

# 组合深梁填充钢框架滞回性能试验

郑宏<sup>1</sup>, 胡立黎<sup>2</sup>, 赵冉<sup>1</sup>, 蒋晓燕<sup>1</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710061; 2. 浙江杭萧钢构股份有限公司, 杭州 311232)

**摘要:**通过1个纯钢框架和2个内填组合深梁的拟静力试验,研究组合深梁对纯钢框架结构的承载能力、延性、滞回特性和耗能能力的影响。试验显示:加载初期,滞回曲线为直线,刚度保持不变;卸载时没有残余变形;屈服后,试件的滞回曲线饱满;骨架曲线有明显的塑性流动阶段,呈现三折线形;填充深梁试件破坏时的层间位移角分别为1/25和1/22;试验表明组合深梁提高了钢框架的初始刚度、屈服荷载和极限承载能力;钢框架的延性和耗能能力都得到了提高。因此,内填深梁钢框架结构抗震性能良好,可将组合深梁作为结构抗震设防的第一道防线。

**关键词:**钢-混凝土组合深梁;钢框架;拟静力试验;滞回性能

**中图分类号:**TU317.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0023-06

## Hysteretic Behavior of Composite Deep Beam Infilled Steel Frame

ZHENG Hong<sup>1</sup>, HU Li-li<sup>2</sup>, ZHAO Ran<sup>1</sup>, JIANG Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China;

2. Zhejiang Hangxiao Steel Structure Corporation Limited, Hangzhou 311232, P. R. China)

**Abstract:** The Quasi-static tests of one steel frame and two the composite deep beams infilled steel frames were carried out. The effects of the deep beams on the load capacity, ductility, hysteretic property and energy dissipation of pure steel structure were analyzed. It is found that the hysteresis curve is a straight line with the constant of the stiffness at the beginning and without residual deformation. And the hysteresis curve of specimen was full after yielding, and the skeleton curves had a clear plastic flow phase with triple linear. The lateral drifts of the beam specimens at failure were 1/25 and 1/22. The composite deep beams enhance the initial stiffness, yield load and maximum load-bearing capacity of steel frame. Therefore, seismic performance of the composite deep beams is better.

**Key words:** steel-concrete composite deep beams; steel frame; quasi-static test; hysteretic behavior

抗震设计中,水平抗侧力构件是设计重点内容。钢框架侧向刚度小,易引起非结构构件的破坏<sup>[1]</sup>,可采用剪力墙提高钢框架结构的刚度。但剪力墙<sup>[2-3]</sup>刚度大且震后不易修复。为采用合适刚度,Kahn和Hanson<sup>[4]</sup>提出将钢筋混凝土板内填于钢筋混凝土框架;Kesner<sup>[5-6]</sup>将纤维混凝土板应用于钢框架。但混凝土构件与钢框架的连接节点难于处理。目前,

未见采用钢板和混凝土组合的深梁作为抗侧力构件。为实现结构抗侧刚度可在两个极值之间变化,实现一定范围内刚度渐变调幅<sup>[7-12]</sup>,可把深梁作为一种抗侧力构件<sup>[13-15]</sup>内填于钢框架中。组合深梁采用高强度螺栓与框架连接,连接可靠且拆装方便。该文以拟静力低周反复荷载试验,研究组合深梁填充钢框架的破坏过程和抗震性能。

收稿日期:2010-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助(50678025);陕西省外国专家局择优资助项目(SLZ2008008)

作者简介:郑宏(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事钢结构稳定性和组合结构抗震性能研究,  
(E-mail)chzheng@sohu.com。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

1.1.1 试件命名和框架的制作 试件分为 2 大类：纯钢框架和 2 个深梁填充钢框架结构，试件编号如表 1 所示。

3 个试件的钢框架尺寸和构造均相同。框架

柱、梁均为 HW200×200×8×12 型钢，柱轴线距离为 1 800 mm。梁柱节点处设置加劲肋，刚性连接，节点的加劲肋连接为全熔透的对接焊缝(图 1)。柱脚为刚性连接，设置 4 个 150×250×12 加劲肋，采用 6 个 M24 高强度摩擦型螺栓与基座梁连接(图 2)。钢材均为 Q235B，材性试验结果如表 2。

表 1 试件编号

名称	试件编号	填充构件	分项编号		
			钢板	混凝土板	框架
纯框架	PF	无	—	—	PF
组合深梁填充钢框架 A	CDBF-A	填充组合深梁	CDBF-A-S	CDBF-A-R	CDBF-A-F
组合深梁填充钢框架 B	CDBF-B	填充组合深梁	CDBF-B-S	CDBF-B-R	CDBF-B-F

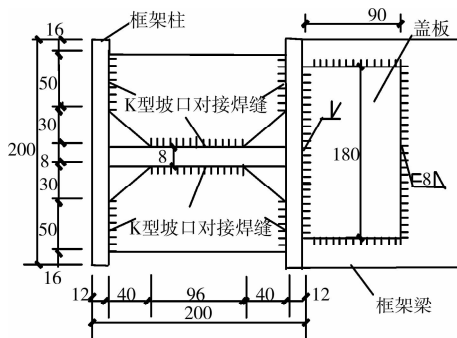


图 1 梁柱节点构造

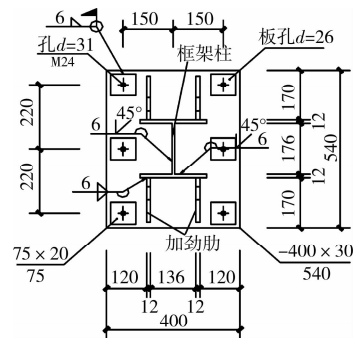


图 2 柱脚构造

表 2 试件的材性

钢框架腹板			钢框架翼缘			CDBF-B-S 和 CDBF-A-S			φ8 钢筋	混凝土
屈服强度	极限强度	弹性模量	屈服强度	极限强度	弹性模量	屈服强度	极限强度	弹性模量	屈服强度	抗压强度
276.05	450.35	209.77	277.81	460.13	208.72	321.67	472.68	205.82	236.99	45.30

1.1.2 组合深梁的制作 组合深梁是在钢板与混凝土板上分别预留孔洞，再用 M20 的摩擦型高强度螺栓将两者连接而成。混凝土板(厚 60 mm)与钢板(厚 4 mm)详细构造如图 3。与框架的连接方法为在钢板上下端、钢框架梁下翼缘和基座梁上翼缘留有螺栓孔，用角钢的一肢将钢板夹紧并用螺栓固定；角钢的另一肢分别与框架梁下翼缘和基座梁上翼缘通过螺栓固定(图 4)。连接螺栓采用摩擦型高强螺栓 M20，CDBF-A 共 18 个，CDBF-B 共 36 个，连接角钢为不等边角钢  $\angle 100 \times 80 \times 8$ 。

### 1.2 试验加载和测试方案

试验加载装置有作动器和基座梁等组成，如图 4 所示。水平加载设备为从美国进口的 MTS 电液伺服程控结构试验机系统。最大行程为  $\pm 250$  mm，

最大水平推力为 1 460 kN。竖向加载设备采用带有低摩擦球铰的 2 个 100 kN 的同步油压千斤顶，通过荷载稳压装置可转化为更大的竖向荷载。加载时，首先在两柱顶施加压力 300 kN。试验过程中保持不变；然后施加水平往复荷载，采用位移控制加载方式。屈服前，每级位移循环加载 1 次；屈服后，每级位移循环加载 3 次。加载到以下情况停止试验：1) 水平荷载下降至最大荷载的 85%；2) 结构无法再继续承受荷载；3) 加载荷载超过试验机的量程。

为了两侧试件受力和变形情况，在框架梁、框架柱上都布置百分表和应变片；在钢板和钢筋上布置应变花和单向应变片。使用 360 通道 7D-602 数据采集仪器自动采集试验数据。

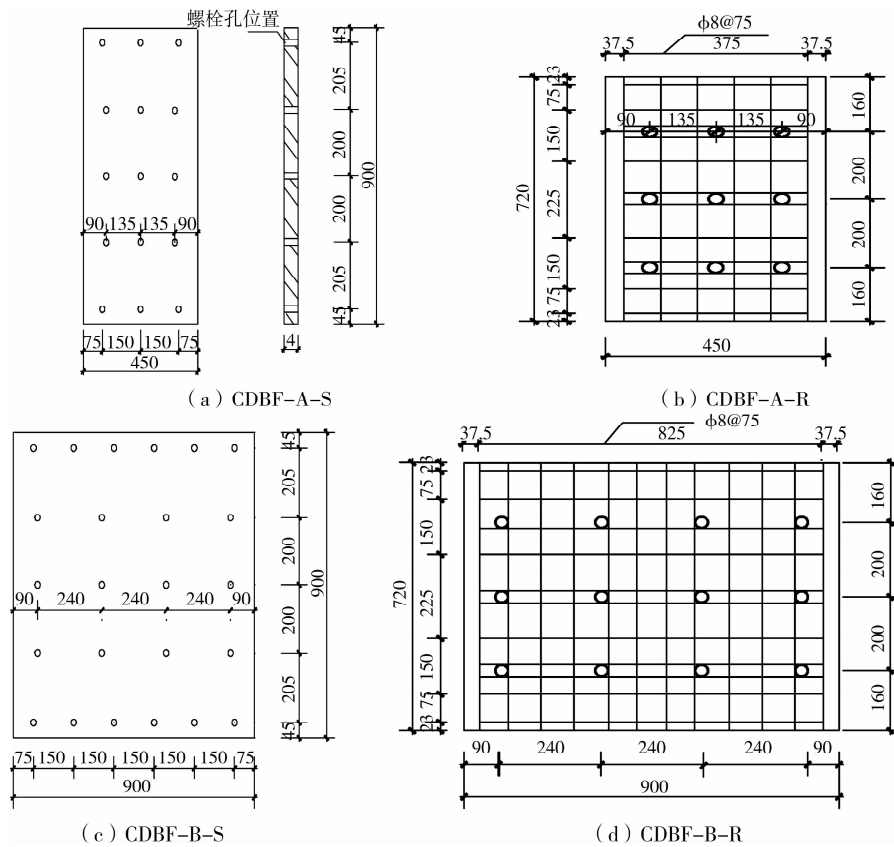
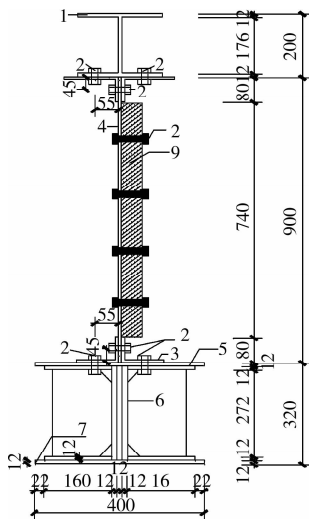
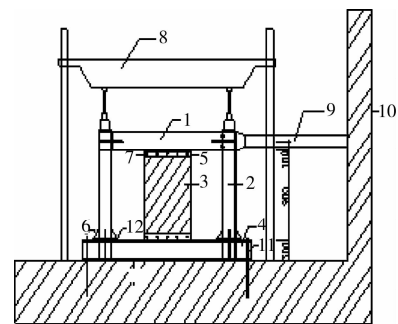


图 3 组合深梁的构造



注:1-框架梁;2-高强螺栓;3-角钢;4-组合深梁;5-底梁上钢板;6-底梁腹板;7-底梁底板;9-钢筋混凝土板

图 4 组合深梁的连接



注:1-框架梁;2-框架柱;3-深梁;4-地梁;5-角钢;6-加劲肋;7-摩擦型高强螺栓;8-竖向加载;9-作动器;10-反力墙;11-锚固件;12-端板

图 5 加载装置示意图

## 2 试验过程

### 2.1 PF 的破坏过程

荷载较小时,结构无明显变化。当水平位移加载至 25 mm(MTS)时,框架柱脚开始出现屈服,柱表面油漆开始剥落。随着荷载的增大,柱脚屈服越明显,柱翼缘局部屈曲。37 mm 时,框架右侧节点区

内油漆开始剥落,且上盖板焊缝开始出现裂缝。41 mm 时,右侧梁柱节点上盖板焊缝完全断开,且节点区腹板裂缝开展贯通,框架破坏,试验结束。框架梁在整个实验过程中无明显变化,框架的最后破坏形态见图 6。

### 2.2 CDBF 系列的加载过程

在加载初期,组合深梁的钢板与混凝土板接触的上下边缘处形成微小缝隙,当水平荷载由最大卸载至零时,缝隙基本消失。当荷载接近屈服点时,组合深梁开始向有混凝土板的一侧屈曲,钢板开始有残余变形;在深梁的 4 个角部部位,钢板和混凝土板

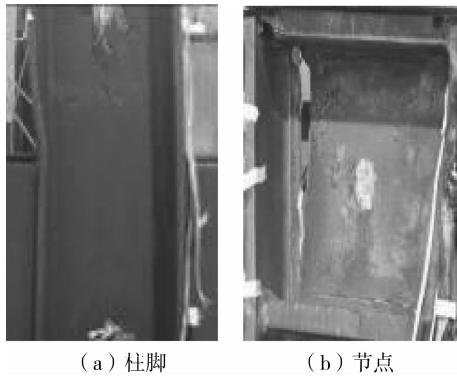


图 6 框架的破坏模式

开始出现分离,深梁下部分离的距离最大,上部的分离距离也较大(如图 7、8);随着水平荷载方向的变化,钢板和混凝土板呈现规律性的“开”与“合”。随着整个结构进入破坏阶段,组合深梁屈曲的距离逐渐增大,最大达 71 mm。除因与连接角钢挤压损坏角部外,混凝土板自始至终都没有出现裂缝或其他部位破坏。整个过程中框架的破坏形态与纯框架结构破坏相同。



图 7 CDBF-A 深梁破坏模式

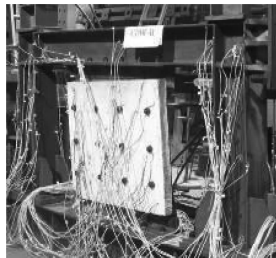


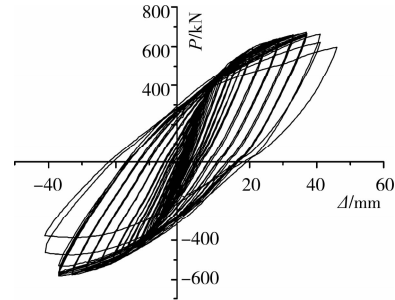
图 8 CDBF-B 深梁破坏模式

### 3 试验结果分析

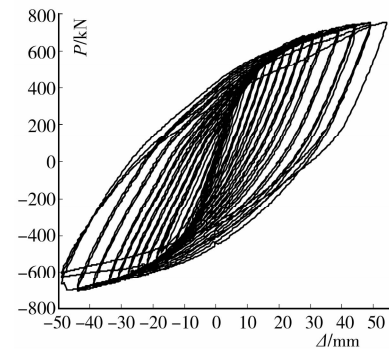
#### 3.1 荷载-位移滞回曲线

荷载作用下,各试件的荷载-位移滞回曲线,如图 9。加载初期,滞回曲线基本为直线,刚度保持不变;卸载时没有残余变形。说明结构处于弹性阶段,结构没有发挥耗能能力。随着荷载的增大,滞回曲线呈现梭形,试件的刚度不断退化,卸载时存在残余

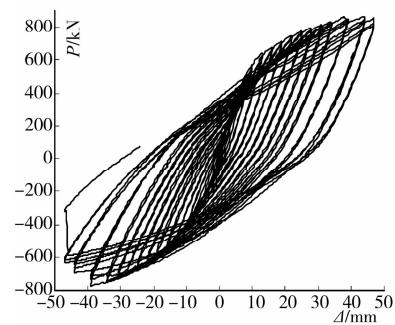
变形。说明结构进入塑性阶段,耗能能力良好。但进入塑性阶段后期,PF 试件滞回环不出现“捏拢”现象,但 CDBF 试件滞回曲线出现有“捏拢”现象,并逐渐向反“S”形发展,CDBF-B 表现尤为明显。



(a) PF



(b) CDBF-A



(c) CDBF-B

图 9 试件荷载-位移滞回曲线

#### 3.2 承载能力和延性分析

从图 10 的骨架曲线中看出:初始刚度  $CDBF-B > CDBF-A > PF$ ; CDBF 试件骨架曲线均高于纯框架。从表 3 和表 4 中可得,填充深梁试件的位移延性系数显著增大,但最大位移值并没有明显变化,导致屈服位移显著减小,说明结构受力后期主要由框架控制最大位移,深梁提高了试件初始刚度,减小了屈服位移;CDBF-A 在屈服前对框架承载能力提高有限,但屈服后最大承载能力比钢框架增加了 12.6%,说明内填的钢板在屈服后产生的屈曲后强度也能提高结构的承载能力。当组合深梁逐渐散失弹性承载能力后可以利用其屈曲后强度,对结构第

二阶段抗震设计是有利的。

因此,内填组合深梁可提高钢框架初始刚度,屈服荷载、极限承载力和延性等性能;改变深梁跨高比可使结构得到合适的承载性能和延性性能。

表 3 试验试件屈服荷载 ( $F_y$ )、最大荷载 ( $F_u$ )

NO.	$F_y$ /kN	增幅/%	$F_u$ /kN	增幅/%
PF	555.693	—	671.237	—
CDBF-A	545.033	0	756.083	12.6
CDBF-B	624.282	45	864.064	28.7

表 4 试验试件屈服位移 ( $\Delta_y$ )、最大位移 ( $\Delta_{max}$ ) 和延性系数 ( $\mu$ )

NO.	$\Delta_y$ /mm	$\Delta_{max}$ /mm	$\mu$	增幅/%
PF	17.061	44.056	2.582	—
CDBF-A	12.252	50.078	4.088	58.3
CDBF-B	7.953	44.682	5.621	117.6

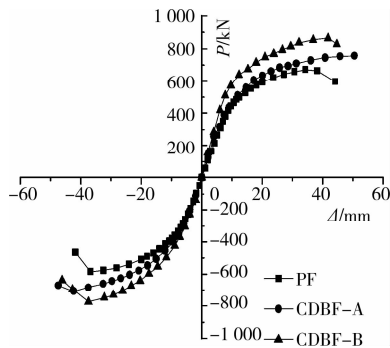


图 10 CDBF 与 PF 骨架曲线对比

### 3.3 耗能能力和承载能力退化分析

加载过程中  $P-\Delta$  围成的面积即为结构耗散的能量。从图 11 可以看出:在弹性阶段,结构的耗能能力为零;进入弹塑性阶段后,PF、CDBF-A 和 CDBF-B 耗能系数随着加载位移的增大均呈增大趋势;对于相同的加载位移,耗能系数为  $CDBF-A > CDBF-B > PF$ 。因此,通过改变深梁跨高比可使结构得到合适的耗能能力。

承载力退化系数反映同一级加载各次循环承载力降低的程度。从表 5 中可得:各级载位移,CDBF-A 和 CDBF-B 的承载力退化系数均接近 1,说明随着组合深梁的逐渐破坏,并没有导致整体结构的承载能力急速退化。因此,在同级循环荷载作用下组合深梁填充钢框架承载力稳定性能良好。

CDBF-A 和 CDBF-B 试件破坏时的层间位移角分别为 1/25 和 1/22,说明试件在确保承载能力不显著降低情况下,结构仍有较强的变形能力,保证结

构不倒塌。

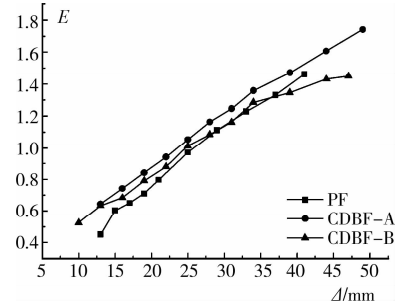


图 11 试件能量耗散系数曲线

表 5 CDBF-A 和 CDBF-B 承载力退化系数

CDBF-A			CDBF-B		
位移/mm	$\lambda_1$	$\lambda_2$	位移/mm	$\lambda_1$	$\lambda_2$
6	1.019	0.935	6	0.992	0.943
13	1.011	0.998	13	0.981	0.995
19	1.005	0.999	19	0.989	0.995
25	1.000	0.998	25	0.989	0.995
31	1.001	0.996	31	0.991	0.994
44	0.999	0.998	44	0.978	0.987
49	0.999	1.000	47	0.968	0.987

注:  $\lambda_i$  为第  $i$  次循环结构的承载力退化系数

### 3.4 应力分析

从试件屈服点的分布(图 12)可看出:

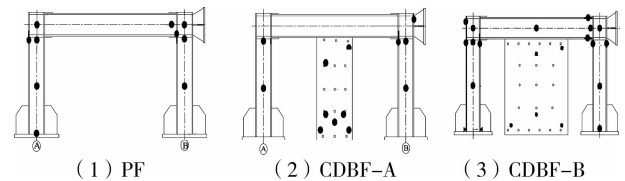


图 12 试件屈服点的分布

1)弹性阶段,CDBF-B-S 的应力较大;屈服后,CDBF-B-S 先于 CDBF-B-F 的应力增大到屈服;表明:屈服前,CDBF-B-S 是抵抗外力的主要因素之一。同时,试验现象显示深梁结构先于框架发生破坏。因此,选择适当的跨高比可以使深梁作为第一道抗震防线。

2)组合深梁的最大变形处也是最大应力处,说明混凝土板有效限制了钢板中部的变形,使钢板的变形向上下边缘处转移;钢板主要在上下端部形成塑性铰,产生耗能能力。因此,以钢板上部和下部分为最不利截面。

3)纯框架的屈服过程与 CDBF-B-F 和 CDBF-A-F 一致,说明填充组合深梁后并没有改变钢框架的破坏顺序。

4)混凝土板的钢筋应力较小,说明混凝土板在限制钢板平面外变形过程中钢筋受力很小。

## 4 结论

1) 填充深梁钢框架的承载能力、延性和耗能能力均优于钢框架结构,且承载能力稳定。通过改变组合深梁的尺寸可调整结构的抗侧刚度,使结构刚度能在一定范围内调幅。

2) 组合深梁的最大变形处也是最大应力处;主要在钢板上下端部形成塑性铰,产生耗能能力。因此,以钢板上部和下部作为最不利截面。混凝土板在限制钢板平面外变形过程中钢筋受力很小。组合深梁不会改变钢框架的破坏顺序,可作为结构抗震设防的第一道防线。

3) 内填组合深梁钢框架结构的荷载-位移滞回曲线呈现纺锤形,耗能系数呈增大趋势,说明内填组合深梁钢框架结构的抗震性能良好。

4) 组合深梁作为一种抗震加固构件,采用高强螺栓与框架连接,安装或拆卸方便,也可工厂预制,因此可应用于新建的钢框架结构、建筑结构改造、加固与修复。

### 参考文献:

- [1] 陈绍蕃,顾强. 钢结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 邵建华,顾强,申永康. 多层多跨钢板剪力墙水平极限承载力分析[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(2):71-74.  
SHAO JIAN-HUA, GU QIANG, SHEN YONG-KANG. Horizontal ultimate bearing capacity analysis of multi-story multi-span steel plate shear walls system [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(2):71-74.
- [3] 傅剑平,汪锦林,白绍良. 工字形 T 形钢筋混凝土剪力墙抗震抗剪试验[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(3):22-26.  
FU JIAN-PING, WANG JIN-LING, BAI SHAO-LIANG. The seismic shear capacity of I shaped and T shaped reinforced concrete structural walls[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(3):22-26.
- [4] KAHN L F, HANSON R D. Infilled walls for earthquake strengthening [J]. J. Struct. Div. ASCE, 1979;105(2):283-296.
- [5] KESNER K E. Development of seismic retrofit and strengthening strategies for critical facilities using engineered cementitious composite materials [D]. Cornell University, Ithaca, N. Y. 2003.
- [6] KEITH KESNER, SARAH L BILLINGTON. Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(11):1712-1720.
- [7] 米旭峰. 带竖缝钢筋混凝土剪力墙的设计与构造研究[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版,2009,23(5):387-390.
- MI XU-FENG. Design rules and constructional measures of RC slit walled system [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 23(5):387-390.
- [8] 金怀印,许淑芳,周德源. 带缝空心 R. C. 剪力墙结构模型动力特性研究[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(1):77-82.  
JIN HUI-YIN, XU SHU-FANG, ZHOU DE-YUAN. Study on the dynamic characteristics for model of slit hollow shear wall structure of reinforced concrete [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(1):77-82.
- [9] 王恒,余安东,郝际平. 带缝钢板剪力墙性能研究[J]. 钢结构,2007,22(9):70-72.  
WANG HENG, YU AN-DONG, HAO JI-PING. Analysis on the behaviors of steel shear wall with slits [J]. Steel Construction, 2007, 22(9):70-72.
- [10] 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 CHUN-HUA, HAO JI-PING, WANG YING-CHUN, et al. Cyclic test of thin steel plate shear wall with slits [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1):46-52.
- [11] 郝际平,曹春华,王迎春,等. 开洞薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2009,9(2):79-85.  
HAO JI-PING, CAO CHUN-HUA, WANG YING-CHUN, et al. Test on thin steel plate shear wall with opening under cyclic loading [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 9(2):79-85.
- [12] 缪友武,董全利,郭彦林. 两侧边开缝钢板剪力墙弹性屈曲分析[J]. 钢结构,2007,22(9):95-98.  
MIU YOU-WU, DONG QUAN-LI, GUO YAN-LIN. Elastic buckling behavior of steel plate shear walls slotted at two edges [J]. Steel Construction, 2007, 22(9):95-98.
- [13] 郑宏,杨飞颖,张维刚. 钢板深梁屈曲分析[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(3):31-34.
- [14] ZHENG HONG, YANG FEI-YING, ZHANG WEI-GANG. Buckling analysis on steel plate deep beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3):31-34.
- [15] ZHENG HONG, ZHOU XU-HONG. Parameter study of hysteretic behavior of steel beams in ANSYS [C]// Proceedings of the Second International Conference on Modeling and Simulation. Manchester, England, UK: World Academic Press, 2009:91-96.

(编辑 王秀玲)