

装配式剪力墙结构新型连接节点的构造与抗震性能研究

余志武^{1,2}, 彭晓丹^{1,2}, 国巍^{1,2}, 彭妙培^{1,2}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 装配式结构具有快速施工, 节能环保的特点, 装配式剪力墙结构符合我国住宅产业化的要求。预制墙体连接技术是制约装配式剪力墙结构使用及抗震性能的关键, 提出一种适用于装配式剪力墙连接的新型节点连接技术, 通过节点的静力试验及试件低周反复荷载试验, 研究和评价新型节点连接的抗震性能, 并在试验基础上改进节点连接构造。结果表明: 该连接技术锚固性能可靠。在选择合理钢筋埋深和设计的情况下, 运用这种连接方法的装配式剪力墙水平缝和竖直缝试件具有与现浇试件相当的抗震性能。

关键词: 住宅产业化; 装配式剪力墙结构; 连接节点; 抗震性能

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0160-05

New node connection mode and seismic performance of precast concrete shear wall structure

YU Zhiwu^{1,2}, PENG Xiaodan^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, PENG Miaopei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: Precast structures has features of rapid construction, energy saving, and the precast shear wall structure fits the requirements of the housing industrialization perfectly. The connection technology of precast wall is the key constraints to using properties and seismic performance of the structure. This paper proposes a new node connection technology which can be applied to precast concrete shear wall connection. The seismic performance was researched and evaluated through the nodes statistic test and specimen low cyclic loading test and the new nodes connection was improved on an experimental basis. The results showed that the anchorage of this connection technology is reliable. On the basis of reasonable depth and design selection, the precast shear wall specimens with horizontal or vertical joint using the new node connection technology have equal seismic performance to cast-in-place specimens.

Key words: Housing industrialization; precast concrete shear wall; node connection; seismic performance

在创建“资源节约型、环境友好型”社会的大背景下, 从传统高污染、高能耗的手工作坊式建造方式向环保节能的工厂化、标准化建造方式的转变是建筑产业发展的必然要求, 装配式结构是实现这一目标的主力军^[1]。装配式剪力墙结构具有装配式建筑生产效率高、质量好、生态环保的特点, 同时结构竖直和侧向刚度均较大, 房间内无梁、柱等突出, 适用于高层住宅建筑, 符合“住宅工业化”的发展要求, 国内已经进行相关研究工作并展开了示范和应用^[2-3]。

装配式剪力墙结构中存在较多的水平接缝、竖向接缝和节点, 如何使得预制构件之间牢固连接成为了制约结构整体性、承载能力、抗震性等性能的关键。国外对装配式剪力墙连接技术的研究起步较早, Sami H Rizkalla^[4]等对采用抗剪键连接的水平接缝装配式剪力墙抗剪承载能力的影响因素进行研究, 并根据试验数据归纳出抗剪键的受剪承载力计

算公式; Brian J. Smith^[5]提出了采用普通钢筋和无粘结预应力钢绞线连接的装配式剪力墙结构水平缝连接方式, 并在试验研究^[6]中证明这种连接中普通钢筋耗能, 而预应力筋保持结构的承载力和自恢复能力。相比国外将无后浇混凝土的“干连接”形式作为研究重点, 国内的研究主要集中在需要现场湿作业拼装的装配式剪力墙结构接缝的“湿连接”。朱张峰等^[7]研究了预制装配式剪力墙结构中中间层边节点, 包括墙板节点、墙梁节点、梁板节点的抗震性能, 并对节点钢筋连接进行探讨; 姜洪斌等^[8,9]提出预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋连接, 在试验数据基础上给出了锚固长度的建议公式, 并对采用浆锚连接的预制剪力墙子结构进行拟静力试验, 研究其变形能力及刚度退化。钱稼茹等^[10]对预制墙体钢筋灌浆套筒连接的试件进行低周反复荷载试验, 结果表明结构耗能能力强, 抗震性能与传统现浇墙体相当。国内也有学者^[11]进行了

收稿日期: 2014-10-27

修改稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50938008, 51108466); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1296); 中铁四局合作开发课题项目(143010100)

作者简介: 余志武(1955-), 男, 教授。从事混凝土耐久性、组合结构、装配式剪力墙结构等研究。E-mail: zhwyu@mail.csu.edu.cn

“干连接”的初步研究。

综合本文关于装配式剪力墙连接节点的调研,目前提出的连接方式还存在着一些缺陷和不足。“干连接”在国外应用较广泛,但在施工现场需要张拉预应力筋,对操作精度要求高,质量较难把控,国内较少采用。国内装配式剪力墙多采用“湿连接”,包括灌浆套筒连接、浆锚搭接、预留孔连接等,存在着施工操作复杂、施工成本高、对不同受力条件的构件适应性差的不足。本文提出一种装配式剪力墙新型连接节点—U型套箍连接,属于“湿连接”的范畴,具有施工操作便捷、成本低、能适用于不同条件下装配式剪力墙结构的特点。U型套箍连接的U型钢筋是由预制构件预留纵筋或分布钢筋外露形成,预制构件U型钢筋错位搭接形成套箍,并在套箍平面内四角穿插垂直于平面的通长钢筋,并浇筑混凝土实现预制剪力墙墙体的连接,节点构造如图1所示。

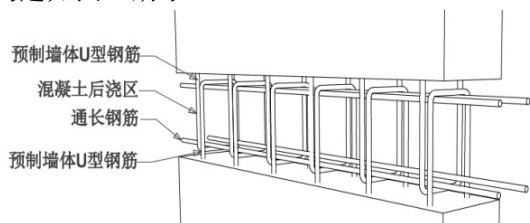


图1 装配式剪力墙新型连接节点构造

Fig.1 New connection node structure of precast concrete shear wall

1 装配式剪力墙中新型连接节点抗拔性能试验

制作单个节点试件进行静力拉拔试验,获得节点试件的抗拔力、U型钢筋及混凝土的破坏形态,据此来评价采用这种新型连接节点的装配式剪力墙结构抗震性能,试件如图2所示。节点试件混凝土块体尺寸为330 mm×200 mm×300 mm,实测混凝土抗压强度30.94 MPa,U型钢筋弯折长为130 mm。试验变量为钢筋型号及U型钢筋在混凝土块中的埋深,试验所用钢筋B8、B10、C14为三种,

U型钢筋埋深变化范围为40 mm到270 mm。

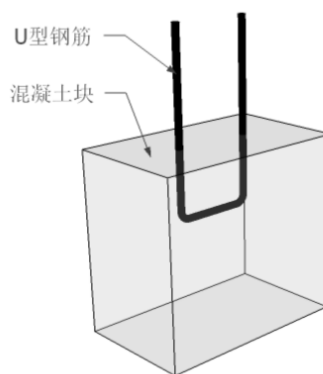


图2 U型套箍连接抗拔试验试件

Fig.2 U-shaped ferrule connection pullout test specimens

试件的抗拔力^[12]主要由U型钢筋竖直段与混凝土的粘结力和水平段钢筋与混凝土块的挤压力形成,由于试件水平段钢筋埋置长度相同,钢筋直径对挤压力的影响较小,试件抗力主要由受埋深影响的粘结力决定。试验开始时,混凝土内靠近表面处钢筋应力值最大,应力随深度增加而减小;荷载增加,近试件表面钢筋混凝土的粘结力首先发生破坏,并沿U型钢筋竖直段发展。根据试验现象,节点试件的破坏主要可分为U型钢筋外露段拉断和混凝土拉裂U型钢筋拔出两种破坏形态,如图3所示。若U型钢筋两根竖直钢筋的极限荷载小于试件抗拔力,试件发生U型钢筋外露段拉断破坏,此时钢筋发生颈缩现象,属于延性破坏;反之,则发生不利于结构抗震的混凝土块拉裂的脆性破坏,U型钢筋没有显著屈服耗能,U型钢筋被拔出。不同直径钢筋试件对应的埋深—破坏力试验曲线如图4所示。据图4可得,在忽略个别试件因加载装置造成错误的前提下,增加U型钢筋的埋深能增加试件的抗拔力,但当埋深增加到一定程度后,抗拔力的增长曲线趋于平缓,这也启发我们在实际工程应用中,要寻找一个经济合理的U型钢筋埋深。



(a) 钢筋拉断破坏



(b) 钢筋拔出破坏

图3 节点试件不同破坏形态

Fig.3 Different failure modes of node specimens

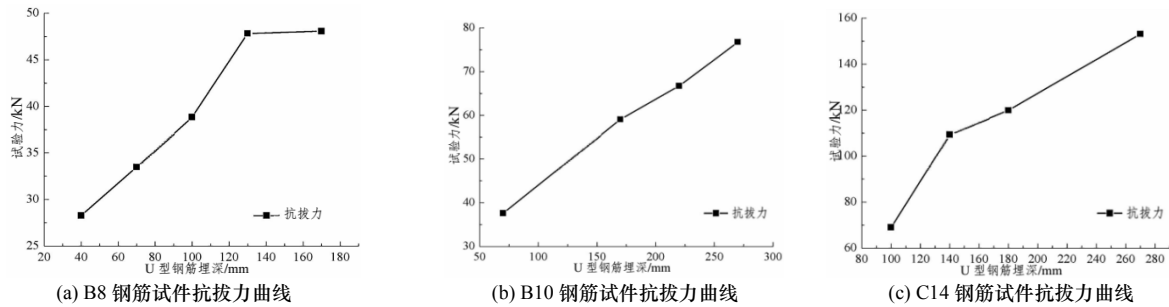


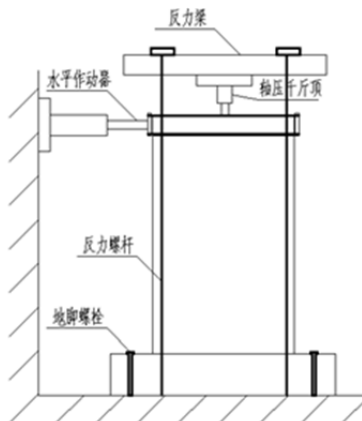
图 4 不同钢筋直径试件对应埋深-抗拔力曲线

Fig.4 Depth-pullout force curve of specimens with different reinforcements diameter

2 装配式剪力墙结构新型连接试件抗震性能试验

在装配式剪力墙结构新型连接节点试验抗拔力研究的基础上,为解决预制剪力墙连接技术问题,分别对采用新型连接技术的水平缝剪力墙试件和竖直缝剪力墙试件进行低周反复荷载试验,根据试验结果对 U 型套箍连接方法的抗震性能进行评价。试验制作试件共 3 个,原型为实体工程底部剪力墙墙体,分别记为 SW1(现浇试件)、SW2(带水平缝试件)、SW3(带竖直缝试件)。预制构件混凝土强度等级为 C30,水平缝和竖直缝混凝土采用加入水泥用量 5%的膨胀剂的微膨胀混凝土,强度等级为 C35。

试验用荷载-位移双控制加载,试件屈服前由荷载控制加载,屈服后由位移控制加载,试件轴压比为 0.3,试验加载装置如图 5 所示。试验研究的内容包括试件的裂缝发展及试件破坏机理、试件内钢筋应变的分布和位移分布、试件的变形能力及刚度退化分析。

图 5 试验加载装置
Fig. 5 Loading device

3.1 试件裂缝发展及破坏形态

试验中,装配试件的裂缝开展情况及破坏形态与现浇试件基本相同,3 个试件加载完成后的裂缝分布如图 6 所示。3 个试件都经历了开裂阶段、屈

服阶段、塑性阶段及破坏阶段。加载初期,试件残余变形小,处于线弹性阶段,装配试件的开裂荷载要比现浇试件小,墙体与地梁连接处有微裂缝出现。在往复荷载作用下,墙体屈服,从墙底往上出现多条水平裂缝,剪力墙约束边缘构件钢筋屈服。塑性阶段,试件损伤累积,裂缝不断出现,已有裂缝斜向发展并逐步贯通形成主裂缝。破坏阶段,都伴随墙体底部混凝土压溃,装配试件后浇带混凝土裂缝分布密集,部分裂缝与预制构件裂缝相互贯通,现浇试件破坏荷载大于装配试件。总的来看,剪力墙试件边缘钢筋的屈服先于混凝土的压溃破坏,试件的破坏形态都属于塑性破坏,具有较好的延性。

比较 3 个试件裂缝分布,现浇试件 SW1 相对于装配试件 SW2、SW3,其裂缝在底部墙高 1/2 的范围内分布,而装配试件的裂缝分布范围主要集中于底部墙高 1/3 的范围内,形成了贯通的斜裂缝,损伤累积效应不如现浇试件显著。装配试件破坏时,由于新老混凝土结合面抗剪性能不佳,后浇缝处产生贯通裂缝。实际使用应考虑在预制墙体的拼装面设置剪力键或由人工凿毛改为水射流凿毛等方式改善结合面抗剪性能。

3.2 装配试件钢筋应变分布和位移分布

试验时,在后浇缝两端对应位置 U 型钢筋上布置钢筋应变片,研究水平接缝处钢筋应变的传递情况。图 7 为试件作动器作用对侧钢筋的应变曲线,水平缝装配试件 SW2 接缝处上下钢筋应变变化趋势相同,与现浇试件相似,差值基本恒定,说明 U 型套箍连接在试件屈服前能有效传递钢筋应力,传力效果与现浇试件相近。图 8 为试件在开裂阶段、屈服阶段、荷载峰值阶段位移沿墙高的分布图,在开裂及屈服阶段,试件 SW2 的侧向位移较试件 SW1、SW3 大,由于水平接缝的存在使得试件刚度减小;在荷载峰值阶段,试件 SW2、SW3 的侧向位移均大于现浇试件 SW1;装配试件各阶段位移沿

墙高分布曲线基本呈线性, 与现浇试件趋势相同, 说明预制试件间协同变形能力良好, 连接可靠.

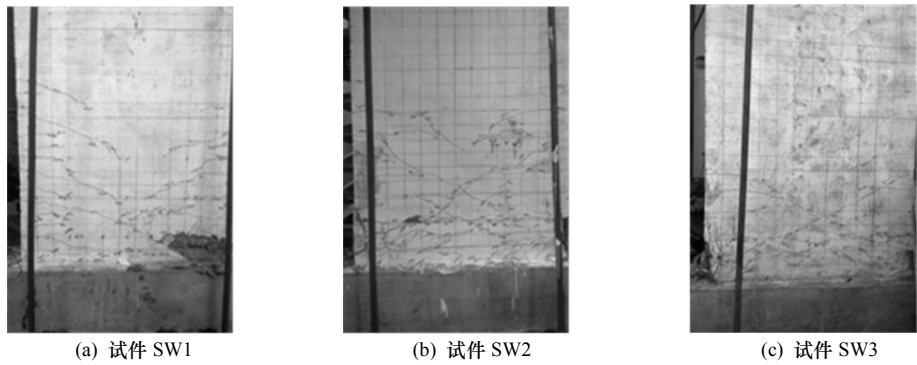


图 6 试件裂缝分布
Fig.6 Crack distribution figures of the specimens

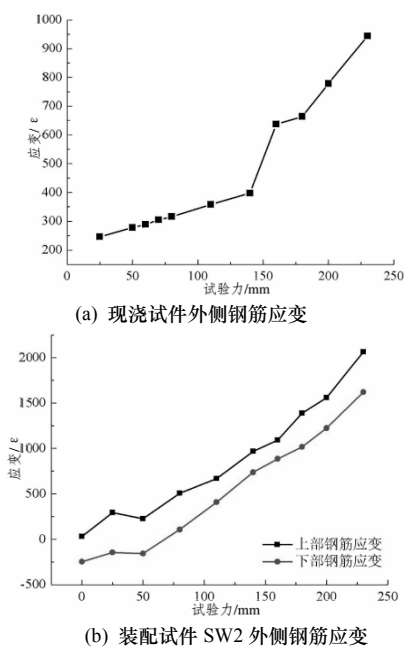


图 7 试件钢筋应变的传递
Fig.7 Strain propagate of reinforcements in specimens

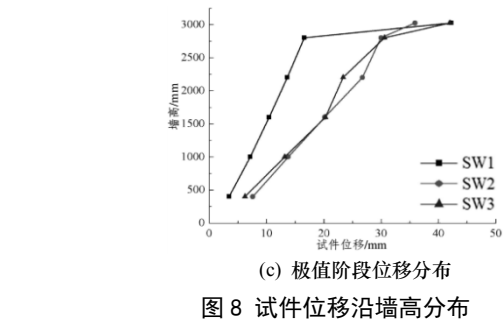
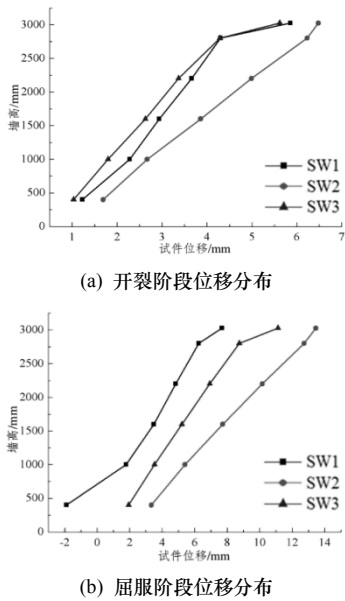


图 8 试件位移沿墙高分布
Fig.8 The displacement distribution of specimens along the wall height

3.3 试件的变形能力和刚度退化比较

表 1 列出了试件正向加载时对应的屈服位移 1、屈服位移角 2、极限位移 3、极限位移角 4 和位移延性系数 5, 其中极限位移 3 和极限位移角 4 为试件加载到承载力最大值后, 试验力下降至最大承载力的 85% 时所对应位移及转角. 结果表明: 装配试件的延性比现浇试件差, 但延性系数均大于 2.5, 延性较好, 极限位移角 4 均大于规范^[13]限值, 符合规范要求. 图 9 为试件的等效刚度退化曲线, 装配试件与现浇试件有相同的刚度退化趋势, 但初期裂缝出现较早, 初始刚度低, 前期刚度退化曲线较陡, 刚度退化快, 后期刚度退化曲线与现浇试件曲线基本重合, 刚度性能表现与现浇试件接近.

表 1 剪力墙试件变形能力比较
Tab.1 Comparison of deformation capacity of the shear wall specimen

试件编号	1	2	3	4	5
SW1	11.05	1/261	42.8	1/71	3.68
SW2	13.7	1/211	35.9	1/84	2.62
SW3	11.9	1/254	41.8	1/72	3.53

4 新型连接节点的改进

由试验结果及图 9 对于试件刚度的分析, U 型套箍连接应用于装配式剪力墙水平缝与现浇试件表现相近, 而用于装配式剪力墙竖直缝, 试件的初

始刚度显著降低,这是由于竖直缝后浇混凝土不密实,而U型套箍连接不能抵抗预制墙体之间挤压使得接缝处混凝土开裂较早所致.为此,提出一种基于U型套箍连接改进的新型连接方法,如图10所示.

预制构件工厂化生产时将外露纵筋或分布钢筋加工成U型,在平行于U型水平段钢筋对应位置处焊接水平加强钢筋,起限制穿插通长钢筋相对移动的作用,具体尺寸依据后浇缝宽度及结构受力情况拟定.预制构件吊装就位,外露U型钢筋相互搭接形成套箍,穿插垂直于套箍平面的通长钢筋.改进型U型套箍连接在不影响施工便捷性,不明显增加成本的前提下,提高了节点连接性能,节点能较好地抵抗预制构件之间的挤压力.

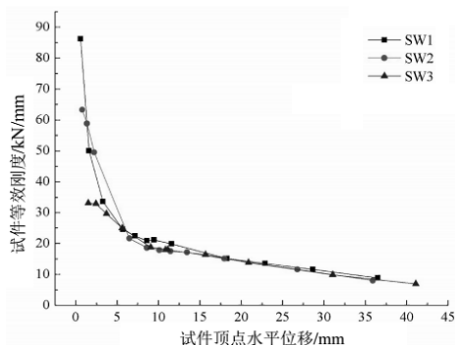


图9 试件等效刚度退化曲线

Fig9 Equivalent stiffness degradation curve of specimens

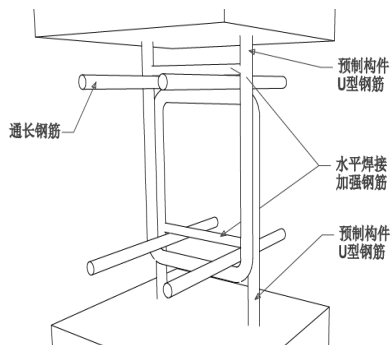


图10 改进U型套箍连接构造图

Fig.10 Structure diagram of improved U-shape ferrule connection

5 结论

本文提出一种装配式剪力墙结构的新型节点连接构造-U型套箍连接,通过节点连接的静力试验,研究钢筋、混凝土及钢筋混凝土粘结破坏的形态,分析U型钢筋直径及埋深对试件抗拔力的影响;通过试件的低周反复荷载试验,研究试件裂缝发展及破坏形态、钢筋应变分布及试件位移分布、变形能力及刚度退化,据此评价新型节点连接的抗震性能,并基于试验结果提出了一种改进型的U型套箍连

接,得到如下结论:

(1) U型钢筋锚固破坏形态主要有两种:钢筋拉断和混凝土块拉裂.

(2) 适当增加U型钢筋的埋深能显著提高节点抗拔力,避免混凝土拉裂;当埋深达到一定程度后,节点发生钢筋拉断,抗拔力将转由U型钢筋型号决定度.

(3) 采用新型节点连接的装配试件发生破坏形态为弯曲或近于弯剪的塑性破坏;在钢筋屈服前,钢筋间传力效果良好;装配试件具有与现浇试件相当的整体性、变形能力及耗能能力,连接的抗震性能可靠.

参考文献 References

- [1] 秦亮, 王蕴. 适于建筑工业化的装配式结构体系[J]. 工业建筑, 2006 (S):1518-1521.
QING Liang, WANG Yun. Precast structure systems suitable for industrial construction. [J]. Industrial Construction, 2006 (S): 1518-1521.
- [2] 黄小坤, 田春雨. 预制装配式混凝土结构的研究进展[J]. 住宅产业, 2010 (9): 28-32.
HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu. Research progress of precast concrete shear wall [J]. Journal of Housing Industry, 2010(9): 28-32.
- [3] 张锡治, 李义龙, 安海玉. 预制装配式混凝土剪力墙结构的研究与展望[J]. 建筑科学, 2014, 30(1): 26-31.
ZHANG Xizhi, LI Yilong, AN Haiyu. Present Research and Prospect of Precast Concrete Shear Wall Structure[J]. Building Science, 2014, 30(1): 26-31.
- [4] RIZKALLA Sami H, SERRETTE Reynaud L, HEUVEL J Scott. Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels[J]. PCI Journal, 1989, 34(2): 104-120.
- [5] SMITH Brian J, KURAMA Yahya C. Design of Hybrid Precast Concrete Walls for Seismic Regions [J]. Journal of Structure Engineering, 2003, 129 (3): 286-296.
- [6] SMITH Brian J, KURAMA Yahya C, MCGINNIS Michael J. Behavior of Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions: Comparison of Hybrid and Emulative Specimens [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(11): 1917-1927.
- [7] 朱张峰, 郭正兴. 预制装配式剪力墙结构节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 69-76.
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Seismic test and analysis of joints of new precast concrete shear wall structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (1): 69-76.
- [8] 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.

(下转第191页)