

# 钢框架减震结构拟动力试验

王涛<sup>1,2</sup>, 张锡朋<sup>1,2</sup>, 解晋珍<sup>1,2</sup>, 王啸霆<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要** 目的 对一个首层薄弱的4层钢框架结构进行消能减震设计, 研究该减震结构在不同地震烈度下的地震响应以及阻尼器的性能. 方法 根据日本隔震结构协会(JS-SI)编写的《被动减震结构设计·施工手册》中介绍的被动消能减震设计方法, 使用带缝钢板阻尼器, 基于该结构减震性能曲线进行减震设计, 对该减震结构进行拟动力子结构试验. 结果 在小震、中震及大震下, 该减震结构的最大层间位移角在1/50以内, 阻尼器不发生面外变形, 也不产生裂缝, 与结构共同抵抗侧力, 保证结构不发生破坏. 结论 该减震结构具有良好的减震性能, 所采用的带缝钢板阻尼墙能够发挥其滞回耗能性能, 但在大震后面外失稳, 需要提供足够的面外约束进一步提升其抗震性能.

**关键词** 带缝金属阻尼器; 钢框架; 拟动力子结构试验; 地震响应; 减震性能

中图分类号 TU352.1

文献标志码 A

## Pseudo-dynamic Substructure Test on Steel Frame Structures with Metallic Wall Dampers

WANG Tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xipeng<sup>1,2</sup>, XIE Jinzhen<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoting<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, China, 150080; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, CEA, Harbin, China, 150080; 3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

**Abstract:** The purpose of this research is to design and retrofit a four-story steel frame building by metallic dampers, and to study the seismic performance of the damped structure and dampers. Based on the method of "Design and Construction Manual of Passive Controlled Structures" by Japanese Association of Isolated Structures (JSSI) the metallic damper is the wall-type damper with slits. A pseudo-dynamic substructure test was conducted. The test result shows that the maximum story drift angles of the damped structure are less than 1/50 under small, medium and large earthquakes. It can be concluded that the metallic wall damper with slits are able to play a stable hyster-

收稿日期: 2017-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678542); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2016A06)

作者简介: 王涛(1977—), 男, 研究员, 博士, 主要从事结构先进混合试验方法、功能可恢复韧性结构体系等方面研究.

etic energy dissipation loop, while the out-of-plane buckling shall be further restrained.

**Key words:** metallic wall damper with slits; steel frame structures; pseudo-dynamic substructure test; seismic respons; seismic mitigation behavior

中、低层钢框架结构在强震作用下容易出现薄弱层屈服机制<sup>[1]</sup>,其原因在于薄弱层柱顶抗剪承载力或延性不足,发生局部屈曲或断裂,从而形成柱端塑性铰<sup>[2-3]</sup>.甚至在某些情况下,钢框架结构在中震作用下即发生显著的非线性塑性变形.消能减震技术是结构被动控制技术的一种,其通过附加消能减震装置,为结构提供附加刚度和附加阻尼,与主体结构共同组成新的结构系统共同抵抗地震作用,有效降低主体结构的地震响应<sup>[4-7]</sup>.在钢框架结构中布置消能减震阻尼器,可以改变钢框架结构各层抗侧刚度沿高度的分布模式,并提高结构的耗能能力,从而保护主体结构不发生层倒塌破坏<sup>[8]</sup>.日本隔震结构协会 JSSI 编写的《被动控制结构设计·施工手册》中介绍了基于结构减震性能曲线的被动消能减震设计方法.为研究采用 JSSI 所提供减震设计方法设计的减震结构在小震、中震、大震以及超大震下的地震响应,评价其减震效果.笔者对 1 栋首层薄弱的钢框架结构进行消能减震设计,并进行子结构拟动力试验来评价减震结构的减震性能.同时,考察带缝钢板阻尼器在不同烈度地震作用下的力学性能.

1 首层薄弱钢框架结构的抗震性能

笔者以一栋 4 层 4 跨的典型平面钢框架结构作为研究对象,框架柱和梁分别采用箱型截面和 H 型截面,材质为 SN490 级,屈服强度为 325 MPa,钢框架结构如图 1 所示.初始阻尼比为 0.02,自振周期  $T_f=1.328\text{ s}$ ,结构各层重量与刚度列于表 1 中.

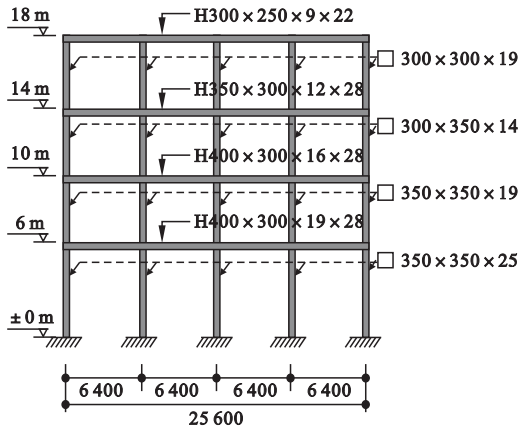


图 1 钢框架结构

Fig. 1 Dimensions of the steel frame structure

表 1 结构参数

Table 1 Structural information

楼层	层重/kN	刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
4	1 675.1	20.8
3	1 242.6	29.4
2	1 242.6	36.7
1	1 242.6	24.2

为检验该结构的抗震性能,采用 OpenS-EES 软件建立其有限元模型<sup>[9]</sup>.采用双线性随动强化模型作为钢材的本构模型,屈服后刚度比取 0.001.钢结构梁、柱采用非线性梁柱单元进行模拟.约束同一层柱顶具有相同的水平向变形,以体现楼板的作用.数值结构的自振周期为 1.328 s,说明该模型可有效模拟原型结构.选取符合  $A_i$  分布的侧力模式<sup>[10]</sup>对结构进行 Pushover 分析,层间位移角分布和层滞回曲线如图 2 所示.结果显示,结构首层的层间位移角达到 0.06,而其余三层的层间位移角均小于 0.02,说明该结构存在首层薄弱的问题.

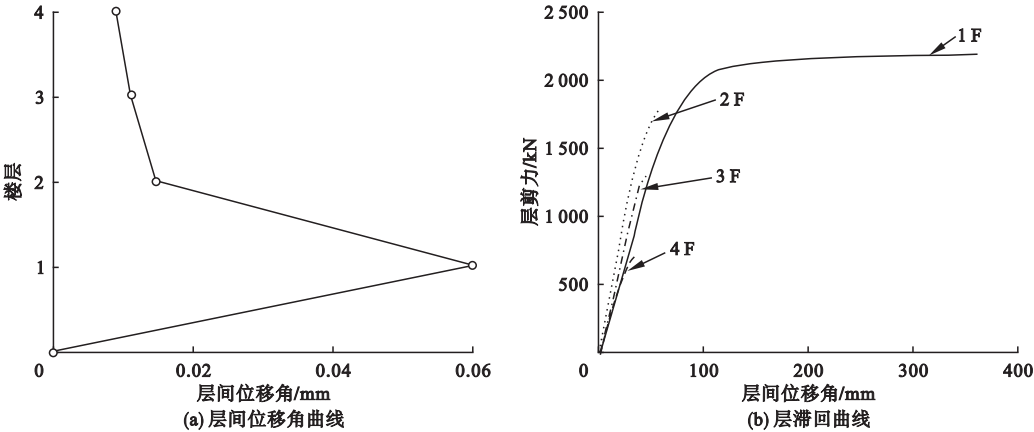


图 2 钢框架结构静力推覆分析结果

Fig. 2 Pushover analysis of steel frame

2 减震设计

钢框架结构通常具有较长的自振周期,其伪速度反应谱可以被视为一个常量,因此可通过增设阻尼器来分担主体钢框架承担的地震作用. 附加刚度仅能减小结构的位移响应,而附加阻尼既能减小结构的位移响应,也能减小加速度响应. 采用结构位移、伪加速度响应的降低率  $R_d$  和  $R_a$  表示来评价减震设计的效果, Kasai K<sup>[11]</sup> 将二者表示为无量纲参数附加刚度比  $K_a/K_f$  和最大延性系数  $\mu$  的连续函数, 附加刚度比  $K_a/K_f$  为阻尼器附加刚度  $K_a$  与主结构弹性刚度  $K_f$  的比值, 分别选取  $K_a/K_f$  为 0.5、1、2、4、9, 最大延性系数  $\mu$

为结构体系的最大位移与屈服位移的比值, 分别选取  $\mu$  为 1、2、4、8、20, 从而获得如图 3 所示的减震性能曲线, 图 3(a) 说明剪力降低率  $R_a$  与位移降低率  $R_d$  的关系、图 3(b) 说明等效阻尼比  $\eta_{eq}$  与等效周期比  $T_{eq}/T_f$  的关系. 根据减震性能曲线, 可采用等效单自由度体系来预测钢框架结构的位移. 首先, 选用 BCJ-L2 人工波进行弹塑性时程分析, 得到最大层间位移角为 0.022 5. 而目标位移角为 1/150(0.006 67), 因此框架基本保持弹性. 然后, 在相同的位移降低率  $R_d=0.296 6$  下确定附加刚度比  $K_a/K_f$  的最小值. 当延性比  $\mu$  接近 4 时, 附加刚度比  $K_a/K_f$  的最小值为 5.45, 此时剪力降低率  $R_a$  为 0.700 9.

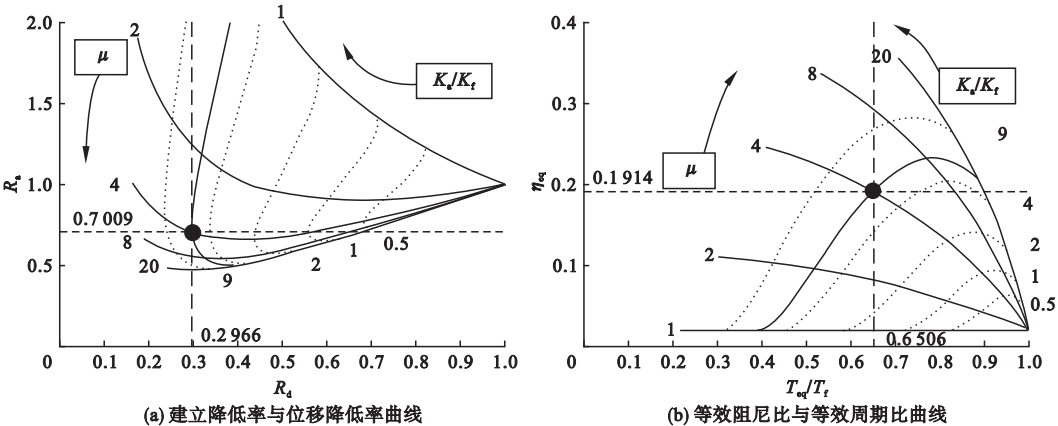


图 3 减震性能曲线

Fig. 3 Seismic reduction performance curves

采用 Ai 侧向力分布时, 基于结构各层具有相同的层间位移角和延性的假定, 减震结

构各层所需的附加刚度和相应的屈服力如表 2 所示. 根据 JSSI 设计方法,采用带缝钢板阻尼器<sup>[12-20]</sup>对原型结构进行减震设计<sup>[21]</sup>,附加刚度由带缝钢板阻尼器提供,所用钢材为

Q235 为便于计算及试验研究,带缝钢板阻尼器设置在同一跨内,带缝钢板阻尼墙参数如表 3 所示,减震装置布置方案如图 4 所示.

表 2 阻尼器设计参数  
Table 2 Damper design parameters

层数	层高/ mm	目标层间位移/ mm	阻尼器延性系数	阻尼器屈服变形/ mm	阻尼器弹性刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	阻尼器屈服力/ kN
4	4 000	26.67	4.0	6.67	114.53	763.5
3	4 000	26.67	4.0	6.67	158.63	1 057.5
2	4 000	26.67	4.0	6.67	181.17	1 207.8
1	6 000	40.00	4.0	10.00	140.47	1 404.7

表 3 带缝钢板阻尼墙参数  
Table 3 Parameters of wall-type damper with slits

层数	墙高/ mm	墙宽/ mm	墙厚/ mm	开缝排数	开缝长度/ mm	开缝间距/ mm	形状系数	屈服力/ kN	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服位移/ mm
4	3 675	3 200	12	1	1 640	277	1.2	7 620.9	114.9	6.63
3	3 625	3 200	12	1	2 080	487	1.2	1 056.4	160.9	6.56
2	3 575	3 200	12	1	2 240	599	1.2	1 206.6	186.7	6.46
1	5 775	3 200	12	2	1 830	568	1.2	1 400.5	141.7	9.89

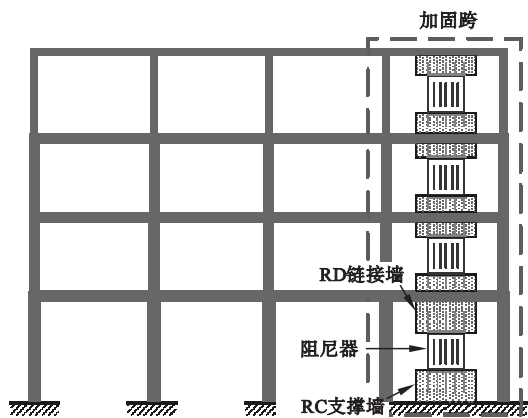


图 4 减震装置布设方案

Fig. 4 Damping device layout

3 子结构拟动力试验

3.1 试验设计与加载装置

针对减震结构,设计子结构试验,图 5 为子结构试验示意图. 数值子结构中的带缝钢板阻尼墙简化为 2 根交叉的 TRUSS 单元;试验子结构采用 1/3 缩尺模型. 表 4 为缩尺后

的带缝钢板阻尼墙基本参数,屈服力为原模型 1/9,初始刚度与屈服位移为原模型 1/3,屈服力计算采用 Q235 实测屈服强度 318 MPa.

表 4 缩尺模型参数  
Table 4 Information of scaled model

模型	屈服力/ kN	初始刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服位移/ mm
原模型	1 895	141.7	13.38
缩尺模型	210	43.5	4.84

试验加载装置如图 6 所示,一共设置 4 个作动器,两个竖向两个横向. 竖向作动器力控制,模拟上部结构对框架施加的重力作用,在加载期间保持不变;横向作动器位移控制,将每一步数值子结构计算得的位移施加到试验体上,并且返回每一步的反力,由于试验体为 1/3 缩尺模型,在位移与力的传递过程中按照一定比例进行换算.

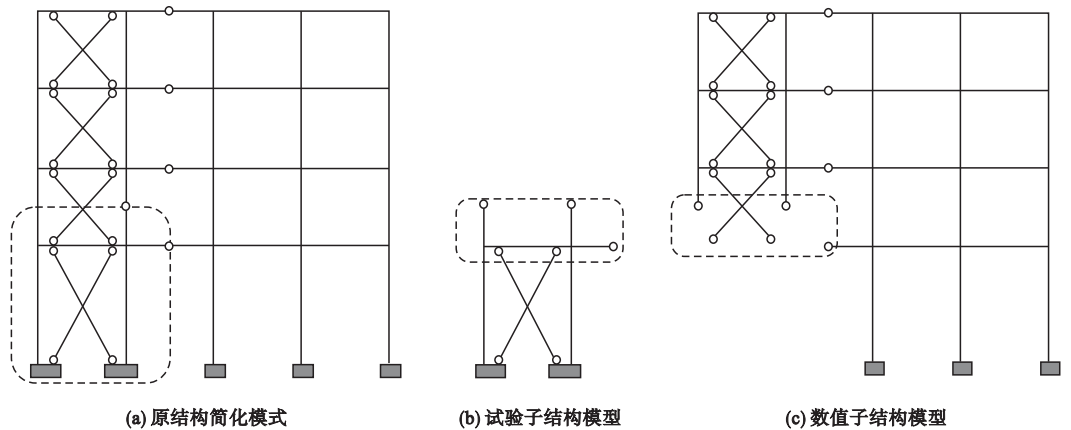


图 5 子结构试验示意图

Fig. 5 Scheme of substructure hybrid test

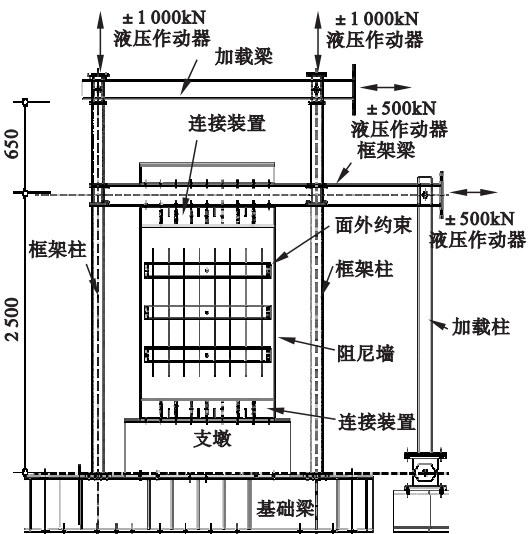


图 6 加载示意图

Fig. 6 Loading setup

3.2 试验地震波

该拟动力子结构试验选择的地震波为 Takatori,持续时间 25s,时间间隔 0.01 s,最大加速度为  $741\text{ cm/s}^2$ ,最大加速度出现在 5.8 s. 由于该地震波加速度较大的区段处在 0~10 s,所以取其前 10 s 的波段进行分析试验时,分别输入 Takatori 地震波的 20%、40%、60% 和 100% 来模拟小震、中震、大震和超大震下的减震结构地震响应,其地震动峰值分别为  $148\text{ cm/s}^2$  (0.15 g)、 $296\text{ cm/s}^2$  (0.30 g)、 $444\text{ cm/s}^2$  (0.45 g) 和  $741\text{ cm/s}^2$  (0.75 g).

3.3 测量方案

测量装置如图 7 所示,位移计 DH-1、2 和 DV1、2、5、6 分别用来量测框架部分的水平和竖向变形;位移计 DH-3、4 和 DV3、4 分别用于监测阻尼器的水平和竖向变形,交叉布设的位移计 DX1、2 用于测量阻尼器的剪切变形;框架和阻尼器开缝位置分别布置了应变片和应变花,用以监测其应力水平.

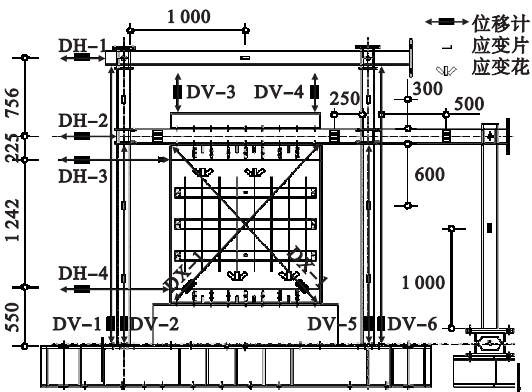


图 7 测量装置

Fig. 7 Measurement scheme

4 试验结果及分析

4.1 结构各层位移时程曲线

图 8 为该减震结构在不同峰值地震动下的各层位移时程曲线. 随着地震动的加强,结构各层的位移逐渐增大.

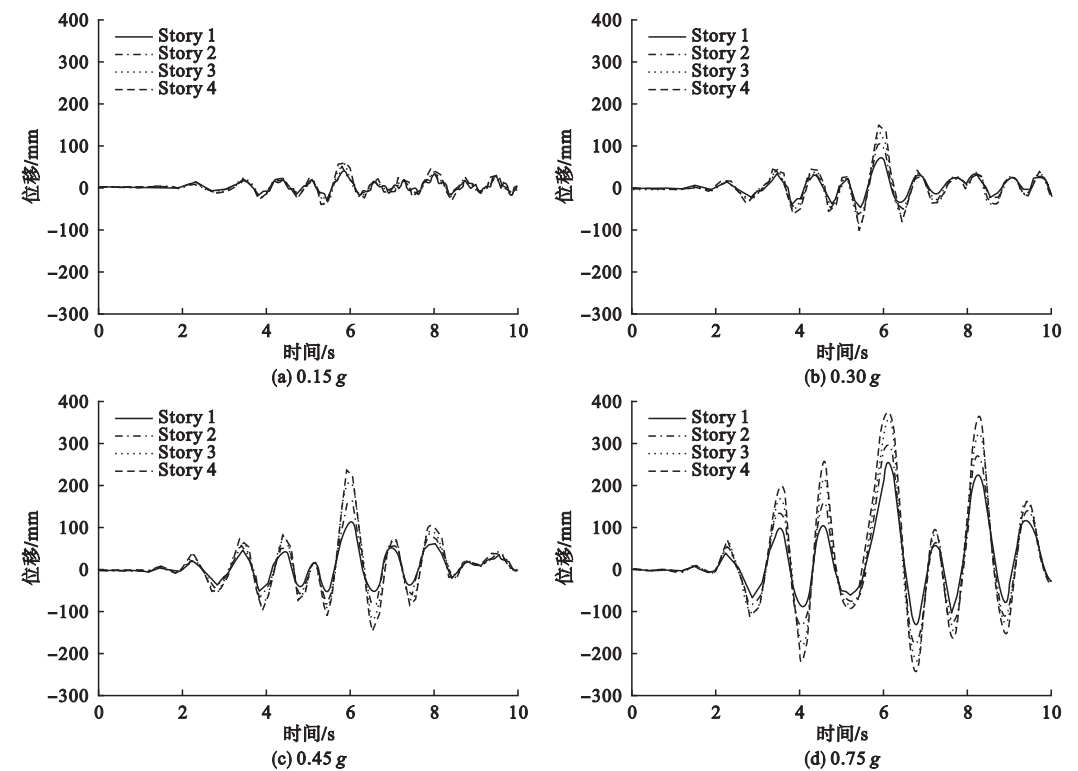


图8 各层位移时程曲线

Fig. 8 Displacement time histories of each level

4.2 结构各层的最大层间位移角

图9为结构在不同峰值地震动下的最大层间位移角.

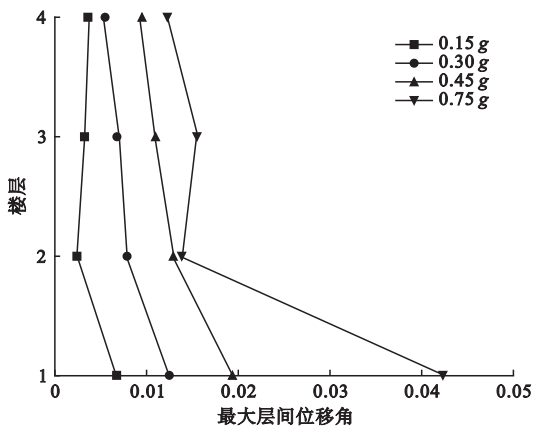


图9 最大层间位移角曲线

Fig. 9 Maximum inter-story drift angle of each level

随着地震动的加强,结构各层最大层间位移角逐渐增大,20% ,40% ,60% 地震动下,层间位移角分布比较均匀,并且最大层间位移角均在 1/50 以内,表明通过该方法设计得到的减震结构在小震、中震以及大震下能够

满足规范规定的位移角求. 在 100% 的 Taka-tori 地震波作用(相当于超大震)下,该结构产生了较大的层间位移,且首层的最大层间位移角远远大于其他三层,达到了 0.042 (1/24). 说明该减震结构在超大震的作用下仍会出现首层薄弱的倒塌机制.

4.3 结构滞回曲线

首层的层剪力最大,且最大层间位移角发生在首层,所以在不同峰值加速度地震动下,结构首层的层剪力-层间位移角滞回曲线如图 10 所示. 在小震作用下,结构滞回曲线基本为直线,结构处于弹性阶段,满足规范的要求. 在中震和大震作用下,结构滞回曲线呈梭型,表明结构进入了弹塑性阶段,发生了屈服. 且层间位移角在 1/50 以内,能够稳定的发挥其滞回耗能性能. 在超大震作用下,首层剪力较大震作用下没有提高,层间位移急剧增加,可认为结构在此时发生了破坏,而且由于首层层间位移大大超出其他三层层间位移,可认为结构在此时发生了首层倒塌破坏.



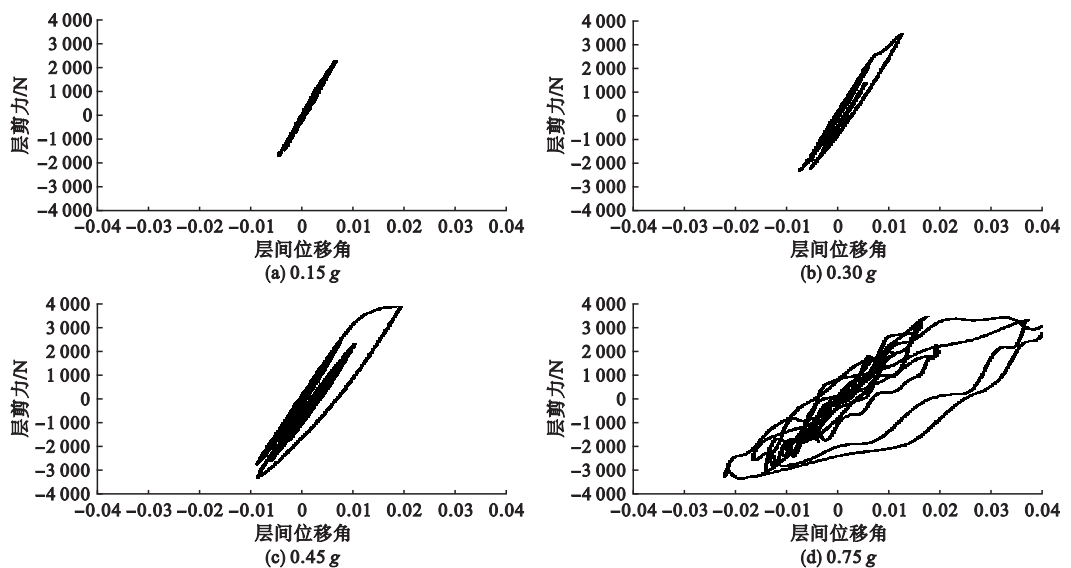


图 10 结构首层滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curve of first story

4.4 带缝钢板阻尼墙地震响应

在 20%、40% 和 60% 的 Takatori 地震波作用下,带缝钢板阻尼墙除了整体的剪切变形外,没有其他明显的现象. 无面外变形,也无裂缝的产生. 也就是说,带缝钢板阻尼墙在该情况下,能够稳定地发挥其性能. 子结构试验体带缝钢板阻尼墙的设计屈服荷载为 190 kN,将材性试验得到的钢材实测屈服强度 318 MPa 带入可得带缝钢板阻尼墙的实际设计屈服荷载为 210 kN. 图 11 为带缝钢

板阻尼墙在不同加速度峰值地震作用下的滞回曲线. 从滞回曲线中也可以看出,带缝钢板阻尼墙在剪力达到 210 kN 左右发生屈服,与设计基本吻合. 在小震作用下,带缝钢板阻尼墙保持弹性不发生屈服,提供抗侧刚度,与框架共同抗侧力;中震和大震作用下,带缝钢板阻尼墙发生屈服,滞回曲线为梭型,发挥其耗能性能;超大震作用下,带缝钢板阻尼墙由于局部发生了面外失稳,刚度明显降低,位移角急剧变大.

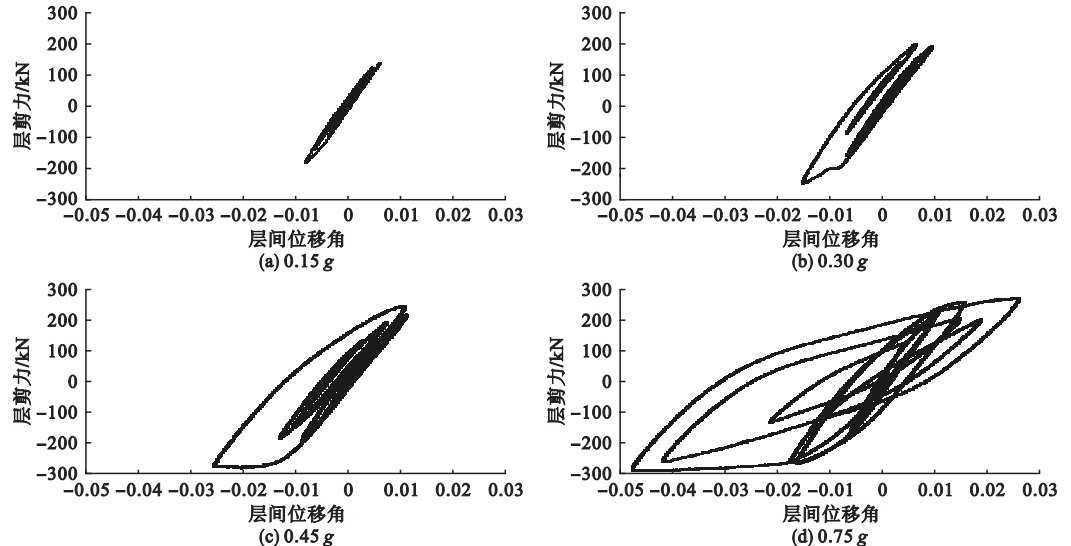
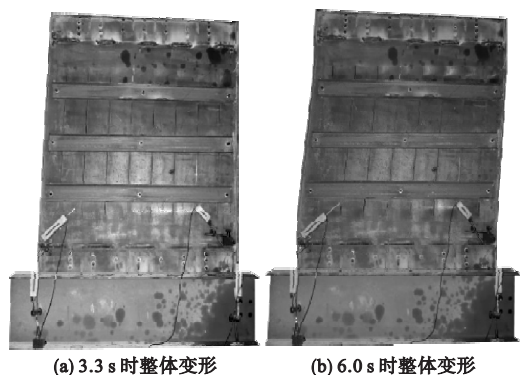


图 11 带缝钢板阻尼墙滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curve of the damper with slits during hybrid testing

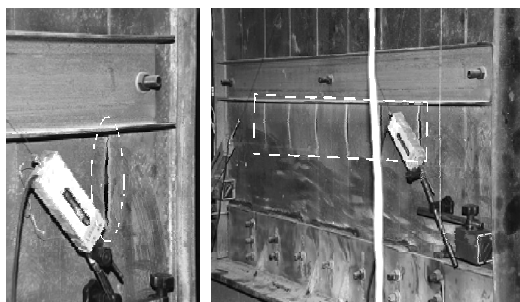
在 10% 的 Takatori 地震波作用下,在数值计算迭代到约 330 步时(对应于地震波 3.3 s 左右,地震动的最大加速度约为 0.48 g,带缝钢板阻尼墙首先在左右两侧开缝端部产生一定的面外变形,由左右两侧向内侧发展,直到带缝钢板阻尼墙所有开缝端部都产生面外变形。但由于墙体横向有三道槽型钢的约束,面外变形局限在开缝的上下端部区域,没有向开缝的中部区域延伸数值计算迭代到 600 步左右的时候,即地震波 6.0 s 左右,地震动的最大加速度 0.75 g 附近,带缝钢板阻尼墙开缝上、下端部的产生了明显的面外变形,且变形不可恢复,但此时没有裂缝产生(见图 12)。

尽管从结构层面来看,在超大震作用下,减震结构会发生层倒塌破坏。但就耗能构件而言,阻尼墙仅出现了局部面外失稳,未产生裂缝,提供的附加刚度降低,但其承载力基本保持不变。由滞回曲线的饱满程度判断阻尼墙仍可持续发挥滞回耗能作用,故认为带缝钢板阻尼墙本身在超大震作用下并未失效。



(a) 3.3 s 时整体变形

(b) 6.0 s 时整体变形



(c) 3.3 s 时局部面外变形



(d) 6.0 s 时局部面外变形

图 12 100% 地震动下墙体变形情况

Fig. 12 Deformation of wall-type damper with slits

## 5 结 论

(1)按照 JSSI 设计方法,采用带缝钢板阻尼墙进行减震设计的钢框架具有良好的减震性能,能保证结构在小震、中震及大震下最大层间位移角在 1/50 以内,结构不发生倒塌。

(2)在超大震作用下,结构由于首层层间位移过大而发生层间倒塌破坏,说明 JSSI 设计方法不能从根本上改变结构倒塌模式。

(3)带缝钢板阻尼墙在小震、中震以及大震下,不发生面外变形,也不产生裂缝,能够稳定发挥其性能。带缝钢板阻尼墙能够保证在小震下保持弹性,与结构共同抵抗侧力;中震及大震下发生屈服,发挥其滞回耗能性能,保证结构不发生破坏。

(4)在超大震下,带缝钢板阻尼墙发生了局部面外变形,不产生裂缝。尽管结构由于层间位移角过大发生倒塌破坏,但带缝钢板阻尼墙本身还能够发挥其稳定的滞回耗能性能。

## 参考文献

- [1] YAMADA S, TADA M, KASAI K, et al. Collapse experiment on 4-story steel moment frame; part 1 Outline of test results [C]. Beijing: Proceedings of 14th World Conference on Earthquake Engineering, October, 2008.
- [2] 黄炳生. 日本神户地震中建筑钢结构的震害及启示[J]. 建筑结构, 2000, 30(9): 24-25. (HUANG Bingsheng. The damage and enlightenment of steel structure building in Kobe earthquake in Japan [J]. Building structure, 2000, 30(9): 24-25.)
- [3] 刘洪波, 谢礼立, 邵永松. 钢框架结构的震害及其原因[J]. 世界地震工程, 2006, 22(4):



- 47-51.  
(LIU Hongbo, XIE Lili, SHAO Yongsong. The earthquake damage of steel frame buildings and causes of brittle failure[J]. World information on earthquake engineering, 2006, 22(4): 47-51.)
- [4] 丁洁民, 吴宏磊. 粘滞阻尼技术工程设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
(DING Jiemin, WU Honglei. Viscous damping technology for engineering design and application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.)
- [5] 李宏男, 李钢, 李中军, 等. 钢筋混凝土框架结构利用“双功能”软钢阻尼器的抗震设计[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 36-43.  
(LI Hongnan, LI Gang, LI Zhongjun, et al. Earthquake-resistant design of reinforced concrete frame with metallic dampers of “dual functions” [J]. Journal of building structures, 2007, 28(4): 36-43.)
- [6] 李玉顺, 大井谦一, 沈士钊. 钢框架结构软钢阻尼器振动控制的试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 1-7.  
(LI Yushun, KENICHI Ohi, SHEN Shizhao. Experimental and theoretical study on vibration control of steel frame attached with hysteretic dampers [J]. Journal of building structures, 2004, 25(2): 1-7.)
- [7] 林新阳, 周福霖. 消能减震的基本原理和实际应用[J]. 世界地震工程, 2002, 18(3): 48-51.  
(LIN Xinyang, ZHOU Fulin. Theory and application of energy dissipation-seismic reduction technology [J]. World information on earthquake engineering, 2002, 18(3): 48-51.)
- [8] CHANR W K, ALBERMANI F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation[J]. Engineering structures, 2008, 30(4): 1058-1066.
- [9] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT H M, et al. Open System for Earthquake Engineering Simulation User Command-Language Manual [M]. Berkeley: Pacific earthquake engineering research center, University of California, 2006.
- [10] BCJ. Structural provisions for building structures [M]. Tokyo: Building center of Japan, 1997.
- [11] KASAI K. Passive control systems for seismic damage mitigation [J]. Journal of structural engineering, 1998, 122(5): 501-512.
- [12] HITAKA T, MATSUI C. Experimental study on steel shear wall with slits [J]. Journal of structural engineering, 2003, 129(5): 586-595.
- [13] 孔子昂, 王涛, 施唯. 带缝钢板阻尼器受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 11-22.  
(KONG Ziang, WANG Tao, SHI Wei. Experimental study on mechanical properties of steel dampers with slits [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(9): 11-22.)
- [14] 邓付元, 王涛, 施唯. 带阻尼器消能连梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(增刊1): 96-100.  
(DENG Fuyuan, WANG Tao, SHI Wei. Cyclic test on seismic behavior of energy-dissipative coupling beams with dampers [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(S1): 96-100.)
- [15] 赵作周, 肖明, 钱稼茹, 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 Zuozhou, XIAO Ming, QIAN Jiaru, et al. Experimental study on seismic behavior of steel plate shear walls with vertical slits [J]. Building structure, 2007, 37(12): 105-109.)
- [16] 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 Lu, CHEN Yiyi, WANG Weidong. 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.)
- [17] 马欣伯, 郭兰慧, 张素梅, 等. 两边连接开缝钢板剪力墙的弹性屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊1): 130-135.  
(MA Xinbo, GUO Lanhui, ZHANG Sumei, et al. Elastic buckling analysis of two-sided connection steel plate shear wall with slits [J]. Engineering mechanics, 2011, 28(S1): 130-135.)
- [18] 郭兰慧, 马欣伯, 张素梅. 两边连接开缝钢板剪力墙的试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 133-142.  
(GUO Lanhui, MA Xinbo, ZHANG Sumei. Experimental research on steel plate shear wall with slits [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(3): 133-142.)
- [19] 孙飞飞, 王文涛, 刘桂然. 开缝钢板剪力墙的理论分析与数值模拟[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(5): 37-43.  
(SUN Feifei, WANG Wentao, LIU Guiran. Theoretical analysis and numerical simulation of slit steel plate shear wall [J]. Progress in steel building structures, 2011, 13(5): 37-43.)
- [20] 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 Jinyu, FAN Shenggang, YAN Lunan, 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.)
- [21] 日本隔震结构协会. 被动减震结构设计·施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
(Handbook of structural design and construction of passive control 2nd [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.)