

预埋波纹管单排钢筋浆锚连接的预制剪力墙 抗震性能研究

陈 昕^{1,2}, 李家旭¹, 杨永生³, 刘 明^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省现代建筑产业工程技术研究中心,
辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学学报编辑部, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究预埋波纹管单排钢筋浆锚连接预制剪力墙的抗震性能, 解决装配式剪力墙结构现场装配时墙体间配筋复杂、连接钢筋数量较多、导致施工难度较大等实际工程问题。**方法** 在采用预埋波纹管成孔、螺旋箍筋约束浆锚连接的基础上, 提出一种将墙体非边缘构件的竖向连接钢筋采用“以少代多”单排布置的新型连接方式。通过拟静力试验, 考察预制剪力墙非边缘构件竖向钢筋采用全数连接和单排钢筋连接的差异, 分析并比较两种预制墙体承载性能、延性、刚度及耗能能力。**结果** 单排钢筋浆锚连接的墙体试件破坏模式与钢筋全数连接试件基本相同, 最终形成墙体根部混凝土被压碎、边缘钢筋屈服的剪切破坏; 墙体的延性系数均大于4, 具有良好的延性。**结论** 单排钢筋浆锚连接预制剪力墙与钢筋全数连接的墙体试件具有相似的抗震性能, 说明预制剪力墙非边缘构件采用单排钢筋浆锚连接形式可靠。

关键词 预制剪力墙; 单排钢筋连接; 约束浆锚; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Research on Seismic Performance of Precast Shear Wall Connected by Embedded Corrugated Pipe and Single Row of Steel Bars

CHEN Xin^{1,2}, LI Jiayu¹, YANG Yongsheng³, LIU Ming^{1,2}

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

Abstract: This paper studies the seismic performance of the prefabricated shear walls connected by embedded corrugated pipe and single row of steel bars, which can solve practical engineering

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项 目 (51738007); 辽宁省教育厅青年科技人才“育苗”项目 (lnqn201906)

作者简介: 陈昕(1982—), 女, 博士, 主要从事装配式混凝土剪力墙结构的抗震性能等方面研究。

problems such as complex reinforcement between the walls, a large number of connecting steel bars and difficult construction during the on-site assembly of the prefabricated shear wall structure. Based on the use of hole formation of embedded corrugated pipes and connection of grouted anchors with spiral stirrups, this paper proposes the vertical connecting steel bars of non-edge members of the wall which arranged in a single row by “replace more with less”. Through the pseudo-static test, the difference between the vertical reinforcement of the non-edge members of the precast shear wall and the single row of reinforcement is investigated, and the bearing performance, ductility, rigidity and energy consumption capacity of the two precast walls are analyzed and compared. The above research results show that the failure mode of the wall specimens connected by a single row of reinforced mortar anchors is basically the same as that of the specimens connected by all steel bars. The concrete at the root of the wall is crushed and the edge steel bars yield shear failure; the ductility coefficient of the wall is greater than 4, which has good ductility. The specimens of the precast shear wall connected by a single row of reinforced grouted anchors and all steel bars have similar seismic performance, indicating that the non-edge members of the precast shear wall are reliable in connection with a single row of reinforced grouted anchors.

Key words: Precast shear wall; large-diameter steel bar; grouting-anchor connection; quasi-static test; seismic performance

在装配式剪力墙结构中,竖向钢筋之间的连接技术以套筒灌浆连接^[1-3]和浆锚连接的应用最为广泛。其中浆锚连接技术主要包括抽芯成孔约束浆锚连接、波纹管浆锚连接等形式。哈尔滨工业大学姜洪斌^[4-7]、东南大学郭正兴^[8-11]等学者对这些连接方式的工作机理及构件间的连接性能进行了大量的研究,证明了浆锚连接的可靠性。但在工程实践中发现,采用约束浆锚连接时,由于抽芯成孔经常产生塌孔的缺陷,造成插筋和灌浆困难;而采用波纹管浆锚连接时,钢筋锚固长度的增大,但这使得波纹管长度变长,连接区域增大,施工难度增加。因此,采用预埋波纹管成孔、螺旋箍筋约束浆锚连接^[12-13]的设计理念应运而生。预埋波纹管螺旋箍筋约束的连接方式结合了波纹管浆锚和约束浆锚的优点,预埋波纹管替代抽芯成孔可极大程度上避免构件制作时易塌孔的施工缺陷,可保证连接钢筋准确、有效地插入上部预制构件对应位置的预留孔道内;螺旋箍筋约束构件纵向钢筋与混凝土之间的粘结能力,成为一种适用性较强的浆锚连接方式。

笔者在该种钢筋约束浆锚连接性能研究的基础上^[12-15],提出一种将预制剪力墙非边缘构件4根 $\Phi 12@200$ 代换为1根 $\Phi 25@400$ (以“1代4”)的新型连接构造形式,该种钢筋连接形式可较好地简化施工工序、有效提高工效。通过分析和比较钢筋代换前后预制混凝土剪力墙的承载力、延性、刚度和耗能能力发现,代换后的单排钢筋浆锚连接预制剪力墙与钢筋全数连接的墙体试件具有相似的抗震性能,其连接形式可靠,可为今后的实际工程应用提供借鉴。

1 试验概况

1.1 试件设计

预制剪力墙试件的宽×高×厚为2 000 mm×2 800 mm×200 mm,墙体内顶部设置暗梁,暗梁的截面宽×高为200 mm×400 mm;为设计上下层墙体的连接,在剪力墙底部设置底梁,以实现预制剪力墙与底梁的水平连接,底梁的截面宽×高为400 mm×550 mm,底梁与剪力墙接缝处采取凿毛处理。墙体连接构造和配筋如图1和图2所示。

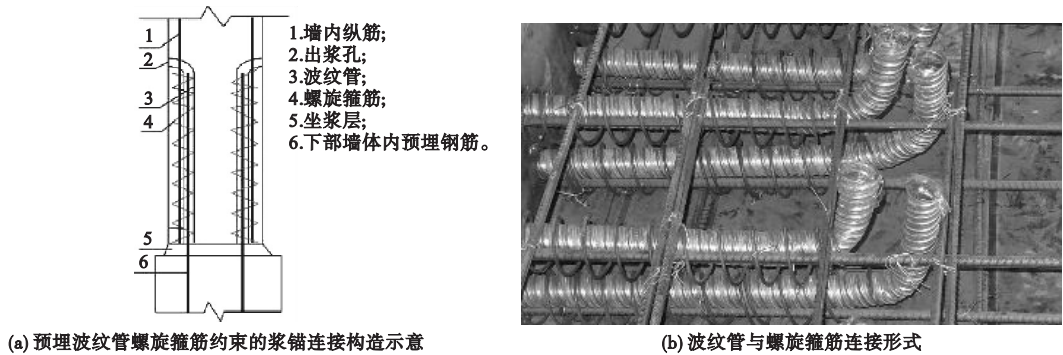


图 1 预埋波纹管螺旋箍筋约束的浆锚连接方式

Fig. 1 Restrained grouting anchor connection pre-buried corrugated pipe and spiral stirrup

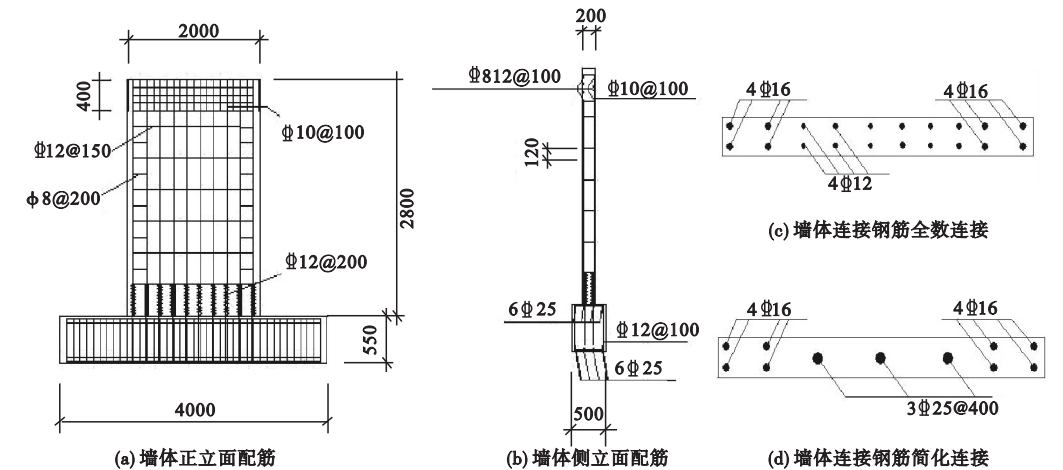


图 2 预制剪力墙试件配筋形式

Fig. 2 Reinforcement form of precast shear wall specimen with all connected steel bars

本次试验设计制作了 4 片足尺比例预制剪力墙试件,试件编号为 S5 Z2B2(非边缘构件大直径钢筋连接)和 S2 Z2B2(非边缘构件钢筋全数连接),每个编号的试件各 2 个。以“S2 Z2B2-1”为例,字母“Z2”代表轴压比为 0.2,“B”代表金属波纹管,“B2”代表波纹管成孔、竖向钢筋搭接长度为 $0.9 l_a$ 。

1.2 试验装置及加载制度

本次试验是在沈阳建筑大学结构实验室进行,加载装置如图 3 所示。墙体的竖向轴力由 5 000 kN 油压千斤顶提供,在整个加载过程中竖向轴力保持不变。在千斤顶与反力架之间安装滑板,尽量消除装置之间的摩擦以减小对水平荷载的影响。试验采用 1 500 kN 的 MTS 电液伺服作动器施加往复荷载,加载端在剪力墙顶部,剪力墙两侧设置足够

刚度的刚性支撑,防止试件在试验过程中发生平面外变形和扭转。



图 3 试验加载装置设计

Fig. 3 Design of test loading device

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152—2012),试验正式开始前对试件进行两次预加载,预加荷载不超过试件预估开

裂荷载的 30%。试验正式开始时采用荷载-位移双控制的加载方法。试件屈服前,墙体的水平荷载以 100 kN 递增加载;试件屈服后,由试件的屈服位移控制加载,每级加载位移取屈服位移的整数倍,且每级循环三次。当试件达到峰值荷载后,继续加载至荷载下降到峰值荷载的 85%,或者构件失去继续承载的能力,即认为构件破坏,试验结束。试验加载制度如图 4 所示。

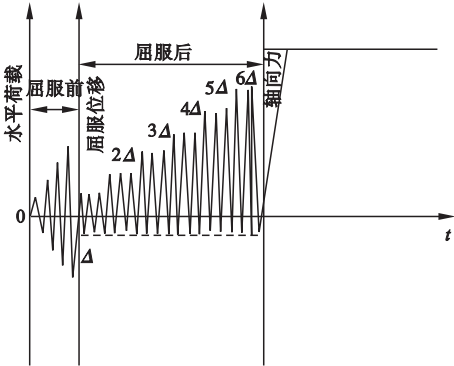


图 4 试验加载制度

Fig. 4 Test loading regime

1.3 量测内容

试验量测内容为荷载量测、位移量测、应变 量测和裂缝量测。其中荷载和位移量测包括开 裂荷载、屈服荷载、极限荷载及对应的位移、破 坏荷载及极限位移;应变 量测包括钢筋应变、混 凝土应变;裂缝量测主要考察裂缝开展、分布及 宽度。测点布置如图 5 和图 6 所示。

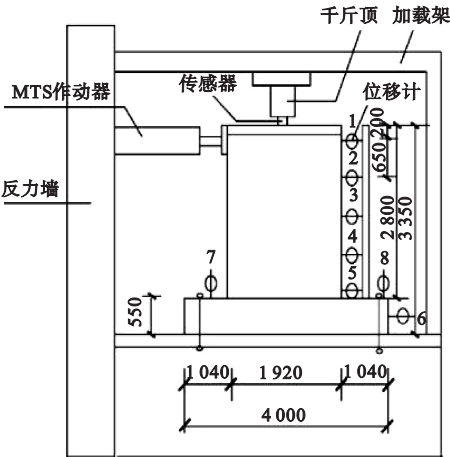


图 5 位移计布置

Fig. 5 Arrangement of displacement sensor

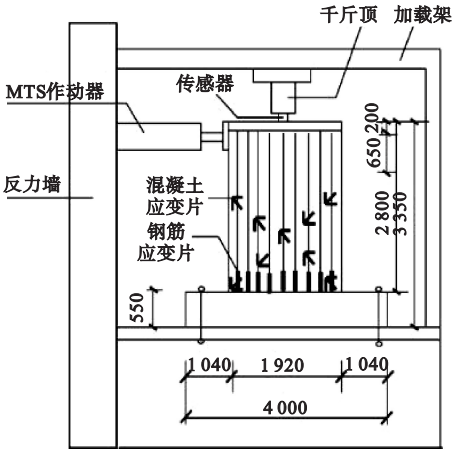
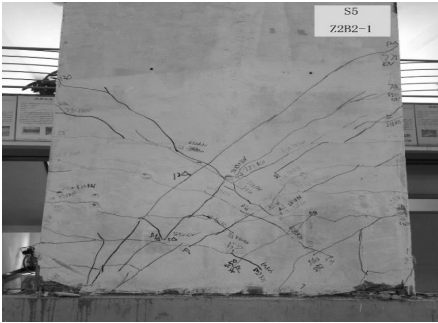


图 6 钢筋和混凝土应变片布置

Fig. 6 Arrangement of strain gauges of concrete and steel bars

2 试验现象及破坏形态

选取两种连接形式试件中的一个进行试 验现象和破坏形态描述,对比分析两种墙体破 坏形态的差异。对于单排钢筋简化连接试件 S5 Z2B2-1,当荷载加至 0 ~ ±200 kN 时,试 件处于弹性阶段,荷载与位移呈线性关系,加 卸载曲线基本重合,试件在推拉方向残余变形 较小。当拉压荷载加至 ±249 kN 时,在剪力 墙两侧与底梁水平接缝处分别出现了裂缝,裂 缝长度约为400 mm和330 mm,标志着试件进 入开裂阶段。试件加载达到 ±723. 24 kN 时, 在推力和拉力方向分别距墙底约 220 mm 和 200 mm高度处各增加了 1 条新裂缝,墙体最 外侧边缘钢筋受拉屈服,试件由弹性阶段进入 弹塑性阶段,此时屈服位移为 9. 5 mm。在加 载至 3. 5Δ_y 时,墙体达到峰值承载力961 kN, 推力和拉力方向各出现一条距墙底高度2. 1 m 的新裂缝,原有裂缝长度延伸、宽度加剧,最大 裂缝宽度达到2. 35 mm。墙体达到极限承载 力时,剪力墙表层混凝土脱落,外侧根部混凝 土被压碎,试件水平承载力下降超过 15%, 试件破坏,试验结束。从破坏形态上看,墙体与 底梁未发生滑移剪切破坏。试件破坏形态及 裂缝分布如图 7 所示。



(a) 试件S5 Z2B2-1



(b) 试件S5 Z2B2-2

图 7 钢筋简化连接试件的破坏形态及裂缝分布

Fig. 7 The failure modes and cracks distribution of the specimensimplify connected with steel bars

对于钢筋全数连接试件 S2 Z2B2 - 1, 当水平荷载加载至 350 kN 时, 墙体发生开裂, 裂缝长度约为 280 mm。试件加载到 766. 01 kN 时, 墙体最外侧边缘钢筋受拉屈服, 试件由弹性阶段进入弹塑性阶段, 此时屈服位移为 6. 64 mm。随着加载的不断进行, 墙体达到峰

值承载力 1 050 kN, 此时剪力墙外侧根部混凝土剥落, 主裂缝加宽变长, 裂缝最大宽度达到 2. 52 mm, 剪力墙外侧钢筋弯曲鼓出, 边缘混凝土掉落, 试件的极限变形为 52. 53 mm。试件破坏形态及裂缝分布如图 8 所示。



(a) 试件S2 Z2B2-1



(b) 试件S2 Z2B2-2

图 8 钢筋全数连接试件的破坏形态及裂缝分布

Fig. 8 The failure modes and cracks distribution of the specimens fully connected with steel bars

将非边缘构件单排钢筋的简化连接预制剪力墙试件与钢筋全数连接的墙体相比可知, 墙体表现出来的破坏形式基本相同。在墙体非边缘构件的连接范围内, 采用简化连接预制剪力墙表面并未发现裂缝增多的现象, 说明墙体竖向钢筋在与大直径钢筋间接搭接时, 钢筋间应力可进行有效传递。在试件发生最终破坏时, 连接钢筋没有出现断裂或者与墙体分离的现象, 在连接区域未出现裂缝明显增多, 表明采用该种简化连接方式的预制剪力墙与下部底梁依然显现出良好的整体工作性能, 可以保证上下墙体连接可靠,

实现构件间“强连接”的设计理念。

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线与骨架曲线

预制剪力墙试件的滞回曲线如图 9 所示。从图中可以看出, 在轴压比 0. 2 的工况下, 试件 S5Z2B2 - 1 的滞回环面积较小、曲线呈反“S”型, 捏缩严重, 反映出该试件在吸收地震能量的能力略差; 试件 S5 Z2B2 - 2 的滞回环饱满, 在试件屈服后位移控制后期, 承载力降低缓慢、变形增加, 体现出试件在往复荷载作用下的能量吸收、消耗过程。在轴

压比和连接钢筋搭接长度相同的情况下,钢筋简化连接的两个剪力墙试件承载力较钢筋

全数连接试件有所降低。

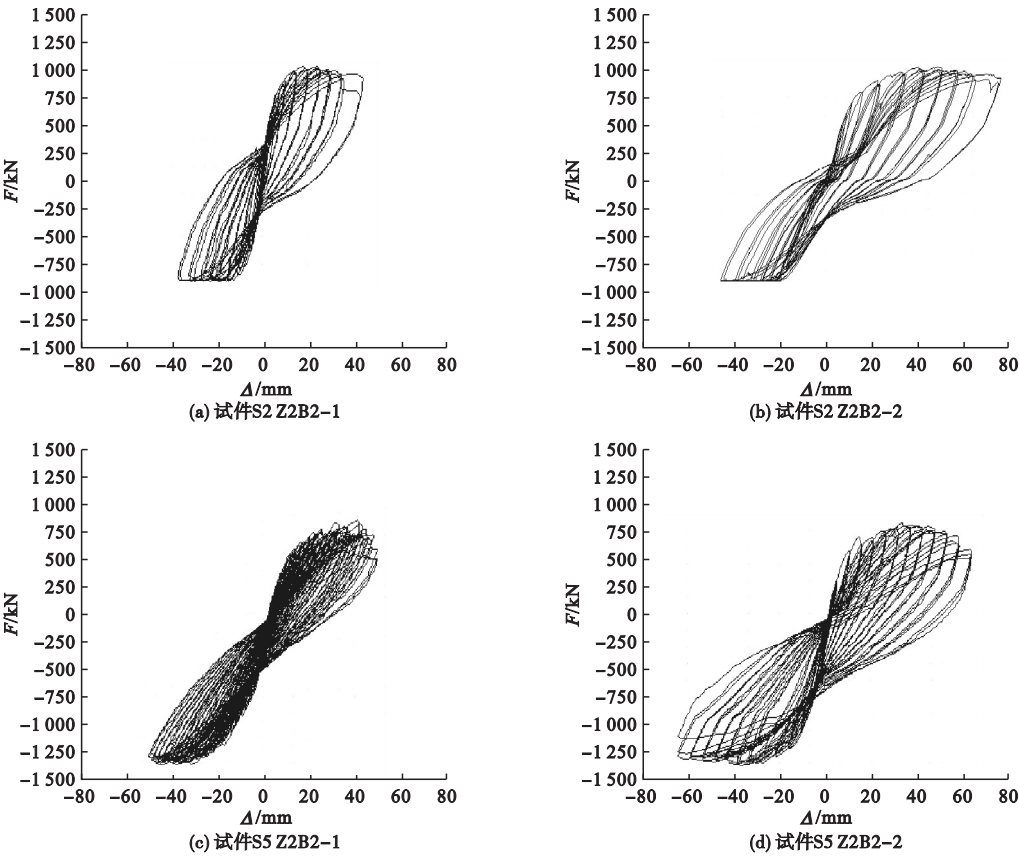


图9 预制剪力墙试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curves of the precast shear walls

将两种连接方式预制剪力墙的骨架曲线进行对比(见图10)。

接试件 S5 Z2B2 - 1 和 S5 Z2B2 - 2 的抗剪承载力平均值较钢筋全数连接试件 S2 Z2B2 - 1 和 S2 Z2B2 - 2 降低约 9%。从墙体延性上看,试件在屈服前,初始刚度大,曲线斜率变化较小;试件屈服后至达到极限承载力都经历了一个“平台”阶段,刚度急剧退化,变形快速增长,延性较好,有利于抗震。

3.2 承载力与延性分析

试件在开裂、屈服、极限、破坏等关键特征点处对应荷载、位移和延性系数见表 1。从表中可以看出,简化连接方式的预制剪力墙的峰值承载力平均值达到了 948 kN,钢筋全数连接试件峰值承载力平均值为 1 037.5 kN,说明减少非边缘构件竖向连接钢筋数量在一定程度上降低了约束浆锚连接

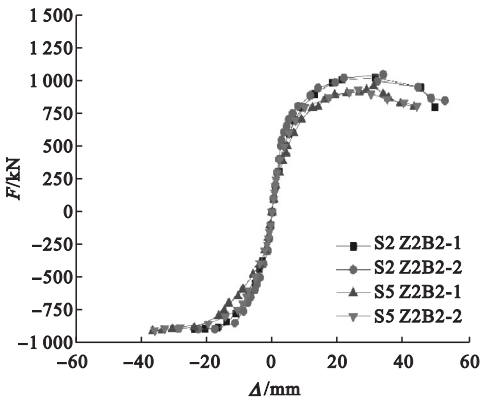


图10 试件骨架曲线对比

Fig. 10 Comparison of skeleton curves of specimens

从图中可以看出,两种连接方式的预制剪力墙试件骨架曲线走势基本相同,简化连

预制剪力墙的抗剪承载力。预制剪力墙的延性系数平均值为 5.365,且均大于 4,具有良好的延性。

表 1 关键特征点处预制剪力墙承载力及其变形

Table 1 Bearing capacity and deformation of precast shear walls at different loading points									
试件 编号	开裂荷 载/kN	开裂位 移/mm	屈服荷 载/kN	屈服位 移/mm	峰值荷 载/kN	峰值位 移/mm	破坏荷 载/kN	极限位 移/mm	延性 系数
S5 Z2B2-1	249	3.83	723.24	9.59	961	30.87	816.9	43.12	4.28
S5 Z2B2-2	225	3.67	723.32	7.74	935	26.24	794.8	44.00	5.69
S2 Z2B2-1	350	5.29	766.01	6.64	1 050	33.73	892.5	52.53	7.11
S2 Z2B2-2	420	5.67	767.15	8.41	1 025	31.28	870.4	49.54	5.65

3.3 层间位移角分析

根据试验结果,计算得出每个试件在各关键特征点的层间位移角,结果见表 2。表中 θ_{cr} 为开裂荷载对应层间位移角、 θ_y 为屈服荷载对应层间位移角、 θ_p 为峰值荷载对应层间位移角、 θ'_p 为极限荷载对应层间位移角。由表 2 可以看出,试件开裂时的层间位移角为 1/763 ~ 1/494,可满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)所规定的弹性层间位移限值 1/1 000 和弹塑性层间位移限值 1/120 的要求。

表 2 预制剪力墙层间位移角

Table 2 Interlayer displacements angle of precast shear wall				
试件编号	θ_{cr}	θ_y	θ_p	θ'_p
S5 Z2B2-1	1/731	1/292	1/91	1/65
S5 Z2B2-2	1/763	1/362	1/107	1/64
S2 Z2B2-1	1/529	1/422	1/83	1/53
S2 Z2B2-2	1/494	1/333	1/90	1/57

3.4 刚度退化分析

试验构件在循环反复荷载作用下,在同级峰值荷载时,对应的位移随循环次数的增加而增大,试件刚度产生退化。各剪力墙试件的刚度退化曲线如图 11 所示。通过对比可知,简化连接试件的刚度退化曲线位于钢筋全数连接墙体试件的上方,表明简化连接的预制剪力墙刚度较大、变形较小。试件屈服后,简化连接预制剪力墙试件的初始刚度下降了约 40%;但随着屈服后期的位移控制后,刚度退化速率减缓,逐步体现出良好的延

性性能,与钢筋全数连接试件刚度退化走势基本相同。

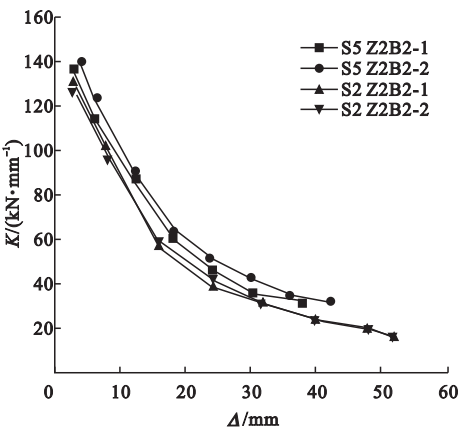


图 11 预制剪力墙试件的刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curves of specimens

3.5 耗能能力分析

根据试验结果,可计算出试件的能量耗能系数和等效黏滞阻尼系数。试件能量耗散曲线如图 12 所示。

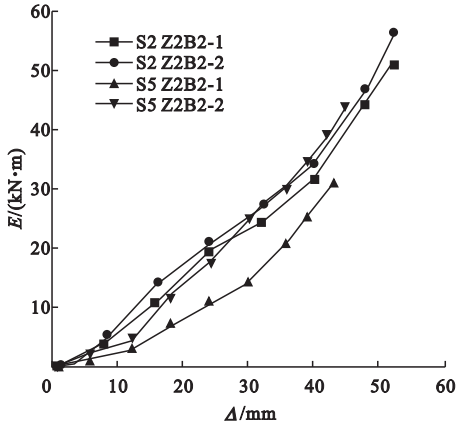


图 12 各试件能量耗散曲线

Fig. 12 Energy dissipation curves of each test specimens

从图 12 可以看出,两种连接形式的试件能量耗散曲线表现出相似的走势。试件屈服前,简化连接方式和钢筋全数连接预制剪力墙的耗能能力接近;试件屈服后,随着加载位

移的持续增加,各试件的等效黏滞阻尼系数呈上升趋势,墙体耗能能力增大。

3.6 钢筋应变分析

钢筋应变曲线如图 13 所示。

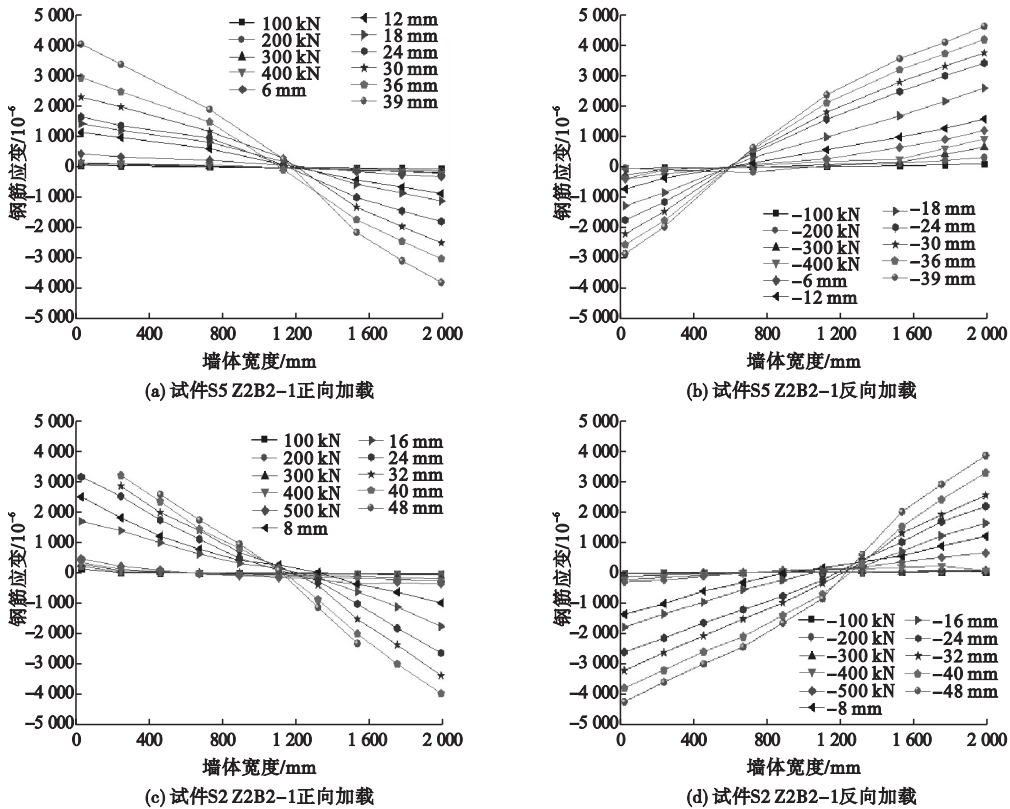


图 13 预制剪力墙底部钢筋应变曲线

Fig. 13 Reinforced strain curves of the bottom of the precast shear wall

由图 13 可见,预制剪力墙试件水平接缝截面处,墙体竖向钢筋应变随墙体宽度呈线性变化,平截面假定在两种竖向钢筋连接方式下均适用。因此,可采用平截面假定作为计算手段,对该种连接形式下预制剪力墙水平接缝截面承载力进行计算。

4 结 论

(1)所有试验墙体的破坏模式大体相同,主要破坏形态为墙体表面、波纹管上方出现些许水平裂缝,随着水平荷载的增加,裂缝逐渐向对角线方向发展;墙体最终破坏形态表现为边缘竖向钢筋受拉屈服,墙体底部混凝土被压碎的剪弯破坏。

(2)简化约束浆锚连接预制剪力墙表现出

与钢筋全数连接墙体相似的破坏形态。在轴压比 0.2 的试验工况下,简化连接的预制剪力墙承载力平均值较钢筋全数连接墙体有所降低,降低幅度约 9.3%;两种连接方式墙体的延性系数相近,且均大于 4,具有良好的延性。

(3)简化约束浆锚连接预制剪力墙在各关键特征点的刚度退化曲线走势基本一致,但墙体试件发生开裂后,墙体试件初始刚度下降较快,随着荷载的不断增加,刚度退化速率减缓。

(4)简化约束浆锚连接预制剪力墙竖向钢筋在屈服前,随着荷载的不断增加,墙体竖向钢筋应变沿墙体宽度截面呈线性变化,符合平截面假定。

参考文献

- [1] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):51-59.
(QIAN Jiaru, YANG Xinke, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 51-59.)
- [2] 钱稼茹,彭媛媛,秦珩,等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):7-11.
(QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly [J]. Building structure, 2011, 41(2): 7-11.)
- [3] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):1-6.
(QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, ZHANG Jingming, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements spliced by grout sleeves [J]. Building structure, 2011, 41(2): 1-6.)
- [4] 陈再现,姜洪斌,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟动力子结构试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):41-50.
(CHEN Zaixian, JIANG Hongbin, ZHANG Jiaqi, et al. Pseudo-dynamic substructure test on precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 41-50.)
- [5] 姜洪斌,陈再现,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):34-40.
(JIANG Hongbin, CHEN Zaixian, ZHANG Jiaqi, et al. Quasi-static test of precast reinforced concrete shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2011, 32(6): 34-40.)
- [6] 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]. Journal of Harbin institute of technology, 2011, 43(10): 18-23.)
- [7] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):28-31.
(JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar anchorage of the PC structure [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2011, 43(4): 28-31.)
- [8] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 不同无粘结长度新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 工程力学,2016,33(8):52-57.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei. Experiment on seismic performance of new hybrid-assembling precast concrete shear walls with various unbonded lengths [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(8): 52-57.)
- [9] 朱张峰,郭正兴. 不同轴压比新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2016,33(12):143-149.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Experimental research on the seismic performance of new hybrid precast concrete shear walls under various axial compression ratios [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(12): 143-149.)
- [10] 朱张峰,郭正兴. 考虑竖向与水平接缝的工字形装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2019,36(3):139-148.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Aseismic experimental research on I-shaped precast concrete shear walls with vertical and horizontal joints [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(3): 139-148.)
- [11] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报,2018,51(3):36-43.
(ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei. Experimental study and FEA on seismic performance of new hybrid precast concrete shear walls [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(3): 36-43.)
- [12] 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[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 university of technology, 2016, 56(6): 616-623.)
- [13] 陈昕,刘明,丁浩爽. 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震性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(6):968-975.
(CHEN Xin, LIU Ming, DING Haoshuang. Experiment on shear behavior influence of prefabricated shear walls with grouting anchor connection by corrugated pipes [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(6): 968-975.)
- [14] 陈昕. 改进约束浆锚连接(CPSS)的预制剪力墙抗震性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
(CHEN Xin. Research on seismic behavior of improved grouting-anchor connection of precast shear walls [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.)
- [15] CHEN X, LIU M, BIONGDINI F, et al. Structural behavior of precast RC shear walls with large diameter bars [J]. ACI structural journal, 2019, 116(5): 77-86.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)