

绪 论

1.1 装配式建筑概述

建造房屋如果可以像“搭积木”一样,成批成套地建造,将极大地提高建造速度,降低建造周期和成本。这种采用“搭积木”似的建造手段而形成的建筑称为装配式建筑。其实装配式建筑古已有之,我国很多古建筑中就采用了装配组装的方式,仅通过榫卯连接的方式就可以建造完成。从木质榫卯结构建筑技术到砖木结构、砖石结构,华夏民族能工巧匠不断传承和发展。著名的历史奇迹北京故宫(图 1-1)、天坛(图 1-2)、应县木塔,还有全国各地历史古迹中的各种庙宇、亭台楼阁,虽历经数百年,甚至上千年依然熠熠生辉、坚固如初。随着社会的发展和建筑技术的进步,装配式建筑结构也不断发展出各式各样的结构形式,朝着工业化、绿色化和信息系统集成的方向发展。



图 1-1 故宫博物院

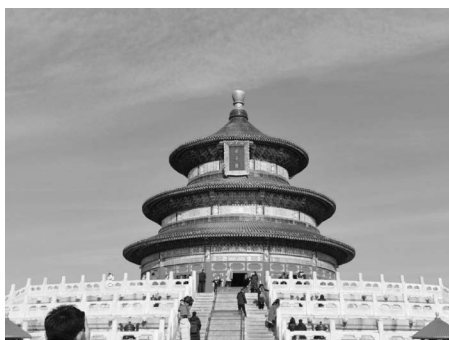


图 1-2 天坛祈年殿

1.1.1 装配式建筑的定义

根据装配式混凝土建筑技术标准中的定义,装配式建筑是指结构系统、外围护系统、设备与管线系统、内装系统的主要部分采用预制部品部件集成的建筑。这种建筑的施工方法与传统的现浇结构不同,包括多种不同的预制构件。预制构件在工厂先进行加工,包括预制梁、板、柱、阳台、雨棚、楼梯等,再通过运输工具运送到建设现场,最后采用不同的连接方式

将其拼装成不同结构形式。

装配式建筑的组织过程可分为三个阶段：①设计阶段，将建筑的各种构件拆分为标准构件和非标准构件；②预制阶段，建筑所需构件在工厂里采用专用模具进行预制加工并运至施工现场；③施工阶段，使用大型起重机械现场组装各种构件。构件定位安装后，通过可靠连接节点形成完整的建筑结构。相较于传统的、分散的手工业生产方式，装配式建筑采用工业化生产方式，即现代化的制作、运输、安装和科学管理的大工业生产方式。

装配式建筑涉及建筑产业现代化、新型建筑工业化和绿色建筑等概念，下面分别叙述。

(1) 建筑产业现代化。建筑产业现代化是以绿色发展为理念，以住宅建设为重点，以新型建筑工业化为核心，广泛运用现代科学技术和方法，以工业化、信息化的深度融合对建筑全产业链进行更新、改造和升级，实现传统生产方式向现代工业化生产方式转变，从而全面提高建筑工程的效率、效益和质量。

(2) 新型建筑工业化。早在 20 世纪 50 年代中期，原建工部借鉴苏联经验，第一次提出实行建筑工业化。70 年代中期，原国家建委提出以“三化一改”（设计标准化、构件工厂化、施工机械化和墙体改革）为重点，发展建筑工业化，同时在北京、上海、常州开展试点并进入大发展时期。80 年代末期，因工程质量问题、唐山地震、计划经济转型等原因停止下来。新型建筑工业化是建筑产业现代化的核心，是在房屋建造的全过程中以标准化设计、工厂化生产、装配化施工和信息化管理为主要特征的工业化生产方式，并形成完整的一体化产业链，从而实现社会化大生产。新型建筑工业化是生产方式的变革，是传统生产方式向现代工业化生产方式转变的过程。所谓“新型”的含义主要体现在信息化与建筑工业化的深度整合，其次是区别以前提倡的建筑工业化。

建筑产业现代化与新型建筑工业化是两个不同的概念，产业化是整个建筑产业链的产业化，工业化是生产方式的工业化。工业化是产业化的基础和前提，只有工业化达到一定的程度，才能实现产业现代化。建筑工业化的目标是实现建筑产业化。因此，实现建筑产业现代化的有效途径是新型建筑工业化，推动建筑产业现代化必须以新型建筑工业化为核心。

作为新型建筑工业化的核心技术体系，装配式混凝土结构有利于提高生产效率，节约能源，发展绿色环保建筑，并且有利于提高和保证建筑工程质量。相较于现浇施工工法，装配式混凝土结构施工工法更符合绿色施工的节地、节能、节材、节水和环境保护等要求，降低对环境的负面影响，包括降低噪声，防止扬尘，减少环境污染，清洁运输，减少场地干扰，节约水、电、材料等资源和能源，遵循可持续发展的原则。此外，装配式混凝土结构可以连续地按顺序完成工程的多个或全部工序，从而减少进场的工程机械种类和数量，消除工序衔接的停闲时间，实现立体交叉作业，减少施工人员，从而提高工效、降低物料消耗、减少环境污染，为绿色施工提供保障。另外，装配式混凝土结构可以在较大程度上减少建筑垃圾（占城市垃圾总量的 30%~40%），如废钢筋、废铁丝、废竹/木材、废弃混凝土等。

(3) 绿色建筑。它贯穿建筑全寿命周期，指最大限度地节约资源（节能、节地、节水、节约材料），保护环境，减少污染，为人们提供健康、适用、高效的室内空间，与自然和谐共处。

装配式建筑是实现建筑工业化，完成建筑业现代化转型的必要条件。推进建筑业现代化是我国实现建筑业转型升级的根本手段，对于促进建筑业、建材业、房地产业融合，提高建筑科技含量和生产效率，解决建筑用工紧缺问题，提高施工质量、建设质量，降低施工工期，保障施工项目安全，减少资源消耗和环境污染，都具有十分重要的意义。

1.1.2 装配式建筑分类

1. 按建筑材料划分

装配式建筑按建筑材料可分为装配式混凝土结构建筑、装配式钢结构建筑、装配式木结构建筑和装配式竹结构建筑等,如图 1-3~图 1-6 所示。



图 1-3 装配式混凝土结构建筑



图 1-4 装配式钢结构建筑



图 1-5 装配式木结构建筑



图 1-6 装配式竹结构建筑

装配式混凝土结构一词来自英文 precast concrete structure,简称 PC 结构,是由预制混凝土构件通过可靠的连接方式装配而成的混凝土结构,包括装配整体式混凝土结构、全装配混凝土结构等。

装配式钢结构建筑是指按照统一、标准的建筑部品规格与尺寸,在工厂将钢构件加工制作成房屋单元或部件,然后运至施工现场,再通过连接节点将各单元或部件装配成一个结构整体。钢材具有轻质高强、易加工、易运输、易装配与拆卸的特点,所以钢结构适用于装配式的建筑体系。

装配式竹木结构建筑是采用工业化的胶合木材、胶合竹材或木、竹基复合材料作为建筑结

构的承重构件,并通过金属连接件将这些构件连接而成。《多高层木结构建筑技术标准》(GB/T 51226—2017)将装配式木结构建筑的结构体系和结构类型归纳为如下几种。

(1) 纯木结构体系:①轻型木结构;②木框架支撑结构;③木框架剪力墙结构;④正交胶合木剪力墙结构。

(2) 木混合结构体系:①上下混合木结构;②混凝土核心筒木结构体系。

2. 按结构体系划分

装配式建筑按结构体系可分为装配式框架结构体系、装配式剪力墙结构体系、装配式框架-剪力墙结构体系等。

1) 装配式框架结构

框架结构是由梁、板和柱共同组成的结构以承受房屋全部的荷载(图 1-7)。框架结构的分隔灵活,节省材料,可以较灵活地配合建筑平面布置,利于安排需要较大空间的建筑结构。通过合理设计,框架结构的梁和柱能够共同承受使用时的竖向荷载和地震时的水平荷载,具有良好的抗震性能。由于框架结构主要受力构件梁和柱易于标准化和成型化,非常适合装配式施工作业。装配式框架结构体系包括装配式混凝土框架结构体系、装配式钢框架结构体系以及装配式竹木框架结构体系等。装配式框架结构不仅可以提高施工效率,降低环境污染,还可以保证建筑结构质量,是应用最为广泛的结构体系形式之一。一般预制构件有柱、叠合梁、叠合楼板、阳台、楼梯等。

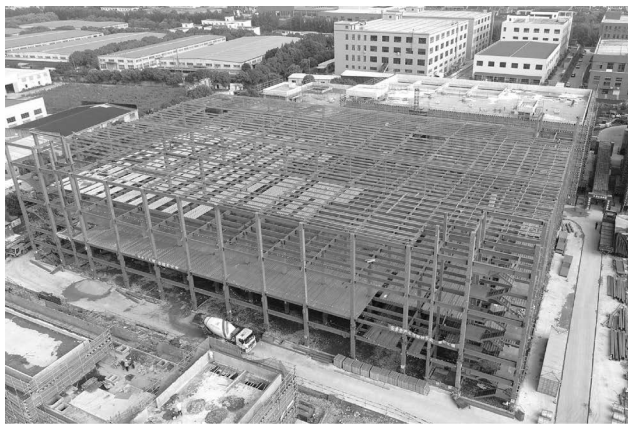


图 1-7 装配式框架结构

2) 装配式剪力墙结构

剪力墙结构在我国多、高层建筑中得到广泛的应用,装配式剪力墙结构是一种适合我国国情的工业化建筑结构体系。装配式剪力墙结构的主要受力构件包括剪力墙、梁和板,结构体系包括上述部分或全部混凝土预制构件(图 1-8)。预制构件在施工现场进行拼装,上、下墙板采用竖向受力钢筋浆锚连接或灌浆套筒连接,楼面梁板采用叠合现浇,从而形成整体。一般预制构件包括剪力墙、叠合楼板、楼梯、阳台等。

3) 装配式框架-剪力墙结构

装配式框架-剪力墙结构体系根据预制构件部位的不同,可以分为预制框架-现浇剪力墙结构、预制框架-现浇核心筒结构、预制框架-预制剪力墙结构三种形式。装配式框架-剪力

墙结构中,框架部分与装配式框架类似,剪力墙部分可采用现浇或者预制。若剪力墙布置为核心筒的形式,即形成装配式框架-核心筒结构(图 1-9)。装配式框架-剪力墙结构兼有框架结构和剪力墙结构的特点,体系中剪力墙和框架布置灵活,易实现大空间,适用于较高的建筑。



图 1-8 装配式剪力墙结构



图 1-9 装配式框架-核心筒结构

1.1.3 我国建筑工业化发展政策

2016年2月,中共中央、国务院《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》把发展新型建造方式作为今后城市规划建设管理工作的一个重要方向,提出要加大政策支持力度,大力推广装配式建筑,制定装配式建筑的设计、施工和验收规范。

2016年9月,国务院常务会议决定,大力发展钢结构、混凝土等装配式建筑。会议提出,一要适应市场需求,完善装配式建筑标准与规范;二要健全与装配式建筑相适应的发包承包、施工许可、工程造价、竣工验收等制度;三要加大人才培养力度。此次发展装配式建筑获得中央层面的支持和资源倾斜,住宅产业化、装配式建筑将进入快速发展阶段。

2016年9月,国务院办公厅《关于大力发展装配式建筑的指导意见》提出:①发展装配式建筑是建造方式的重大变革,是推进供给侧结构性改革的重大变革,是推进供给侧结构性改革和新型城镇化发展的重要举措。②坚持标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用,提高技术水平和工程质量,促进建筑产业转型升级。③力争用10年左右的时间,使装配式建筑占新建建筑面积的比例达到30%。④强化队伍建设,大力培养装配式建筑设计、生产、施工、管理等专业人才。鼓励高等学校、职业学校设置装配式建筑相关课程,推动装配式建筑企业开展校企合作,创新人才培养模式。

2016年11月,中华人民共和国住房和城乡建设部(以下简称“住建部”)在上海市召开了全国装配式建筑工作现场会。住建部党组书记、部长陈政高要求:下一步要重点抓好七项工作,努力实现装配式建筑发展的新突破。一是全面落实装配式建筑发展目标和重点任务。用10年左右的时间,使装配式建筑占新建建筑面积的比例达到30%。二是全面形成装配式建筑技术标准。三是加大基础产业建设力度。四是建设新型的职工队伍。五是进一步加大政策支持力度。六是推动建筑业管理体制机制创新。七是住建部门在发展装配式建筑中要有所作为。

2018年2月,中华人民共和国住房和城乡建设部颁布实施了《装配式建筑评价标准》(GB/T 51129—2017),明确定义了“预制率”及“装配率”等专业术语。“预制率”是指工业化建筑室外地坪以上的主体结构和围护结构中,预制构件部分的混凝土用量占对应构件混凝土总用量的体积比;“装配率”即工业化建筑中预制构件、建筑部品的数量(或面积)占同类构件或部品总数量(或面积)的比例。

我国预制混凝土技术标准编制历时10年左右,目前预制混凝土领域的国家和行业标准已基本齐备。现行的预制混凝土结构设计、构件生产、结构施工、工程验收等系列标准可指导我国建筑工程领域的装配式结构工程实施。国家主要从“结构装配化、施工机械化、装修模块化、模数统一化”四个方面来构建建筑工业化标准体系。国家从标准的属性上将标准分为“综合标准、基础标准、通用标准、专用标准”四个层次,已列入建筑工业化标准体系的基础标准有6项,通用标准有9项,专用标准有47项,这些标准名称可以从国家工程建设标准化信息网查询,主要包括:

- (1)《装配式建筑评价标准》(GB/T 51129—2017)
- (2)《装配式钢结构建筑技术标准》(GB/T 51232—2016)
- (3)《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231—2016)
- (4)《装配式木结构建筑技术标准》(GB/T 51233—2016)
- (5)《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)
- (6)《预制带肋底板混凝土叠合楼板技术规程》(JGJ/T 258—2011)
- (7)《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666—2011)
- (8)《装配式混凝土结构预制构件选用目录(一)》(16G116-1)
- (9)《装配式混凝土结构住宅建筑设计示例(剪力墙结构)》(15J939-1)
- (10)《装配式混凝土结构表示方法及示例(剪力墙结构)》(15G107-1)
- (11)《预制混凝土剪力墙外墙板》(15G365-1)
- (12)《预制混凝土剪力墙内墙板》(15G365-2)
- (13)《装配式混凝土连接节点构造》(15G310-1)
- (14)《装配式混凝土连接节点构造(剪力墙)》(15G310-2)
- (15)《桁架钢筋混凝土叠合板(60mm厚底板)》(15G366-1)
- (16)《预制钢筋混凝土阳台板、空调板及女儿墙》(15G368-1)
- (17)《预制钢筋混凝土板式楼梯》(15G367-1)
- (18)《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程(2023年版)》(JGJ 355—2015)
- (19)《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107—2016)
- (20)《装配式混凝土剪力墙结构住宅施工工艺图解》(16G906)
- (21)《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2015)

1.2 建筑产业现代化发展现状

1.2.1 国外发展现状

工业化预制技术起源于19世纪的欧洲,在20世纪初受到重视。但无论是在欧洲、日本

还是美国,其快速发展的原因有两个:一是工业革命,它导致了大量农民向城市集中,从而导致了城市化运动的快速发展;二是第二次世界大战后城市住宅需求急剧增加,同时战争的破坏导致住房存量下降,大量士兵复员,加剧了住房供需矛盾。在这种情况下,一批受工业化影响的现代主义建筑师开始考虑以工业化的方式生产住宅。

国外建筑产业现代化以住宅产业现代化为主要特征,是在住宅全寿命周期过程中引入现代科技成果与管理方式,采用现代工业化生产方式生产住宅,提高劳动生产率,降低建造和运营成本,满足节能、节水、节材、节地和环保需求,全面改善住宅的使用功能和居住质量。

1. 欧洲

制造技术方面,以德国、意大利、法国等发达国家为主的建筑工业化主要采用流水线作业进行构件生产,产品以平板类构件为主,包括墙板、叠合楼板、砌块等。法国在1891年就已使用装配式混凝土构件,迄今已有130多年的历史。法国建筑工业化以混凝土体系为主,钢、木结构体系为辅。结构形式上多采用框架或板柱体系。德国装配式住宅主要采取装配式叠合板体系。预制墙板由两层预制板与格构钢筋制作而成,现场就位后,在两层板中间浇筑混凝土,共同承受竖向荷载和水平力作用。该结构能很好地结合现浇混凝土结构和装配式混凝土结构的特点,基本不存在一般装配式剪力墙的拼缝薄弱环节,能够大幅度减少模板和支架的用量,节省工程费用,并且墙体轻便,大体量的构件也能应用。德国也是世界上建筑能耗降低幅度发展最快的国家,直至近几年提出零能耗的被动式建筑。瑞典和丹麦早在20世纪50年代开始就已有大量企业开发了预制混凝土板墙部件。目前,新建住宅中通用部件占到了80%,既满足多样性的需求,又达到了50%以上的节能率。在设计技术方面,欧洲大部分地区的住宅为低层住宅,且抗震要求不高,因此房屋以板墙为主,连接构造相对简单。

2. 美国

美国在20世纪70年代能源危机期间开始实施配件化施工和机械化生产。美国城市发展部出台了一系列严格的行业标准、规范,一直沿用至今,并与后来的美国建筑体系逐步融合。美国城市住宅结构基本上以装配式混凝土和装配式钢结构住宅为主,降低了建设成本,提高了工厂通用性,增加了施工的可操作性。从设计技术的角度,美国形成了一系列标准产品可供选用,主要是SP板、双T板、预制梁柱等,这些标准构件与其他非标构件和现浇构件组合,创造出丰富的建筑结构。

3. 日本

日本的建筑工业化,从设计技术来看主要强调刚柔结合的地震防灾、减灾理念。建筑结构主要分成了一些专用体系,有传统轻钢结构房屋、剪力墙板式住宅、框架结构住宅等。从预制技术来看,日本的预制生产技术主要强调质量的可靠性、耐久性,机械化水平也较高,但并不强调自动化生产线生产。

4. 新加坡

新加坡开发出15层到30层的单元化的装配式住宅,占全国总住宅数量的80%以上。通过平面布局、部件尺寸和安装节点的重复性来实现以标准化设计为核心的建筑工业化,装配率达到70%。

1.2.2 国内发展现状

20世纪90年代以后,我国现浇混凝土体系应用较广泛,但现浇混凝土结构存在的现场质量控制困难、质量不稳定等问题一直无法解决。1999年,国务院办公厅印发《关于推进住宅产业化,提高住宅质量若干意见的通知》,2006年颁布《国家住宅产业化基地实施大纲》,更加重视建筑工业化的发展方向。2008年开始探索SI住宅(SI住宅指住宅的承重结构骨架具有耐久性,而且是固定不变的,而内部的结构可以根据住户的需求灵活变化)技术研发、建设技术集成和全装修的应用试点项目,地方政府也相继出台了建筑产业现代化的政策。近年来,各级政府高度重视建筑产业现代化的工作,加快出台、编制相应的指导意见、鼓励政策、发展规划以及新的标准规范等。

(1) 国家产业政策方面:目前国家层面主要是住房和城乡建设部推进的建筑产业现代化发展纲要和实施建议,建筑产业现代化是住建部继住宅产业化和新型建筑工业化之后提出的建筑业发展战略,是推进绿色建筑行动计划的重要支撑,高度概括了我国建筑业未来转型升级的发展方向。

(2) 技术标准方面:我国预制混凝土技术标准编制历时10年左右,目前预制混凝土领域的国家和行业标准已基本齐备,现行的预制混凝土结构设计、构件生产、结构施工、工程验收等系列标准完全可以指导我国建筑工程领域的装配式结构工程实施。

(3) 房地产开发企业情况:在万科集团强力推进住宅产业化取得阶段进展的背景下,许多开发企业主动或被动关注住宅产业化和预制混凝土技术,纷纷开始尝试产业化住宅试点项目的学习和探索。

(4) 设计咨询情况:由于各地产业化政策相继出台,许多有实力的设计咨询企业开始探索向产业化方向转型,通过试点工程和专业培训相结合,全国各地迅速出现了一批产业化设计咨询团队,成为产业化发展的一大亮点。

(5) 大型建筑施工企业情况:以中国建筑集团有限公司为代表的国有大型建筑总承包企业相继开展新型建筑工业化转型升级之路,希望通过产业一体化平台建设(开发+设计+生产+施工),迅速提升企业的市场竞争力。

(6) 设备配件企业:近年来,国内外设备配件企业发展迅速,在全国各地抢滩建厂成为一大亮点。PC生产线的自动化和信息化管理水平不断提高,预制工厂的工业化水平已达到国际先进水平。

随着科技研发投入的不断加大,各项技术体系日益成熟,众多龙头企业积极探索和实践。通过试点示范的带动作用,在加快区域整体推进等方面取得了明显成效。目前,已有多省市陆续出台了推进建筑产业现代化(或住宅产业现代化)的指导意见,试点示范项目已经从个别城市、个别项目向区域或城市规模化推广方向发展,如深圳、上海、北京、长沙等地已开始在全市大面积推广。

本章小结

本章系统地介绍了装配式建筑的定义,建筑工业化和产业现代化的概念以及国内外的发展历程。通过对本章内容的学习,读者可以了解装配式建筑体系的基本内容,这对学习以

后的章节大有帮助。

复习思考题

1-1 我国现阶段工程常用的装配式结构体系包括哪些? 不同装配式建筑结构体系的优缺点是什么?

1-2 在中高烈度地震区域推广建筑工业化时,应该进行哪些方面的考量? 在进行结构体系的选择、设计和施工时需要注意哪些方面的内容?

1-3 欧美国家及日本具有完善的建筑工业化结构体系,如在国内引进和应用会出现什么问题? 国外的建筑工业化发展历程对我国有何借鉴?

装配式建筑结构设计概述

2.1 装配式混凝土结构

2.1.1 装配式混凝土结构体系

装配式混凝土结构是由预制混凝土构件通过可靠连接装配而成的混凝土结构,包括装配整体式混凝土结构、全装配式混凝土结构等。预制构件通过现场后浇混凝土、水泥基灌浆料连接形成整体的装配式混凝土结构,称为装配整体式混凝土结构。预制构件之间通过干式连接形成的混凝土结构称为全装配式混凝土结构。根据结构形式和预制方案,大致可将装配整体式混凝土结构分为装配整体式框架结构、装配整体式剪力墙结构、预制叠合剪力墙结构、装配整体式框架-现浇剪力墙结构等。

1. 装配整体式框架结构

框架结构是指由梁、板和柱组成的承重系统(图 2-1),即由梁、板和柱组成框架共同抵抗使用过程中出现的水平荷载和竖向荷载,结构中的墙体不承重,仅起到围护和分割的作用。如整幢房屋均采用这种结构形式,则称为框架结构体系或框架结构房屋。框架的主要受力构件包括梁、柱和板。全部或部分框架梁、柱采用预制构件构建成的装配整体式混凝土结构称作装配整体式混凝土框架结构,简称装配整体式框架结构(图 2-2)。

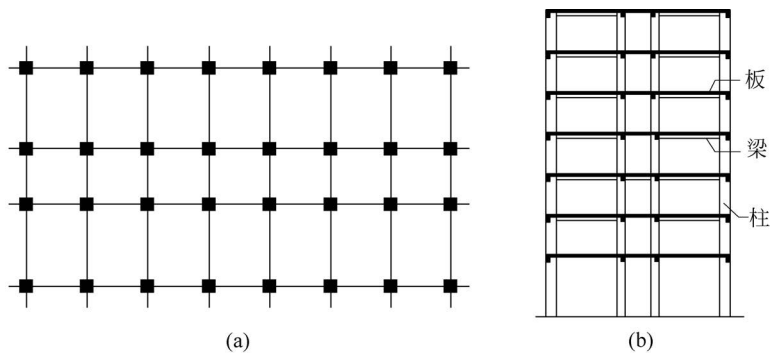


图 2-1 框架结构平面及剖面示意图

(a) 平面布置; (b) 剖面图