

二十一世纪预应力砼工程的发展

——来自第十三届国际预应力会议的信息和启示

郑锐谋

一、前言

信息科学、材料科学、生物科学等学科的高速发展将把人类带入难以预料的高速发展的新社会。砼工程科学作为相对古老的学科,在人类社会发展起着重大的作用。人类赖以生存和发展的基本环境——住宅、商业、公共建筑及工业建筑、交通工程无一不和砼工程紧密相关。砼工程在这即将过去的廿世纪,为人类现代文明作出了巨大的贡献。在即将进入新纪元之时,砼工程将怎样迎接高度发展的科学技术和知识经济社会的要求,来自五大洲数十个国家1000多名砼结构工程师在1998年5月21日~30日云集荷兰阿姆斯特丹,在第13届国际预应力砼大会暨国际预应力协会(FIP)和欧洲砼协会(CEB)合并成立国际砼协会之际,总结了四年来砼工程领域的主要成就,并展望新世纪砼发展的趋势。会议发表了包括材料发展进程、预应力构件工厂化生产和施工、预应力砼在桥梁、建筑及特种结构中的应用、结构工程计算机软件、大型结构实验、再生材料使用、土木工程财政新来源、已有建筑物的评定和加固、隧道和地下建筑、海洋建筑、结构工程风险分析、结构的动力分析、结构工程设计进展、结构的耐久性和寿命等十五个方面的二百多篇论文。同时,会议还举办了大型展览会,包括世界著名的预应力工程公司和设计咨询、软件公司等数十家单位展出了产品和工艺及软件。在展览会上,法国、日本、德国、奥地利、捷克、西班牙、比利时等国家还发表、散发了1994—1998年砼工程的总结报告,这些报告内容丰富、

郑锐谋 福建省建筑科学研究院副总工、高工

有很高的技术价值。本文作者参加了这次会议,现从大会上的发言、论文和从参展资料中,对大会所体现出砼工程新进展作一摘要性的概述,重点是预应力技术在建筑工程中的应用,让更多的国内砼结构同行对大会有所了解,供我国发展砼工程借鉴。

二、砼材料新进展

1、提高砼材料的强度

C₁₂₀高强度砼在建筑上使用已不是新记录。粉末反应型砼代表新类型砼,其抗压强度可达200~800MPa,抗拉强度可达25~150MPa,此次会议就高性能砼的研究发表了大量文章。

2、提高砼材料的延性

砼材料的延性问题已变得越来越重要。它可提高砼结构的变形能力和承受非正常的和不规则荷载的能力。在砼浇捣中加纤维提高砼延性的办法越来越引起兴趣。其主要应用之一是在当前欧洲最大的建筑工程——柏林议会中心基础底板的使用,该座建筑底板面积为2000m²,承受3000MN向上压力,底板用2000根每根受荷为1500kN的柱锚固,底板厚1.2m,共用24000m³砼,每立方米砼采用长为50mm、直径为0.6mm的钢纤维40kg。采用钢纤维砼的另一个典型例子是在隧道的预制衬砌上。当前砼已开始采用碳纤维。能够达到最大延性的砼材料为渗碳纤维砼(SIFCON-Slurry Infiltrated Fibre Concrete),它实际上是不开裂和不渗水的,可以代替钢板,抗拉强度达到90~105MPa,弯曲抗拉达到35~40MPa。

3、改善砼浇捣性能

不少砼的缺陷是由于不良的浇注过程振动产生的。在日本已经生产出一种不用振捣的砼,并且已在一些工程上使用。荷兰采用日本的方法也成功地应用于若干工程。

4、再生材料的应用

砼成为解决环境问题的一个手段。荷兰每年使用3600万 m^3 砼,其中有1/3是使用废渣。砼废渣、砖废渣、若干工业废料成为砼的原材料。这种材料性能的研究已成为西方一些国家的重要科研,在本次大会中有不少论文是关于这方面的研究成果。

我国生产建筑材料所消耗的能源占总能源的15%,排放废气污染更是高达40%。使用再生材料,减少能耗和污染是一个重要任务。

5、非金属材料加强砼

1867年, Joseph Monier 在砼中加入钢筋,标志着加强砼的诞生,人们通常称为钢筋砼(Reinforced Concrete)。近年来,随着材料科学的发展,人们已经开始使用碳纤维加劲塑料(CFRP)、玻璃纤维加劲塑料(GFRP)、芳纶纤维加劲塑料(AFRP)。这时RC就不再单指钢筋砼,它可以是碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维加劲塑料砼等。

非金属材料(比如CFRP)有如下优于钢筋的优点:

- (1) 自身轻,其容重约为钢材的1/4;
- (2) 防腐蚀、不导电;
- (3) 强度大,抗拉强度可达4900MPa;
- (4) 操作方便,可用人工铺设。

围绕这种新材料,瑞士、荷兰、德国、美国、加拿大、日本等作了大量研究:

(1) 纤维加劲塑料材料的性能和以其加强砼的性能(抗弯强度和抗剪强度,动力特征等)。

(2) 用碳纤维加劲塑料生产预应力筋及其

锚具体系。

(3) 用该材料加固砼结构、砖墙结构的方法和性能等。

该材料应用例子,主要是作为预应力筋应用于桥梁砼结构和加固工程:

(1) 1987年, Strabag Bam-AG和Bayer AG成立的合资公司开发包括有68%FFRP和32%树脂聚合物筋(Polystal),其直径为7.5mm,用于1986年建成的Dusselkorf桥,该桥二跨(跨度为21.3m和25.6m),共用了59根预应力筋,拉力为600kN。

(2) 加拿大1994年建成的公路桥Bediington Train是二跨拱桥,跨度为22.83m和19.23m,该桥采用CFRP砼。

(3) 现正在施工中的荷兰Dintelbaven桥,跨度为185m和192m,采用4*91 ϕ 5CFRP预应力筋作为体外索。CFRP预应力筋在这个工程的应用将具有历史性里程碑的意义。

三、预制预应力砼构件在房屋结构中的应用

近年来,预制预应力砼在房屋建筑中的应用得到很大的发展,其原因基于建筑市场对结构的效能、建筑材料的最优使用、建筑速度、质量、使用的灵活性、适应性及环境的要求而促成的。预计预制预应力砼将成为砼结构的主导发展方向。

当前,欧洲每年预应力砼楼板构件产量已达2000万 m^2 。使用400mm厚的空心板,楼板在使用荷载为5kN/ m^2 时跨度可达17m。芬兰应用500mm厚的空心板,使用荷载为5kN/ m^2 时板的跨度为21m。在瑞士,近来建造的办公楼,在整个进深中没有柱子。这为建筑的使用提供了巨大的效率(每平方米建筑面积达到最大的使用面积)以及空间的灵活性和时间的适应性。预制预应力砼结构广泛应用于工业和商业建筑、住宅、办公楼等。

预制预应力砼使用高性能砼。一般强度超过80MPa, 当前开始采用强度达到甚至超过300MPa的砼, 水灰比为0.14~0.20, 含有重量为水泥重量20%~25%的硅粉或者高性能塑料纤维。同时钢纤维和碳纤维构件在市场也开始使用。其主要作用是减少构件的高度。

四、面向二十一世纪预应力技术的发展动向

本世纪30年代开始发展的预应力技术是现代砼技术的历史性革命。应用预加给砼的应力, 抵消作用在砼结构上的荷载, 使砼能承受更大的应力, 成为能和钢材相匹敌的材料。这就是为什么预应力技术成为人们至今为止所能想象的最富有成效的结构技术。现代预应力技术的发展是促使砼技术发展的主要因素。今天, 预应力已经公认为成熟的、得到充分发展的技术。

当前后张预应力技术可建造长达300m悬臂桥(澳大利亚Geteway), 可将桥梁构件拼装成30~100m跨度的桥(泰国已建造总长度为30km这类桥梁), 可建造500~1000m的斜拉桥(法国的Normandy, 日本的Tatara), 预应力技术还应用于海洋大型重力式平台和悬浮式平台(挪威)、用于大坝的地锚(澳大利亚的Burrinjant)。在建筑工程中数千万平方米的大跨度的预应力平板的应用, 提高了结构使用灵活性和经济性。还有在诸如大型体育馆、大跨度建筑、核反应堆、高耸电视塔等广泛应用, 创造出当代结构工程的奇绩, 甚至从建筑美学角度也有其独特的创造性。

这次会议展出了预应力砼结构的丰硕成果, 同时不少结构工程师对预应力技术的进一步发展提出各种创造性的见解。笔者认为很有启发性的观点:

- (1) 预应力体系的优化, 例如体外无粘结预应力筋的进一步应用;
- (2) 非金属预应力筋材料的应用;
- (3) 提高金属预应力筋耐久性;

(4) 施加预应力值的控制, 对智能性预应力筋的研究;

(5) 预应力技术进一步在建筑结构领域中的应用—提高建筑使用灵活性和经济性;

(6) 扩大预应力技术应用范围;

(7) 规范和教育工作, 为促进预应力技术的进一步发展, 专家建议编制全球统一使用规范。当然这种规范不是限制结构工程师的创造性, 也不会局限于结构细节, 不会对结构工程师造成误导(现有一些国家地区规范造成设计出超筋结构和过大构件断面的情况, 束缚了结构工程师的创造能力)。同时提高结构工程师现场的、实际的工作能力, 发挥其创造性和自由性工作精神, 这是建筑结构发展的重要条件之一, 而不是使结构工程师成为简单的规范应用和计算机程序的使用者。笔者认为, 在全球经济日益一体化, 技术信息交流、技术发展进一步全球化的今天, 我国在砼工程应用领域有许多方面可以借鉴、甚至直接应用, 包括规范的实质性内容, 以弥补我国这方面的不足和促进土木结构工程应用技术的发展。

五、预应力砼技术在建筑上应用的新动态

1、有粘结预应力砼楼板的应用

本世纪60年代研制、70年代和80年代得到大量推广应用的无粘结预应力砼楼盖结构技术, 由于其施工技术的简易性, 使后张预应力砼技术在现浇楼盖结构中得到应用, 对于建造楼盖结构起了重要作用, 这无疑是预应力技术在建筑工程应用的一个重大进展。从北美到欧洲, 从东南亚到中国大陆, 有数千万平方米建筑使用了这一技术。但这一技术也逐渐暴露出一些缺点。近年来, 从欧洲到东南亚已开始悄悄兴起使用有粘结预应力砼楼板, 它比无粘结预应力砼技术有如下方面的优点:

- (1) 有粘结筋的设计强度比无粘结筋高10~

30%，也就是说提高构件的极限承载力10—30%，从而有效地节约预应力材料；

(2) 节约普通钢筋。有粘结预应力砼楼板只需配置少量的构造筋，或者在局部地方因强度需要的附加钢筋。在澳大利亚、菲律宾等国家，在有粘结筋方向没有配置普通钢筋。法国某工程有粘结预应力砼底板不使用普通钢筋，其设计超出FIP的规定；

(3) 有粘结筋固定端使用压花锚，可节约无粘结筋固定端挤压锚；

(4) 有粘结砼楼板施工并不复杂，仅增加灌浆工序。

我国在福建省福州市第一个使用有粘结预应力砼板工程——福州安泰中心商住楼，在1998年5月已成功地应用了这方面的国际先进经验。

2、对无粘结预应力筋腐蚀问题的调查和研究

由荷兰和美国工程师组成的小组对一座建于80年代的二十八层使用无粘结筋楼盖进行了调查。在预应力筋曲线底部位置凿小洞并刮去塑料油脂，对预应力筋的腐蚀强度进行了检查，发现预应力筋从完全没有腐蚀到产生严重腐蚀的状态均存在。其结论为：

(1) 无粘结筋存在油脂干枯受腐蚀严重问题，主要原因是浇注砼时，端部密封不严使水渗入造成预应力筋腐蚀；

(2) 对这栋楼普遍调查表明，腐蚀最严重的状态以最不利估计，不会超过预应力筋总数的10%；

(3) 由于楼盖计算安全度普遍很高，用三维空间结构分析的楼盖体系比按规范设计的预应力筋强度超过45%，还没有对结构安全性造成直接的急迫的危害；

(4) 无粘结筋的腐蚀问题依然是一个必需引起注意的普遍问题。

3、预应力筋的探伤问题

(1) 利用声纳技术检查预应力筋（无粘结和有粘结）的损伤情况。加拿大、英国、美国均已着手进行这项工作并取得重要成果。

(2) 灌浆饱和性的检查

德国SUSPA公司使用专门“内窥镜”简易仪器进行探测，只要在检查部位打一个洞，用“内窥镜”可看到灌浆饱满性。

4、有粘结预应力砼灌浆技术的改进

水灰比降到0.27~0.3，有很高的流动性和很高的泌水率，并不需要压力就能达到远比普通灌浆好的效果。该工作由荷兰水泥工业协会（VNC）研究完成。灌浆材料除水泥外另加入某些超塑性添加剂等材料。

5、预应力技术新工艺——介于先张拉和后张拉法之间的工艺

新的预应力工艺是在浇捣砼尚未凝固的时候施加预应力，砼在压力的情况下固结。这种施加预应力的方法需要用特殊的可滑动的模板及能把压力传给砼的装置。该方法由乌克兰工程师发明。这种方法可使同样配筋率情况下提高梁的承载力25~34%、柱的承载力75%，抗裂度不变。该方法已在重达30吨的桥梁构件中使用。

6、预应力砼路面技术

高等级路面使用砼取代沥青路面，其特点是维修费用低。现在每年建造约有2500km的普通钢筋砼路面的主要问题是由于接缝多使得车辆行驶不舒服。预应力砼可解决这个问题。使用预应力砼路面几百米才设置接缝（甚至不需要）。同时预应力砼路面不开裂。使用对角线和曲线形预应力筋、锚固在预应力的边梁上，使得连续浇砼得以进行。预制边梁可作为滑模，预应力筋可代替（甚至全部代替）普通钢筋。预应力砼路面有广阔发展前景。印度以每年10%的增长速度使用预应力砼路面。

7、预应力砼结构在建筑工程中进一步使用

与会专家普遍认为预应力砼结构在桥梁建筑中将取得更大成就和进展。相比之下,建筑领域的应用还不够广泛。预应力砼结构能够体现建筑技术最主要的两个特征,即使用灵活和经济合理性。但在很多国家由于技术、建筑、规范和教育诸多原因,没有采用预应力技术,使很多工程失去优化设计的可能。为此,世界上许多专家呼吁,在建筑领域应有更多的国家与地区在更多的工程上使用预应力技术。

8、预应力砼技术在深基坑开挖、边坡稳定、大面积重荷载基础底板、高层建筑转换梁、转换板和加固工程以及许多大型结构吊装就位等领域应用也很普遍。

六、预应力砼结构的抗震问题

当前国际砼结构工程界对预应力砼结构的抗震问题给予很大的重视。日本方面在1995年神户——犬坂地震之后,结合砼与预应力砼结构在地震中的实际表现进行了调查并作了大量研究。其它国家也作了不少研究,现就本次会议的有关内容简介如下:

1、日本经验

预应力砼结构在日本大坂——神户地震中的表现良好,题为《预应力砼结构的动力性能》一文对该地震区域100栋预应力砼结构进行调查和研究。文中指出,这100栋房子其中10栋是预制预应力结构,90栋是现浇预应力结构。100栋中,仅有一栋受到严重损坏,其余99栋状态非常好。该文作者将这100栋房子分为五类以现场记录的地震波对这五种类型房子进行线性动力分析和非线性动力计算分析。计算分析结果和现场结构的地震反映表现类似,其结论是执行1981年日本建筑规范按强柱弱梁强度型设计的预应力砼建筑抗震机理和性能良好。日本大坂——神户地震表明,预应力结构在地震区是能够应用的。与钢

筋砼结构一样,需要合理的设计和施工。

2、采用竖向预应力加固普通钢筋砼柱提高砼结构的抗震性能

1995年日本神户——大坂地震中,地震水平加速度达到重力加速度的量值,相当多的普通钢筋砼被破坏。采用竖向预应力砼柱,可以提高柱的抵抗水平荷载的能力,同时在地震之后又能很快的复原。实际上地震破坏多发生在大震之后的结构变形所带来非结构部分的破坏,采用预应力结构,在地震卸荷之后能迅速复原,可避免结构及非结构的破坏。

3、新西兰经验

预制预应力砼有良好的抗震性能,在新西兰得到广泛应用。

新西兰是地震高发区,对于结构抗震要求相当严格。采用预制预应力砼结构,最大优点是能在构件选择的部位在地震作用时发生屈服,产生塑性铰,提高整个结构的延性和耗能能力,而避免损坏,因而具有良好抗震性能。采用能量设计方法和预制构件合适的安装方法建造的预制预应力砼结构在新西兰得到普遍使用,具有工程质量高、节约现场劳动力和模板以及缩短工程工期等多方面效益。

预应力砼结构(预制和现浇)不仅是楼盖结构,凡是抗侧力的框架结构都可以在地震区使用,其设计主要要求是“强柱弱梁”,地震时,使塑性铰主要发生在楼盖部位。

七、预应力砼技术在一些典型建筑工程的应用实例

1、日本大阪市政中心体育馆地下运动场

直径110m的拱型屋顶,复盖土重达50~60kN/m²。采用预制预应力拱梁——板结构。组装时用30根环形预应力大束,每束张拉力为807kN。根据荷载进行三次张拉。工程进行了动力分析,并有数百个应力和应变试点,检测结果

预应力砼

和计算吻合。该工程是日本最大的地下拱型运动场建筑。

2、法国斯特拉斯堡欧洲会议中心

斯特拉斯堡欧洲会议中心是一座应用现代砼和预应力结构实现新型建筑艺术的优秀建筑。该议会中心为2层,高72m,直径为94m。按地震要求,该工程必须是一座无伸缩缝的环型建筑。而只有建造对楼板施加环向预应力才能满足结构在地震作用时应力和变形要求,从而实现建筑美学对该建筑物造型的要求。同时该建筑物的高度不能超过附近的教堂,采用预应力楼板降低了结构高度。

由于该建筑在环向和径向都有剪力墙,为使楼板建立有效的预应力,环形楼板分为四组,分别浇注和张拉,砼采用C₃₀,仅4—5天,达到C₂₁~C₂₃MPa即可张拉。

该工程环形预应力工艺采用游动锚具等新型工艺,保证了预应力施工的质量和速度。

3、泰国曼谷Amari Atrium大厦

该大厦为28层(包括3层地下室)商业综合建筑,建筑面积为6万m²。建筑长度为80m,开间为8.2m,横断面中间跨为9.7m,向二边各挑出4.9m的平台。建筑的内部布置和外部造型要求使用预应力平板。采用直径为 $\phi 12.7\text{mm}$ 无粘结预应力束,在横向集中在柱上扁梁布束,纵向则均匀布置。板厚20cm,以长度方向平均计算纵、横向各为2.9束/m。80m方向伸缩缝,仅设置后浇带。

4、马来西亚一座高层建筑

马来西亚一座高310m,76层,建筑面积230000m²的建筑,用预应力砼扁梁(跨度17m)和预应力砼板结构,板跨度为6m、板厚14cm,设置有粘结预应力筋4 $\phi 15@1500$ 。

5、日本Ohgishima储汽罐拱型屋面的设计和施工

该油罐直径为45m,高度为37.8m。从技术经济指标上,采用预应力圆拱屋面为优,截面高度为600m(支座处为1250mm)。从施工角度屋顶如采用原位浇捣,高达37.5m,模板支撑工程量大、耗费很多。该工程采用地面浇注、整体提升的方法。设计上要计算拱型屋顶自重作用、提升过程、安装就位的应力以及预应力筋产生的应力(特别是环形应力)。工程采用在半径为20.0m—21.5m处设置5*26 $\phi 15.2$ 预应力筋。设计还进行了动力计算(水平动力系数0.15,地震加速度150gal)。整体提升使用16台千斤顶,拱顶总重为40500kN。

6、西班牙巴塞罗那贸易中心

贸易中心主体为二个大型大跨度建筑,其跨度均为70m,其长度一跨为70m,另一跨为23m,加上辅助建筑,总面积为47672m²。70m跨度的T型屋架,沿屋架方向是变高度和变宽度,最大高度为4m。中间主肋宽度为0.35m,到二端支座宽度为0.4~0.8m。中间主肋配有10*15 $\phi 15$ 的预应力筋。屋架的支座与二侧宽度各为10m和20m的砼框架相连。屋架在地面预制,然后提升。

八、会议的启示

1、积极参加国际砼技术交流。近年来,发达国家建筑市场几乎饱和,我国土木工程无论在投资方面或建设规模方面均可排在世界前列。在砼工程技术、预应力技术应用方面近年有巨大进步,完成大量杰出的土木工程设计和施工。但在该次会议中我们仅有十多位代表参加,文章也寥寥无几,没有一个工程入选1998年预应力砼协会大奖,这和土木建设大国很不相称。日本有200多名代表参加,会议上发表大量论文。因此建议我国砼工程界要积极总结经验,参加国际交流,赶上世纪经济技术一体化的潮流。2002年国际砼工程大会将在日本召开,到时我国应有强大

阵容的代表团带着丰富的著述参加会议。争取2006年国际砼大会在我国召开也是有可能的。

2、统一砼学术团体组织,加强砼技术和预应力技术的研究、发展,加强全国性的技术交流和组织工作。国际预应力协会和欧洲砼协会已合并为国际砼协会,这有利于技术交流和组织工作。我国这方面组织单位多、力量分散。建议成立统一的组织,其工作不能局限于每年(或每二年)开一、二次交流会议。应组织在关键技术问题的攻关,提出设计施工建议,组织技术推广工作等。

3、加强科研工作。与发达国家相比,我国砼工程(包括预应力砼工程)的研究相对落后,凭借我们已有的强大队伍,及一些单位在预应力技术推广应用中的经济实力完全可以承担和完成重要的科研任务。

4、成立大型强有力的预应力砼工程公司。国际上已有若干著名大型预应力砼公司(如法国 Freyssinet和VSL、荷兰DIANA、德国DSI、瑞士BBR等)实力雄厚,承担国际上重大预应力砼工程,并担负新技术开发研究。我国的建设规模及大规模土木工程和分散的预应力工程设计施工状态很不适应。在当前国企和科研体系改制过程

中,成立大型预应力砼公司是非常必要的,当前国际上几家大型预应力公司已经虎视眈眈,看准我国的广阔市场,已开始登陆并企图占领我国市场。我们应欢迎他们的到来,同时也要以此为契机加速我国自己的队伍建设和发展壮大自己的施工技术力量。

参考文献

1. Challenges for Concrete in the Next Millennium. X III FIP congress, 1998 5.21—5.29, Amsterdam, Netherland.
2. Structural Concrete in The Czech Republic, 1994 — 1997, X III FIP congress, 1998.
3. Structural concrete, 1994 — 1998 German Group of FIP.
4. Prestressed Concrete in Japan, X III FIP Congress National Report.
5. The French Technology of Concrete, X III FIP 1998.
6. Prestressed Concrete Structures in Spain, 1994 — 1998, X III FIP Congress & Exhibition.
7. Some Remarkable Belgian Concrete Constructions FIP 1998.
8. National Report of The Slovak Republic, FIP 1998.
9. Croatia National Report, X III FIP congress, 1998.
10. Prestressed Concrete in Austria 1994 — 1998 X III FIP Congress 1998, May, 23—29 1998 Amsterdam.

※ OVM信息 ※

第四届中日建筑结构技术交流会在大连召开

在建设部、大连市和大连理工大学、大连建筑设计研究院、香港建筑署等单位的支持下,第四届中日建筑结构技术交流会于1999年10月12日至10月15日在大连理工大学召开。中方代表包括香港、台湾有200余人,日方代表40余人,共约300人参加了会议。会议不仅规模较大,水平也

较高,共收集论文80余篇,反映了中日两国在建筑结构方面研究和实践的新成果,体现了“交流、友谊、合作”的宗旨。会议期间,代表们还参观了建筑结构新技术、新产品展览。

柳州欧维姆工程有限公司总经理韩学广应邀出席了会议。
(周义兵)