



学校土木工程专业系列规划教材



Principles of Concrete Structures

混凝土结构基本原理

· 平台课课程群 ·

■ 主编 徐礼华 周朝阳
■ 主审 余志武



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



高等学校土木工程专业系列规划教材

混凝土结构基本原理

主 编 徐礼华 周朝阳
副主编 刘素梅
主 审 余志武



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/徐礼华,周朝阳主编. —武汉:武汉大学出版社,2017.8
高等学校土木工程专业系列规划教材

ISBN 978-7-307-19401-4

I. 混… II. ①徐… ②周… III. 混凝土结构—高等学校—教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 143793 号

责任编辑:方竞男

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:880×1230 1/16 印张:21 字数:674 千字

版次:2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19401-4 定价:56.00 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。

高等学校土木工程专业系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方 志 叶列平 何若全 沙爱民 范 峰 周铁军 魏庆朝
委 员:王 辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周 云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程 桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高 波
委 员:丁克伟 丁建国 马昆林 王 成 王 湛 王 媛 王 薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方 俊
龙广成 申爱国 付 钢 付厚利 白晓红 冯 鹏 曲成平
吕 平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁 皑 许 伟 许程洁 许婷华
阮 波 杜 咏 李 波 李 斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨 杨 杨志勇 杨淑娟 吴 昊 吴 明 吴 轶
吴 涛 何亚伯 何旭辉 余 锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张 红 张 纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄 平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高 飞 高 玮 郭东军 唐柏鉴
黄 华 黄声享 曹平周 康 明 阎奇武 董 军 蒋 刚
韩 峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾 珂 雷宏刚
廖 莎 廖海黎 蒲小琼 黎 冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王 睿 白立华 曲生伟 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导模式转变为建设性、发现性的学习,从被动学习转变为主动学习,由教师传播知识到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,逐步配备基本数字教学资源,主要包括:

文本:课程重难点、思考题与习题参考答案、知识拓展等。

图片:课程教学外观图、原理图、设计图等。

视频:课程讲述对象展示视频、模拟动画,课程实验视频,工程实例视频等。

音频:课程讲述对象解说音频、录音材料等。

数字资源获取方法:

- ① 打开微信,点击“扫一扫”。
- ② 将扫描框对准书中所附的二维码。
- ③ 扫描完毕,即可查看文件。

更多数字教学资源共享、图书购买及读者互动敬请关注“开动土木传媒”微信公众号!



丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有500余所大学开设土木工程专业,在校生达40余万人。

2010年6月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

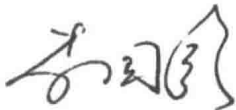
2011年9月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以为序。



2014年3月于同济大学四平路校区

前 言

“混凝土结构基本原理”是土木工程专业的核心专业课程之一。本书系统讲述了钢筋混凝土构件、预应力混凝土构件的受力性能、设计计算方法和构造措施,主要内容包括钢筋和混凝土的物理力学性能,混凝土结构设计的基本原则和方法,受弯构件承载力,受压构件承载力,受拉构件承载力,受扭构件承载力,受冲切承载力,混凝土构件的变形、裂缝宽度与耐久性,公路桥涵混凝土结构承载力、裂缝宽度及挠度计算,基本构件容许应力法设计,预应力混凝土结构。

本书依据《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)及交通运输部行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(征求意见稿)》(JTG D62—2012)等编写而成。为适应土木工程专业学生创新能力和实践能力培养的要求,在编写过程中力求做到概念明确、内容简明、讲述清楚。本书中主要章节均配有相当数量的例题,有利于学生理解相关知识;每章均给出了内容提要、能力要求、知识归纳、独立思考和习题,以方便学生明确每章的学习重点,巩固所学知识。

本书由武汉大学徐礼华和中南大学周朝阳担任主编,武汉大学刘素梅担任副主编,武汉大学池寅、方梅、安旭文和中南大学阎奇武、刘澍担任参编。具体编写分工为:徐礼华编写第1章及附录1,池寅编写第2章,方梅编写第3、6、12章,刘素梅编写第4、5章,安旭文编写第7、9章,周朝阳编写第8章及附录2、附录3,阎奇武编写第10章,周朝阳、刘澍编写第11章。全书由徐礼华统稿,中南大学余志武教授担任主审。

本书可作为高等院校土木工程专业的教材,也可供有关的设计、施工和科研人员使用。

由于时间仓促,书中的错误与不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2017年4月

目 录

1 绪论	(1)	知识归纳	(34)
1.1 混凝土结构的一般概念	(2)	独立思考	(35)
1.1.1 混凝土结构的一般定义及分类	(2)	习题	(35)
1.1.2 钢筋与混凝土结构共同工作 原理	(3)	参考文献	(36)
1.1.3 钢筋混凝土结构的特点	(4)	3 混凝土结构设计的基本原则和方法	(37)
1.2 混凝土结构发展历程	(4)	3.1 概述	(38)
1.2.1 混凝土材料	(4)	3.2 结构的可靠度	(38)
1.2.2 混凝土结构体系	(5)	3.2.1 作用效应及结构抗力	(38)
1.2.3 混凝土结构设计计算方法	(6)	3.2.2 结构的功能要求	(39)
1.3 混凝土结构发展趋势	(7)	3.2.3 结构的可靠性及可靠度	(40)
1.4 混凝土结构学习建议	(9)	3.3 极限状态	(41)
知识归纳	(10)	3.3.1 承载能力极限状态	(41)
独立思考	(10)	3.3.2 正常使用极限状态	(41)
习题	(10)	3.3.3 结构的设计状况	(42)
参考文献	(11)	3.4 以概率理论为基础的极限状态设计 方法	(42)
2 钢筋和混凝土的物理力学性能	(12)	3.4.1 结构的功能函数和极限状态方程	(42)
2.1 钢筋的物理力学性能	(13)	3.4.2 失效概率与可靠指标	(42)
2.1.1 钢筋的成分和类型	(13)	3.5 荷载代表值和材料强度代表值	(44)
2.1.2 钢筋的品种和级别	(13)	3.5.1 荷载代表值	(44)
2.1.3 钢筋的强度与变形	(14)	3.5.2 材料强度代表值	(45)
2.1.4 钢筋应力-应变关系曲线的 数学模型	(15)	3.6 实用设计表达式	(45)
2.1.5 钢筋的疲劳	(17)	3.6.1 承载能力极限状态设计表达式	(46)
2.1.6 钢筋的性能要求	(17)	3.6.2 正常使用极限状态设计表达式	(48)
2.2 混凝土的物理力学性能	(18)	知识归纳	(49)
2.2.1 混凝土的组成	(18)	独立思考	(50)
2.2.2 混凝土的强度	(18)	习题	(50)
2.2.3 混凝土的变形	(24)	参考文献	(51)
2.3 钢筋与混凝土的黏结	(31)	4 受弯构件承载力	(52)
2.3.1 黏结力的组成	(31)	4.1 概述	(53)
2.3.2 光面钢筋的黏结性能	(31)	4.2 正截面受弯承载力	(54)
2.3.3 变形钢筋的黏结性能	(31)	4.2.1 正截面受弯承载力试验研究	(54)
2.3.4 影响黏结强度的因素	(32)	4.2.2 正截面受弯承载力计算	(57)
2.3.5 钢筋的锚固	(33)	4.2.3 单筋矩形截面受弯构件正截面 承载力计算	(60)

4.2.4	双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(63)	5.4.4	偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线运用	(126)
4.2.5	T形截面受弯构件正截面承载力计算	(67)	5.5	偏心受压构件斜截面受剪承载力	(127)
4.3	斜截面承载力	(73)	5.5.1	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算公式	(127)
4.3.1	斜截面受剪承载力	(74)	5.5.2	最小截面要求	(128)
4.3.2	保证斜截面受弯承载力的构造措施	(84)	5.6	双向偏心受压构件正截面承载力	(128)
4.4	受弯构件的一般构造	(86)	5.7	受压构件一般构造要求	(129)
4.4.1	材料强度	(86)	5.7.1	截面形式及尺寸	(129)
4.4.2	混凝土的保护层厚度	(87)	5.7.2	材料要求	(129)
4.4.3	梁纵向钢筋的锚固	(87)	5.7.3	配筋构造要求	(129)
4.4.4	钢筋的连接	(88)	知识归纳		(131)
4.4.5	纵向钢筋	(89)	独立思考		(131)
4.4.6	箍筋	(90)	习题		(132)
4.4.7	弯起钢筋	(91)	参考文献		(133)
4.4.8	钢筋混凝土构件施工图	(91)	6	受拉构件承载力	(134)
知识归纳		(93)	6.1	概述	(135)
独立思考		(94)	6.2	轴心受拉构件的正截面承载力计算	(135)
习题		(95)	6.2.1	轴心受拉构件的受力过程和破坏特征	(135)
参考文献		(96)	6.2.2	轴心受拉构件的正截面承载力计算	(136)
5	受压构件承载力	(97)	6.3	矩形截面偏心受拉构件的正截面承载力计算	(136)
5.1	概述	(98)	6.3.1	小偏心受拉构件	(137)
5.2	轴心受压构件正截面承载力计算	(99)	6.3.2	大偏心受拉构件	(137)
5.2.1	普通箍筋柱的正截面受压承载力	(99)	6.4	偏心受拉构件的斜截面受剪承载力	(139)
5.2.2	轴心受压螺旋形或焊接环形箍筋柱的正截面受压承载力计算	(102)	知识归纳		(139)
5.3	偏心受压构件正截面承载力	(105)	独立思考		(140)
5.3.1	偏心受压构件的二阶效应	(105)	习题		(140)
5.3.2	偏心受压短柱的破坏形态	(107)	参考文献		(140)
5.3.3	偏心受压长柱的破坏形态	(109)	7	受扭构件承载力	(141)
5.3.4	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(110)	7.1	概述	(142)
5.3.5	I形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(120)	7.2	纯扭构件的试验研究	(143)
5.4	偏心受压构件正截面承载力 N_u-M_u 相关曲线及应用	(125)	7.2.1	裂缝出现前的性能	(143)
5.4.1	矩形截面对称配筋大偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线	(125)	7.2.2	裂缝出现后的性能	(144)
5.4.2	矩形截面对称配筋小偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线	(125)	7.2.3	受扭构件的破坏形态	(144)
5.4.3	偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线特点	(126)	7.3	矩形截面纯扭构件的受扭承载力计算	(145)
			7.3.1	矩形截面纯扭构件的开裂扭矩	(145)
			7.3.2	矩形截面受扭构件的承载力计算公式	(146)
			7.4	弯剪扭构件的承载力计算	(152)

7.4.1 弯剪扭构件的承载力计算 公式	(152)	9.2.4 最大裂缝宽度的计算公式及其 验算	(188)
7.4.2 计算公式的应用	(154)	9.3 混凝土结构的耐久性	(191)
7.5 受扭构件的构造要求	(154)	9.3.1 耐久性的概念及环境分类	(191)
7.5.1 截面尺寸的限制条件	(154)	9.3.2 影响混凝土结构耐久性的因素 及其防治措施	(191)
7.5.2 受扭纵向钢筋的构造要求	(154)	9.3.3 混凝土结构的耐久性设计规定	(193)
7.5.3 受扭箍筋的构造要求	(155)	知识归纳	(194)
7.5.4 按构造要求配置受扭钢筋的 条件	(155)	独立思考	(196)
知识归纳	(157)	习题	(196)
独立思考	(158)	参考文献	(197)
习题	(158)	10 公路桥涵混凝土结构承载力、裂缝宽度 及挠度计算	(198)
参考文献	(159)	10.1 概述	(199)
8 受冲切承载力	(160)	10.1.1 设计方法	(199)
8.1 概述	(161)	10.1.2 耐久性设计	(200)
8.2 影响冲切承载力的因素	(162)	10.1.3 材性指标	(202)
8.2.1 材料性能	(162)	10.2 受弯构件计算	(203)
8.2.2 几何特征	(162)	10.2.1 构造要求	(203)
8.2.3 作用条件	(162)	10.2.2 正截面承载力计算	(207)
8.3 基础受冲切计算	(163)	10.2.3 斜截面承载力计算	(210)
8.4 楼板的受冲切计算	(165)	10.2.4 裂缝宽度验算	(215)
8.4.1 无腹筋板的受冲切验算	(165)	10.2.5 变形(挠度)验算	(216)
8.4.2 楼板受冲切配筋设计	(169)	10.3 受压构件计算	(216)
8.4.3 柱帽的设计	(170)	10.3.1 轴心受压构件	(216)
8.5 其他规范中受冲切承载力的计算	(172)	10.3.2 偏心受压构件	(217)
8.5.1 无受冲切钢筋板的受冲切承载力 计算	(172)	10.3.3 构造要求	(222)
8.5.2 配置受冲切钢筋板的受冲切承载 力计算	(173)	知识归纳	(223)
8.5.3 柱基础的受冲切承载力计算	(174)	独立思考	(224)
知识归纳	(174)	习题	(224)
独立思考	(174)	参考文献	(225)
习题	(174)	11 基本构件容许应力法设计	(226)
参考文献	(174)	11.1 受弯构件正截面应力计算	(227)
9 混凝土构件的变形、裂缝宽度与耐久性	(176)	11.1.1 正截面应力限值规定	(227)
9.1 混凝土受弯构件的挠度验算	(177)	11.1.2 正截面应力计算基础	(228)
9.1.1 截面的弯矩-曲率关系和刚度	(177)	11.1.3 单筋矩形截面的计算	(228)
9.1.2 受弯构件的短期刚度 B_s	(178)	11.1.4 双筋矩形截面的计算	(233)
9.1.3 受弯构件的截面弯曲刚度 B	(180)	11.1.5 T形截面的计算	(234)
9.1.4 受弯构件的挠度验算	(181)	11.2 轴心受压构件正截面应力计算	(235)
9.2 混凝土构件的裂缝宽度验算	(183)	11.2.1 配一般箍筋的轴心受压构件 计算	(235)
9.2.1 裂缝的开展机理	(183)	11.2.2 配间接钢筋的轴心受压构件 计算	(237)
9.2.2 平均裂缝间距	(184)	11.3 偏心受压构件正截面应力计算	(238)
9.2.3 平均裂缝宽度	(185)		

11.3.1 偏心类型的判别	(238)	12.6.3 先张法和后张法计算公式 比较	(291)
11.3.2 小偏心受压构件的计算	(240)	12.7 预应力混凝土轴心受拉构件设计 ...	(291)
11.3.3 大偏心受压构件的计算	(243)	12.7.1 使用阶段承载力计算	(291)
11.3.4 偏心受压构件的稳定性验算 ...	(253)	12.7.2 使用阶段裂缝控制验算	(292)
11.4 主拉应力及抗剪计算	(253)	12.7.3 施工阶段承载力验算	(293)
11.4.1 梁的主拉应力及抗剪计算 ...	(253)	12.8 预应力混凝土受弯构件应力分析 ...	(296)
11.4.2 偏心受压构件主拉应力计算 ...	(262)	12.8.1 施工阶段的应力分析	(297)
知识归纳	(263)	12.8.2 使用阶段的应力分析	(298)
独立思考	(265)	12.8.3 加载至破坏	(300)
习题	(265)	12.9 预应力混凝土受弯构件设计	(300)
参考文献	(266)	12.9.1 设计计算内容	(300)
12 预应力混凝土结构	(267)	12.9.2 荷载平衡法概念	(301)
12.1 预应力混凝土的基本概念与分类 ...	(268)	12.9.3 预应力钢筋数量的确定	(302)
12.1.1 预应力混凝土的基本概念 ...	(268)	12.9.4 使用阶段承载力计算	(303)
12.1.2 预应力混凝土的分类	(269)	12.9.5 使用阶段裂缝控制验算和挠度 验算	(307)
12.2 预应力施加方法与锚(夹)具	(270)	12.9.6 施工阶段验算	(309)
12.2.1 预应力施加方法	(270)	12.10 预应力混凝土构件的一般构造 要求	(310)
12.2.2 锚具和夹具	(271)	知识归纳	(310)
12.3 预应力混凝土材料的性能要求	(273)	独立思考	(312)
12.3.1 混凝土	(273)	习题	(313)
12.3.2 钢筋	(273)	参考文献	(314)
12.4 张拉控制应力和预应力损失	(275)	附录	(315)
12.4.1 张拉控制应力	(275)	附录1 《混凝土结构设计规范(2015年版)》 (GB 50010—2010)材料指标与 有关规定	(315)
12.4.2 预应力损失	(275)	附录2 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土 桥涵设计规范(征求意见稿)》(JTG D62—2012)的有关规定	(322)
12.4.3 预应力损失的组合	(280)	附录3 《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混 凝土结构设计规范》(TB 10002.3— 2005)有关规定	(322)
12.5 预应力钢筋锚固区受力性能	(281)		
12.5.1 先张法构件预应力钢筋的传递 长度	(281)		
12.5.2 后张法预应力构件端部锚固区 的局部受压性能	(281)		
12.6 预应力混凝土轴心受拉构件的应力 分析	(284)		
12.6.1 先张法轴心受拉构件	(284)		
12.6.2 后张法轴心受拉构件	(288)		



数字资源目录

可靠性: 安全性、适用性、耐久性

正截面、偏心受拉构件

10 30 60
定强 定配 定强定配

1

绪 论

课前导读

□ 内容提要

本章主要内容包括混凝土结构的定义与分类, 钢筋与混凝土共同工作的原理, 混凝土结构的发展概况, 混凝土结构理论的特点与学习建议。本章教学重点为混凝土结构的概念及特点, 混凝土结构在国内外的发展及应用情况; 教学难点为混凝土结构的特点, 钢筋和混凝土共同工作的原理。

□ 数字资源



5 分钟看完本章

□ 能力要求

通过本章的学习, 学生应熟练掌握钢筋与混凝土共同工作的原理; 掌握配筋的作用与要求; 熟悉混凝土结构的主要优缺点; 了解混凝土结构的发展历程和趋势。

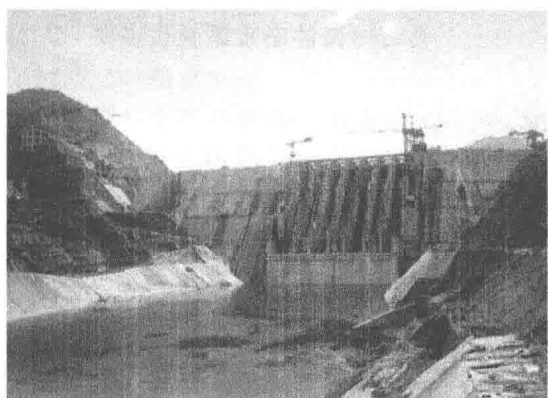
1.1 混凝土结构的一般概念 >>>

1.1.1 混凝土结构的一般定义及分类

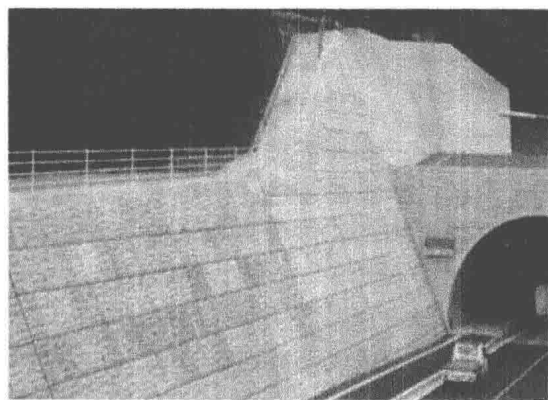
以混凝土为主要材料制作的结构称为混凝土结构,主要包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。

素混凝土结构,指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构。其主要用于承受压力而不承受拉力的构件,如重力堤坝[图 1-1(a)]、支墩、重力式挡土墙[图 1-1(b)]、地坪、水泥混凝土路面等。

钢筋混凝土结构,指配置受力的普通钢筋的混凝土结构。其广泛应用于土木、水利工程,同时还应用于原子能工程、海洋工程和机械工程的一些特殊场合,如反应堆压力容器、海洋平台、巨型运油船、大吨位水压机机架等。图 1-2 所示为武汉绿地中心主塔楼。



(a)



(b)

图 1-1 素混凝土结构

(a)重力堤坝;(b)挡土墙

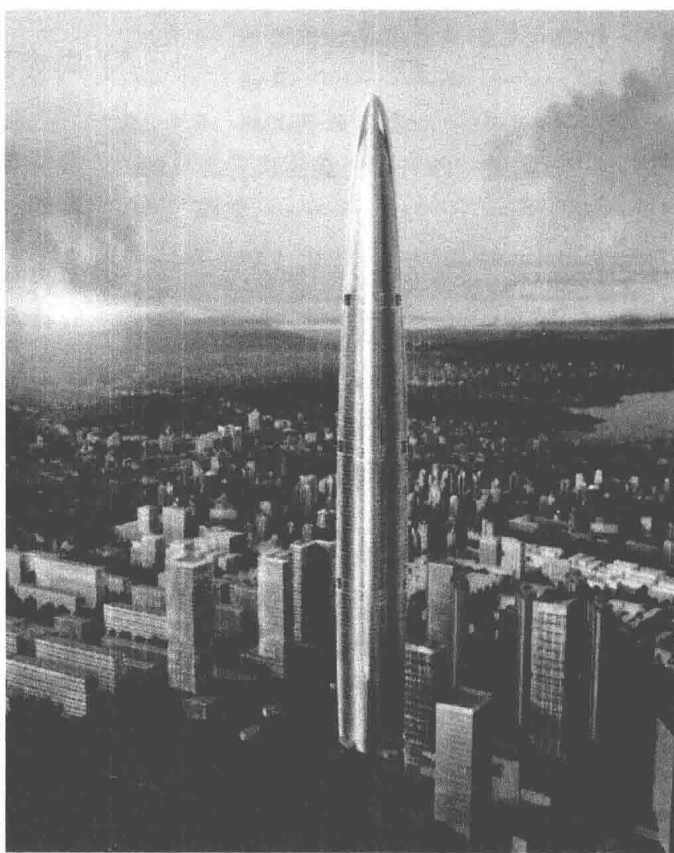


图 1-2 武汉绿地中心主塔楼

预应力混凝土结构,是由配置受力的预应力钢筋,通过张拉或其他方法施加预应力的混凝土结构。其应用范围从桥梁与工业建筑发展到民用建筑、公共建筑、地下建筑、海港码头、水利水电工程等领域,成为高层、大跨度及大空间、重载、特种结构中不可缺少的结构形式之一。图 1-3 所示为吊装施工中的预制预应力混凝土箱形桥面。

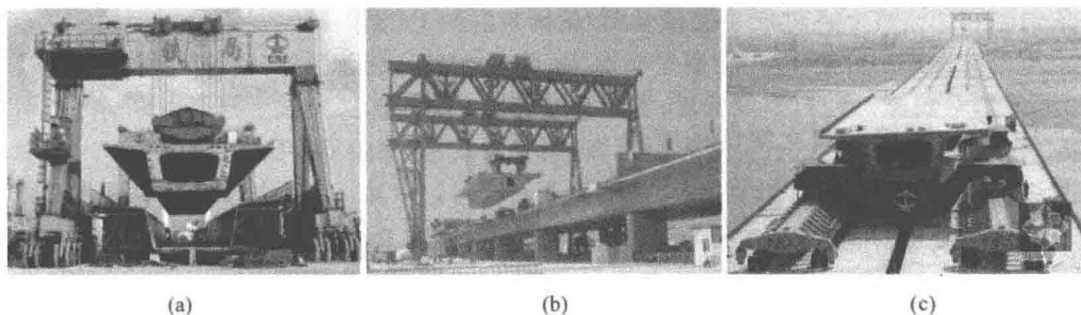


图 1-3 施工中的预应力混凝土箱形桥面

(a) 起升作业; (b) 上桥作业; (c) 运输作业

1.1.2 钢筋与混凝土结构共同工作原理

钢筋混凝土由钢筋和混凝土两种物理力学性能完全不同的材料组成。混凝土的抗压能力较强而抗拉能力很弱,钢筋的抗拉能力和抗压能力都很强。将混凝土和钢筋这两种材料结合在一起工作,使混凝土受压、钢筋受拉,充分发挥各自的力学性能优势,以满足工程结构的使用要求。

以简支梁为试验研究对象,在图 1-4 所示的荷载 F 作用下,梁跨中截面(中和轴)的下部受拉,上部受压。若梁试件由素混凝土制作而成,由于混凝土的抗拉能力差,随着外荷载的增加,一旦受拉区混凝土的应力超过其抗拉强度,梁底部会立即开裂,开裂后裂缝沿梁截面高度方向迅速发展,梁瞬间发生脆断破坏,没有预兆,承载能力很低。若在梁试件的受拉区配置适量受力钢筋,当受拉区混凝土开裂后,梁中和轴以下受拉区的拉应力主要由钢筋承担,中和轴以上受压区的压应力仍由混凝土承担。与素混凝土梁不同,此时,钢筋混凝土梁能继续承受荷载,直至受拉钢筋应力达到屈服强度,随后荷载略有增加,致使受压区边缘混凝土被压碎,梁发生破坏。破坏前,梁跨中挠度和裂缝发展充分,呈现出明显的预兆,属于延性破坏。试验表明,配置在受拉区的钢筋明显增强了抗拉能力,从而大幅度提高了梁的承载能力和变形能力。这样,钢筋与混凝土两种材料的强度被充分利用。

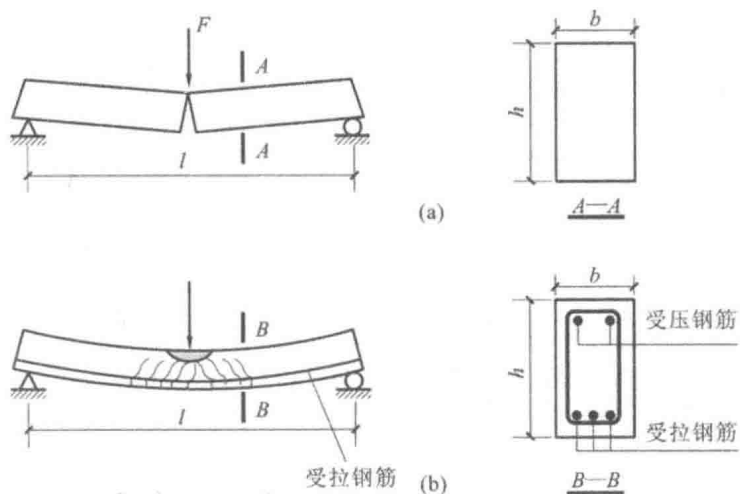
素混凝土梁
破坏试验视频

图 1-4 素混凝土梁与钢筋混凝土梁的受力性能示意图

(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土这两种物理力学性能完全不同的材料之所以能有效地共同工作,其主要原因是:①混凝土硬化后,与钢筋产生良好的黏结力,使两者牢固结合并传递应力,从而保证钢筋与混凝土在外荷载作用下能够协调变形,这是两种材料能够共同工作的基础。②钢筋的温度线膨胀系数值(约为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)与混凝土的温度线膨胀系数值(为 $1.0 \times 10^{-5} \sim$

$1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 颇为接近, 当温度变化时, 钢筋与混凝土之间不会产生较大的温度应力和相对变形而导致黏结破坏。

1.1.3 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构具有如下优点:

①就地取材。混凝土所用的砂、石一般可就地取材。一些工业废料(如矿渣、粉煤灰等)可用于混凝土结构。

②节约钢材。钢筋混凝土结构充分发挥各自材料性能。与钢结构相比, 可节约钢材, 降低造价。

③耐久性好。混凝土强度稳定性好, 同时钢筋受混凝土保护而不易锈蚀, 无须经常保养和维护, 因此钢筋混凝土的耐久性较好。处于侵蚀性气体中或受海水浸泡的钢筋混凝土结构, 经过合理设计及采取特殊措施, 可满足工程要求。

④耐火性好。由于钢筋被混凝土包裹, 即使发生火灾, 钢筋也不会像钢结构那样很快软化而导致结构整体破坏。与钢结构和木结构相比, 钢筋混凝土结构的耐火性很好。

⑤可模性好。钢筋混凝土可以根据实际工程需要制成各种形状和尺寸的结构, 如曲线形的梁、拱、曲面塔体、空间薄壳等。

⑥整体性好。现浇式或装配整体式钢筋混凝土结构具有很好的整体性, 刚度大, 变形小, 有利于承受地震作用、爆炸冲击波作用等。

但钢筋混凝土结构也存在一些缺点:

①自重重大。同等体积下, 钢筋混凝土的重量大于砌体和木材, 这对大跨度结构、高层建筑结构以及结构抗震不利。

②抗裂性差。混凝土的抗拉强度只是其抗压强度的 $1/10$ 左右, 尽管配置受力钢筋能够承担拉应力, 但普通钢筋混凝土受弯构件和受拉构件在正常使用时往往带裂缝工作。

③施工复杂、工序多。混凝土结构施工工序复杂, 周期较长, 且受季节和气候的影响较大; 隔热、隔声性能较差。

④混凝土结构构件一旦发生局部破坏, 加固修复工作比较困难。

在应用钢筋混凝土结构时, 应充分发挥其优点, 通过技术创新克服其缺点, 例如, 采用轻质、高强混凝土以减轻混凝土的自重; 采用预应力混凝土以提高构件的抗裂性等。

1.2 混凝土结构发展历程 >>>

1.2.1 混凝土材料

混凝土结构的发展离不开材料自身性能的提升, 混凝土材料的发展主要表现在强度的不断提高, 性能的不断改善, 纤维混凝土、预应力混凝土和轻质混凝土的应用以及 FRP 筋的应用等方面。

20 世纪 60 年代, 美国使用的混凝土抗压强度平均为 28 N/mm^2 , 70 年代提高到了 42 N/mm^2 。20 世纪 80 年代, 在发达国家 C50 强度等级的混凝土已经普遍采用。我国目前的土木工程结构, 尤其是超高层混凝土房屋结构, 抗压强度为 60 N/mm^2 的混凝土应用非常广泛。此外, 高效能外加减水剂的应用更加促进了混凝土强度的提高。20 世纪 70 年代, 日本生产出 $80 \sim 90 \text{ N/mm}^2$ 强度的高强混凝土。近年来, 美国和加拿大等采用附加



混凝土材料图

减水剂的方法已经能够制成强度为 200N/mm^2 以上的超高强混凝土。高强混凝土及超高强混凝土的问世扩大了混凝土结构的应用范围,包括防护工程、海洋工程、军事工程等领域。

为了提高混凝土的抗裂、抗冲击、抗疲劳等性能,以及强度、韧性、延性及耐久性等,通过在普通混凝土中掺入不同种类、不同数量的纤维(如钢纤维、聚丙烯/聚乙烯纤维、玻璃纤维和碳纤维等)而形成的纤维混凝土已经得到广泛的认可。其中以钢纤维混凝土的应用最为广泛,比如,在路面和机场跑道、桥面铺装层、工业建筑、桥梁结构以及地下工程衬砌和支护方面应用较多。美国、日本和我国都相继编制了钢纤维混凝土结构的设计与施工规程或相关规范。另外,为了改善混凝土的工作性能,在混凝土中添加智能纤维材料,使得混凝土具有损伤自修复、裂缝自愈合和预警功能的研究引起了高度的重视,例如1998年,意大利的圣乔治大教堂的钟塔(Bell Tower of San Giorgio Church)中使用了形状记忆合金 SMA 对其进行加固,明显提高了钟塔的抗震性能及变形恢复功能。

为了克服钢筋混凝土易开裂的缺点,预应力混凝土的概念被提出。早在1928年,法国工程师 E. Freyssinet 成功地将高强钢丝用于预应力混凝土,使预应力混凝土的概念得以实现。预应力混凝土的应用对材料强度提出了更高的要求,而高强度的混凝土及钢材的发展又促进了预应力混凝土结构应用范围的扩大。预应力混凝土除了用于一般建筑结构外,还应用于对防腐、抗渗及对裂缝控制有特殊要求的结构,如电视塔、海洋采油平台、压力容器等。加拿大多伦多国家电视塔(CN Tower)是具有代表性的预应力混凝土构筑物,高度为553m。此外,著名的武汉长江大桥引桥、福建乌龙江大桥等均采用了预应力混凝土。四川泸州大桥,采用了预应力混凝土 T 形结构,三个主跨为170m,主桥全长1255.6m,引道长达7000m,是目前我国最长的公路大桥。

改善混凝土性能的另一个重要方面则是减轻混凝土的自重,使得混凝土结构能够适应对大跨和超高的需求。从20世纪60年代以来,轻骨料(陶粒、浮石、火山渣、膨胀矿渣等)混凝土和多孔、加气混凝土得到了迅速发展。其重度为 $14\sim 18\text{kN/m}^3$,比普通混凝土(重度约为 25kN/m^3)要轻很多。由于自重减轻,结构地震作用减小,因此可在地震区采用轻质混凝土结构。也可在预制、预制-现浇结构中采用,如制成预制大型壁板、屋面板以及现浇薄壳、大跨度、高层结构。但应用中需考虑它的特殊性能(如弹性模量低,收缩、徐变大等)。目前世界最高的轻质混凝土结构的高层建筑是美国休士顿贝壳广场大厦(One Shell Square),高215m,共52层。

混凝土结构中钢筋的锈蚀是影响结构生命周期的重要因素之一。用 FRP 筋(fiber reinforced plastic)代替混凝土中的钢筋则是一种有效的解决方法。FRP 是一种由纤维加筋、树脂母体和一些添加剂制成的复合材料。根据纤维种类的不同,FRP 分为碳纤维增强塑料(CFRP)、玻璃纤维增强塑料(GFRP)和芳香醚聚酰胺纤维增强塑料(AFRP)。FRP 具有高强、轻质、抗腐蚀、低松弛等诸多优点,用作预应力钢筋时相比钢筋有明显的优势。世界上第一座 GFRP 预应力混凝土公路桥梁在欧洲联邦德国的杜塞尔多夫(Dusseldorf)于1986年建成并投入使用。1993年,加拿大首次在卡尔加里(Calgary)建成了一座 CFRP 预应力混凝土公路桥。此外,在日本、美国及欧洲等发达国家或地区,使用 FRP 进行结构补强的理论研究和工程应用得到突飞猛进的发展。美国混凝土协会于1991年成立了 ACI440 委员会,负责开展 FRP 加固技术研究,编写了 FRP 混凝土结构研究现状分析报告,并于2001年颁布标准《FRP 筋增强混凝土结构设计与施工指南》(*Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*)。欧洲预应力混凝土协会(Federation International de la Precontrainte, FIP)于1993年成立 FRP 增强混凝土结构工作组,并完成了发展报告《FRP 增强钢筋混凝土结构设计指南》(*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*)。日本土木工协会(JSCE)也在混凝土结构与施工规范的基础上加入了 FRP 布补强、加固修复公路桥墩和铁路高架桥柱的设计内容。我国学者从20世纪90年代开始进行 FRP 混凝土结构的研究,取得了不少研究成果,并于2002年颁布了技术标准《碳纤维片材加固混凝土结构规程》(CECS 146—2003)。

1.2.2 混凝土结构体系

由混凝土结构基本构件(如梁、板、柱和拱等),根据不同的用途、结构功能,按照一定的规则,可以组成不同的结构体系。混凝土结构中的基本受力构件主要为钢筋混凝土构件,称为钢筋混凝土结构体系。以预

应力混凝土构件为主要受力构件的体系为预应力混凝土结构体系。为了适应高变形能力、重载等的需要,在混凝土结构构件中配置型钢或将混凝土构件与钢构件通过一定的连接措施结合在一起组成型钢混凝土组合结构体系;在钢管中填充混凝土形成钢管混凝土或钢管约束混凝土结构体系;在一种结构中同时使用钢构件、钢-混凝土组合构件和混凝土构件组成钢-混凝土混合结构体系。

相对于砌体结构、木结构和钢结构而言,混凝土结构是一种新兴结构,在 19 世纪中叶才开始得到应用,至今有 160 多年的历史。近代以来,经过了 J. Smeaton, J. Parker 等人的试作阶段,1824 年英国 J. Aspdin 调配石灰岩和黏土,首先烧制成了人工的硅酸盐水泥,并取得专利,成为水泥工业的开端。1854 年法国技师 J. L. Lambot 将铁丝网加入混凝土中制成了小船,并于 1855 年在巴黎博览会上展出,成为最早的混凝土制品。从那以后, F. Conigne, Wilkinson 等人改进了 J. L. Lambot 的制品,到 1867 年法国技师 J. Monier 取得了用格子状配筋制作桥面板的专利,混凝土工艺迅速地向前发展。1877 年美国 T. H. Yatt 研究了混凝土梁的力学响应,1887 年德国 Konen 提出了用混凝土承担压力和用钢筋承担拉力的设计方案,德国 J. Baushinger 确认了混凝土中的钢筋不受锈蚀等问题,这些研究成果促进了钢筋混凝土结构的迅速发展。1892 年法国 Hennebique 阐述了箍筋对抗剪的有效作用,并于 1898 年提出了 T 形梁的方案。关于柱子, Conigne 在钢筋混凝土桩方面得到了很多专利, Considere 根据试验于 1902 年取得了螺旋钢筋柱的专利。直到 19 世纪末以后,随着材料性能的改善、结构形式的多样化、计算理论及设计方法的不断改进,混凝土的工程应用十分普遍,已成为现代工程建设中应用最广泛的材料之一。我国则是混凝土结构使用最多的国家,特别是在高层建筑中,大多采用混凝土结构。图 1-5 所示为部分混凝土结构高层建筑。在多层住宅中也采用了混凝土-砌体混合结构。此外,一些构筑物,例如电视塔、储水池、烟囱、筒仓、压力贮罐等以及一些大跨度民用建筑、工业建筑也采用了钢筋混凝土和预应力混凝土结构。

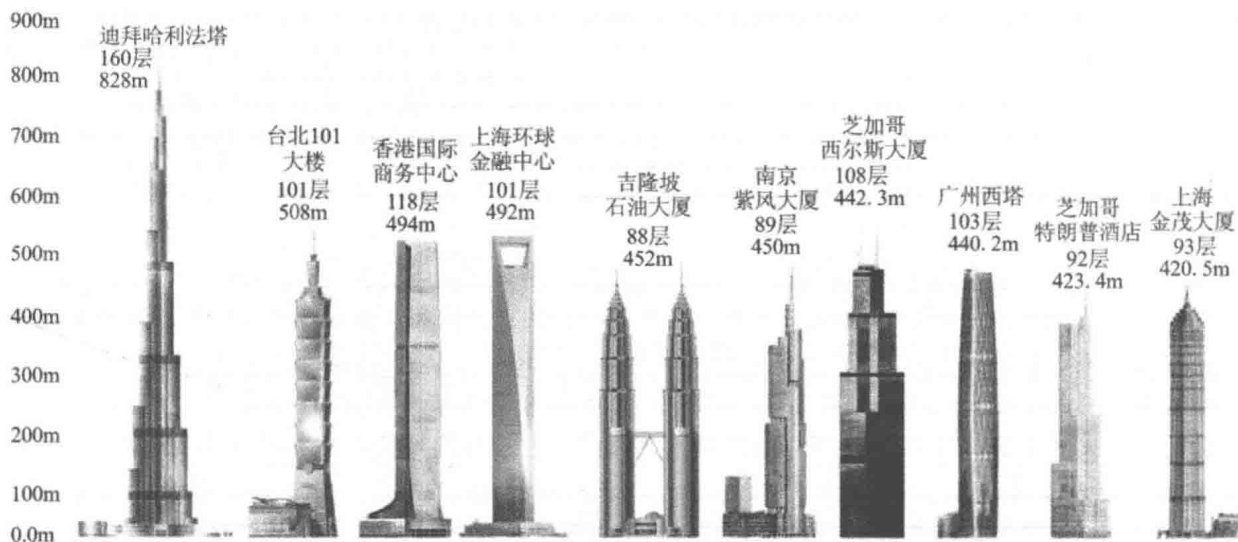


图 1-5 部分混凝土结构高层建筑

1.2.3 混凝土结构设计计算方法

在结构设计理论方面,钢筋混凝土使用早期,主要以弹性理论为基础的允许应力设计方法,将钢筋混凝土视为理想弹性材料,采用远低于材料试验所得的钢筋屈服强度和混凝土极限抗压强度作为允许应力。实践证明,这种容许应力设计方法和实际情况有很大出入,它认为截面应力分布是线性的,因此无法考虑钢筋与混凝土之间以及超静定结构各截面之间的应力或内力重分布,也无法深入考虑抗震设计中结构的延性。这些原因使得混凝土结构的设计从容许应力设计法发展到极限状态设计法。极限状态则是一个更加广泛的概念,指的是结构或构件达到该状态时,失去抵抗外力的能力(承载能力极限状态)或使得结构无法正常使用(正常使用极限状态)。不同的结构或构件应满足规定的极限状态要求,并在确定设计参数时应用了概率的思想,在荷载和材料强度等设计参数的取值上考虑了统计变异性。这种设计方法概念明确,考虑问题比较仔细,并于 20 世纪 70 年代为多数国家所采用,其理论本身逐渐向系统化和精确化发展。为了合理规定