

预制装配式混凝土结构体系的现状和发展展望

石建光¹ 林树枝²

(1. 厦门大学土木工程系, 厦门 361005; 2. 厦门市建设与管理局, 厦门 361003)

[摘要] 我国各地实施的预制装配式混凝土结构体系类型少, 建筑的使用功能、高度、层数、抗震设防烈度等适用范围要求严格。保证较高的预制装配率, 充分发挥预制、装配提供的技术优势, 未来预制装配式混凝土结构技术在构件、结构等方面可以获得很大发展。可以将预应力技术、高强和高性能材料技术、新型结构构件技术等有利于提高构件性能的技术用在预制构件上。可以将隔震和消能减震技术、人工塑性铰、加设支撑、关键部位性能提升技术、主次结构设计技术等有利于提高结构性能的技术应用在建筑结构上。发挥叠合构件部分现浇处理的优点, 与建筑和设备专业配合, 优化建筑性能和功能。通过预制和装配技术的优势, 整合各项材料、构件和结构性能提高技术, 扩大结构适用范围的同时, 提升建筑工业化技术水平。

[关键词] 预制装配式混凝土结构体系; 构件技术; 结构技术; 发展展望

1 引言

为解决建筑业对环境的影响、资源的消耗等问题, 低碳、节能、绿色、生态和可持续发展等理念广泛应用于建筑中, 许多国家通过建立定量的评价体系来降低能源和资源消耗、提高对环境的要求^[1], 主体结构在这些评价体系中发挥着重要作用^[2]。实际上主体结构在高层建筑的建造中占据主要部分, 应该对主体结构的资源性能和环境性能提出相应的要求^[3]各种有利于主体结构建造中降低能源资源消耗和保护环境的技术来考察, 采用预制装配式结构是一种通过改变建造方式实现资源性能和环境性能要求的技术途径^[4]。因为预制装配式结构具有可以转变建设模式、提高效率、保证质量、有利于管理等特点, 所以国务院 2013 年 1 月 1 日《绿色建筑行动方案》中明确要求推广适合工业化生产的预制装配式混凝土、钢结构等建筑体系, 加快发展建设工程的预制和装配技术, 提高建筑工业化技术集成水平。预制和装配技术的发展也同时转变了建筑业的传统生产方式。建筑业的工业化可以概括为建筑设计标准化、构配件预制工厂化、施工机械化和组织管理科学化等“四化”, 建筑工业化是一种重大的技术和组织变革^[5]。预制和装配技术是技术变革的核心, 对目前建筑业大量使用的混凝土结构、钢结

构和混合或组合结构来说, 预制装配式混凝土结构体系、钢结构体系和混合或组合结构体系是技术变革的重点, 为此总结目前各地实施的预制和装配式建筑结构体系, 分析其特点和适用范围, 对推动建筑工业化的发展具有积极意义。

2 预制和装配式建筑结构体系

2.1 目前的建筑结构体系

建筑结构体系按材料可以分为钢结构、混凝土结构、组合结构(如型钢混凝土结构、钢管混凝土结构)和混合结构。建筑结构的基本构件可分为水平布置的构件与竖向布置的构件, 水平布置的构件包括梁、板(组成楼盖结构、屋盖结构)、刚臂等, 竖向布置的构件包括柱、剪力墙、支撑、筒体等。基本构件因材料、截面形状、布置、建造方式、构成形式等的不同会形成满足不用使用和性能要求的各种构件, 如梁因材料不同可以是钢筋混凝土梁、钢梁、型钢混凝土梁、钢-钢筋混凝土组合梁等, 柱因截面形状不同可以是方柱、矩形柱、圆柱、异型柱等, 板因建造方式不同可以是现浇板、预制板和叠合板等, 支撑因布置不同可以是中心支撑、偏心支撑、单层支撑和多层支撑等, 而筒体因构成形式不同可以是实腹筒、框筒、支撑筒、桁架筒等。由不同的基本构件可以形成各类建筑结构体系, 如框架结构、剪力墙结构、框架-剪力

墙结构、筒体结构、框架-支撑结构、板柱结构、巨型结构体系等。基本构件的变化多样使得形成的建筑结构体系可以花样繁多,这为建立各种建筑结构体系提供了极大便利和丰富的资源^[6],所以目前满足各种建筑要求的结构体系种类繁多,如框架结构中的钢框架结构、混凝土框架结构、组合框架结构等因其梁和柱的材料不同、柱子变型、预应力施工等一项或多项变化可以形成混合框架、异型柱框架、预应力混凝土框架以及型钢混凝土异型框架等各种形式的框架结构体系(图1),每种框架结构体系都有相应的规范要求,以便进行设计、施工和验收。

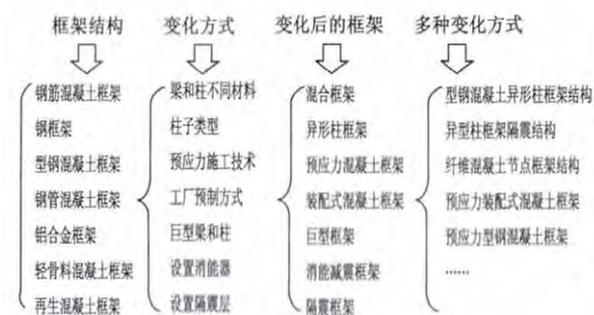


图1 不同材料的框架结构和各种形式的框架结构体系

同样其它结构体系也可以有各种变化^[6]。要适应日益丰富的建筑创作,研究和创新结构体系,以结构成就建筑之美成为目前迫切的需要^[7]。伴随我国超高层建筑数量和高度的迅速发展,在高层建筑中越来越多的采用了各种混合结构体系^[8]。在建筑工业化过程中,如何将这些种类繁多的结构体系采用预制和装配技术建造是转型的关键。

2.2 各地实施的预制和装配式建筑结构体系

目前各地实施的预制和装配式建筑结构体系主要为预制装配式混凝土结构体系、钢结构体系。由于钢结构体系本身的构件工厂化生产和现场组装施工特点,一开始就满足建筑工业化的“四化”要求,在产业链组织、技术资格、经济核算等方面都形成了与建筑工业化要求相匹配的管理体系,所以预制和装配式建筑结构体系发展的难点在混凝土结构体系。研究确定预制装配式混凝土结构体系就是实现建筑工业化的首要任务,总结各地实施的预制装配式混凝土结构体系可以为进一步开发研究提供参考。

深圳市实施的预制装配式混凝土结构体系主要由竖向现浇构件、预制叠合梁板、预制外挂墙板构成,结构体系包括了框架、框架-剪力墙和框架-

核心筒结构^[9]。因为主要受力构件仍然采用现浇,所以同目前大量采用的混凝土结构体系差异较小,但把材料消耗多、工期长的梁、板、外墙等构件采用了预制装配技术,提高了结构的预制装配率。

上海市首先对住宅采用了装配整体式混凝土体系^[10],结构体系包括装配整体式混凝土框架结构、预制叠合混凝土剪力墙结构两种。预制叠合混凝土剪力墙结构为内墙现浇、外墙采用预制叠合墙、连接节点部分现浇的剪力墙结构。

江苏省采用的是预制装配整体式剪力墙结构体系^[11],结构体系由墙板、叠合楼板、楼梯及阳台等混凝土预制构件组成,在施工现场拼装后,采用墙板间竖向连接缝现浇、上下墙板间主要竖向受力钢筋浆锚连接以及楼面梁板叠合现浇形成整体的一种结构形式,属于专用的一种预制装配式结构体系。

北京市准备采用的是装配式剪力墙结构体系^[12],结构体系有装配式钢筋混凝土剪力墙结构、圆孔板剪力墙结构、装配式型钢剪力墙结构三种。这些装配式剪力墙结构体系也属于专用的一种预制装配式结构体系,结构的预制装配率很高,但结构的最大适用高度限制严格,并把适用范围扩大到8度抗震设计。

南京大地集团从法国引进了预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系^[13],结构体系有预制预应力混凝土装配整体式框架结构、预制预应力混凝土装配整体式框架-剪力墙结构两种。框架结构的预制装配率很高,而框架-剪力墙结构比较低。

安徽西伟德混凝土预制件(合肥)有限责任公司从德国西伟德企业集团引进了叠合板式混凝土剪力墙结构体系^[14],结构体系由叠合式楼板和叠合式墙板,辅以必要的现浇混凝土剪力墙、边缘构件、梁、板,共同形成剪力墙结构,专门用于住宅建筑,预制装配率很高。

辽宁省本着消化吸收的原则,参照鹿岛建设株式会社编制的《构架式预制钢筋混凝土结构设计与施工技术指南》,制定了DB21/T1868-2010《装配整体式混凝土结构技术规程(暂行)》^[15]。结构体系包括装配整体式混凝土框架结构、装配整体式混凝土框架-核心筒、装配整体式混凝土密柱框架筒、装配整体式混凝土筒中筒结构。

黑龙江省准备采用的是预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构,其中竖向结构构件为预制混凝土

土剪力墙,水平构件为预制混凝土叠合梁、叠合板,楼梯为预制混凝土楼梯,及其他可采用预制混凝土结构的构件^[16]。吉林省颁布的 DB22/T1779-2013《装配整体式混凝土剪力墙结构体系居住建筑技术规程》也是采用了剪力墙结构体系^[17]。

河北省提出了一种装配整体式约束混凝土柱组合梁混合结构^[18],是指由装配式约束混凝土柱、装配式组合梁组装成的整体框架或由该框架与支撑组装成的框架-支撑结构体系。

预制装配整体式预应力板柱体系是由南斯拉夫塞尔维亚材料研究院的伯兰柯·热热立(Branko Zvezely)教授于1956年首创的板柱结构体系,这种板柱住宅建筑可以获得很经济的高度和跨度^[19]。1993年我国就颁布了整体预应力装配式板柱建筑技术规程^[20],结构体系有板柱-剪力墙结构和纯板柱结构两种,它由预制柱、预制的带边肋的屋面板和楼板组成,屋面板和楼板为双向预应力暗密肋夹芯板,一个柱网一块。

目前正在制定的《装配式混凝土结构技术规程》给出的结构体系包括框架结构、框架-剪力墙结构、剪力墙结构^[21]。这些结构体系将适用于非抗震设计及抗震设防烈度为6~8度抗震设计的乙类及乙类以下的装配式混凝土建筑结构。

总结以上各地实施的预制装配式建筑结构体系可以看出,采用专用结构体系,则预制装配率很高,但使用范围有限。采用通用结构体系,则预制装配率一般,但使用范围广泛。主体结构梁、柱、剪力墙采用预制装配技术,则建筑高度、层数、抗震设防烈度等适用范围受限严格,但可以获得很高的预制装配率,充分体现建筑工业化的优势,如果主体结构现浇或部分内墙现浇,扩大了建筑适用范围,但现浇和预制同时存在,施工工期缩减不明显,建筑工业化的优势体现不足。

与目前的建筑结构体系比较,预制装配式混凝土结构能够实现的结构体系很有限,能够采用的预制装配式混凝土结构主要是框架结构、框架-剪力墙结构、剪力墙结构和板柱结构,其建筑高度、层数、抗震设防烈度等适用范围比现浇结构要更加严格。

3 预制装配式混凝土结构的发展

国外多层房屋建筑常用的装配式结构多是钢结

构的框架体系、预制楼板和墙板^[22],考虑建造成本,我国多层房屋建筑采用装配式混凝土结构是比较合适的,但多层房屋在大中城市建造的越来越少,主要分布在小城市或乡村,会面临距离预制构件生产工厂远、配套企业不易解决等问题。面对大中城市建造的越来越高的房屋建筑,采用预制装配式混凝土结构时需要更多满足高层建筑高度、层数、使用功能、抗震设防烈度等要求的结构体系。整合设计、研究、施工、开发商、构件生产、预制成套设备供应商、专项产品供应商等各类涉及预制装配式建筑的核心单位开发预制装配式混凝土结构体系是一项首要工作。

充分发挥工厂预制构件的优势,将各种有利于构件性能提高的技术体现在预制构件上是促进建筑工业化发展的有力手段。如预应力混凝土梁可实现的跨度为15~40(m)、经济跨度为15~25(m),预应力混凝土板可实现的跨度为6~12(m)、经济跨度为7~10(m)^[23]。可以大幅度减少材料用量、增加结构适用范围。目前预应力混凝土结构设计规范^[24]、抗震规程都颁布实施^[25],这为预制构件采用预应力技术提供了保证。再如采用各种高强混凝土、高强钢筋、纤维混凝土制造梁、柱、剪力墙等构件不仅可以改善性能,而且可以节约材料、扩大适用范围。如果用更好性能得新型结构构件就可能提高预制装配式混凝土结构体系的性能,解决使用上的限制问题,如剪力墙构件采用带竖缝剪力墙、缝槽剪力墙、设连接键带缝剪力墙、摩擦阻带带缝剪力墙、竖向耗能剪力墙、暗支撑剪力墙等^[4]。

充分发挥现场装配的优势,将各种有利于提高结构性能的技术应用在建筑结构上,可以极大地提高预制装配式混凝土的技术水平。如结构体系中采用隔震和消能减震技术,就可以大幅度提高预制装配式混凝土结构适用高度和层数,并在高地震区进行应用。从建筑结构整体考虑,设置人工塑性铰^[26]、加设支撑^[27]等都可以提高结构性能、扩大适用范围。预制装配式混凝土结构的框架梁柱节点、端部等关键部位一般采用现浇,这些关键部位采用高性能混凝土、纤维混凝土、工程纤维增强水泥基复合材料、高阻尼隔震橡胶等可以提高结构性能^[28,30],大幅提升装配整体式混凝土结构的应用高度。从结构整体考虑,主体结构和次要结构的设计可以在预制装配式混凝土结构中实现^[31],主体结构采用高性能材料,



次要结构采用一般材料,可以既提高结构性能又降低造价,成为预制装配式结构的专门技术。

发挥叠合构件部分现浇处理的优势,既增强了结构的整体性,又解决了建筑部件、暖通空调、给排水系统、电气系统等建筑和设备专业的要求,在不降低结构安全性的前提下,优化了建筑性能和功能。将保温隔热等建筑热工要求与结构体系结合,可以从建筑整体上降低材料、能源消耗^[32],这为预制装配式结构体系开发提供了更加广阔的途径。

4 总结

通过总结各地实施的预制装配式混凝土结构体系,并与目前的建筑结构体系相比较,可以看出,可以采用的预制装配式混凝土结构体系类型比较少,建筑的使用功能、高度、层数、抗震设防烈度等适用范围比现浇结构要更加严格。为适应目前越来越高的建筑需要,提高预制装配式混凝土结构的性能、扩大适用范围是主要的科研开发任务。

从保证较高的预制装配率,充分发挥预制装配提供的技术优势出发,未来预制装配式混凝土结构技术的发展,应该充分发挥工厂预制构件的优势,将预应力技术、高强和高性能材料技术、新型结构构件技术等有利于构件性能提高的技术体现在预制构件上。充分发挥现场装配的优势,将隔震和消能减震技术、人工塑性铰、加设支撑、关键部位性能提升技术、主次结构设计技术等有利于提高结构性能的技术应用在建筑结构上。发挥叠合构件部分现浇处理的优势,与建筑、暖通空调、给排水、电气等建筑和设备专业配合,优化建筑性能和功能。建筑工业化是未来发展的趋势,通过预制和装配技术整合各项材料、构件和结构技术,提高结构性能的同时,提升建筑工业化技术水平,使得我国从建筑业大国向建筑业强国转变具有重要意义。

参考文献:

[1] Candace Say, Antony Wood, Sustainable rating systems around the world[J], CTBUH Journal, 2008 Issue II, 19-29.
 [2] The Institution of Structural Engineers, The Value of Structural Engineering to Sustainable Construction[M], Final Report, 6 March 2012, www.arup.com.
 [3] Jianguang Shi, The Demand and Requirements of Environment and Resource on the High-Rise Building Structure[C], CTBUH 2011 World Conference, Seoul, Korea, 10-12 October, 2011, www.ctbuh2011.org.

[4] 石建光. 高层建筑结构的资源性和技术实现途径[C]. 第二十二届全国高层建筑结构学术交流会, 2012年10月24-27日, 厦门市.
 [5] 卢达溶. 工业系统概论[M]. 清华大学出版社, 1999年.
 [6] Jianguang Shi, Tong Han, Conceiving methods and innovative approaches for tall building structure systems[J], The Structural Design of Tall and Special Buildings, August 2010, 19(5), 537-550.
 [7] 丁洁民. 我国超高层建筑的现状分析和探讨[J]. 建筑结构, 2013年第09期, 9-12.
 [8] 任庆英. 建筑创作与结构创新[J]. 建筑结构, 2013年第09期, 2-8.
 [9] 深圳市地方标准 SJG18-2009, 预制装配整体式钢筋混凝土结构技术规范[S].
 [10] 上海市地方规范 DG/TJ08-2071-2010, 装配整体式混凝土住宅体系设计规程[S].
 [11] 江苏省地方标准 DGJ32/TJ125-2011, 预制装配整体式剪力墙结构体系技术规程[S].
 [12] 北京市地方标准, 装配式剪力墙结构设计规程(征求意见稿)[S], 2012年10月
 [13] JGJ 224-2010, 预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程[S].
 [14] 安徽省地方标准 DB34/T 810-2008, 叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程[S].
 [15] 辽宁省地方标准 DB21/T1868-2010, 装配整体式混凝土结构技术规程(暂行)[S], 2011年2月1日.
 [16] 黑龙江省地方标准 DB23/Txxxx-2010, 预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构技术规范(征求意见稿)[S].
 [17] 吉林省地方标准 DB22/T1779-2013, 装配整体式混凝土剪力墙结构体系居住建筑技术规程[S].
 [18] 河北省地方标准, 装配整体式约束混凝土柱组合梁混合结构技术规程(征求意见稿)[S].
 [19] 郭兆军, 胡克旭, 郭朋, 胡文军. 装配式板柱结构住宅建筑合理高度和跨度分析[J]. 结构工程师, 2008年5期, 18-21.
 [20] CECS 52-2010, 整体预应力装配式板柱结构技术规程[S].
 [21] JGJ 1-20xx, 装配式混凝土结构技术规程(征求意见稿)[S].
 [22] 张琰, 美国和加拿大的装配式钢结构建筑体系[J]. 建筑技术开发, 1996年第6期, 51-52.
 [23] 上海市地方标准 DGJ0869-2007, 预应力混凝土结构设计规程[S].
 [24] JGJ/T279-2012, 预应力混凝土结构设计规范[S].
 [25] JGJ140-2004, 预应力混凝土结构抗震设计规程[S].
 [26] 王崇昌, 王宗哲. 钢筋混凝土弹塑性抗震结构的机构控制理论[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1986年2期.
 [27] Jianguang Shi, Jiqiang Song, The comparative analysis on anti-seismic design between EBF and frame-shear wall structures[C], The Fifth International Conference on Tall Building, Hong Kong, Dec. 9-12, 1998.
 [28] Parra-Montesinos, G. J.; Peterfreund, S. W.; and Chao, S.-H. Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(3): 487-495.
 [29] 梁兴文, 康力, 邓明科. 塑性铰区采用纤维增强混凝土剪力墙的变形性能研究[J]. 工程力学, 第30卷第3期, 2013年3月, 256-262.
 [30] 张大长, 陈怀亮, 韩丽婷. 塑性铰区埋入高阻尼隔震橡胶后 RC 柱抗震性能的试验研究[J]. 工程力学, 第26卷第10期, 2009年10月, 102-110.
 [31] 经杰, 叶列平, 钱稼茹. 双重抗震结构体系在高层建筑中的应用[J]. 建筑科学, 2001年第17卷第1期, 42-45.
 [32] 江苏省地方标准 DGJ32/Jxx-2011, 装配整体式自保温混凝土房屋结构技术规程(征求意见稿)[S].