

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0120-05

# 带填充墙的钢框架受力性能分析

邹 昀<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>2</sup>, 王 强<sup>3</sup>

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏, 无锡 214122; 2. 浙江大学浙空间结构研究中心, 浙江, 杭州 310027;

3. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

**摘 要:** 为了分析新型填充墙对钢框架结构抗震性能的影响, 利用大型非线性有限元软件 ABAQUS 对带填充墙钢框架进行了计算分析, 主要研究了填充墙钢框架体系在单调荷载、循环荷载作用下的受力性能。进一步对填充墙开洞大小、框架的高宽比对结构整体受力性能的影响进行了分析。研究表明: 在水平荷载作用下, 填充墙能够提高钢框架的刚度和承载力; 在循环荷载作用下, 结构整体的耗能性能较好。填充墙开洞大小和框架高宽比均对结构整体的承载力和滞回曲线有影响。与其他层相比, 底层洞口尺寸的改变对结构性能的影响更大。随着框架高宽比的减少, 结构的承载力随之提高, 延性性能有所下降。该文得到的结论对于指导工程设计具有重要的参考价值。

**关键词:** 带砌体填充墙钢框架; 抗震性能; 有限元分析; 滞回曲线; 高宽比

**中图分类号:** TU398.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S012

## ANALYSIS ON MECHANICAL PERFORMANCE OF STEEL FRAME INFILLED WITH MASONRY PANEL

ZOU Yun<sup>1</sup>, ZHANG Peng-fei<sup>2</sup>, WANG Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Environment Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Spatial structure research center of Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027 China;

3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

**Abstract:** In order to study the influence of new filler wall on the seismic performance of a steel frame structure, the mechanical behavior under monotonic and cyclic loading is analyzed based on the NFEA software ABAQUS. Furthermore, the whole size of filler wall and aspect ratio are taken into consideration. The result shows that the filler wall can dramatically improve not only bearing capacity of the frame, as well as its stiffness under horizontal loading, but also its good energy dissipation ability under cyclic loading. In addition, the whole size and aspect ratio also have an influence on structural bearing capacity and hysteretic performance, that is, the whole size of ground floor has more impact on mechanical behavior than any other floor and increase in bearing capacity but decrease in ductility by a diminution in aspect ratio. The conclusion given by this study will have a great referential value for engineering design

**Key words:** steel frames infilled with masonry panel; dynamic characteristics; finite element analysis; hysteresis curve; height-to-span ratio

钢结构有“绿色建筑”之称, 具有轻质高强、抗震性能好、工业化程度高、施工速度快、绿色环

保和可持续发展的优点。近年来钢结构建筑得到了迅速发展, 特别是在住宅、办公和旅馆等建筑中的

收稿日期: 2012-06-02; 修改日期: 2012-12-31

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划子课题项目(2012BAJ16B05)

通讯作者: 邹 昀(1967—), 女, 安徽人, 教授, 博士, 主要从事高层抗震研究(E-mail: zouyun\_22@126.com).

作者简介: 张鹏飞(1990—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事空间结构研究(E-mail: zpfzjndx@126.com);

王 强(1971—), 男, 沈阳人, 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: wangqiangsy@163.com).

运用越来越广泛。其中,带填充墙的钢框架结构是多层、高层建筑中一种常用的结构形式。在传统的钢结构设计中,填充墙体被作为围护结构,不考虑其结构功能,不考虑各类砌体填充墙对框架抗侧力的贡献,然而在钢框架的实际受力过程中,由于砌体填充墙与框架的梁柱之间耦连作用,使填充墙框架结构的受力情况与纯框架的受力情况有较大差异。研究各组成部分之间的相互关系,探究围护体系对钢框架抗侧力性能及改善抗震性能的贡献,对钢结构住宅产业的发展有着重要意义<sup>[1-4]</sup>。

国内外一些学者<sup>[5-9]</sup>对带填充墙的钢框架进行了理论和试验研究。洗兰<sup>[10]</sup>利用 ANSYS 软件对二层钢框架进行了有限元分析,钢材的本构关系采用了考虑应变强化和带有下降段的三折线模型。对比分析了页岩模数多孔砖和蒸压粉煤灰砖,这两种类型的砌体填充墙对结构受力性能的影响;进一步以框架的跨高比、轴压比、填充墙与框架之间的连接方式为影响参数,分析了钢框架的荷载-位移曲线以及钢框架的应力分布规律。李捷<sup>[11]</sup>利用 ANSYS 软件研究了带型钢边框混凝土剪力墙的抗震性能,分析了型钢、轴压比、混凝土强度、配钢率等参数,对混凝土剪力墙抗震性能的影响。本文利用 ABAQUS 有限元软件,首先分析了带填充墙的钢框架单调加载下的荷载-位移曲线,在此基础上,进一步以墙体开洞尺寸以及框架高宽比为主要影响因素,分析了结构在循环荷载作用下的受力性能,通过滞回曲线系统地研究了结构在地震作用下的耗能能力。

## 1 有限元分析

### 1.1 模型建立

分析框架部采用单跨两层平面钢框架结构<sup>[5]</sup>。结构构件采用焊接工字形截面,柱的截面尺寸为 H250mm×200mm×8mm×12mm,梁的截面尺寸为 H300mm×120mm×6mm×12mm。模型尺寸和加载情况如图 1 所示。框架梁柱,材料均为 Q235B。模型采用两点水平加载,两个加载点的荷载比值是 1:1。

选用 ABAQUS 提供的三维八节点一阶缩减积分实体单元 C3D8R 模拟钢框架的梁、柱以及填充墙,钢框架模型和带填充墙的整体模型分别如图 2 和图 3 所示。采用 ABAQUS 提供的弹簧(Spring)单元模拟钢框架与填充墙之间的接触。在 ABAQUS 中弹簧的单元类型有 Spring1、Spring2、SpringA 三

种。其中, Spring1 用于结点和地面之间的连接; SpringA 用于连接两个结点,其变形沿着连接的两个节点的连线。本文选用 SpringA 弹簧单元模拟填充墙与钢框架梁柱之间的连接,选用 Spring1 单元用于模拟填充墙与基础的连接。

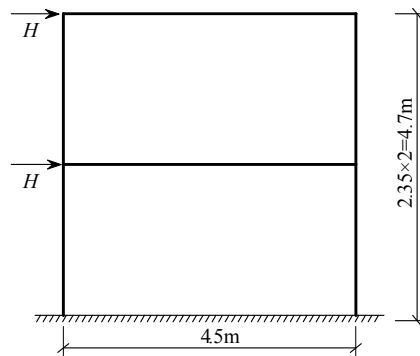


图 1 模型尺寸及加载情况

Fig.1 Model dimension and loaded condition

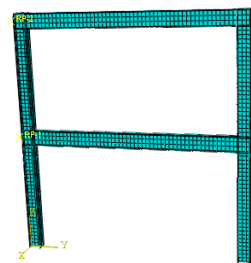


图 2 钢框架的有限元模型

Fig.2 Steel frame finite element analysis model

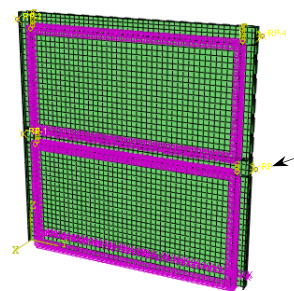


图 3 整体有限元模型

Fig.3 Whole frame finite element analysis model

### 1.2 结构的荷载-位移曲线和滞回曲线

基本试件(Base)在单调荷载作用下的荷载-位移曲线如图 4 所示。经过相关计算得到,在单调荷载作用下,当荷载  $P < 362\text{kN}$  时,基本试验件处于弹性阶段,当钢框架承受的荷载值达到  $362\text{kN}$ ,位移达到  $35.66\text{mm}$  后试件中的墙体开始出现裂纹,承载能力将下降,虽然墙体本身是脆性材料,但由于外有钢框架的约束,墙体在出现裂纹后仍然能够承担一定的承载力和刚度,承载力随着位移的增大而

增大。当基本试件位移达 67.13mm 时, 结构达到其极限承载力 402.8kN。整个框架进入了塑性阶段, 此后位移增大的同时, 框架的承载力开始下降。

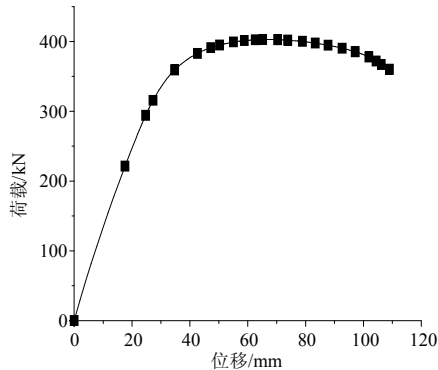


图4 基本试件的荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of Base specimen

结构在循环荷载作用下的滞回曲线呈弓形, 如图5所示。有明显捏缩响应, 这是由于在水平荷载作用下填充墙的剪切变形使滞回曲线发生了滑移, 并且随着荷载的增大滑移现象逐渐加剧。试件在循环荷载作用下完成了 $4\Delta_y$ 循环( $\Delta_y=10\text{mm}$ ), 滞回性能较好, 在进入 $-5\Delta_y$ 循环时, 由于墙体裂缝开展较大, 试件发生了破坏。

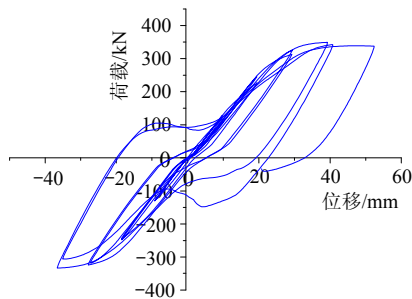


图5 基本试件的滞回曲线

Fig.5 Hysterisis curve of Base specimen

### 1.3 填充墙的受力分析

结构在循环荷载作用下, 二层砌体填充墙的受力区域主要集中在沿受力方向对角线范围之内, 而对角线范围之外等效应力相对较小, 填充墙角部与梁柱部位的应力集中现象严重。这是由于随着位移的增大, 砌体填充墙出现裂纹, 整个模型的抗侧力主要由对角线区域内的填充墙提供; 随着荷载的增大, 受力区域等效应力值逐渐增大; 当水平位移达到 $4\Delta_y$ 循环时, 二层填充墙角部的材料已经接近极限应力, 说明此时该处填充墙已经发生破坏。首层填充墙等效应力分布情况与二层填充墙相类似, 但

应力值要小于二层, 且最大应力主要集中在填充墙左上角, 其他部位等效应力均较小, 随着循环荷载增大, 当达到 $5\Delta_y$ 循环时, 只有上角填充墙被压坏。

随着水平荷载的增大, 裂纹开展越来越严重。不同水平荷载下裂缝开展的跟踪情况如图6所示。从填充墙主应力分布易看出, 填充墙角部的主拉应力较大, 所以裂缝从角部首先出现并沿对角线方向发展; 而对角线中部的裂缝开展不明显。由于在水平荷载作用下, 钢框架的变形在二层要大于一层, 所以填充墙在一层的裂缝开展没有二层明显, 由于两层受力情况相似, 两层裂缝开展的趋势仍然比较接近。

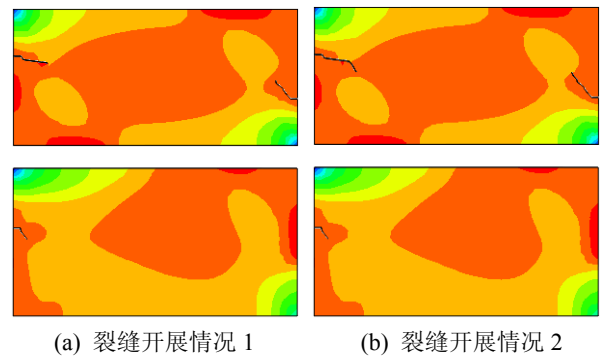


图6 裂缝开展图

Fig.6 Cracks development

为了进一步分析填充墙对钢框架的受力性能的影响, 进一步对一个无填充墙的纯框架(CKJ 结构)与 Base 结构进行对比分析。该试件梁柱截面尺寸与基本试件完全一致, 边界条件和加载方式也和基本试件相同。纯钢框架(CKJ)结构在单调荷载作用下的荷载-位移曲线, 如图7所示。

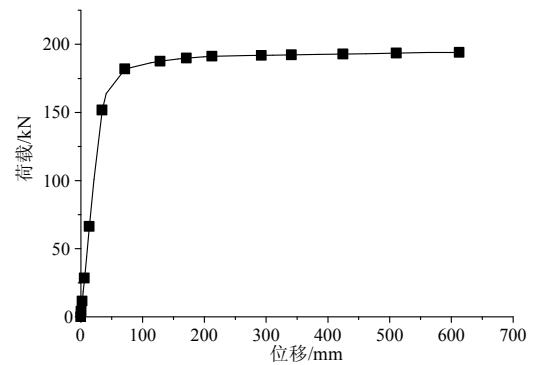


图7 CKJ 结构荷载位移曲线

Fig.7 Load-displacement curve of CKJ specimen

由图7可看出, 带填充墙的钢框架结构的承载力明显高于纯钢框架, 极限承载力约为纯框架试件的2.07倍。而延性性能却明显低于纯框架试件。

图 8 为带填充墙的钢框架与纯钢框架两种框架结构的对比骨架曲线, 图 9 为两试件的割线刚度退化曲线。由图 8 可以看出, 带填充墙钢框架结构的承载力有了明显的提高, 但是延性明显降低。两试件的割线刚度退化曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出, 由于填充墙平面内的刚度很大, 使得 Base 试件初始割线刚度比纯框架试件有大幅增大。但是到后期由于填充墙破坏, 带填充墙钢框架的割线刚度迅速下降, 而纯框架的退化趋势则较为缓慢。随着荷载的增大, 两者的割线刚度差别逐渐缩小。

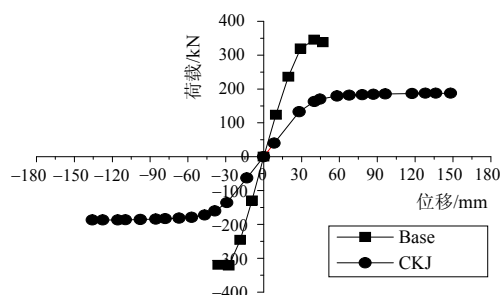


图 8 BASE 与 CKJ 结构骨架曲线  
Fig.8 Skeleton curve of BASE and CKJ

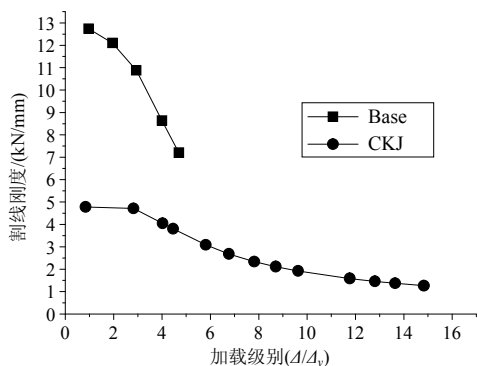


图 9 BASE 与 CKJ 结构割线刚度退化曲线  
Fig.9 Stiffness degenerate secant curve of BASE and CKJ

## 2 影响因素分析

### 2.1 墙体开洞情况对结构体系受力性能的影响

本文共设计了 3 种开洞尺寸分别为 1130mm×957mm、1754mm×1153mm、2360mm×1362mm, 共 9 个试件。试件的洞口位置如图 10 所示, 图 10 中关于洞口的位置相关参数列于表 1 中。试件以不同开洞尺寸在一层和二层之间按照表 1 的位置参数进行排列组合, 共设计了 9 种情况以研究洞口大小对填充墙钢框架体系受力性能的影响。

表 1 开洞尺寸相关参数 /m

Table 1 Parameters of hole location

$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
2.46	0.616	0.529	0.618	1.54

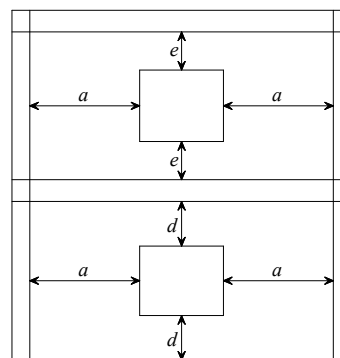


图 10 洞口尺寸  
Fig.10 Dimension of hole

具有不同洞口尺寸的 10 个试件的荷载-位移曲线如图 11 所示, 图 11 中 KDDX 为试件名称, 试件编号从 1 到 9 对应着墙体洞口在一层和二层的尺寸依次增加, 由于篇幅关系, 文章不一一提供每个试件洞口的具体位置与尺寸。通过对比试件的荷载-位移曲线发现, 填充墙的开洞使得结构的抗侧承载力下降, 并且开洞尺寸越大, 抗侧承载力越小; 首层填充墙的开洞大小对结构的抗侧承载力降低的影响较明显, 二层填充墙体的开洞大小对结构影响较小。

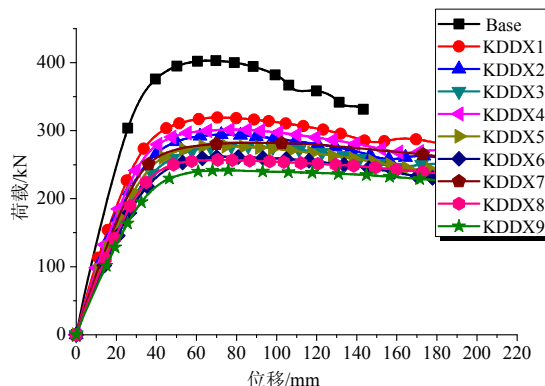


图 11 不同洞口大小的试件对应的荷载-位移曲线  
Fig.11 Load-displacement curves of different specimen with different holes

由于填充墙开洞尺寸的不同, 在循环荷载作用下的滞回曲线有明显的区别, 随着填充墙开洞尺寸的增大, 滞回曲线越来越趋于饱满, 捏缩现象越来越不明显, 结构的延性和耗能性能越接近纯框架。

### 2.2 高宽比对填充墙钢框架体系受力性能的影响

通过改变框架的高宽比, 以考察框架跨度变化对填充墙钢框架受力性能的影响, 建立了高宽比分别为 0.5875、0.52、0.47 这 3 个分析模型, 通过非线性有限元分析得到了单调荷载作用下的荷载-位移曲线。可以看出, 无论在弹性阶段还是在弹塑性阶段, 不同高宽比框架的荷载-位移曲线变化规律基

本一致。随着高跨比的减小,即框架跨度的增大,结构的极限承载力逐渐增大,而结构的延性将降低。通过比较循环荷载作用下的滞回曲线发现,高宽比越小,即框架跨度越大,捏缩现象越明显,耗能能力下降。

### 3 结论

通过对填充墙钢框架受力性能进行的理论研究,得出以下主要结论:

(1) 在水平荷载作用下,填充墙钢框架结构中砌体填充墙如同斜压支撑一样成为框架结构的斜向支撑并约束框架结构的水平位移,提高了结构的刚度和承载力。

(2) 填充墙钢框架在循环荷载作用下,滞回曲线表明结构的耗能性能较好。

(3) 在水平荷载作用下,填充墙裂缝主要沿对角线范围之内发生和开展,而对角线范围之外填充墙的等效应力相对很小;说明填充墙在框架中起到斜向支撑的作用。

(4) 在地震作用下填充墙首先发生破坏,并耗散一定的地震能量,结构的刚度会随之降低,结构还可以继续承担荷载,钢框架结构可以作为抗震的第二道防线。

(5) 填充墙开洞大小对结构的承载力和滞回性能均有影响,并且底层填充墙的开洞产生的影响大。随着洞口面积增加,结构的抗侧承载力降低,结构的滞回曲线趋于饱满,捏缩现象越不明显,结构的延性和耗能性能越接近纯框架。

(6) 随着框架高宽比的减小,即随着框架的跨度增大,结构的极限承载力逐渐增大,而结构的延性将降低,滞回曲线的捏缩现象越明显,结构抗震耗能能力下降。

#### 参考文献:

- [1] El-Dakhakhni W W, Elgaaly M, Hamid A A. Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 177—185.
- [2] Saneinejad A, Hobbs B. Inelastic design of infilled

- frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(4): 634—650.
- [3] 管克俭, 李捍无, 彭少民. 空腔结构复合填充墙-钢框架抗侧力性能试验研究[J]. *世界地震工程*, 2003, 19(3): 73—77.  
Guan Kejian, Li Hanwu, Peng Shaomin. Experimental research on lateral resistant behavior of steel frame with cavity sandwich wall infill [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2003, 19(3): 73—77. (in Chinese)
- [4] Dhillon B S, Abdel-Majid S. Interactive analysis and design of flexibly connected frames [J]. *Computers and Structures*, 1990, 36(2): 189—202.
- [5] 刘小强, 吴惠弼. 高层钢框架的非线性分析模型[J]. *工程力学*, 1993, 10(4): 42—51.  
Liu Xiaoqiang, Wu Huiyi. Nonlinear analysis model of tall frameworks [J]. *Engineering Mechanics*, 1993, 10(4): 42—51. (in Chinese)
- [6] 李国华, 郁银泉, 顾强. 钢框架内填混凝土墙结构体系有限元分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2007, 33(5): 17—20.  
Li Guohua, Yu Yinquan, Gu Qiang. Finite element analysis for concrete infilled steel frame [J]. *Sichuan Building Science*, 2007, 33(5): 17—20. (in Chinese)
- [7] Maheri Mahmoud R, Akbari R. Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(12): 1505—1513.
- [8] Kim Jinkoo, Choi Hyunhoon. Response modification factors of chevron-braced frames [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(2): 285—300.
- [9] Liauw T C, Kwan K H. Plastic theory of non-integral infilled frames [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1983, 75(3): 379—396.
- [10] 洗兰. 填充墙钢框架结构的受力性能分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.  
Xian Lan. Study on the performance of filler wall steel frames construction under load [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [11] 李捷. 带型钢边框混凝土剪力墙的抗震性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.  
Li Jie. Study on seismic performance of reinforced concrete shear wall with steel frame [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)