

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240105001

一字型带竖缝的干连接装配式剪力墙抗震性能研究*

王振宇^{1,2}, 刘洪涛³, 杜修力¹

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京市住宅建筑设计研究院有限公司, 北京 100005;
3. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044)

摘要: 相邻预制墙板之间的竖缝通过高强度螺栓和预埋连接钢板实现干法连接, 构造简单, 操作方便, 传力直接。为研究该竖缝干连接装配式剪力墙的抗震性能, 进行了1片现浇墙和4片干连接预制墙的低周往复加载试验, 研究了竖缝干连接试件的破坏模式、滞回特性、刚度退化、耗能性能以及不同类型竖缝节点的连接特性。结果表明: 竖缝干连接节点可以有效传递装配式剪力墙左、右墙肢剪力, 使墙板承载能力满足设计要求, 并具有较好的延性性能和耗能能力; 但预制墙板破坏形态与现浇墙有所不同, 受竖缝节点影响其裂缝分布区域更广, 墙板耗能能力增强, 且随竖缝连接强度增强, 墙板强度和刚度趋近于现浇整体墙。竖缝干连接装配式剪力墙的层间变形主要由弯曲变形和剪切变形组成, 墙板极限位移角均大于规范规定的弹塑性层间位移角限值(1/120), 且其位移延性系数介于5.1~7.4, 具有良好的变形能力和抗倒塌能力。另外, 竖缝节点上移可以有效提高节点连接效率, 改善墙板整体性和耗能能力, 节约建设成本, 因此在工程中建议节点布置在墙板中上部。

关键词: 装配式剪力墙; 竖向接缝; 干连接节点; 高强度螺栓; 低周往复加载试验; 抗震性能

中图分类号: TU398.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0571-13

Study on Seismic Performance of Dry-connected Precast Shear Walls with Vertical Seams

WANG Zhenyu^{1,2}, LIU Hongtao³, DU Xiuli¹

(1. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Institute of Residential Building Design & Research Co., Ltd., Beijing 100005, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Vertical joints between adjacent precast wall panels are dry-connected using high-strength bolts and embedded steel plates. This method features simple construction, convenient operation, and direct force transfer. To study the seismic performance of dry-connected precast shear walls with vertical joints, one cast-in-place wall and four dry-connected precast walls were subjected to low-cycle reversed loading tests. The failure mode, hysteretic characteristics, stiffness degradation, energy dissipation capacity, and connection characteristics of different types of vertical joints were studied. The results indicated that the dry-connected vertical joints could effectively transfer shear forces between the left and right wall limbs of precast shear walls, enabling the wall panels to meet design load-bearing re-

* 收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504302)、国家自然科学基金青年项目(51908013)资助

作者简介: 王振宇(1987—), 男, 高级工程师, 博士。主要从事装配式结构抗震防灾研究。E-mail: wangzhenyu@zzjz.com

通信作者: 刘洪涛(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事装配式结构防灾减灾研究。E-mail: liuht0312@163.com

quirements while demonstrating good ductility and energy dissipation capacity. However, the failure pattern of precast walls was different from that of cast-in-place walls, with more widely distributed crack zones due to the influence of vertical joints, and the energy dissipation capacity of walls was enhanced. With the increase of vertical joint connection strength, the strength and stiffness of the precast walls approached those of cast-in-place walls. The inter-story deformation of dry-connected precast walls with vertical joints was mainly composed of bending and shear deformations, with the ultimate drift ratio exceeding the limit value of elastic-plastic inter-story drift ratio specified in the code (1/120), and displacement ductility coefficient ranging between 5.1 and 7.4, exhibiting good deformation and collapse resistance. In addition, raising the position of the vertical joints could effectively improve joint connection efficiency, enhance wall integrity and energy dissipation capacity, and reduce construction costs. Therefore, it was recommended to position the joints in the upper-middle section of wall panels in engineering practice.

Keywords: precast shear wall; vertical seam; dry connection; high-strength bolts; low-cycle reversed loading test; seismic performance

0 引言

预制装配式剪力墙结构因墙板之间存在接缝而区别于现浇剪力墙结构^[1-3]。其中水平接缝传递竖向荷载、承受水平剪力,竖向接缝传递相邻预制剪力墙的相互作用,接缝性能是影响装配式剪力墙结构整体性、安全性和可靠性的关键^[4-5]。现阶段我国装配式剪力墙结构中接缝连接均采用预制墙板预埋钢筋再后浇混凝土的湿连接形式^[6]。美国 SCI 规范^[7]根据“剪切-摩擦”抗剪理论,认为竖向接缝处的剪力主要通过骨料咬合作用、横向钢筋的摩擦作用和销栓作用来承担;宋国华等^[8-10]开展了大板结构竖向接缝的拟静力试验,分析了接缝抗剪机理并提出了相应的接缝抗剪承载力计算公式;杨勇^[11]通过低周往复荷载试验研究了带竖向结合面的预制剪力墙试件,结果表明该预制剪力墙具有良好的抗震性能,墙板承载力稍低,延性更好;周宏庚^[12]和沈小璞等^[13]开展了竖向接缝采取不同构造措施的叠合板式混凝土剪力墙拟静力推覆试验和数值模拟分析,结果表明,不同连接构造的预制剪力墙整体性较好,竖缝可以保证预制部分和现浇部分协同工作。

相对于湿法连接,干法连接可以有效提高施工效率,充分发挥装配式结构的拼装优势,便于震后受损部件快速更换,实现韧性设计目标^[14-15]。但目前关于干法连接装配式剪力墙的研究仍相对较少,本文提出了一种竖向接缝采用高强度螺栓和预埋

连接钢板实现干法连接的新型节点,其连接构造简单,操作方便,传力直接。该竖缝干连接节点包括“插接型节点”和“拼接型节点”两种基本类型,每组干连接节点包括内、外连接钢板、连接套筒、连接钢筋和高强度螺栓等组成,如图1所示。其中“插接型节点”的内、外连接钢板均由两块平行钢板组成,分为连接区(外露于预制墙板)和锚固区(预制墙板内),连接区预留螺栓孔,内连接钢板螺栓孔间通过连接套筒形成螺栓孔道,可以起到提高节点强度和整体性的作用;连接钢板锚固区外伸连接钢筋,与预制墙板钢筋笼焊接。预制墙板拼装时,内外连接钢板连接区相互插入,对齐螺栓孔,拧紧高强度螺栓,即可将相邻预制墙板连接为一体;而“拼接型节点”则是在预制墙板 A、B 上均埋置内连接钢板,预制墙板拼装时,由一块独立的外连接钢板将竖缝两

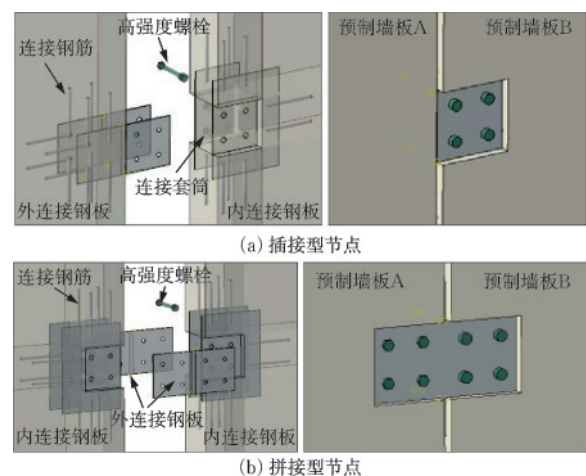


图1 竖向缝干连接节点示意

Fig.1 Schematic of dry-connected vertical joint

侧的内连接钢板“搭接”在一起,对齐螺栓孔,拧紧高强度螺栓,完成连接。

基于干法连接装配式剪力墙与现浇墙的受力特点不同(如竖向接缝影响、节点滑移、连接不对称性等),本文设计了多种竖缝节点类型的装配式剪力墙试件,并对其进行低周往复加载试验,通过与整浇混凝土剪力墙对比,系统研究了干连接装配式剪力墙的抗震性能。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验共设计了5片剪力墙试件,其中试件RC-SW为现浇整体墙,其余试件DCVS-1#~4#均为含干连接“竖缝”的装配式墙。墙体基本尺寸为2 800 mm(墙高) \times 1 900 mm(墙总长) \times 200 mm(墙厚),装配式剪力墙构件由左右两片(墙板A和B)组成,每片墙宽度均为940 mm,竖缝宽20 mm。试验中设计轴压比均为0.15,试件剪跨比均为1.5。参考规范^[16]相关规定,所有试件暗柱纵筋为6 Φ 12,暗柱箍筋均为 Φ 8@100,剪力墙竖向和水平向分布钢筋均采用双层双向配筋 Φ 8@200。为了使左右墙板间的相互作用仅靠竖缝节点承担,试件加载梁中间由紧密接触的两块钢垫板隔开并在其接触面涂润滑油,降低摩擦阻力,钢垫板的另一端通过直锚筋锚固在加载梁内。试件具体尺寸及构造如图2所示。

本试验根据螺栓布置和连接方式划分为三种节点类型:试件DCVS-1#和4#采用插接型节点连接(I型节点),沿竖缝高度布置两组节点,每组节点由4颗螺栓组成,共需8颗螺栓,其中试件DCVS-4#将两组节点整体上移600 mm(图2),考察节点位置对装配式墙板受力特性的影响;试件DCVS-2#采用拼接型节点连接(II型节点),节点位置同试件DCVS-1#,每组节点由8颗螺栓组成,共计16颗螺栓;试件DCVS-3#采用混合节点连接(III型节点),螺栓布置与试件DCVS-1#相同,内外连接钢板之间增加角焊缝连接。试件参数见表1,不同类型节点详细构造如图3所示。

各试件混凝土强度等级均为C30,混凝土材料的性能指标见表2;钢筋强度等级为HRB400,节点连接钢板均为6 mm厚Q355级钢材,其性能实测结果见表3。干连接节点中螺栓采用10.9s级M16摩擦型高强螺栓,螺栓屈服强度和极限强度分别为

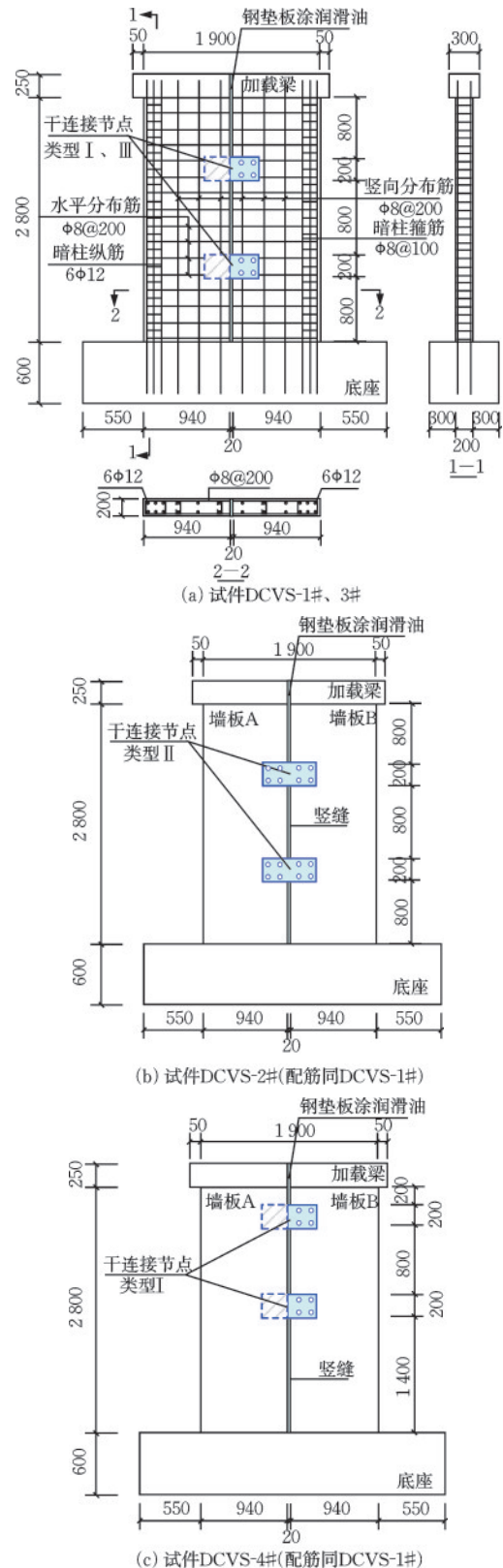


图2 试件几何尺寸和配筋

Fig.2 Specimen geometry and reinforcement details

940 MPa和1 040 MPa^[17],设计预紧力为100 kN,高强度螺栓连接摩擦面的抗滑移系数经实测取0.35。

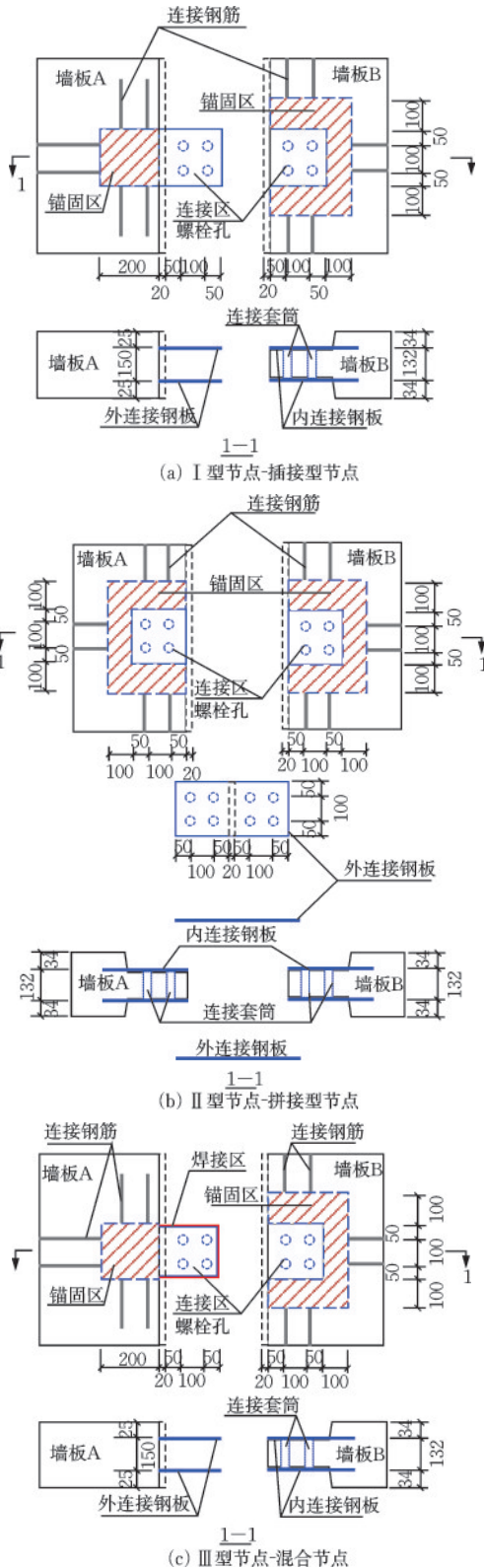


图3 干连接节点构造详图

Fig.3 Design details of dry connection

1.2 试验加载及量测内容

试验在北京工业大学城市与工程安全减灾教

表1 试件编号和参数设计

Table 1 Specimen number and design parameters

编号	节点类型	高强度螺栓 (节点数×单节点螺栓数)	备注
RCSW	现浇	0	对照组
DCVS-1#	I	2×4M16	插接型节点
DCVS-2#	II	2×8M16	拼接型节点
DCVS-3#	III	2×4M16	栓焊混合节点
DCVS-4#	I	2×4M16	插接型节点

表2 混凝土材料性能指标

Table 2 Mechanical properties of concrete

单位:MPa

试件	立方体抗压强度	轴心抗压强度	轴心抗拉强度	弹性模量
RCSW	30.7	23.3	2.60	3.00×10^4
DCVS-1#	34.4	26.1	2.77	3.12×10^4
DCVS-2#	33.1	25.2	2.71	3.08×10^4
DCVS-3#	33.4	25.4	2.72	3.09×10^4
DCVS-4#	34.8	25.7	2.74	3.13×10^4

表3 钢材材料性能指标

Table 3 Mechanical properties of steel

种类	规格	f_y /MPa	f_u /MPa	δ /%
钢筋	8 mm	433.2	588.3	12.4
	12 mm	412.4	566.7	12.1
钢板	$t=6$ mm	410.2	494.6	—
高强螺栓	M16	940.0	1 040.0	—

注: f_y 和 f_u 为材料的屈服强度和极限强度; δ 为材料的总伸长率

育部重点实验室进行,首先在试件加载梁上表面施加恒定竖向荷载(设计轴压比0.15),然后在加载梁端面中心位置施加水平向往复荷载。水平荷载采用位移控制分两阶段加载,试件在预测屈服位移前每级加载循环一次;屈服后每级加载循环两次,直至试件承载力下降到峰值荷载的85%或试件发生破坏无法维持荷载时,试验停止。在试验过程中,约定MTS作动器外推时为正,内拉时为负,试验加载装置如图4所示。

试验中位移计布置如图5所示。HY1~HY4量测试件不同高度处的水平位移,HY5测量地梁平动位移;VY1和VY2量测墙体底部转动位移,VY3和VY4量测墙体竖缝的相对位移;位移计SY1~SY4量测墙体的剪切变形;应变片布置如图6所示,主要包括纵筋应变片(V1~V8)、水平分布筋应变片(h1~h4)以及连接钢板表面应变花(Y1~Y4)。

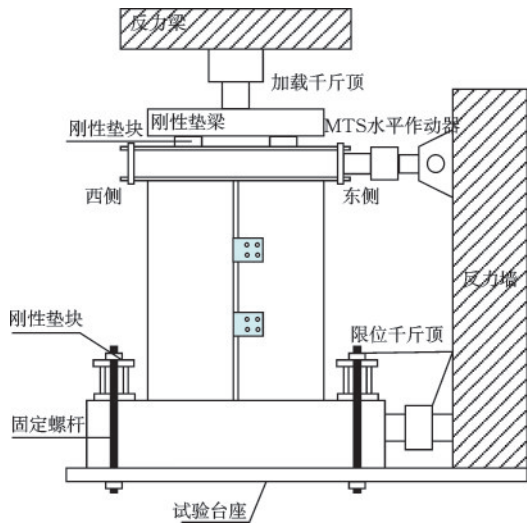


图4 试验加载装置

Fig.4 Experimental loading setup

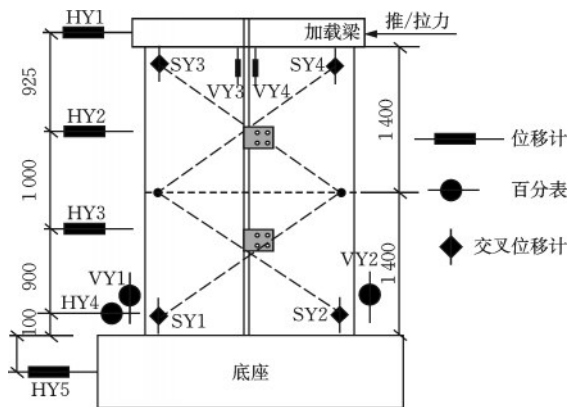


图5 位移计布置

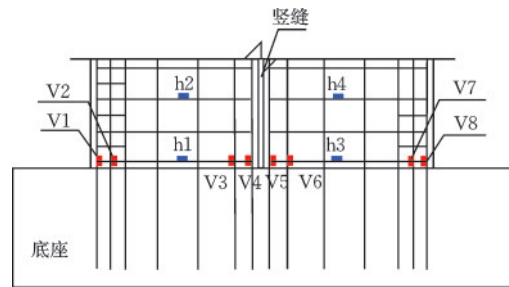
Fig.5 Layout of displacement transducers

2 试验结果及分析

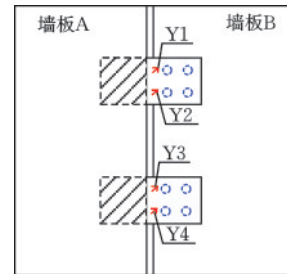
2.1 试验现象和破坏形态

试件均按“强剪弱弯”原则进行设计,剪跨比为1.5,属于中高墙,剪力墙的抗弯性能和抗剪性能共同影响墙体的破坏形态。试件的裂缝发展过程和破坏模式具体如下。

(1)试件 RCSW 加载至 350 kN 时,墙底出现第一条水平裂缝;之后水平裂缝沿墙板高度向上发展且不断延长;加载至 450 kN 时,试件边缘纵筋发生屈服,荷载—位移曲线出现拐点;当水平位移达到 14 mm 时,部分水平裂缝斜向发展,在腹板中部交汇,受压区墙角混凝土开始出现竖向裂缝;加载至 42 mm 时,墙角压区混凝土压碎剥落,边缘纵筋受



(a) 纵筋和水平筋应变片布置

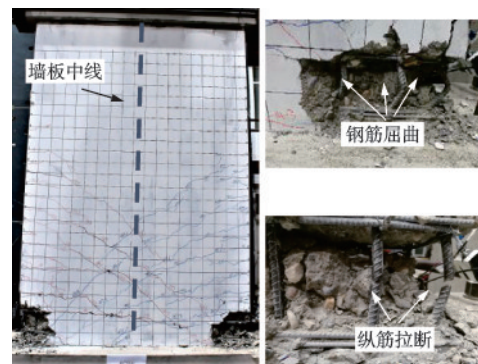


(b) 应变花布置

图6 应变片布置

Fig.6 Strain gauge arrangement

压屈曲,荷载达到峰值(+560.1 kN、-563.3 kN);继续加载至 49 mm 时,边缘纵筋拉断且墙底压区混凝土压碎、剥落严重,此时水平荷载下降超过峰值荷载的 15%,加载结束。试件 RCSW 的破坏形态如图 7 所示。



(a) 裂缝分布

(b) 钢筋变形

图7 试件 RCSW 破坏形态

Fig.7 Failure patterns of RCSW

(2)试件 DCVS-1#加载至 2.9 mm 时,墙板受拉侧出现水平裂缝,裂缝宽度 0.06 mm;加载至 4.4 mm 时,竖缝节点四角出现细微放射状裂缝;加载至 7.3 mm 时,墙板水平裂缝继续发展,最大裂缝宽度 0.2 mm,此时上节点螺栓出现轻微滑移,荷载—位移曲线出现转折;之后随着加载位移增大,墙肢中上部水平裂缝斜向发展,在竖缝位置出现交叉,边缘纵筋受拉屈服,下节点螺栓出现滑动。加载至

36.3 mm($5\Delta_y$)时,墙脚距墙底 20 cm 高度范围内混凝土压碎劈裂破坏,上、下节点连接钢板出现明显位移,荷载达到峰值(+546.9 kN、-543.4 kN);加载至 50.8 mm($7\Delta_y$)时,墙肢下部裂缝明显加宽,主裂缝附近混凝土在往复荷载下压溃、剥落,露出箍筋,上、下节点连接钢板转动明显,但外观无明显变形;继续正向加载至 58 mm 时,墙角受压区破坏严重,拉区竖向钢筋拉断,试件破坏,停止加载。试件 DCVS-1#的破坏形态如图 8 所示。

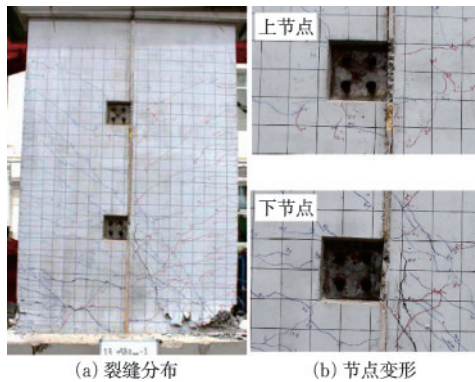


图 8 试件 DCVS-1#破坏形态
Fig.8 Failure patterns of DCVS-1#

(3) 试件 DCVS-2#加载至 2.9 mm 时,墙板开裂,裂缝宽度 0.03 mm;加载至 7.3 mm 时,水平裂缝继续发展,最大裂缝宽度 0.1 mm,上、下节点螺栓开始滑动,荷载-位移曲线出现转折;墙板 A 和 B 在墙角同时出现水平拉裂缝,表明墙肢承受一定比例的局部弯矩,试件整体性较弱。随着加载位移增大,上、下节点螺栓出现明显滑动,连接钢板出现位移,竖缝两侧墙板出现明显错动。加载至 29 mm($4\Delta_y$)时,受局部弯矩影响墙板 A、B 下部自身斜裂缝交叉呈 X 形,此时上节点位移大于下节点,节点四周无裂缝发展,荷载达到峰值(+460.1 kN、-426.9 kN)。加载至 43.5 mm($6\Delta_y$)时,墙脚压区混凝土劈裂破坏,纵筋压屈;加载至 50.8 mm($7\Delta_y$)时,墙脚混凝土压溃剥落严重,露出箍筋;继续正向加载至 58 mm 时,位移计(HY1)出现倾斜,导致位移测量异常,无法恢复,停止加载,此时上、下节点连接钢板转动明显,但外观无明显变形,基本保持完好。试件 DCVS-2#的破坏形态如图 9 所示。

(4) 试件 DCVS-3#加载至 2.9 mm 时,墙板开裂,裂缝宽度 0.03 mm;加载至 5.8 mm 时,竖缝节点四角出现细微放射状裂缝;加载至 7.3 mm 时,水平裂缝继续发展,最大裂缝宽度 0.25 mm,荷载-位移

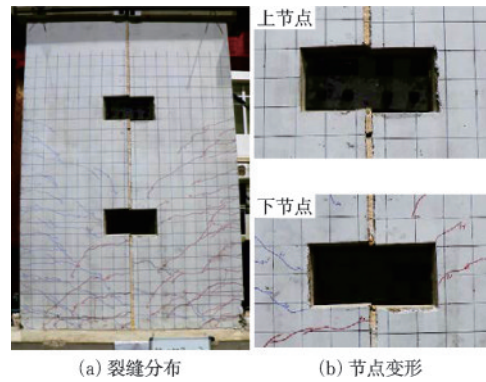


图 9 试件 DCVS-2#破坏形态
Fig.9 Failure patterns of DCVS-2#

曲线出现转折,此时上、下节点连接焊缝完好;加载至 29 mm($4\Delta_y$)时,墙肢下部水平裂缝斜向发展并出现交叉,压区墙脚混凝土出现竖向裂缝,有轻微的压溃现象。加载至 36.3 mm($5\Delta_y$)时,墙脚混凝土压碎劈裂破坏,节点焊缝未见损伤,此时荷载达到峰值(+564 kN、-516.8 kN);加载至 50.8 mm($7\Delta_y$)时,墙脚混凝土压溃剥落严重,露出箍筋,拉区纵筋被拉断一根,此时上节点焊缝出现局部撕裂,连接钢板外观无明显变形,竖缝两侧墙板无明显错动。继续正向加载至 58 mm 时,拉区竖向钢筋再次被拉断,荷载下降超过峰值荷载 15%,停止加载。试件 DCVS-3#的破坏形态如图 10 所示。

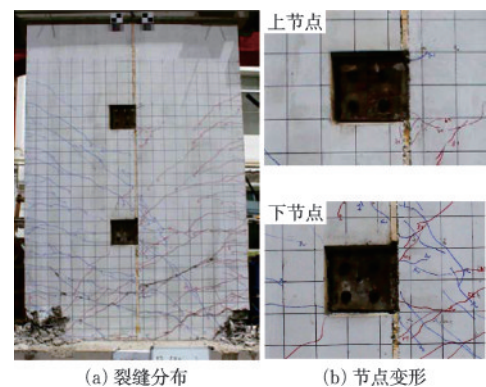


图 10 试件 DCVS-3#破坏形态
Fig.10 Failure patterns of DCVS-3#

(5) 试件 DCVS-4#加载至 2.9 mm 时,墙板开裂,裂缝宽度 0.03 mm;加载至 5.8 mm 时,下节点右下角出现细微放射状裂缝;加载至 7.3 mm 时,墙肢水平裂缝继续发展,上、下节点螺栓未见滑移;墙肢受拉端部最外侧钢筋屈服,荷载-位移曲线出现转折;之后随着加载位移增大,下节点螺栓出现滑动,竖缝两侧墙肢发生轻微错动,且主要集中在下节点

以下部分。加载至 29 mm($4\Delta_y$)时,墙肢下部水平裂缝斜向发展并交叉,下节点四角裂缝继续发展延长与墙肢裂缝连通,压区墙脚混凝土出现竖向裂缝,有轻微的压溃现象,此时荷载达到峰值(+558.5 kN、-527.9 kN)。加载至 36.3 mm($5\Delta_y$)时,墙脚混凝土压碎劈裂破坏,墙底裂缝张开长度已跨越竖缝,上、下节点均出现不同程度转动;加载至 50.8 mm($7\Delta_y$)时,拉区边缘纵筋拉断两根,上、下节点连接钢板位移明显,外观无明显变形,荷载下降超过峰值荷载 15%,试件破坏,停止加载。试件 DCVS-4#的破坏形态如图 11 所示。

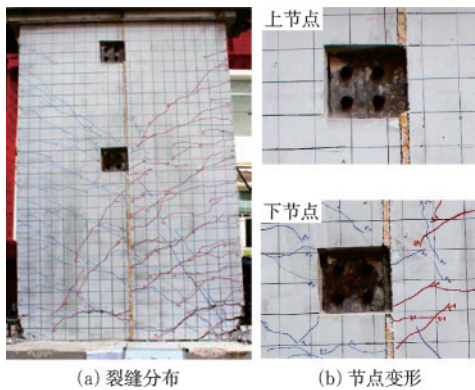


图 11 试件 DCVS-4#破坏形态
Fig.11 Failure patterns of DCVS-4#

所有试件均为弯剪破坏,干连接节点无锚固破坏,连接钢板未出现屈曲或者面外变形,外观保持良好,破坏状态表明干连接试件可以通过竖缝连接节点传力,保证左右墙肢协同受力。但与现浇试件相比,干连接试件裂缝发展受竖向接缝的影响,裂缝分布高度均达到或超过了现浇试件(现浇试件和 DCVS-1#~4#破坏时裂缝发展高度分别为 1 600、2 300、1 800、2 200、2 600 mm),裂缝分布更均匀,发展范围较大,墙板耗能能力增强。此外,节点连接越强,墙板整体性越好,三种类型节点中,混合节点(Ⅲ型节点)是插接型节点(Ⅰ型节点)的加强型连接,节点焊缝强度高,变形小,节点螺栓始终没有滑移;而拼接型节点(Ⅱ型节点)变形大,连接强度低于插接型节点,因此试件 DCVS-2#局部弯矩作用明显,墙板整体性较差。

2.2 滞回曲线和骨架曲线

图 12 为试件加载点的水平荷载—位移($P-\Delta$)滞回曲线和骨架曲线。试件屈服前基本处于弹性状态,滞回环狭长,面积很小;屈服后,滞回环面积

随控制位移增大而明显增加,耗能能力显著增强,滞回环均出现了一定程度捏拢。干连接试件中 DCVS-2#捏拢现象更加明显,表明相同变形下试件残余位移相对较小,这与试验中拼接型节点变形较大,墙板塑性变形(裂缝发展)不充分的现象吻合。试件 DCHS-3#滞回曲线饱满,节点焊缝连接增强了试件整体性,墙板裂缝发展充分,加载后期节点塑性变形,进一步加大了卸载后试件残余位移。插接型节点位置上移后,试件 DCVS-4#的滞回曲线与 DCVS-1#试件接近,节点上移后墙板裂缝发展高度达到 2 600 mm,塑性变形更充分,因此滞回曲线饱满程度有所增加,但试件强度变化不大。

从图 12(f)中可以看出,各试件的骨架曲线走势基本一致,表现出相近的发展规律,骨架曲线达到峰值荷载后都经历了一个较平缓阶段,表明在后期试件承载力下降缓慢,位移延性较好。试件 DCVS-2#峰值荷载较 DCVS-1#下降明显(下降约 19%),表明拼接型节点(弱连接)变形较大,对左右墙肢约束作用较小,试件整体性较差,墙板刚度和强度均有所降低。试件 DCVS-3#和 4#骨架曲线与现浇试件几乎重叠,变形和强度非常接近,表明混合节点连接强度较高(强连接属性),墙板整体性较好,增加节点焊缝可以提高试件的刚度和承载力;插接型节点上移同样可以改善装配式墙板整体性,但对剪力墙承载能力影响较小。

2.3 特征荷载和位移

采用几何作图法^[18]确定屈服点(屈服荷载 F_y 和屈服位移 Δ_y)。开裂荷载 F_{cr} 、开裂位移 Δ_{cr} 取墙底出现第一条水平裂缝时对应的荷载和位移;峰值荷载 F_m 和峰值位移 Δ_m 为试件骨架曲线上峰值点对应的荷载和位移;极限荷载 F_u 和极限位移 Δ_u 为试件破坏时对应的荷载和位移。表 4 给出了各试件关键特征状态的荷载和位移,取正反向加载的平均值,其中 θ_u 和 δ ($\delta = \Delta_u / \Delta_y$) 分别为极限位移角和位移延性系数。

从表 4 中可以看出:(1)与现浇试件相比,所有干连接试件的开裂荷载较低,开裂位移相近,表明干连接试件的初始弹性刚度较低。这是由于竖缝的存在削弱了墙板的整体性,导致墙板开裂刚度有所降低,采用弱连接节点(拼接型节点)的试件 DCVS-2#中表现尤为明显;而试件 DCVS-4#开裂刚度有所提升,表明节点上移对试件整体性和初始

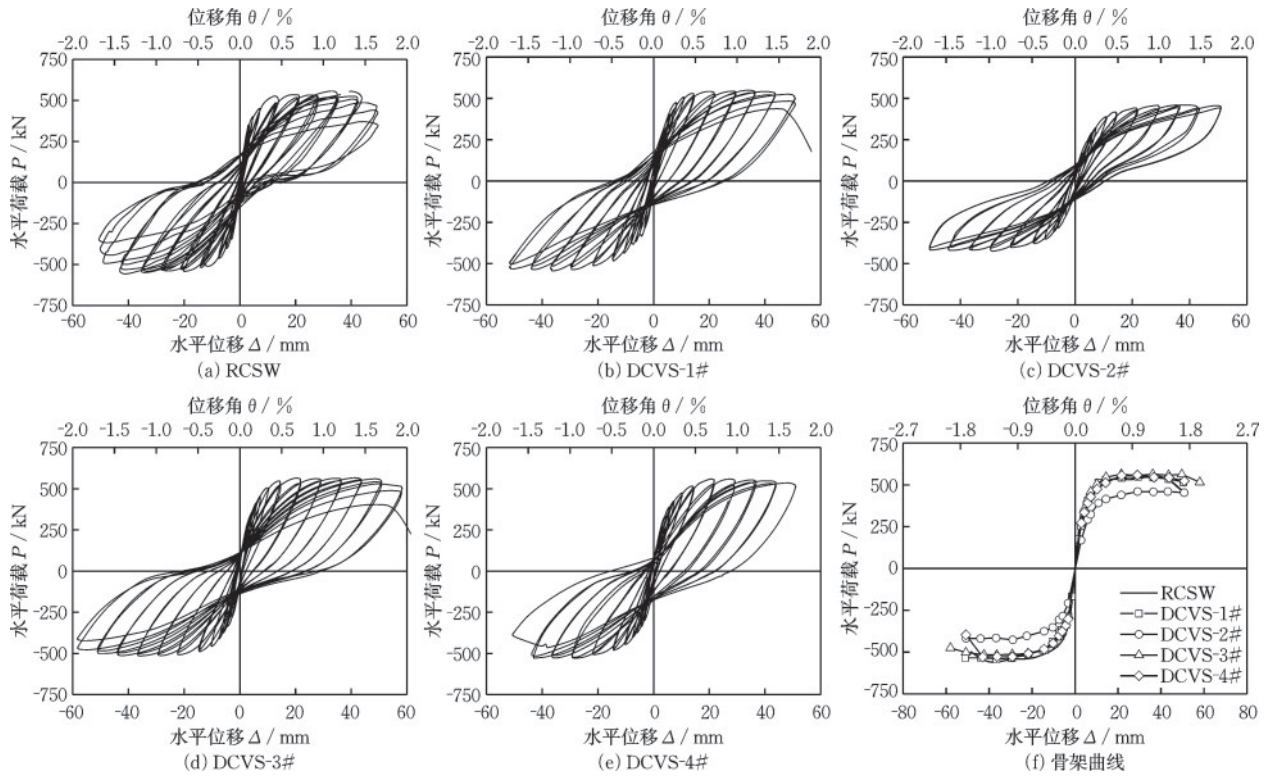


图 12 试件滞回曲线和骨架曲线

Fig.12 Hysteresis curves and skeleton curves of specimens

表 4 试件特征点荷载和位移

Table 4 Characteristic point loads and displacements of specimens

编号	F_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	F_y/kN	Δ_y/mm	F_m/kN	Δ_m/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	θ_u	δ
RCSW	350.0	3.2	442.7	6.5	561.7	39.0	486.2	48.7	1/60	7.5
DCVS-1#	269.9	3.0	417.5	7.8	545.2	36.5	525.8	50.8	1/58	6.6
DCVS-2#	188.1	3.0	362.5	10.0	443.5	29.1	435.5	50.8	1/58	5.1
DCVS-3#	281.7	2.9	443.9	7.9	540.4	36.3	477.2	58.3	1/50	7.4
DCVS-4#	287.0	3.0	429.8	8.3	543.2	29.1	486.0	49.3	1/59	6.0

刚度的恢复起到了有利作用；(2)除拼接型节点试件 DCVS-2#外,其余干连接试件的屈服点和峰值点荷载与现浇试件接近,表明 I 型和 III 型节点连接可以保证 A、B 墙肢的整体受力性能;而 II 型节点(拼接型节点)变形较大,连接强度相对较弱, A、B 墙肢始终存在局部弯矩作用,整体性较差,导致试件的屈服强度和峰值荷载均低于其余试件;(3)干连接试件的极限位移角均远大于我国抗震规范^[19]规定现浇剪力墙结构的弹塑性层间位移角限值(1/120),位移延性系数在 5.1~7.4,一般认为钢筋混凝土抗震结构要求的延性系数应达到 3~4^[20],表明所有干连接试件具有良好的变形能力和抗倒塌能力。

2.4 侧向刚度

本文采用割线刚度来分析墙板刚度退化的特性,各试件的割线刚度退化曲线如图 13 所示。从图中可以看出:(1)各试件的刚度衰减趋势大致相同,剪力墙的刚度退化主要集中在加载前期,从开裂到屈服过程刚度衰减最快,屈服以后刚度衰减逐渐放缓;(2)拼接型节点试件 DCVS-2#刚度退化曲线位于下方,表明此试件的刚度低于现浇试件和其它干连接试件,其原因是螺栓数量增加,变形增大,节点连接强度较弱;(3)干连接试件与现浇墙初始开裂刚度的比值在 0.576~0.864,表明干连接试件因墙板竖缝本身削弱导致其初始开裂刚度相对于现浇墙有不同程度的削弱;开裂后干连接试件(除试件

DCVS-2#外)刚度与现浇试件接近,表明竖缝采用插接性节点和混合节点连接的装配式墙刚度与现浇墙基本相当。

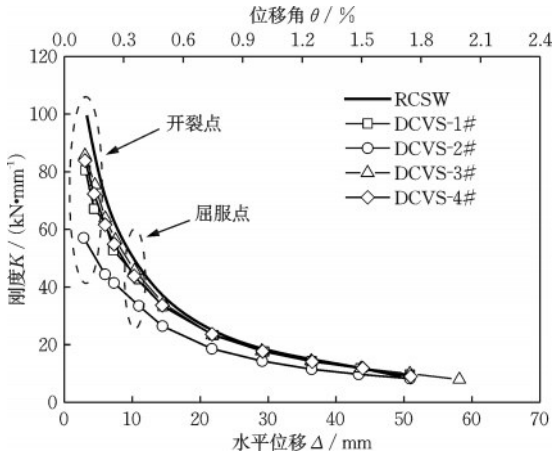


图 13 各试件刚度退化曲线

Fig.13 Stiffness degradation curves of specimens

2.5 耗能能力

为了评价试件耗能能力,图 14 给出了各试件等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 与加载点水平位移的关系曲线。从图中可以看出:(1)所有试件的等效粘滞阻尼系数随位移增大呈上升趋势,表明墙板整体耗能能力较好;其中干连接试件在加载前期(屈服之前)等效粘滞阻尼系数高于现浇试件,表明中小震工况时耗能能力更优,这与干连接试件前期节点摩擦耗能作用发挥有关;(2)插接型节点试件 DCVS-1# 的等效粘滞阻尼系数曲线与现浇试件几乎重叠,说明两者的耗能能力相当;当节点上移时,试件 DCVS-4# 裂缝发展更充分,耗能能力提高明显;(3)拼接型节点试件 DCVS-2# 整体性较差,墙肢间协调变形能力较弱,裂缝发展不充分,因此其耗能曲线在加载后期 ($2\Delta_y$ 后) 低于现浇试件,耗能水平削弱明显;(4)试件 DCVS-3# 采用混合节点加强连接,墙板整体性好,裂缝发展充分,且后期焊缝产生塑性变形,提高了墙板整体耗能水平。

3 剪力墙变形分析

试验中各试件墙底均未发现明显滑移变形 (HY4 测量值),竖缝干连接装配式剪力墙结构的层间变形主要由弯曲变形和剪切变形两部分组成。如图 15 所示,其中 Δ 为剪力墙总变形, Δ_b 为弯曲变形, Δ_s 为剪切变形。试验中通过布置在墙体两侧的

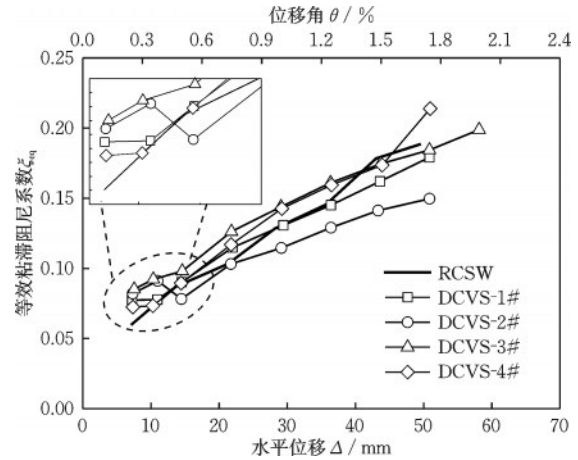


图 14 各试件等效粘滞阻尼系数曲线

Fig.14 Equivalent viscous damping ratio curves

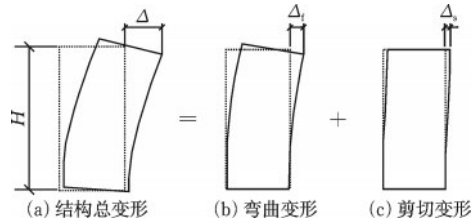


图 15 装配式剪力墙的层间变形示意

Fig.15 Schematic of inter-story deformation of prefabricated shear wall

竖向位移计 (VY1 和 VY2) 量测剪力墙在弯矩作用下的竖向变形,计算墙体的弯曲变形^[21-22];通过位移计 SY1~SY4 量测剪力墙在往复荷载作用下对角线方向的变形,计算剪切变形^[21-22]。

图 16 给出了干连接试件在各级荷载下各类变形的占比情况。从图中可以看出:(1)随控制位移增加,剪力墙弯曲变形占比逐渐减小,剪切变形占比有所增大,因此墙板裂缝由水平转为斜向发展;(2)竖缝连接强度越大,墙板整体性越好,弯曲变形占比越大,如混合节点(强连接)试件 DCVS-3#,反之剪切变形占比越大,如拼接型节点(弱连接)试件 DCVS-2#,尤其是在墙板上半部分其规律表现更加明显。该现象与悬臂墙高宽比越大,墙体弯曲变形越明显的变形规律不相符,分析原因可能是试件上端通过加载梁施加荷载的方式影响了墙板的变形特性,下一步需通过补充试验或数值模拟分析进一步验证和解释。按此规律,试件 DCVS-4# 剪切变形占比下降明显,表明节点上移有效提高了连接强度,墙板整体性得到加强;(3)从 4 个试件变形占比可以看出,墙板上半部分的弯曲变形占比明显高于下半部分,剪力墙变形呈现出典型的悬臂杆件下端固定,上端自由的变形特征。

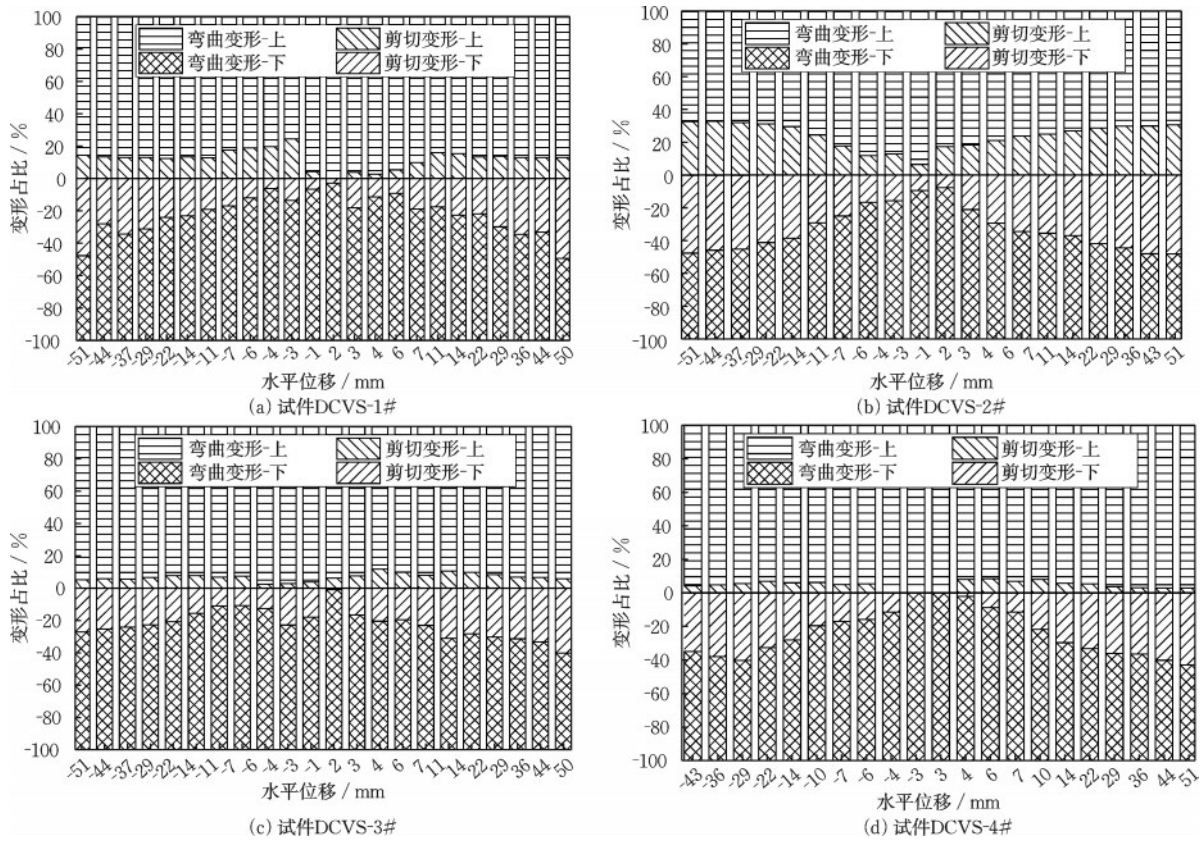


图 16 墙板层间变形占比分析

Fig.16 Composition analysis of inter-story deformation components

4 干连接节点连接性能分析

4.1 钢筋应变分析

图 17 给出了各试件墙板边缘纵筋应变随水平荷载变化的骨架曲线。

从图中可以看出:(1)钢筋塑性变形以拉伸为主,受压时钢筋变形较小,受局部挤压影响较大;屈服前钢筋应变呈线性变化,转折点处为钢筋屈服点,与钢筋拉伸试验结果基本吻合;(2)试件 DCVS-2# 的墙肢纵筋应变规律与其它试件不同。同向加载时,墙肢 A、B 两侧纵筋 V1 和 V4、V5 和 V8 保持一拉一压状态,表明墙肢内部存在明显局部弯矩作用,试件整体性能较差;其余试件竖缝两侧钢筋均以受拉为主,且正、反向均受拉屈服,表现出较好的整体受力特性。

4.2 节点连接钢板应力分析

干连接节点连接钢板的作用是将 A、B 墙肢连接为整体,确保墙板弯矩和剪力的有效传递,试验中使用应变花对节点连接钢板表面进行了应变测量,由于钢板表面应变状态复杂,应变花测量区域

往往受多个方向拉压作用,本文采用材料力学中 Von Mises 准则^[23]计算等效应力 $\bar{\sigma}$,计算见式(1)和式(2),用以判定材料是否进入屈服状态。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2}{2}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_{90}) + \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2} \right] \\ \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\epsilon_0 + \epsilon_{90}) - \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_{45} - \epsilon_{90})^2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_1 和 σ_2 分别为第一和第二主应力; E 为材料弹性模量; ν 为泊松比; ϵ_0 、 ϵ_{45} 和 ϵ_{90} 分别为应变花 0° 、 45° 和 90° 三个方向的应变测量值。

连接钢板等效应力骨架曲线如图 18 所示,从图中可以看出:(1)插接型节点试件 DCVS-1# 连接钢板等效应力最大为 332.5 MPa,未发生屈服;节点上移后,试件 DCVS-4# 连接钢板等效应力最大为 118.6 MPa,下降明显,表明节点上移有效提高了节

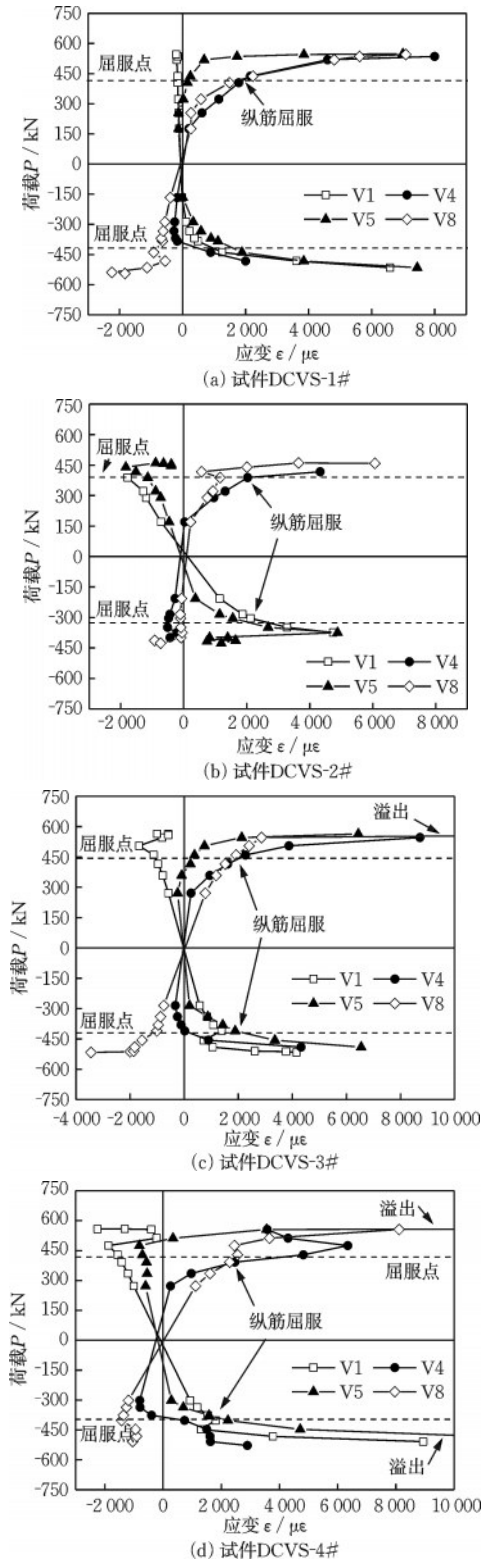


图 17 墙肢边缘纵筋应变骨架曲线

Fig.17 Load-strain curves of vertical reinforcements at wall limb edge

点传力效率;工程中可以考虑适当降低钢板规格,节约建设成本;(2)拼接型节点试件 DCVS-2# 连接钢板等效应力较小,最大值为 190.7 MPa,钢板未屈

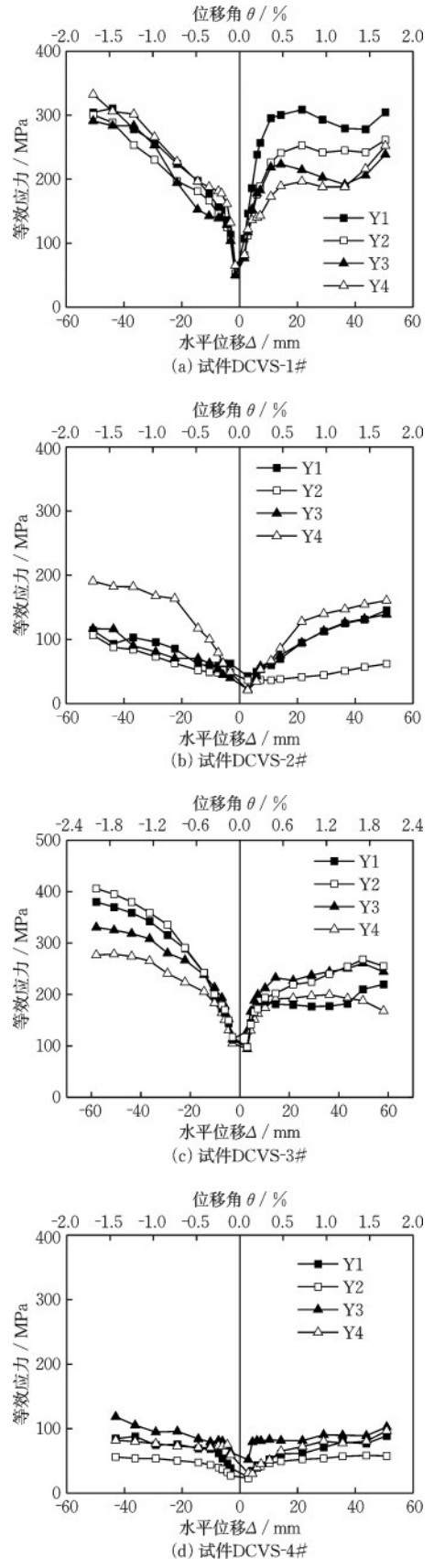


图 18 节点连接钢板等效应力骨架曲线

Fig.18 Von Mises stress-displacement curves of joint connection steel plates

服;(3)混合节点试件DCVS-3#上节点连接钢板等效应力达到402.3 MPa;加载后期,节点焊缝局部轻微撕裂,产生塑性变形。

5 结 论

本文通过拟静力试验研究了一字型带竖缝的干式连接装配式剪力墙的抗震性能,并与整浇剪力墙进行对比。得到以下结论:

(1)采用连接钢板和高强度螺栓组成的竖缝干连接节点连接相邻预制混凝土剪力墙,左、右墙肢可通过干连接节点传力,像现浇整体墙一样协同受力。

(2)受竖向接缝影响,干式连接装配式剪力墙的破坏形态与现浇整体墙有所不同,首先裂缝发展高度较高(受上节点影响),分布区域更广;其次竖缝连接强度越强,墙板整体性越好,其强度和刚度趋近于现浇整体墙,竖缝节点连接强度由强到弱排序为:混合节点,上移插接型节点,普通插接型节点和拼接型节点。

(3)采用插接型节点(DCVS-1#)和混合节点(DCVS-3#)的干连接装配式剪力墙的滞回特性与现浇试件相近,初始刚度稍低于现浇试件,延性和耗能能力表现良好,尤其是在小震情况下耗能能力更优;节点上移(DCVS-4#)可以有效提高节点传力效率,改善墙板整体性和耗能能力,节约建设成本。拼接型节点(DCVS-2#)变形大,刚度低,剪力墙整体性较差,大震情况下耗能能力削弱明显,建议该类型节点在工程中使用时应增加节点强度和墙板整体性(如采取增加焊缝连接、节点上移等措施)。

(4)带“竖缝”的干连接装配式剪力墙层间变形主要由弯曲变形和剪切变形组成。干连接试件的位移延性系数介于5.1~7.4,具有良好的变形能力和抗倒塌能力。

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 J R, Yang X K, Qin H, 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. (in Chinese)
- [2] 李爱群,王维,贾洪,等. 预制混凝土剪力墙结构抗震

性能研究进展(I):接缝性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 601-602.

Li A Q, Wang W, Jia H, et al. Progress of investigation on seismic behavior of precast rc shear wall structures (I): joint property study [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 601-602. (in Chinese)

- [3] 李爱群,王维,贾洪,等. 预制混凝土剪力墙结构抗震性能研究进展(II):结构性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(6): 737-741.

Li A Q, Wang W, Jia H, et al. Progress of investigation on seismic behavior of precast rc shear wall structures (II): structure property study [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(6): 737-741. (in Chinese)

- [4] 李少云. 带竖缝剪力墙及其结构控制性能的研究[D]. 广州:华南理工大学, 1989.

Li S Y. Research on shear wall with vertical joints and its structural control performance [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 1989. (in Chinese)

- [5] 郑少波. 预制剪力墙接缝抗剪性能试验研究[D]. 天津:天津大学, 2015.

Zhen S B. Experimental research on shear properties of precast concrete shear walls interface [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)

- [6] 装配式混凝土结构技术规程: JGJ1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

- [7] Building code requirements for structural concrete: ACI318-11 [S]. Farmington Hills: American concrete Institute, 2011.

- [8] 宋国华,柳炳康,王东炜. 反复荷载作用下PBPS竖缝抗震性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 18-24.

Song G H, Liu B K, Wang D W. Experimental and theoretical study on seismic behavior of vertical connection in PBPS under repeated loading [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(6): 18-24. (in Chinese)

- [9] 宋国华,王东炜,滕海文,等. 装配式钢筋混凝土结构竖缝抗剪承载力研究及国内外规范比较[J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 125-128.

Song G H, Wang D W, Teng H W, et al. Study on shear resistance of a vertical connection in PRC structures and comparison among building codes of different countries [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 125-128. (in Chinese)

- [10] 宋国华,王东炜,滕海文. PRC结构竖缝强度退化后抗剪能力统计特征[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30

- (1): 81-84.
- Song G H, Wang D W, Teng H W. Statistical characteristics of the shear resistance of PRC structures after the degeneration of perpend[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, 30(1): 81-84. (in Chinese)
- [11] 杨勇. 带竖向结合面预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Yang Y. Experimental research on seismic performance of precast shear wall with vertical joint surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 周宏庚. 叠合板式混凝土剪力墙竖向拼缝构造措施试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(1): 39-42.
- Zhou H G. The experiment study on structural measures of the vertical seam of superimposed concrete shear wall[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(1): 39-42. (in Chinese)
- [13] 沈小璞, 马巍, 陈信堂, 等. 叠合混凝土墙板竖向拼缝连接抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(9): 1366-1371.
- Shen X P, Ma W, Chen X T, et al. Experimental study of the seismic performance of the vertical joint seam of superimposed concrete wall panels[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2010, 33(9): 1366-1371. (in Chinese)
- [14] Du X L, Wang Z Y, Liu H T, et al. Research on seismic behavior of precast self-centering concrete walls with dry slip-friction connectors [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42(10): 102668.
- [15] 许高娟, 欧进萍. 预制装配式结构梁柱节点被动耗能减振技术研究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6): 1183-1199.
- Xu G W, Ou J P. State-of-the-art and prospect of pre-fabricated beam-column connection with passive energy dissipation technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6): 1183-1199. (in Chinese)
- [16] 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, 2010.
- [17] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [18] Wu M, Liu X, Liu H T, et al. Seismic performance of precast short-leg shear wall using a grouting sleeve connection[J]. Engineering Structures, 2020, 208: 110338.
- [19] 建筑抗震设计规范 GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [20] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [21] Mohamed N, Farghaly S A, Benmokrane B, et al. Flexure and shear deformation of GFRP-reinforced shear walls[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 18(2): 04013044-1~8.
- [22] Cheng X W, Ji X D, Xu Z G, et al. Seismic behavior of precast prestressed reinforced concrete short-leg walls [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104710.
- [23] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

(本文编辑: 池营营)