

无粘结预应力 装配钢筋混凝土 结构研究

UNBONDED PRESTRESSED PRECAST
REINFORCED CONCRETE STRUCTURE RESEARCH

韩建强 杨志年 尤志国 付秀艳 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

无粘结预应力装配钢筋混凝土 结构研究

Unbonded Prestressed Precast
Reinforced Concrete Structure Research

韩建强 杨志年 尤志国 付秀艳 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无粘结预应力装配钢筋混凝土结构研究/韩建强等著. —武汉:武汉大学出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-307-16254-9

I. 无… II. 韩… III. 预应力—钢筋混凝土结构—研究 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 148551 号

责任编辑:蔡 巍 责任校对:路亚妮 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:271 千字

版次:2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16254-9 定价:62.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

无粘结预应力装配式混凝土框架结构是一种新型结构体系,目前国际上对其研究正在逐步深入,相对于有粘结预应力装配式结构,对无粘结预应力装配式结构及其性能的研究还处于起步阶段。国内对无粘结预应力装配式混凝土框架结构的研究较少。近年来,预应力结构已广泛用于房屋建筑、桥梁工程、水工结构、海工结构、港口码头及特种结构中。然而装配式结构主要应用在一些城市高铁和桥梁工程中,在民用建筑方面,装配式结构的发展速度非常缓慢。为了从根本上改善我国的建筑业,实现机械化、工业化施工,必须完成对建筑业的技术改造,探索新型结构体系。本书结合课题组的研究,对无粘结预应力装配钢筋混凝土结构受力特征和破坏机理进行较为深入、系统的研究。

本书由华北理工大学建筑工程学院韩建强、杨志年、尤志国、付秀艳撰写,书中的实验数据和研究成果是由著者于2006—2011年在北京工业大学攻读博士研究生期间和毕业后主持的国家自然科学基金项目(51208171)所研究的内容组成。本书的编写得到了学院领导的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

本书的研究成果得到了国家自然科学基金青年基金项目(批准号:51208171)的资助。

本书可供钢筋混凝土装配结构的研究和技术人员自学使用和参考,也可供大专院校土木工程相关专业作为研究生实践教材使用。

由于作者水平有限,书中难免会出现错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

著 者

2015年4月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 无粘结预应力装配钢筋混凝土结构的研究背景	(3)
1.3 本书主要研究内容和研究意义	(18)
2 无粘结预应力装配式框架结构基本原理	(20)
2.1 无粘结预应力装配构件连接截面受力分析	(20)
2.2 无粘结预应力装配式结构受弯构件跨中正截面承载力计算	(31)
2.3 预应力装配式混凝土框架节点梁端塑性铰	(32)
2.4 无粘结预应力装配式框架结构试件设计方法	(34)
2.5 本章小结	(37)
3 无粘结预应力装配中节点试验研究	(38)
3.1 试件设计	(38)
3.2 试件制作	(43)
3.3 试验装置	(47)
3.4 试验加载方案	(48)
3.5 试验测量内容	(49)
3.6 试验现象	(49)
3.7 滞回曲线与骨架曲线	(52)
3.8 节点的刚度、延性和耗能能力	(54)
3.9 本章小结	(56)
4 无粘结预应力装配边节点试验研究	(57)
4.1 试验目的	(57)
4.2 试件设计	(57)
4.3 材料力学性能	(60)
4.4 试件制作、浇筑、组装和预应力张拉	(63)
4.5 加载装置与加载方案	(67)
4.6 量测内容和仪器	(69)
4.7 试验现象	(73)
4.8 试验数据分析	(79)
4.9 本章小结	(85)
5 现浇框架和无粘结预应力装配框架结构试验研究	(87)
5.1 试验目的	(87)
5.2 试验设计	(87)
5.3 材料力学性能	(97)

5.4	试件破坏过程及破坏机制	(99)
5.5	试验结果及分析	(102)
5.6	本章小结	(110)
6	无粘结预应力装配加固框架结构试验研究	(111)
6.1	混凝土结构加固技术	(111)
6.2	加固试验目的	(113)
6.3	加固试验设计	(113)
6.4	加固试验破坏特征	(116)
6.5	加固试验结果分析	(117)
6.6	钢筋混凝土框架结构恢复力模型	(124)
6.7	节点恢复力模型骨架曲线特征点理论值	(132)
6.8	变形恢复能力	(134)
6.9	本章小结	(135)
7	无粘结预应力装配框架结构数值仿真分析	(136)
7.1	常用计算方法和计算模型	(136)
7.2	有限元分析中材料的模型及属性	(139)
7.3	在反复荷载作用下钢筋的应力-应变关系	(145)
7.4	建立框架有限元分析模型	(146)
7.5	有限元分析计算结果	(148)
7.6	无粘结预应力装配框架性能指标参数分析	(150)
7.7	本章小结	(152)
8	无粘结预应力装配框架结构推覆分析和时程分析	(153)
8.1	无粘结预应力装配框架结构推覆分析	(153)
8.2	无粘结预应力装配框架结构时程分析	(159)
8.3	梁端塑性铰的滞回曲线	(166)
8.4	本章小结	(167)
	参考文献	(168)

1 绪 论

1.1 概 述

预制装配钢筋混凝土技术是钢筋混凝土结构建筑生产方式走向工业化的关键环节。早在 19 世纪 90 年代初,法国 Ed. Coigent 公司在某俱乐部建筑中就首次采用了预制混凝土技术,但并未得到普及。由于第二次世界大战给多国造成大量工业建筑和民用建筑的破坏,尤其是西欧的一些国家。战争结束后,为了尽快恢复生产和生活,预制混凝土结构便在西欧的一些国家迅速发展起来,然后推广到了美国、加拿大、日本等国。20 世纪末期,预制混凝土结构已经广泛被用于工业与民用建筑、桥梁道路、水工建筑、大型容器等工程结构领域,发挥着不可替代的作用。

19 世纪后期,欧洲一些工程学者就提出预应力技术的概念,但早期的试验均未取得理想的效果。主要原因归结于当时采用的钢筋均为低强钢筋,再加上锚具、混凝土的收缩及徐变等因素造成的预应力损失使得有效预应力所剩值较小。

20 世纪 20—30 年代,法国工程师 E. Freyssinet 对预应力混凝土结构提出必须采用高强钢材和高强混凝土构造要求,对于预应力混凝土结构来说,这一结论在理论上取得了关键性的突破。德国工程师 E. Hoyer 利用高强钢丝与混凝土之间的粘结力研制出先张法预应力施工工艺,突破了单靠锚具传力的后张法施工工艺,促使预应力混凝土的发展迈出了关键性的一步。因此,E. Freyssinet 和 E. Hoyer 对预应力混凝土的现代发展作出了巨大的贡献。

预应力混凝土经过不断的研究和发展,在应用上已从以往的铁路桥梁、轨枕、电杆、压力水管、储罐、水塔等单一构件,扩大到高层建筑、高耸结构、地下建筑、机场跑道、核电站压力容器、水工建筑、海洋结构、大吨位船舶等复杂结构。

在 20 世纪 50 年代,我国开始研究和发展预应力混凝土结构。最初,研制出的整体式和装配式屋面梁、吊车梁、大型屋面板等预应力混凝土结构主要用于代替工业厂房和公共建筑中的钢结构,后来,随着预应力混凝土结构的不断研究和发展,预制混凝土空心楼板在我国得到了普遍应用。一些中小型钢筋混凝土结构的民用建筑逐步开始应用。1976 年唐山经历了罕见的大地震后,我国工程学者在吸取过去建筑的经验教训后,引进了南斯拉夫预制预应力混凝土板柱结构体系,即 IMS 体系。IMS 体系在经过中国建筑一局(集团)有限公司、中国建筑科学研究院等 30 多个科研、设计、施工单位的系统研究和开

发后,已累计建成近 30 万平方米的整体板柱预应力建筑结构,中国工程建设标准化协会并于 1993 年颁布了《整体预应力装配式板柱建筑技术规程》(CECS 52:93)^[1]。近年来,随着建筑工业化的发展趋势和一些大跨、重型结构的工艺需求,在房屋建筑、桥梁工程、水工结构、港口码头等多种结构中已开始广泛采用预应力结构。

目前,预应力混凝土结构已成为我国工程建设领域中的一种主要结构形式,中华人民共和国住房和城乡建设部(后简称住建部)已将预应力技术作为重点推广的技术领域,纳入编制的建设科技成果推广计划和未来的远景规划中,并将发展高效预应力混凝土结构作为我国建筑工业化发展的一项基本政策。

从实际工程中不难发现,预制装配式建筑有以下主要特点^[2-6]:

(1) 生产效率高,便于工业化发展

预制混凝土产品大部分在工厂用机械化、自动化的方式生产,生产效率高于现场浇筑混凝土的生产方式。现场安装预制构件也多采用机械化方式施工,不需要或只需要很少的现浇混凝土作业,减少了现浇混凝土的养护时间,施工方便、快捷,受季节和天气的影响较小。利用清水混凝土构件或预先做好建筑饰面的混凝土构件可以在安装后直接投入使用,省去了建筑装修过程。采用预制混凝土技术,施工工期可以显著缩短,从而带来综合经济效益的提高。

(2) 质量易保证,施工方便

据国外有关资料调查统计结果表明:预制混凝土工厂生产的混凝土强度变异系数为 7%,而施工现场生产的现浇混凝土强度变异系数为 17%。预制工厂生产的产品在强度、密实性、耐久性、防水性等方面都比现场浇筑的混凝土更有保证。构件的定型和标准化有利于机械化生产,生产条件好,质量易于控制,而且按标准严格检验出厂产品,因而质量保证率高。同时,工厂生产可以使用复杂、精细的模板,预制构件的造型富于变化,混凝土表面质量好时可以不用粉刷直接作为清水混凝土构件使用。

(3) 施工噪声低,对周围生活及工作环境影响小

预制混凝土构件在工厂制作,可以严格控制废水、废料和噪音污染。现场安装时湿作业少,施工工期短,这些都减少了对施工现场及周围环境的污染;在一些跨越交通线的工程中采用预制构件可以基本不对既有交通造成影响。

(4) 结构工期短,投资回收快,经济效益好

由于减少了现浇结构的支模、拆模和混凝土养护等时间,故加快了施工速度,缩短了施工工期。从而就缩短了贷款建设的还贷时间和投资回收周期,减少了整体成本投入,经济效益明显。预制构件表面平整、外观好、尺寸准确,并且能将保温、隔热、水电管线布置等多方面功能要求结合起来,有良好的技术经济效益。

综合以上预应力装配结构的几个主要特点可见,与传统现浇钢筋混凝土房屋相比,现浇钢筋混凝土房屋现场作业量大、建筑工人劳动强度大、生产效率低、施工速度慢、建设周期长、施工噪声大,工程质量难以控制,安全事故较多,工程质量通病屡见不鲜。而装配式钢筋混凝土房屋可避免传统建房的缺点,施工速度较传统现浇施工速度快很多,可在短期内竣工,从而缩短资金的周转周期;工人劳动强度大幅降低,交叉作业方便有序;房屋的构件在工厂制作,装配中的每道工序都可以像设备安装那样检查其精度,能确保房屋质量;

降低施工时的噪音,减少物料堆放场地,有利于环境的保护;由于工厂化的生产和现场的标准装配,使房屋制造成本逐步降低。预制混凝土结构虽然具有上述众多优点和发展前景,但因历史上一些不利的震害现象及对其抗震能力了解不多,使得相当长一段时期内,人们对预制混凝土结构在震区尤其是强震区的应用持保守态度,因此需要探索新型的装配技术并研究其抗震性能。

预应力装配式混凝土结构是一种新型建筑装配结构形式,主要施工步骤是先将预制好的梁和柱运至施工现场,采用机械把构件吊装就位,在梁柱预留孔道中穿入预应力钢筋,按照一定的施工顺序张拉预应力钢筋,通过预应力钢筋的挤压把梁、柱预制构件拼装成整体框架。在施工阶段,可以作为构件之间拼装连接手段;在使用阶段,后张预应力钢筋可以承受梁端弯矩,构成整体受力节点和连续受力框架,预制构件之间的这种连接装配结构体系称为预应力装配结构体系。后张预应力钢筋可采用有粘结预应力钢筋、无粘结预应力钢筋或部分粘结预应力钢筋多种形式。预应力连接方式不仅克服了普通装配式结构连接受力和可靠性差且整体刚度小的缺点,还在框架梁、梁柱节点区域的混凝土中建立起预压应力,从而把预应力混凝土和装配式结构有机地结合为一体,有效地提高了整体结构的刚度,形成了由预应力把预制构件装配成整体的一种新型结构形式——预应力装配混凝土结构^[7]。

这种建筑结构形式集装配技术和预应力技术的优点于一体。在建造时不需要浇筑混凝土,构件由工厂运送到施工现场进行拼装,没有绑钢筋、支模板、浇筑混凝土所带来的噪声污染,也没有浇筑、养护混凝土所产生的建筑材料的浪费和水资源的浪费。当建筑物拆除时,可以像搭积木那样把构件取下来,把建筑构件分类运回到预制厂或相关生产厂集中处理,各部分材料可以循环利用,因此预应力装配混凝土结构符合我国节约能耗的需求和建筑业可持续发展的战略选择,具有广阔的应用前景。

1.2 无粘结预应力装配钢筋混凝土结构的研究背景

1.2.1 预应力混凝土结构及研究现状

预应力混凝土结构是当代工程建设中一种不可替代的重要结构,这一观点已被国内外大量的土木工程实践充分证明。预应力混凝土技术的应用,不仅节省了钢材和钢筋混凝土,还解决了很多使用其他结构材料难以解决的工程问题。

1.2.1.1 预应力混凝土结构的特点

预应力结构是指结构或构件在承受外部荷载效应之前,预先对其在外部荷载作用下的受拉区施加预压应力,以减小结构在承受外部荷载时受拉区的拉应力,从而提高结构的抗裂性能。预应力混凝土结构充分发挥了高强钢材和高强混凝土的优势,较好地把这两种高强材料结合在一起。因此,相对于普通混凝土构件而言,预应力混凝土结构可以有效地限制构件截面裂缝宽度,提高构件刚度,减小构件挠度。

与普通钢筋混凝土结构相比,预应力混凝土结构具有如下的一些特点:

① 结构使用性能得到了有效的改善,通过对截面受拉区施加预应力,可以使结构内力得到有效的重分布,降低截面应力峰值,减小结构在使用荷载下的裂缝宽度或使结构不开裂。另外,预应力的反拱效应可以有效地减小结构的整体变形,不仅改善了结构的使用性能,还提高了结构的耐久性。

② 预应力混凝土结构由于提高了构件的刚度,因此,在相同荷载作用下,可以减小构件的截面高度,从而减轻结构自重;预应力可以有效提高大跨度、承受重荷载结构的跨高比限值。

③ 预应力混凝土结构由于预应力钢筋较强的恢复能力,当作用在结构上的活荷载部分卸载或全部卸载后,使得构件具有良好的裂缝闭合性能与变形恢复性能,从而减小了构件的残余变形,为结构后期的加固和修复打下良好的基础。

④ 在普通钢筋混凝土结构中,由于裂缝宽度和挠度的限制,难以充分发挥高强钢材的强度。而预应力混凝土结构中,通过对高强钢材预先施加较高的拉应力,则可充分利用高强材料,使其在结构破坏前能够达到其屈服强度或名义屈服强度。

⑤ 由于预应力钢筋的预压作用可以延缓截面斜裂缝的产生,增加了截面剪压区面积,构件的抗剪承载力可以得到有效的提高。另外,预应力钢筋的预压作用还可以有效降低钢筋的应力循环幅度,增加疲劳寿命,特别是对以承受动力荷载为主的桥梁结构,效果更为显著。

⑥ 预应力混凝土结构与普通钢筋混凝土结构相比,混凝土用量可以节省 20%~40%,钢材可以节省 30%~60%;而与钢结构相比,则可以节省一半以上的造价。由此可见,采用预应力混凝土结构相对于普通混凝土结构具有良好的经济性。

⑦ 目前,预应力混凝土结构已经在较多工程领域得到应用,但从前期的研发和投入上来讲,成本还相对较高,再加上相应的设计、施工等比较复杂。因此,针对预应力混凝土结构的研究工作还有待于进一步的深入和完善。

1.2.1.2 预应力混凝土结构的发展及应用现状

工程界学者早在 19 世纪 80 年代就开始尝试用张拉钢筋的方法来改善钢筋混凝土梁的抗裂性能,但这些早期的试验都由于预应力损失过大而未能获得理想的效果。随后法国工程师 E. Freyssinet 对预应力混凝土的现代发展贡献较大。他通过考虑混凝土收缩、徐变等因素对预应力损失的影响,于 1928 年提出了预应力混凝土结构采用高强钢材、高强混凝土的必要性,使预应力混凝土得以实现理想的抗裂效果,混凝土结构理论的发展就此进入了一个崭新的历史时期。当时对高强钢材施加预应力的目的,只是为了改变混凝土的受力性能,用预压应力来抵消初期承受的拉应力,使材料实现弹性受力。这种混凝土截面没有受力区,即后来所谓的“全预应力混凝土”。预应力混凝土自问世以来,不仅广泛应用在一般的工业与民用建筑中,还在高层建筑、大跨度结构和高耸结构中取得了令人瞩目的发展。

美国混凝土学会(ACI)对关于什么是预应力混凝土这一问题给出了最初的定义,即预应力混凝土是根据需要,人为地引入某一数值与分布的内应力,用以部分或全部抵消外荷载应力的一种加筋混凝土。几十年来,通过各国工程界学者对预应力混凝土结构的不断

断努力探索,在预应力混凝土结构性能的研究、计算理论、设计方法及工程实践等方面都取得了长足的发展。现代预应力结构较非预应力结构而言,不但具有受力性能好、使用性能优越、跨越能力强、耐久性高、轻巧、美观等优点,而且较为经济、节能,因而在工程领域得到不断的推广和应用,是当代土木工程中的一种重要结构形式,也是当代土木工程中的一项高新技术。

1938年,奥地利的 F. Emperger 从经济的角度出发,对普通钢筋混凝土梁提出用附加少量预应力筋的方法来改善钢筋混凝土的抗裂性能和挠度。

1940年, P. W. Abeles 为了改善“全预应力混凝土”的性能,提出用减少预应力筋和增加普通钢筋的想法,这就是“部分预应力混凝土”的思想。部分预应力是预应力混凝土设计思想的又一创新和突破。这一设计准则是允许预应力构件在正常使用极限状态截面出现拉应力,甚至出现裂缝,但必须满足裂缝宽度符合规范要求,不能影响结构的正常使用和耐久性。部分预应力混凝土结构不仅改善了普通混凝土结构的抗裂性,提高了结构刚度,还使材料强度得到充分利用;同时又降低了预应力度,改善了结构的延性。但由于部分预应力混凝土结构施工、设计等方面的复杂性,直到 1970 年,部分预应力混凝土结构才被纳入 CEB-FIP 模式规范,为世界各国工程界学者所接受。

1950年, R. B. B. Morrman 提出用一组等效荷载来代替预应力束的作用。1964年,林同炎提出荷载平衡法,指出预应力束的作用可以用重力荷载来等效,从而为工程设计人员提供了合理选择预应力筋线型和预应力大小的准则。这些思想促使人们从不同的角度来探讨预应力混凝土结构的受力机理。

随着预应力混凝土结构研究的不断深入和创新,预应力混凝土和预应力技术得到迅猛发展,在建造高(高层建筑结构和高耸结构)、大(大跨度和大空间结构)、重(重载结构)、特(特种结构及特殊用途)工程时,已成为首选的结构形式和技术,在许多跨世纪的、大型的、巨型的工程中,如上海的杨浦大桥、南浦大桥、东方明珠电视塔、浦东国际机场等工程,均采用了预应力技术。由此可见,预应力混凝土结构已经渗透到土木工程中的各个领域。另外,高层建筑结构可以采用无粘结预应力平板和预应力扁梁,有效降低层高,简化模板,加快施工进度,同时可以节约可观的钢材。因此,住建部、国家各部委均将其列入我国今后发展纲要中的新技术推广项目。

预应力混凝土在工程实践中已经显示了其无限的潜力,但同时为预应力混凝土设计理论提出了许多研究问题,因此,有待对预应力混凝土结构的应用理论作进一步的研究和完善。

1.2.2 预制装配式结构及研究现状

1.2.2.1 预制装配式结构的特点

预制装配是指建筑物所需的构件或部分构件在工厂加工、制作、养护,然后运至施工现场,利用施工机械进行拼装连接的建筑形式。预制混凝土结构的建造工序一般可分为:设计、制造、运输、安装、装饰等几个环节。由于第二次世界大战给前苏联、欧洲等国家造成战后劳动力的极度紧张,住房极端困难。随着许多国家城市经济建设的不断发展和科学技术的不断创新,城市人口急剧增加,过去房屋建筑的现状已不能满足需求。如何加快

工程进度,减轻劳动强度已成为当时工程领域急需解决的问题。在此背景下,装配式建筑便应运而生,成为建筑工业化的一种必然趋势。到了20世纪中后期,在上述国家中,装配式建筑已形成了自己的建筑体系,成为一种主要的建筑形式。联合国经济社会事务部在1974年对欧洲各国建筑工业化状况进行调查后指出:建筑工业化是20世纪不可逆转的潮流。国际建筑研究与文献委员会也在1989年的第十一届大会上将建筑工业化视为当代建筑技术发展的趋势之一。

发达国家都比较重视研究能较好、较快和较省地建造房屋的结构形式。特别是对减少工时消耗、降低建筑造价和节省建筑材料用量,并且对环境保护具有可持续效益的建筑结构体系和形式的研究。要实现上述目标,就必须走建筑工业化道路,使建筑物的设计、制作、运输和安装等都实现工业化。装配式钢筋混凝土结构的特点正好符合了建造工程领域的这一发展趋势。对于居住建筑、工业建筑和公共建筑来说,都适合采用装配式钢筋混凝土结构。在建筑生产实践中,预制及装配结构的应用历史悠久。同时,装配式混凝土结构相对于传统混凝土结构而言,具有能使构件进行工业化生产的优势,可以提高施工进度,缩短工期,在近几十年来的工程实践中已经得到了充分的证实和应用。装配式混凝土结构的应用和推广,已经给整个建筑业的发展带来了深刻的变化。即使在钢材比较富足的国家,由于不断地对装配式钢筋混凝土建筑的结构方案、预制过程、预制构件的运输和安装等进行多方面的研究、发展和完善,使得装配式钢筋混凝土结构具有较强的竞争能力。

实践证明,预制装配式结构已成为现代钢筋混凝土结构的一个工业化生产方式。除了在特殊的场合外,相对于传统的钢筋混凝土结构而言,装配式钢筋混凝土结构具有独特的优势。具体表现在以下几个方面^[8,9]:

① 预制构件的工业化生产大大提高了劳动生产效率;构件采用定型化和标准化后,使得高度机械化和半自动化的预制生产线可以投入工业化生产;装配过程中投入现代化的机械系统和先进的生产技术可以重复相同的工作程序,提高机械使用效率。这些都可以显著降低工时消耗,加快施工进度。法国传统建筑中,每平方米用工约为20个工时,在采用了装配式建筑体系后,实现了工业化施工方法,每平方米用工可节省约9个工时。

② 大量使用预制构件可显著缩短施工工期,加快资金周转;由于大量构件可以预制,因此,除安装之外的工序可以同时进行。而传统的现浇建造方法的各工序在时间上则是依次进行的,不能同时进行。例如,日本100户的五层住宅的建设工期,采用传统施工方法约为240 d,同样的工程,采用装配式结构后,构件通过工厂预制,采用现场机械吊装的施工方法,工期可缩短约25%。

③ 预制构件采用工厂化生产后,可以充分利用高强混凝土的力学性能,从而实现高强混凝土的应用和推广,随着工业化的普及便可以减少建筑构件的体积并降低造价。另外,建筑构件通过在固定工厂中的工业预制,还可以克服建筑工业的季节性,实现施工的连续性。

④ 由于预应力混凝土结构可以减小结构截面尺寸,提高构件的抗裂性能和减小构件的变形,利用这一优势,预制装配式结构还可以建造出大跨度的建筑物。

⑤ 现浇混凝土结构中,模板只能应用3~5次,使用效率较低,而对于同样的建筑形

式和加工方法,预制用的木模板可用到 60 次。对于标准化的构件,还可以采用更耐用的钢模板。可见,预制装配钢筋混凝土框架可节省大量价值昂贵的模板材料。

预制混凝土和现浇混凝土相比也有不足之处,主要表现在以下几点:

① 整体性较差。预制混凝土结构由预制构件在现场拼装而成,如果未能精心设计连接节点保证施工质量,就容易出现结构整体性和冗余度差的问题。在过去发生的次地震中发现部分预制混凝土结构破坏严重^[10](图 1-1、图 1-2),预制混凝土结构的抗震问题在一定程度上限制了其在地震区的推广应用。

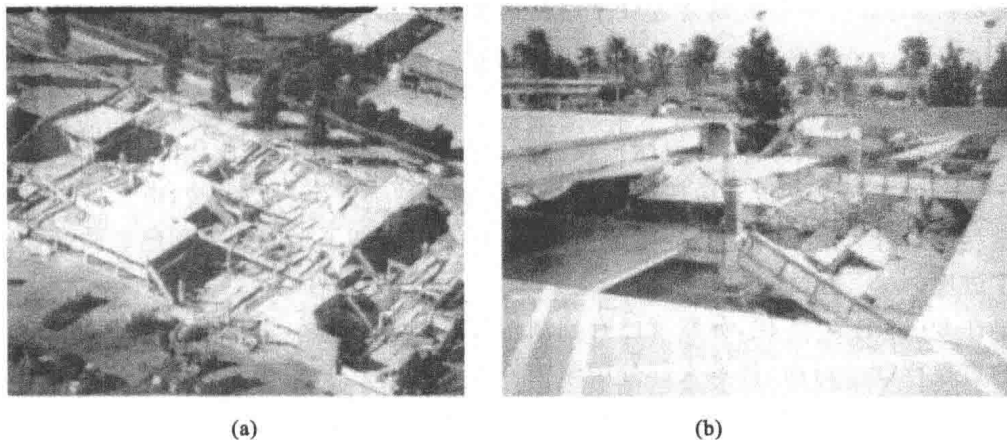


图 1-1 美国 Northridge 地震中部分预制混凝土结构破坏情况 (Englekirk, 2004)

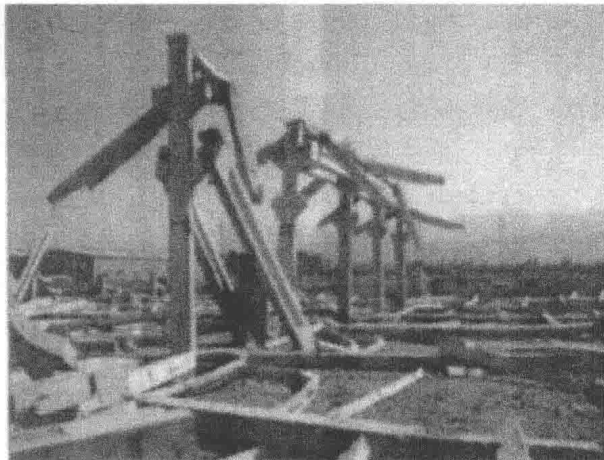


图 1-2 土耳其 Marmara 地震中预制混凝土结构破坏情况 (Korkmaz, 2005)

② 设计难度较大。一般结构工程师比较熟悉现浇混凝土结构的设计方法,对预制混凝土结构的设计方法、特点和构造不熟悉。Ariditi 对美国预制混凝土行业的调查表明:缺乏熟练的预制混凝土结构设计人员和施工技术人员是限制预制混凝土结构推广应用的一个重要原因。

③ 运输安装问题。预制构件一般在预制工厂制作,然后运输到现场安装,这一方面需要大型运输和安装设备,另一方面也增加了运输成本,因此预制构件一般在施工现场附近的预制工厂制作,避免长途运输。对运输困难的大尺寸构件也可以在施工现

场预制,但这种情况下预制构件的质量和生产效率又无法像在专业工厂中那样得到很好的保证。

④ 初期设备投资大,经济指标优势不明显。预制混凝土的推广必须先期建设预制构件厂,这就需要很大的初期投资,在运输和安装过程中也需要大型的运输和安装设备,而且预制混凝土设计、生产和安装都要求有较高的技术,这些都提高了预制混凝土应用的门槛。Ariditi 对美国预制混凝土行业的调查表明:大约一半的承包商认为采用预制混凝土不能降低工程造价,这也是限制预制混凝土推广应用的一个原因。

1.2.2.2 国外装配式钢筋混凝土结构的发展及应用现状

随着建筑工业化的不断推进,装配式钢筋混凝土结构得到了不断的发展和应用,其应用领域也在不断扩大。

目前,在住宅建筑方面,各发达国家都已大部分或全部走向工业化的道路。已基本淘汰黏土烧制的小砖。在设计阶段就已经把房屋的各种部件(包括水、暖、电设备)都进行了成套定型的设计,以便于成套、成批量生产,这样不仅提高了生产效率和建筑质量,又可加快施工进度。

早在 20 世纪 70 年代,苏联就已有预制构件厂 4500 多家,可见其对预制装配式结构发展的重视程度。目前,日本大部分房屋构件都是在工厂制造出来的。如大和房屋工业株式会社生产的钢结构单门独院,就是采用预制装配式的房屋,其制造工艺流程简单、快捷,每栋房屋从客户订货到制造、装配完毕,全部过程仅需几十天。应用实例见图 1-3。

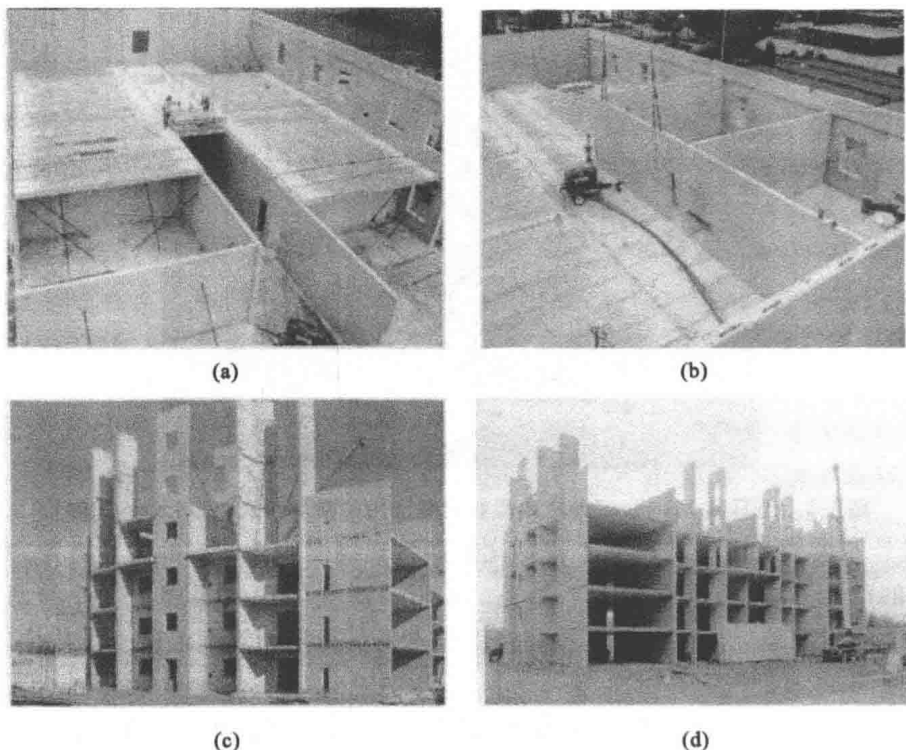


图 1-3 预制装配混凝土结构应用实例

在其他东欧国家,装配式建筑也得到了较程度的发展,东欧各国大量的工业厂房和多层民用建筑都是采用预制装配技术建造的。其中南斯拉夫的IMS体系的基本原理是用后张法将预制楼板和柱子连接起来,在板柱之间形成预应力摩擦节点,依靠四角摩擦力把楼板的垂直荷载传给柱子,依靠剪力墙把主要水平荷载传至基础。在1969年和1981年南斯拉夫班亚·卢卡地区强烈地震中,IMS体系经受住了考验,表现出了良好的抗震性能,如今已被广泛应用于古巴、匈牙利、安哥拉和埃及等国。

美国未出现过欧洲国家在第二次世界大战后曾遇到的房荒问题,因此,美国发展建筑工业化的道路与其他国家有所不同,其很少提及“建筑工业化”。但由于其物质技术基础雄厚,商品经济发达。其建筑业的发展仍然是沿着建筑工业化道路前进的,而且已经达到了较高水平。在全国各地分布着数千家混凝土预制构件制品厂,所提供的预制构件包括梁、柱、板和桩等八大类53种产品,其中单T形板、双T形板、空心板和槽形板应用最广。此外,过去一些人工难以完成的复杂的装配施工工艺,随着高度发达的建筑机械化也都得以实现,从而大大促进了美国装配式建筑结构的发展。美国的住宅、工业、文化和体育建筑等各个工程领域都有装配式建筑结构体系的应用。如坐落在美国的亚利桑那州的菲尼克斯会议中心,圆屋顶直径约200英尺(61 m),是由90英尺(27.4 m)的大型轻混凝土预制构件在现场浇筑而成的,整个屋顶由32块双T形板组成,每块重达45 t。

预制混凝土结构在日本、西欧、北美等发达国家应用相当广泛,比如,在美国,预制混凝土结构在土木工程中的应用比重为35%,在俄罗斯达到50%,在欧洲发达国家平均比重达40%以上,尤其是在美国和加拿大等国,预制预应力混凝土结构占预应力混凝土用量的80%以上。

综上所述,通过近几十年来对预制装配式混凝土结构的不断研究和完善,各国都创办起了不同规模程度的生产预制建筑构件的工厂。在设备良好的固定的混凝土工厂里生产预制构件,工地越来越多地变成了提供安装构件的场所。大量的试验研究和工程经验证明,预制装配式混凝土结构体系可以达到工程需要的强度、刚度、延性和整体性。通过技术上的不断进步和创新,已经基本上可以实现对任何常用的框架结构都可以采用拼装预制构件的做法,且这种整体结构体系可以达到满足要求的抗震能力。

1.2.2.3 国内装配式钢筋混凝土结构的发展及应用现状

我国政府从新中国成立初就对建筑工业化的发展十分重视。20世纪50年代,我国开始以装配化和施工机械化为重点,在重点工业建设项目中借鉴前苏联经验发展建筑工业化。

1956年,在关于加强和发展建筑工业化的决定中,国务院明确指出:“为了从根本上改善我国的建筑业,必须积极地有步骤地实现机械化、工业化施工,必须完成对建筑业的技术改造,逐步地完成向建筑工业化的过渡。”通过二三十年的研究和探索,我国在设计标准化、构件生产工厂化、施工机械化等方面都取得了进展;并形成了符合我国国情的装配式混凝土建筑形式。20世纪70年代,北京和上海的混凝土结构房屋中有30%以上采用了装配式混凝土结构建造。

目前,在我国常见的预制混凝土结构概括起来主要有以下几种类型:

① 预制混凝土单层厂房。这种结构类型的预制混凝土结构主要由预制混凝土基础,预制混凝土梁、板、柱等预制构件组成。梁和板构件可采用先张预应力方法预制,当跨度

很大时可将多段构件采用后张预应力的方法拼装成整体。

② 预制混凝土多层房屋。这种结构类型主要用于多层预制混凝土厂房、办公楼、公寓建筑等。主体结构形式有预制混凝土框架结构、剪力墙结构等。

③ 屋盖结构。即板梁合一的屋盖结构,这种结构构件形式在德国和意大利等国已发展成为标准结构构件,板的宽度一般不超过 2.5 m。当跨度不超过 15 m 时,采用双 T 形屋盖较经济;当跨度为 12~30 m 时,可以采用单 T 形屋盖或采用折板结构。

在我国,目前已具备了相当的构配件与制品的生产能力,据不完全统计,20 世纪末我国钢筋混凝土构件生产厂已超过千家,职工总数十几万人,年生产量达千万立方米。

1976 年的唐山大地震后,我国整体板柱建筑“IMS”的研究和开发开始启动。我国曾在住宅建设方面广泛推广和应用预应力装配式大板建筑,并通过实践积累了丰富的工程经验,科研单位也已在该领域取得相当的科研成果。并于 1993 年推出了《整体预应力装配式板柱建筑技术规程》(CECS 52:1993)。

在工业建筑方面,我国还采用装配式结构建造了大量的单层钢筋混凝土柱的工业厂房。该类厂房的主要构件钢筋混凝土柱、屋架、屋面板、吊车梁及支撑等均采用预制技术。

我国在 20 世纪 60—70 年代曾推广使用装配式建筑,早期预制混凝土受前苏联预制混凝土建筑模式的影响,主要应用在工业厂房、住宅、办公楼等建筑领域。20 世纪 70 年代以后我国政府曾提倡建筑实现三化,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,在许多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^[11]。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。

随着预应力结构和装配结构的不断发展,在一些城市高铁和桥梁工程中已广泛采用预应力装配式结构,但在民用建筑方面,装配式结构的发展速度仍非常缓慢。主要原因可归结为以下几点:

① 预制混凝土技术发展缓慢。预制混凝土生产企业规模小,设备、工艺落后,产品单一,质量标准低,预制混凝土技术远远落后于发达国家。李学智认为从 20 世纪 60 年代到 80 年代,我国的预制混凝土技术比发达国家至少落后了 18 年。

② 片面追求经济效益,使预制混凝土建筑暴露出一些突出问题。预制混凝土应用早期,由于在特定的历史条件下片面强调经济效益,致使预制混凝土建筑质量和使用功能低劣,预制混凝土建筑普遍存在隔音、隔热、防水差的问题,这使得预制混凝土在以后的推广应用中受到社会普遍的抵触。

③ 预制混凝土结构在地震区的应用受到限制。唐山大地震等震害中发现预制混凝土大量破坏,使人们产生了预制混凝土抗震性能差的观念,这对预制混凝土在地震区的推广应用产生了很大的负面影响。近年来有些地区甚至明文规定禁止在地震区使用预制混凝土楼板^[12]。

由此可见,推广和发展装配式结构还需要进行一定的创新和研究。

进入 21 世纪后,预制混凝土由于其固有的一些优点在我国又重新受到重视。预制混凝土生产效率高,产品质量好,尤其是它改善工人劳动条件、环境影响小,有利于社会可持续发展的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也有回暖的趋势,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^[13-20]。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^[21,22],大连 43 层的希望大厦(图 1-4)即采用了预制混凝土叠合楼面体系。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会迎来一个大发展时期。

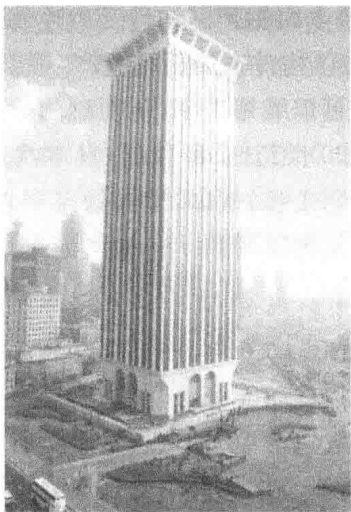


图 1-4 大连希望大厦

1.2.3 预应力装配式混凝土结构及研究现状

1.2.3.1 预应力装配式钢筋混凝土结构的特点

目前,我国预应力装配式结构体系多用于桥梁工程。在民用建筑结构中几乎还没有采用预应力装配的结构类型,虽有部分结构采用了装配形式,但由于其节点连接和整体性能相对较差,并未得到广泛推广。江苏省某公司曾在 2001 年从法国引进预制预应力混凝土装配式框架体系,该结构体系中,框架梁为预制预应力混凝土构件,柱为普通混凝土构件,节点采用非预应力连接方式,框架梁端不能承受弯矩,节点两侧构件受力不连续,体系受力不太合理,整体性能较差。

预应力装配式混凝土框架构件采用工厂化生产的预制柱和预制预应力梁,运至现场,直接采用机械吊装就位,梁、柱就位后将对穿过梁、柱预留孔道的预应力筋采用后张法施加预应力。后张预应力筋在施工阶段可作为拼装手段,在使用阶段又可承受一定的梁端弯矩,构成整体受力节点和连续受力框架,这种技术克服了普通非预应力装配式节点受力可靠性差的缺陷。并且在遭遇地震作用后,整体结构具有很强的弹性恢复能力,这种能力使得地震造成的裂缝闭合,节点恢复刚性,结构可以继续正常工作或稍加处理后便可继续投入使用。因而,预应力装配式混凝土结构即使在地震区 also 具有很强的适应性。

预应力装配式结构的主要优点^[23,24]如下:

① 预应力装配式框架结构克服了普通装配式结构常见的铰接节点可靠性差、抗震性能薄弱的缺陷,通过后张预应力钢筋,使得框架节点由铰接变为刚接,增强了节点的整体性,使得结构具有较好的抗震性能。由于结构具有很强的弹性恢复能力,使得结构在震后残余变形较小,一般稍加处理或不加处理便可继续使用。

② 预应力装配解决了普通预制框架构件难以装配和装配节点抗震性能较差的问题,形成了预制混凝土构件采用预应力装配形成整体式框架的结构体系。

③ 预应力筋能有效地控制装配式混凝土结构在预制梁、柱拼接处易产生的裂缝,提高了节点处的抗裂性能,增强了预应力装配式结构的耐久性;同时预应力筋可承受负弯