

 高等学校教材

结构设计原理

JIEGOU SHEJI YUANLI

贾艳敏 高力 主编
陈彦江 主审



人民交通出版社

China Communications Press

高等学校教材

Jiegou Sheji Yuanli

结构设计原理

贾艳敏 高 力 主 编
陈彦江 主 审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书结合最新行业标准规范《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),叙述了钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计基本理论和方法。主要内容包括:钢筋混凝土材料的力学性能;以概率理论为基础的结构设计方法;受弯、受剪、受扭、受压、受冲切、局部承压等受力状态下结构的承载力计算;受弯构件裂缝宽度及变形验算,并附有一定数量的计算示例、思考题和习题。

本书突出受力性能分析,强调基本概念和原理,既可作为高等院校公路与城市道路专业、交通土建专业、桥梁与隧道专业的本科生教材,也可供公路和城市建设部门从事结构设计研究、施工和管理的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构设计原理/贾艳敏,高力主编. —北京:人民交通出版社, 2004.9
ISBN 7-114-05222-7

I. 结… II. ①贾… ②高… III. 桥梁结构—结构设计 IV.U443

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第086460号
高等学校教材

书 名: 结构设计原理

主 编: 贾艳敏 高 力

责任编辑: 赵瑞琴

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285656, 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: 北京明十三陵印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16

字 数: 394 千

版 次: 2004年8月第1版

印 次: 2004年8月第1版第1次印刷

书 号: ISBN7-114-05222-7

印 数: 0001—3000册

定 价: 28.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

本书以最新颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以后统一简称为《公桥规》)为主要依据,介绍了钢筋混凝土结构、全预应力混凝土结构和部分预应力混凝土结构的设计原理。

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,并于每章附有一定数量的例题、思考题和习题。

本书注重培养学生分析问题和解决问题的能力,适用于高等院校的道路与桥梁工程专业、桥梁与隧道工程专业的学生使用,也可供交通工程和土建工程等有关专业的师生选用。此外,还可以供从事桥梁工程和市政工程工作的技术人员参考使用。

本书由贾艳敏、高力主编,任晓强副主编。具体分工如下:贾艳敏(绪论、第二章、第三章、第六章、第十章、第十一章、第十二章、第十三章),高力(第一章、第七章、第八章、第九章),任晓强(第四章、第五章、第十四章、第十五章)。参加本书编写工作的还有刘秀、孙陆珍。本书由陈彦江主审。

由于编者水平有限,加之对2004年新的《公桥规》理解不深,教材中难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2004年7月

目 录

绪论	1
第一章 钢筋混凝土结构的力学性能	3
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念	3
第二节 钢筋的力学性能	5
第三节 混凝土的力学性能	7
第四节 钢筋与混凝土的粘结	12
思考题	15
第二章 钢筋混凝土结构的基本计算原则	16
第一节 极限状态设计的基本概念	16
第二节 作用效应组合	22
第三节 极限状态设计原则	25
第四节 材料强度的标准值与设计值	25
思考题	29
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	31
第一节 受弯构件的截面形式与构造	31
第二节 受弯构件的受力分析	38
第三节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	42
第四节 双筋矩形梁正截面承载力计算	48
第五节 T形截面承载力计算	51
思考题	59
习题	61
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	62
第一节 概述	62
第二节 受力分析	62
第三节 斜截面抗剪承载力计算	64
第四节 斜截面抗弯承载力计算	71
思考题	73
习题	74
第五章 钢筋混凝土梁承载能力校核与构造要求	75
第一节 全梁承载能力校核	75
第二节 构造要求	77
第三节 简支梁的斜截面设计与全梁承载力校核	78
第四节 装配式钢筋混凝土简支 T形梁主梁设计	83

思考题	84
习题	84
第六章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	85
第一节 轴心受压构件承载力计算	85
第二节 偏心受压构件的构造及受力特点	94
第三节 矩形截面偏心受压构件抗压承载力计算	101
第四节 T形和工字形截面偏心受压构件抗压承载力计算	111
第五节 圆形截面偏心受压构件承载力计算	115
思考题	117
习题	117
第七章 钢筋混凝土受扭及弯扭构件	119
第一节 纯扭转构件承载力	119
第二节 弯剪扭构件承载力	124
第三节 复杂截面受扭构件的设计特点	127
思考题	131
习题	131
第八章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	133
第一节 概述	133
第二节 轴心受拉构件的承载力计算	133
第三节 偏心受拉构件的承载力计算	134
思考题	138
习题	139
第九章 冲切与局部承压承载力验算	140
第一节 冲切承载力计算	140
第二节 局部承压破坏机理	147
第三节 混凝土局部承压强度提高系数	150
第四节 局部承压区的计算	151
思考题	154
习题	154
第十章 钢筋混凝土受弯构件的应力、裂缝与变形验算	155
第一节 概述	155
第二节 换算截面	156
第三节 受弯构件在施工阶段的应力计算	159
第四节 裂缝的特性分析	162
第五节 最大裂缝宽度验算	162
第六节 受弯构件的变形验算	165
思考题	169
第十一章 预应力混凝土的基本概念及其材料	170
第一节 预应力混凝土的基本原理	170
第二节 施加预应力的方法与设备	175

第三节	预应力混凝土结构的材料	187
思考题		192
第十二章	预应力混凝土受弯构件的应力损失	193
第一节	预应力混凝土梁各工作阶段的受力分析	193
第二节	预加力的计算与预应力损失的估算	195
思考题		210
第十三章	预应力混凝土受弯构件的承载能力计算	212
第一节	预应力混凝土受弯构件的承载能力计算	212
第二节	预应力混凝土受弯构件的正应力验算	218
第三节	预应力混凝土受弯构件混凝土的主压应力和主拉应力计算	224
第四节	使用阶段正截面抗裂验算	225
第五节	受弯构件挠度验算	227
思考题		230
第十四章	预应力混凝土简支梁设计	231
第一节	预应力混凝土受弯构件设计规定	231
第二节	预应力混凝土简支梁设计	237
思考题		239
第十五章	部分预应力混凝土受弯构件	240
第一节	概述	240
第二节	部分预应力混凝土结构的计算原理	243
思考题		245
参考文献		246

绪 论

桥梁结构是由桥面板、横梁、主梁、桥墩、桥台、拱圈等基本构件所组成。桥梁或道路人工构造物都要承受例如车辆荷载、人群荷载、风荷载以及桥跨结构各部分自重等各种力的作用。在建筑物中,承受荷载和传递荷载的各个部件的总和称为结构,因而结构是由若干单元按照一定的规则,通过正确的连接方式组成的能够承受并传递荷载和其他间接作用的骨架,这些单元就是工程结构的基本构件,如上面所提到的板、梁、拱圈等。

根据构件受力与变形的特点,可将构件归纳为受拉构件、受压构件、受弯构件和受扭构件等几种最基本的构件。在工程实际中,有些构件的受力和变形比较简单,但是另一些构件的受力和变形则比较复杂,可能是几种受力状态的组合。

对于各种构件,应该根据其使用功能、性质和将来发展的需要,遵循适用、安全、经济和美观的原则进行设计。构件和由若干构件所组成的结构,在正常使用情况下应该安全可靠,这就要求它们在使用荷载作用下具有足够的承载能力、刚度、稳定性和耐久性。承载能力要求是指在使用期限内,结构及各个构件(包括联结件)具有足够的安全储备;刚度要求是指在计算荷载作用下,结构及各个构件的变形在容许范围内;稳定性要求是指结构整体及各个组成构件在计算荷载作用下都处于稳定的平衡状态;耐久性是指结构和构件在设计使用年限内,不发生破坏或产生过大的裂缝而影响正常使用。此外,结构构件还应该满足制造、运输和安装过程中的强度、刚度和稳定性要求。

在设计基本构件时,要求构件本身必须具有一定的承载能力和抵抗变形等方面的能力。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、构造特点以及施工质量等因素有关。当其他条件已确定,如果构件的尺寸过小,则结构有可能会因为产生过大的变形而不能正常使用,或者因为承载能力不够而导致结构物的崩塌。反之,如果截面尺寸过大,则构件的承载能力又将过分剩余,从而造成人力、物力的过大耗费。

《结构设计原理》是一门结合桥梁工程中实际构件的工作特点来研究钢筋混凝土、预应力混凝土构件设计原理的技术基础课。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,并根据受力特点进行配筋设计和验算构件的承载能力、稳定性、刚度、裂缝等问题,即正确处理荷载与承载能力之间的关系。《结构设计原理》可以为今后学习桥梁工程和其他道路人工构造物的设计、计算奠定理论基础。

本课程在内容、研究方法等方面都和力学课程(材料力学、结构力学)有较大的差异,具体如下。

1. 材料性能的特殊性

本课程所研究的内容在性质上相当于钢筋混凝土的“材料力学”。它与材料力学有着某些共性,但同时又有很多来源于材料性能的特殊性。

材料力学研究的是由单一、匀质、连续、弹性材料制成的构件。本课程研究的主要是由钢筋和混凝土两种材料组成的构件,而且混凝土是非匀质、非连续、非弹性的材料。因此,材料力学公式可以直接应用的情况不是很多,但是通过几何、物理和平衡关系建立基本方程的途径是

相同的,只需在每一种关系的具体内容上考虑钢筋混凝土性能上的特点。

钢筋混凝土构件是由两种材料组成的复合材料构件,因此就存在着两种材料在数量上和强度上的匹配问题。如果钢筋和混凝土在截面面积上的比例和材料强度上的匹配超过了一定的界限,则会引起构件受力性能的改变,这是单一材料构件所没有的特点,而对于钢筋混凝土构件则既具有基本理论意义,又具有工程实际意义,这是学习本课程必须十分注意的问题。

由于混凝土材料力学性能的复杂性和离散性,目前还未建立起较为完善的强度和变形理论,有关混凝土的强度和变形规律,很大程度上依赖于实验给出的经验公式。因此,在本课程的学习过程中,运用计算公式时要注意其适用范围和先决条件。

2. 设计的综合性

本课程与力学课程不同。材料力学、结构力学等课程侧重于构件应力(或内力)和变形的计算,它们的习题答案往往是惟一的。而混凝土结构所要解决的不仅是承载能力和变形计算问题,更主要的是构件和结构的设计,包括材料选择、结构方案、构件类型和配筋构造等。结构设计是一个综合性的问题,在进行结构布置时,不仅要考虑结构受力的合理性,同时还要考虑使用要求、材料、造价、施工制造等方面的问题。因此,本课程的特点是设计的多方案性,答案常常不是惟一的,而且设计和计算工作通常也不是一次就可以获得成功的,要根据安全适用、经济合理、技术先进的原则,对各项指标进行全面地综合分析和比较。因此,在学习本课程时,要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。

为了保证设计质量,达到设计方法的统一,交通部颁布了《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《公桥规》)。规范是具有约束性和立法性的文件,是设计、校核、审批工程结构设计的依据。因此,在学习本课程的过程中,要学会运用规范,这是在力学课程中不曾遇到的新问题。

第一章 钢筋混凝土结构的力学性能

第一节 钢筋混凝土结构的基本概念

一、混凝土结构的一般概念

混凝土结构包括素混凝土结构(plain concrete structure)、钢筋混凝土结构(reinforced concrete structure)和预应力混凝土结构(prestressed concrete structure)等。素混凝土结构是指不配置任何钢材的混凝土结构;钢筋混凝土结构是指用普通钢筋作为配筋的普通混凝土结构;预应力混凝土结构是指在结构构件制作时,在其受拉部位上人为地预先施加压应力的混凝土结构。

混凝土是土木建筑工程中广泛应用的一种建筑材料。混凝土材料的抗压强度较高,而抗拉强度却很低(它的抗拉强度仅是其抗压强度的 $1/8 \sim 1/12$)。因此,素混凝土构件的应用范围非常有限,主要用于受压构件,如柱、墩、基础墙等。如果将它用做受弯构件,如图 1.1.1(a)所示的素混凝土梁,由于混凝土的抗拉能力很小,在相对较小的荷载下,受拉区就会开裂,导致梁的瞬间脆断破坏。梁的开裂荷载即为其破坏荷载 $P = 14\text{kN}$,这时受压区混凝土的抗压强度

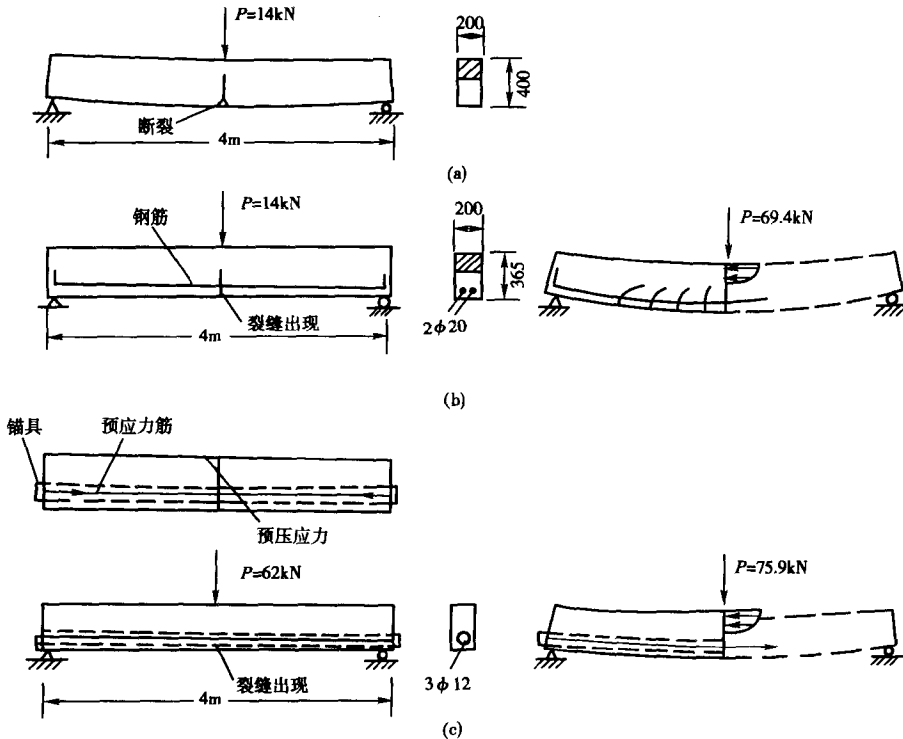


图 1.1.1 简支梁的受力图(尺寸单位: mm)

(a)素混凝土梁;(b)钢筋混凝土梁;(c)预应力混凝土梁

还远远没有充分利用。钢材的抗拉强度和抗压强度都很高,如果在梁的受拉区配置一定数量的钢筋,形成钢筋混凝土梁,可以使钢筋和混凝土这两种物理-力学性能不同的材料在共同工作中发挥各自的优点。如图 1.1.1(b)所示,当荷载 $P = 14\text{kN}$ 作用下,虽然受拉区混凝土还会开裂,但钢筋可以替代开裂的混凝土承受拉力,因而可继续加载,直到钢筋达到屈服后,梁才达到破坏荷载 $P = 69.4\text{kN}$ 。可见,钢筋混凝土梁的承载能力比素混凝土梁有很大提高。破坏时,钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度均得到了充分利用,虽然梁过早开裂的问题并没有解决,但却收到下列效果:

- (1)结构承载能力有很大提高;
- (2)结构的受力性能得到显著改善。

如果在混凝土梁受荷以前先在梁中建立起预压应力,就形成预应力混凝土梁,如图 1.1.1(c)所示。由于外荷载要先抵消预压应力才能使梁产生拉应力,因此预应力混凝土梁的开裂荷载($P = 62\text{kN}$)比钢筋混凝土有较大的提高,从而防止了梁的过早开裂。破坏时($P = 75.9\text{kN}$)与钢筋混凝土梁相似,钢筋和混凝土这两种材料的强度均得以充分利用。

二、钢筋混凝土的特点

钢筋(reinforcement)和混凝土(concrete)是两种性质不同的材料,它们之所以能有效地结合在一起共同工作,主要是由于:

(1)钢筋和混凝土之间有着可靠的粘结力,能相互牢固地结成整体,在外荷载作用下,钢筋与相邻混凝土能够协调变形,共同受力;

(2)钢筋与混凝土的温度线膨胀系数(linear expansion coefficient)相近[钢为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$],因此,当温度发生变化时,钢筋混凝土构件内只产生较小的温度应力,不致破坏钢筋和相邻混凝土之间的粘结力;

(3)钢筋被混凝土所包裹,从而防止了钢筋的锈蚀,保证了结构的耐久性(durability)。

钢筋混凝土结构除了能合理利用钢筋和混凝土两种材料的特性外,还有下述优点:

(1)合理地利用了钢筋和混凝土这两种材料的受力特点,可以形成具有较高承载能力的结构构件;

(2)由于混凝土的强度是随着时间的增长而增长,在正常养护下,混凝土 1 年龄期的强度约是 28d 强度的 1.5 倍,因而,钢筋混凝土结构的使用寿命可以很长,耐久性较好。相对于钢、木结构而言,几乎不需要经常性地维修和养护,耐火性较好;

(3)钢筋混凝土结构的构件种类较多,施工方法的适应性很强,既可以整体式现场浇筑,也可以预制装配,并且可以根据需要浇筑成各种形状的结构;

(4)现浇钢筋混凝土结构的整体性好,抗振性较好;

(5)混凝土中占比例较大的砂、石等材料,大多数可就地取材,节省运费,降低建筑成本。

钢筋混凝土结构也存在一些缺点:

(1)由于钢筋混凝土结构的自重大,所以当达到一定跨径时,其承受活荷载的能力就会显著降低;

(2)抗裂性差,如前所述,混凝土的抗拉强度非常低,因此,普通钢筋混凝土结构经常带裂缝工作,裂缝的存在影响结构的耐久性和美观;

(3)浇筑混凝土时需要模板(forms)支撑;

(4)户外施工受到季节条件限制;在雨天和冬季进行混凝土施工时,必须对混凝土浇筑、振

捣和养生等工艺采取相应的措施,这样才能确保施工质量。

钢筋混凝土结构虽然有缺点,但毕竟有其独特的优点,所以在桥梁工程、隧道工程、房屋建筑、路面工程等方面都得到了广泛应用。

第二节 钢筋的力学性能

钢筋混凝土结构使用的钢筋,不仅要强度高,而且要具有良好的塑性和可焊性,同时还要求与混凝土有较好的粘结性能。

一、钢材的分类

钢筋混凝土结构用的钢材,按直径粗细分钢筋和钢丝两类。凡是直径 $d \geq 6\text{mm}$ 者,称为钢筋;直径 $d < 6\text{mm}$ 者,称为钢丝。

钢筋根据生产工艺和加工条件分热轧钢筋、冷拉钢筋和热处理钢筋三种。将钢筋在高于再结晶温度状态下,用机械方法轧制成的不同外形的钢筋,称为热轧钢筋(hot rolled steel bars)。热轧钢筋按照外形特征可分为光圆钢筋(hot rolled plain steel bars)[如图 1.2.1(a)]和变形钢筋(deformed bars)[如图 1.2.1(b)、(c)、(d)]。

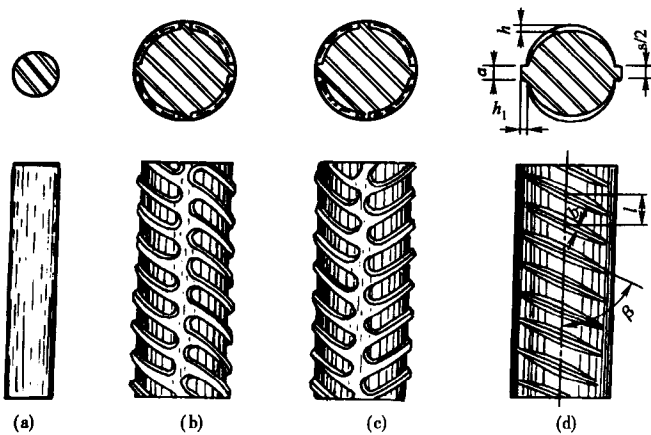


图 1.2.1 热轧钢筋的外形

变形钢筋表面有两条纵向凸缘(纵肋),两侧有等距离的斜向凸缘(横肋)。其中横肋斜向一个方向而呈螺旋形的称为螺旋钢筋[图 1.2.1(b)];横肋斜向不同方向而呈“人”字形的,称为人字形钢筋[图 1.2.1(c)]。纵肋与横肋不相交且横肋为月牙形状的,称为月牙纹钢筋[图 1.2.1(d)]。

钢丝根据加工方法和组成形式,分碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝四种。按照钢材的化学成分,分碳素钢(carbon steel)和普通低合金钢(low alloy-steel)两大类。

二、钢筋的力学性能

1. 钢筋的应力-应变关系

钢筋的力学性能有强度和变形(包括弹性变形和塑性变形)等。单向拉伸试验是确定钢筋力学性能的主要手段。通过试验可以看到,钢筋的拉伸应力-应变关系曲线可分为两大类,即有明显流幅的曲线(图 1.2.2)和无明显流幅的曲线(图 1.2.3)。

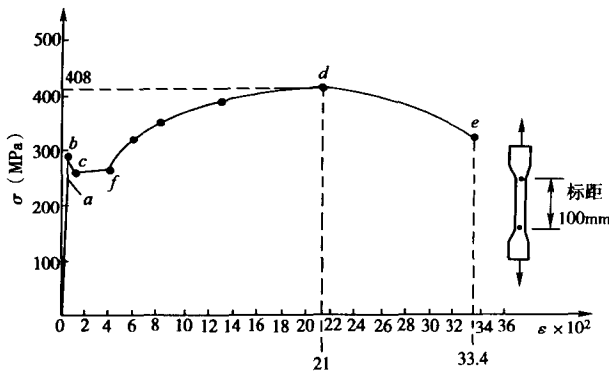


图 1.2.2 有明显流幅的钢筋应力-应变曲线

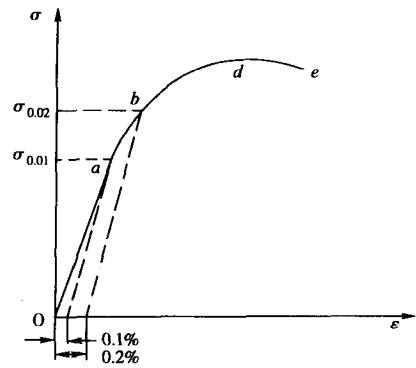


图 1.2.3 无明显流幅的钢筋应力-应变曲线

图 1.2.2 表示一条有明显流幅的钢筋应力-应变曲线。在达到比例极限 (proportional limit) a 点之前,材料处于弹性阶段,应力与应变的比值为常数,即为钢筋的弹性模量(modulus of elasticity) E_s 。此后应变比应力增加快,到达 b 点进入屈服阶段,即应力不增加,应变却继续增加很多,应力-应变曲线图形接近水平线,称为屈服台阶(或流幅)。对于有屈服台阶的钢筋来讲,有两个屈服点(yield point),即屈服上限(b 点)和屈服下限(c 点)。屈服上限受试验加载速度、表面光洁度等因素影响而波动;屈服下限则较稳定,故一般以屈服下限为依据,称为屈服强度(yield strength)。过了 f 点后,材料又恢复部分弹性进入强化阶段,应力-应变关系表现为上升的曲线,到达曲线最高点 d , d 点的应力称为极限强度。过了 d 点后,试件的薄弱处发生局部“颈缩”现象,应力开始下降,应变仍继续增加,到 e 点后发生断裂, e 点所对应的应变(用百分数表示)称为延伸率,用 δ_{10} 或 δ_5 表示(分别对应于量测标距为 $10d$ 和 $5d$,其中 d 为钢筋直径)。

有明显流幅的钢筋拉伸时的应力-应变曲线显示了钢筋的主要物理力学指标,即屈服强度、抗拉极限强度和延伸率。屈服强度是钢筋混凝土结构设计计算中钢筋强度取值的主要依据。屈服强度与抗拉极限强度的比值称为屈强比,它可以代表材料的强度储备,一般屈强比要求不大于 0.8。延伸率是衡量钢筋拉伸时的塑性指标。

拉伸试验中没有明显流幅的钢筋,其应力-应变曲线如图 1.2.3 所示。这类钢筋的比例极限大约相当于其极限强度的 65%。硬钢一般取其极限强度的 80%,即残余应变为 0.2% 时的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为协定的屈服点,又称条件屈服强度,取残余应变的 0.1% 处应力作为弹性极限强度。

钢筋混凝土结构中的纵向钢筋一般应采用 R235(Q235),HRB335,HRB400 及 KL400 钢筋。R235 为光圆钢筋强度等级代号,其牌号为 Q235,相当于原标准 I 级钢筋,公称直径 $d = 8 \sim 20\text{mm}$,以偶数 2mm 递增;HRB335、HRB400 为钢筋牌号,其中尾部数字为强度等级,HRB335 相当于原标准 II 级钢筋;HRB400 相当于原标准 III 级钢筋,该钢筋公称直径 $d = 6 \sim 50\text{mm}$,其中 $d = 22\text{mm}$ 以下以 2mm 递减, $d = 22\text{mm}$ 以上为 25、28、32、36、40、50mm;KL400 为余热处理钢筋的强度等级代号,钢筋级别相当于原标准的 III 级钢筋,公称直径 $d = 8 \sim 40\text{mm}$,尺寸进级情况与 HRB 相同。

2. 钢筋的强度指标

(1)屈服强度。钢材的受拉、受压及受剪屈服强度是钢材的主要强度指标。由于比例极限、弹性极限和屈服点比较接近,而在屈服点之前的应变又很小,所以在计算时一般近似地认

为钢材的弹性工作阶段是以屈服点为上限,当应力小于屈服强度时,材料的变形是弹性的,卸载后可以完全恢复,而当应力达到屈服点后,材料将产生很大且卸载后不能恢复的变形。因此,在结构设计时,一般取屈服强度为钢材允许达到的最大应力。

(2)极限强度。钢材的极限强度[包括抗拉强度(tensile strength)、抗压强度(compressive strength)和抗剪强度(shear resistance strength)]是材料能承受的最大应力。当材料达到或接近极限强度时,材料已经产生了非常大的塑性变形,此时的结构已经无法正常使用。尽管如此,极限强度仍是材料强度的一个主要指标,与屈服强度相比,极限强度越高,材料的安全储备就越大。通常以屈强比(屈服强度/抗拉极限强度)来衡量钢材强度的这种储备,显然,屈强比越小,钢材的强度储备就越大。

3. 钢筋的塑性指标

(1)伸长率(ductility rate)。钢材的伸长率等于试件被拉断后原标距长度的伸长值与原标距比值的百分率,是反映材料塑性变形能力的一个指标,以符号 δ 表示。伸长率 δ 与试件原标距长度 l_0 和试件的直径 d_0 的比值有关,当 $l_0/d_0 = 10$ 时,记作 δ_{10} ;当 $l_0/d_0 = 5$ 时,记作 δ_5 ,可以按照下式计算:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1.2.1)$$

式中: l_0 ——试件原标距长度;

l_1 ——试件拉断后标距间的长度。

(2)截面收缩率(percentage reduction of area)。截面收缩率是反映材料塑性变形能力的另一个指标,等于试件被拉断后颈缩区的断面面积缩小值与原断面面积比值的百分率,以符号 ψ 表示。截面收缩率 ψ 可以按照下式计算:

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

式中: A_0 ——试件受力前的断面面积;

A_1 ——拉断后颈缩区的断面面积。

(3)冷弯性能。冷弯性能由常温下的冷弯实验来检验。实验装置如图 1.2.4 所示,实验时按照规定直径的弯心角把试件弯曲,当试件表面出现裂纹或分层时即为破坏。冷弯性能以冷弯的角度来衡量,当冷弯角度达到 180° 时,钢材的冷弯性能合格。冷弯实验不仅检验了钢材是否具有构件制作过程中冷加工所要求的弯曲变形能力,还能够显示其内部的缺陷,鉴定钢材的质量,因此它是判别钢材塑性变形能力和质量的一个综合标准。

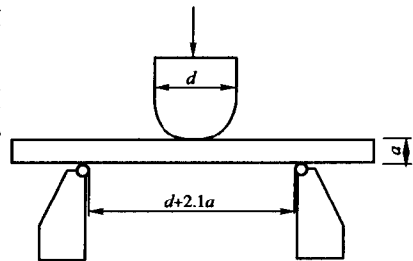


图 1.2.4 冷弯实验示意图

第三节 混凝土的力学性能

一、混凝土的强度

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。影响混凝土强度的因素是多方面的,除了受组成材料的性质、配合比、

养护环境、施工方法等因素影响外,在进行试验时还与试件的形状、大小、试验方法、加载方法、加载速度等因素有关。

(一)立方体抗压强度

混凝土立方体抗压强度是混凝土最基本的强度指标,它是用来确定混凝土强度等级、评定和比较混凝土强度和质的最主要指标,也是推算其他力学性能的基础。《公桥规》规定的立方体抗压强度是指边长为 150mm 的立方体试块,在 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 28d 后,用标准的试验方法测得的抗压强度(以 MPa 计, $1\text{MPa} = 1\text{N}/\text{mm}^2$),用符号 f_{cu} 表示。

混凝土强度等级是按照边长为 150mm 的立方体抗压强度标准值确定的。混凝土立方体抗压强度标准值是按照上述立方体抗压强度试验方法得到的具有 95% 保证率的抗压强度值,以符号 $f_{\text{cu,k}}$ 表示。《公桥规》按照混凝土立方体抗压强度标准值,把混凝土结构中混凝土的强度等级分为 14 级,以“C + 立方体抗压强度标准值”表示,即 C15、C20…C70、C80。

公路桥涵钢筋混凝土构件的混凝土强度等级可采用 C20 ~ C80,中间以 5MPa 进级。C50 以下为普通强度混凝土,C50 以上为高强混凝土。当用 HRB335、HRB400 级钢筋配筋时,混凝土强度等级不应低于 C25。

混凝土的抗压强度与试验方法有着密切的关系,如果在试件的表面和压力机的压盘之间涂一层油脂,则抗压强度要比未加油脂时低很多,破坏形状也不相同,如图 1.3.1。这是由于未加油脂的试件表面与压力机压盘之间有向内的摩阻力存在,摩阻力好像箍圈一样阻止混凝土的横向变形,因而提高了试件的抗压强度。破坏时试件侧面碎裂成锥形,这种破坏是由沿斜面作用的剪力所引起的。而表面加油脂的试件,摩阻力大大减小,试件强度因而下降,同时破坏的性质也改变了,此时,试件由于形成了与压力方向平行的裂缝而破坏。《公桥规》所规定的标准试验方法是不加油脂等润滑剂的。

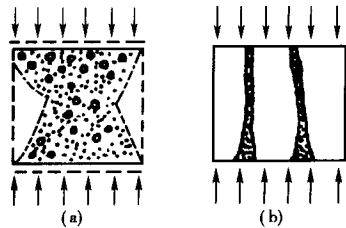


图 1.3.1 混凝土立方体的破坏情况
(a)不涂润滑剂;(b)涂润滑剂

混凝土强度是设计钢筋混凝土结构时选择混凝土材料的主要指标,应该根据结构物的用途、尺寸、使用条件以及经济和技术等因素综合考虑。

混凝土抗压试验的加载速度对立方体抗压强度也有影响,加载速度越快,测得的强度越高。通常规定的加载速度:混凝土的强度等级低于 C30 时,取每秒钟 $0.3 \sim 0.5\text{N}/\text{mm}^2$;混凝土的强度等级等于或高于 C30 时,取每秒钟 $0.5 \sim 0.8\text{N}/\text{mm}^2$ 。

试验时随着混凝土龄期的增长,混凝土的极限抗压强度逐渐增大,开始时强度增长速度较快,然后逐渐减缓,这个强度增长的过程往往要延续几年,在潮湿环境中延续的时间更长。混凝土任何龄期的立方体强度,可以按下列经验公式近似推算:

$$f_{\text{cu},n} = f_{\text{cu},k} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (1.3.1)$$

式中: $f_{\text{cu},n}$ —— n 天龄期混凝土立方体强度, n 必须大于 3;

$f_{\text{cu},k}$ ——28 天龄期混凝土立方体强度标准值;

$\lg n, \lg 28$ ——混凝土龄期 n 天和 28 天的常用对数。

试件尺寸对混凝土 $f_{\text{cu},k}$ 也有影响,实验结果证明,立方体尺寸愈小则试验测出的抗压强度愈高,这个现象称为尺寸效应。

(二) 混凝土的轴心抗压强度

混凝土的抗压强度不仅与试件的尺寸有关,也与它的形状有关。在实际工程结构中,受压构件不是立方体而是棱柱体,所以,采用棱柱体试件(高度大于边长的试件称为棱柱体)比采用立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。用棱柱体试件测得的抗压强度称为棱柱体抗压强度,或者称为轴心抗压强度。

棱柱体试件是在与立方体试件相同的条件下制作的,试件表面不涂润滑剂,实测所得的棱柱体抗压强度比立方体抗压强度低。混凝土轴心抗压强度随着混凝土强度等级提高而增加,总的趋势是混凝土轴心抗压强度与混凝土强度等级成正比。

(三) 混凝土的轴心抗拉强度

混凝土试件在轴心拉伸下的极限抗拉强度,在结构设计中是确定混凝土抗裂度的重要指标,有时还可以通过混凝土轴心抗拉强度间接地作为衡量混凝土其他力学性能的指标,例如混凝土与钢筋之间的粘结强度等。

混凝土的轴心抗拉强度比抗压强度低得多,它与同龄期混凝土抗压强度的比值大约在 $1/8 \sim 1/18$ 之间。混凝土强度等级越高,混凝土的轴心抗拉强度与抗压强度之比越小,亦即混凝土的强度等级提高后,其相应的抗拉强度却提高不多。

轴心受拉试件如图 1.3.2(a)所示,试件为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的柱体,两端预埋钢筋。试验机夹紧两端伸出的钢筋,使试件受拉,破坏时试件中部产生横向裂缝,其平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度。

由于轴心受拉试件试验时对中比较困难,故国内外多采用立方体或圆柱体的劈裂试验[图 1.3.2(b)]测定混凝土的抗拉强度。这种试件与混凝土立方体试件相同,不需埋设钢筋,可用压力试验机进行。劈裂试验是通过 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方钢垫条,且在试件与方钢之间夹垫一层马粪纸,施加压力 F ,试件中间截面除加力点附近很小的范围外,有均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件劈裂成两半。我国交通部颁布的标准《公路工程水泥混凝土试验规程》规定:采用 150mm 立方体作为标准试件进行混凝土劈裂抗拉强度测定,按照规定的试验方法操作,则混凝土劈裂抗拉强度 f_t^p 可按下列公式计算:

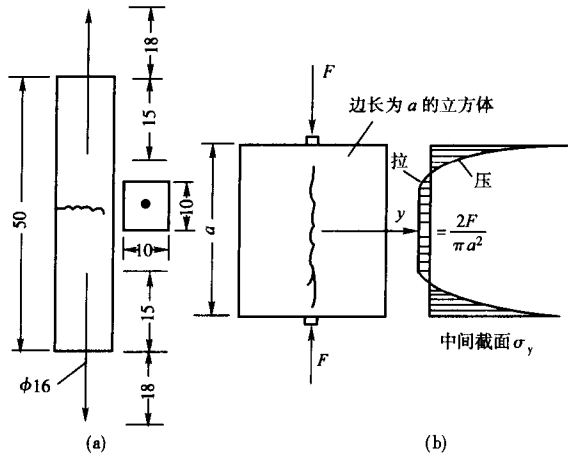


图 1.3.2

(a)轴心受拉试件;(b)劈裂试件

采用 150mm 立方体作为标准试件进行混凝土劈裂抗拉强度测定,按照规定的试验方法操作,则混凝土劈裂抗拉强度 f_t^p 可按下列公式计算:

$$f_t^p = \frac{2F}{\pi a^2} \quad (1.3.2)$$

二、混凝土的变形性能

由于混凝土材料并不是一种理想的匀质材料,因而受力后的实际变形情况是十分复杂的。混凝土试件的变形与加载方式、荷载作用的持续时间、温度、湿度、试件的形状和尺寸等因素有关。

(一) 混凝土在单调、短期荷载作用下的变形性能

混凝土的应力-应变关系是混凝土力学性能的一个重要方面,它是进行钢筋混凝土构件的

截面应力分析、建立强度和变形计算理论所必不可少的依据。特别是近代在采用计算机对钢筋混凝土结构进行有限元非线性分析时，混凝土的应力-应变关系已成了数学物理模型研究的重要依据。

混凝土受压的应力-应变曲线，通常用 $h/b = 3 \sim 4$ 的棱柱体试件来测定。图 1.3.3 为典型的混凝土受压的应力-应变曲线。它的应力-应变曲线与钢材是完全不相同的。从总体来看，可以分为上升段和下降段两部分，并且包含三个重要特征值：①最大应力值 σ_{max} ；②与 σ_{max} 相对应的应变值 ϵ_0 ；③极限应变值 ϵ_{max} 。

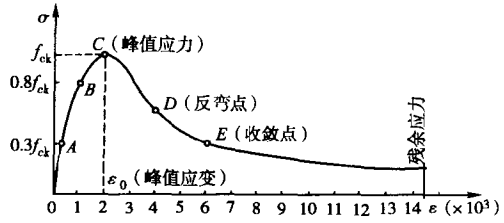


图 1.3.3 混凝土受压时应力-应变曲线形状

在曲线的初始部分，当应力 $\sigma \leq 0.3f_{ck}$ 时， $\sigma - \epsilon$ 关系接近一根直线，混凝土处于弹性工作阶段。当应力 $\sigma > 0.3f_{ck}$ 后，随应力的增大，应力-应变曲线越来越偏离直线。任一点的应变 ϵ 可分为弹性应变 ϵ_e 和塑性应变 ϵ_p 两部分。当应力接近于 $0.5f_{ck}$ 后，曲线明显地呈弯曲状上升，即应变增量大于应力增量，呈现出材料的部分塑性性质。当应力达到 $0.8f_{ck}$ 后，塑性变形显著增大，应力-应变曲线的斜率急剧减小。当应力达到最大应力 σ_{max} (即棱柱体抗压强度 f_{ck}) 时， $\sigma - \epsilon$ 曲线的斜率已接近水平，相应的应变 ϵ_0 随混凝土强度的不同在 $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{-3}$ 间波动，通常取平均值 $\epsilon_0 = 2 \times 10^{-3}$ 。应力从零到 σ_{max} 这一段曲线称为“上升段”曲线。

如采用等应变加载，就可以测得图 1.3.3 所示的“下降段”曲线。到达最大应力 σ_{max} 后 (C 点)，随应变的增长，应力逐渐下降。下降段末端 (D 点) 的相应应变即为混凝土的极限应变值 ϵ_{max} 。极限应变 ϵ_{max} 应包括弹性应变 (elastic strain) 和塑性应变 (plastic strain) 两个部分，塑性应变越大，表示混凝土材料的变形能力越大，亦即材料的延性越好。所谓延性也可以理解为耐受变形的能力。

(二) 混凝土的弹性模量、变形模量

在实际工程中，为了计算结构的变形，必须要求一个材料常数——弹性模量。严格地说，混凝土棱柱体初次受荷后，其应变的增长很快，应力-应变之间并不存在线性弹性关系，所以，混凝土的变形模量不是弹性模量，而应该是包括塑性变形在内的弹塑性模量。

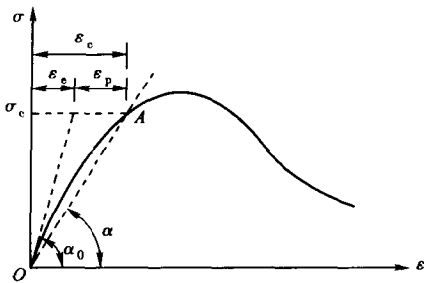


图 1.3.4 混凝土变形模量示意图

从图 1.3.4 中所表示出的 $\sigma - \epsilon$ 曲线中可以看出，当混凝土的应力达到 σ_c 时，其相应的应变为 ϵ_c ，混凝土的总应变由弹性应变 ϵ_e 和塑性应变 ϵ_p 两部分组成，即

$$\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (1.3.3)$$

从图 1.3.4 所示的应力-应变曲线可以看出，混凝土的变形模量是指应力增量 $d\sigma$ 与应变增量 $d\epsilon$ 的比值。用几何关系表示时，即为在应力-应变曲线上某一点的切线与 ϵ 轴的交角 α 的正切值，即

$$E_c = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \tan\alpha \quad (1.3.4)$$

显然，混凝土的变形模量是个变数，应力愈大，变形模量愈小，这样使用上是很不方便的。工程上为了实用，同时考虑到混凝土应力在 $(0.4 \sim 0.6)f_{ck}$ 以下时，变形模量变化不大，因此在钢筋混凝土结构中，通常近似地取压应力 $\sigma_c = 0.5f_{ck}$ 时的变形模量作为混凝土的弹性模量。

混凝土的弹性模量与强度等级有关，根据大量的试验结果，拟合出由立方体抗压强度 $f_{cu,k}$