

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201609108

半装配式再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验

刘程炜,曹万林,董宏英,王世蒙,秦成杰

(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:为研究半装配式单排配筋混凝土剪力墙结构的抗震性能以及再生混凝土在预制剪力墙中的应用效果,设计了4个不同轴压比下工字形半装配式单排配筋普通混凝土和再生混凝土剪力墙试件,试件由底部带预留孔的上层预制剪力墙、带墩头竖向分布钢筋的基础梁、二者之间的坐浆层以及纵横墙交接处的现浇暗柱组成,基础梁顶部伸出的单排竖向墩头钢筋伸入上层预制墙体底部的预留孔中,采用灌浆锚固的方法连接,并进行了低周反复荷载试验,分析了各个试件的破坏特征、承载力、刚度以及耗能等.结果表明:在水平荷载作用下,预制剪力墙与基础梁之间的连接部位出现水平通缝并产生较小滑移,墙身分布着X形交叉斜裂缝;随着轴压比的增大,试件的承载力提高,但延性较差;再生混凝土试件的破坏形态和受力性能与普通混凝土试件相近,再生混凝土可用于工厂预制的结构构件中;半装配式单排配筋混凝土剪力墙构造简单、施工方便,且抗震性能良好,可用于低多层剪力墙结构中.

关键词:半装配式;单排配筋;再生混凝土;低矮剪力墙;抗震性能

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)06-0035-05

Test on seismic behavior of semi-assembled low-rise recycled concrete shear walls

LIU Chengwei, CAO Wanlin, DONG Hongying, WANG Shimeng, QIN Chengjie

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

Abstract: To evaluate the seismic behavior of semi-assembled shear wall with single row of steel bars and the application effect of recycled concrete in the precast shear walls, four I-shaped semi-assembled concrete shear wall specimens with single row of steel bars were designed. This type of specimen consisted of an upper precast concrete shear wall with reserved holes at the bottom, a foundation beam with single row of button-head steel bars, slurry layer between the precast shear wall and the foundation beam, and cast-in-place concealed columns between longitudinal and transversal walls. Button-head steel bars extending from the surface of the foundation beam were anchored in the reserved holes of the precast shear wall, with high strength grouting material filling the holes. Specimens were tested under cyclic reversed loading and different axial compression. Failure character, bearing capacity, stiffness, energy dissipation were compared, and the results show that: under the horizontal load, horizontal crack and a small slip appear in the joint connection between the precast shear wall and the foundation beam, X-shaped cracks distribute in the precast wall; with the increase of axial compression ratio, the bearing capacity of specimens is improved, but the ductility is reduced; the failure mode and mechanical properties of recycled concrete specimens are similar to those of normal concrete specimens; the semi-assembled shear wall structure with single row of steel bars has the advantages of simple structure, convenient construction and good seismic performance, and it can be used in low-rise and multistory residential structures.

Keywords: semi-assembled; single row of steel bars; recycled concrete; low-rise shear wall; seismic behavior

目前,装配式混凝土剪力墙结构以其量产化、工期短、资源节约环保等优点在中国得到了大力推广.已有研究表明^[1-2],采用套筒连接、浆锚连接等方式进行装配的预制剪力墙结构性能良好,但造价较高、施工较为繁琐.如何经济高效地在低、多层房屋中应用装配式建造技术成为新的课题.单排配筋混凝土

剪力墙结构构造简单,满足低、多层房屋的抗震要求^[3];张微敬等^[4]对竖向分布钢筋单排套筒连接的预制剪力墙进行了抗震性能研究,证明竖向钢筋与套筒连接的钢筋间接搭接能够有效传递应力;同时,建筑垃圾资源化技术也在逐渐发展,发展再生骨料混凝土是建筑垃圾资源化的重要组成部分.本课题组将装配式建造技术和单排配筋再生混凝土剪力墙结构相结合,提出了半装配式单排配筋再生混凝土剪力墙结构.该结构由上层预制剪力墙、下层预制剪力墙、上下层墙体间的坐浆层以及纵横墙交接处的

收稿日期:2016-09-28

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0701902)

作者简介:刘程炜(1987—),女,博士研究生;

曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者:曹万林,wlcao@bjut.edu.cn

现浇暗柱组成.上下层预制剪力墙连接时,下层预制墙体顶部伸出的单排竖向墩头钢筋伸入上层预制墙体底部的预留孔中,并灌入高强灌浆料,通过墩头钢筋在预留孔中灌浆锚固的方法连接.本文对 2 个工字形半装配式单排配筋普通混凝土剪力墙试件和 2 个工字形半装配式单排配筋再生混凝土剪力墙试件在不同轴压比下的抗震性能进行了试验研究.

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了 4 个剪跨比 1.0 的工字形半装配式单排配筋混凝土剪力墙试件,纵横墙交接处的暗柱为现浇,腹板与暗柱两侧的翼缘部分为预制.上层预制剪力墙与基础梁采用墩头钢筋预留孔灌浆连接,二者之间为 20mm 厚坐浆层,墙体底部预留孔直径为 50 mm,高度为 165 mm.4 个试件的尺寸及配筋完全一致.腹板宽度为 1 060 mm,厚度为 140 mm;翼缘宽度为 430 mm,厚度为 140 mm;加载梁尺寸为 1 340 mm×430 mm×300 mm;预制基础梁尺寸为 1 800 mm×430 mm×450 mm.腹板水平分布钢筋、竖向分布钢筋均为单排 $\Phi 10@200$,墙底设置由双排 $\Phi 6$ 水平钢筋和 $\Phi 4$ 箍筋组成的钢筋笼,现浇暗柱配筋 4 $\Phi 10$,箍筋为 $\Phi 4@70$ 镀锌铁丝.基础梁中对应腹板位置配置 5 $\Phi 10$ 带墩头竖向连接钢筋,对应翼缘两侧预制部分各配置 1 $\Phi 12$ 带墩头连接钢筋.

试件编号规则:以 B-0.15-0 为例,首字母 B 表示半装配式剪力墙试件,中间 0.15 为设计轴压比,最后为 0 表示采用天然混凝土,若为 33 则代表采用再生粗骨料取代率 33%的再生混凝土.试件主要参数见表 1,尺寸及配筋见图 1.

表 1 试件参数
Tab.1 Test parameters

试件编号	混凝土类别	轴压比设计值	轴压力/kN
B-0.15-0	普通混凝土	0.15	750
B-0.15-33	再生混凝土	0.15	800
B-0.3-0	普通混凝土	0.30	1 500
B-0.3-33	再生混凝土	0.30	1 600

1.2 试件制作

首先分别预制墙体腹板、翼缘的两侧以及基础梁.腹板底部预留 5 个直径 50 mm、高度 165 mm 的圆孔,圆孔周围配置钢筋笼;暗柱两侧的预制翼缘作为整体同时预制,在同一位置采用同一根水平钢筋相连,钢筋两侧末端设置 U 形弯钩,锚固在翼缘预制部分(实际工程中,预制剪力墙中的水平钢筋,可采用 U 形弯钩锚固在暗柱中),翼缘两侧底部各预留一个直径 50 mm、高度 165 mm 的圆孔,腹板和翼

缘侧面分别预留直径 20 mm 的与底部圆孔相通的注浆孔;预制基础梁对应上层墙体预留孔位置的带墩头竖向钢筋伸出表面 170 mm,对应暗柱部位伸出 4 根沿墙体高度通长的竖向钢筋.吊装预制墙体,将基础梁伸出的墩头钢筋伸入腹板及翼缘底部的预留孔中,用垫块留出 20 mm 坐浆层厚度,从墙体侧面的注浆孔灌浆,灌浆料充满预留孔及坐浆层,通过灌浆料与预留孔孔壁粘结、墩头钢筋在灌浆料中锚固,完成预制墙体与基础梁之间的连接,随后浇筑暗柱及加载梁混凝土,完成腹板与翼缘两侧的连接.试件制作过程见图 2.

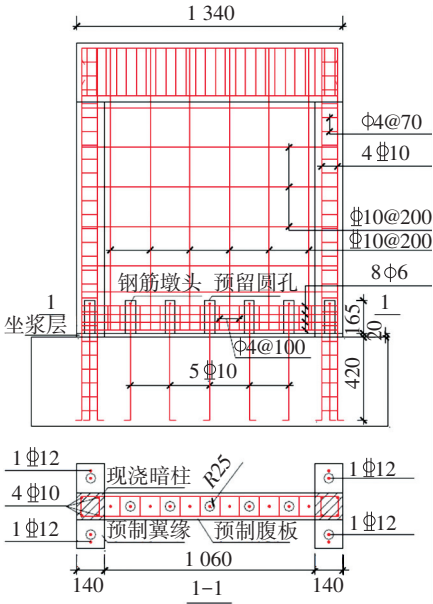


图 1 试件几何尺寸及配筋

Fig.1 Geometry dimension and steel bar details of specimens

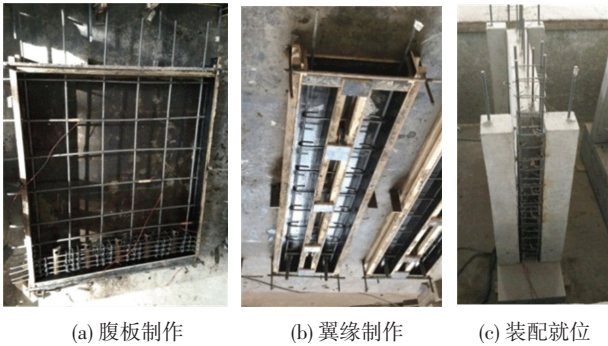


图 2 试件制作

Fig.2 Making of specimens

1.3 材料性能

预制剪力墙混凝土采用 C50 级普通混凝土和再生混凝土(再生粗骨料取代率 33%),再生粗骨料为废弃混凝土经机械破碎后人工分拣得到,粒径大小为 5~25 mm,堆积密度 1 252.8 kg/m³,表观密度 2 575.5 kg/m³,压碎指标 2.99%,含泥量 2.25%.普通混凝土实测强度 $f_{cu}=46.85$ MPa,再生混凝土实测强

度 $f_{cu} = 51.95$ MPa。高强灌浆料选择 CGMJM-VI 型泵送钢筋接头灌浆料,按照现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》^[5] 测得其抗压强度为 77.5 MPa。剪力墙水平分布钢筋与部分竖向分布钢筋选用直径 10 mm 的 HRB400 级钢筋,实测强度 $f_y = 486$ MPa, $f_u = 688$ MPa,断后伸长率为 20.8%;翼缘两侧竖向钢筋选用直径 12 mm 的 HRB400 级钢筋,实测强度 $f_y = 458$ MPa, $f_u = 591$ MPa,断后伸长率为 23.2%。

1.4 加载方案

采用拟静力试验方法,首先按照设计轴压比 $n = 1.2 N / f_c A$,计算施加的竖向荷载 N ,结果见表 1。其中混凝土强度 $f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu}$, $f_c = f_{ck} / 1.4$ 。试验过程中利用 2 000 kN 的液压千斤顶-滚轴支座-分配梁加载系统施加恒定的竖向荷载,然后施加低周反复水平荷载,加载点距离基础梁顶面 1 340 mm。试件屈服前,采用水平力控制加载,试件屈服后,采用位移控制加载,每级荷载或位移加载一次,直至试件明显破坏或水平荷载下降至峰值荷载的 85%。

在加载梁中央布置位移计,量测 1.34 m 高度处的水平位移;在基础梁中线顶部布置百分表,量测基础梁水平位移;在腹板底部中间位置布置百分表,量测预制墙体与基础梁之间的剪切滑移。墩头连接钢筋上布置应变片,位置在距离基础梁顶面 20 mm 处,以研究间接搭接的竖向墩头钢筋能否有效传力。试验过程中,竖向荷载、水平荷载、水平位移、钢筋应变等数据通过 IMP 数据采集系统自动采集,人工观测混凝土墙体裂缝并记录损伤过程。

2 破坏过程和破坏形态

各试件破坏过程相似,以 B-0.15-33 为例,水平荷载达到 140 kN 时,翼缘底部坐浆层与基础梁之间出现水平裂缝。水平荷载达到 400 kN 时,受拉翼缘距基础梁顶面 12 cm 处出现水平缝。按位移控制加载, $2\Delta_y$ 时,翼缘外侧由下至上产生多条水平裂缝,原有裂缝继续开展。 $3\Delta_y$ 时,腹板沿对角线产生剪切斜裂缝,继续加载,墙体斜裂缝发展成数条交叉裂缝;坐浆层上下的水平缝在推拉荷载作用下由翼缘迅速向腹板中部发展直至贯通整个墙体,剪力墙与基础梁之间发生滑移;腹板预留孔顶部位置产生水平裂缝。达到峰值荷载时,翼缘外侧在基础梁顶面以上 18 cm 处(即预留孔顶部位置)的水平裂缝宽度达到 10 mm,预制翼缘底部的混凝土破碎严重,坐浆层处水平裂缝宽 5 mm,正反向加载时剪力墙水平滑移值分别为 2.78、1.89 mm。极限荷载时,坐浆层处水平裂缝宽 8 mm,正反向加载时剪力墙水平滑移值分

别为 4.32、2.79 mm,翼缘底部混凝土碎裂脱落。其破坏形态与裂缝分布见图 3。



图3 B-0.15-33 破坏形态与裂缝分布

Fig.3 Failure modes and crack distribution of B-0.15-33

各试件坐浆层处的水平裂缝沿接触面贯通,受拉区水平裂缝较宽,剪力墙与基础梁之间均产生剪切滑移,翼缘由下至上产生多条水平裂缝,腹板分布着多条 X 形交叉斜裂缝。剪力墙的变形由坐浆层处水平缝的张开、滑移以及墙体本身的弯曲和剪切变形共同组成。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线与骨架曲线

各试件顶点的水平荷载 F 与位移 Δ 滞回曲线和骨架曲线分别见图 4、5。由图 4 可看出,半装配式再生混凝土剪力墙试件的滞回曲线与普通混凝土剪力墙试件相似,加载初期滞回环为细长梭形,随着剪力墙与基础梁之间发生剪切滑移及水平缝的张开,加载曲线在后期变得平缓,且由于剪力墙与基础梁之间的裂缝宽度不断增大,卸载时开始曲线较陡,之后恢复变形加快,曲线平缓,捏拢现象逐渐明显,残余变形越来越大。由骨架曲线可见,轴压比 0.3 的 2 个试件峰值荷载大于轴压比 0.15 的 2 个试件,但其极限位移较小;轴压比相同时,混凝土实测强度较高的再生混凝土试件峰值荷载较大。

3.2 承载力分析

表 2 列出了各试件的开裂荷载 F_{cr} 、屈服荷载 F_y 和峰值荷载 F_p 。

预制翼缘底部混凝土受压破坏之后,其中的连接钢筋逐渐失去作用,由试验过程中测得的钢筋应变可知,峰值荷载时翼缘两侧的连接钢筋未达到屈服强度,没能充分发挥作用,为提高安全可靠,建议在计算半装配式剪力墙的正截面承载力时,忽略翼缘连接钢筋的作用。表 3 列出了根据规范[6]并参考文献[3]得到的试件承载力计算值,钢筋屈服强度取实测值,混凝土轴心抗压强度取 $f_c = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu}$ 。

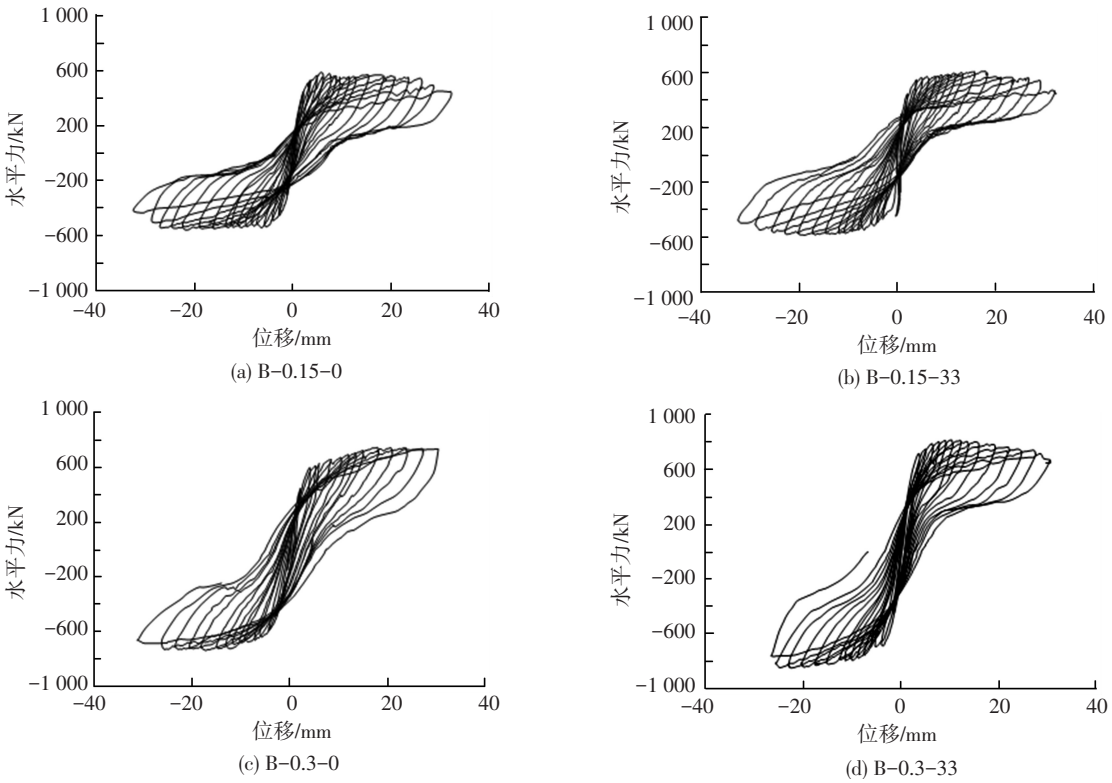


图 4 试件顶点水平荷载 F 与位移 Δ 滞回曲线

Fig.4 F - Δ hysteretic loops of specimens

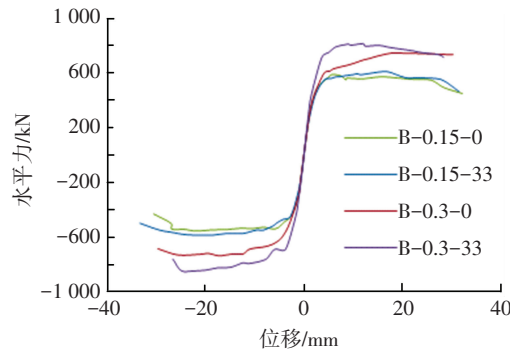


图 5 试件顶点水平荷载 F 与位移 Δ 骨架曲线

Fig.5 F - Δ skeleton curves of specimens

对比表 2、3 中结果可知,各试件试验峰值水

平荷载为承载力计算值的 1.04~1.41 倍.计算斜截面承载力时,规范^[6]规定当 $N>0.2f_cbh_0$ 时取 $N=0.2f_cbh_0$,导致轴压比 0.3、剪跨比 1.0 的半装配式剪力墙试件的承载力计算值远小于实测值,较为保守.

3.3 延性

表 4 列出了试件的屈服位移 Δ_y 、峰值位移 Δ_p 、极限位移 Δ_u 、峰值位移角 θ_p 、极限位移角 θ_u 和位移延性系数 μ , $\mu=\Delta_u/\Delta_y$.结果表明:轴压比 0.15 的试件延性系数大于轴压比 0.3 的试件,延性较好;再生混凝土试件的延性系数略大于普通混凝土试件;4 个试件的极限位移角均达到 1/50 以上,弹塑性变形能力满足规范要求.

表 2 试件开裂荷载、屈服荷载、极限荷载实测值

Tab.2 Experimental results of cracking, yield and ultimate loads kN

试件编号	F_{cr}	F_y			F_p		
		正向	反向	平均	正向	反向	平均
B-0.15-0	140	502.5	426.3	464.4	570.9	555.9	563.4
B-0.15-33	140	522.4	410.7	466.5	609.3	586.6	598.0
B-0.3-0	270	532.0	511.9	526.9	748.1	737.3	742.7
B-0.3-33	230	700.6	680.0	690.3	816.7	849.2	833.0

表 3 试件承载力计算值

Tab.3 Calculations of bearing capacity of specimens kN

试件 编号	斜截面 承载力	正截面 承载力	计算承 载力
B-0.15-0	540.6	556.7	540.6
B-0.15-33	552.2	579.1	552.2
B-0.3-0	573.6	892.5	573.6
B-0.3-33	587.4	937.3	587.4

3.4 刚度

采用割线刚度分析各试件在低周反复荷载作用下的刚度退化,图 6 为试件割线刚度与顶点水平位移的关系曲线.结果表明:各试件的刚度退化曲线基本平行,屈服前刚度下降较快,随着顶点位移的增大刚度退化趋缓.轴压比大的试件刚度相对较大,后期退化相对较快.试件破坏时残余刚度为屈服刚度的

9%~16%。刚度退化的主要原因是反复荷载作用下混凝土的破碎以及接缝处的张开、滑移。

3.5 耗能

采用试件破坏前的总耗能值 A 与能量耗散系数 E 来判断试件的耗能能力^[7]。试件 B-0.15-0、B-0.15-33、B-0.3-0、B-0.3-33 在低周反复荷载作用下每级循环耗

能值的总和 A 分别为 115、111、119、112 kN·m,总耗能值相近。图 7 为能量耗散系数 E 与水平位移 Δ 的关系曲线。每级循环的能量耗散系数随水平位移的增大整体呈上升趋势,接近极限位移时,由于结构的加速破坏和承载力的降低,耗能系数稍有下降。再生混凝土试件的耗能能力与普通混凝土试件相比较小,但相差不多。

表 4 各试件位移及延性系数实测结果

Tab.4 Experimental results of displacement and ductility coefficient

试件编号	Δ_y/mm		Δ_p/mm		Δ_u/mm		θ_p 平均	θ_u 平均	μ 平均
	正向	反向	正向	反向	正向	反向			
B-0.15-0	2.90	2.7	17.4	21.8	32.2	30.5	1/68	1/43	11.2
B-0.15-33	2.80	2.9	17.2	20.5	31.5	33.3	1/71	1/41	11.4
B-0.3-0	3.23	3.1	17.9	17.2	30.3	29.6	1/75	1/45	6.8
B-0.3-33	3.30	3.5	12.0	22.6	28.4	26.6	1/77	1/48	8.1

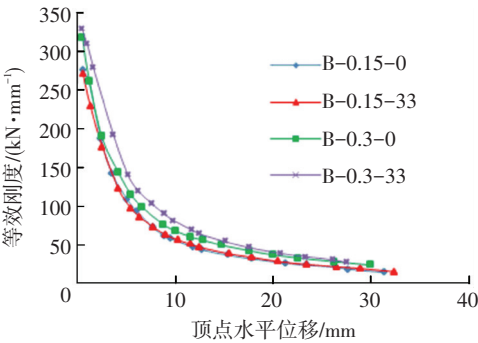


图 6 试件刚度 K 与顶点水平位移 Δ 关系曲线
Fig.6 K - Δ curves of specimens

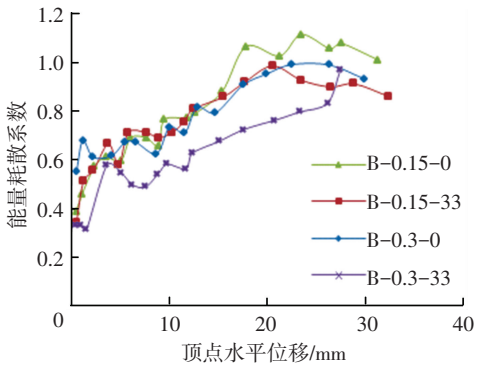


图 7 试件能量耗散系数 E 与顶点水平位移 Δ 关系曲线
Fig.7 E - Δ relation curves of specimens

4 结 论

- 1) 半装配式单排配筋混凝土剪力墙在水平荷载作用下破坏时,预制剪力墙与基础梁之间出现水平通缝并产生较小滑移,翼缘出现多条水平裂缝,墙身分布多条 X 形交叉斜裂缝。
- 2) 半装配式单排配筋再生混凝土剪力墙与普通混凝土剪力墙的抗震性能总体相近;随着轴压比的增大,试件的承载力提高、延性变差。
- 3) 采用墩头钢筋预留孔灌浆连接的半装配式单排配筋混凝土剪力墙抗震性能良好,可用于低层和多层剪力墙结构中。

参考文献

[1] 陈云钢,刘家彬,郭正兴,等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 83-89.
CHEN Yungang, LIU Jiabin, GUO Zhengxing, et al. Test on seismic performance of precast shear wall with reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 83-89.

[2] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B, et al. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal, 1995, 40 (4): 78-96.

[3] 张建伟,曹万林,吴定燕,等. 单排配筋低矮剪力墙抗震试验及承载力模型[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(2): 179-186.
ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, WU Dingyan, et al. Seismic experiment and load-carrying capacity calculation of low-rise RC shear wall with bi-directional single row of steel bars [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(2): 179-186.

[4] 张微微,钱稼茹,于检生,等. 竖向分布钢筋单排间接搭接的带现浇暗柱预制剪力墙抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 89-97.
ZHANG Weijing, QIAN Jiaru, YU Jiansheng, et al. Tests on seismic behavior of precast shear walls with cast-in-situ boundary elements and vertical distributed reinforcements spliced by a single row of steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 89-97.

[5] 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法):GB/T 17671—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
Method of testing cements-determination of strength:GB/T 17671—1999 [S]. Beijing: China Standard Press, 1999.

[6] 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.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[7] 建筑抗震试验方法规程:JGJ 101—1996 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101—1996 [S]. Beijing: China Architecture & building Press, 1997.

(编辑 赵丽莹)