

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.004



钢板带加强型型钢混凝土低矮剪力墙 抗震性能试验研究

陈默然^a, 高永^{a,b}, 周珉^a, 孙林^a, 高龙^a, 黄宗明^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为进一步改善一字型内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的抗震性能,设计和完成了 2 个剪跨比为 1.0 的钢板带加强型内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙低周往复水平加载试验,并与 1 个未设置钢板带的内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙进行对比分析。试验结果表明:钢板带的设置使剪力墙的水平承载力有显著提升,极限位移角提高 20% 左右,满足了相关规范极限位移角大于 1/100 的要求;钢板带的设置使试件破坏模式发生变化,总耗能有大幅度提升;钢板带的设置要适度,不能过强,以免形成新的薄弱区。

关键词:型钢混凝土;剪力墙;钢板带;低周反复加载;抗震性能

中图分类号:TU398.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0030-07

Experimental analysis of seismic behavior of steel reinforced concrete squat shear walls with steel plates

Chen Moran^a, Gao Yong^{a,b}, Zhou Min^a, Sun Lin^a, Gao Long^a, Huang Zongming^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to improve seismic behavior of one-shaped concrete squat shear wall with built in vertical steels in the rectangular section, two concrete squat shear wall specimens were designed and fabricated with an aspect ratio of 1.0, which enhanced by horizontal steel plates other than built-in vertical steels in the sections. Mechanical behaviors of those specimens were tested under reversed cyclic lateral loads and a constant vertical load. The test results were compared with a specimen without enhancement of horizontal steel plates, which indicates that the peak lateral loads of specimens with steel plates are improved significantly. The ultimate drift ratios of specimens with steel plates are improved by 20% and are larger than 1/100, which meets the relevant specifications. Steel plates change the failure modes of specimens, and the total energy dissipation of specimens with steel plates are improved substantially. The enhancement should be kept in a suitable range, otherwise new weak areas will be formed if the horizontal steel plates are too strong.

Keywords: steel reinforced concrete; shear wall; steel plate; cyclic load; seismic behavior

收稿日期:2017-01-07

基金项目:国家自然科学基金(51178486)

作者简介:陈默然(1991-),男,主要从事结构抗震研究,(E-mail)20141602086t@cqu.edu.cn.

Received:2017-01-07

Foundation item:National Natural Science Foundation of China(No. 51178486)

Author brief:Chen Moran(1991-), main research interest:structural seismic, (E-mail) 20141602086t@cqu.edu.cn.

剪跨比较小的钢筋混凝土低矮剪力墙以剪切变形为主,抗震性能较差。为了提高低矮剪力墙的性能,学者们提出了在混凝土剪力墙中设置钢框架、斜撑、钢板等措施,并进行了大量的试验研究。曹万林等^[1]、李一松等^[2]、伍云天等^[3]、李立仁等^[4]对内置型钢框架或斜撑的低矮混凝土剪力墙进行了试验研究,Astaneh-Asl^[5]、Ozaki 等^[6]、Zhao 等^[7]、聂建国等^[8]、Altin 等^[9]、纪晓东等^[10]、Rassouli 等^[11]对钢板混凝土低矮剪力墙进行了试验研究,这些措施虽然能显著提高低矮剪力墙的抗震性能,但多存在构造复杂、施工质量难以保证等不足之处。

内置竖向型钢混凝土剪力墙施工比较简单,而且竖向型钢可以降低剪力墙的轴压比。为了研究内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的抗震性能,魏勇等^[12]、梁兴文等^[13]进行了边框设置竖向型钢一字型低矮混凝土剪力墙的试验研究;吕西林等^[14]进行了 3 片剪跨比为 0.8 的内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的试验,结果表明:中部配置型钢使剪力墙抗震性能有了明显提高,中部型钢含钢率越大延性越好;作者所在课题组的张力等^[15]进行了 5 片内置型钢混凝土低矮剪力墙的试验,结果表明:腹板中部配置竖向型钢限制了对角斜裂缝的发展,能有效改善低矮剪力墙的变形能力及耗能能力,增大试件破坏时的极限位移,极限位移角虽有所提高,但仍然只有 1/100 左右。在腹板中部配置竖向型钢后,中部型钢有效地限制了对角主斜裂缝的开展,破坏模式由原来的主拉应力对角交叉通缝,转变为墙体角部沿 45 度线至中部型钢区域的剪压破坏。要进一步提高墙体的变形能力,就必须提高此区域内混凝土的极限压应力和极限压应变,避免剪压斜裂缝的过早和集

中出现。在文献[15]中剪力墙试件 SRCW8 的基础上,提出了在墙体底部增设钢板带的加强方案,拟通过钢板带和内置竖向型钢组成横、纵向约束,一方面,形成约束混凝土,提高此范围内混凝土的极限压应力和极限压应变;另一方面,通过横向钢板限制剪压区从墙体角部到中部型钢的直接贯通,使破坏区域更加均匀分散,提高耗能能力,从而达到进一步改善内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的抗震性能的目的。设计并完成了 2 个一字型钢板带加强型型钢混凝土低矮剪力墙低周反复加载试验,研究钢板带加强型型钢混凝土低矮剪力墙的抗震性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

3 个剪力墙试件的编号分别为 SRCW8、SRCW18 和 SRCW19,其中 SRCW8 为内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙,SRCW18 和 SRCW19 为钢板带加强型型钢混凝土低矮剪力墙。各试件均为矩形截面,外形尺寸相同,墙高 990 mm,墙宽 1 200 mm,墙厚 100 mm,剪跨比为 1.0。各试件墙顶设置钢筋混凝土加载梁,墙底设置地梁,与剪力墙整体浇筑,加载梁高为 420 mm,加载点位于加载梁中心。各试件的钢筋和竖向型钢配置相同,如图 1(c)所示,图中阴影部分为暗柱区。SRCW18 和 SRCW19 设置的外包钢板带如图 1(a)、(b),其中,钢板带宽 50 mm,厚 5 mm,SRCW18 墙体前后两侧的钢板带与型钢焊接,SRCW19 的中部型钢相对其他试件(图 1(c))旋转 90°放置,两侧钢板带通过 6 道对拉螺栓拉结,研究钢板带的配置方式对剪力墙抗震性能的影响。

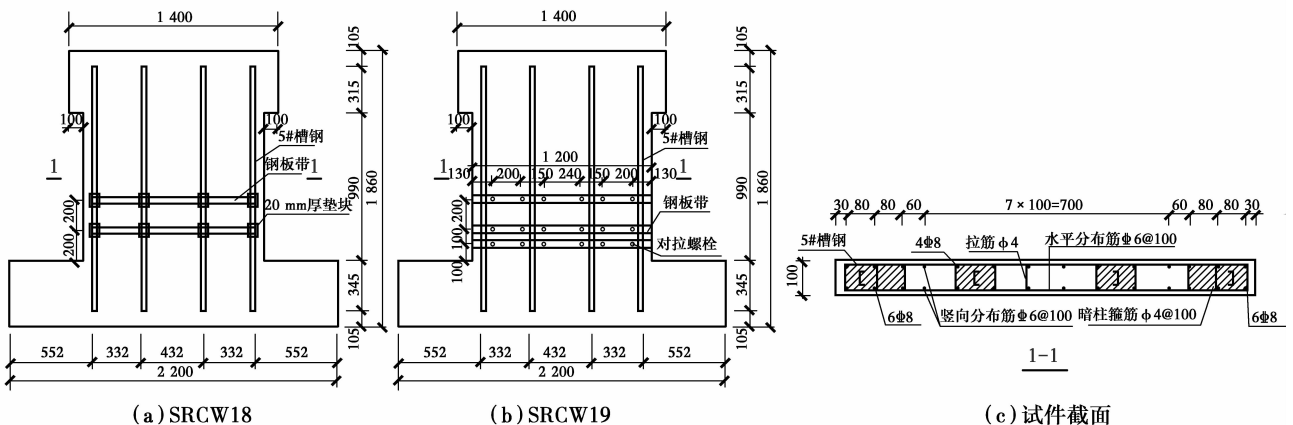


图 1 试件设计

Fig. 1 Design of the specimens

1.2 材料特性

试验设计的混凝土强度等级为 C40,各试件实测混凝土立方体抗压强度平均值为:46.38 MPa (SRCW8)、54.72 MPa (SRCW18)、48.21 MPa (SRCW19)。试件所用钢材实测材料性能见表 1,其中,槽钢和钢板强度等级为 Q235,对拉螺栓杆直径为 18 mm,强度等级为 8.8 级。

表 1 钢材材料性能
Table 1 Steel material properties

试件编号	σ_s /MPa	σ_b /MPa	E_s /MPa
SRCW8 槽钢	452.5	565	184.5
SRCW18 槽钢	330.9	446.7	180.4
SRCW19 槽钢	324.5	436.3	180.4
6 mm 钢筋	465	661	187.5
8 mm 钢筋	424	605	183
4 mm 铁丝	245.5	341.5	192
钢板带	262.1	420.4	201.9

注: σ_s 为屈服强度; σ_b 为极限强度; E_s 为弹性模量

1.3 加载方式和加载制度

试验为竖向荷载作用下的水平低周反复加载试验,试验轴压比为 0.224,加载装置如图 2 所示。加载制度为:先一次性施加竖向荷载至预定值,试件竖向力通过加载梁均匀加载至剪力墙墙体,并在试验过程中保持恒定;竖向荷载施加完成后进行正向(千斤顶推)和反向(千斤顶拉)水平力加载,直至试件开裂;开裂后转为正反向水平位移加载,以开裂荷载对应的位移为基准,以 0.5 mm 级差为位移增量进行反复加载,每级位移加载循环两次,直至试件破坏。

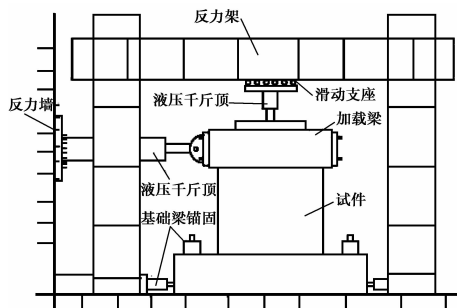
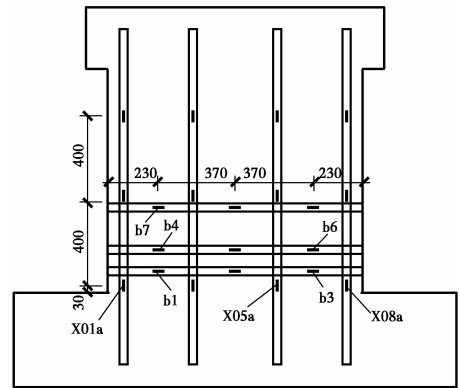


图 2 试验加载装置示意

Fig. 2 Load device

1.4 量测内容

试件型钢和钢板带应变片布置如图 3 所示,试验量测的内容为:施加的竖向荷载和水平荷载;试件的位移;钢筋、型钢和钢板带的应变;试验过程中观察描绘裂缝开展情况和最终的破坏情况。



注:编号X为型钢竖向应变片;编号b为钢板带横向应变片

图 3 型钢和钢板带应变片布置

Fig. 3 Strain gauges on steel

2 试验结果与分析

2.1 破坏过程

图 4(a)、(b)、(c)为各试件加载初期裂缝图,此时,各试件位移加载至 2 mm 左右。初期裂缝开展过程类似:首先,在墙体根部边缘出现水平裂缝, SRCW8 和 SRCW19 沿中部型钢也同时出现较短的交叉斜裂缝,但 SRCW18 沿中部型钢还出现两道竖向贯穿裂缝,截止至上部钢板带;而后,墙体端部水平裂缝向上扩展,逐渐转变为近似 45° 的斜裂缝,原有水平裂缝向墙体内部斜向延伸,沿中部型钢的交叉短斜裂缝变密。

SRCW8 在正反向加载至 2.9 mm 和 2.8 mm 时,中部型钢区交叉短斜裂缝在距墙底 400 mm 高处,沿墙体对角线向墙根扩展,图 4(d)为 SRCW8 水平荷载达到峰值时的裂缝图,此时正反向加载至 5.3 mm 和 5.2 mm,可见墙体对角线方向的斜裂缝和中部型钢区交叉短斜裂缝开展较密集,尤其边缘和中部型钢之间 400 mm 高范围内墙体的 45° 短斜裂缝数量较多; SRCW18 在水平位移加载至 4.2 mm 时,边缘与中部型钢之间 400 mm 高范围内的墙板也出现短斜裂缝, SRCW18 在正反向加载至 6.5 mm 和 7.3 mm 时达到峰值,由图 4(e)可见,分布于整片墙的斜裂缝比 SRCW8 更密集,但钢板带以下墙根部的短斜裂缝出现较少;水平荷载达到峰值之前, SRCW19 的对角斜裂缝和中部型钢区交叉短斜裂缝不断加密,但第 2 道钢板带以下斜裂缝数量较少,图 4(f)为 SRCW19 水平荷载达到峰值时的裂缝图,此时正反向加载至 8.6 mm 和 7.0 mm,可见,第 2 道钢板带以上墙体斜裂缝开展比 SRCW8 和 SRCW18 更密集,分布范围更广。总之, SRCW8

墙体底部裂缝分布更密集, SRCW18 裂缝分布较均匀, SRCW19 墙体上部裂缝更密集。

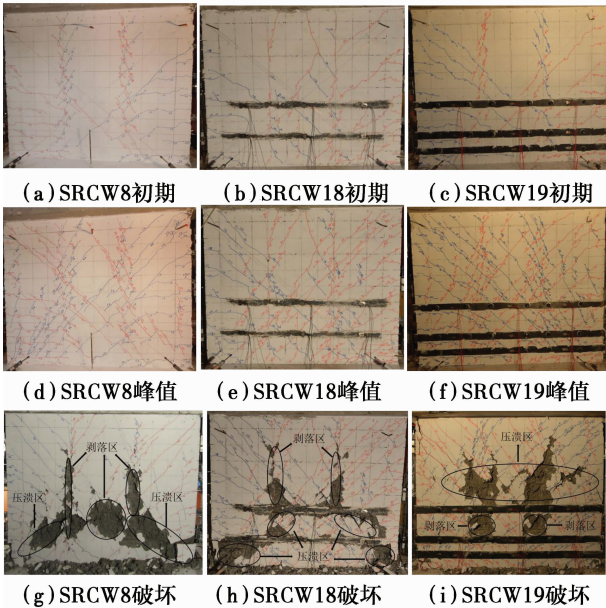


图 4 试件裂缝开展

Fig. 4 Cracking development of specimens

文献[15]的试验表明:沿中部型钢暗柱区混凝土出现交叉短斜裂缝和剥落现象,影响墙体的整体受力性能。为分析是否是因为中部型钢的设置减小墙板混凝土的厚度所引起, SRCW19 的中部型钢放置方式较其他试件旋转了 90° , 以此对比型钢放置方式对试件的影响。从实验现象可知, 各试件中间暗柱区混凝土均在加载初期开裂, 说明中间型钢放置方式对初期混凝土开裂无影响; SRCW8 和 SRCW18 水平位移加载至 5.3 mm 和 6.2 mm 时, 中间暗柱混凝土开始剥落, SRCW19 加载至 8.5 mm 左右时中间暗柱区开始剥落, 说明型钢转 90° 放置, 使暗柱混凝土厚度增加, 剥落现象被推迟。

图 4(g)、(h)、(i) 为各试件破坏时的形态, 虽均为腹板压溃, 但位置和范围不同。SRCW8 在承载力达到峰值之后, 沿中部型钢混凝土在反复荷载作用下不断剥落, 墙体根部混凝土保护层也出现保护层剥落和压溃现象, 正向加载至 15.03 mm 时, 墙体根部 400 mm 高范围内边缘暗柱与中部型钢之间的混凝土沿近似 45° 方向被压溃, 试件失去承载力破坏; SRCW18 在峰值之后, 沿中部型钢的混凝土不断剥落, 墙体根部混凝土出现保护层剥落和局部压溃现象, 反向加载至 12.57 mm 时, 墙体根部钢板带以下的混凝土由下部钢板带分为上下两段沿近似 45° 方向被压溃, 破坏区较 SRCW8 明显更均匀, 同时可以

观察到边缘暗柱型钢在墙底位置已屈曲, 钢板带外鼓; SRCW19 加载至峰值后, 沿中部型钢的混凝土大面积剥落, 且范围比其它试件大, 墙根混凝土保护层只有轻微剥落, 正向加载至 12.01 mm 时, 钢板带以上接近整个墙宽范围内的混凝土沿近似 45° 方向被压溃, 破坏区域集中, 而钢板带以下墙体除局部混凝土剥落外, 没有实质性破坏。试件 SRCW19 钢板带外鼓程度相比 SRCW18 要小, 说明当钢板带的自由边较长时, 适当添加对拉螺栓以保证约束效果是必要的。

2.2 滞回曲线与耗能能力

图 5(a)、(b)、(c) 为 3 个试件的加载点处水平力—位移滞回曲线。比较而言, SRCW18 的滞回曲线最饱满, 尤其是最后几个加载循环滞回曲线; 而 SRCW8 和 SRCW19 的滞回曲线捏缩现象较明显。图 5(d) 是各试件骨架曲线的比较, 各试件的初始刚度比较接近, 原因是 3 个试件的钢筋和竖向型钢配置相同, SRCW18 和 SRCW19 的峰值荷载和峰值位移比 SRCW8 大, 原因是钢板带为混凝土提供了有效的约束, 提高了剪力墙的变形能力。峰值荷载后, SRCW18 的骨架曲线下降段相比 SRCW8 和 SRCW19 更平缓, 持荷能力更好。

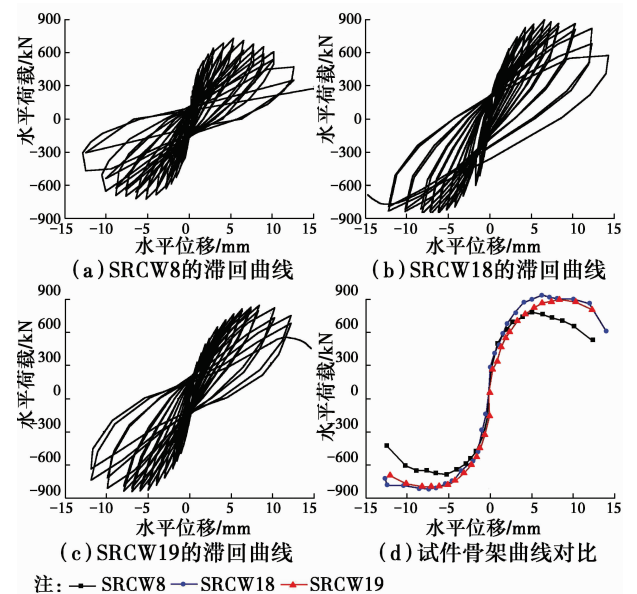


图 5 滞回曲线和骨架曲线

Fig. 5 Lateral load-displacement responses of specimens

剪力墙的耗能性能是评价其抗震性能的重要指标。由于试验中各试件的加载细节有些差异, 而且, 到最终破坏时各试件的总加载步也不一致, 所以, 只能采用构件直到认定破坏时的总耗能进行比较, 即取各试件开裂后到破坏的各级循环的滞回曲线包围

的面积总和作为总耗能进行对比。SRCW18 的总耗能比 SRCW8 高 73%，SRCW19 的总耗能比 SRCW8 高 40%，设置两道钢板带的剪力墙 SRCW18 的耗能能力要好于设置 3 道钢板带的 SRCW19。

2.3 承载力和变形能力

试件加载点的屈服水平力 F_y 、屈服位移 Δ_y 、峰值水平力 F_p 、峰值位移 Δ_p 、极限位移 Δ_u 、极限位移角 θ_u 和延性系数 μ_Δ 见表 2。由于试件的骨架曲线没有明显的屈服点，用 Park 法确定屈服力 F_y 和屈服位移 Δ_y ；极限位移 Δ_u 通过承载力下降至峰值的 85% 时对应的位移确定，若试件破坏时承载力还未下降至 85% 以下，则取试件破坏前的最大位移；定义位移延性系数为 $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$ ；定义极限位移角为 $\theta_u =$

Δ_u/h ，其中 h 为加载点至墙底的距离。试验结果表明：SRCW18 的水平承载力平均值比 SRCW8 高 20%，SRCW19 的承载力比 SRCW8 高 16%，说明钢板带的设置能有效提高剪力墙的水平承载力；设置钢板带的试件峰值位移也有大幅提高，SRCW18 和 SRCW19 的极限位移角比较接近，均比 SRCW8 提高了 20% 左右，且均满足相关规范^[16] 极限位移角大于 1/100 的要求，钢板带约束墙体底部混凝土，推迟了腹板底部混凝土的压溃破坏，说明钢板带的设置能有效提高试件变形能力。但设置钢板带试件的位移延性系数却比 SRCW8 低 16% 左右，这说明，对于所研究的没有明显屈服点的剪力墙类试件，应用极限位移角作为评判变形能力的标准更合理。

表 2 试件承载能力和变形能力

Table 2 Load bearing and deformation capacity of specimens

试件编号	加载方向	屈服		峰值		极限		μ_Δ
		F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	Δ_u/mm	θ_u	
SRCW8	正向	530.76	1.70	731.02	5.3	9.89	1/121	5.82
	反向	544.48	1.73	724.95	5.2	10.45	1/115	6.04
	平均或最大	537.62	1.72	727.98	5.3	10.45	1/115	5.93
SRCW18	正向	694.52	2.84	889.55	6.5	12.65	1/95	4.46
	反向	511.85	2.22	863.03	7.3	12.57	1/96	5.66
	平均或最大	603.19	2.53	876.29	6.9	12.65	1/95	5.06
SRCW19	正向	658.48	3.56	848.84	8.6	12.50	1/96	3.52
	反向	605.81	1.77	845.73	7.0	12.00	1/100	6.78
	平均或最大	632.15	2.67	847.29	7.8	12.50	1/96	5.15

2.4 型钢和钢板带的应变

各试件型钢和钢板带的应变曲线如图 6 所示。由图 6(a)、(b)、(c) 可知，在剪力墙底部截面，各试件的边缘暗柱型钢在试件破坏前均已受压屈服，型钢充分发挥抗压作用；SRCW8 边缘暗柱型钢受拉未屈服，SRCW18 和 SRCW19 边缘暗柱型钢均受拉屈服，但 SRCW19 的拉应变明显比 SRCW18 小，印证了前述总体变形的规律。由图 6(d)、(e)、(f) 可知，各试件中部型钢受压、受拉均未屈服，但 SRCW18 和 SRCW19 的中部型钢拉应变均比 SRCW8 大，上述试验结果说明钢板带提高了剪力墙整体性，使型钢发挥作用更好。

图 6(g)、(h) 为 SRCW18 和 SRCW19 的钢板带的应变对比。由图 6(g) 可知，SRCW18 的上下两道钢板带在加载初期应变比较接近，均未屈服。峰值荷载后，下部钢板带应变快速增长且达到受拉屈服，

上部钢板带在试件破坏前仍未屈服，原因是 SRCW18 的钢板带下部混凝土在试件破坏之前压溃严重，说明下部钢板带发挥了主要的约束混凝土的作用。由图 6(h) 可知，SRCW19 的 3 道钢板带在试验过程中均未达到屈服，钢板带应变从上到下依次递减，原因是 SRCW19 底部墙体被钢板带约束得过强，上部墙体成为薄弱区，被斜向压溃破坏，上部钢板带更靠近压溃区，发挥约束作用更强。

分析试验结果不难发现，SRCW19 试件与 SRCW18 试件相比，在相同的范围内增加了一道钢板带，而且通过对拉螺栓又在一定程度上加强了每道钢板带的约束能力，但效果却适得其反，水平承载力略小，极限位移相当，但破坏区域更加集中，总耗能能力降低约 20%，其抗震性能反而更差。说明底部墙体的钢板带约束必须适度，避免形成上部薄弱区。

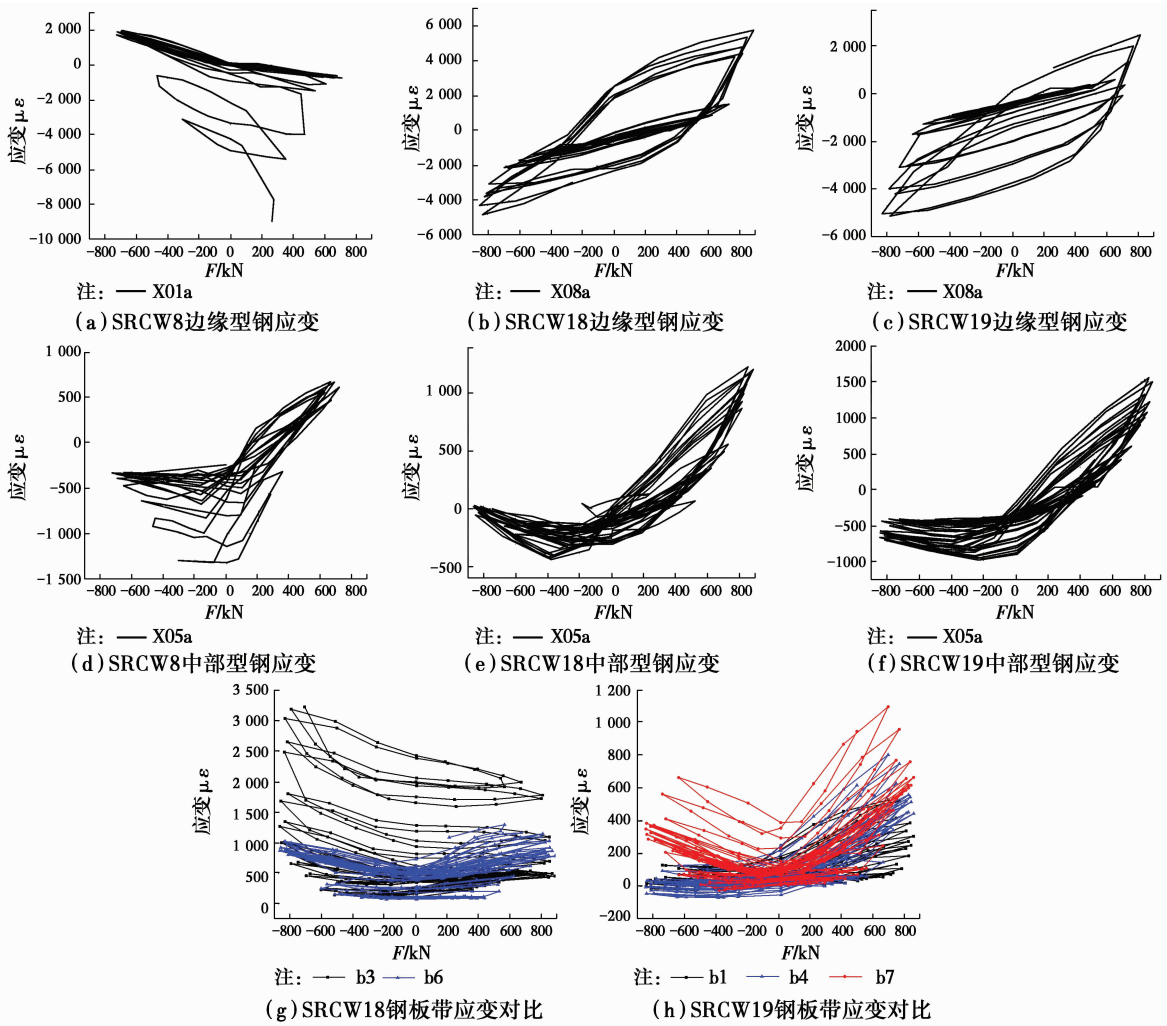


图6 型钢和钢板带应变

Fig. 6 Strains of steel

3 结论

由3个内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的试验,得出以下结论:

1) 钢板带的适当设置能进一步改善内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的变形性能,使破坏区分布更加均匀,试件的总耗能提高70%左右,极限位移角提高20%左右,能够满足现行规范极限位移角大于1/100的要求。

2) 钢板带的设置也能显著提高内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙的水平承载力。

3) 钢板带对剪力墙约束从墙底到墙顶应该满足由强到弱的渐变规律,要避免剪力墙底部约束过强形成局部刚性区域,导致墙体的集中破坏区域上移。本文的试验非常有限,只是进行了探索性的工作,要提出能够用于工程设计的钢板带设置具体方法,还需要更进一步的工作。

参考文献:

- [1] 曹万林,张建伟,田宝发,等.带暗支撑低矮剪力墙抗震性能试验及承载力计算[J].土木工程学报,2004,37(3):44-51.
CAO W L, ZHANG J W, TIAN B F, et al. Experimental study on aseismatic property and calculation of load-carrying capacity for low-rise RC shear walls with concrete bracings [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 44-51. (in Chinese)
- [2] 李一松,李国强,崔大光.型钢混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):92-102.
LI Y S, LI G Q, CUI D G. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete low-rise shear wall [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 92-102. (in Chinese)

- [3] WU Y, KANG D, YANG Y B. Seismic performance of steel and concrete composite shear walls with embedded steel truss for use in high-rise buildings [J]. *Engineering Structures*, 2016, 125: 39-53.
- [4] 李立仁, 华川. 暗斜撑对型钢-高强混凝土低矮剪力墙抗震性能影响的研究 [J]. *四川建筑*, 2012, 32 (3): 159-161.
LI L R, HU C. Influence of bracing on seismic behavior of steel reinforced high-strength concrete low-rise shear walls [J]. *Sichuan Architecture*, 2012, 32 (3): 159-161. (in Chinese)
- [5] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls [M]. USA: Structural Steel Educational Council, 2002.
- [6] OZAKI M, AKITA S, OSUGA H, et al. Study on steel plate reinforced concrete panels subjected to cyclic in-plane shear [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 228 (1): 225-244.
- [7] ZHAO Q, ASTANEH-ASL A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (2): 271-284.
- [8] NIE J G, HU H S, FAN J S, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete filled double-steel-plate composite walls [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 88: 206-219.
- [9] ALTIN S, KOPRAMAN Y, BARAN M. Strengthening of RC walls using externally bonding of steel strips [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 686-695.
- [10] 纪晓东, 贾翔夫, 钱稼茹. 钢板混凝土剪力墙抗剪性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36 (11): 46-55.
JI X D, JIA X F, QIAN J R. Experimental study on shear behavior of steel-plate composite shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36 (11): 46-55. (in Chinese)
- [11] RASSOULI B, SHAFAEI S, AYAZI A, et al. Experimental and numerical study on steel-concrete composite shear wall using light-weight concrete [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 126: 117-128.
- [12] 魏勇, 钱稼茹, 赵作周, 等. 高轴压比钢骨混凝土矮墙水平加载试验 [J]. *工业建筑*, 2007, 37 (6): 76-79.
WEI Y, QIAN J R, ZHAO Z Z. Lateral loading experiment of SRC low shear walls with high axial force ratio [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37 (6): 76-79. (in Chinese)
- [13] 梁兴文, 白亮, 杨红楼, 等. 型钢高性能混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2010, 27 (10): 131-138.
LIANG X W, BAI L, YANG H L, et al. Experimental study on the seismic behavior of high performance steel concrete shear walls [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27 (10): 131-138. (in Chinese)
- [14] 吕西林, 董宇光, 丁子文. 截面中部配置型钢的混凝土剪力墙抗震性能研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26 (6): 101-107.
LYU X L, DONG Y G, DING Z W. Study on seismic behavior of steel reinforced concrete wall [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration-Chinese Edition*, 2006, 26 (6): 101-107. (in Chinese)
- [15] 张力. 内置竖向型钢混凝土低矮剪力墙抗震性能的试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHANG L. Experimental study on seismic performance of low-rise steel reinforced concrete shear wall with built-in vertical steel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [16] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Technical specification for concrete structures of tall building; JGJ 3-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)