

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.003



屈服耗能隔墙的减震性能

刘哲锋, 王子琰, 曾志辉, 匡彦, 聂辉

(长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410004)

摘要:将消能减震概念应用于非结构构件,提出一种屈服耗能隔墙。该隔墙在小震下为主体结构提供可量化的刚度支持,大震时提供可调节的耗能能力支持。通过对屈服耗能隔墙试件进行不同耗能元件数量下的静力往复试验,研究了该类型隔墙的消能机理与破坏模式,并基于 IDARC 程序中的柱单元对试件进行模拟,获得了消能元件数量与隔墙滞回参数之间的量化关系,提出了在 IDARC 程序中模拟设置屈服耗能隔墙的方法。通过对一个 6 层钢筋混凝土框架进行不同屈服耗能隔墙设置方案下的动力时程分析,发现屈服耗能隔墙的设置能够有效减小结构的地震反应、降低结构的损伤;框架中耗能隔墙数量的增加会使结构的层间位移显著减小,而隔墙数量相同时,隔墙中耗能元件数量的增加并不会导致结构层间位移发生明显变化。

关键词:隔墙;屈服耗能;静力往复试验;钢筋混凝土框架

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0017-07

Earthquake resistant performance of yielding energy dissipation partition

Liu Zhefeng, Wang Ziyang, Zeng Zhihui, Kuang Yan, Nie Hui

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: By applying the ideal of energy dissipater to nonstructural components, yielding energy dissipation partition (YEDP) was proposed. The YEDP could provide quantifiable stiffness under minor earthquakes and adjustable energy dissipation capacity under major earthquakes. The static cyclic loading tests of YEDP with different number of energy components were completed, and the energy dissipation mechanism and failure mode of YEDP were got understanding. Based on the quantitative relationship between number of energy components and hysteresis curve parameters, the method which using column unit of IDARC program to simulate YEDP was proposed. The dynamic time-history analysis of 6-storey reinforced concrete frame under different YEDP set programs were carried out, the results show that YEDP could effectively reduce the seismic response of the structure. The interlayer displacement of structure decreases significantly with the increasing of number of YEDP, but be changeless with the increasing of number of energy components in the YEDP when the number of YEDP is same.

Keywords: partition; yielding energy dissipation; static cyclic loading test; reinforced concrete frame

收稿日期:2017-05-20

基金项目:湖南省重点学科开放基金(13ZDXK07)

作者简介:刘哲锋(1976-),男,副教授,博士,主要从事结构抗震研究,E-mail:Lzf0072006@163.com。

Received:2017-05-20

Foundation item: Opening Project of Key Subject of Hunan Province (No. 13ZDXK07)

Author brief: Liu Zhefeng (1976-), associate professor, PhD, main research interest: structural seismic, E-mail: Lzf0072006@163.com.

相对于结构构件,隔墙、填充墙等非结构构件由于刚度较低,整体性和变形能力较差,在地震作用下容易发生垮塌,从而造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失^[1-4]。消能减震技术则是近年来迅速发展起来的一种安全、有效的工程抗震方法,这种方法通过把某些结构构件设计成耗能元件,以减小主体结构的破坏^[5-6]。因此,研究人员开始思考如何将消能减震思想引入非结构构件,使之成为一个可控的耗能单元,在实现自身有序破坏的同时,提高主体结构的抗震性能。如唐兴荣等^[7]、瞿伟廉等^[8]通过对砌体填充墙设缝来减小墙体的刚度约束作用;周云等^[9-10]在砌体填充墙内设置填充有阻尼材料的贯通横缝,使墙片在相互错动时通过阻尼机制耗散能量;林坤等^[11]提出无浆砌体填充墙,通过砌块之间的摩擦实现耗能;暴伟等^[12]则对轻钢龙骨隔墙体系的屈服耗能机制进行了研究。

本文亦将耗能减震概念应用于填充墙体系,提出一种屈服耗能隔墙。该隔墙在小震下为主体结构提供可量化的刚度支持,大震时提供可调节的耗能能力支持,以期为减震隔墙的性能化设计提供一种思路与尝试^[13]。

1 屈服耗能隔墙的构造与试验

1.1 隔墙构造与隔墙试件

如图 1 所示,屈服耗能隔墙由上下两块墙片和中间的软钢耗能元件组成,墙片采用 X 型钢钢筋混凝土构架,空隙处填充轻质材料。在墙片中预埋用以连接软钢耗能元件的钢片,上下钢片位置对齐;软钢耗能元件的孔洞位置与预埋钢片孔洞重合,用螺栓将软钢耗能元件与预埋钢片栓紧,从而将上下墙片连接成为一个整体。在小震作用下,软钢耗能元件仅发生弹性变形,隔墙提供一定的刚度;在大震作用

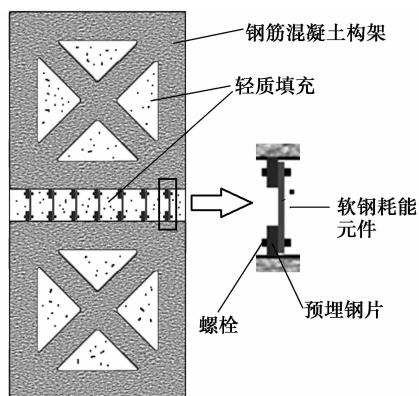


图 1 屈服耗能隔墙构造

Fig. 1 Yielding energy dissipation partition

下,耗能元件变形耗能,而与上下楼板连接的墙片保持弹性状态。地震结束后更换耗能元件,隔墙可继续使用。同时,隔墙的耗能能力可以根据耗能元件的数量加以调整。

为了解屈服耗能隔墙的力学性能,设计一个屈服耗能隔墙试件进行静力往复试验。试件的尺寸与配筋如图 2,隔墙试件的设计高度为 1 715 mm,上下墙片长宽均为 800 mm,X 型钢构架与边框的截面均为 120 mm×120 mm,隔墙下墙片与地梁整体浇筑。纵筋与箍筋均采用 HRB335 级钢筋,混凝土为 C30 级。上下墙片中的预埋钢片采用厚度为 10 mm 的 Q235 钢,软钢耗能元件采用厚度为 5 mm 的 Q235 钢,其细部尺寸见图 3,连接螺栓型直径 8 mm。

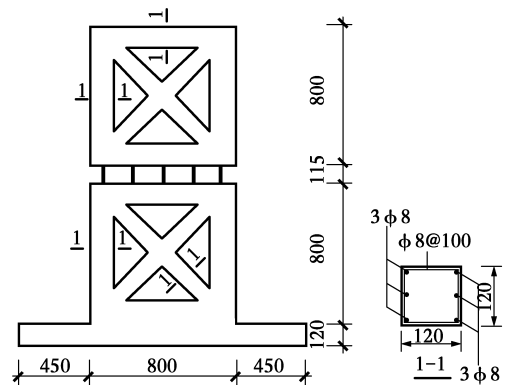


图 2 试件尺寸与配筋(单位:mm)

Fig. 2 Section dimensions and reinforcement details of specimen

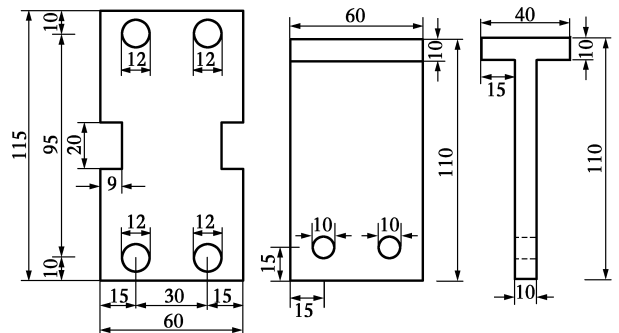


图 3 预埋钢片与耗能元件尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Dimensions of embedded steel and energy dissipation components

试件的安装如图 4 所示,地梁与地面通过螺杆以及两端的油压千斤顶进行固定。隔墙上墙片顶端预埋高强螺栓,与配套制作的带孔加载钢梁(1 500 mm×50 mm×40 mm)相连接,以模拟上部墙片与楼板的固定连接。带孔钢梁与作动器相连,为了保持带孔钢梁的水平运动,试件两侧设置槽钢,槽钢两端分别与加载钢梁、地梁进行铰接连接。作动器通过对钢梁施加水平力,实现隔墙上下墙片的相对位

移,以模拟地震中结构层产生的层间位移。

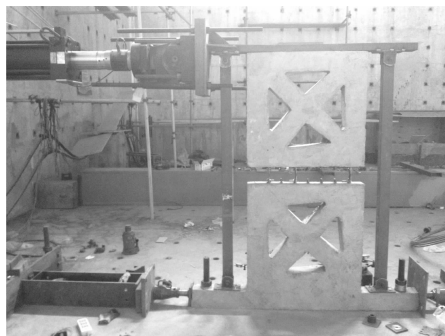


图 4 试件的安装

Fig. 4 Installation of specimen

1.2 加载方案与试验结果

采用 MTS500kN 作动器分别对安装有 3、4、5 片耗能元件的隔墙试件实行往复加载试验。试验采用位移控制,加载规则为 10 mm→20 mm→30 mm→40 mm→50 mm→60 mm,每个幅值往复加载 5 次。

3 次试验的试验现象基本类似,即采用 10、20 mm 幅值往复加载时,耗能元件虽然有一定的变形,但当位移回复到初始位置时,耗能元件能够恢复到原始状态;当采用 30 mm 幅值往复加载后,耗能元件的变形明显增大,位移回复到初始位置时,耗能元件出现形状扭曲;随着加载幅值不断增加,耗能元件的变形加剧,呈现波浪形扭曲(图 5);隔墙最终的破坏以连接耗能元件的螺栓断裂为标志(图 6)。3 片、4 片耗能元件下的试验在位移幅值为 60 mm 时螺栓断裂,5 片耗能元件下的试验在幅值为 50 mm 时螺栓断裂。加载过程中上下墙片未出现开裂。

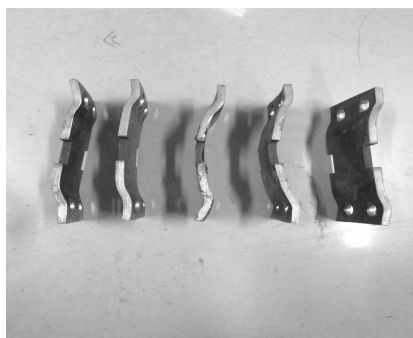


图 5 试验结束时的软钢耗能元件

Fig. 5 The energy components at the end of the test

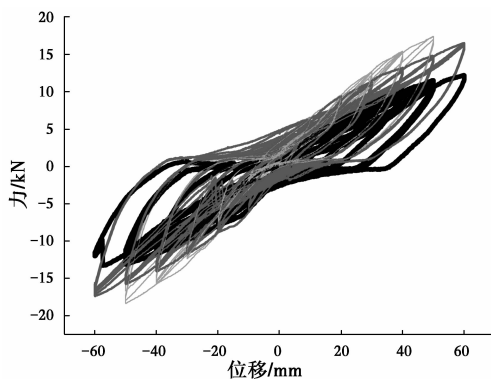
图 7 是 3 次静力往复加载试验的滞回曲线。可以发现,由于混凝土墙片维持弹性,因此,试件在滞回过程中没有出现强度或刚度退化现象;随着耗能元件数量的增加,滞回曲线的主要变化在于加载刚度的增加,并导致耗能能力提高。隔墙试件的滞回



图 6 连接螺栓的断裂

Fig. 6 Fracture of connecting bolts

曲线与通常的软钢耗能阻尼器有较为明显的不同,发生了较为明显的捏缩。一方面原因在于墙片本身的变形,同时,由于螺栓与软钢耗能元件孔洞之间的空隙导致螺栓松动产生虚位移,此外,试验过程中,由于加载钢梁与上墙片在加载后期发生松动,导致上部墙片在滞回过程中发生了刚体转动。这种松动现象在具有 5 片耗能元件的试验中表现得最为明显,因此,其滞回曲线的捏缩也最为严重。



注: — 3片软钢片 — 4片软钢片 — 5片软钢片

图 7 3 次试验的滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curve of three experiments

2 屈服耗能隔墙的数值模拟

在 IDARC 程序中,可通过设定滞回曲线的特征参数实现对滞回过程中强度衰减、刚度衰减以及捏缩效应的模拟^[14]。采用 IDARC7.0 中的柱单元来模拟隔墙,即通过调整柱单元滞回曲线的特征参数来进行模拟。如图 8 所示,在程序中建立一个梁单元模拟加载横梁,通过铰接链杆模拟隔墙两侧的槽钢,采用柱单元模拟屈服耗能隔墙,柱单元不设置材料参数,仅通过输入截面的滞回特征来进行定义。通过对梁单元施加相同的水平加载路径,通过柱单元两端塑性铰的滞回行为来模拟隔墙试件的屈服耗能过程。

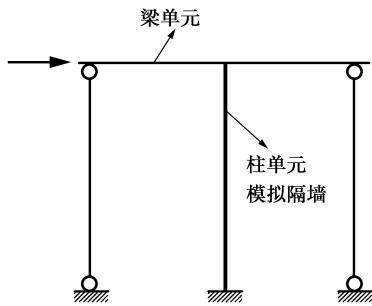


图 8 IDARC 程序中隔墙模拟

Fig. 8 The partition model in IDARC program

图 9 是柱单元长度为 3.3 m 时按照滞回面积等原则进行模拟的结果,对比曲线,可见模拟结果与试验值较为接近。需要指出的是,这里的模拟隐含约定了 3.3 m 高的耗能隔墙与试验中的试件具有相同的滞回性能,即模拟隔墙上下墙片的抗侧刚度应与试件相等,耗能元件的尺寸应与试件相同。

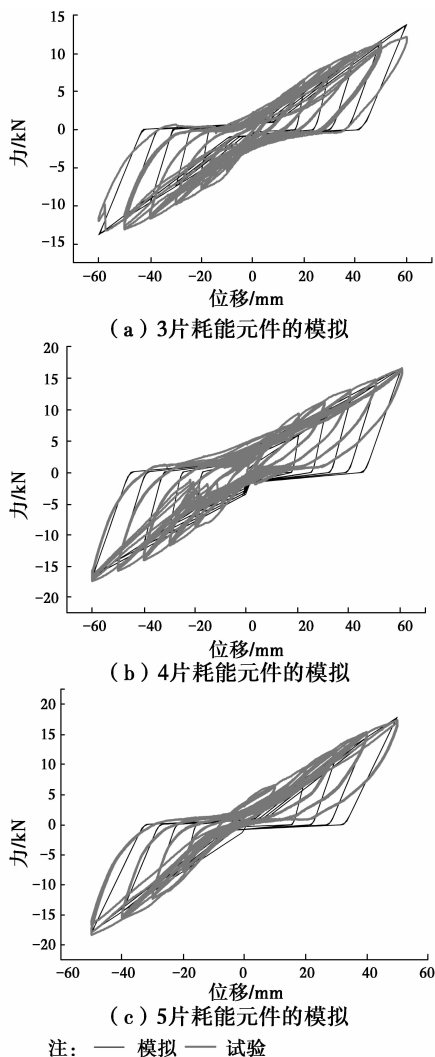


图 9 隔墙试件的 IDARC 模拟滞回曲线与试验滞回曲线

Fig. 9 The hysteresis curves of IDARC simulation and experimental

表 1 是 IDARC 中柱模型滞回参数的取值,可见,耗能元件数量的增加导致隔墙初始刚度的增长,而屈服后刚度以及各退化参数并没有发生变化,这与图 7 所展示的现象一致。因此,在建模过程中,可以认为隔墙中耗能元件的数量仅影响模型的初始刚度,取值可按照表 1 中的数值进行线性插值。

表 1 试件模拟时滞回参数取值

Table 1 The value of the hysteresis parameter of the simulation

试件	初始刚度/ ($10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$)	屈服后刚 度/($10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$)	刚度退 化参数	强度退 化参数 (延性)	强度退 化参数 (能量)	滑移 参数
3 片耗能元件	6.0	0.09	35	0.15	0.01	0.5
4 片耗能元件	7.5	0.1	35	0.15	0.01	0.5
5 片耗能元件	8.8	0.1	35	0.15	0.01	0.5

3 屈服耗能隔墙在 RC 框架中的减震效果

为了解屈服耗能隔墙在框架结构中的减震效果,采用一个如图 10 所示的 6 层 3 跨 RC 框架进行算例模拟。框架层高 3.3 m,每跨跨度 6 m,混凝土强度等级为 C40,纵筋采用 HRB335 级,箍筋采用 HRB235 级,框架柱截面为 600 mm \times 600 mm,框架梁截面为 200 mm \times 500 mm,梁柱截面配筋见图 10,框架自振周期为 1.09 s。采用附表 1 所示的 3 条地震波对结构进行动力时程分析,加速度峰值调整为 0.25g。

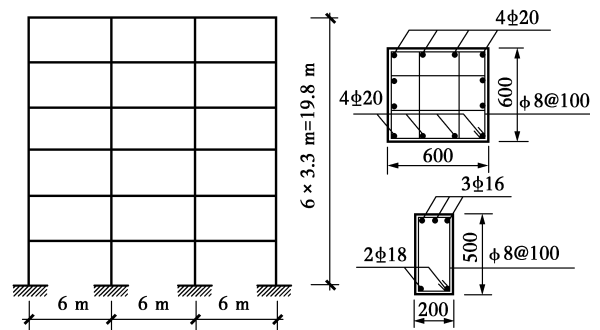


图 10 6 层 3 跨 RC 框架与梁柱配筋

Fig. 10 6-storey 3-span RC frame and reinforcement details of beam-column

采用 IDARC7.0 进行动力时程分析,时程分析共设计 7 种耗能隔墙布置方案(见表 2),其中,W 表示框架中未设置耗能隔墙,采用的是 240 mm 厚的烧结粘土砖砌体作为隔墙。IDARC 程序中采用

INFILL PANEL 单元模拟砌体隔墙,该单元通过交叉双向压杆来模拟砌体墙对框架的影响,单元滞回模型采用 Smooth hysteretic model,滞回参数采用程序默认值;O 表示框架每层每跨设置一片屈服耗能隔墙,每片隔墙中耗能元件的数量分别有 3、4、5 片 3 种情况;T 表示框架每层每跨设置两片屈服耗能隔墙,每片隔墙中耗能元件的数量也有 3、4、5 片 3 种情况(图 11)。隔墙的滞回参数按表 1 选取。通过比较耗能隔墙设置后结构层间位移角的变化来了解屈服耗能隔墙的减震效果。

表 2 7 种隔墙布置方案及其自振周期

Table 2 Seven kinds of partition layout scheme and natural vibration period

隔墙耗能 元件数量	每层每跨布置 1 片耗能隔墙	每层每跨布置 3 片耗能隔墙
0	W, 0.95 s	
3	O-3, 0.83 s	T-3, 0.52 s
4	O-4, 0.82 s	T-4, 0.50 s
5	O-5, 0.81 s	T-5, 0.49 s

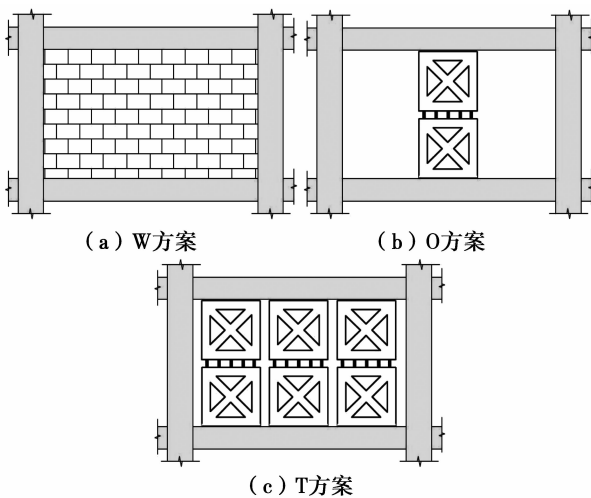
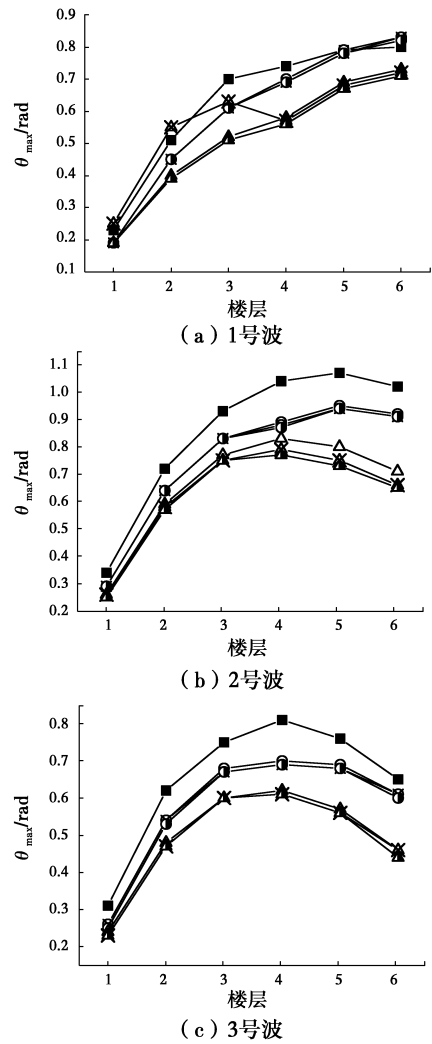


图 11 不同隔墙布置方案的示意图

Fig. 11 Schematic diagram of different partition layout schemes

图 12 是在 3 条地震波作用下,算例框架在不同隔墙布置方案时的最大层间位移角。可见,在不同地震波作用下,相对于砌体隔墙,屈服耗能隔墙的设置都使得框架的层间位移发生了不同程度的减小。框架每跨中耗能隔墙数量的增加会使结构的层间位移显著地减小,而在隔墙数量一定的情况下,隔墙中耗能元件数量的增加并不会导致结构层间位移发生明显的减小。这表明,要提高屈服耗能隔墙对框架结构的减震效果,应尽量增加框架中隔墙的数量,而

不是一味的增加隔墙中耗能元件的数量。



注: ■—W ○—O-3 ⊗—O-4 ●—O-5 △—T-3 ×—T-4 ▲—T-5

图 12 3 条地震波作用下不同隔墙布置方案的最大层间位移角

Fig. 12 Maximum story drift angle of different partition layout schemes under three seismic waves

图 13 是 3 条地震波作用下不同隔墙布置方案的耗能比较。图 13(a)是结构总累积滞回耗能的变化情况,可见,屈服耗能隔墙的设置总体上使得结构的总滞回耗能有所减少,但其幅度随地震波的不同而不同;图 13(b)是框架结构梁柱滞回耗能占总滞回耗能比例的变化情况,可见,屈服耗能隔墙的设置使得结构构件的耗能比例出现了较为明显的下降,同时,隔墙数量增加导致的下降效果要比单纯增加隔墙中耗能元件数量的效果更为明显;图 13(c)是框架梁耗能占总耗能的比例变化情况,不难发现图中的下降比例略小于图 13(b),这说明结构承担滞回耗能比例的下降主要源于梁承担耗能比例的下降。

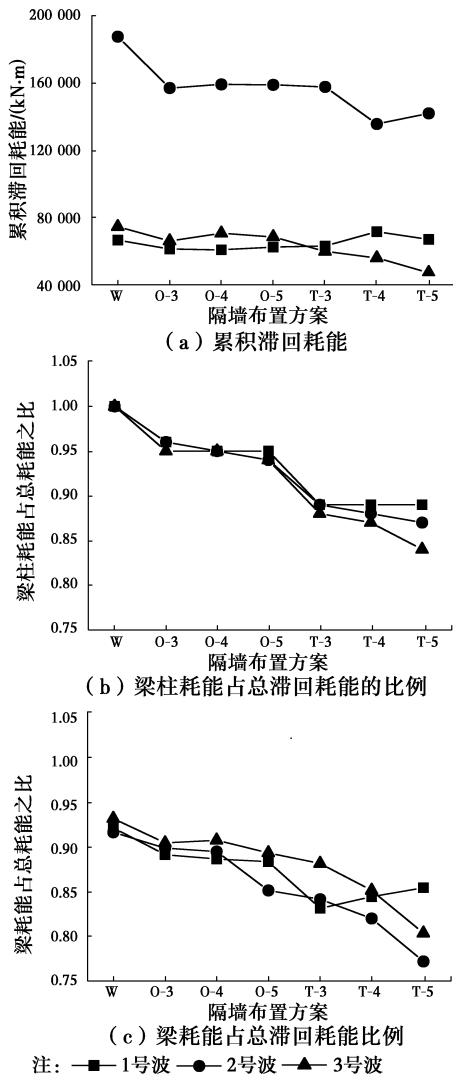


图13 3条地震波作用下不同隔墙布置方案的耗能比较

Fig. 13 Comparison of energy dissipation of different partition schemes under three seismic waves

4 结论

1) 屈服耗能隔墙的耗能能力由软钢耗能元件提供,上下墙片不参与,保持为弹性;屈服耗能隔墙的刚度由上下墙片和耗能元件共同提供。屈服耗能隔墙的破坏源于耗能元件连接螺栓的断裂。

2) 屈服耗能隔墙耗能元件的数量主要影响隔墙的加载刚度,两者之间近似呈线性关系。利用IDARC程序中的柱单元能够实现对屈服耗能隔墙的模拟。

3) 对于框架结构,屈服耗能隔墙能够有效减小结构的层间位移与承担的滞回耗能量比例。与增加隔墙中耗能元件数量的方法相比,增加框架中隔墙的数量将带来更为明显的减震效果。

为了提高屈服耗能隔墙的耗能能力,可以考虑

将耗能元件直接预埋,避免螺栓连接导致的滑移。同时,如何对墙片进行优化设计,以减小自重、提高施工便利性是有待解决的问题。

参考文献:

- [1] 刘小娟,蒋欢军.非结构构件基于性能的抗震研究进展[J].地震工程与工程振动,2013,33(6):54-60.
LIU X J, JIANG H J. State-of-the-art of performance-based seismic research on nonstructural components [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6):54-60. (in Chinese)
- [2] 黄连金.非结构构件抗震性能指标及分析[D].上海:同济大学,2009:1-2.
HUANG L J. Seismic performance index and analysis of non structural members [D]. Shanghai: Tongji University, 2009:1-2. (in Chinese)
- [3] 郝进锋,李艳秋,刘艳晖,等.基于建筑性能的非结构构件抗震设计研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):63-66.
HAO J F, LI Y Q, LIU Y H, et al. Study on earthquake-resistant design of nonstructural components on the basis of construction performance [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006,26(3):63-66. (in Chinese)
- [4] 秦权,聂宇.非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法[J].建筑结构学报,2001,22(3):15-20.
QIN Q, NIE Y. Seismic design and simplified analytical method of nonstructural components and equipment in buildings [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 15-20. (in Chinese)
- [5] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997,33-36.
ZHOU F L. Seismic control of engineering structures [M] Beijing: Seismological Press, 1997, 33-36. (in Chinese)
- [6] 周云,徐彤.耗能减震技术的回顾与前瞻[J].力学与实践,2000,22(5):2-7.
ZHOU Y, XU T. The state of the art and the prospect of seismic energy dissipation technology [J]. Mechanics in Engineering, 2000,22(5): 2-7. (in Chinese)
- [7] 唐兴荣,刘利花,周振轶,等.带竖缝砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(10):84-93.
TANG X R, LIU L H, ZHOU Z T, et al. Experimental study on seismic behavior of slitted masonry in-filled reinforced concrete frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 84-

93. (in Chinese)
- [8] 瞿伟廉,盛克苏,李肇胤. 设置耗能横缝的填充墙对多层框架地震反应的控制[J]. 建筑结构学报,1991,12(2):42-50.
- QU W L, SHENG K S, LI Z Y. Control of earthquake responses of multistory structures by filler wall with horizontal energy [J]. Journal of Building Structures, 1991, 12(2): 42-50. (in Chinese)
- [9] 周云,郭阳照,廖奕发,等. 带 SBS 层阻尼砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(9):21-28.
- ZHOU Y, GUO Y Z, LIAO Y F, et al. Experimental study on seismic behaviors of damped masonry in-filled reinforced concrete frame structures with SBS layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(9): 21-28. (in Chinese)
- [10] 周云,郭阳照,杨冠男,等. 阻尼砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(7):89-96.
- ZHOU Y, GUO Y Z, YANG G N, et al. Experimental study on seismic behavior of frame structure with damped infill wall [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 89-96. (in Chinese)
- [11] 林坤,刘红军,TOTOEV YURI. 无浆填充墙框架拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(2):119-127.
- LIN K, LIU H J, TOTOEV Y. Quasi-static experimental research on dry-stack masonry infill panel frame [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 119-127. (in Chinese)
- [12] 暴伟,郭瑞林,苑士岩. 半刚性连接钢框架-轻钢龙骨隔墙体系抗侧力性能研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(Sup1):154-160.
- BAO W, GUO R L, YUAN S Y. Lateral force resistance behavior of semi-rigid steel frame with light steel keel wall [J]. Journal of Building Structures, 2013,34(Sup1): 154-160. (in Chinese)
- [13] 匡彦. 屈服耗能隔墙的减震性能研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.
- KUANG Y. Anti-seismic mechanical performance research of yielding energy damping partition [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2015. (in Chinese)
- [14] REINHOM A M, ROH H, SIVASELVAN M, et al. IDARC2D Version 7. 0: A program for the inelastic damage analysis of structures s. Report No. MCEER-09-0006 [R]. National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo,2009:214-223.

(编辑 王秀玲)

附录:

附表 1 地震波记录表

Schedule 1 Recorded of the ground motions

编号	地震名称	时间(年份)	记录台站	分量	PGV/(cm·s ⁻¹)	PGA/g	(PGV/PGA)/s
1	Kobe	1995	KJMA	0	81.3	0.821	0.101 05
2	Parkfield	1966	Cholame	320	6.8	0.063	0.110 14
3	Loma Prieta	1989	Anderson Dam	340	10.0	0.077	0.132 52