为准确地给出墙板对框架横梁的附加作用力,以用于此类结构的整体分析。

## 1 简化分析模型几何参数定义

带缝钢板剪力墙受到侧向荷载作用时,缝间墙肢的变形与一系列底端固支、顶端滑移支座的受弯构件相似,于是采用图3所示的壁式框架模型替代带缝钢板剪力墙进行受力分析。壁式框架简化模型各部分的几何参数定义如下:

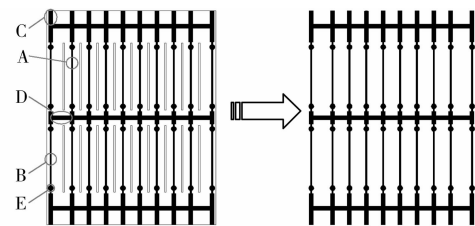


图3 带缝钢板剪力墙壁式框架简化模型

A区:采用框架单元(或 beam 单元)模拟带缝钢板剪力墙的缝间墙肢。该单元长度取  $l$ ,横截面取  $t \times b$ ,同时考虑单元的弯曲变形、剪切变形和轴向变形;

B区:采用梁单元模拟带缝钢板剪力墙最外侧的墙肢。在建模时与A区唯一的区别是框架单元采用“T”形截面,以计入墙板侧边加劲肋的影响,考虑加劲肋影响效应后对墙板刚度和承载力的估算精度更高<sup>[3,14]</sup>;

C、D区:采用梁单元共同模拟缝间墙肢顶部、底部及中部的非开缝板带区域(简称“板带区”)。C区用于模拟板带区在侧向荷载作用下的剪切变形及其在竖向荷载下的轴向变形,因板带区的高宽比很小,侧向荷载下以剪切变形为主,弯曲变形所占比例很小,故在简化模型中忽略板带区水平荷载下的弯曲变形,仅考虑剪切变形。D区用于模拟板带区在水平荷载下的轴向变形及其在竖向荷载下的剪切变形、弯曲变形。需要指出的是,简化模型考虑了板带

区在竖向荷载下的弯曲变形,这是因为虽然板带区高宽比较小,在水平荷载下以剪切变形为主,但在竖向荷载下仍是以弯曲变形为主,故简化模型在计算板带区竖向荷载作用下的变形时,同时考虑了弯曲变形和剪切变形;

E 区为塑性铰,位于模拟缝间墙肢的各框架单元两端。简化模型以塑性铰来模拟墙板的材料非线性,这对于带缝钢板剪力墙是合适的,试验和有限元研究均表明,对于实现了屈曲前屈服的带缝钢板剪力墙,可以在缝间墙肢端部形成塑性铰,且基本上仅在该位置进入塑性<sup>[1,14]</sup>。

## 2 简化分析模型非线性参数定义

简化模型通过在 A、B 框架单元端部设置塑性铰来模拟墙板的材料非线性,故塑性铰非线性参数的定义对简化模型模拟墙板非线性行为的准确性至关重要。本文对墙板整体非线性行为的定义基于 FEMA 356 规程,图 4 是用于结构(或构件)建模的广义力-位移关系曲线<sup>[15]</sup>。

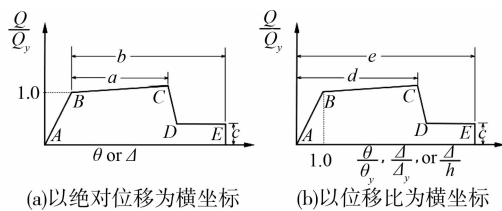


图 4 构件的广义力-位移关系曲线

图 4 中 A 点(未加载)至 B 点(屈服点)的直线段代表结构的线(弹)性行为;BC 段斜率取 AB 段斜率的 0~10%,以考虑材料应变硬化等因素造成的承载力上升;C 点纵坐标表示构件的极限承载力,横坐标表示开始出现严重承载力下降(即 CD 段)时的变形;D 点对应构件的残余强度,E 点表示构件失效,E 点后构件强度降为 0<sup>[15]</sup>。FEMA 356 规程指出,若建模时设定的 CD 段斜率过大(即承载力下降速度过快)则易导致计算不收敛等,为避免该情况,建模时可适当减小 CD 段的斜率。对于带缝钢板剪力墙,A 点取原点,表示未加载点;B 点表示墙肢出现塑性铰的点,该点对应的缝间墙肢弯矩  $M_E$  和侧移  $\delta_y$  分别为:

$$M_E = \sigma_y \cdot Z \quad (1)$$

$$\delta_y = Q_y / K_0 \quad (2)$$

式中: $\sigma_y$  为钢材屈服强度; $Z$  为缝间墙肢的塑性截面模量; $Q_y$  为屈服承载力; $K_0$  为墙板初始刚度。当墙板弯曲在平面内变形时,B 点的值在定义了塑性铰

后,可通过程序计算自动得到,但因带缝钢板剪力墙在侧向荷载作用下,并非完全在平面内变形,少量的面外变形虽不足以引起墙板的极值点失稳,但仍能使墙板的屈服承载力降低<sup>[16]</sup>,为考虑此种影响,简化模型中将 B 点对应的纵坐标取屈服强度  $Q_y$  的 0.9 倍<sup>[14]</sup>;

C 点的纵坐标表示结构的极限承载力,横坐标表示结构出现严重承载力下降时的变形,因 C 点对应的纵横坐标值随墙板参数的变化而改变,并不唯一,故为简化,分析时可偏于保守地取取值:1) 分析表明,对于实现了屈曲前屈服的墙板,极限承载力均可达到按各缝间墙肢端部形成塑性铰计算的塑性屈服强度,故 C 点纵坐标可偏于保守地取塑性屈服承载力  $Q_y$  的 1.0 倍<sup>[1-3]</sup>;2) Hitaka<sup>[2]</sup> 对带缝钢板剪力墙循环往复荷载下的滞回性能进行了大量试验,以及有限元分析<sup>[14]</sup> 表明实现屈曲前屈服的墙板极限位移角均大于 3%,故 C 点的横坐标可偏于保守地取 3%<sup>[1-3]</sup>;

D 点对应墙板残余强度,简化模型中取屈服承载力的 0.2 倍,试验数据<sup>[1-2]</sup> 表明,对于实现了屈曲前屈服的带缝钢板剪力墙在 4% 侧移角后出现较为明显的承载力下降现象,为此本模型取 D 点横坐标为 4%,该值同时可避免因 CD 端的斜率过大而造成数值计算的不收敛;E 点对应结构完全失效,该点的纵坐标与 D 相同,根据 Hitaka<sup>[1-2]</sup> 及 Cortés<sup>[3]</sup> 的试验数据,D 点横坐标取 4.5%。

定义墙板整体的非线性参数后,需将其转化为缝间墙肢端部塑性铰的非线性参数,这可通过墙板整体变形与缝间墙肢变形间的协调关系得到。因模拟墙板非开缝板带区域的半刚域杆件在侧向荷载下,仅发生剪切变形,变形幅值与开缝区域相比小很多,基本可忽略,故可假定侧向荷载作用下,墙板的侧向变形完全集中在开缝区域;另由于非开缝板带区的协调作用,各缝间墙肢的变形可视为基本相同。故可用式(3)表示墙板整体侧移角与缝间墙肢弦转角之间的转化关系:

$$\theta_{\text{link}} = \left( \frac{h}{ml} \right) \theta \quad (3)$$

式中: $\theta$  为墙板侧移角; $\theta_{\text{link}}$  为缝间墙肢的转角; $h$  为墙板总高度; $ml$  为缝间墙肢总高度。

本文提出的简化分析模型是基于带缝钢板剪力墙实现屈曲前屈服这一基本假定的,与墙板高厚比、缝间墙肢高宽比、开缝层数等诸多开缝参数有关,文献[14]通过大量的数值分析得出了开缝参数建议取值范围。

### 3 简化分析模型正确性验证

为验证简化模型的正确性,选取文献[1]的 A102 试件和文献[17]的 F100W102 试件进行模型验证。两试件所用钢板剪力墙的整体尺寸均为  $800\text{ mm} \times 800\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$ ,不同的是前者的钢板墙处于理想刚性边界条件下,而后者的钢板墙则置于框架结构中。选用上述 2 试件进行模型验证是为了验证壁式框架简化模型在不同边界条件下的适用性,所用试件的几何参数如表 1 所示。

表 1 试件的几何参数

模型	$b$	$l$	$m$	$b_s$	$t_s$	梁、柱截面
A102	42	235	2	50	4.5	
F100W102	42	235	2	50	4.5	$100 \times 100 \times 6 \times 8$

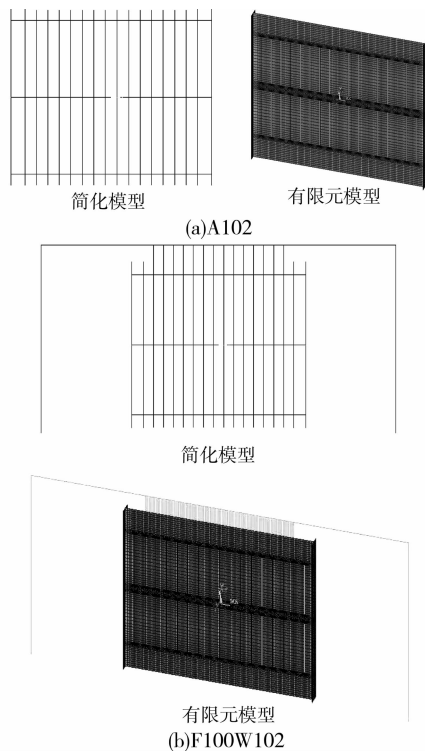


图 5 带缝钢板剪力墙模型

图 5 给出了 2 试件在 Sap2000 软件建立的壁式框架简化模型以及在 Ansys 软件中采用 shell181 和 beam188 单元建立的有限元模型。值得注意的是,对于 F100W102 试件,为了保证框架与墙板几何位置的正确性,采用刚臂连接,刚臂连接部分为墙板上边界被高强螺栓有效摩擦面覆盖的范围。

图 6 给出了不同模型间荷载-位移曲线的比较,分别比较了试验实测数据、Ansys 有限元模型及壁式框架简化模型计算所得的数据。从图中可以看出,对于各试件,精细的有限元模型均能与试验结果

较好地吻合,采用壁式框架简化模型得到的荷载-位移曲线与试验的吻合程度虽不如有限元模型,但仍能较好地反映结构受力反应的主要特征,总体来讲吻合程度较高。简化模型分析表明,极限状态下 2 试件均在缝间墙肢形成了塑性铰,这与文献[1,17]的试验现象是一致的。

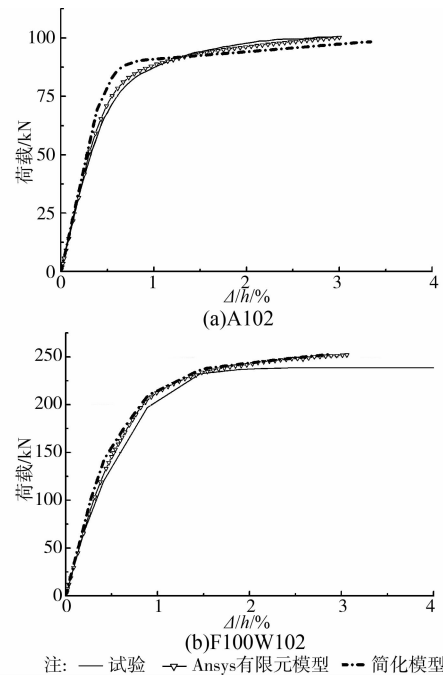


图 6 荷载-位移曲线的比较

表 2 与表 3 给出了不同试件有限元模型、壁式框架简化模型计算得到的初始刚度、极限承载力与试验实测值的比较,从表中数据可看出,壁式框架模型分析所得的数据可以与试验结果较好吻合,初始刚度及极限承载力误差均在 10% 之内。

表 2 初始刚度对比

模型	$K_{Exp}/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$K_{FEM}/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$K_{SM}/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$K_{FEM}/K_{Exp}$	$K_{SM}/K_{Exp}$
A102	28	27.8	26.3	0.993	0.940
F100W12	39.2	26.3	43	1.015	1.096

表 3 承载力对比

模型	$Q_{Exp}/\text{kN}$	$Q_{FEM}/\text{kN}$	$Q_{SM}$	$Q_{FEM}/Q_{Exp}$	$Q_{SM}/Q_{Exp}$
A102	98	100.2	95.5	1.002	0.953
F100W12	236	242.2	246.7	1.026	1.045

注:对于荷载-位移曲线无下降段的试件,极限承载力取 2% 侧移角内的最大值。

为考察简化模型可否反映协同受力时墙板对框架的附加作用,图 7~8 给出了 F100W102 试件弹性及弹塑性阶段钢框架结构的弯矩图。Ansys 有限元

模型可较为真实地反映试件的受力特征,故此处将壁式框架简化模型的计算结果与有限元模型的计算结果加以对比,因框架梁与墙板相连的部分弯矩图形状过于复杂,且弯矩幅值均较小,故在图中将该部分的弯矩图略去。

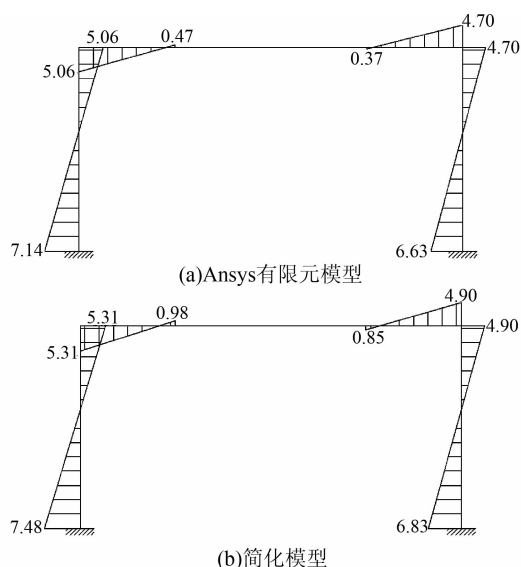


图 7 1/500 侧移角下框架结构弯矩图的比较 (kN·m)

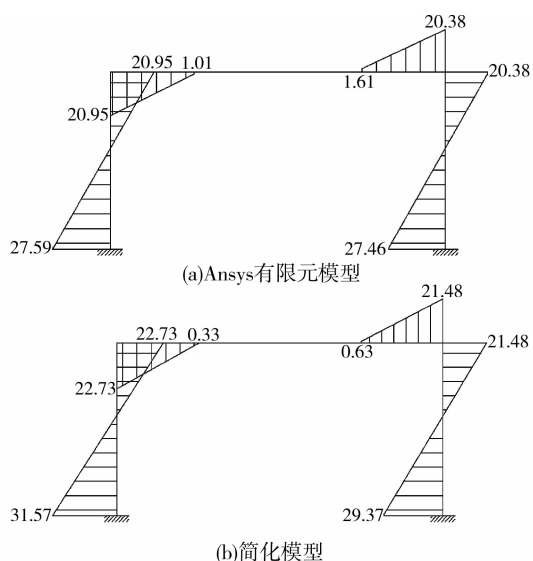


图 8 1/100 侧移角下框架结构弯矩图的比较 (kN·m)

Ansys 有限元模型与壁式框架简化模型的计算结果总体上较为接近,框架梁、柱各控制截面处的弯矩误差均处于 5% 内,同时由弯矩图可以推知,采用有限元模型与壁式框架简化模型计算出的框架结构剪力图也非常接近,这表明壁式框架模型可以较为准确地反映出钢板剪力墙对周边框架的附加剪力。另外,从图中可以看出,壁式框架简化模型计算得到的梁端弯矩均略大于有限元模型分析结果,这是因为壁式框架模型在受力分析时忽略了墙板面外变形对

面内刚度的削弱,这导致墙板在受力过程中对框架梁的附加剪力大于有限元模型,但因为实现了屈曲前屈服的墙板受力过程中的面外变形幅值较小,故简化模型与有限元模型的计算结果相处并不大,这表明了壁式框架简化模型可以用于考虑墙板与周边框架相互作用的结构分析中,且结果偏于保守。

## 4 结 论

基于带缝钢板剪力墙的基本受力特点和变形特征,提出了一种适用于该类墙板的弹塑性简化分析模型,运用带塑性铰的壁式框架模型替代开缝墙板。并给出了模型中各构件的截面、刚度、几何参数及非线性参数的定义。最后,基于简化模型分别对带缝钢板剪力墙以及框架-带缝钢板剪力墙结构进行 Pushover 分析,并将计算结果与已有试验和有限元结果进行了对比,得出以下主要结论:

1) 对于实现了屈曲前屈服的带缝钢板剪力墙,该壁式框架简化模型可较为准确地反映出其主要受力特点。分析结果表明,采用壁式框架模型代替带缝钢板剪力墙有限元模型进行弹塑性分析时引起的初始刚度和极限承载力误差均在 10% 之内。

2) 该简化模型可较为准确地分析出协同工作时墙板对与之相连框架横梁的附加剪力,框架控制截面处弯矩计算误差在 5% 以内,表明进行框架-带缝钢板剪力墙结构整体弹塑性分析时具有较高的精度,且简单实用。

## 参考文献:

- [1] Hitaka T, Mmtsui C. Experimental study on steel shear wall with slits [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 586-595.
- [2] Hitaka T, Matsui C, Sakai J. Cyclic tests on steel and concrete-filled tube frames with slit walls [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(6): 707-727.
- [3] Cottés G, Liu J. Experimental evaluation of steel slit panel-frames for seismic resistance [J]. Journal of Construction Steel Research, 2010, 67(2): 181-191.
- [4] 赵作周,肖明,钱稼如,等. 开缝钢板墙抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(12): 105-109. Zhao Z Z, Xiao M, Qian J R, et al. Experimental study on seismic behavior of steel plate shear walls with vertical slits [J]. Building Structure, 2007, 37(12): 105-109.
- [5] 曹春华,郝际平,王迎春,等. 开缝薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2008, 40(1): 46-52.

- Cao C H, Hao J P, Wang Y C, et al. Cyclic test of thin steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1):46-52.
- [6] 钟玉柏, 张素梅, 马欣伯. 四边简支开缝钢板剪力墙抗剪静力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2054-2059.
- Zhong Y B, Zhang S M, Ma X B. Research of shear resistance static behaviors of steel-plate shear walls with slits [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2054-2059.
- [7] 闫鲁南, 陆金钰, 王恒华. 带缝钢板剪力墙弹性屈曲性能研究[C]//第20届全国结构工程学术会议, 宁波, 2011:401-408.
- Yan L N, Lu J Y, Wang H H. Elastic buckling behavior of steel plate shear wall with slits [C]//The 20th National Conference on Structural Engineering, Ningbo, 2011:401-408.
- [8] 陈勇豪. 开缝钢板剪力墙试验研究及理论分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [9] 杜江洪. 带缝钢板剪力墙与中心支撑抗侧刚度替代换算分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
- [10] 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): 115-120.
- Jiang L, Chen Y Y, Wang W D. Research on elastic lateral stiffness and simplified model of steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 115-120.
- [11] 贺旻斐, 蒲康国, 金华建, 等. 开缝钢板墙简化模型研究[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(4): 38-45.
- He M F, Pu K G, Jin H J, et al. Research on simplified model for steel plate wall with slits [J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(4): 38-45.
- [12] 赵作周, 肖明, 柯江华, 等. 开缝钢板墙及其在高层钢框架结构中应用试设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 9-15.
- Zhao Z Z, Xiao M, Ke J H, et al. Steel plate shear wall with vertical slips and its trial application in a high-rise steel frame building structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 9-15.
- [13] 童根树, 米旭峰. 钢框架内嵌带竖缝混凝土剪力墙的内力计算模型[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 39-46.
- Tong G S, Mi X F. Analytical model for steel frame-reinforced concrete infill slit wall system [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 39-46.
- [14] 闫鲁南. 带缝钢板剪力墙稳定性能及滞回性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [15] FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [16] Chen W F, Lui E M. Stability design of steel frames [M]. CRC Press, 1991.
- [17] Hitaka T, Matsui C, Tsudak K, et al. Elastic-plastic behavior of building steel frame with steel bearing wall with slits [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000, Auckland, New Zealand.

(编辑 胡玲)