



高等职业教育特色精品课程规划教材
高等职业教育课程改革项目研究成果

结构设计 原理

Jiegou Sheji
Yuanli

◇主 编 于 辉 崔 岩
◇副主编 陈立春 申 建
◇主 审 谢守军

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等职业教育特色精品课程规划教材
高等职业教育课程改革项目研究成果

结构设计原理

主 编	于 辉	崔 岩			
副主编	陈立春	申 建			
主 审	谢守军				
参 编	郭 梅	王东杰	张 月	姜仁安	
	慕 平	高 峰	崔惠德	闫淑杰	



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书是根据高职高专道桥及相关专业的结构设计原理课程的教学要求编写的, 根据我国国家标准和交通部颁布的现行交通行业标准与设计规范, 对公路桥涵有关钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构的基本构件受力特性、设计计算原理和构造及施工预制过程作了详尽的介绍。

本书可作为高职高专道路与桥梁技术专业、工程监理专业、工程造价专业等交通土建类专业教材, 亦可供从事公路与桥梁专业设计与施工的有关技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

结构设计原理/于辉, 崔岩主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 2600 - 4

I. 结… II. ①于…②崔… III. ①道路工程 - 结构设计 - 高等学校: 技术学校 - 教材②桥梁结构 - 结构设计 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. U412 U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 139459 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 13.75

字 数 / 321 千字

版 次 / 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 25.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

前言

本书以最新颁布的《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)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)、公路桥涵施工技术规范(JTJ 041—2000)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构造及基本设计原理。

根据编者们的多年的教学和工程实践经验,本书对上述规范作了必要的解释和说明,介绍了实用计算方法,并在每章附有例题、思考题和习题。

本书编写是通过调研及邀请企业一线路桥施工设计人员共同进行研究,对道路与桥梁工程的施工设计进行岗位能力分析,根据岗位能力要求,将结构设计原理理论课程内容分解为与岗位能力相对应的钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和圬工结构三个教学项目,各个项目下有各自的学习情境及子学习情境,并且每个项目配以工程施工工艺及工程实例,以满足学生职业能力的要求。

本书共分三大项目。项目一为钢筋混凝土结构,主要介绍了钢筋混凝土结构的基本概念及材料性质,我国现行公路设计规范的设计原则,钢筋混凝土受弯、受压构件的承载力计算及构造原理,受弯构件的应力、裂缝与变形计算验算,最后介绍了钢筋混凝土受弯构件及受压构件的施工预制过程。项目二为预应力混凝土结构,主要介绍了预应力混凝土结构的基本概念,预应力混凝土结构受弯构件的计算方法,最后介绍预应力混凝土结构的施工预制方法。项目三为圬工结构,主要介绍了圬工结构的基本概念,圬工结构的承载力计算,最后介绍圬工结构的砌筑方法。

参与本书编写的人员有:吉林交通职业技术学院于辉、崔岩、陈立春、申建、郭梅、王东杰、张月、姜仁安、高峰、崔惠德、闫淑杰、朱春风,昆明杰宏测绘科技咨询有限公司张广军。本书由于辉、崔岩任主编,陈立春、申建任副主编。具体分工如下:于辉编写总说明项目一中的子项目一,崔岩编写项目一中的子项目二及项目二中学习情境三,陈立春编写全书思考题与习题及项目二中学习情境一,申建编写项目二学习情境二中子学习情境一、子学习情境三、子学习情境四,郭梅、姜仁安编写项目二学习情境二中子学习情境二,王东杰、慕平编写项目三中的学习情境一,高峰、崔惠德、张月、闫淑杰、朱春风编写项目三中的学习情境二,张广军编写项目三中的学习情境三。全书由于辉、崔岩统稿。在编写过程中得到了吉林大学张弘强老师的帮助和支持,在此对本书参考的相关的论著和资料的编者一并表示感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,教材中难免出现不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

总说明	(1)
思考题与习题	(4)
项目一 钢筋混凝土结构	(5)
子项目一 钢筋混凝土受弯构件	(5)
学习情境一 钢筋混凝土结构的基本知识	(5)
子学习情境一 钢筋混凝土结构概述	(5)
子学习情境二 钢筋混凝土材料物理的力学性质	(7)
子学习情境三 钢筋与混凝土的相互作用——粘结力	(26)
思考题与习题	(27)
学习情境二 钢筋混凝土结构设计的基本原理	(28)
子学习情境一 极限状态法的基本概念	(29)
子学习情境二 作用、作用值与作用效应组合	(30)
子学习情境三 公路桥梁涵设计规范的设计原则	(32)
思考题与习题	(35)
学习情境三 钢筋混凝土受弯构件构造及正截面承载力计算	(36)
子学习情境一 钢筋混凝土受弯构件构造特点	(36)
子学习情境二 钢筋混凝土受弯构件正截面破坏状态分析	(40)
子学习情境三 单筋矩形截面受弯构件计算	(44)
子学习情境四 双筋矩形截面受弯构件的计算	(52)
子学习情境五 单筋 T 形截面受弯构件计算	(55)
思考题与习题	(62)
学习情境四 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力的计算	(63)
子学习情境一 受弯构件斜截面抗剪承载力的影响因素及破坏形态	(64)
子学习情境二 受弯构件斜截面承载力的计算	(66)
子学习情境三 全梁承载力校核与构造要求	(71)
思考题与习题	(80)
学习情境五 钢筋混凝土受弯构件的应力、裂缝和变形计算	(81)
子学习情境一 换算截面及应力验算	(82)
子学习情境二 钢筋混凝土受弯构件的裂缝和裂缝宽度验算	(87)
子学习情境三 受弯构件的变形(挠度)验算	(89)
思考题与习题	(94)

学习情境六 钢筋混凝土梁的施工预制	(95)
思考题与习题	(102)
子项目二 钢筋混凝土受压构件	(103)
学习情境一 轴心受压构件的构造要求及计算	(103)
子学习情境一 普通箍筋柱	(104)
子学习情境二 螺旋箍筋柱	(108)
思考题与习题	(112)
学习情境二 偏心受压构件	(112)
子学习情境一 矩形截面偏心受压构件	(113)
子学习情境二 圆形截面偏心受压构件	(124)
思考题与习题	(129)
学习情境三 钻孔灌注桩施工	(129)
思考题与习题	(136)
项目二 预应力混凝土结构	(137)
学习情境一 预应力混凝土结构的基本概念及材料	(137)
子学习情境一 预应力混凝土的基本概念与特点	(137)
子学习情境二 预应力混凝土结构的材料	(140)
子学习情境三 预应力混凝土结构的分类	(142)
思考题与习题	(145)
学习情境二 预应力混凝土简支梁的设计	(145)
子学习情境一 预应力混凝土简支梁的构造	(146)
子学习情境二 预应力混凝土受弯构件计算	(148)
子学习情境三 预应力混凝土受弯构件的应力计算	(161)
子学习情境四 预应力混凝土受弯构件抗裂性验算	(168)
思考题与习题	(183)
学习情境三 预应力混凝土梁的施工工艺	(183)
子学习情境一 后张法预应力混凝土梁的施工工艺	(183)
子学习情境二 先张法预应力混凝土梁的施工工艺	(190)
思考题与习题	(192)
项目三 圬工结构	(193)
学习情境一 圬工结构的基本概念与材料	(193)
子学习情境一 圬工结构砌体的种类	(194)
子学习情境二 砌体的强度与变形	(197)
思考题与习题	(203)

学习情境二 圬工结构的强度计算	(203)
子学习情境一 圬工受压构件正截面承载力计算	(203)
子学习情境二 受弯、受剪构件的计算	(207)
思考题与习题	(209)
学习情境三 石砌墩台施工	(210)
思考题与习题	(211)
参考文献	(212)

总说明

- ◎ **知识目标:** 掌握结构的分类及各工程的结构特点;能知道混凝土结构的发展与应用概况。
- ◎ **能力目标:** 能掌握学好本门课程需要注意的问题及本课程所讲述的主要内容。

在土木工程中,由建筑材料筑成,能承受荷载而起骨架作用的构架称为结构。从应用领域分,结构可分为建筑结构、桥梁结构、水电结构和其他特种结构等。从结构所使用的建筑材料种类分,又可分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢结构、木结构、圬工砌体结构以及组合结构。而各种桥梁结构都是由桥面板、横梁、主梁、桥梁的墩台、拱等基本构件所组成,虽然这些构件形式很多,但按主要受力特点可以分为受压构件、受弯构件、受拉构件和受扭构件等几种最典型的基本构件。

《结构设计原理》是讨论工程结构基本构件的构造、受力性能、计算验算方法及基本结构施工预制过程的课程,是学习和掌握桥梁工程和其他道路人工构造物的基础。

一、各种工程结构特点及使用范围

1. 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种不同材料所组成,混凝土材料具有较高的抗压强度,而抗拉强度很低,根据构件受力情况,合理配置钢筋,使混凝土和钢筋的强度得到充分地发挥,就可形成承载力较高、刚度较大的结构构件。

钢筋混凝土结构的优点在于:

(1) 耐久性好,与钢结构相比钢筋混凝土结构有较好的耐久性,它不需要经常的保养与维护。在钢筋混凝土结构中,钢筋被混凝土包裹而不致锈蚀,另外混凝土的强度还会随时间增长而略有提高,故钢筋混凝土有较好的耐久性,对于在有侵蚀介质存在的环境中工作的钢筋混凝土结构,可根据侵蚀的性质合理地选用不同品种的水泥,可达到提高耐久性的目的。一般火山灰水泥和矿渣水泥抗硫酸盐侵蚀的能力很强,可在有硫酸盐腐蚀的环境中使用;另外矿渣水泥抗碱腐蚀的能力也很强,则可用于碱腐蚀的环境中。

(2) 耐火性好,相对钢结构和木结构而言,钢筋混凝土结构具有较好的耐火性。在钢筋混凝土结构中,由于钢筋包裹在混凝土里面而受到保护,火灾时钢筋不至于很快达到流塑状态使结构整体破坏。

(3) 整体性好,相对砌体结构而言,钢筋混凝土结构具有较好的整体性,适用于抗震、抗暴结构。另外钢筋混凝土结构刚性较好,受力后变形小。

(4) 容易取材,混凝土所用的砂、石料可就地取材,节省运费,降低运输成本。另外还可以将工业废料如矿渣、粉煤灰用于混凝土当中。

(5) 可模性好,可根据结构方面的要求将钢筋混凝土结构浇筑成各种形状和尺寸。

混凝土结构除了具有以上优点外,还存在以下一些缺点:

(1) 结构自重,钢筋混凝土结构自重,截面尺寸也较大,达到一定跨径时,其承受荷载的能力就会显著降低。

(2) 抗裂性能差,混凝土抗拉强度很低,在使用阶段构件一般是带裂缝工作的,这对构件的刚度和耐久性都带来不利的影响。

(3) 浇筑混凝土时需要大量的模板。

(4) 户外浇注混凝土时受季节及天气条件限制,冬季及雨季混凝土施工必须对混凝土浇筑振捣和养生等工艺采取相应的措施,以确保施工质量。

(5) 隔热隔声性能也较差。

由于钢筋混凝土结构具有许多优点,现在世界各地成为建筑、道路桥梁、机场、码头和核电站等工程中应用最广的工程材料。在公路与城市道路工程、桥梁工程中,钢筋混凝土结构主要应用于中小跨径桥梁、涵洞、挡土墙等结构物中。

2. 预应力混凝土结构

为了使构件满足变形和裂缝控制的要求,则需增加构件的截面尺寸和用钢量,这将导致截面尺寸和自重过大,使钢筋混凝土构件用于大跨或承受动力荷载的结构如大跨屋盖、重吨位吊车梁、较大跨径的桥梁等成为很不经济、很不合理、甚至是不可能的,如果在结构构件受外荷载作用前,预先对由外荷载引起的混凝土受拉区施加预压应力,用以减小或抵消外荷载所引起的混凝土的拉应力,则能使结构构件的拉应力不大,甚至处于受压状态。也就是借助于混凝土较高的抗压能力来弥补其抗拉能力的不足,采用预先加压的手段来间接地提高混凝土的抗拉强度,从本质上改变混凝土易裂的特性。这种在构件受荷载以前预先对混凝土受拉区施加压应力的结构称为“预应力混凝土结构”。

在受拉区适当的施加压应力可以延缓裂缝的产生和发展,并且可以使用高强高性能混凝土、高强钢筋以减小结构截面尺寸,减轻结构自重,增大跨越能力。预应力技术还可以作为装配钢筋混凝土结构的一种可靠的手段。

预应力混凝土材料的单价高,施工工序多,要求有经验、熟练的技术人员和技术工人施工,且要求较多的严格的现场技术监督和检查。

3. 圬工结构

圬工结构是由胶结材料将砖、天然石料、混凝土预制块等块材按规则砌筑而成的整体结构,特点是易于就地取材。圬工结构自重较大,施工中工业化程度低。圬工结构多用于中小跨径的拱桥、墩台、挡土墙、基础、涵洞、道路护坡等工程中。

4. 钢结构

钢结构一般由钢厂轧制的型钢或钢板通过焊接或螺栓等连接组成的结构。钢结构由于钢材的强度高,构件所需的尺寸较小,所以是自重较轻的结构。钢结构可靠性高,机械化程度高,已预制的构件可在施工现场较快的装配连接,施工效率高,但相对于混凝土结构,钢结构造价高,养护费用高。

钢结构一般应用于大跨径的钢桥、城市人行天桥、高层建筑、海洋钻井采油平台等。同时,钢结构还应用于钢支架、钢模板、钢围堰、钢挂梁等临时结构中。

随着科学的发展,在工程中还出现了多种组合结构和新材料结构。例如预应力混凝土组合梁、钢管混凝土结构、钢-混凝土组合梁、纤维增强聚合物(FRP)结构,FRP-混凝土

组合结构等。组合结构由于利用具有各自材料及结构特点的部件通过可靠的连接使之结和成整体受力的构件,从而获得较好的工程效果。FRP 结构具有轻质、高强、耐腐蚀的特点,近几年在一些特殊环境条件下日益得到应用。

二、学习本课程应注意的问题

《结构设计原理》是一门综合性较强的应用科学。其发展需综合运用数学、力学、材料科学和施工技术等相关知识,并涉及许多领域,以建立自己完整的设计理论、结构体系和施工技术。本课程的内容多、符号多、计算公式多、构造规定也多,学习时要遵循教学大纲的要求,贯彻“少而精”的原则,突出重点内容的学习。

(1)《结构设计原理》以提高道桥工程施工技术人员岗位能力为前提进行课程设计,按照道桥施工设计时“工作任务引领”方式进行教学内容设计,将《结构设计原理》理论课程内容按岗位能力分解为相对应的钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构等教学项目。

(2)加强实验、实践性教学环节并注意扩大知识面。结构设计原理的基本理论相当于钢筋混凝土及预应力混凝土的材料力学,它是以实验为基础的,因此除课堂学习以外,还要加强实验的教学环节,以进一步理解学习内容和训练实验的基本技能。并进行简支梁正截面受弯承载力、简支梁斜截面受剪承载力、偏心受压短柱正截面受压承载力的实验。《结构设计原理》课程的实践性很强,因此要加强课程作业、课程设计和毕业设计等实践性教学环节的学习,并在学习过程中逐步熟悉和正确运用我国颁布的一些设计规范和设计规程。例如《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—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)等。

(3)逐步培养工程思维模式。该课程中一些公式是以经验、实验为基础得到的,而非由理论推导而来。另外构件和结构设计是一个综合性问题。设计过程包括结构方案、构件选型、材料选择、配筋构造、施工方案等,同时还需要考虑安全适用和经济合理。设计中许多数据可能有多种选择方案,因此设计结果不是唯一的。最终设计结果应经过各种方案的比较,综合考虑使用、材料、造价、施工等各项指标的可行性,才能确定较为合适的一个设计结果。

三、混凝土结构的发展与应用概况

1824 年泥水匠阿斯谱丁发明了波特兰水泥,此后大约在 19 世纪 50 年代,钢筋混凝土开始被用来建造各种简单的楼板、柱、基础等。随着生产的需要,促进了人们对钢筋混凝土性能的实验,开展计算理论的探讨和施工方法的改进,进入 20 世纪以后,钢筋混凝土结构有了较快的发展,许多国家陆续建造了一些建筑、桥梁、码头和堤坝。20 世纪 30 年代,钢筋混凝土如薄壳、折板开始应用于空间结构,期间预应力混凝土结构也得到了广泛的研究与应用。第二次世界大战以后,重建城市的任务十分繁重,必须加快建设速度,于是钢筋混凝土结构工业化施工方法的得到快速发展,工厂生产的预制构件也得到了较广泛的应用,由于混凝土和钢筋材料强度不断提高,钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的应用范围也再不断向大跨和高层发展。日本浜名大桥,采用预应力混凝土箱形截面桥梁跨度超过 240 m。目前,钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构已应用到土木工程的各个领域,成了一种主要的土木工程结构。随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用,高强高性能混凝土的应用范围不断扩大,钢纤维混凝土和聚合物混凝土的研究和应用有

有了很大发展。还有,轻质混凝土、加气混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”,不但改善了混凝土的性能,而且对节能和保护环境具有重要的意义。此外,防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也正在研究中。混凝土结构的应用范围也在不断地扩大,在大跨度钢筋混凝土桁架、门式刚架、拱、薄壳等结构形式也有广泛应用。在铁路、公路、城市的立交桥、高架桥、地铁隧道,以及水利港口等交通工程中用钢筋混凝土建造的桥梁、水闸、水电站、码头等已是星罗棋布。甚至已开始构思和实验用于月面建筑。

随着人们对混凝土的深入研究,钢筋混凝土结构在土木工程领域必将得到更广泛的应用。目前,钢管混凝土结构、钢骨混凝土结构和钢-混凝土组合结构的应用更加开拓了混凝土的使用范围。美国混凝土学会2000年委员会设想,在近期使混凝土的性质获得飞跃发展,把混凝土的拉、压强度比从目前的1/10提高到1/2,并且具有早强、收缩徐变小的特性。同时还预言,未来将会建造跨度达500~600 m的钢筋混凝土桥梁,以及钢筋混凝土海上浮动城市、海底城市、地下城市等。所有这些都显示了近代结构设计和施工水平日新月异的迅速发展。

思考题与习题

1. 按主要受力特点可以分为几种结构?
2. 结构按所使用的建筑材料分为哪些类型?
3. 钢筋混凝土结构的特点有哪些?
4. 预应力钢筋混凝土结构的特点有哪些?
5. 学习本课程应注意哪些问题?

项目一

钢筋混凝土结构

子项目一 钢筋混凝土受弯构件

学习情境一 钢筋混凝土结构的基本知识

- ◎ **学习目标：**掌握钢筋混凝土结构的受力特点；
掌握钢筋与混凝土的物理力学性质；
知道钢筋与混凝土的相互作用——黏结作用。
- ◎ **能力目标：**掌握钢筋和混凝土材料的物理、力学性能
能做混凝土及钢筋强度的试验。
掌握钢筋的加工要求。

子学习情境一 钢筋混凝土结构概述

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料——钢筋和混凝土接合成整体，共同发挥作用的一种建筑材料。

一、素混凝土构件和钢筋混凝土构件受力和破坏形态比较

1. 素混凝土简支梁

素混凝土梁在外加集中力和梁的自身重力作用下，梁截面的上部受压，下部受拉。由于混凝土的抗拉性能很差（为抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$ ），若梁下部受拉边缘的拉应变达到混凝土极限拉应变，只要梁的跨中附近截面的受拉边缘混凝土一开裂，梁就突然断裂，破坏前变形很小，没有预兆，属于脆性破坏类型。因此，素混凝土构件在实际工程的应用很有限，主要用于以受压为主的基础、柱墩和一些非承重结构。

2. 钢筋混凝土简支梁

为了改变这种情况，在截面受拉区域配置适量的钢筋构成钢筋混凝土梁。钢筋主要承受梁中性轴以下受拉区的拉力，混凝土主要承受中性轴以上受压区的压力。由于钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力都很大，即使受拉区的混凝土开裂梁还能继续承受相当大的荷载，直到受拉钢筋达到屈服强度，此后荷载还可略有增加，当受压区混凝土被压碎，梁才破坏。

破坏前, 变形较大, 有明显预兆, 属于延性破坏类型。

可见, 与素混凝土梁相比, 钢筋混凝土梁的承载能力和变形能力都有很大提高, 并且钢筋与混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

3. 钢筋混凝土受压柱

在轴心受压的混凝土柱中通常也配置抗压强度较高的钢筋协助混凝土承受压力, 以提高混凝土柱的承载能力和变形能力。由于钢筋的抗压强度比混凝土的高, 所以柱的截面尺寸可以小些。另外, 配置了钢筋还能改善受压混凝土构件破坏时的脆性, 并可以承受偶然因素产生的拉力。

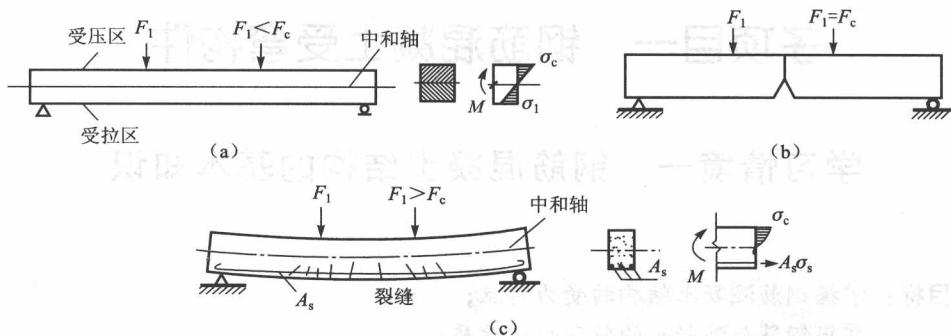


图 1-1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁

(a) 受竖向力作用的混凝土梁; (b) 素混凝土梁的断裂; (c) 钢筋混凝土梁的开裂

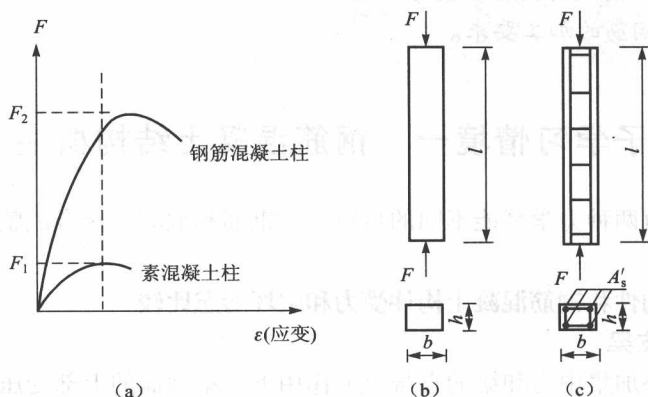


图 1-2 素混凝土和钢筋混凝土轴心受压构件的受力性能比较

(a) 柱的压力 - 混凝土应变曲线; (b) 素混凝土柱; (c) 钢筋混凝土柱

除在构件的受拉区配钢筋以承受拉力, 在构件的受压区配置钢筋协助混凝土承受压力外, 还有许多其他配筋方式: 在复杂应力区域 (如梁在受剪区段、受扭构件、节点区、剪力墙等), 可以配置箍筋或纵横交错的钢筋; 当构件受力很大时, 可以直接配置钢骨, 还可以利用箍筋约束混凝土来提高混凝土的抗压强度, 甚至直接采用钢管, 另外采用纤维 (碳纤维、玻璃纤维等) 与混凝土一起搅拌形成的纤维混凝土, 其抗拉强度可以得到提高。

因此, 两种 (或两种以上) 材料的有机组合, 充分发挥各自的长处, 可以创造出多种

形式的复合材料,适应各种不同受力的要求,取得很好的综合经济效益。

二、钢筋与混凝土能共同工作的原因

(1) 混凝土干缩硬化后能产生较大粘结力(或称握裹力),由于粘结力的存在使二者可靠的结合成整体,在荷载的作用下能共同工作,协调变形。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数较为接近(钢筋为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$)。当温度变化时,两种材料不会产生较大的相对变形,即不会产生较大的内应力。

(3) 钢筋被混凝土包裹,免遭锈蚀,使钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。水泥水化作用后,产生碱性反应,在钢筋表面产生一种水泥石质薄膜,可以防止有害介质的直接侵蚀。

子学习情境二 钢筋混凝土材料物理的力学性质

一、混凝土物理、力学性质

普通混凝土是由水泥、砂、石材料用水拌和硬化后形成的人工石材,是多相复合材料。混凝土中的砂、石、水泥胶体组成了弹性骨架,主要承受外力,并使混凝土具有弹性变形的特点。而水泥胶体中的凝胶、孔隙和界面初始微裂缝等,在外力作用下使混凝土产生塑性变形。另一方面,混凝土中的孔隙、界面微裂缝等缺陷又往往是混凝土受力破坏的起源。由于水泥胶体的硬化过程需要多年才能完成,所以混凝土的强度和变形也随时间逐渐增长。

(一) 混凝土的强度

混凝土的强度是混凝土的重要力学性能指标,是设计混凝土结构的重要依据,它直接影响到结构的安全性和耐久性。在设计施工中常用的混凝土的强度可分为立方体强度、轴心抗压强度以及轴心抗拉强度等。

在实际工程中,单向受力构件是极少见的,一般均处于复合应力状态,复合应力作用下混凝土的强度应引起足够的重视。研究复合应力作用下混凝土的强度必须以单向应力作用下的强度为基础,复合应力作用下混凝土的强度实验需要复杂的设备,理论分析也较难,还处于研究之中。因此,单向受力状态下混凝土的强度指标就很重要,它是结构构件分析、建立强度理论公式的重要依据。

1. 立方体抗压强度 $f_{cu,k}$

(1) 概念。

混凝土的强度与水泥强度等级、水灰比有很大关系;骨料的性质、混凝土的级配、混凝土成型方法、硬化时的环境条件及混凝土的龄期等也不同程度地影响混凝土的强度;试件的大小和形状、试验方法和加载速率也影响混凝土强度的试验结果。因此各国对各种单向受力下的混凝土强度都规定了统一的标准试验方法。我国采用边长为 150 mm 的立方体作为混凝土抗压强度的标准尺寸试件,并以立方体抗压强度作为混凝土各种力学指标的代表值。《规范》规定以边长为 150 mm 的立方体,在 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 28 天,依照标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 N/mm^2 计,也就是单位 MPa)作为混凝土的强度等级,并用符号 $f_{cu,k}$ 表示。立方体抗压强度是在实验室条件下取得的抗压强度(标准养护试块)。

(2) 强度等级的划分及有关规定。

《规范》规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 确定。公路桥涵受力构件的混凝土强度等级划分 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80，共 14 个等级。例如，C30 表示立方体抗压强度标准值为 30 N/mm^2 。其中，C50 以下为普通混凝土，C50 ~ C80 属高强度混凝土。钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20；当采用 HRB400 和 KL400 级钢筋配筋时，混凝土强度等级不得低于 C25。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C40。

(3) 试验方法对立方体抗压强度的影响。

试件在试验机上受压时，纵向要压缩，横向要膨胀，由于混凝土与压力机垫板弹性模量与横向变形的差异，压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形。当试件承压接触面上不涂润滑剂时，混凝土的横向变形受到摩擦力的约束，形成“箍套”的作用。在“箍套”的作用下，试件与垫板的接触面局部混凝土处于三向受压应力状态，试件破坏时形成两个对顶的角锥形破坏面，如图 1-3 (a) 所示。如果在试件承压面上涂一些润滑剂，这时试件与压力机垫板间的摩擦力大大减小，试件沿着力的作用方向平行地产生几条裂缝而破坏，所得的抗压极限强度较低，如图 1-3 (b) 所示。《规范》规定的标准试验方法是不加润滑剂。

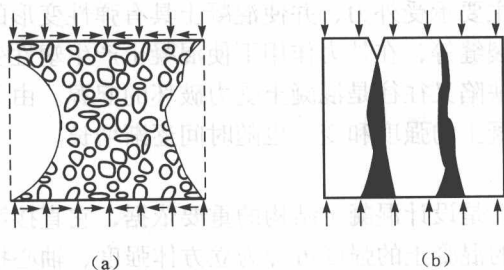


图 1-3 混凝土立方体的破坏情况

(a) 不涂润滑剂；(b) 涂润滑剂

(4) 加载速度对立方体强度的影响。

加载速度越快，测得的强度越高。通常规定加载速度为：混凝土强度等级低于 C30 时，取每秒钟 $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ ；混凝土强度等级高于或等于 C30 时，取每秒钟 $0.5 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2$ 。

(5) 龄期对立方体强度的影响。

混凝土的立方体抗压强度随着成型后混凝土的龄期逐渐增长，增长速度开始较快，后来逐渐缓慢，强度增长过程往往要延续几年，在潮湿环境中往往延续更长。

(6) 尺寸效应。

立方体尺寸愈小则试验测出的抗压强度愈高，对此现象有多种不同的原因分析和理论解释，但还没有得出一致的结论。一种观点认为是材料自身的原因，认为试件内部缺陷（裂纹）的分布，粗、细粒径的大小和分布，材料内摩擦角的不同和分布，试件表面与内部硬化程度有差异等因素有关。另一种观点认为是试验方法的原因，认为试块受压面与试验机之间摩擦力分布（四周较大，中央较小）、试验机垫板刚度有关。过去我国曾长期采用以 200 mm 边长的立方体作为标准试件。在试验研究也采用 100 mm 的立方体试件。用这两种尺寸试件测得的强度与用 150 mm 立方体标准试件测得的强度有一定差距，这归结于尺寸效应的影响。所以非标准试件强度应乘以一个换算系数后，换算成标准试件强度。根据大量实测数据，《规范》规定，如采用 200 mm 或 100 mm 的立方体试块时，其换算系数分别取 1.05 和 0.95。

2. 轴心抗压强度 f_{ck}

由于实际结构和构件往往不是立方体，而是棱柱体，所以用棱柱体试件比立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。试验证实，轴心抗压钢筋混凝土短柱中的混凝土抗压强

度基本上和棱柱体抗压强度相同,可以用棱柱体测得的抗压强度作为轴心抗压强度,又称为棱柱体抗压强度。《规范》规定以 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的棱柱体试件试验测得的具有 95% 保证率的抗压强度为混凝土轴心抗压强度标准值,用符号 f_{ck} 表示。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同,试件上下表面不涂润滑剂。实测的棱柱体试件的抗压强度都比立方体的强度值低,并且棱柱体试件高宽比越大,强度越小。混凝土轴心抗压强度随着混凝土强度等级提高而增加,总趋势是混凝土轴心抗压强度与混凝土强度成正比。

3. 混凝土的抗拉强度 f_t

抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一,也可用它间接地衡量混凝土的冲切强度等其他力学性能。轴心抗拉强度只有立方抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$,混凝土强度等级愈高,这个比值愈小。混凝土的抗拉强度取决于水泥石的强度和水泥石与骨料的粘接强度。采用表面粗糙的骨料及较好的养护条件可提高混凝土的抗拉强度。

但在进行混凝土结构强度计算时,认为受拉区混凝土开裂后退出工作,拉力全部由钢筋来承受,此时研究混凝土的抗拉强度没有实际意义。但是对于不允许出现裂缝的结构,就应该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。

轴心抗拉强度可采用如图 1-4 的试验方法,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的柱体,两端埋有伸出长度为 150 mm 的变形钢筋 ($d=16\text{ mm}$),钢筋位于试件轴线上。试验机夹紧两端伸出的钢筋,对试件施加拉力,破坏时裂缝产生在试件的中部,单位时间的平均破坏应力为轴心抗拉强度。由于混凝土内部的不均匀性,加之安装试件的偏差等原因,这种方法准确测定抗拉强度是很困难的。所以,国内外也常用如图 1-5 所示的圆柱体或立方体的劈裂试验来间接测试混凝土的轴心抗拉强度。

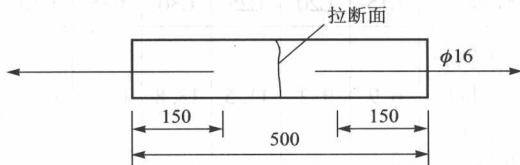


图 1-4 混凝土直接受拉实验 (尺寸单位: mm)

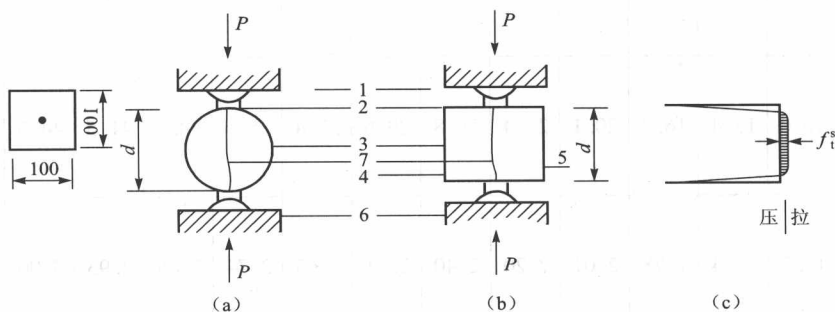


图 1-5 混凝土劈裂实验及其应力分布

- (a) 圆柱体劈裂试验; (b) 立方体劈裂试验; (c) 劈裂面上水平应力分布
1—压力机的上压板; 2—弧形垫条及垫层各一条; 3—试件; 4—浇模顶面;
5—浇模底面; 6—压力机的下压板; 7—试件破裂线

在立方体或圆柱体上的加垫条,在垫条上施加一条压力线荷载,这样试件中间垂直截面除加力点附近很小的范围外,均有均匀分布的水平拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度

时, 试件被劈成两半。根据弹性理论, 劈裂抗拉强度可按式计算:

$$f_{t,s} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1-1)$$

式中, P ——破坏荷载;

d ——圆柱直径或立方体边长;

l ——试件的长度。

实验结果表明, 混凝土的劈裂强度除与试件尺寸等因素有关外, 还与垫条的宽度和材料特性有关。加大垫条宽度可使实测劈裂强度提高, 一般认为垫条宽度应不小于立方试件边长或圆柱体试件直径的 $1/10$ 。国内外的大多数试验资料表明, 混凝土的劈裂强度略高于轴心抗拉强度, 考虑到国内外对比资料的具体条件不完全相同, 且目前我国尚未建立混凝土劈裂实验的统一标准, 通常认为混凝土的轴心抗拉强度与劈裂强度基本相同。

4. 混凝土的强度标准值与设计值

经统计分析, 并考虑结构混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异, 选取具有 95% 保证率的强度值作为强度标准值。混凝土强度设计值为混凝土强度标准值除以混凝土的材料分项系数 γ_c , 《桥规》规定 $\gamma_c = 1.4$, 见表 1-1。

表 1-1 混凝土强度标准值

单位: N/mm^2

强度 种类		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}	6.9	9.2	11.5	13.8	16.1	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
	轴心 抗拉 f_{td}	0.88	1.06	1.23	1.39	1.52	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14
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	47.5	50.2
	轴心 抗拉 f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.40	2.51	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

注: 计算现浇钢筋混凝土轴心受压及偏心受压构件时, 如截面的长边或直径小于 300 mm, 则表中混凝土的强度设计值应乘以系数 0.8; 当构件质量 (如混凝土成型、截面和轴线尺寸等) 确定保证时, 可不受此限制。

5. 混凝土在复合应力作用下的强度

混凝土结构和构件通常受到轴力、弯矩、剪力和扭矩的不同组合作用, 混凝土很少处于理想的单向受力状态, 实际混凝土结构构件大多是处于复合应力状态, 例如框架梁、柱既受