

带可更换连梁的双肢剪力墙抗震性能试验研究

吕西林, 陈 云, 蒋欢军

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 设计了 1 个带有传统连梁的双肢剪力墙试件和 1 个带有可更换连梁保险丝的新型双肢剪力墙试件, 通过低周反复加载试验对 2 个试件进行了抗震性能对比研究. 研究表明, 带有可更换连梁的新型剪力墙和传统剪力墙具有相同的承载力, 其等效黏滞阻尼大于传统剪力墙, 强度退化小, 而且新型剪力墙能够将连梁的受损位置集中在保险丝, 便于震后更换.

关键词: 可更换连梁; 保险丝; 双肢剪力墙; 低周反复加载试验; 等效黏滞阻尼系数

中图分类号: TU352

文献标志码: A

Experimental Study of Seismic Performance of Coupled Shear Wall Structure with Replaceable Coupling Beams

LÜ Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A conventional coupled shear wall specimen and a new coupled shear wall specimen with replaceable coupling beams were designed and tested by low cyclic loading tests. The seismic performance of two types of shear walls were studied and compared. The results show that the two specimens have similar bearing capacity. In addition, the new shear wall possesses larger equivalent viscous damping and displays less strength degradation. Moreover, the replaceable coupling beam of new shear wall make the structural damage concentrate in the fuses, while the other parts of replaceable coupling beams keep intact, which is beneficial to replace the damaged fuse after the earthquake easily.

Key words: replaceable coupling beam; fuse; coupled shear walls; low cyclic tests; equivalent viscous damping coefficient

联肢剪力墙中的连梁不仅可以连接墙肢、增强剪力墙整体抗倾覆能力, 而且在地震时可率先屈服耗能, 保护墙肢安全. 正因为如此, 连梁在地震后往往遭到严重破坏, 修复困难. 鉴于此, 近年来, 不少研究人员研究在剪力墙连梁中安装可更换的耗能保险丝, 通过保险丝耗能, 地震受损后可更换, 有利于快速恢复结构的使用功能, 实质上这种新型的结构也可称之为可恢复功能结构^[1].

辛辛那提大学的 Fortney 等^[2-3]提出了可更换钢连梁的概念, 即对连梁的中间部分(称之为保险丝)进行削弱, 并利用其进行剪切屈服耗能, 损坏后易于更换. Dankook 大学的 Chung 等^[4]提出了在钢连梁的中部附加一个摩擦阻尼器, 通过摩擦阻尼器的耗能来增强连梁的耗能能力. 中国地震局工程力学研究所的毛晨曦等^[5]开发了一种应用可更换连梁上的新型形状记忆合金阻尼器. 韩国首尔大学的 Kim 等^[6-7]研究开发了一种应用在连梁上的复合阻尼耗能部件, 该耗能部件由高阻尼橡胶材料和两个 U 型钢板阻尼器并联在一起耗能. 加拿大多伦多大学的 Lyons^[8]发明了一种可以替换连梁的黏弹性连接阻尼器, 并申请了美国专利. 日本清水建设技术研究所的熊谷仁志等^[9-10]研究开发了在钢筋混凝土连梁的中部开缝设置连梁阻尼器, 该连梁阻尼器为一块由低屈服点钢板制作的矩形剪切板. 哈尔滨工业大学的滕军等^[11]也提出了一种连梁阻尼器.

尽管目前国内外有不少学者在研究可更换连梁, 但还没有研究人员将可更换连梁保险丝安装在大比例多层剪力墙模型上进行低周反复加载试验研究. 本文将作者开发的一种连梁保险丝安装在一片大比例三层双肢剪力墙连梁上, 与带有传统连梁的双肢剪力墙进行抗震性能对比试验, 从其破坏机理、

收稿日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(51261120377); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ13B02)

第一作者: 吕西林(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程抗震与防灾. E-mail: lxlst@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈 云(1980—), 男, 工学博士, 主要研究方向为工程抗震与结构振动控制. E-mail: chenyunhappy@163.com

承载力、强度和刚度退化性能以及滞回耗能能力等方面来全面研究新型剪力墙的抗震性能。

1 试件尺寸及配筋

根据作者之前的相关研究^[12-13],提出了一种可

更换连梁的实用设计方法,根据该设计方法设计了可更换连梁.为了阐述方便,传统剪力墙试件称之为CSW,与之相对带可更换连梁的新型剪力墙称之为FSW.传统剪力墙试件的尺寸及配筋如图1所示.新型剪力墙的墙体配筋与传统剪力墙的墙体配筋完全相同,非屈服段配筋与保险丝尺寸分别如图2、3所

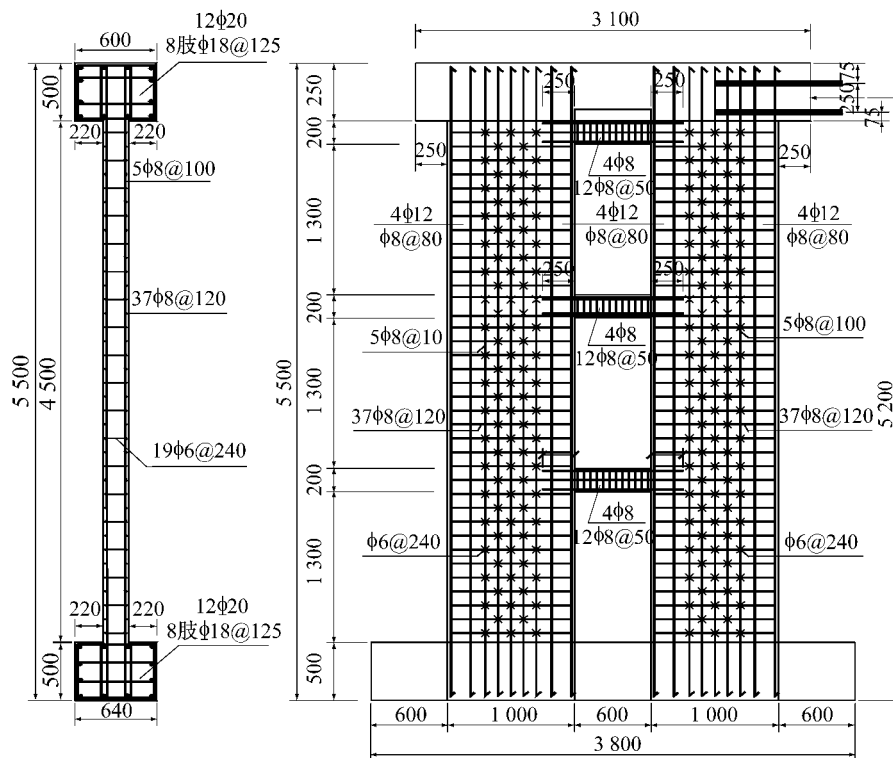


图1 CSW试件的配筋(单位:mm)

Fig.1 Reinforcement of CSW specimen(unit:mm)

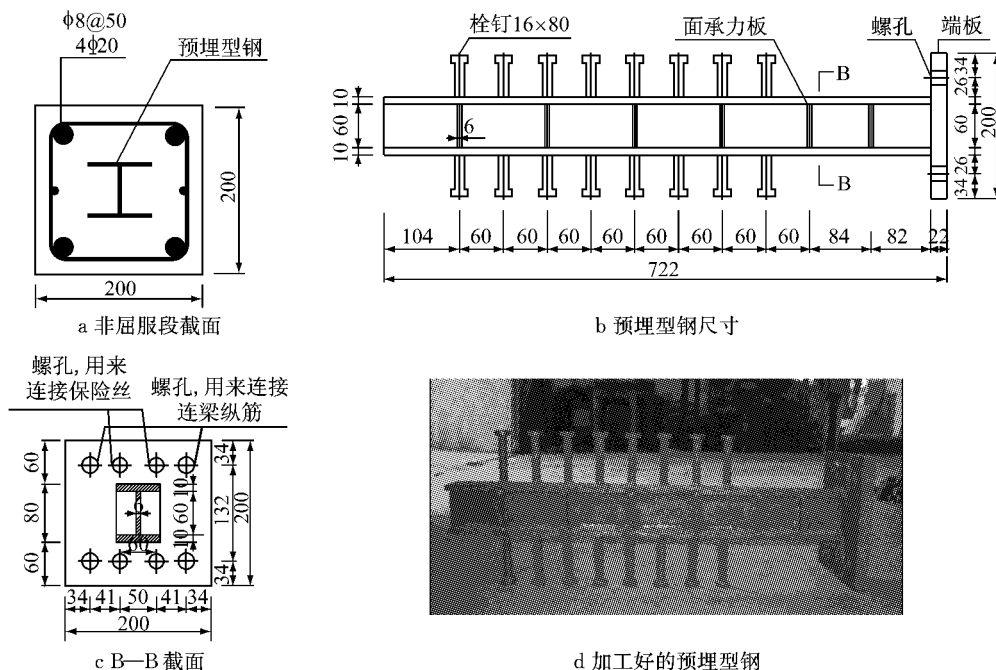


图2 非屈服段的尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.2 Dimensions and reinforcement of the non-yield segment(unit:mm)

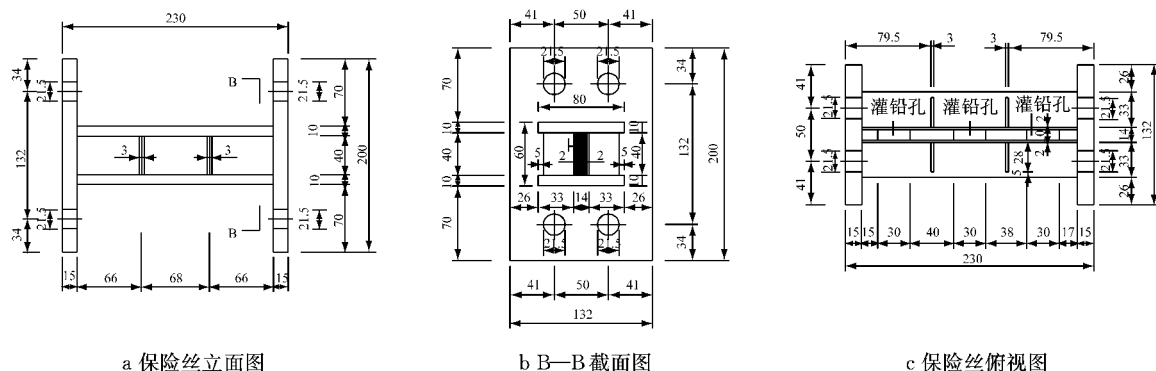


图 3 保险丝的尺寸(单位:mm)

Fig.3 Dimensions of fuses(unit:mm)

示,制成的带可更换连梁的 FSW 试件如图 4 所示。加工完成的保险丝照片及其滞回曲线见文献[14]。



图 4 FSW 试件安装图

Fig.4 Test set-up of FSW specimen

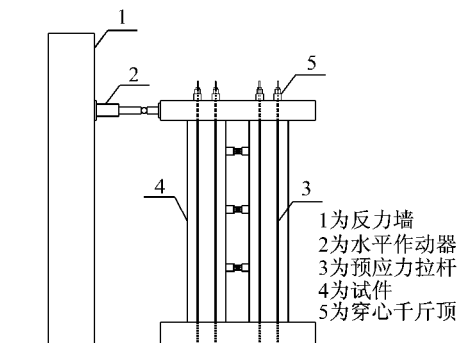


图 5 试验加载装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of specimen set-up

水平承载力至少下降到历经的最大承载力的 85%。

试验过程中,保持反复加载的连续性和均匀性,加载或卸载的速度尽可能保持一致。具体的加载制度如图 6 所示。竖向荷载一共施加 1 200 kN,2 个试件的轴压比都相同,为 0.21 左右。每个穿心千斤顶施加 150 kN,8 个千斤顶通过一个油泵供油,竖向荷载在往复推覆的过程中油压可能要降低,因此要随时观察油压的变化,每隔几个工况调整一下油压,使竖向荷载保持不变。

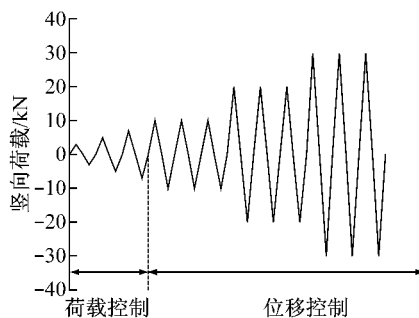


图 6 试件的加载制度

Fig.6 Loading history

2 加载方法

2.1 加载装置

试件是单悬臂构件,底端为固定端,顶端为自由端,在顶端施加竖向荷载和水平荷载。试件的底座和顶部加载梁均采用大尺寸的钢筋混凝土梁,加载梁挑出 220 mm,用来安装穿心千斤顶。在安装千斤顶的位置,底部加载梁和顶部加载梁对应的位置都开有孔洞。试件通过 8 根预应力拉杆施加竖向荷载,预应力拉杆的拉力通过加载梁上方的穿心千斤顶施加。水平荷载由 100 t 水平液压作动器施加,试验加载装置示意图见图 5。

2.2 加载制度

加载装置采用荷载控制和位移控制两种方法加载。试件屈服前采用荷载控制并分级加载,试件屈服后采用位移控制加载,每级增加的位移量为按荷载控制结束时位移的 1 倍,往复循环 3 次,直至试件的

3 试验现象

3.1 连梁部分的破坏现象

CSW 试件的一、二层连梁在水平荷载达到初步计算的屈服荷载时几乎同时出现平行于墙肢高度方向的竖向弯曲裂缝,此后连梁的裂缝不断扩展,在连梁与墙肢的交界处,裂缝贯通连接在一起,底层连梁的上下部混凝土有剥落和压碎现象出现.最终,连梁除了梁端之外的其余部位基本没有破坏,属于非常典型的连梁形成塑性铰后的弯曲破坏.图 7 显示了连梁最终的破坏形态.



图 7 CSW 连梁最终破坏形态

Fig.7 Final damage state of coupling beam of CSW

FSW 试件随着加载梁在作动器作用下产生位移,首先在连梁的非屈服段和预埋型钢伸入墙肢的部分产生部分微裂缝,随着荷载的增大,连梁上的微裂缝增多,但这些裂缝很细微且互不连通,直到试件破坏基本都没有发展.当作动器的水平位移达到 80 mm 时,保险丝中间区格的加劲肋处腹板出现裂缝,随着顶点加载位移的不断增大,保险丝加劲肋处的腹板都出现不同程度的撕裂.试验结束后虽然保险丝产生了破坏,但非屈服段基本保持完好,残余变形也很小(图 8).试验结束后可以很容易地将损坏的保险丝拆下(图 9).

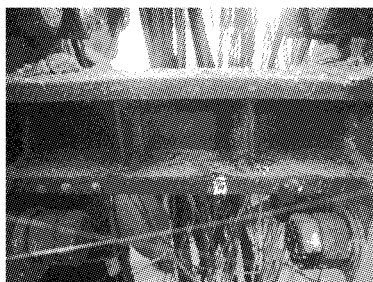


图 8 FSW 连梁保险丝最终破坏形态

Fig.8 Final damage state of fuse of FSW

3.2 墙肢部分的破坏现象

CSW 试件最终破坏形态为:1个墙肢暗柱外侧

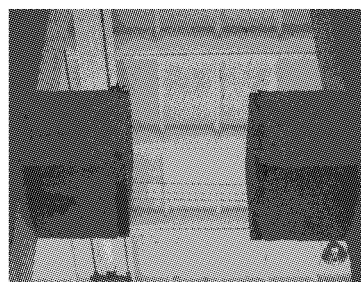


图 9 损坏保险丝的拆卸

Fig.9 Damaged fuse removal

的 2 根纵筋在反复拉压作用下拉断,内侧的 2 根纵筋完全压屈,混凝土压碎,靠近暗柱的 4 根纵向分布钢筋也完全压屈,与之连接的水平分布钢筋向外鼓出,外侧的混凝土严重剥落,墙肢外侧混凝土压碎的水平长度约为整个墙肢宽度的一半左右,墙肢内侧的混凝土压碎区很小,箍筋有轻微外鼓;另 1 个墙肢的外侧破坏较轻,箍筋外鼓,但压碎区的长度较小,暗柱纵筋也尚未露出.此墙肢内侧的混凝土仅有轻微压裂,混凝土尽管有剥落,但钢筋尚未露出,最终破坏照片见图 10.



图 10 CSW 单片墙肢最终的整体裂缝形态

Fig.10 Final cracks of single wall limb of CSW

FSW 墙肢的破坏过程和 CSW 试件类似,最后墙肢外侧的混凝土压碎,纵筋在多次反复拉压作用下拉断,试件产生破坏.图 11 为 FSW 墙肢破坏照片.FSW 试件的墙肢破坏区域小于 CSW 试件.

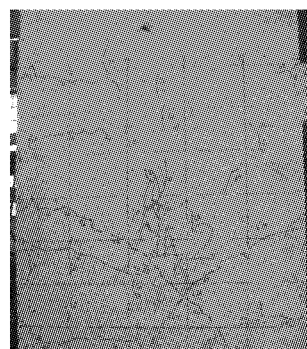


图 11 FSW 墙肢最终整体破坏形态

Fig.11 Final cracks of single wall limb of FSW

从连梁破坏形态可知,传统双肢剪力墙的连梁达到了设计目的,典型的塑性铰在连梁的端部形成,但最终连梁端部纵筋屈服,混凝土压碎脱落,导致震后修复困难.带有可更换连梁的新型剪力墙连梁基本实现了设计目标.尽管可更换连梁的非屈服段产生了部分微裂缝,但这些裂缝随着墙肢顶部加载位移的增大,并没有进一步发展,因此连梁的非屈服段以及连梁与墙肢连接的部分基本保持完好,连梁的塑性变形绝大部分集中在保险丝部分,因此保险丝最终都发生了破坏.但破坏后的保险丝由于残余变形很小,所以很容易拆卸更换,实现了损坏后可更换的目的,这是可更换连梁相比传统连梁的重大优势.

4 滞回曲线和骨架曲线

滞回曲线是构件或结构抗震性能的综合体现,也是结构进行弹塑性分析的主要依据.分别比较2个试件的荷载-顶点位移滞回曲线和骨架曲线,分析每个试件的屈服承载力、极限承载力.

如图12所示,CSW试件的滞回曲线不对称,正向的位移反应大于负向的位移反应.其原因是试件在加载过程中对试件底座没有采取较好的防滑措施,导致试件在推拉的过程中底座产生了较大的滑

移位移.在本试件加载过程中,由于试件轴压力的施加是通过预应力自平衡拉杆施加的,仅凭地锚杆施加的轴向压力不能够使底座产生较大的抗滑移摩擦力,导致底座产生了较大的滑移.

鉴于CSW试件底座产生了较大的滑移,在加载FSW试件时底座增加了防滑移装置,底座的一端通过钢梁和机械式千斤顶顶在反力墙上,另一端安装了反力架,通过机械式千斤顶顶在反力架上.如图13所示,滞回曲线基本对称,底座滑移很小,不到1 mm.

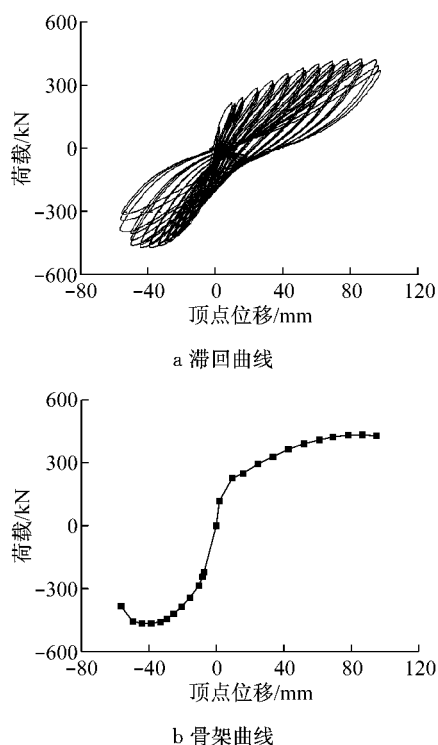


图12 CSW试件的荷载-顶点位移曲线

Fig.12 Load-top displacement curve of CSW specimen

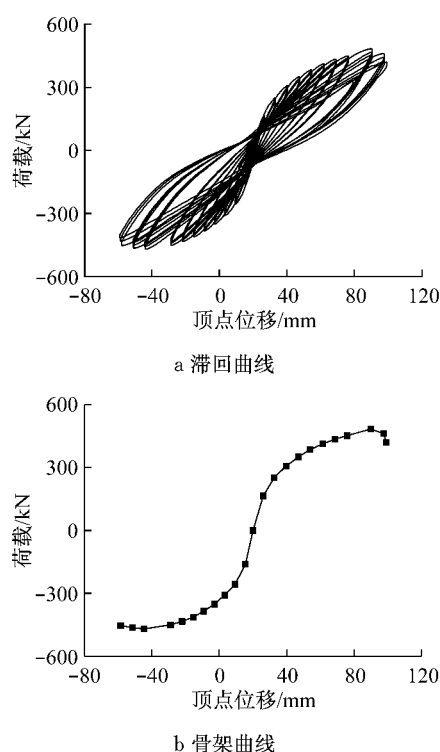


图13 FSW试件的荷载-顶点位移曲线

Fig.13 Load-top displacement curve of FSW specimen

为了对2个试件的承载力和屈服位移以及极限位移等做一个综合的比较,表1列出了2个试件的试验结果.这里屈服位移通过Park法确定^[15],该方法通过作图法在试件的骨架曲线上确定试件的屈服荷载,即以屈服荷载系数与峰值承载力的乘积为纵坐标轴上的一个点,过该点作水平线与骨架曲线交于点I,连接原点与点I的直线交过峰值承载力点的水平线于点II,过点II作横坐标轴的垂线交骨架曲线于点III,点III即为等效屈服点.极限承载力取最大承载力下降15%的值,延性比定义为在保持结构或材料的基本承载力的情况下,极限变形和初始屈服变形的比值^[16].

表 1 试验结果

Tab.1 Test results

试件	加载方向	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	峰值位移/mm	峰值荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN	延性比
CSW	正向	34.07	351.69	73.75	431.46	81.80	426.74	2.38
	负向	-24.73	-376.30	-55.10	-463.82	-77.43	-388.99	3.13
FSW	正向	28.57	393.71	55.84	484.04	63.27	419.32	2.21
	负向	-22.41	-378.88	-51.63	-468.54	-62.80	-453.03	2.80

比较 2 个试件的屈服荷载,为方便起见,取正负加载方向的平均屈服荷载进行比较. CSW 和 FSW 试件的平均屈服荷载分别为 364.00, 386.30 kN. 以 CSW 试件的屈服荷载为标准,则 FSW 试件的屈服荷载比 CSW 的高 6.1%. 然后比较峰值荷载,CSW 和 FSW 试件的平均峰值荷载分别为 447.64 kN, 476.29 kN. 同样,FSW 试件的峰值荷载大于 CSW 试件,相差 6.4%. 这些都表明根据可更换连梁的实用设计方法,新型可更换连梁不会造成双肢剪力墙试件的承载力削弱.

延性比仍然比较正负方向计算的平均延性比. CSW 和 FSW 试件的平均延性比分别为 2.75 和 2.51. 从延性比来看,FSW 的延性比略小于 CSW 试件.

5 强度退化及刚度退化

试验每级循环加载 3 次,为了充分考察试件的荷载保持能力,取每级位移第 3 次循环的峰值荷载 $P_{3,\max}$ 与第 1 次循环的峰值荷载 $P_{1,\max}$ 之比来计算强度退化率. 在反复荷载作用下,随着侧向荷载的增加,试件的刚度也在不断退化,试件的刚度采用等效割线刚度.

如图 14 所示,首先比较试件在正向加载时的强度退化,当构件的延性比小于 1.78 时,FSW 试件的强度退化小于 CSW 试件;当试件的延性比大于 1.78 时,FSW 试件的强度退化大于 CSW 试件. 如图 15 所示,负向加载时,FSW 试件的强度退化在延

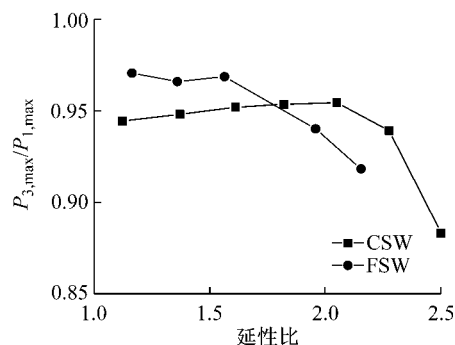


图 14 正向加载时试件的强度退化曲线

Fig.14 Strength degradation curves under positive loading

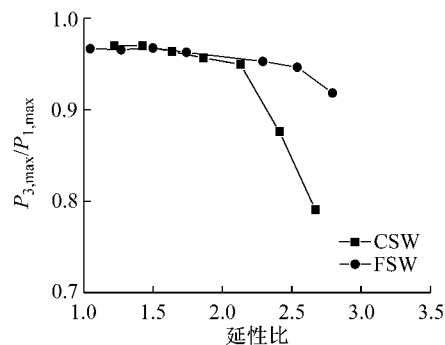


图 15 负向加载时试件的强度退化曲线

Fig.15 Strength degradation curves under negative loading

性比小于 2.14 时与 CSW 试件类似,但当延性比大于 2.14 时,CSW 试件随着加载位移的增大,强度退化越来越严重,而 FSW 试件的强度退化较小,最终 CSW 试件的强度退化达到 21%,而 FSW 试件的强度退化都小于 10%. 因此带有可更换连梁的新型剪力墙的强度退化较小,传统剪力墙的强度退化较大.

如图 16 和 17 可见,2 个试件的刚度退化速度比较相近,特别是在负向加载时 2 个试件的刚度退化规律基本一致. 总体来看,带有可更换连梁的新型剪力墙与传统剪力墙的刚度退化规律基本一致.

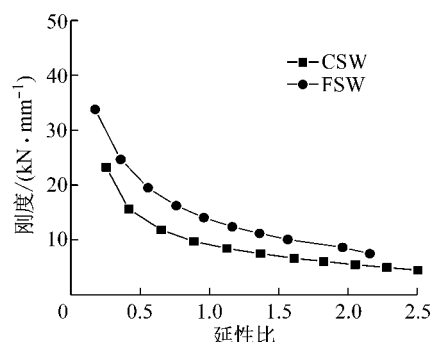


图 16 正向加载时试件的刚度退化曲线

Fig.16 Stiffness degradation curves under positive loading

6 耗能性能评价

等效黏滞阻尼系数 h_e 经常被用来评价结构的耗能性能,表征构件的滞回环与矩形滞回环的接近

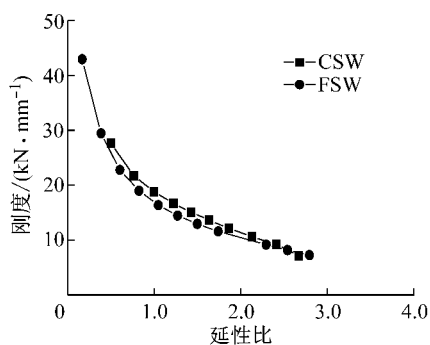


图 17 负向加载时试件的刚度退化曲线

Fig. 17 Stiffness degradation curves under negative loading

程度. 等效黏滞阻尼系数越大, 表征构件在该位移下耗散的能量越多^[17].

由图 18 可知, FSW 试件的等效黏滞阻尼系数在不同的延性比下均大于 CSW 试件, 这表明在整个加载过程中, FSW 试件的耗能能力较强, 可更换连梁保险丝发挥了较好地耗能作用.

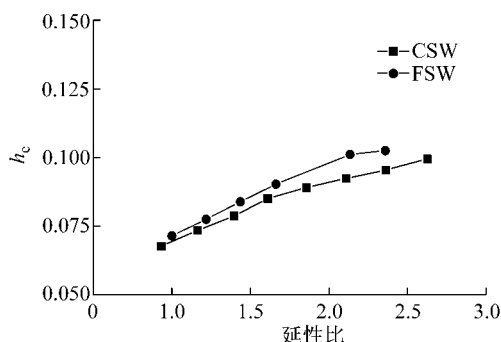


图 18 等效黏滞阻尼系数比较

Fig. 18 Comparison of the equivalent viscous damping

7 应变分析

CSW 试件的连梁端部和墙脚都形成了塑性铰, 而且通过对剪力墙暗柱纵筋的应变分析可知, CSW 试件墙肢第 2 层的暗柱纵筋也产生了屈服, 而 FSW 试件的暗柱纵筋屈服区域仅限于第 1 层. 这表明, CSW 试件的墙体损伤范围大于 FSW 试件, 考虑到 FSW 试件的等效黏滞阻尼系数仍然大于 CSW 试件, 所以 FSW 试件的可更换连梁保险丝应该耗散了更多地震能量.

保险丝腹板不仅可以较好地发挥滞回耗能作用, 而且保险丝的端部也通常发生弯曲屈服, 也可以发挥较好的耗能作用. 图 19 所示为保险丝翼缘应变随顶点荷载的变化曲线. 由图可知, 连梁保险丝翼缘

的应变都超过了其屈服应变($1\ 670 \times 10^{-6}$), 滞回曲线非常饱满, 耗能能力较强. 因此, 保险丝的腹板和翼缘均可以发挥优良的耗能作用.

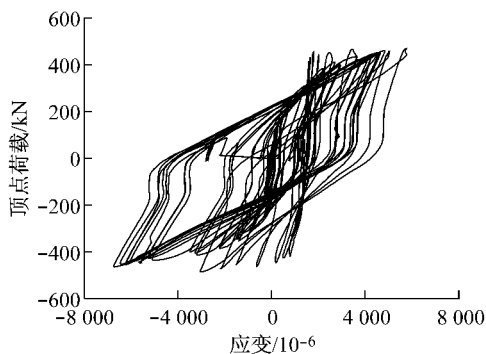


图 19 连梁保险丝翼缘应变-顶点荷载曲线

Fig. 19 Axial strain-top load curve of flange of fuse

连梁非屈服段的纵筋、箍筋、预埋型钢的翼缘和腹板的应变都非常小, 应变绝对值的最大值不到 $1\ 200 \times 10^{-6}$, 都远小于相应的屈服应变, 表明尽管非屈服段的混凝土产生了部分微裂缝, 但非屈服段关键受力组件都处于弹性状态, 没有产生塑性损伤, 这非常有利于震后实现对保险丝的更换. 图 20 表示连梁非屈服段纵筋的应变-顶点荷载曲线, 可以看出非屈服段纵筋的应变很小, 远远小于其相应的屈服应变.

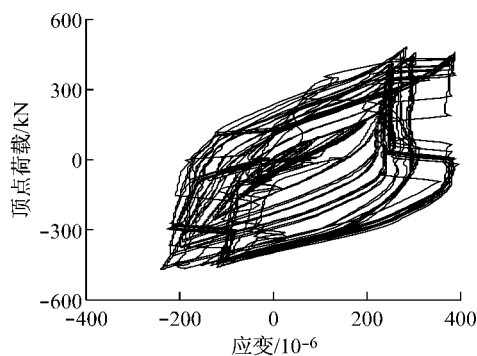


图 20 非屈服段纵筋的应变-顶点荷载曲线

Fig. 20 Axial strain-top load curve of longitudinal reinforcement of non-yield segment

8 结论

本文主要通过低周反复加载对比试验研究了 1 个带传统钢筋混凝土连梁的双肢剪力墙试件与 1 个带可更换连梁的新型双肢剪力墙试件的抗震性能. 主要结论如下:

(1) 通过试件的破坏形态对比分析发现, 传统剪

力墙试件的连梁破坏集中在连梁的端部,连梁端部形成了典型的塑性铰,而新型剪力墙的连梁受损位置集中在保险丝,受损的保险丝很容易拆卸更换。

(2)通过新型剪力墙试件的承载力与传统剪力墙试件的承载力比较,证实了带有传统连梁和可更换连梁的剪力墙试件具有相似的承载力,可更换连梁不会削弱双肢剪力墙的承载力。

(3)通过比较 2 个试件的强度退化、刚度退化、等效黏滞阻尼系数,可以发现新型剪力墙试件的强度退化较小,刚度退化规律与传统剪力墙试件基本一致,总体等效黏滞阻尼系数也大于传统剪力墙试件。

(4)除此之外,传统剪力墙试件的墙体塑性铰延伸到了第 2 层,墙体的损伤范围更大,而新型剪力墙试件的墙肢塑性铰仅限于第 1 层,墙肢的破坏范围较小;保险丝的腹板和翼缘的滞回曲线饱满,表明保险丝可以耗散大量地震能量;连梁非屈服段的预埋型钢以及非屈服段的纵筋应变都很小,远远小于屈服应变,表明非屈服段基本完好,震后只需对损坏后的保险丝更换即可。

参考文献:

- [1] 吕西林,陈云,毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(7): 941.
LÜ Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(7): 941.
- [2] Fortney P J, Shahrooz B M, Rassati G A. Large-scale testing of a replaceable “fuse” steel coupling beam [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12): 1801.
- [3] Rassati G A, Fortney P J, Shahrooz B M. Design of innovative coupling beams for use in hybrid coupled core wall systems [C]// NSF CMMI Research and Innovation Conference 2009. Honolulu: [s. n.], 2009: 0653920.
- [4] Chung H S, Moon B W, Lee S K, et al. Seismic performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(7): 807.
- [5] MAO C X, WANG Z Y, ZHANG L Q, et al. Seismic performance of RC frame-shear wall structure with novel shape memory alloy dampers in coupling beams [C/CD]// 15WCEE. Lisbon: [s. n.], 2012.
- [6] Kim H J, Choi K S, Oh S H, et al. Comparative study on seismic performance of conventional RC coupling beams and hybrid energy dissipative coupling beams used for RC shear walls [C/CD]// 15WCEE. Lisbon: [s. n.], 2012.
- [7] Oh S H, Choi K Y, Kim H J, et al. Experimental validation on dynamic response of RC shear wall systems coupled with hybrid energy dissipative devices [C/CD]// 15WCEE. Lisbon: [s. n.], 2012.
- [8] Lyons R M, Christopoulos C, Montgomery M S. Enhancing the seismic performance of RC coupled wall high-rise buildings with viscoelastic coupling dampers [C/CD] // 15WCEE. Lisbon: [s. n.], 2012.
- [9] 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄. 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁の復元力特性[J]. 日本建築学会構造系論文典, 2009, 74(643): 1677.
- [10] 熊谷仁志, 島崎和司, 林静雄. 中央部に鋼材ダンパーを有する RC 境界梁に関する実験的研究[J]. 日本建築学会構造系論文典, 2009, 74(638): 755.
- [11] 滕军, 马伯涛, 李卫华, 等. 联肢剪力墙连梁阻尼器伪静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12): 92.
TENG Jun, MA Botao, LI Weihua, et al. Pseudo-static test for coupling beam damper of coupled shear wall structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 31(12): 92.
- [12] CHEN Yun, LÜ Xilin. New replaceable coupling beams for shear wall structures [C/CD] // 15WCEE. Lisbon: [s. n.], 2012.
- [13] LÜ Xilin, MAO Yuanjun, CHEN Yun. Test and analysis on shear walls with replaceable devices under cyclic loading for earthquake resilient structures [C/CD] // Proceedings of 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2012.
- [14] 吕西林, 陈云, 蒋欢军. 新型可更换连梁研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 8.
LÜ Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun. Research progress for new replaceable coupling beams [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 8.
- [15] 帕克 R, 波利 T. 钢筋混凝土结构[M]. 秦文钺, 等译. 重庆: 重庆大学出版社, 1985.
Park R, Paulay T. Reinforced concrete structures [M]. Translated by QIN Wenyue, et al. Chongqing: Chongqing University Press, 1985.
- [16] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHANG Xinpei. Nonlinear analysis of seismic structure of reinforced concrete [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [17] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2005.
HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2005.