

交通中等专业学校统编教材

桥梁工程

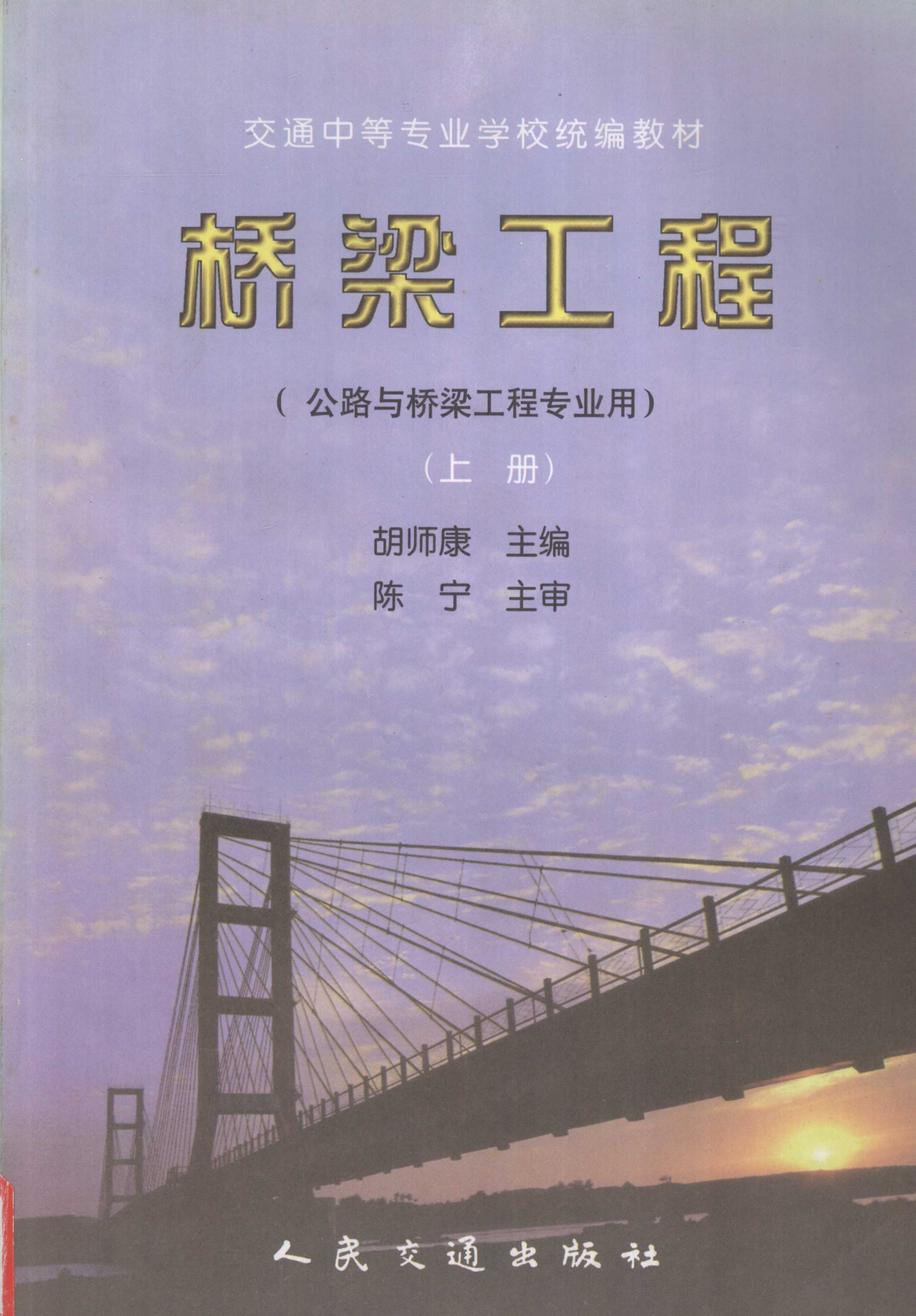
(公路与桥梁工程专业用)

(上册)

胡师康 主编

陈 宁 主审

人民交通出版社



交通中等专业学校统编教材

QiaoLiang GongCheng

桥 梁 工 程

(公路与桥梁工程专业用)

(上册)

胡师康 主编

陈 宁 主审

人 民 交 通 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

桥梁工程 上册/胡师康编. —北京:人民交通出版社,1997

交通中等专业学校统编教材

ISBN 7-114-02588-2

I. 桥… II. 胡… III. 桥梁工程-专业学校-教材
IV. U44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 08336 号

交通中等专业学校统编教材

桥梁工程

(公路与桥梁工程专业用)

(上册)

胡师康 主编

陈 宁 主审

责任印制:张 凯 正文设计:崔凤莲 责任校对:张 莹

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:305 千

1997 年 9 月 第 1 版

1998 年 11 月 第 1 版 第 4 次印刷

印数:17101-20100 册 定价:12.30 元

ISBN 7-114-02588-2

U · 01827

内 容 提 要

本书主要包括:钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砖石及混凝土结构的主要受力性能、设计计算方法及构造要求。

本书系交通中等专业学校公路与桥梁工程专业统编教材,亦可供公路工程技术人员及从事混凝土结构工程的设计人员参考。

前 言

本书是根据1995年8月在太原召开的全国交通中专路桥工程学科委员会第六次会议、路桥专业委员会第四届二次会议的精神编写的,可作为交通中等专业学校公路与桥梁工程专业的统编教材。

本书以1985年我国交通部颁布标准《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021—85)、《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ022—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)为主要依据,分别介绍了钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砖石及混凝土结构的主要受力性能、设计计算方法及构造要求。考虑到交通系统中等专业学校的特点,本书在加强必要的基本理论教学的同时,注意了知识的科学性、先进性、规范性和实用性。为了进一步加深读者对基本概念的理解及加强所学知识的应用,在重要内容后面大都附有例题、思考题和习题,以期收到举一反三,灵活运用之效果。

本书由江西省交通学校胡师康编写,广西交通学校陈宁审稿,福建交通学校张顺铨复审,全书插图由广西交通学校陈宁描绘。

由于编者水平有限,经验不足,书中不可避免地存在一定缺点和错误,敬请读者批评指正,以便再版时改正。

编 者

1996年9月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 钢筋混凝土结构

第一章 钢筋混凝土材料的物理力学性能	4
第一节 混凝土	4
第二节 钢筋	10
第三节 钢筋与混凝土共同工作	17
思考题	19
第二章 钢筋混凝土结构的基本计算原理	21
第一节 荷载与结构抗力	21
第二节 极限状态计算法的基本原理	22
第三节 安全系数	23
思考题	25
习题	26
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面强度计算	27
第一节 受弯构件的构造要求	27
第二节 受弯构件试验结果分析	31
第三节 单筋矩形截面受弯构件计算	35
第四节 双筋矩形截面受弯构件计算	44
第五节 单筋 T 形截面受弯构件计算	50
思考题	58
习题	58
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面强度计算	60
第一节 受弯构件斜截面破坏形态	60
第二节 受弯构件斜截面抗剪强度计算公式	62
第三节 受弯构件斜截面抗剪配筋设计	67
第四节 受弯构件斜截面强度计算	71
思考题	80
习题	81
第五章 钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算	82
第一节 换算截面	82
第二节 受弯构件在施工阶段的应力计算	85
思考题	89

习题	89
第六章 钢筋混凝土受弯构件变形与裂缝宽度计算	90
第一节 受弯构件的变形(挠度)计算	90
第二节 受弯构件的裂缝宽度计算	93
思考题	96
习题	96
第七章 钢筋混凝土受压构件强度计算	97
第一节 受压构件的构造要求	97
第二节 轴心受压构件正截面强度计算	100
第三节 偏心受压构件正截面强度计算	108
思考题	129
习题	130

第二篇 预应力混凝土结构

第八章 预应力混凝土结构的基础知识	132
第一节 预应力混凝土的基本概念及其材料	132
第二节 张拉控制应力与预应力损失	136
思考题	143
第九章 预应力混凝土受弯构件的计算	144
第一节 受弯构件的基本构造	144
第二节 受弯构件的计算	148
第三节 部分预应力混凝土与无粘结预应力混凝土简介	166
思考题	168

第三篇 砖石及混凝土结构

第十章 砖石及混凝土结构的材料和圬工砌体的性能	170
第一节 砖石及混凝土结构的材料	170
第二节 圬工砌体的主要力学性能	172
思考题	179
第十一章 砖石及混凝土结构的强度计算	180
第一节 砖石及混凝土结构的设计原则	180
第二节 砖石及混凝土结构的强度计算	181
思考题	188
习 题	188
主要参考书目	189

绪 论

一、建筑结构的分类及应用范围

凡是建筑物,无论桥梁、涵洞、房屋、水工结构物等,都是由构件(如梁、桁架、拱、墙、柱、基础等)所组成。这些构件在建筑物中互相支承、互相扶持,直接地或间接地、单独地或协同地承受各种荷载作用,构成了一个结构整体——建筑结构。建筑结构是建筑物的骨架,是建筑物赖以存在的物质基础,它的质量好坏,对于建筑物的适用、安全和使用寿命等具有决定性作用。

建筑结构,根据所选用材料的不同,可分为钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砖石及混凝土结构(圬工结构)、钢结构和木结构等。

(一)钢筋混凝土结构

钢筋混凝土是由混凝土和钢筋两种材料构成的。钢筋混凝土作为建筑材料具有许多优点,如强度高、耐久性好、耐火性好、抗震性好、易于就地取材,并具有可模性等。但是,钢筋混凝土也有一些缺点,如自重大、费工费木料、受季节影响大等。随着科学技术的发展,钢筋混凝土的这些缺点正在逐步得到克服。钢筋混凝土结构的应用范围十分广泛,如桥梁、涵洞、挡土墙、路面、水工结构物和房屋建筑等,多采用钢筋混凝土建造。

(二)预应力混凝土结构

预应力混凝土结构就是构件在使用荷载作用之前,预先对混凝土受拉区施加压应力的结构。预应力混凝土结构抗裂性能好,适宜采用高强度钢筋和高标号混凝土,从而能节省材料、减轻自重、增大跨度;同时,预应力混凝土结构还具有刚度较大、耐久性与抗疲劳性能较好等优点。但是,预应力混凝土结构也存在一些问题,如需要张拉设备和锚固装置、生产工艺比较复杂、制作技术要求高、施工周期长等。目前,预应力混凝土不仅在桥梁、房屋建筑、轨枕、电杆、桩、储液池等方面得到了比较广泛的应用,而且还推广到地下建筑、海洋建筑、压力容器、大吨位货轮、飞机跑道和工程加固等方面。

(三)砖石及混凝土结构

砖石及混凝土结构一般是指由砖、石料及混凝土等材料构成的结构物,又称圬工结构。砖石及混凝土结构具有就地取材、施工简便、造价低廉、耐火性能好和化学稳定性好等优点。可惜砖石及混凝土结构自重大、抗拉抗弯强度低、抗震性能差、施工期长、现场作业量大,不能适应建筑工业化发展的要求。砖石及混凝土结构广泛应用于桥涵工程及其它建筑工程中以受压为主的结构部件,如拱圈、墩台、基础、挡土墙及其它受压构件。

(四)钢结构

钢结构是由钢材制成的结构。钢结构强度高、重量轻、质地均匀、制作简单以及运输方便等;它的主要缺点是:容易锈蚀、维修费用高、耐火性能差等。目前,钢结构多用于修建高、大建筑物;钢结构常预制成定型杆件,作为生产设备。

(五)木结构

木结构是指全部或大部分用木材制成的结构物。木结构具有就地取材、制作简单、自重轻

等优点。但是,木结构却易燃、易腐蚀、易虫蛀、结构变形大。近二、三十年,工程建设中已很不采用木结构,只有在山区、林区的某些建筑中还有应用,或者临时抢险急修工程及施工过程中的辅助性工程(如便桥、工棚、支架和模板等)中,还采用木结构。

二、桥涵结构设计的基本要求

公路桥涵应根据所在公路的使用任务、性质和将来的发展需要,按照适用、经济、安全和美观的原则进行设计,也需要根据因地制宜、就地取材、便于施工和养护的原则,合理地选用适当结构型式。同时,应尽可能地节省木材、钢材和水泥的用量,其中尤应注意贯彻节省木材的精神。

在进行桥涵结构设计时,应严格遵守有关技术标准和设计规范。对于一些特殊结构或创新结构,则可参照国家批准的专门规范或有关的先进技术资料进行设计。同时,还应进行必要的科学实验。

桥涵结构在使用期限内应有适当的可靠度,这就要求桥涵结构的整体及其各个组成部分的构件在使用荷载作用下具有足够的强度、刚度、稳定性和耐久性。强度要求是指桥涵结构在使用期限内,它的各个部件及其联结的各个细部抵抗破坏的能力符合规定的要求或具有足够的安全储备;刚度要求是指在计算荷载作用下,桥涵结构物的变形必须控制在容许范围以内;桥涵稳定性要求是指整个桥涵结构及其各个部件,在计算荷载作用下都处于稳定的平衡状态;桥涵结构的耐久性是指桥涵结构在正常的使用年限内,不得过早地破坏而影响正常使用。值得注意的是,不可片面地强调结构的经济指标而降低对结构物耐久性的要求,从而影响桥涵结构物的使用寿命或过多地增加桥涵的维修、养护、加固的费用。

桥涵结构物的所有构件和联结细部都必须进行设计和验算。同时,每个工程技术人员还必须清楚地懂得,正确地处理好结构构造问题是十分重要的,这与处理好计算问题是同等的重要。因而,在进行桥涵结构设计时,首先应根据材料的性质、受力特点、使用条件和施工要求等情况,慎重地进行全面的综合性的分析,而后采取合理的构造措施,确定构件的几何形状和各部尺寸,并进行验算和修正。

三、学习本课程需要注意的问题

钢筋混凝土、预应力混凝土、砖、石及混凝土结构是目前我国公路桥涵与道路人工构造物广泛采用的结构。本课程就是研究上述诸结构及构件的受力性能、设计计算方法及构造要求,这是桥涵结构设计的基本内容,也为学习《桥梁工程》(下册)提供基础知识。

学习本课程时要注意下列几个问题:

1. 桥涵结构设计计算。需要用到建筑材料、力学等方面的知识,因此,学习本课程时,应跟《公路建筑材料》、《工程力学》等先修课联系起来。但是,《工程力学》课主要是研究单一、匀质、连续、弹性材料的构件,而桥涵结构所用材料有它自己的特点,因此,在进行桥涵结构设计计算时,应考虑桥涵结构物的实际情况,进行恰当的处理,变成符合条件的结构构件,再借用《工程力学》中相关公式去设计计算。

2. 由于组成各种结构的材料种类不同,材性各异,这就使结构的强度和变形规律在很大程度上要依靠大量试验资料的统计分析所给出的经验关系来描述。因此,在结构计算中就不可避免地要出现一些半经验半理论公式,甚至是经验公式。这就要求在学习和运用这些公式时特别注意它的适用范围和条件。

3. 结构设计是一个综合性问题,需要考虑安全、适用、经济和施工可行性等各方面的因素。同一构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面型式、尺寸、配筋数量等多种答案,因此,结构物设计的多方案性是本课程的另一特点。

4. 本课程的主要内容取材于我国现行的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021—85)、《公路桥石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ022—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85),这些设计规范是我国公路桥涵结构物设计的主要依据。在学习过程中,应熟悉上述规范,只有对上述规范条文的概念、实质有了正确的理解,才能确切地应用规范的公式和条文,以充分发挥设计者的分析能力、主动性和创造性。

上述这些问题都是在已修课程中所未曾遇到过的,只有很好地认识它们,才能更好地掌握这门课程。

第一篇 钢筋混凝土结构

混凝土具有较高的抗压强度,但它的抗拉强度甚低,仅为抗压强度的 $1/8 \sim 1/12$;钢筋则是抗拉和抗压强度都很高的材料。

一根纯混凝土简支梁,由于混凝土的抗拉强度很低,当荷载不大时,梁的下缘就会开裂,裂缝出现后,随即迅速向上扩展,使梁发生没有预兆的、突然的脆裂,所以纯混凝土梁的承载能力很低,而且梁破坏时,其中性轴以上受压区的压应力还远小于混凝土的抗压强度,材料未得到充分利用。若在中性轴以下的受拉区配置适量的钢筋,当梁下缘开裂时,受拉区的拉力可由受拉钢筋承受,这就弥补了混凝土抗拉能力低的弱点,此时,荷载可继续增加,裂缝向上延伸,直到受压区混凝土应力达到抗压极限强度,梁才被压碎而破坏。由此可见,在混凝土中配置了钢筋的梁,其承载能力比纯混凝土梁要大得多。

由钢筋和混凝土共同组成的结构,称为钢筋混凝土结构。

第一章 钢筋混凝土材料的物理力学性能

第一节 混 凝 土

一、混凝土的强度

对于钢筋混凝土结构,混凝土强度是直接影响结构安全与耐久性的力学指标,是设计钢筋混凝土结构物的重要依据。混凝土强度主要包括混凝土的抗压强度及混凝土的抗拉强度。

(一)混凝土的立方强度(即立方抗压强度)和标号 R

所谓混凝土立方强度,即指各边长均为 20cm 的混凝土标准立方体试块,在标准条件(温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 90\%$)下养护,龄期为 28 天,用标准试验方法,在压力试验机上所测得的极限抗压强度(以 MPa 计),简称立方强度。工程上以此立方强度作为混凝土标号,用以划分混凝土强度等级,用符号 R 表示。

根据我国交通部部颁标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)(以下简称《桥规》(JTJ023—85))的规定,用于公路桥梁承重部分的混凝土标号分为 15 号、20 号、25 号、30 号、40 号、50 号、60 号等七种。同时还规定,钢筋混凝土构件的混凝土标号不宜低于 15 号;当构件中采用 II、III 级钢筋时,混凝土标号不宜低于 20 号。

(二)混凝土的轴心抗压强度(即棱柱体强度) R_a

混凝土的抗压强度不仅与试件的尺寸有关,也同它的形状有关。在实际结构中,轴心受压

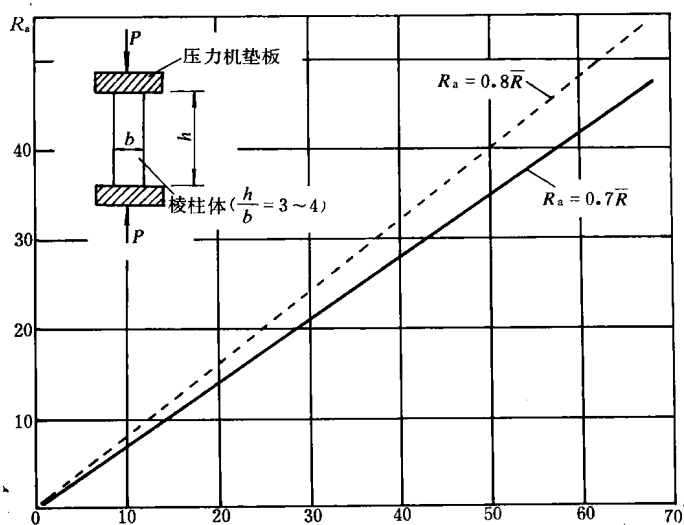


图 1-1 混凝土棱柱体强度 R_a 与立方强度 R 的关系

构件的纵向尺寸总是远大于它的横向尺寸(例如柱、桁架的压杆等)。工程中通常用高宽比为 3~4 的棱柱体试件做轴心抗压试验来确定混凝土的轴心抗压强度,即棱柱体强度。我国近年来所做的 349 组棱柱体抗压试验的结果证实棱柱体强度 R_a 与其立方强度 R 的关系大致成一条直线(见图 1-1),统计所得的经验公式可近似地取 $R_a = 0.8R$ 。考虑到试验与实际结构受力情况的差异所造成的误差及多年来所采用的数值等因素,实际应用时取

$$\bar{R}_a = 0.7\bar{R} \quad (1-1)$$

式中: $\bar{R}_a$ ——棱柱体试件强度的平均值;

$\bar{R}$ ——立方体抗压强度的平均值。

实践证明,用棱柱体强度作为混凝土的轴心抗压强度是符合实际的。

(三)混凝土的轴心抗拉强度 R_t

混凝土的轴心抗拉强度很低,一般约为立方强度的 $\frac{1}{8} \sim$

$\frac{1}{12}$,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。

测定混凝土轴心抗拉强度的方法有两类,一类是直接测试方法,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。这种测试对试件尺寸及钢筋位置要求较严。另一类为间接测试方法,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基本均匀分布的拉应力。当试件劈裂破坏时,混凝土抗拉强度值可按《弹性力学》中的公式求得,即

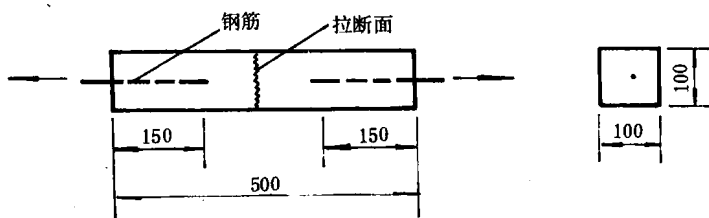


图 1-2 混凝土轴心抗拉强度直接测试试件

尺寸单位:cm

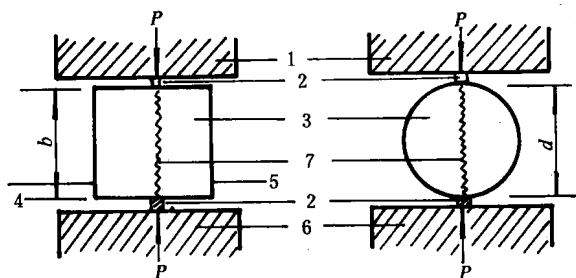


图 1-3 用劈裂法试验混凝土抗拉强度示意图

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

$$R_l^p = \frac{2P}{\pi dl} \tag{1-2}$$

式中： P ——破坏荷载；
 $b、d$ ——立方体边长或圆柱体直径；
 l ——立方体边长或圆柱体长度。

根据试验资料，混凝土的抗拉强度随混凝土立方强度的提高而增长，但这种增长是逐渐衰减的，在实用上混凝土轴心抗拉强度采用的经验公式为

$$\bar{R}_l = 0.232 \bar{R}^{2/3} \tag{1-3}$$

式中： $\bar{R}_l$ ——混凝土轴心抗拉强度的试验平均值(MPa)。

(四)混凝土的标准强度和设计强度

材料的标准强度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标准值。对于混凝土，原国家建委有关单位，根据正常混凝土质量的统计，同批混凝土立方试块的强度平均值 $\bar{R}$ 一般高于其标号 R 一个均方差值 σ ，考虑到《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041—89)对混凝土施工质量的要求与原国家建委有关规范相同。《桥规》(JTJ023—85)采用的混凝土标准强度是混凝土试件的强度平均值减去 1 倍均方差，即 $R_h^b = \bar{R}_h - \sigma$ ，其保证率为 84.13%。

材料的设计强度是结构设计时材料的强度指标。在结构设计中，材料强度保证率通常要求不少于 95%，而混凝土试件的强度平均值减去 2 倍均方差，即 $R_h = \bar{R}_h - 2\sigma$ ，其保证率为 97.73%，满足要求。因此，《桥规》(JTJ023—85)取这个数值 ($R_h = \bar{R}_h - 2\sigma$) 作为混凝土的设计强度。这个混凝土设计强度值约为 (0.8~0.86) 倍混凝土标准强度值。

不同标号混凝土的设计强度与标准强度取值见表 1-1。

混凝土的设计强度和标准强度(MPa) 表 1-1

强度种类		符 号	混 凝 土 标 号						
			15	20	25	30	40	50	60
设 计	轴心抗压	R_a	8.5	11.0	14.5	17.5	23.0	28.5	32.5
强 度	抗 拉	R_l	1.05	1.30	1.55	1.75	2.15	2.45	2.65
标 准	轴心抗压	R_h^b	10.5	14.0	17.5	21.0	28.0	35.0	42.0
强 度	抗 拉	R_l^b	1.30	1.60	1.90	2.10	2.60	3.00	3.40

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 30cm，表中混凝土的强度应乘以系数 0.8。

二、混凝土的变形

钢筋混凝土结构的计算理论与混凝土的变形性能相关，所以研究混凝土的变形，对于掌握钢筋混凝土结构设计计算方法是重要的。混凝土的变形可分为混凝土的受力变形与混凝土的体积变形。

(一)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三个特征。

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 $\sigma_h \leq 0.2\sigma_{\max}$ 时,应力与应变曲线近似呈线性关系,此时混凝土的变形主要取决于骨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粘性流动外,混凝土中已产生微裂缝并开始扩展所致。当 $\sigma_h \geq 0.75\sigma_{\max}$ 时,微裂缝继续扩展并互相贯通,使得塑性变形急剧增长,最后在 σ_h 接近 $\sigma_{\max}$ 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 $\sigma_{\max}$ 即为棱柱体强度 R_a ,其相应的应变值 $\epsilon_a = 0.0008 \sim 0.003$ (计算时取 $\epsilon_a = 0.002$)。曲线 $O-\sigma_{\max}$ 段称为此应力-应变曲线的“上升段”。

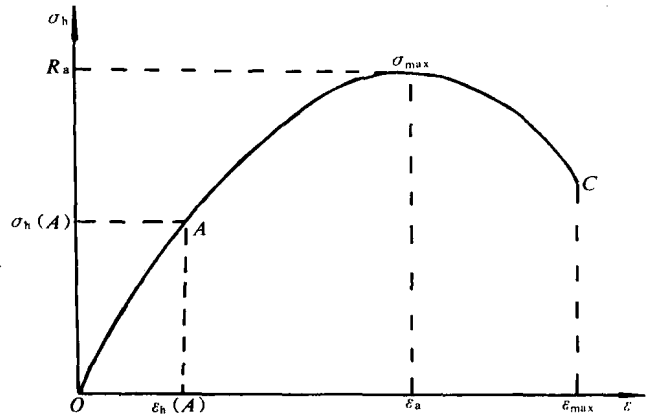


图 1-4 混凝土一次短期加荷(压)时的应力-应变曲线

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 $\sigma_{\max}$ 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,使所测得的应力-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,它所积存的弹性变形能较小,当试件加荷到 $\sigma_{\max}$ 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 点相应的应变即为受压极限应变 $\epsilon_{\max}$ 。一般情况下, $\epsilon_{\max} = 0.002 \sim 0.006$,有时甚至可达 0.008。对高标号(如 50 号和 60 号)混凝土由于其脆性性质,没有这种下降段或很不明显。

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。这时荷载持续时间愈长,试件变形愈大,应力-应变曲线的曲率也就愈大。

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 $\epsilon_1 = 0.0001 \sim 0.00015$,仅为受压极限应变的 $\frac{1}{15} \sim \frac{1}{20}$,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)表示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 $\widehat{OA}$ 凹向 ϵ 轴,而卸荷曲线 $\widehat{AB}$ 则凸向 ϵ 轴,当荷载全部卸完一瞬间,卸荷曲线 $\widehat{AB}$ 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。如图 1-5b)表示混凝土棱柱体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(如图 1-5b)中的 σ_1 或 σ_2)不超过 $0.5R_a$ 时,随着反复加、卸荷次数的增加,加荷曲线的曲率亦逐渐减小。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

原点的切线。当应力(如图 1-5b)中的 σ_3 超过 $0.5R_s$ 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愈大,试验达到疲劳所需的循环次数则愈少。

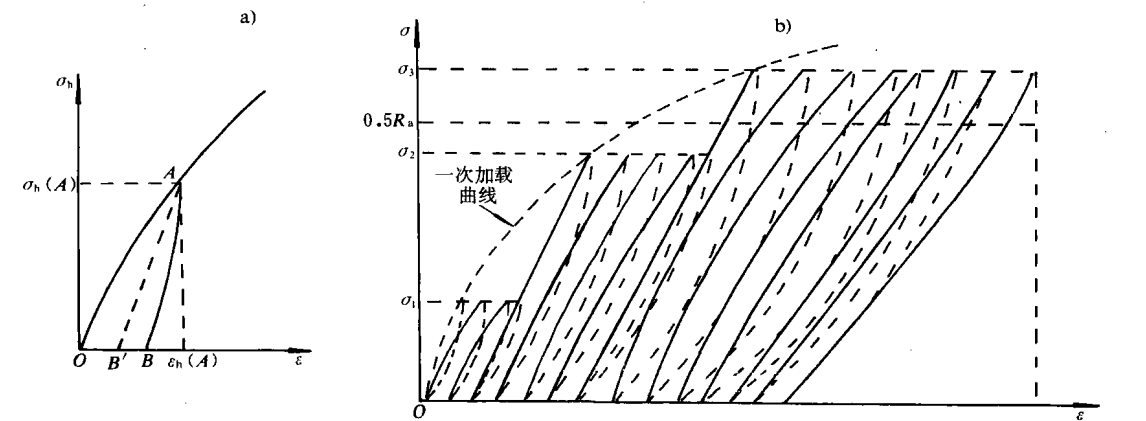


图 1-5 混凝土在重复荷载下的应力-应变曲线
a)一次加荷卸荷;b)多次加荷卸荷

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使用。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(R_F)。混凝土的疲劳强度约为其棱柱体强度的 50%,即 $R_F \approx 0.5R_s$ 。

3. 混凝土在长期荷载使用下的变形

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,我们发现混凝土的应变还在继续增加,这种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:

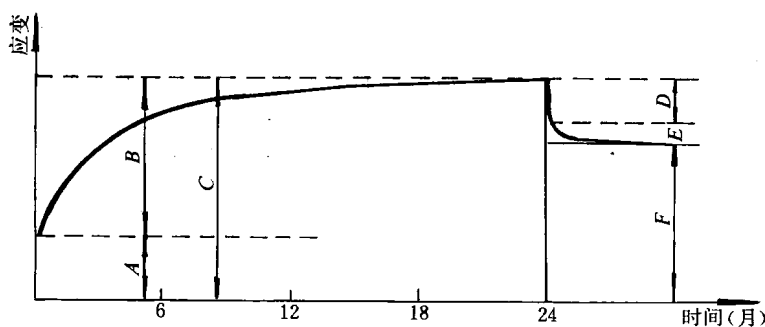


图 1-6 混凝土在长期不变荷载作用下应变随时间的增长图

(1)混凝土的徐变与混凝土的应力大小有着密切的关系。应力愈大,徐变也愈大。当应力较小($\sigma_h < 0.5R_s$)时,徐变变形与应力成正比,这种情况称为线性徐变。

(2)混凝土的徐变与时间参数有关。图 1-6 为混凝土试件的应变-时间关系曲线,图

中纵标A 为加荷过程中完成的变形,称为瞬变;纵标 B 为荷载不变情况下产生的徐变,纵标 C 为试件产生的总变形。试件在受荷后的前 3~4 个月,徐变的发展最快,可达徐变总值的 45~50%,当长期荷载引起的应力 $\sigma_h < (0.5 \sim 0.55)R_s$ 时,徐变的发展符合渐近线规律,徐变全部完成则需 4~5 年。当长期荷载卸去后,变形一部分恢复(如图 1-6 中的 D),另一部分(如图 1-6 中的 E)则在相当长的时间内逐渐恢复,这又称弹性后效。图 1-6 中的 F 为最后的残余变形。

(3)加荷龄期对徐变也有重要影响。混凝土加荷龄期愈短,即混凝土愈“年轻”,徐变愈大(图 1-7)。

(4) 水泥用量愈多、水灰比愈大,徐变愈大。

(5) 混凝土骨料愈坚硬、养护时相对湿度愈高,徐变愈小。

混凝土的徐变对混凝土和钢筋混凝土结构有很大的影响。在某些情况下,徐变有利于防止结构物的裂缝形成,同时还有利于结构或构件的内力重分布。但在预应力混凝土结构中,徐变则引起预应力损失。徐变变形还可能超过弹性变形,甚至达到弹性变形的 2~4 倍,这就要改变超静定结构的应力状态。所以,混凝土的徐变已为大家所重视。

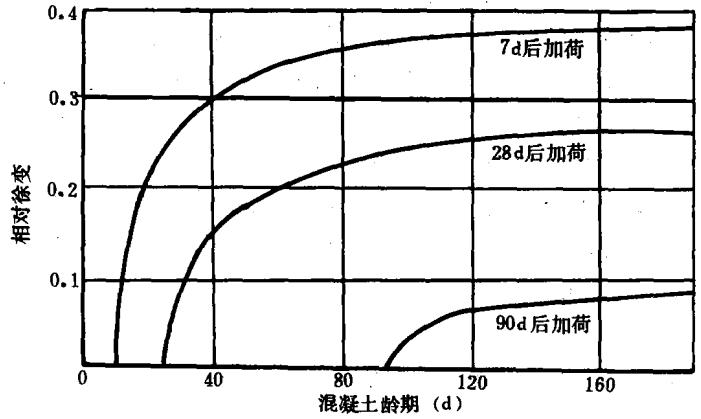


图 1-7 加荷时混凝土龄期与相对徐变的关系

4. 混凝土的弹性模量 E_h

在计算超静定结构的内力、钢筋混凝土结构的变形和预应力混凝土构件截面的预压应力时,需要应用到混凝土的弹性模量。

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,即为混凝土的变形模量。它不是常数,随混凝土的应力变化而变化,显然,混凝土的变形模量使用上很不方便。为了工程上的实用,人们近似地取用应力-应变曲线在 origin O 的切线斜率作为混凝土的弹性模量,并用 E_h 表示。而混凝土应力-应变曲线 origin O 的切线斜率的准确值不易从一次加荷的应力-应变曲线上求得。我国工程上所取用的混凝土受压弹性模量 E_h 数值是在重复加荷的应力-应变曲线上求得的。试验采用棱柱体试件,加荷产生的最大压应力选取 $\sigma_h = (0.4 \sim 0.5)R_h$,反复加荷卸荷 5~10 次后,混凝土受压应力-应变关系曲线基本上接近直线,并大致平行于相应的原点切线,则取该直线的斜率作为混凝土受压弹性模量 E_h 的数值。

根据试验资料,混凝土受压弹性模量的经验公式为

$$E_h = \frac{10^5}{2.2 + \frac{33}{R}} \quad (1-4)$$

式中: R ——混凝土的立方强度(MPa)。

试验结果表明,混凝土的受拉弹性模量与受压弹性模量十分相近,其比值平均为 0.995,实用时可取受拉弹性模量等于受压弹性模量。

混凝土弹性模量 E_h 按表 1-2 取用。

混凝土的弹性模量(MPa)

表 1-2

混凝土标号	15	20	25	30	40	50	60
弹性模量 E_h	2.3×10^4	2.6×10^4	2.85×10^4	3.0×10^4	3.3×10^4	3.5×10^4	3.65×10^4

混凝土受剪弹性模量 G_h 可由弹性理论求得:

$$G_h = \frac{E_h}{2(1+\mu)} \quad (1-5)$$

式中: μ ——混凝土的横向变形系数(即泊松比),根据试验资料 $\mu = 0.08 \sim 0.18$,计算时可取 $\mu = \frac{1}{6}$,因此可求得 $G_h = 0.425E_h$,取用 $G_h = 0.43E_h$ 。

(二)混凝土的体积变形

混凝土的收缩与膨胀属于混凝土的体积变形。

混凝土在空气中结硬时体积减小的现象称为混凝土的收缩。产生收缩的原因主要是混凝土在凝结硬化过程中的化学反应所产生的“凝缩”和混凝土自由水分的蒸发所产生的“干缩”两部分所引起的混凝土体积变化。

混凝土的收缩与许多因素有关。混凝土中的水泥用量愈多、水泥标号愈高、水灰比愈大，混凝土的收缩就愈大；混凝土中的骨料质量愈好、浇捣混凝土愈密实、在养生结硬过程中周围湿度愈高，混凝土收缩就愈小。

实践证明，混凝土从开始凝结起就产生收缩，有时它可延续一二十年，一般在最初半年内收缩最大，可完成全部收缩量的 80%~90%。

混凝土的收缩对钢筋混凝土结构会产生有害影响，常造成收缩裂缝。特别是一些长度大但截面尺寸小的构件或薄壁结构，如果在制作和养护时不采取预防措施，严重的会在交付使用前就因收缩裂缝而破坏。为此，在施工时应控制混凝土材料的水灰比和水泥用量等各项指标并加强养护。必要时应设置变形缝和防收缩钢筋，以防止和限制因混凝土收缩而引起的裂缝开展。

混凝土在水中结硬时，体积则膨胀。膨胀值一般比收缩值小得多，且常起有利作用，因此在计算中不予考虑。

第二节 钢 筋

一、钢筋的种类

钢筋是钢筋混凝土结构中的又一重要组成部分。工程中所用钢筋按其外形可分为光面圆钢筋、变形钢筋(多为螺旋纹与人字纹)(见图 1-8)、钢丝及钢绞线；按其所用钢料品种可分为

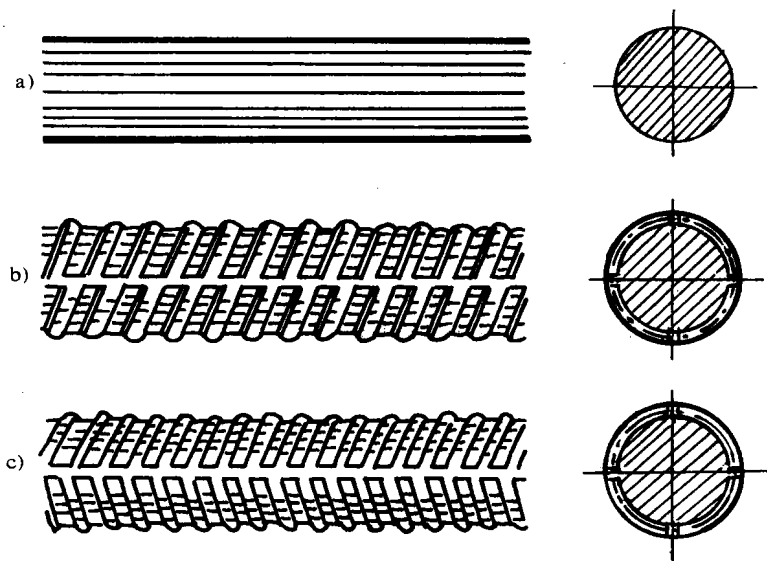


图 1-8 钢筋的形状

a)光面圆钢筋;b)螺旋形螺纹钢筋;c)人字形螺纹钢筋