



高等职业教育“十二五”规划教材
——道路桥梁工程技术专业系列规划教材

结构设计原理

◎ 曹孝柏 主编



JIEGOU SHEJI YUANLI



免费提供
电子教案



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育“十二五”规划教材
——道路桥梁工程技术专业系列规划教材

结构设计原理

曹孝柏 主编
王运政 主审



机械工业出版社

本书为高等职业教育“十二五”规划教材，全书按照最新《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)等规范、规程进行编写。全书涵盖了钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构等内容共计14个单元，主要内容包括：钢筋混凝土结构的基本概念及材料、结构按极限状态法设计计算的原则、钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算、钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算、钢筋混凝土受弯构件的应力计算、钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝宽度验算、轴心受压构件的正截面承载力计算、偏心受压构件的正截面承载力计算、预应力混凝土结构的基本概念及材料、预应力混凝土受弯构件按承载能力极限状态设计计算、预应力混凝土受弯构件按正常使用极限状态设计计算、预应力混凝土简支梁设计、圬工结构的基本概念与材料、圬工结构的承载力计算等。

本书既可作为高职院校道路桥梁工程技术专业的教材，也可作为交通土建类相关专业以及公路与桥梁工程设计、施工人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

结构设计原理/曹孝柏主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 8

高等职业教育“十二五”规划教材. 道路桥梁工程技术专业系列规划教材

ISBN 978-7-111-50958-5

I. ①结… II. ①曹… III. ①建筑结构—结构设计—高等职业教育—教材 IV. ①TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 168304 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张荣荣 责任编辑:张荣荣

版式设计:越颖喆 责任校对:佟瑞鑫

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.5 印张 · 381 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-50958-5

定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

出版说明

近年来，随着国家经济建设的迅速发展，道路桥梁的发展规模不断扩大，建设速度不断加快，对道桥专业具备高等职业技能的人才需求也随之不断加大。为了贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》的精神，我们通过深入调查，组织了全国二十余所高职高专院校的一批优秀教师，编写出版了本套教材。

本套教材编写中注重培养学生的实践能力，基础理论贯彻“实用为主、必需和够用为度”的原则，基本知识采用广而不深、点到为止的编写方法，基本技能贯穿教学的始终。在教材的编写中，力求文字叙述简明扼要、通俗易懂。本套教材结合了专业建设、课程建设和教学改革成果，在广泛的调查和研讨的基础上进行规划和编写，在编写中紧密结合职业要求，力争能满足高职高专教学需要并推动高职高专道桥类专业的教材建设。

本系列教材共十六本，包括《基础工程》《桥涵工程施工技术》《道路 CAD》《道路工程材料》《道路工程测量》《工程力学》《路基路面工程》《桥梁工程》《土质学与土力学》《公路工程造价》《公路工程施工监理》《道路工程制图》《道路工程制图习题集》《公路勘测设计》《结构设计原理》《公路工程检测技术》。

本系列教材适合高职高专院校、成人高校及二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校的道桥类专业使用，也可作为相关从业人员的培训教材。

机械工业出版社

前 言

随着《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)和《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)的陆续颁布,各校急需根据新规范编写的教材。本教材就是在这种背景下编写出版的。

本教材以最新颁布的规范为主要依据,介绍了钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和圬工结构的设计计算原理。本教材在编写过程中,编者着力贯彻能力本位思想,注重技能培养,注重结构基本概念和结构构造的介绍;在教材内容的取舍上,注意针对性和实用性,坚持必需和够用的原则,并努力做到理论联系实际;在教材内容的结构体系上,根据知识的内在逻辑关系,对传统的组织和表达形式作了较大的改革,使之更易教、易学。为了便于教学,每个单元前均编写了主要知识点、学习目标、学习重点,每个单元后均编写了复习思考题或习题。

本教材由湖南城建职业技术学院曹孝柏、索新文、刘月亮,湖南交通职业技术学院刘孟良,湖南高速铁路职业技术学院陈安生,湖南工程职业技术学院王小冰编著,曹孝柏任主编。其中绪论、单元1、单元3、单元4、单元7、单元8由曹孝柏执笔,单元2、单元9由索新文执笔,单元5、单元6由刘月亮执笔,单元10由陈安生执笔,单元11、单元12由刘孟良执笔,单元13、单元14由王小冰执笔。

本书在编写过程中,得到了机械工业出版社张荣荣、湖南建工集团第三工程公司戴习东、湖南建工集团第五工程公司罗贵生、湘潭市市政工程公司余泽红的指导和帮助,附于书末的参考文献作者们对本书的完成给予了巨大的支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书由湖南城建职业技术学院王运政教授主审。王教授对全书进行了十分认真的审阅,提出了不少建设性的意见,对保证本书质量起到了重要作用,谨此表示衷心感谢,并对王教授严谨的治学态度表示钦佩。

由于编者水平有限,加之对新颁布的规范理解不深,教材中难免有不足和欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

绪论	1
0.1 结构的概念及类型	1
0.2 各种材料结构的特点及使用范围	1
0.3 结构设计的基本要求	2
0.4 本课程的内容、学习目标及应注意的问题	3
单元 1 钢筋混凝土结构的基本概念及材料	4
1.1 钢筋混凝土结构的基本概念	4
1.2 混凝土	5
1.3 钢筋	12
1.4 钢筋与混凝土之间的黏结	19
复习思考题	20
单元 2 结构按极限状态法设计计算的原则	22
2.1 作用（荷载）与作用（荷载）效应组合	23
2.2 极限状态法设计的基本概念	25
2.3 我国公路桥涵设计规范规定的计算原则	27
复习思考题	30
单元 3 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	32
3.1 钢筋混凝土受弯构件的构造要求	32
3.2 受弯构件正截面受力全过程和破坏特征	36
3.3 单筋矩形截面受弯构件计算	40
3.4 双筋矩形截面受弯构件计算	50
3.5 单筋 T 形截面受弯构件计算	54
复习思考题	62
习题	63
单元 4 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	65
4.1 受弯构件斜截面的受力特点及破坏形态	65
4.2 受弯构件斜截面抗剪承载力计算	67
4.3 受弯构件斜截面抗弯承载力计算	74
4.4 全梁承载力校核与构造要求	75
复习思考题	85
习题	86
单元 5 钢筋混凝土受弯构件的应力计算	87
5.1 换算截面	87

VI

5.2 受弯构件在施工阶段的应力计算	91
复习思考题	98
习题	98
单元6 钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝宽度验算	99
6.1 受弯构件的变形计算	99
6.2 受弯构件的裂缝宽度计算	103
复习思考题	106
习题	107
单元7 轴心受压构件的正截面承载力计算	108
7.1 概述	108
7.2 普通箍筋柱	109
7.3 螺旋箍筋柱	114
复习思考题	117
习题	118
单元8 偏心受压构件的正截面承载力计算	119
8.1 概述	119
8.2 偏心受压构件的纵向弯曲	125
8.3 矩形截面偏心受压构件	128
8.4 圆形截面偏心受压构件	142
复习思考题	148
习题	149
单元9 预应力混凝土结构的基本概念及材料	150
9.1 概述	150
9.2 部分预应力混凝土与无黏结预应力混凝土	152
9.3 预加应力的方法与设备	157
9.4 预应力混凝土结构的材料	163
复习思考题	164
单元10 预应力混凝土受弯构件按承载能力极限状态设计计算	165
10.1 概述	165
10.2 预加力的计算与预应力损失的估算	167
10.3 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	175
复习思考题	181
单元11 预应力混凝土受弯构件按正常使用极限状态设计计算	182
11.1 预应力混凝土受弯构件的应力计算	182
11.2 预应力混凝土受弯构件的抗裂验算	189
11.3 端部锚固区计算	192
11.4 变形计算	196
11.5 部分预应力混凝土 B 类构件的裂缝宽度验算	198
复习思考题	200
单元12 预应力混凝土简支梁设计	201
12.1 预应力混凝土受弯构件的基本构造	201
12.2 预应力混凝土简支梁设计计算示例	207

复习思考题	216
单元 13 圬工结构的基本概念与材料	217
13.1 概述	217
13.2 圬工结构的材料	218
13.3 砌体的强度与变形	221
复习思考题	228
单元 14 圬工结构的承载力计算	229
14.1 设计原则	229
14.2 圬工受压构件正截面承载力计算	229
复习思考题	237
习题	237
参考文献	238

绪 论

0.1 结构的概念及类型

在土建工程中，所有建筑物的承重骨架都是由若干构件通过一定方式连接而成的，用以承受并传递各种作用（包括荷载和间接作用）。如各种桥梁的承重骨架都是由桥面板、主梁、横梁、墩台、拱、索等构件所组成，其中梁、板、拱、索等称为基本构件。在建筑物中，承受和传递作用的各个部件的总和称为结构，它是由若干构件按照一定的规则，通过正确的连接方式组成的承重骨架体系。

根据构件受力与变形的特点，基本构件可分为受拉构件、受压构件、受弯构件和受扭构件等。在工程实际中，有些构件的受力和变形比较简单，而有些构件的受力和变形则比较复杂，可能是几种受力状态的组合。

按承重结构所用材料不同，桥涵结构可分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢结构、砖石及混凝土结构（圬工结构）、木结构等。

(1) 钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种力学性质不同的材料组成，具有可就地取材，耐久性好，刚度大，可模性好等优点，相对于预应力混凝土结构而言，还具有较好的延展性和抗震性能。其缺点是：由于混凝土抗拉强度太低，构件容易开裂，跨越能力不强，且构件尺寸大，自重大等。钢筋混凝土结构广泛应用于各种桥梁、涵洞、挡土墙、路面、水工结构和房屋结构等。

(2) 预应力混凝土结构。预应力混凝土结构由于在构件承受作用之前预先对混凝土受拉区施加适当的压应力，因而在正常使用条件下，可以人为地控制截面上的应力，从而延缓裂缝的产生和发展，或者说可将裂缝宽度控制在一定的范围之内，且可采用高强混凝土及高强钢材，从而降低自重，增强跨越能力。但高强材料单价高，预应力混凝土结构施工难度大、工序多，对技术要求也较高。

(3) 圬工结构。圬工结构是以砖石或混凝土包括以其块件和砂浆或小石子混凝土结合而成的砌体作为建筑材料所建成的结构。其特点是易于就地取材，且有好的耐久性，但自重大，施工机械化程度低，多用于中小跨度的拱桥、墩台、挡土墙及防护工程中。

(4) 钢结构。钢结构是由型钢或钢板通过一定的连接方式所构成。钢结构的可靠性高，其基本构件可在工厂制作，故施工效率高，周期短。但相对于混凝土结构而言，造价较高，而且养护费用也高。

(5) 木结构。由于木材易燃、易腐蚀、易变形，加之我国木材资源严重不足，因此，除抢险急修的临时性便道外，禁止修建木桥。

0.2 各种材料结构的特点及使用范围

目前国内外桥梁的发展总趋势是：轻型化、标准化和机械化。因而，对于基本构件的设

计也应符合上述要求。

1. 各种材料结构的特点

(1) 结构质量。为了达到增大结构跨径的目的，应力求使构件能做成薄壁、轻型和高强。钢材的单位体积质量虽大，但其强度却很高；木材的强度虽很低，但其密度却很小。通常情况下，在跨径较大的永久性桥梁结构中，采用预应力混凝土结构是十分合理和经济的。

(2) 使用性能。从结构抵抗变形的能力（即刚度）、结构的延性、耐久性和耐火性等方面来说，则以钢筋混凝土结构和圬工结构较好；钢结构和木结构则都需采取适当的防护措施和定期进行保养维修。预应力混凝土结构的耐久性比钢筋混凝土结构更好，但其延性则不如钢筋混凝土结构好。

(3) 建筑速度。石材或混凝土结构和钢筋混凝土结构较易就地取材；钢、木结构则易于快速施工。由于混凝土工程需要有一段时间的结硬过程，因而施工工期一般较长。尽管装配式钢筋混凝土结构可以在预制工厂进行工业化成批生产，但建筑工期稍比钢、木结构要长。

2. 各种材料结构的使用范围

(1) 钢筋混凝土结构。钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种材料组成的，具有易于就地取材、耐久性好、刚度大、可模性（亦即可以根据工程需要浇筑成各种几何形状）好等优点。钢筋混凝土结构的应用范围非常广泛，如各种桥梁、涵洞、挡土墙、路面、水工结构和房屋建筑等。当采用标准化、装配化的预制构件时，更能保证工程质量和加快施工进度。相对于预应力混凝土结构而言，钢筋混凝土结构具有较好的延性，对抗震结构更为有利。但是，钢筋混凝土结构也有自重较大、抗裂性能差、修补困难等缺点。

(2) 预应力混凝土结构。构件在承受作用之前预先对混凝土受拉区施以适当压应力的结构称为“预应力混凝土结构”，因而在正常使用条件下，可以人为地控制截面上只出现很小的拉应力或不出现拉应力，从而延缓了裂缝的发生和发展，且可使高强度钢材和高等级混凝土的“高强”在结构中得到充分利用，降低了结构的自重，增强了跨越能力。目前，预应力混凝土结构在国内外得到了迅速发展，是现今桥梁工程中应用较广泛的一种结构。近年来，部分预应力混凝土结构也正在快速地发展。它是介于普通钢筋混凝土结构与全预应力混凝土结构之间的一种中间状态的混凝土结构。它可以人为地根据结构的使用要求，控制混凝土裂缝的开裂程度和拉应力大小。

(3) 砖石或混凝土结构（统称圬工结构）。用胶结材料将天然石料、混凝土预制块等块材按一定规则砌筑而成的整体结构即为圬工结构。石材及混凝土结构在我国使用甚广，常用于拱圈、墩台、基础和挡土墙等结构中。

因本书主要讲述的是钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砖石或混凝土结构，故对钢结构、木结构的使用特性不作介绍。

0.3 结构设计的基本要求

结构设计应遵循安全、适用、经济、美观和利于环保的原则。结构设计的目的，就是要使所设计的结构，在规定的时间内具有足够的可靠性，即要求它们在承受各种作用后具有足够的承载能力、刚度、稳定性和耐久性。承载能力要求是指在设计使用年限内，结构及各个构件（包括连接件）具有足够的安全储备；刚度要求是指结构及各个构件的变形在容许范围内；稳定性要求是指结构整体及其各个组成构件在计算荷载作用下都处于稳定的平衡状

态；耐久性是指结构和构件在设计使用年限内，不发生破坏或产生过大的裂缝而影响正常使用。此外，结构构件还应该满足制造、运输和安装过程中的强度、刚度和稳定性要求。

结构及各个构件在满足可靠性的同时，还应具有经济性。构件的可靠性与材料性质、几何形状、截面尺寸、受力特点、工作条件、构造特点以及施工质量等因素有关。可靠和经济是相互矛盾的。当其他条件已确定时，如果构件的尺寸过小，则结构有可能会因为产生过大的变形而不能正常使用，或者因为承载能力不够而导致结构物的崩塌。反之，如果截面尺寸过大，则构件的承载能力又将过分富裕，从而造成人力、物力的过大耗费。结构设计所要解决的根本问题，就是要在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡，使所建造的结构既经济合理，又安全可靠。

0.4 本课程的内容、学习目标及应注意的问题

本课程主要讨论桥涵结构基本构件的受力特性、计算方法及构造要求，包括钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圪工结构基本构件。通过学习，应懂得结构计算的基本原则，掌握钢筋混凝土结构基本构件计算方法，了解预应力混凝土结构、圪工结构基本构件的计算方法，理解各种结构构件的构造要求，为后续课程的学习和将来从事桥涵结构的施工、设计奠定基础。

在学习本课程时，应特别注意以下几个方面：

(1) 注意培养“工程思维”。《结构设计原理》是道路桥梁工程技术、市政工程技术等专业的一门重要的技术基础课，是基础课和专业课之间的桥梁和纽带，同时也具有和基础课、专业课不同的特点。如本课程的绝大多数公式均非单纯由理论推导而来，而是以经验、试验为基础得到的半理论半经验公式；结构设计具有多方案性，即使是同一构件在给定荷载作用下，其截面形式、截面尺寸、配筋方式和数量都没有唯一答案，而只存在好与不好之分，往往需要综合考虑适用、材料、造价、施工等多方面因素，才能做出合理选择，因而设计过程往往是一个多次反复的过程。所以，不能以学习数学、力学等的思维模式和学习方法来学习这门课程。

(2) 要注意本课程同力学知识的联系和区别。本课程所研究的对象，除钢结构外都不符合匀质弹性材料的条件，因此力学公式多数不能直接搬用，但从通过几何、物理和平衡关系来建立基本方程来说，二者是相同的。所以，在应用力学原理和方法时，必须考虑材料性能上的特点，切不可照搬照抄。

(3) 注重规范的学习。从某种意义上说，学习本课程就是学习规范。规范是国家颁布的关于结构计算和构造要求的技术规定和标准，具有一定的约束性和法规性。我国现行公路桥涵设计规范主要有《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路圪工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)等，本书统称为《公路桥规》。熟悉并学会应用有关规范是学习本课程的重要任务之一，因此，应自觉结合课程内容学习，以达到逐步熟悉并正确应用之目的。

(4) 重视各种构造措施。现行结构实用计算方法一般只考虑了荷载作用，其他影响，如混凝土收缩、温度影响以及地基不均匀沉降等，难以用计算公式表达。规范根据长期工程实践经验，总结出了一些构造措施来考虑这些因素的影响。所谓构造措施，就是对结构计算中未能详细考虑或难以定量计算的因素，在施工简便、经济合理前提下所采取的技术措施，它与结构计算是结构设计中相辅相成的两个方面。因此，学习时不但要重视各种计算，还要重视构造措施，设计时必须满足各项构造要求。但除常识性构造规定外，不能死记硬背，而应该着眼于理解。

单元 1 钢筋混凝土结构的基本概念及材料

主要知识点

①钢筋混凝土结构的定义及特点；钢筋与混凝土共同工作的机理；②混凝土的立方体强度和轴心抗压（拉）强度；混凝土变形类型及特点；混凝土徐变的概念及规律；混凝土的收缩特性；③热轧带肋（光圆）钢筋、冷轧带肋钢筋、余热处理钢筋和钢丝的表示方法；钢筋的应力-应变曲线；钢筋强度的标准值和设计值；④钢筋与混凝土的黏结力；确保黏结强度的措施。

学习目标

①了解混凝土的变形、收缩及徐变；②了解钢筋的分类及性能；③熟悉钢筋与混凝土之间的黏结作用。

学习重点

钢筋与混凝土的物理力学性能及相互作用。

1.1 钢筋混凝土结构的基本概念

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料结合成整体，共同承受作用的一种建筑材料。

混凝土是一种人造石料，其抗压强度很高，而抗拉强度很低。采用素混凝土做成的构件，例如素混凝土梁，当它承受竖向作用时，在梁的垂直截面（正截面）上将产生弯矩，中性轴以上受压，以下受拉。当作用达到某一数值 P 时，梁的受拉区边缘混凝土的拉应变达到极限拉应变，即出现竖向弯曲裂缝，这时，裂缝截面处的受拉区混凝土退出工作，该截面处的受压区高度减小，即使作用不增加，竖向弯曲裂缝也会急速向上发展，导致梁骤然断裂。这种破坏是很突然的，也就是说，当作用达到 P 的瞬间，梁立即发生破坏。 P 为素混凝土梁受拉区出现裂缝时的作用（荷载），一般称为素混凝土梁的抗裂荷载，也是素混凝土梁的破坏荷载。由此可见，素混凝土梁的承载能力是由混凝土的抗拉强度控制的，而受压区混凝土的抗压强度远未被充分利用。在制造混凝土梁时，倘若在梁的受拉区配置适量的抗拉强度高的纵向钢筋，就构成钢筋混凝土梁。试验表明，和素混凝土梁有相同截面尺寸的钢筋混凝土梁承受竖向作用时，作用略大于 P 时梁的受拉区仍会出现裂缝。在出现裂缝的截面处，受拉区混凝土虽退出工作，但配置在受拉区的钢筋几乎承担了全部的拉力。这时，钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样立即断裂，仍能继续工作，直至受拉钢筋的应力达到其屈服强度，继而受压区的混凝土也被压碎，梁才被破坏。因此，钢筋混凝土梁中混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都能得到充分的利用，承载能力可较素混凝土梁提高很多。

混凝土的抗压强度高，常用于受压构件。若在构件中配置抗压强度高的钢筋来构成钢筋混凝土受压构件，试验表明，与素混凝土受压构件截面尺寸及长细比相同的钢筋混凝土受压构件，不仅承载能力大为提高，而且受力性能得到改善。在这种情况下，钢筋主要是协助混凝土来共同承受压力。

综上所述，根据构件受力状况配置钢筋构成钢筋混凝土构件后，可以充分发挥钢筋和混凝土各自的材料力学特性，把它们有机地结合在一起共同工作，提高了构件的承载能力，改善了构件的受力性能。钢筋用来代替混凝土受拉（受拉区混凝土出现裂缝后）或协助混凝土受压。

钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料之所以能有效地结合在一起而共同工作，主要是由于：

(1) 混凝土和钢筋之间有良好的黏结力，使两者能可靠地结合成一个整体，在荷载作用下能够很好地共同变形，完成其结构功能。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数也较为接近（钢筋为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ），因此，当温度变化时，不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的黏结。

(3) 混凝土包裹在钢筋的外围，可以防止钢筋的锈蚀，保证了钢筋与混凝土的共同工作。

钢筋混凝土除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外，还有下述一些优点：

(1) 在钢筋混凝土结构中，混凝土的强度是随时间而不断增长的，同时，钢筋被混凝土所包裹而不致锈蚀，所以，钢筋混凝土结构的耐久性是较好的。钢筋混凝土结构的刚度较大，在使用荷载作用下的变形较小，故可有效地用于对变形要求较严格的建筑物中。

(2) 钢筋混凝土结构既可以整体现浇也可以预制装配，并且可以根据需要浇制成各种形状和截面尺寸的构件。

(3) 钢筋混凝土结构所用的原材料中，砂、石所占的比重较大，而砂、石易于就地取材，可以降低工程造价。

当然，钢筋混凝土结构也存在一些缺点，如：钢筋混凝土结构的截面尺寸一般较相应的钢结构大，因而自重较大，这对于大跨度结构是不利的；抗裂性能较差，在正常使用时往往是带裂缝工作的；施工受气候条件影响较大，并且施工中需耗用较多木材；修补或拆除较困难等。

钢筋混凝土结构虽有缺点，但毕竟有其独特的优点，所以广泛应用于桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、铁路工程以及水工结构工程、海洋结构工程等。随着钢筋混凝土结构的不断发展，上述缺点已经或正在逐步加以改善。

1.2 混凝土

1.2.1 混凝土的强度

1. 混凝土立方体抗压强度

混凝土的立方体抗压强度是一种在规定的统一试验方法下衡量混凝土强度的基本指标。我国标准试件取用边长相等的混凝土立方体。这种试件的制作和试验均比较简便，而且离散性较小。

我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)规定以边长为150mm的立方体试件,在标准养护条件下($20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$)养护28d,依照标准试验方法加压至试件破坏测得的具有95%保证率的抗压强度值(以MPa计)作为混凝土的立方体抗压强度标准值($f_{\text{cu,k}}$),同时用此值来表示混凝土的强度等级,并冠以“C”。如C30,则表示为30级混凝土,“30”表示该级混凝土立方体抗压强度的标准值为30MPa。

混凝土立方体抗压强度与试验方法有密切关系。在通常情况下,试验机承压板与试件之间将产生阻止试件向外自由变形的摩擦阻力,阻滞了裂缝的发展,从而提高了试块的抗压强度。如果在承压板与试件之间涂油脂润滑剂,则试验加压时摩擦阻力将大为减小。规范上规定采用的是不加润滑剂的试验方法。

混凝土的立方体抗压强度还与试件尺寸有关。试验表明,立方体试件尺寸越小,摩擦阻力的影响越大,测得的强度也越高。在实际工程中也有采用边长为200mm和边长为100mm的混凝土立方体试件,则所测得的立方体强度应分别乘以换算系数1.05和0.95来折算成边长为150mm的混凝土立方体抗压强度。

混凝土的立方体抗压强度的标准值又称为混凝土的强度等级。用于公路桥梁承重部分的混凝土强度等级有C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75和C80等。钢筋混凝土构件的混凝土强度等级不宜低于C20;当采用HRB400、KL400级钢筋时,混凝土强度等级不宜低于C25;预应力混凝土构件不应低于C40。

2. 混凝土轴心抗压强度

通常钢筋混凝土构件的长度比它的截面边长要大得多,因此棱柱体试件(高度大于截面边长的试件)的受力状态更接近于实际构件中混凝土的受力情况。工程中通常用高宽比为3~4的棱柱体,按照与立方体试件相同条件下制作和试验方法测得的具有95%保证率的棱柱体试件的极限抗压强度值,作为混凝土轴心抗压强度,用 f_{ck} 表示。

试验表明,棱柱体试件的抗压强度较立方体试块的抗压强度低。通过大量棱柱体抗压试验结果发现, f_{ck} 与 $f_{\text{cu,k}}$ 的关系大致呈一直线,如图1-1所示。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)规定,结构中混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系大致为 $f_{\text{ck}} = 0.88\alpha f_{\text{cu,k}}$,式中, α 为系数,C50以下混凝土 $\alpha = 0.76$,C50以上混凝土 $\alpha = 0.78 \sim 0.82$ 。国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定,混凝土的轴心抗压强度试验以 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的试件为标准试件。

3. 混凝土轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度和抗压强度一样,都是混凝土的基本强度指标。但是混凝土的轴心抗拉强度很低,一般约为立方体强度的 $1/8 \sim 1/18$ 。为此,在进行钢筋混凝土结构强度计算时,总是考虑受拉区混凝土开裂后退出工作,拉应力全部由钢筋来承受,这时,混凝土的抗拉强度没有实际意义。但是,对于不容许出现裂缝的结构,就应考虑混凝土的抗拉能力,并以混凝土的轴心抗拉极限强度作为混凝土抗裂强度的重要指标。

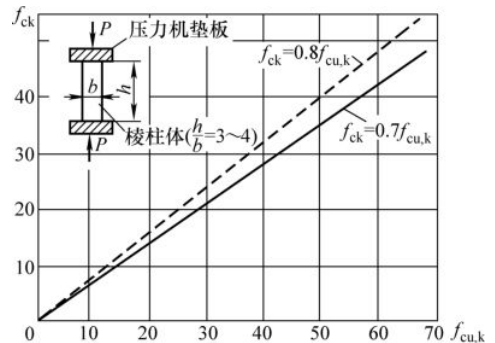


图 1-1 混凝土棱柱体抗压强度 f_{ck} 与立方体抗压强度 $f_{\text{cu,k}}$ 的关系

测定混凝土轴心抗拉强度的方法有两种：一种是直接测试方法，如图 1-2 所示，对两端预埋钢筋的长方体试件（钢筋位于试件轴线上）施加拉力，试件破坏时的平均拉应力，即为混凝土的轴心抗拉强度。

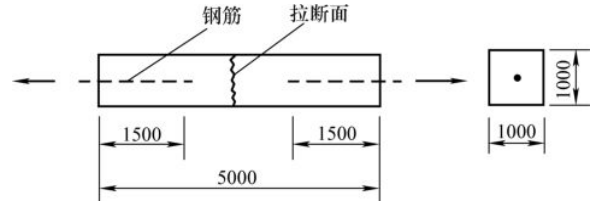


图 1-2 混凝土轴心抗拉强度直接测试试件

另一种为间接测试方法，如劈裂试验（图 1-3），试件采用立方体或圆柱体，试件平放在压力机上，通过垫条施加线集中力 P ，试件破坏时，在破裂面上产生与该面垂直且均匀分布的拉应力，当拉应力达到混凝土的抗拉强度时，试件即被劈裂成两半。

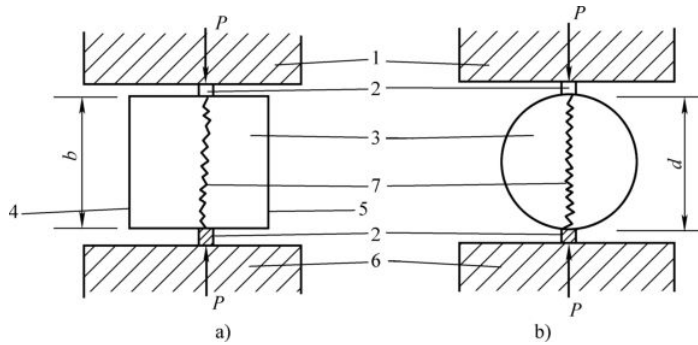


图 1-3 用劈裂法试验混凝土抗拉强度示意图

a) 用立方体进行劈裂试验 b) 用圆柱进行劈裂试验

1—压力机上压板 2—垫条 3—试件 4—浇模顶面 5—浇模底面 6—压力机下压板 7—试件破裂线

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62—2004）规定，结构中混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度的关系大致为 $f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45}$ 。式中 δ 为混凝土立方体抗压强度变异系数，对 C60 以下混凝土，取 $\delta = 0.1$ 。

4. 混凝土轴心抗压（拉）强度标准值与设计值

材料强度标准值是考虑到同一批材料实际强度有时大有时小的这种离散性，为了统一材料质量要求而规定的材料极限强度的值。在分析大量试验结果的基础上，通过数理统计，根据结构的安全和经济条件，选取某一个具有 95% 保证率的强度值，作为混凝土强度的标准值。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62—2004）推荐的混凝土强度标准值与混凝土立方体抗压强度标准值存在着一定的折算关系。

混凝土强度设计值主要用于承载能力极限状态设计的计算。概率极限状态设计方法规定强度设计值应用标准值除以材料分项系数而得。混凝土的材料分项系数 $\gamma_c = 1.4$ 。

不同强度等级混凝土强度设计值和强度标准值见表 1-1。

表 1-1 混凝土强度设计值和强度标准值

（单位：MPa）

强度种类	符号	混凝土强度等级														
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80	
强度设计值	轴心抗压	f_{cd}	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
	轴心抗拉	f_{td}	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22

(续)

强度种类		符号	混凝土强度等级													
			C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
强度标准值	轴心抗压	f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
	轴心抗拉	f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.10

注：计算现浇钢筋混凝土轴心受压和偏心受压构件时，如截面的长边或直径小于 300mm，表中数值应乘以系数 0.8；当构件质量（混凝土成型、截面和轴线尺寸等）确有保证时，可不受此限。

1.2.2 混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类，一类是在荷载作用下的受力变形，如单调短期加载的变形、荷载长期作用下的变形以及多次重复加载的变形；另一类与受力无关，称为体积变形，如混凝土收缩及温度变化引起的变形。

1. 混凝土的受力变形

(1) 混凝土在一次短期荷载作用下的变形。研究混凝土在一次短期加荷时的变形性能，也就是要研究混凝土受压时的应力-应变曲线形状、曲线中的最大应力值及其对应的应变值和破坏时的极限应变值。

据试验资料可得图 1-4 所示的混凝土棱柱体一次短期加荷轴心受压的应力-应变曲线。

在曲线开始部分，即 $\sigma_c \leq 0.2\sigma_{\max}$ 时应力与应变近似呈线性关系，此时混凝土的变形主要取决于集料和水泥在受压后的弹性变形。当应力超过 $0.2\sigma_{\max}$ 后，塑性变形渐趋明显，应力-应变曲线的曲率随应力的增长而增大，且应变的增长较应力为快。这是由于除水泥凝胶体的黏性流动外，混凝土中已产生微裂缝并开始扩展所致。当 $\sigma_c \geq 0.75\sigma_{\max}$ 时，微裂缝继续扩展并互相贯通，使塑性变形急剧增长，最后在 σ_c 接近 σ_{\max} 时，混凝土内部微裂缝转变为明显的纵向裂缝，试件的抗力开始减小。此时混凝土试件所承受的最大应力 σ_{\max} 即为棱柱体强度 f_{cd} ，其相应的应变值 $\varepsilon_c = 0.0008 \sim 0.003$ （计算时取 $\varepsilon_c = 0.002$ ）。曲线 $O \sim \sigma_{\max}$ 段称为此应力-应变曲线的“上升段”。

由于加荷，试验机本身变形而积存了弹性应变能。早期的试验机刚度较小，它所积存的弹性应变能就较大，当试件加荷到 σ_{\max} 后，试验机因混凝土抗力减小，而一下子把能量释放出来，对试件施加了附加应变，使试件发生急速的崩坏，所测得的应力-应变曲线只有上升段；现在的试验机采用了先进技术，其刚度大，它所积存的弹性应变能较小，当试件加荷到 σ_{\max} 时，试件还不会立即破坏。如果试验机不再加荷而是缓慢地卸荷，试件应力逐渐减小，但是试验机还在释放能量，致使试件仍在持续地变形，使应力-应变曲线形成“下降段”，直至下降段末端 C ，试件才完全破坏。 C 点相应的应变即为混凝土受压极限应变 ε_{cu} 。一般情况下， $\varepsilon_{cu} = 0.002 \sim 0.006$ ，有时甚至可达 0.008。对高强度（如 C50 和 C60）混凝土，由

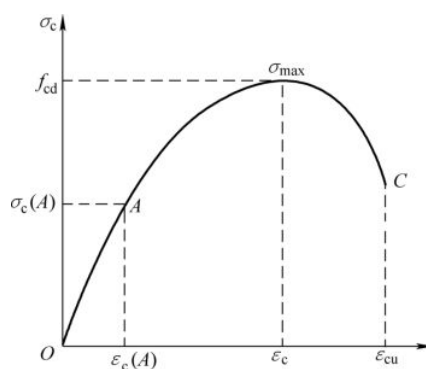


图 1-4 混凝土一次短期加荷（压）时的应力-应变曲线

于其脆性性质，没有这种下降段或下降段很不明显。

试验证明，混凝土塑性变形的大小与加荷速度及荷载持续时间有密切关系。在瞬时荷载作用下，比如，当每级荷载持续时间少于 0.001s 时，所记录的变形完全为弹性变形，应力-应变呈直线关系。这时荷载持续时间越长，试件变形越大，应力-应变曲线的曲率也就越大。

混凝土的一次短期加荷轴心受拉应力-应变曲线与轴心受压类似，但比受压应力-应变曲线的曲率变化小，受拉极限应变 $\varepsilon_c = 0.0001 \sim 0.00015$ ，仅为受压极限应变的 1/20 ~ 1/15，这也是混凝土受拉时容易开裂的原因。

(2) 混凝土在多次重复荷载作用下的变形。图 1-5a 所示为混凝土棱柱体在一次加荷卸荷时的应力-应变曲线，加荷曲线 OA 凹向 ε 轴，而卸荷曲线 AB 凸向 ε 轴，当荷载全部卸完一瞬间，卸荷曲线 AB 的末端为 B 点，如果停留一段时间再量测试件应变，则发现还有很小的变形可以恢复，也即由 B 点到 B' 点，则 BB' 的恢复应变称为混凝土的弹性后效， $B'O$ 称为试件残余应变。图 1-5b 所示为混凝土棱柱体在多次重复荷载作用下的应力-应变曲线，当受压重复荷载引起的最大应力（图 1-5b）中的 σ_1 或 σ_2 不超过 $0.5f_{cd}$ 时，随着反复加、卸荷次数的增加，加荷曲线的曲率也逐渐减小。经 4 ~ 10 次循环后，塑性变形基本完成，而只有弹性变形，混凝土的应力-应变曲线逐渐接近于直线，并大致平行于通过原点的切线。当应力如图 1-5b）中的 σ_3 超过 $0.5f_{cd}$ 时，开始也是经若干次循环后，应力-应变关系变成直线。但若继续循环下去，将重复出现塑性变形，且应力-应变曲线向相反方向弯曲，直至循环到一定次数，由于塑性变形的不断扩展，导致构件破坏。这种情况称为疲劳破坏。试验证明，重复荷载引起的应力越大，试验达到疲劳所需的循环次数则越少。

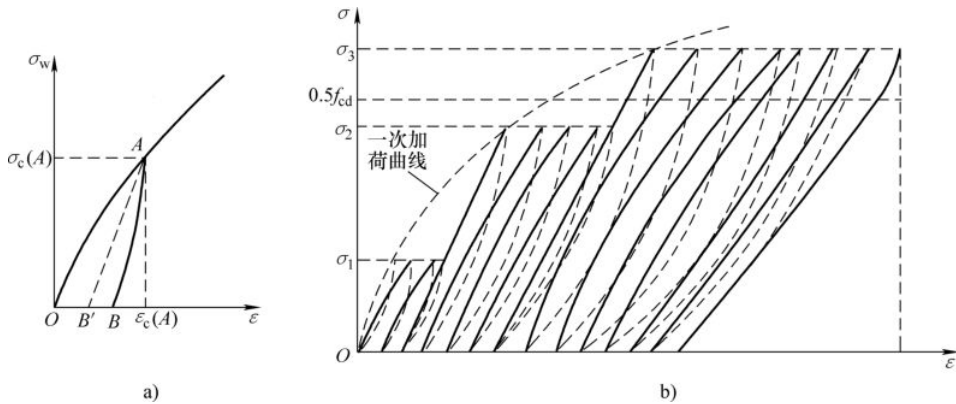


图 1-5 混凝土在重复荷载下的应力-应变曲线

a) 一次加荷卸荷 b) 多次加荷卸荷

对于由混凝土组成的桥涵结构，通常要求能承受两百万次的反复荷载作用。经受两百万次反复变形而破坏的应力即称为混凝土的疲劳强度 (f_p)。混凝土的疲劳强度约为其棱柱体强度的 50%，即 $f_p \approx 0.5f_{cd}$ 。

(3) 混凝土在长期荷载作用下的变形。在混凝土棱柱体试件上加荷，试件产生压应变，如果维持荷载不变，若干时间后，混凝土的应变还在继续增加。混凝土在荷载长期作用下（即压力不变的情况下），应变随时间继续增长的现象称为混凝土的徐变。

混凝土的徐变具有如下规律：