



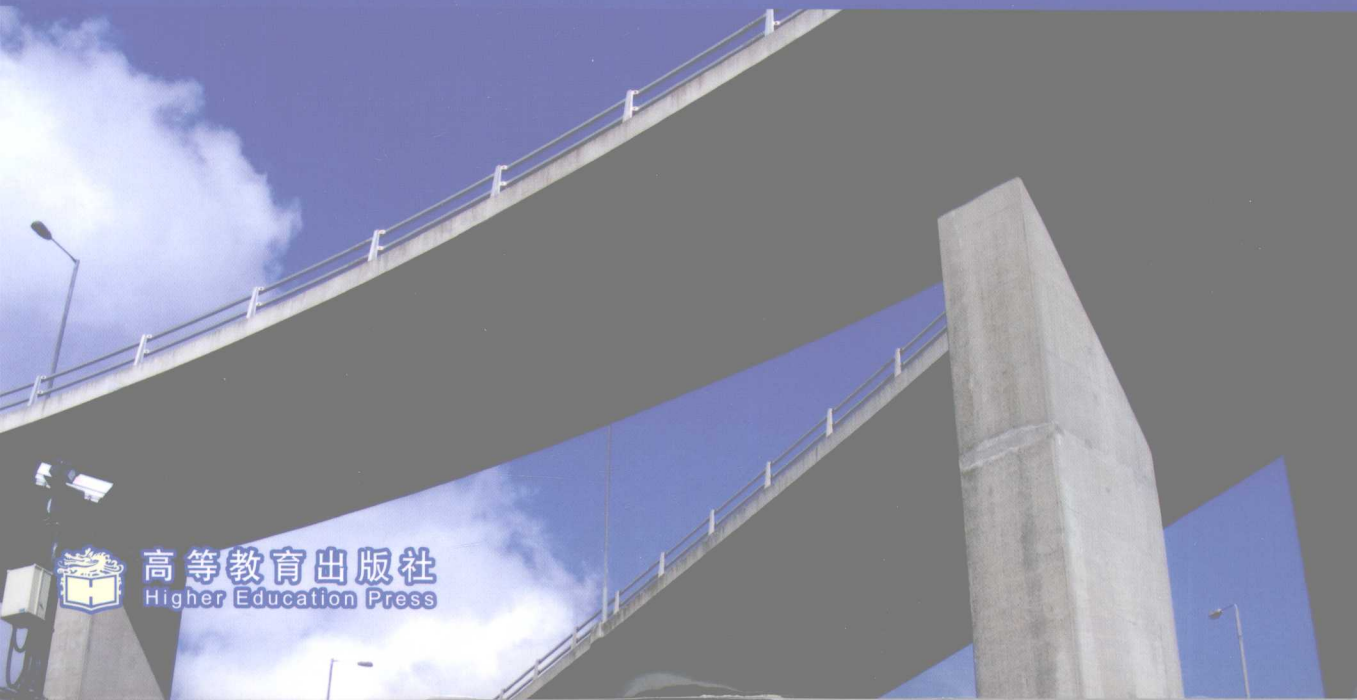
全国高职高专教育“十一五”规划教材



高职高专教育“道路与桥梁工程技术专业”系列教材

# 结构设计原理

罗向荣 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

全国高职高专教育“十一五”规划教材  
高职高专教育“道路与桥梁工程技术专业”系列教材

# 结构设计原理

罗向荣 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是根据高职高专道路与桥梁工程技术专业教学的基本要求,参照我国国家标准和交通部颁布的交通行业标准与规范精心编写的。

本书内容包括钢筋混凝土材料的力学性能、钢筋混凝土结构设计基本原则、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、钢筋混凝土受压构件承载力计算、钢筋混凝土构件正常使用极限状态计算及短暂状况应力验算、预应力混凝土结构基本概念、预应力混凝土受弯构件的设计与计算、圬工结构的设计与计算。

本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、成人高校和民办高校道路与桥梁工程技术专业的专业课教材,也可作为市政、监理、检测、养护等相关专业的教材,同时可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

结构设计原理/罗向荣主编. —北京:高等教育出版社, 2009. 8

ISBN 978 - 7 - 04 - 027315 - 1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 104094 号

策划编辑 张骁军 责任编辑 张玉海 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉  
版式设计 陆瑞红 责任校对 王雨 责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 13.5  
字 数 320 000

购书热线 010 - 58581118  
咨询电话 400 - 810 - 0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landrac.com>  
<http://www.landrac.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 8 月第 1 版  
印 次 2009 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 17.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27315 - 00

# 前 言

本书是根据高职高专道路与桥梁工程技术专业教学的基本要求,参照我国国家标准和交通部颁布的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2004)、《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)等交通行业标准编写的。

本书系统地介绍了公路桥涵钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、圬工结构各种基本构件的受力特征、设计方法及构造要求,力求体现高职高专教材的特点,服务于高职高专培养技术应用型人才的大目标。本书内容坚持以必须、够用为度,吸取其他有关教材的长处,结合编者的教学和工程经验,重视由浅入深和理论联系实际,内容简明扼要、通俗易懂。为了便于学生学习掌握,每章前有学习目标,章后有思考与练习题。

本书由罗向荣任主编,张伦超任副主编,其中:绪论、第三章由罗向荣编写,第一、四章由杨帆编写,第二、九章由王巍编写,第六章由王巍、罗向荣编写,第七、八章由张伦超编写,第五章由王策编写,毕轶、张常明完成了本书部分例题核算和插图绘制工作。

本书由哈尔滨工业大学张树仁教授主审,他对本书进行了认真详细的审核,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心地感谢!

鉴于编者水平,本书难免有不足之处,敬请读者批评指正,以期今后改进。

编 者  
2008年10月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010)58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010)82086060

**E-mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100120

**购书请拨打电话：**(010)58581118

# 目 录

绪论 .....	1	实训项目 .....	58
<b>第一章 钢筋混凝土材料的力学性能 .....</b>	<b>4</b>	<b>第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算 .....</b>	<b>59</b>
第一节 混凝土 .....	4	第一节 钢筋混凝土梁斜截面破坏形态分析 .....	60
第二节 钢筋 .....	11	第二节 钢筋混凝土梁斜截面承载力计算 .....	62
第三节 钢筋与混凝土的共同工作 .....	14	第三节 全梁抗剪承载力校核及构造要求 .....	68
思考与练习题 .....	15	思考与练习题 .....	79
<b>第二章 钢筋混凝土结构设计基本原则 .....</b>	<b>17</b>	实训项目 .....	80
第一节 极限状态基本概念 .....	17	<b>第五章 钢筋混凝土受压构件承载力计算 .....</b>	<b>81</b>
第二节 结构上的作用 .....	19	第一节 受压构件的构造要求 .....	81
第三节 公路桥梁结构的概率极限状态设计法 .....	21	第二节 轴心受压构件承载力计算 .....	84
思考与练习题 .....	28	第三节 矩形截面偏心受压构件承载力计算 .....	90
<b>第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算 .....</b>	<b>29</b>	第四节 圆形截面偏心受压构件承载力计算 .....	104
第一节 钢筋混凝土受弯构件的构造要求 .....	30	思考与练习题 .....	110
第二节 钢筋混凝土梁正截面破坏状态分析 .....	35	<b>第六章 钢筋混凝土构件正常使用极限状态计算及短暂状况应力验算 .....</b>	<b>112</b>
第三节 受弯构件正截面承载力极限状态计算的一般问题 .....	37	第一节 钢筋混凝土受弯构件变形验算 .....	112
第四节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 .....	39	第二节 钢筋混凝土结构裂缝宽度验算 .....	116
第五节 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 .....	46	第三节 钢筋混凝土受弯构件短暂状况的正截面应力验算 .....	119
第六节 T形截面受弯构件正截面承载力计算 .....	50	第四节 钢筋混凝土受弯构件短暂状况的斜截面应力验算 .....	126
思考与练习题 .....	56		



思考与练习题 .....	129	第三节 预应力混凝土受弯构件正常使	
实训项目 .....	129	用极限状态计算 .....	152
<b>第七章 预应力混凝土结构基本</b>		第四节 预应力混凝土结构持久状况和	
<b>概念</b> .....	131	短暂状况构件的应力计算 .....	158
第一节 预应力混凝土基本原理 .....	131	第五节 端部锚固区的构造与计算要点 .....	161
第二节 施加预应力的方法 .....	133	第六节 预应力混凝土简支梁的设计与	
第三节 预应力钢筋的锚固 .....	135	构造 .....	163
第四节 预应力损失 .....	138	第七节 预应力混凝土简支梁设计实例 .....	170
思考与练习题 .....	145	思考与练习题 .....	187
实训项目 .....	145	实训项目 .....	188
<b>第八章 预应力混凝土受弯构件的</b>		<b>第九章 圬工结构的设计与计算</b> .....	190
<b>设计与计算</b> .....	147	第一节 圬工材料的力学性能 .....	190
第一节 预应力混凝土受弯构件各受力		第二节 圬工受压构件的承载力计算 .....	199
阶段分析 .....	147	思考与练习题 .....	205
第二节 预应力混凝土受弯构件承载力		<b>参考文献</b> .....	206
计算 .....	148		

# 绪 论

“结构设计原理”主要讨论各种工程结构基本构件的受力性能、计算方法和构造设计的原理,是学习和掌握桥梁工程及其他人工构筑物设计的基础。

所谓结构,是指桥梁和构筑物中用来承受各种作用的受力体系,通常称为桥梁和构筑物的骨架。而组成结构的各个部件称为基本构件,如组成桥梁结构的基本构件有桥面板、主梁、横梁、墩台、拱、索等。根据构件受力的不同,这些基本构件又可分为受弯构件、受压构件、受拉构件和受扭构件等几种典型的基本构件。

工程中的结构是由不同建筑材料制成的,根据结构材料的不同结构可分为配筋混凝土结构、石及混凝土砌体结构(又称圬工结构)、钢结构、钢-混凝土组合结构等。本书主要介绍配筋混凝土结构、圬工结构。

## 一、配筋混凝土结构的概念、特点及使用范围

配筋混凝土结构包括钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构。

混凝土是一种人工石材,它的抗压强度较高,而抗拉强度却很低。例如素混凝土梁,当它承受竖向荷载作用时,在梁的垂直截面将产生弯矩,使得梁中性轴以上截面受压、以下截面受拉。由于混凝土的抗拉性能很差,荷载很小时该梁便由于受拉区混凝土被拉裂而突然折断(图 0-1a),而此时梁受压区混凝土的压应力还远小于混凝土的抗压强度。如果在梁的受拉区配置一定数量的钢筋做成钢筋混凝土梁(图 0-1b),虽然荷载达一定程度时受拉区混凝土仍然开裂,但钢筋可以代替开裂的混凝土继续承受拉力,直到钢筋达到其屈服强度裂缝迅速向上延伸,受压区面积减小,导致混凝土压应力达到抗压强度而被压碎破坏。在钢筋混凝土梁中,通常是混凝土承受压力,钢筋承受拉力,钢筋与混凝土两种材料的强度均得到充分利用,因此大大提高了构件的承载力。此外,在受压混凝土构件中,配置抗压强度较高的钢筋,也可协助混凝土承受压力,从而减小构件截面尺寸,改善受压构件的脆性性质。

钢筋和混凝土这两种力学性能不同的材料所以能结合在一起共同工作,其原因是:

① 钢筋和混凝土之间有着可靠的粘结力,能牢固结成整体,受力后变形一致,不会产生相对滑移。这是钢筋和混凝土共同工作的主要条件。

② 钢筋和混凝土的线膨胀系数大致相同(钢约为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , 混凝土约为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),因此温度变化时不致产生较大的温度应力

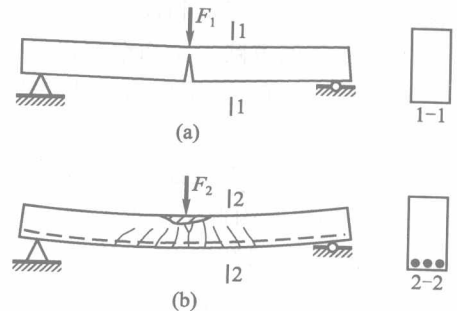


图 0-1 钢筋混凝土梁与素混凝土梁的比较



而破坏两者之间粘结。

③ 钢筋外边有一定厚度的混凝土保护层,可以防止钢筋锈蚀,从而保证了钢筋混凝土构件的耐久性。

钢筋混凝土结构中所用的混凝土材料占比例较大的是砂石材料,一般可以就地就近取材;混凝土可模性好,结构造型灵活,可以根据设计要求浇成各种形状;同时钢筋混凝土合理地利用了钢筋和混凝土两种材料的受力性能特点,形成的结构整体性、耐久性好。因而,钢筋混凝土结构广泛用于房屋建筑、桥梁工程、隧道、涵洞、挡土墙、水工结构、港口及地下工程中。但是,钢筋混凝土结构也有自重过大、抗裂差,补强维修工作比较困难的缺点。

为了避免钢筋混凝土构件中裂缝出现过早、变形过大和充分利用高强材料,人们在生产实践中创造了预应力混凝土结构。所谓预应力混凝土结构,是在结构构件受外荷载作用之前,人为地对混凝土构件的受拉区预先施加一定的压力,由此产生预压应力状态,以减小或抵消外荷载作用下引起的拉力,推迟裂缝的开展,减小裂缝的宽度,从而加大构件刚度减小变形,同时还可采用高强材料,从而减小了构件的截面尺寸,降低了结构自重,增大了跨越能力。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为广泛的一种结构。

## 二、圬工结构的概念、特点及使用范围

以石材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称为圬工结构。圬工结构具有原材料分布广,易于就地取材,价格低廉;耐久性、耐腐蚀性、耐污染性等性能较好,材料性能比较稳定,维修养护费用低;与钢筋混凝土结构相比,可节约水泥、钢材和木材;施工不需要特殊的设备,操作简便,并可以连续施工等优点。同时,圬工结构也存在强度低、自重大、施工周期长、机械化程度低、抗震能力差等一些缺点。

由于圬工材料(石材、混凝土等)具有抗压强度大,抗拉、抗剪性能较差的力学特点,因此圬工结构在工程中常用作以承压为主的结构构件,如拱桥的拱圈、涵洞、桥梁的重力式墩台、道路护坡、扩大基础及重力式挡土墙等。

## 三、学习本课程的目的和应该注意的问题

“结构设计原理”是道路与桥梁工程专业的主干课程之一,是结合桥梁工程中实际构件的工作特点,研究钢筋混凝土、预应力混凝土、圬工结构构件设计的一门学科。通过本课程的学习,将具备工程结构的基本知识,掌握各种桥梁工程结构基本构件的受力性能、计算方法及构造要求,并能根据有关设计规范和设计资料进行一般构件的设计,正确识读桥梁结构施工图,为今后学习桥梁工程和其他道路人工构造的设计计算奠定坚实的基础。

要学好本课程,除了应像其他课程那样做到勤看、勤思、勤记、勤练、勤问之外,还应注意以下几点:

本课程的内容涉及数学、工程力学、道桥建筑材料等先修课,同时又是学习桥梁工程、基础工程等课程的基础,因此学习本课程时应与相关知识相联系,必要时还要旧课重温,只有这样才能使新知识植根于旧知识,才能培养自己的综合分析能力和归纳能力,使新知识得到巩固和提高。

本课程的重要内容是进行结构设计。结构设计应遵循适用、经济、安全和美观的原则,它涉及方案比较、构件选型、材料选择、尺寸确定、构造要求、经济合理和施工可行等多种因素,是一个

综合性的问题。同一个问题往往有多种可能的解决办法。因此,学习本课程时还要逐步掌握对各种错综复杂因素的综合分析能力。

另外,混凝土的力学特性及强度理论非常复杂,目前钢筋混凝土结构的计算公式就是在理论分析和大量试验基础上建立起来的。因此,应用公式时要特别注意它的适用范围和限制条件。

本课程是一门实践性很强的课程,因此学习本课程不能满足于通过课堂教学学好书本知识,还应通过实习、参观等各种渠道向工程实践学习,不断积累工程经验,真正做到理论联系实际。只有这样,书本的理论知识才能得到升华。

本课程是直接依据是《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2004)、《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)。设计规范和标准是国家颁布的关于结构设计计算和构造要求的技术规定和标准,是具有技术法律性质的文件,每个设计人员都必须遵守。所以,在学习本课程时要注意熟悉规范,并正确运用规范。

# 第一章

## 钢筋混凝土材料的力学性能



### 本章概述:

本章主要介绍混凝土的强度和变形,钢筋的品种、级别和力学性能,以及钢筋与混凝土共同工作的基本条件和保证粘结强度的构造措施。



### 学习目标:

- 了解影响混凝土强度的因素,掌握混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、轴心抗拉强度的测定方法。
- 掌握混凝土在一次短期加荷时的变形性能,了解混凝土收缩、徐变现象及其影响因素,理解收缩、徐变对钢筋混凝土结构的影响。
- 了解钢筋的种类、级别与形式,掌握有明显屈服点钢筋和无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线的特点和设计时强度的取值标准。
- 理解钢筋与混凝土之间粘结应力的作用,了解钢筋和混凝土粘结的作用机理及掌握提高粘结强度的构造措施。

## 第一节 混 凝 土

### 一、混凝土强度

混凝土是由水泥、砂、石子和水按一定的配合比拌和,经凝结和硬化形成的人工石材。混凝土强度是混凝土的重要力学性能,是设计钢筋混凝土结构的重要依据,它直接影响结构的安全性和耐久性。

混凝土强度的大小不仅与组成材料的质量和配合比有关,而且与混凝土的养护条件、龄期、受力情况以及试件的形状、尺寸和试验方法有密切的关系。因此,在研究各种单向受力状态下的混凝土强度指标时,必须以统一规定的标准试验方法为依据。

#### 1. 混凝土的立方体抗压强度



《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62—2004)》(以下简称《桥规 JTG D62》)规定混凝土立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护至 28 d 龄期的边长为 150 mm 的立方体试件,以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 MPa 计),记为  $f_{cu,k}$ 。

根据混凝土立方体抗压强度标准值的不同,混凝土的强度共分 14 个强度等级,即 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。其中 C 表示混凝土,15, …, 80 表示以 MPa 为单位的立方体抗压强度的大小。《桥规 JTG D62》规定:公路桥涵钢筋混凝土受力构件的混凝土强度等级不应低于 C20;当采用 HRB400、KL400 级钢筋时,不应低于 C25;预应力混凝土构件的混凝土强度等级不应低于 C40。

混凝土的立方体抗压强度与试验方法有密切的关系。通常情况下,试验时试件表面不涂润滑剂,于是在试件表面与压力机压盘之间有向内的摩阻力存在。摩阻力像箍圈一样,对混凝土试件的横向变形产生约束,延缓了裂缝的开展,提高了试件的抗压极限强度。如果在试件表面涂抹一层润滑剂,试件表面与压力机压盘之间的摩阻力将大大减小,因此失去了对混凝土试件横向变形的约束作用,所测得的抗压极限强度较不加润滑剂时低很多。

混凝土的立方体抗压强度还与试件的尺寸有关,试件的尺寸越大,实测强度越低,这种现象称为尺寸效应。当采用边长为 200 mm 或 100 mm 立方体试件时,须将其抗压强度实测值乘以 1.05 或 0.95 转换成标准试件的立方体抗压强度值。

## 2. 混凝土轴心抗压强度

在实际结构中,绝大多数受压构件的高度比其支承面的边长要大得多,所以采用棱柱体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。用标准棱柱体试件测定的混凝土抗压强度,称为混凝土的轴心抗压强度或棱柱体抗压强度。

试验表明,在试件上下表面不涂润滑剂所得的抗压强度随棱柱体的高宽比的增加而降低。这是因为,试件高度越大,试验机压板与试件表面之间的摩擦力对试件中部横向变形约束的影响越小,所测得的强度也相应小。试验表明,当棱柱体试件的高度  $h$  与截面边长  $b$  之比在 2~4 之间时,混凝土的抗压强度比较稳定。因此,我国混凝土材料试验中规定采用 150 mm × 150 mm × 450 mm 的棱柱体作为混凝土轴心抗压试验的标准试件,采用与立方体试件相同的制作、养护条件和标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度称轴心抗压强度标准值(以 MPa 计),记为  $f_{ck}$ 。

混凝土轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值的关系为

$$f_{ck} = 0.88\alpha f_{cu,k} \quad (1-1)$$

式中  $\alpha$ ——轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值,对 C50 及以下混凝土取  $\alpha = 0.76$ ,对 C55~C80 混凝土取  $\alpha = 0.78 \sim 0.82$ ;另外,考虑 C40 以上混凝土具有脆性,取 C40~C80 折减系数为 1.0~0.87,中间按直线插入;

0.88——结构中混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异修正系数。

## 3. 混凝土轴心抗拉强度

混凝土的抗拉强度是混凝土的基本强度指标,其数值只有抗压强度值的 1/8~1/18。我国采用较多的测试方法是用钢模浇筑成型的 100 mm × 100 mm × 500 mm 的棱柱体试件通过预埋在试件轴线两端的钢筋(图 1-1),对试件施加均匀拉力,试件破坏时的平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度  $f_{tk}$ 。

应该指出,采用上述直接测试法测定混凝土抗拉强度时,试件制作时预埋两端的钢筋对中偏

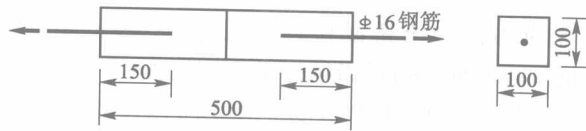


图 1-1 直接测试法测定混凝土轴心抗拉强度

差、混凝土质量不匀和安装试件难以避免的较小歪斜和偏心等因素,都会对试验结果产生较大的影响。因此,目前国外常采用劈裂抗拉试验方法测定混凝土抗拉强度。劈裂试验可用立方体或圆柱体试件进行,在试件上下支承面与压力机压板之间加一条垫条,使试件上下形成对应的条形加载,造成沿立方体中心或圆柱体直径切面的劈裂破坏(图 1-2)。

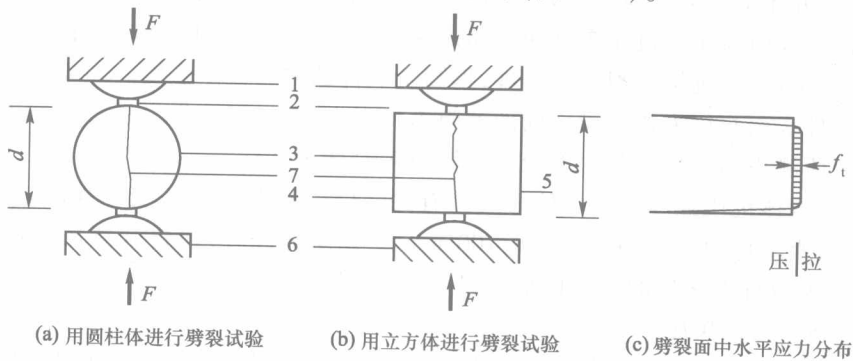


图 1-2 混凝土劈裂试验及其应力分布

1—压力机上压板；2—垫条；3—试件；4—试件浇筑顶面；  
5—试件浇筑底面；6—压力机下压板；7—试件破裂线

#### 4. 复合应力状态下混凝土的强度

在钢筋混凝土结构中,混凝土很少处于理想的单向应力状态,而往往处于轴力、弯矩、剪力甚至扭矩等多种组合的复合应力状态,如双向应力状态或三向应力状态。

##### (1) 双向受力状态

图 1-3 所示为混凝土在双向应力状态(两个平面上作用有法向应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,第三个平面上应力为零)作用下的强度规律。当混凝土处于双向受压时,一向的混凝土抗压强度随着另一向压应力的增加而有所提高,最多可提高 25% 左右;当双向受拉时,互相影响不大,双向受拉强度接近单向受拉强度;当处于一向受压一向受拉状态时,混凝土强度均低于单向受压和单向受拉强度。

##### (2) 压剪或拉剪复合应力状态

压剪或拉剪复合应力状态[在一个单元体上除作用有剪应力(切应力)  $\tau$  外,并在一个面上同时作用有法向应力  $\sigma$ ]下的混凝土强度试验曲线如图 1-4 所示。从图中可知,在剪压力状态下,随着压应力的增大,混凝土的抗剪强度逐渐增大,并在压应力达到某一

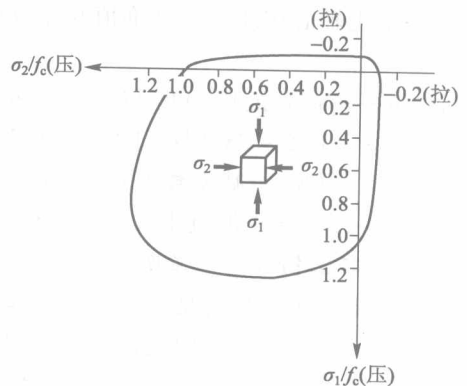


图 1-3 双向应力状态下混凝土强度变化曲线

数值时,抗剪强度达到最大值,此后由于混凝土内部微裂缝的发展,抗剪强度随压应力的增加反而减小。

### (3) 三向受压应力状态

混凝土三向受压时,其任一向的抗压强度都会随其他两向压应力的增加而有较大程度的提高。混凝土圆柱体三向受压的轴向抗压强度与侧压力之间的关系可用下列经验公式表示:

$$\sigma_1 = f_c + K\sigma_2 \quad (1-2)$$

式中  $\sigma_1$ ——三向受压时的混凝土轴向抗压强度 (MPa);

$f_c$ ——单向受压时混凝土棱柱体抗压强度 (MPa);

$\sigma_2$ ——侧向压应力 (MPa);

$K$ ——侧向应力系数,侧向压力较低时,其数值较大,为简化计算可取为常数。较早的试验资料给出  $K=4.1$ ,后来的试验资料给出  $K=4.5 \sim 7.0$ 。

在钢筋混凝土结构中,为了进一步提高混凝土的抗压强度,常采用间接配筋约束混凝土变形。例如,螺旋箍筋柱和钢管混凝土等,它们都是用螺旋形箍筋和钢管来约束混凝土的横向变形,使混凝土处于三向受压应力状态,从而使混凝土强度和延性都有较大的提高。

## 二、混凝土的变形

混凝土的变形可分为两类:一类是由荷载作用下产生的受力变形,包括单调短期加载、多次重复加载以及荷载长期作用下的变形等;另一类是由混凝土收缩产生的体积变形,包括混凝土收缩、膨胀和由于温度、湿度变化产生的变形。

### 1. 混凝土在一次短期加载时的变形性能

用混凝土标准棱柱体试件做一次短期加载单轴受压试验,所测得的混凝土受压应力-应变曲线如图 1-5 所示。

从试验分析得知:

① 当应力小于其极限强度 30%~40% (a 点) 时,应力-应变关系接近直线。

② 当应力继续增大时,应力-应变曲线逐渐向下弯曲,呈现出塑性性质。当应力增大到接近极限强度的 80% 左右 (b 点) 时,应变增加得更快。

③ 当应力达到极限强度 (c 点) 时,试件表面出现与压力方向平行的纵向裂缝,试件开始破坏,这时达到的最大应力  $\sigma_0$  称为混凝土轴心抗压强度  $f_c$ ,相应的应变为  $\epsilon_0$ ,一般为 0.002 左右。

④ 试件在普通材料试验机上进行抗压试验时,达到最大应力后试件就立即崩碎,呈脆性破坏特征,所得的应力-应变曲线如图 1-5 中  $Oabcd$ 。这种突然性破坏是由于试验机的刚度不足所造成的。如果在普通压力机上用高强弹簧(或油压千斤顶)与试件共同受压,用以吸收试验机内所积蓄的应变能,防止试验机的回弹对试件的冲击造成的突然破坏,则到达最大应力后,随试

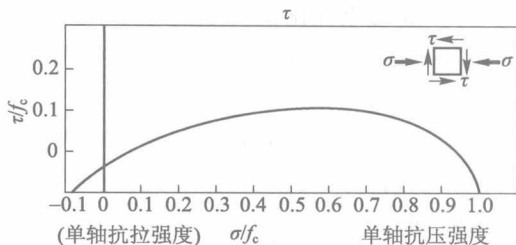


图 1-4 法向应力和剪应力共同作用下混凝土强度变化曲线

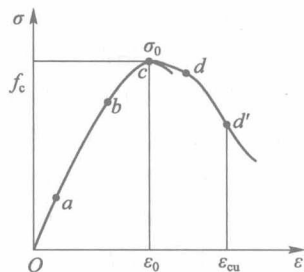


图 1-5 实测的混凝土受压应力-应变曲线



件变形的增大,高强弹簧承受的压力所占的比例增大,对试件起到卸载作用,使试件受到的压力稳定下降,就可以测出混凝土的应力-应变全过程曲线,如图 1-5 中的  $Oabcd'$ 。曲线  $Oc$  段称为上升段, $cd'$  段称为下降段。相应于曲线末端的应变称为混凝土的极限压应变  $\varepsilon_{cu}$ ,  $\varepsilon_{cu}$  越大表示塑性变形能力大,也就是延性越好。

试验结果表明,不同强度等级的混凝土其应力-应变曲线的上升段形状相似,但下降段的形状有明显不同。强度等级较低的混凝土下降段较长,顶部较平缓;强度等级较高的混凝土下降段顶部陡峭,曲线较短。这表明强度等级低的混凝土受压时的延性比强度等级高的要好。

## 2. 混凝土的弹性模量

在钢筋混凝土结构的内力分析及构件的变形计算中,混凝土的弹性模量是不可缺少的基础资料之一。作为弹塑性材料的混凝土,其应力与应变的关系是一条曲线,其应力增量与应变增量的比值,称为混凝土的变形模量,其数值随混凝土的应力变化而变化。在实际工程上,人们近似地取用应力-应变曲线在原点  $O$  的切线斜率作为混凝土的弹性模量,并用  $E_c$  表示。试验表明,混凝土的受拉弹性模量与受压弹性模量大体相等,计算时可取同一数值。混凝土受压或受拉时的弹性模量可查表 1-1。

《桥规 JTG D62》规定混凝土的剪变模量  $G_c = 0.4E_c$ ,泊松比  $\nu_c = 0.2$ 。

表 1-1 混凝土的弹性模量

混凝土 强度 等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$E_c/\text{MPa}$	2.50	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80
	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10$	$\times 10$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$

注:当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时,表中 C50~C80 的  $E_c$  值应乘折减系数 0.95。

## 3. 混凝土在重复荷载下的变形性能

混凝土在多次重复荷载作用下,其应力、应变性质和短期一次加载情况有明显不同。由于混凝土是弹塑性材料,初次卸载至应力为零时,应变不可能全部恢复。可恢复的那部分称之为弹性应变,弹性应变包括卸载时瞬时恢复的应变和卸载后弹性后效两部分,不可恢复的部分称之为残余应变,因此在一次加载卸载过程中,混凝土的应力-应变曲线形成一个环状,如图 1-6a 所示。

混凝土在多次重复荷载作用下的应力-应变曲线示于图 1-6b。当加载应力相对较小时,随着加载卸载重复次数的增加,残余应变会逐渐减小,一般重复 5~10 次后,应力-应变曲线逐渐接近于直线,混凝土呈现弹性工作性质。

如果加载应力超过某一个限值时,经过几次重复加载卸载,应力-应变曲线也将变成直线,再继续重复加载卸载后,应力-应变曲线出现反向弯曲,逐渐凸向应变轴,斜率变小,变形加大,重复加载卸载到一定次数时,混凝土试件将因严重开裂或变形过大而破坏,这种因荷载多次重复作用而引起的破坏称为疲劳破坏。桥梁工程中,通常要求能承受 200 万次以上反复荷载不得产生疲劳破坏,相应的强度称为混凝土的疲劳强度。

## 4. 混凝土在长期荷载作用下的变形

混凝土在长期不变压应力作用下,其应变随时间增长的现象称为混凝土徐变。徐变对结构

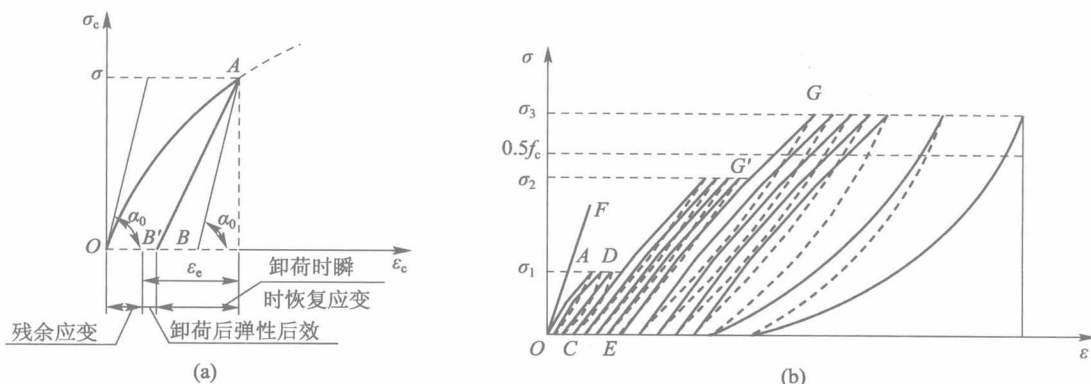


图 1-6 混凝土在重复荷载作用下的应力 - 应变曲线

的不利影响是使构件变形增大,影响结构的正常使用;对于长细比较大的偏心受压构件,徐变会使偏心距增大,降低构件承载力。在预应力混凝土构件中,徐变会导致预应力损失。徐变将有利于结构的内力重分布,减少应力集中现象和温度应力。

图 1-7 所示为混凝土棱柱体试件加载至应力达  $0.5f_c$  时,保持应力不变所得到的徐变试验曲线。由图可见,混凝土的总应变由两部分组成,即加载过程中完成的瞬时应变  $\epsilon_{e1a}$  和荷载持续作用下逐渐完成的徐变应变  $\epsilon_{cr}$ 。徐变通常在前四个月内增长较快,半年内可完成总徐变量的 70% ~ 80%,第一年内可完成 90% 左右,其余部分持续几年才能完成。其中最终总徐变量约为瞬时应变的 2 ~ 4 倍。此外,图中还表示了两年后卸载时应变的恢复情况,其中:  $\epsilon'_{e1a}$  为卸载时瞬时恢复的应变,其值略小于加载时的瞬时应变  $\epsilon_{e1a}$ ;  $\epsilon''_{e1a}$  为卸载后的弹性后效,即卸载后经过 20 d 左右又恢复的一部分应变,其值约为总徐变量的 1/12;其余很大一部分应变是不可恢复的,称为残余应变  $\epsilon'_{cr}$ 。

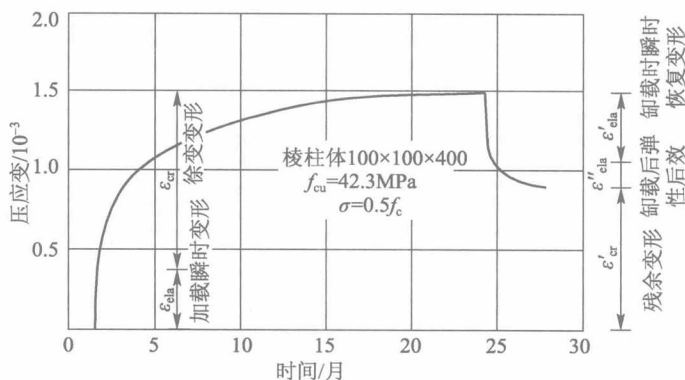


图 1-7 混凝土的徐变(加载卸载应变与时间关系曲线)

关于徐变产生的原因,目前尚无统一的解释,通常可这样理解:一是混凝土中水泥凝胶体在荷载作用下产生粘性流动,并把它所承受的压力逐渐转给骨料颗粒,使骨料压力增大,试件变形也随之增大;二是混凝土内部的微裂缝在荷载长期作用下不断发展和增加,也使应变增大。当应力不大时,徐变的发展以第一种原因为主;当应力较大时,以第二种原因为主。

影响混凝土徐变的因素:





① 加载时混凝土的龄期越短,徐变越大。因此,加强养护促使混凝土尽早结硬,对减小徐变是较有效的。蒸汽养护可使徐变减小 20% ~ 35%。

② 持续作用的应力越大,徐变也越大。

③ 水灰比大,水泥用量多,徐变大。

④ 使用高质量水泥,以及强度和弹性模量高、级配好的骨料(集料),徐变小。

⑤ 混凝土工作环境的相对湿度越大,徐变越小,高温、干燥环境下徐变将显著增大。

### 5. 混凝土的收缩和膨胀

混凝土在空气中结硬时其体积会缩小,这种现象称为混凝土收缩;混凝土在水中结硬时体积会膨胀,称为混凝土的膨胀。一般说来,混凝土的收缩值比膨胀值大得多。

混凝土产生收缩的原因,一般认为是由水泥凝胶体本身的体积收缩(凝缩)以及混凝土因失水产生的体积收缩(干缩)共同造成的。收缩对混凝土结构是不利的,例如当混凝土受到各种制约不能自由收缩时,将在混凝土中产生拉应力,导致混凝土产生收缩裂缝。在预应力混凝土构件中,混凝土收缩将引起预应力损失。

由图 1-8 可见,收缩应变也是随时间而增长的。结硬初期收缩应变发展很快,以后逐渐减慢,整个收缩过程可延续两年左右。蒸汽养护时,由于高温高湿条件能加速混凝土的凝结和结硬过程,减少混凝土的水分蒸发,因而混凝土的收缩值要比常温养护时小。一般情况下,混凝土的收缩应变终值约为  $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ 。

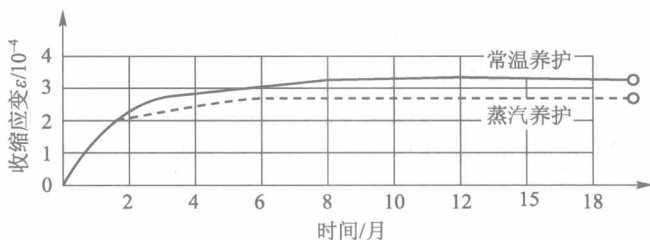


图 1-8 混凝土的收缩

影响混凝土收缩的因素很多,如混凝土的组成、制作养护条件、外部环境等因素对收缩和徐变有类似的影响。

## 三、混凝土的耐久性

混凝土结构的耐久性是指结构对气候作用、化学侵蚀、物理作用等外界环境影响或其他破坏过程的抵抗能力。环境因素引起的混凝土结构损伤或破坏主要有混凝土的碳化、氯离子侵蚀、碱-骨料反应、冻融循环破坏和钢筋腐蚀。从短期效果而言,这些问题影响结构的外观和使用功能;从长远看,则会降低结构安全度,成为发生事故的隐患,影响结构的使用寿命。

提高混凝土自身的耐久性是解决混凝土结构耐久性的前提和基础。混凝土的耐久性主要取决于混凝土的材料组成,其中水灰比、水泥用量、强度等级等均对耐久性有较大影响。

新颁布的《桥规 JTG D62》在总则中增加耐久性设计内容,明确规定了不同使用环境下结构混凝土的基本要求,对影响混凝土耐久性的最大水灰比、最小水泥用量、最低强度等级、最大氯离子含量和碱含量做出了限制规定。