

预制装配式剪力墙结构的性能研究综述

李彦苍, 徐培东

河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸

Email: liyancang@hebeu.edu.cn, xupeidong555@163.com

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月18日; 发布日期: 2020年11月25日

摘 要

为了适应建筑节能减排和住宅产业化发展和要求, 预制剪力墙结构的研究和应用已成为结构工程中的一个热点问题。本文从国内外预制剪力墙结构的发展入手, 阐述了预制剪力墙结构的发展历程, 概括了近年来国内外学者对预制剪力墙结构的研究成果, 并从预制剪力墙结构的抗剪性能和抗震性能两方面进行了简要的分析和探讨, 最后提出了装配式剪力墙结构发展的方向和对未来的展望。

关键词

装配式剪力墙结构, 抗剪性能, 抗震性能

Summary of Research on Performance of Prefabricated Shear Wall Structure

Yancang Li, Peidong Xu

College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Email: liyancang@hebeu.edu.cn, xupeidong555@163.com

Received: Nov. 3rd, 2020; accepted: Nov. 18th, 2020; published: Nov. 25th, 2020

Abstract

The research and application of precast shear wall structure have become a hot issue in structural engineering in order to adapt to the development and requirements of building energy saving and emission reduction and housing industrialization. Starting with the development of precast shear wall structure at home and abroad, this paper expounds the development course of precast shear wall structure, and summarizes the research results of precast shear wall structure by domestic and foreign scholars in recent years, the shear and seismic behaviors of precast shear wall structures are briefly analyzed and discussed. Finally, the development direction and prospect of fa-

bricated shear wall structure are put forward.

Keywords

Fabricated Shear Wall Structure, Shear Performance, Seismic Performance

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

预制装配式建筑的发展是我国建筑业“十三五”期间重要战略之一[1]。2016年《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》发布实施后,装配式将成为今后建筑行业的重要营造方式之一。近年来,预制水平构件在预制方法中得到了广泛的应用,但采用预制方法的构件应用较少,施工经验相对缺乏。预制剪力墙结构相对于预制框架结构有很大的优势,其主要表现是剪力墙结构具有大量的水平缝、垂直缝和节点,以及这些接缝和节点的存在,这些节点、接缝共同受力、协同工作,使得整个剪力墙成为了一个整体,这种连接方式极大地提高了建筑物的耐久性、抗冲击性和抗震性,因而接缝和节点的受力性能是整个剪力墙结构的关键,它决定着剪力墙的质量[2]。

预制装配式剪力墙结构是以装配式或半装配式墙板为主体构件,现场组装,局部浇筑而成的混凝土结构。预制构件结构是一种现代建筑结构模型,与传统的混凝土结构不同,它采用组装方式,耗水量和能耗相对较少,不会产生大量固体废弃物和污水[3]。此外,这种施工方法对住宅产业化和建筑节能都有一定的参考价值。建筑采用预制式防渗墙结构,主体结构主要由厂家规划现场组装完成,在施工条件较差的地区具有较好的适应性。近年来,可持续发展理念对新时代我国住宅产业化发展也提出了新的要求[4],同时建筑行业对预制混凝土建筑的研究越来越多,关于预制装配式剪力墙结构性能的研究也逐渐地成为建筑研究领域的一个热点,为我国推广这一技术提供了良好的基础。本文首先对预制剪力墙结构的发展历程进行了概括,其次从对预制剪力墙结构抗剪性能和抗震性能两方面进行分析,总结出提升抗剪和抗震性能的因素,并对其进行可行性分析,提出了今后对预制剪力墙结构发展的建议。

2. 国内外预制装配式剪力墙结构发展历程

在国外,预制装配式剪力墙结构常被用于低层、多层和高层建筑,例如一些欧洲国家的预制结构可达16~26层,而日本由于自身地域特点,它的预制剪力墙结构一般在10层以内,并且在地震结构中表现出良好的抗震性能,如墨西哥智利大地震和日本阪神大地震很多的预制混凝土剪力墙结构损害较少,或者修复设备连接后可立即使用[5],这些都说明了预制剪力墙结构具有良好的抗震性能和稳定性。预制装配式剪力墙结构是实现住宅产业化的有效途径之一。19世纪末,欧洲首次提出预制混凝土墙板结构,并已在一些项目中应用。但早期预制墙板结构主要用于非结构构件[6]。日本的预制装配式大板结构始于20世纪60年代,其中3~5层的中层建筑占主导地位,而高层建筑采用高强度钢或钢筋混凝土框架组合结构[7]。目前,美国、日本、新西兰等国家已颁布相关的预制装配式混凝土结构技术法规。其中,很多国家的预制装配式混凝土结构在建筑物中占很大比例,瑞典新建住宅的通用组件占80%,美国约占35%,欧洲约占35%~40%,日本则超过50%。

我国预制结构的发展起步较晚,这种结构最早出现在工业建筑、办公楼等生产建筑中。在20世纪

80 年代中后期, 其发展速度逐年递减, 直到进入 21 世纪后, 装配式结构才再次被人们重视, 人们逐渐意识到预制剪力墙结构住宅产业化的优势及其降低能耗, 减少资源消耗的作用。目前, 对预制装配式结构的研究越来越多, 这种结构在实际应用中也逐渐增多。预制剪力墙结构在实际中应用的越多, 就越要保证结构自身的安全性, 正因如此, 对预制剪力墙结构的性能分析显得尤为重要。

3. 国内外预制装配式剪力墙结构性能与理论研究

3.1. 抗剪性能研究

装配式结构的横向节点主要承受水平剪力, 传递纵向荷载[8] [9]。现阶段, 连接结构水平节点纵向钢筋的方法有很多, 包括套筒浆锚固连接和竖向钢筋箍连接。采用合理有效的竖向钢筋连接方法, 提高结构措施水平, 可大大提高水平节点的受力性能。在组合剪力墙结构中, 相邻墙板之间的竖向连接负责传递两墙板之间的剪力, 在墙受地震等荷载作用时具有一定的延性和变形能力。受冲击时, 接缝处会产生相对的竖向和横向变形。这些变形不仅会严重影响结构的内力分布, 而且会对结构能耗产生显著影响, 因此, 对结构进行抗剪性能分析研究是必不可少的环节[10] [11]。

Foerster 等人[12]增加了竖向受力钢筋与水平接缝处分布钢筋的连接, 改善了竖向受力钢筋与水平接缝处分布钢筋的连接形式, 并对新的水平接缝施加单调剪切荷载。结果表明, 水平接缝轴向压力和砂浆的开裂荷载是水平接缝开裂的重要因素, 不同类型水平接缝的开裂荷载取决于这两个因素。研究还发现角钢与分布筋的连接以及纵向受力筋的连接对提高水平接缝的抗剪性能也有重要影响。

Lanhui Guo [13]等对两种钢板剪力墙进行了试验研究, 研究了加劲肋对这种构件滞回性能的影响。试验结果表明, 该试件具有良好的延性和耗能能力。加筋试件的耗能能力大于无加筋试件。同时, 应用有限元分析模型对钢板剪力墙的受力性能进行了分析, 并与相应的试验结果进行了比较, 验证了分析结果的正确性。分析结果表明, 自由边具有明显的离面变形, 应用加强筋约束以满足设计要求。对于高厚比较小、跨高比较大的钢板剪力墙, 其耗能能力较好。最后提出了钢板剪力墙的骨架曲线, 用于计算钢板剪力墙的弹性刚度和承载力。

Andrzej Cholewicki [14]提出了计算两种非对角裂缝破坏和对角裂缝损伤接缝抗剪承载力的两种计算公式。在试验的基础上, 研究了剪切粘结面积、形状和配筋率对剪切性能的影响。同时, 与相关规范进行对比分析, 验证公式的合理性。Sami H. Rizkalla 等人[15]研究了剪切粘结对水平接缝剪切承载力的影响, 分析了剪切粘结的数量、角度和深度, 提出了剪切粘结在剪切过程中的合理受力模型, 总结出了剪切承载力计算公式。

2017 年, 张锡治和马健[16]在 1:2 的尺度试件上进行了单调剪切试验, 试件上有 8 个剪跨比为 0.54 的剪刀式剪力墙。结果表明, 轴压比对裂缝的发展模式有较大的影响。轴向压力较小的试件, 主要以齿槽接合面裂缝的展开为主; 而轴向压力较大的试件则出现了对角线裂缝。提高轴压比和设置暗柱可以提高齿形连接的抗剪承载力, 而齿槽长度对抗剪承载力的影响较小。

综上, 国内外大量相关的试验研究已颇有成果, 理论研究也有不少的成果, 研究人员通过各种改进方法与试验验证了剪力墙结构的抗剪性能, 但是由于装配式结构其连接节点的材料、工艺、构造的复杂性通常导致很多结论不能完全一致, 加之相关标准尚不完善, 因此, 今后在如何改善预制剪力墙结构并使得其结构的抗剪性能最好是我们要继续努力的一个方向。

3.2. 抗震性能研究

Arthi S [17]等对预制剪力墙 - 地下连续墙节点与整体节点在地震荷载作用下的受力性能进行了比较。整体连接采用 u 形钢筋连接剪力墙与楼板, 预制连接采用传力杆分两步进行。首先将预制剪力墙下板与预

制楼板的 u 形销杆通过纵向钢筋连接, 在预制楼板上方进行找平混凝土浇筑。其次, 剪力墙上板采用从剪力墙下板伸出的传力杆连接, 在传力杆和管道之间的空隙填充了非收缩灌浆, 试件在板端进行反复循环加载。分析结果表明, 预制构件的抗剪承载力主要来源于预制板的横隔板作用, 而预制构件的刚度主要来源于预制板的横隔板作用。剪力墙与楼板之间的预制销钉连接具有良好的延性、强度、刚度和耗能性能[18]。

Harry G. Harris [19]等人对全尺寸组合剪力墙结构墙体节点的轴压承载力进行了试验研究。结果表明, 接缝后水泥砂浆的强度对接缝强度有显著影响; 墙体的加固可以防止墙体端部出现裂缝, 提高节点的承载力。曹正刚[20]等编制了装配式钢板剪力墙组合框架的拟动力试验程序研究其抗震性能。试件是一个三层的单间隔框架, 由 Hsection 钢柱和组合梁组成, 由螺栓高度可调节的钢梁柱连接(BHA 连接)组装而成, 选用单梁连接的 SPSWs 作为抗侧力构件, 试件受到四次逐渐增加强度的地面运动。结果表明构件在地震作用下具有更好的延性。

Sung Gook Cho [21]等本文主要研究钢板混凝土剪力墙在侧向力作用下的受力性能。本文介绍了一种有效模拟 SC 剪力墙构件非线性行为的解析方法。首先回顾了以往研究中剪力墙试件的试验结果[22]。然后, 通过有限元模拟和结构分析, 对复合墙体模型的侧向荷载响应进行了预测, 并与试验结果进行了比较。更具体地说, 进行了非线性静力分析, 以评估剪力墙的抗震能力。通过分析得到了复合墙体的破坏模式、强度和刚度特性。有限元模型的初始刚度和位移结果与实验结果相吻合, 整体性能相似。在有限元模拟剪力墙时, 分析结果主要取决于界面接触(即混凝土与螺栓、钢筋与焊接螺栓之间的边界条件)。

孙建[23] [24]等为了研究新型预制剪力墙竖向节点抗震性能和荷载传递机理, 先后对两个试验墙进行了试验研究和理论分析。试验结果证实了新型节点的可行性以及墙体良好的抗震性能, 尽管需要采取一定的优化措施来提高延性。在此基础上, 从理论上研究了该结构的荷载传递机理在实验研究中。理论计算结果表明, 新型节点的荷载传递路径简洁明确。

Brian J. Smith 等[25] [26]通过无粘结预应力筋的竖向连接, 研究了预制混凝土剪力墙。试件中部采用预应力筋连接, 边缘设置钢筋。通过分析这种连接方法的受力特点, 提出了计算模型, 并计算出这种连接方法的受力和变形计算公式。通过试验研究了水平极限位移、耗能能力、剪切变形等指标。结果表明, 该连接方法具有良好的抗震性能。Brian J. Smith 等[27] [28]也研究了这种连接方式连接的裸眼剪力墙的抗震性能, 并取得了类似的结果。

2017 年, 钱家儒、韩文龙[29]对套筒灌浆钢筋预制剪力墙结构的地震行为进行了研究, 并在 3 层全尺寸模型上对不同强度地震作用下的子结构进行了拟动力试验。研究表明, 试件的破坏集中在窗下壁面和地震方向的连接梁上。窗下壁为剪切破坏, 节点梁主要由弯曲破坏引起。第一层墙体有轻微弯曲损伤; 在梁的连续纵向配筋试验过程中, 先后产生了墙体竖向配筋和节点梁箍筋, 实现了“强墙缝弱梁”和连续梁“强剪弱弯”的设计目标[30]; 不同强度的地震在作用下, 刚度降低到不同程度。若以层间位移角作为评价参数, 则结构破坏程度为完好、轻度破坏、中度破坏和倒塌; 双向叠合楼板的完整性与平面的“无配筋预制板”与“预制板配筋”的内部刚度较好, 且均能起到水平刚性挡板的作用; 采用两根 u 形钢筋代替普通箍筋的封闭箍的施工方案是可行的。

综上, 结构的抗震性能的好坏是判定结构稳定性的一个关键性因素[31] [32]。尤其是对于预制结构来说, 每一部分构件的安装组合成为一个整体, 这种特性就决定了它的整体性不如现浇混凝土, 所以对结构抗震性能的研究显得格外重要。

从国内外装配式剪力墙的研究成果来看, 装配式剪力墙面板节点与整体性能的关系越来越受到重视。合理的接缝设计和施工是预制剪力墙结构应用和推广的关键。考虑到新型装配式结构体系的出现和装配式结构抗震性能的不确定性, 装配式剪力墙结构的抗震性能仍是结构工程研究的热点问题。

4. 预制装配式剪力墙结构的可行性分析

4.1. 抗剪性能的可行性分析

如前一节所述, 众多国内外学者已经进行了许多研究。从对竖向受力钢筋与水平接缝的连接分析了水平接缝开裂的主要原因, 通过运用角钢及纵向受力筋提高了水平接缝的抗剪性能, 对钢板剪力墙进行试验研究, 验证了高厚比较小、跨高比较大的钢板剪力墙具有优良的性能, 研究了剪切粘结、剪切粘结面积、形状和配筋率对剪切性能的影响, 通过试验验证了轴压比与设置暗柱可提高抗剪承载力等一系列研究结果, 都验证了可通过外加钢筋或修改结构参数可提高结构的抗剪性能。

4.2. 抗震性能的可行性分析

从目前国内外研究现状分析来看, 大多数学者主要集中在预制剪力墙结构的节点和构件的抗震主要性能研究上, 从在预制剪力墙节点的轴承载力进行试验研究, 钢板剪力墙组合框架的试验, 套筒灌浆钢筋预制剪力墙结构进行了研究, 验证了在预制装配式结构方面节点处抗震性能的优越性, 而整体结构的抗震性能相对较少。近年来, 我国地震灾害的范围和严重程度都比较大。对于建筑, 特别是住宅建筑, 有必要对预制剪力墙的施工进行深入研究, 充分发挥其结构在抗震中的作用。

5. 结语

装配式混凝土结构具有机械化程度高、质量可靠、施工方便、节能环保等优点, 具有较为广阔的发展前景。预制混凝土剪力墙结构在我国虽然还处于起步阶段, 但在结构性能、生产效率、资源节约、环境保护等方面具有很大的优势。未来可以在装配式结构连接节点的施工质量、预制构件的运输方式和整体结构的抗震性能等方面进行深入的研究, 促进我国装配式建筑业的整体发展, 大力推进我国建筑业建筑的产业化和节能。

基金项目

河北省创新能力提升计划项目(19456102D)。

参考文献

- [1] 李彦苍, 刘筱玮. 基于蚁群算法的预制装配式混凝土框架结构可靠性分析[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 167-172.
- [2] 赵帅领. 预制钢筋混凝土剪力墙板水平接缝抗剪件连接构造研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [3] 张吉红. 预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J]. 建筑技术开发, 2020(15): 1-2.
- [4] 尹万云, 刘守城, 邵传林, 倪淑梅, 张悦洋, 张晋. 预制装配式剪力墙结构研究进展及其工程应用[J]. 工业建筑, 2015(增刊): 453-461.
- [5] 阎利, 吴庭鸿, 等. 预制装配式结构连接节点研究进展综述[J]. 建筑科学, 2020, 36(5): 126-132.
- [6] 岳啸. 装配式建筑结构设计中的剪力墙结构设计研究[J]. 建筑技术开发, 2020(17): 16-18.
- [7] 赵倩. 国内外装配式建筑技术体系发展综述[J]. 广州建筑, 2018(4): 3-5.
- [8] 温述豹. 不同连接形式预制装配式剪力墙水平缝抗剪承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [9] 赵庆. 预制剪力墙竖向接缝抗剪性能研究分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
- [10] 郑少波. 预制剪力墙接缝抗剪性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2015.
- [11] 赵庆, 郑少波, 谢剑. 预制剪力墙竖向接缝抗剪性能有限元分析[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 96-102.
- [12] Focrster, H., Rizkalla, S. and HcuvcI, J. (1989) Behavior and Design of Shear Connections for Load Bearing Wall Panels. *PCL Journal*, 34, 102-119. <https://doi.org/10.15554/pcij.01011989.102.119>

- [13] Guo, L., Rong, Q., Ma, X. and Zhang, S. (2011) Behavior of Steel Plate Shear Wall Connected to Frame Beams Only. *International Journal of Steel Structures*, **11**, 467-479. <https://doi.org/10.1007/s13296-011-4006-7>
- [14] Loadbearing, C.A. (1971) Capacity and Deformability of Vertical Joints in Structural Walls of Large Panel Buildings. *Building Science*, **6**, 163-184. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(71\)90009-0](https://doi.org/10.1016/0007-3628(71)90009-0)
- [15] Rizkalla, S.H., Serrette, R.L. and Heuvel, J.S. (1989) Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels. *PCI Journal*, **34**, 104-120. <https://doi.org/10.15554/pcij.03011989.104.120>
- [16] 张锡治, 马健, 韩鹏, 等. 装配式剪力墙齿槽式连接受剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017(11): 93-100.
- [17] Arthi, S. and Jaya, K. (2020) Seismic Performance of Precast Shear Wall-Slab Connection under Cyclic Loading: Experimental Test vs. Numerical Analysis. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **19**, 739-757. <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0593-7>
- [18] 孙崇芳, 梁书亭, 朱筱俊, 郭正兴, 刘家彬, 李虎, 郭建民, 李罡, 吴东岳. 槽口-无黏结接缝与平界面接缝预制剪力墙抗震性能对比[J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 188-194.
- [19] Harris, G. and Iyengar, S. (1980) Full-Scale Tests on Horizontal Joints of Large Panel Precast Concrete Buildings. *PCI Journal*, **25**, 72-92. <https://doi.org/10.15554/pcij.03011980.72.92>
- [20] Cao, Z., Du, P., Fan, F. and Chen, Z. (2017) Pseudo-Dynamic Testing of a Fabricated Composite Frame with Steel Plate Shear Walls. *Journal of Zhejiang University—Science A*, **18**, 454-466. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1600022>
- [21] Cho, S.G., Park, W.-K., So, G.-H., Yi, S.-T. and Kim, D. (2014) Seismic Capacity Estimation of Steel Plate Concrete (SC) Shear Wall Specimens by Nonlinear Static Analyses. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **19**, 698-709. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1271-3>
- [22] 王爽, 殷大路. 预制装配式剪力墙抗震性能数学建模仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(6): 217-221.
- [23] Sun, J. and Qiu, H. (2015) Seismic Behavior and Mechanism Analysis of Innovative Precast Shear Wall Involving Vertical Joints. *Journal of Central South University*, **22**, 1536-1547. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2670-z>
- [24] 李潇然, 赵作周, 钱稼茹, 刘时伟, 何乐, 韩兴运. 竖向钢筋混合连接预制剪力墙抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(10): 1-9.
- [25] Smith, B.J. and Kurama, Y.C. (2009) Design of Hybrid Precast Concrete Walls for Seismic Regions. *ASCE 2009 Structures Congress*, Austin, Texas, 30 April-2 May 2009, 1673-1682. [https://doi.org/10.1061/41031\(341\)184](https://doi.org/10.1061/41031(341)184)
- [26] Smith, B.J. and Kurama, Y.C. (2010) Analytical Model Validation of a Hybrid Precast Concrete Wall for Seismic Regions. *Proceedings of the 2010 ASCE Structures Congress*, Orlando, Florida, 12-15 May 2010, 2914-2924. [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)263](https://doi.org/10.1061/41130(369)263)
- [27] Smith, B.J., Kurama, Y.C. and McGinnis, M.J. (2012) Comparison of Solid and Perforated Hybrid Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions. *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, **21**, 1529-1540. <https://doi.org/10.1061/9780784412367.136>
- [28] Smith, B.J., Kurama, Y.C. and McGinnis, M. (2012) Hybrid Precast Concrete Shear Walls for Seismic Regions: Solid and Perforated Walls. *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 6-8 March 2012, 1685-1695.
- [29] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J]. 建筑结构学报, 2017(3): 26-38.
- [30] 李万润, 向荣江, 杜永峰. 一种新型螺栓连接预制剪力墙抗震性能分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 78-86.
- [31] 黄远, 易展辉. 带耗能角钢无黏结预应力预制剪力墙抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(3): 74-82.
- [32] 种迅, 张蓝方, 万金亮, 王德才, 叶献国, 解琳琳, 邵徽斌. 两层带开洞预制剪力墙抗震性能试验研究与数值模拟分析[J]. 工程力学, 2019, 36(5): 176-183.