

装配式结构研究和应用回顾与前瞻

廖耿杰

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年7月27日; 录用日期: 2024年8月18日; 发布日期: 2024年8月29日

摘要

回顾了国内外在装配式结构领域的研究进展, 包括装配式结构抗震体系研究、装配式结构构件连接研究、消能减震和隔震技术在装配式结构中的应用研究等, 探讨了装配式结构在国内外的应用情况, 研究表明: 装配式结构是一种非常适合建筑工业化生产的绿色低碳的结构形式, 具有广阔的应用前景, 其在抗震体系和构件连接方面还有待更深入的研究, 消能减震和隔震技术、控制技术亦能够引入到装配式结构中来, 同时为了推广装配式结构的应用, 提出了加大政策扶持力度等建议。

关键词

装配式结构, 抗震性能, 连接, 隔震, 消能减震

Review and Prospect of Research and Application of Pre-Cast Structures

Gengjie Liao

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 27th, 2024; accepted: Aug. 18th, 2024; published: Aug. 29th, 2024

Abstract

This paper reviews domestic and foreign research progress in the field of pre-cast structure including pre-cast structure seismic resistance system research, pre-cast structure component connection research, application research of energy dissipation and seismic isolation technology in pre-cast structure, etc. and discusses application situation of pre-cast structure in domestic and foreign countries. It is indicated in the research that pre-cast structure is a structural style appropriate for making architectural industrialized production green and low-carbon, which has a broad prospect of application. Pre-cast structure needs to be further researched in the aspects of seismic resistance system and component connection. Energy dissipation and seismic isolation technolo-

gies and control technology can also be introduced into pre-cast structure. In the meantime, in order to promote application of pre-cast structure, suggestions are brought up, such as: to strengthen government's supporting measures, etc.

Keywords

Pre-Cast Structure, Anti-Seismic Performance, Connection, Vibration Isolation, Energy Dissipation and Shock Absorption

Copyright © 2024 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

装配式结构是一种非常适合建筑工业化生产的结构形式，其在国内外的的发展也走过了曲折的道路，随着发展循环经济和低碳社会的迫切需要以及研究理论和技术的不断成熟，装配式结构再一次回归到人们的视线[1]。本文回顾总结了国内外装配式结构发展以来的理论研究和应用进展，在此基础上对我国装配式结构的发展进行了展望，希望对我国装配式结构的进一步发展起到促进作用。

2. 装配式结构概述

2.1. 装配式结构的分类

装配式结构按其材料来分可主要分为装配式混凝土结构、钢结构和木结构。而装配式混凝土结构又主要分为装配式框架结构、装配式剪力墙结构和装配式框架—剪力墙结构；钢结构主要为多高层钢结构骨架 + 预制墙板，近年来还兴起了多层冷弯薄壁钢结构体系；木结构多为低层多层体系。从目前国外情况来看，以上体系均有所发展，目前国内应用较多的为钢结构体系，其次是冷弯薄壁钢结构体系，装配式混凝土结构体系也即将成为热点。

2.2. 装配式结构的特点

不同于传统的全现浇结构，装配式结构为工厂生产出构件然后运输到工地现场安装，因而具有以下特点：1) 适合建筑工业化生产。工业化生产机械化程度高、效率高，产品质量好。2) 施工工期短。减少了现浇结构支模、拆模和混凝土养护时间，施工速度大大加快，减少了对周边生活的影响。3) 低碳环保。在提倡节约型社会的今天，装配式结构现场垃圾少、对环境污染少，节能指标高。

3. 国内外对于装配式结构的研究

早期国内外建设的一些装配式混凝土结构在地震考验中表现出了一些薄弱环节，如 1999 年土耳其 Adapazari 地震中，装配式混凝土框架结构发生了构件连接失效和结构整体倒塌[2]；我国 1976 年唐山大地震中一些装配式框架结构预制梁在支座处拉脱倾覆[3]，而通过精心节点设计的四川绵竹、德阳等地的装配式混凝土框架结构则在 2008 年汶川地震影响中表现良好[4]；另外钢结构在汶川震害中的表现比较令人满意；中国古代木结构代表如山西应县木塔采用了消能减震式的榫卯连接，在经历多次地震影响后任巍然不动[5] [6]。从以上震害发现，装配式结构的主要薄弱点为装配式钢筋混凝土构件之间的连接问题，故国内外对于装配式结构的研究大多集中在结构抗震体系性能和对装配式钢筋混凝土构件连接的技术处理上。

3.1. 装配式结构抗震体系研究

装配式结构独特的构建方式使其在抗震能力方面具有一定的优势。相比传统的钢筋混凝土结构和钢结构，装配式结构在抗震方面表现出更好的性能，主要体现在以下几个方面。装配式结构采用模块化设计和安装，能够更加灵活地适应不同的抗震设计要求。装配式结构可以通过设计和调整构件的数量和位置，来增加结构的抗震性能。在地震频发的地区，可以根据具体情况增加结构的抗震支撑能力，以提高整体的抗震性能。而传统的建筑结构往往难以满足这种灵活性的设计要求，需要通过增加材料和改变结构形式等方式来增加抗震性能，成本和难度较大。

此外，装配式结构采用轻质材料和新型结构连接技术，能够减小结构的自重，降低地震荷载对结构的影响。装配式结构常采用钢结构、轻钢龙骨、轻质隔墙等轻质材料，不仅可以减小结构的自重，减少了地震荷载对结构的影响，还具有更好的变形能力和吸能性能，提高了结构的抗震性能。而传统的建筑结构多采用钢筋混凝土或钢结构，自重相对较大，地震荷载对结构的影响较大，抗震性能相对较低。

而目前国内外也对装配式结构的抗震性能展开了大量研究。加州大学圣地亚哥分校的 Charles Lee Powell 结构试验室进行了一个 5 层预制混凝土结构体系在强震作用下的抗震性能试验，模型设计按基于位移的抗震设计理论进行[7]。美国从上世纪八、九十年代开始，对预制后张预应力拼装混凝土框架进行了一系列研究，华盛顿大学的 John Stanton 等进行了混合配筋预制混凝土框架的整体性能试验[8]。同济大学的苏小卒等人进行了有粘结和无粘结预应力混凝土框架的反复荷载试验，共三个单层单跨框架试件，梁与柱均施加预应力[9]。长沙铁道学院的余志武等人对 5 榀无粘结部分预应力混凝土框架结构进行了低周水平反复荷载试验，探讨其延性、耗能及恢复力特性[10]。另外，中国建筑科学研究院对 5 层 1/2 缩尺 L 型大板剪力墙结构进行了振动台试验[11]，柳炳康等进行了预制拼装剪力墙试验，合肥工业大学对低周反复荷载下预压装配式 PC 框架延性性能和耗能能力进行了研究，还对叠合板式钢筋混凝土剪力墙试验研究[12]，这些试验研究在抗震性能、设计方法、连接构造、施工工艺等方面都取得了不错的成果。王晓东对式大板结构进行了抗震性能的分析研究[13]。孙巍巍了两种新型后张无粘结预应力装配式短肢剪力墙：直接装配式短肢墙、混合装配式短肢墙，对新型预应力装配式剪力墙的抗震能力及设计方法进行了较为系统的研究[14]。黑龙江宇辉集团与哈尔滨工业大学研发的装配式混凝土短肢剪力墙结构体系，已经获得多项国家知识产权和实用新型专利。万科在深圳建筑研究中心试验基地建立四层试验楼，承担着预制构件拼装试验、外墙试验、构件与墙连接试验等 80 余项检测项目[15]。

3.2. 装配式钢筋混凝土结构构件连接研究

装配式结构构件连接的研究还需考虑到连接件的设计。在设计中需要根据具体的结构荷载和使用环境，选择合适的连接件形式。同时还需要考虑连接件的材料和制造工艺，以保证连接件的可靠性和经济性。在实际应用中，由于连接件通常是在工厂中预制完成的，在设计时需要考虑工厂和施工现场的协同工作，以保证连接件能够顺利被安装到构件中。

3.2.1. 装配式结构构件连接方式的分类

1) 拼缝式连接

拼缝式连接是装配式结构中最常见的连接方式，其主要特点是通过构件之间的榫卯、榫槽等形式进行连接。在实际应用中，拼缝式连接通常用于墙板、地板等构件的连接，其连接强度高、稳定性好、适用范围广。同时，拼缝式连接也存在一些缺点，如施工难度大、成本高等问题。

2) 榫卯式连接

榫卯式连接是一种利用榫头和榫座互相套合的连接方式。这种连接方式适用于柱、梁等承重构件的

连接,其主要特点是连接牢固、安全可靠。但是,榫卯式连接也存在一些问题,如加工精度要求高、施工难度大等。

3) 螺栓连接

螺栓连接是一种利用螺栓将构件固定在一起的连接方式。这种连接方式适用于大型构件的连接,其主要特点是施工方便、连接牢固、适用范围广。但是,螺栓连接也存在一些问题,如螺栓锈蚀、松动等安全隐患。

4) 焊接连接

焊接连接是一种利用电弧焊、气焊等方法将构件焊接在一起的连接方式。这种连接方式适用于钢结构、混凝土结构等不同材料的连接,其主要特点是连接牢固、强度高。但是,焊接连接也存在一些问题,如焊缝质量难以保证、施工难度大等。

5) 粘接连接

粘接连接是一种利用黏合剂将构件粘合在一起的连接方式。这种连接方式适用于特殊材料、特殊构件的连接,其主要特点是连接牢固、适用性广。但是,粘接连接也存在一些问题,如耐久性差、环境适应性差等。

3.2.2. 装配式结构构件连接的性能试验

除了连接方式和连接件的设计外,装配式结构构件连接的研究还需考虑到连接的稳定性和可靠性。在装配式结构中,由于构件的加工和连接在不同的环节进行,需要保证连接的稳定性,特别是在连接处的受力情况需要得到合理的设计和分析。此外,装配式结构的连接需要考虑到施工现场的环境对连接的影响,例如温度、湿度、土壤条件等都会对连接的稳定性造成影响。在装配式结构构件连接的研究中,还需要将先进的成品房和智能化制造技术引入到连接件的设计和制造中。这对于提高连接件的质量和稳定性具有重要意义。同时,结合信息化技术和建筑模拟技术,可以对连接件在不同受力情况下的性能进行模拟和测试,以保证连接件的稳定性和可靠性。

为了验证不同连接方式的可行性和稳定性,国内外学者进行了大量的性能试验。这些试验主要包括拉伸试验、剪切试验、扭转试验、疲劳试验等,旨在评估构件连接的强度、刚度、变形性能等指标。日本建筑协会(AIJ)主要对后张有粘结预应力预制框架结构进行了试验和理论研究,设计了一系列框架节点试件,包括一些有粘结预应力钢筋混凝土框架的中节点、边节点和一个用于对比的无粘结预应力节点[16][17]。欧洲的研究者主要针对全装配式节点的梁柱连接刚度进行了大量的试验研究,建立了考虑材料本构关系、连接方式等参数的半刚性框架计算机分析程序[18]。Cheung, Angus K. F 等对与预制混凝土板的连接的自密实进行了研究[19]。中国建筑科学研究院与万科企业股份有限公司合作,对预制框架结构的套筒浆锚连接技术、梁端摩擦剪机理、预制拼接叠合梁、预制拼装柱、预制拼装梁柱节点、预制叠合板进行了比较系统的试验研究[11]。范力等对2个采用橡胶垫螺栓连接梁柱节点的单层两跨的装配式预制混凝土框架结构进行拟动力试验,考察结构的破坏模式,研究结构的强度、刚度、滞回、耗能等抗震性能[20]。黄祥海对实际工程中预制装配式框架采用不同连接方式的性能进行了分析,对比了各种干式连接的优点和不足,改进了几种干式连接构造,并提出了新型全预制装配式混凝土框架节点的设想[21]。董挺峰对全预应力连接和混合连接的框架内节点两种连接形式分别进行了试验研究与理论分析[22]。柳炳康等对装配式大板结构连接处的竖缝在反复荷载作用下的抗震性能进行了研究,以便使装配式结构成为一种完善的抗震体系[23][24]。丁阳等对2个不同形式的足尺装配式钢筋混凝土框架节点试件进行了低周反复荷载的试验研究[25]。郭正兴等为研究预制装配式混凝土框架柱脚预应力节点在工业建筑中的可实现性,通过对两个柱脚施加预应力的节点足尺模型在水平低周反复荷载下的试验,分析了柱脚节点的承载能力、破坏

形态、耗能能力等抗震性能，以及实际施工工艺流程[26]-[28]。

3.3. 消能减震和隔震技术在装配式结构中的研究

除了传统的抗震方法在装配式结构中的研究，消能减震和隔震技术思想也可以引用入到装配式结构的抗震研究当中来[29]-[31]。Morgen 针对无粘结预应力框架节点耗能较差的特点，提出了在框架节点安装钢摩擦阻尼器的改进方案[32]。彭凌云、周锡元提出了分布阻尼的概念[33]，即在结构构件如梁、柱中配置低屈服点钢材，使阻尼分布到结构的各处而不是集中在局部，通过合理设计，使得这些钢材在结构发生预期变形时(比如中震时)屈服耗能，我们可以根据这一思想对装配式结构构件连接处设置耗能装置，使结构阻尼分散到结构当中。周云提出了耗能减震器应具有多道耗能减震防线(或多级耗能元件)的思想[34]，根据这一思想，我们可以在装配式结构中研究设置具有多道耗能减震防线的装置。翁大根采用了粘滞阻尼器对上海一多层装配式混凝土框架结构进行了加固，增强了结构的抗震性能，取得了良好的实用和经济效果[35]。周福霖等对一高层装配式层间隔震结构进行了动力弹塑性分析[36]。张文芳等针对一种装配式钢筋混凝土盒式结构房屋，研究了其在各层之间均设置摩擦隔震部件时的地震反应分析模型和理论[37]。

3.4. 装配式结构的其他研究

各科研单位、高校还对装配式结构的其他性能如外墙保温、水密性、防火、施工技术等进行了广泛研究。余立永、肖岩等通过对一实体装配式竹结构房屋进行了防火试验研究，同时对一轻钢活动房做了火灾对比试验，试验中对房屋的墙体的内外温差进行了测量，用以分析墙体的保温性能[38]。张学林等对纤维强化水泥外墙板进行了水密性能内部研发实验，探讨了住宅外墙板系统的水密性性能[39]。周全等结合上海万科“中林”项目的调研工作，对 PC 结构预制构件的工业化生产、运输堆场、现场安装以及现浇结构模板工程进行了研究，就 PC 外墙模与大模板的连接提出了施工逆序法、混凝土墩法、混凝土条法、侧面固定法和上端固定法等方法[40]。

4. 国内外对于装配式结构的应用

4.1. 装配式结构在国外的应用

装配式结构的发展起源于二战以后，走在研究和应用前列的是北美、西欧、日本、新西兰。在美国，Ben C. Gerwick 在 1991 年 PCI 年会上把预制混凝土结构的发展视为美国乃至全球建筑业发展的新契机。西欧也在装配式结构体系上稳步发展，涌现了一批技术先进的企业。地处大地震带上的新西兰也在装配式预应力混凝土结构上有广泛应用并取得良好效果。同样处于大地震带上的日本则在装配式结构体系上发展较快，大成建设、前田建设、鹿岛建设、日本建筑研究所等都在装配式结构研究和应用上有所突破，如目前大成建设刚刚建成的 58 层的预制装配式混凝土结构不但成功在高烈度地区建成了超高层建筑，还应用了隔震和消能减震等先进技术，在装配式结构发展过程中迈出了重要一步。

4.2. 装配式结构在国内的应用

我国装配式结构的发展始于 20 世纪 50 年代，在 70~80 年代达到应用的小高峰期，当时的应用主要是预制混凝土厂房、砖混中采用预制板及多层预制混凝土大板结构，后来还开发了预制装配式框架体系、升板体系、南斯拉夫体系等[41]，这些装配式结构在非抗震区发挥了重要作用，但是随着当时装配式结构建筑功能的问题凸显，接头处理不善导致漏水等问题及我国唐山大地震中装配式结构的不佳表现，到了 90 年代，人们逐渐放弃了对装配式结构的使用。近年来，随着装配式结构优点的凸显及相关技术的研究

发展,装配式结构再次引起了人们的重视,尤其是近三年来,在以万科为首的房地产公司的推动下,东部沿海地区涌现了一批装配式结构代表,如北京万科假日风景某工程为15层装配式剪力墙结构,采用了保温复合外墙、楼梯、复合楼板、飘窗、阳台等预制构件,并将采用太阳能热水系统和全装修方案。上海二建和上海万科联手打造了上海浦东万科“新里程”预制装配式住宅楼,他们还创办了“预制装配式住宅产业化培训中心”,将为住宅产业化参与人员全面提供施工专业业务和操作技能。江苏南通海门中南世纪城采用NPC技术,包括电梯井在内的所有构件均为工厂制作。万科在宁波金色水岸、金域华府、慈城新区湖西地块进行了装配式混凝土结构的产业化推广。除此之外,万科还在东莞建立了国家住宅产业化基地。黑龙江宇辉集团开发建设的洛克小镇楼盘,地上18层,全部采用预制装配整体式混凝土剪力墙结构技术。在开发装配式住宅结构体系方面,莱芜钢铁建设公司、马鞍山钢铁建设公司等进行了积极的理论研究和工程实践。另外,我国在装配式住宅集成技术和集成系统方面也有所发展,形成了以海尔家居集成系统、远大集成住宅系统等为代表的我国装配式住宅集成技术和集成系统[40],“装配式装修”的概念正向人们走来[41]-[45]。

5. 装配式结构研究和应用展望

通过以上对国内外装配式结构研究和应用的探讨,再结合目前的有关文献[46]-[49]。从技术和政策方面,提出几点展望和建议:

1) 在技术研究方面,继续加大对新型抗震体系的整体破坏机制、承载能力、刚度退化、变形恢复能力等抗震性能的研究以及节点连接的深入研究[37];重视新材料在装配式结构中的应用,包括新型保温、节能墙板等研究;将消能减震思想引入到装配式结构当中,包括耗能装置的抗震性能分析,合理设置耗能装置的研究,新型耗能装置的开发等,同时对装配式结构的研究反过来能为消能减震的发展提供背景和平台。

2) 之前由于体制、标准的缺失,装配式结构在国内的发展遇到了很多阻力,一些地方如上海、山东、江苏、安徽、深圳等都纷纷出台了相关的技术、经济政策,如江苏省2005年修编完成了《预应力混凝土装配式框架结构技术规程》,对推动当地的装配式结构发展起到了重要作用;而国家建筑工业行业标准《装配式混凝土结构技术规程》2011年已经面世,这对装配式结构的发展来说无疑是一个利好消息,我们期待着国家标准的出台并期望有更多相应配套的标准和技术措施问世。

3) 受国情的影响,装配式结构目前在我国还处于初步摸索阶段,政府的政策扶持,将有利于产业化发展。国家应继续建立住宅产业化基地,提高住宅标准化、工业化水平,培育能力强的龙头企业发挥示范、辐射作用,鼓励房地产开发企业与生产、科研部门、高校组成联合体,形成“产、学、研”结合的体系,不断推进装配式体系的发展。

6. 结语

随着装配式结构的理念和世界各国专家、学者对装配式结构研究和应用的深入,使得装配式结构有了广阔的发展前景,装配式结构必将在推动人类建筑变革中起到重要作用。

参考文献

- [1] Hong, W., Park, S., Jeong, S., Lim, G. and Kim, J. (2011) Evaluation of the Energy Efficiencies of Pre-Cast Composite Columns. *Indoor and Built Environment*, **21**, 176-183. <https://doi.org/10.1177/1420326x11420126>
- [2] Arslan, M.H., Korkmaz, H.H. and Gulay, F.G. (2006) Damage and Failure Pattern of Prefabricated Structures after Major Earthquakes in Turkey and Shortfalls of the Turkish Earthquake Code. *Engineering Failure Analysis*, **13**, 537-557. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.02.006>

- [3] 刘恢先, 主编. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [4] 张瀑, 鲁兆红, 淡浩. 汶川地震中预制装配整体结构的震害调查分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(3): 129-133.
- [5] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组, 等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
- [6] 邸小坛. 绵阳市城区建筑震害调查与鉴定原则[C]//中国土木工程学会, 中国建筑学会. 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 344-351.
- [7] Johal, S. and Nasser, G.D. (1999) Successful Testing of PROGRESS Five Story Pre-Cast Building Lead to Innovative Seismic Solutions. *PCI Journal*, **44**, 120-123. <https://doi.org/10.15554/pci.11011999.42.67>
- [8] Stanton, J., Stone, W.C. and Cheok, G.S. (1997) A Hybrid Reinforced Precast Frame for Seismic Regions. *PCI Journal*, **42**, 20-23. <https://doi.org/10.15554/pci.03011997.20.23>
- [9] 苏小卒, 朱伯龙. 预应力混凝土框架的反复荷载试验及有限元全过程滞回分析[J]. 同济大学学报, 1987, 15(1): 35-46.
- [10] 余志武, 罗小勇. 水平低周反复荷载作用下无粘结部分预应力混凝土框架的抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 30-36.
- [11] 黄小坤, 田春雨. 预制装配式混凝土结构研究[J]. 住宅产业, 2010(9): 28-32.
- [12] 柳炳康, 田井锋, 张瑜中, 等. 低周反复荷载下预压装配式PC框架延性性能和耗能能力[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 74-81.
- [13] 王晓东. 装配式大板结构的抗震性能分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.
- [14] 孙巍巍. 后张无粘结预应力装配式短肢剪力墙抗震能力及设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2007.
- [15] 封浩. 工业化住宅技术体系研究——基于“万科”装配式住宅设计[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2009.
- [16] Kiyoshi, N. (2001) Damage Controlled Seismic Design by Precast Prestressed. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan.
- [17] Kato, H. and Ichisawa, Y. (2002) Experimental Study on Seismic Performance of Pre-Cast Pre-Stressed Concrete Building. *Proceedings of the First FIB Congress*, Osaka, 13-19 October 2002.
- [18] COST CI. (1999) Control of the Semi-Rigid Behavior of Civil Engineering Structural Connections. Final Report. European Commission EUR 19244.
- [19] Cheung, A.K.F. and Leung, C.K.Y. (2011) Effective Joining of Pre-Cast Concrete Slabs with Self-Compacting HSFRC. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **9**, 41-49. <https://doi.org/10.3151/jact.9.41>
- [20] 范力, 吕西林, 赵斌, 张继承. 装配式预制混凝土框架结构拟动力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 1-9.
- [21] 黄祥海. 新型全预制装配式混凝土框架节点的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [22] 董挺峰, 李振宝, 崔邯龙, 等. 低周反复荷载下装配式框架连接的性能[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(1): 27-30.
- [23] 宋国华. 装配式钢筋混凝土结构铅直接合部抗震性能研究及非线性分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 1999.
- [24] 柳炳康, 张瑜中, 晋哲锋, 等. 预压装配式预应力混凝土框架接合部抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 64-69.
- [25] 丁阳, 张雪松, 李忠献, 等. 装配式钢骨混凝土框架中节点的抗震性能试验[C]//中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十次年会论文集. 2005: 325-329.
- [26] 丁里宁, 郭正兴, 梁培新, 等. 预制装配式框架预应力柱脚节点抗震性能试验研究[C]//第二届结构工程新进展国际论坛论文集. 2008: 172-179.
- [27] 陈申一. 新型预应力装配整体式混凝土框架设计与施工研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2007.
- [28] 林宗凡. 国外装配式混凝土结构中的摩擦耗能技术综述[J]. 建筑科学, 1994(3): 77-80.
- [29] Castiglioni, C.A., Kanyilmaz, A. and Calado, L. (2012) Experimental Analysis of Seismic Resistant Composite Steel Frames with Dissipative Devices. *Journal of Constructional Steel Research*, **76**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.027>
- [30] Andriono, T. (1989) Seismic Resistant Design of Base Isolated Multistorey Structures. Ph.D. Thesis, University of

Canterbury.

- [31] Cancellara, D. and De Angelis, F. (2017) Assessment and Dynamic Nonlinear Analysis of Different Base Isolation Systems for a Multi-Storey RC Building Irregular in Plan. *Computers & Structures*, **180**, 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.02.012>
- [32] Morgen, B.G. and Kurama, Y.C. (2004) A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames. *PCI Journal*, **49**, 112-133. <https://doi.org/10.15554/pcij.07012004.112.133>
- [33] 彭凌云, 周锡元, 闫维明. 建筑结构的分布式阻尼减震方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(z1): 45-48.
- [34] 周云, 邓雪松, 吴从晓. 高层建筑耗能减震新体系概念与实现[J]. 工程抗震与加固改造, 2007(6): 1-9.
- [35] 翁大根, 王姝, 任晓崧, 等. 消能减震加固措施在多层装配式框架中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2007(S1): 31-35, 66.
- [36] 卫杰彬, 谭平, 匡珍, 等. 高层装配式层间隔震结构的抗震性能及破坏失效模式研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S1): 171-176.
- [37] 张文芳. 盒式房屋层间摩擦隔震体系地震反应的研究[J]. 山西建筑, 2002, 28(3): 1-3.
- [38] 余立永. 装配式现代竹结构房屋设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [39] 张学林, 张忠伟, 陈连禄. 集成工业化住宅外墙板系统水密性能实验[J]. 墙材革新与建筑节能, 2009(7): 37-39.
- [40] 周全. PC结构住宅工业化模板体系研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2009.
- [41] 薛伟辰, 王东方. 预制混凝土板、墙体系发展现状[J]. 工业建筑, 2002, 32(12): 57-60.
- [42] 刘名瑞. 我国集成住宅技术情景发展初探[J]. 建筑学报, 2004(4): 73-74.
- [43] 李湘州. 21世纪建材、建筑业“大革命”装配式建筑[J]. 建材发展, 2003(4): 5-6.
- [44] Chen, Y., Galal, K. and Athienitis, A.K. (2010) Modeling, Design and Thermal Performance of a BIPV/T System Thermally Coupled with a Ventilated Concrete Slab in a Low Energy Solar House: Part 2, Ventilated Concrete Slab. *Solar Energy*, **84**, 1908-1919. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.012>
- [45] Golić, K., Kosorić, V. and Furundžić, A.K. (2011) General Model of Solar Water Heating System Integration in Residential Building Refurbishment—Potential Energy Savings and Environmental Impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1533-1544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.052>
- [46] Wang, C. and Chan, T. (2023) Seismic Design and Parametric Study of Steel Modular Frames with Distributed Seismic Resistance. *Thin-Walled Structures*, **182**, Article 110325. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110325>
- [47] Palermo, A., Pampanin, S. and Buchanan, A.H. (2006) Experimental Investigations on LVL Seismic Resistant Wall and Frame Subassemblies. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES)*, Geneva, 3-8 September 2006, 983.
- [48] Xiang, Y., Wei, Y., Wang, Y. and Meng, K. (2019) Seismic Resistance Performance of Shear Wall Structure of Assembled Coastal Buildings. *Journal of Coastal Research*, **83**, 267-271. <https://doi.org/10.2112/si83-043.1>
- [49] Lv, X., Yu, Z. and Shan, Z. (2021) Seismic Behaviour of Frame Structures with Assembly of Prefabricated Concrete Beam. *Journal of Building Engineering*, **40**, Article 102765. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102765>