

带斜筋单排配筋中高剪力墙抗震性能试验研究

张建伟, 蔡 翀, 曹万林, 李琬荻, 吴蒙捷

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了解斜筋布置形式对单排配筋混凝土中高剪力墙抗震性能的影响, 进行了4个带斜筋和1个不带斜筋的单排配筋混凝土中高剪力墙低周反复荷载试验, 对比分析了各剪力墙的破坏形态、滞回性能、承载力、延性、刚度退化和耗能能力, 研究了斜筋角度和配筋比例对中高剪力墙抗震性能的影响. 结果表明: 对于低配筋量的单排配筋混凝土中高剪力墙, 墙体分布钢筋的配置形式变化对其破坏形态、极限承载力和延性影响不大; 配置斜筋可在一定程度上减小墙体剪切滑移变形, 斜筋呈扇形布置对于减小墙体剪切滑移变形效果相对较好; 与不配置斜筋的单排配筋混凝土中高剪力墙相比, 配置斜筋的单排配筋混凝土中高剪力墙后期刚度衰减速度相对较慢, 抗震耗能能力较好.

关键词: 斜筋; 单排配筋; 中高剪力墙; 低周反复荷载试验; 抗震性能

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)11-1681-10

doi: 10.11936/bjtuXB2016010059

Research of Seismic Behavior of Mid-rise RC Shear Wall With Single Row of Steel Bars and Inclined Reinforcement

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

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

Abstract: In order to study the effect of inclined reinforcement arrangement on seismic behavior of mid-rise RC shear wall with single row of steel bars, the low cyclic loading tests for four mid-rise RC shear walls with single row of steel bars and inclined reinforcement and one without inclined reinforcement were carried out respectively. The failure mode, hysteretic behavior, load-carrying capacity, ductility, rigidity degeneration and energy dissipation capacity of five test specimens were contrastively analyzed. The influences of intersection angle between inclined reinforcement and horizontal direction as well as the proportion of web reinforcement and inclined reinforcement on the seismic performance of mid-rise RC shear walls were also revealed. The test results indicate that different reinforcement arrangements have little influence on failure mode, ultimate load-carrying capacity and ductility for the mid-rise RC shear wall with single row of steel bars, but the inclined reinforcement can reduce shear slipping of the wall to a certain extent, and the inclined reinforcement positioned as fan-shape is more effective. The mid-rise RC shear walls with single row of steel bars and inclined reinforcement show slower stiffness attenuation and better energy dissipation capacity than that of the shear wall without inclined reinforcement.

Key words: inclined reinforcement; single row of steel bars; mid-rise shear wall; low cyclic loading test; seismic performance

收稿日期: 2016-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378029)

作者简介: 张建伟(1971—), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震方面的研究, E-mail: zhangjw@bjut.edu.cn

混凝土剪力墙具有较大的抗侧刚度,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。在我国,随着传统黏土砖结构的禁用和地震的频繁发生,混凝土剪力墙也越来越多地应用于多层住宅结构^[1]。目前,有关钢筋混凝土剪力墙的设计规范和规程的适用范围主要是针对高层建筑结构^[2-4],对于多层混凝土剪力墙抗震结构采用相同的设计方法显然不合理。对于抗震设防地区,应发展抗震性能良好、施工简便、造价低、绿色节能的多层住宅结构,为此,本课题组提出了单排配筋混凝土剪力墙结构体系,并开展了系列研究工作^[5-7]。

由于多层结构中的混凝土剪力墙轴压比一般较低^[8],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。为提高其抗剪切滑移能力,限制斜裂缝的开展,改善其抗震性能,可在单排配筋的基础上设置斜筋^[9-11]。为了研究斜筋布置形式、配筋比例对混凝土中高剪力墙抗震性能的影响,本文进行了5个有无斜筋的单排配筋矩形截面混凝土中高剪力墙低周反复荷载试验研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计5个试件,编号为SW1.5-1~SW1.5-5。试件由墙体、基础梁和加载梁3部分组成。几何尺

寸相同:墙高1650 mm,墙厚140 mm,墙宽1200 mm;基础梁的截面尺寸为400 mm×400 mm;加载梁的截面尺寸为300 mm×200 mm。各试件水平荷载加载点到基础梁顶面的距离为1800 mm,剪跨比 $\lambda=1.5$ 。

SW1.5-1为不带斜筋的单排配筋剪力墙,墙体配筋率为0.25%,符合混凝土结构规范不小于0.25%的要求^[2]。其他试件为配筋形式不同的带斜筋单排配筋剪力墙。SW1.5-2~SW1.5-4墙体配筋率均为0.25%,其中竖向及水平分布钢筋配筋率为0.15%,斜筋配筋率为0.1%,斜筋与水平方向夹角依次为45°、60°和扇形分布,扇形分布的斜筋与水平方向夹角分别为45°、60°、75°;SW1.5-5墙体配筋率为0.35%,其中竖向及水平分布钢筋配筋率为0.25%,斜筋配筋率为0.1%,斜筋与水平方向夹角为60°。

试件的边缘暗柱采用三角形箍筋 $\Phi 4@70$,暗柱纵筋采用3 $\Phi 8$ 钢筋。斜筋的配筋形式采用每侧3 $\Phi 6$ 钢筋X形交叉布置,从基础底部穿过暗柱,上端锚固在暗柱或加载梁内,斜筋的水平间距为100 mm。试件的配筋参数列于表1,试件尺寸及配筋形式见图1。

1.2 材料性能

试验墙体分布钢筋采用HPB300级钢筋。表2列出了钢筋的屈服强度、极限强度和弹性模量实测值,屈服应变为屈服强度与弹性模量的比值。

表1 试件配筋

Table 1 Reinforcement of specimens

试件	分布钢筋	斜筋	斜筋仰角	暗柱纵筋	暗柱箍筋
SW1.5-1	$\Phi 6@80$			3 $\Phi 8$	$\Phi 4@70$
SW1.5-2	$\Phi 6@130$	3 $\Phi 6$	45°	3 $\Phi 8$	$\Phi 4@70$
SW1.5-3	$\Phi 6@130$	3 $\Phi 6$	60°	3 $\Phi 8$	$\Phi 4@70$
SW1.5-4	$\Phi 6@130$	3 $\Phi 6$	扇形	3 $\Phi 8$	$\Phi 4@70$
SW1.5-5	$\Phi 6@80$	3 $\Phi 6$	60°	3 $\Phi 8$	$\Phi 4@70$

试件采用C30商品混凝土整体浇筑,实测150 mm立方体抗压强度均值为54.8 MPa。

表2 钢筋材料性能

Table 2 Material properties of steel bars

钢筋规格	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/GPa	$\varepsilon_y/\times 10^{-6}$
$\Phi 6$	383.9	522.4	181.7	2.112
$\Phi 8$	410.0	608.3	195.5	2.097

1.3 试验装置及加载制度

加载装置如图2所示。试验采用1000 kN液压千斤顶施加轴力,千斤顶可随试件水平变形移动。为使施加的竖向荷载分布均匀,在试件顶部放置一个钢垫梁。采用1000 kN拉压液压千斤顶施加水平往复荷载。基础梁通过地锚螺栓固定在试验台座上。使用联机数据系统采集轴力、水平力、位移、钢筋应变,并实时绘制水平荷载-位移滞回曲线,监控加载过程,人工描绘裂缝。

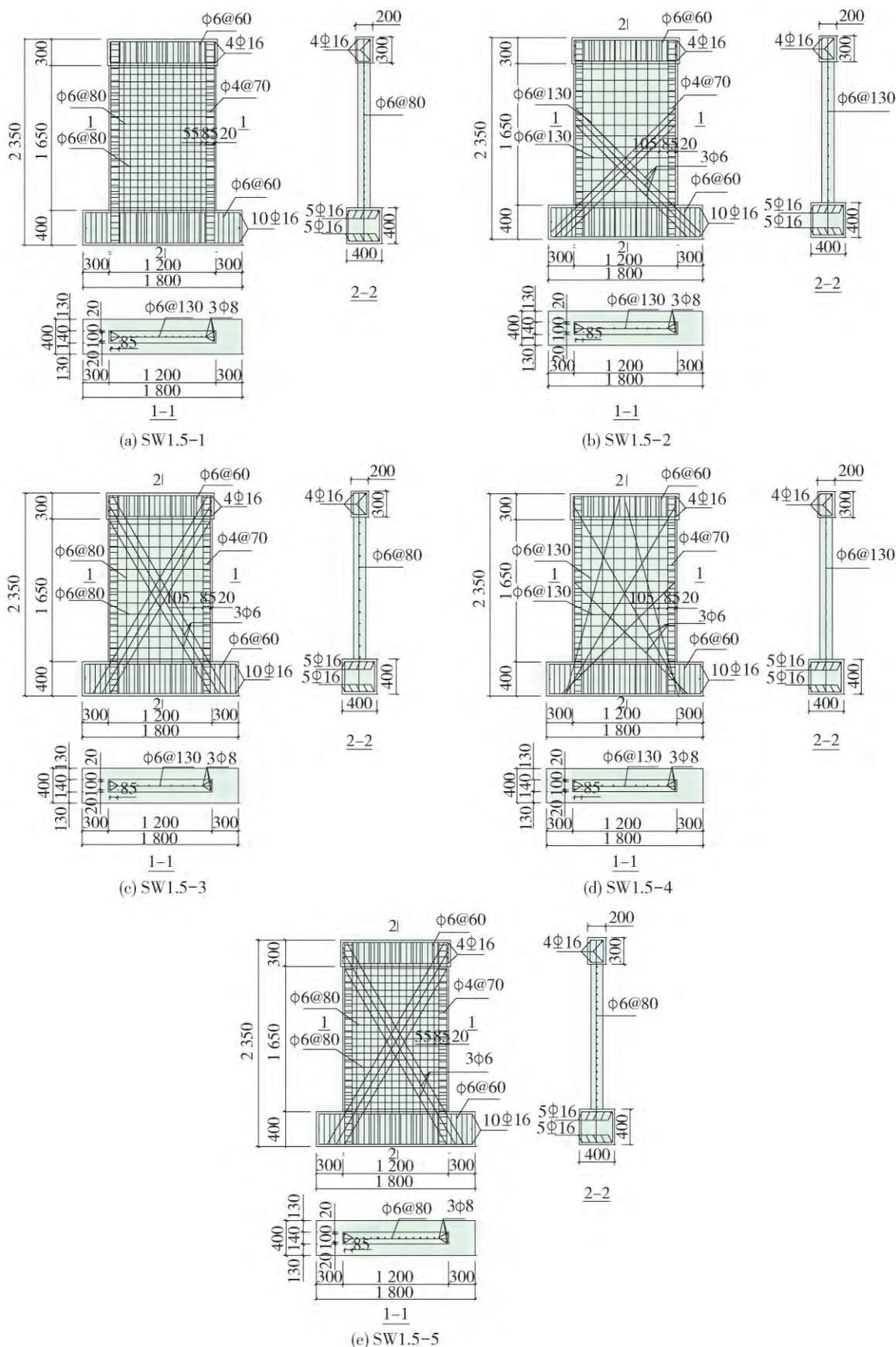


图 1 试件配筋图

Fig. 1 Reinforcement arrangement of specimens

首先,施加竖向荷载 627 kN,使得墙体试验轴压比为 0.1,并在试验过程中保持不变,然后,施加水平往复荷载. 试件屈服前按力控制加载,每级加载往复 1 次. 试件屈服后按水平位移控制加载,每级加载往复 2 次. 当剪力墙水平承载力降低到 85% 峰值荷载以下时,试验结束. 试验加载制度如图 3 所示.

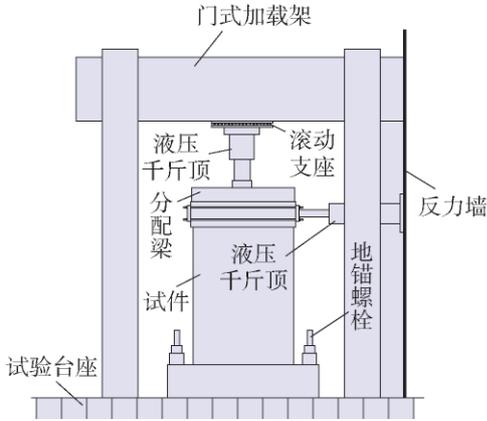


图2 试验加载装置
Fig. 2 Test setup

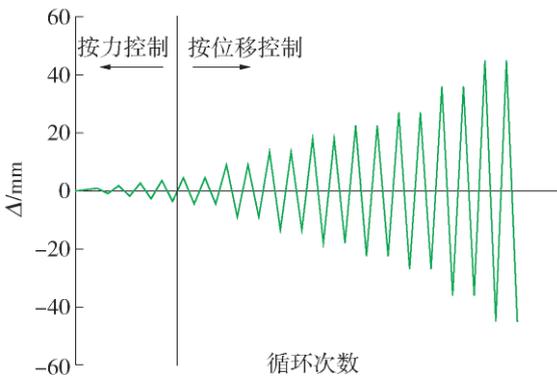
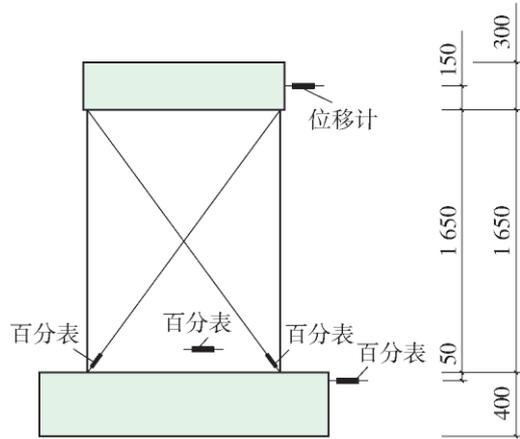


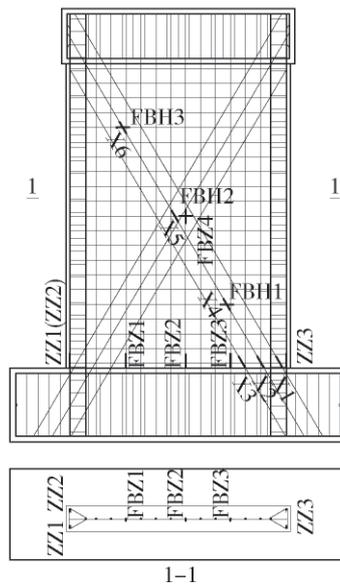
图3 加载制度
Fig. 3 Loading process

1.4 测点布置

在水平力作用位置布置 1 个位移计,位移计距离墙底 1 800 mm,用来量测墙体在正、负向加载过程中的水平位移;在基础梁上布置 1 个百分表,用来监测基础滑移位移;在墙体对角线布置 2 个百分表,用来量测墙体加载过程中的剪切变形;墙底中部布置 1 个百分表,用来测量墙体水平滑移变形. 各试件的位移传感器布置见图 4 (a). 钢筋应变测点位于墙底暗柱纵筋、墙底竖向分布钢筋、墙体分布钢筋、斜筋. 试件 SW1.5-5 的钢筋应变测点布置情况如图 4 (b) 所示.



(a) 位移测点布置



(b) SW1.5-5钢筋应变测点布置

图4 变形与应变测点布置

Fig. 4 Measurement points arrangement of specimens

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

试件最终破坏形态如图 5 所示. 各试件裂缝均集中在墙体中下部,加载开始时在下部墙体边缘出现裂缝,随着荷载增加,裂缝沿着水平方向持续发展. 在循环往复荷载的作用下,逐渐形成左右相互贯通的弯曲裂缝. 墙体中最大裂缝宽度均出现在墙体与基础的基础的连接部位. 各试件的破坏形态均呈弯曲破坏特征,墙体暗柱纵筋先受拉屈服,最终墙角混凝土压碎.

试验过程中,量测了墙体在不同受力阶段的最大裂缝宽度. 图 6 和图 7 是 4 个相同配筋量的剪力墙,在峰值荷载前各循环加载最大情况下测得的墙

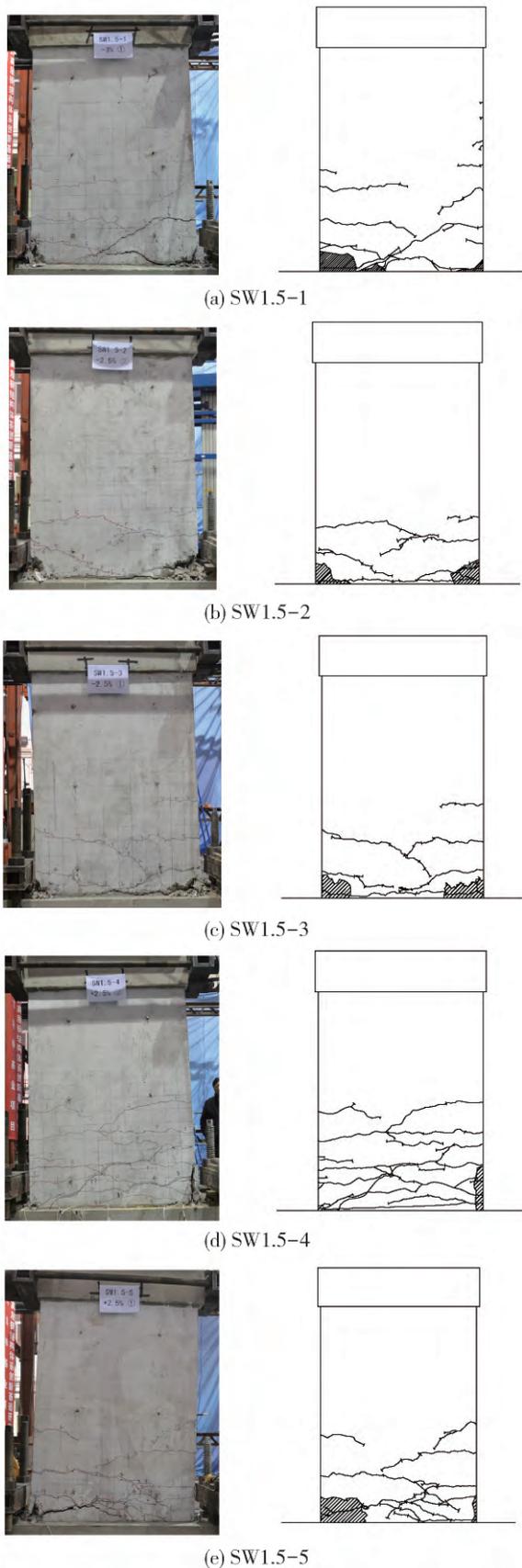


图 5 破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

体与基础连接部位最大裂缝宽度和墙体中下部最大裂缝宽度发展情况. 由图可见: 在配筋量相同的情况下, 墙体配筋形式对墙体底部水平弯曲裂缝开展影响不明显, 但对墙体中下部裂缝宽度发展有重要影响, 设置斜筋能提高墙体斜向主拉应力方向的抗拉能力, 有效控制墙体中下部斜裂缝开展, 从而减小裂缝宽度, 其中 60°和扇形布置斜筋效果较好.

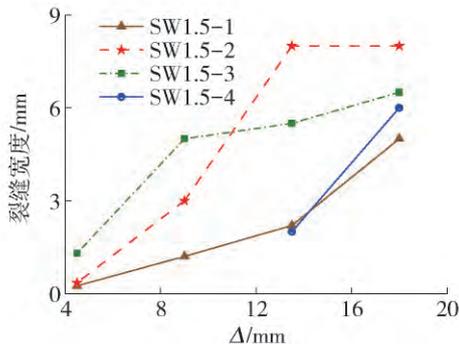


图 6 墙体与基础连接处最大裂缝宽度

Fig. 6 Maximum crack width between wall and foundation

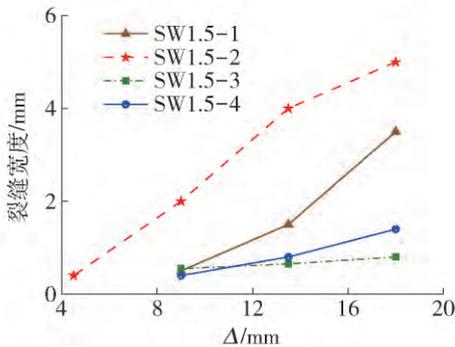


图 7 墙体内部最大裂缝宽度

Fig. 7 Maximum crack width in the wall

加载后期, SW1.5-1 墙体中未配置斜筋, 斜向裂缝开展和墙底滑移不能得到有效控制, 墙体变形发展较快, 最终因墙底角部混凝土压碎脱落而失效. SW1.5-2 墙体裂缝主要为水平裂缝, 最大裂缝出现在墙底与基础连接处, 这主要是因为墙体分布筋配筋率降低, 改为布置增强底部抗剪切滑移能力的斜向 45°钢筋, 使得其正截面抗弯能力相对减弱, 水平弯曲裂缝开展充分, 墙体斜裂缝开展较少. 试件 SW1.5-3 将斜筋的配置角度调整为 60°, 裂缝主要为水平弯曲裂缝. 由图 5 ~ 7 可见, SW1.5-2 和 SW1.5-3 具有相似的裂缝分布, 但 SW1.5-2 的裂缝宽度发展更快, 这说明在中高剪力墙中, 60°布置斜筋对于控制裂缝更为有效. 试件 SW1.5-4 将 3 根斜筋调整为扇形分布(45°、60°、75°), 裂缝以水平

弯曲裂缝为主,加载后期在墙底形成交叉斜裂缝,最大裂缝出现在墙底与基础连接处;与 SW1.5-1、SW1.5-2 和 SW1.5-3 相比,裂缝数量显著增多.这是因为墙体纵向分布钢筋配筋率较低,首先,在墙体受拉区边缘形成较多水平裂缝,由于扇形分布的斜向钢筋随着高度的增长而愈加分散,与平行布置斜筋相比,水平抗剪能力相对减弱,抗弯能力相对增强,水平裂缝斜向延伸,墙体裂缝开展充分.试件 SW1.5-5 裂缝主要是水平弯曲裂缝,加载后期裂缝斜向下延伸.这是因为试件在 SW1.5-3 的配筋基础上,增大墙体分布钢筋配筋率,提高了墙体抗弯能力,在加载后期,由于抗剪能力相对较弱,水平裂缝开始斜向下发展,最终试件由于受压区混凝土压碎脱落而失效.

2.2 滞回曲线

各试件的水平荷载-位移滞回曲线如图 8 所示.加载初期,各试件的滞回曲线为一条直线,基本无残余变形,试件处于弹性工作阶段.随着荷载增大,混凝土开裂,试件刚度下降,卸载后残余变形不断增加.试件 SW1.5-5 加载到 $1/80$ 位移角时,平面外弯曲变形明显,若继续按照原轴压比 0.1 进行试验,可能造成墙体平面外压弯破坏,故降低轴压比至 0.07 继续进行试验,所以其后期滞回性能明显不同于其他试件.

由图 8 可以看出,SW1.5-1~SW1.5-4 滞回曲

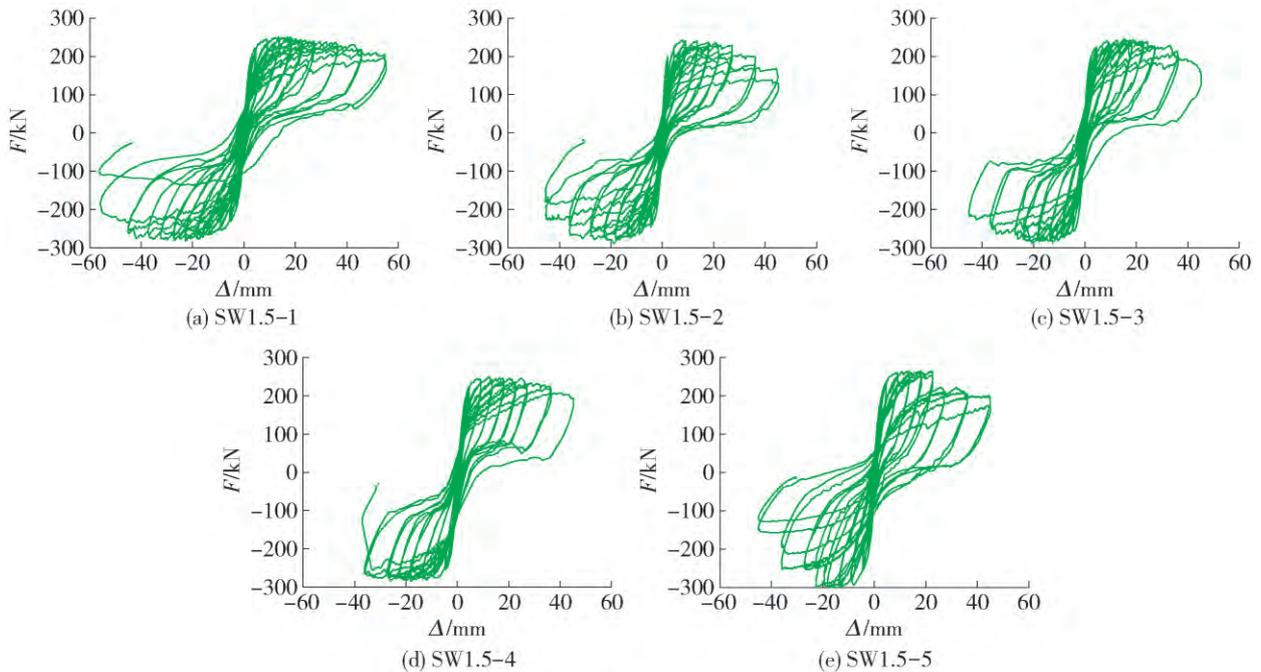


图 8 水平荷载-位移滞回曲线

Fig. 8 Horizontal load-displacement hysteretic loops

线捏缩效应明显,这是因为随着荷载的反复作用并不断增大,墙体裂缝变宽,钢筋滑移增多,在卸载后期和反向加载初期,裂缝位置的水平剪力主要由钢筋承担,此时墙体会很大的剪切滑移,承载力很低,剪力墙刚度也很小.加载后期,试件 SW1.5-3 和 SW1.5-4 滞回曲线相对饱满些,这是因为合理的墙体钢筋分布形式能够减轻墙体剪切滑移和控制斜裂缝开展.试件 SW1.5-5 降低轴压比后,滞回曲线捏缩效应有所减轻.

2.3 承载力

各试件荷载-位移骨架曲线如图 9 所示.从骨架曲线可以看出,各试件加载过程具有弹性、塑性和破坏 3 个阶段.屈服前刚度基本相同;塑性阶段除 SW1.5-5 承载力有一定提高外,其余试件峰值荷载比较接近,这是因为墙体呈弯曲破坏,承载能力主要由墙体边缘纵向钢筋量决定,改变分布钢筋的配筋形式对承载能力影响不大;破坏阶段各试件的承载力下降均较平缓,承载能力相对稳定.

水平承载力特征值列于表 3,其中: F_{cr} 为明显开裂荷载; F_y 为按等能量法得到的试件屈服荷载; F_u 为试件峰值荷载.

由表 3 可以看出:

1) 与普通单排配筋剪力墙 SW1.5-1 相比,带斜筋剪力墙的开裂荷载均与之接近.改变墙体配筋形式和提高墙体配筋率对开裂荷载影响不大.

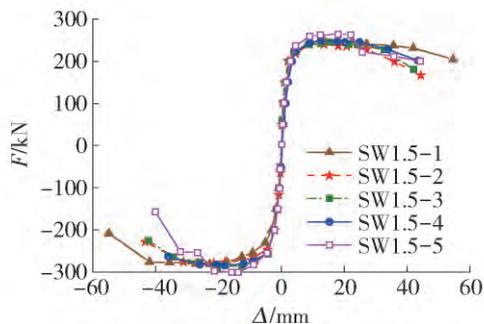


图 9 水平荷载-位移骨架曲线

Fig. 9 Horizontal load-displacement envelope curves

2) 与 SW1.5-1 相比, 试件 SW1.5-2 ~ SW1.5-4 的屈服荷载依次提高了 0.4%、2.8%、2.5%, 峰值荷载依次提高 0.5%、2.3%、1.4%。由此可见, 改变墙体配筋形式对中高剪力墙承载能力影响不大。其原因是低配筋量的单排配筋混凝土中高剪力墙的破坏形式为弯曲破坏, 破坏时墙体边缘纵向钢筋受拉屈服, 墙体边缘纵向钢筋配筋量是决定其承载能力的关键因素, 墙体分布钢筋对其影响较小。

3) 试件 SW1.5-5 与 SW1.5-1 相比, 屈服荷载和峰值荷载分别提高了 6.6% 和 8%, 这表明增设 60° 斜筋对墙体的抗弯能力有一定贡献。

表 3 水平荷载特征值

Table 3 Characteristic horizontal load of specimens

试件	F_{cr}/kN	F_{cr} 相对值	F_y/kN			F_y 相对值	F_u/kN			F_u 相对值
			正向	负向	均值		正向	负向	均值	
SW1.5-1	80.2	1.000	219.7	238.6	229.1	1.000	251.1	281.7	261.9	1.000
SW1.5-2	79.4	0.990	213.4	246.9	230.1	1.004	247.6	278.9	263.2	1.005
SW1.5-3	77.4	0.966	212.1	258.9	235.5	1.028	245.6	290.1	267.9	1.023
SW1.5-4	79.9	0.997	222.7	246.9	234.8	1.025	246.3	284.6	265.4	1.014
SW1.5-5	77.3	0.964	230.3	258.0	244.2	1.066	264.3	301.4	282.9	1.080

2.4 延性

各试件的位移特征值列于表 4。其中: Δ_{cr} 表示开裂位移; Δ_y 表示屈服位移; Δ_u 表示峰值位移; Δ_d 表示极限位移; 位移角 $\theta = \Delta/H$; 位移延性系数 $\mu = \Delta_d /$

Δ_y 。 Δ_y 为利用能量法^[12] 求得的屈服荷载所对应位移值, Δ_d 为承载力下降到峰值荷载的 85% 时对应的极限位移。

表 4 位移特征值

Table 4 Characteristic displacement of specimens

试件	Δ_{cr}/mm	Δ_y/mm	Δ_u/mm	Δ_d/mm	θ_d/rad	μ	μ 相对值
SW1.5-1	1.0	5.3	20.4	49.8	1/36	9.3	1.000
SW1.5-2	0.9	4.2	19.2	36.9	1/49	8.9	0.951
SW1.5-3	0.8	4.0	17.9	37.3	1/48	9.3	0.996
SW1.5-4	1.0	4.5	17.7	40.8	1/44	9.1	0.972
SW1.5-5	0.9	4.5	15.9	39.7	1/45	8.8	0.939

由表 4 可以看出:

1) 各试件极限位移角 θ_d 均远大于规范规定的剪力墙在大震作用下的弹塑性位移角限值 1/120^[2], 具有很好的变形能力。

2) 与 SW1.5-1 相比, 带斜筋剪力墙试件 SW1.5-2 ~ SW1.5-4 的延性系数略有降低, 降低幅度在 5% 以内。由于斜筋限制了墙底剪切滑移和墙

体裂缝开展, 减小了墙体的水平变形, 使得试件屈服位移和峰值位移有所减小, 试件达到峰值位移后, 骨架曲线下降速度比试件 SW1.5-1 略快, 墙体较早达到极限位移。

2.5 刚度

各试件的实测特征刚度值列于表 5, 其中: K_0 为初始刚度; K_{cr} 为开裂刚度; K_y 为屈服刚度; K_u 为峰值

荷载对应的割线刚度。

由表5可见:各试件的初始刚度相近,墙体开裂后,带斜筋剪力墙的刚度衰减速度相对较慢。其原因是斜筋布置角度趋近于墙体主拉应力方向,有效

地承担了墙体斜向主拉应力,限制了墙体斜裂缝的开展,增强了墙体斜裂缝间的骨料咬合作用,减小了墙体剪切变形,同时限制了墙底剪切滑移变形,从而减缓了墙体刚度衰减速度。

表5 实测刚度特征值

Table 5 Characteristic stiffness of specimens

试件	$K_0 / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_{cr} / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_y / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	$K_u / (\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	K_{cr} / K_0	K_y / K_0	K_u / K_0
SW1.5-1	108.4	80.2	43.2	12.8	0.74	0.40	0.12
SW1.5-2	116.3	88.2	54.8	13.7	0.76	0.47	0.12
SW1.5-3	116.2	96.8	58.9	15.0	0.83	0.51	0.13
SW1.5-4	112.1	79.9	52.2	15.0	0.71	0.47	0.13
SW1.5-5	118.2	85.9	54.3	17.8	0.73	0.46	0.15

2.6 耗能能力

滞回曲线所包围的面积反映了试件的耗能能力,SW1.5-1~SW1.5-5的累计耗能 E_p 和等效黏滞阻尼系数 h_e 随水平位移发展的变化规律如图10、11所示。

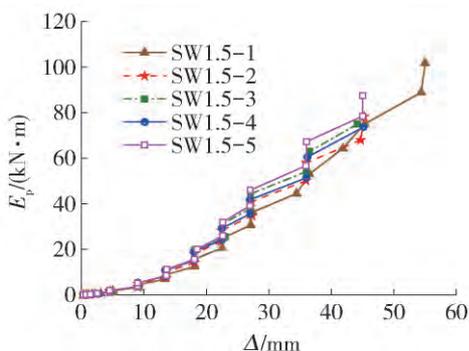


图10 累计耗能发展曲线

Fig. 10 Energy dissipation curves for specimens

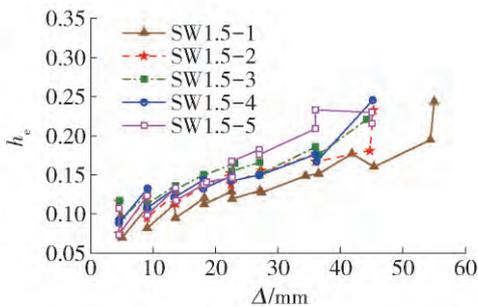


图11 等效黏滞阻尼系数变化曲线

Fig. 11 Equivalent viscous damping coefficient curves for specimens

表6列出了各试件在1/40位移角下的累计耗能和等效黏滞阻尼系数。

由图10、11和表6可以看出:

1) 与试件SW1.5-1相比,带斜筋试件的耗能能力均有提高。试件SW1.5-2由于加载后期承载力下降较快,耗能提高较少。试件SW1.5-3、SW1.5-4、SW1.5-5累计耗能提高相对明显,这表明斜筋的合理布置形式和增加钢筋用量对单排配筋混凝土中高剪力墙的耗能能力提高作用明显。

2) 混凝土开裂以后,等效黏滞阻尼系数随位移的增长基本呈线性增长。与SW1.5-1比较,在1/40位移角时,SW1.5-2~SW1.5-5等效黏滞阻尼系数依次提高了2.2%、24.6%、38.8%、29.8%,试件SW1.5-4等效黏滞阻尼系数最大,这是因为扇形斜筋有效限制裂缝宽度发展,在墙体中形成较多细小裂缝,在循环往复荷载作用下,裂缝两侧混凝土摩擦耗能,材料性能充分发挥。

表6 试件在1/40位移角时耗能实测值

Table 6 Measured results of energy dissipation for specimens under drift ratio of 1/40

试件	$E_p / (\text{kN} \cdot \text{m})$	E_p		h_e	
		相对值	h_e	相对值	h_e
SW1.5-1	64.291	1.000	0.177	1.000	
SW1.5-2	67.993	1.058	0.181	1.022	
SW1.5-3	75.001	1.167	0.221	1.246	
SW1.5-4	73.699	1.146	0.246	1.388	
SW1.5-5	78.471	1.221	0.230	1.298	

2.7 水平剪切滑移变形

图12所示为各试件水平剪切滑移变形 Δ_{sl} 在总变形 Δ 中所占比例的发展变化规律。当加载位移较

小时,试验设备及量测仪器引起相对误差较高,致使数据失真,因此,图中给出了按位移控制加载后的发展变化情况。

由图 12 可以看出,试件 SW1.5-1 的水平剪切滑移变形在总变形中所占比例随墙体水平变形的增大而增加,试件破坏阶段由于边缘暗柱纵筋被拉断,剪切滑移变形比例增加幅度有所加大。其他各试件加载到峰值位移后,剪切滑移变形比例均低于 SW1.5-1。这表明在加载后期,斜筋对于控制墙体剪切滑移变形有一定影响。在配筋率相同的条件下,扇形布置斜筋对于剪切滑移变形限制最为有效。

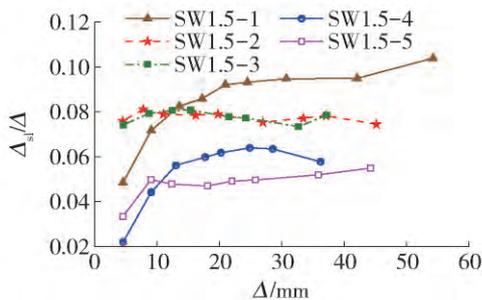


图 12 水平剪切滑移变形发展曲线
Fig. 12 Shear-slip deformation curves

2.8 钢筋应变

图 13 所示为配筋量相同试件 SW1.5-1 ~ SW1.5-4 的边缘暗柱底部钢筋 ZZ1 测点在第 7、8 循环加载的应变滞回曲线。

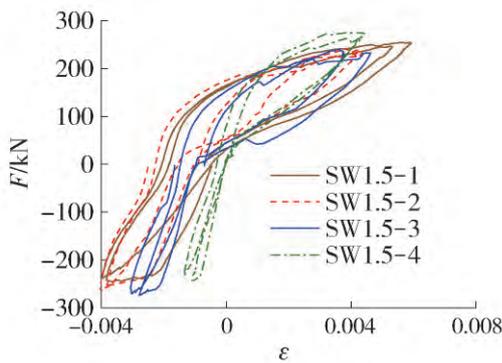


图 13 暗柱底部纵筋应变滞回曲线
Fig. 13 Load-strain hysteresis loops of vertical bars in the boundary element

由图可见,各试件边缘暗柱纵筋均已受拉屈服。与 SW1.5-1 相比,其他 3 个试件的边缘暗柱纵筋应变发展速度减慢,这是因为斜筋有效限制了裂缝的开展,减慢了墙体刚度衰减速度,并减小了剪切滑移变形而产生的影响。

2.9 承载力计算

根据文献 [11] 建立的带斜筋单排配筋混凝土剪力墙正截面和斜截面承载力计算公式对本文试验墙体进行计算,结果列于表 7。由表 7 可见,计算结果与实测结果符合较好,且其正截面承载力低于斜截面承载力,故各剪力墙在试验过程中发生了弯曲破坏。

表 7 承载力计算值

Table 7 Calculated results of load-carrying capacity

试件编号	斜截面承载力/kN	正截面承载力/kN		正截面承载力相对误差/%
		实测值	计算值	
SW1.5-1	421.9	261.9	252.7	-3.53
SW1.5-2	406.4	263.2	253.7	-3.61
SW1.5-3	391.6	267.9	256.4	-4.31
SW1.5-4	390.4	265.4	256.1	-3.50
SW1.5-5	457.6	282.9	267.1	-5.58

3 结论

- 1) 对于单排配筋混凝土中高剪力墙,配置斜筋能够有效限制墙体斜裂缝的开展,减小墙体底部水平剪切滑移变形,改善其抗震性能。
- 2) 墙体分布钢筋的配置形式变化对单排配筋混凝土中高墙的破坏形态、极限承载力和延性影响不大。
- 3) 在配筋率不变的情况下,配置交叉斜筋能够在一定程度上减小墙体剪切滑移变形,提高单排配筋混凝土中高剪力墙的抗震耗能能力。
- 4) 斜筋的配置角度对墙体抗震性能有一定的影响,60°仰角或扇形(45°、60°、75°)布置斜筋效果较好。

参考文献:

[1] 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 C Y, WANG Y P, ZHANG W Y, et al. Analysis on building structure defect of masonry structures in Qinghai rural by Yushu earthquake [J]. Architecture Technology, 2012, 43(5): 435-438. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 131-133.

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 66-73.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 9-10, 77-95.
- [5] 曹万林, 孙天兵, 杨兴民, 等. 双向单排配筋混凝土高剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 世界地震工程, 2008 (3): 14-19.
CAO W L, SUN T B, YANG X M, et al. Experimental study on seismic performance of high-rise shear wall with bi-directional single row of steel bars [J]. World Earthquake Engineering, 2008(3): 14-19. (in Chinese)
- [6] 曹万林, 殷伟帅, 杨兴民, 等. 双向单排配筋中高剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2009 (1): 103-108.
CAO W L, YIN W S, YANG X M, et al. Experimental study on seismic performance of medium-height RC shear wall with bi-directional single row of steel bars [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009(1): 103-108. (in Chinese)
- [7] 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 (1): 77-81.
ZHANG J W, YANG X M, CAO W L, et al. Seismic behavior and design method of RC shear wall structure with single row of steel bars [J]. World Earthquake Engineering, 2009(1): 77-81. (in Chinese)
- [8] 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 H, HUANG X K, KONG H, 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. (in Chinese)
- [9] 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 M, CHENG H Y, ZHANG J W, 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. (in Chinese)
- [10] 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 M, CHENG H Y, YANG X M, 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. (in Chinese)
- [11] 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 J W, HU J M, YANG X M, 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. (in Chinese)
- [12] 过镇海. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 335-336.

(责任编辑 郑筱梅)