

交通职业教育教学指导委员会推荐教材
高职高专院校道路桥梁工程技术专业教学用书

高等职业教育规划教材

工 程 结 构

Gongcheng Jiegou

主编 白淑毅

主审 杨 平

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是交通职业教育教学指导委员会推荐教材,由路桥工程学科委员会组织编写。书中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及方法,内容包括如何合理选择构件截面尺寸及配筋,构件承载力、稳定性、刚度和裂缝计算等。书中内容紧密结合最新规范,并编入较多的计算示例和设计计算图表,每章后附有复习思考题和练习题。

本书是高职高专院校道路桥梁工程技术专业教学用书,也可供相关专业教学使用,或作为有关专业继续教育及职业培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程结构/白淑毅主编. —北京:人民交通出版社,
2005.8
ISBN 7-114-05746-6

I.工... II.白... III.土木工程-工程结构
IV.TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第101323号

书 名:工程结构

著 作 者:白淑毅

责任编辑:袁 方

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:13

字 数:276千

版 次:2005年10月第1版

印 次:2005年10月第1次印刷

书 号:ISBN 7-114-05746-6

印 数:0001-5000册

定 价:22.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

绪论	1
第一章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料的物理力学性能	4
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念及特点	4
第二节 混凝土	5
第三节 钢筋	10
第四节 钢筋与混凝土的特性	16
复习思考题	17
第二章 钢筋混凝土结构设计基本原理	18
第一节 结构概述	18
第二节 极限状态法设计的基本概念	19
第三节 承载力极限状态设计原则	22
第四节 正常使用极限状态设计原则	25
复习思考题	27
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	28
第一节 钢筋混凝土受弯构件的构造要求	28
第二节 钢筋混凝土梁正截面破坏特征	32
第三节 钢筋混凝土受弯构件承载力极限状态计算的一般问题	35
第四节 单筋矩形截面受弯构件承载力计算	37
第五节 双筋矩形截面受弯构件承载力计算	41
第六节 T形截面受弯构件承载力计算	45
复习思考题	51
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	52
第一节 受弯构件斜截面的受力特点及破坏形态	52
第二节 受弯构件斜截面抗剪承载力计算	55
第三节 保证斜截面抗弯承载力的构造要求	59
第四节 全梁承载能力校核	61
第五节 计算示例	62
复习思考题	73
第五章 钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算	74
第一节 换算截面	74
第二节 受弯构件在施工阶段的应力计算	79

复习思考题	85
第六章 钢筋混凝土受弯构件变形和裂缝计算	86
第一节 受弯构件的变形(挠度)计算	86
第二节 受弯构件的裂缝宽度计算	90
复习思考题	93
第七章 受压构件承载力计算	94
第一节 概述	94
第二节 轴心受压构件正截面承载力计算	94
第三节 偏心受压构件承载力计算	101
复习思考题	121
第八章 预应力混凝土结构的基本概念及其材料	124
第一节 概述	124
第二节 预加应力的方法与设备	126
第三节 预应力混凝土结构的材料	131
复习思考题	132
第九章 预应力混凝土受弯构件的设计与计算	134
第一节 概述	134
第二节 预应力的计算与预应力损失的估算	136
第三节 预应力混凝土受弯构件的应力计算	143
第四节 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	147
第五节 端部锚固区计算	151
第六节 变形计算	154
第七节 预应力混凝土受弯构件设计与计算示例	156
复习思考题	167
第十章 其他预应力混凝土结构简介	168
第一节 部分预应力混凝土结构	168
第二节 无粘结预应力混凝土构件	170
第三节 双预应力混凝土梁	171
复习思考题	173
第十一章 砖、石及混凝土结构的基本概念与材料	174
第一节 概述	174
第二节 砖、石及混凝土结构的材料	175
第三节 砌体的强度与变形	178
复习思考题	184
第十二章 砖、石及混凝土构件的承载力计算	186
第一节 砖、石及混凝土结构的设计原则	186
第二节 轴心受压构件正截面承载力计算	187
第三节 偏心受压构件正截面承载力计算	189

第四节 受弯、受剪和局部承压构件的承载力计算 193

复习思考题 196

参考文献 197

绪 论

教学要求

1. 结合工程实际和所学过的课程,阐明本课程的性质、任务以及与其他课程的关系;
2. 结合实际详细介绍结构的概念、组成和基本构件的分类;
3. 结合实际阐述各种材料结构的特点及使用范围。

一、本课程的性质、任务以及与其他课程的关系

《工程结构》主要研究钢筋混凝土、预应力混凝土、砖石及混凝土(通称圬工)结构的构件设计原理,其主要内容包括如何合理选择构件截面尺寸及其联结方式,并根据承受荷载的情况验算构件的承载力、稳定性、刚度和裂缝等问题,它是学习桥梁工程和其他人工构造物设计的基础。本课程是介于基础课和专业课之间的技术基础课。

桥梁、隧道、涵洞、挡土墙等都是公路及城市道路工程中常见的构造物,它们不同程度地受到各种荷载及其他作用,例如桥梁结构承受车辆、人群、土压力和结构自重等荷载以及地震、基础沉降和混凝土收缩徐变等作用。通常我们把桥梁或道路构造物中承受荷载和传递荷载的各个部件统称为结构。例如桥梁结构由板、横梁、桥墩(台)、拱、索等基本构件所组成。《工程结构》课程就是以这些基本构件为主要研究对象的一门学科。

构件的形式虽然多种多样,但根据其受力与变形的特点可分为受弯构件(梁和板)、受压构件、受拉构件、受扭构件等基本构件。在实际工程中,有些构件的受力和变形比较简单,但有些构件的受力和变形则比较复杂,有可能是几种受力状态的组合。本教材重点介绍受弯构件和受压构件。

在外荷载作用下,构件有可能由于强度不足而破坏或变形过大而不能正常使用。因而,在设计基本构件时,要求构件本身必须具有一定的抵抗变形的能力,即“承载能力”。构件承载能力的大小与构件的材料性质、几何形状、截面尺寸、受力特点、工作条件、构造特点及施工质量等因素有关。在一定条件下,如果构件的尺寸过小,则结构将有可能因产生过大的变形而不能正常使用,或因材料强度不足而导致结构物的破坏。反之,如果截面尺寸过大,则构件的承载能力又过分富裕,从而造成人力、物力上的过大耗费。为此,研究如何正确地处理荷载与承载能力之间的关系,是本课程的主要任务。

《工程结构》是一门重要的技术基础课。它是在学习《材料力学》、《道路建筑材料》等先

修课程的基础上,结合实际桥梁工程来研究结构构件设计的一门学科,并为学习《桥梁工程》课程奠定基础。本教材以2004年交通部颁布的公路桥涵设计系列规范——《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)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)(送审稿)为主要依据。由于新桥规采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法,故本教材在编写过程中均以按极限状态设计法为主,同时,适当地编入了按容许应力法设计的内容。

二、各种工程结构的特点及使用范围

由于各种工程结构采用建筑材料的性质不同,形成了不同的特点,从而决定了它们在实际工程中的使用范围。

1. 钢筋混凝土结构

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种物理力学性能不同的材料组成的。混凝土结硬后抗压强度很高,而抗拉强度极低,在破坏时表现出脆性。而钢材是一种抗拉和抗压强度都很高的材料,但其价格昂贵,且易于生锈。根据构件的受力情况,在混凝土中合理地配置适量的钢筋,可使构件的承载能力大大提高。

钢筋混凝土结构所用的混凝土材料中占比例较大的是砂、石材料,这便于就地取材,而且材料经济;混凝土强度是随龄期而增长的,钢筋受混凝土保护不致于生锈,与钢结构相比耐久性好,养护维修费用低;混凝土可模性较好,结构造型灵活多变,可以根据需要浇筑成各种形状,且形成的结构整体性强。因而,钢筋混凝土结构广泛用于桥梁、隧道、地下结构、房屋建筑、水利、港口等工程中。但是,由于混凝土材料的抗拉强度甚低(约是其抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$),因而正常使用条件下,其受拉区一般都存在裂缝,正是由于对裂缝宽度的限制,通常不能充分发挥高强度钢材和高强混凝土的作用,从而使结构的截面尺寸偏大,相应地自重也就较大。

2. 预应力混凝土结构

预应力混凝土结构是为了解决钢筋混凝土结构在使用阶段容易开裂的问题而发展起来的结构。该构件受载之前预先对混凝土受拉区施加适当的压应力,从而使其在使用荷载作用下,截面上不出现拉应力或只出现很小拉应力,从而延缓了裂缝的发生和发展,使构件全截面参加工作,这种结构称为预应力混凝土结构。

预应力混凝土结构由于使用高强度钢筋和高强度混凝土,因而可显著减小构件截面尺寸,节省材料,减轻构件自重,因而使预应力混凝土构件比钢筋混凝土构件更轻巧,尤其适合于建造恒载占比重较大的大跨径桥梁;预应力混凝土结构由于在使用阶段不出现拉应力,在腐蚀性环境下可保护钢筋免受侵蚀,因此可用于海洋环境和有防渗透要求的结构;预应力技术可作为装配式施工的一种可靠手段,能很好地将各部件结合成整体,从而形成了悬臂浇筑和悬臂拼装等无支架施工方法。正因为有这些优点,近年来预应力混凝土结构在国内外都得到了迅速发展,并成为桥梁结构中应用最为广泛的结构之一。

必须指出,尽管预应力混凝土结构有诸多优点,由于该结构高强度材料的单价也高,施工工艺要求高,需要比较专业的队伍实施,且要求有较为完善的现场质量监督和检查制度。因此,不是在任何场合都可以用预应力混凝土结构来代替普通钢筋混凝土结构,而是两者各有其合理的适用范围。

3. 砌体结构

砌体结构是人类社会使用最早的结构。它是用胶结材料将砖、天然石料等块材按一定规则砌筑而成的整体结构,其特点是材料经济、易于就地取材。当块材采用天然石料时,则具有良好的耐久性。但是砌体结构的自重一般都较大,施工中机械化程度较低,工期较长。在公路与桥梁工程中,砌体结构多于中小跨径的拱桥、桥墩(台)、挡土墙、涵洞和道路护坡等工程中。

三、课程特点和学习方法

1. 课程的特点

与其他基础课相比,本课程主要有以下几个特点:

1) 半理论、半经验性

《工程结构》中的计算公式与《材料力学》等基础课中的公式有所不同,《材料力学》所涉及的材料都是理想的弹性材料,而《工程结构》中的材料是非均质、非弹性的钢筋混凝土材料,其计算公式是根据理论分析及试验研究得到的半理论、半经验公式,有些则是工程经验的总结。因此在学习和运用这些公式时,要正确理解公式的本质,特别注意公式的适用范围及限制条件。

2) 设计的多方案性

在数学和力学等基础学科中,问题的答案一般是惟一的。而结构设计则是要综合考虑总体布置、结构形式、材料选择和构件选型等多个方面,是一个多因素的综合性问题,应遵循安全、经济、适用、美观和有利环保的原则。同一构件在给定荷载作用下,可以采用不同的截面形式,选择不同的截面尺寸和配筋方式等,进而可得到不同的设计结果。合理的设计往往要经过多方案的技术经济比较,从施工、造价、使用、维护和环保等方面综合考虑。事实上,不同的设计理念造就了不同的设计结果。

2. 学习方法

学习时要注意以下几点:

1) 重视构造要求

结构设计包括结构计算及构造设计两个方面,结构计算是对结构进行假定简化的基础上进行的,因而计算结果与实际情况仍有一定差距;而构造要求是构件受力性能的保证措施,是长期的科学实验和工程实践的总结。因此,一定要重视构造细节的设计,理解构造原理,懂得计算和构造同等重要。

2) 重视实践和规范应用

《工程结构》课程是一门理论性和实践性都较强的课程,学习时一方面应重视基础知识及理论学习,另一方面还应针对性地到预制厂及施工现场参观学习,增强感性认识,积累工程经验。此外,在学习本课程中要认识规范、学会应用设计规范。设计规范是相关领域进行系统的科学研究和长期工程经验的总结,有相对的科学性,它是工程技术人员进行设计时应该或必须遵守的规程。我国交通部颁布的最新设计规范主要有:《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)(以下简称《通用规范》)、《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》)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2004)(以下简称《圬工规范》)。

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

第一章

钢筋混凝土结构的基本概念及材料的物理力学性能

教学要求

1. 结合实际详细介绍钢筋混凝土结构的基本概念及特点;
2. 阐述混凝土及钢筋的物理力学性能及主要强度指标,理解混凝土及钢筋在工程实际当中的应用;
3. 论述钢筋与混凝土之间的粘结及相互影响。

• 第一节 钢筋混凝土结构的基本概念及特点 •

一、钢筋混凝土结构的基本概念

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

混凝土是一种典型的脆性材料,其抗压强度很高,但抗拉强度很低(约为抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$)。以素混凝土梁为例,当它承受两个对称的集中力时,梁的上部受压,下部受拉。取跨中纯弯曲段为研究对象,随着荷载的增加,当荷载达到某一数值 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,即使荷载不增加,竖向弯曲裂缝也会急速向上发展,导致梁骤然断裂。这种破坏是突然的,也就是说,当荷载达到 P 的瞬间,梁立即发生破坏。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荷载作用时,荷载略大于 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将可承担几乎全部的拉力。这时,钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样立即断裂,而能继续承受荷载作用直至受拉钢筋的应力达到屈服强度,继而受压区的混凝土也被压碎,梁才破坏。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。

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,可以充分利用钢筋和混凝土

土各自的材料特点,把它们有机地结合在一起共同工作,从而提高构件的承载能力,改善构件的受力性能。

钢筋和混凝土这两种不同性质的材料之所以能结合在一起共同工作,主要是因为:

- (1) 混凝土和钢筋之间有足够的粘结力,使两者结合成整体共同受力。
- (2) 混凝土和钢筋的温度线膨胀系数大致相同,不会因温度变化而破坏粘结。
- (3) 混凝土包裹在钢筋外围,可以防止钢筋的锈蚀,从而具有足够的耐久性。

二、钢筋混凝土结构的特点

(1) 在钢筋混凝土结构中,混凝土的强度是随时间不断增长的,同时,钢筋被混凝土所包裹而不易锈蚀,所以,钢筋混凝土结构的耐久性 is 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很小,可用于对变形要求较高的结构物中。

(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。

(4) 钢筋混凝土结构抗裂性能较差,在正常使用时往往是带裂缝工作的。

(5) 钢筋混凝土结构的截面尺寸较大,自重也较大。

(6) 钢筋混凝土结构施工受气候条件影响较大,且施工中需耗用较多的模板。

• 第二节 混 凝 土 •

一、混凝土强度

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。

混凝土强度是指混凝土材料达到破坏或开裂极限状态时所能承受的应力。混凝土的强度除受材料的组成、养护条件及龄期等因素影响外,还与受力状态有关。

1. 混凝土的抗压强度

1) 立方体抗压强度

我国规范习惯于用立方体抗压强度作为混凝土强度的基本指标。新修订的《桥规》(JTG D62—2004)规定的立方体抗压强度标准值系指采用按标准方法制作、养护 28d 龄期的边长为 150mm 立方体试件,以标准试验方法(试件支承面不涂油脂)测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 MPa 计),记为 $f_{cu,k}$,同时用此值来表示混凝土的强度等级,并冠以 C 表示,如 C30 表示 30 级混凝土,其抗压强度标准值为 30MPa。

按照立方体抗压强度的大小将混凝土强度划分为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80 共 14 个级别。

实际工程中如采用边长 200mm 或 100mm 的立方体试块,测得的立方体抗压强度分别乘以换算系数 1.05 和 0.95。

公路桥涵受力构件的混凝土强度等级的选择应按下列规定采用:

- (1) 钢筋混凝土构件不应低于 C20, 当采用 HRB400、KL400 级钢筋配筋时, 不应低于 C25。
- (2) 预应力混凝土构件不应低于 C40。

2) 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 ($h/b \geq 3$), 可摆脱端部摩阻力的影响, 所测强度趋于稳定。我国采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 450\text{mm}$ 的棱柱体作为混凝土的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轴心抗压 (或棱柱体抗压) 强度 (以 MPa 计), 记为 f_c 。

2. 混凝土抗拉强度

混凝土抗拉强度是混凝土的基本力学特征之一, 其值约为立方体抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$ 。混凝土抗拉强度的测试方法各国不尽相同, 我国较多采用的测试方法是用浇筑成型的 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的柱体试件, 通过预埋在试件轴线两端的钢筋, 对试件施加拉力, 试件破坏时的平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度 f_t (图 1-1)。

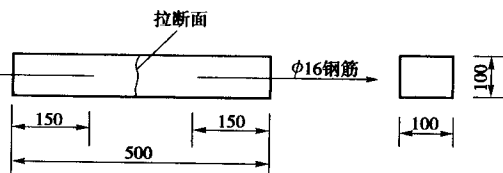


图 1-1 混凝土抗拉实验 (尺寸单位: mm)

3. 混凝土强度标准值与设计值

考虑到材料实际强度有时大、有时小的这种离散性, 及生产过程中某些不可统计因素的影响, 规定出材料的标准强度和结构设计计算所取的材料的设计强度。

混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 、轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应按表 1-1 采用。

混凝土强度标准值 (MPa)

表 1-1

强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45
f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6
f_{tk}	1.27	1.54	1.8	2.01	2.20	2.40	2.51
强度等级 强度种类	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

混凝土轴心抗压强度设计值 f_{cd} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 1-2 采用。

混凝土强度设计值 (MPa)

表 1-2

强度等级 强度种类	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45
f_{cd}	6.9	9.2	11.5	13.8	16.1	18.4	20.5
f_{td}	0.88	1.06	1.23	1.39	1.52	1.65	1.74

续上表

强度等级 强度种类	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{cd}	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
f_{td}	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14

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。

二、混凝土的变形性能

混凝土的变形可分为两类:一类是荷载作用下产生的受力变形,其数值和变化规律与加载方式及荷载作用持续时间有关,包括单次短期加载、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. 混凝土的受力变形

1) 混凝土在一次短期加载时的应力-应变曲线

从试验分析得知(图1-2):

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;

当应力继续增大时,应力-应变曲线就逐渐向下弯曲,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;

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称为混凝土轴心抗压强度,相应的应变为 ϵ_0 ,一般为0.002左右。

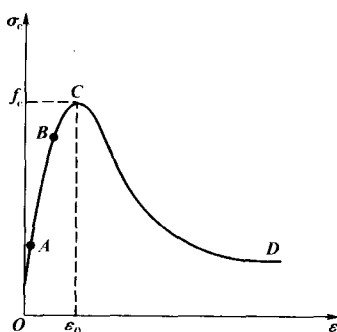


图1-2 混凝土一次短期荷载作用下应力-应变曲线

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-应变曲线中的曲线段OABCD下降段曲线CD无一定规律,这种突然性破坏是由于试验机的刚度不足所导致的,因为试验机在加载过程中产生变形,试件受到试验机的冲击而急速破坏;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,防试验机的回弹对试件的冲击造成的突然破坏,达到最大应力后,随试件变形的增大,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1-2中的曲线段OABCD;曲线中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,极限压应变越大,表示塑性变形能力大,也就是延性越好。

混凝土受压时应力-应变曲线的形态与混凝土强度等级和加载速度等因素有关,混凝土强度等级越高,曲线下降段越不明显;加载速度越快,曲线的曲率越小。

2) 混凝土在重复荷载作用下的应力-应变曲线

混凝土在多次重复荷载作用下,其应力、应变性质与短期一次加载情况有显著不同。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。可恢复的部分称之为弹

性应变 ε_e ，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（图 1-3a）。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。

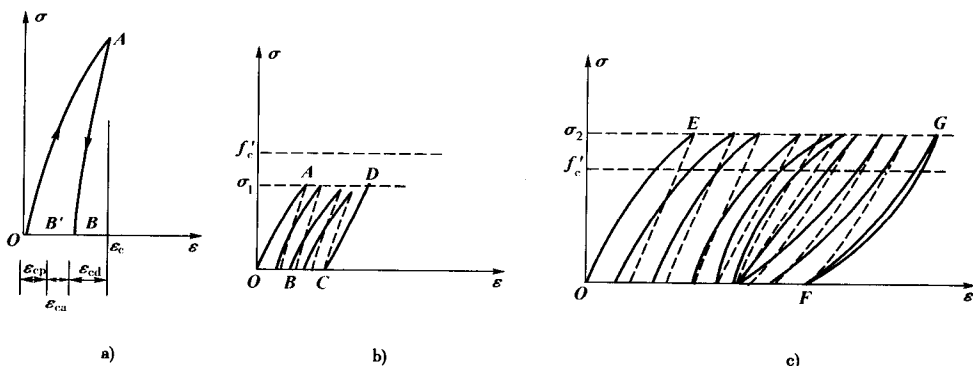


图 1-3 混凝土在重复荷载下的应力-应变曲线

混凝土在多次重复荷载作用下的应力-应变曲线示于图 1-3b)。当加载应力相对较小（一般认为 σ_1 或 $\sigma_2 < 0.5f_c$ ）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，加载的卸载应力-应变曲线环就越来越闭合，并接近一直线，混凝土呈现弹性工作性质。

如果加载应力超过某一个限值（如图中 $\sigma_3 \geq 0.5f_c$ ，但仍小于 f_c ）时，经过几次重复加载卸载，应力-应变曲线就变成直线，再经过多次重复加载卸载后，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 万次以上反复荷载并不得产生疲劳破坏，这一强度称为混凝土的疲劳强度 f'_c ，一般取 $f'_c \approx 0.5f_c$ 。

3) 混凝土在荷载长期作用下的变形性能

在不变的应力长期持续作用下，混凝土的变形随时间而不断增长的现象，称为混凝土的徐变（图 1-4）。混凝土的徐变对结构构件的变形、承载力以及预应力钢筋的应力损失都将产生重要的影响。

图 1-4 所示为铁道部科学院所做的混凝土棱柱体试件徐变的试验曲线，试件加载至应力达 $0.5f_c$ 时，保持应力不变。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 ε_{el} 和荷载持续作用下逐渐完成的徐变应变 ε_{cr} 。徐变开始增长较快，以后逐渐减慢，经过长时间后基本趋于稳定。通常条件在前 4 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。

由分析可知，影响徐变的因素有以下几个方面：

- (1) 混凝土的徐变与混凝土的应力有着密切的关系，应力越大，徐变也越大。
- (2) 混凝土的徐变与时间参数有关。
- (3) 混凝土加荷龄期愈短，徐变越大。
- (4) 水泥用量越多，徐变越大。

(5) 集料越坚硬、养护相对湿度越高,徐变越小。

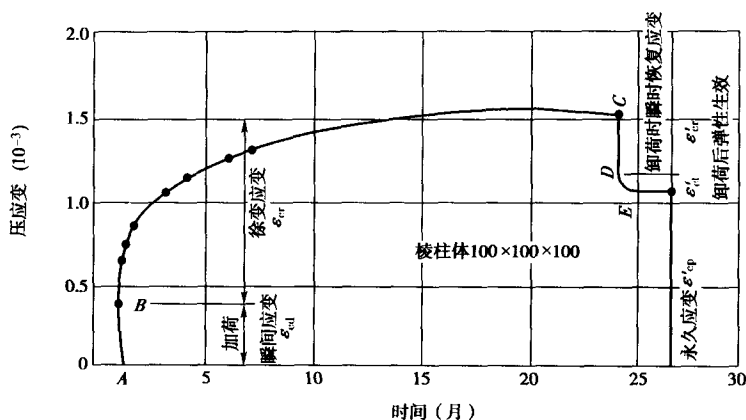


图 1-4 混凝土徐变与时间的关系

4) 混凝土的变形模量

混凝土的变形模量有三种表示方法(图 1-5):

(1) 原点弹性模量,简称弹性模量

混凝土的弹性模量,相当于应力-应变图上过原点所作的切线的斜率(正切值),其符号为 E_c 。

(2) 割线模量

混凝土的割线模量相当于应力-应变图上过原点至任意应力 σ 相对应的曲线点处割线的斜率(正切值),其符号为 E'_c 。

(3) 切线模量

混凝土的切线模量相当于应力-应变曲线上某一处所作切线的斜率(正切值),即应力增量与应变增量的比值,其符号为 E''_c 。

我国工程上所取用的变形模量为弹性模量,混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_c 应按表 1-3 采用。

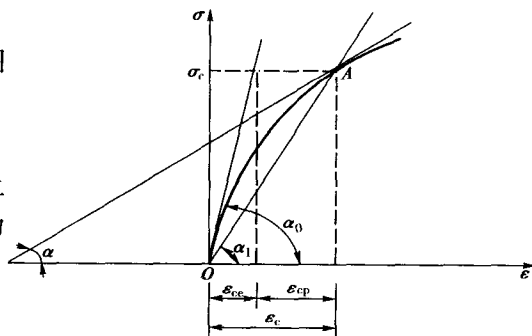


图 1-5 混凝土的变形模量

混凝土的弹性模量 (MPa)

表 1-3

混凝土强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45
E_c	2.20×10^4	2.55×10^4	2.80×10^4	3.00×10^4	3.15×10^4	3.25×10^4	3.35×10^4
混凝土强度等级	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
E_c	3.45×10^4	3.55×10^4	3.60×10^4	3.65×10^4	3.70×10^4	3.75×10^4	3.80×10^4

注:①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 E_c 的值应乘以折减系数 0.95;

②混凝土的剪变模量 G_c 可按本表数值的 0.4 倍采用,混凝土的泊松比 ν_c 可采用 0.2。

2. 混凝土的收缩和膨胀

混凝土在空气中的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。一般来说,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。

通过实验可知,在最初半年内收缩量较大,以后逐渐减慢。蒸气养护时,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 $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ 。

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,甚至导致混凝土产生收缩裂缝。在钢筋混凝土构件中,钢筋因受到混凝土收缩影响产生压应力,而混凝土则产生拉应力,如果构件截面配筋过多,构件就可能产生收缩裂缝。在预应力混凝土构件中,混凝土收缩将引起预应力损失。收缩对某些钢筋混凝土超静定结构也将产生不利影响。

• 第三节 钢 筋 •

一、钢筋的种类

(1)钢筋混凝土结构所采用的钢筋按其化学成分,可分为碳素钢及普通低合金钢两大类。

(2)按钢筋的加工方法,钢筋可分为热轧钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋、热处理钢筋和钢丝五大类。《桥规》推荐,用于钢筋混凝土桥梁结构的钢筋主要选取热轧钢筋、碳素钢丝和精轧螺纹钢三大类。

①热轧钢筋是将钢材在高于再结晶温度状态下,用机械方法轧制成不同外形的钢筋。热轧钢筋按外形可分为光圆钢筋和带肋钢筋两大类。

光圆钢筋的强度等级代号为 R235,相当于原标准的 I 级钢筋。R235 钢筋为低碳钢,其强度较低,但塑性和可焊性能较好,广泛用于钢筋混凝土结构中。带肋钢筋按强度分为 HRB335、HRB400、KL400。HRB335 钢筋相当于原标准的 II 级钢筋,厂家生产的公称直径范围为 6~50mm,推荐直径一般不超过 32mm。HRB335 钢筋为普通低合金钢,强度、塑性和可焊性等综合性能都较好,钢筋表面带肋与混凝土粘结性能也较好。HRB400 和 KL400 钢筋相当于原标准的 III 级钢筋。其中 HRB400 为按国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499—1998)生产的热轧钢筋,KL400 为按国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB 13014—1991)生产的余热处理钢筋。

②碳素钢丝又称高强钢丝。碳素钢丝按其外形分为光面钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝等三种类型。

光面钢丝一般以多根钢丝组成钢丝束或由若干根钢丝扭结成钢绞线的形式应用。桥梁工程中常用的钢绞线有:1×2(二股)、1×3(三股)、1×7(七股)。钢绞线截面集中,盘卷运输方便,与混凝土粘结性能良好,现场配束方便,是预应力混凝土桥梁广泛采用的钢筋。螺旋肋钢丝和刻痕钢丝,与混凝土之间的粘结性能好,适用于先张法预应力混凝土结构。

③精轧螺纹钢是按企业标准(Q/YB3125—1996)和(Q/ASB 116—1997)生产的高强度钢筋,主要用于中小跨径的预应力混凝土桥梁构件。

④冷轧带肋钢筋和冷轧扭钢筋是近年来在建筑工程中应用的新的钢筋。冷轧带肋钢筋是

用热轧圆盘条经冷轧或冷拔减小直径后,冷扎成表面有肋钢筋。冷轧扭钢筋是用低碳钢轧圆盘条经专用钢筋冷轧扭机调直、冷轧并冷扭一次成型,具有规定截面形状和节距的连续螺旋状钢筋。

(3) 根据《桥规》可知,公路混凝土桥涵的钢筋应按下列规定采用:

①钢筋混凝土及预应力混凝土构件中的普通钢筋宜选用热轧 R235、HRB335、HRB400 和 KL400 钢筋,预应力混凝土构件中的箍筋应选用其中的带肋钢筋;按构造要求配置的钢筋网可采用冷轧带肋钢筋。

②预应力混凝土构件中的预应力钢筋应选用钢绞线、钢丝;中、小型构件或竖、横向预应力钢筋,也可选择精轧螺纹钢。

二、钢筋的强度和变形

1. 钢筋的应力-应变曲线

根据钢筋在单向受拉时的应力-应变曲线特点,可将钢筋分为有明显屈服点和无明显屈服点两类。

1) 有明显屈服点的钢筋应力-应变曲线

一般热轧钢筋属于有明显屈服点的钢筋,工程上习惯称为软钢,其拉伸试验的典型应力-应变曲线如图 1-6a) 所示。

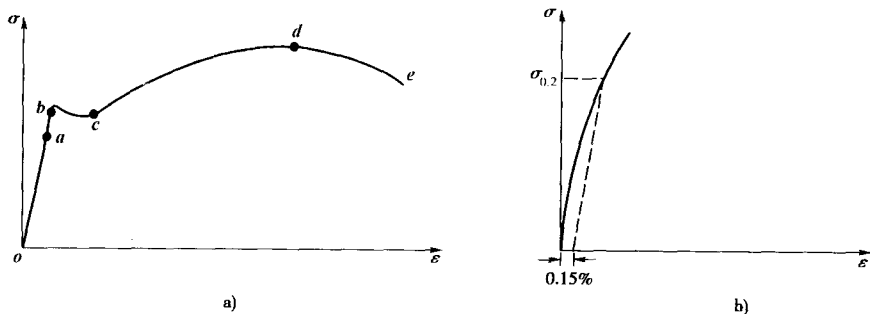


图 1-6 钢筋的应力-应变曲线

从图 1-6a) 可以看出,软钢从加载到拉断,共经历四个阶段。自开始加载至应力达到 a 点以前,应力-应变呈线性关系, a 点应力称为比例极限, oa 段称为弹性工作阶段;过 a 点后,应变的增长速度略快于应力,应力达到 b 点后,钢筋进入屈服阶段,产生很大的塑性变形,在应力-应变图上呈现一水平段 bc ,称为屈服台阶段或流幅, b 点应力称为屈服强度或流限;过 c 点后,钢筋应力开始重新增长,应力-应变关系表现为上升的曲线,曲线最高点 d , d 点对应的应力为钢筋的抗拉极限强度, cd 段称为强化阶段。曲线通过 d 点后钢筋截面将突然急剧缩小,发生局部颈缩现象,应力-应变关系呈下降曲线,应变继续增加,直到 e 点钢筋断裂, de 段称为破坏阶段。

有明显屈服点的钢筋有两个强度指标:一是 b 点所对应的屈服强度,另一个是 d 点对应的极限强度。工程上取屈服强度作为钢筋强度取值的依据,因为钢筋屈服后产生了较大的塑性变形,将使构件变形和裂缝宽度大大增加,以至无法使用。钢筋的极限强度是钢筋的实际破坏

强度,不能作为设计中钢筋强度取值的依据。

2) 无明显屈服点的钢筋应力-应变曲线

各种类型的钢丝属于无明显屈服点的钢筋,工程上习惯称为硬钢。硬钢拉伸试验时的典型应力-应变曲线示于图 1-6b)。

从图 1-6b) 可以看出,无明显屈服点的钢筋(硬钢)只有一个强度指标,即极限抗拉强度。在工程设计中,极限抗拉强度不能作为钢筋强度取值的依据,一般取残余应变为 0.2% 所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 屈服点钢筋的强度限值,通常称为条件屈服强度。

2. 钢筋的塑性性能

钢筋除应具有足够的强度外,还应具有一定的塑性变形能力。钢筋的塑性性能通常用延伸率和冷弯性能两个指标来衡量。

钢筋延伸率是指钢筋试件上标距为 $10d$ 或 $5d$ (d 为钢筋试件直径) 范围内的极限伸长率,记为 δ_{10} 或 δ_5 ,钢筋的延伸率越大,表明钢筋的塑性越好。

冷弯是将直径为 d 的钢筋围绕某个规定直径 D (规定 D 为 $1d, 2d, 3d, 4d, 5d$) 的辊轴弯曲成一定的角度 (90° 或 80°), 后钢筋应无裂纹、鳞落或断裂现象(图 1-7)。

3. 钢筋的松弛现象

钢筋受力长度保持不变的情况下,应力随时间增长而降低的现象称为松弛(又称为徐舒)。预应力混凝土结构中,预应力钢筋张拉后长度基本保持不变,将产生松弛现象,从而引起预应力损失。

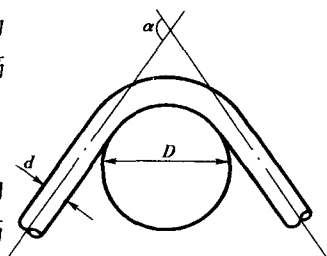


图 1-7 钢筋的冷弯

钢筋的松弛随时间增长而加大,总的趋势是初期发展较快,10 ~ 20d 完成大部分,1 ~ 2 个月基本完成。《桥规》给出的钢筋松弛损失中间值与终极值的比值见表 1-4。

钢筋的松弛与时间关系

表 1-4

时间(d)	2	10	20	30	40
比值	0.5	0.61	0.74	0.87	1.0

钢筋的松弛还与初始应力大小、温度和钢筋品种等因素有关。初始应力越大则松弛也越大。温度对松弛也有很大影响,应力松弛值随温度的升高而增加,同时这种影响还会长期存在。因此,对蒸气养生的预应力混凝土构件应考虑温度对钢筋松弛的影响。不同钢种的钢筋松弛值差异很大。低合金钢热轧钢筋的松弛值相对较小,热处理钢筋次之,高强钢丝和钢绞线的松弛值相对较大。目前我国生产的高强钢丝和钢绞线按其生产工艺不同分为 I 级松弛(普通松弛)和 II 级松弛(低松弛)两种类型。低松弛钢丝和钢绞线的松弛值,约为普通松弛值的 1/3。

4. 钢筋的冷加工

为了节省钢筋和扩大钢筋的应用范围,常对热轧钢筋进行冷拉、冷拔等机械冷加工。经冷加工后,钢筋的力学性能发生了很大的变化。

冷拉是在常温下用机械方法将具有明显屈服点的钢筋拉到超过屈服强度,即强化阶段中的某一个应力值,然后卸载至零。钢筋经冷拉后,屈服强度提高,但塑性降低,这种现象称为冷拉硬化。