

轴压比取值对考虑波纹管组合钢筋浆锚连接 预制剪力墙抗剪性能的影响

陈 昕^{1,2}, 刘 明^{2,3}, 丁浩爽²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 辽宁省现代建筑产业工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究考虑波纹管组合、钢筋约束浆锚连接的预制混凝土剪力墙在低周期反复荷载作用下的抗剪性能. 方法 通过4片剪力墙构件的拟静力试验, 在设计轴压比取值分别为0.2和0.4的试验工况下对剪力墙的破坏模式、承载力、延性和耗能能力等方面进行分析, 得到了荷载与位移关系的滞回曲线和骨架曲线. 结果 4个试件的破坏模式主要表现为试件边缘竖向钢筋首先受拉屈服, 墙体两侧底部混凝土受压破坏; 各试件滞回曲线饱满, 骨架曲线也基本一致, 采用0.4轴压比的剪力墙试件承载力比轴压比为0.2的试件提高了25%, 延性系数均大于4, 预制剪力墙试件的弹塑性层间位移角大于1/120. 结论 预制墙体的设计轴压比取值较大者, 其内部浆锚钢筋连接仍然保证可靠, 在地震作用下墙体的吸能与耗能能力越大.

关键词 预制剪力墙; 轴压比; 浆锚连接; 波纹管成孔; 拟静力试验.

中图分类号 TU375

文献标志码 A

The Effect of Axial Compression Ratio on Shear Behavior Influence of Prefabricated Shear Walls with Grouting Anchor Connection by Corrugated Pipes

CHEN Xin^{1,2}, LIU Ming^{2,3}, DING Haoshuang²

(1. Department of construction engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Research Center of Engineering Technology of Modern Construction Industry in Liaoning Province, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the shear behavior under the low cycle loading of the prefabricated concrete shear wall assembled with grouting anchor connection and corrugated pipes, the quasi-static experiment of the four shear walls were carried out. The failure modes, bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of the shear wall were analyzed in the design axial pressure ratio of 0.2 and 0.4. The hysteresis curve and skeleton curve of the relationship between load and displacement were obtained. The results show that the failure modes of the four specimens are mainly

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701402)

作者简介: 陈昕(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事装配式建筑预制混凝土构件设计及理论研究.

expressed by vertical reinforcement yielded and concrete damaged in the both edges of shear wall. The hysteresis curves are full and the skeleton curves are basically the same. The bearing capacity of the shear wall specimen with the axial compression ratio of 0.4 is 25% higher than that of the axial compression ratio of 0.2, and the ductility coefficient is more than 4, the elastic-plastic inter-layer displacement angles (ISDA) of the prefabricated specimens are more than 1 /120. The internal reinforcement assembled with grouting anchor connection is still guaranteed to be reliable and the energy absorption and consumption is being increased with the larger design axial compression ratio of the wall.

Key words: prefabricated shear wall; axial compression ratio; anchor connection; corrugated pipe for the hole; quasi-static experiment

预制剪力墙是装配式结构中用于抵抗水平荷载作用的重要承重构件之一,它既承受来自外部的剪力和弯矩作用,同时又承受结构自重及上部楼层传递下来的轴力作用,而剪力墙承受一定的轴压力对其抗剪承载力起着有利的作用^[1-4]. 剪力墙承受轴向压力将延迟、抑制墙体表面斜裂缝的出现和开展,增大截面剪压区的高度,提高受压区混凝土抗剪及裂缝处骨料的咬合力,但在一定范围增大剪力墙轴压比对其提高其抗剪承载力是有限的,如果持续增大剪力墙设计轴压比,将导致剪力墙延性明显降低,破坏形态向剪压破坏转变. 在装配式剪力墙结构体系^[5-10]中,主要包括以芯模管(构件养护后抽出)^[11-12]和波纹管^[13-16]两种成孔方式、竖向钢筋浆锚搭接连接的装配式剪力墙结构体系. 约束钢筋浆锚连接在预制混凝土构件制作过程中用芯模管成孔,养护后需取出,施工质量难以控制. 参考文献[17-19]提出采用考虑波纹管成孔、螺旋箍筋约束浆锚连接组合的装配式混凝土剪力墙结构形式并进行拟静力试验研究. 笔者制作4个足尺剪力墙试件,上下层相邻装配式墙体的竖向钢筋采用波纹管成孔、螺旋箍筋约束的浆锚连接组合,研究设计轴压比分别采用0.2和0.4对装配式剪力墙结构的可靠性影响.

1 试验

1.1 试件设计

(1)试件构造

剪力墙试验试件长宽高为2 000 mm ×

2 800 mm × 200 mm,剪力墙顶部设置暗梁,暗梁尺寸为400 mm × 400 mm × 200 mm;剪力墙内部埋设波纹管,且永久不取出,剪力墙内波纹管浆锚钢筋搭接方式如图1所示. 剪力墙底部设置底梁,底梁长宽高为4 000 mm × 400 mm × 550 mm. 剪力墙边缘暗柱配置HRB400级4Φ16@200钢筋,竖向钢筋配置12Φ12@200,水平分布筋配置HRB400级12Φ12@200,箍筋采用HPB300Φ8@200,预制剪力墙配筋见图2.

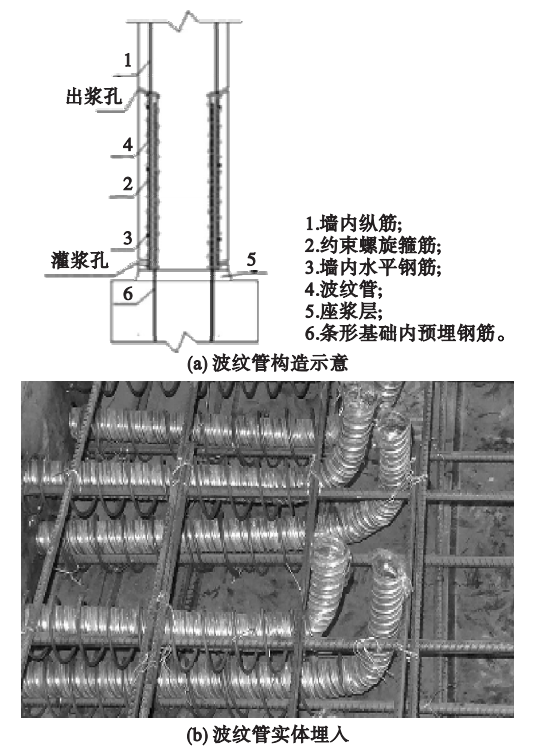


图1 预制剪力墙波纹管浆锚钢筋搭接方式

Fig. 1 Grouting anchor connection of fabricated shear walls with corrugated pipe

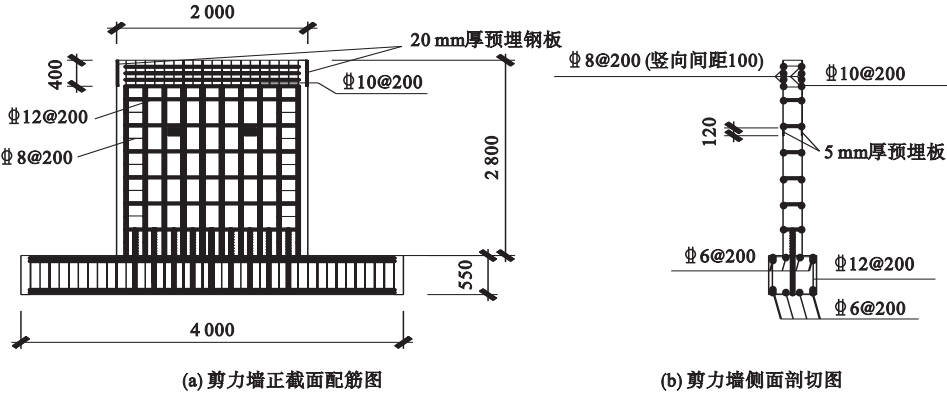


图 2 预制剪力墙配筋图

Fig. 2 The reinforcement figure of prefabricated shear wall

(2) 试验参数设计

考虑地区设防烈度、抗震等级及试验加载装置等因素,此次试验轴压比设定为 0.2 和 0.4,采用“Z”代表设计轴压比,“B”表示以波纹管为成孔方式,试件参数见表 1。

表 1 试件参数设计

Table 1 Design of specimen parameters

试件编号	设计轴压比取值	成孔方式	钢筋浆锚连接长度
Z2B2-1	0.2	波纹管	$0.9l_{ae}$
Z2B2-2	0.2	波纹管	$0.9l_{ae}$
Z4B2-1	0.4	波纹管	$0.9l_{ae}$
Z4B2-2	0.4	波纹管	$0.9l_{ae}$

注: l_{ae} 为剪力墙竖向受拉钢筋的抗震锚固长度。

1.2 原材料性能和试件制作

(1) 钢筋和混凝土材性

剪力墙水平和竖向钢筋采用 HRB400 级,HPB300 级箍筋,并进行试验钢筋拉拔试验,在表 2 中列出了钢筋实测的屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 和屈服应变 ε_y 。

表 2 试验钢筋实测极限强度及屈服应变

Table 2 Tensile Strength and Yield Strain of Measured Reinforcement

钢筋类型	直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	ε_y
HPB300	8	376	485	2 030
HRB400	10	550	645	2 250
HRB400	12	487	657	2 435
HRB400	16	497	690	2 485

混凝土采用 C30 级,28 d 养护完成实测混凝土立方体轴心抗压强度为 42.3 ~ 47.6 MPa。波纹管内灌浆料是一种水泥基材料,28 d 养护后灌浆料立方体抗压强度 $f_{cu,m}$ 实测值为 64.2 ~ 75.8 MPa。

(2) 剪力墙制作

试件由剪力墙和底梁组成。剪力墙底部根据钢筋浆锚搭接长度确定波纹管和螺旋箍筋的安装范围,底梁浇筑前预留竖向搭接钢筋,经 28 d 养护后试验墙体与底梁进行装配灌浆。

1.3 加载装置及加载制度

(1) 加载装置

试验水平荷载由量程 1 500 kN 的 MTS 电液伺服作动器提供;竖向荷载由 500 kN 油压千斤顶提供,采用 5 000 kN 力传感器,通过静态电阻应变仪 XL2101B5 + 来实时控制竖向轴力。试件顶部放置尺寸与试件截面尺寸相同的分配梁,通过分配梁将竖向荷载均匀地传递到试件顶部,在剪力墙前后两侧布置抗滑动支撑,防止剪力墙试件发生平面外扭转。试件通过钢锚杆锚固在地面的槽型试验基础上,加载装置如图 3 所示。

(2) 加载制度

根据《工程结构试验与检测》^[20],试验采用荷载-变形双控制加载。试件屈服前由水平荷载 100 kN/每次进行控制并循环 1 次,试件屈服后由屈服位移整数倍控制并循环



图3 试验加载装置图

Fig.3 Experiment loading device

3次.当剪力墙试件到达最大水平荷载,而试件层间水平位移增加,当试件承载力降低至最大荷载的85%时,认为试件已破坏.加载制度见图4.

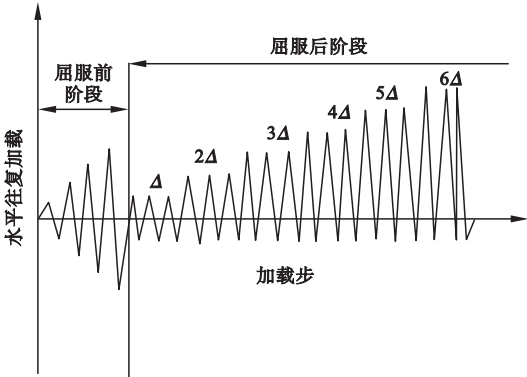


图4 试件加载制度示意

Fig.4 Loading system of specimens

1.4 测量内容和测量方法

测量内容主要是荷载、变形和应变测量,其中应变测量包括混凝土表面的应变测量和时间内部手拉钢筋的应变测量,测量方法如表3所示、测点布置见图5.

表3 试件测量内容和测量方法

Table 3 The testing content and methods

测量项目	测量方法
荷载测量	竖向压力由静态电阻应变仪(型号为XL2101B5+)来监测,并在整个试验过程中保持恒定不变;水平荷载由电液伺服作动器提供并监测
位移测量	沿墙体横截面中心线自上而下等间距布置5个位移传感器,墙体顶面边缘与最上部位移计距离为200 mm;在底梁前后布置2个位移计,以量测底梁在试验过程中是否发生侧向扭转
混凝土应变测量	为测量剪力墙试件在弹性、弹塑性和塑性阶段剪力墙表面混凝土的应变变化情况,将9组混凝土应变花呈45°对角线粘贴于试件表面上,每组应变花的应变片角度分别为0°、45°和90°
钢筋应变测量	为测量上下层剪力墙拼接处连接钢筋的应变变化情况,在试验结构构件底梁伸出的钢筋上、距底面钢筋40 mm高的距离粘贴钢筋应变片;为研究上下钢筋间接接后荷载传递,在底梁连接钢筋、距底梁表面320 mm高度处粘贴钢筋应变片

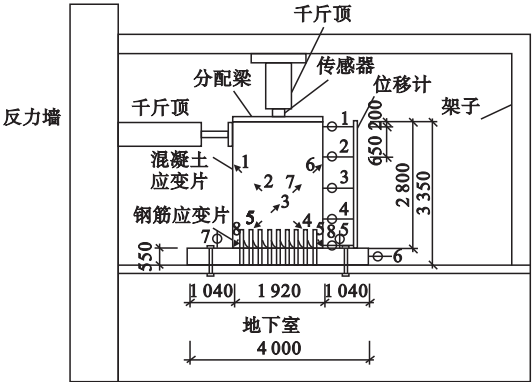


图5 试件测点布置图

Fig.5 Specimen measuring point layout

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态分析

以试件Z2B2-1和Z4B2-1的破坏过程进行对比分析.在设计轴压比为0.2的试验工况下,剪力墙的受力全过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段及破坏等4个阶段,在轴压比取值为0.4时,则分为弹性阶段、弹塑性阶段及破坏等3个阶段.

对于设计轴压比取值为0.2的试件,当水平荷载达到其极限荷载的72%时墙体边缘受拉钢筋发生屈服.钢筋屈服后试验墙体

水平裂缝宽度持续增大、长度增加;当受压区混凝土主压应变达到极限,此时剪力墙达到极限承载力,随着水平荷载持续增加,墙体变形增大,剪力墙抗剪承载力下降至极限承载力 85%,试件破坏.破坏时剪力墙主要特征表现为,墙体边缘受拉主筋达到抗拉极限强度,墙体两侧底部混凝土达到抗压极限强度而被压溃,破坏形态属弯剪破坏.

对于高轴压比的剪力墙,即笔者试验中设计轴压比为 0.4 的试件,当水平荷载达到其极限荷载的 60% 时墙体边缘受拉钢筋屈服.随着水平荷载不断施加,剪力墙试件的裂缝倾角越来越陡,裂缝发展迅速;当剪力墙进入破坏阶段,剪力墙的承载力下降,此时破坏形态为剪切破坏.破坏模式如图 6 所示.



图 6 试件破坏模式

Fig. 6 The destroy mode of Z2B2-1 和 Z4B2-1

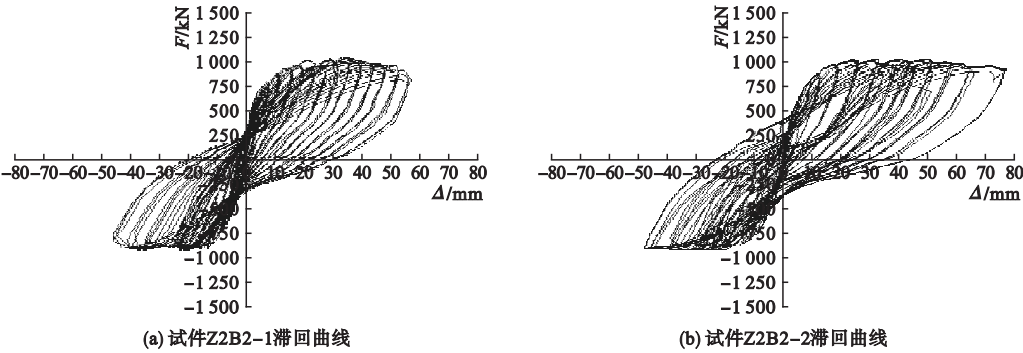
2.2 滞回曲线分析

图 7 给出了 4 片剪力墙的滞回曲线.由图 7 可以看出,根据设计轴压比取值,各试件滞回曲线有较明显差别.设计轴压比取值为 0.2 的试件,滞回曲线所围成的环形区域较为丰满,呈梭形,且稍带反 S 形状及捏拢现象.而 0.4 轴压比的试件,其滞回曲线呈明显的狭长带状形式,且轴压比越大越显狭长.反

向加载的滞回曲线明显不同于正向加载,当正向加载试件达到极限状态,反向加载最大荷载加至仪器最大量程.

2.3 骨架曲线分析

骨架曲线是将每级循环第一个峰值点连接起来,其形状反映试件在整个试验的承载力和变形特征(见图 8).



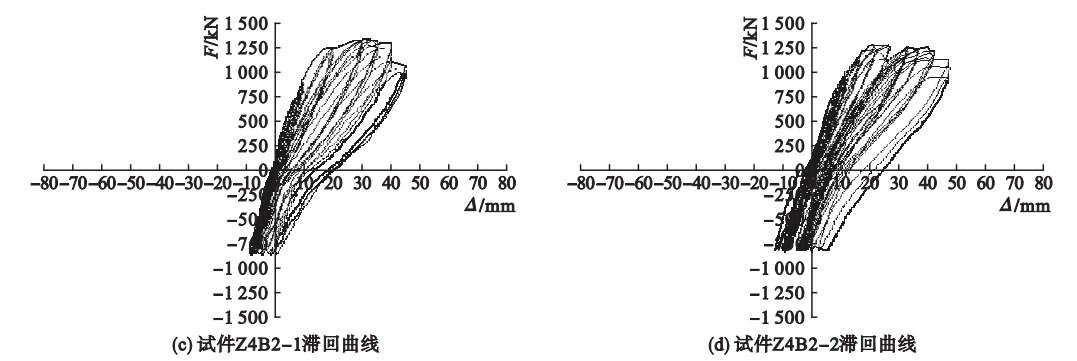


图7 试件滞回曲线

Fig. 7 Specimens hysteresis curves

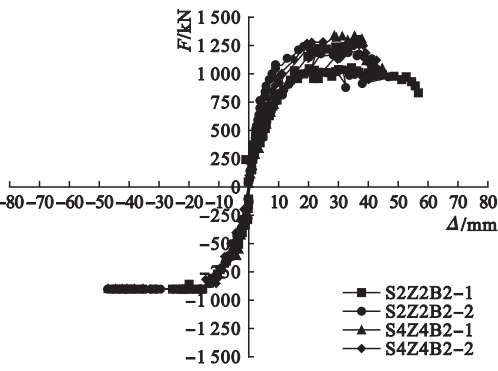


图8 骨架曲线

Fig. 8 The skeleton curves

由图8可见,当预制剪力墙底部波纹管
内浆锚钢筋搭接长度一定,时,试件的轴压
比越小,其位移延性系数越大,表明试件延
性越好;反之,轴压比越大,其位移延性系
数越小,表明试件延性越差.因此,试件的
延性随轴压比的减小而增大,在低轴压比
情况下,增加幅

度较大;在高轴压比情况下,增加幅度较小.

3 轴压比对剪力墙性能影响分析

3.1 轴压比对承载力的影响分析

试件开裂荷载 F_{cr} 、屈服荷载 F_y /屈服位
移 Δ_y 、极限荷载 F_p /变形 Δ_p 、破坏荷载 F_u /极
限变形 Δ_u 、延性系数 μ 如表4所示.按《高
层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)计
算得到剪力墙抗剪承载 F_m 为776.9 kN.

从表4可知,采用0.4轴压比的两个试
件承载力均值比轴压比为0.2的试件承载
力提高了25%,说明提高墙体的轴向压力
对受剪承载力起着有利的作用;4个试件
的峰值水平力试验值为按《高层建筑混
凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)中抗
剪承载力1.33~1.67倍,说明该类预制剪
力墙的抗剪承载力满足现行国家规范的
要求.

表4 试件水平承载力及变形

Table 4 The horizontal bearing capacity and deformation of specimens

试件编号	轴压比	F_{cr}	F_y/Δ_y	F_p/Δ_p	F_u/Δ_u	μ
Z2B2-1	0.2	550	789/8	1050/38	892.5/54	6.75
Z2B2-2	0.2	493	852/10	1024/48	870.4/52	5.2
Z4B2-1	0.4	418	849.5/10	1321/38	1122.9/40	4
Z4B2-2	0.4	400	859.5/10	1271/23	1080.4/45	4.5

3.2 轴压比对延性性能的影响分析

从表4中对延性系数的计算,轴压比为
0.4试件延性系数低于轴压比为0.2试
件,但4个试件的延性系数均大于4,具
有良好的延性,说明该类剪力墙在震作
用下可以承受较大塑性位移.剪力墙层
间位移 θ 为

$$\theta = \frac{\Delta}{H}$$

(1)

式中: Δ 为剪力墙试件水平层间位移; H 为
测点中心距试件底面高度,取值2 600
mm.

通过计算可以得出,4个剪力墙试
件的层间位移角分别为13/650、6/325、
1/65、9/520,

都超过《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中规定的在大震作用下,混凝土剪力墙结构弹塑性层间位移角 1/120。

3.3 轴压比对耗能能力的影响分析

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015),采用能量耗散系数与等效黏滞阻尼

系数来衡量构件在低周反复荷载作用下耗能能力, E 和 h_e 越大,说明构件在地震作用下耗能能力越好。表 5 计算出预制剪力墙在开裂、屈服、极限和破坏阶段的能量耗散系数 E_y 、 E_p 、 E_u 和等效黏滞阻尼系数 h_{ey} 、 h_{ep} 、 h_{eu} 值。

表 5 能量耗散系数 E 和黏滞阻尼系数 h_e

Table 5 The energy dissipation factor and Viscous damping coefficient							
试件编号	轴压比	$E_y/(kN\cdot m)$	$E_p/(kN\cdot m)$	$E_u/(kN\cdot m)$	h_{ey}	h_{ep}	h_{eu}
Z2B2-1	0.2	1.44	1.49	1.54	0.23	0.24	0.25
Z2B2-2	0.2	1.98	1.54	1.83	0.32	0.25	0.29
Z4B2-1	0.4	1.15	1.18	1.15	0.18	0.19	0.18
Z4B2-2	0.4	1.54	1.12	1.23	0.25	0.18	0.20

结果表明,设计轴压比 0.4 的预制剪力墙耗能能力低于轴压比取值 0.2 的试件,说明设计轴压比取值越小,在地震作用下该类预制剪力墙的吸能与耗能能力越大;反之轴压比越大,吸能与耗能能力越小。

4 结 论

(1) 预制剪力墙试件的破坏模式表现为边缘竖向受拉钢筋屈服、墙体两侧底部被压碎的剪切破坏。轴压比取值较大的剪力墙试件,在受拉钢筋屈服后裂缝倾角斜率高于轴压比低的试件,且裂缝发展迅速,试件的破坏为弯矩 和轴力共同作用的结果,最后试件丧失承载力而破坏。

(2) 采用 0.4 轴压比两个试件承载力的均值较轴压比 0.2 的试件提高了 25%,说明增加墙体轴向压力对提高构件受剪承载力起着有利的作用;4 个试件极限承载力为《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)中剪力墙抗剪承载力计算值的 1.33~1.67 倍。

(3) 4 个试件的延性系数均大于 4,具有良好的延性;设计轴压比取值对该类预制剪力墙在低周反复荷载作用下受力机理的影响表明,轴压比的增加导致墙体水平位移减小,即轴压比为 0.4 试件的延性系数低于轴压比为 0.2 的试件。

(4) 该类预制剪力墙的水平层间位移角均满足现行国家规范《建筑抗震设计规范》规定的在大震作用下剪力墙结构弹塑性层间位移角 1/120 限值。

(5) 设计轴压比取值 0.4 的预制剪力墙耗能能力低于轴压比为 0.2 的试件,说明剪力墙的轴压比取值越小,在地震作用下构件的吸能与耗能能力越大;轴压比越大,吸能与耗能能力降低。

参考文献

[1] 任军. 不同轴压比下叠合板式剪力墙的抗震性能研究[D]. 安徽:合肥工业大学,2010.
(REN Jun. Seismic behavior research of the superimposed slab shear walls for different axial-load ratios[D]. Anhui: Hefei University of Technology,2010.)

[2] 童小龙,方志,罗肖,等. RPC 剪力墙非线性分析及轴压比限值研究[J]. 四川大学学报, 2015,47(4):45-51.
(TONG Xiaolong, FANG Zhi, LUO Xiao, et al. Nonlinear analysis and study on allowable axial load ratio of reactive powder concrete shear walls[J]. Journal of Sichuan university, 2015,47(4):45-51.)

[3] 余欣,张爱社. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土剪力墙数值分析[J]. 山东建筑大学学报, 2017,32(2):144-151.
(YU Xin, ZHANG Aishe. Numerical analysis of reinforced concrete shear wall based on Openses[J]. Journal of Shandong jianzhu uni-

- versity, 2017, 32(2): 144 – 151.)
- [4] 刘超, 蒋隆敏, 黄艳. RC 剪力墙在不同轴压比下抗震性能的数值模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 23 – 27.
(LIU Chao, JIANG Longmin, HUANG Yan. Numerical simulation analysis on seismic performance of RC shear wall with different axial compression ratio[J]. Journal of Hunan university of technology, 2015, 29(5): 23 – 27.)
- [5] LING J H, RAHMAN A B A R, et al. Behavior of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and building materials, 2012, 33: 90 – 94.
- [6] HOSSEINL S J A, RAHMAN A B A. Analysis of spiral reinforcement in routed pipe splice connectors[J]. Journal of mechanical engineering and sciences, 2013, 65: 537 – 546.
- [7] ALIAS A, SAPAWI F. Performance of grouted splice sleeve connector under tensile load[J]. Journal of mechanical engineering and sciences, 2014, 7(2): 1094 – 1102.
- [8] KOUHSFAR K, RAHMAN A B D, AHMAD Y. Bond behavior of the reinforcement bar in glass fiber-reinforced polymer connector[J]. Gradevinar, 2014, 66(4): 301 – 310.
- [9] 赵唯坚, 郭婉楠, 金峤, 等. 预制装配式剪力墙结构竖向连接形式的发展现状[J]. 工业建筑, 2014, 4(4): 115 – 121.
(ZHAO Weijian, GUO Wannan, JIN Qiao, et al. State of the art research on connection type of vertical components for precast concrete shear wall systems[J]. Industrial construction, 2014, 44(4): 115 – 121.)
- [10] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074 – 1077.
(JIANG Qinjian. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad[J]. Architecture technology, 2010, 41(12): 1074 – 1077.)
- [11] 陈锦石, 郭振兴. 全预制装配整体式剪力墙结构体系空间模型抗震性能研究[J]. 施工技术, 2012, 41(9): 87 – 91.
(CHEN Jinshi, GUO Zhenxing. Seismic performance study on space model of the new precast[J]. Construction technology, 2012, 41(9): 87 – 91.)
- [12] 陈耀刚. 工业化全预制装配整体式剪力墙结构体系节点研究[J]. 建筑技术, 2010, 41(2): 153 – 156.
(CHEN Yaogang. Research on industrialized fully-prefabricated assembly integral shear wall structure system nodes[J]. Architecture technology, 2010, 41(2): 153 – 156.)
- [13] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 18 – 23.
(JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete structure[J]. Harbin institute of technology, 2011, 43(10): 18 – 23.)
- [14] 赵培. 约束浆锚钢筋搭接连接试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(ZHAO Pei. Experimental research on restraint grouting-anchoring overlap-joint of steel bar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [15] LAROSCHE A, CUKROV M, SANDERS D, et al. Prestressed pile to bent cap connections: seismic performance of a full-scale three-pile specimen[J]. Journal of bridge engineering, 2013, 19(3): 131 – 136.
- [16] BARROS R, GIONGO J S. Locking beam influence on behavior of reinforced concrete two pile caps with embedded socket[J]. Acta scientiarum: technology, 2014, 36(2): 212 – 220.
- [17] 陈昕, 刘明, 姚大鹏, 等. 考虑波纹管组合钢筋浆锚搭接长度的装配式剪力墙拟静力试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(6): 616 – 623.
(CHEN Xin, LIU Ming, YAO Dapeng, et al. Quasi-static experiments on lap length of precast concrete shear walls assembled with grouting anchor connection and corrugated pipes[J]. Journal of Dalian institute of technology, 2016, 56(6): 616 – 623.)
- [18] 管乃彦, 陈昕, 吕亚军. 两种成孔方式下约束浆锚搭接的预制剪力墙抗震性能研究[J]. 混凝土, 2015, 6: 1 – 4.
(GUAN Naiyan, CHEN Xin, LV Yajun. Study on the seismic performance of precast concrete shear wall holed by two different ways[J]. Concrete, 2015, 6: 1 – 4.)
- [19] 丁浩爽. 考虑波纹管组合钢筋约束浆锚连接的搭接长度试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(DING Haoshuang. Experimental research on lap length of steel restraint grouting-anchoring lap considering corrugated pipes[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [20] 刘明. 工程结构试验与检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
(LIU Ming. Engineering structure testing and inspection[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.)