DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201512108

斜筋配置对单排配筋低矮墙抗震性能影响试验

张建伟,李琬荻,曹万林,蔡 翀,吴蒙捷

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学),北京 100124)

摘 要:在低配筋量的单排配筋混凝土低矮剪力墙中配置斜向钢筋,可限制基底施工缝处水平剪切滑移和墙体斜裂缝开展,提高混凝土低矮剪力墙的抗震耗能能力.为探求带斜筋单排配筋混凝土低矮剪力墙的优化配筋设计方法,进行了5个不同配筋设计的剪力墙模型低周反复荷载试验,对比分析了各模型的破坏特征、滞回性能、承载与变形能力、刚度退化规律、耗能能力及钢筋应变发展规律.试验结果表明:对于单排配筋混凝土低矮剪力墙,斜筋可有效控制其剪切变形,使其抗震性能优于不带斜筋的剪力墙;合理配置斜筋,可明显提高混凝土低矮剪力墙的抗震耗能能力,获得性价比较高的抗震墙.

关键词:单排配筋;斜筋;低矮剪力墙;抗震性能;设计方法

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)06-0028-07

Experimental study on the influence of different inclined reinforcements collocation on seismic performance of low-rise concrete shear wall with single row of steel bars

ZHANG Jianwei, LI Wandi, CAO Wanlin, CAI Chong, WU Mengjie

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: The inclined reinforcements are configured in low-rise reinforced concrete shear wall with single row of steel bars and low reinforcement ratio, which can limit horizontal shear slip at the bottom construction joints and development of diagonal cracks on the wall. To investigate optimization design method of reinforcements for low-rise concrete shear wall with single row of steel bars and inclined reinforcements, the cyclic loading tests of 5 shear walls with different reinforcement design were carried out. The failure characteristic, hysteretic property, load-carrying and deformation capacity, stiffness degradation, energy dissipation and reinforcement strain were compared and analyzed. The results show that the seismic performance of shear wall with inclined reinforcements is better than the wall without inclined reinforcements, because the inclined reinforcements can control the shear deformation effectively. If inclined reinforcements are reasonably allocated, energy dissipation capacity of low-rise concrete shear wall can be significantly improved and higher performance price ratio of structural wall can be obtained.

Keywords: single row of steel bars; inclined reinforcement; low-rise RC shear wall; seismic performance; design method

混凝土剪力墙由于其平面内刚度较大,在水平荷载作用下侧向位移较小,被广泛应用于高层建筑结构[1].由于粘土砖结构的禁用和地震的频繁发生,混凝土剪力墙在多层住宅中应用也越来越广泛[2].但如果按照《高层建筑混凝土结构技术规程》[3]对多层住宅中的混凝土剪力墙进行设计,会导致钢筋用量偏多、施工不便、造价偏高,不利于推广应用.为此,课题组针对多层住宅结构,开展了单排配筋混凝土剪力墙结构研究,围绕设计方法、构造措施、施工工艺、抗震性能等方面开展了较系统的研究工作.结果表明:通过合理的设计,单排配筋混凝土剪力墙的抗震性能明显优于砖砌体墙,可以满足多层住宅结构抗震性能要求[4];单排配筋混凝土剪力墙边缘构件宜采用设置矩形箍筋或三角形箍筋的暗柱形式[5];单排配筋混凝土剪力墙连梁与墙肢的强弱关系对其连接部位的破坏特征影响较大,宜设计成强墙肢、弱连梁的结构形式[6].

由于多层建筑结构中混凝土剪力墙的轴压比一般较低[7],再加上单排配筋混凝土剪力墙的墙体配筋量较少,在水平地震作用下,其底部施工缝处容易发生水平剪切滑移现象.为此,在低配筋量的单排配筋混凝土剪力墙中配置斜向钢筋,可以限制基底施工缝处水平剪切滑移和墙体斜裂缝开展,提高混凝土剪力墙的抗震耗能能力[8-11].为探求带斜筋单排配筋混凝土剪力墙的优化配筋设计方法,本文对5个不同配筋形式的矩形截面混凝土低矮剪力墙进行低周反复荷载试验研究.

收稿日期:2015-12-24
基金项目:国家自然科学基金(51378029);
国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)
作者简介:张建伟(1971—),男,教授,博士生导师;
曹万林(1954—),男,教授,博士生导师
通信作者:张建伟,zhangjw@bjut.edu.cn

1　试验概况

1.1　模型设计

设计 5 个单排配筋剪力墙模型,编号为 SW1.0-1~SW1.0-5.模型由墙顶加载梁、墙底基础梁及墙体构成.模型的几何尺寸均相同:墙体宽度为 1 200 mm,厚度为 140 mm,即《混凝土结构设计规范》[12]中规定的剪力墙最小厚度,剪跨比 λ = 1.0.其中,SW1.0-1 为不带斜筋单排配筋剪力墙,SW1.0-2~SW1.0-5 为带斜筋单排配筋剪力墙,其配筋率及配筋形式不同,最低配筋率取《高层建筑混凝土结构技术规程》[3]规定的剪力墙分布钢筋最小配筋率 0.25%,5 个模型的配筋详情见表 1.模型的边缘构件均采用三角形箍筋暗柱形式,纵筋为 3Φ8 钢筋,箍筋为 Φ4@ 70.模型的几何尺寸及配筋见图 1.

采用商品混凝土浇筑模型,墙体混凝土强度设计等级为 C30,实测立方体抗压强度均值为 55.56 MPa,弹性模量为 3.13×10^4 MPa.墙体钢筋均采用 HPB300 级钢筋,其力学性能见表 2.

表 1　模型配筋

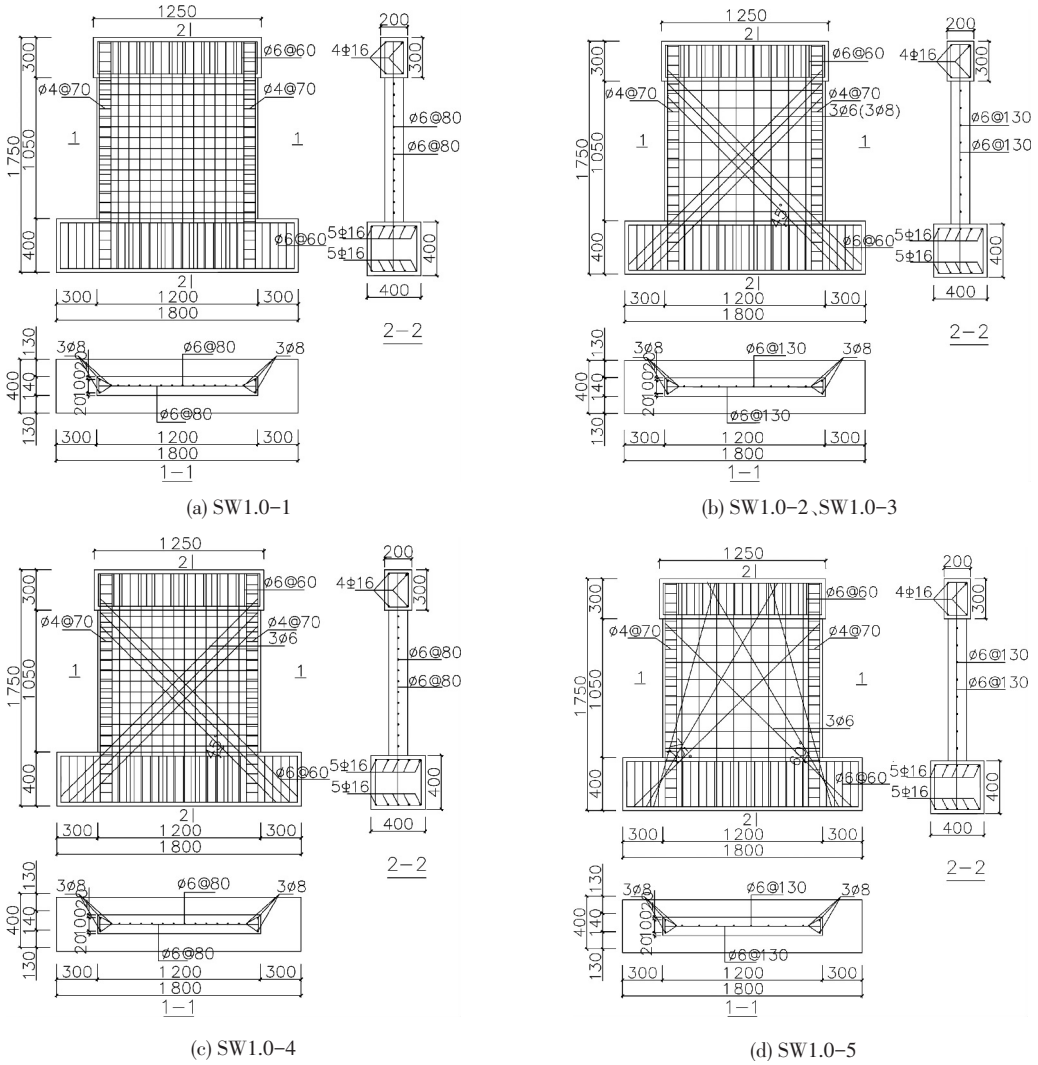
Tab.1　Reinforcement of specimens

模型编号	墙体配筋率/%	分布钢筋配筋量	斜筋配筋量	斜筋角度/(°)
SW1.0-1	0.25	Φ6@ 80(0.25%)	—	—
SW1.0-2	0.25	Φ6@ 130(0.15%)	3Φ6(0.10%)	45
SW1.0-3	0.35	Φ6@ 130(0.15%)	3Φ8(0.20%)	45
SW1.0-4	0.35	Φ6@ 80(0.25%)	3Φ6(0.10%)	45
SW1.0-5	0.25	Φ6@ 130(0.15%)	3Φ6(0.10%)	45、60、75

表 2　钢筋力学性能

Tab.2　Mechanical properties of steel bars

钢筋规格	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E_s/GPa	伸长率 δ/%	屈服应变 $\varepsilon_y/10^{-6}$
Φ6	383.79	522.40	181.73	16.77	2 112
Φ8	409.96	608.28	195.48	22.82	2 097



(a) SW1.0-1　　(b) SW1.0-2、SW1.0-3

(c) SW1.0-4　　(d) SW1.0-5

图 1　模型尺寸及配筋(mm)

Fig.1　Dimensions and reinforcement details of specimens (mm)

1.2　加载方案及量测内容

试验加载装置见图 2.加载方案为在恒定竖向轴压力作用下施加往复水平力.首先在截面形心处施加竖向轴压力至 624 kN,使墙体试验轴压比达到

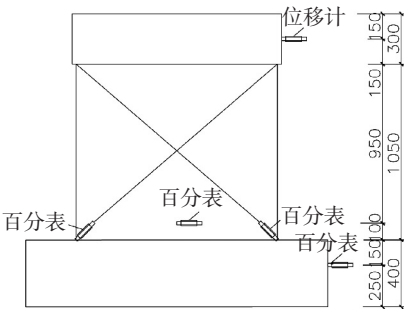
0.1,并在试验过程中保持恒定.水平力采用荷载-变形双控制的方法:模型屈服前采用荷载控制,分成三级加载,每级荷载反复 1 次,级差 80 kN;从第 4 循环开始采用变形控制,逐级加载,每级位移增量取模型 1/400 位移角,每级反复 2 次;当顶点位移角超过 1/66 时,每级位移增量改为 1/200 位移角.加载至模型承载力下降到峰值荷载的 85%以下时,试验停止.

试验量测内容主要有:轴压力、水平力、水平位移、剪切变形、钢筋应变.在加载过程中,观察记录裂缝的发展情况、裂缝宽度及混凝土破坏现象等.位移计及百分表布置见图 3(a).钢筋应变测量包括:暗柱底部纵向钢筋应变、剪力墙竖向分布钢筋应变、剪力墙水平分布钢筋应变和斜向钢筋应变.模型 SW1.0-5的钢筋应变测点布置见图 3(b).

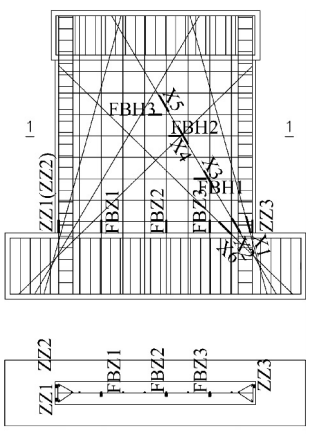


图 2　加载装置

Fig.2　Test setup



(a) 位移计、百分表布置



(b) SW1.0-5的钢筋应变测点布置

图 3　模型测点布置

Fig.3　Instrumentation of specimens

2　试验结果及分析

2.1　破坏形态

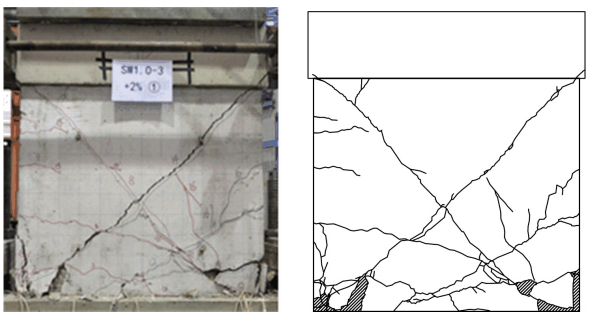
模型最终破坏形态见图 4,其中照片为水平位移角达 1/50 时的破坏形态.各模型墙体下部裂缝较为集中,加载开始时,各模型均先在下部墙体边缘处出现水平裂缝,之后水平裂缝向墙底延伸,逐渐形成相互贯通的交叉型弯曲裂缝.模型 SW1.0-3 的斜裂缝在加载后期承载力下降阶段发展为对角主斜裂缝,最后因剪切破坏丧失承载能力,其他模型呈以弯曲破坏为主的弯剪破坏特征.



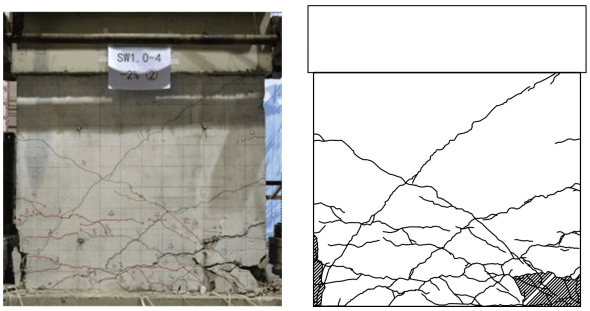
(a) SW1.0-1



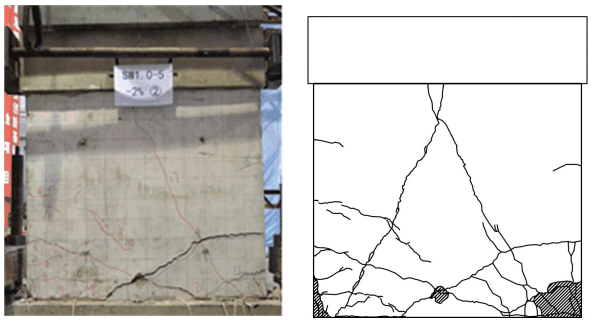
(b) SW1.0-2



(c) SW1.0-3



(d) SW1.0-4



(e) SW1.0-5

图 4　破坏形态

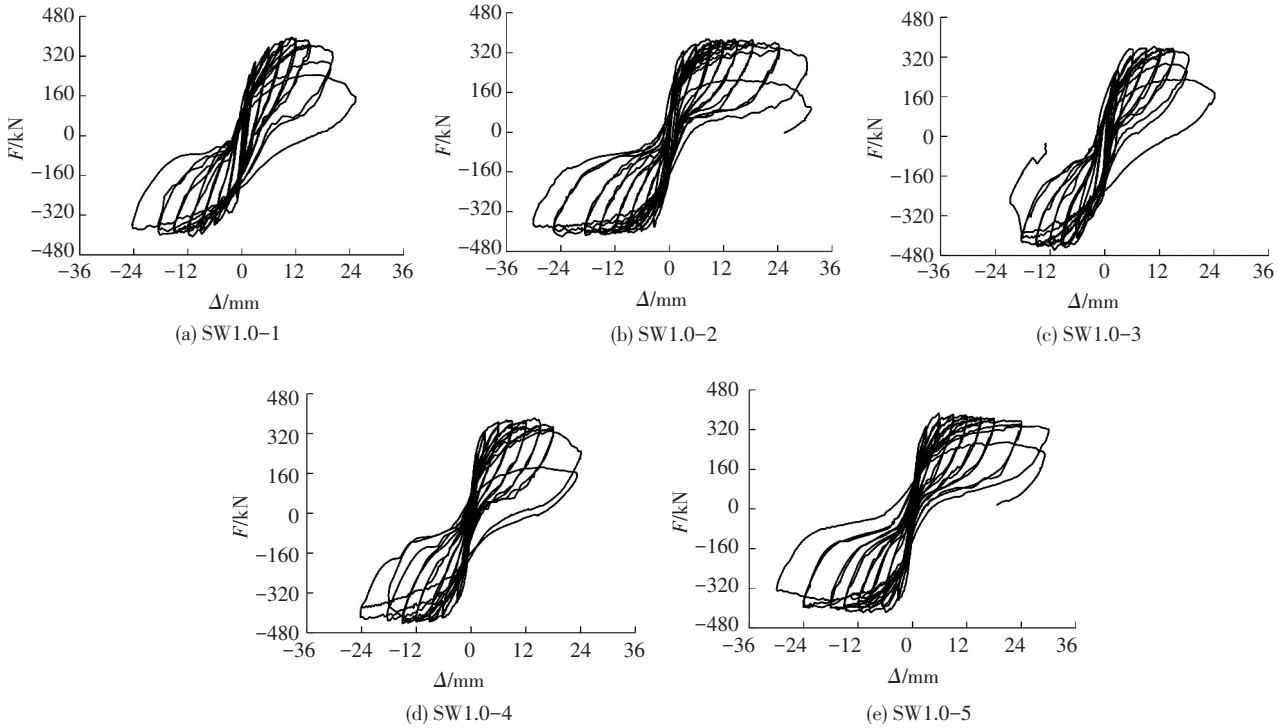
Fig.4　Failure modes of specimens

SW1.0-1 墙体斜裂缝开展不充分,主要因为墙体内未配置斜筋,墙底抗剪切滑移能力较弱,加载后期墙底水平弯曲裂缝处出现剪切滑移现象,最终因角部混凝土压碎而失效.SW1.0-2 墙体裂缝主要为弯曲裂缝,其原因是墙体分布钢筋配筋率降低,改为布置斜筋增强了墙体抗剪能力和底部抗剪切滑移能力,使得其正截面受弯承载能力相对减弱,墙底水平弯曲裂缝开展充分,墙体斜裂缝开展较少.SW1.0-3墙体因分布钢筋配筋率较低,而斜筋配筋率较高,且斜筋在墙底边缘构件区域集中布置,导致其对墙底正截面受弯承载力的贡献作用大于其对墙体受剪承载力贡献作用,计算表明其正截面承载力略低于斜截面承载力,在剪力墙承载力下降阶段,剪力墙底角部位混凝土压坏后,导致斜截面承载力下降较快,最终发生了斜向剪切破坏.SW1.0-4 墙体虽然与SW1.0-3总配筋率相同,但其分布钢筋配筋率较高,而斜筋配筋率相对低些,剪力墙斜截面承载力在整个受力过程中始终大于正截面承载力,导致承载力下降阶段的破坏形态与 SW1.0-3 有所不同,最后破坏特征以弯曲破坏为主,且墙底裂缝较多,分布区域较高.SW1.0-5 墙体因斜筋呈扇形布置(45°、60°、75°),且斜筋配筋率低于分布钢筋的配筋率,剪力墙失效以弯曲破坏为主,加载后期出现了倾斜角度较大的压剪斜裂缝.

各剪力墙底角部位均有混凝土压碎、钢筋屈曲现象.剪力墙达到峰值荷载时,边缘暗柱底部受拉纵筋均达到了屈服状态.

2.2　滞回性能

SW1.0-1～SW1.0-5 的水平力-位移滞回曲线见图 5,位移指距墙底 1 200 mm 的顶点水平位移.



(a) SW1.0-1　(b) SW1.0-2　(c) SW1.0-3

(d) SW1.0-4　(e) SW1.0-5

图 5　水平力-位移滞回曲线

Fig.5　Horizontal force-displacement hysteretic loops

由图 5 可见:模型 SW1.0-1,由于墙底水平裂缝开展和滑移相对较重,加载后期不可恢复的残余变形较大.模型 SW1.0-2 和 SW1.0-5 的滞回性能较为相近,破坏后期力学性能退化速度较慢,变形能力较好.模型 SW1.0-4 的破坏后期力学性能退化速度慢于模型 SW1.0-3.各模型在最后一次滞回加载时,均发生了墙底角部混凝土压溃现象,导致承载力和刚度下降十分明显.

2.3　承载力

各模型的水平力-位移骨架曲线比较见图 6.可见:开裂前,各模型曲线基本重合;开裂与屈服阶段,曲线略有差异;峰值荷载之后,骨架曲线的下降速度

差别较明显;模型 SW1.0-2、SW1.0-5 骨架曲线平缓,承载能力比较稳定.

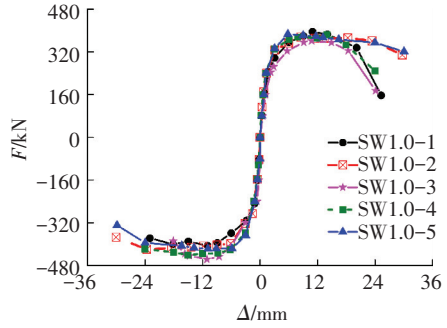


图 6 水平荷载-位移骨架曲线

Fig.6 Horizontal load-displacement envelope curves

各模型的开裂荷载 F_{cr}(墙体出现肉眼可见的第一条明显裂缝时荷载值)、屈服荷载 F_y、峰值荷载 F_u 列于表 3.其中屈服荷载采用能量等值法确定.由表 3 可见:

1)模型 SW1.0-4 与 SW1.0-1 相比,各特征点实测值均略有提高.表明在分布钢筋配筋率相同的情况下,增加斜筋能提高剪力墙的承载能力.

2)模型 SW1.0-3 与 SW1.0-2 相比,在分布钢筋配筋率相同且均存在斜筋的情况下,斜筋配筋率增加对剪力墙峰值荷载的提高有一定作用,但对其开裂和屈服荷载影响不大.

3)模型 SW1.0-5 与 SW1.0-2 相比,各特征点荷载值基本相近.表明在分布钢筋和斜筋配筋率相同的情况下,斜筋呈扇形布置对承载力的贡献不大.

总的来说,各模型承载力差异不大,其主要原因是:混凝土强度及边缘构件对模型承载力贡献明显,在低配筋条件下的墙体配筋形式变化对其承载力影响较小.

表 3 开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载的实测值

Tab.3 Test result of cracking load, yield load and peak load

模型编号	F_{cr}/kN	F_{cr}比值	F_y/kN			F_y比值	F_u/kN			F_u比值
			正向	负向	平均		正向	负向	平均	
SW1.0-1	114.75	1.000	326.76	329.12	327.94	1.000	395.18	405.82	400.50	1.000
SW1.0-2	123.78	1.079	327.76	351.82	339.79	1.036	375.20	411.62	393.41	0.982
SW1.0-3	124.74	1.087	300.34	356.51	328.43	1.001	361.01	457.07	409.04	1.021
SW1.0-4	121.53	1.059	319.94	375.60	347.77	1.060	374.91	441.64	408.28	1.019
SW1.0-5	121.84	1.062	330.14	352.79	341.47	1.041	386.16	417.75	402.00	1.004

2.4 变形能力

各模型的开裂位移 Δ_{cr}、屈服位移 Δ_y(正负向均值)、峰值位移 Δ_u(正负向均值)、破坏位移 Δ_d(正负向均值)、延性系数 $\mu=\Delta_d/\Delta_y$ 列于表 4.Δ_d 取承载力下降至峰值荷载的 85%时所对应的位移值,模型 SW1.0-1 和 SW1.0-4 负向承载力未能下降至峰值荷载的 85%,则 Δ_d 取正向数值.位移角 $\theta=\Delta/H$,Δ 为墙顶测点的水平位移,H 为测点高度.

表 4 模型的特征点位移

Tab.4 Characteristic displacement of specimens

模型编号	Δ_{cr}/mm	Δ_{cr}比值	Δ_y/mm	Δ_y比值	Δ_u/mm	Δ_u比值	Δ_d/mm	Δ_d比值	μ	μ比值
SW1. 0-1	0.59	1.000	4.27	1.000	10.95	1.000	20.15	1.000	4.72	1.000
SW1.0-2	0.50	0.847	3.76	0.881	11.42	1.043	29.20	1.449	7.77	1.646
SW1.0-3	0.63	1.068	4.43	1.037	10.93	0.998	18.57	0.922	4.20	0.890
SW1.0-4	0.49	0.831	3.37	0.789	11.44	1.045	19.60	0.973	5.81	1.231
SW1.0-5	0.58	0.983	2.90	0.679	8.34	0.762	28.14	1.397	9.72	2.059

由表 4 可见:

1)模型 SW1.0-4 与 SW1.0-1 相比,峰值位移略有增加,延性系数提高了 23.1%.表明在分布钢筋配筋率相同的情况下,增加斜筋能提高剪力墙的延性.

2)模型 SW1.0-2、SW1.0-5 较其他 3 个模型延性提高明显,表明斜筋和分布筋配筋量的优化配置可以提高剪力墙的延性,当分布筋配筋率为 0.15%,斜筋配筋率为 0.10%时,延性提高效果较佳.

3)模型 SW1.0-5 与 SW1.0-2 相比,延性系数提高了 25.1%.表明在分布钢筋和斜筋配筋率相同的情况下,斜筋呈扇形布置有助于提高剪力墙的延性.

低矮剪力墙的水平剪切变形占总变形的比例较大,尤其是在剪力墙开裂以后,剪切变形所占的比例会进一步增加.表 5 列出了各模型达到破坏荷载时剪切变形所占比例值.可见,不带斜筋剪力墙 SW1.0-1 的剪切变形所占比例明显大于其他带斜筋剪力墙.表明斜筋可以有效地控制低矮剪力墙剪切变形,且墙体配筋或斜筋越多,其剪切变形占总变形的比例越小.

表 5 模型的剪切变形

Tab.5 Shear deformation of specimens

模型编号	剪切变形/mm	总变形/mm	剪切变形比例/%
SW1.0-1	11.65	20.15	57.83
SW1.0-2	14.46	29.20	49.53
SW1.0-3	6.00	18.57	32.31
SW1.0-4	8.05	19.60	41.05
SW1.0-5	12.79	28.14	45.44

2.5 刚度

各模型实测所得初始刚度 K_0、开裂割线刚度

K_{cr}、屈服割线刚度 K_y、峰值割线刚度 K_u、1/50 位移角割线刚度 $K_{1/50}$列于表 6.

由表 6 可见:各模型初始刚度较为接近,模型 SW1.0-2、SW1.0-4 与 SW1.0-1 相比,开裂刚度和屈服刚度明显提高,说明在配筋量不变的情况下,合理布置斜筋可减缓低矮剪力墙开裂后的刚度衰减速度;在分布钢筋配筋量相同的情况下,增设斜筋可明显减缓剪力墙开裂后的刚度衰减速度.其原因是斜筋能更有效地承担墙体斜向主拉应力,限制斜裂缝的开展,增强斜裂缝间的骨料咬合作用,增大墙体抗剪切能力,减小剪切变形,从而减缓刚度下降速度.模型 SW1.0-5 与 SW1.0-2 相比,除开裂刚度以外,各刚度数据均明显提高,表明在分布钢筋和斜筋配筋率相同的情况下,斜筋呈扇形布置能减缓剪力墙的刚度衰减;模型 SW1.0-3 在 1/50 位移角时割线刚度较其他模型低,峰值荷载后,刚度退化更为迅速,主要是因为剪力墙在承载力下降阶段同其他模型不同,发生了剪切破坏.

表 6　模型的割线刚度

Tab 6　Secant rigidity of specimens

模型编号	K_o/(kN·mm^{-1})	K_o比值	K_{cr}/(kN·mm^{-1})	K_{cr}比值	K_y/(kN·mm^{-1})	K_y比值	K_u/(kN·mm^{-1})	K_u比值	$K_{1/50}$/(kN·mm^{-1})	$K_{1/50}$比值
SW1.0-1	278.36	1.000	194.49	1.000	76.80	1.000	36.58	1.000	10.15	1.000
SW1.0-2	275.41	0.989	247.56	1.273	90.49	1.178	34.46	0.942	14.84	1.462
SW1.0-3	272.69	0.980	198.00	1.018	74.22	0.966	37.42	1.023	9.58	0.944
SW1.0-4	283.45	1.018	248.02	1.275	103.20	1.344	35.69	0.976	13.71	1.351
SW1.0-5	279.07	1.003	210.07	1.080	117.95	1.536	48.20	1.318	15.48	1.525

2.6　耗能能力

模型的能量耗散能力以累积耗能 E_p(滞回曲线所包围面积)和等效粘滞阻尼系数 h_e来衡量.图 7 和图 8 分别为累计耗能和等效粘滞阻尼系数随水平位移增长而变化的关系曲线.

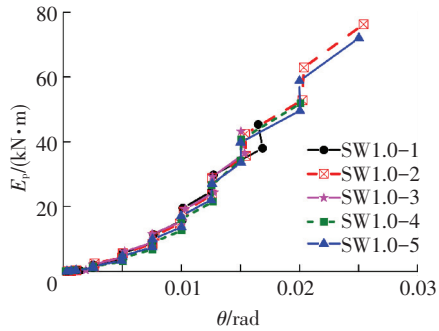


图 7　累计耗能与水平位移关系

Fig.7　Energy dissipation curves of specimens

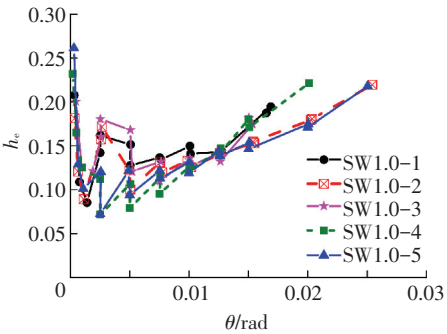


图 8　等效阻尼系数与水平位移关系

Fig.8　Equivalent viscous damping coefficient curves of specimens

表 7 给出了模型荷载下降至峰值荷载 85%以前的累计耗能,破坏荷载点所在滞回环的等效粘滞阻尼系数 h_e.

表 7　模型的耗能能力

Tab.7　Energy dissipation of specimens

模型编号	h_e	E_p/(kN·m)	累计耗能相对值
SW1.0-1	0.187	45.360	1.000
SW1.0-2	0.219	76.270	1.681
SW1.0-3	0.181	54.465	1.201
SW1.0-4	0.221	51.877	1.144
SW1.0-5	0.218	72.048	1.588

由图 7、8 和表 7 可见:

1)与 SW1.0-1 相比,带斜筋剪力墙模型的耗能能力明显提高,尤其是模型 SW1.0-2 和 SW1.0-5 的累计耗能提高显著,表明按合理比例配置斜筋,可更有效地提高单排配筋混凝土低矮剪力墙的抗震耗能能力.其原因是斜向钢筋可以增强墙底水平裂缝处的销栓作用和墙体斜裂缝的骨料咬合作用,使得墙体具有较好的弹塑性变形能力,从而提高其耗能能力.

2)SW1.0-2 与 SW1.0-5 的耗能能力相差不大,表明相同配筋率情况下,斜筋扇形放置对低矮混凝土剪力墙的耗能能力影响较小.

3)SW1.0-3 最终发生的是脆性剪切破坏,破坏时的等效粘滞阻尼系数较小.

2.7　钢筋应变规律

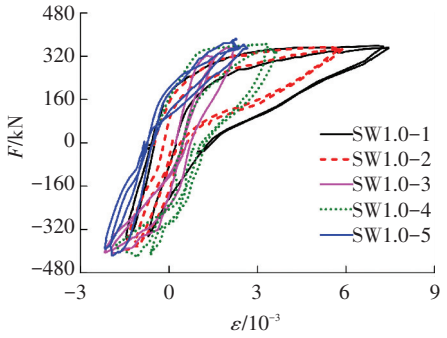
图 9(a)为各模型边缘暗柱钢筋应变测点 ZZ2 第六、七循环加载的应变发展规律.图 9(b)为 SW1.0-2剪力墙最外侧斜向钢筋底部应变测点 X1 的应变发展规律.

由图 9 对比分析可见:

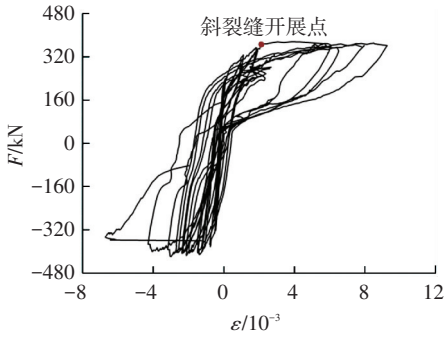
1)图 9(a)中各模型在达到峰值荷载之前,边缘构件底部受拉纵筋均已屈服,模型正截面受弯承载力较弱,呈现弯曲破坏形态.与模型 SW1.0-1 相比,

其他 4 个模型的边缘暗柱纵筋应变,由于斜筋有效限制了斜裂缝的开展,降低了墙体刚度衰减速度,减慢了墙体水平变形发展,使得其发展速度减慢;随着墙体配筋率或斜筋配置量的提高,边缘暗柱纵筋受拉应变发展速度相应降低;斜筋呈扇形布置,可降低边缘暗柱纵筋的应变发展速度.

2)图 9(b)表明,当墙体混凝土出现斜裂缝时,斜向钢筋应变会突增,最终受拉屈服.表明斜筋在剪力墙体受剪过程中可有效控制斜裂缝的开展,增强墙体的抗震耗能能力.



(a) 各剪力墙底部暗柱纵筋ZZ2测点



(b) SW1.0−2的底部斜筋X1测点

图 9 钢筋应变滞回曲线

Fig.9 Load-strain hysteresis loops of reinforcement

3 结 论

1)对于单排配筋混凝土低矮剪力墙,斜筋可以有效控制其剪切变形.

2)斜筋和分布筋的合理配置,可以明显提高单排配筋混凝土低矮剪力墙的抗震性能;当分布钢筋配筋率为 0.15%、斜筋配筋率为 0.10%时,效果较好.

3)扇形布置斜筋,有利于提高单排配筋混凝土低矮剪力墙的延性和减缓刚度衰减.

参考文献

[1] 陈耀.高层建筑剪力墙结构优化设计分析探讨[J].福建建材,2011(4):36-37,39.
CHEN Yao. Analysis on optimized design of shear wall structure for high-rise buildings [J]. Fujian Building Materials, 2011(4): 36-37, 39.

[2] 罗春燕,王延鹏,张吾渝,等.青海村镇砌体结构房屋抗震缺陷分析[J].建筑技术,2012,43(5):435-438.
LUO Chunyan, WANG Yanpeng, ZHANG Wuyu, et al. Analysis on building structure defect of masonry structures in Qinghai rural by Yushu earthquake[J]. Architecture Technology, 2012,43(5): 435-438.

[3] 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 and Building Press, 2011.

[4] 张建伟,杨兴民,曹万林,等.单排配筋剪力墙结构抗震性能及设计研究[J].世界地震工程, 2009, 25(1): 77-81.
ZHANG Jianwei, YANG Xingmin, CAO Wanlin, et al. Seismic behavior and design method of RC shear wall structure with single row of steel bars[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(1): 77-81.

[5] 张建伟,曹万林,殷伟帅.简化边缘构造的单排配筋中高剪力墙抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2009,42(12):99-104.
ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, YIN Weishuai. Study on seismic performance of mid-rise RC shear wall with single row of steel bars and simplified boundary elements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 99-104.

[6] 孙超,曹万林,杨兴民,等.双向单排配筋剪力墙与连梁节点的抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2008,24(3):84-88.
SUN Chao, CAO Wanlin, YANG Xingmin, et al. Test studies on seismic performance of joints of coupling beam and shear wall with bi-directional single row of steel bars[J]. World Earthquake Engineering, 2008, 24(3): 84-88.

[7] 夏昊,黄小坤,孔慧,等.低轴压比单排双向配筋混凝土剪力墙结构性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2012,34(3):69-75.
XIA Hao, HUANG Xiaokun, KONG Hui, et al. Experimental research on structural behaviors of the RC shear wall with bi-directional single layer reinforcement under low axial force ratio[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(3): 69-75.

[8] 邢民,程焕英,张建伟,等.带斜筋单排配筋 L 形截面剪力墙低周反复荷载试验研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(3):391-397.
XING Min, CHENG Huanying, ZHANG Jianwei, et al. The cyclic loading tests on L-shaped shear wall with single row of steel bars and inclined reinforcements[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2015, 35(3): 391-397.

[9] 邢民,程焕英,杨兴民,等.带斜筋单排配筋 T 形截面剪力墙的抗震性能[J].建筑结构,2014, 44(15):71-76.
XING Min, CHENG Huanying, YANG Xingmin, et al. Seismic performance of T-shaped shear wall with bidirectional single row of steel bars and inclined reinforcements[J]. Building Structure, 2014, 44(15): 71-76.

[10] 张建伟,胡剑民,杨兴民,等.带斜筋单排配筋 Z 形截面剪力墙抗震性能研究[J].施工技术,2014, 43(9): 63-68.
ZHANG Jianwei, HU Jianmin, YANG Xingmin, et al. Seismic performance of Z-shear wall with bidirectional single row of steel bars and inclined reinforcements[J]. Construction Technology, 2014, 43(9): 63-68.

[11] 张建伟,杨兴民,曹万林,等.带斜筋单排配筋低矮剪力墙的抗震性能[C]//第 24 届全国结构工程学术会议论文集.厦门:中国力学学会,2015:462-469.
ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, YANG Xingmin, et al.Seimic performance of low-rise shear wall with single layer of web reinforcement and inclined steel bar[C] // Proceedings of the 24th National Conference on Structural Engineering. Xiamen: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics,2015: 462-469.

[12] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S].北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.

(编辑 赵丽莹)