

# 混凝土结构理论及规范的发展

——纪念我国混凝土结构设计规范的奠基者李明顺教授

徐有邻

(中国建筑科学研究院,北京 100013)

**摘要:**半个世纪以来我国混凝土结构理论及规范从无到有,经历了从照搬、模仿到依据试验研究和工程实践自主编制的过程。早期的《钢筋混凝土结构设计规范》(草案)和 GBJ 21—66 规范,基本引用、参照原苏联的规范;TJ 10—74 规范则采用安全系数法进行设计。30 多年来混凝土结构设计规范国家标准管理组围绕规范修订,组织进行了六批系统的试验研究,奠定了我国现代混凝土结构理论的基础,并成为规范修订的主要依据。GBJ 10—89 规范确定了我国混凝土结构设计规范的基本模式,GB 50010—2002 及修订的新规范将从“构件分析”向“结构分析”过渡。本文简介了新版混凝土结构设计规范的修订原则及主要内容,并对今后混凝土结构试验及科研方向提出了建议。

**关键词:**混凝土结构; 试验研究; 理论发展; 规范修订

**中图分类号:**TU375 TU318.4 **文献标志码:**A

## Development of concrete structure theory and code

XU Youlin

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In the last half century, the theory and code for the design of concrete structures in our country have evolved from initial copying or imitating others to the establishment of an independent code system based primarily on domestic research and construction practice. Earlier codes as ‘Code for design of reinforced concrete structures (draft)’ and GBJ 21—66 basically quote and imitate the codes of former Soviet Union. In the version of TJ 10—74, a global safety factor is implemented to guide the design. During the last 30 years, six coordinated experimental research have been executed, which significantly enriched the knowledge of modern concrete structures and laid a sound basis for developing codes and specifications. The code of GBJ 10—89 defined the basic system of the structure design codes in China. The code of GB 50010—2002 and the revised version can further improve the quality of concrete structure design. The revising principles and primary contents of new version of the ‘Code for design of concrete structures’ are discussed in this paper, along with the suggestion for future direction of experimental and analytical research of concrete structures.

**Keywords:** concrete structure; test research; theory development; revision of code

## 0 前言

混凝土结构可以就地取材,造价低廉,可塑性强,耐久性好,比较适合我国的国情。改革开放30年以来,在已建成的400多亿平方米建筑和现在每年建成20亿平方米的建筑中,混凝土结构占有绝大的比例,并且今后还将长久地作为主导结构形式继续发挥作用。然而我国混凝土结构理论与规范的发展,经历了漫长过程,学者们为此付出了艰苦的努力。

## 1 混凝土结构理论及规范的发展

### 1.1 引进规范的早期应用

解放以前,旧中国经济技术落后,没有自己的标准规范。沿海和大城市中建造的混凝土结构都是直接引用国外规范进行设计、施工。建国后开展大规模的经济建设,急需拥有我国自己的标准、规范。最初的混凝土结构设计、施工规范经历了从照搬到参照的过程。

上世纪50年代,我国经济技术力量薄弱,由于当时工程建设基本由原苏联援助和设计,所以全盘接受了原苏联的技术体系,包括结构理论以及配套的标准规范。在混凝土结构方面则受原苏联规范HNTY 123-55的影响较大。该规范采用三个系数(荷载的超载系数、材料的匀质系数、构件的工作条件系数),按三种极限状态(强度、变形、裂缝)进行设计。上世纪60年代初期,在基本照搬该规范基础上颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》(草案),确定了我国混凝土结构设计最初的基本模式。

为适应国情,在总结工程实践经验的基础上,上世纪60年代中期修订并颁布了GBJ 21—66《钢筋混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup>、GBJ 10—65《钢筋混凝土工程施工及验收规范》以及其他一些标准规范。由于缺乏系统的科学研究、试验验证以及工程调研,规范的核心内容仍是参照原苏联规范的规定。

文化大革命后期的上世纪70年代初,在极其困难的条件下,当时的国家建委组织国内专家,开始自主编制我国配套的规范、标准。根据当时有限的建筑设计、施工实践经验和少量试验研究成果,编制了各种材料结构(砌体、钢、木、混凝土等)的设计规范以及配套的荷载、抗震、地基基础等标准。1974年颁布的TJ 10—74《钢筋混凝土结构设计规范》<sup>[2]</sup>以及后来陆续颁布的这批规范标准,综合考虑荷载、材料、结构形式、受力性能等因素,采用综合安全系数的计算方法,设计比较简便,但其内容在很大程度上仍受原苏联规范的影响。

总结起步阶段的这三批标准、规范,应肯定其在我国早期基本建设中发挥了应有的作用。而且由于其从无到有的奠基地位,对以后设计、施工、科研、教学都产生了深远的影响。但因历史条件所限,以及“文化大革命”极左思潮的影响,片面地将“技术先进”理解为“节约材料”。因此这三批规范、标准的安全储备都偏低较多。

### 1.2 规范自主化的最初探索

由于上述系列规范中各种材料(砌体、钢、木、混凝土等)结构的安全系数不统一,以及荷载、抗震等设计的协调问题,在中国建筑科学研究院结构所规范室李明顺领导下,由邵卓民、白生翔、胡德炘、韩素芳、陈基发等人积极参与,会同国内高等院校、科研院所和设计院的许多专家,借鉴可靠度理论,引进概率极限状态设计方法获得成功。使得从材料、荷载到结构设计安全能够实现比较科学和合理的控制。同时学术界也打破了长期的封闭状态,利用改革开放的有利时机,积极学习、消化吸收西方工业发达国家的结构设计理论以及标准、规范。

与此同时,混凝土结构设计规范国家标准管理组以及1981年成立的中国工程建设标准化协会(CECS)及混凝土结构专业委员会(TC-5),针对设计规范编制中存在的大量存疑问题,组织国内约40个高等学校、科研院所以及设计院的约200位专家、学者,分立科研课题,先后开展了三批围绕规范修订的系统试验研究。延续12年的这三批科研课题,概括了相关设计理论(荷载、材料、设计方法、概率统计、安全校准等)、各种受力状态(压、弯、剪、扭、局压、冲切、疲劳、预应力、抗震等)、各类基本构件(板、梁、柱、墙、节点、预制、叠合、牛腿、预埋件等)以及基本构造问题(锚固、连接、保护层、最小配筋率等)的基础性研究,涵盖了涉及混凝土结构学科的全部领域以及相关学科的部分内容。

三批大规模系统的试验研究,总计试验试件将近10万个,发表论文上千篇,其中不乏在《建筑结构学报》上发表的高水平论文。这三批空前丰富的科研成果,基本奠定了我国现代混凝土结构理论的基础。在科研成果及工程实践积累的基础上,借鉴先进国际标准的有关内容,上世纪80年代自主编制的GBJ 10—89《混凝土结构设计规范》<sup>[3]</sup>具有鲜明的中国特色。规范采用基于可靠度理论的概率极限状态设计方法,适当提高了安全储备,系统建立了各种受力状态、各类基本构件的计算模式和配套构造措施,形成了较为系统、完整的设计理论。

GBJ 10—89规范是第一本基于自主科研确立的适合我国国情的混凝土结构设计规范,其基本改变了我国混凝土结构理论及规范封闭和落后的状态。

该规范作为以后历次规范修订的基本依据,其巨大影响一直持续至今。规范适时地指导了改革开放以后大规模基本建设中的混凝土结构设计,起到了控制工程设计质量、保障结构安全的积极作用。

### 1.3 结构理论及规范的逐步完善

针对规范修订中尚未解决的问题,国家标准管理组(CECS)及混凝土结构专业委员会(TC-5)又组织了第四、五批课题进行科研攻关。除补充完善基本设计方法以外,考虑从单个构件的截面计算拓展到结构体系的内力分析;同时深入开展多轴应力状态下混凝土力学性能的研究;并采用非线性有限元等手段提高分析及结构设计水平;配合技术进步,对高效预应力技术、无粘结预应力技术、高强钢筋以及钢筋机械连接等技术也进行了系统的试验研究;此外,对社会反映强烈的混凝土结构裂缝问题以及结构设计的安全度设置水平等问题,也进行了调查、分析及研究。

在上述科研和调查基础上再次修订的GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》<sup>[4]</sup>,水平有了进一步提高。继续补充、完善基本设计方法;从“构件计算”向“结构设计”过渡,增加了“结构分析”的内容;利用分析手段的进步和混凝土力学的研究成果,引入了混凝土本构关系及多轴强度准则以解决复杂结构的设计问题;此外,根据国情又适度提高了结构安全度的设置水平;并通过适度提高混凝土强度等级及采用高强钢筋,有效地解决了耗材问题。与设计规范修订的同时,配套颁布的GB 50204—2002《混凝土结构工程施工质量验收规范》<sup>[5]</sup>对于在市场经济条件下加强施工控制,强化质量验收,实现混凝土结构的安全可靠,起到了重要作用。

## 2 混凝土结构规范修订近况

### 2.1 修订规范的科学研究

早在GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》修订后期,第六批规范课题研究工作已经展开。在市场经济的新形势下,在国家规范管理组和混凝土结构专业委员会(CECS TC-5)引导、协助下由各单位结合工程或申请课题开展专项研究。针对现代混凝土结构体量大、形状复杂、功能多变、容易遭受偶然作用等特点,科研课题着力深化混凝土结构理论和工程实际问题的研究。

第六批课题的内容有:解决高强钢筋引起使用状态问题(裂缝、刚度等)的试验研究;针对某些抗力薄弱环节的补充试验研究;混凝土结构的耐久性调研分析;既有混凝土结构的设计问题;完善、补充结构内力的分析方法;间接作用(温差、收缩等)效应及

裂缝控制的研究;钢筋综合抗力(强度及延性)及对构件破坏形态的影响;各种配筋构造问题(并筋、锚固、连接以及最小配筋率等)的试验研究;与相关标准规范(抗震、高规以及土木工程其他专业规范等)的分工、协调和衔接;“9.11事件”和“汶川地震”以后,又开展了在偶然作用下结构防灾性能(抗连续倒塌结构整体稳定性)的研究。

### 2.2 新版规范的修订原则

新一轮《混凝土结构设计规范》的修订于2007年启动,历时3年,已于2009年12月通过审查。修订规范反映近年科研课题的研究成果以及我国混凝土结构的技术进步及工程经验。新版规范的修订总原则为“补充、完善、提高,不作大的改动”<sup>[6]</sup>。具体表现为:

(1)适当增加结构的安全储备以及抗灾性能,注重结构的整体稳定性(robustness)。

(2)规范从以构件计算为主扩展到结构体系的设计,强调概念设计的重要性。

(3)淘汰低强度材料,采用高强-高性能材料,提高资源利用效率,落实“四节一环保”。

(4)贯彻可持续发展的基本国策,完善耐久性设计,补充既有结构设计的原则。

(5)拓展结构分析的内容,补充、完善构件截面计算及连接构造措施的有关内容。

(6)进一步与国际接轨,实现与相关标准及土木工程其它专业规范的合理分工、协调。

### 2.3 规范修订的主要内容

(1)增加结构方案和结构防倒塌设计的原则,提高结构在偶然作用下的抗灾性能。

(2)面对我国大量既有建筑安全性与改造的迫切需要,增加既有结构设计的原则规定。

(3)调整正常使用极限状态的荷载组合,以及预应力构件的验算要求。

(4)增加楼盖舒适度的设计,控制结构竖向自振频率。

(5)完善耐久性设计方法,适当增加钢筋保护层厚度,提出了使用期维护、管理的要求。

(6)淘汰低强度钢筋,采用高强-高性能钢筋,提出钢筋延性(最大力下的总伸长率)的要求。

(7)解决配筋密集的困难,提出并筋(钢筋束)配置的规定。

(8)扩充结构分析内容及各种效应的分析方法,提出非荷载效应(温度、收缩)分析的原则。

(9)完善结构构件考虑二阶效应的计算方法。

(10)适应复杂结构非线性分析及设计,完善材料本构关系及混凝土多轴强度准则的内容。

(11)增加斜截面受剪承载力计算的安全性,完

善双向受剪设计方法,调整冲切承载力计算。

(12) 补充拉、弯、剪、扭复合受力构件设计的相关规定,明确应力配筋的有关要求。

(13) 调整正常使用极限状态裂缝宽度及刚度的计算方法,计算结果略有放松。

(14) 改进钢筋锚固和连接的方式,补充完善机械锚固、机械连接等手段。

(15) 考虑配筋特征值调整钢筋最小配筋率,增加安全度,同时控制大截面构件的最小配筋率。

(16) 在梁柱节点中引入钢筋机械锚固的有关规定,简化锚固配筋构造。

(17) 补充、完善各类装配整体式结构及叠合式(水平、竖向)结构的设计原则及构造要求。

(18) 调整预应力混凝土收缩、徐变及新工艺、新材料预应力损失计算的规定。

(19) 增加无粘结预应力的有关内容,补充、完善各种预应力构件的配筋构造措施。

(20) 调整混凝土构件抗震等级以及有关内力调整的规定,提出抗震钢筋延性的要求。

(21) 调整柱的轴压比限值、最小截面尺寸、最小配筋率,适当提高安全储备。

(22) 补充、完善筒体及剪力墙洞口、连梁、边缘构件与楼面梁连接等的设计规定。

(23) 增加冲切及板柱节点抗震设计的有关规定,补充预应力构件的抗震设计要求。

同时施工技术规范、验收规范也将修订,并统筹考虑与其它专业规范的协调和统一。

## 3 混凝土结构的发展方向

### 3.1 试验研究将支撑未来的发展

半个多世纪以来,我国混凝土结构理论及规范标准经历了从无到有,逐步发展完善的历程。随着我国大规模基本建设的发展以及经济增长模式的逐渐转变,各类大型复杂、功能特殊的结构越来越多,同时还面临着大量低安全度的既有建筑和结构耐久性、抗灾性等问题。因此规范将不断修订,为修订规范而进行的试验研究也将持续进行,从而混凝土结构理论也将得到发展。本次规范修订结束后,将针对修订中尚未解决的遗留问题,提出下一批规范科研课题,供各高等院校、科研院所、企事业单位作为科研选题的参考。

### 3.2 结构试验方向的调整

#### (1) 改变单一构件试验研究的形式

传统以单一构件(板、梁、柱、墙等)进行的试验研究,结论有很大的局限性,难以反映由这些构件组成结构体系(楼盖、框架等)的真正受力状态及规律。

若以结构组件或结构体系的方式进行试验,则可更真实地反映其受力状态。当然这对试验技术提出了更高的要求。

#### (2) 加强连接构造的试验研究

构件间的连接构造是传统试验研究中比较薄弱的环节,且对结构安全有着重要的影响,应加强这方面的研究。小比例的缩尺模型试验只能作定性探讨,应以足尺(或大比例)试件进行连接构造的试验研究,否则难以反映连接构造措施的真正效果。

#### (3) 加强结构抗灾性能的试验研究

传统承载力试验加载到钢筋(或构件)屈服为止,很少探讨后期超加载引起的大幅度挠曲、倾覆、压溃、断裂等破坏形态以及结构的解体和倒塌。而与此相关的防倒塌性能研究对结构安全具有更重要的实际意义。今后应加强这方面的试验研究以增强结构的抗灾性能。

#### (4) 开展结构原位加载试验的探讨

与在实验室内按理想状态进行的试验相比,结构原位加载试验更符合工程实际情况。近年由于工程检测的需要,原位加载试验增多,反映的规律与传统的结构理论差别很大,甚至有本质的不同。应总结已有的试验资料,编制原位加载试验的标准,用以指导原位加载试验。

#### (5) 开发约束混凝土的潜力

传统混凝土结构理论的基础是材料的单轴强度,而现代结构混凝土多处于复杂应力状态下。混凝土力学及强度准则专门探讨三轴应力状态下混凝土的力学行为,相应约束状态下的混凝土具有很大的抗力。通过试验研究开发约束混凝土的巨大潜力,具有实际工程意义。

#### (6) 提高试验研究的分析水平

目前混凝土结构试验的数量很大,但研究质量有待提高。应提倡先分析后试验,多分析少试验。基本假定应有可靠的依据;机理分析应深入透彻;应充分利用已有的试验资料;应用非线性有限元及概率统计等手段,提高试验和分析水平。

### 3.3 结构科研方式的改进

#### (1) 提倡研究的原创性

科研的精髓在于其原创性,探索未知领域的研究成果必须具有新意,即对传统认知的突破,甚至否定。不能苛求新的思维尽善尽美,应采取宽容态度允许其逐渐完善。减少无原创性的重复研究,更应杜绝抄袭行为或各种窃取公有知识而垄断专利、标准的不正当行为。

#### (2) 减少盲目的低水平重复

目前为解决学位、职称等功利目的而进行的科研及发表的论文数量不少,大多是没有明确目标的

空泛议论或低水平重复。这类研究多凭想象建立不可靠的基本假定,然后进行繁琐的推导,得出似是而非的结论。既无理论意义又无工程价值,浪费了宝贵的科研资源。

### (3) 加强基础理论研究

混凝土结构基础理论研究的周期长、难度大,且在市场经济条件下没有直接的经济效益。自上世纪末至今,基础理论研究呈减退趋势,造成技术发展后劲不足。应充分意识到这种现象可能造成的长期不利影响。应重视基础理论研究,并及时给予充分的经费和人力支持。

### (4) 提高工程应用研究水平

为解决工程问题而进行的应用性研究日渐增多,但多带有急功近利的目的。只求解决眼前的局部问题而未能进一步深入探索,而达到更高的水平。科研单位和高等院校应更多地介入此类结合工程问题的研究,并利用自己的智力优势提高分析水平,为学术发展积累资料。

### (5) 提倡深入浅出的成果表达

目前有些研究并不解决实际问题,而热衷于将简单问题复杂化。艰深晦涩的理论,混乱曲折的逻辑,似是而非的结论……,这些常人难以理解的“科研成果”并不代表高水平。真正的高水平科研体现在:研究深入,表达浅出,逻辑清晰,简便易用,对此应加以提倡。

### (6) 提倡学术争鸣和讨论

目前我国学术界、工程界缺乏争鸣讨论,这不利于理论发展和技术进步。学术争鸣不一定非要给出“对”或“错”的结论,讨论双方必然有各自的理由。通过争论使有关技术人员了解情况,深化认识就是最大的成果。但愿今后能真正形成“百家争鸣”的活跃氛围。

## 4 结语

半个世纪以来我国混凝土结构理论及规范从无到有,逐渐丰富和完善,完全依靠独立自主的科研试验及工程实践积累。目前我国大规模基建急需结构理论及标准规范的持续发展,转变科研形式,调整研究方向极为重要。所提建议未必合适,仅供参考。

### 参 考 文 献

- [1] GBJ 21—66 钢筋混凝土结构设计规范[S].
- [2] TJ 10—74 钢筋混凝土结构设计规范[S].
- [3] GBJ 10—89 混凝土结构设计规范[S].
- [4] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [5] GB 50204—2002 混凝土结构工程施工质量验收规范[S].
- [6] 中国建筑科学研究院.《混凝土结构设计规范》修订(报批稿)[R].北京:中国建筑科学研究院,2010.