

预制混凝土框架结构体系研究进展

薛伟辰, 胡翔

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 按节点核心区构造方案的不同, 预制混凝土框架结构总体上可分为现浇节点核心区预制混凝土框架结构和预制节点核心区预制混凝土框架结构两类。通过对国内外相关研究成果的系统调研, 总结了工程中常用预制混凝土框架结构的构件连接与节点核心区的构造特点、受力性能(“等同现浇”或“非等同现浇”)及设计原则。在此基础上, 介绍了目前国内外有关预制混凝土框架结构体系的技术标准, 并进一步展望了预制混凝土框架结构体系的研发工作。

关键词: 预制混凝土框架结构体系; 现浇节点核心区; 预制节点核心区; 受力性能; 技术标准

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

Research Progress on Precast Concrete Frame Structures

XUE Weichen, HU Xiang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the structural details of core regions, precast concrete frame structures are generally divided into two types, i. e. precast concrete frame structures with cast-in-place core regions and precast concrete frame structures with precast concrete core regions. Based on systematic investigations of relevant studies in China and abroad, the structural characteristics, mechanical behaviours and design methods of different types of precast concrete frame structures are summarized. On this basis, the domestic and foreign technical specifications of precast concrete frame structures are introduced, and the future research and development work is also prospected.

Key words: precast concrete frame structures; cast-in-place core region; precast core region; mechanical behaviours; technical specification

预制混凝土结构自 19 世纪末在欧洲兴起, 发展至今已有 140 多年的历史^[1]。在此过程中, 预制混凝土结构因其在建造品质、建造效率以及节省材料、减少能源消耗和人工、降低排放和污染等方面的优势, 在全世界范围内得到越来越广泛的应用^[2-3]。当前, 我国正在进行传统建筑行业的转型升级。大力发展装配式建筑, 特别是采用预制混凝土结构的装配式建筑, 对于传统建筑行业转型升级的实现具有重要的促进作用。

预制混凝土框架结构和预制混凝土剪力墙结构是目前预制混凝土结构中最主要的结构体系^[4]。其中, 预制混凝土框架结构室内空间布置灵活、建筑立面丰富, 在公共建筑、居住建筑和工业建筑中均有广泛的应用。

从预制混凝土框架结构的发展历史来看, 在早期, 梁、柱等预制构件的纵向钢筋一般采用搭接方式进行连接, 这使得通过现浇节点核心区或通过预制构件端部后浇混凝土进行预制梁、柱构件连接成为最普遍的构造方案^[5]。20 世纪 60 年代以来, 随着套筒连接、浆锚搭接和螺栓连接等钢筋连接方式的逐渐成熟, 采用预制节点核心区构造的预制混凝土框架结构在实际工程中得到越来越多的应用。此外, 随着后张预应力技术的成熟, 采用后张预应力连接的预制混凝土框架结构也逐步得到发展与应用。

综上所述, 根据节点核心区构造方案的不同, 预制混凝土框架结构体系总体上可分为现浇节点核心区预制混凝土框架结构体系和预制节点核心区预制混凝土框架结构体系两类。基于国内外已有的研究成果, 对预制混凝土框架结构体系的研究进展进行了总结, 并展望了预制混凝土框架结构体系的研究方向。

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2016YFC0701400); 国家自然科学基金(51878478, 51508400)

第一作者: 薛伟辰(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为预制混凝土结构、现代预应力结构和土木工程 FRP 应用。E-mail: xuewc@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

1 现浇节点核心区预制混凝土框架结构体系

节点核心区是连接预制混凝土梁、柱的重要部位。预制混凝土梁、柱在现场吊装就位后,通过现浇节点核心区实现可靠连接,从而保证预制混凝土框架结构体系具有良好的整体性。此类预制混凝土框架结构体系一般采用叠合楼板,并通过合理的预制混凝土底板连接构造和后浇混凝土叠合层厚度来实现刚性楼板构造,从而进一步增强结构的整体性。目前,采用现浇节点核心区的预制混凝土框架结构主要包括现浇柱-叠合梁框架结构、预制柱-叠合梁框架结构、预制异形柱-叠合梁框架结构、预制型钢混凝土框架结构和预制预应力混凝土框架结构等。

1.1 现浇柱-叠合梁框架结构

现浇柱-叠合梁框架结构是早期的预制混凝土框架结构型式之一,主要构造特点是框架梁采用叠合梁,叠合梁的预制部分在现场吊装就位,纵向钢筋在节点核心区搭接或焊接连接,并通过现浇框架柱和节点核心区形成整体^[6]。现浇柱-叠合梁框架结构的安装精度要求较低,但现场湿作业量较大,需大量模板和支撑,预制梁纵筋在节点核心区搭接连接时易发生碰撞,降低安装效率。

1986年, Park等^[7]通过三个梁柱边节点足尺模型的低周反复荷载试验(轴压比为0.10,梁端加载模式),对现浇柱-叠合梁框架结构的抗震性能进行了研究。试验模型中,叠合梁的预制部分采用了U形截面构造。结果表明,此类预制混凝土框架结构梁柱节点具有良好的抗震性能,满足“强柱弱梁”和“强节点弱构件”的设计要求,承载力达到设计值的1.12~1.33倍,延性系数达到6.0左右。2008年,薛伟辰等通过梁柱节点足尺模型试验(中节点和边节点轴压比分别为0.40和0.30)^[8-10]和二层二跨(中柱和边柱轴压比分别为0.40和0.30)以及六层二跨框架结构大尺度模型试验^[6,9,11]对现浇柱-叠合梁框架结构的抗震性能进行了较为系统的研究。该研究中,叠合梁为T形截面构造,考虑了叠合楼板的影响,叠合梁的预制部分则采用了倒T形截面构造,便于预制楼板搁置。结果表明,此类预制混凝土框架结构的破坏形态、破坏机制、承载力、延性、耗能能力和刚度退化规律等均与现浇框架结构基本一致,中节点和边节点的延性系数分别达到5.7和4.2,二层二跨和六层二跨框架结构的延性系数分别达到4.7

和4.6。图1为典型现浇柱-叠合梁框架节点骨架曲线^[10]与框架结构滞回曲线^[6]。2015年,黄远等^[12]完成了二榀二层二跨现浇柱-叠合梁框架结构1/2相似比模型的低周反复荷载试验(中柱和边柱轴压比分别为0.14和0.10)。叠合梁也采用了考虑叠合楼板影响的T形截面构造,叠合梁的预制部分则采用了矩形截面构造。结果表明,此类预制混凝土框架结构的滞回曲线饱满,耗能能力较好,延性系数达到3.3左右,极限位移角达到1/30。

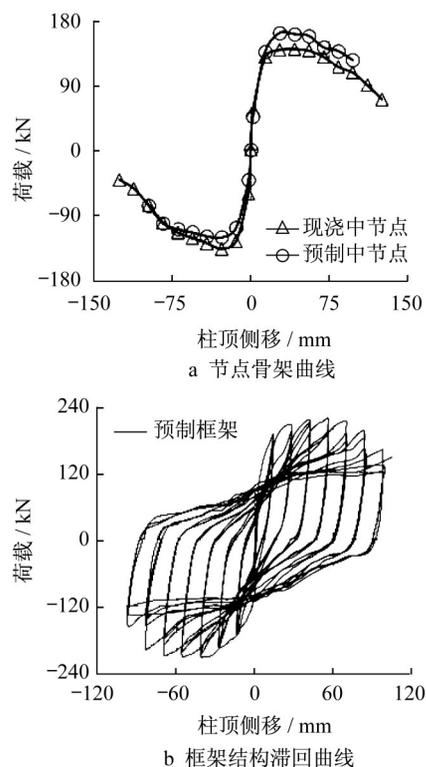


图1 典型现浇柱-叠合梁框架节点骨架曲线与框架结构滞回曲线

Fig. 1 Typical envelope curves of connections and hysteresis loops of frame structures with CIP columns and composite beams

1.2 预制柱-叠合梁框架结构

为了进一步提高上述预制混凝土框架结构的工业化程度和施工效率,有必要采用预制柱^[1]。目前,在工程中应用的预制柱包括单层预制柱和多层预制柱两种型式。其中,多层预制柱一般跨越2~4层,中间节点处预留缺口后浇混凝土但钢筋连续,相邻多层预制柱之间则采用与单层预制柱相同的连接构造。从系统查阅的文献资料和工程应用情况来看,目前在此类预制混凝土框架结构中预制柱的纵向钢筋连接构造主要包括套筒连接和螺栓连接两种。

1.2.1 单层预制柱

(1) 套筒连接

套筒连接是目前预制混凝土结构中最常用的钢筋连接技术,但其对预制构件的安装精度要求较高。套筒连接主要包括灌浆套筒连接和机械套筒连接两类。灌浆套筒连接对技术要求较高,连接质量也不易检测;机械套筒连接则需预留较大的操作空间,并需后浇混凝土,增大了预制柱吊装就位的难度。对于单层预制柱纵向钢筋采用灌浆套筒连接的预制混凝土框架结构,陈适才等^[13]、柳旭东等^[14]完成了一系列框架梁柱节点足尺模型的低周反复荷载试验(轴压比为0.35~0.40,均采用梁端加载模式),薛伟辰等^[15]完成了四个框架梁柱节点足尺模型(轴压比为0.30,采用柱端加载模式)和二榀二层二跨框架结构大尺度模型(中柱和边柱轴压比分别为0.30和0.20)的低周反复荷载试验。图2为典型预制柱-叠合梁框架结构的骨架曲线与滞回曲线^[15]。针对单层预制柱纵向钢筋采用机械套筒连接的预制混凝土框架结构,张微敬等^[16]开展了二榀二层二跨框架结构1/2缩尺模型(中柱和边柱轴压比分别为0.50和0.25)的低周反复荷载试验和有限元分析。预制柱纵向钢筋采用灌浆套筒连接和机械套筒连接均可有效保证此类预制混凝土框架结构良好的整体性;承载力、延性、变形能力、耗能能力和刚度退化规律等关键性能指标的对比分析表明,此类预制混凝土框架结构具有“等同现浇”的抗震性能。此外,袁鑫杰等^[17]完成了一系列预制混凝土框架的抗连续倒塌静力试验。结果表明,预制柱纵向钢筋采用灌浆套筒连接时能够承受连续倒塌大变形下的水平剪力,预制混凝土框架结构具有良好的抗倒塌性能。

随着高强混凝土和高强钢材的不断发展,两种高强材料在预制混凝土框架结构中的应用也越来越广泛的关注。2004年,赵斌等^[18]开展了四个采用高强混凝土和高强钢纤维混凝土(立方体抗压强度 f_{cu} 实测值为71~86 MPa)的预制柱-叠合梁框架节点足尺模型低周反复荷载试验(轴压比为0.15,采用柱端加载模式)。结果表明:此类预制混凝土框架节点的滞回曲线与现浇框架节点相似,均较饱满;预制混凝土框架节点的承载力比现浇节点高约0.5%~3.8%;高强混凝土预制混凝土框架节点的延性系数达到6.3,高强钢纤维混凝土预制混凝土框架节点的延性系数则达到6.6左右,均高于相应的现浇对比试件(6.21)。2016年,刘璐等^[19]开展了配置大直径大间距(柱纵筋4 Φ 32,梁下部纵筋2 Φ 32、

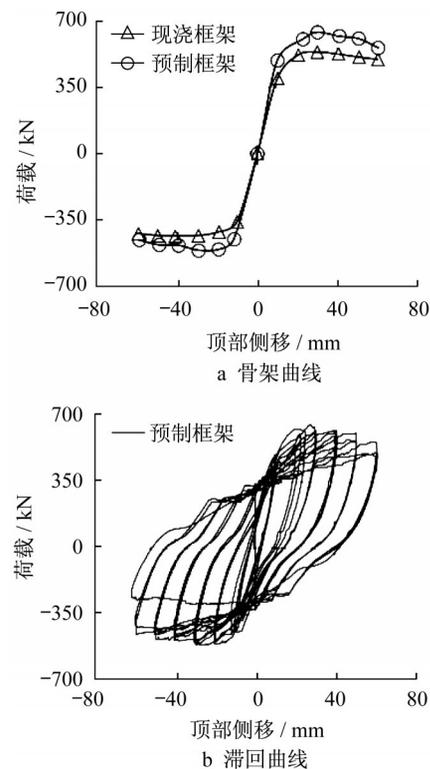


图2 典型预制柱-叠合梁框架结构骨架曲线与滞回曲线
Fig. 2 Typical envelope curves and hysteresis loops of frame structures with precast columns and composite beams

上部纵筋2 Φ 28)HRB500高强钢筋的预制混凝土框架梁柱节点足尺模型的低周反复荷载试验(轴压比为0.25,采用梁端加载模式)。结果表明:此类预制混凝土框架梁柱节点具有良好的抗震性能,位移延性系数为4.5~5.6,HRB500高强钢筋以及大直径和大间距配筋构造对节点性能无明显影响。2017年,薛伟辰^[20]等通过系统的梁柱节点足尺模型(轴压比为0.35,采用柱端加载模式)和二层二跨框架结构大尺度模型(中柱和边柱轴压比分别为0.30和0.20)的低周反复荷载试验,对采用C100高强混凝土(f_{cu} 实测值为114.5 MPa)和HRB500高强钢筋的预制混凝土框架结构的抗震性能进行了研究。结果表明:采用高强混凝土和高强钢筋对预制混凝土框架梁柱节点和框架结构的破坏形态与破坏机制影响较小,滞回曲线均较饱满;耗能能力和变形能力均较好;梁柱节点的延性系数为2.0~2.2,框架结构的延性系数为3.0~4.0;现行规范中有关C80混凝土结构两类极限状态的设计计算方法可用于C100混凝土预制混凝土框架结构的设计,但应注意适当加强柱脚的箍筋约束以改善柱脚塑性铰的转动能力。

(2) 螺栓连接

螺栓连接是指在上下层预制柱中分别预埋螺栓连接器和螺杆,并通过紧固螺帽实现预制柱可靠连接的构造方案^[21]。该连接构造施工效率高、质量易保证。薛伟辰等^[22-23]通过框架柱足尺模型(轴压比为0.48和0.24)、梁柱节点足尺模型(轴压比为0.48,采用柱端加载模式)和二层二跨框架结构1/2缩尺模型(中柱和边柱轴压比分别为0.36和0.24)的低周反复荷载试验,对采用此类连接构造预制混凝土框架结构的抗震性能进行了研究。结果表明:采用螺栓连接能够保证预制柱的连接强度和刚度;此类预制混凝土框架结构能够实现“强柱弱梁”的设计目标,具有与现浇框架相近的抗震性能;螺栓连接预制柱、梁柱节点和框架结构的承载力与相应的现浇试件相差不超过 $\pm 8\%$;螺栓连接预制柱的延性系数为3.8(轴压比为0.24)和3.1(轴压比为0.48),梁柱中节点和边节点的延性系数分别为3.2和2.7,框架结构的延性系数为4.4,与相应的现浇试件相差 $-6\% \sim 20\%$ 。图3为典型螺栓连接预制柱-叠合梁框架结构骨架曲线和滞回曲线^[23]。

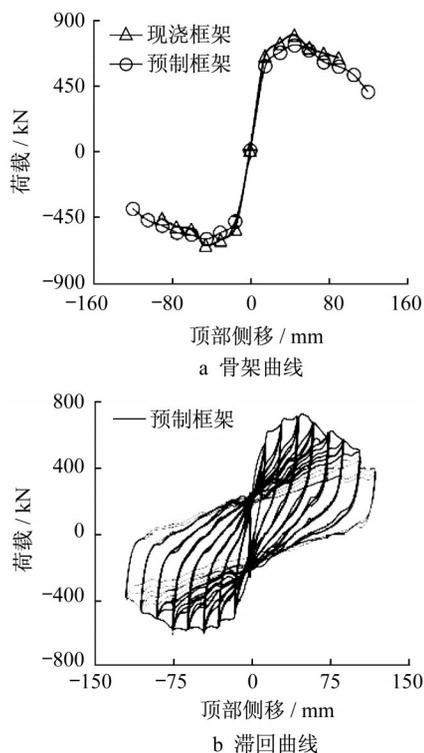


图3 典型螺栓连接预制柱-叠合梁框架结构骨架曲线与滞回曲线

Fig. 3 Typical envelope curves and hysteresis loops of frame structures with bolted connected precast columns and composite beams

1.2.2 多层预制柱

采用多层预制柱可大量减少框架柱纵向钢筋的连接数量,有助于提高预制混凝土框架结构的施工效率,降低建造成本。在美国、欧洲和新西兰等预制混凝土结构发展较为成熟的国家和地区,多层预制柱的应用十分普遍。Alcocer等^[24]、Ertas等^[25]、Im等^[26]、Eom等^[27]和Yuksel等^[28]通过梁柱节点足尺模型低周反复荷载试验(轴压比为0~0.10),对采用多层预制柱的预制混凝土框架结构的抗震性能进行了研究。结果表明:采用多层预制柱的梁柱节点整体性和抗震性能较好,具有与相应现浇节点相近的承载力(相差在 $\pm 8\%$ 以内)和延性(边节点2.5~3.7,中节点2.9~4.1),并具有良好的变形能力(极限位移角均能达到 $3.0\% \sim 3.5\%$)。

上述研究结果表明,套筒连接和螺栓连接均能保证预制柱良好的整体性,采用单层预制柱和多层预制柱的预制混凝土框架结构均具有“等同现浇”的抗震性能。与套筒连接构造相比,螺栓连接构造的施工速度更快、连接质量更易保证。相比单层预制柱方案,采用多层预制柱方案则有助于进一步提高预制混凝土框架结构的施工效率,降低建造成本。

1.3 预制异形柱-叠合梁框架结构

采用十字形、L形、T形和Z形等异形截面预制柱代替传统矩形截面预制柱,并采用与柱肢等宽的叠合梁,即形成预制异形柱-叠合梁框架结构。此类预制混凝土框架结构可有效避免室内梁柱凸起问题,从而显著改善室内空间利用率,在多层和小高层住宅以及宾馆等建筑中具有良好的应用前景。

针对这一预制混凝土框架结构,薛伟辰等^[29]通过梁柱节点足尺模型(轴压比为0.35,采用柱端加载模式)和框架结构大尺度模型(中柱和边柱轴压比分别为0.35和0.24)的低周反复荷载试验,对抗震性能进行了研究。预制异形柱纵向钢筋采用套筒灌浆连接,预制梁纵向钢筋在现浇节点核心区搭接连接。结果表明:预制异形柱-叠合梁框架节点和框架结构的总体抗震性能均与现浇对比试件相近,两者的滞回曲线均饱满;预制试件的承载力与相应的现浇对比试件相差 $-10\% \sim +5\%$;预制节点的延性系数约为2.7、预制混凝土框架的延性系数达到5.0,均高于相应的现浇试件(现浇节点约2.6,现浇框架3.3)。图4为典型预制异形柱-叠合梁框架结构的骨架曲线和滞回曲线^[29]。

1.4 预制型钢混凝土框架结构

预制型钢混凝土框架结构是由预制型钢混凝土

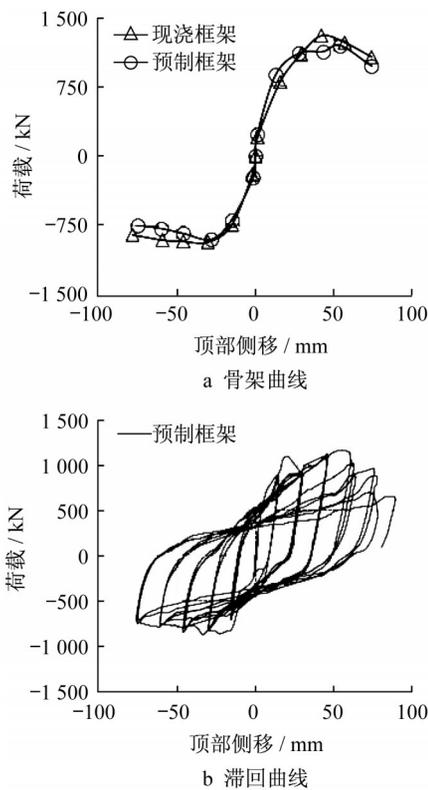


图4 典型预制异形柱-叠合梁框架结构骨架曲线和滞回曲线
Fig. 4 Typical envelope curves and hysteresis loops of frame structures with precast specially shaped columns and composite beams

梁、柱和现浇节点核心区组成。预制梁与预制柱之间以及相邻预制柱之间通过节点核心区现浇混凝土、型钢和纵向钢筋连接形成整体。图5a为典型的预制型钢混凝土框架节点构造。在该类框架中,通过螺栓连接预埋型钢实现各预制构件之间的快速拼装。现场施工时,该结构可不设或仅少量设置支撑,并可多层连续施工,从而大幅节省材料、缩短工期。

已完成的梁柱节点足尺模型的低周反复荷载试验结果表明^[30-32]:此类预制型钢混凝土框架梁柱节点具有良好的抗震性能,承载力、延性、变形能力、耗能能力和刚度退化规律等关键性能指标均与相应的现浇节点相近。在此基础上,薛伟辰等^[30]开展了二层二跨预制型钢混凝土框架结构1/3缩尺模型及其现浇对比试件(中柱和边柱轴压比分别为0.40和0.30)的低周反复荷载试验。结果表明:预制型钢混凝土框架发生了与现浇对比试件相似的混合铰破坏机制,两者的滞回曲线均较饱满,承载力和延性均较接近(预制混凝土框架承载力低约7%,预制混凝土框架延性系数为3.6,比现浇框架高约3%)。总体而言,此类预制型钢混凝土框架结构具有与现浇结

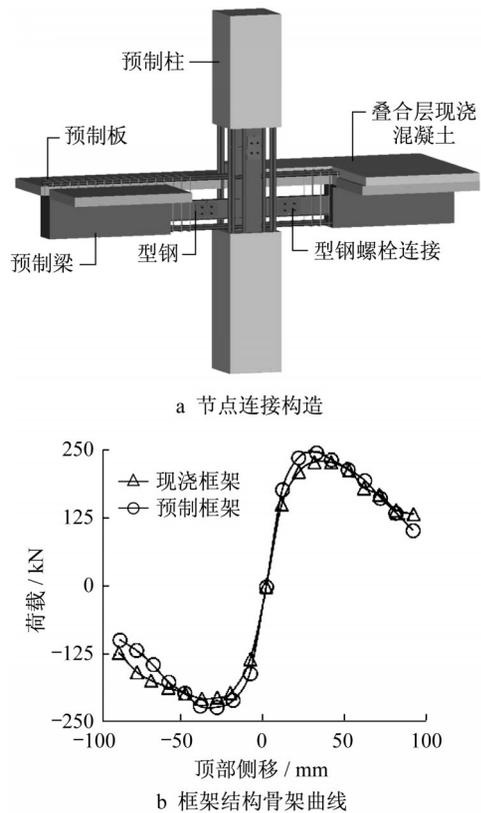


图5 典型预制型钢混凝土框架节点连接构造与框架结构骨架曲线
Fig. 5 Typical connection details and envelope curves of precast steel reinforced concrete frame structures

构“等同”的抗震性能。图5b为典型预制型钢混凝土框架结构骨架曲线^[30]。

1.5 预制预应力混凝土框架结构

预应力的施加有助于预制混凝土框架结构使用性能和整体性的改善,促进预制混凝土框架结构在大跨、重载结构中的应用。此外,在此类预制混凝土框架中应用的叠合楼板通常采用预应力底板(包括实心或空心平底板、带肋底板和双T板等)来增大楼板跨度,进一步提升室内大空间。目前,工程中主要应用的预制预应力框架结构仅在框架梁中施加预应力。按照预应力施工工艺的不同,预制预应力框架结构可分为先张预应力预制混凝土框架结构和后张预应力预制混凝土框架结构两类。

1.5.1 先张预应力预制混凝土框架结构

先张预应力预制混凝土框架结构的主要构造特点是仅在预制梁中设置了先张预应力筋,即仅采用先张预应力预制混凝土梁构件。法国世构(SCOPE)体系是一种典型的先张预应力预制混凝土框架结构体系。该结构体系的特点是通过先张预

应力减小预制梁的截面尺寸,改善预制梁的抗裂性能,从而减少了施工阶段预制梁的支撑数量。蔡建国等^[33-34]和于建兵等^[35-36]针对世构体系及改进方案开展了一系列梁柱节点和框架结构的低周反复荷载试验研究与有限元分析。结果表明:先张预应力预制混凝土框架可实现与相应的现浇框架类似的破坏机制与破坏形态;在承载力、延性和变形能力等方面,先张预应力预制混凝土框架均与相应的现浇框架接近;屈服之前先张预应力预制混凝土框架的耗能能力明显低于相应的现浇框架,但屈服后两者的总体耗能能力接近。

1.5.2 后张预应力预制混凝土框架结构

后张预应力预制混凝土框架结构与先张预应力预制混凝土框架结构最大的不同在于,后张预应力预制混凝土框架结构采用穿过节点核心区的后张预应力工艺,这使得此类框架结构具有更好的整体性和变形恢复能力。薛伟辰等^[37]和Hu等^[38]通过框架梁柱节点足尺模型(轴压比为0.40,采用柱端加载模式)和二层二跨框架结构1/3大尺度模型的低周反复荷载试验,对此类预制混凝土框架结构的抗震性能进行了研究。结果表明:后张预应力预制混凝土框架具有良好的整体性和抗震性能;后张预应力预制混凝土框架梁柱节点和框架结构的承载力比相应的现浇框架结构高约7.5%;后张预应力预制混凝土框架梁柱中节点和边节点的延性系数分别为3.4和2.6,框架结构的延性系数为4.1,与相应的现浇框架相差-5%~+12%;后张预应力预制混凝土框架的残余变形率不大于0.27,表现出良好的变形恢复能力。图6为典型后张预应力预制混凝土框架结构骨架曲线与滞回曲线^[37]。

总体上,采用现浇节点核心区构造的预制混凝土框架结构具有良好的整体性,其破坏形态与破坏机制均与相应的现浇框架结构基本一致,承载力、延性、变形能力、耗能能力和刚度退化规律等关键性能指标均与相应的现浇框架结构相近。此外,由于采用了符合刚性楼板假定的叠合楼板,因此此类预制混凝土框架结构具有“等同现浇”的抗震性能。

2 预制节点核心区预制混凝土框架结构体系

大量工程实践表明,预制混凝土框架结构的节点核心区内钢筋相互交错,碰撞问题突出,这导致预制梁、柱现场拼装时效率低下,同时也增加了节点核

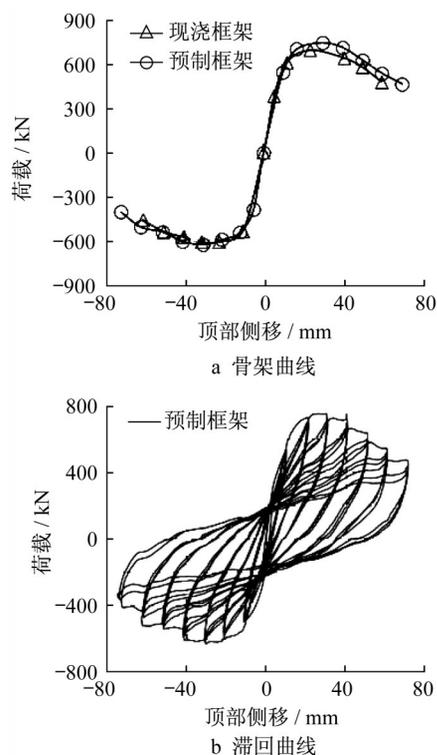


图6 典型后张预应力预制混凝土框架骨架曲线与滞回曲线
Fig. 6 Typical envelope curves and hysteresis loops of precast post-tensioned concrete frame structures

心区后浇混凝土的难度。因此,将节点核心区与柱(梁)构件一起在工厂预制,有助于简化预制混凝土框架结构的现场拼装与连接工序。在此类预制混凝土框架结构体系中,叠合楼板和无后浇混凝土叠合层的全预制混凝土楼板均有应用。在进行结构设计时,刚性楼板假定的适用性尚需根据楼板的构造方案分析确定。众所周知,框架梁、柱的连接构造是影响此类预制混凝土框架结构建造效率和抗震性能的关键环节。从查阅的文献资料和工程资料来看,目前此类预制混凝土框架结构中梁、柱的连接构造主要包括后浇整体式连接、螺栓连接、钢制暗牛腿连接、后张预应力连接和阻尼器连接等。

2.1 梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构

梁端后浇整体式连接是一种较为传统的连接构造。已有研究与工程中采用的梁端后浇整体式连接构造主要包括钢筋搭接、钢筋套筒连接、钢筋环扣连接和型钢连接等^[39]。

针对钢筋采用搭接构造的梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构,刘桐等^[40]完成了三个梁柱节点1/2缩尺模型的低周反复荷载试验(轴压比为0.10,采用梁端加载模式)。结果表明,此类梁端连

接构造能保证预制混凝土框架良好的整体性,可实现与现浇框架“等同”的抗震性能。

针对钢筋采用套筒连接构造(包括灌浆套筒和机械套筒)的梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构,罗青儿等^[41]、章一萍等^[42]和刘洪涛等^[43]先后完成了一系列梁柱节点大尺度模型的低周反复荷载试验(轴压比为0.20~0.40,均采用梁端加载模式)。灌浆套筒和机械套筒均实现了钢筋的等强连接,从而保证了此类预制混凝土框架具有与现浇框架相近的抗震性能,两者在承载力和延性等方面的差值在±7%以内。

针对钢筋采用环扣连接构造的梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构,Restrepo等^[44]和Khoo等^[45]完成了一批双柱式梁柱组合体的低周反复荷载试验。结果表明,钢筋采用环扣连接构造能保证预制混凝土框架梁柱组合体良好的整体性,承载力、延性、变形能力、耗能能力和刚度退化规律等关键性能指标均与现浇框架接近。图7为钢筋环扣连接构造的示意图和典型的梁柱组合体滞回曲线^[45]。

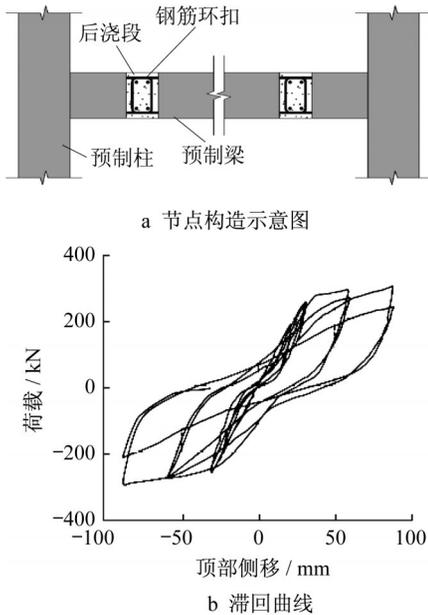


图7 典型钢筋环扣连接节点构造示意图与滞回曲线
Fig. 7 Typical details and hysteresis loops of beam-column connections with annular closed reinforcements

针对采用型钢连接构造的梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构,李忠献等^[46]、Sudhakar等^[47]和宋玉普等^[48]分别完成了一批梁柱节点大尺度模型的低周反复荷载试验(轴压比为0~0.20,均采用梁端加载模式)。需要说明的是,文献[46]和[48]中型钢

连接拼缝均设置在梁端距柱边约1倍梁高处,而文献[47]则直接设置在柱边。此外,文献[46]和[47]中的型钢采用螺栓连接,而文献[48]中的型钢则采用焊接连接。试验结果表明,采用此类连接构造预制混凝土框架均能实现预期的破坏模式,承载力和延性与相应的现浇型钢混凝土框架接近。

2.2 螺栓连接预制混凝土框架结构

螺栓连接构造是指在预制节点核心区和梁端分别预埋螺栓连接组件,并通过紧固螺帽将两者可靠连接的构造方案。与梁端后浇整体式连接的构造方案相比,螺栓连接构造简单、施工便捷、质量可控。已有研究中,螺栓连接构造总体而言有两种型式,一种是螺栓连接方向与梁跨度方向平行(见图8a),另一种是螺栓连接方向与梁跨度方向垂直(见图8b)。

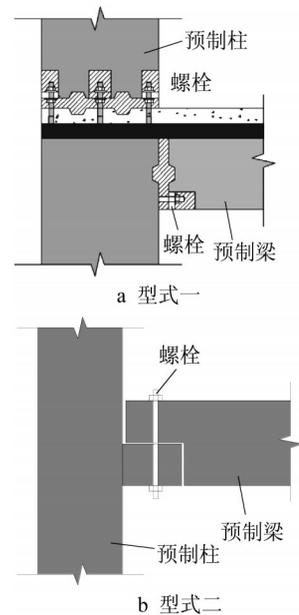


图8 两种典型螺栓连接构造示意图
Fig. 8 Details of two types of bolted connections

针对采用第一种型式的预制混凝土框架,在梁柱节点层次,国内外学者开展了一系列尺度模型的抗震性能试验研究^[23,49-53]。文献[23,49,51-53]的研究结果均表明,此类预制混凝土框架梁柱节点在承载力、延性、刚度和耗能能力等方面均与相应的现浇节点相近。在文献[50]中,由于梁端拼缝处设置了橡胶垫片,因此承载力虽然与现浇节点相近,但是刚度和耗能能力明显降低。在结构层次,文献[23]开展了二榀二层二跨框架结构1/2缩尺模型的低周反复荷载试验。结果表明,采用此类螺栓连接构造的预制混凝土框架结构也具有与相应的现浇框架结构“等同”的抗震性能。

针对采用第二种型式的预制混凝土框架, Barros等^[54]和吕西林等^[55]分别开展了连接节点受力性能试验和框架结构拟动力试验研究。结果表明:此类连接节点和框架结构表现出明显的与现浇框架不同的半刚性特性;设计时,采用此类螺栓连接构造的预制混凝土框架应按半刚性节点进行设计。

2.3 钢制暗牛腿连接预制混凝土框架结构

钢制暗牛腿连接构造是指在预制节点核心区 and 框架梁端分别预埋钢制承口组件和钢制插口组件,在施工现场拼装就位后采用超高性能混凝土(UHPC)灌注拼缝处形成的连接构造。图9a为此类连接构造的示意图,图中的钢制暗牛腿为某定型产品。采用该连接构造的预制混凝土框架结构安装效率高、几乎无需模板和支撑,但成本相对较高。

针对采用此类连接构造的预制混凝土框架结构,薛伟辰等^[23]开展了梁柱节点足尺模型(轴压比为0.48,采用柱端加载模式)和二层二跨框架结构1/2缩尺模型(中柱和边柱轴压比分别为0.36和0.24)的低周反复荷载试验。结果表明:预制混凝土框架的承载力比现浇框架略低,相差不超过8%;预制混凝土框架的初始刚度有所降低,低约20%;梁柱节点和框架结构的延性系数分别达到3.5和6.1,均好于相应的现浇框架(梁柱节点和框架结构的延性系数分别为2.8和3.6);框架结构的极限位移角达到3.6%,表现出良好的变形能力。图9b为典型钢制暗牛腿连接预制混凝土框架结构的骨架曲线^[23]。

2.4 后张预应力连接预制混凝土框架结构

后张预应力连接是指通过张拉设置在框架梁中并穿过预制节点核心区的后张预应力筋,使梁、柱等预制构件可靠连接的构造方案。目前,最典型的后张预应力连接预制混凝土框架结构体系包括PRESSS体系(PREcast seismic structure system)和预压装配式体系等。

1988年,美日联合开始了PRESSS体系的研发工作,主要目标是研发一种具有良好抗震性能和施工便利性的预制结构^[56]。经过十余年的发展,PRESSS体系的研发重点逐渐转向预制混凝土框架结构体系。在研发早期,PRESSS体系中预制梁、柱仅通过直线无黏结预应力筋进行连接^[57]。借鉴同期开展的、由美国标准技术研究所(NIST)资助的相关研究成果^[58-61],PRESSS体系最终形成了以“混合连接”为主要连接构造的后张预应力预制混凝土框架结构体系,

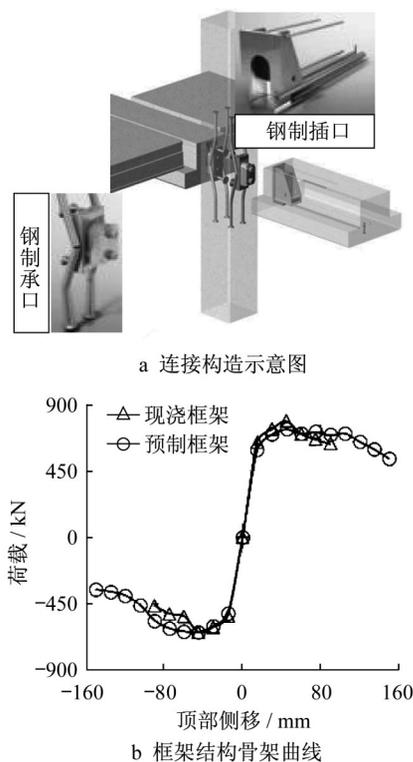


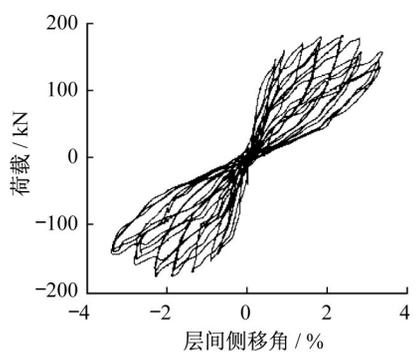
图9 典型钢制暗牛腿连接预制混凝土框架结构连接构造示意图和骨架曲线

Fig. 9 Typical connection details and envelope curves of precast concrete frame structures connected with hidden steel corbels

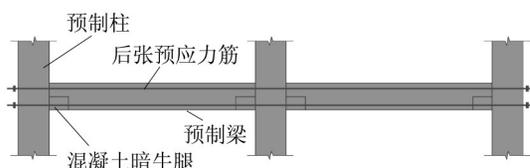
即预制梁、柱通过无黏结预应力筋和普通钢筋“混合连接”形成整体^[62]。一系列梁柱节点和框架结构抗震性能试验结果表明^[63-65],PRESSS体系具有良好的承载力、延性、变形能力和变形恢复能力,耗能仅为现浇框架的40%左右,表现出明显的半刚性特性。我国学者针对PRESSS体系及其改进方案也开展了梁柱节点抗震性能试验研究,并得到了相似的研究结论^[66-68]。图10a为典型PRESSS体系框架节点滞回曲线^[61]。

预压装配式框架结构体系是在PRESSS体系基础上发展而来的一种后张预应力连接预制混凝土框架结构体系,在日本和我国已开展了一系列研究与工程应用^[69]。这一体系的主要构造特点是预制梁、柱仅通过直线预应力筋进行连接^[70-71]。此外,根据需要,预制梁端可设置混凝土暗牛腿以改善接缝抗剪性能,预制梁可采用先张预应力预制梁以改善其使用性能^[69],如图10b所示。日本和我国学者针对这一体系开展了系统的梁柱节点和框架结构抗震性能试验研究^[69-74]。结果表明,预压装配式框架结构体系的受力性能与PRESSS体系较为接近,具有良

好的承载力、延性、变形能力和变形恢复能力,但梁柱节点表现出明显的半刚性特性,刚度和耗能能力与现浇框架差别较大。



a 典型PRESSSS体系框架节点滞回曲线



b 预压装配式框架结构体系示意图

图10 典型后张预应力连接预制混凝土框架结构滞回曲线与构造示意图

Fig. 10 Typical hysteretic loops of connections and structural details of post-tensioned precast concrete frame structures

2.5 阻尼器连接预制混凝土框架结构

为了进一步改善预制混凝土框架结构在强震作用下的抗震性能,促进其在高烈度抗震区的应用,有学者提出了采用阻尼器连接预制梁、柱的构造方案。

1995年,Englekirk^[75]首次提出在节点核心区设置低屈服高延性连杆来连接预制梁、柱构件的方案,并开展了梁柱节点足尺模型的低周反复荷载试验。试验结果表明^[76],此类连接构造能够保证预制混凝土框架良好的承载力、延性和变形能力。由于低屈服高延性连杆进入塑性较早,并且塑性变形较大,导致连杆与节点核心区混凝土之间发生明显滑移,因此影响了结构的耗能能力和变形恢复能力。总体而言,此类预制混凝土框架结构的总体性能与相应的现浇框架结构存在较大差别,需采用基于性能的设计方法进行设计。

吴从晓等^[77]提出了一种采用扇形黏弹性阻尼器连接预制梁、柱构件的构造方案。在此方案中,除采用阻尼器连接预制梁、柱外,梁端还采用了基于钢筋搭接的后浇整体式连接构造。梁柱节点和框架结构的低周反复荷载试验结果表明^[77-78]:此类预制混凝土

框架结构的抗震性能与相应的设置阻尼器的现浇框架结构接近;扇形黏弹性阻尼器使梁端塑性铰外移,有效保护了节点核心区,改善了此类预制混凝土框架的延性和耗能能力;设置扇形黏弹性阻尼器后,预制混凝土框架结构的残余变形变大,变形恢复能力有所降低。

为了解决采用阻尼器连接导致预制混凝土框架结构变形恢复能力降低的问题,Song等^[79]和Koshikawa^[80]提出了同时采用阻尼器和无黏结预应力筋连接预制梁、柱构件的构造方案。梁柱节点和框架结构的低周反复荷载试验结果表明^[79-82]:采用此类连接构造的预制混凝土框架结构具有良好的耗能能力;与相应的无预应力阻尼器连接预制混凝土框架结构相比,残余变形率最大可降低87%左右。然而,由于预制梁纵向钢筋不与节点核心区连接,因此此类预制混凝土框架结构的初始抗侧刚度约为现浇框架结构的50%,承载力约为现浇框架结构的30%~60%。图11为典型阻尼器连接预制混凝土框架结构滞回曲线^[81]。

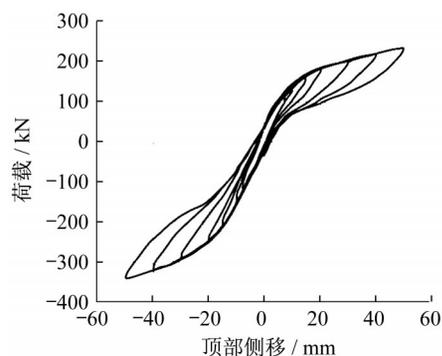


图11 典型阻尼器连接预制混凝土框架结构滞回曲线

Fig. 11 Typical hysteretic loops of precast concrete frame structures connected by dampers

总体上,采用预制节点核心区构造的预制混凝土框架结构,抗震性能受梁、柱连接构造的影响较大。从上述研究成果来看,对于采用梁端后浇整体式连接和钢制暗牛腿连接的预制混凝土框架结构,总体性能与现浇框架结构相差不大;对于采用螺栓连接的预制混凝土框架结构,当连接螺栓与梁跨方向平行时,抗震性能总体上与现浇框架结构接近,当连接螺栓与梁跨方向垂直时,抗震性能则与现浇框架结构有较大差别,属半刚性连接体系;对于采用后张预应力连接和阻尼器连接的预制混凝土框架结构,抗震性能总体上与相应现浇框架结构差别较大。

3 相关技术标准

技术标准是在工程中推广应用预制混凝土框架结构体系的技术依据。目前,国内外已制订了一系列针对预制混凝土框架结构体系的技术标准。

3.1 国外技术标准

美国、欧洲、日本和新西兰是目前预制混凝土结构研究与应用较为成熟的国家和地区,其技术标准也最具代表性。因此,以上述国家和地区为例,介绍国外有关预制混凝土框架结构体系的技术标准。

3.1.1 美国

美国混凝土协会(ACI)和预制/预应力混凝土协会(PCI)编制了一系列有关预制混凝土结构的技术标准或手册。ACI 318-14 (Building code requirements for structural concrete and commentary)对预制柱-叠合梁框架和螺栓连接预制混凝土框架的设计方法和构造要求进行了较为原则性的规定,ACI 550.1R-09(17) (Guide to emulating cast-in-place detailing for seismic design of precast concrete structures)对预制柱-叠合梁框架结构、梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构等具有“等同现浇”受力性能的预制混凝土框架结构的设计计算与构造要求进行了较为详细的规定,ACI 550.2R-13 (Design guide for connections in precast jointed systems)则对与梁跨垂直方向螺栓连接预制混凝土框架结构提出了具体的构造规定和基于性能的设计要求,ACI 550.3-13 (Design specification for unbonded post-tensioned precast concrete special moment frame satisfying ACI 374.1)则对PRESSS体系提出了具体的技术规定以及基于性能的抗震设计要求。PCI Design Handbook 8th较为详细地说明了预制柱-叠合梁框架结构、PRESSS体系和螺栓连接预制混凝土框架结构的计算方法和构造要求,并给出了构造图例。除上述技术标准或手册外,美国后张预应力协会(PTI)编制的 Post-tensioning Manual 6th也对后张预应力连接预制混凝土框架结构体系提出了技术规定,而在美国联邦应急管理局(FEMA)编制的 NEHRP 2003 (Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures)和国际规范理事会编制的 IBC-18 (International building code)中也包含了一些有关预制混凝土框架结构的总体性技术要求。

3.1.2 欧洲

欧洲有关预制混凝土结构的技术标准或手册主

要由欧洲标准化协会(CEN)和国际混凝土联合会(FIB)编制。其中,BS EN 1992-1-1:2004 (Design of concrete structures, Part 1-1: general rules and rules for buildings)和 FIB MC-2010 (Model code for concrete structures)对预制柱-叠合梁框架结构的总体设计原则和构造要求进行了规定。此外,FIB还编制了一系列与预制混凝土框架结构体系相关的技术报告,包括 FIB 27 (Seismic design of precast concrete buildings, 2003年出版)、FIB 43 (Structural connections for precast concrete buildings, 2008年出版)和 FIB 78 (Precast concrete buildings in seismic areas, 2016年出版)等,为预制混凝土框架结构(主要包括预制柱-叠合梁框架结构、螺栓连接预制混凝土框架结构和PRESSS体系)的推广和应用提供了技术依据。

3.1.3 日本

日本有关预制混凝土结构的技术标准或指南主要由日本建筑协会(AIJ)编制。其中,AIJ 2000 (Draft of Japanese design guidelines for precast construction of equivalent monolithic reinforced concrete buildings)主要对预制柱-叠合梁框架结构和后张预应力连接预制混凝土框架结构提出了总体技术要求。由日本预制建筑协会(JPA)编制并于2003年出版的设计指南“现浇等同型预制钢筋混凝土(R-PC)结构的设计”中,对预制柱-叠合梁框架结构和预制型钢混凝土框架结构的设计方法与构造措施给出了具体的规定与说明。

3.1.4 新西兰

新西兰的预制混凝土结构应用较为广泛,混凝土结构设计标准 NZS 1170.5-2004 (Structural design actions, Part 5: earthquake actions)和 NZS 3101.1-2006 (Concrete structures standard: amendment 2)中包括了有关预制柱-叠合梁框架结构、螺栓连接预制混凝土框架结构和PRESSS体系的技术规定。此外,由新西兰混凝土协会(NZCS)和新西兰地震工程协会(NZSEE)资助的坎特布雷大学先进工程研究中心(Center for Advanced Engineering, University of Canterbury)编制出版的技术指南“Guidelines for the use of structural precast concrete in buildings (second edition)”中,还对现浇柱-叠合梁框架结构、预制柱-叠合梁框架结构以及梁端后浇整体式连接预制混凝土框架结构的设计方法和构造措施给出了详细说明。

3.2 我国技术标准

3.2.1 国家或行业标准

GB/T 51231—2016《装配式混凝土建筑技术标准》和JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》是目前我国预制混凝土结构领域技术要求较全面的标准。上述两部标准均给出了现浇节点核心区预制混凝土框架结构的技术规定,主要包括现浇柱-叠合梁框架结构、预制柱-叠合梁框架结构、现浇节点核心区后张预应力预制混凝土框架结构等。此外,JGJ 224—2010《预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程》还给出了先张预应力预制混凝土框架结构的设计规定。上述体系中,预制柱的纵向钢筋主要采用套筒连接构造。需要说明的是,对于在我国预制混凝土框架结构中广泛应用的叠合楼板,GB/T 51231—2016和JGJ 1—2014还给出了符合刚性楼板假定的构造要求。JGJ 1—2014第6.6节规定,叠合楼板的后浇混凝土叠合层厚度不小于60 mm时,一般可认为其符合刚性楼板假定;GB/T 51231—2016第5.5节则规定,屋面层和平面受力复杂楼层的叠合楼板,当后浇混凝土叠合层厚度不小于100 mm时,一般可认为其满足刚性楼板假定。

3.2.2 地方标准

目前,包括上海、北京、天津、重庆、江苏、山东、辽宁、广东、四川、黑龙江、福建等在内的我国大部分省市均制订了有关预制混凝土框架结构体系的技术标准。上海市标准的技术规定较为全面,相继颁布实施的规程有DGJ 08-2154—2014《装配整体式混凝土公共建筑设计规程》和DG/TJ 08-2071—2016《装配整体式混凝土居住建筑设计规程》,对所述的大部分现浇节点核心区预制混凝土框架结构均给出了技术规定。此外,北京市DB11/1310—2015《装配式框架及框架-剪力墙结构设计规程》中不仅包括了预制柱-叠合梁框架结构的技术规定,还包括了螺栓连接预制混凝土框架结构的技术规定。

4 结语

预制混凝土框架结构室内空间布置灵活、建筑立面丰富,在公共建筑、居住建筑和工业建筑中均有广泛应用。按照节点核心区构造的不同,预制混凝土框架结构体系总体上分为现浇节点核心区预制混凝土框架结构体系和预制节点核心区预制混凝土框架结构体系两类。经合理设计的现浇节点核心区预制混凝土框架结构具有与现浇混凝土框架结构“等

同”的抗震性能,可参照现行现浇混凝土框架结构的设计方法进行设计。预制节点核心区预制混凝土框架结构则根据梁端连接构造的不同分为“等同现浇”和“非等同现浇”两类。其中,“非等同现浇”预制混凝土框架结构一般具有半刚性特点,需采用基于性能的设计方法进行设计。美国、欧洲、日本和新西兰等国家和地区制定了较为完善的预制混凝土框架结构相关技术标准,对主要的预制混凝土框架结构的设计方法和构造要求均给出了较为详细的说明。

从已有研究成果来看,我国针对现浇节点核心区预制混凝土框架结构体系方面的研究已较为成熟,在国家或行业标准和地方标准层面已形成了基本完善的标准体系。对于预制节点核心区预制混凝土框架结构体系,我国的相关研究工作尚不成熟,有关技术标准尚未编制。从完善结构体系、改善结构综合经济效益方面来看,尚有以下几个方面的工作有待开展:①针对高层建筑和高烈度区建筑,有必要开展新型预制混凝土框架结构减隔震体系研发及设计理论研究,从而进一步扩大预制混凝土框架结构的适用范围;②针对低多层建筑,进一步简化预制混凝土框架结构的连接构造,开展“非等同现浇”预制混凝土框架结构体系的研发,并建立系统的设计理论;③基于高性能材料(包括高强钢筋、超高性能混凝土等),开展新型预制混凝土框架结构体系研发,进一步改善预制混凝土框架结构的抗震性能,提升建造效率,降低建造成本。

作者贡献声明

薛伟辰:确定总体架构,甄别相关重要文献,负责最终成稿。

胡翔:系统查阅、总结相关文献,与第一作者合作撰写主要内容。

参考文献:

- [1] HUBER B, STEINLE A. Precast concrete structures [M]. Berlin: Ernst & Sohn GmbH & Co., KG, 2011.
- [2] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 47.
XUE Weichen. Progress of studies and applications of precast concrete frame structure systems [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 47.
- [3] XUE Weichen, HU Xiang, YANG Yunjun. Full-scale tests on composite concrete T-beams subjected to cyclic and monotonic loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineering: Structures and Buildings, 2019, 172(9): 671.
- [4] 薛伟辰, 胡翔. 预制混凝土剪力墙结构体系研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 44.

- XUE Weichen, HU Xiang. State of the art of studies on precast concrete shear wall structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(2): 44.
- [5] ELLIOTT S K, JOLLY K C. Multi-storey precast concrete framed structures [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [6] XUE Weichen, YANG Xinlei. Tests on half-scale, two-story, two-bay, moment-resisting hybrid concrete frames [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(5): 627.
- [7] PARK R, BULL D K. Seismic resistance of frames incorporating precast prestressed concrete beam shells [J]. *PCI Journal*, 1986, 31(4): 54.
- [8] 薛伟辰, 杨新磊, 王蕴, 等. 现浇柱叠合梁框架节点抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(6): 9.
XUE Weichen, YANG Xinlei, WANG Yun, *et al.* Experimental study on seismic behavior of different type of frame connections with composite beams and cast-in-place columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(6): 9.
- [9] XUE Weichen, ZHANG Bing. Seismic behavior of hybrid concrete beam-column connections with composite beams and cast-in-place columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2014, 111(3): 617.
- [10] XUE Weichen, YANG Xinlei. Seismic tests of precast concrete, moment-resisting frames and connections [J]. *PCI Journal*, 2010, 55(3): 102.
- [11] XUE Weichen, YANG Xinlei. Tests on 1/4-scale six-story two-bay hybrid concrete moment-resisting frames under lateral loading [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(2): 341.
- [12] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(1): 44.
HUANG Yuan, ZHANG Rui, ZHU Zhengeng, *et al.* Experimental study on seismic performance of frame with precast beams and cast-in-place columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(1): 44.
- [13] 陈适才, 闫维明, 王文明, 等. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板边节点抗震性能研究 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(6): 60.
CHEN Shicai, YAN Weiming, WANG Wenming, *et al.* Seismic behavior of exterior beam to column joints with layered slab of large precast concrete structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(6): 60.
- [14] 柳旭东, 王东辉, 刘帅, 等. 装配式梁柱边节点抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2016, 46(10): 87.
LIU Xudong, WANG Donghui, LIU Shuai, *et al.* Experimental study on seismic behavior of prefabricated edged beam-column joint [J]. *Building Structure*, 2016, 46(10): 87.
- [15] 薛伟辰, 张斌, 胡翔. 预制柱叠合梁框架抗震性能试验研究 [R]. 上海: 同济大学, 2012.
XUE Weichen, ZHANG Bin, HU Xiang. Seismic performance of precast concrete frame structures with precast columns and composite beams [R]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [16] 张微敬, 王桂洁, 张晨骋, 等. 钢筋机械连接的装配式框架抗震性能试验研究与有限元分析 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 47.
ZHANG Weijing, WANG Guijie, ZHANG Chencheng, *et al.* Experimental study and finite element analysis on seismic behaviour of assembled frames with rebars spliced by mechanical connection [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 47.
- [17] 袁鑫杰, 李易, 陆新征, 等. 湿式连接装配式混凝土框架抗连续倒塌静力试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(12): 46.
YUAN Xinjie, LI Yi, LU Xinzheng, *et al.* Static progressive collapse test on prefabricated concrete frames with wet connections [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(12): 46.
- [18] 赵斌, 吕西林, 刘海峰. 预制高强混凝土结构后浇整体式梁柱组合件抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(6): 22.
ZHAO Bin, LÜ Xilin, LIU Haifeng. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column subassembly with cast-in-site monolithic joint [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6): 22.
- [19] 刘璐, 黄小坤, 田春雨, 等. 配置大直径大间距HRB500高强钢筋的装配整体式钢筋混凝土框架节点抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(5): 247.
LIU Lu, HUANG Xiaokun, TIAN Chunyu, *et al.* Experimental study on seismic performance of precast RC frame joints with HRB500 high strength rebars of large diameter and spacing [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(5): 247.
- [20] 薛伟辰, 胡翔, 任栋升, 等. 预制高强混凝土框架结构抗震性能研究 [R]. 上海: 同济大学, 2017.
XUE Weichen, HU Xiang, REN Dongshen, *et al.* Seismic performance of precast high strength concrete frame structures [R]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [21] 代领杰, 胡翔, 薛伟辰. 一种新型预制混凝土框架节点简介及其受力性能探讨 [J]. *施工技术*, 2017, 46(4): 6.
DAI Lingjie, HU Xiang, XUE Weichen. Introduction of a new type of precast concrete frame connection and discussion of its mechanical performance [J]. *Construction Technology*, 2017, 46(4): 6.
- [22] 薛伟辰, 胡翔, 孙哲. 新型预制混凝土框架柱抗震性能试验研究 [R]. 上海: 同济大学, 2015.
XUE Weichen, HU Xiang, SUN Zhe. Experimental studies on seismic performance of a new type precast concrete frame structures [R]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [23] 薛伟辰, 胡翔, 代领杰. 螺栓连接预制混凝土框架结构抗震性能试验研究 [R]. 上海: 同济大学, 2017.
XUE Weichen, HU Xiang, DAI Lingjie. Experimental studies on seismic performance of precast concrete frame structures with bolted connections [R]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [24] ALCOCER S M, CARRANZA R, PEREZ N D, *et al.*

- Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame[J]. *PCI Journal*, 2002, 47(3): 70.
- [25] ERTAS O, OZDEN S, OZTURAN T. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames [J]. *PCI Journal*, 2006, 51(3): 66.
- [26] IM H J, PARK H G, EOM T S. Cyclic loading test for reinforced concrete emulated beam-column connection of precast concrete moment frame [J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(1): 115.
- [27] EOM T S, PARK H G, HWANG H J, *et al.* Plastic hinge relocation methods for emulative PC beam-column connections [J]. *Journal of Structural Engineering: ASCE*, 2016, 142(2): 1.
- [28] YUKSEL E, KARADOGAN H F, BAL I E, *et al.* Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction [J]. *Engineering Structures*, 2015, 99: 157.
- [29] 薛伟辰, 胡翔, 张力, 等. 预制异形柱混凝土框架结构抗震性能研究[R]. 上海: 同济大学, 2014.
- XUE Weichen, HU Xiang, ZHANG Li, *et al.* Seismic performance of precast concrete frame structures with precast specially shaped columns [R]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [30] 薛伟辰, 胡翔, 孙岩波, 等. 预制型钢混凝土框架结构抗震性能研究[R]. 上海: 同济大学, 2017.
- XUE Weichen, HU Xiang, SUN Yanbo, *et al.* Seismic performance of precast steel reinforced concrete frame structures [R]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [31] 侯光荣, 王绪续, 吕娜娜, 等. 新型装配式部分型钢混凝土框架梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2018, 48(7): 27.
- HOU Guangrong, WANG Xuxu, LÜ Nana, *et al.* Experimental study on seismic behavior of new prefabricated partial SRC frame beam-column joints [J]. *Building Structure*, 2018, 48(7): 27.
- [32] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(Suppl. C): 1820.
- [33] 蔡建国, 冯健, 王赞, 等. 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能研究[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(2): 136.
- CAI Jianguo, FENG Jian, WANG Zan, *et al.* Seismic behavior of frame comprised of precast prestressed concrete components [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sinyatseni*, 2009, 48(2): 136.
- [34] 蔡建国, 赵耀宗, 朱洪进, 等. 预制混凝土框架中节点抗震性能的试验研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(Z1): 113.
- CAI Jianguo, ZHAO Yaozong, ZHU Hongjin, *et al.* Study on seismic behavior of interior joints of precast concrete frames [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(Z1): 113.
- [35] 于建兵, 郭正兴. 钢绞线锚入式预制装配混凝土框架节点抗震试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2017, 47(4): 760.
- YU Jianbing, GUO Zhengxing. Seismic experimental study on strands anchored precast concrete frame connections [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2017, 47(4): 760.
- [36] 于建兵, 石灿, 郭正兴, 等. 芯梁增强装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(Z2): 59.
- YU Jianbing, SHI Can, GUO Zhengxing, *et al.* Experimental study on seismic behavior of assembled concrete frame joints strengthened with core beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(Z2): 59.
- [37] 薛伟辰, 胡翔, 廖显东, 等. 预制预应力混凝土框架结构抗震性能研究[R]. 上海: 同济大学, 2015.
- XUE Weichen, HU Xiang, LIAO Xiandong, *et al.* Seismic performance of precast post-tensioned concrete frame structures [R]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [38] HU X, XUE W C, QI D Q. Experimental studies on precast post-tensioned concrete connections with composite beams and multi-storey columns [J]. *Magazine of Concrete Research*, <https://doi.org/10.6800/jmacr.18.00595>.
- [39] Center for Advanced Engineering (CAE). Guidelines for the use of structural precast concrete in buildings [M]. Christchurch: Wickliffe Press, 1999.
- [40] 刘桐, 陈娟, 刘友忠, 等. 基于水泥基复合材料连接的装配式框架节点抗震性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(11): 84.
- LIU Tong, CHEN Juan, LIU Youzhong, *et al.* Experimental research on seismic behavior of ECC joints of prefabricated framework [J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(11): 84.
- [41] 罗青儿, 王蕴, 翁煜辉, 等. 装配整体式钢筋混凝土框架梁柱节点的试验研究[J]. *工业建筑*, 2009, 39(2): 80.
- LUO Qing'er, WANG Yun, WENG Yuhui, *et al.* Experimental study of beam-column joint of precast monolithic RC frame [J]. *Industrial Construction*, 2009, 39(2): 80.
- [42] 章一萍, 隗萍, 张春雷, 等. 新型装配式混凝土框架结构后浇整体式梁柱节点研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(3): 110.
- ZHANG Yiping, WEI Ping, ZHANG Chunlei, *et al.* Study on new cast-in-situ monolithic beam-column connections for precast frame structure [J]. *Sichuan Building Science*, 2017, 43(3): 110.
- [43] 刘洪涛, 闫秋实, 杜修力. 钢筋混凝土框架梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9): 54.
- LIU Hongtao, YAN Qiushi, DU Xiuli. Study of seismic performance of reinforced concrete frame beam-column joints connected with grouted sleeves [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(9): 54.
- [44] RESTREPO J I, PARK R, BUCHANAN A H. Tests on connections of earthquake resisting precast reinforced concrete perimeter frames of buildings [J]. *PCI Journal*, 1995, 40

- (1): 44.
- [45] KHOO J H, LI B, YIP W K. Tests on precast concrete frames with connections constructed away from column faces[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(1): 18.
- [46] 李忠献, 张雪松, 丁阳. 装配整体式型钢混凝土框架节点抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 32.
LI Zhongxian, ZHANG Xuesong, DING Yang. Seismic behavior of joints of prefabricated steel reinforced concrete integral frame [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 32.
- [47] SUDHAKAR A K, LI B. Investigations of seismic behavior of hybrid connections[J]. *PCI Journal*, 2009, 54(1): 67.
- [48] 宋玉普, 王军, 范国玺, 等. 预制装配式框架结构梁柱节点力学性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2014, 54(4): 438.
SONG Yupu, WANG Jun, FAN Guoxi, *et al.* Experimental study of mechanical properties of prefabricated frame structure beam-column joint [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014, 54(4): 438.
- [49] FRENCH C W, AMU O, TARZIKHAN C. Connections between precast elements-failure outside connection region[J]. *Journal of Structural Engineering: ASCE*, 1989, 115(2): 316.
- [50] 赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(1): 81.
ZHAO Bin, LÜ Xilin, LIU Lizhen. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column subassembly with fully assembled joint [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(1): 81.
- [51] 程蓓, 苗小燕, 徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(12): 94.
CHENG Bei, MIAO Xiaoyan, XU Jianwei. Experimental study on a new type of column-to-beam joints in assembled reinforced concrete frame structures [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(12): 94.
- [52] BAHRAMI S, MADHKHAN M, SHIRMOHAMMADI F, *et al.* Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading[J]. *Engineering Structures*, 2017, 132(Suppl. C): 808.
- [53] YEKRANGNIA M, TAHERI A, ZAHRAI S M. Experimental and numerical evaluation of proposed precast concrete connections [J]. *Structural Concrete*, 2016, 17(6): 959.
- [54] BARROS A E A, BELLUCIO E K, EL D M K. Behaviour of grouted dowels used in precast concrete connections [J]. *Structural Concrete*, 2012, 13(2): 84.
- [55] 吕西林, 范力, 赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(4): 58.
LÜ Xilin, FAN Li, ZHAO Bin. Pseudo-dynamic test on a reduced scale jointed precast concrete frame structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(4): 58.
- [56] PRIESTLEY M J N. Overview of PRESSS research program [J]. *PCI Journal*, 1991, 36(4): 50.
- [57] MACRAE G A, PRIESTLEY M J N. Precast post-tensioned un-grouted concrete beam-column subassembly tests[R]. La Jolla; University of California at San Diego, 1988.
- [58] CHEOK G S, LEW H S. Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads: Report No. 1 [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1990.
- [59] CHEOK G S, LEW H S. Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads: Report No. 2 [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1991.
- [60] CHEOK G S, STONE W C. Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads: Report No. 3 [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1993.
- [61] CHEOK G S, STONE W C. Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads: Report No. 4 [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994.
- [62] NAKAKI S D, STANTON J F, SRITHARAN S. An overview of the PRESSS five-story precast test building [J]. *PCI Journal*, 1999, 44(2): 26.
- [63] PRIESTLEY M J N. The PRESSS program: current status and proposed plans for phase III [R]. *PCI Journal*, 1996, 41(2): 22.
- [64] PALMIERI L, SAQAN E, FRENCH C, *et al.* Ductile connections for precast concrete frame systems[J]. *ACI Special Publication*, 1996, 162: 313.
- [65] PRIESTLEY M J N, SRITHARAN S, CONLEY J R, *et al.* Preliminary results and conclusions from the PRESSS five-story precast concrete test building [J]. *PCI Journal*, 1999, 44(6): 42.
- [66] 李振宝, 董挺峰, 闫维明, 等. 混合连接装配式框架内节点抗震性能研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(10): 895.
LI Zhenbao, DONG Tingfeng, YAN Weiming, *et al.* Study on seismic performance of hybrid precast concrete beam-to-column connections [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(10): 895.
- [67] 张晨, 周宇凌, 蔡小宁, 等. 后张无黏结混合装配式框架节点抗震性能试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2016, 46(5): 1063.
ZHANG Chen, ZHOU Yuling, CAI Xiaoning, *et al.* Experimental study on seismic behaviors of unbonded post-tensioned hybrid precast concrete frame joints [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2016, 46(5): 1063.
- [68] 潘鹏, 王海深, 郭海山, 等. 后张无黏结预应力干式连接梁柱节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(10): 46.
PAN Peng, WANG Haishen, GUO Haishan, *et al.* Experimental study of seismic performance of unbonded post-tensioned prestressed beam-to-column dry connections [J].

- Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 46.
- [69] 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): 60.
- LIU Bingkang, ZHANG Yuzhong, JIN Zhefeng, *et al.* Experimental study on seismic behavior of prestressed fabricated PC frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 60.
- [70] KISHIDA S, KITAYAMA K, MARUTA M, *et al.* Earthquake resistant performance and failure mechanism of precast prestressed concrete beam-column joints assembled by post-tensioning steel bars [C]//Proceeding of 13th World Conference on Earthquake Engineering, 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: [s.n.], 2004: 1-15.
- [71] JIN K, KITAYAMA K, SONG S, *et al.* Shear capacity of precast prestressed concrete beam-column joint assembled by unbonded tendon [J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(1): 51.
- [72] 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.
- LIU Bingkang, TIAN Jingfeng, ZHANG Yuzhong, *et al.* Behavior of ductility and energy dissipation of prestressed precast concrete frame under low-cyclic reversed loading [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 74.
- [73] 柳炳康, 宋满荣, 蒋亚琼, 等. 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 24.
- LIU Bingkang, SONG Manrong, JIANG Yaqiong, *et al.* Experimental study on seismic performance of post-tensioned precast prestressed concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 24.
- [74] 黄慎江, 屈克达, 张克勤, 等. 半刚性预压装配式PC框架弯矩调幅系数的研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2012, 35(11): 1514.
- HUANG Shenjiang, QU Keda, ZHANG Keqin, *et al.* Study of moment modification coefficients of prestressed precast concrete frame under the influence of semi-rigid joints [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2012, 35(11): 1514.
- [75] ENGLEKIRK R E. Development and testing of a ductile connector for assembling precast concrete beams and columns [J]. PCI Journal, 1995, 40(2): 36.
- [76] 李向民, 高润东, 许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(8): 3453.
- LI Xiangmin, GAO Rundong, XU Qingfeng. Experimental study on high ductile joints for precast RC frame [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(8): 3453.
- [77] 吴从晓, 周云, 张超, 等. 布置阻尼器的现浇与预制装配式框架梁柱组合体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 61.
- WU Congxiao, ZHOU Yun, ZHANG Chao, *et al.* Experimental study on seismic performance of beam-column subassembly between cast-in-situ and precast frame structure with dampers [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 61.
- [78] 吴从晓, 黄臻, 邓雪松, 等. 二层二跨预制装配式和现浇混凝土框架消能减震框架结构抗震性能对比[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 149.
- WU Congxiao, HUANG Zhen, DENG Xuesong, *et al.* Seismic performance between cast-in-situ and precast two-story-double-span energy dissipation frame structure [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(1): 149.
- [79] SONG L L, GUO T, CHEN C. Experimental and numerical study of a self-centering prestressed concrete moment resisting frame connection with bolted web friction devices [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(4): 529.
- [80] KOSHIKAWA T. Moment and energy dissipation capacities of post-tensioned precast concrete connections employing a friction device[J]. Engineering Structures, 2017, 138: 170.
- [81] GUO T, SONG L L, CAO Z, *et al.* Large-scale tests on cyclic behavior of self-centering prestressed concrete frames[J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(6): 1263.
- [82] SONG L L, GUO T, GU Y, *et al.* Experimental study of a self-centring prestressed concrete frame subassembly [J]. Engineering Structures, 2015, 88: 176.