

0 绪 论

装配整体式混凝土结构是国内外建筑工业化最重要的生产方式之一，它具有提高建筑质量，缩短工期、节约能源、减少消耗、清洁生产等诸多优点。目前，我国的建筑体系也借鉴国外经验采用装配整体式等方式，并取得了非常好的效果。所谓装配整体式混凝土结构，是由预制混凝土构件通过可靠的方式进行连接并与现场后浇混凝土，水泥基灌浆料形成整体的装配式混凝土结构。

0.1 我国装配式混凝土结构发展历程

1. 我国装配式混凝土结构的发展历程

我国预制混凝土起源于 20 世纪 50 年代，早期受苏联预制混凝土建筑模式的影响，要应用在工业厂房，住宅，办公楼等建筑领域。20 世纪 50 年代后期到 80 年代中期，大部分单层工业厂房都采用预制混凝土建造。20 世纪 80 年代中期以前，在多层住宅和办公建筑中也大量采用预制混凝土技术，主要结构形式有：装配式大板结构、盒子结构、框架轻板结构和叠合式框架结构。20 世纪 70 年代以后我国政府提倡建筑要实现三化，即工厂化，装配化，标准化。在这一时期，预制混凝土在我国发展迅速，在建筑领域被普遍采用，为我国建造了几十亿平方米的工业和民用建筑。

到 20 世纪 70 年代末 80 年代初，基本建立了以标准预制构件为基础的应用技术体系，包括以空心板等为基础的砖混住宅，大板住宅，装配式框架及单层工业厂房等技术体系。

从 20 世纪 80 年代中期以后，我国预制混凝土建筑因成本控制过低，整体性差，防水性能差，以及国家建设政策的改革和全国性劳动力密集型大规模基本建设的高潮迭起，最终使装配式结构的比例迅速降低，自此步入衰退期。据统计，我国装配式大板建筑的竣工面积从 1983 ~ 1991 年逐年下降，20 世纪 80 年代中期以后我国装配式大板厂相继倒闭，1992 年以后就很少采用了。

进入 21 世纪后，预制部品构件由于它固有的一些优点在我国又重新受到重视。预制部品构件生产效率高、产品质量好，尤其是它可改善工人劳动条件，环境影响小，有利于社会可持续发展，这些优点决定了预制混凝土是未来建筑发展的一个必然方向。

近年来我国有关预制混凝土的研究和应用有回暖的趋势，国内相继开展了一些预制混凝土节点和整体结构的研究工作。在工程应用方面采用新技术的预制混凝土建筑也逐渐增多，如南京金帝御坊工程采用了预应力预制混凝土装配整体框架结构体系，大连某 43 层的大厦采

用了预制混凝土叠合楼面。相信随着我国预制混凝土研究和应用工作的开展，不久的将来预制混凝土将会迎来一个快速的发展时期。北京榆构等单位完成了多项公共建筑外墙挂板，预制体育场看台工程。2005年之后，万科集团、远大住工集团等单位在借鉴国外技术及工程经验的基础上，从应用住宅预制外墙板开始，成功开发了具有中国特色的装配式剪力墙住宅结构体系。

我国台湾和香港地区的装配式建筑启动以来未曾中断，一直处于稳定的发展成熟阶段。

我国台湾地区的装配式混凝土建筑体系和日本、韩国接近，装配式结构节点连接构造和抗震，隔震技术的研究和应用都很成熟。装配框架梁柱、预制外墙挂板等构件应用广泛。

我国香港地区在 20 世纪 70 年代末采用标准化设计，自 1980 年以后采用了预制装配式体系。叠合楼板，预制楼梯，整体式 PC 卫生间，大型 PC 飘窗外墙被大量用于高层住宅公屋建筑中。厂房类建筑一般采用装配式框架结构或钢结构建造。

2. 我国装配整体式混凝土结构的技术体系

(1) 我国装配整体式混凝土结构技术体系的研究。

装配整体式混凝土结构的主体结构，依靠节点和拼缝将结构连接成整体并同时满足使用阶段和施工阶段的承载力、稳固性、刚性、延性要求。连接构造采用钢筋的连接方式有灌浆套筒连接、搭接连接和焊接连接。配套构件如门窗、有水房间的整体性技术和安装装饰的一次性完成技术等也属于该类建筑的技术特点。

预制构件如何传力、协同工作是预制钢筋混凝土结构研究的核心问题，具体来说就是钢筋的连接与混凝土界面的处理。自 2008 年以来，我国广大科技人员在前期研究的基础上做了大量试验和理论研究工作，如 Z 形试件结合面直剪和弯剪性能单调加载试验，装配整体式混凝土框架节点抗震性能试验、预制剪力墙抗震试验和预制外挂墙板受力性能试验等，对装配整体式混凝土结构结合面的抗剪性能，预制构件的连接技术及纵向钢筋的连接性能进行了深入研究。2014 年，为适应国家“十二五”规划及未来对住宅产业化发展的需求，国内学者对在装配式结构中占比重较大的钢筋混凝土叠合楼板展开研究，对钢筋套筒灌浆料密实性进行研究。装配整体式混凝土结构的预制构件（柱、梁、墙、板）在设计方面，遵循受力合理、连接可靠、施工方便、少规格、多组合原则。在满足不同地域对不同户型的需求的同时，建筑结构尽量通用化、模块化、规范化，以便实现构件制作的通用化。结构的整体性和抗倒塌能力主要取决于预制构件之间的连接，在地震、偶然撞击等作用下，整体稳固性对装配式结构的安全性至关重要。结构设计中必须充分考虑结构的节点、拼缝等部位的连接构造的可靠性。同时装配整体式混凝土结构设计要求装饰设计与建筑设计同步完成，构件详图的设计应表达出装饰装修工程所需预埋件和室内水电的点位。只有这样才能在装饰阶段直接利用预制构件中所预留预埋的管线，不会因后期点位变更而破坏墙体。

从我国现阶段情况看，尚未达到全部构件的标准化，建筑的个性化与构件的标准化仍存在着冲突，装配整体式混凝土结构的预制构件以设计图纸为制作及生产依据，设计的合理性直接影响项目的成本。发达国家经验表明，固定的单元格式也可通过多样性组合拼装出丰富的外立面效果，单元拼装的特殊视觉效果也许会成为装配整体式混凝土结构设计的突破口，要通过若干年发展实践，逐步实现构件、部品设计的标准化与模数化。

目前国内装配整体式混凝土结构按照等同现浇结构进行设计。

(2) 我国装配整体式混凝土结构的技术体系种类。

目前国内常用装配整体式建筑的结构体系有：装配整体式混凝土剪力墙结构体系、装配整体式混凝土框架结构体系，现浇混凝土框架外挂预制混凝土墙板体系（内浇外挂式框架体系），现浇混凝土剪力墙外挂预制混凝土墙板体系（内浇外挂式剪力墙体系），内部钢结构框架外挂混凝土墙板体系（内部钢结构外挂式框架体系）。

近些年国内建筑产业化企业在发展装配式 PC 建筑时，所采取的技术结构体系均有所不同，大致有以下几种类型。

万科在南方侧重于预制框架或框架结构外挂板 + 装配整体式剪力墙结构，采取设计一体化，土建与装修一体化，PC 窗预埋等技术；在北方侧重于装配整体式剪力墙结构。远大住工为装配式叠合楼盖现浇剪力墙结构体系，装配式框架体系，围护结构采用外挂墙板。在整体厨卫，成套门窗等技术方面实现标准化设计。南京大地建设采用装配式框架外挂板体系，预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系。中南集团为全预制装配整体式剪力墙（NPC）体系。宝业集团为叠合式剪力墙装配整体式混凝土结构体系。上海城建集团为预制框架剪力墙装配式住宅结构技术体系。黑龙江宇辉集团为预制装配整体式混凝土剪力墙结构体系。山东万斯达为 PK（拼装，快速）系列装配整体式剪力墙结构体系。

0.2 国外装配式混凝土结构发展概况

预制混凝土技术起源于英国。1875 年，英国人雷氏提出了在结构承重骨架上安装预制混凝土墙板的新型建筑方案。1891 年，法国巴黎埃德·科金特诺思公司首次在比里亚茨的俱乐部建筑中使用预制混凝土梁。二战结束后，预制混凝土结构首先在西欧发展起来，然后推广到世界各国发达国家的装配式混凝土建筑经过几十年甚至上百年的时间，已经发展到了相对成熟，完善的阶段。但各国根据自身实际，选择了不同的道路和方式。

美国的装配式建筑起源于 20 世纪 30 年代。20 世纪 70 年代，美国国会通过了国家工业化住宅建造及安全法案，美国城市发展部出台了一系列严格的行业规范标准，一直沿用到今天。美国城市住宅以“钢结构 + 预制外墙挂板”的高层结构体系为主，在小城镇多以轻钢结构，木结构低层住宅体系为主。

法国、德国住宅以预制混凝土体系为主，钢、木结构体系为辅。多采用构件预制与混凝土现浇相结合的建造方式，注重保温节能特性。高层主要采用混凝土装配式框架结构体系，预制装配率达到 80%。

瑞典是世界上住宅装配化应用最广泛的 国家，新建住宅中通用部件占到了 80%。

丹麦发展住宅通用体系化的方向是“产品目录设计”，它是世界上第一个将模数法制化的国家。

日本于 1968 年就提出了装配式住宅的概念。1990 年推出了采用部件化，工业化生产方式，追求中高层住宅的配件化生产体系。2002 年，日本发布了《现浇等同型钢筋混凝土预制结构设计指针及解说》。日本普通住宅以“轻钢结构和木结构别墅”为主，城市住宅以“钢结构或预制混凝土框架 + 预制外墙挂板”框架体系为主。

新加坡自 20 世纪 90 年代初开始尝试采用预制装配式住宅，预制化率很高，其中新加坡最著名的达士岭组屋，共 50 层，总高度为 145 m，整栋建筑的预制装配率达到 94%。

0.3 装配式建筑评价指标

装配式混凝土建筑相对于现浇建筑，其承重墙体、柱、梁、楼板等主体结构和围护结构，以及内部装饰部品、设备管线等都是工厂预制在施工现场装配的，总体实现了建造方式的转型，提高了工程质量和效率。

为了保障装配式建筑评价质量和效果，住房和城乡建设部颁布了国家标准《工业化建筑评价标准》(GB/T 51129—2015)。根据该标准的规定，装配式建筑评价分为项目预评价和项目评价(指项目最终评价结果)。项目预评价一般在设计阶段完成后进行，主要目的是促进装配式建筑设计理念尽早融入项目实施中。如果项目预评价结果满足基础项评价要求，对于发现的不足之处，申请评价单位可以通过调整和优化方案进一步提高装配化水平；如果评价结果不满足基础项评价要求，申请评价单位可以通过调整和修改设计方案来满足要求。若申请评价项目在主体结构和装饰装修工程通过竣工验收后进行评价，则评价后得到项目最终评价结果。

预制率、装配率是评价装配式建筑的两项重要指标，也是政府制定装配式建筑扶持政策的主要依据指标。目前，国内对这些指标的评价还没有统一标准，这里从概念入手来进行解释。

任何移动装配式混凝土建筑都不可能做到 100% 预制，为了保证建筑整体性，主体结构施工必须采用部分现浇方式。《工业化建筑评价标准》(GB/T 51129—2015)给出定义，预制率为工业化建筑室外地坪以上主体结构和围护结构中预制部分的混凝土用量占对应构件混凝土总用量的体积比。其计算公式为

$$\text{预制率} = \frac{\text{预制构件部分的混凝土体积}}{\text{对应构件混凝土总体积}}$$

《工业化建筑评价标准》(GB/T 51129—2015)规定，上述混凝土结构部分是指主体结构和围护结构部分，并要求预制率不低于 20%。但上述计算方式也存在一定问题，主要是混凝土体积计算比较烦琐，对上部结构中是否考虑非承重隔墙、地下室等混凝土未予明确。

装配式建筑中还有一个指标称为装配率，其定义为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)的比率(实际评价规则中，不含已经算预制率的构件)。该值要求不低于 50%，用公式表示为

$$\text{装配率} = \frac{\text{预制构件、建筑部品的数量(或面积)}}{\text{同类构件或部品的总数量(或面积)}}$$

值得注意的是，这里装配率计算只针对单独构件或建筑部品，未提出单栋建筑的装配率计算方法。

目前，许多地方都开始大力推行装配式建筑，并编制了相应的地方标准，各地标准有所不同，这里不再一一叙述。

0.4 装配式混凝土结构的发展展望

1. 装配整体式混凝土结构的发展意义

(1) 提高工程质量和施工效率。通过标准化设计，工厂化生产，装配化施工，减少了人操作和劳动强度，确保了构件质量和施工质量，从而提高了工程质量和施工效率，减少资源、能源消耗，减少建筑垃圾，保护环境。由于实现了构件生产工厂化，材料和能源消耗均处于可控状态；建造阶段消耗建筑材料和电力较少，施工扬尘和建筑垃圾大大减少。

(2) 缩短工期，提高劳动生产率。由于构件生产和现场建造在两地同步进行，建造、装修和设备安装一次完成，相比传统建造方式大大缩短了工期，能够适应目前我国大规模的城市化进程。

(3) 转变建筑工人身份，促进社会稳定、和谐。现代建筑产业减少了施工现场临时工的用工数量，并使其中一部分人进入工厂，变为产业工人，助推城镇化发展。

(4) 减少施工事故。与传统建筑相比，产业化建筑建造周期短、工序少，现场工人需求量小，可进一步降低发生施工事故的概率。

(5) 施工受气象因素影响小。产业化建造方式大部分构配件在工厂生产，现场基本为装配作业，且施工工期短，受降雨、大风、冰雪等气象因素的影响较小。

随着新型城镇化的稳步推进，人民生活水平不断提高，全社会对建筑品质的要求也越来越高。与此同时，能源和环境压力逐渐加大，建筑行业竞争加剧。建筑产业现代化对推动建筑业产业升级和发展方式转变，促进节能减排和民生改善，推动城乡建设走上绿色、循环、低碳的科学发展轨道，实现经济社会全面、协调，可持续发展，不仅意义重大，更迫在眉睫。

2. 装配整体式混凝土结构的发展展望

我国在装配式结构的研究上已取得了一些成果，许多高校和企业为装配式结构的推广做出了贡献，同济大学、清华大学、东南大学及哈尔滨工业大学等高校均进行了装配式框架结构的相关构造研究。在万科集团、远大住工集团等企业的大力推动下，装配式结构也得到了一定的推广应用。但目前主要的应用还是一些非结构构件，如预制外挂墙板，预制楼梯及预制阳台等，对于承重构件的应用（如梁，柱等）还是非常少。我国装配式结构未来的发展主要体现在以下几个方面：

(1) 装配整体式混凝土结构在国内研究应用的较少，也很少有完整的施工图，国内仅有少量的设计院能够做装配整体式混凝土框架结构的设计，设计技术人员缺少，使之难以推广。我国应根据国家出台的相关规范，运用新的构造措施和施工工艺形成一个系统，以支撑装配式结构在全国范围内的广泛应用。

(2) 目前，我国的工业化建筑体系处在专用体系的阶段，未达到通用体系的水平。只有

实现在模数化规则下的设计标准化，才能实现构件生产的通用化，有利于提高生产效率和质量，有助于住宅部品的推广应用。

实现建筑与部品模数协调、部品之间的模数协调、部品的集成化和工业化生产土建与装修的一体化，才能实现装修一次性到位。达到加快施工速度，减少建筑垃圾，实现可持续发展的目标。

(3) 装配式结构在我国发展存在间断期，使得掌握这项技术的人才也产生了断代，且随着抗震要求的不断提高，混凝土结构的设计难度也更大了。我们应提高装配式结构的整体性能和抗震性能，使人们对装配式结构的认识不只停留在现浇结构上，积极推广装配整体式混凝土结构，推进应用具有可改造性的长寿命 SI 住宅。

(4) 装配整体式混凝土结构预制构件间的连接技术在保证整体结构安全性、整体性的前提下，尽量简化连接构造，降低施工中不确定性对结构性能的影响。目前我国预制构件的连接方法主要采用套筒灌浆与浆锚连接两种，开发工艺简单、性能可靠的新型连接方式是装配整体式混凝土结构发展的需要。

(5) 日本于 1974 年建立了住宅部品认定制度，经过认定的住宅部品，政府强制要求在公营住宅中使用，同时也受到市场的认可并普遍被采用。

我国建筑预制构件和部品生产单位水平参差不齐、所生产的产品良莠不一。目前我国缺乏专门部门对其进行相关认定。这既不利于保证部品及构件的质量，也不利于企业之间展开充分竞争。我国可以学习日本住宅部品认定制度经验，建立优良住宅部品认定制度，形成住宅部品优胜劣汰的机制。建立这项权威制度，是推动住宅产业和住宅部品发展的一项重要措施。

(6) 目前我国装配整体式混凝土结构处于发展初期，设计、施工、构件生产、思想观念等方面都在从现浇向预制装配转型。这一时期宜以少量工程为样板，以严格技术要求进行控制，样板先行再大量推广。应关注新型结构体系带来的外墙拼缝渗水、填缝材料耐久性、叠合板板底裂缝等非结构安全问题，总结经验，解决新体系下的质量常见问题。