

# 公路桥梁混凝土结构

*Gonglu Qiaoliang Hunningtu  
Jiegou Sheji Yuanli*

## 设计原理

张庆芳 张志国 主编  
段树金 主审



天津大学

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

# 公路桥梁混凝土结构设计原理

张庆芳 张志国 主编  
段树金 主审



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

**图书在版编目(CIP)数据**

公路桥梁混凝土结构设计原理/张庆芳, 张志国主编.  
—天津: 天津大学出版社, 2010. 7  
ISBN 978-7-5618-3559-3

I. ①公… II. ①张… ②张… III. ①公路桥—桥梁结构: 混凝土结构—结构设计 IV. ①U448.142.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124716 号

策划编辑 韩振平  
责任编辑 韩振平 郭颖  
封面设计 谷英卉

出版发行 天津大学出版社  
出版人 杨欢  
地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网址 [www.tjup.com](http://www.tjup.com)  
印刷 肃宁县科发印刷厂  
经销 全国各地新华书店  
开本 169mm×239mm  
印张 16.5  
字数 412 千  
版次 2010 年 7 月第 1 版  
印次 2010 年 7 月第 1 次  
印数 1—3 000  
定价 29.00 元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

**版权所有 侵权必究**

# 前 言

本教材依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)和《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)编写,内容包括绪论、极限状态设计法、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、受扭构件承载力计算、受压构件承载力计算、受拉构件承载力计算、钢筋混凝土构件短暂状况应力验算、钢筋混凝土构件持久状况正常使用极限状态计算、预应力混凝土结构的一般问题、预应力混凝土梁的计算等共 11 章。

为适应短学时和应用型人才的培养需要,本书的编写具有以下特色:

1. 依据或引用最新的文献资料。这其中包括:2009 年出版的《公路桥梁设计规范答疑汇编》、《钢筋混凝土用钢 第 1 部分:热轧光圆钢筋》(GB 1499. 1—2008)、《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB 1499. 2—2007)等。

2. 内容简练实用。对理论性很强的公式推导,例如,受扭构件的变角度桁架模型、圆形截面偏心受压柱的承载力公式,考虑到理解上的难度,本书没有写入,有兴趣的读者可参考有关的教材。预应力混凝土 B 类构件的计算相对比较复杂,本书亦没有详述。

3. 循序渐进,通俗易懂,写法上力求符合初学者的认知规律。

全书由张庆芳、张志国共同完成,张庆芳统编定稿,段树金担任主审。

本书编写过程中,白建方、高伟等老师提出了不少宝贵的意见,对此作者深表谢意。另外,书中参考和借鉴了不少与混凝土有关的文献,谨向有关作者表示感谢。

尽管作者为写作本书尽了最大的努力,但限于水平,难免会有不足甚至欠妥之处,恳请读者朋友不吝指正。对本书若有任何问题或建议,请发电子邮件至 zqfok@126. com 或 zhangzhg@sjzri. edu. cn。

编者

2010 年 2 月

## 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 绪论 .....                      | (1)  |
| 第1章 混凝土结构材料的物理力学性能 .....      | (5)  |
| 1.1 混凝土的强度 .....              | (5)  |
| 1.2 混凝土的变形 .....              | (9)  |
| 1.3 钢筋 .....                  | (14) |
| 1.4 钢筋与混凝土之间的黏结 .....         | (17) |
| 1.5 钢筋的锚固、弯折与接头 .....         | (19) |
| 习题 .....                      | (23) |
| 第2章 极限状态设计法 .....             | (24) |
| 2.1 极限状态设计法的基本概念 .....        | (24) |
| 2.2 公路桥涵设计计算原则 .....          | (28) |
| 2.3 混凝土结构的耐久性设计 .....         | (32) |
| 习题 .....                      | (36) |
| 第3章 受弯构件正截面承载力计算 .....        | (37) |
| 3.1 梁、板的一般构造 .....            | (37) |
| 3.2 适筋梁正截面破坏状态分析 .....        | (42) |
| 3.3 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 .....  | (45) |
| 3.4 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 .....  | (54) |
| 3.5 T形截面受弯构件正截面承载力计算 .....    | (58) |
| 习题 .....                      | (66) |
| 第4章 受弯构件斜截面承载力计算 .....        | (68) |
| 4.1 概述 .....                  | (68) |
| 4.2 受弯构件斜截面的破坏形态 .....        | (69) |
| 4.3 受弯构件斜截面抗剪承载力计算 .....      | (71) |
| 4.4 全梁承载能力校核 .....            | (76) |
| 4.5 构造要求 .....                | (79) |
| 4.6 装配式钢筋混凝土T形简支梁设计 .....     | (81) |
| 习题 .....                      | (88) |
| 第5章 受扭构件承载力计算 .....           | (90) |
| 5.1 纯扭构件的受力性能 .....           | (90) |
| 5.2 钢筋混凝土矩形截面纯扭构件的承载力计算 ..... | (92) |

|      |                        |       |
|------|------------------------|-------|
| 5.3  | 弯、剪、扭共同作用下矩形截面构件的承载力计算 | (95)  |
| 5.4  | T形、工形及箱形截面受扭构件         | (99)  |
| 5.5  | 受扭钢筋的构造要求              | (101) |
|      | 习题                     | (102) |
| 第6章  | 受压构件承载力计算              | (103) |
| 6.1  | 概述                     | (103) |
| 6.2  | 受压构件的构造要求              | (104) |
| 6.3  | 轴心受压构件的正截面承载力          | (107) |
| 6.4  | 偏心受压构件的受力性能与破坏形态       | (113) |
| 6.5  | 矩形截面偏心受压构件正截面承载力基本公式   | (116) |
| 6.6  | 矩形截面偏心受压构件非对称配筋时的计算    | (120) |
| 6.7  | 矩形截面偏心受压构件对称配筋时的计算     | (129) |
| 6.8  | 圆形截面偏心受压构件             | (135) |
|      | 习题                     | (139) |
| 第7章  | 受拉构件承载力计算              | (141) |
| 7.1  | 轴心受拉构件正截面承载力           | (141) |
| 7.2  | 偏心受拉构件正截面承载力           | (141) |
|      | 习题                     | (144) |
| 第8章  | 钢筋混凝土构件短暂状况应力验算        | (146) |
| 8.1  | 受弯构件短暂状况正截面应力验算        | (146) |
| 8.2  | 受弯构件短暂状况斜截面应力验算        | (150) |
|      | 习题                     | (154) |
| 第9章  | 钢筋混凝土构件持久状况正常使用极限状态计算  | (155) |
| 9.1  | 钢筋混凝土受弯构件变形计算          | (155) |
| 9.2  | 钢筋混凝土构件裂缝宽度计算          | (159) |
|      | 习题                     | (164) |
| 第10章 | 预应力混凝土结构的一般问题          | (165) |
| 10.1 | 预应力混凝土的基本原理            | (165) |
| 10.2 | 施加预应力的方法与设备            | (167) |
| 10.3 | 张拉控制应力与预应力损失           | (175) |
| 10.4 | 预应力混凝土构件的应力分析          | (193) |
|      | 习题                     | (199) |
| 第11章 | 预应力混凝土梁的计算             | (200) |
| 11.1 | 预应力混凝土梁正截面承载力计算        | (200) |
| 11.2 | 预应力混凝土梁斜截面承载力计算        | (204) |
| 11.3 | 端部锚固区计算                | (206) |

|       |                                  |       |
|-------|----------------------------------|-------|
| 11.4  | 预应力混凝土梁持久状况正常使用极限状态计算 .....      | (210) |
| 11.5  | 预应力混凝土梁持久状况和短暂状况应力计算 .....       | (215) |
| 11.6  | 预应力混凝土简支梁设计要求 .....              | (218) |
| 11.7  | 预应力混凝土简支梁设计实例 .....              | (227) |
|       | 习题 .....                         | (242) |
| 附录 A  | 一元三次方程的求解 .....                  | (243) |
| 附录 B  | 规范表格摘录 .....                     | (246) |
| 附表 1  | 混凝土强度标准值与设计值 .....               | (246) |
| 附表 2  | 混凝土的弹性模量 $E_c$ .....             | (246) |
| 附表 3  | 普通钢筋强度标准值与设计值 .....              | (246) |
| 附表 4  | 普通钢筋的弹性模量 $E_s$ .....            | (246) |
| 附表 5  | 普通钢筋截面面积、重量表 .....               | (247) |
| 附表 6  | 在钢筋间距一定时每米宽度内钢筋截面面积 .....        | (247) |
| 附表 7  | 普通钢筋和预应力直线形钢筋最小混凝土保护层厚度 .....    | (248) |
| 附表 8  | 钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋的最小配筋率 .....       | (248) |
| 附表 9  | 钢筋混凝土轴心受压构件的稳定系数 $\varphi$ ..... | (249) |
| 附表 10 | 圆形截面钢筋混凝土偏心受压构件正截面承载力计算系数 .....  | (249) |
| 附表 11 | 预应力钢筋抗拉强度标准值 .....               | (250) |
| 附表 12 | 预应力钢筋抗拉、抗压强度设计值 .....            | (251) |
| 附表 13 | 预应力钢筋的弹性模量 .....                 | (251) |
| 附表 14 | 钢绞线公称直径、截面积及理论质量 .....           | (251) |
| 附表 15 | 钢丝公称直径、公称截面积及理论质量 .....          | (252) |
| 参考文献  | .....                            | (253) |

# 绪 论

由基本构件(例如梁、桥墩、桥面板等)组成,用以承受各种作用的体系,称作结构。结构及基本构件由建筑材料制成。依据所采用的材料不同,结构可分为混凝土结构、钢结构、圬工结构和木结构等。混凝土结构又可分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和不配置钢筋的素混凝土结构。

## 一、为什么要配置钢筋

由建筑材料课程可知,混凝土类似于天然石材,具有较高的抗压强度,但抗拉强度很低,一般仅为抗压强度的  $1/16 \sim 1/8$ ;而钢筋则具有较高的抗拉强度。钢筋混凝土结构就是将二者结合起来,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力。

对于一根简支梁,如图 1(a)所示,由《材料力学》知识可知,在图示荷载作用下,梁截面中和轴以上部分受压,以下部分受拉。随着  $P_1$  的增加,梁下部受拉区的拉应变(拉应力)和上部受压区的压应变(压应力)不断增大。当下部受拉区边缘的拉应变达到混凝土的极限拉应变时,最薄弱截面会出现垂直裂缝。由于混凝土抗拉性能很差,一旦开裂,裂缝即会急速向上发展,导致梁突然断裂破坏(破坏前变形很小,没有预兆,属于脆性破坏),如图 1(b)所示。素混凝土梁破坏时能承受的荷载很小,受弯承载力很低,这里,起决定作用的是混凝土抗拉强度,而优良的抗压性能未能充分发挥。

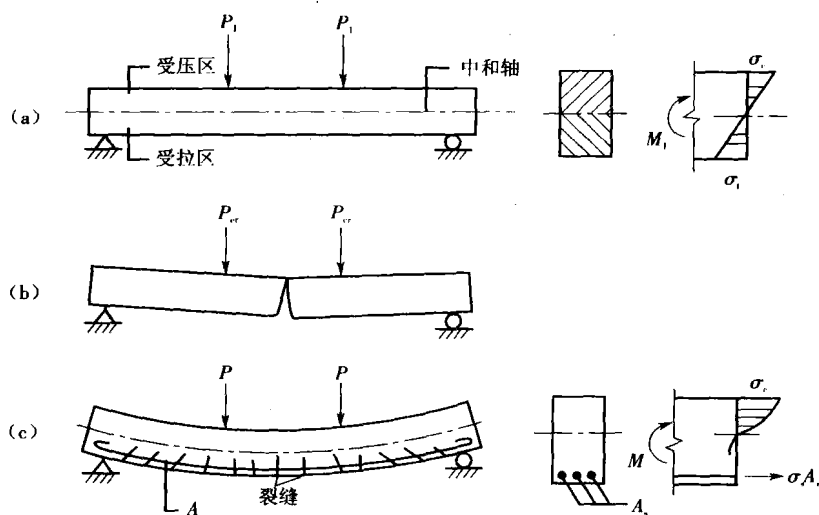


图 1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁

(a) 素混凝土梁的受力与应力分布; (b) 素混凝土梁的破坏; (c) 钢筋混凝土梁的破坏

若在梁的受拉区配置适当数量的纵向钢筋,情况将发生根本改变。如图 1(c)所示,在荷载作用下,当受拉区边缘混凝土拉应变达到极限拉应变时,钢筋混凝土梁和素混凝土梁一样会开裂,但开裂之后的情况有本质不同:裂缝处截面受拉区混凝土退出工作,拉力改由钢筋承担。此时仍可继续加载,不会像素混凝土梁一样一裂即坏。随着荷载的增加,钢筋的拉应力和受压区混凝土的压应力将不断加大,直至钢筋的拉应力达到其屈服强度,继而受压区混凝土被压碎,梁才宣告破坏(破坏前变形较大,有明显预兆,属于延性破坏)。可见,这时混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都得到了充分发挥。

需要指出的是,钢筋混凝土梁与素混凝土梁相比,能承受的极限荷载大大提高,但抗裂荷载是基本相同的,若要提高梁的抗裂性能,则需要通过张拉钢筋的方法使梁体混凝土在承受荷载前预先受压,以此抵消外荷载产生的拉应力,这就是预应力混凝土。

主要承受压力的柱子实际上也是需要配筋的,这时,柱中纵向钢筋的作用为:

- ①与混凝土共同受力以减小截面尺寸;
- ②承受混凝土收缩、温度变化以及偶然偏心引起的拉应力;
- ③承受运输、吊装过程中产生的拉应力。

## 二、钢筋和混凝土为什么能共同工作

钢筋和混凝土这两种材料之所以能结合在一起共同工作,是由于以下原因。

①混凝土结硬后能与钢筋之间产生良好的黏结力,使二者可靠地结合为一个整体,在荷载作用下共同变形。

②钢筋与混凝土的温度线膨胀系数接近,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,不致产生过大的温度应力而破坏两者之间的黏结。

③包裹在钢筋外围的混凝土可使钢筋免于锈蚀,保证了结构具有良好的耐久性。

## 三、钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构在土木工程中得到了最为广泛的应用,主要因为有以下优点。

①经济性好。混凝土所用的砂、石一般易于就地取材。同时,由于钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能,与钢结构相比,可降低造价。

②耐久性好。密实的混凝土具有较高的抗压强度,同时,钢筋被混凝土包裹,不易锈蚀,维修费用很少,所以,钢筋混凝土结构的耐久性比较好。

③整体性好。钢筋混凝土结构(特别是整体浇筑的结构)构件之间是通过钢筋和混凝土的一次性浇筑连接为整体的,有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波。

④可模性好。根据需要,可以较容易地浇筑成各种形状和尺寸。

⑤耐火性好。混凝土是不良导体,钢筋又受到混凝土包裹,火灾时不致因钢筋很快达到软化温度而结构破坏。

钢筋混凝土结构的主要缺点是自重较大、抗裂性能较差、隔热和隔声性能不够理想,此外,施工易受气候条件限制,现浇结构施工周期较长,模板消耗也较多。但随着混凝土材料的不断发展和预应力混凝土结构的推广,这些缺点正在不断得到改善和克服。

#### 四、学习本课程应注意的问题

##### 1. 本课程的内容以及与其他课程的联系

本课程主要介绍混凝土结构的基本原理和基本构件的计算方法,内容包括:混凝土和钢筋的力学性能,极限状态设计法原则,各类基本构件的受力性能、计算理论、计算方法和配筋构造,应力验算,混凝土的变形与裂缝宽度验算以及预应力混凝土梁的计算等。各类基本构件包括受弯构件、受压构件、受拉构件和受扭构件。

本课程的前序课程为“材料力学”、“建筑材料”。虽然不具备这两门课程的知识也能够理解本书的内容,但终究不如学习了“材料力学”、“建筑材料”之后顺畅,水到渠成。另外,本课程与“钢结构”、“砌体结构”等结构设计类课程属于同种类型,彼此之间只是材料性能不同而已,对于同一种力学问题本质上并无太大区别。

本课程的后续课程有“桥梁工程”、“桥梁墩台与基础”等。本课程只是对各种受力类型的基本构件进行讲解,而对这些构件承受的弯矩、剪力等是如何计算得到的并没有涉及,这部分内容将在“桥梁工程”、“桥梁墩台与基础”课程中讲述。

##### 2. 如何学习本课程

###### (1) 注意区分不同规范的适用范围

设计规范是国家颁布的具有法律性的文件,是设计人员必须遵守的准则。由于不同行业各具特点,尽管同是对混凝土结构的规定,不同规范之间还是有差异的,使用时务必注意区分其适用范围。例如,工业与民用建筑采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),高层建筑采用《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002),铁路混凝土桥梁采用《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土设计规范》(TB 10002.3—2005),公路混凝土桥梁采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)。

作为教材,须依据相关规范规定来编写,对其条文进行讲解。本教材的编写依据为《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)。

###### (2) 与“钢结构”课程相比,本课程更注重试验研究

混凝土结构由于其本身材料的复杂性,导致其计算理论和计算方法离不开大量的试验研究,在本课程中表现为很多公式都是半理论半经验性的,很少有像“钢结构”课程中那样的理论公式。又由于试验的局限性,所建立的公式往往都有一定的限制范围和适用条件。学习过程中,重点应放在对基本概念和基本原理的理解上,避免死记硬背公式。

###### (3) 本课程要解决的不仅仅是力学计算问题,更是设计问题

材料力学、结构力学等课程主要解决力学计算问题,而实际的设计不仅涉及构件

的强度、变形计算等问题,还必须考虑安全和经济这一对矛盾的平衡。力学计算有“对”与“错”之分,设计则更多是在多种可行方案中区分“优”与“劣”。

此外,混凝土结构设计十分重视配筋构造。构造措施是长期工程实践经验的积累,通过简便的构造措施可以代替复杂的、没有必要的计算,而且证明是有效的、安全的。构造措施是对计算的必要补充,与计算同样重要,这一点必须引起重视。

# 第1章 混凝土结构材料的物理力学性能

混凝土结构由钢筋和混凝土两种物理力学性能不同的材料组成,掌握这两种材料的基本物理力学性能,是混凝土结构计算理论和设计方法的基础。

本章先讲述混凝土的物理力学性能,包括:单轴受力情况下受压、受拉的性能,复合应力状态下的性能,混凝土的变形;再讲述钢筋的物理力学性能;最后是钢筋和混凝土二者的黏结性能。

## 1.1 混凝土的强度

### 1.1.1 单向应力状态下的混凝土强度

#### 1. 混凝土的立方体抗压强度

立方体试件的强度比较稳定,所以我国把立方体强度值作为混凝土强度的基本指标,并把立方体抗压强度作为评定混凝土强度等级的标准。

《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定,以边长为150 mm的立方体作为标准试件,在 $20 \pm 2$  °C的温度和相对湿度95%以上的空气中养护28 d,依照标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度,称为混凝土的立方体抗压强度标准值,记作 $f_{cu,k}$ ,单位为MPa。

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》根据混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ ,把混凝土强度划分为14个强度等级,分别为C15、C20、C25、C30……C80,其中“C”表示混凝土,C后面的数字表示立方体强度标准值(级差为5 MPa),例如C15即表示 $f_{cu,k} = 15$  MPa。

试验研究表明,混凝土的抗压强度除受组成材料的性质、配合比、养护环境、施工方法等因素影响外,还与试验方法及试件的尺寸、形状有关。

试件在试验机上单向受压时,竖向缩短,横向扩张,压力机垫板的横向变形明显小于混凝土,因此,会对混凝土试块形成约束,其作用与在试块的上、下端各加了一个“套箍”类似,致使混凝土破坏时形成两个对顶的角锥形破坏面。这种“套箍作用”会使抗压强度提高。如果在试件上、下表面涂一层润滑剂,受压时将没有“套箍作用”的影响,试件将沿着平行于力的方向产生几条裂缝而破坏,测得的抗压强度就低。图1.1-1是两种不同情况的对比。我国规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

混凝土的抗压强度还与试件的形状有关。试验表明,试件的高宽比 $h/b$ 越大,所测得的强度越低。当高宽比 $h/b \geq 3$ 时,强度变化就很小了。这反映了试件两端与压

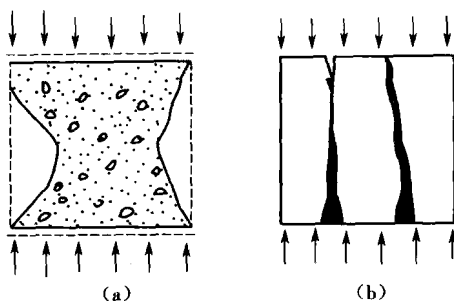


图 1.1-1 混凝土立方体试件的破坏情况

(a) 不涂润滑剂;(b) 涂润滑剂

力机垫板之间存在的摩阻力,对不同高宽比的试件混凝土横向变形的约束影响程度不同。

试件的尺寸对抗压强度也有一定影响。试件的尺寸越大,实测强度越低,这种现象称为“尺寸效应”。一般认为,这是由于混凝土内部缺陷和试件承压面摩阻力影响等因素造成的。依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》,若混凝土强度等级小于 C60 时,用非标准试件测得的强度值应乘以换算系数,其值对 200 mm 立方体试件为 1.05;对 100 mm 立方体试件为 0.95。当混凝土强度等级大于等于 C60 时,宜采用标准试件。

混凝土的立方体抗压强度随着混凝土成型后龄期的增长而提高,而且前期提高的幅度较大,后期逐渐减缓。该过程一般均需延续数年后才能完成。如果使用环境是潮湿的,那么其延续的年限更长。

施加荷载的速度对混凝土立方体抗压强度也有影响,加载速度越快,抗压强度越高。

## 2. 混凝土的轴心抗压强度

在实际结构中,绝大多数受压构件的高度比其截面边长要大得多,所以,采用棱柱体试件抗压强度能更好地反映混凝土的实际受力状态。同时,由于试件的高宽比较大,端部摩阻力的影响较弱,所测强度趋于稳定。《普通混凝土力学性能试验方法标准》以 150 mm × 150 mm × 300 mm 的棱柱体作为混凝土轴心抗压试验的标准试件,按与上述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,称为混凝土的轴心抗压强度(或棱柱体抗压强度)标准值,记为  $f_{ck}$ ,单位为 MPa。

根据统计分析并基于安全考虑,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》将轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值之间的关系按下式确定:

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{cl}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (1.1-1)$$

式中  $\alpha_{cl}$ ——棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值,对混凝土强度等级为 C50

及以下取  $\alpha_{c1} = 0.76$ , 对 C80 取  $\alpha_{c1} = 0.82$ , 中间按照线性内插;

$\alpha_{c2}$ ——考虑混凝土脆性的折减系数, C40 及以下取  $\alpha_{c2} = 1.0$ , 对 C80 取  $\alpha_{c2} = 0.87$ , 中间按线性内插。

### 3. 混凝土抗拉强度

混凝土的抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一, 其值为立方体抗压强度的  $1/16 \sim 1/8$ 。由于混凝土内部的不均匀性以及安装试件的偏差等原因, 国内外常常采用立方体或圆柱体“劈裂试验”来代替轴心拉伸试验, 如图 1.1-2 所示。我国在劈裂试验时采用的试件为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的标准试件, 通过弧形钢垫条施加竖向压力  $F$ 。加载速度: 当混凝土强度等级  $< \text{C30}$  时, 取每秒钟  $0.02 \sim 0.05 \text{ MPa}$ ; 当混凝土强度等级  $\geq \text{C30}$  且  $< \text{C60}$  时, 取每秒钟  $0.05 \sim 0.08 \text{ MPa}$ ; 当混凝土强度等级  $\geq \text{C60}$  时, 取每秒钟  $0.08 \sim 0.10 \text{ MPa}$ 。

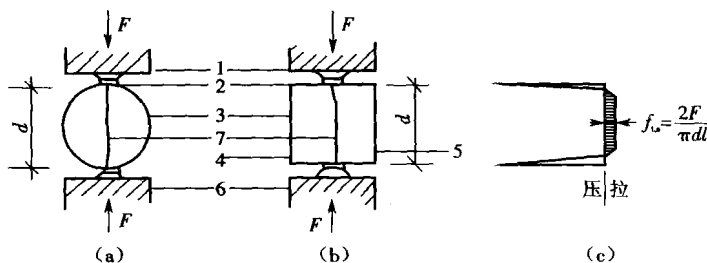


图 1.1-2 混凝土劈裂试验示意图

(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

在试件的中间截面, 存在有均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时, 试件被劈裂成两半。劈裂强度  $f_{ts}$  按下列公式计算:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} \quad (1.1-2)$$

式中  $F$ ——劈裂破坏荷载;

$A$ ——试件劈裂面积。

需要提及的是, 对于同一品质的混凝土, 轴心拉伸试验与劈裂试验所测得的抗拉强度值并不相同, 劈裂抗拉强度值略大于直接拉伸强度值, 而且与试件的大小有关。

### 1.1.2 复合应力状态下的混凝土强度

实际的混凝土构件可能受到轴力、弯矩、剪力及扭矩等不同内力组合的作用, 大多处于复合应力状态, 此时, 混凝土的强度会有明显的变化。

#### 1. 双轴受力时混凝土的强度

沿试件两个主轴方向作用不同的正应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ , 第三个主轴方向正应力为零, 此

时处于双向受力状态,其强度变化规律如图 1.1-3 所示。可以看出,它有如下特点。

①第一象限为双向受拉状态, $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 相互影响不大,即不同应力比值 $\sigma_1/\sigma_2$ 下的双轴抗拉强度均接近单向抗拉强度。

②第三象限为双向受压状态,大体上是一向的混凝土强度随另一向压力的增加而增加。这是由于一个方向的压应力对另一个方向压应力引起的横向变形起到一定的约束作用,限制了试件内部混凝土微裂缝的扩展,故而提高了混凝土的抗压强度。双向受压状态下混凝土强度提高的幅度与双向应力比 $\sigma_1/\sigma_2$ 有关。当 $\sigma_1/\sigma_2$ 约等于 2 或 0.5 时,双向抗压强度比单向抗压强度提高 25% 左右;当 $\sigma_1/\sigma_2 = 1$  时,仅提高 16% 左右。

③第二、四象限为拉—压应力状态,混凝土的强度均低于单轴受力(拉或压)强度。

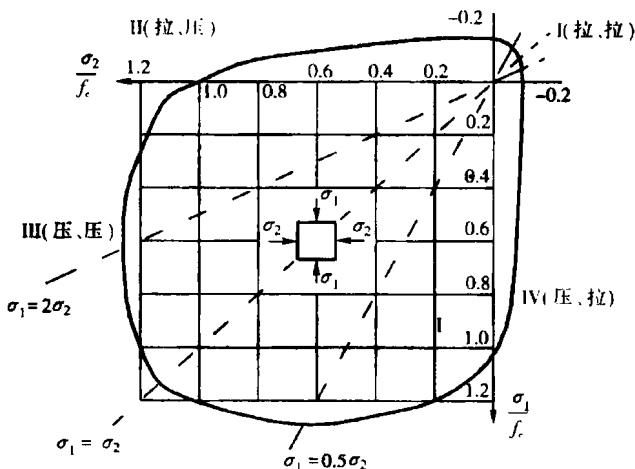


图 1.1-3 双向应力状态下混凝土强度变化曲线

## 2. 正应力与剪应力共同作用时混凝土的强度

如图 1.1-4 所示,由于剪应力的存在,使抗拉强度降低。当 $\sigma/f_c < (0.5 \sim 0.7)$  时,抗压强度随剪应力的提高而提高;之后,抗压强度随剪应力的增大而减小。可见,当结构中存在剪应力时,总会使混凝土的强度较单轴受力时降低。

## 3. 三轴受压时混凝土的强度

试验研究表明,三轴受压时,混凝土的强度和延性均有较大的增长。这是由于,一个方向受压时,其横向变形受到另外两个方向的约束,使微裂缝的发展受到抑制。试验得出的经验公式为:

$$\sigma_1 = f_c + K\sigma_2 \quad (1.1-3)$$

式中  $\sigma_2$ ——侧向约束压应力;

$K$ ——侧向应力系数,通常可取为常数,较早的试验资料给出  $K = 4.1$ ,后来的

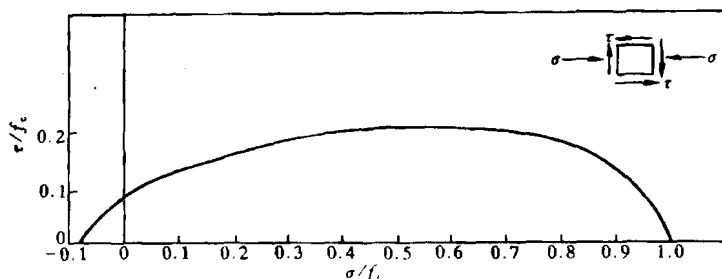


图 1.1.4 法向应力和剪应力组合时混凝土强度变化曲线

试验资料给出  $K = 4.5 \sim 7.0$ 。

实际工程中,常采用横向钢筋约束混凝土变形,如在钢筋混凝土柱中配置间距较密的螺旋形箍筋,以对混凝土施加侧向约束,形成三向受压应力状态。此外,还可以采用钢管混凝土的组合结构。

## 1.2 混凝土的变形

混凝土的变形有两类:一类是混凝土的受力变形,包括一次短期单轴加载变形、荷载长期作用下的变形(徐变)和重复荷载作用下的变形等;另一类是混凝土的体积变形,它与荷载无关,包括混凝土的收缩、膨胀变形。

### 1.2.1 混凝土在一次短期加载时的应力—应变曲线

#### 1. 混凝土受压时的应力—应变曲线

混凝土受压时的应力—应变关系,是混凝土最基本的力学性能之一。我国采用棱柱体试件测定一次短期加载下的混凝土受压应力—应变曲线。图 1.2-1 为实测的典型的棱柱体混凝土试件一次短期加载受压时的应力—应变全曲线。

由图可见,这条曲线包括上升段和下降段两个部分,其关键点包括:A——比例极限,B——临界点,C——峰值点,D——拐点,E——收敛点,F——曲线末梢。

上升段:OA 段接近直线,应力较小,应变不大,混凝土的变形为弹性变形,原始裂缝影响很小;AB 段为微曲线段,应变的增长稍比应力快,混凝土处于裂缝稳定扩展阶段,临界点 B 的应力可作为长期抗压强度的依据;BC 段应变增长明显比应力增长快,混凝土处于裂缝快速不稳定发展阶段,峰值点 C 的应力最大,为混凝土棱柱体抗压强度,与之对应的应变  $\varepsilon_0$ ,称峰值应变,其值在  $0.0015 \sim 0.0025$  之间波动,通常取为  $0.002$ 。

下降段:在 CDEF 下降段中,应力随应变的增长而逐渐降低。D 点为曲线的反弯点。CD 段应力快速下降,应变仍在增长,混凝土中裂缝迅速发展且贯通,出现了主裂缝,内部结构破坏严重。E 点为曲线中曲率最大的点。DE 段,应力下降变慢,应变较

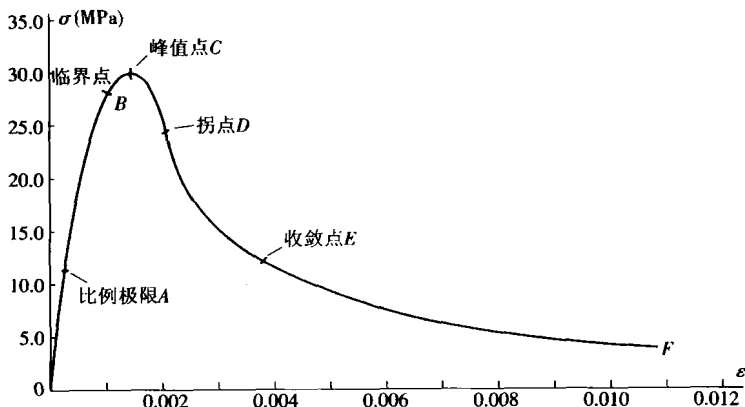


图 1.2-1 混凝土受压时的应力—应变曲线

快速增长,混凝土内部结构处于磨合和调整阶段,主裂缝宽度进一步增大,最后只依赖骨料间的咬合力和摩擦力来承受荷载。 $EF$ 段为收敛段,此时试件中的主裂缝宽度快速增大而完全破坏了混凝土内部结构。通常将收敛点  $E$  对应的应变作为试件破坏时的最大应变,称极限压应变,记作  $\varepsilon_{cu}$ ,其值取为 0.003 3。

值得一提的是,在普通试验机上采用等应力速率的加载方式进行试验时,一般只能获得应力—应变曲线的上升段,很难获得其下降段,其原因是试验机刚度不足。当加载至混凝土达到轴心抗压强度时,试验机中积蓄的弹性应变能大于试件所吸收的应变能,此应变能在接近试件破坏时会突然释放,致使试件发生脆性破坏。如果采用伺服试验机,在混凝土达极限强度时能以等应变速率加载;或在试件旁边附加设置高性能弹性元件共同承压,当混凝土达极限强度时能吸收试验机内积聚的应变能,就能获得应力—应变全曲线。

不同强度等级混凝土的应力—应变关系曲线基本形状相似,强度等级越高,下降段越陡,表明延性越差。

## 2. 混凝土的变形模量

与弹性材料相比,混凝土的应力—应变关系呈现非线性性质,即在不同应力状态下,应力与应变的比值是一个变数。混凝土的变形模量有如下三种表示方法。

### (1) 弹性模量(原点模量) $E_c$

在混凝土轴心受压的应力—应变曲线上,过原点作该曲线的切线,如图 1.2-2 所示,其斜率即为混凝土的原点切线模量,通常称为混凝土的弹性模量,用  $E_c$  表示,即

$$E_c = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\sigma=0} = \tan \alpha_0 \quad (1.2-1)$$

式中  $\alpha_0$ ——过原点所作应力—应变曲线的切线与应变轴间的夹角。

### (2) 割线模量 $E'_c$

在混凝土的应力—应变曲线上,将任一点与原点连线,该割线斜率即为混凝土的